

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА
РУТ (МИИТ)

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Пудовиков Олег Евгеньевич

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
1.1 Основные тенденции в работах по созданию и модернизации маневровых тепловозов	11
1.2. Анализ условий и характеристик работы маневровых тепловозов	19
1.3 Анализ существующих систем автоматического регулирования скорости движения	22
1.4 Особенности автоматизации процессов управления электропередачей маневрового локомотива при работе на сортировочной станции	35
1.5 Выводы по разделу 1	44
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА	45
2.1 Функциональная схема системы автоматического управления скоростью	45
2.2 Модель дизеля	47
2.3 Модель синхронного возбудителя	49
2.4 Модель системы «тяговый генератор – тяговый двигатель»	51
2.5 Модель реализации силы тяги	57
2.6 Модель регулятора частоты вращения	64
2.7 Модель тракта измерения скорости	66
2.8 Выводы по разделу 2	70
3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ТЕПЛОВОЗА	71
3.1 Выбор критериев качества регулирования	71
3.2 Разработка алгоритмов работы регуляторов напряжения и мощности	74

3.3 Пробные расчёты переходных процессов в системе автоматического управления скоростью	78
3.4 Выбор параметров регулятора скорости методом однокритериальной оптимизации.....	83
3.5 Результаты моделирования переходных процессов с использованием найденных в результате оптимизации параметрами	91
3.6 Выводы по разделу 3.....	94
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАДВИГА И РОСПУСКА СОСТАВА С СИНТЕЗИРОВАННЫМ ПИ-РЕГУЛЯТОРОМ.....	96
4.1 Система управления тепловоза ТЭМ7А	96
4.2 Средства измерений	98
4.3 Программа и методика проведения испытаний	100
4.4 Результаты испытаний.....	102
4.5 Выводы по разделу 4.....	111
5 РАСЧЕТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛОКОМОТИВОМ С ФУНКЦИЕЙ «БЕЗ МАШИНИСТА» ДЛЯ МАНЕВРОВОЙ РАБОТЫ.....	112
5.1 Исходные данные	112
5.2 Расчёт экономии годовых текущих расходов	113
5.3. Оценка величины инвестиционных затрат.....	116
5.4 Расчет чистого дисконтированного дохода и срока окупаемости затрат при внедрение системы управления локомотивом с функцией «без машиниста»..	116
5.5 Выводы по разделу 5.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ А	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ В	148

ПРИЛОЖЕНИЕ Г	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ З	154

ВВЕДЕНИЕ

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 движения, 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, при этом качество формируемых переходных процессов, 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 скоростью 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. Феоктистов и многие другие.

Однако основная доля работ направлена на автоматизацию электроподвижного состава или магистральных тепловозов, в отношении автоматизации сортировочной маневровой работы маневровых локомотивов количество работ существенно меньше, а задача по поддержанию заданной скорости движения маневрового локомотива работающего на сортировочной станции в настоящее время не решена.

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 разработанной системой автоматического управления скоростью при совместной работе с системой 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 на базе программного пакета *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-регуляторы 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.

Публикации. Результаты опубликованы в 21 печатной работе, включая 3 статьи в научных журналах, входящих в перечень журналов ВАК России, одну статью в журнале, индексируемом в списке *Scopus*, 3 работы в трудах научно-практических конференций. Получены 7 патентов на изобретения (полезные модели), 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Основные тенденции в работах по созданию и модернизации маневровых тепловозов

Выполнение маневровой работы является одной из основных задач эксплуатации локомотивного парка, при этом порядка 90 – 95 % этой работы осуществляется тепловозами. «Основными затратами на работу тепловозов являются затраты на дизельное топливо, при этом суммарные расходы на содержание тепловозов могут достигать 25 % от общих эксплуатационных расходов» [1]. Эти факторы обуславливают повышенный интерес к эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую в дизель-генераторной установке маневровых тепловозов.

В последние десятилетия появились результаты исследований и разработок, направленных на создание новых и модернизацию уже эксплуатируемых маневровых тепловозов, благодаря чему накоплен определенный опыт использования локомотивов с различными энергетическими установками. Широко применяются гибридные локомотивы. К таким локомотивам относят локомотивы, содержащие энергетическую установку с не менее чем двумя различными источниками энергии [2].

В качестве примера можно привести «маневровые тепловозы, разработанные в Канаде фирмой *Rail Power Technologies Corp*, в которых силовую дизель-генераторную установку мощностью 1500 кВт заменили на установку мощностью 224 кВт, нагруженную только на тяговую аккумуляторную батарею» [3]. Аналогичный принцип использован в американских тепловозах серии *Green Kid* и *Green Coat* [4].

Концерн *Alstom* разработал серии тепловозов *H3*, в которых дизель-генератор также использовался для подзарядки тяговой аккумуляторной батареи, но при пиковых нагрузках оба источника энергии работали одновременно. Суммарные мощности тепловозов по источникам энергии составили 700 и 1000 кВт;

результаты испытаний показали, что предложенная концепция обеспечивает меньший расход дизельного топлива [5, 6].

Подобные разработки существуют и в практике отечественного локомотивостроения. На «НПП «Полет» разработан маневровый тепловоз с электрической передачей переменного-постоянного тока и гибридной силовой установкой, состоящей из тяговых аккумуляторных батарей и дизель-генераторной установки» [6].

Также существуют разработки по применению в силовых энергетических установках накопительных аккумуляторных батарей [7].

Примерами таких тепловозов могут быть маневровые тепловозы ТЭМ31Н мощностью 440 кВт и ТЭМ9Н мощностью 882 кВт. На тепловозе ТЭМ9Н, совместно с дизель-генератором мощностью 630 кВт, силовая энергетическая установка содержит накопитель энергии на основе литий-железо-фосфатных аккумуляторов и суперконденсаторов мощностью 252 кВт. Предполагается, что использование накопителя энергии будет осуществлять поддержание работы тепловоза во время простоя длительностью не менее 4 часов и позволят осуществлять холодный пуск дизеля [8].

Другим способом увеличения эффективности работы силовой энергетической установки стало применение двухдизельных тепловозов, где один дизель-генератор заменяется двумя с аналогичной суммарной мощностью. «Эффект достигается в режиме частичных нагрузок дизеля, когда можно перейти на работу с одним дизелем, что происходит в значительной части общего времени работы тепловоза» [9]. Также существуют разработки с применением третьего дизеля, предназначенного для вспомогательных нужд и обогрева основных дизелей [10].

Примерами таких тепловозов могут служить тепловозы семейства *N-Viro Motive* производства *National Railway Equipment, Co* производства *Brookville Equipment* (мощность одного дизеля 500 кВт) [11], и *Terra Nova* производства *Grampet Group* (мощность одного дизеля 630 кВт) [12]. Результаты их применения показывают, что можно достичь экономии топлива до

30 % по сравнению с однодизельными компоновками локомотивов. Дополнительным преимуществом многодвигательных тепловозов является уменьшение выбросов отработанных газов и других вредных веществ.

Результаты испытаний гибридного локомотива BB63413 (Франция) показали, что максимальная экономия топлива 86 % достигается в режиме холостого хода, в то время как при маневровой работе экономия составляет порядка 40 % [13].

Результаты испытаний гибридного локомотива *HD300* (Япония) с дизелем мощностью 242 кВт и тяговой аккумуляторной батареей показали экономию топлива при маневровой работе также до 40 %. Отмечено, что на тепловозе *HD300* в качестве тяговых двигателей применены синхронные двигатели с постоянными магнитами, что вносит свой вклад в полученную экономию [13].

В России разработан маневровый тепловоз ТЭМ33, содержащий силовую энергетическую установку из двух дизелей (каждый мощностью 571 кВт) [14]. По отношению к обслуживаемым в депо Брянск-II маневровым тепловозам, ТЭМ33 обеспечивает уменьшение расхода топлива на 10 %. Еще одно преимущество ТЭМ33 – уменьшение выбросов вредных веществ до 20 %.

Примером трехдизельного маневрового локомотива является тепловоз на базе ЧМЭЗ. Два основных дизеля мощностью 478 кВт дополнены вспомогательным дизелем, обеспечивающим работу слаботочного оборудования, освещения, обогрева, прогрева дизелей и др. Работу тепловоза при маневровой работе в зоне частичных нагрузок (до 3 позиции контроллера включительно) обеспечивает один основной дизель, второй включается в работу с 4 позиции.

Отдельно стоит отметить локомотивы которые используют в качестве силовой установки только накопители энергии. В 2001 году АО «ВНИКТИ» был разработан проект и изготовлено 2 аккумуляторных локомотива (ЛАМ) на базе экипажной части тепловоза ЧМЭЗ. Локомотив прошел эксплуатационные испытания в локомотивном депо Рыбное, подтвердив свою работоспособность и экономичность. В 2010 году АО «ВНИКТИ» был разработан и построен модуль тяговый аккумуляторный (МТА) на двухосной экипажной части. Он предназначен

для выполнения маневровых работ на станционных и подъездных путях с составами до 500 т на уклонах до 7 ‰. В качестве силовой установки в данных проектах применялась тяговая щелочная никель-кадмиевая аккумуляторная батарея, выпускаемая отечественной промышленностью. Несомненным преимуществом данного локомотива является отсутствие выбросов при работе в помещениях [15 – 17]. Также стоит отметить инновационный отечественный электровоз маневровый контактно-аккумуляторный (ЭМКА2), который имеет возможность работы как от контактной сети, так и накопителя энергии (литий-ионной аккумуляторной батареи). Локомотивы данной серии будут использоваться для работы на крупных вокзалах городов мегаполисов [18]. Поскольку применение аккумуляторной тяги способствует снижению выбросов вредных веществ и парниковых газов, данный вектор развития подвижного состава поддерживают и мировые производители, в частности стоит отметить: компанию *Progress Rail* и созданную ей линейку локомотивов *Electro-Motive Diesel Joule*, локомотивы которой имеют 5 модификаций с мощностным рядом от 1,5 до 5,7 МВт с емкостью батарей от 4 до 14,5 МВт·ч. [19]. Американскую компанию по производству локомотивов *Wabtec* и ее аккумуляторный локомотив *FLXdrive*, представленный в 2020 году (заявленная мощность 3,2 МВт) [20, 21]; китайскую государственную компанию (*CRRC*) и ее линейку аккумуляторных локомотивов для различных мировых железнодорожных перевозчиков [22].

Отмечено, что одной из мировых тенденций локомотивостроения последних десятилетий является применение альтернативного топлива на подвижном составе (природный газ и водород). В Российской Федерации применение природного газа и водорода в качестве топлива поддерживается на государственном уровне, поскольку данные виды топлива достаточно перспективны к применению и уже имеется ряд наработок в области применения природного газа [23, 24]. Кроме того, начали реализовываться проекты в области применения водорода [25, 26]. Важной составляющей, способствующей повышению экономической эффективности подвижного состава, являются средства автоматизации управления, применение которых позволяет реализовать рациональные энергоэффективные режимы работы

оборудования локомотивов. В настоящее время известны результаты разработок систем автоматического управления для подвижного состава, работающем на альтернативных видах топлива (природный газ). В работе [27] предложена система топливоподачи газодизельного двигателя на смесевом топливе (рисунок 1.1).

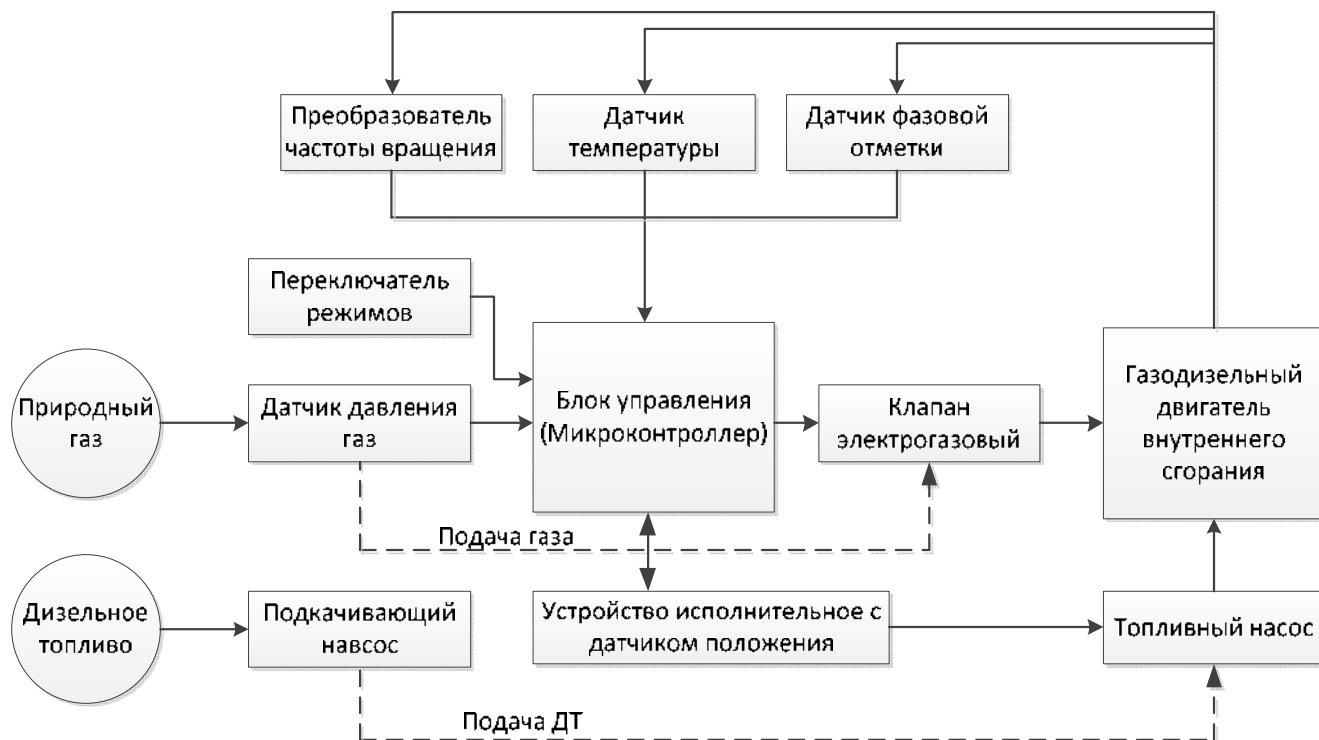


Рисунок 1.1 – Система топливоподачи дизеля на смесевом топливе

Запуск двигателя происходит на дизельном топливе с выполнением стандартных для дизелей процедур. Плавное регулирование подачи дизельного топлива осуществляется исполнительным устройством по алгоритмам широтно-импульсной модуляции. После запуска и завершения прогрева газодизельного двигателя разрешен переход в режим работы на смесевом топливе, в котором система регулирования двигателя автоматически на основании технологических карт и обратных связей по давлению газа температуре и частоте вращения коленчатого вала определит оптимальную по критерию энергоэффективности подачу природного газа и дизельного топлива. При появлении рассогласования между сигналами задания и обратной связи по частоте вращения в первую очередь происходит изменение подачи дизельного топлива. Рассмотренная система решает

лишь задачу автоматического поддержания требуемой частоты вращения вала дизеля, регулирование скорости движения локомотива не предусмотрено.

В качестве другого примера можно рассмотреть автоматическую систему регулирования силовой энергетической установки газотурбинного локомотива, функциональная схема которой показана на рисунке 1.2.

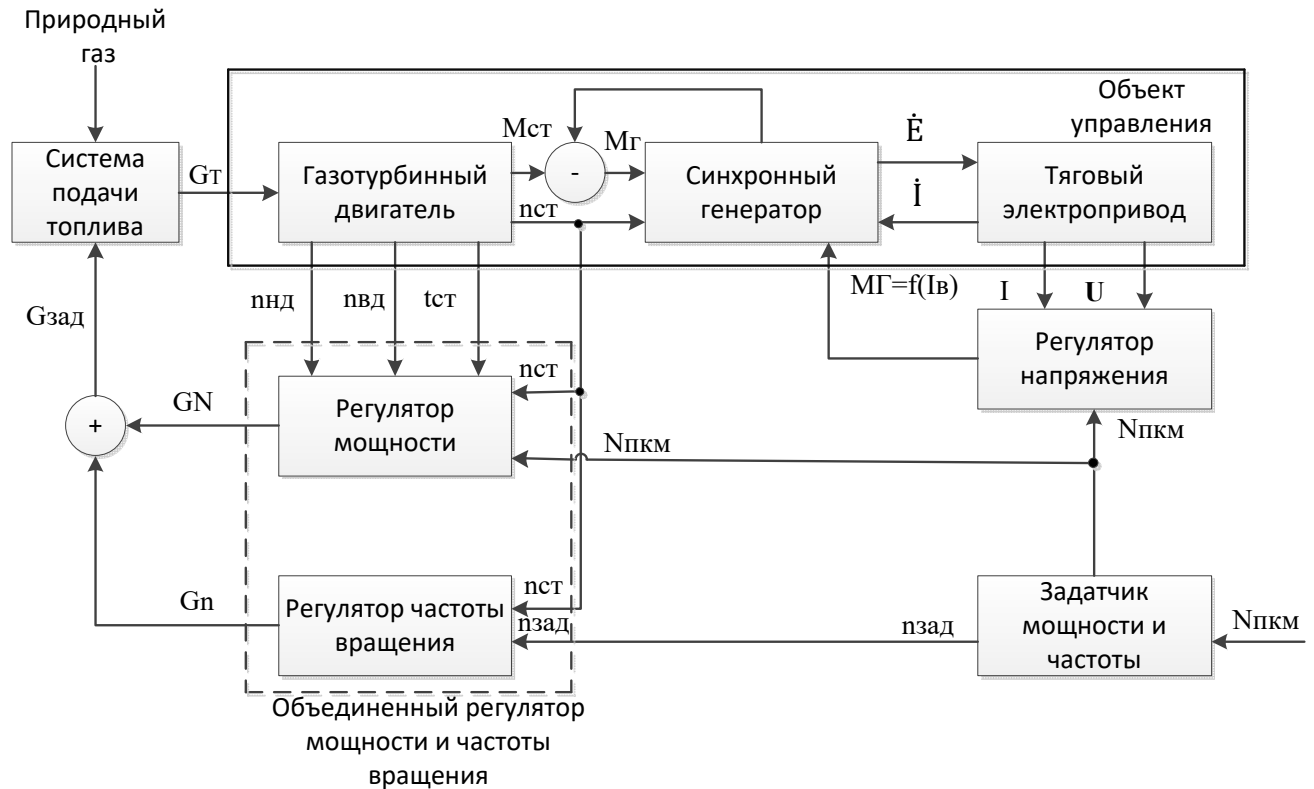


Рисунок 1.2 – Функциональная схема силовой энергетической установки газотурбинного локомотива

Система является одноконтурной и содержит объединенный регулятор мощности и частоты вращения газотурбинного двигателя. Отдельно синтезирован контур управления напряжением тягового генератора. Набор позиций контроллера машиниста, являющегося источником задания на частоту и мощность, осуществляется в ручном режиме, таким образом, автоматическое поддержание скорости движения локомотива здесь также не предусмотрено [28 – 31].

Применение водородного топлива на подвижном составе в настоящее время активно развивается. Ряд стран уже представили прототипы гибридных локомотивов, работающих на водородном топливе. Например, компания *Alstom* была одной из первых, представившей движущийся состав под названием поезд *Coradia iLint*, который работает на водороде [32, 33]. В сентябре 2021 года

компания *Pesa* также представила прототип маневрового локомотива, оснащенного энергоблоком на водородных топливных элементах. Этот четырехосный локомотив, разрабатываемый на основе маневрового тепловоза *SM42*, предназначен для тяги поездов до 3200 тонн [34]. Компания *Siemens* начинает ходовые испытания поездов на водородном топливе *Mireo Plus H*. Эти поезда представляют собой новое поколение подвижного состава с нулевой степенью выбросов вредных веществ [35].

В России активно ведутся работы над созданием локомотивов работающих на водородном топливе. На первом этапе речь идет о создании водородного маневрового локомотива и пригородного рельсового автобуса на водородных топливных элементах. Структурная схема взаимодействия блоков управления отечественного четырехосного маневрового гибридного локомотива работающего на сжатом водороде приведена на рисунке 1.3. Данный локомотив будет иметь следующие параметры: мощность электрохимического генератора (ЭХГ) 360 кВт, энергетическая емкость накопителя 495 кВт*ч, время работы на одной заправке 24 ч., часовая мощность 760 кВт, полная мощность 1560 кВт (15 минут). На данном локомотиве будет иметься возможность управлять локомотивом в ручном режиме от контроллера машиниста (задавая мощность), а также на перспективу предусмотрены каналы связи для работы в автоматическом режиме [36 – 40].

Таким образом, с точки зрения компоновки маневровых тепловозов основными тенденциями по увеличению эффективности работы силовой энергетической установки является или применение гибридной установки (традиционный дизель-генератор меньшей мощности и накопитель энергии на конденсаторах или аккумуляторной батарее), или использование многодизельных установок.

Однако одновременно с достаточно продолжительной работой при частичных нагрузках маневровым тепловозам свойственна большая продолжительность переходных процессов, связанных с частым переключением

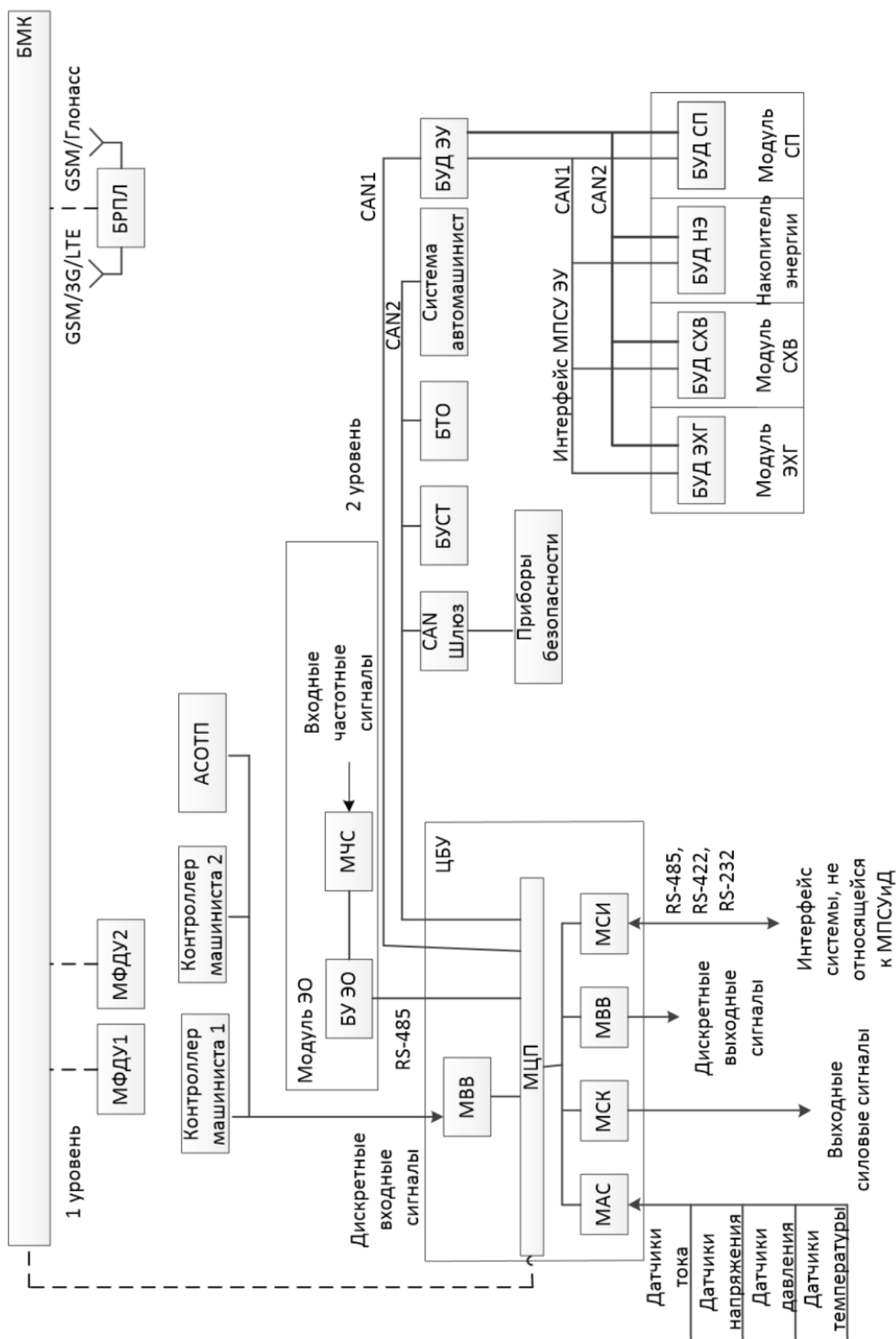


Рисунок 1.3 – Структурная схема взаимодействия блоков управления водородного маневрового локомотива

контроллера машиниста из-за малой протяженности участка работы, необходимости остановок и реверса и т.д. Работа в переходных режимах вызывает дополнительные потери и уменьшает эффективность преобразования энергии независимо от компоновки тепловоза; очевидно, что для устранения или уменьшения этого негативного эффекта необходимо применение более сложных алгоритмов управления электропередачей локомотива [41, 42].

1.2 Анализ условий и характеристик работы маневровых тепловозов

Специфика работы маневровых тепловозов предполагает случайный характер распределения режимов работы в зависимости от выполняемых ими операций, протяженности участков работы, веса состава и др. Во всех режимах работы к тепловозам предъявляются требования высокой надежности, безопасности и эксплуатационной экономичности [43 – 46]. Для достижения этих требований при движении локомотива основной проблемой является поддержание с минимальной погрешностью рациональной или заданной скорости, а также обеспечение плавного протекания переходных процессов в энергетической цепи с учетом всех ограничений, действующих в электропередаче локомотива и по условиям сцепления. Обеспечение требуемой плавности переходных процессов наиболее актуально именно для маневровых тепловозов (поскольку это будет способствовать высокой экономичности преобразования энергии в тепловозе, а также увеличению пропускной способности сопряженных железнодорожных путей и т.д.

Анализ эксплуатации маневровых тепловозов позволяет обобщить и систематизировать основные операции, выполняемые этими локомотивами, следующим образом [47, 48]:

- 1 маневровая работа на станции;
- 2 маневры на станциях, оборудованных горками (заезд, вытягивание, надвиг, роспуск, остановка, холостой ход и др.);

- 3 маневры на станциях, не оборудованных горками (заезд, вытягивание, толчок, оттягивание, холостой ход и др.);
- 4 технологические операции (подача/уборка составов к месту стоянки/мойки/погрузки/выгрузки и др.);
- 5 одиночное следование;
- 6 вывозная работа;
- 7 работа на железнодорожных путях промышленных предприятий, технологических и складских комплексов и др.

Среднестатистическое распределение времени работы маневровых тепловозов ЧМЭЗ по позициям контроллера машиниста показано на рисунке 1.4.

Анализ данных, приведенных на рисунке 1.4, подтверждает то, что 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 экономичность работы силовой установки и всей электропередачи маневрового тепловоза в целом определяется, в основном, стилем работы машиниста – частотой переключения позиций контроллера, интенсивностью торможения, разной скоростью толчков. Особую значимость эта проблема приобретает в условиях горочной и сортировочной работы, когда количество реверсов может достигать до 45 в час [49, 50], а также совершаются наиболее требовательные к силовой энергетической установке толчки. Для уменьшения непроизводительных потерь дизеля желательно уменьшать число переключений, для чего можно пропускать определенные позиции контроллера, но при этом возможны броски тока в тяговой цепи и момента в механической части тягового привода, что может привести к процессам боксования и юза [51, 52]. Таким образом, на эффективность силовой установки и качество движения локомотива и всего состава решающую роль оказывают опыт, квалификация и быстрота реакции машиниста.

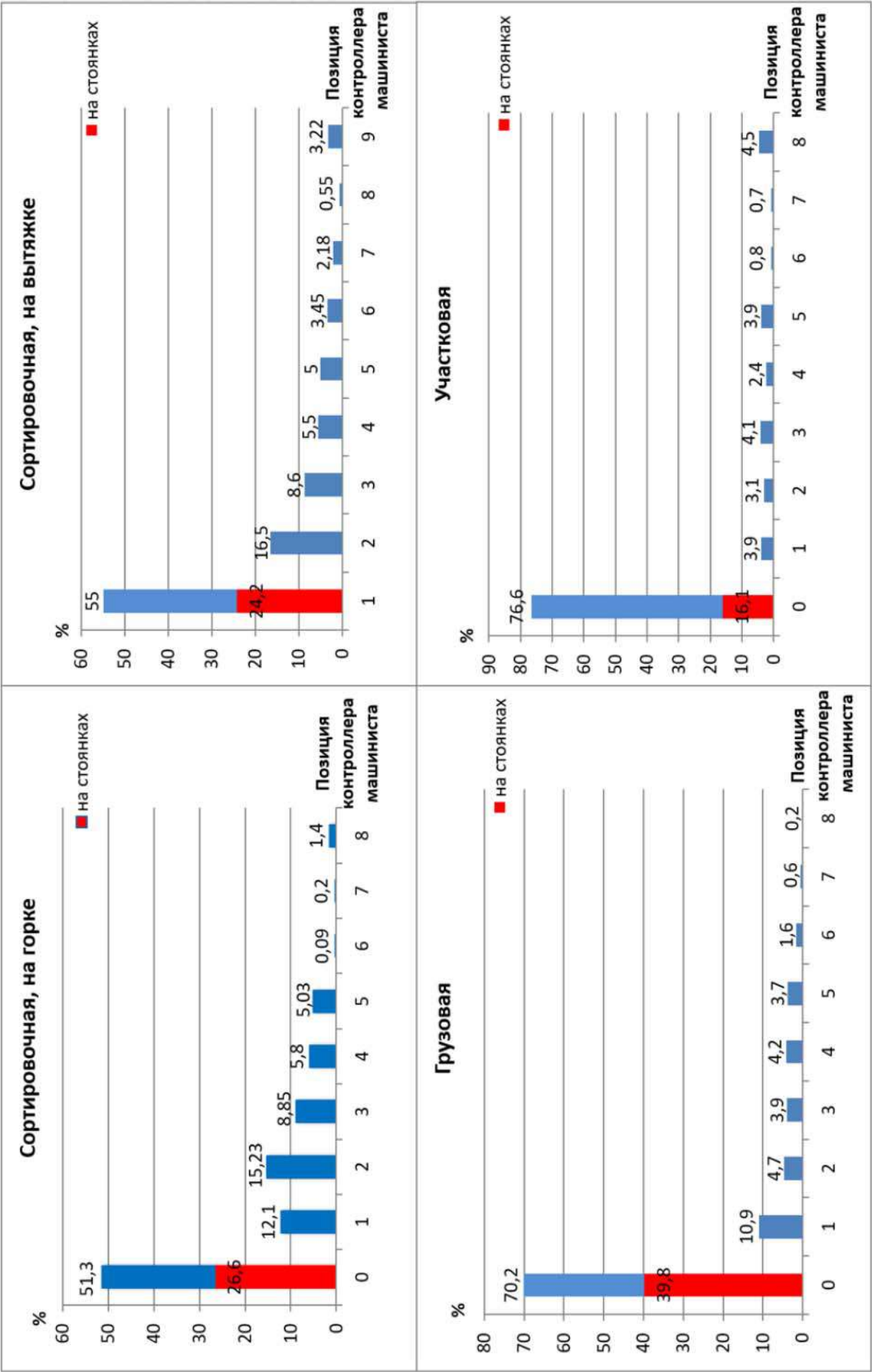


Рисунок 1.4 – Среднестатистическое распределение времени работы маневровых тепловозов ЧМЭЗ по позициям контроллера машиниста

Для уменьшения зависимости эффективности работы тепловоза от личных качеств машиниста целесообразно оснащать маневровые тепловозы автоматической системой управления скоростью, обеспечивающей также формирование желаемых характера изменения переходных процессов при разгоне или торможения с учетом специфики всех выполняемых операций, включая горючую работу, защиту механического и электрического оборудования от динамических нагрузок. Для этого необходимо создание системы одновременного регулирования параметров и координат тягового электропривода и дизель-генераторной установки, входным воздействием в которой по-прежнему будет текущая позиция контроллера машиниста, задаваемая в автоматическом режиме [53, 54].

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

1.3 Анализ существующих систем автоматического регулирования скорости движения

Поставленная в предыдущем подразделе задача по сути является задачей автоматизации управления локомотива. Развитие автоматизации происходит одновременно с эволюцией силовой и слаботочной электроники и схемотехники, в последние десятилетия происходит активный рост в вариантах разработки систем автоматического регулирования благодаря массовому появлению на рынке электроники и автоматики цифровых и микропроцессорных систем, позволяющих реализовывать быстродействующие алгоритмы управления с гибкой логикой независимо от имеющейся информационно-измерительной системы. Наибольший вклад в развитие и внедрение систем автоматики и автоматического регулирования на отечественном подвижном составе внесли ученые 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. Феоктистов и многие другие [55 – 66].

Наиболее важные функции, возлагаемые на системы автоматического регулирования скорости, кроме поддержания заданного значения скорости, можно классифицировать в зависимости от режимов работы:

в режиме тяги: разгон с ограничением тока тяговых двигателей до достижения заданной скорости;

в режиме торможения: начальный этап торможения с реализацией тормозного усилия в функции скорости движения поезда и остановочное торможение с реализацией тормозного усилия при действии ограничений по току и напряжению тяговых двигателей.

На рисунке 1.5 приведен пример траектории движения поезда, реализующей заданные режимы работы. Очевидно, что для удовлетворительной работы таких систем необходимо обеспечение в режиме реального времени расчета многомассовых моделей в динамических режимах работы; за последние десятилетия, с развитием электронной компонентной базы и появлением быстродействующих сигнальных микропроцессорных устройств, созданы и апробированы различные варианты построения систем регулирования. Для уменьшения потерь мощности в электропередаче, точного останова, оптимальной траектории движения были использованы ПИД-регуляторы, генетические алгоритмы, нечеткая логика системы с экспертной оценкой, искусственные нейронные сети.

Для получения наилучших результатов системам автоматического регулирования (управления) требуются наборы данные двух типов: исходные данные об объекте управления и условиях, в которых будет функционировать система автоматического управления (включающие в себя параметры пути, силы тяги и тормозные силы, т. е. те данные, которые имеют прямое отношение к модели

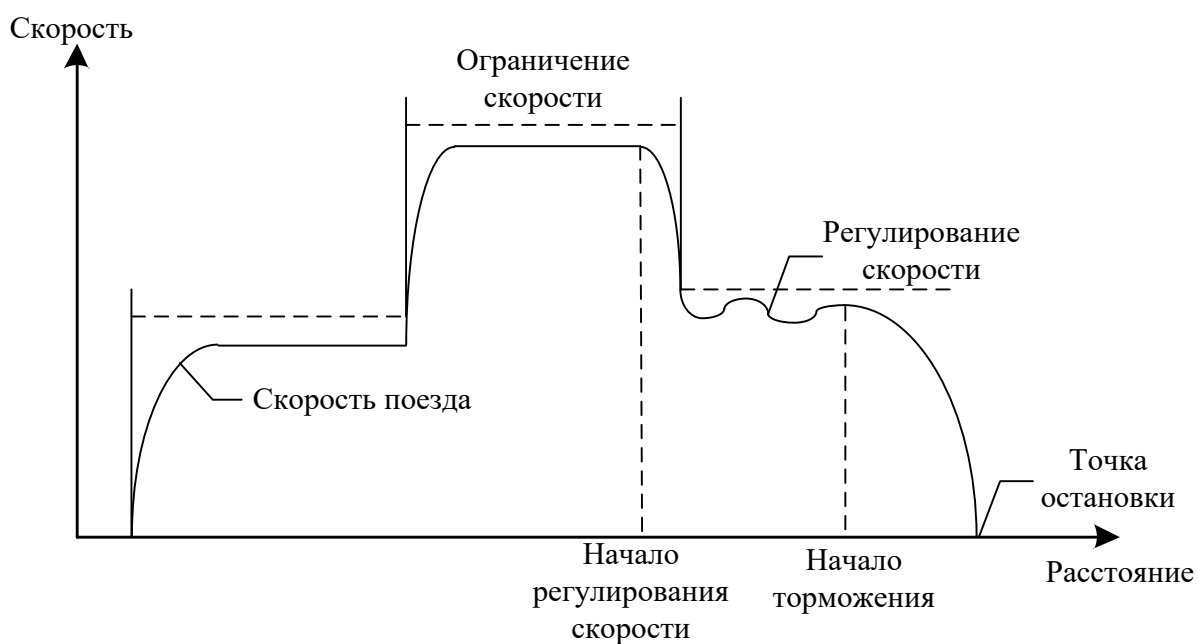


Рисунок 1.5 – Пример траектории движения поезда

поезда или локомотива) и текущая информация о функционировании системы, т. е. информация обратной связи, а именно текущая координата поезда, его скорость движения и прочее.

Синтез систем автоматического управления скоростью локомотива (поезда) осуществляется методами теории автоматического управления. Наибольшее распространение на подвижном составе получили одно- или многоконтурные системы, реализующие принцип управления по отклонению регулируемой величины от заданного значения, т. е. есть замкнутые системы, и системы, реализующие управление как по отклонению регулируемой величины, так и с учётом действующего возмущения, т. е. комбинированные системы [55].

Для примера на рисунке 1.6 приведена структура одноконтурной комбинированной САУ, примененная на тепловозе ТЭП70БС и реализующая ступенчатое управление.

Регулируемой величиной в этой системе является не собственно скорость движения, но время хода $T(S_k)$ по контрольному участку пути. Выходной координатой системы является номер ходовой позиции контроллера, которую

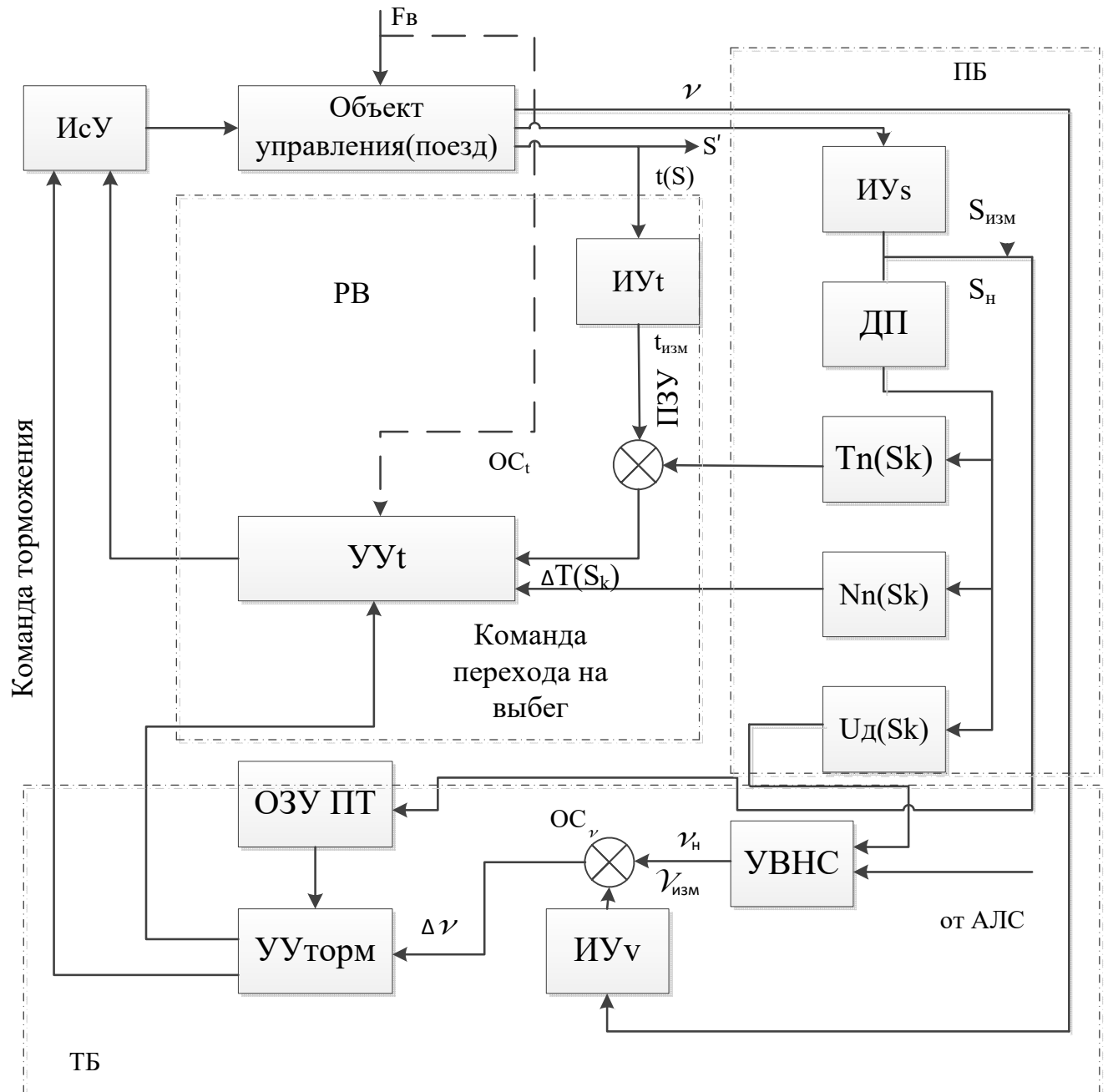


Рисунок 1.6 – Одноконтурная САУ

формирует регулятор времени хода РВ (в его состав входят измеритель времени хода $ИУ_t$, орган сравнения времени хода $ОС_t$, устройство управления временем хода $УУ_t$) [67 – 69].

Для постоянного хранения алгоритмов движения поезда, выбора номера ходовой позиции и задания ограничений по скорости движения $U_d S_k$ в систему введен программный блок ПБ. Включающий в себя измеритель пути $ИУ_s$, дискретизатор пути ДП, а также программные блоки $T_n(S_k)$, $N_n(S_k)$, $U_d(S_k)$.

Длину контрольного участка, для которого задано время хода, формирует дискретизатор пути ДП.

Для реализации торможения при превышении заданной скорости применен тормозной блок ТБ, который по аналогии с регулятором времени хода включает в себя измеритель скорости $ИУ_v$, орган сравнения скорости $ОС_v$, устройства управления торможением $УУ_{\text{торм}}$ и оперативно запоминающего устройства ОЗУ ПТ. Дополнительно в состав тормозного блока введено устройство выбора наименьшей ограничивающей скорости УВНС. Выходы тормозного блока ТБ и регулятора времени хода РВ подключены к исполнительному устройству ИСУ.

Разработаны и положительно зарекомендовали себя в эксплуатации двухконтурные системы автоматического ведения САВП, функциональная схема которая приведена на рисунке 1.7. Такая система по аналогии с одноконтурной содержит программный блок ПБ и тормозной блок ТБ, внешний контур регулятор времени хода, которому подчинен контур скорости. Оба контура работают по отклонению от регулируемой величины.

Структура регулятора времени хода изменена по отношению к одноконтурной системе, преобразуя рассогласование по времени хода $\Delta T(S_k)$ в задание скорости движения локомотива $v_3(S_k)$ с помощью сумматора $СМ_v$ как алгебраическая сумма значения скорости $v_n(S_k)$, сохраненного в постоянно запоминающее устройство (ПЗУ) и величины $\Delta v[\Delta T(S_k)]$, измеренной измерителем времени $ИУ_t$ и рассчитываемой в устройстве управления временем хода $УУ_t$. Регулятор скорости по аналогии с регулятором времени хода в одноконтурной системе состоит из измерителя скорости $ИУ_v$, органа сравнения скоростей $ОС_v$ и управляющего устройства скоростью $УУ_v$. Измеритель скорости $ИУ_v$ осуществляет преобразование непрерывного аналогового сигнала скорости v в цифровую форму, квантованную по уровню и дискретную по времени: $v_{\text{изм}}(nT_v)$, где $n = 0, 1, 2, \dots$; T_v – шаг дискретизации по времени. Выход управляющего устройства скоростью подключен ко входу исполнительного устройства ИСУ. Орган сравнения скоростей $ОС_v$ определяет рассогласование между измеренной $v_{\text{изм}}$ и заданной v_3 скоростями

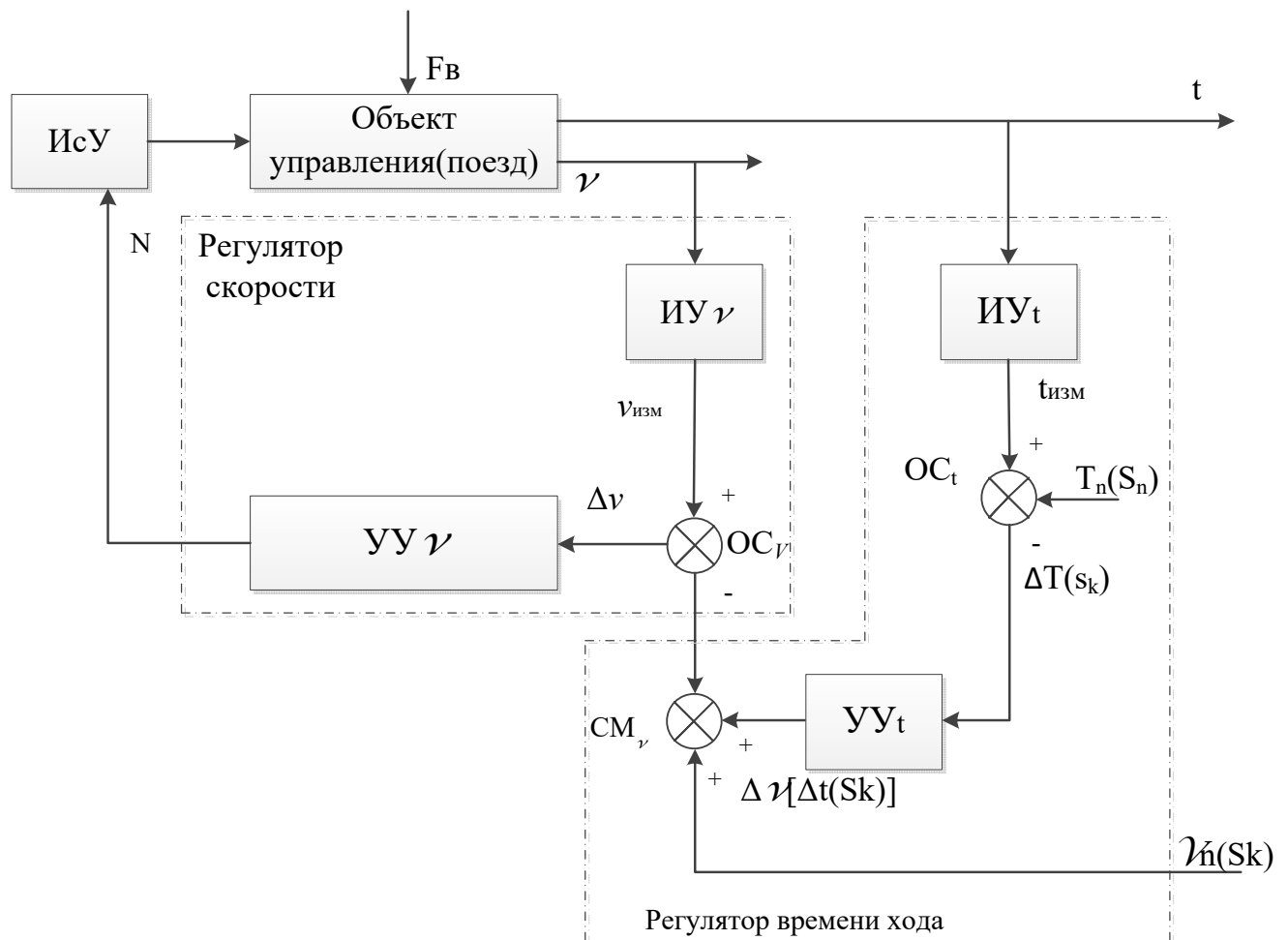


Рисунок 1.7 – Двухконтурная система автоматического ведения поезда

движения; $\Delta v = v_{изм} - v_3$. Управляющее устройство скорости $УУ_v$ выбирает регулирующее воздействие (для маневровых и магистральных локомотивов – это номер ходовой позиции контроллера) в функции рассогласования скоростей от Δv [70, 71].

Внедрение систем автоматического управления скоростью также способствует повышению безопасности движения поездов. Так, в [56] проработан вопрос выполнения соблюдения количественного значения критерия коэффициента запаса устойчивости вагона от схода с рельсов для грузового поезда с распределенной тягой. Предложена система автоматического управления скоростью движения с возможностью одновременной оценки значений

продольных сил в поезде для последующей коррекции регулирующих воздействий на ведомый локомотив.

Функциональная схема такой системы показана на рисунке 1.8.

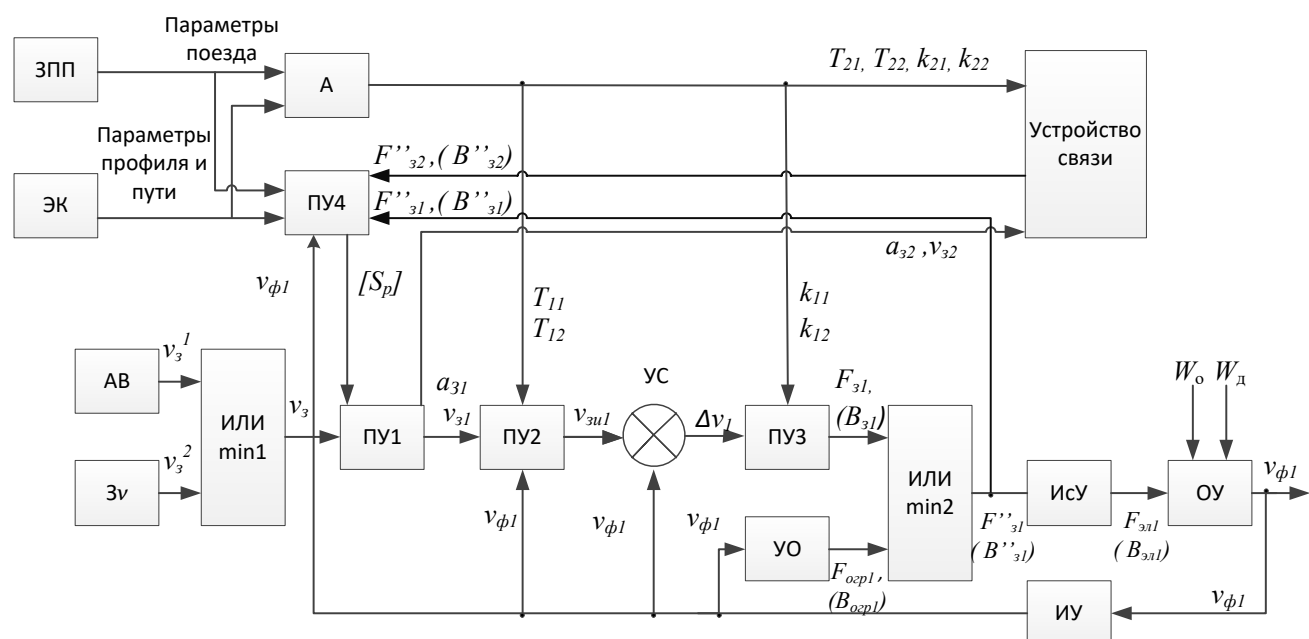


Рисунок 1.8 – Функциональная схема системы с коррекцией задания режимов движения ведомого локомотива

Система включает в себя основные функциональные блоки: систему автоведения АВ (система верхнего уровня), задатчик скорости Z_v , контроллера машиниста, логический элемент ИЛИ – $min1$, осуществляющий выбор наименьшего значения из двух скоростей, задатчик параметров поезда ЗПП, электронную карту пути и профиля ЭК; модуль адаптации А, осуществляющий коррекцию параметров и настройку структуры закона управления; промежуточное устройство ПУ4, необходимое для оценки значений продольных сил [56]. Эти значения поступают в промежуточное устройство ПУ1, которое выполняет преобразование продольных сил в коэффициенты устойчивости всех вагонов от схода с рельсов. При уменьшении этих коэффициентов ниже предельно минимальной величины от схода с рельсов ПУ1 вносит изменения в значения скорости или ускорения задания ведущего или ведомого локомотива. Промежуточное устройство ПУ2 введено в систему с целью плавной аппроксимации ступенчато изменяющегося входного сигнала, промежуточное

устройство ПУЗ выполняет функции пропорционально-интегрального регулятора скорости движения.

Устройство ограничений УО учитывает действующие ограничения в тяговом электроприводе, влияющие на тяговые и тормозные характеристики локомотива. Логический элемент ИЛИ – $\min 2$ по аналогии с элементом ИЛИ – $\min 1$ осуществляет выбор наименьшего значения из двух силы (тяги и торможения). В качестве исполнительного устройства ИСУ применен тяговый электропривод, который формирует движущий момент на колесах объекта управления ОУ. Измерительное устройство ИУ предназначено для измерения фактической скорости движения и подачи его на устройство сравнения УС.

В [72] предложен автоматический регулятор, построенный на основе нечеткой логики. Данный подход позволяет реализовывать как автоматическое поддержание заданной скорости, так и режим автоведения. Функциональная схема системы управления показана на рисунке 1.9. Нечеткий регулятор поделен на три уровня (слоя): на первом уровне решается задача определения скорости на основе данных о железнодорожном пути, на втором уровне – ограничение скорости на основании предельных значений энергетической передачи локомотива, на третьем – минимизация потребления энергии в случае распределенной тяги для длинносоставного поезда.

Работа [73] посвящена исследованию в области численного моделирования систем автоматического управления высокоскоростных поездов в Китае. В [74] представлены исследования по разработке оптимального автономного программного планировщика для автоматического поддержания скорости тяжеловесных поездов эксплуатирующихся в Южной Африке.

В [75] синтезирован адаптивный ПД-регулятор для управления скоростью двух следующих друг за другом поездов с учетом безопасного расстояния между поездами. Адаптивный ПД-регулятор состоит из четырех частей (рисунок 1.10): классический ПД-регулятор, модель поезда на основе метода наименьших квадратов, блок линейного поиска и две матрицы Якоби. На рисунке 1.10 приняты

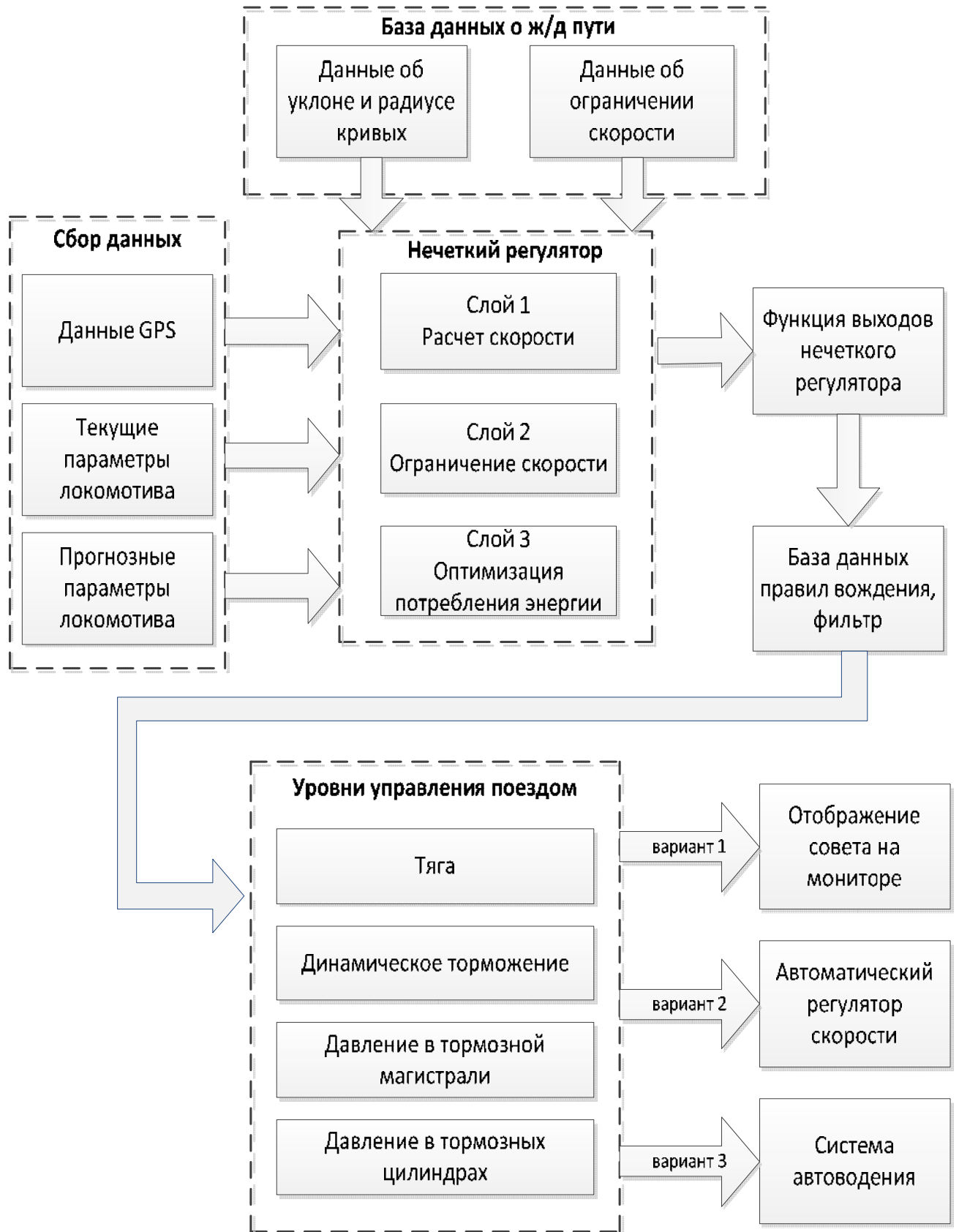


Рисунок 1.9 – Функциональная схема системы с нечетким регулятором

Рисунок 1.10 – Функциональная схема системы с адаптивным ПД-регулятором

обозначения: X_f – положение ведущего поезда, X_b – положение следующего поезда, X_{bd} – тормозной путь, X_e – ошибка слежения. Классический пропорционально-дифференциальный ПД-регулятор описывается уравнением:

$$u_{n+1} = u_n + K_{pn}(e_n - e_{n-1}) + K_{dn}(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}), \quad (1.1)$$

где $e_n = x_{fn} - x_{bn} - 2L_f - x_{bdn}$, K_{pn} и K_{dn} представляют параметры ПД-регулятора, L_f – тормозной путь следующего поезда. $x_{fn}, x_{bn}, 2L_f, x_{bdn}$ – соответственно характеризуют положение головного поезда, положение последнего поезда, длину головного поезда и длину тормозного пути последнего поезда.

Для определения параметров матрицы Якоби можно применить любой из методов аппроксимации, например, метод наименьших квадратов.

В практике отечественного локомотивостроения для решения задачи автоматизированного управления движением различных поездов был разработан соответствующий интеллектуальный комплекс, основной вклад в создание которого внесли ученые и специалисты ведущих высших учебных заведений (ВУЗ) и научно-исследовательских институтов (НИИ) страны [76 – 81].

Ядром данных систем является микропроцессорная система установленная на локомотиве для управления электропередачей локомотива как в ручном режиме, так и в режиме советчика машинисту. Составной частью систем автоведения являются регистраторы параметров движения локомотива, к которым принадлежит система автоматического контроля параметров работы дизельного подвижного состава и учета дизельного топлива (АСК). Эта система специально разработана для непрерывного измерения и регистрации во время поездки данных о параметрах работы локомотива [76, 77].

Для примера на рисунке 1.11 показана структурная схема электрооборудования тепловоза 2ТЭ116У с функцией поосного регулирования касательной силы тяги [78 – 80].

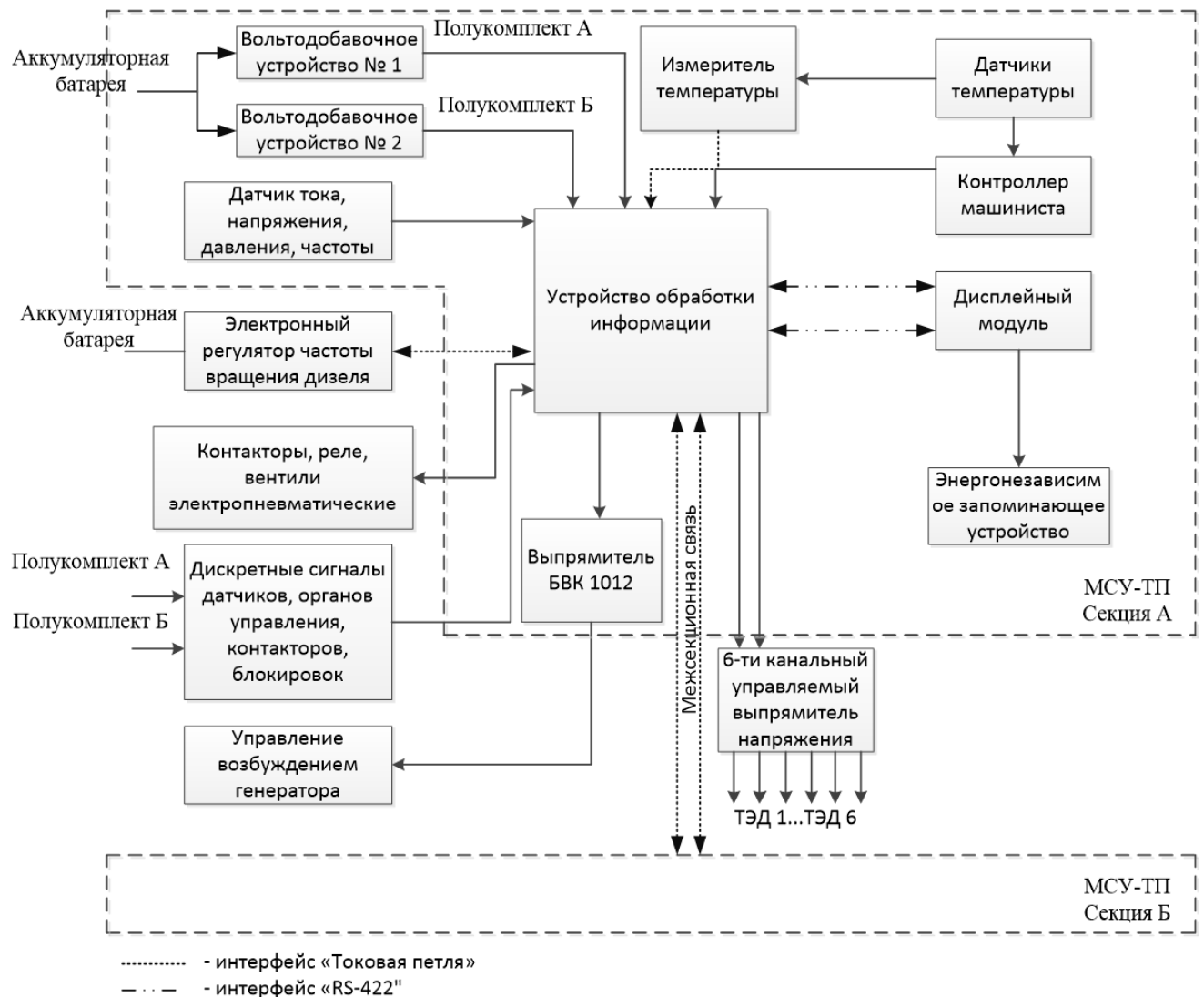


Рисунок 1.11 – Функциональная схема микропроцессорной системы управления, регулирования и диагностики тепловозов (МПСУ-ТП) 2ТЭ116У

«Устройство обработки информации является главным вычислительным устройством на локомотиве реализующим заложенные в него алгоритмы управления электропередачей и диагностики оборудования» [81]. Через блоки и преобразователи входящие в состав системы устройство обработки информации осуществляет сбор информации от различных датчиков, а также управление электропередачей локомотива.

На рисунке 1.12 показана функциональная схема микропроцессорной системы управления, регулирования и диагностики тепловоза ТЭП70БС с системой автоведения.

Работа данной системы аналогична, примененной на тепловозе 2ТЭ116У.

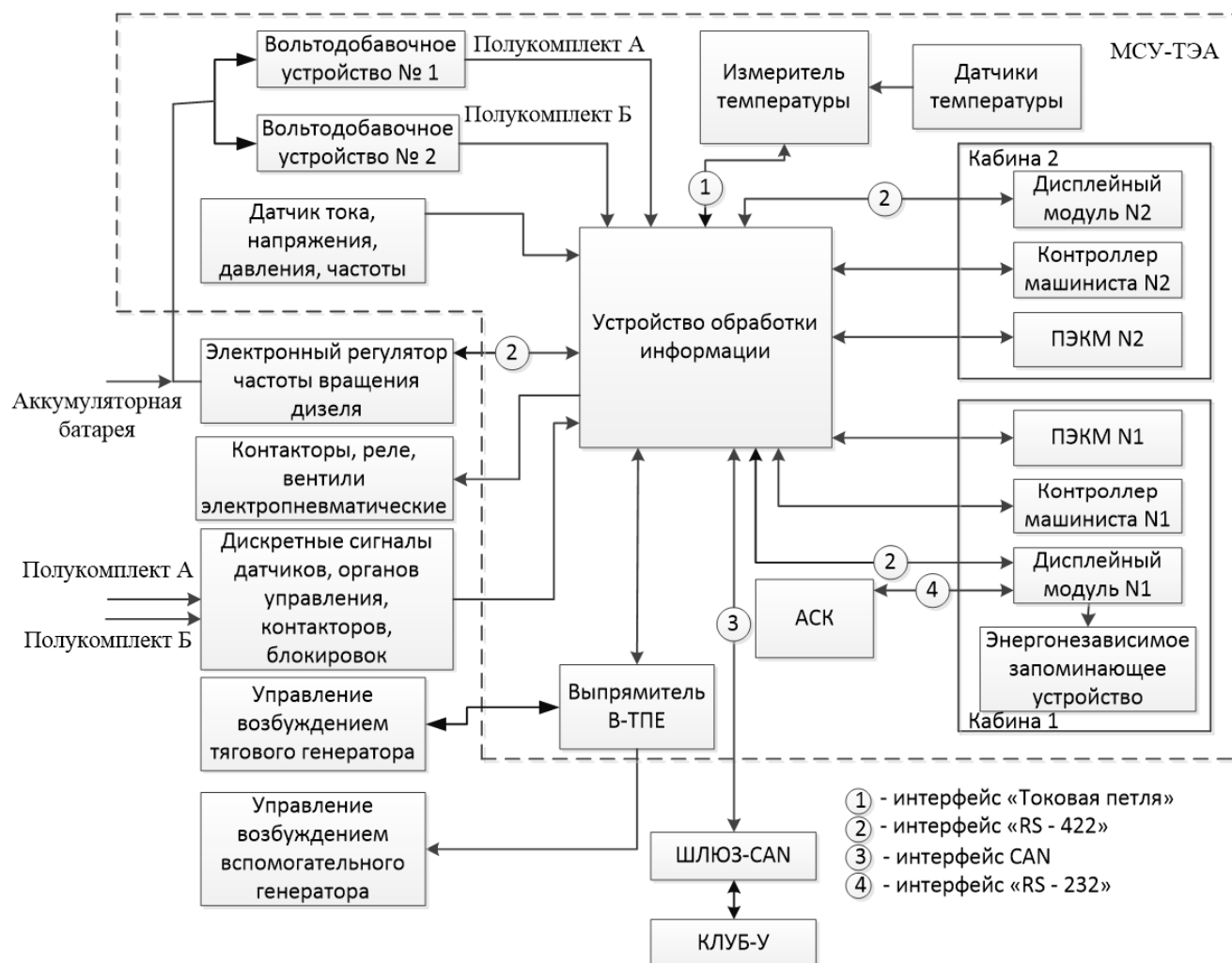


Рисунок 1.12 – Функциональная схема микропроцессорной системы управления, регулирования и диагностики тепловозов ТЭП70БС

Устройство обработки информации является главным вычислительным устройством на локомотиве ТЭП70БС и реализует заложенные в него алгоритмы управления электропередачей и диагностики оборудования [68].

Аналогичная система управления применяется на электровозах серии ВЛ65, а также электровозах Э5К всех модификаций – эти электровозы снабжены одинаковыми элементами управления, схожими конфигурациями пульта машиниста, поддерживающего связь с автоматической системой регулирования, посредством которого осуществляется ввод и корректировка параметров движения.

Функциональная схема рассматриваемой системы электровоза ЭП1 показана на рисунке 1.13. Задание скорости движения Z_v и задание основных параметров

поезда $З_m$ технически реализовано на основе клавиатуры и дисплея, расположенных на пульте управления машиниста.

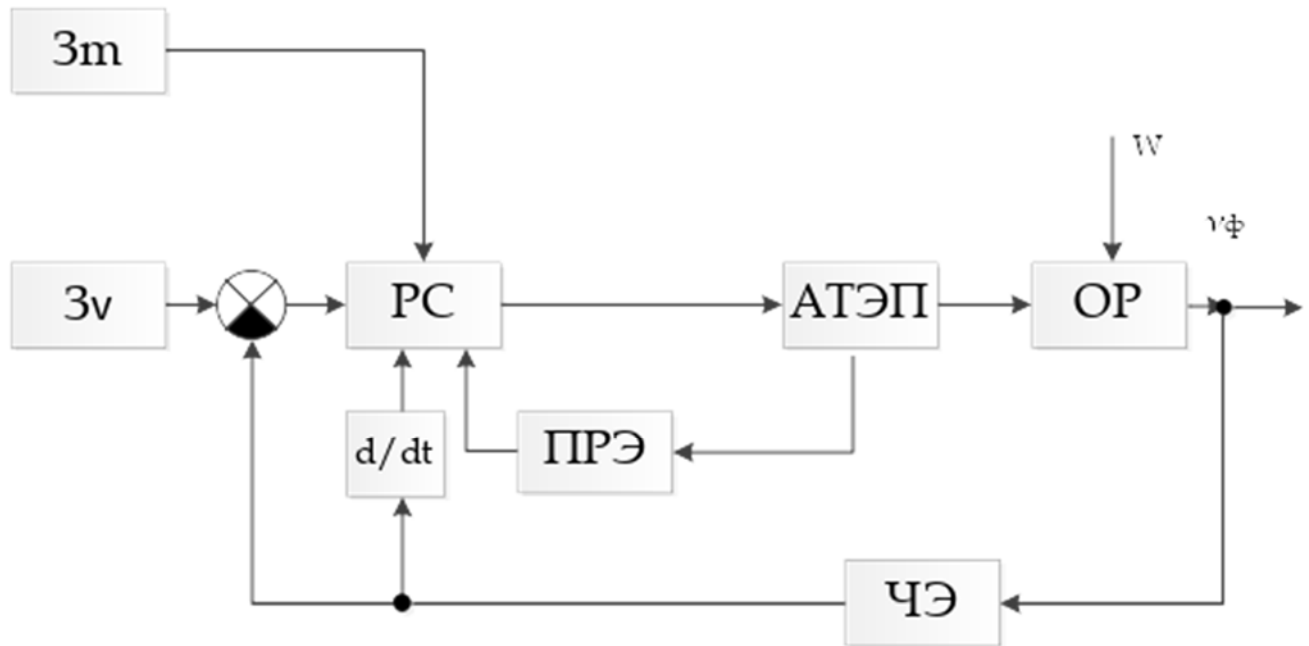


Рисунок 1.13 – Структурная схема системы автоматического регулирования электровоза ЭП1

С целью повышения качества регулирования скорости движения поезда по сравнению с электровозами ВЛ85 и ВЛ65 в систему, реализованную на электровозе ЭП1, был реализован комбинированный регулятор скорости РС, в котором к жесткой обратной связи по скорости v_ϕ добавлена гибкая обратная связь по ускорению (d/dt) .

Такая система, тем не менее, не осуществляет реализацию ограничений рывков (т. е. второй производной скорости по времени), что уменьшает плавность движения в переходных режимах.

1.4 Особенности автоматизации процессов управления электропередачей маневрового локомотива при работе на сортировочной станции

Как показал анализ условий эксплуатации и характеристик работы маневровых тепловозов, результаты которого приведены в подразделе 1.2, одним из основных и наиболее напряженных режимов работы является надвиг и роспуск

поездов на станциях, оборудованных сортировочной горкой. Эффективная и безопасная работа тепловоза в этом режиме обеспечивает высокую пропускную способность сортировочной горки и сопряженных железнодорожных путей [82]. Ключевыми особенностями работы тепловозов в этом режиме являются большой диапазон массы формируемых поездов (массы могут достигать до 10000 т), большой диапазон рабочих скоростей движения тепловоза (как правило, при роспуске состава – не более 10 км/ч, при одиночном следовании локомотива – до 40 км/ч), большой диапазон уклонов путей. Эти особенности не только усложняют управление тепловозом в ручном режиме, но и усложняют синтез системы автоматического регулирования скорости в связи с большим разбросом возмущающих воздействий.

Специалистами ВНИКТИ с участием 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, схема которого представлена на рисунке 1.14 [83, 84].

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. Отмечено, что система автоматического управления скоростью является исполнительным звеном нижнего уровня в структуре распределенного программно-аппаратного комплекса автоматизированного управления сортировочной горкой, который кроме нее включает две системы верхнего уровня – систему управления автоматической маневровой станционной и локомотивной сигнализацией (МАЛС) разработки акционерного общества «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС») и систему автоматизации сортировочной станции *MSR32* разработки *Siemens*. Для

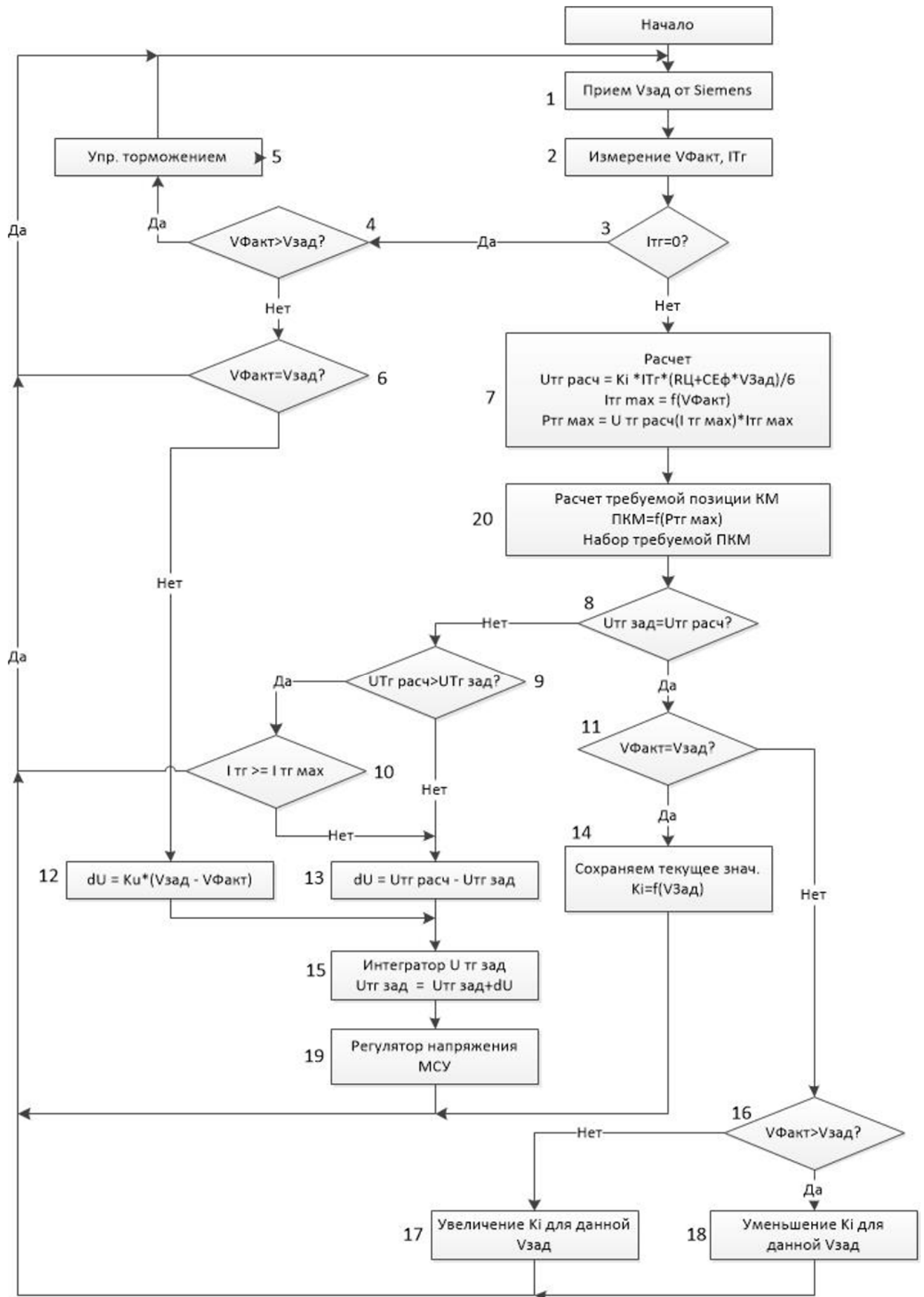


Рисунок 1.14 – Схема алгоритма управления тепловозом в режиме поддержания скорости

систем верхнего уровня процесс управления локомотивом сводится к передаче на локомотив, т. е. системе автоматического управления скоростью, величины заданной скорости. Далее рассмотрен приведенный на рисунке 1.14 алгоритм работы регулятора скорости.

При трогании, когда скорость тепловоза равняется нулю $V_{\text{факт}} = 0$ и она меньше своего заданного значения ($V_{\text{факт}} < V_{\text{зад}}$) и ток тягового генератора равен нулю $I_{\text{ТГ}} = 0$, в соответствие с последовательностью 3, 4, 6, 12, 15, 19 (рисунок 1.14) алгоритма задание на напряжение тягового генератора $U_{\text{ТГ.зад}}$ для регулятора напряжения получаем как результат интегрирования разности заданной и фактической скорости ($V_{\text{зад}} - V_{\text{факт}}$) (рисунок 1.14).

При появлении тока тягового генератора $I_{\text{ТГ}} > 0$ ($I_{\text{ТГ}} < I_{\text{ТГ.зад}}$), величина заданного напряжения определяется в результате выполнения последовательности 3, 7, 20, 8, 9, 13, 15, 19 (рисунок 1.14) алгоритма до достижения $I_{\text{ТГ}} = I_{\text{ТГ.зад}}$ (рисунок 1.15, а), после чего будет выполняться последовательность 3, 7, 20, 8 – 10 (рисунок 1.14). Коэффициент K_i в формуле для $U_{\text{ТГ.расч}}$ введен для обеспечения возможности коррекции этой зависимости для конкретной заданной скорости. Массив коэффициентов включает коэффициенты для каждого значения заданной скорости с шагом 0,1 км/час, значения всех коэффициентов равны 1.

В этом режиме (стоповом) 3, 7, 20, 8 – 10 (рисунок 1.14), (рисунок 1.15, а) система будет находиться до начала движения. Одновременно осуществляется набор нужной позиции контроллера машиниста (ПКМ).

С началом движения $V_{\text{факт}} > 0$ ($V_{\text{факт}} < V_{\text{зад},i}$) ток $I_{\text{ТГ}}$ уменьшится ($I_{\text{ТГ}} > 0$, $I_{\text{ТГ}} < I_{\text{ТГ.зад}}$), в результате чего осуществится переход на последовательность 3, 7, 20, 8, 9, 13, 15 – 19 (рисунок 1.14) с увеличением тока $I_{\text{ТГ}}$ до достижения ($I_{\text{ТГ}} = I_{\text{ТГ.зад}}$) (рисунок 1.15, б). Эти переходы будут повторяться по мере разгона тепловоза и достижения расчетного значения напряжения тягового генератора ($U_{\text{ТГ.зад}} = U_{\text{ТГ.расч}}$) (рисунок 1.15, б), что будет эквивалентно выходу на установившуюся скорость $V_{\text{уст}}$.

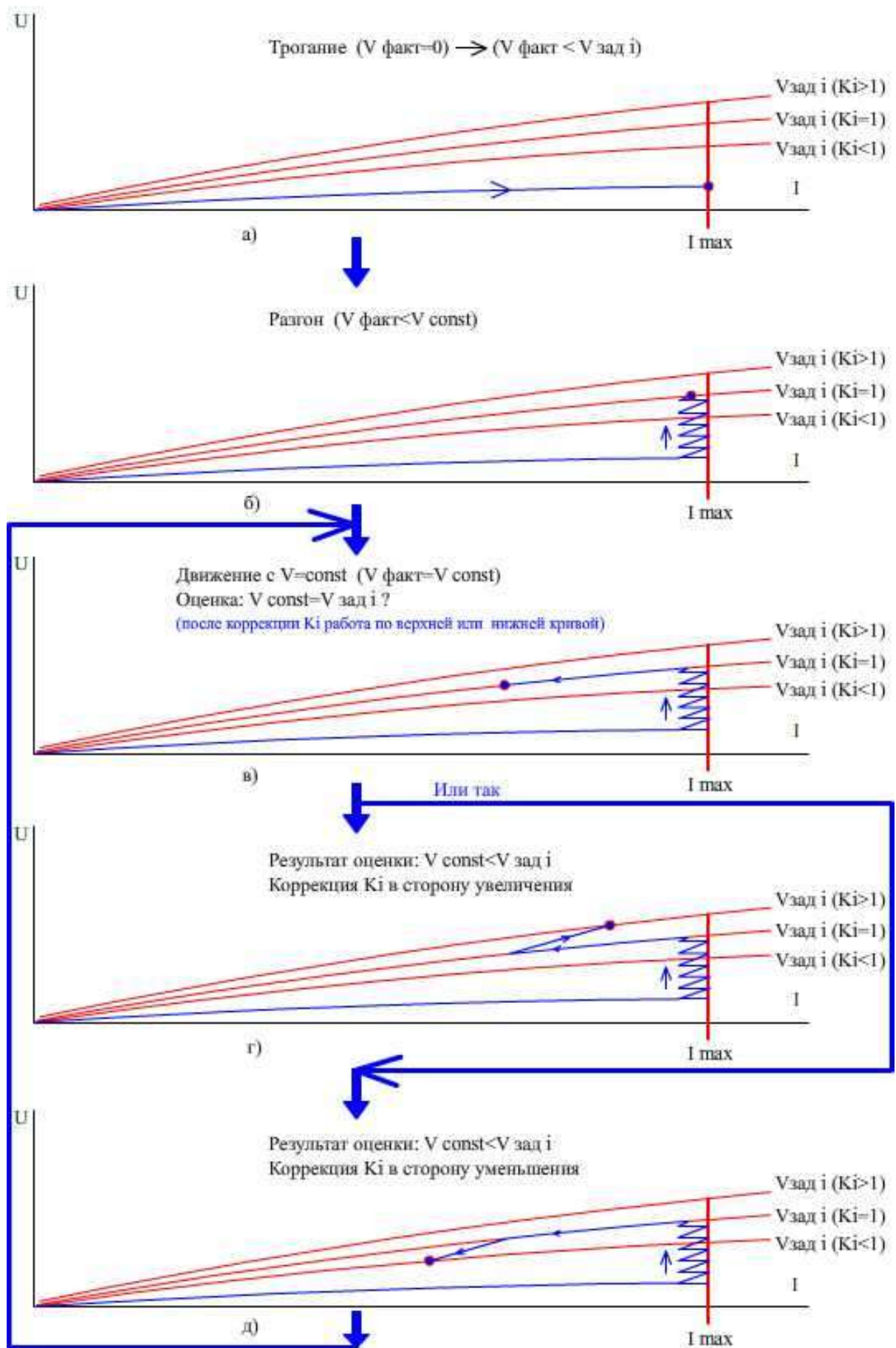


Рисунок 1.15 – Изменение режима работы дизель-генераторной установки в процессе реализации алгоритма

В процессе движения при изменении сопротивления движению от профиля или веса состава напряжение тягового генератора изменяется по кривой $U_{\text{тг.расч}} = f(I_{\text{тг}})$, соответствующей заданной скорости $V_{\text{зад},i}$ и значению коэффициента K_i . При этом осуществляется оценка соответствия достигнутой установившейся скорости $V_{\text{уст}}$ заданной $V_{\text{зад},i}$ (рисунок 1.15, в).

Если в результате оценки будет установлено, что достигнутая установившаяся скорость меньше заданной $V_{\text{зад},i}$, осуществляется коррекция коэффициента K_i в большую сторону, что будет эквивалентно переходу на более высокую кривую $U_{\text{тг.расч}} = f(I_{\text{тг}})$ и, возможно, увеличению позиции контроллера машиниста, последовательность 7 – 20 алгоритма (рисунок 1.15, г).

Если же в результате оценки будет установлено, что достигнутая установившаяся скорость больше заданной $V_{\text{зад},i}$, осуществляется коррекция коэффициента K_i в меньшую сторону, что будет эквивалентно переходу на низкую кривую $U_{\text{тг.расч}} = f(I_{\text{тг}})$ и, возможно, уменьшению позиции контроллера машиниста последовательность 7 – 20 алгоритма (рисунок 1.15, д).

Таким образом, в процессе эксплуатации системы будет осуществляться подбор и непрерывная коррекция (при необходимости) значений коэффициентов K_i , обеспечивающих максимальную точность поддержания соответствующих заданных скоростей. Эта коррекция будет автоматически учитывать износ колесных пар, изменения характеристик тяговых электродвигателей и их цепей, в том числе при смене тяговых электродвигателей.

Расчетное сопротивление движению в данном алгоритме можно использовать для ступенчатого перемещения по кривой $U_{\text{тг.расч}} = f(I_{\text{тг}})$ при изменении веса состава. В этом случае можно сразу установить напряжение генератора, соответствующее новому расчетному сопротивлению. Это позволит повысить точность поддержания скорости в переходных процессах.

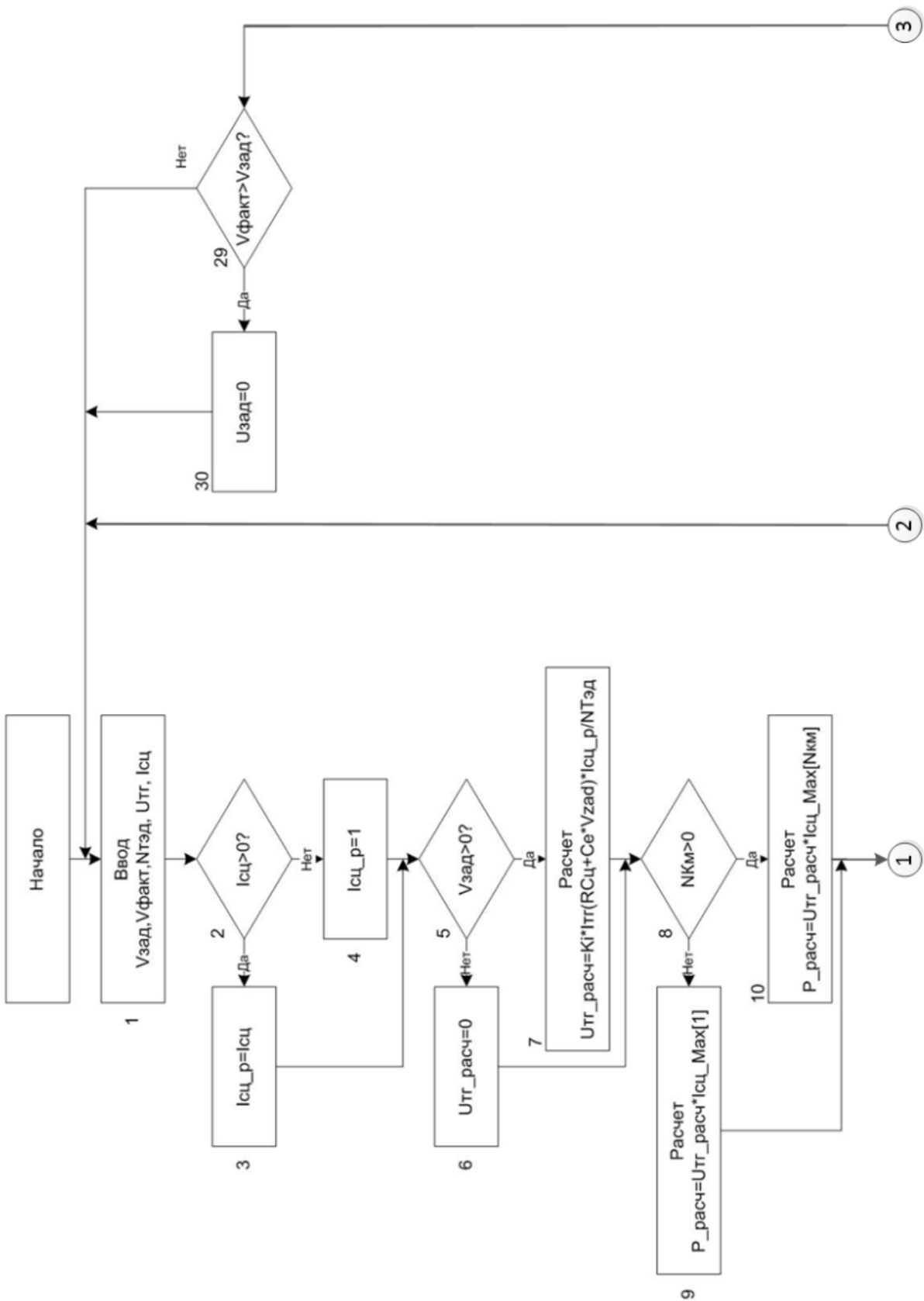
В ходе реализации алгоритма поддержания скорости в него внесены некоторые доработки и изменения. Это связано с особенностями работы микропроцессорной системы управления, характером движения поезда с учетом

инерционной составляющей состава, упрощением алгоритма, и др. Схема скорректированного алгоритма поддержания скорости представлена на рисунке 1.16.

В блоке 1 осуществляется ввод значений параметров необходимых для функционирования регулятора скорости. В блоках 2 – 4 с целью упрощения алгоритма, а также исключения случаев деления на 0, задается эквивалентное минимальное значение тока силовой цепи $I_{\text{сц}_p}$, отличное от нуля. Далее, в блоках 5 – 7, производится вычисление расчетного, для поддержания заданной скорости, значения напряжения тягового генератора $U_{\text{тг}_\text{расч}}$. Значение потребной мощности дизель-генераторной установки $P_{\text{расч}}$, блоки 8 – 10, вычисляется как произведение $U_{\text{тг}_\text{расч}}$ и максимального, для текущей позиции контроллера машиниста, тока силовой цепи. До начала движения значение максимального тока ограничивается уровнем первой ПКМ. В соответствии с потребной мощностью осуществляется расчет и набор требуемой ПКМ.

Блоки 12 – 14 предназначены для выявления признака превышения максимального тока силовой цепи, в случае если ток превышает максимальное значение, заданное значение напряжения уменьшается. Далее вычисляется величина рассогласования dU между фактическим $U_{\text{тг}_\text{факт}}$ и расчетным $U_{\text{тг}_\text{расч}}$ напряжениями. По величине рассогласования dU производится расчет заданного напряжения тягового генератора $U_{\text{зад}}$, блоки 17 – 28. При этом в зависимости от знака рассогласования dU приращение величины $U_{\text{зад}}$ осуществляется с разным темпом. На последнем шаге, блоки 29, 30, определяется величина перерегулирования скорости движения поезда. В случае наличия перерегулирования, величина $U_{\text{зад}}$ приравняется нулю.

Из рисунка 1.15 очевиден основной недостаток описанного регулятора – колебательный характер переходных процессов, обусловленный поисковым алгоритмом определения коэффициента регулятора. Данный переходный процесс по скорости имеет более плавный характер в связи со значительной инерционностью локомотива (поезда).



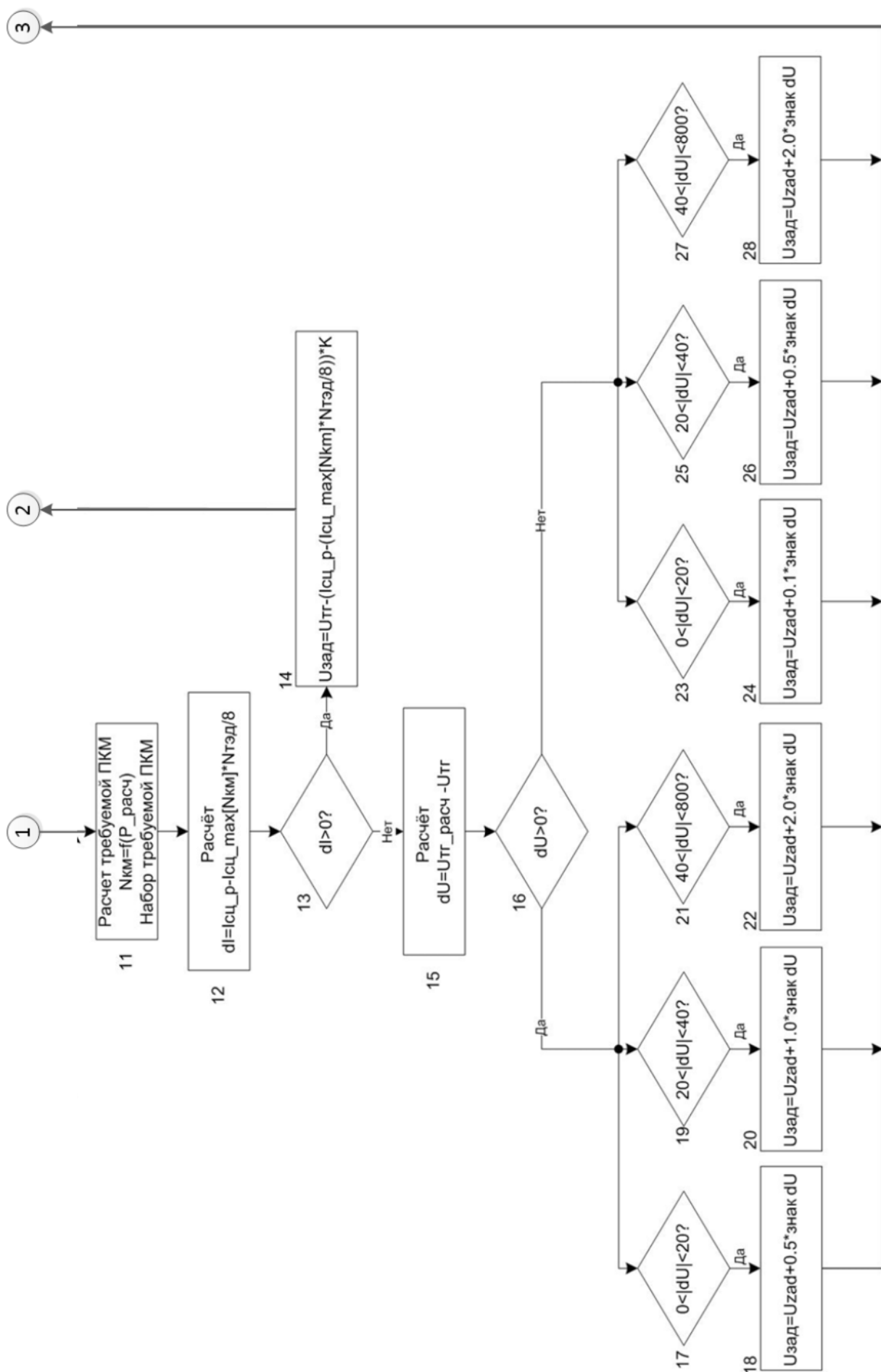


Рисунок 1.16 – Алгоритм работы регулятора скорости

1.5 Выводы по разделу 1

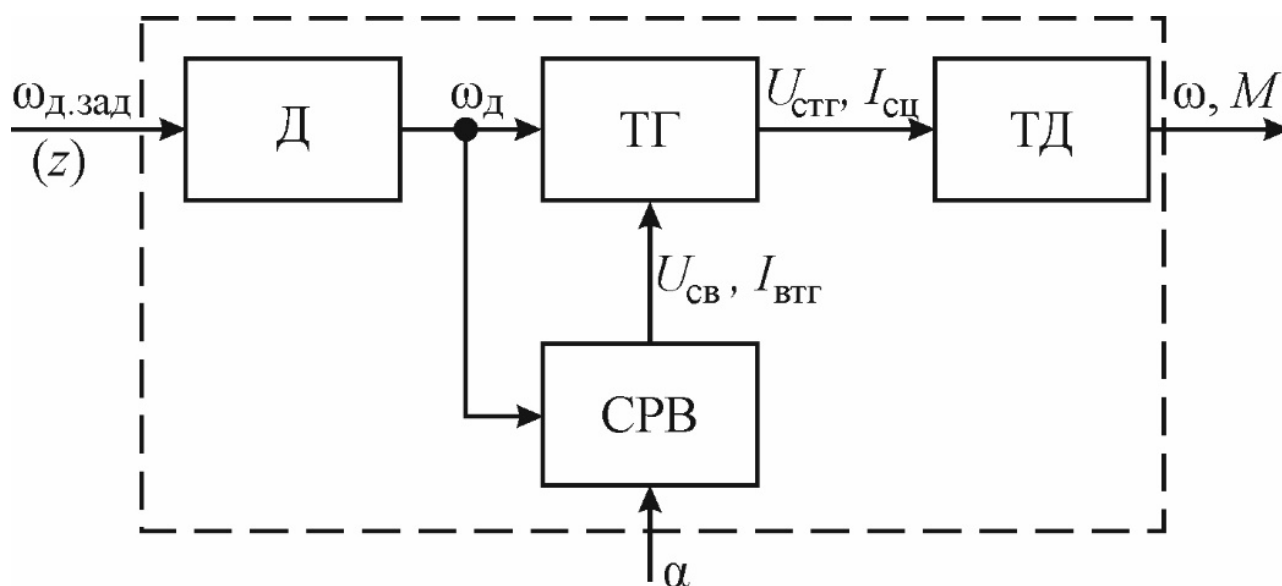
1 Анализ разработок и исследований в области автоматизации управления тяговым подвижным составом показал, что для разработки систем автоматического управления скоростью локомотива целесообразно использовать классические методы теории автоматического управления, на основе которых синтезируются системы подчиненного регулирования, работающие по отклонению регулируемой величины, или с комбинированными регуляторами, использующими жесткие и гибкие обратные связи по регулируемой величине или возмущающему воздействию.

2 Установлено, что особенностями сортировочной маневровой работы маневровых локомотивов являются большое время переходных процессов и низкие скорости движения, что определяет основные задачи при автоматизации – высокая точность формирования задания и поддержания скорости, формирование плавного характера переходного процесса без колебательных процессов.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА

2.1 Функциональная схема системы автоматического управления скоростью

Математическое описание электропередачи для силовой установки горочного локомотива будет представлено дальше в данном разделе, обобщенная функциональная схема электропередачи представлена на рисунке 2.1.



Д – дизель, ТГ – тяговый генератор, ТД – тяговый двигатель, СРВ – система регулирования возбуждения ТГ; $\omega_{д.зад}$, $\omega_{д}$ – задание на частоту вращения вала Д и фактическая частота вращения вала Д, z – выход штока силового сервомотора регулятора частоты вращения, $U_{стг}$, $I_{сц}$ – выпрямленное напряжение ТГ и ток обмотки якоря ТД (ток силовой цепи), $U_{св}$, $I_{вТГ}$ – напряжение и ток обмотки возбуждения ТГ, α – угол открытия тиристорov управляемого выпрямителя, ω – частота вращения вала ТД, F_T – сила тяги

Рисунок 2.1 – Функциональная схема электропередачи маневрового тепловоза

В результате анализа условий горочной работы, выполненного в первом разделе, основными требованиями, предъявляемыми к системе автоматического управления скоростью маневрового тепловоза, являются:

– осуществление процессов разгона/торможения с заданными показателями качества переходного процесса;

- поддержание заданной скорости движения при изменении профиля пути, массы поезда и т.д.;
- обеспечение ограничений в тяговом электроприводе и дизель-генераторной установке;
- возможность интеграции системы автоматического управления скоростью в топологию существующих информационных систем тепловоза, автоматических локомотивных сигнализаций, систем автоматизации сортировочных станций и т.д.

Выполнение первых двух требований достигается выбранной структурой системы управления и структурой регулятора скорости и значениями его параметров, в то время как реализация остальных требований обеспечивается структурой и алгоритмом работы только системы управления. Функциональная схема системы автоматического управления скоростью, разработанная с учетом приведенных требований и с учетом схемы электропередачи, показана на рисунке 2.2.

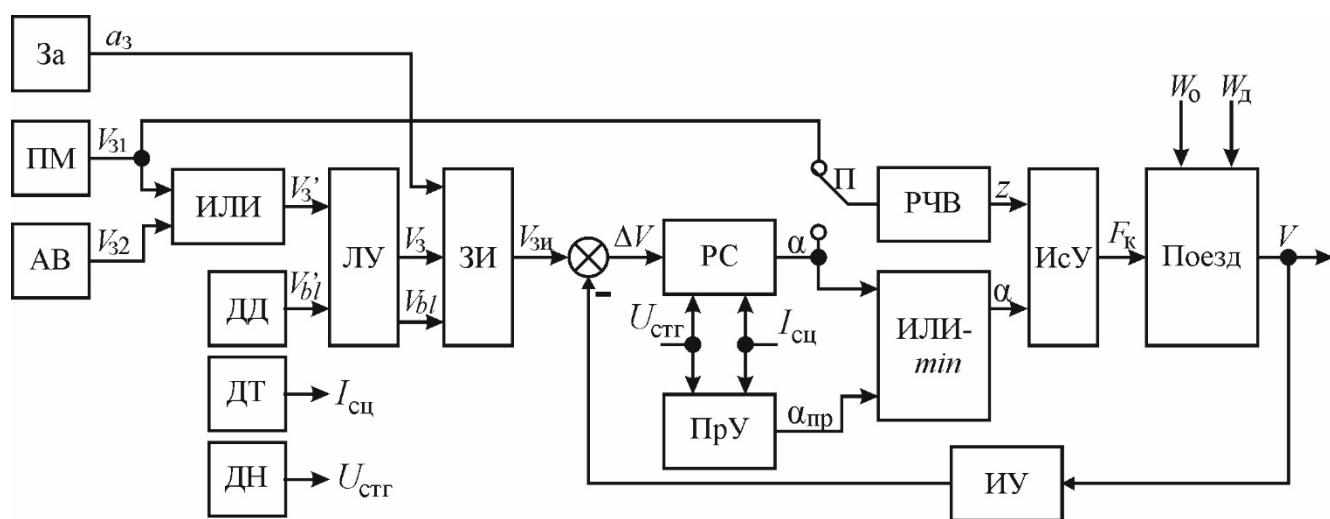


Рисунок 2.2 – Функциональная схема системы автоматического управления скоростью

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} . Логический устройство ЛУ

необходим 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 $V_{зи}$ до уровня V_z с ускорением a_z , 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 $V_{зи}$ 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 Д (рисунок 2.1), входящего в состав исполнительного устройства (ИсУ). Переключатель П осуществляет подключение РЧВ к пульту 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) (рисунок 2.1). 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 [57].

Далее разработаем математическую модель для каждого из основных функциональных элементов электропередачи и системы автоматического управления скоростью.

2.2 Модель дизеля

Математическое описание механического движения дизеля хорошо известно, исследованию динамических процессов в механической части дизеля посвящено

множество работ [85 – 88]. Уравнение механического движения основано на втором законе Ньютона. Для вращающихся элементов дизеля имеем:

$$\frac{d\omega_d}{dt} = \frac{M_{\text{и}} - M_{\text{м}} - M_{\text{н}}}{J}, \quad (2.1)$$

где J – момент инерции вращающихся элементов дизеля;

$\frac{d\omega_d}{dt}$ – угловое ускорение коленчатого вала дизеля;

$M_{\text{и}}$ – индикаторный момент, развиваемый дизелем;

$M_{\text{м}}$ – момент механических потерь;

$M_{\text{н}}$ – момент сопротивления, создаваемый нагрузкой.

Индикаторный момент дизеля $M_{\text{и}}$ определяется из выражения:

$$\frac{dM_{\text{и}}}{dt} = \left(\frac{5}{\omega_d Z / 100} + 1 \right) \cdot \left(k_{\text{и}} \frac{Z}{2} - M_{\text{и}} \right), \quad (2.2)$$

где ω_d – частота вращения коленчатого вала дизеля;

Z – выход штока силового сервомотора регулятора частоты вращения;

$k_{\text{и}}$ – эмпирический коэффициент индикаторного момента.

Выражение (2.2) составлено с учетом ряда допущений и поэтому не может использоваться для анализа внутренних процессов дизеля, однако позволяет адекватно оценивать характер изменения как индикаторного момента $M_{\text{и}}$, так и частоты вращения ω коленчатого вала дизеля в динамических режимах работы.

С учетом допущений, принимаемых в теории двигателей внутреннего сгорания [89], момент механических потерь $M_{\text{м}}$ принят пропорциональным второй степени частоты вращения коленчатого вала дизеля:

$$M_{\text{м}} = k_{\text{м}} \omega_d^2, \quad (2.3)$$

где $k_{\text{м}}$ – коэффициент пропорциональности, $k_{\text{м}} = 0,4$.

Момент сопротивления, создаваемый нагрузкой, определяется из выражения:

$$M_{\text{н}} = \frac{U_{\text{ген}} \cdot I_{\text{сц}}}{\omega_d}, \quad (2.4)$$

где $U_{\text{ген}}$ – напряжение генератора;

$I_{\text{сц}}$ – ток силовой цепи.

Структурная схема дизеля, соответствующая уравнениям (2.1) – (2.4), приведена на рисунке 2.3.

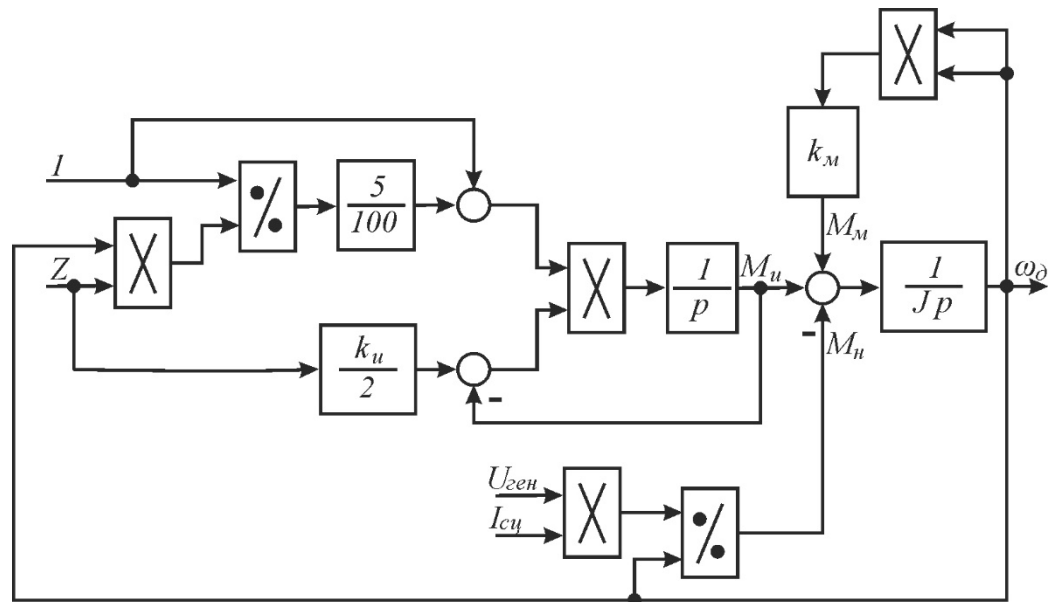


Рисунок 2.3 – Структурная схема дизеля (p – оператор Лапласа)

Уравнения (2.1) – (2.4) образуют систему уравнений, составляющих математическую модель дизеля. Дифференциальные уравнения (2.1) и (2.2) записаны в форме Коши и проблем при численном моделировании не вызывают.

2.3 Модель синхронного возбудителя

На основании принципиальной схемы электрической передачи локомотива в части включения возбудителя на обмотку возбуждения тягового генератора (рисунок 2.4) составлена эквивалентная схема замещения возбудителя, в качестве которого выступает синхронный однофазный обращенный генератор (рисунок 2.5).

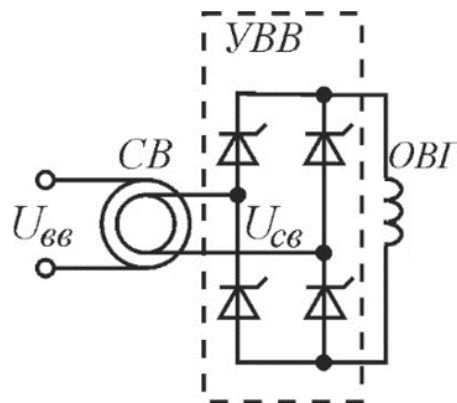
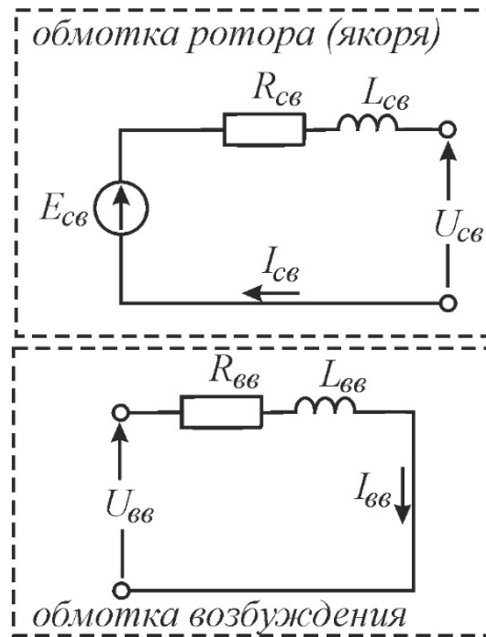


Рисунок 2.4 – Схема включения синхронного возбудителя и обмотки возбуждения тягового генератора



$E_{св}$ – ЭДС обмотки ротора возбuditеля, $I_{вв}$ – ток обмотки статора (обмотка возбуждения) возбuditеля, $R_{св}$ – сопротивление обмотки ротора возбuditеля, $L_{св}$ – индуктивность обмотки ротора возбuditеля, $I_{вв}$ – ток обмотки возбуждения возбuditеля, $L_{вв}$ – индуктивность обмотки возбуждения возбuditеля, $R_{вв}$ – сопротивление обмотки возбуждения возбuditеля

Рисунок 2.5 – Эквивалентная схема замещения синхронного возбuditеля

Постоянное напряжение питания $U_{вв}$ подступает от стартер-генератора (подвозбuditеля) на обмотку возбуждения синхронного возбuditеля (СВ). Переменное напряжение обмотки ротора (якоря) синхронного возбuditеля $U_{св}$ поступает на вход управляемого выпрямителя (УВВ), выходное напряжение которого подается на обмотку возбуждения тягового генератора (ОВГ).

Очевидно, что математическое описание синхронного возбuditеля для обеих обмоток возбуждения и ротора (якоря) осуществляется на основании второго закона Кирхгофа.

Уравнение электрического равновесия обмотки ротора:

$$U_{св} = E_{св} - I_{св}R_{св} - L_{св} \frac{dI_{св}}{dt}. \quad (2.5)$$

Ток обмотки ротора возбuditеля определяется на основании закона Ома:

$$I_{св} = \frac{U_{св}}{R_{св} + R_{ОВГ}}. \quad (2.6)$$

Электродвижущая сила (ЭДС) обмотки ротора возбuditеля носит электромеханический характер и определяется на основании закона Фарадея:

$$E_{CB} = C_B \omega_B \Phi, \quad (2.7)$$

где C_B – электромагнитная постоянная возбудителя;

ω_B – частота вращения ротора возбудителя;

Φ – магнитный поток.

Уравнение электрического равновесия обмотки возбуждения:

$$U_{BB} = I_{BB} R_{BB} + L_{BB} \frac{dI_{BB}}{dt}, \quad (2.8)$$

откуда

$$\frac{dI_{BB}}{dt} = \frac{U_{BB} - I_{BB} R_{BB}}{L_{BB}}. \quad (2.9)$$

Структурная схема синхронного возбудителя показана на рисунке 2.6.

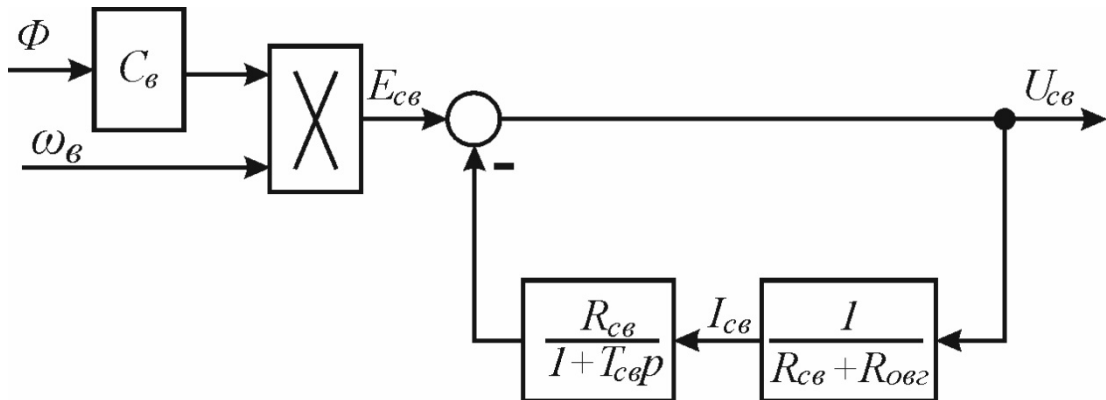
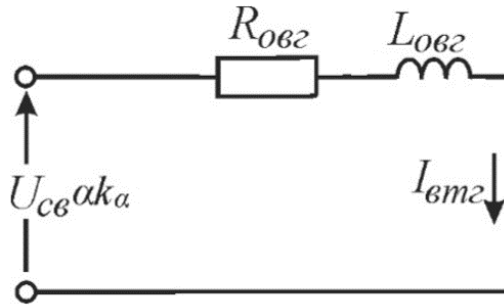


Рисунок 2.6 – Структурная схема синхронного возбудителя
 ($T_{cv} = L_{cv}/R_{cv}$ – постоянная времени цепи обмотки ротора возбудителя)

Структурная схема построена на уравнениях (2.5) – (2.9) образующих систему уравнений и составляющих математическую модель синхронного возбудителя.

2.4 Модель системы «тяговый генератор – тяговый двигатель»

Тяговый генератор представляет собой трехфазную синхронную машину с обмоткой возбуждения, схема включения которой показана на рисунке 2.4. В соответствии с этой схемой на рисунке 2.7 показана ее эквивалентная схема включения



$R_{овг}$ – сопротивление обмотки возбуждения тягового генератора, $L_{овг}$ – индуктивность обмотки возбуждения тягового генератора, $R_{овг}$ – сопротивление обмотки возбуждения тягового генератора, $I_{втг}$ – ток обмотки возбуждения тягового генератора (выпрямленный ток синхронного возбудителя), α – угол открытия тиристорov управляемого выпрямителя, k_{α} – коэффициент преобразования схемы однофазного мостового выпрямителя

Рисунок 2.7 – Эквивалентная схема замещения обмотки возбуждения тягового генератора

Для схемы (рисунок 2.7) на основании второго закона Кирхгофа составлено уравнение:

$$U_{св} \alpha k_{\alpha} = I_{втг} R_{овг} + L_{овг} \frac{dI_{втг}}{dt}, \quad (2.10)$$

откуда

$$\frac{dI_{втг}}{dt} = \frac{U_{св} \alpha k_{\alpha} - I_{втг} R_{овг}}{L_{овг}}, \quad (2.11)$$

где k_{α} – коэффициент преобразования УВВ (рисунок 2.4) в цепи обмотки возбуждения тягового генератора, α – угол открытия тиристорov УВВ.

На рисунке 2.8 приведена схема включения тягового генератора и эквивалентного тягового двигателя. Количество тяговых двигателей в процессе моделирования учитывается путём пропорционального изменения параметров модели эквивалентного тягового двигателя.

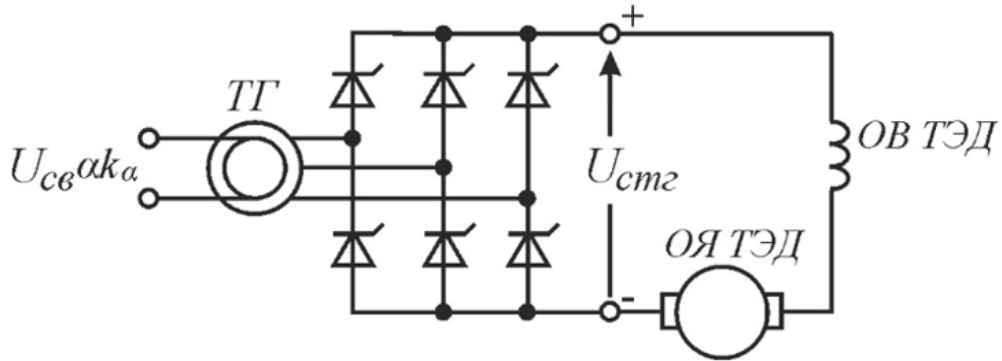
Эквивалентная схема замещения обмотки статора генератора, соответствующая схеме (рисунок 2.8), показана на рисунке 2.9.

Уравнения электрического равновесия для обмоток статора синхронного генератора записано в векторной форме:

$$\vec{U}_{ген} = \vec{i}_{ген} R_{ген} + \frac{d\vec{\psi}_{ген}}{dt}, \quad (2.12)$$

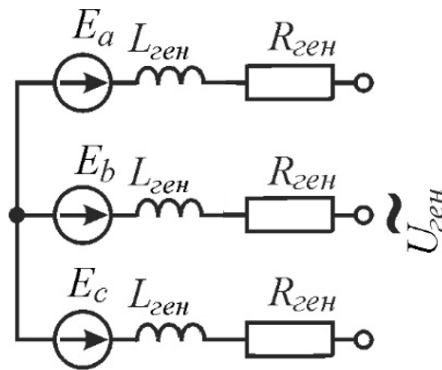
где $i_{ген}$ – ток статора тягового генератора,

$\psi_{ген}$ – потокосцепление статора с учетом взаимных индуктивностей.



ТГ – тяговый генератор, *ТЭД* – тяговый электродвигатель, *ОЯ* – обмотка якоря, *ОВ* – обмотка возбуждения, $U_{стг}$ – выпрямленное напряжение тягового генератора

Рисунок 2.8 – Схема включения тягового генератора и эквивалентного тягового двигателя



a, b, c – фазы обмотки, $L_{ген}$ – индуктивность обмотки статора тягового генератора, $R_{ген}$ – сопротивление обмотки статора тягового генератора

Рисунок 2.9 – Эквивалентная схема замещения обмотки статора тягового синхронного генератора

Для расчёта выпрямленного напряжения синхронного тягового генератора использована аппроксимированная нагрузочной характеристикой генератора:

$$U_{стг} = f(I_{в\Gamma}, I_{сц}, \omega_d). \quad (2.13)$$

При аппроксимации использованы реальные характеристики генератора. В качестве метода аппроксимации применён метод наименьших квадратов. В окончательном виде значение напряжения на выходе синхронного генератора определяется полиномом:

$$\begin{aligned} U_{стг} = & (I_{в\Gamma} 0,209 - I_{сц} 1,021 \cdot 10^{-7} - I_{в\Gamma}^2 1,709 \cdot 10^{-3} + \\ & + I_{в\Gamma} I_{сц} 7,34 \cdot 10^{-7} - I_{сц}^2 2,794 \cdot 10^{-7} - I_{в\Gamma}^2 I_{сц} 2,359 \cdot 10^{-8} - \\ & - I_{в\Gamma} I_{сц}^2 3,692 \cdot 10^{-11} + I_{в\Gamma}^3 4,969 \cdot 10^{-6} + I_{сц}^3 2,888 \cdot 10^{-8}) \omega_d. \end{aligned} \quad (2.14)$$

При нагружении тягового генератора на эквивалентный электродвигатель постоянного тока с последовательным возбуждением (рисунок 2.10) работа силовой цепи описывается уравнением по второму закону Кирхгофа:

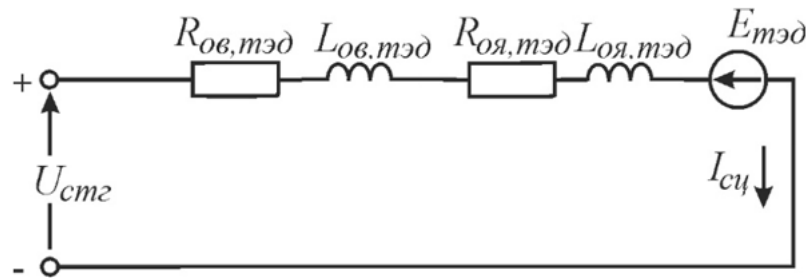
$$U_{\text{СТГ}} = E_{\text{ТЭД}} + I_{\text{СЦ}}(R_{\text{ОВ,ТЭД}} + R_{\text{ОЯ,ТЭД}}) + (L_{\text{ОВ,ТЭД}} + L_{\text{ОЯ,ТЭД}}) \frac{dI_{\text{СЦ}}}{dt}, \quad (2.15)$$

откуда

$$\frac{dI_{\text{СЦ}}}{dt} = \frac{U_{\text{СТГ}} - E_{\text{ТЭД}} - I_{\text{СЦ}}(R_{\text{ОВ,ТЭД}} + R_{\text{ОЯ,ТЭД}})}{L_{\text{ОВ,ТЭД}} + L_{\text{ОЯ,ТЭД}}}, \quad (2.16)$$

$$I_{\text{СЦ}} = \frac{(U_{\text{СТГ}} - E_{\text{ТЭД}}) / (R_{\text{ОВ,ТЭД}} + R_{\text{ОЯ,ТЭД}})}{1 + T_{\text{СЦ}} p}, \quad (2.17)$$

где $T_{\text{СЦ}} = (L_{\text{ОВ,ТЭД}} + L_{\text{ОЯ,ТЭД}}) / (R_{\text{ОВ,ТЭД}} + R_{\text{ОЯ,ТЭД}})$ – постоянная времени силовой цепи тягового двигателя.



$E_{\text{тэд}}$ – противоЭДС обмотки статора тягового двигателя

Рисунок 2.10 – Эквивалентная схема замещения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

ПротивоЭДС обмотки статора тягового генератора носит электромеханический характер и определяется на основании закона Фарадея:

$$E_{\text{ТЭД}} = C_e \omega \Phi, \quad (2.18)$$

где C_e – электромагнитная постоянная тягового двигателя;

ω – частота вращения ротора тягового двигателя.

Для расчёта электромагнитной постоянной C_e тягового электродвигателя (ТЭД) использованы реальные характеристики электродвигателя двигателя ЭД133 (рисунок 2.11).

Уравнение электромеханических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения в установившемся режиме работы [90]:

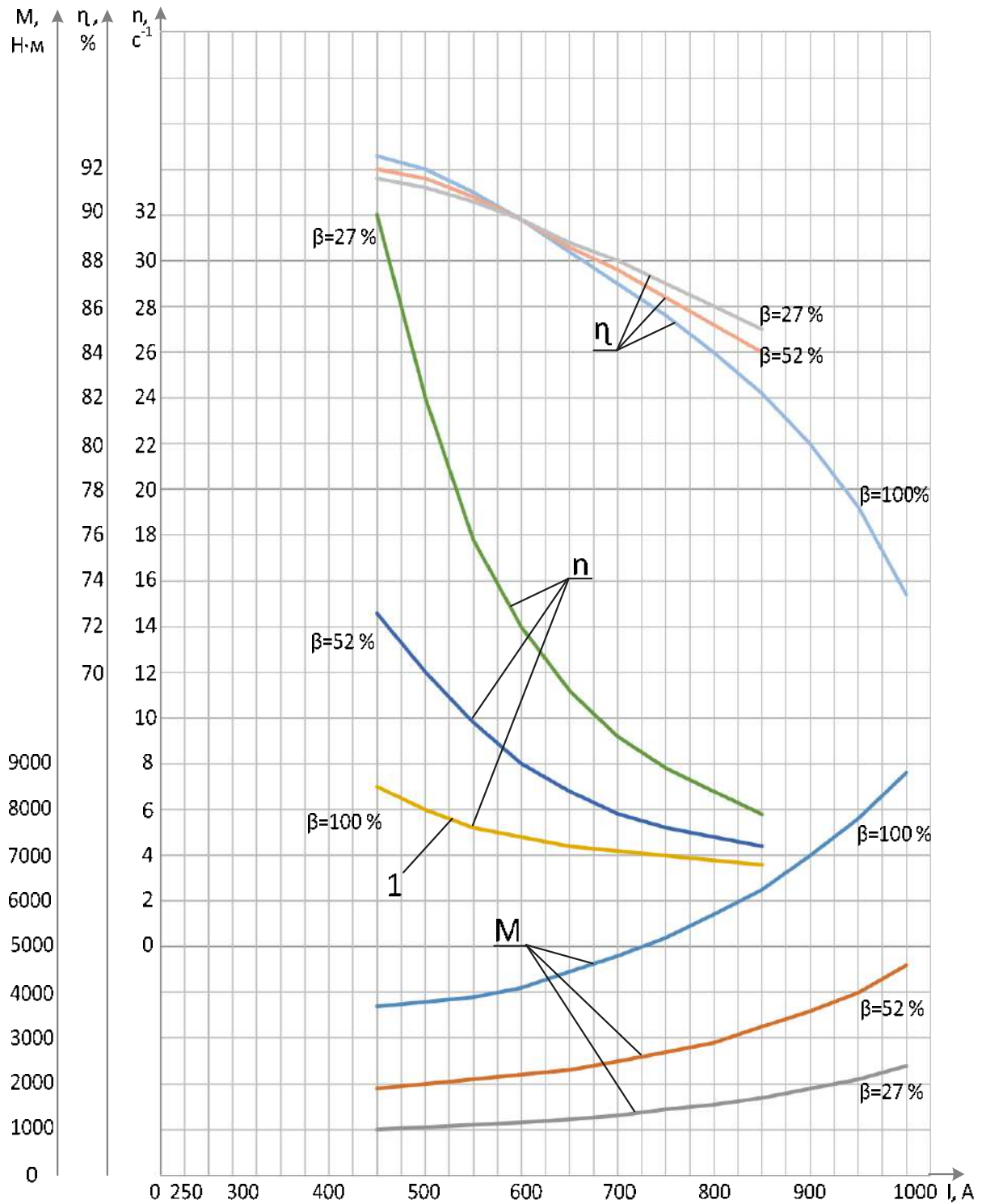


Рисунок 2.11 – Скоростные характеристики, характеристики КПД и вращающего момента двигателя ЭД133 тепловоза ТЭМ7А

$$\omega = \frac{U_{\text{дв}} - I_{\text{сц}}(R_{\text{ов.тэд}} + R_{\text{оя.тэд}})}{C_e \Phi} \quad (2.19)$$

Уравнение (2.19) описывает электромеханические характеристики на рисунке 2.11. Вычислено значение постоянной C_e ТЭД в трех точках кривой 1

(рисунок 2.11) путём применения метода наименьших квадратов. Зависимость C_e от тока якоря ТЭД аппроксимирована полиномом:

$$C_e = 0,0444. \quad (2.20)$$

Момент на валу якоря ТЭД $M_{\text{ТЭД}}$ при отсутствии ослабления возбуждения

$$M_{\text{ТЭД}} = C_M I_{\text{сц}} \Phi, \quad (2.21)$$

где C_M – электромашинная постоянная ТЭД.

С учётом реальных характеристик ТЭД (кривая 2 на рисунке 2.11), момент на валу ТЭД аппроксимирован полиномом второй степени:

$$M_{\text{ТЭД}} = 0,0029 I_{\text{сц}}^2 + 4,465 I_{\text{сц}} - 19,519. \quad (2.22)$$

Частота вращения ротора тягового двигателя определяется по известному выражению:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\text{ТЭД}} - M_c}{J_\Sigma}, \quad (2.23)$$

где J_Σ – суммарный момент инерции механической части тягового электропривода;

M_c – суммарный момент сопротивления, приведенный к валу ротора эквивалентного тягового двигателя.

Структурная схема, соответствующая математической модели эквивалентного тягового двигателя, приведена на рисунке 2.12.

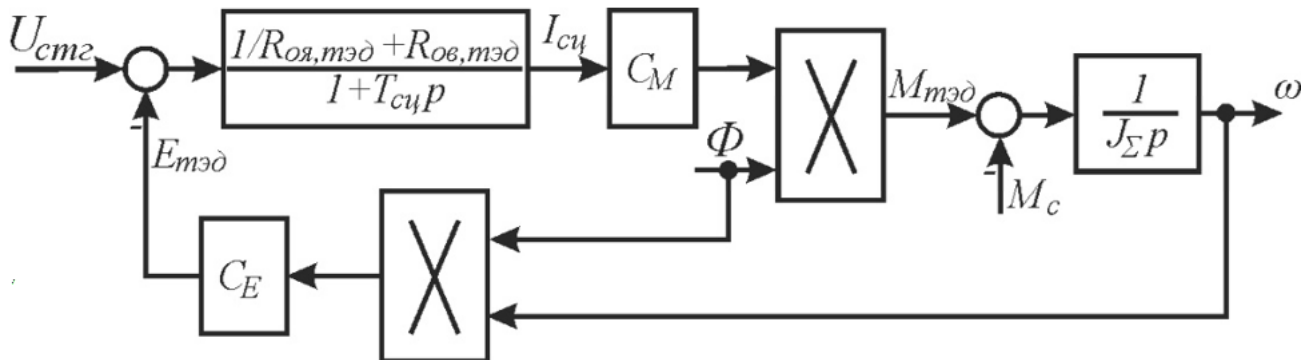


Рисунок 2.12 – Структурная схема замещения эквивалентного тягового двигателя

Структурные схемы приведенные на рисунках 2.3, 2.6, 2.12 заложены в математической модели математической модели тягового электропривода маневрового тепловоза.

2.5 Модель реализации силы тяги

Результатом реализации силы тяги на шаге интегрирования dt является перемещение поезда массой Q на расстояние ds со скоростью v и ускорением $\frac{dv}{dt}$.

Уравнение движения поезда:

$$Q \frac{dv}{dt} = F_k - (W_o + W_d) - B, \quad (2.24)$$

где Q – масса поезда с учетом инерционной составляющей;

F_k – сила тяги локомотива;

W_o – сила основного сопротивления движению;

W_d – сила дополнительного сопротивления движению;

B – сила торможения.

Расчёт силы тяги локомотива осуществляется с использованием значения момента $M_{тэд}$ тягового двигателя, вычисляемого в модели передачи мощности:

$$F_k = \frac{2M_{тэд}}{D_{кп}} \cdot \mu_{ред} \cdot \eta_{ред} \cdot n_{дв}, \quad (2.25)$$

где $\mu_{ред}$ – передаточное отношение тягового редуктора;

$\eta_{ред}$ – коэффициент полезного действия (КПД) тягового редуктора;

$D_{кп}$ – диаметр колёсной пары;

$n_{дв}$ – количество тяговых двигателей локомотива.

Модель основного сопротивления движению предусматривает возможность определения основного сопротивления движению для грузовых вагонов различного типа. Соответственно, будут отличаться и формулы, по которым данное сопротивление определяется [91].

Основное удельное сопротивление движению грузовых 4-осных полувагонов на роликовых подшипниках на бесстыковом пути:

$$w_o'' = 5,2 + \frac{34,2 + 0,732 \cdot v + 0,022 \cdot v^2}{q_0}. \quad (2.26)$$

Основное удельное сопротивление движению грузовых 6-осных вагонов на роликовых подшипниках на бесстыковом пути:

$$w_0'' = 6,9 + \frac{78,5 + 0,78 \cdot v + 0,02 \cdot v^2}{q_0}. \quad (2.27)$$

Основное удельное сопротивление движению грузовых 8-осных вагонов на роликовых подшипниках на бесстыковом пути:

$$w_0'' = 6,9 + \frac{58,9 + 0,26 \cdot v + 0,0017 \cdot v^2}{q_0}. \quad (2.28)$$

В выражениях (2.27 – 2.28) q_0 – масса вагона брутто, приходящийся на одну ось.

Основное удельное сопротивление движению локомотива на бесстыковом пути определяется по формуле:

$$w_0' = 18,6 + 0,1 \cdot v + 0,0024 \cdot v^2. \quad (2.29)$$

Общее удельное сопротивление движению определяется как сумма сопротивлений движению вагонов и локомотива:

$$W_0 = \frac{w' \cdot P + w'' \cdot Q}{P + Q}; \quad (2.30)$$

где Q – масса вагонов (пересчитывается на каждом шаге для случаев отцепа).

Для уточненного определения сопротивления движению поезда от уклона определяется положение на продольном профиле центра масс каждого вагона и локомотива. После этого величины сопротивлений всех единиц поезда суммируются. При этом используется зависимость:

$$W_i = (P \cdot i_{\text{лок}} + \sum (q_{\text{брутто}} \cdot i_{\text{вагона } j})) \cdot 9,81, \quad (2.31)$$

где W_i – общая сила сопротивления поезда от уклона;

P – масса локомотива;

$q_{\text{брутто}}$ – вес одного вагона брутто;

i – значение уклона, на котором находится данный вагон или локомотив (%).

Для расположения поезда, показанного на рисунке 2.13 сопротивление от уклона определяется по следующей зависимости:

$$W_i = (P \cdot i_1 + q_1 \cdot i_1 + q_2 \cdot i_2 + q_3 \cdot i_2 + q_4 \cdot i_3 + q_5 \cdot i_3) \cdot 9,81. \quad (2.32)$$

ЛОКОМОТИВ	вагон 1	вагон 2	вагон 3	вагон 4	вагон 5
уклон 1			уклон 2	уклон 3	

Рисунок 2.13 – Пример расположения поезда на профиле

При определении сопротивления от кривой для каждого вагона проверяем, находится ли его центр в кривой, если да, то сопротивление от кривой вагона определяем по формуле:

$$w_r = \left(\frac{200}{R} + 1,5 \cdot \tau_K \right) \cdot 9,81, \quad (2.33)$$

где $\tau_K = \left| \frac{v^2}{13 \cdot R} - \frac{h}{S_K} \cdot g \right|$ – непогашенное ускорение;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

h – возвышение наружного рельса (мм);

S_K – расстояние между кругами катания колес.

Для расположения поезда, показанного на рисунке 2.14 сопротивление от кривой определяется по следующей зависимости:

$$W_r = w_{r \text{ вагон 2}} + w_{r \text{ вагон 3}}. \quad (2.34)$$

ЛОКОМОТИВ	<u>вагон 1</u>	<u>вагон 2</u>	<u>вагон 3</u>	<u>вагон 4</u>	<u>вагон 5</u>
Прямая		Кривая		Прямая	

Рисунок 2.14 – Пример расположения поезда на профиле

Дополнительная сила сопротивления движению будет рассчитываться по формуле:

$$W_d = W_i + W_r + W_v, \quad (2.35)$$

где W_d – дополнительная сила сопротивления движению

W_i – общая сила сопротивления поезда от уклона;

W_r – общая сила сопротивление поезда от кривой;

W_v – общая сила сопротивление поезда создаваемая ветром (не учитывается в данной модели);

При движении поезд в целом совершает поступательное движение, однако имеются также вращающиеся массы (колесные пары, тяговые двигатели). По этой

причине инерция поезда будет несколько больше чем у поступательно движущегося объекта.

Для учета инерционных свойств вращающихся масс поезда вычисляем инерционную массу:

$$Q = (P + q_{\text{брутто}} \cdot N_{\text{вагонов}}) \cdot (1 + \gamma), \quad (2.36)$$

где $(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся частей поезда.

Для расчета коэффициента инерции вращающихся частей $(1 + \gamma)$ поезда значения принимаются согласно табличным значениям.

Таким образом, параметры модуля реализации силы тяги рассчитываются в следующей последовательности:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{расчёт } (F_k, W_o, W_d), \\ \Delta v = (F_k - (W_o + W_d)) \frac{\Delta t}{Q}, \\ v = v + \Delta v, \\ \Delta s = v \cdot \Delta t, \\ s = s + \Delta s, \\ t = t + \Delta t. \end{array} \right. \quad (2.37)$$

В качестве примера приведем некоторые результаты определения сопротивления движению поезда в процессе горочной работы.

При реализации надвига состав в начальный момент времени может располагаться на «больших» или «малых» предгорочных путях. Все «короткие» пути, как «длинные» имеют одинаковый профиль, поэтому при определении сопротивления движению от уклона практически не имеет значения, с какого из коротких путей будет осуществлен процесс надвига (рисунок 2.15).

Далее процесс надвига или роспуска вагонов может осуществляться по горочным путям Г1 – Г4. Пути Г1 и Г2, как пути Г3 и Г4 имеют одинаковый профиль (рисунок 2.15).

Таким образом, при определении основного сопротивления движению поезда необходимо рассмотреть 4 возможных варианта (рисунок 2.15):

- движение по «большим» путям с последующим надвигом и роспуском через горочные пути Г1 и Г2;

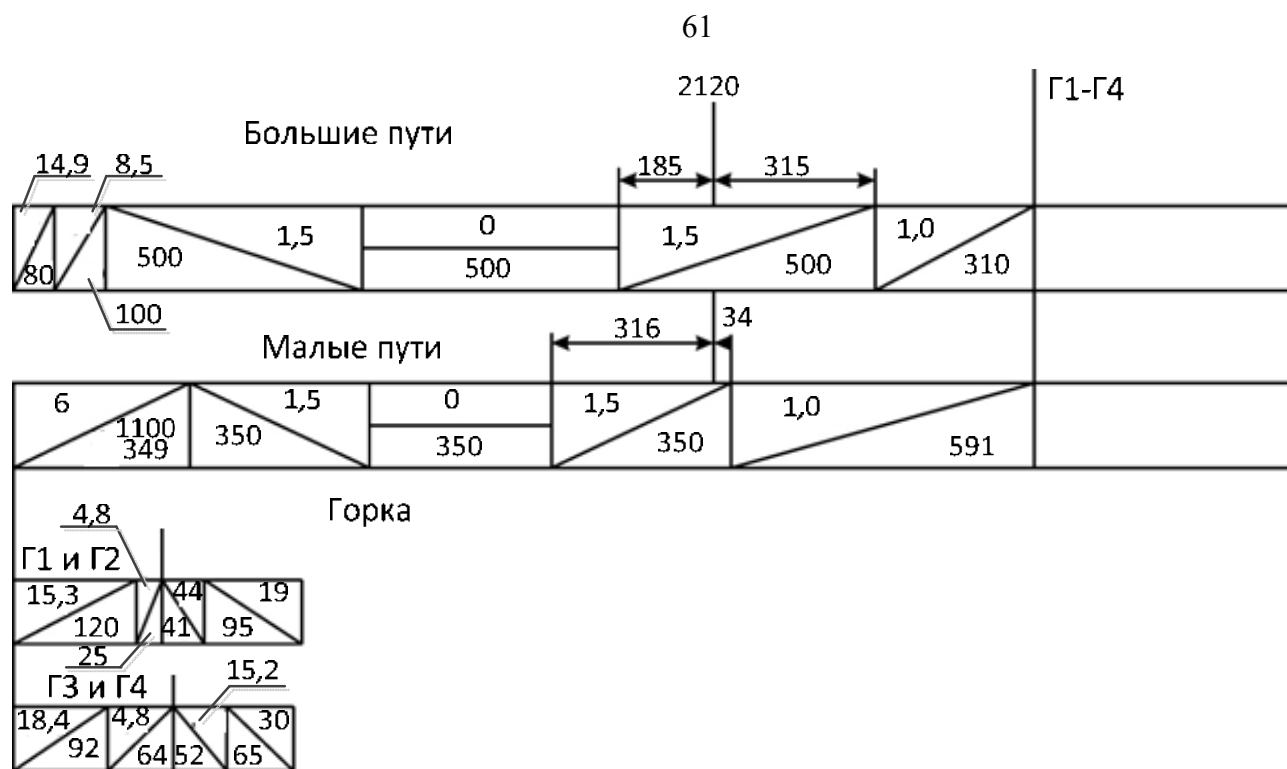


Рисунок 2.15 – Исходный расчетный профиль

- движение по «большим» путям с последующим надвигом и роспуском через горочные пути Г3 и Г4;
- движение по «малым» путям с последующим надвигом и роспуском через горочные пути Г1 и Г2;
- движение по «малым» путям с последующим надвигом и роспуском через горочные пути Г3 и Г4.

При расчете начальное положение принято при нахождении автосцепки первого по ходу движения (последнего от локомотива) вагона на отметке 2120 (в расчетах считается пройденный путь равным «0»).

Также при расчете процесса надвига при определении силы сопротивления движению от уклона играет роль количество отцепляемых за 1 раз вагонов. В расчете принимается вариант с отцепом от одного до 5 вагонов за 1 раз.

Составленная процедура позволяет определить сопротивление от уклона при любом количестве вагонов любого типа и с любой загрузкой. В данном разделе рассчитаны силы сопротивления от уклона при надвиге составов из 40 и 70 четырехосных грузовых вагонов длиной 14 м весом брутто 100т (полностью загруженный) и 24 т (порожний вагон).

За начальное положение принят момент прохождения 1-м по ходу движения вагоном отметки 2120. За конечное положение принят момент, когда локомотив достигает вершины горки (отцепляется последний вагон).

Расчет выполняется с шагом 10 м до момента, когда 1-й вагон достигнет вершины горки. Далее шаг принимается равным длине одного вагона 14 м.

На рисунках 2.16 и 2.17 приведены результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 40 порожних (вес брутто 24 тс) и 40 груженных (брутто 100 тс) грузовых вагонов со стороны «больших» путей на горочные пути Г1 и Г2 с отцепом группами от 1 до 5 вагонов. По горизонтальной оси отложен пройденный путь, а по вертикальной сила сопротивления движению от уклона в кгс. При трогании с места и до момента $l = 630$ м сила сопротивления движению от уклона не превышает 1700 кгс для порожних вагонов 6500 кгс для груженных вагонов. При изменении l от 630 м до 750 м хвост состава начинает движение на горб горки и сила сопротивления движению от уклона, соответственно, резко возрастает для порожних вагонов до 4500 кгс для груженных вагонов 17800 кгс. Далее при изменении l от 770 м до 1350 м начинается процесс роспуска состава, при этом происходит изменение силы сопротивления движению от уклона. Более детально моменты отцепов для рисунка 2.16 представлены на рисунке 2.18.

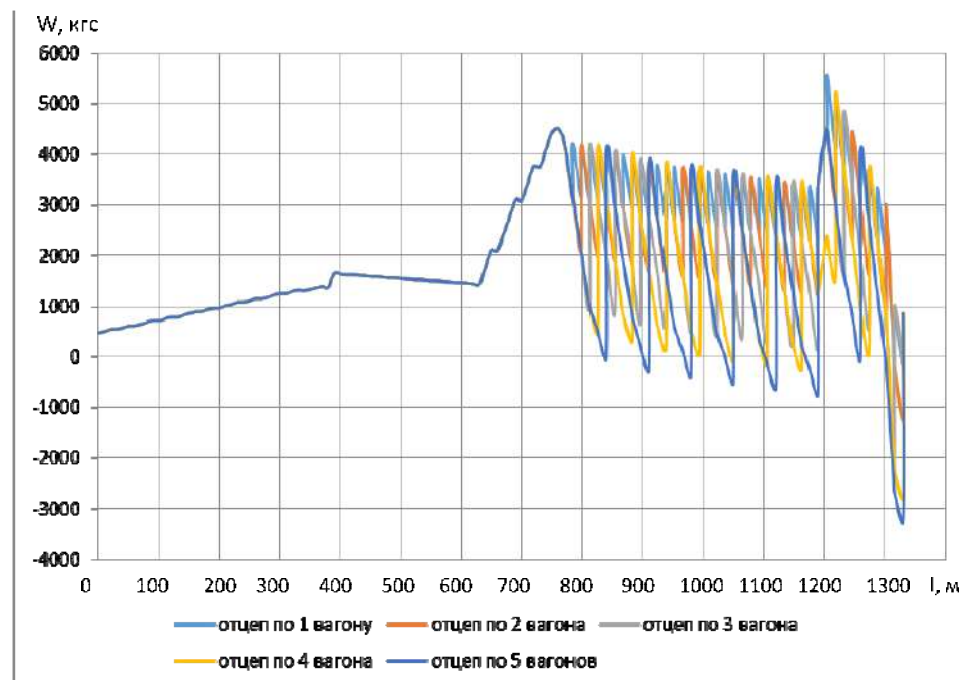


Рисунок 2.16 – Результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 40 порожних вагонов со стороны «больших» путей на горочные пути Г1 и Г2

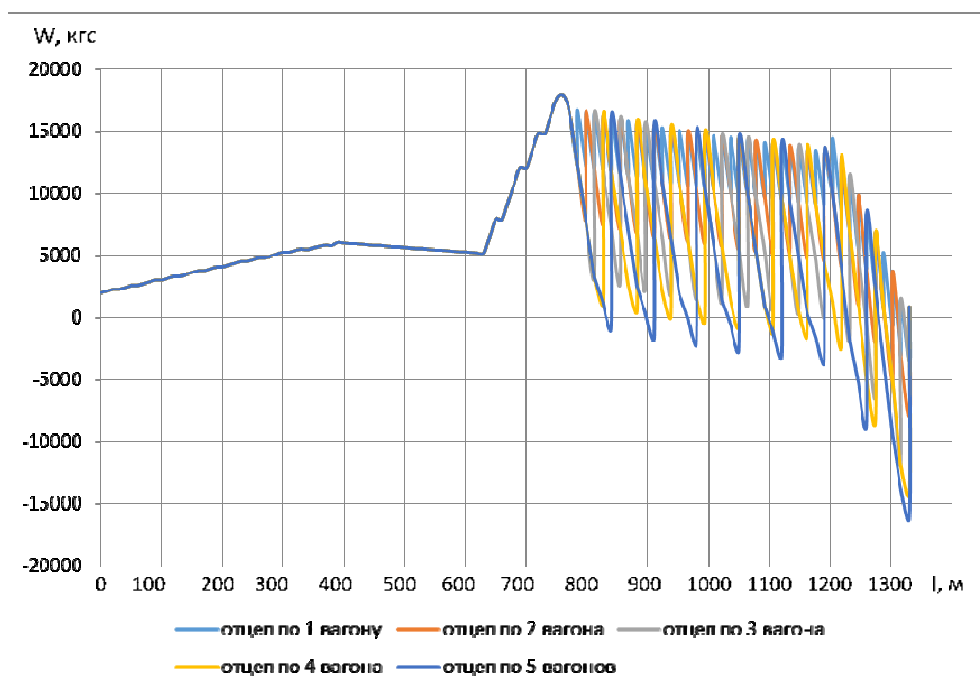


Рисунок 2.17 – Результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 40 груженых вагонов со стороны «больших» путей на горочные пути Г1 и Г2

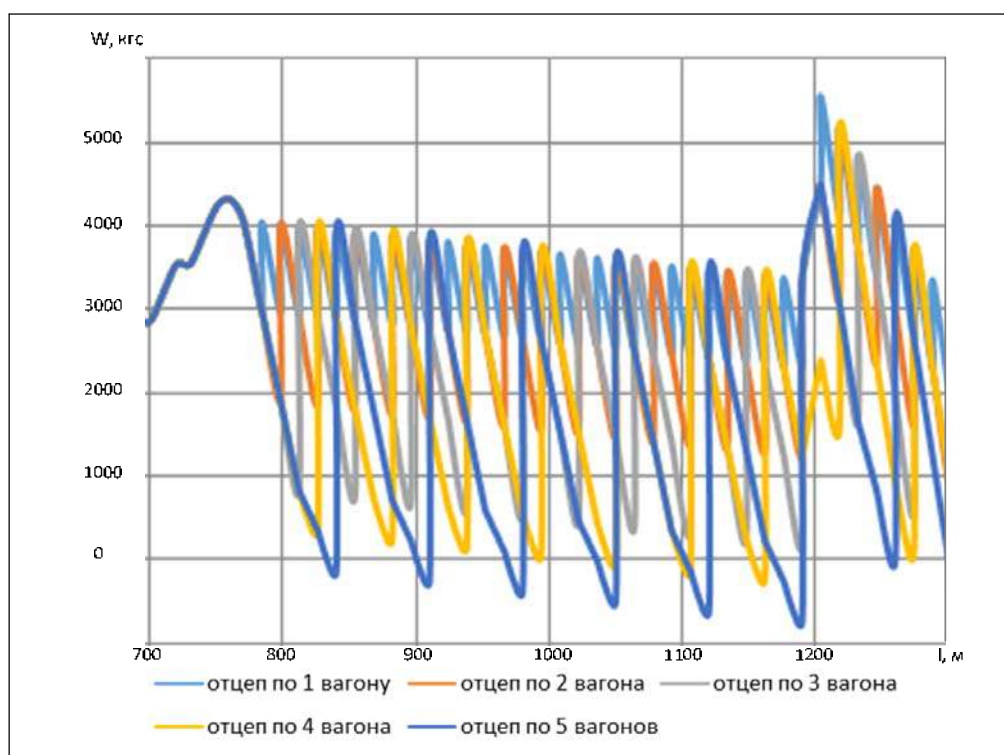


Рисунок 2.18 – Результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 40 порожних вагонов со стороны «больших» путей на горочные пути Г1-Г2 (увеличено для рисунка 2.16)

На рисунках А.1 и А.2 Приложения А приведены результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 70 порожних (вес брутто 24 тс) и

70 груженых (брутто 100 тс) грузовых вагонов со стороны «больших» путей на горочные пути Г3 и Г4 с отцепом группами от 1 до 5 вагонов.

На рисунках А.3 и А.4 Приложения А приведены результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 40 порожних (вес брутто 24 тс) и 40 груженых (брутто 100 тс) грузовых вагонов со стороны «малых» путей на горочные пути Г1 и Г2 с отцепом группами от 1 до 5 вагонов.

На рисунках А.5 и А.6 Приложения А приведены результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 70 порожних (вес брутто 24 тс) и 70 груженых (брутто 100 тс) грузовых вагонов со стороны «малых» путей на горочные пути Г3 и Г4 с отцепом группами от 1 до 5 вагонов.

Из приведенных результатов на рисунках 2.16 – 2.17 и рисунках А.1 – А.6 (Приложения А) можно сделать следующие выводы:

1 Количество одновременно отцепляемых вагонов оказывает наибольшее влияние на изменение силы сопротивления движению от уклона, причем чем больше вагонов в отцепе тем больше одновременное изменение сопротивления от уклона;

2 Наибольшее сопротивление движению от уклона возникает при надвиге состава из 70 груженых вагонов на горочные пути Г3 и Г4 в момент когда первые по ходу движения вагоны достигают переломной точки и составляет порядка 21000 кгс (при надвиге груженого состава из 40 вагонов максимальное сопротивление составляет порядка 18000 кгс), при этом не имеет значения со стороны каких путей осуществляется надвиг;

3 При надвиге состава из порожних вагонов сопротивление движению от уклона составляет около 6000 кгс, причем наибольшей величины сопротивление достигает при въезде локомотива на горочные пути.

2.6 Модель регулятора частоты вращения

Регулятор РЧВ необходим для поддержания заданных оборотов коленчатого вала дизеля, а также ограничения изменения числа оборотов в допустимых

пределах при резко меняющейся нагрузке. Регулятор устанавливается на дизеле и крепится к корпусу топливного насоса высокого давления, и приводится в действие от его кулачкового вала. Регулятор частоты вращения непосредственно управляет подачей топлива, за счет перемещения рейки топливного насоса высокого давления.

Для регулирования частоты вращения дизелей применяются гидромеханические регуляторы, а также регуляторы с электронными системами управления и электрогидравлическими исполнительными устройствами [92].

В качестве регулятора частоты вращения диссертации рассмотрен всережимный гидромеханический регулятор непрерывного действия, применяемый на тепловозе ТЭМ7А.

Особенностью регулятора является наличие второго серводвигателя, предназначенного для обеспечения изодромного характера работы. Динамические качества такого изодрома определяются геометрическими размерами поясков на золотнике и неподвижной втулке. Такой изодром имеет большие переустановочные усилия, что практически исключает чувствительность регулятора к изменению вязкости и загрязненности масла, а также повышает надежность работы регулятора.

Функциональная схема модели РЧВ на базе типового гидромеханического регулятора, реализующего пропорционально – интегральный закон управления, приведена на рисунке 2.19.

Взаимодействие центробежного измерителя и задающего устройства описывается уравнением:

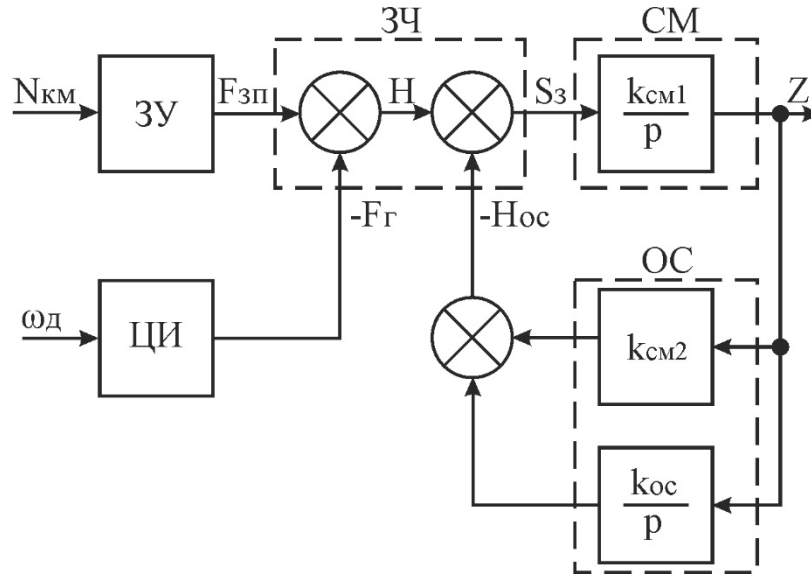
$$H = k_{зу}N_{км} - k_{ци}\omega_d, \quad (2.38)$$

где $N_{км}$ – позиция контроллера машиниста;

$k_{зу}, k_{ци} = 5,417$ – коэффициенты пропорциональности [93, 94];

H – перемещение плунжера золотниковой части регулятора.

Работа золотниковой части регулятора описывается следующей системой уравнений:



ЗУ – задающее устройство; ЦИ – центробежный измеритель; ЗЧ – золотниковая часть; СМ – силовой серводвигатель; ОС – местная корректирующая обратная связь

Рисунок 2.19 – Функциональная схема модели РЧВ

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = k_{см1}(H - H_{ос}), \\ \frac{H_{ос}}{dt} = k_{см2}dz + k_{ос}z. \end{cases} \quad (2.39)$$

где $H_{ос}$ – перемещение подвижной втулки изодромной обратной связи регулятора;

Z – перемещение штока силового сервомотора (мм);

$k_{см1} = 25$, $k_{см2} = 1,1$, $k_{ос} = 0,05$ – коэффициенты пропорциональности, величины которых определены по результатам выполнения пробных расчётов.

2.7 Модель тракта измерения скорости

Структурная схема последовательности моделирования автоматической систему регулирования скорости с учетом измерительного тракта скорости приведена на рисунке 2.20.

Очевидно, что для решения задачи регулирования (поддержания) скорости движения поезда необходима организация обратной связи по регулируемой

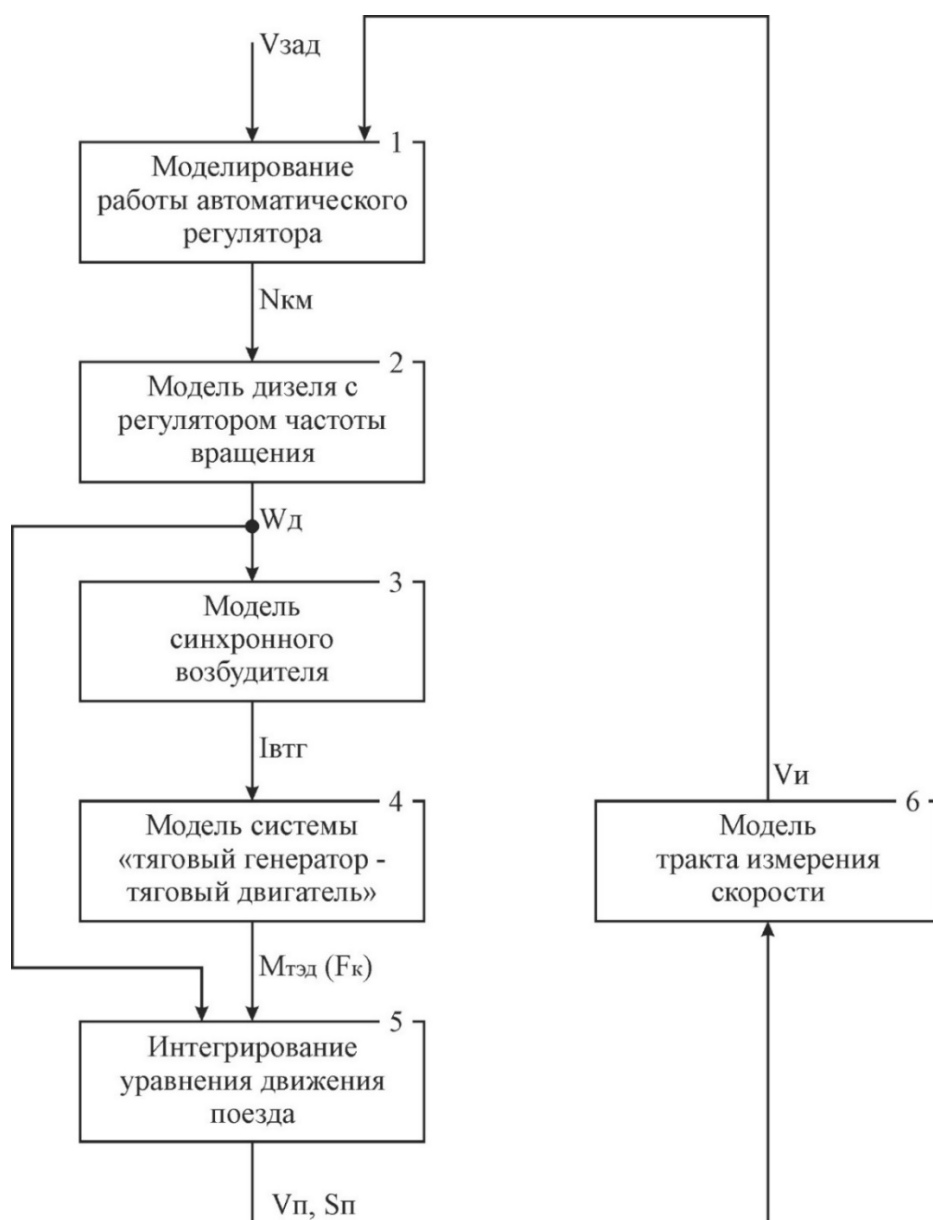


Рисунок 2.20 – Структурная схема моделирования автоматической системы регулирования скорости совместно с трактом измерения скорости

переменной. В настоящее время существует достаточно большое количество датчиков как вращательного, так и поступательного движения. Наибольшее распространение для определения линейной скорости локомотива получили датчики угла поворота устанавливаемые на буксы.

В последние десятилетия в связи с развитием микропроцессорной техники и методов цифровой обработки сигналов получили массовое применение импульсные датчики (энкодеры), генерирующие определенное число электрических импульсов при одном обороте. В работе [58] проведен обзор способов использования таких датчиков для задачи определения скорости.

Рассмотрены варианты использования высокочастотного стабилизированного генератора эталонной частоты (необходим для измерения интервала времени между соседними импульсами), измерения временного промежутка, за которое сгенерировано определенное количество импульсов. Эти способы имеют существенные недостатки – наличие дополнительных устройств и/или переменное время дискретизации (выборки данных). В результате установлено, что для применения таких датчиков в качестве датчиков частоты вращения необходимо организовать подсчет импульсов за единицу времени или сравнивать количество импульсов за соседние промежутки времени или периоды дискретизации.

На рисунке 2.21 показана структурная схема измерительного тракта скорости поезда с применением импульсного датчика.

В первом блоке с передаточной функцией W_1 осуществляется интегрирование фактической скорости поезда V_{Π} , т. е. происходит определение средней скорости движения за определенный (эталонный) временной интервал T :

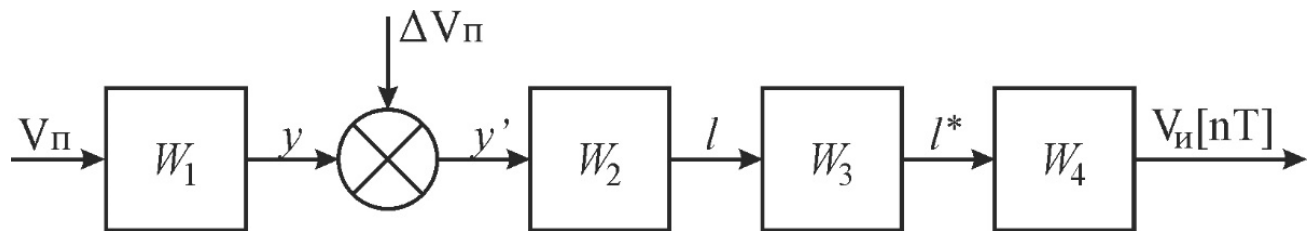


Рисунок 2.21 – Структурная схема канала измерения скорости движения поезда

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V_{\Pi}(t) dt. \quad (2.40)$$

Для учета методической погрешности измерения в систему введен дополнительный сигнал ΔV_{Π} , представляющий собой равномерно распределенную случайную величину, зависящую от количества импульсов Z датчика за один оборот, времени T , радиуса колесной пары с импульсным датчиком по кругу катания R . Отметим, что величина инструментальной погрешности определяется технологическими неточностями при изготовлении датчиков, несоосностью колесных пар и датчиков, разбросом параметров бандажей колесных пар и др.

Элемент с передаточной функцией W_2 выполняет функции дискретизации по уровню (квантования), т. е. определяет целую часть E сигнала $y + \Delta V_n$ на отрезке $2\pi R/zT$:

$$l = E \left\{ \frac{y + \Delta V_n}{\frac{2\pi R}{zT}} \right\} \frac{2\pi R}{zT}. \quad (2.41)$$

Элемент с передаточной функцией W_3 преобразует квантованный сигнал l в последовательность единичных импульсов (δ -функций), образующих решетчатую функцию l^* :

$$l^*(t) = l(t) \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT), \quad (2.42)$$

где n – номер отсчета.

Последний элемент на рисунке 2.24 с передаточной функцией W_4 выполняет задачу восстановления цифрового сигнала $l[nT]$ из решетчатого l^* на следующем отрезке времени $nT \leq t \leq (n+1)T$:

$$V_n[nT] = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} V_n(t) dt + \Delta(t), \quad (2.43)$$

где $|\Delta(t)| \leq \Delta V_{max}$ – максимальная величина статической методической погрешности метода измерения.

Учитывая принцип работы импульсного датчика и процесса обработки сигналов с него, становится очевидным, что период следования импульсов должен быть меньше периода дискретизации T , тогда минимальное значение скорости движения q , определяемое датчиком, находится из выражения:

$$q \geq \frac{2\pi R}{zT}. \quad (2.44)$$

Принимаем число импульсов датчика за один оборот $z = 42$, период дискретизации $T = 1$ с, радиус бандажа по кругу катания $R = 0,525$ м. Тогда из формулы (2.44) вычисляем значение минимальной скорости: $q \approx 0,2826$ км/ч или $q \approx 0,0785$ м/с.

2.8 Выводы по разделу 2

1 На основании алгебраических и дифференциальных уравнений разработано математические модели 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, применение которой позволяет исследовать показатели качества в установившемся и переходном режимах работы.

2 В результате расчета сопротивления движению от уклона установлено, что количество одновременно отцепляемых вагонов оказывает наибольшее влияние на изменение силы сопротивления движению от уклона, причем чем больше вагонов в отцепе, тем больше одновременное изменение сопротивления от уклона; при надвиге состава из порожних вагонов сопротивление движению от уклона составляет около 6000 кгс, причем наибольшей величины сопротивление достигает при въезде локомотива на горочные пути.

3 Разработана функциональная схема системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы, применение которой позволяет осуществлять поддержание заданной скорости с требуемыми показателям качества.

3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ТЕПЛОВОЗА

3.1 Выбор критериев качества регулирования

Система автоматического управления должна удовлетворять ряду требований, основным из которых является требование устойчивости. Помимо устойчивости, система управления должна удовлетворять требованиям к качеству управления в установившемся и переходных режимах работы. Обеспечение устойчивости системы достигается выбором методов коррекции и типом корректирующих звеньев в системе автоматического управления. Решение данной задачи осуществляется эвристическими методами. При выбранной структуре системы управления требуемое качество достигается рациональным выбором параметров системы с использованием принятой совокупности показателей качества управления, при этом выполняется решение задачи параметрического синтеза системы автоматического управления. Таким образом, для решения задачи параметрического синтеза САУ скоростью (рисунок 2.2) необходимо осуществить выбор критериев качества управления.

В теории автоматического управления рассматривают достаточно большое количество критериев качества и методов оценки устойчивости системы. На рисунке 3.1 приведена диаграмма, классифицирующая методы исследования и оценки качества переходных процессов в системе автоматического управления.

Прямой метод основан на численном решении дифференциальных уравнений системы автоматического управления и получении в результате временных зависимостей выходных координат (переходных характеристик), по которым непосредственно и определяются необходимые показатели качества переходного процесса во временной области, при этом в качестве задающего в основном используют типовые единичные воздействия, например, единичный скачок. К показателям, характеризующим качество системы в переходных режимах

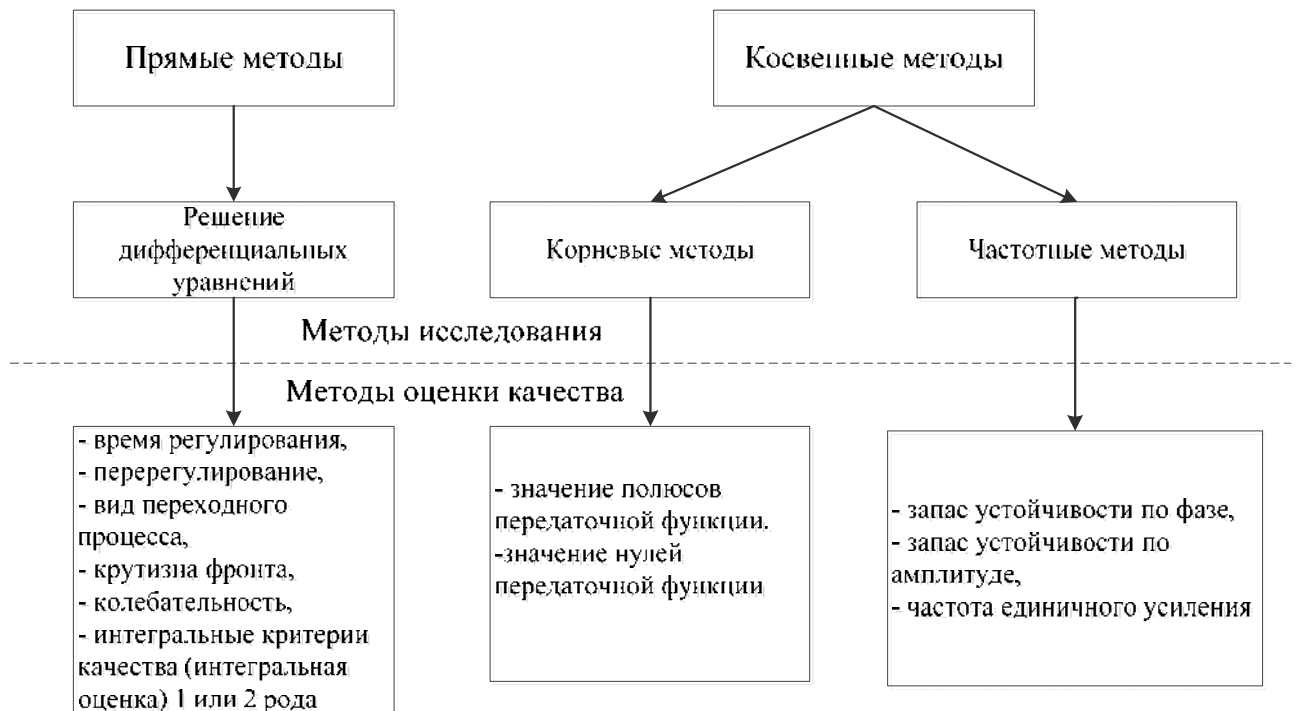


Рисунок 3.1 – Методы исследования и оценки качества переходных процессов

работы, относятся время регулирования, перерегулирование, вид переходного процесса (монотонный, апериодический, колебательный), крутизна переднего фронта переходной функции, колебательность.

Помимо качества в переходных режимах, САУ скоростью должна обеспечивать качество управления и в установившемся режиме работы. Для этого использованы интегральные критерии, основанные на анализе изменения интегрального значения регулируемой переменной во времени, которая одновременно отражает ошибку регулирования координаты в переходном процессе (или колебательность) и время регулирования. При выборе интегральной оценки качества необходимо обеспечить минимально возможное значение критерия качества. Порядок (или род) интегральной оценки определяется в зависимости от характера переходного процесса в части наличия или отсутствия возможных колебаний или перерегулирований.

Величина ошибки в установившемся режиме зависит от суммарного коэффициента усиления системы, а также от порядка астатизма системы автоматического регулирования. В большинстве случаев, при использовании замкнутых систем автоматического управления по отклонению, для увеличения

порядка астатизма необходимо вводить интегральную составляющую в регулятор. Основным критерием качества в установившемся режиме является ошибка в установившемся режиме.

Корневые критерии определяют вид и значения определенных критериев качества переходного процесса в зависимости от взаимного расположения полюсов и нулей передаточной функции системы автоматического управления. Устойчивость определяется расположением полюсов передаточной функции по отношению к мнимой оси. Степень сложности такого метода возрастает при увеличении порядка уравнений и нелинейностей, зачастую получаются физически нереализуемые передаточные функции регуляторов.

Частотные методы предполагают переход из операторной или временной области в частотную, в которой производится синтез передаточной функции регулятора на основании желаемой частотной характеристики (в основном, амплитудной) и частотной характеристики объекта управления (с учетом обратных связей). Преимуществом данного метода является то, что частотные критерии качества переходного процесса фактически совпадают с критериями устойчивости (запасы устойчивости по фазе и амплитуде, частота единичного усиления (при наличии)). Недостатком – определенные трудности при построении логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) нелинейных звеньев и возможность синтеза физически нереализуемой передаточной функции регулятора.

Анализ работы маневровых тепловозов в горочном режиме, проведенный в первом разделе, показал, что для повышения эффективности работы сортировочных станций системы автоматического управления скоростью должны решать следующие наиболее существенные задачи:

- точность поддержания скорости в заданном диапазоне ее изменения, причем с уменьшением скорости точность необходимо увеличивать;
- ограничение ускорения в режимах надвига и роспуска как по минимальному, так и по максимальному значениям;

– обеспечение аperiodического характера переходного процесса по скорости.

Очевидно, что задача ограничения ускорения в переходных режимах (применительно к системе управления – это крутизна фронта переходной характеристики) в первую очередь должна решаться посредством плавного (линейного или S -образного) формирования переходной характеристики с помощью задатчика интенсивности, т.к. при его отсутствии ускорение будет являться функцией массы (или момента инерции) поезда и параметров регулятора.

Точность поддержания скорости определяется типом и параметрами регулятора скорости, по сути, является главным критерием качества переходного процесса. Противоречие в выборе параметров регулятора скорости в данном случае обуславливается наличием дополнительных требований по быстродействию и характеру переходного процесса – увеличение пропорциональной составляющей регулятора приводит к уменьшению ошибки и повышению колебательности переходной характеристики с одновременным увеличением интенсивности изменения скорости в режимах надвига и роспуска; введение интегральной составляющей повышает порядок астатизма, что повышает качество САУ в установившемся режиме работы, но одновременно с этим влияет на интенсивность нарастания (уменьшения) скорости в режимах надвига и роспуска.

Таким образом, в качестве критериев качества при решении задачи параметрического синтеза системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза следует принять установившуюся ошибку вид переходного процесса, который должен быть монотонным или аperiodическим.

3.2 Разработка алгоритмов работы регуляторов напряжения и мощности

Для реализации требуемого качества регулирования скорости в переходных процессах маневрового тепловоза необходимо учитывать особенности технической реализации основных элементов энергетической цепи. Основными исполнительными устройствами в структуре системы автоматического управления

скоростью (рисунки 2.1 и 2.2) является дизель-генераторная установка, для обеспечения нормальных режимов работы которой необходимы регулятор мощности дизеля и регулятор напряжения генератора.

Регулятор напряжения является подчиненным контуру регулирования скорости тепловоза и мощности тягового генератора алгоритм работы регулятора напряжения приведён на рисунке 3.2.

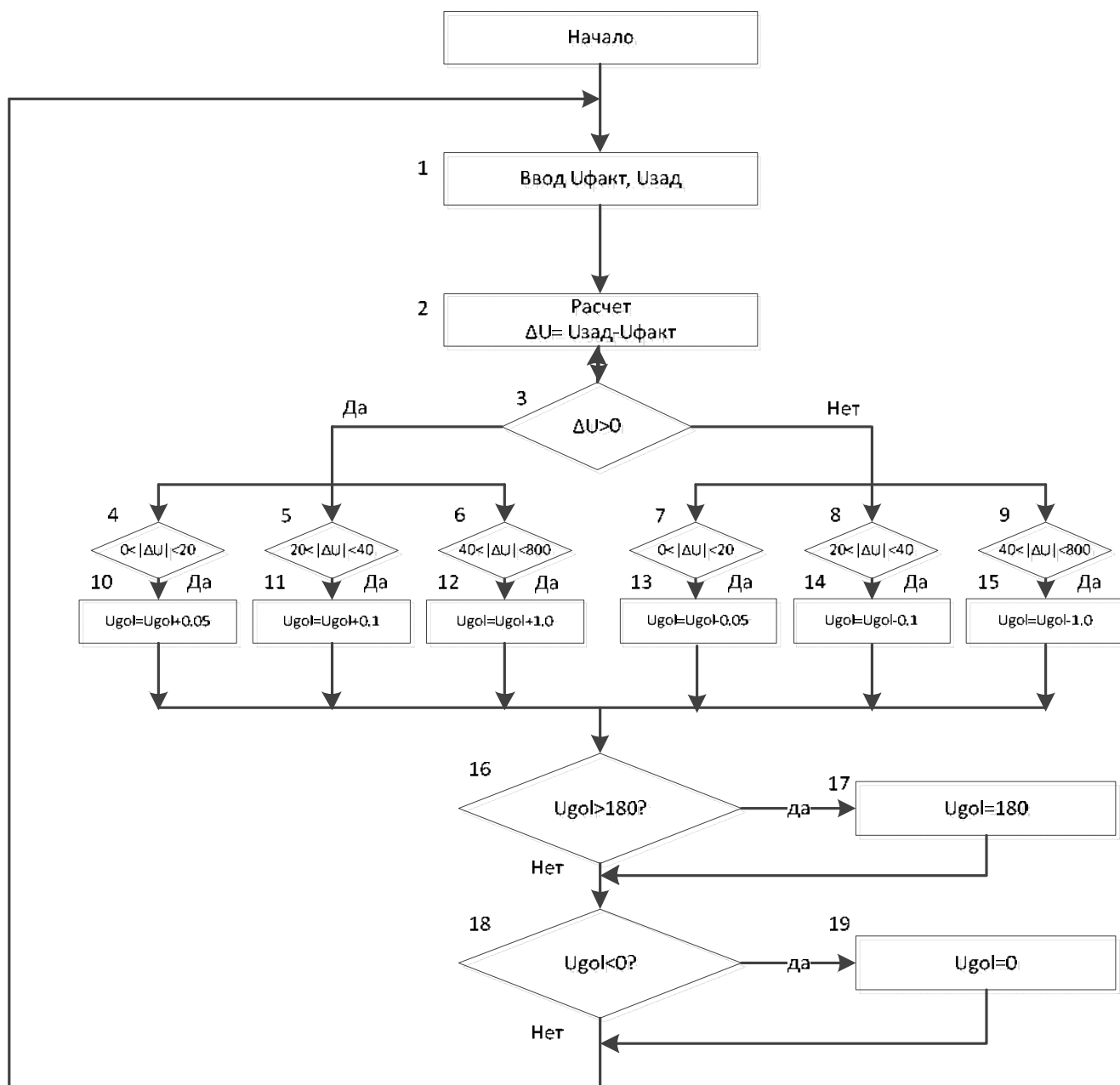


Рисунок 3.2 – Блок схема алгоритма работы регулятора напряжения

На первом шаге в блоке 1 осуществляется ввод фактического и заданного значений напряжения тягового генератора. Далее, в блоке 2 определяется величина

рассогласования ΔU между заданным и фактическим значением напряжения. По значению ΔU осуществляется регулирование напряжения через задание угла открытия тиристоров. При этом блоки 4 – 15 обеспечивают изменение темпа приращения заданного угла открытия тиристоров. Блоки 16, 18 ограничивают угол открытия тиристоров.

Основная задача регулятора мощности – выбор позиции контроллера машиниста, соблюдение ограничений тягового генератора по току, напряжению и мощности в зависимости от заданной позиции контроллера машиниста. При этом регулятор напряжения является подчинённым звеном регулятора скорости. Алгоритм работы регулятора мощности приведен на рисунке 3.3.

Блок 1 предназначен для ввода текущей позиции контроллера машиниста $N_{км}$, количества тяговых двигателей $N_{тэд}$, фактических значений частоты вращения коленчатого вала дизеля W_d , напряжения тягового генератора $U_{тг}$ и тока силовой цепи $I_{сц}$. В блоке 3 производится выбор ограничений в соответствии с установленными значениями. Блоки 5 – 7 предназначены для выявления признака превышения максимального значения напряжения тягового генератора, в случае если заданное значение превышает максимальное значение, заданное значение напряжения приравнивается к максимальному значению напряжения на данной позиции контроллера машиниста. Блоки 8 – 10 предназначены для выявления признака превышения максимального тока силовой цепи, в случае если ток превышает максимальное значение, заданное значение напряжения уменьшается. В блоке 12 проводится оценка ускорения локомотива и при необходимости в блоках 13 – 16 осуществляется корректировка заданной позиции контроллера машиниста. В блоках 2 и 4 проверяется заданное значение напряжения и в случае, если оно меньше нуля, значение заданного напряжения приравнивается к нулю.

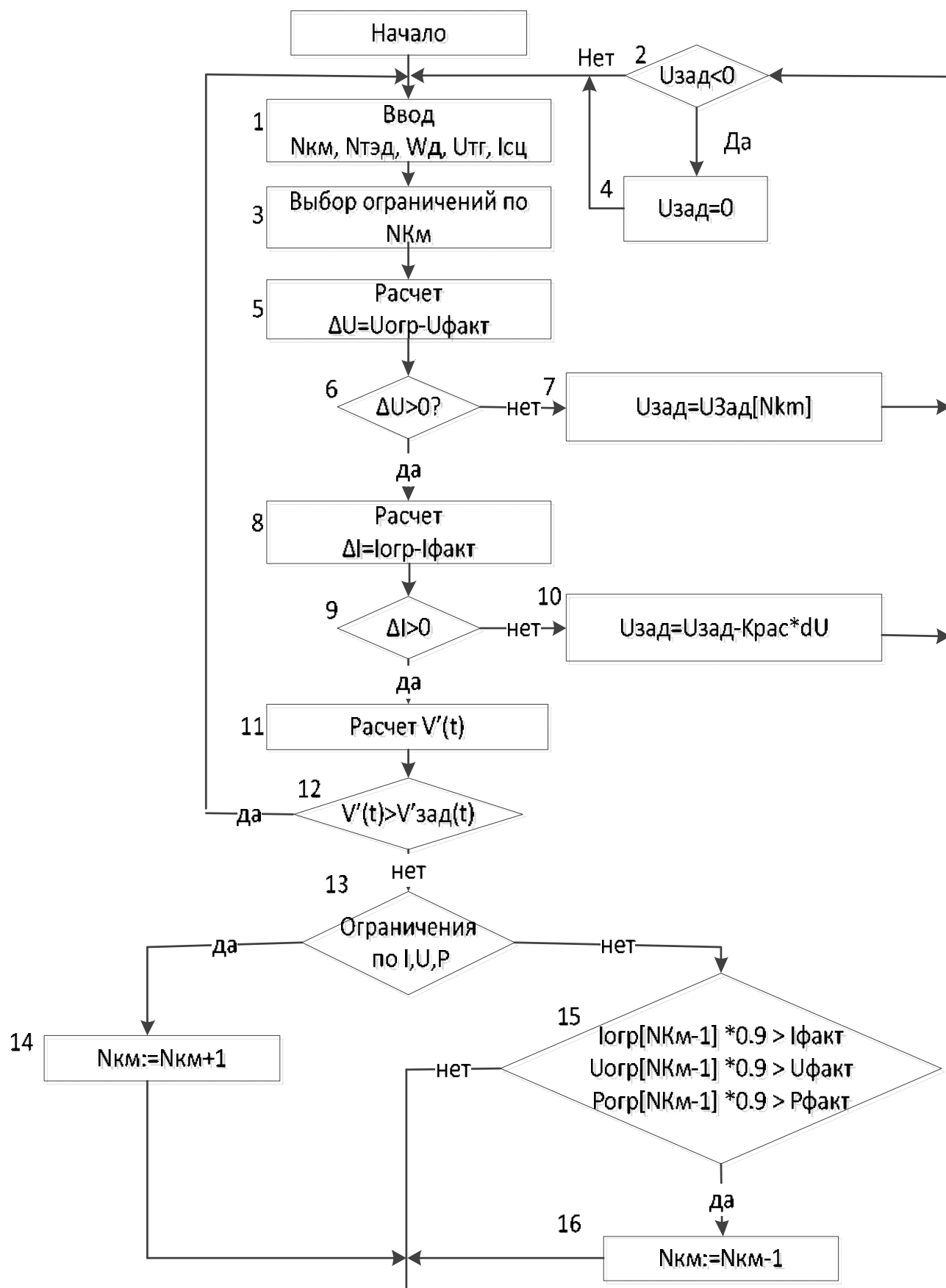


Рисунок 3.3 – Блок схема алгоритма работы регулятора мощности

3.3 Пробные расчёты переходных процессов в системе автоматического управления скоростью

Учитывая, наличие большого количества переменных параметров системы управления, в том числе объекта управления, в САУ применён адаптивный регулятор скорости (рисунок 1.16). Предложенное решение [95] по своей сути является поисковым методом решения задачи, в основу этого метода положен принцип самонастраивающейся системы, в котором пробный сигнал (коэффициент) изменяется ступенчато. Для упрощения реализации данного регулятора в режиме реального времени в качестве критерия оптимизации была выбрана ошибка регулирования. Некоторые результаты его применения приведены на рисунках 3.4 – 3.9.

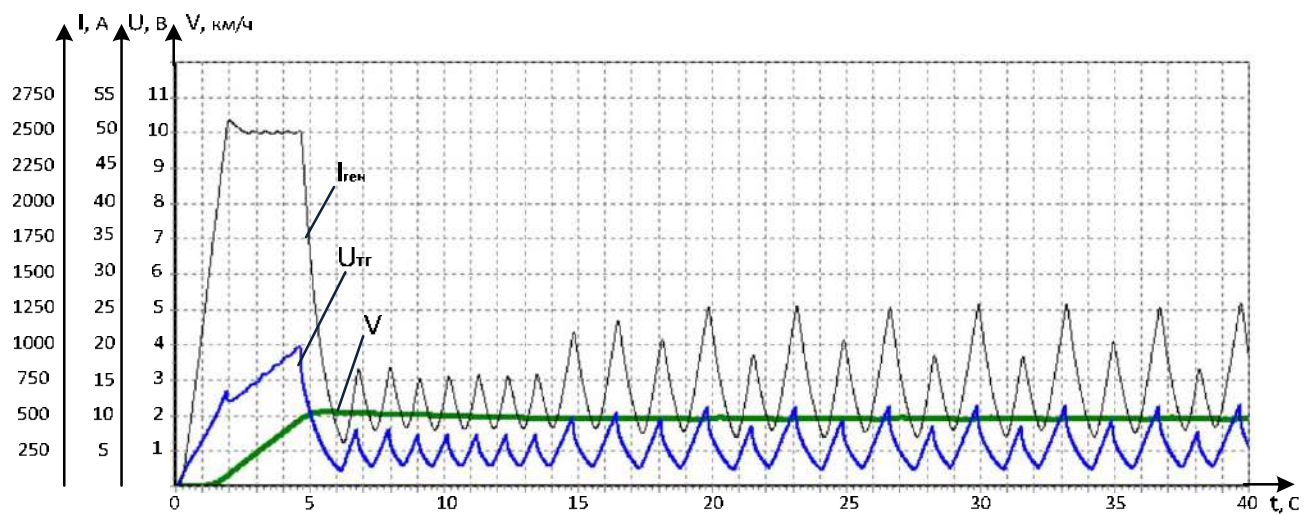


Рисунок 3.4 – Результаты моделирования при надвиге 40 порожних вагонов (4-осных) с заданной скоростью 2 км/ч

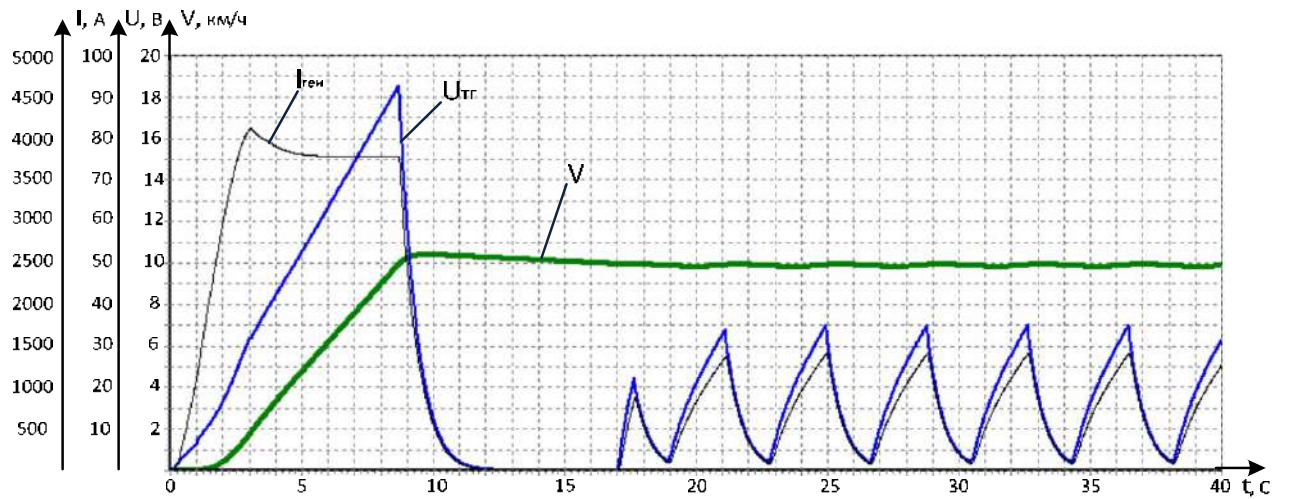


Рисунок 3.5 – Результаты моделирования при надвиге 40 порожних вагонов (4-осных) с заданной скоростью 10 км/ч

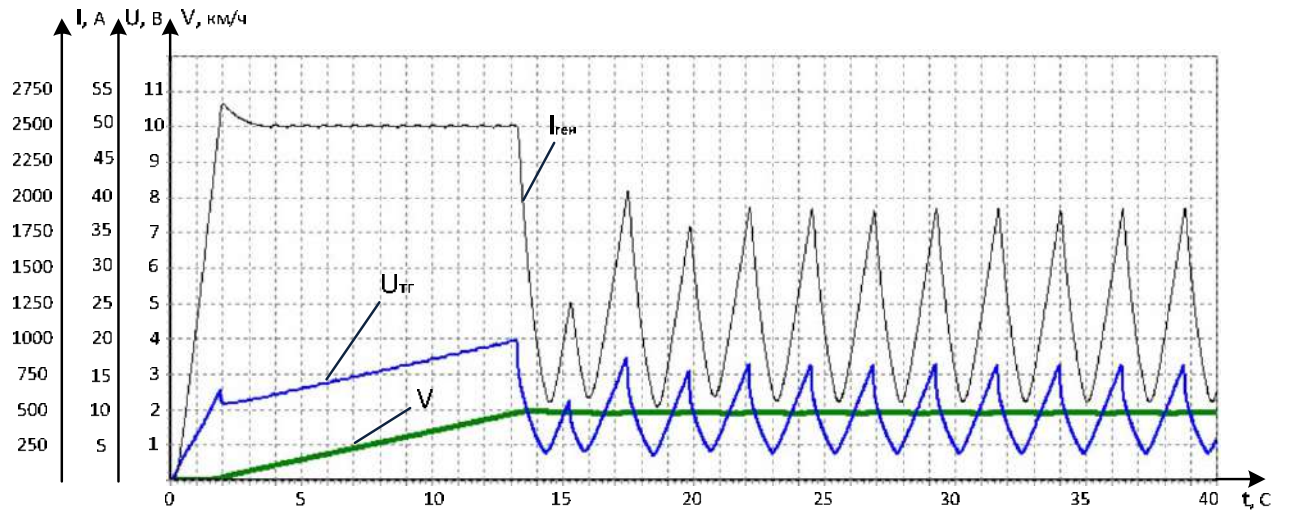


Рисунок 3.6 – Результаты моделирования при надвиге 40 гружёных вагонов (4-осных) с заданной скоростью 2 км/ч

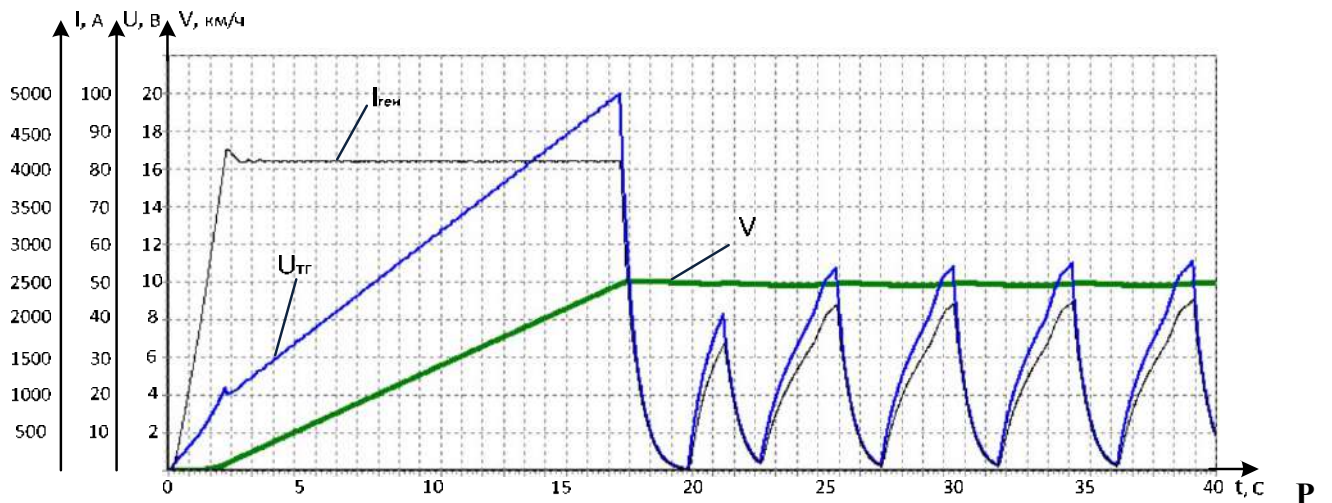


Рисунок 3.7 – Результаты моделирования при надвиге 40 гружёных вагонов (4-осных) с заданной скоростью 10 км/ч

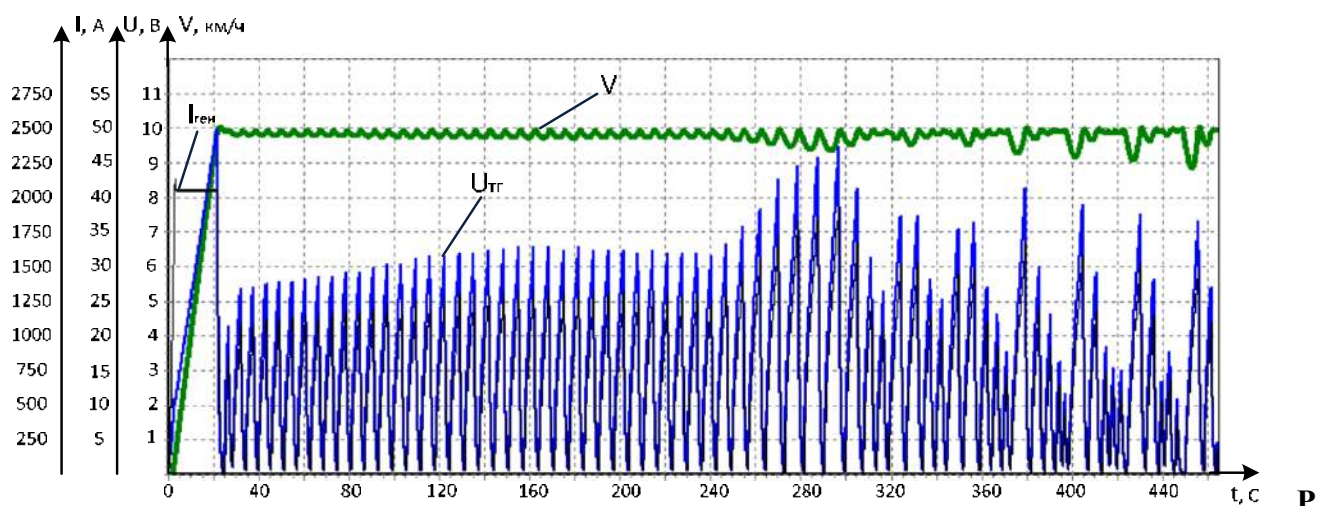


Рисунок 3.8 – Результаты моделирования при движении 40 гружённых вагонов (4-осных) с последующим роспуском с заданной скоростью 10 км/ч

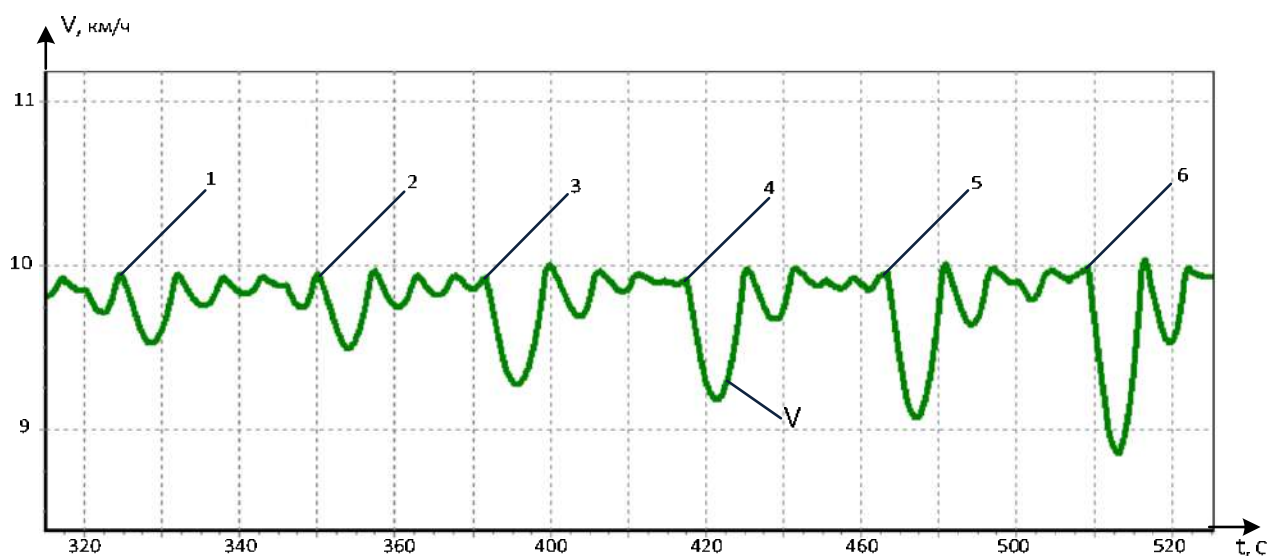


Рисунок 3.9 – Моменты отцепов при роспуске состава (1, 2, 3, 4, 5, 6) (увеличено для рисунка 3.8)

На рисунках 3.4, 3.5 представлены результаты моделирования при движении 40 порожних вагонов с различными скоростями без отцепов вагонов от состава.

На рисунках 3.6, 3.7 представлены результаты моделирования при движении 40 гружённых вагонов с различными скоростями без отцепов вагонов от состава.

На рисунке 3.8 представлены результаты моделирования движения 40 гружённых вагонов, с последующим роспуском всего состава отцепами по 5 вагонов, заданная скорость движения 10 км/ч. На рисунке 3.9 отмечены моменты отцепов вагонов от состава.

Как видно из результатов моделирования, синтезированный регулятор скорости справляется со своей задачей по поддержанию заданного значения скорости с ошибкой, не превышающей 0,18 км/ч, причем увеличение веса состава вызывает увеличение этой ошибки. Увеличение веса состава также приводит к уменьшению колебательности переходного процесса, что выражается в уменьшении перерегулирования при том же самом весе состава и скорости надвига, при некоторых условиях переходный процесс становится аperiodическим. Сама колебательность при этом является невысокой при всех скоростях надвига, и показатель колебательности m , показывающий количество максимумов (минимумов) отклонений значений функций с учетом 5 % коридора, равен нулю. При роспуске состава возникают колебательные процессы (рисунки 3.6, 3.7), обусловленные изменением его веса, что находит свое отражение в высоких значениях величины перерегулирования. Демпфированию колебаний не способствует наличие адаптивного регулятора, поскольку его поисковый принцип подразумевает достаточно длительное время реакции, что приводит к развитию колебательных процессов. В установившемся режиме работы регулятор отрабатывает величину задания по скорости с требуемой точностью, уменьшая ошибку с уменьшением количества вагонов. Время регулирования скорости при наличии контура регулирования тока определяется исключительно величиной уставки максимального тока, при одинаковых значениях уставки увеличение веса состава вызывает увеличение времени регулирования.

Таким образом, адаптивный регулятор скорости, синтезированный на поисковом принципе, неудовлетворительно отрабатывает процесс роспуска состава, допуская колебательные переходные процессы за счет постоянного изменения величины пропорциональной составляющей регулятора в процессе работы.

Для устранения указанных недостатков было рассмотрено применение пропорционально-интегрального регулятора с передаточной функцией:

$$W_{pc}(p) = K_p + \frac{K_i}{p}, \quad (3.1)$$

где K_p и K_i – коэффициент при пропорциональной и интегральной частях регулятора соответственно.

На рисунке 3.10 приведены графики переходных процессов в контуре скорости при применении ПИ-регулятора скорости.

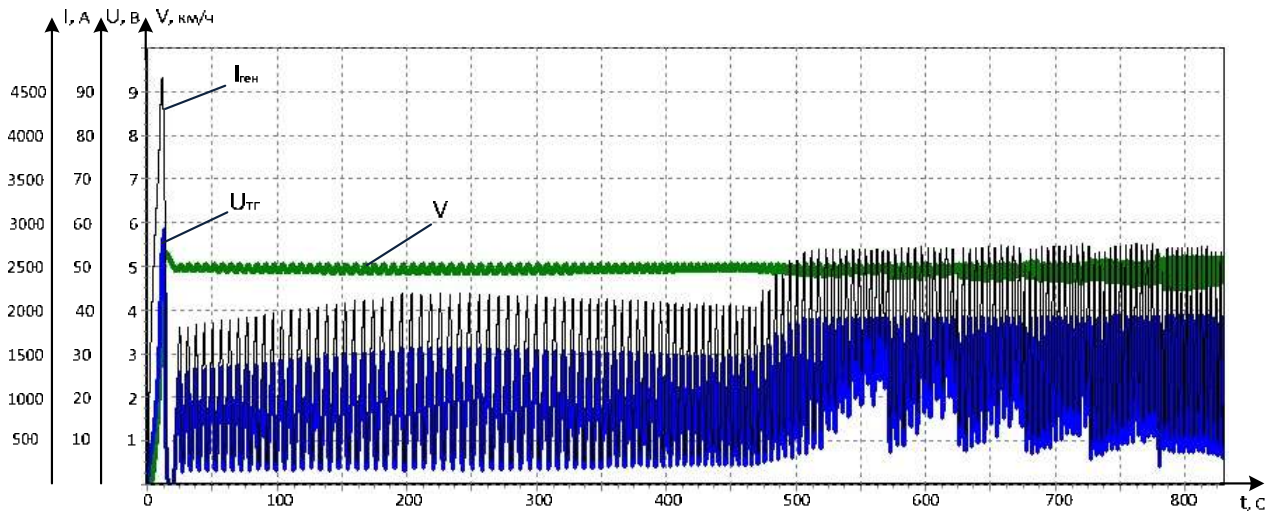


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования при надвиге 30 гружённых вагонов (4-осных) с последующим роспуском с заданной скоростью 5 км/ч

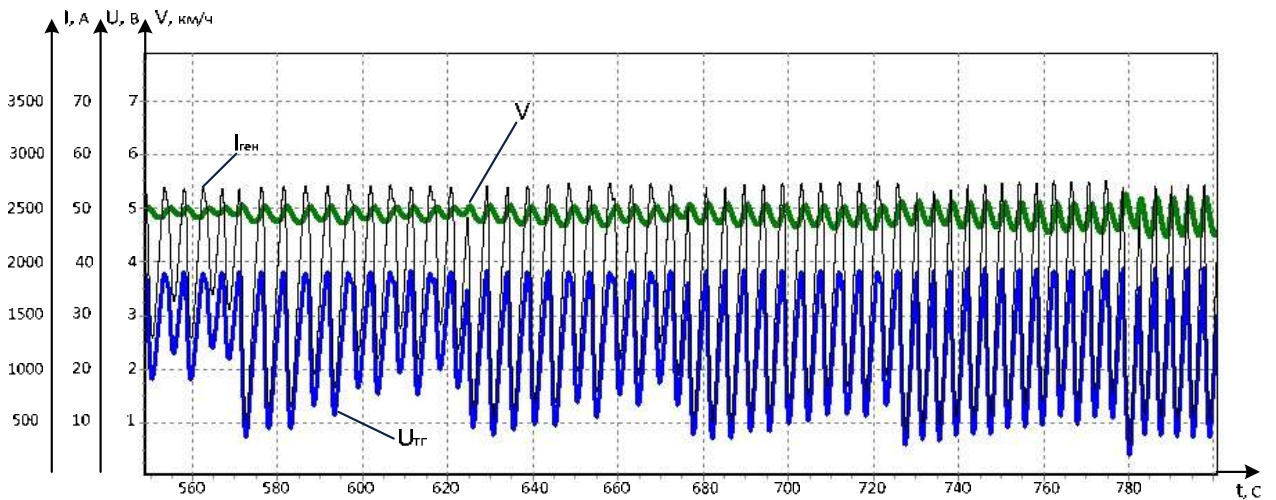


Рисунок 3.11 – Моменты отцепов при роспуске состава (увеличено для рисунка 3.10)

Параметры регулятора скорости выбраны в результате решения задачи синтеза методом логарифмических амплитудно-частотных характеристик системы, линеаризованной в рассматриваемой точке для состава 2400 т, и составили $K_p = 200$ и $K_i = 0,0045$.

Как видно из графика, величина перерегулирования по скорости при надвиге составляет $\sigma = 11 \%$, также присутствует существенная колебательность по скорости при роспуске состава (амплитуда колебаний превышает 20 % от установившегося значения) что является неудовлетворительным.

3.4 Выбор параметров регулятора скорости методом однокритериальной оптимизации

Для разрешения противоречий при синтезе систем автоматического управления необходимо применять методы одно- или многокритериальной оптимизации с введением целевой функции, описывающей условия компромисса (для многокритериальной оптимизации) или выделять один основной критерий оптимизации, по которому и проводить синтез регулятора (для однокритериальной оптимизации).

При решении как многокритериальной, так и однокритериальной задачи оптимизации широкое применение находят методы динамического программирования, симплексные методы, методы Нелдера-Мида и ряда других. Так, имеется значительный опыт решения задачи параметрического синтеза с использованием метода оптимизации Нелдера-Мида [59, 96]. В данных работах с использованием этого метода решалась задача многокритериальной оптимизации по критериям времени регулирования и плавности хода [96], или времени регулирования и перерегулирование [59].

Аналогичный метод был применен и в работе [97], где была «решена задача синтеза регулятора скорости грузового поезда с распределенной тягой; в качестве критериев оптимизации были выбраны время регулирования, величина максимальной действующей в поезде продольной динамической силы, сумма накопленных усталостных напряжений и коэффициент устойчивости вагона против схода с рельсов» [97]. В этих рассмотренных случаях [59, 96, 97] выполнялась минимизация целевой функции, описывающей условия компромисса между разнородными показателями качества.

Особенностью рассматриваемых динамических систем является то, что рациональные с точки зрения выбранной системы оценки качества параметры законов управления находятся в зависимости от параметров объекта управления и возмущающих параметров, которые в случае с регулированием скорости зависят

от массы состава, количества вагонов, начальных условий, собственно скорости движения и т.д.

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, для оценки качества управления принято решение использовать интегральную оценку второго рода:

$$I_2 = \int_0^{\infty} (V(\infty) - V(t))^2 dt, \quad (3.2)$$

или в дискретном виде:

$$I_2 = \sum_0^{t_{\text{пп}}} (V(t_{\text{пп}}) - V_i)^2, \quad (3.3)$$

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

Интегральная оценка второго рода позволяет оценить в комплексе быстродействие, колебательность и величину установившейся ошибки для всех типов переходного процесса (монотонный, апериодический, колебательный). Постоянное значение этого параметра в установившемся режиме работы говорит о нулевой ошибке, что полностью отвечает необходимым требованиям.

Результаты исследований переходных процессов в предыдущем подразделе показали, что ПИ-регулятор обеспечивает нулевую статическую ошибку при постоянном возмущении, поэтому регулятор с такой структурой принят за базовый. Для выбора оптимального значения параметров регулятора был применен одномерный метод оптимизации Монте-Карло. Суть метода пояснена ниже.

1 Принять первый шаг расчета $k = 1$. Генерировать с помощью генераторов случайных чисел значения параметров ПИ-регулятора скорости, равномерно расположенные в диапазоне $[K_{p.min}; K_{p.max}]$ и $[K_{i.min}; K_{i.max}]$ для пропорциональной K_p и интегральной K_i составляющих соответственно.

2 Выполнить моделирование системы управления по уравнениям (2.1) – (2.24), (2.38), (2.41), (2.45) со сгенерированными в п. 1 значениями параметров

регулятора скорости. Вычислить значение интегральной оценки I_2 (3.3). Принять $I_2 = I_{2.min}$.

3 Принять $k = 2$.

4 Аналогично п. 1 генерировать случайные значения параметров регулятора.

5 Аналогично п. 2 выполнить моделирование системы управления по уравнениям (2.1) – (2.24), (2.38), (2.41), (2.45) со сгенерированными в п. 3 значениями параметров регулятора скорости. Вычислить значение интегральной оценки I_{2k} (3.3).

6 Если $I_{2k} < I_{2.min}$, то принять $I_{2k} = I_{2.min}$.

7 Если $k < N$, то выполнить инкремент шага $k = k + 1$ и выполнить переход на п. 4.

После N итераций определить значения $K_{p.опт}$ и $K_{i.опт}$, обеспечивающие минимальное значение интегральной оценки $I_{2.min}$. При достаточно большом количестве расчетов метод Монте-Карло гарантирует нахождение глобального минимума с высокой достоверностью. Для повышения качества управления целесообразно подобные расчеты провести для различных масс поездов и профилей пути, что, учитывая специфику работы на сортировочных горках, не потребует значительных затрат времени и ресурсов. Это позволит адаптировать систему управления к изменениям возмущающих воздействий в широком диапазоне.

При расчете были приняты следующие начальные данные: $K_{p.min} = 1$, $K_{p.max} = 100$, $K_{i.min} = 0,001$, $K_{i.max} = 0,01$, $N = 100$.

Результаты вычисления интегральной оценки для различных масс поездов приведены далее. На рисунке 3.12 представлена зависимость интегральной оценки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поездов массой от 0 до 1000 т. На рисунке 3.13 представлена зависимость интегральной оценки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поездов массой от 1000 до 2000 т. На рисунке 3.14 представлена зависимость интегральной оценки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поездов массой от 2000 до 3000 т. На рисунке 3.15 представлена зависимость интегральной оценки второго

рода от значений параметров регулятора скорости для поездов массой от 3000 до 4000 т. На рисунке 3.16 представлена зависимость интегральной оценки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поездов массой от 4000 до 5000 т. На рисунке 3.17 представлена зависимость интегральной оценки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поездов массой от 5000 т и выше.

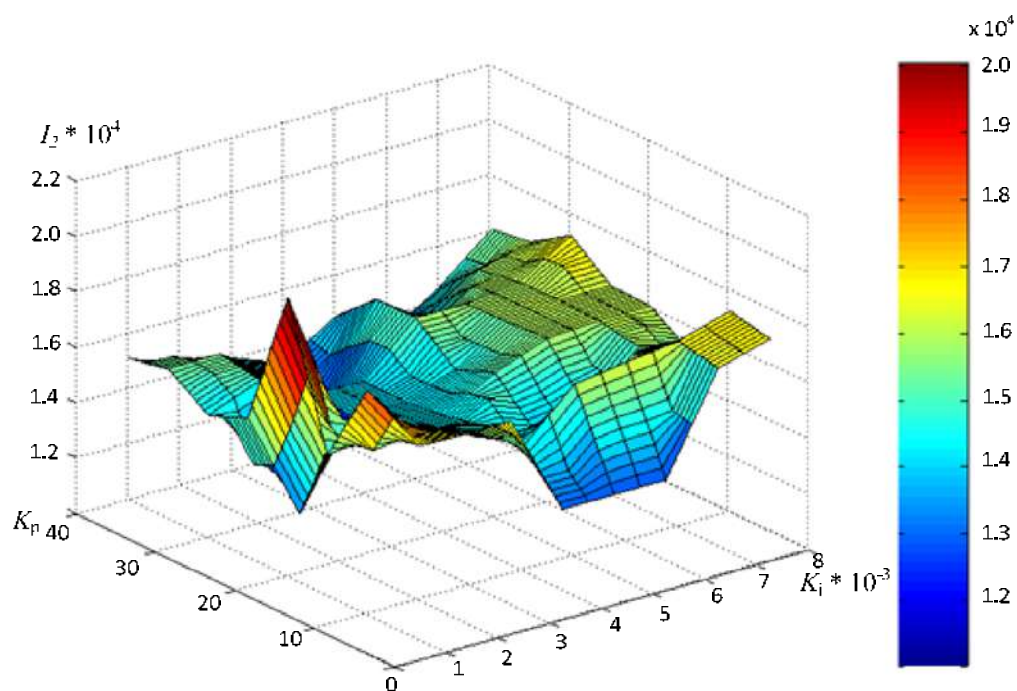


Рисунок 3.12 – Зависимость интегральной ошибки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поезда массой 800 т (20 вагонов по 40 тонн)

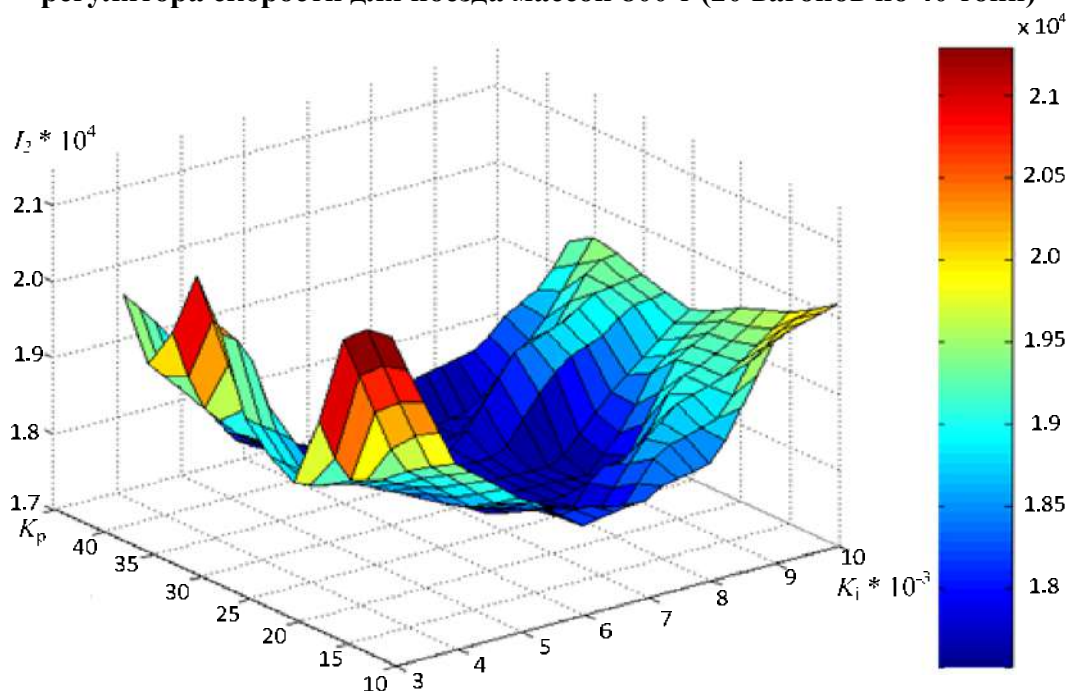


Рисунок 3.13 – Зависимость интегральной ошибки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поезда массой 1600 т (20 вагонов по 80 тонн)

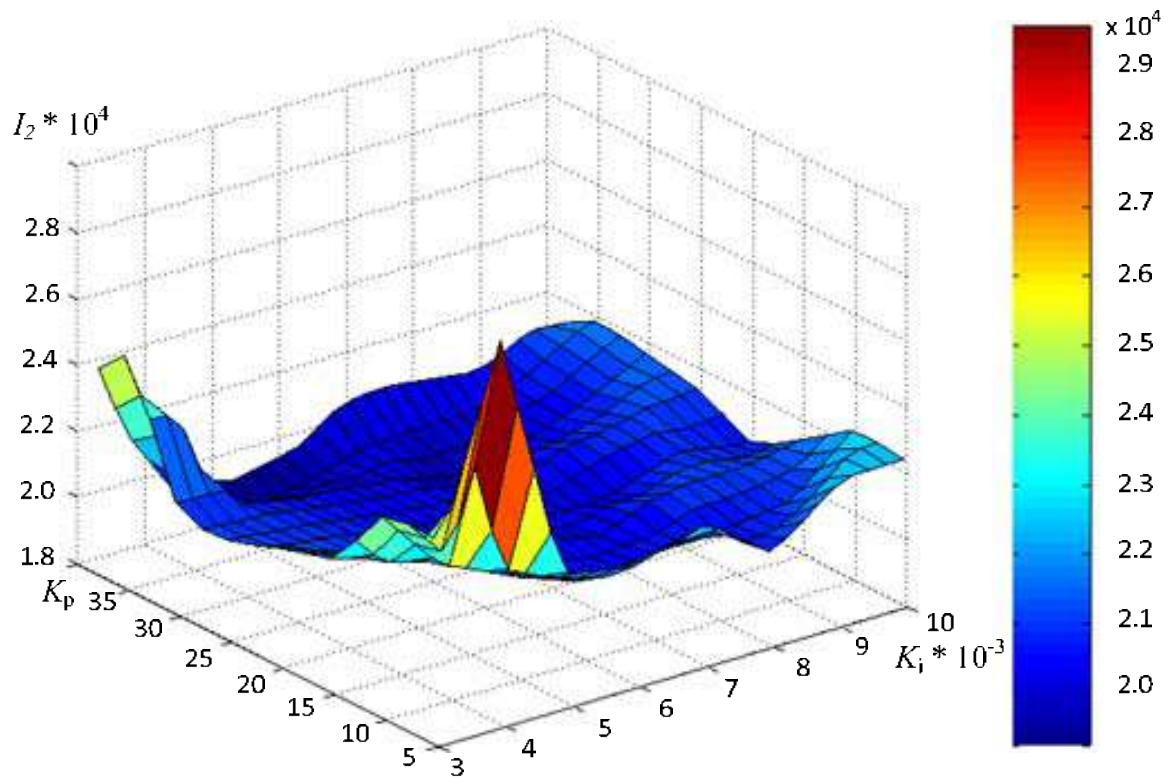


Рисунок 3.14 – Зависимость интегральной ошибки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поезда массой 2400 т (30 вагонов по 80 тонн)

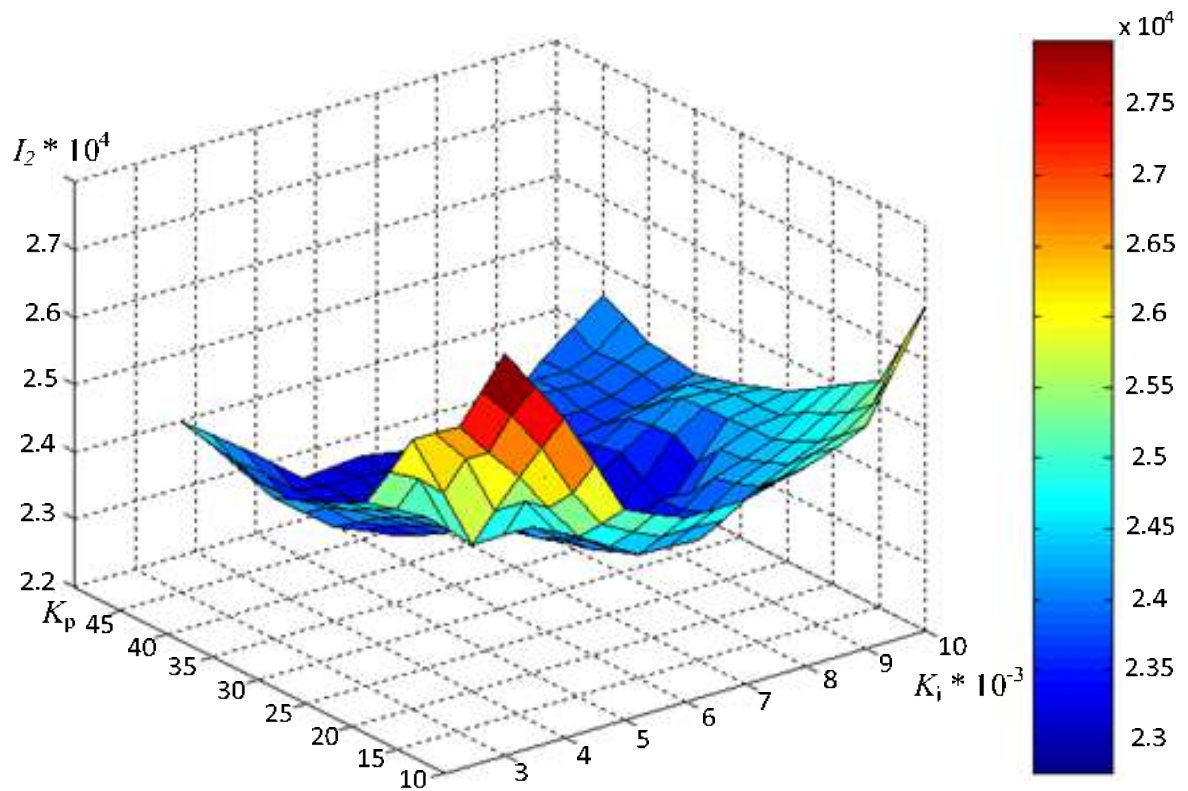


Рисунок 3.15 – Зависимость интегральной ошибки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поезда массой 3600 т (45 вагонов по 80 тонн)

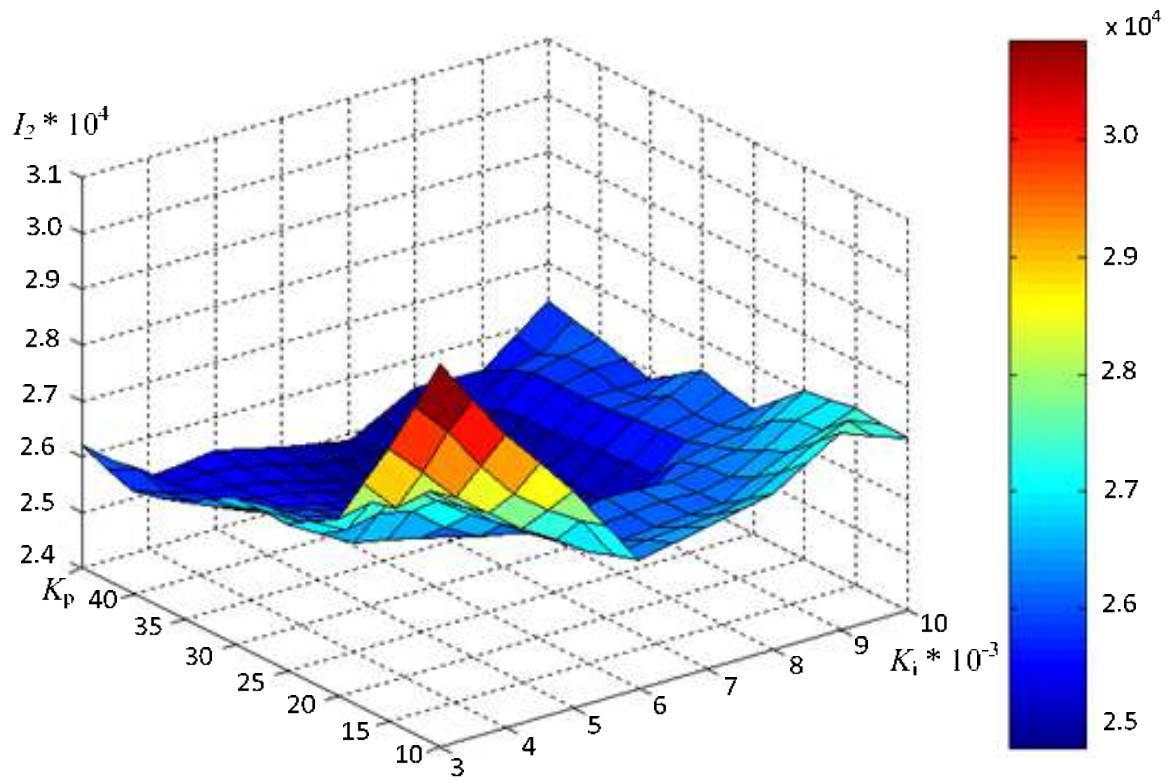


Рисунок 3.16 – Зависимость интегральной ошибки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поезда массой 4800 т (60 вагонов по 80 тонн)

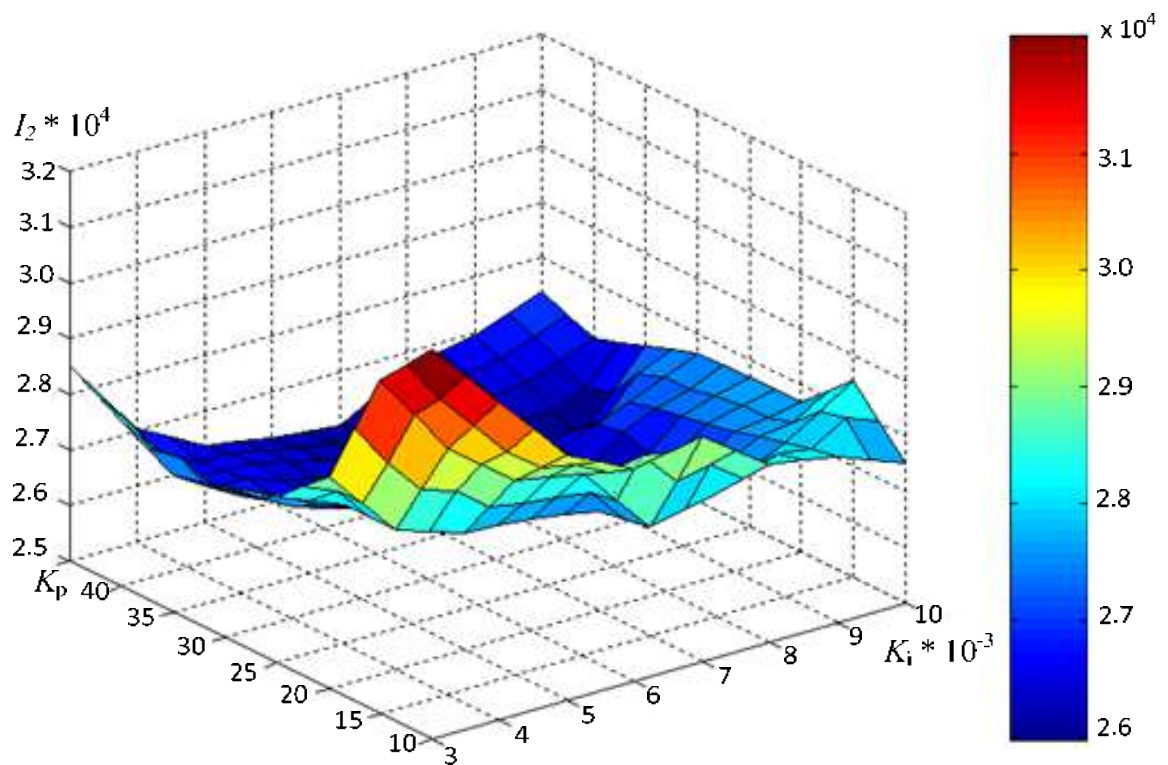


Рисунок 3.17 – Зависимость интегральной ошибки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поезда массой 5600 т (70 вагонов по 80 тонн)

В результате расчета были определены параметры системы управления, приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры системы автоматического управления скорости, полученные в результате оптимизации

Параметры поезда	$K_{p.опт}$	$K_{i.опт}$	$I_{2.min}$
20 вагонов по 40 тонн (800 т)	9,7	0,005	11012,1
20 вагонов по 80 тонн (1600 т)	30,7	0,0077	17478,8
30 вагонов по 80 тонн (2400 т)	15,5	0,0089	19140,7
45 вагонов по 80 тонн (3600 т)	27,4	0,0079	22776,4
60 вагонов по 80 тонн (4800 т)	32,6	0,0091	24814,3
70 вагонов по 80 тонн (5600 т)	34,2	0,0083	25975,2

Анализ результатов моделирования показывает, что для каждого из рассмотренных вариантов состава и диапазона изменения значений параметров регулятора существует оптимальное (минимальное) значение интегральной оценки. Данный результат позволяет использовать предложенный подход для синтеза систем автоматического управления скоростью маневрового тепловоза. Исходными данными для синтеза в этом случае являются основные параметры элементов энергетической цепи, а также масса поезда.

Предлагаемый алгоритм работы регулятора скорости приведен на рисунке 3.18. В блоке 1 система автоматического управления скоростью получает от систем верхнего уровня заданную скорость ($V_{зад}$), массу поезда ($m_{поезд}$), ступень торможения ($ST_{торм}$), 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 ступень торможения от системы верхнего уровня. При заданной ступени 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

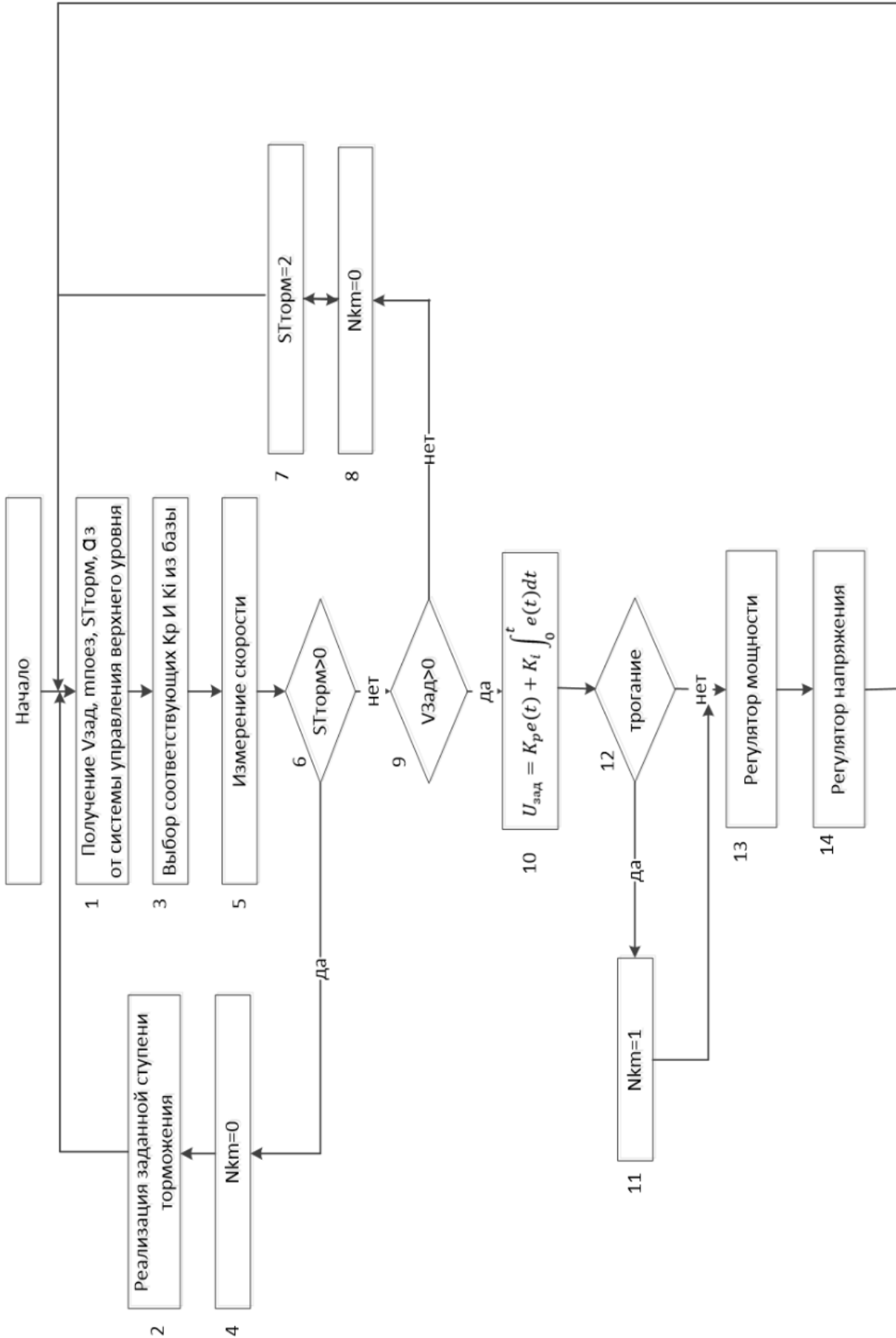


Рисунок 3.18 – Блок схема алгоритма управления тепловозом в режиме поддержания скорости

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.

3.5 Результаты моделирования переходных процессов с использованием найденных в результате оптимизации параметрами

Была выполнена серия расчётов по имитационному моделированию системы автоматического управления для различных вариантов профилей сортировочных путей, расстояний до горба горки (от 200 до 770 м), масс состава (от 800 до 6400 т), количества вагонов (от 20 до 80), диапазон заданий скорости принимался от 2 до 10 км/ч. Для примера некоторые результаты моделирования разработанной системы с использованием найденных в результате оптимизации параметрами регулятора скорости для тепловоза типа ТЭМ7А показаны на рисунках 3.19 – 3.22 и рисунках Б.1 – Б.8 (Приложения Б).

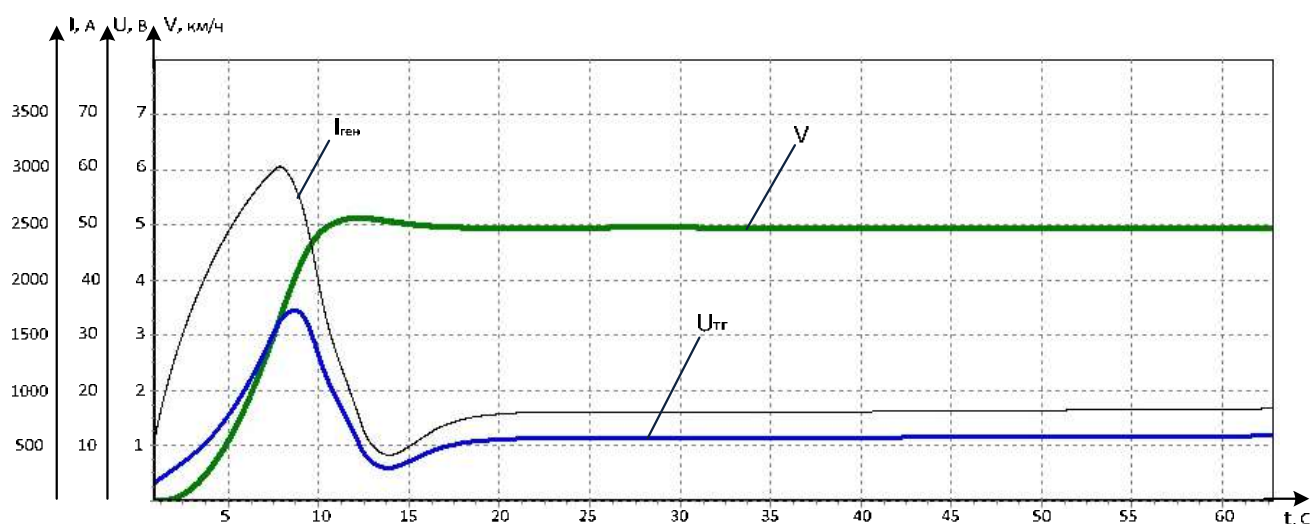


Рисунок 3.19 – Результаты моделирования при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 800 т

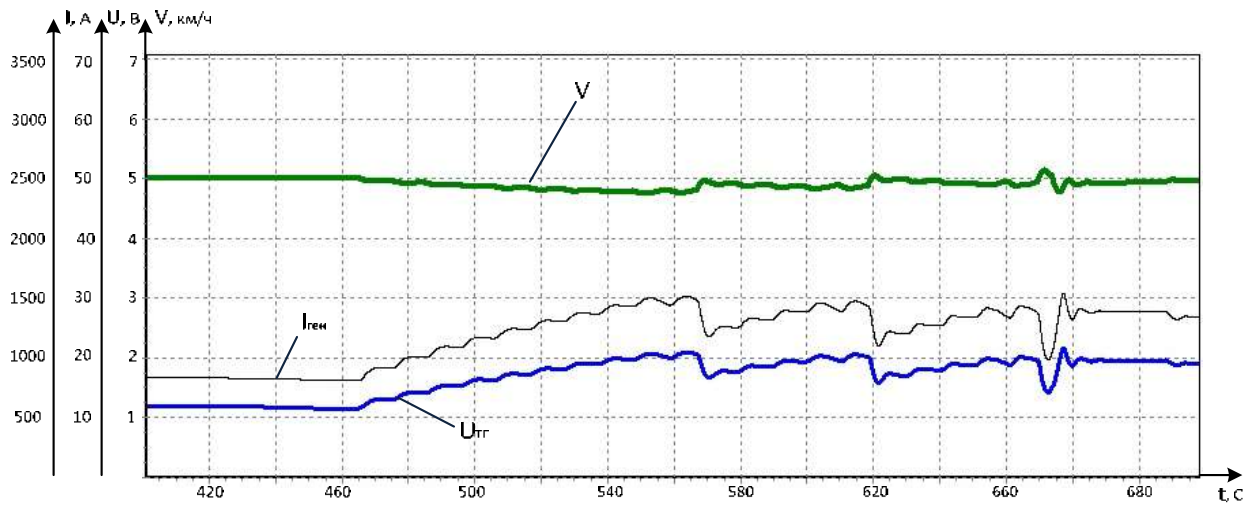


Рисунок 3.20 – Результаты моделирования при надвиге и начале роспуска состава при массе поезда 800 т

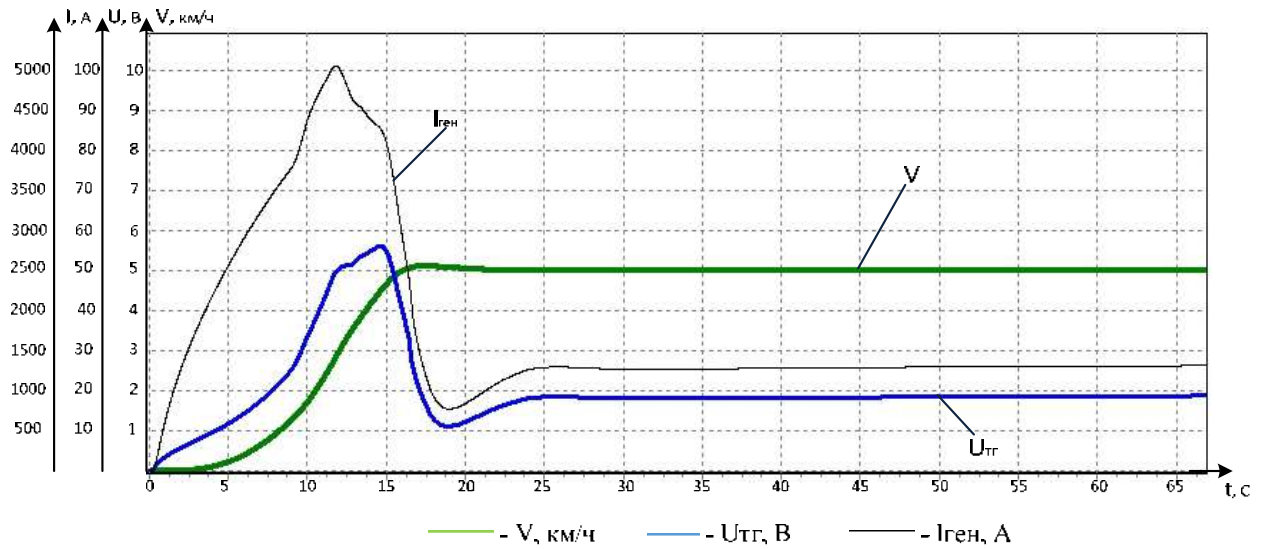


Рисунок 3.21 – Результаты моделирования при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 3600 т

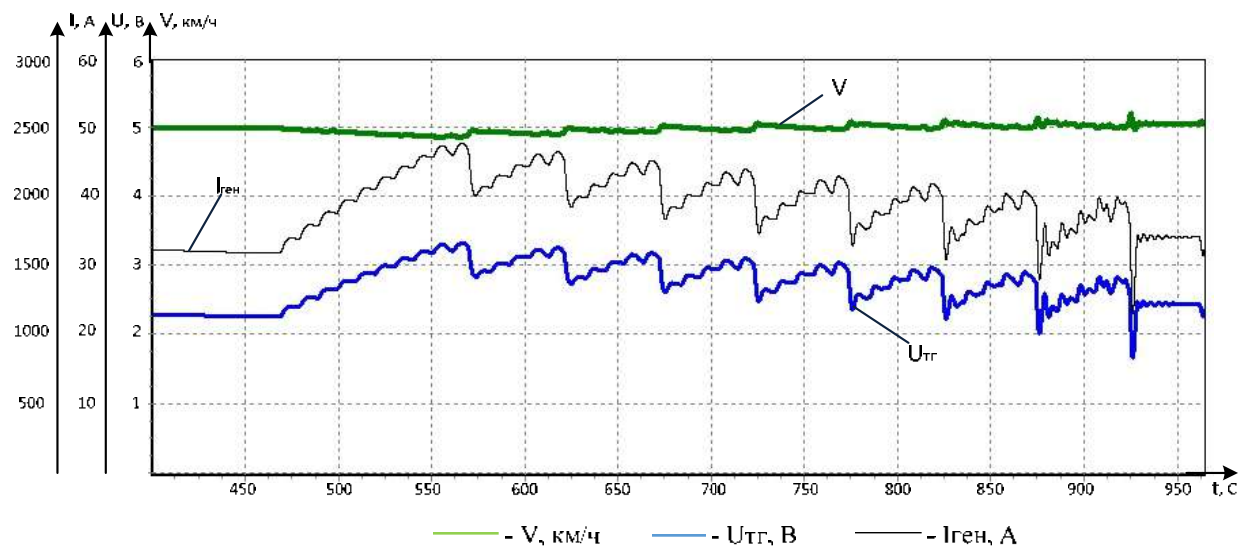


Рисунок 3.22 – Результаты моделирования при надвиге и начале роспуска состава при массе поезда 3600 т

На рисунках 3.19 и 3.20 приведены временные зависимости скорости V , тока $I_{\text{ген}}$ и напряжения $U_{\text{тг}}$ силовой цепи для поезда массой 800 т (в составе поезда 20 вагонов по 40 т). Система автоматического управления отрабатывает задание скорости $V = 5$ км/ч. На рисунке 3.19 представлены осциллограммы полученные при разгоне и поддержании заданной скорости, на рисунке 3.20 при надвиге и роспуске состава (процесс роспуска начинается в момент времени $t = 565$ с).

На рисунках 3.21 и 3.22 приведены временные зависимости скорости V , тока $I_{\text{ген}}$ и напряжения $U_{\text{тг}}$ силовой цепи для поезда массой 3600 т (в составе поезда 45 вагонов по 80 т). Система автоматического управления отрабатывает задание скорости $V = 5$ км/ч. На рисунке 3.21 представлены осциллограммы полученные при разгоне и поддержании заданной скорости, на рисунке 3.22 при надвиге и роспуске состава (процесс роспуска начинается в момент времени $t = 570$ с).

Анализ результатов моделирования при разгоне и поддержании скорости показывает, что ПИ-регулятор скорости обеспечивает точное поддержание фактической скорости тепловоза во всем рассматриваемом диапазоне. Вид переходного процесса во всех рассмотренных случаях является апериодическим (рисунки 3.18, 3.20 – перерегулирование составляет 5 %, в остальных случаях – менее 5 %). 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 датчика 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 отрабатывает 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.

3.6 Выводы по разделу 3

1 Предложена система критериев для оценки качества работы системы автоматического управления маневрового тепловоза в условиях горочной работы. Установлено, что по условиям безопасности движения, а также особенностям 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.

2 Решение задачи оптимизации показало, что значения параметров регулятора зависят от массы поезда и для адаптации регулятора необходима загрузка в алгоритм работы регулятора скорости не только параметров энергетической цепи тепловоза, но и массы состава, изменение которых в широком диапазоне оказывает влияние на вид переходного процесса и величину оценки интегральной квадратичной ошибки.

3 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).

4 В результате проведенных имитационных моделирований установлена работоспособность разработанных решений, синтезированные система управления и регулятор скорости могут быть рекомендованы для применения на маневровых тепловозах, занятых горочной работой.

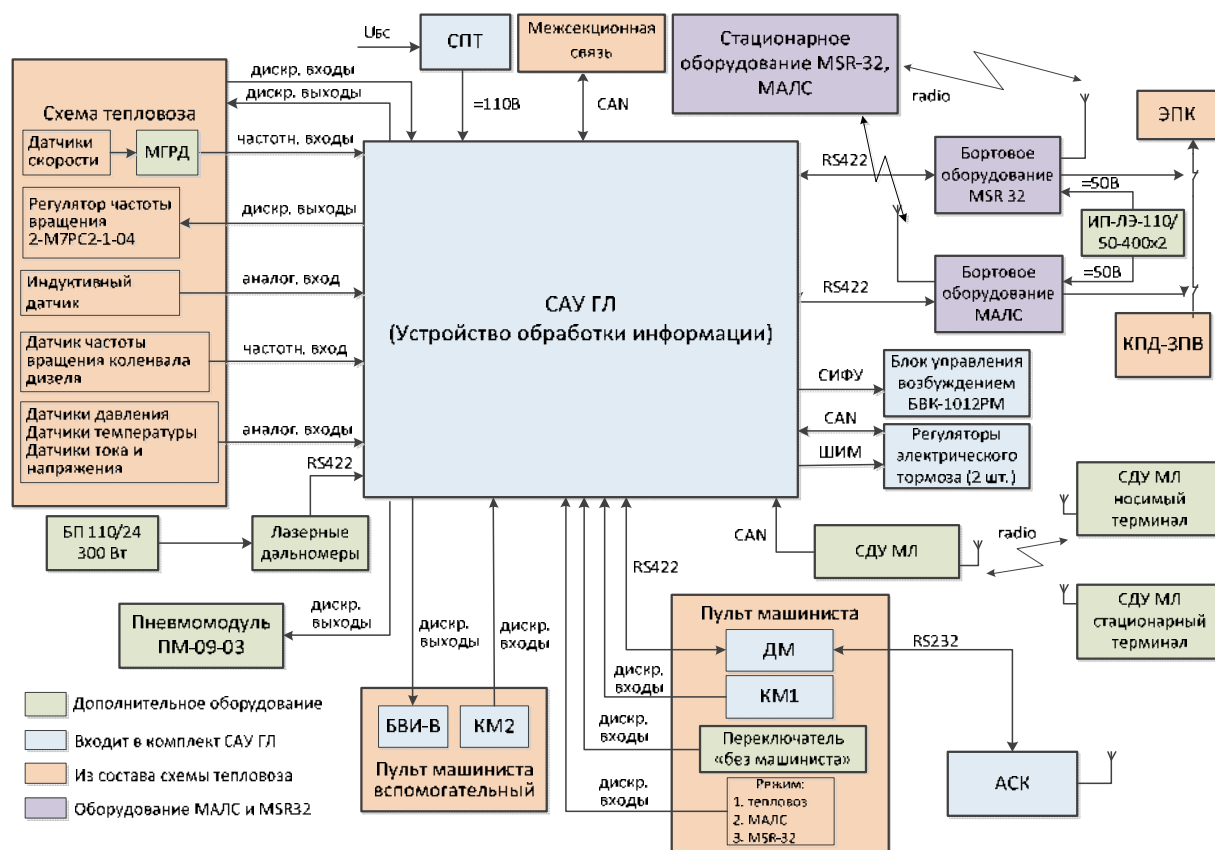
5 Применение задатчика интенсивности совместно с ПИ-регулятором скорости позволило сформировать плавные переходные процессы во всем

диапазоне изменения задающих и возмущающих воздействий с апериодическим характером переходных процессов и нулевой статической ошибкой поддержания скорости. Максимальная динамическая ошибка при отцепе вагонов не превышает 0,18 км/ч.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАДВИГА И РОСПУСКА СОСТАВА С СИНТЕЗИРОВАННЫМ ПИ-РЕГУЛЯТОРОМ

4.1 Система управления тепловоза ТЭМ7А

Функциональная схема системы управления тепловоза ТЭМ7А показана на рисунке 4.1. Основным элементом в ней является система автоматического управления горочным локомотивом (САУ ГЛ).



МАЛС, MSR32 – системы автоматического управления локомотивом верхнего уровня, МГРД – модуль гальванической развязки датчиков; СПТ – стабилизатор постоянного тока; ЭПК – электропневматический клапан автостопа; КПД-ЗПВ – комплекс средств сбора и регистрации данных (электронный speedometer); СДУ МЛ – система дистанционного управления маневровым локомотивом; БП – блок питания; КМ1, КМ2 – контроллеры машиниста; БВИ-В – блок вспомогательной индикации; АСК – автоматизированная система контроля параметров работы дизельного подвижного состава и учета дизельного топлива; ИП-ЛЭ – источник электропитания локомотивной электронной аппаратуры

Рисунок 4.1 – Структура системы управления тепловоза ТЭМ7А

САУ ГЛ собирает информацию, поступающую от всех первичных преобразователей информации, различных датчиков, дискретных сигналов, цифровых интерфейсов элементов управления и исполнительных устройств и механизмов, бортовой аппаратурой, регуляторами электрического тормоза и т.д. Обмен информации по каналам цифровых интерфейсов является двунаправленным [98, 99].

Полный цикл работы локомотивов в парке приема станции Лужская Октябрьской железной дороги показан на рисунке 4.2 [100 – 102].

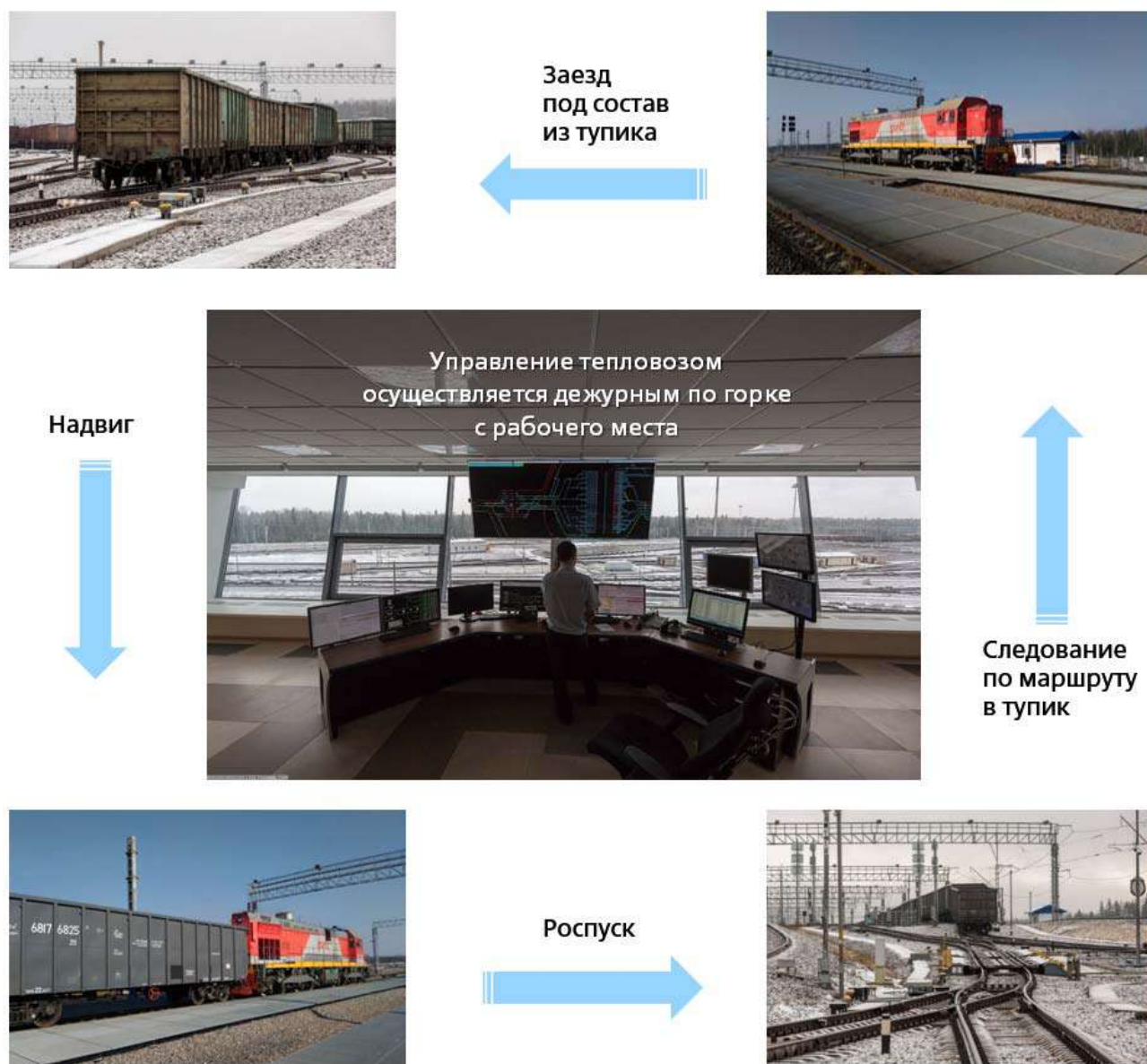


Рисунок 4.2 – Полный цикл работы локомотивов в парке приема станции Лужская Октябрьской железной дороги

Горочный цикл работы локомотива состоит из операций: надвиг – роспуск – следование по маршруту в тупик – заезд под состав. После чего горочный цикл повторяется.

4.2 Средства измерений

Для измерения напряжения и тока на тепловозе ТЭМ7А используются «преобразователи напряжения и тока (ПН 1) ТУ 32-ВНИКТИ – 39-2006. При измерении тока дополнительно применяются измерительные шунты» [103].

Преобразователь напряжения и тока ПН 1 используется для перевода информации из первичного сигнала напряжения в пропорциональный токовый сигнал. Данный преобразователь содержит гальваническую развязку входных и выходных сигналов. Преобразователь имеет четыре входа [103].

Схема подключения датчиков напряжения и тока ПН 1 к системе управления локомотива приведена на рисунке 4.3.

Для измерения скорости движения тепловоза ТЭМ7А применяется датчик угла поворота Л 178/1.2 ТУ 32 ЦТ 2089-89 [104].

Датчик угла поворота Л 178/1.2 имеет следующие технические характеристики:

- максимальная частота вращения вала – 2122 об/мин;
- напряжение питания – 50 В;
- устанавливается на буксе колесной пары и имеет степень защиты корпуса от внешних факторов IP68 по ГОСТ 14254-2015;
- направление вращения датчика не регламентировано;
- количество выходных каналов – 2;
- Л178/1.2 крепится на буксе колесной пары тепловоза.

Для преобразования непрерывно меняющегося во времени угла поворота оси колесной пары в дискретные импульсы применен формирователь импульсов.

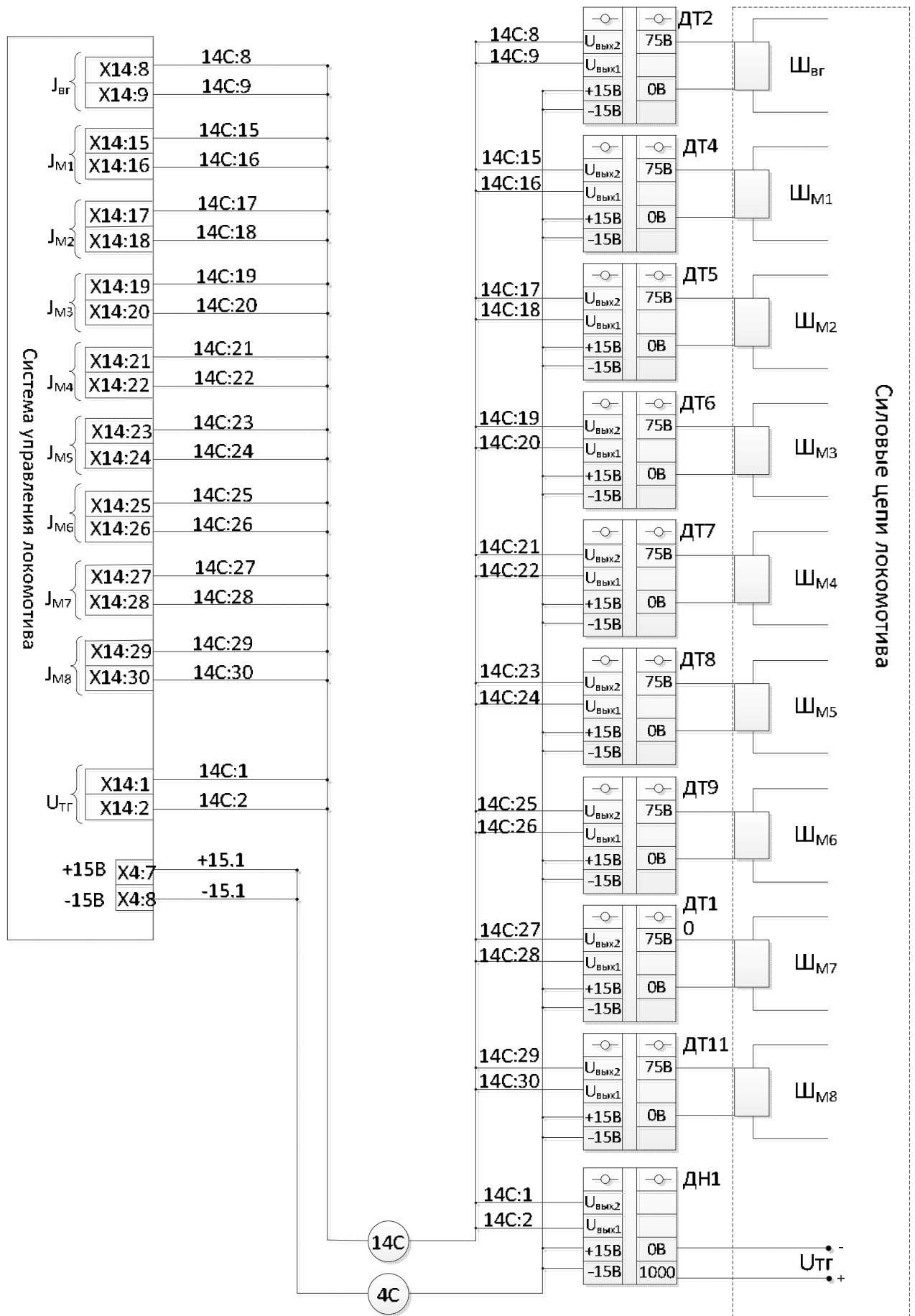
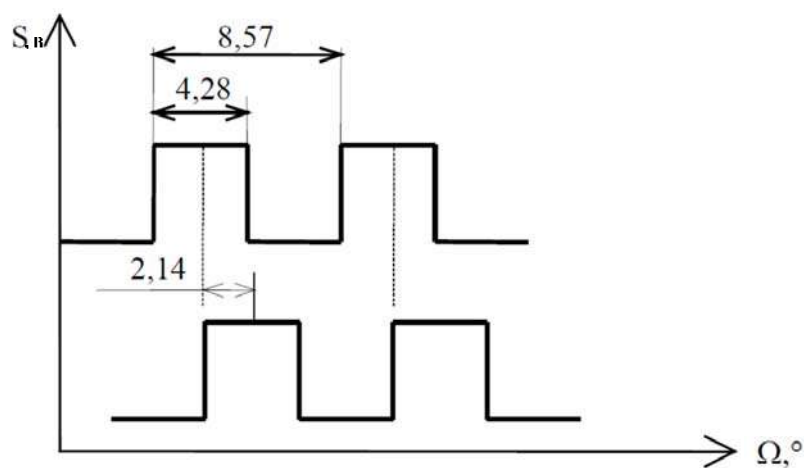


Рисунок 4.3 – Схема подключения датчиков напряжения и тока к системе управления локомотива

Выходные сигналы датчика Л 178/1.2 показаны на рисунке 4.4 [104].



$\Omega, ^\circ$ – угол поворота вала (модулятора)

Рисунок 4.4 – Диаграмма сигналов датчика угла поворота

Принцип работы второго канала формирователя импульсов идентичен первому.

Схема подключения датчика угла поворота к системе управления приведена на рисунке 4.5.

Датчик угла поворота Л 178/1.2 как правило не входит в состав микропроцессорных систем управления и является частью систем безопасности.

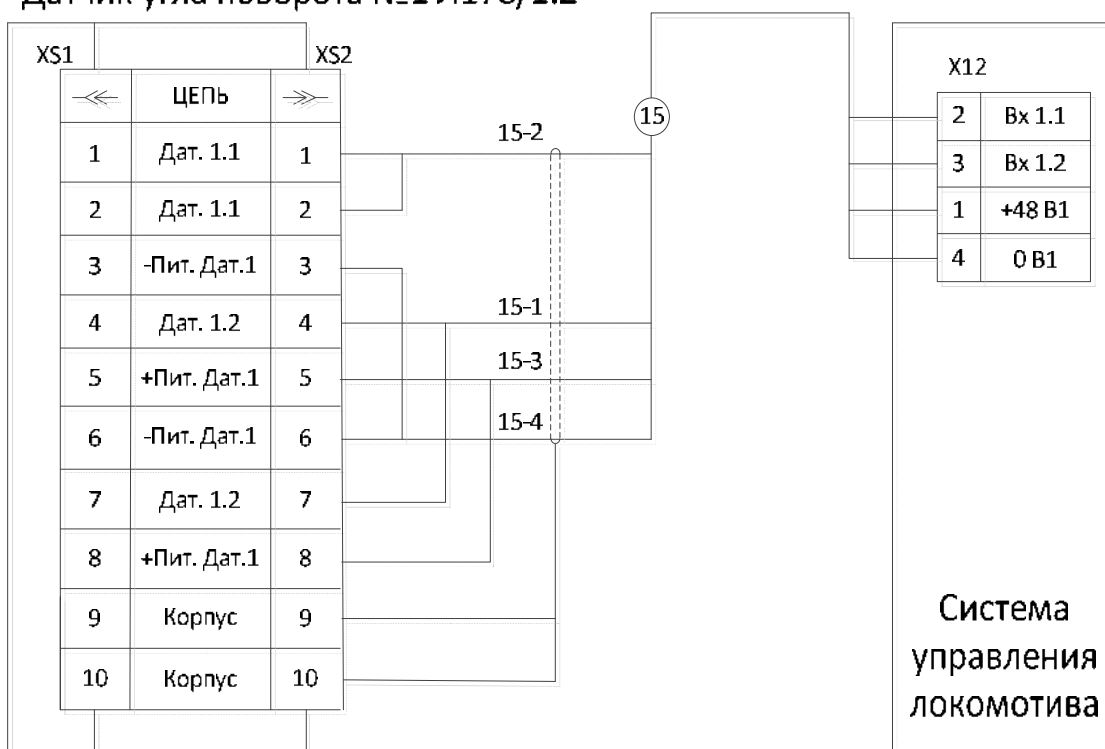
4.3 Программа и методика проведения испытаний

Проверка управления скоростью локомотива проводится в автоматическом режиме по командам задающей системы автоматизации сортировочной станции 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 оценивается работа электропривода локомотива в автоматическом режиме и точность поддержания заданной скорости.

Результаты испытаний считаются положительными, если происходит

Датчик угла поворота №1 Л178/1.2



Датчик угла поворота №2 Л178/1.2

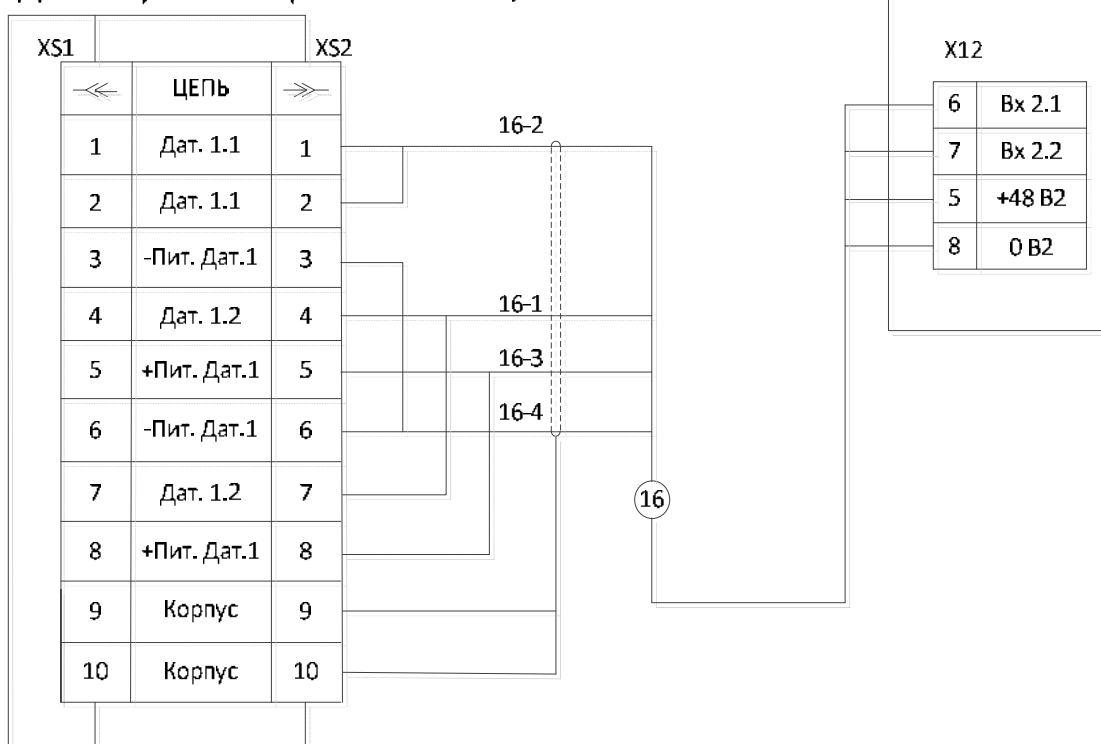


Рисунок 4.5 – Схема подключения датчика угла поворота к системе управления локомотива

автоматическое управление тягой по командам системы автоматизации сортировочной станции *MSR32* и реализуется поддержание заданной скорости с точностью 0,05 м/с.

4.4 Результаты испытаний

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).

Некоторые результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 4.6 – 4.12 и рисунках В.1 и В.2 (Приложения В).

На рисунке 4.6 представлена осциллограмма зависимости напряжения тягового генератора, тока тягового генератора и скорости в зависимости от времени при надвиге и роспуске состава массой 5100 т тепловозом ТЭМ7А. На рисунке 4.7 (увеличено для рисунка 4.6) процесс разгона состава и надвиг состава на сортировочную горку с заданной скоростью 5 км/ч (при этом колебания скорости в установившемся режиме не превышают $\pm 0,12$ км/ч). Процесс роспуска данного состава представлен на рисунке 4.8 (увеличено для рисунка 4.6), роспуск начинается при $t = 400$ с при этом возникающие колебательные процессы связаны с групповыми отцепками вагонов (значительное изменение массы состава). В конце роспуска от системы управления верхнего уровня происходит изменение заданной

скорости с 5 км/ч до 4 км/ч, регулятор скорости отрабатывает данное задание с необходимой точностью.

На рисунке 4.9 представлена осциллограмма зависимости напряжения тягового генератора, тока тягового генератора и скорости в зависимости от времени при надвиге и роспуске состава массой 940 т тепловозом ТЭМ7А. Рисунок 4.10 (увеличено для рисунка 4.9) осциллограмма процесса разгона состава и надвига состава на сортировочную горку с заданной скоростью 5 км/ч (колебания скорости в установившемся режиме не превышают $\pm 0,8$ км/ч). На рисунке 4.11 (увеличено для рисунка 4.9) представлена работа регулятора скорости при изменении заданной скорости с 5 км/ч до 3 км/ч, как видно регулятор отрабатывает данное задание с необходимой точностью, далее начинается процесс роспуска данного состава при $t = 680$ с. На рисунке 4.12 (увеличено для рисунка 4.9) представлена работа регулятора скорости при трогании локомотива в процессе роспуска состава (остановка по причине перекрытия горочного светофора), регулятор скорости отрабатывает данное задание с необходимой точностью.

На рисунках В.1 и В.2 (Приложения В) представлены осциллограммы зависимости напряжения тягового генератора, тока тягового генератора и скорости в зависимости от времени при надвиге и роспуске состава массой 2300 т и 1600 т тепловозом ТЭМ7А.

Полученные результаты экспериментальных исследований показали целесообразность применения системы автоматического регулирования скорости на маневровых тепловозах, работающих на сортировочных станциях.

Результаты выполненного эксперимента показывают правильность выбранных технических решений, подтверждают работоспособность синтезированных регуляторов и алгоритмов управления. Также данные результаты подтверждают адекватность разработанных во втором разделе математических моделей основных элементов электропередачи тепловоза и выполненного компьютерного моделирования замкнутой системы регулирования скорости тепловоза с ПИ-регулятором. Определённые показатели качества управления

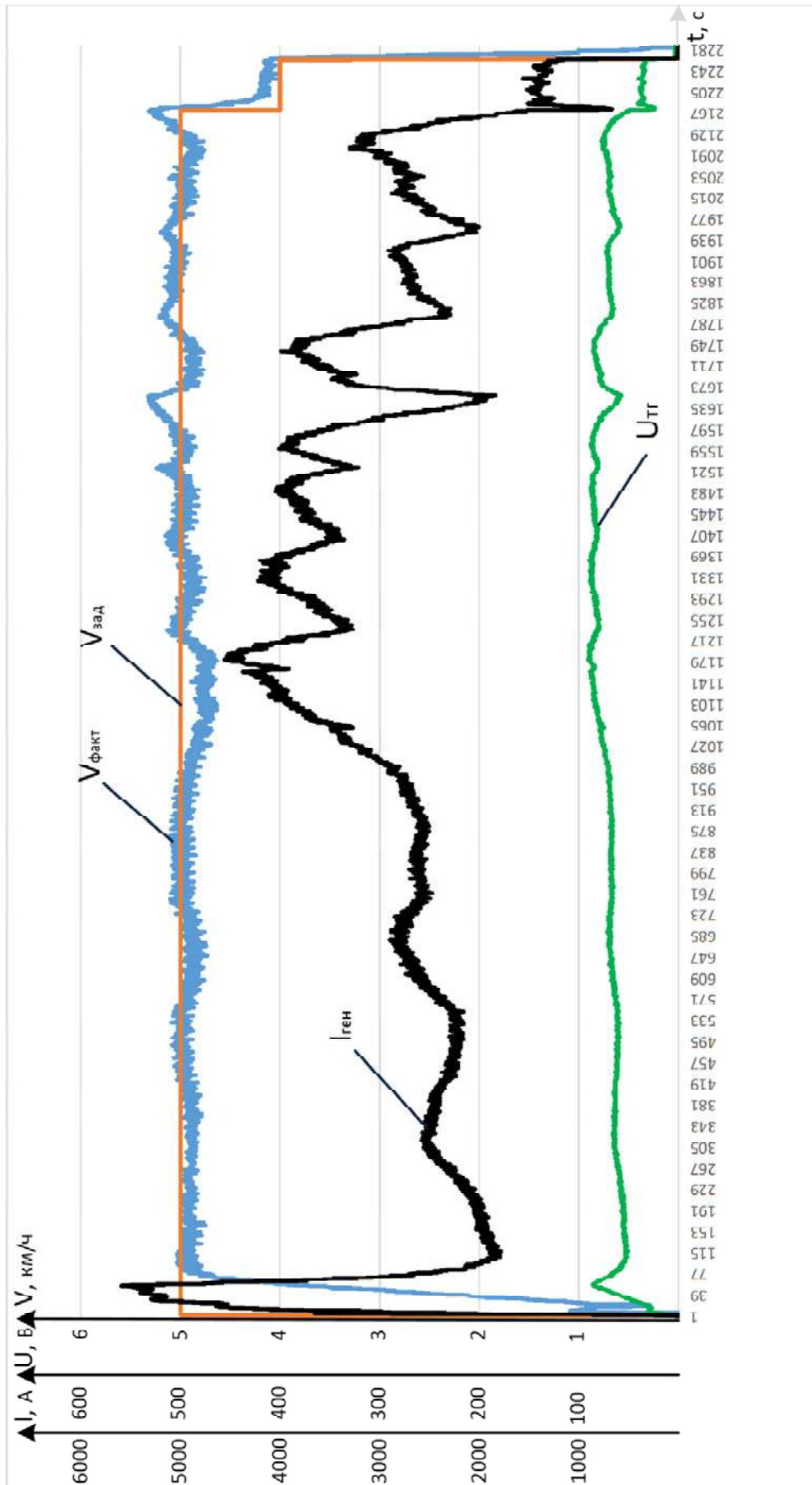


Рисунок 4.6 – Экспериментальные результаты при разгоне и поддержании скорости (надвиг и роспуск состава) при массе поезда 5100т

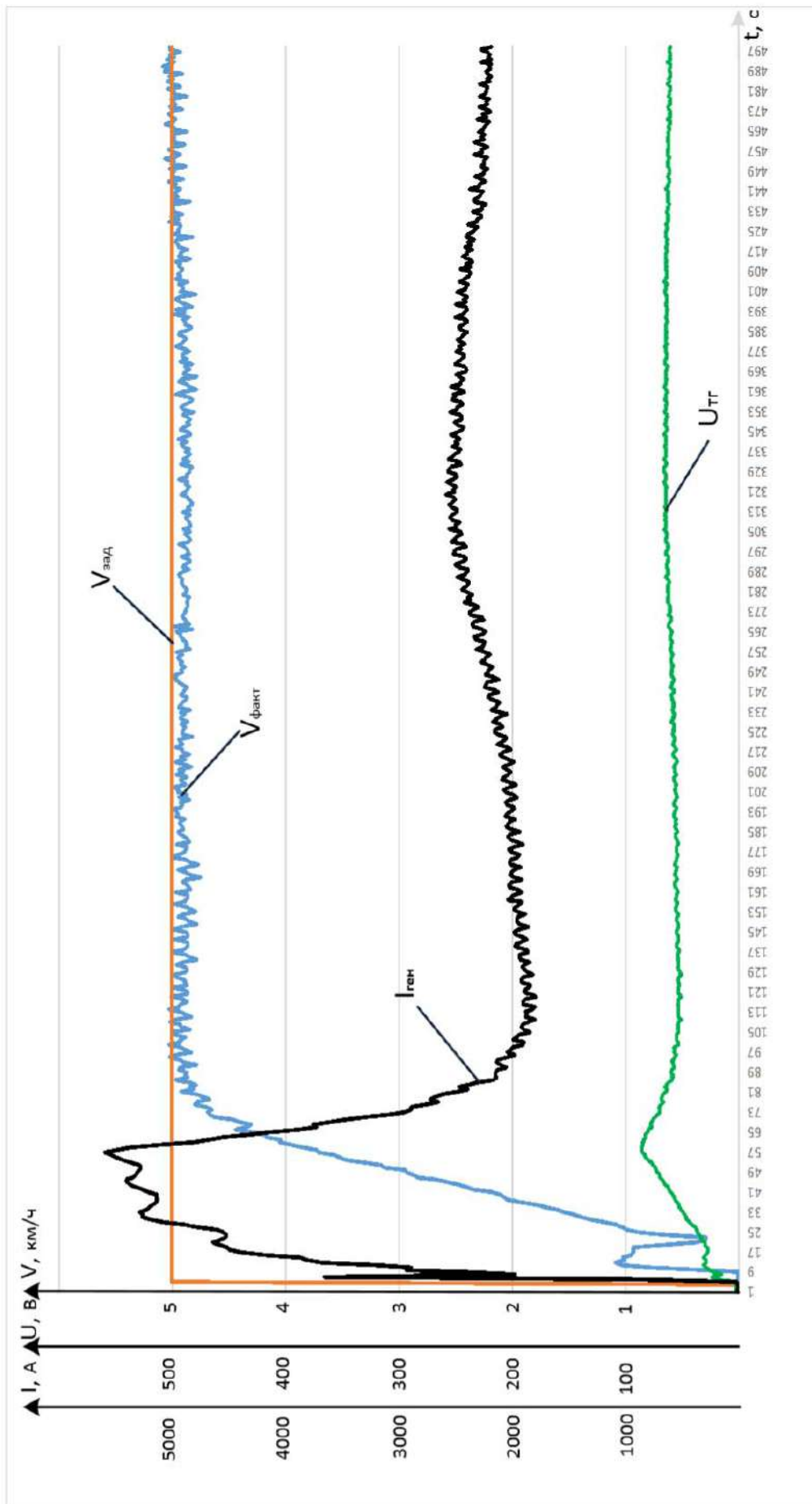


Рисунок 4.7 – Экспериментальные результаты при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 5100 т

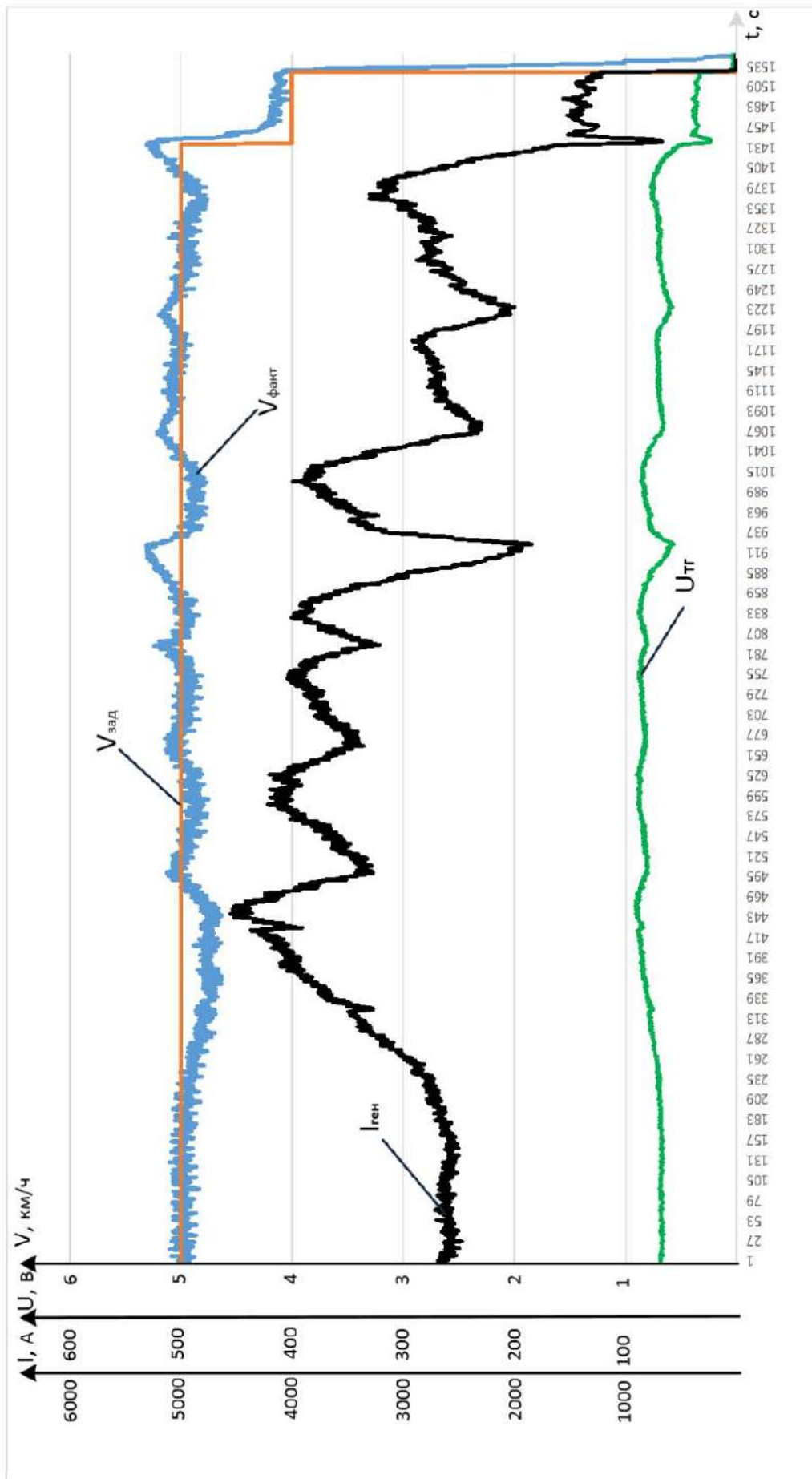


Рисунок 4.8 – Экспериментальные результаты при роспуске состава и поддержании скорости при массе поезда 5100 т

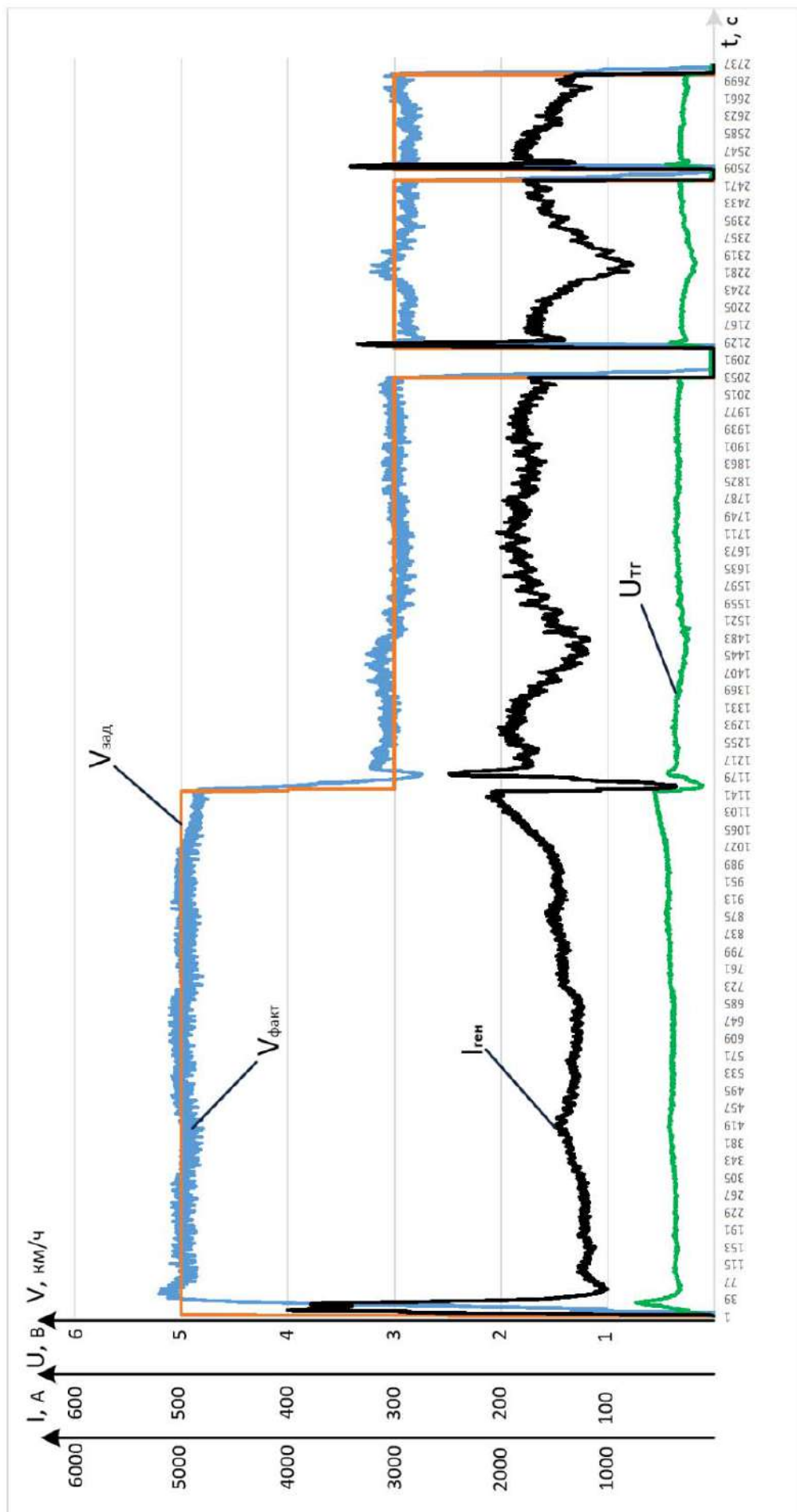


Рисунок 4.9 – Экспериментальные результаты при разгоне и поддержании скорости (надвиг и роспуск состава) при массе поезда 940 т

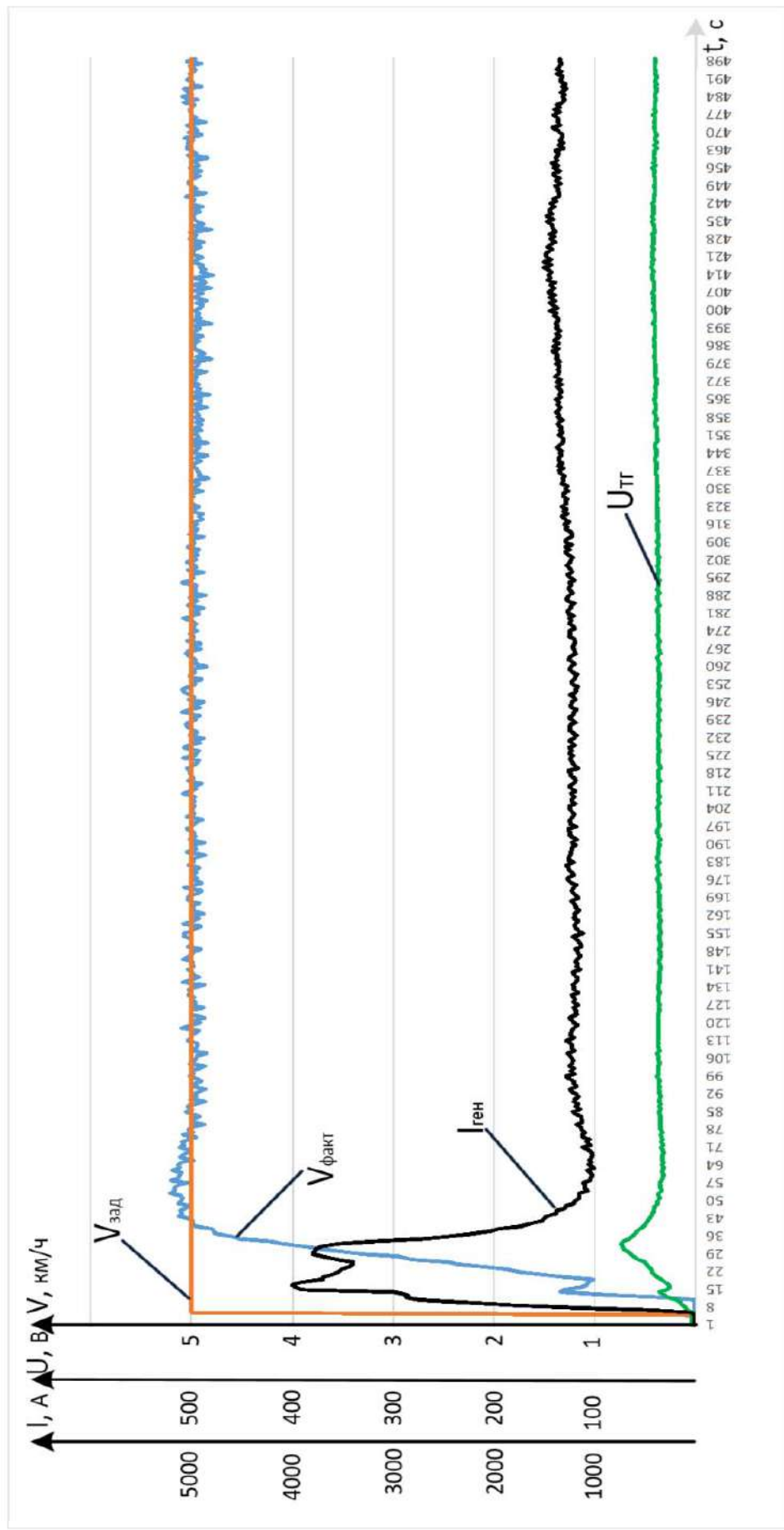


Рисунок 4.10 – Экспериментальные результаты при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 940 т

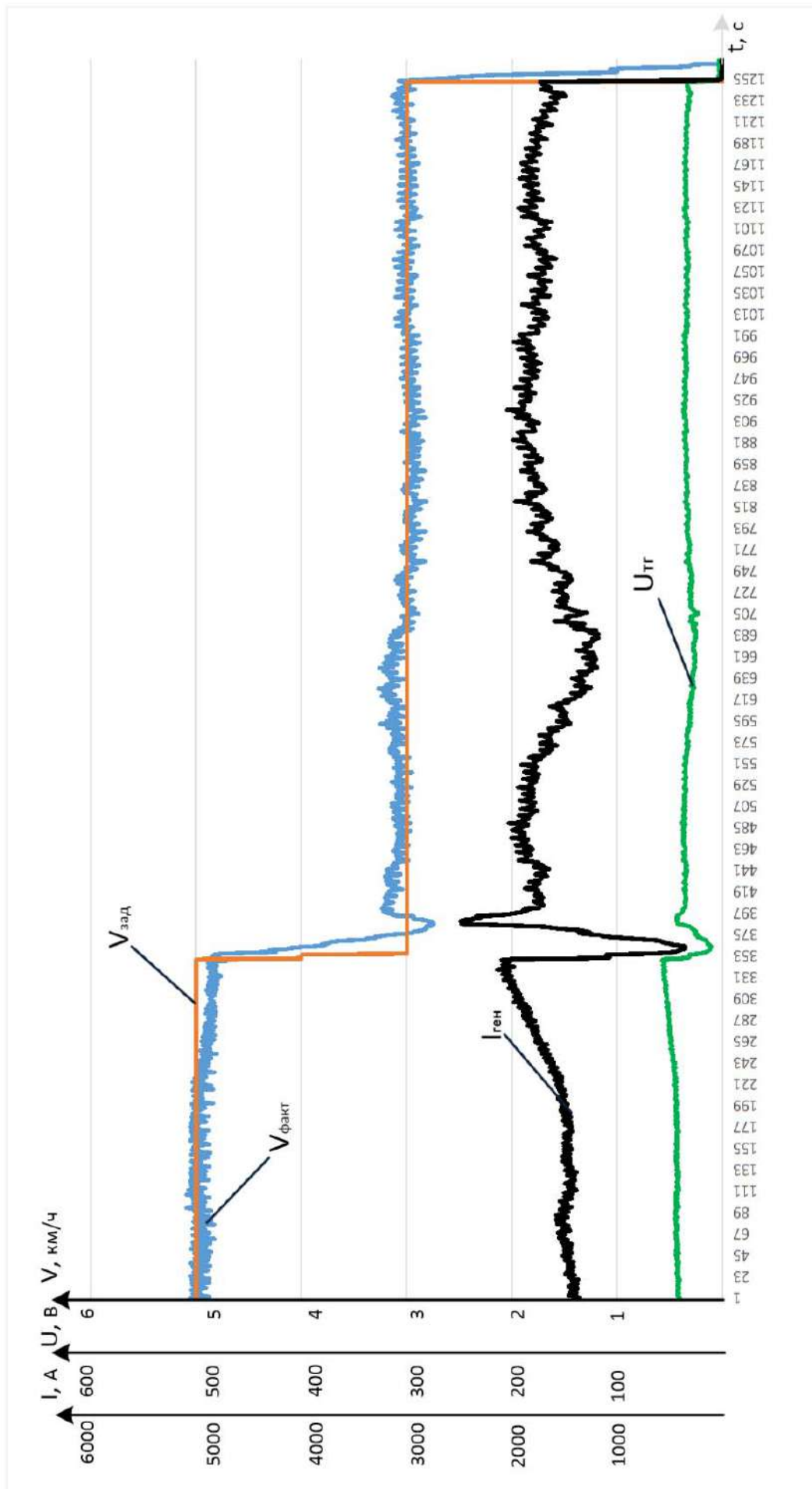


Рисунок 4.11 – Экспериментальные результаты при надвиге состава на сортировочную горку и изменении заданной скорости при массе поезда 940 т

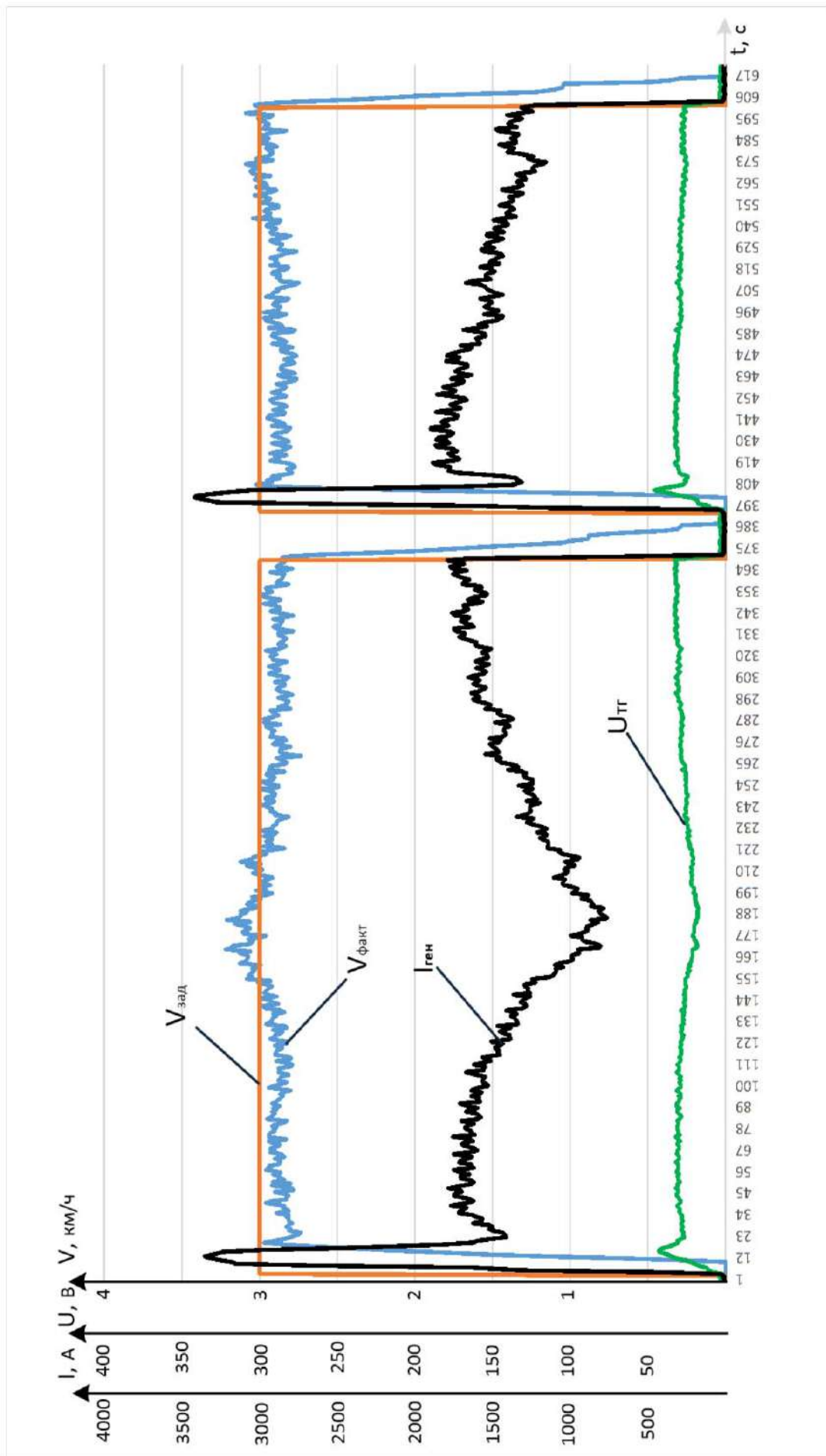


Рисунок 4.12 – Экспериментальные результаты при роспуске состава (остановка и последующее трогание) при массе поезда 940 т

(перерегулирования скорости при разгоне, колебания скорости, тока и напряжения силовой) цепи показывают хорошее совпадение как качественно, так и количественно. 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.

4.5 Выводы по разделу 4

1 Проверка управления скоростью тепловоза ТЭМ7А была проведена в парке приема станции Лужская Октябрьской железной дороги в автоматическом режиме по командам задающей системы автоматизации сортировочной станции *MSR32* с ПИ-регулятором скорости. Из зарегистрированной в ходе маневровой работы данных о параметрах работы подвижного состава отбираются эпизоды управления тягой в режиме поддержания заданной скорости. Акт о проведении испытаний представлен в приложении Г.

2 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.

5 РАСЧЕТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛОКОМОТИВОМ С ФУНКЦИЕЙ «БЕЗ МАШИНИСТА» ДЛЯ МАНЕВРОВОЙ РАБОТЫ

5.1 Исходные данные

В соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года приоритетным направлением развития холдинга ОАО «РЖД» на 2016 – 2020 гг. признана реализация комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» с формированием новых сквозных цифровых каналов организации перевозочного процесса и применения безлюдных технологий.

АО «ВНИКТИ» разработан проект оборудования маневрового локомотива ТЭМ7А САУ ГЛ с реализацией технологии автоматического регулирования скорости надвига и роспуска с обеспечением режима работы «без машиниста» (САУ ГЛ), включающие в себя алгоритмы поддержания скорости разработанные в данной диссертационной работе. Режим «без машиниста» позволяет без локомотивной бригады эксплуатировать локомотив в парке приема станции Лужская при выполнении операций надвига, роспуска, движения в тупик, заезде под состав и сцепке с составом по замкнутому циклу. Все операции выполняются автоматически под управлением систем МАЛС и *MSR32*.

Кроме того, система дистанционного управления маневровым локомотивом, также разработанная и установленная на тепловоз по проекту АО «ВНИКТИ», при взаимодействии с САУ ГЛ обеспечивает управление локомотивом в режиме дистанционного управления по радиоканалу с переносного и стационарного пульта, либо с удаленного рабочего места.

Технико-экономическое обоснование эффективности тепловоза оборудованного САУ ГЛ с функцией «без машиниста» для маневровой работы на станции Лужская Октябрьской железной дороги выполнено на основе

сопоставления необходимых затрат и получаемых результатов в соответствии с действующими в ОАО «РЖД» методическими документами.

5.2 Расчёт экономии годовых текущих расходов

Оборудование локомотива ТЭМ7А САУ ГЛ с функцией «без машиниста» при выполнении маневровой работы на станции Лужская Октябрьской железной дороги позволит исключить время на прием-сдачу локомотива бригадой и сэкономить годовые текущие расходы на оплату труда обслуживающего персонала. При этом оборудование локомотива новой системой управления не повлечет за собой увеличения текущих затрат по ее обслуживанию по сравнению с системой в штатном исполнении.

В настоящее время САУ ГЛ оборудовано 3 локомотива ТЭМ7А (№№534, 542, 543), эксплуатирующихся на станции Лужская Октябрьской железной дороги. При этом управление указанными локомотивами будет осуществляться оператором с пульта дистанционного управления.

В качестве результатов от внедрения системы управления маневрового тепловоза с функцией «без машиниста» рассмотрена экономия годовых текущих затрат на оплату труда.

При переводе трех локомотивов на управление движением в автоматическом режиме сокращаются 4,22 ставки на каждый локомотив (ставки рассчитаны в соответствии с документом «Порядок применения коэффициента, учитывающий сменный (графиковый) режим работы», утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 6 июня 2011 г. № 1226р).

Расчет количество бригад, обслуживающих один маневровый локомотив проводится исходя из установленной продолжительности рабочего времени с учетом отпусков и других отвлечений по формуле:

$$\Pi_{бр} = k_{тг} \cdot \frac{T_{год}}{T}, \quad (5.1)$$

где $k_{\text{тг}}$ – коэффициент технической готовности локомотива, принят согласно технической документации на тепловоз на уровне 0,95;

$T_{\text{год}}$ – число часов в году, составляет 8760 ч;

T – годовой фонд рабочего времени, составляющий 1974 ч.

Таким образом, количество бригад, обслуживающих один маневровый локомотив, составит: $P_{\text{бр}} = 4,2$ бригады.

Годовые затраты на заработную плату локомотивных бригад рассчитаны по формуле:

$$I_{\text{бр}} = e_{mh} \cdot (1 + k_{\text{соц}}) \cdot P_{\text{бр}} \cdot T \cdot 10^{-3}, \quad (5.2)$$

где e_{mh} – стоимость бригадо-часа, рублей;

$k_{\text{соц}}$ – коэффициент, учитывающий процент начислений по социальному налогу и страхованию от несчастных случаев на производстве (30,4 %).

В качестве исходных данных для расчета стоимости бригадо-часа приняты данные Октябрьской железной дороги:

- тарифная ставка: 4 уровень оплаты 9 разряд – 369,3 рублей / ч;
- среднемесячная норма часов работы – 164,92 ч;
- среднемесячная величина зональной надбавки – 20 % к окладу;
- среднемесячная доплата за работу во вредных условиях – 4 %;
- среднемесячная доплата за работу в одно лицо – 50 %;
- среднемесячная доплата за классность – 10 %;
- среднемесячная величина премии – 80 %;
- среднемесячная доплата за работу в ночные часы – 13,3 %.

Исходя из этого, фонд оплаты труда одного машиниста с учетом всех выплат и премий составляет 2026,67 тысяч рублей в год.

Стоимость бригадо-часа составит 1024,07 рублей / час.

Годовые затраты на содержание локомотивных бригад в расчете на один локомотив составят: $I_{\text{бр}} = 11099,7$ тысяч рублей на 1 локомотив в год.

В расчете принято, что поскольку функциональные обязанности оператора идентичны функциям, выполняемым машинистом локомотива, в расчете расходы

на содержание оператора и машиниста приняты одинаковыми, т. е. 1024,07 рублей / час.

Исходя из этого рассчитаны годовые текущие затраты на оплату труда машинистам и операторам для вариантов проекта «до» и «после» внедрения САУ ГЛ с функцией «без машиниста».

Годовые текущие затраты по оплате труда обслуживающего персонала определены из выражения:

$$И_{зп} = T_{год} \cdot e_{mh} \cdot n, \quad (5.3)$$

где e_{mh} – стоимость содержания локомотивной бригады (одного машиниста) и составляет 1024,07 рублей / час;

n – количество рабочих мест по вариантам расчета. Первый вариант при «ручном» обслуживании тепловозов машинистом (в одно лицо) $n = 3$, второй вариант обслуживание тепловозов «без машиниста» одним оператором $n = 1$;

$T_{год}$ – годовой фонд работы локомотива, час. Определен из выражения:

$$T_{год} = t_{см} \cdot n_{см} \cdot N_{сут} \cdot k_{тг}, \quad (5.4)$$

где $t_{см}$ – продолжительность рабочей смены, час;

$n_{см}$ – количество рабочих смен в сутки;

$N_{сут}$ – число суток в году;

$k_{тг}$ – коэффициент технической готовности локомотива.

Годовой фонд работы тепловоза ТЭМ7А составит: $T_{год} = 8322$ часа.

Годовые текущие затраты на оплату труда обслуживающего персонала составят:

– при «ручном» обслуживании тепловозов ТЭМ7А машинистами $И_{зп}^6 = 25566,9$ тысяч рублей;

– при управлении тепловозами оператором $И_{зп}^H = 8522,3$ тысяч рублей.

Экономия годовых текущих расходов на оплату труда обслуживающего персонала при внедрении на станции Лужская системы в режиме «без машиниста» составит:

$$\Delta И = И_{зп}^6 - И_{зп}^H, \quad (5.5)$$

и составит $\Delta И = 17044,6$ тысяч рублей.

5.3 Оценка величины инвестиционных затрат

Стоимость работ, выполненных АО «ВНИКТИ» по реализации функций системы управления локомотивом без машиниста, с учетом работ, выполняемых по доработке СДУ и адаптации с системами управления высшего порядка, составляет 39575,36 тысяч рублей (без НДС).

5.4. Расчет чистого дисконтированного дохода и срока окупаемости затрат при внедрение системы управления локомотивом с функцией «без машиниста»

В соответствии с методическими материалами, действующими в ОАО «РЖД», для того что бы определить эффективность использования от внедрения новой системы используются такие показатели как: чистый доход потребителя за жизненный цикл, чистый дисконтированный доход и срок окупаемости затрат.

«Чистый доход представляет собой накопленный денежный поток (сальдо притока и оттока денежных средств, генерируемых проектом) и рассчитывается без учета фактора времени» [105]. Расчет чистого дисконтированного дохода при внедрении САУ ГЛ с функцией «без машиниста» для маневровой работы на станции Лужская Октябрьской железной дороги в расчете на 3 тепловоза ТЭМ7А приведен в таблице Ж.1 (Приложение Ж), на рисунке 3.1 (Приложения 3) приведена динамика изменения интегрального эффекта.

При этом рассчитан и срок окупаемости затрат, составивший 4,54 года или 3,54 года с начала эксплуатационной фазы без учета инвестиционного этапа.

В расчете учтены изменения величины амортизационных отчислений и налоговых выплат в соответствии с действующей II частью Налогового Кодекса РФ

по налогу на прибыль, который установлен в соответствии с гл. 25 части II Налогового Кодекса РФ по ставке 2024 года в размере 20 %.

В соответствии с Федеральным законом от 29.11.2012г. №202-ФЗ «О внесении изменений в часть вторую Налогового кодекса Российской Федерации» от налога на имущество освобождается движимое имущество, принятое с 1 января 2013 года на учет в качестве основных средств (подпункт 8 п.4 статьи 374 НК) [5].

В таблице 5.1 представлены основные показатели эффективности проекта по созданию и внедрению системы управления работой горочных локомотивов ТЭМ7А в режиме «без машиниста».

Таблица 5.1 - Результаты расчета показателей эффективности проекта

Показатели	Значения показателей
Чистый доход, тысяч рублей	66857
Чистый дисконтированный доход, тысяч рублей	241053,24
Срок окупаемости затрат, лет	
- простой	2,82
- дисконтированный	3,54
Внутренняя норма доходности	35,37 %
Индекс доходности	2,69

Результаты расчета показателей эффективности проекта свидетельствуют о его эффективности и целесообразности.

5.6 Выводы по разделу 5

1 Оборудование трех локомотивов ТЭМ7А САУ ГЛ 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.

2 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 устройство 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АО «ВНИКТИ» - Акционерное общество "Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава";

АО «НИИАС» - Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»;

АСК – автоматическая система контроля параметров работы дизельного подвижного состава и учета дизельного топлива;

АСОТП – автоматическая система обнаружения и тушения пожара;

БВИ-В – блок вспомогательной индикации;

БВК – блок выпрямителей кремниевых;

БМК – блок маршрутизирующего коммутатора;

БП – блок питания;

БРПЛ – блок регистрации параметров локомотива;

БТО – блок тормозного оборудования;

БУД НЭ – блок управления и диагностики накопителя энергии;

БУД СВХ – блок управления и диагностики системы хранения водорода;

БУД СП – блок управления и диагностики согласующего преобразователя;

БУ ЭО – блок управления электрооборудованием;

БУД ЭУ – блок управления и диагностики энергетической установки;

БУД ЭХГ – блок управления и диагностики электрохимического генератора;

БУСТ – блок управления стояночным тормозом;

ВУЗ – высшее учебное заведение;

В-ТПЕ – выпрямитель с тиристорным преобразователем;

Д – дизель;

ЗУ – задающее устройство;

ЗЧ – золотниковая часть;

ИП-ЛЭ – источник электропитания локомотивной электронной аппаратуры;

ИсУ – исполнительное устройство;

ИУ – измерительное устройство;

ИЭ – исполнительный элемент;

КМ – контроллер машиниста;

КПД – коэффициент полезного действия;

КПД-ЗПВ – комплекс средств сбора и регистрации данных (электронный скоростемер);

КЛУБ-У – локомотивное устройство безопасности;

ЛАМ – локомотив аккумуляторный маневровый;

ЛАЧХ – логарифмические амплитудно-частотные характеристики;

МАЛС – системой маневровой автоматической локомотивной сигнализации;

МАС – модуль аналоговых сигналов;

МВВ – модуль ввода вывода;

МГРД – модуль гальванической развязки датчиков;

МПСУ ЭУ – микропроцессорная система управления энергетической установкой;

МСИ – модуль согласования интерфейсов;

МСК – модуль силовых контактов;

МСУ-ТП – микропроцессорная система управления тепловоза 2ТЭ116У;

МСУ-ТЭА – микропроцессорная система управления тепловоза ТЭП70БС с функцией автоведения;

МТА – модуль тяговый аккумуляторный;

М-ТПП – многоканальный тяговый преобразователь тепловоза;

МФДУ – многофункциональный дисплей управления;

МЦП – модуль центрального процессора;

МЧС – модуль частотных сигналов;

НИИ – научно-исследовательский институт;

ОВ – обмотка возбуждения;

- ОС – обратная связь;
- ОС – орган сравнения;
- ОЯ – обмотка якоря;
- ПБ – программный блок;
- ПИ – пропорционально-интегральный (регулятор);
- ПД – пропорционально - дифференциальный (регулятор);
- ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный (регулятор);
- ПЗУ – постоянное запоминающее устройство;
- ПКМ – позиция контроллера машиниста;
- ПН 1 – преобразователь напряжения;
- ПЭКМ – приставка электропневматическая;
- ПрЭ – программный элемент;
- ПУ – промежуточное устройство;
- РУТ (МИИТ) - Российский университет транспорта
(Московский институт инженеров железнодорожного транспорта);
- РЧВ – регулятор частоты вращения;
- САР – система автоматического управления;
- САУ ГЛ – система автоматического управления горочным
локомотивом;
- СВ – синхронный возбудитель;
- СДУ МЛ – система дистанционного управления маневровым
локомотивом;
- СМ – силовой серводвигатель;
- СПТ – стабилизатор постоянного тока;
- СРВ – система регулирования возбуждения;
- ТБ – тормозной блок;
- ТГ – тяговый генератор;
- ТД – тяговый двигатель;
- ТЭД – тяговый электродвигатель;
- УВВ – управляемый выпрямитель;
- УВНС – устройство выбора наименьшей скорости;

УО – устройство контроля ограничений;

УУ – устройство управления;

ЦИ – центробежный измеритель;

ЦБУ – центральный блок управления;

ЭДС – электродвижущая сила;

ЭМКА2 – контактно-аккумуляторный маневровый электровоз;

ЭО – модуль электрооборудования;

ЭПК – электропневматический клапан автостопа;

ЭХГ – электрохимический генератор;

CAN – control Area Network;

EMD – electro-Motive Diesel;

GPS – global Positioning System;

MSR32 – система автоматизации сортировочной станции;

RS – recommended Standard.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Анализ режимов работы силовых установок маневровых тепловозов / Н. И. Щуров, Е. Г. Гурова, С. В. Макаров, Д. М. Стрельникова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 104. – Текст : непосредственный.

2 **J. Oostra.** Гибридный маневровый локомотив / J. Oostra // Железные дороги мира. – 2010. – № 9. – С. 26–29. – Текст : непосредственный.

3 **Фалендыш, А. П.** Использование гибридных передач на маневровых тепловозах / А. П. Фалендыш, Н. В. Володарец // Локомотив-информ. – 2010. – № 12. – С. 4–6. – Текст : непосредственный.

4 **W. Vantuono.** Экономия топлива при тепловозной тяге / W. Vantuono // Железные дороги мира. – 2004. – № 3. – С. 42–46. – Текст : непосредственный.

5 **Q. Vosman.** Альтернативные источники энергии для локомотивов / Q. Vosman et al. ZEVrail // Железные дороги мира. – 2012. – № 12. – С. 32–36. – Текст : непосредственный.

6 **K.Hiller.** Новые тепловозы для маневровой и поездной работы / K.Hiller et al. Eisenbahntechnische Rundschau // Железные дороги мира. – 2012. – № 10. – С. 38–42. – Текст : непосредственный.

7 Перспективы тяговых аккумуляторных батарей на железнодорожном транспорте / Материалы компаний Alstom, Forsee Power, Saft и др. // Железные дороги мира. – 2023. – № 1. – С. 62–66. – Текст : непосредственный.

8 Группа Синара : официальный сайт. – Москва, 2024. – URL: <https://www.sinara-group.com> (дата обращения: 03.03.2024). – Текст : электронный.

9 **Грищенко, А. В.** Оценка эффективности тепловозной многодизельной энергетической установки с объединенной системой охлаждения / А. В. Грищенко, В. А. Кручек, В. В. Кручек // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 1(30). – С. 43–48. – Текст : непосредственный.

10 **J. Stagl**. Обновление локомотивного парка железных дорог США и Канады / J. Stagl // Железные дороги мира. – 2008. – № 10. – С. 62–66. – Текст : непосредственный.

11 **Зайцева, Т. Н.** Многодизельные тепловозы / Т. Н. Зайцева, П. А. Полин // Локомотив. – 2012. – № 6. – С. 45–47. – Текст : непосредственный.

12 **Andrei Chirileasa**. American Caterpillar builds new locomotive in Romania with local group Grampet, mainly for export. – Romania-insider.com: [сайт]. – 2014. – URL: <http://www.romania-insider.com/american-caterpillar-builds-new-locomotive-in-romania-with-local-group-grampet-mainly-for-export/122359> (дата обращения: 28.04.2024) – Текст : электронный.

13 **М. Kache**. Проекты гибридных локомотивов / М. Kache // Железные дороги мира. – 2015. – № 4. – С. 56–60. – Текст : непосредственный.

14 **Гапанович, В. А.** Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В. А. Гапанович, В. И. Киселев, И. К. Лакин [и др.]. – М.: Изд-во «ИРИС ГРУПП», 2012. – 576 с.

15 **Сергеев, В. Л.** Знакомьтесь: маневровый аккумуляторный локомотив ЛАМ-01/ В. Л. Сергеев, И. А. Шаркин // Локомотив. 2003. – № 10. – С. 29. – Текст : непосредственный.

16 Тяговый аккумуляторный модуль (МТА). Руководство по эксплуатации 27.Т.345.00.000.000.РЭ / ФГУП «ВНИКТИ Министерства путей сообщения Российской Федерации». Коломна, 2002 г. – 31 с. – Текст : непосредственный.

17 Результаты ходовых динамических испытаний локомотива аккумуляторного маневрового ЛАМ-01 : отчет о научно-исследовательской работе № И-12-2002 / Л. К. Добрынин, В. А. Пузанов, В. В. Березин // ФГУП «ВНИКТИ Министерства путей сообщения Российской Федерации». Коломна, 2002 г. – 66 с. – Текст : непосредственный.

18 **Чикиркин, О. В.** ЭМКА2 – инновационный гибридный электровоз / О. В. Чикиркин // Локомотив. – 2023. – № 11. – С. 30–31. – Текст : непосредственный.

19 Progress rail : официальный сайт. – URL: <https://www.progressrail.com/en/Segments/RollingStock/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html> (дата обращения: 11.02.2024). – Текст : электронный.

20 Испытания локомотива FLXdrive с тяговыми аккумуляторами / Железные дороги мира. – 2021. – № 8 – С. 53–57. – Текст : непосредственный.

21 **Dave Lustig.** Traction: Road trials showcase battery loco potential / Dave Lustig // Railway Gazette International. – 2021. – № 7. – pp. 27–28. – Текст : электронный.

22 Китайская CRRC представила самый мощный в своей линейке маневровый локомотив с аккумуляторной тягой // Информационное агентство ROLLINGSTOCK Agency : [сайт]. – 2023. – URL: <https://t.me/rollingstock/4937> (дата обращения: 11.02.2024). – Текст : электронный.

23 Энергетическая стратегия России на период до 2020 года : [утверждена распоряжением Правительства РФ от 28.08.2003 № 1234-р] // Институт энергетической стратегии : [сайт]. – URL: http://www.energystrategy.ru/projects/ES-28_08_2003.pdf (дата обращения: 10.02.2024). – Текст : электронный.

24 Об энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года : распоряжение ОАО «РЖД» от 11.02.2008 № 269р // ОАО «Российские железные дороги» : [сайт]. – 2011. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=35#6745> (дата обращения: 10.02.2024). – Текст : электронный.

25 Концепции развития водородной энергетики в РФ : [утверждена распоряжением Правительства РФ от 5 августа 2021 г. №2162-р] // Информационный портал «Энергетическая политика и стратегия» : [сайт]. – URL: http://energypolicy.info/images/articles/NTE_010.pdf (дата обращения: 11.02.2024). – Текст : электронный.

26 Соглашение о сотрудничестве между ОАО «РЖД», АО «Группа Синара», АО «Роснано» в сфере разработки магистральных локомотивов с использованием силовой установки с электрохимическими генераторами с водород-воздушными топливными элементами и литий-ионными

аккумуляторными батареями : [от 4 июня 2021 г. № 58]. – 14 с. – Текст : непосредственный.

27 **Журавлев, А. Н.** Повышение эффективности работы тепловозного газодизеля путем регулирования соотношения воздуха и топлива в цилиндрах : специальность 2.9.3. «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Журавлев Андрей Николаевич ; Самарский государственный университет путей сообщения. – Самара, 2022. – 123 с. – Текст : непосредственный.

28 **Грачев, Н. В.** Энергосберегающее управление силовыми установками газотурбинных локомотивов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Грачев Николай Валерьевич ; Петербургский государственный университет путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2021. – 167 с. – Текст : непосредственный.

29 **Руденко, В. Ф.** Газотурбовоз ГТ1 на альтернативном моторном топливе СПГ / В. Ф. Руденко, А. Г. Воронков, Е. Ю. Стальнов // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 5. – С. 63–65. – Текст : непосредственный.

30 **Пышный, И. М.** Локомотивы нового поколения, эксплуатирующиеся на сжиженном природном газе / И. М. Пышный, А. Г. Русаков // Инновационный транспорт. – 2014. – № 2 (12). – С. 28–30. – Текст : непосредственный.

31 **Санчугов, В. И.** Автоматика и управление энергетическими установками с газотурбинным приводом : учебное пособие / В. И. Санчугов, Е. В. Шахматов // Самара : Издательство Самарского университета, 2017. – 260 с. : ил. – 200 экз. – ISBN 978-5-7883-1163-0. – Текст : непосредственный.

32 Возможности применения альтернативных источников энергии для локомотивов / Материалы компаний Ballard Power Systems, Progress Rail,

Union Pacific, Wabtec // Железные дороги мира. – 2023. – № 11. – С.48–51. – Текст : непосредственный.

33 Тренды рынка подвижного состава : альманах к салону PRO//Движение.Экспо / Информационное агентство ROLLINGSTOCK Agency. – 2023. – С. 52–59. – Текст : непосредственный.

34 На TRAKO представлен польский локомотив на водородном топливе / Железные дороги мира : [сайт]. – URL: <https://zdmira.com/news/na-trako-predstavlen-polskij-lokomotiv-na-vodorodnom-toplive> (дата обращения: 11.02.2024). – Текст : электронный.

35 Siemens начинает ходовые испытания поездов на водородном топливе Mireo Plus H / Железные дороги мира : [сайт]. – URL: <https://zdmira.com/news/siemens-nachinaet-khodovye-ispytaniya-poezdov-na-vodorodnom-toplive-mireo-plus-h> (дата обращения: 11.02.2024). – Текст : электронный.

36 Техника маневрирования. Как работает локомотив-беспилотник на станции Лужская / Гудок : [сайт]. – URL: <https://gudok.ru/content/mechengineering/1571805/> (дата обращения: 11.02.2024). – Текст : электронный.

37 **Ким, С. И.** Контроль исправности тепловоза ТЭМ7А перед началом работы в режиме «Автомашинист» / С. И. Ким, А. А. Пронин, С. В. Елисеев // Локомотив. – 2023. – № 2 (794). – С. 5–6. – Текст : непосредственный.

38 **Никольский, К. Ю.** Разработка автоматического управления маневровым локомотивом / К. Ю. Никольский // Локомотив. – 2022. – № 12 (792). – С. 4. – Текст : непосредственный.

39 **Стойнова, О. Ф.** Беспилотный железнодорожный транспорт – технология будущего / О. Ф. Стойнова // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2020. – № 2. – С. 66–74. – Текст : непосредственный.

40 В беспилотном режиме / Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 12. – С. 3. – Текст : непосредственный.

41 **Балабин, В. Н.** Методика оценки эксплуатационной работы дизелей маневровых тепловозов / В. Н. Балабин, В. Н. Васильев, М. А. Ибрагимов //

Проблемы безопасности российского общества. – 2014. – № 3/4. – С. 166–172.

– Текст : непосредственный.

42 **Балабин, В. Н.** Расход топлива можно учитывать точно / В. Н. Балабин, В. З. Какоткин, О. Ю. Живов // Локомотив. – 2003. – № 4. – С. 33–35.

– Текст : непосредственный.

43 **Фалендыш, А. П.** Оценка технического уровня маневровых тепловозов с гибридной передачей / А. П. Фалендыш, Н. В. Володарец // Вестник СНУ им. В. Даля. – 2010. – № 5(147). – Ч. 2. – С. 134–141. – Текст : непосредственный.

44 **Гончаров, Н. Е.** Маневровая работа на железнодорожном транспорте : монография / Н. Е. Гончаров, В. П. Казанцев. – Москва : Транспорт, 1978. – 183 с. : ил. ; 21 см. – Библиогр.: с. 180–181. – 10000 экз. – ISBN 5-1310132-A. – Текст : непосредственный.

45 **Бородин, А. Ф.** Технология работы сортировочных станций: учебное пособие / А. Ф. Бородин, Г. М. Биленко, О. А. Олейник, Е. В. Бородина ; под редакцией А. Ф. Бородина. – Москва : РГОТУПС, 2002. – 192 с. : ил. – Библиогр.: с. 188–189. – 2500 экз. – ISBN 5-7473-0107-1. – Текст : непосредственный.

46 Маневровые тепловозы / под редакцией Л. С. Назарова. – М.: Транспорт, 1977. – 408 с. – Библиогр.: с. 404–405. – 50000 экз. – Текст : непосредственный.

47 **Кузнецова, И. А.** О рациональном выборе маневровых гибридных локомотивов в зависимости от условий эксплуатации / И. А. Кузнецова // Сборник научных статей XII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», 20–21 октября 2011 г. – Москва : МИИТ, 2011. – С. V-17– V-18. – Текст : непосредственный.

48 **Кузнецова, И. А.** Оценка технико-энергетической эффективности работы маневровых тепловозов путем моделирования рабочих процессов оборудования в режимах эксплуатации : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузнецова Ирина

Алексеевна ; АО «ВНИИЖТ». – Москва, 2018. – 168 с. – Текст : непосредственный.

49 Типовой технологический процесс работы сортировочной станции : Проект / СССР МПС. Главное управление движения. – Москва : [б. и.], 1961. – 134 с., 14 л. ил. ; 29 см. – Текст : непосредственный.

50 Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД», нормативы численности бригад маневровых локомотивов : постановление ОАО «РЖД» от 20.12.2006 № 05.66 : утверждены вице-президентом ОАО «РЖД» С. В. Козыревым 08.02.2007. – Москва : Техинформ, 2007. – 132 с. – 2000 экз. – Текст : непосредственный.

51 Вождение поездов: Пособие машинисту : производственно-практическое издание / Р. Г. Черепашенцев, В. А. Бирюков, В. Т. Понкрашов, А. Н. Судилковский ; под редакцией Р. Г. Черепашенца. – Москва : Ордена «Знак Почета» издательство «Транспорт», 1994. – 304 с. : ил. – Библиогр.: с. 301–302. – 10000 экз. – Текст : непосредственный.

52 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утверждены приказом Министерства Транспорта Российской Федерации № 250 от 23 июня 2022 г. – 528 с. – Текст : непосредственный.

53 Секерин, Е. В. Эффективный путь экономии топлива на маневровой работе / Е. В. Секерин // Электрическая и тепловозная тяга. – 1971. – № 7. – С. 18. – Текст : непосредственный.

54 Кузнецова, И. А. К вопросу снижения расхода топлива при выполнении маневровой работы тепловозами / И. А. Кузнецова // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 6. – С. 23–28. – Текст : непосредственный.

55 Автоматизированные системы управления электроподвижным составом. Часть 1: Теория автоматического управления : Учебник / Л. А. Баранов, А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 400 с. – ISBN 978-5-89035-616-1. – Текст : непосредственный.

56 Пудовиков, О. Е. Новые подходы к разработке систем автоматического управления скоростью длинносоставных поездов /

О. Е. Пудовиков, Н. О. Жухин // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 81–89. – Текст : непосредственный.

57 Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов ; под редакцией Л. А. Баранова. – Москва : Транспорт, 1990. – 272 с.: ил. ; 21 см. – Библиогр.: с. 262–268. – ISBN 5-277-00964-7. – Текст : непосредственный.

58 **Пудовиков, О. Е.** Автоматическое управление скоростью грузового поезда с электровозом, допускающим плавное управление силами тяги и торможения : специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт)» ; специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пудовиков Олег Евгеньевич ; МИИТ. – Москва, 2011. – 290 с. – Текст : непосредственный.

59 **Пудовиков, О. Е.** Система автоматического регулирования движения перспективного электропоезда : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пудовиков Олег Евгеньевич ; МИИТ. – Москва, 2000. – 134 с. – Текст : непосредственный.

60 Система автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. И. Астрахан, В. М. Максимов ; под редакцией Л. А. Баранова. – Москва : Транспорт, 1984. – 312 с. : ил. ; 22 см. – Библиогр.: с. 305–309. – 760 экз. – Текст : непосредственный.

61 **Баранов, Л. А.** Модели систем автоматического управления: учебник по автоматизации и управлению в технических системах / Л. А. Баранов ; Министерство путей сообщения Российской Федерации ; Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). – Москва : МИИТ, 2003. – 186 с. : ил. ; 29 см. – Текст : непосредственный.

62 **Баранов, Л. А.** Модели и методы синтеза микропроцессорных систем автоматического управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой / Л. А. Баранов // Вестник МИИТа. – 2004. Вып. 10. – С. 3–16. – Текст : непосредственный.

63 **Савоськин, А. Н.** Дополнение к системе автоматического управления электровоза ЧС2К / А. Н. Савоськин, М. С. Антонюк // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 7. – С. 54–56. – Текст : непосредственный.

64 **Савоськин, А. Н.** Выбор структуры регулятора скорости движения магистральных электровозов / А. Н. Савоськин, А. А. Ефремов, П. Е. Коваль // Вестник ВНИИЖТ. – 1987. – № 1. С. 24–26. – Текст : непосредственный.

65 **Феоктистов, В. П.** Автоматическое регулирование скорости электроподвижного состава / В. П. Феоктистов, И. Н. Шапкин // Железнодорожный транспорт. – 1968. – № 3. С. 86–91. – Текст : непосредственный.

66 **Коваль П. Е.** Система автоматического регулирования скорости движения грузового электровоза : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коваль Павел Евгеньевич ; Моск. ин-т инженеров ж.-д. трансп. им. Ф. Э. Дзержинского. Москва, 1989. – 164 с. – Текст : непосредственный.

67 Схемы электрических цепей тепловозов ТЭП70, 2ТЭ116 : Учебное иллюстрированное пособие / В. В. Грачев, Б. Н. Морошкин, С. В. Сергеев, Д. Н. Курилкин, А. А. Надеждин // Москва : Маршрут. – 2006. – 137 с. : ил. – 1500 экз. – ISBN 5-89035-254-7 – Текст : непосредственный.

68 Тепловоз ТЭП70БС. Руководство по эксплуатации: [в 3 частях] : часть 1: Техническое описание ТЭП70А.00.РЭ. – Коломна : Коломенский завод, 2010. – 363 с. – Текст : непосредственный.

69 **Ким, С. И.** Расчет характеристик параллельной работы систем энергоснабжения пассажирских тепловозов ТЭП70БС, соединенных по системе двух единиц с двухэтажными пассажирскими вагонами и результаты

предварительных испытаний на Северо-Кавказской железной дороге / С. И. Ким, А. А. Пронин, С. Л. Марковский // Вестник ВНИКТИ. – 2018. – Вып. 101. – С. 77–82. – Текст : непосредственный.

70 **Никифоров, Б. Д.** Автоматизация управлением торможением поездов : монография / Б. Д. Никифоров, В. И. Головин, Ю. Г. Кутыев. – Москва : Транспорт, 1985. – 263 с. : ил. ; 22 см. – Библиогр.: с. 256–257. – 2100 экз. – Текст : непосредственный.

71 **Гуткин, Л. В.** Электропоезд ЭР200 : монография / Л. В. Гуткин, Ю. Н. Дымант, И. А. Иванов. – Москва : Транспорт. 1981. – 192 с. : ил. – Библиогр.: с. 189–190. – 4000 экз. – Текст : непосредственный.

72 Train cruise control / Colin Cole, Scott Simson, Mitchell McClanachan, Ted McLeod, John Phelan // 9th International Heavy Haul Association Conference : Heavy Haul and Innovation Development , 22 June 2009 – 25 June 2009. – China, Beijing, 2009. – pp. 638–645.

73 Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways / Hairong Dong, Bin Ning, Baigen Cai, Zhongsheng Hou // IEEE circuits and systems magazine. – Secondquarter 2010. – Vol. 10, Iss. 2.

74 **Zhuan, X.** Cruise Control Scheduling of Heavy Haul Trains / X. Zhuan, X. Xia // Ieee transactions on control systems technology. Vol. 14, no. 4, 2006. – P. 757–766. DOI: 10.1109/TCST.2006.872506.

75 Train Speed Control in Moving-Block Railway Systems: An Online Adaptive PD Controller Design / M. Durmus, K. Ucak, G. Oke, M. Soylemez // 1st IFAC Workshop on Advances in Control and automation Theory for Transportation Applications, September 16–17. – Istanbul, Turkey, 2013. – pp. 7–12.

76 Бортовой модуль непрерывного удаленного контроля параметров тепловоза в эксплуатации (АСК ВНИКТИ) / М.В. Федотов, А.И. Нестеров, А.В. Грищенко, В.В. Грачев, Ф.Ю. Базилевский // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Локомотивы. XXI век», 15–16 октября 2013 г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2013. – С. 125–126. – Текст : непосредственный.

77 Комплексное использование диагностической информации для оценки технического состояния тепловозного парка / М. В. Федотов, В. А. Киреев, А. И. Нестеров, А. Л. Шарапов // Вестник ВНИКТИ. – 2015. – № 97. – С. 73–76. – Текст : непосредственный.

78 Система МСУ-ТП на тепловозе 2ТЭ116У(УМ) / С. В. Сергеев, А. Л. Ткаченко, О. А. Моисеев, И. И. Городецкий // Локомотив. – 2011. – № 8. – С. 11–13. – Текст : непосредственный.

79 Электрическая схема тепловоза 2ТЭ116У / С. В. Сергеев, А. В. Пархонин и др. // Локомотив. – 2009. – № 6. – С. 22–25. – Текст : непосредственный.

80 Знакомьтесь: тепловоз 3ТЭ116У / С. В. Сергеев, М. В. Федотов, А. Л. Ткаченко, С. В. Ким, Е. В. Долганова, И. В. Рубаник, Р. В. Нестеренко, Ю. Г. Алешевский // Локомотив. – 2014. – № 3 (687). – С. 38–42. – Текст : непосредственный.

81 Тепловоз 2ТЭ116У. Руководство по эксплуатации 2ТЭ116.00.00.008-01РЭ [в 4 частях] : часть 1. Описание и работа / ПАО «Лугансктепловоз». – Луганск, 2007. – 147 с. – Текст: непосредственный.

82 Исследование тормозной эффективности маневрового локомотива при выполнении технологических операций на сортировочной горке / И. А. Ролле, А. Г. Брагин, В. О. Иващенко, А. Е. Цаплин // Бюллетень результатов научных исследований. – 2019. – № 2. – С. 72–80. DOI: 10.20295/2223-9987-2019-2-72-80. – Текст : непосредственный.

83 **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. – Текст : непосредственный.

84 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. – Текст : непосредственный.

85 Моделирование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя / Марков В. А., Поздняков Е. Ф., Фурман В. В., Плахов С. В // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 7 (712). – С. 35–46. – Текст : непосредственный.

86 **Павлов, Д. В.** Математическое моделирование процесса функционирования одноцилиндрового дизеля с воздушным охлаждением с учетом расхода картерных газов / Д. В. Павлов, К. Ю. Платонов, Р. Н. Хмелев // Известия МГТУ «МАМИ». – 2020. – № 3(45). – С. 75–82. – Текст : непосредственный.

87 **Вершина, Г. А.** Тепловой и динамический расчет двигателей внутреннего сгорания : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / Г. А. Вершина, Г. М. Кухаренок, А. Ю. Пилатов. – Минск : БНТУ, 2013. – 79 с. : ил. – Библиогр.: с. 76. – 100 экз. – ISBN 978-985-550-320-1. – Текст : непосредственный.

88 **Майорова, Ю. А.** Моделирование дизель-генераторной установки с турбонаддувом двигателем постоянного тока / Ю. А. Майорова, А. К. Пронина, К. П. Путилин // Энергетические установки и технологии. – 2018. – № 2. – С. 34–44. – Текст : непосредственный.

89 **Путинцев, С. В.** Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний : учебное пособие по дисциплине «Специальные главы конструирования и САПР» / С. В. Путинцев. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 288 с. : ил. – Библиогр.: С. 263–273. – Текст : непосредственный.

90 **Ключев, В. И.** Теория электропривода : Учебник для вузов / В. И. Ключев. – [3-е издание, переработанное и дополненное]. – Москва : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. : ил. – Библиогр.: с. 689. – 1000 экз. – ISBN 5-283-00642-5. – Текст : непосредственный.

91 Правила тяговых расчетов для поездной работы : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р. – Москва, 2016. – 515 с. – Текст : непосредственный.

92 **Фурман, В. В.** Улучшение эксплуатационно-технических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем создания и совершенствования систем электронного управления : специальность 05.04.02 «Тепловые двигатели» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Фурман Виктор Владимирович ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва, 2016. – 32 с. – Текст : непосредственный.

93 **Поздняков, Е. Ф.** Анализ эффективности использования регулятора частоты вращения с последовательно включенными корректирующими звеньями в дизельном двигателе дизель-генераторной установки : специальность 05.04.02 «Тепловые двигатели» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Поздняков Евгений Федорович ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва, 2009. – 150 с. – Текст : непосредственный.

94 **Свойкин, А. О.** Исследование динамического поведения плунжера золотника с модернизированным приводом / А. О. Свойкин, П. Я. Крауиньш // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2022. – № 3. – С. 246–254. – Текст : непосредственный.

95 **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. – Текст : непосредственный.

96 **Аунг Зо Тун.** Система автоматического управления скоростью движения электропоезда городской транспортной системы города Янгон : специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аунг Зо Тун ; МГУПС (МИИТ). – Москва, 2016. – 24 с. – Текст : непосредственный.

97 **Киселев, М. Д.** Автоматическое управление скоростью грузового поезда при использовании распределенной тяги : специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт)» ; специальность 05.22.07 «Подвижной состав

железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Киселев Максим Дмитриевич ; РУТ (МИИТ). – Москва, 2019. – 176 с. – Текст : непосредственный.

98 Система управления горочным локомотивом с реализацией технологии автоматического регулирования скорости надвига и роспуска (САУ ГЛ) : техническое задание / Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ОАО «ВНИКТИ»)). – Коломна, 2013. – 18 с. – Текст : непосредственный.

99 Babkov, Yu. V. To the issue of creating a “smart” locomotive = К вопросу создания "умного" локомотива / Yu. V. Babkov, S. I. Kim, S. N. Zhuravlev, A. A. Pronin = Ю. В. Бабков, С. И. Ким, С. Н. Журавлев, А.А. Пронин // AIP Conference Proceedings. – 2021. – vol. 2389, iss. 1. – 7 p.

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

101 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. – Текст : непосредственный.

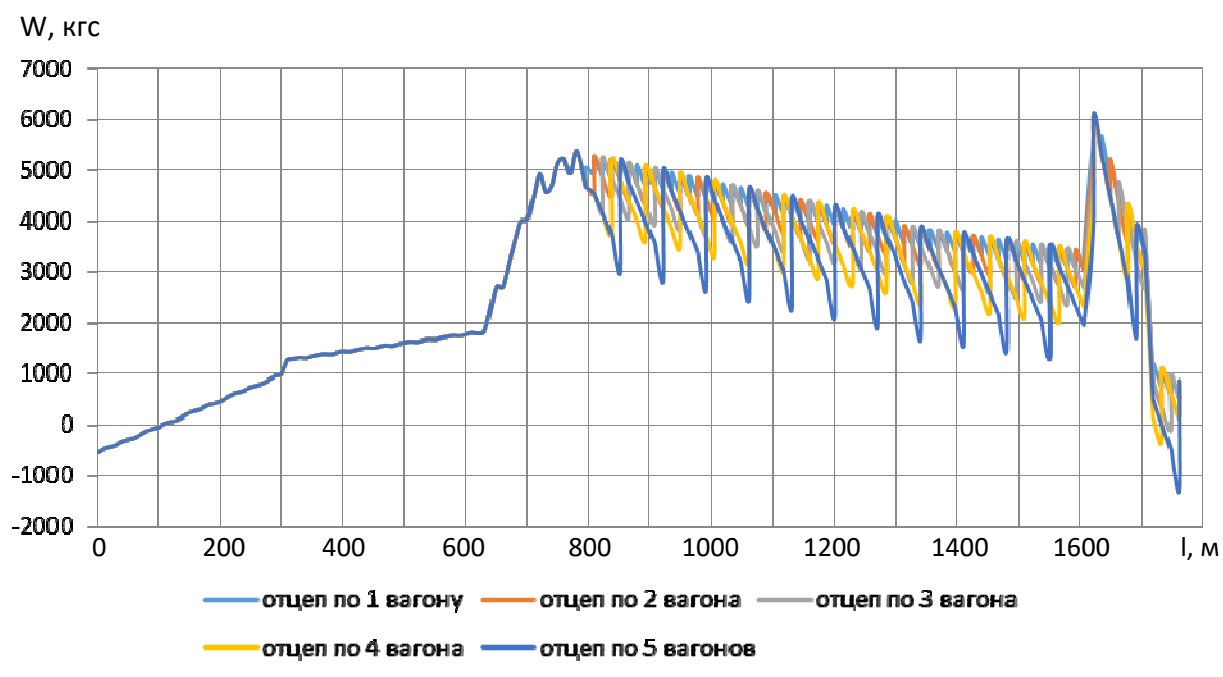
102 Журавлев, С. Н. Система поддержания заданной скорости локомотива / С. Н. Журавлев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4. – С. 17–22. – Текст : непосредственный.

103 Преобразователь напряжения измерительный ПН1. Руководство по эксплуатации 27.Т.288.00.00.000 РЭ / Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ОАО ВНИКТИ). – Коломна, 2005. – 23 с., цв. ил. – Текст : непосредственный.

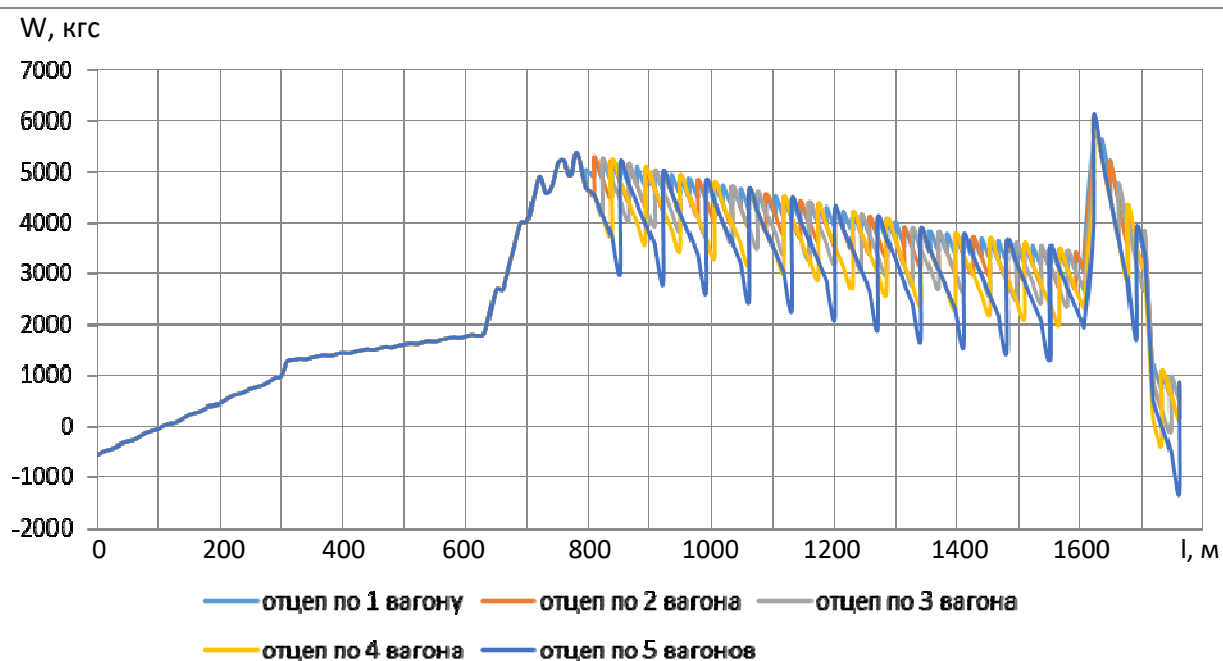
104 Датчик угла поворота Л178/1.2. Руководство по эксплуатации ЦАКТ.402131.005 РЭ / ОАО «Электромеханика». – Пенза, 2021. – 19 с., ил. – Текст : непосредственный.

105 **Савицкий, А. Г.** Комплексная система автоматизированного управления сортировочным процессом : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Савицкий Александр Григорьевич ; МИИТ. – Москва, 2005. – 24 с. – Текст : непосредственный.

**Результаты расчетов сопротивления движению от уклона при надвиге
порожних и груженных вагонов на сортировочную горку**



**Рисунок А.1 – Результаты расчета сопротивления движению от уклона
при надвиге 70 порожних вагонов со стороны «больших» путей
на горочные пути Г3 и Г4**



**Рисунок А.2 – Результаты расчета сопротивления движению от уклона
при надвиге 70 груженных вагонов со стороны «больших» путей
на горочные пути Г3 и Г4**

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

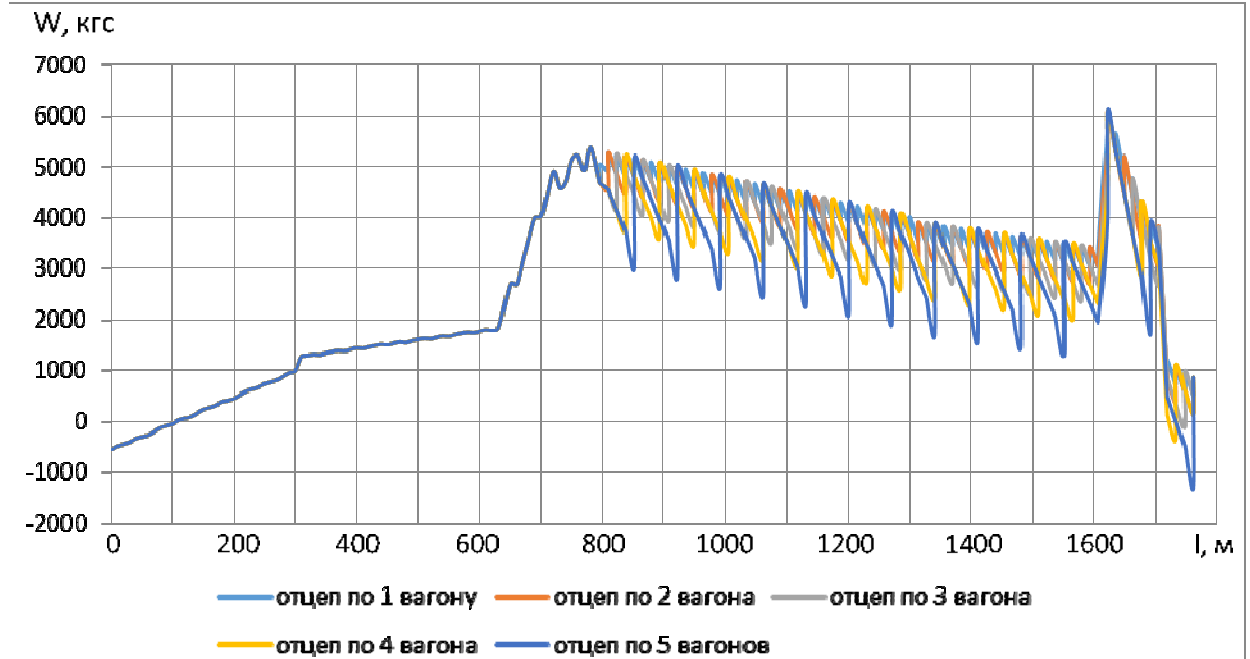


Рисунок А.3 – Результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 40 порожних вагонов со стороны «малых» путей на горочные пути Г1 и Г2

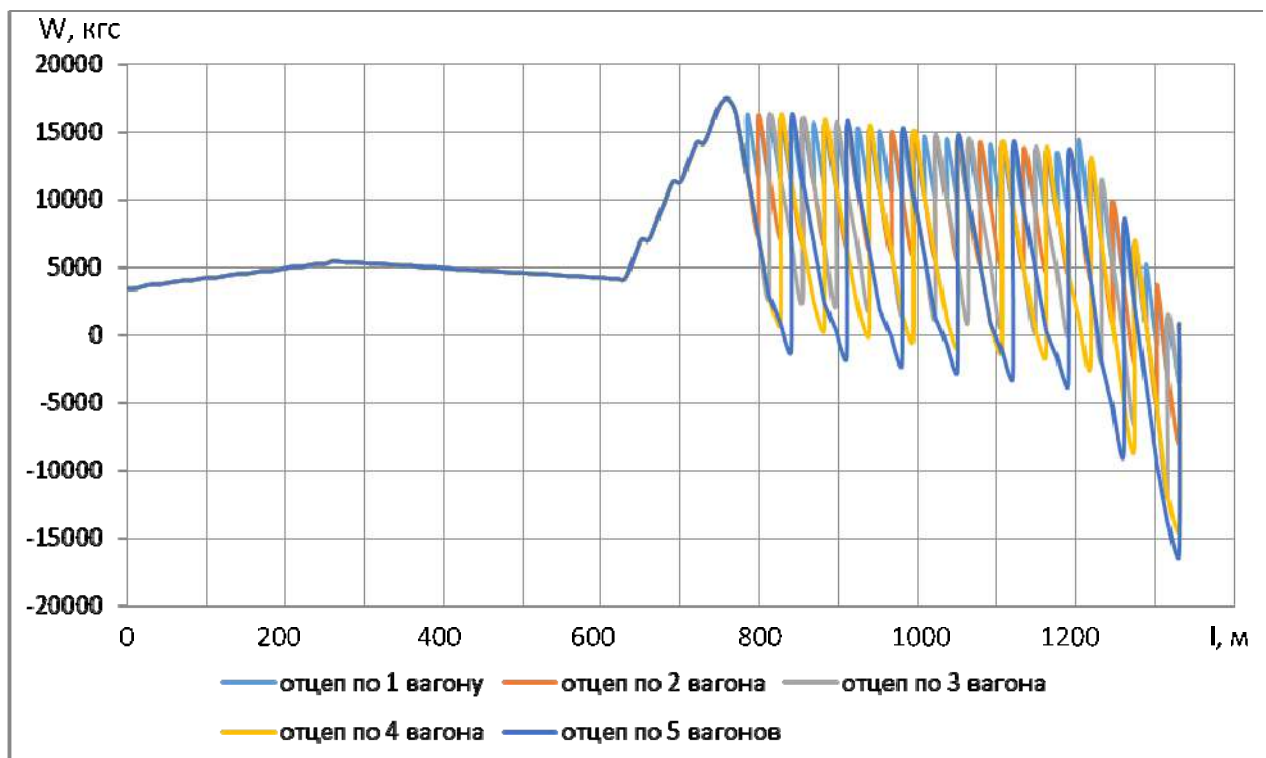


Рисунок А.4 – Результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 40 груженых вагонов со стороны «малых» путей на горочные пути Г1 и Г2

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

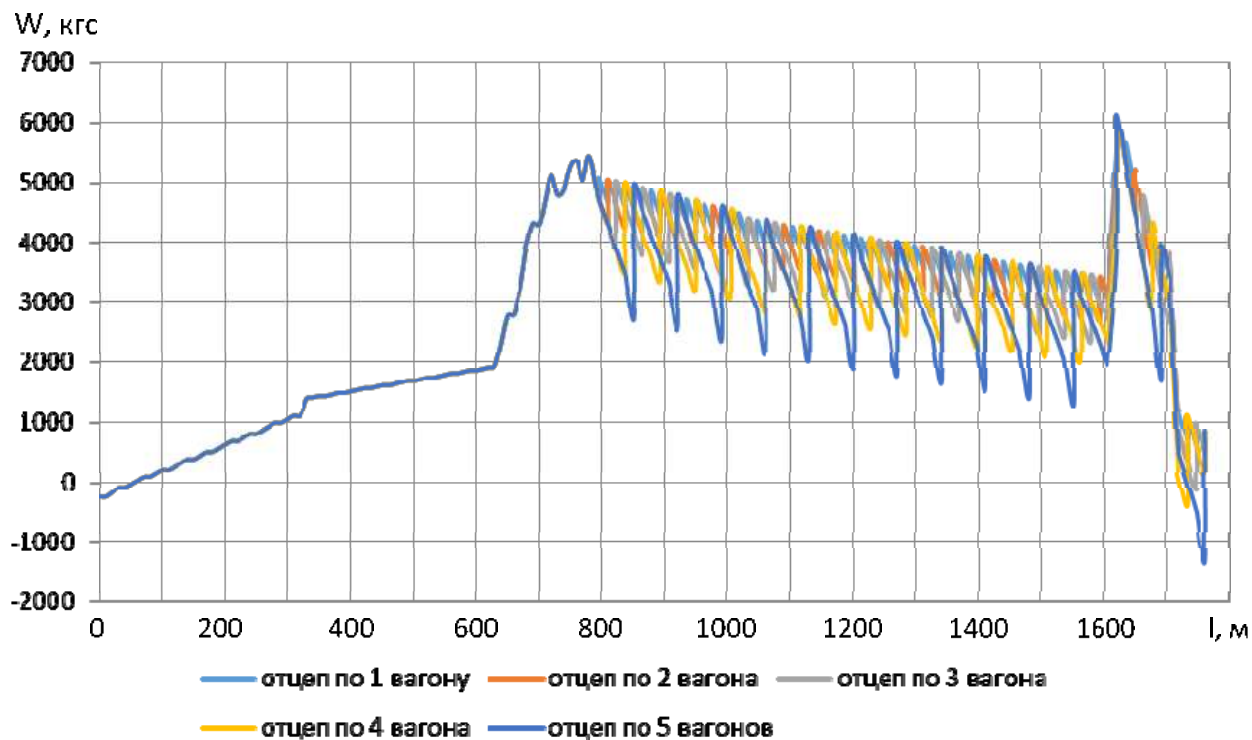


Рисунок А.5 – Результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 70 порожних вагонов со стороны «малых» путей на горочные пути Г3 и Г4

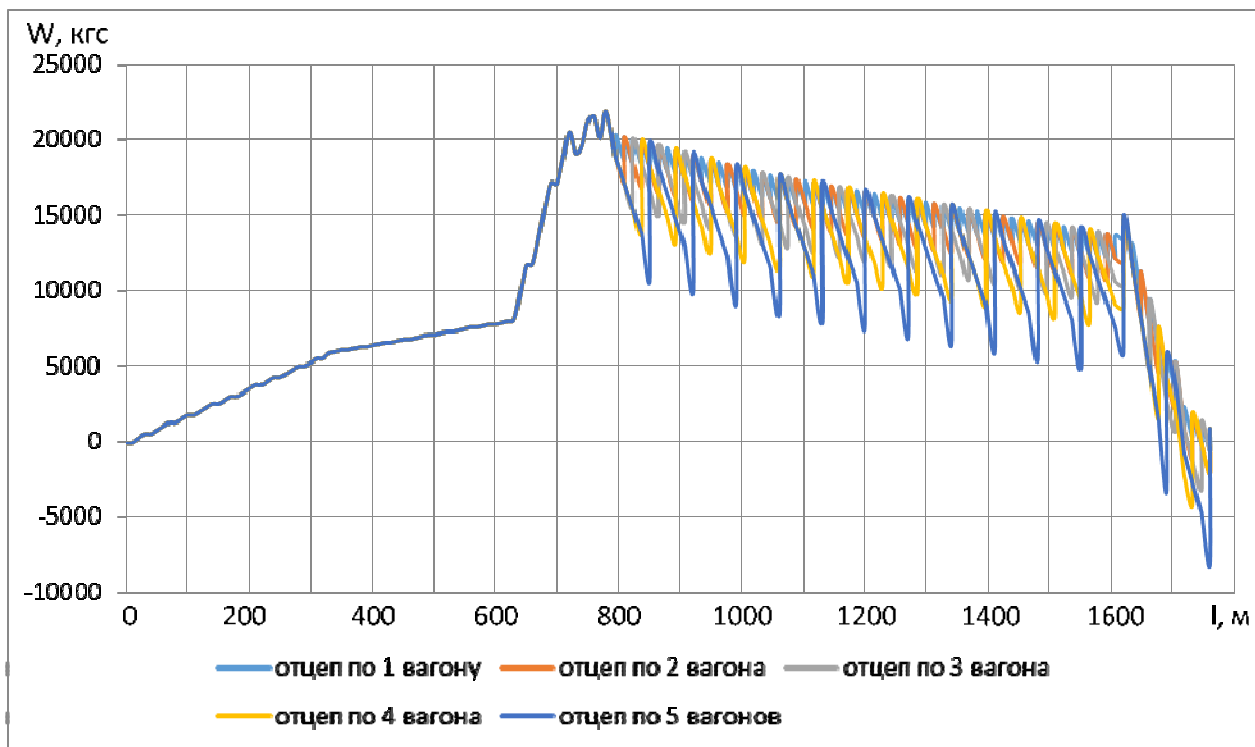
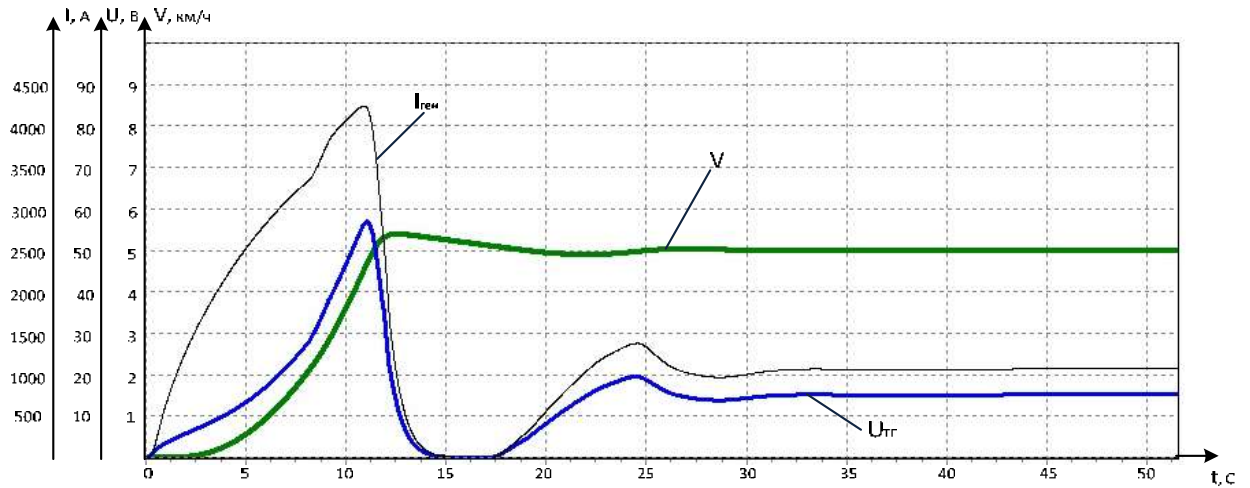
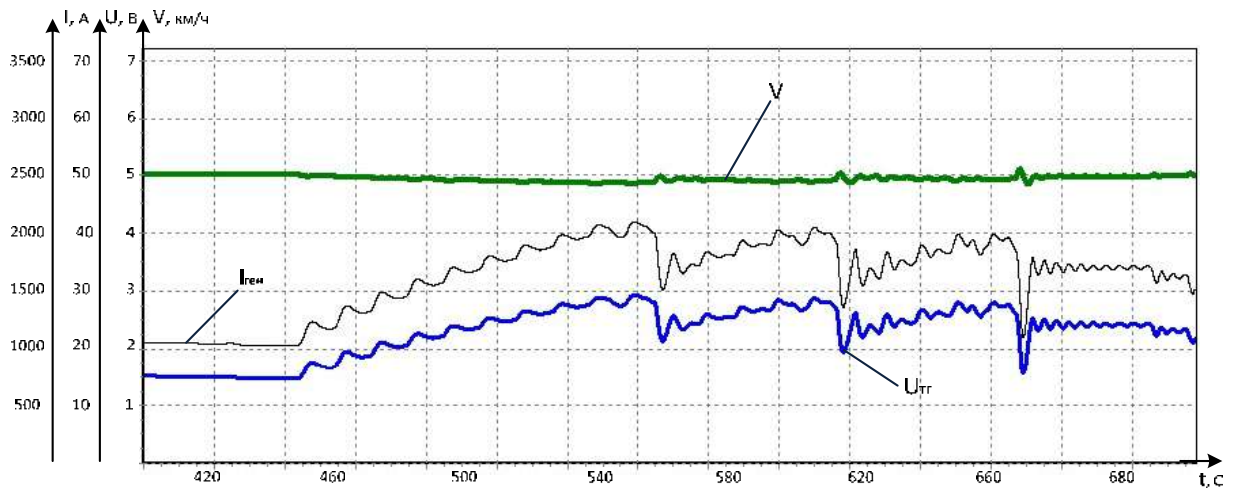


Рисунок А.6 – Результаты расчета сопротивления движению от уклона при надвиге 70 груженых вагонов со стороны «малых» путей на горочные пути Г3 и Г4

**Результаты моделирования процессов надвига и роспуска составов на
сортировочную горку в режиме поддержания заданной скорости
движения**



**Рисунок Б.1 – Результаты моделирования при разгоне и поддержании скорости
при массе поезда 1600 т**



**Рисунок Б.2 – Результаты моделирования при надвиге и начале роспуска состава
при массе поезда 1600 т**

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

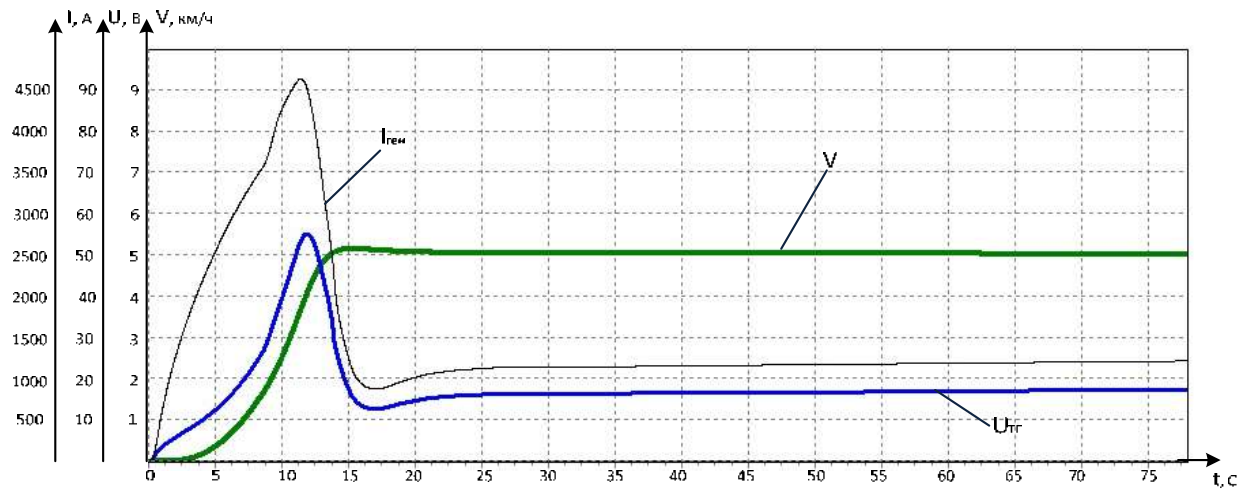


Рисунок Б.3 – Результаты моделирования при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 2400 т

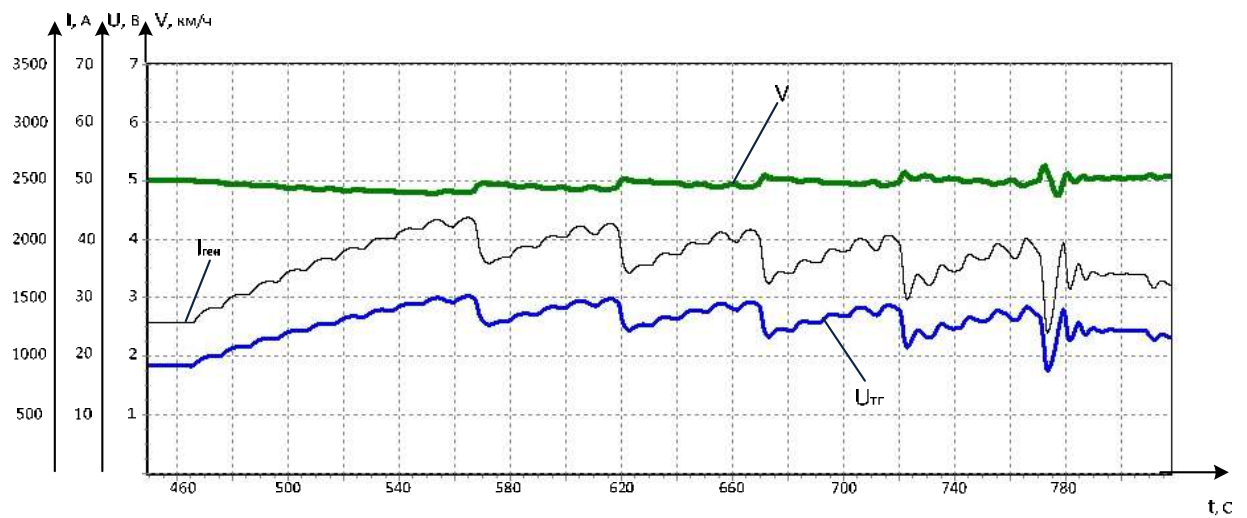


Рисунок Б.4 – Результаты моделирования при движении и начале роспуска состава при массе поезда 2400 т

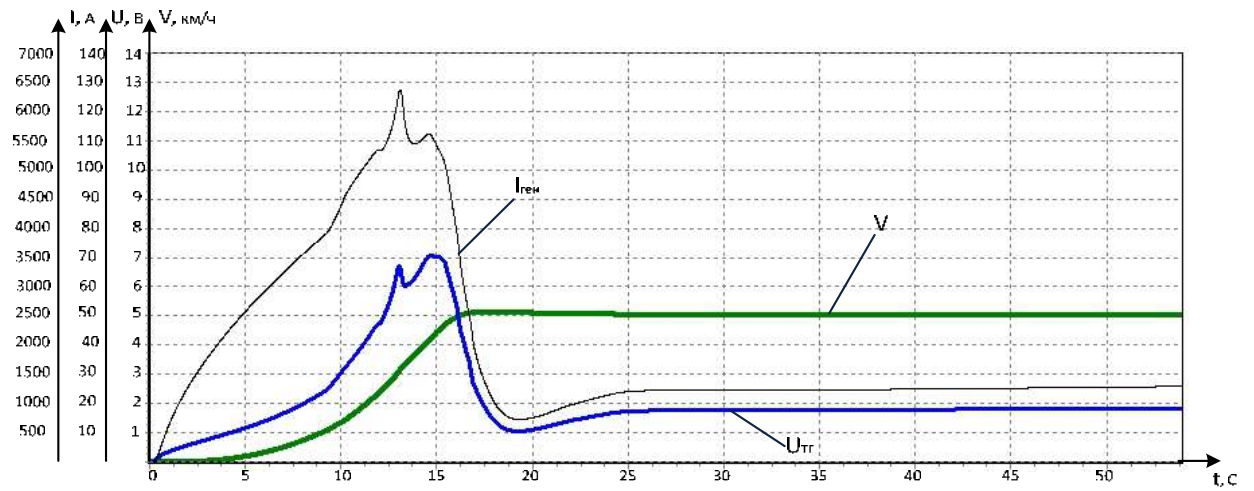


Рисунок Б.5 – Результаты моделирования при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 4800 т

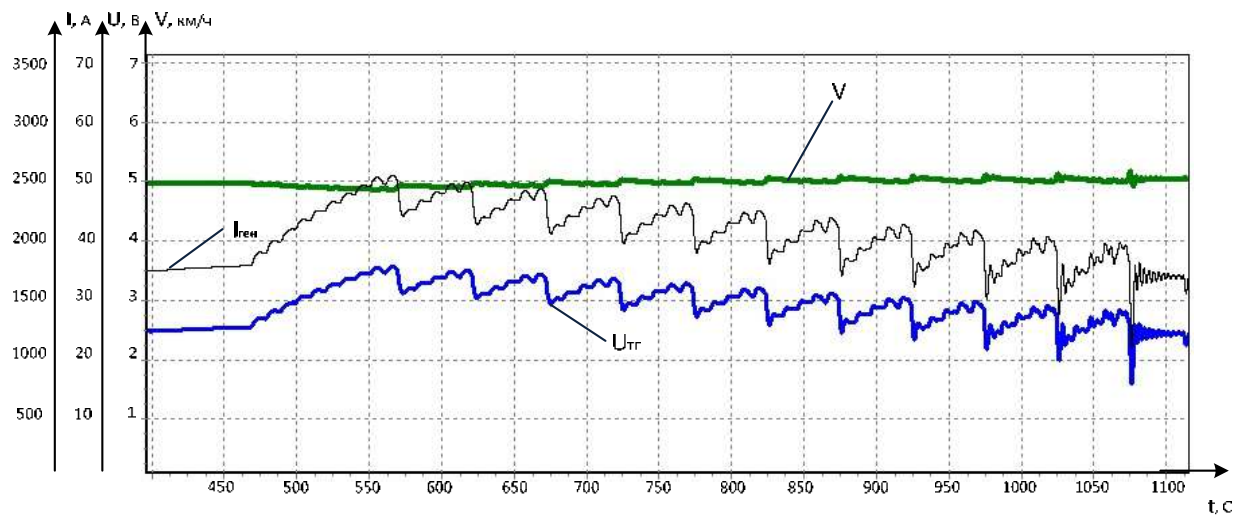


Рисунок Б.6 – Результаты моделирования при надвиге и начале роспуска состава при массе поезда 4800 т

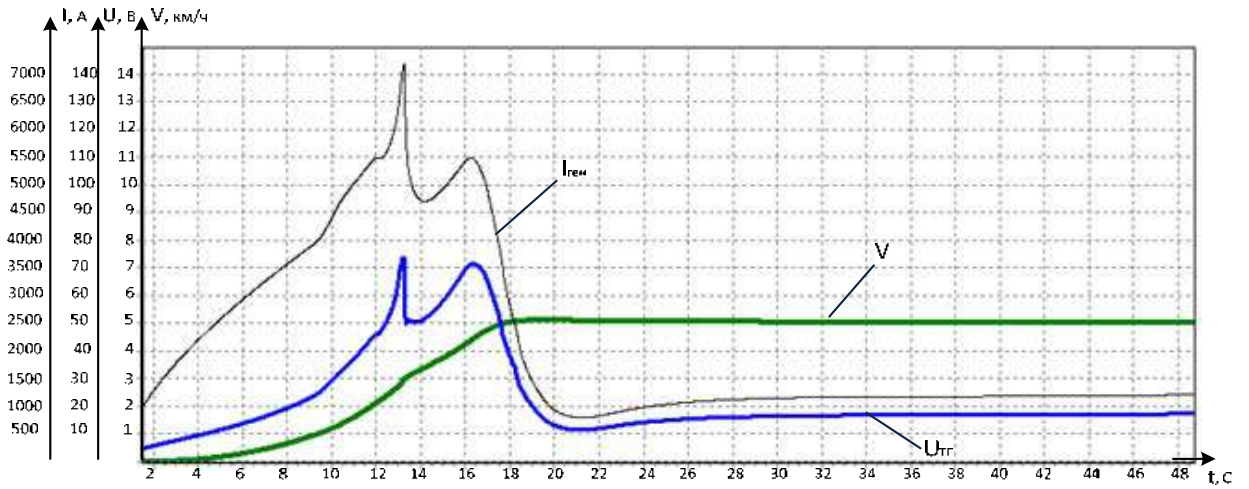


Рисунок Б.7 – Результаты моделирования при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 5600 т

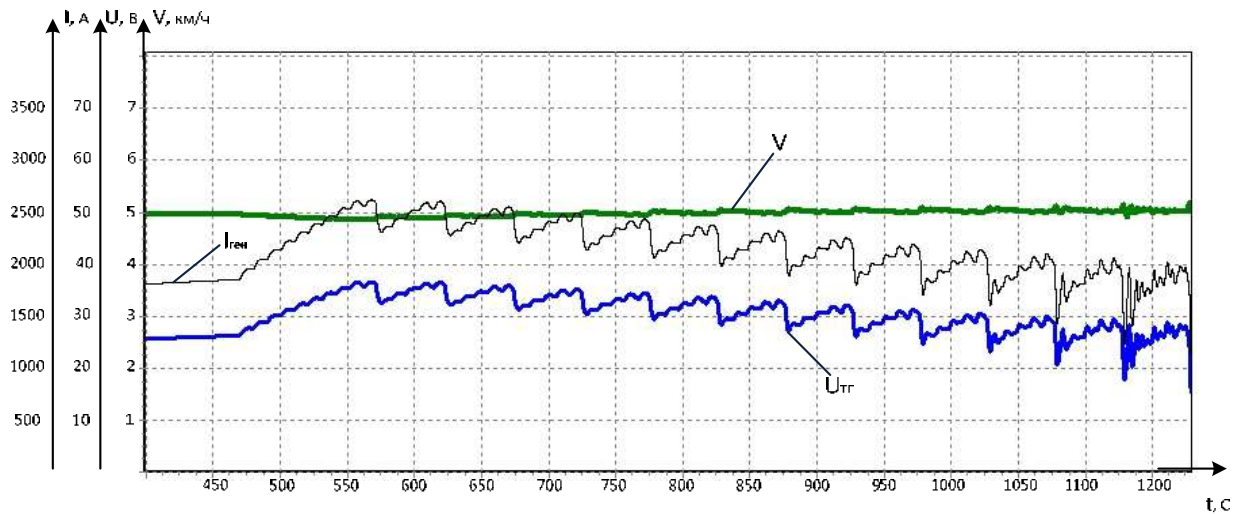


Рисунок Б.8 – Результаты моделирования при движении и начале роспуска состава при массе поезда 5600 т

Результаты экспериментальных исследований при надвиге и роспуске составов на сортировочную горку

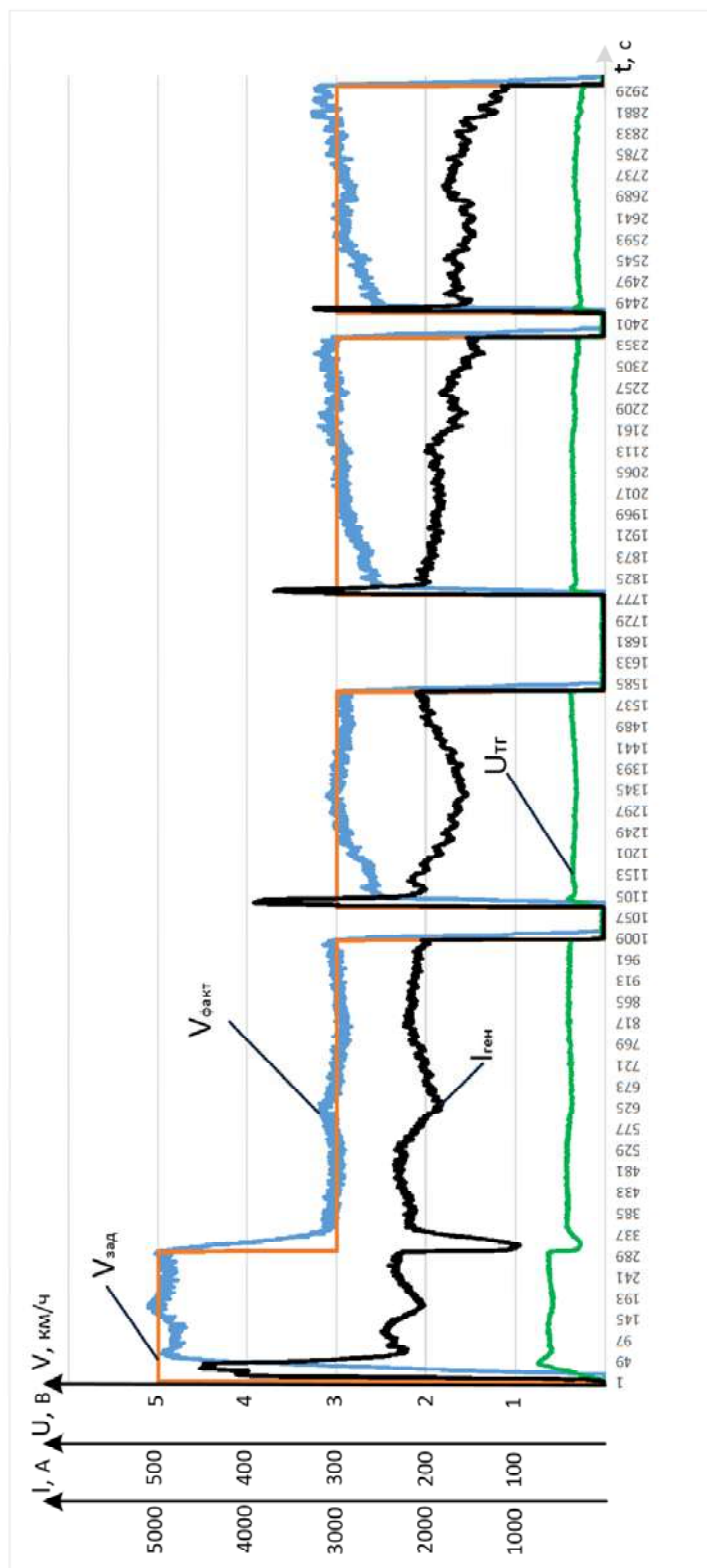


Рисунок В.1 – Экспериментальные результаты при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 2300 т

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

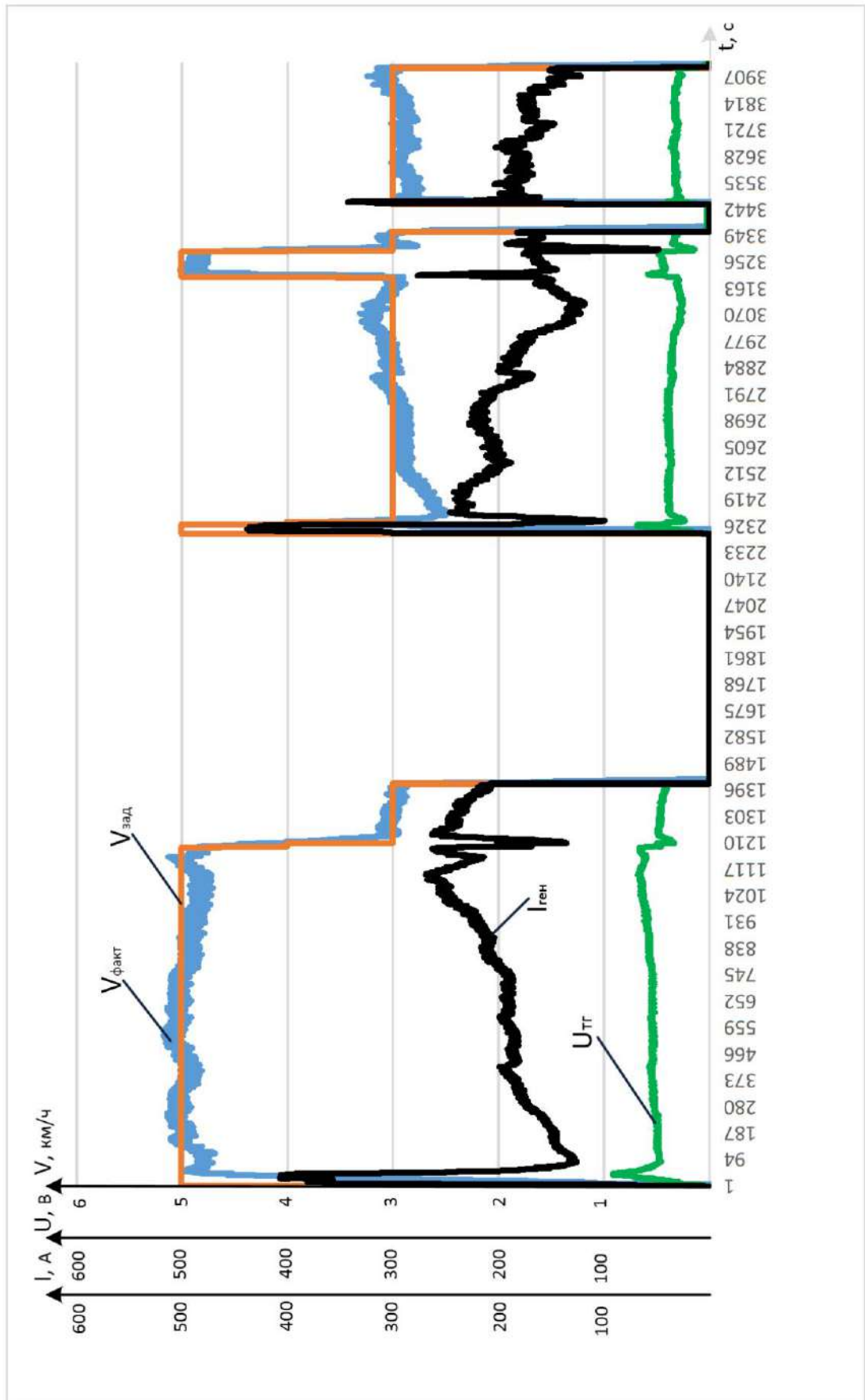


Рисунок В.2 – Экспериментальные результаты при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 1600 т

**Акт проведения испытаний на станции Лужская Октябрьской
железной дороги**

АКТ

Проведения испытаний на тепловозе ТЭМ7А

Настоящий акт составлен о том, что в период с 11 по 12 июля 2023 года в парке приема станции Лужская Октябрьской железной дороги Журавлевым С.Н. совместно с представителями Октябрьской железной дороги проводились испытания на тепловозе ТЭМ7А №543.

Испытания проводились с целью проверки работоспособности адаптивного алгоритма поддержания заданной скорости движения маневрового тепловоза ТЭМ7А при совместной работе с системой управления сортировочным процессом MSR32 (разработки фирмы SIEMENS). В ходе испытаний тепловозом ТЭМ7А в автоматическом режиме выполнялись операции надвига и роспуска составов различной массы (от 900 т. до 5100 т.) со скоростями заданными системой верхнего уровня MSR32 (от 2км/ч до 5 км/ч).

Разработанный адаптивный алгоритм поддержания заданной скорости движения на маневровом тепловозе ТЭМ7А №543 работает корректно, перекрытий горочного светофора по несоответствию скорости движения локомотива заданной скорости движения от системы управления сортировочным процессом MSR32 не отмечалось.

От Октябрьской ж.д.:
Главный инженер ст. Лужская

От АО «ВНИКТИ»:
Заместитель главного инженера



Е.А. Козелепов

С.Н. Журавлев

Акт о практическом использовании диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ:

Первый заместитель
генерального директора –
главный инженер АО «ВНИКТИ»

к.т.н. Ю.В. Бабков

«15» февраля 2024г.

АКТ

о практическом использовании результатов диссертационной работы
Журавлева Сергея Николаевича «Адаптивная система автоматического
управления скоростью маневрового тепловоза»

Настоящий акт составлен о том, что в АО «ВНИКТИ» при разработке и создании микропроцессорных систем управления тепловозами различных серий используются результаты и рекомендации диссертации Журавлева С.Н. «Адаптивная система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза».

Применение результатов диссертационной работы позволило автоматизировать процессы управления электропередачей тепловоза, а также реализовать режим автоматического управления скоростью движения маневрового тепловоза ТЭМ7А при совместной работе с системой управления сортировочным процессом MSR32.

Заведующий НИКБ ЭМСУ, к.т.н.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'Y' followed by a horizontal line and a loop.

Ю.И. Клименко

Акт об использовании результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор РУТ (МИИТ)
к.ф.н.
 В.С. Тимонин
«20» «Февраля» 2024 года

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
«Адаптивная система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза»,
выполненной Журавлевым Сергеем Николаевичем, в учебном процессе

Результаты, полученные С.Н. Журавлевым при выполнении диссертационной работы «Адаптивная система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза» использованы при чтении лекций по дисциплинам «Теория систем автоматического управления», «Электрооборудование и системы управления тепловозов» в разделах «Адаптивные системы управления», «Системы регулирования тягового электропривода тепловозов», в дисциплине «Математическое моделирование» в разделах «Методы численного интегрирования дифференциальных уравнений», «Математическая модель энергетической установки автономного локомотива» которые читаются преподавателями кафедры «Электропоезда и локомотивы» для студентов специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» специализации «Электрический транспорт железных дорог», «Локомотивы», в лабораторных работах по этим дисциплинам, а также в рамках подготовки выпускных квалификационных работ обучающихся по этой специальности.

и.о. директора ИТТСУ
д.т.н., профессор



П.Ф. Бестемьянов

заведующий кафедрой
Электропоезда и локомотивы,
д.т.н., доцент



О.Е. Пудовиков

**Расчет чистого дисконтированного дохода
при внедрении САУГЛ с функцией «без машиниста»**

Таблица Ж.1 – Расчет чистого дисконтированного дохода при внедрении САУГЛ с функцией «без машиниста» для маневровой работы на станции Лужская Октябрьской железной дороги (3 тепловоза ТЭМ7А), тысяч рублей

Годы	Инвестиции	Экономия годовых текущих расходов	Амортизационные отчисления	Изменение налога на прибыль	Чистый денежный поток	Чистый доход	Коэффициент дисконтирования	Дисконтированный денежный поток	Интегральный эффект
0	39575,36				-39575,36	-39575,36	1,00000	-39575,36	-39575,36
1		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	-25543,93	0,91575	12849,29	-26726,07
2		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	-11512,5	0,81983	11503,4	-15222,67
3		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	2518,93	0,73134	10261,73	-4960,94
4		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	16550,36	0,65124	9137,78	4176,84
5		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	30581,79	0,57991	8136,94	12313,78
6		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	44613,22	0,51639	7245,71	19559,49
7		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	58644,65	0,45983	6452,11	26011,6
8		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	72676,08	0,40947	5745,42	31757,02
9		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	86707,51	0,36462	5116,13	36873,15
10		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	100738,94	0,32468	4555,77	41428,92
11		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	114770,37	0,28912	4056,79	45485,71
12		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	128801,8	0,25745	3612,46	49098,17
13		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	142833,23	0,22926	3216,79	52314,96
14		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	156864,66	0,20415	2864,46	55179,42
15		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	170896,09	0,18179	2550,72	57730,14
16		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	184927,52	0,16188	2271,35	60001,49
17		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	198958,95	0,14415	2022,57	62024,06
18		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	212990,38	0,12836	1801,04	63825,1
19		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	227021,81	0,11430	1603,78	65428,88
20		17044,6	1978,77	3013,17	14031,43	241053,24	0,10178	1428,12	66857
Всего	39575,36	340892	39575,4	60263,4	241053,24			66857	

Динамика изменения интегрального эффекта

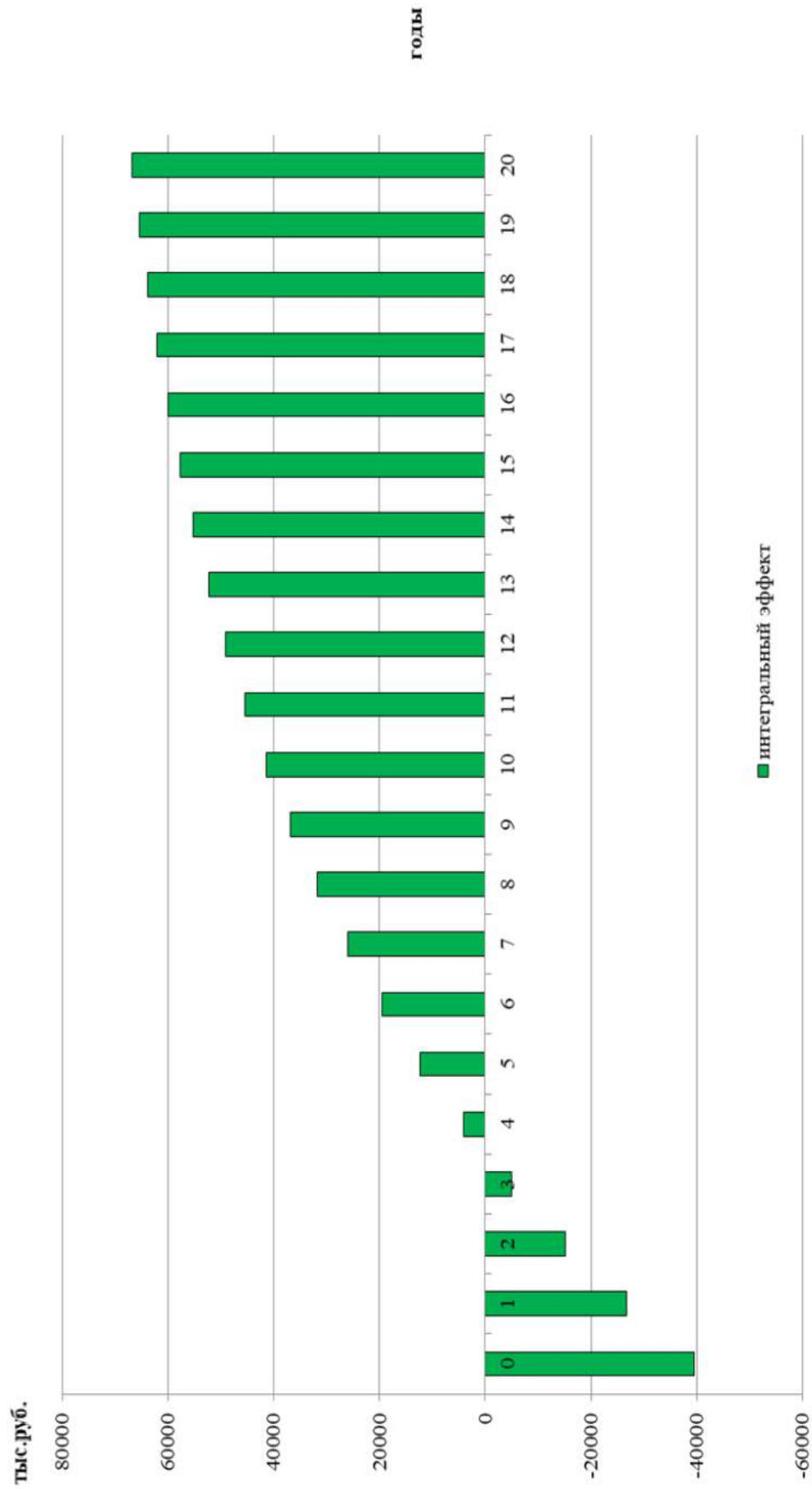


Рисунок 3.1 – Интегральный эффект и срок окупаемости затрат при внедрении САУ ГЛ с функцией «без машиниста» для маневровой работы на станции Лужская Октябрьской железной дороги (3 тепловоза ТЭМ7А)