

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

КОТЯЕВ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ

**УЛУЧШЕНИЕ ТЯГОВЫХ КАЧЕСТВ ТЕПЛОВОЗОВ ПУТЕМ
ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОВЫШЕНИЯ
СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕС С РЕЛЬСАМИ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Космодамианский Андрей Сергеевич

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	9
1.1 Анализ исследований в области сцепления колес локомотива	9
1.2 Влияние внешних факторов на сцепные качества локомотивов и способы повышения коэффициента сцепления	19
1.3 Электрические системы повышения сцепления колес тепловоза с рельсами ..	32
1.4 Выводы раздела 1	40
2 МАКЕТНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОВЫШЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ ОПЫТНОГО ТЕПЛОВОЗА	42
2.1 Обоснование метода экспериментальных исследований сцепных качеств локомотива с применением макетных систем	42
2.2 Устройство макетной системы повышения сцепления колес с рельсами опытного тепловоза	46
2.2.1 Общее устройство и принцип действия системы	46
2.2.2 Буксовый узел подвода тока тягового генератора к оси колесной пары	51
2.2.3 Электрическая изоляция колесно-моторных блоков	53
2.3 Испытательный комплекс для проведения исследований тяговых (сцепных) качеств опытного тепловоза	56
2.3.1 Общее устройство испытательного комплекса	56
2.3.2 Измерительно-вычислительный комплекс динамометрического вагона	58
2.3.3 Система регистрации параметров экспериментов	61
2.4 Математическое моделирование тягового электропривода опытной секции тепловоза	63
2.5 Выводы раздела 2	76
3 ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ КАЧЕСТВ ТЕПЛОВОЗА С МАКЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПОВЫШЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ	78
3.1 Обоснование диапазонов варьирования внешних факторов	78

3.2 Планирование эксперимента.....	81
3.3 Результаты экспериментов.....	82
3.3.1 Методика проведения экспериментов	82
3.3.2 Проведение и обработка результатов экспериментов.....	85
3.4 Выводы раздела 3	104
4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЯГОВЫХ КАЧЕСТВ ТЕПЛОВОЗОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ПОВЫШЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ	105
4.1 Исследовательский и программный прогнозы	105
4.2 Организационно-экономический прогноз	112
4.2.1 Современное состояние проблемы.....	112
4.2.2 Расчет годовых текущих расходов на песок, сервисное обслуживание и ремонт пескоснабжающих устройств	115
4.2.3 Расчет экономии текущих расходов по очистке щебня при использовании тепловозов с электрическими системами повышения сцепления	118
4.2.4 Расчет инвестиций на оснащение парка тепловозов 2ТЭ116 электрическими системами повышения сцепления и срока их окупаемости.....	119
4.3 Выводы раздела 4	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Значительный рост грузовых перевозок требует поиска и внедрения передовых технологий, направленных на увеличение пропускной и провозной способности железных дорог. При этом увеличение веса поездов непосредственно связано с необходимостью обеспечения требуемых тяговых свойств локомотивов.

К основным факторам, влияющим на силу тяги локомотива, относятся процессы, происходящие в пятнах контакта ведущих колес локомотива с рельсами (тяговых контактах) и определяющие его сцепные свойства. Поэтому для достижения высокой эффективности работы железнодорожного транспорта при различных состояниях рельсов по загрязнению и износу необходимо поддерживать значения коэффициента сцепления на соответствующем уровне.

Взаимодействие колес локомотива с рельсами характеризуется различными явлениями, которым свойственна большая сложность. Это обусловило необходимость проведения всесторонних научных изысканий, в и др., обладающие определенным эффектом и имеющие свои недостатки. результате которых возникли многочисленные гипотезы и теории в рассматриваемой области. Исследования влияния внешних факторов на сцепные качества локомотивов позволили разработать различные способы повышения коэффициента сцепления, основанные на термомеханической очистке поверхностей катания колес, механической и химической очистке рельсов, электроискровой и лазерной очистке контактирующих поверхностей, на применении кварцевого песка

Предложены способ и основанные на нем системы улучшения сцепления колес тепловоза с рельсами путем энергетического воздействия электрическим током на зоны контакта. Проведенные экспериментальные исследования показали, что сцепные качества в этом случае сопоставимы со способом, связанным с подачей песка. При использовании таких систем также следует ожидать уменьшения износа колесных пар и снижения затрат на содержание пути.

Однако в результате указанных исследований получены значения коэффициента сцепления при практически неподвижном состоянии пятен тяговых контактов. Это не позволяет оценить реальные возможности предложенного способа в движении локомотива. Поэтому для практической реализации способа необходимо знать характер изменения коэффициента сцепления в зависимости от скорости тепловоза в технически обоснованном диапазоне.

Актуальность диссертационных исследований подтверждена «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», в которой предусмотрено проведение работ по нескольким научно-техническим направлениям. Одним из них является проблема улучшения взаимодействия в системе «колесо-рельс».

Степень разработанности темы исследования. Основа диссертации базируется на достижениях науки в части взаимодействия железнодорожных колес с рельсами в зоне контакта и улучшения тяговых характеристик локомотивов. Современное представление о процессах трения и сцепления колеса с рельсом изложено в работах А.В. Андреева, И.В. Крагельского, Н.Б. Демкина, Ю.М. Лужнова, А.В. Чичинадзе, Э.Д. Брауна, Н.А. Буше, Н.Н. Ляпушкина, А.Н. Савоськина, В.И. Сакало, В.С. Коссова, Б.В. Дерягина, Н.А. Кротовой, Н.М. Михина, Б.И. Костецкого, К.П. Флячинского, Ф.П. Боудена, Д. Тейбора, К.Л. Джонсона, Ф.Д. Барвела, Ф.В. Картера, Д.Д. Калкера и др. Большой вклад в решение задач и разработку теории сцепления внесли зарубежные ученые и исследователи: Г. Вербек, О. Креттек, А.Л. Голубенко, Г. Лукас, А.Н. Коллинс и др.

Объектом исследования является повышение сцепных свойств тепловоза при работе в тяговом режиме.

Предметом исследования являются электрические системы повышения сцепления колес тепловоза с рельсами.

Цель диссертационного исследования заключается в установлении закономерностей увеличения предельных значений физического коэффициента сцепления в процессе движения тепловозов, оборудованных электрическими системами повышения сцепления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- обосновать, разработать и создать макетную электрическую систему повышения сцепления, предназначенную для оборудования опытной секции тепловоза;
- выполнить математическое моделирование тягового привода опытной секции тепловоза;
- установить зависимости предельного коэффициента сцепления от силы электрического тока в контактах колес с рельсами и скорости движения тепловоза при различном состоянии контактирующих поверхностей по степени загрязнения;
- оценить прогнозируемое повышение тяговых качеств тепловозов, оборудованных электрической системой повышения сцепления.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих результатах:

- использован метод натурных исследований с применением разработанной макетной системы повышения сцепления, позволяющей моделировать основные процессы работы известных электрических систем повышения сцепления;
- получены регрессионные модели коэффициента сцепления тепловоза в движении при воздействии на зоны контактов колес с рельсами электрическим током тягового генератора, представляющие собой математические зависимости максимально возможного коэффициента сцепления от силы тока и скорости в зоне трогания с места и разгона локомотива при различных загрязнениях контактов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработаны варианты электрических систем повышения сцепления, принцип действия которых основан на подаче тока тягового генератора в зоны контакта колес с рельсами;
- обоснован метод экспериментальных исследований сцепных качеств локомотива с применением макетных систем, разработана макетная система повышения сцепления для проведения исследований опытного тепловоза в движении;
- разработана математическая модель тягового электропривода опытной секции тепловоза, позволяющая проводить теоретический анализ повышения

сцепных качеств в движении локомотива при воздействии на контакты колес с рельсами электрическим током с учетом разгрузки колесной пары и состояния контактов по степени загрязнения;

– полученные математические модели коэффициента сцепления позволяют прогнозировать повышение тяговых качеств магистральных тепловозов различных типов при оборудовании их электрическими системами повышения сцепления;

– применение на отечественных тепловозах предложенных электрических систем повышения сцепления позволит существенно повысить их эффективность.

Методология и методы диссертационного исследования. Для теоретических исследований была использована разработанная математическая модель тягового привода опытной секции тепловоза 2ТЭ116. Выполнено компьютерное моделирование движения опытной секции с использованием основной библиотеки MatLab/Simulink и программного комплекса «Универсальный механизм».

При проведении натурных экспериментальных испытаний были использованы современные средства регистрации и обработки данных измерительно-вычислительного комплекса, построенного на отечественной программно-аппаратной платформе Fastwel I/O. Обработка результатов экспериментов велась с использованием известных методик, базирующихся на современном аппарате математической статистики, математических методах обработки экспериментальных данных, теории планирования экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

– обоснование метода экспериментальных исследований сцепных качеств локомотива с применением разработанной макетной системы повышения сцепления;

– математическое моделирование тягового электропривода опытной секции тепловоза, оборудованной макетной электрической системой повышения сцепления;

– методика получения математических (регрессионных) моделей сцепления тепловоза в движении при изменении его скорости и силы тока, проходящего через зоны контакта колес с рельсами;

– оценка прогнозируемого повышения тяговых качеств тепловозов, оборудованных электрическими системами повышения сцепления.

Степень достоверности и апробация полученных результатов подтверждается:

– сходимостью результатов расчетов и экспериментально полученных данных;

– сравнением результатов исследования с данными, опубликованными другими авторами;

– применением обоснованных методов научного исследования;

– использованием общепризнанных программных комплексов.

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на международных конференциях: Международная научная конференция «Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта», г. Москва, 22 июня 2021 г.; XX международная научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсосбережение - XXI век» (МНПК-2022), г. Орел, 14 – 16 ноября 2022 г.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ исследований в области сцепления колес локомотива с рельсами

Эффективность работы локомотивов определяют главным образом его тяговые качества, зависящие от нескольких факторов. Одним из основных факторов, формирующих требуемые эксплуатационные характеристики, является сцепление колес с рельсами. Проблема сцепления неразрывно связана с наукой о трении, которое присутствует в зонах контакта твердых тел и обусловлено сложными физико-механическими и механико-химическими процессами. В 1882 году Г. Герцем было получено решение контактной задачи в виде зависимостей, позволяющих определять размеры пятен контакта двух твердых упругих тел и максимальные контактные давления [100]. При рассмотрении взаимодействия железнодорожных колес с рельсами зона их контакта по Герцу имеет эллиптическую форму с большой полуосью, которая направлена обычно по продольной оси рельса.

На основе теории упругости Ф.В. Картером [125], Г. Фроммом [127], Н.М. Беляевым [4, 5], И.Я. Штаерманом [118], Л.И. Лурье [64], К.Л. Джонсоном [129, 130], А.Ю. Ишлинским [37], Н.И. Мухелишвили [81] и др. были получены последующие решения контактной задачи в различных постановках, имеющие важное значение для практических расчетов машин и развития теории трения. Так, Картер предположил [125], а Фромм доказал [127], что при качении упругих цилиндрических тел в зоне их контакта возникают участки сцепления и скольжения. При этом участок сцепления прилегает к набегающему краю контакта.

Современное представление о процессах трения изложено в работах А.В. Андреева [1, 2], И.В. Крагельского [54, 55], Н.Б. Демкина [17-19], Ю.М. Лужнова [60], А.В. Чичинадзе [117], Н.А. Буше [7], Н.Н. Ляпушкина [65, 67], В.И. Сакало [100], В.С. Коссова [47], Б.В. Дерягина [20], Н.М. Михина [79], Б.И. Костецкого

[50], К.П. Флячинского [113], Ф.П. Боудена [124], К.Л. Джонсона [21, 131], Ф.Д. Барвела [121-123], Ф.В. Картера, Д.Д. Калкера [132-134] и др.

В работах [1, 2] А.В. Андреев рассмотрел процесс формирования пятна контакта колеса и рельса. Так, при статическом положении и вертикальной нагрузке зона сцепления в пятне контакта (относительного покоя) располагается в центре, зоны скольжения размещены в передней по ходу и задней частях контакта. При приложении к колесу вращающего момента зона сцепления в пятне контакта смещается к его переднему краю. Это происходит из-за возрастания нагрузки со стороны набегания колеса и ее уменьшения со стороны сбегания. Дальнейшее увеличение вращающего момента приводит к постепенному уменьшению зоны сцепления и увеличению зоны скольжения. Предельному значению вращающего момента, определенному контактными характеристиками рассматриваемой трибологической системы, соответствует зона сцепления, свернувшаяся до точки. При этом происходит срыв сцепления, и начинается боксование [10].

И.В. Крагельский определил область соприкосновения двух тел в виде физической системы с собственными свойствами [54]. Он предложил первую теоретическую модель, основой которой является зависимость механических свойств материала от скорости деформации.

Одними из первых И.В. Крагельский и Н.Б. Демкин учли шероховатость контактирующих поверхностей, получив соответствующие математические зависимости [18, 19, 55]. Они показали, что из-за дискретного характера контакта между реальными твердыми телами его фактическая площадь всегда существенно меньше номинальной площади касания.

В работе [54] отмечена двойственная молекулярно-механическая природа трения, обусловленная протеканием процессов трения при объемном деформировании материала и преодолении молекулярных связей. Кроме того, фрикционный контакт рассмотрен как некое «третье тело», в котором происходит непрерывное разрушение и новое формирование элементов в процессе скольжения. Исследования Ю.М. Лужнова, А.В. Чичинадзе, Н.Б. Демкина [18, 60, 117]

позволили получить фундаментальные результаты в области контактного взаимодействия шероховатых поверхностей. Так, Ю.М. Лужновым было обосновано включение поверхностных загрязнений в состав «третьего тела» дополнительно к выступам микронеровностей и адсорбированным молекулам. Таким образом, в реальном контакте колеса и рельса, представляющих собой два твердых тела, пространство между их выступами занимает полидисперсный слой поверхностного загрязнения. В состав этого слоя входят продукты износа указанных твердых тел, газовые молекулы и жидкая фаза (вода, масло), вносимая извне [62].

В результате при качении колеса по рельсу происходит передача всех нормальных и тангенциальных сил через фактическую площадь контакта, а также через слой полидисперсного загрязнения, присутствующий практически на всей номинальной площади контакта между колесом и рельсом [62]. Поэтому характер трения колес и рельсов, находящихся в реальных эксплуатационных условиях, существенно зависит от изменения свойств в слое поверхностных загрязнений [59, 63].

Рассмотренные результаты исследований имеют большое значение для понимания процессов и решения постоянно возникающих проблем, связанных со сцеплением локомотивов и достижением ими требуемых эксплуатационных параметров. Изучению сцепления колес локомотивов с рельсами посвящены работы Н.П. Петрова [94-96], Н.Н. Меншутина [69-71], Д.К. Минова [76-78], М.Р. Барского [3], И.Н. Сердиновой, И.П. Исаева [32-36], Ю.М. Лужнова [59-63], Г.В. Самме [101, 103, 104], С.И. Осипова [83], Л.А. Мугинштейна [80], А.Л. Лисицына, Э.М. Френкеля [114], А.В. Бычковского [8], М.А. Спицина [105], Ж.Д. Желева [23], А.В. Фролова [116], А.М. Лубягова [57], А.М. Керопяна [39] и др. Большой вклад в решение задач и разработку теории сцепления внесли зарубежные ученые и исследователи: Г. Вербек [10], О. Креттек [56], А.Л. Голубенко [15], Г. Лукас [136], А.Н. Collins [126] и др.

В формировании силы сцепления аналогично силам трения принимают участие сложные молекулярно-механические процессы. Это определило появление различных предположений и теорий о природе взаимодействия колеса и рельса. Наличие существенных вертикальных нагрузок колес на рельсы приводит к возникновению явления адгезии, которое обуславливает сцепление поверхностей тел. В современном понимании адгезия представляет собой проявление сил межмолекулярного взаимодействия контактирующих тел, ее также объясняют процессом адсорбции в контакте. Кроме того, существуют химическая, диффузионная и электрическая теории [20, 22].

Большое число работ посвящено рассмотрению сущности сцепления с позиций теории упругости [21, 32, 55, 62, 77, 131]. В них доказано, что сила сцепления возникает в процессе качения колеса при его проскальзывании относительно рельса. Д.К. Минов отметил, что сила сцепления по своей природе является разновидностью силы сухого трения, которое реализуется при перекачивании колеса по рельсу [78]. Величина силы сцепления зависит от размеров и конфигурации фактической площади контакта, величины нормального давления и физико-химическими свойств материалов бандажа и рельса [76, 100].

Сцепление ведущих колес с рельсами оценивают величиной коэффициента сцепления ψ , который представляет собой отношение максимально возможной в данных условиях величины силы тяги локомотива, развиваемой без боксования, к вертикальной нагрузке на колеса:

$$\psi = \frac{F_{\text{к макс}}}{P}, \quad (1.1)$$

где $F_{\text{к макс}}$ – сила тяги локомотива;

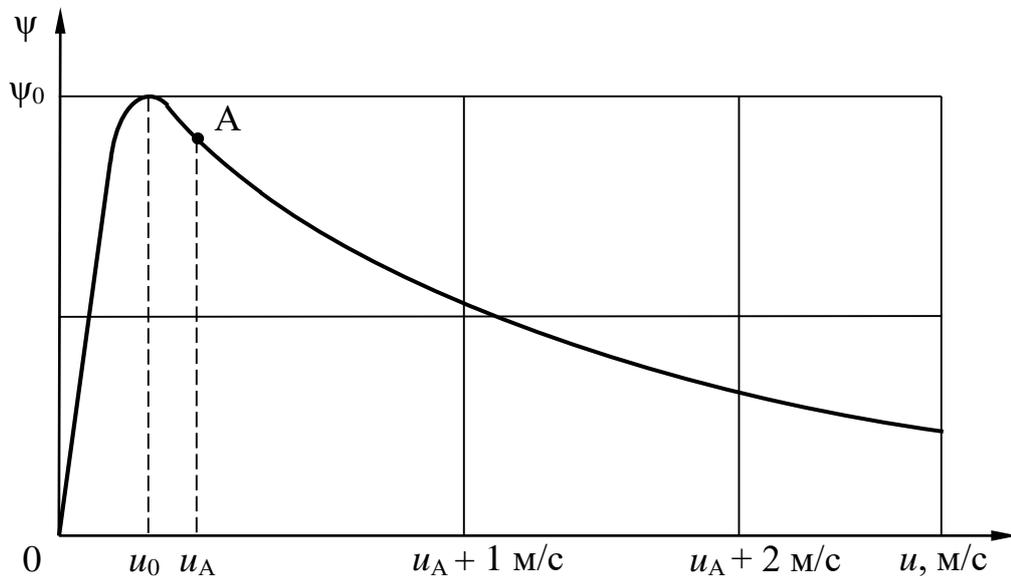
P – вертикальная нагрузка на колеса

Определенный таким образом коэффициент сцепления ψ называют физическим коэффициентом сцепления, реализованным в конкретных условиях.

Особое значение при анализе рассматриваемого процесса имеет характеристика сцепления. Она представляет собой зависимость коэффициента сцепления (силы сцепления) от скорости скольжения (проскальзывания) колеса. По

результатам обработки экспериментальных данных методами математической статистики такую характеристику одним из первых получил Н.Н. Меншутин [69, 71].

Характеристика разделена на три участка (рисунок 1.1):



u_0 – значение скорости упругого скольжения при потенциальном коэффициенте сцепления; u_A – значение скорости упругого скольжения в момент начала боксования

Рисунок 1.1 – Характеристика сцепления (получена Н.Н. Меншутиным [71])

– на первом участке происходит рост коэффициента сцепления ψ до значения потенциального коэффициента сцепления ψ_0 , этот процесс обусловлен увеличением скорости упругого скольжения (предварительное смещение и микропроскальзывание) до значения u_0 ;

– характерной особенностью второго (переходного) участка является сохранность значения коэффициента сцепления на уровне ψ_0 или его незначительное снижение в интервале скоростей упругого скольжения от u_0 до u_A ;

– на третьем участке, начинающемся со скорости u_A , коэффициент сцепления снижается в зависимости от скорости полного скольжения u .

Установлено, что по отношению к скорости движения локомотива значения относительной скорости скольжения u_A , определяющие коэффициент сцепления в момент начала боксования, не превышают 0,5...2,0 %. В работах [103, 104] показано, что с увеличением относительной скорости скольжения до 7...15 % в

третьей зоне после некоторого снижения коэффициент сцепления может быть кратковременно увеличен на 35...50 %.

В соответствии с характеристиками сцепления, построенными М.Р. Барским и И.Н. Сердиновой [3] при абсолютных значениях коэффициента сцепления и скорости скольжения, коэффициент сцепления при нулевых скорости скольжения и скорости движения электровоза составляет 0,33. При скорости движения электровоза, превышающей 15 км/ч, он достигает значения 0,22. Однако для зоны скоростей движения ниже 10 км/ч отсутствует исчерпывающая информация о характере изменения коэффициента сцепления, что указывает на ее недостаточную изученность.

Одну из первых аналитических зависимостей коэффициента сцепления от скорости движения v , которую назвали расчетным коэффициентом сцепления ψ_p (рисунок 1.2), предложил Н.П. Петров на основании анализа экспериментальных данных [94, 95, 96].

Величины расчетных коэффициентов сцепления ψ_p современных локомотивов определяют на основе технико-экономического анализа и результатов

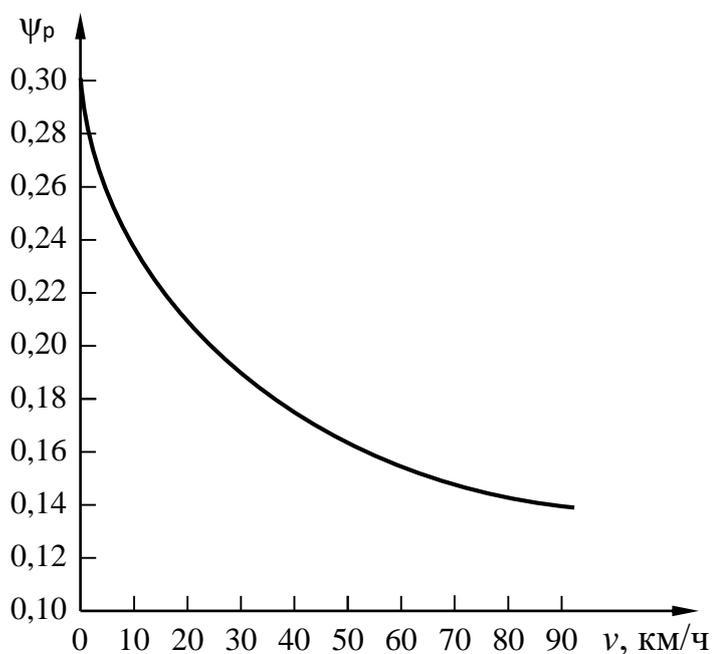
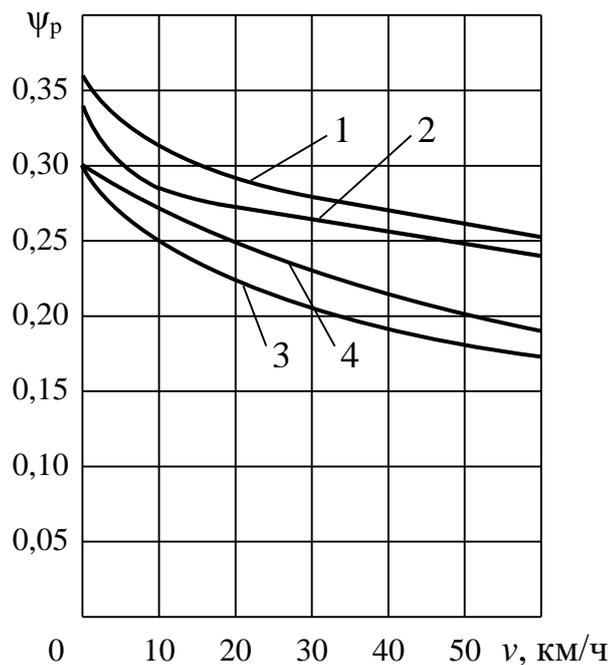


Рисунок 1.2 – Зависимость коэффициента сцепления от скорости движения (получена Н.П. Петровым [96])

многочисленных опытов в условиях реальной эксплуатации. По этим результатам с помощью методов математической статистики подбирают коэффициенты эмпирических зависимостей, которые в дальнейшем используют для тяговых расчетов на всей сети железных дорог. Анализ графических зависимостей коэффициента ψ_p (рисунок 1.3), полученных для различных локомотивов Ю.М. Лужновым, Г.В. Самме, С.И. Осиповым [62, 83, 99], показывает, что при трогании коэффициент сцепления локомотива на 35...40 % больше, чем при установившемся движении. Закономерность снижения коэффициента сцепления ψ_0 с увеличением скорости движения локомотива отмечена во многих работах [60, 62, 101, 113]. Это связано с проявлением сил межмолекулярного взаимодействия поверхностей колес и рельсов в состоянии покоя и уменьшением продолжительности их контактирования с ростом скорости движения локомотива.



1 – для электровозов переменного тока (ВЛ80); 2 – для электровозов постоянного тока (ВЛ10); 3 – для тепловозов с электропередачей (2ТЭ116); 4 – для паровозов

Рисунок 1.3 – Зависимости расчетных коэффициентов сцепления отечественных локомотивов от скорости движения [99]

Распределение реализованных локомотивом значений коэффициента сцепления, определяющее использование силы сцепления, зависит от закона изменения силы тяги при пуске. Установлено, что для обеспечения стабильности

пусковой тяги локомотива при отсутствии срывов сцепления следует создать наиболее быстрое нарастание силы тяги и увеличение ускорения в допустимых пределах в начальный момент пуска [32]. Это обусловлено наибольшими силами сопротивления движению в момент пуска, определяемыми коэффициентом трения покоя, которые необходимо быстро преодолеть. Исследования [32, 136] показали, что при нарастании силы тяги до 75 % от максимального значения за первую четверть времени пуска можно получить высокие коэффициенты сцепления в процессе пуска. Далее тяговое усилие необходимо плавно довести до величины, ограниченной условиями сцепления. При этом аналогично должно быть снижено до нуля ускорение.

А.М. Керопяном [39] на основе анализа различных режимов нарастания силы тяги выбрана рациональная характеристика процесса пуска (рисунок 1.4, а). На ней отображена экспоненциальная зависимость относительного тягового усилия φ от относительного времени пуска τ . При этом

$$\varphi = \frac{F}{F_{\max}}, \quad (1.2)$$

где F – текущее значение тягового усилия;

F_{\max} – предельное значение силы тяги локомотива по условиям сцепления (в конце пуска).

$$\tau = \frac{t}{t_{\text{п}}}, \quad (1.3)$$

где t – текущее значение времени пуска;

$t_{\text{п}}$ – полное время пуска.

Характеристика позволяет создать условия для реализации коэффициентов сцепления, приближенных к оптимальным значениям (рисунок 1.4, б).

Как показали расчеты, после завершения пуска, производимого по рациональной характеристике, тяговое усилие локомотива и, следовательно, коэффициент сцепления увеличиваются на 4,2 %. На величину силы сцепления оказывают влияние макро- и микрогеометрические параметры колеса и рельса,

которые определяют размеры и очертания номинальной и фактической площадей контакта [17-19, 79].

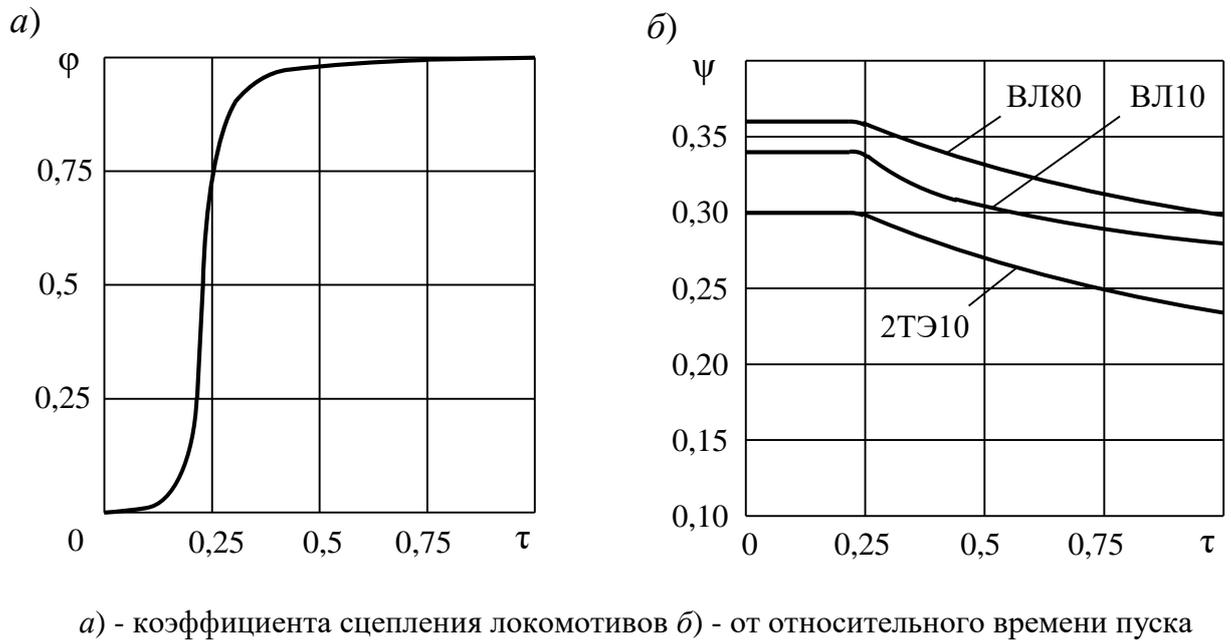


Рисунок 1.4 – Зависимости относительного тягового усилия

Номинальная площадь контакта формируется путем упругой деформации в зависимости от макрогеометрических факторов, к которым относятся диаметры и конусности колеса, радиусы кривизны головки рельса и др. В образовании фактической площади участвуют микронеровности, подверженные преимущественно пластическим деформациям под действием нагрузки. К этим факторам относятся волнистость и шероховатость поверхностей, причем волнистость по своим размерам гораздо меньше макроотклонений поверхности и существенно превышает шероховатость. На номинальный контакт колеса и рельса приходится не более двух волн, что обуславливает соизмеримость площади контакта с порядком цифр волнистости. В связи с этим параметр волнистости при исследовании контактного взаимодействия можно не учитывать [39]. Таким образом, сила трения и, следовательно, сила сцепления определяется суммой всех сил, действующих на отдельных неровностях [18], т. е. от фактической площади контактирования, заключенной в границы номинального контакта.

Изучению влияния геометрических размеров и шероховатости рабочих поверхностей колеса и рельса на процессы их контактного взаимодействия

посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [39, 43, 47, 82, 100, 113, 114 и др.]. Так, Э.М. Френкель [114] установил, что коэффициент сцепления колеса локомотива непосредственно зависит от диаметра колеса, т. е. он пропорционален площади контактной поверхности колеса и рельса.

Одним из главных результатов проведенных работ является решение задачи контактирования конформных профилей колеса и рельса, получаемых путем приработки в процессе эксплуатации. На основании экспериментальных исследований, проведенных К.П. Флячинским [113] установлено, что при использовании приработанных профилей можно достичь более высоких скоростей скольжения колес относительно рельсов. При этом температуры в зонах контактов имеют значения в два раза ниже по сравнению с новыми профилями. Объяснением этого эффекта является то, что приработанные профили имеют бóльшую фактическую площадь контакта и, следовательно, условия теплообмена значительно лучше. При взаимодействии конформных профилей колеса и рельса имеет место увеличенная ширина дорожек катания на рельсах, и их коэффициент сцепления повышается по отношению к неприработанным поверхностям до 9,0 % [39].

В работах Н.Б. Демкина [17, 18], Н.М. Михина [79] и др. установлена непосредственная зависимость коэффициента трения от шероховатости контактирующих поверхностей, т. е. от взаимодействия отдельных выступов микронеровностей. Ими отмечено, что при решении контактных задач для поверхностей со средней и грубой чистотой обработки целесообразно учитывать только пластические деформации выступов шероховатых поверхностей. А.М. Керопяном [39] получен диапазон рациональных значений шероховатости рабочих поверхностей рельсов при профилировании R_z 40...20 мкм, что способствует сокращению продолжительности процесса приработки пары «колесо – рельс». Установление рациональных шероховатостей рабочих поверхностей колес и рельсов позволяет также выполнить прогнозирование расчетных значений коэффициента сцепления локомотивов.

1.2 Влияние внешних факторов на сцепные качества локомотивов и способы повышения коэффициента сцепления

Поверхностный слой загрязнения занимает практически всю номинальную площадь контакта между колесом и рельсом. Ранее было показано, что сила сцепления локомотива существенно зависит от изменения механических свойств в этом слое. В состав загрязнений в основном входят частицы износа трущихся тел, вода, машинное масло, песок, пыль и др., которые заносятся извне в условиях эксплуатации локомотива [59, 62, 63]. Это позволяет отнести названные элементы загрязнения к внешним факторам. Рассматриваемый слой загрязнения является частью так называемого «третьего тела», через которое передаются нормальные и касательные силы при качении колеса по рельсу [62].

Большой вклад в изучение проблемы влияния промежуточной среды на сцепление колес с рельсами внесли ученые: М.Р. Барский, И.Н. Сердинова [3], И.П. Исаев [34], Ю.М. Лужнов [58, 62,63], Г.В. Самме [103], Д.П. Марков [68], В.А. Попов [98], Ю.П. Топоров [109], С.И. Косиков [44], Н.Ж. Andrews [119], F.J. Barwell, R.G. Woolacot [122], А.Н. Collins, С. Pritchard [126] и др.

Исследованиями слоя поверхностного загрязнения установлено [34, 58, 62, 63], что в его состав входят 80...95 % твердых веществ, состоящих главным образом из оксидов железа (30...40 %), оксидов кремния (30...50 %) и безводных алюмосиликатов. В меньших количествах содержатся соединения магния, кальция, углерода, серы, меди, свинца и никеля. При этом слой загрязнения покрывает до 99 % поверхности зоны контакта колеса с рельсом. Поэтому дисперсными загрязнениями трущихся тел воспринимается часть нагрузок, передающихся от колеса на рельс.

Таким образом, рассмотренные твердые загрязняющие элементы существенно влияют на формирование фрикционных свойств поверхности катания колес и рельсов [126]. Однако их воздействие на сцепные качества пары трения «колесо – рельс» не является однозначным. В частности, благодаря своим

адсорбционным свойствам твердые частицы загрязнения, размолотые колесами до мелкодисперсного состояния, впитывают масло и до определенного момента минимизируют его воздействие на коэффициент сцепления [34, 62]. Но при достаточно большой толщине масляной пленки рассмотренный эффект отсутствует и обратно пропорционален размеру частиц загрязнений. Кроме того, тонкая пленка сухой ржавчины оказывает положительное влияние на величину коэффициента сцепления, а толстая и сухая пленка ржавчины способствует его существенному снижению.

Г.В. Самме в работе [103] отметил, что без окисных и других поверхностных пленок трение невозможно. Они защищают основные материалы от глубинного вырывания и сваривания, очень прочно связаны с металлом и имеют иную твердость в сравнении с ним, что при трении обеспечивает более легкое удаление с поверхности металлического тела. В процессе трения эти пленки непрерывно разрушаются и восстанавливаются, чему способствуют соответствующие температурные режимы в пятне контакта [66].

В слое поверхностного загрязнения вместе с твердыми частицами присутствуют вода в различных агрегатных состояниях и смазочные материалы [37]. Несмотря на гораздо меньшее количество по сравнению твердой составляющей загрязнения их значение для фрикционных свойств контакта не менее существенно.

Изучению влияния смазочных материалов на сцепление колес с рельсами посвящено немалое количество работ. Так, исследования [62, 126] показали, что сцепление колеса и рельса зависит от толщины масляной пленки: на абсолютно чистом рельсе коэффициент сцепления составил 0,6...0,7; при наличии масляной пленки толщиной до 10 молекул он уменьшился до 0,2 и менее; при увеличении толщины масляной пленки произошло снижение коэффициента сцепления до величины 0,16.

Проведено большое количество исследований по оценке воздействия увлажнения рельсов на сцепленные свойства локомотивов [3, 119, 126 и др.], которые отражают основную тенденцию к уменьшению величины коэффициента

сцепления. Экспериментальные исследования, проведенные на натурном стенде, показали [26, 97] снижение предельного коэффициента сцепления с 0,36 при сухом, чистом контакте до 0,27 при внесении в зону контакта колеса и рельса воды. В случае смачивания рабочих поверхностей контактирующих поверхностей водой, смешанной с машинным маслом коэффициент сцепления уменьшился до 0,19. В работе [3] оценено влияние степени увлажнения поверхности катания на коэффициент сцепления, при этом последний может изменяться от 0,1 до 0,35. Подобные результаты получены в работе [109], в которой отмечено незначительное снижение или повышение коэффициента сцепления на сильно увлажненных рельсах. Такое явление можно объяснить смыванием основной части поверхностных загрязнений, что обеспечивает компенсацию и даже превосходит отрицательное действие влаги.

На сцепление колес с рельсами оказывает влияние относительная влажность воздуха [10, 32, 62, 122, 126]. Так, при повышении относительной влажности от 30 % до значений свыше 67 % коэффициент сцепления уменьшается в 1,5 раза [122]. Исследования [10], выполненные на абсолютно чистых рельсах при увеличении относительной влажности воздуха с 30 % до 70 %, показали уменьшение коэффициента сцепления почти на 12 %.

По причине дискретности пятна контакта колеса и рельса загрязнения занимают пустоты между выступами, образующими шероховатость поверхностей контактирующих тел [17]. Это может служить материалом для увеличения площади реального контакта тел. Содержание жидкой фазы в поверхностных загрязнениях в значительной степени определяет структурно-реологические характеристики, которые могут отражать свойства твердых тел, паст или жидкостей. Таким образом, можно утверждать, что процесс формирования фрикционного контакта и сцепление колес с рельсами существенно зависят от состояния поверхностных загрязнений [34]. В работе [68] отмечено, что с увеличением параметра шероховатости поверхностей колес и рельсов повышается объем загрязнений, скапливающихся в углублениях рельефа, и уменьшается коэффициент трения-скольжения.

В зимний период при низких температурах окружающей среды на рельсах часто появляется ледяная корка, толщина которой достигает 1 мм. Кроме твердого агрегатного состояния воды (льда) в структуре наледи содержатся частицы износа колес, рельсов, тормозных колодок локомотивов и вагонов, частицы пыли, смазка и др. [44], в связи с чем ее называли «черным налетом». В результате проведенных экспериментальных исследований [44, 62] было выявлено большое воздействие указанной корки на сцепление локомотивов, заключающееся в уменьшении коэффициента сцепления до 0,13...0,17.

Анализ состава и свойств слоя поверхностного загрязнения показал его непосредственное влияние на фрикционные процессы в пятне контакта колеса и рельса и, следовательно, на сцепление в этой системе. Для повышения силы тяги локомотива необходимо произвести полезное воздействие на указанный слой, обеспечивающее соответствующее повышение коэффициента сцепления. Существуют различные способы такого воздействия, к которым относятся механическая и химическая очистки рельсов, термомеханическая очистка поверхности катания, электроискровая и лазерная очистки контактирующих поверхностей и др. В настоящее время основным способом увеличения сцепления локомотивов является внесение в зоны тяговых контактов кварцевого песка. Возможно использование других абразивных материалов, обладающих высокой твердостью.

Для механического удаления загрязнений с рабочей поверхности рельсов применялись различные устройства [38], рабочими элементами которых являлись скребки, вращающиеся металлические щетки и др. Но они не обеспечивали требуемого качества очистки, и их использовали в ограниченном диапазоне скоростей движения (до 20 км/ч). В связи с этим механическую очистку целесообразно применять для начальной обработки рельсов и в сочетании с другими способами повышения коэффициента сцепления. А.М. Лубяговым [57] исследован механизм повышения коэффициента сцепления, основанный на комплексной механической и химической очистке зоны фрикционного контакта и

включающий чистку абразивом и нейтрализацию поверхностных загрязнений щелочной средой.

При химической очистке рабочую поверхность рельсов обрабатывают специальными составами, разлагающими составляющие загрязнений. В состав модификаторов трения включают растворы кислот, щелочей, эфиров, бензола, ацетона, а также жидкое стекло и силикатные жидкости с добавлением глицерина и метилового спирта и т. д. Результаты исследований [32, 44, 120] выявили в этих случаях возможность увеличения коэффициента сцепления до 20...30 %. В работе [57] отмечено, что модификаторы трения обеспечивают фрикционное взаимодействие контактирующих поверхностей с коэффициентом трения не ниже 0,3...0,35. При возникновении повышенного проскальзывания, определяющего режимы боксования, жидкий модификатор способствует возрастанию коэффициента трения до значений 0,4...0,45.

Сущность способа термомеханической очистки поверхности катания заключается в формировании необходимых изменений в поверхностных слоях бандажа, создающих условия для образования наростов, удаления влаги, сгорания органических составляющих пленок и т. д. Такие изменения обеспечивают рост коэффициента трения и потенциального коэффициента сцепления. Во времена эксплуатации паровозов этот способ осуществлялся путем пробоксовки ведущих колесных пар перед троганием с места. На современных локомотивах реализуют режимы работы колесно-моторных блоков с постоянным скольжением при продольном крипе 7...15 % [135]. Российскими учеными разработаны теоретические основы и предложен способ повышения сцепления за счет режимов кратковременных процессов боксования колесно-моторных блоков [103, 104]. В этом случае колесная пара должна работать при избыточном скольжении (со скоростью скольжения не более 30 км/ч) в течение короткого времени (3...5 с), что может обеспечить повышение реализуемого коэффициента сцепления на 30...50 %.

Практический опыт эксплуатации тягового подвижного состава указывает на частое применение машинистами подтормаживания локомотивов в качестве профилактического мероприятия перед затяжным подъемом [120]. Это действие

также обеспечивает некоторое увеличение коэффициента сцепления, обусловленное термомеханической очисткой поверхностей катания ведущих колесных пар.

К недостаткам данного способа можно отнести повышенный износ рельсов и бандажей, а также увеличение потребляемой энергии в сравнении с потребной энергией для реализации тяги [103].

Существенного увеличения коэффициента сцепления (до 50 %) можно достичь при помощи электроискровой обработки поверхностей катания колес и рельсов токами высокой частоты. Проведены металлографические исследования образцов рельсов и бандажей, подвергшихся высокотемпературному воздействию в ходе электроискровой обработки [77, 78]. Они показали, что причиной повышения коэффициента сцепления является образование в приповерхностных слоях тонкой структуры мартенсита в совокупности с возникающими ювенально чистыми поверхностями. Наряду с этим слабая связь мартенситовых включений с основным металлом вызывает их выкрашивание, что приводит к увеличению в 1,5 раза износа контактирующих поверхностей.

Лазерную очистку рельсов [9] обеспечивают путем воздействия на загрязняющий слой неодимово-иттриево-алюминиево-гранатовым лазером, работающим в инфракрасной области спектра. Это позволяет устранить практически все виды загрязнений, входящие в состав поверхностного слоя. Благодаря относительно небольшому времени воздействия лазерного излучения на рабочую поверхность температура, достигающая 5000 °С, не изменяет структуру и усталостно-прочностные характеристики металла рельсов. Однако использование такого способа очистки рельсов связано с выполнением высоких требований безопасности при работе с лазерной установкой, а также соблюдением режима воздействия лазерного излучения на рабочие поверхности рельсов в зависимости от скорости движения. Кроме того, особые требования предъявляются к элементам конструкции установки из-за большой мощности лазера.

В России и за рубежом разработано и опробовано немало других способов, связанных с воздействием на слой поверхностного загрязнения [14, 32, 44, 84]:

- способ воздействия на рабочую поверхность рельсов струей воды под высоким давлением;
- способ очистки рабочей поверхности рельсов паром;
- способ очистки рабочей поверхности рельсов открытым пламенем;
- пескоструйная очистка рельсов;
- плазменная очистка рельсов;
- способ подогрева рельсов;
- способ подачи в зону контакта воздуха при высокой температуре.

Каждый из этих способов может обеспечить значимое повышение коэффициента сцепления локомотива в определенных условиях эксплуатации. Так, например, способ воздействия струей воды невозможно применять в зимний период. В то же время подогрев рельсов, и подачу горячего воздуха наоборот целесообразно использовать при отрицательных температурах для удаления образующейся ледяной пленки и инея. По причине присутствия у данных способов существенных недостатков они не нашли применения на тяговом подвижном составе.

Для повышения коэффициента сцепления можно использовать абразивные материалы (кварцевый песок, алмазную пыль, оксиды хрома, алюминия и др.), вводимые в зоны контакта колес с рельсами. На современных локомотивах применяют подачу в тяговые контакты сухого кварцевого песка, который имеет высокие сопротивление на срез и твердость. Использование песка позволяет повысить коэффициент сцепления до 0,5...0,7 [48, 108].

Существуют разные теории, объясняющие влияние песка на увеличение сцепления [39]:

- сдвиг раздавленных изотропных частиц в зоне контакта вследствие относительного проскальзывания колеса и рельса;
- продавливание поверхностной загрязняющей пленки частицами песка и внедрение их в поверхности катания колес и рельсов;
- сдвиг анизотропных частиц в зоне контакта при упругом проскальзывании материала бандажа колеса и рельса;

– разрывы контактирующих между собой поверхностей бандажа и рельса, при внесении в зону контакта твердых частиц песка и др.

По теории механического диспергирования в зоне контакта колеса и рельса происходит измельчение частиц песка. Это приводит к образованию дисперсной системы в виде полученного слоя, которая обладает объемными структурно-реологическими свойствами [39, 62]. Измельченный песок вместе с другими загрязнениями занимает пространство между выступами микронеровностей, способствуя увеличению площади реального контакта. При диспергировании многие органические включения и влага переходят в слой песка, происходит высвобождение существенной энергии, и поверхностная активность в системе «колесо - рельс» повышается [102]. Этими процессами можно объяснить увеличение коэффициента сцепления локомотива.

В результате совершенствования этого способа были разработаны новые варианты введения песка в зону контакта колеса и рельса [39, 57, 91]:

- подача наэлектризованного песка с целью лучшего его распределения по поверхности катания бандажа;
- подача песка в струе жидкости и нанесение его на поверхность катания колес в составе модификаторов трения в виде брикетов ротапринтным способом;
- подача предварительно подогретого индукционным нагревателем сухого песка.

Так, последний вариант предназначен для обеспечения эффективного функционирования пары трения «колесо-рельс» в зимний период при образовании на рельсах ледяной корки и позволяет повысить коэффициент сцепления на 10 % [39].

Однако кроме положительного эффекта повышения сцепных качеств локомотивов применение песка имеет существенные недостатки [39, 62]:

- является причиной дополнительного сопротивления движению поезда, достигающего 12 %;
- ухудшает состояние железнодорожного пути, загрязняя балластную призму, что приводит к значительным материальным затратам;

– способствует более интенсивному абразивному износу трущихся деталей пути и подвижного состава.

Повысить коэффициент сцепления можно применением способов, основанных на внешних энергетических воздействиях на зоны тяговых контактов. Одним из таких воздействий является создание мощного магнитного поля в контактах колес с рельсами, что было использовано на рудничном электровозе путем установки специального электромагнитного устройства [12]. По результатам экспериментальных исследований устройства было отмечено улучшение сцепных свойств. Однако для изготовления такого устройства потребовалось до четырех тонн меди, и возникли серьезные трудности при его размещении в экипажной части. В дальнейшем во ВНИТИ (Всесоюзный научно-исследовательский тепловозный институт (г. Коломна) были проведены испытания маневрового тепловоза ТЭМ2УС, оборудованного электромагнитным устройством повышения сцепления. На колесных парах тепловоза были установлены электромагниты, обеспечивающие прохождение магнитного потока через тяговые контакты колес с рельсами, что создавало силу их дополнительного прижатия.

В работе [43] приведены рекомендации для разработки магнитных усилителей коэффициента сцепления (МУКС) колесных пар локомотива с рельсами. Экспериментальные исследования тепловоза ЧМЭЗ, оборудованного опытным образцом МУКС, показали, что в результате намагничивания зон контакта колес с рельсами при сниженном сцеплении происходит увеличение наибольшей силы тяги тепловоза на 9...11 %. При этом автор отметил, что в настоящее время не создана конструкция МУКС, которая позволила бы существенно повысить сцепление локомотива при обеспечении приемлемых массогабаритных показателей.

К внешним энергетическим воздействиям можно отнести прохождение электрического тока через контакты колес с рельсами, что, в частности, присуще принципу действия электровозов. Изучение влияния электрического тока на сцепление проводилось путем анализа данных, полученных при эксплуатации электровозов [60, 98] и на основании экспериментальных исследований процесса

на лабораторных натурных стендах [108]. Так, при испытаниях электровозов постоянного тока ВЛ22М и ВЛ23 отмечен рост коэффициента сцепления от 0,2 при токе тяговых двигателей 150 А до 0,49 при токе 500 А.

Сравнение сцепных качеств локомотивов разных видов показало более высокие коэффициенты сцепления у электровозов (рисунок 1.3), в которых через контакты колес с рельсами проходят тяговые токи. На основании этого были проведены экспериментальные исследования влияния электрического тока в тяговых контактах на коэффициент сцепления [108]. На лабораторном стенде была достигнута плотность переменного тока в контакте, превышающая 20 А/мм² аналогично плотности тока в контактах электровозов. При этом происходило увеличение коэффициента сцепления колеса с рельсом для различных загрязнений контактирующих поверхностей (рисунок 1.5).

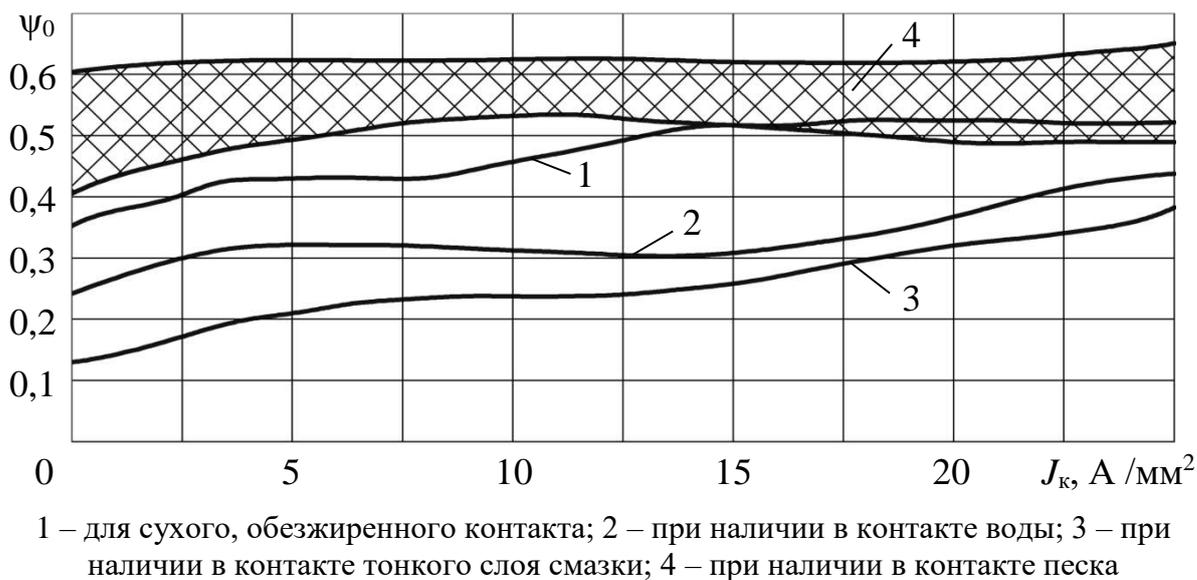


Рисунок 1.5 – Зависимости физического коэффициента сцепления колеса и рельса от плотности тока через контакт [108]

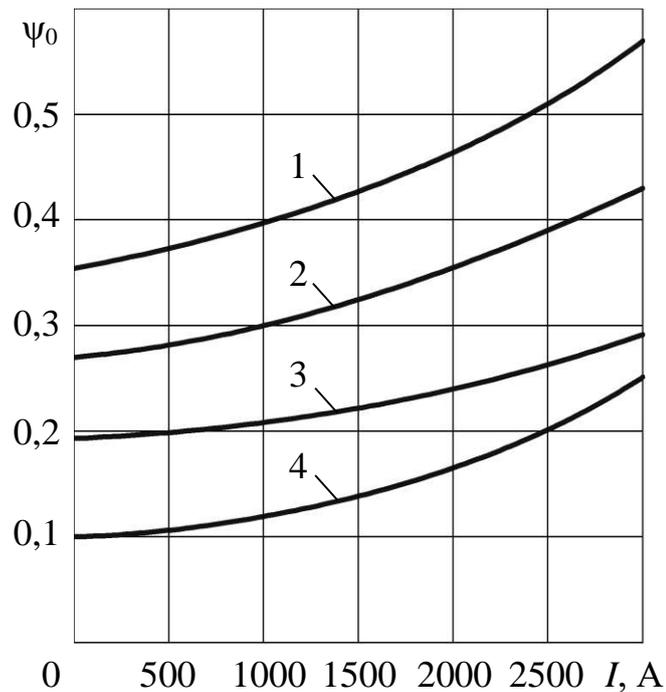
В частности, исследование сухого, обезжиренного контакта при увеличении плотности тока в контакте от 0 до 25 А/мм² показало рост коэффициента сцепления от 0,36 до 0,53, для увлажненных поверхностях колеса и рельса рост составил 0,25...0,44, при нанесении на рельс тонкого слоя смазки – 0,13...0,38.

Влияние электрического тока на фрикционные характеристики пары трения «металл – металл» объясняют возможным проявлением туннельного эффекта [115],

механизмами, основанными на принципе автоэлектронной эмиссии [105], электропластическим эффектом [110] и др. Так, проявление электропластического эффекта объясняют воздействием электронов при прохождении электрического тока через пару трения на движущиеся дислокации. Последние выходят на поверхность и оказывают воздействие на силы внешнего трения. При этом происходит интенсификация деятельности источников дислокаций, которая увеличивает пластичность поверхностного слоя [53]. Однако, несмотря на многочисленные исследования, в настоящее время отсутствует единая теория о природе рассматриваемого процесса.

Энергетическое воздействие электрическим током на сцепление локомотива было предложено использовать на тепловозах с электрической передачей. При этом в зоны контактов колес с рельсами должен подаваться ток от тягового генератора [24, 86]. Такой способ воздействия обусловлен использованием на современных магистральных грузовых тепловозах тяговых генераторов (ГП-311Б, ГП-312, ГС-501А, ГСТ-2800-1000, АСТГ- 2800/400-1000), имеющих токи продолжительного режима 4000...5000 А и реализующих токи кратковременного режима 6000...7500 А. В диапазоне скоростей движения тепловозов 0...20 км/ч токи этих генераторов составляют в среднем 6000 А, что позволяет обеспечить подачу тока в тяговые контакты до 3000 А и этим создать в них требуемую высокую плотность электрического тока.

Проведены экспериментальные исследования на натурном стенде [26, 97], в результате которых были получены регрессионные модели предельного коэффициента сцепления локомотива ψ_0 , представляющие собой математические зависимости коэффициента от токов различного вида и вертикальной нагрузки на колесо. На построенных по указанным моделям графиках $\psi_0 = f(I)$ для постоянного тока и при различных загрязнениях контакта колеса с рельсом наглядно видно повышение предельного коэффициента сцепления (рисунок 1.6).



1 – для сухого, чистого контакта; 2 – при наличии в контакте воды; 3 – при наличии в контакте воды с добавлением машинного масла; 4 – при наличии в контакте машинного масла

Рисунок 1.6 – Расчетные зависимости предельного коэффициента сцепления от силы постоянного тока в контакте и при вертикальной нагрузке на колесо 115 кН [26, 97]

Наибольший рост коэффициента сцепления получен при сухом контакте колеса и рельса. При этом была выполнена подготовка их рабочих поверхностей, заключающаяся в очистке от загрязнений, шлифовании и обезжиривании. Повышение силы тока в контакте от 0 до 3000 А привело к росту коэффициента с 0,36 до 0,57. Проведение опытов в большом слое машинного масла при таком же увеличении электрического тока показало повышение ψ_0 от 0,1 до 0,25. В случае нанесения на поверхности катания колеса и рельса воды, смешанной с машинным маслом, отмечено увеличение коэффициента сцепления от 0,19 до 0,29. При смачивании контакта водой получен рост ψ_0 от 0,28 до 0,43.

Эксперименты с подачей в рассматриваемый контакт переменного и выпрямленного двухполупериодного токов не выявили значимых отличий в характере изменения ψ_0 от зависимостей, приведенных на рисунке 1.6.

Проведены испытания грузового тепловоза 2ТЭ10У, на котором была установлена макетная система повышения сцепления, обеспечивающая подвод дискретно регулируемого тока тягового генератора в исследуемые контакты колес

с рельсами. Зафиксирован рост силы тяги тепловоза и, как следствие, его коэффициента сцепления [27]. При подаче в тяговые контакты тока силой около 1100 А и относительно чистых рабочих поверхностях колес и рельсов сила тяги повысилась на 10...15 %. В случае нанесения на поверхности рельсов машинного масла при том же токе отмечен рост силы тяги на 25...30 %.

Испытания тепловоза ЧМЭЗ с опытным магнитным усилителем коэффициента сцепления [43] и тепловоза 2ТЭ10У, оборудованного макетной системой повышения сцепления [27], были выполнены в практически заторможенном состоянии локомотивов. Оценка повышения силы тяги была выполнена косвенным путем: в первом случае – по силе тока тягового электродвигателя, во втором – по значениям напряжения измерительного прибора, которое пропорционально силе тяги опытного тепловоза. Таким образом, результатами экспериментов были качественные показатели силы тяги, позволяющие сравнительно судить о рассматриваемых воздействиях на тяговые качества только в стоячем положении тепловозов. Однако в них не зафиксированы реальные значения коэффициента сцепления, не исследованы режимы движения локомотивов с разными скоростями.

Лабораторные экспериментальные исследования [26, 97, 108] позволили определить значения коэффициента сцепления (рисунки 1.5 и 1.6) при подаче электрического тока в контакт колеса с рельсом. Сравнение величин коэффициента сцепления при этом способе и при использовании кварцевого песка дало близкие результаты. Поэтому его можно рассматривать как вероятную альтернативу для применения на тяговом подвижном составе. Для создания эффективных систем и устройств, в которых будут воплощены все возможности энергетического воздействия электрическим током на тяговые контакты, необходимо разрабатывать различные варианты таких средств повышения сцепления и проводить всесторонние исследования оборудованных ими локомотивов.

1.3 Электрические системы повышения сцепления колес тепловоза с рельсами

Разработкой теоретических основ для построения и созданием реальных конструкций средств повышения сцепных качеств локомотивов занимались многие известные ученые и специалисты в области локомотивной тяги. Так, в работах Г.В. Самме [103, 104] приведены результаты сравнительно новых исследований в области фрикционного взаимодействия колеса локомотива с рельсом и рассмотрены разработанные на их базе устройства и системы повышения сцепления. В этих устройствах реализован способ термомеханической очистки контактирующих поверхностей путем применения управляемых процессов боксования колесно-моторных блоков. Ю.М. Лужновым и А.М. Керопяном предложены устройства [90, 91] направленные на развитие способа повышения сцепления с подачей песка в зоны контакта. А.М. Лубяговым разработано [57] принципиально новое устройство подачи под давлением жидкого модификатора трения в контакты колес локомотива с рельсами. Предложены устройства [87, 88], в которых производится подача постоянного электрического тока в зоны указанных контактов от дополнительных источников. С позиции практической значимости интерес вызывают средства повышения сцепления, в которых использован подвод электрического тока в контакты, обеспечиваемый собственными средствами локомотива. В патенте [85] предусмотрено прохождение через контакты боксующих колесных пар с рельсами тока, созданного разностью потенциалов в точках соединения якорей тяговых электродвигателей с обмотками возбуждения. Однако величина этого тока может быть недостаточной для существенного увеличения коэффициента сцепления. Совершенствованием рассматриваемого воздействия стали электрические системы повышения сцепления (ЭСПС), в которых осуществлена подача тока тягового генератора тепловоза в зоны контакта колес и рельсов [29, 46, 49, 51, 89, 93, 128]. Тепловозы с электропередачей выполняют многоосными, и они обычно имеют в секции шесть или восемь ведущих колесных пар. Для создания в контактах колес с рельсами

требуемой плотности электрического тока предложена на уровне изобретения ЭСПС, построенная на основе управления импульсами тока тягового генератора, подводимого в указанные контакты [89].

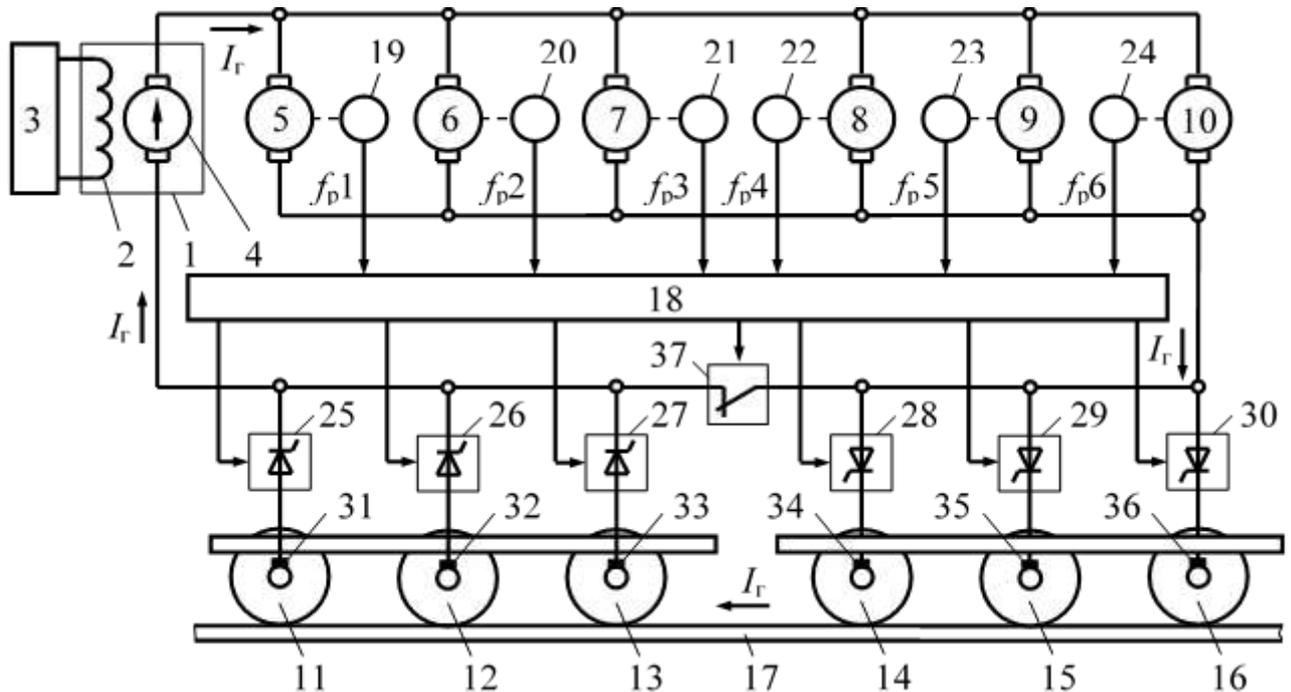
Работа тепловоза, оборудованного такой системой, при благоприятных условиях осуществляется по обычной схеме электрической передачи (рисунок 1.7). Дизель приводит во вращение тяговый генератор, обмотка возбуждения 2 которого подключена к системе возбуждения 3, формирующей внешнюю характеристику генератора. Якорь 4 генератора питает тяговые электродвигатели 5 - 10, вращающий момент которых передается через тяговые редукторы на колесные пары 11 - 16. Последние установлены на рельсах 17, образуя с ними пары трения, создающие касательную силу тяги тепловоза F_k .

При изменении условий работы, заключающемся в появлении воды, масла и других загрязнений в тяговых контактах, снижается сцепление локомотива, которое становится причиной возникновения боксования колесных пар и снижения F_k . Срыв сцепления в первую очередь происходит на передних по ходу движения колесных парах каждой тележки, т. к. они подвержены разгрузке в режиме тяги локомотива. На схеме (рисунок 1.7) разгруженными являются пары 11, 14, а при изменении направления движения тепловоза – 13, 16.

Результатом выполнения блоком управления 18 операций дифференцирования сигналов, пропорциональных частотам вращения роторов тяговых электродвигателей $f_{p1} - f_{p6}$, является определение угловых ускорений двигателей ϵ_p . При этом указанные сигналы поступают в блок от датчиков скорости 19-24, установленных на тяговых электродвигателях.

При фиксации у одного или двух двигателей 5, 8 (7, 9), приводящих в движение колесные пары 11, 14 (13, 16), ускорений ϵ_p , значения которых определяют окружные ускорения указанных колесных пар $w \geq 0,5 \text{ м/с}^2$ [89], блок 18 формирует сигналы о возникновении режима их боксования. Эти сигналы поступают на коммутирующие устройства 25, 28 (27, 30), которые соединяют с цепью якоря тягового генератора колесные пары 11, 14 (13, 16) с помощью

скользящих контактов 31, 34 (33, 36), обеспечивающих электрическую связь с осями пар.



1-4 – генератор; 5-10 – тяговые электродвигатели; 11-16 – колесные пары; 17 – рельс; 18 – блок управления; 19-24 – датчики скорости; 25-30 – коммутирующие устройства; 31-36 – скользящие контакты; 37 – коммутирующее устройство

Рисунок 1.7 - Схема электрической передачи тепловоза с подачей в зоны контакта колес и рельсов управляемых импульсов тока генератора

Далее блок управления отключает коммутирующее устройство 37, которое в свою очередь размыкает прямое электрическое соединение тяговых двигателей и якоря генератора. Результатом этих переключений является формирование цепи, обеспечивающей прохождение тока тягового генератора I_r по электродвигателям, колесной паре 14 (16), рельсам 17 и колесной паре 11 (13). При этом происходит существенное увеличение коэффициента сцепления ψ рассматриваемых колесных пар с рельсами, и их боксование прекращается. Момент восстановления сцепления колес можно определить по ускорениям ϵ_p , соответствующим линейным ускорениям $w < 0,45 \text{ м/с}^2$ [89]. При боксовании только передних колесных пар предложены два варианта управления током в контактах: импульсами с постоянным контролем моментов начала и окончания режимов боксования или постоянной подачей до выхода тепловоза из зоны возможного боксования.

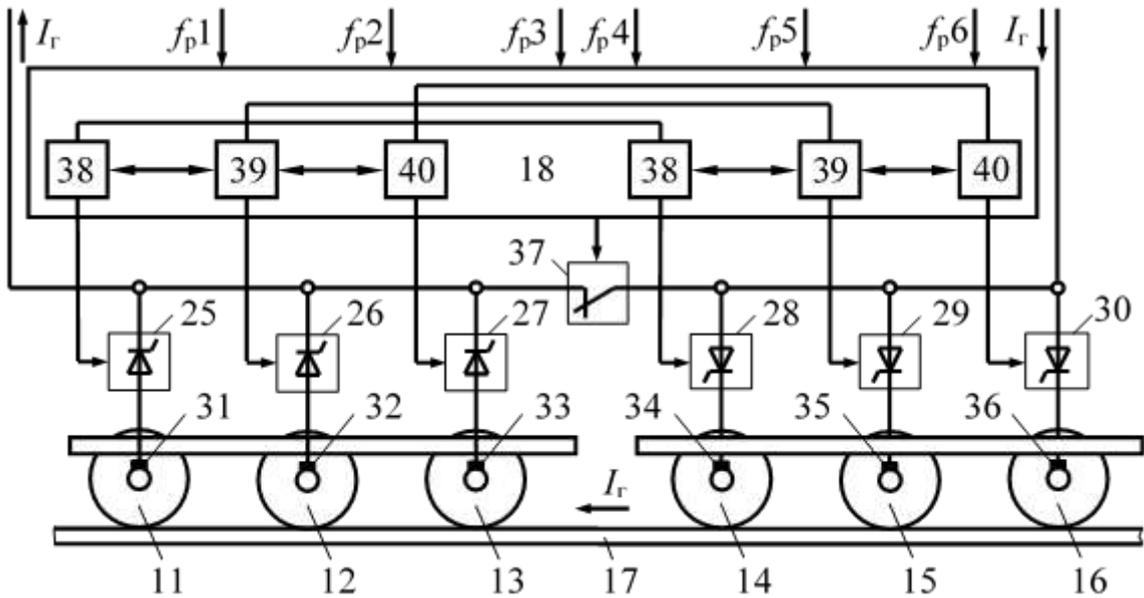
В случае срыва сцепления одной или двух средних колесных пар 12, 15, последовавшего за передними колесными парами, блок управления 18 аналогично фиксирует возникновение боксования по сигналам f_{p2}, f_{p5} , которые вырабатывают датчики скорости 20, 23. По командам блока 18 коммутирующие устройства 26, 29 подключают колесные пары 12, 15 к якорю генератора посредством скользящих контактов 32, 35. При этом устройствами 25, 28 (27, 30) производится отключение от генератора цепей колесных пар 11, 14 (13, 16). В результате попеременно формируются электрические соединения боксующих колесных пар по две в каждом, и в них поступают импульсы тока тягового генератора. Прохождение тока через контакты колес с рельсами приводит к увеличению коэффициента ψ и, следовательно, наибольшей силы тяги, боксование прекращается. Отсутствие тока во время пауз способствует очередному срыву сцепления. Поэтому в процессе работы системы блок 18 постоянно регистрирует начало и завершение боксования колесных пар, производит операции сравнения соответствующих моментов времени. Таким образом, используемый в системе алгоритм управления коммутирующими устройствами имеет довольно высокую сложность.

При выделении блоком управления сигналов f_p датчиков скорости, пропорциональных скорости движения локомотива $V > 15$ км/ч, которая определяет окончание зоны возможного боксования, и при условии фиксации ускорений ϵ_p , соответствующих $w < 0,45$ м/с², блок 18 отключает коммутирующие устройства 37, 25-30, чем переводит схему электропередачи в исходное состояние.

Для упрощения алгоритма управления можно исключить отдельные операции блока 18, связанные с частой регистрацией режимов боксования. При этом достаточно по очереди подавать постоянные импульсы тока на указанные соединения колесных пар.

В такой ЭСПС [93, 29] сохранена функция блока управления, заключающаяся в аналогичной регистрации момента возникновения одновременного боксования передних и средних колесных пар (рисунок 1.8). Далее осуществляется синхронизированная работа генераторов сигналов, включенных в схему блока 18.

В случае боксования колесных пар 11, 12, 14, 15 запускаются генераторы 38, 39, которые управляют переключением коммутирующих устройств 25, 26, 28, 29.



11-16 – колесные пары; 17 – рельс; 18 – блок управления; 25-30 – коммутирующие устройства; 31-36 – скользящие контакты; 38-40 – генераторы импульсов

Рисунок 1.8 - Схема подачи постоянных импульсов тока генератора в зоны контакта колес и рельсов

При срыве сцепления колесных пар 12, 15 в момент времени $t_{н1}$ генератор 38 подает сигнал на отключение коммутирующих устройств 25, 28 (рисунок 1.9).

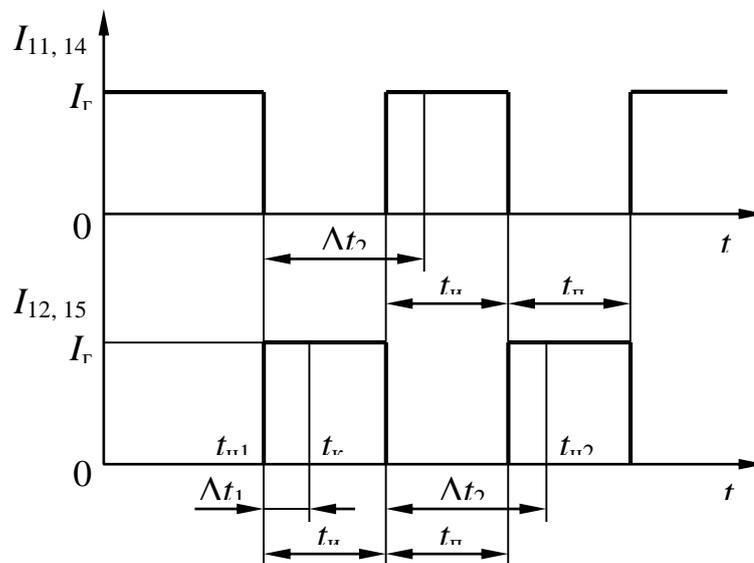


Рисунок 1.9 - Диаграмма токов колесных пар

Одновременно от генератора 39 срабатывают устройства 26, 29. Это создает с помощью контактов 32, 35 последовательное соединение колесных пар 12, 15, и по ним проходит ток $I_{12, 15} = I_r$. Последующие действия генераторов связаны с выработыванием сигналов управления, обеспечивающих коммутацию устройств 25, 26, 28, 29 с формированием постоянных импульсов тока $I_{11, 14}$ и $I_{12, 15}$. Импульсы попеременно поступают на рассматриваемые соединения колесных пар 11, 14 и 12, 15, чем увеличивают их коэффициент ψ .

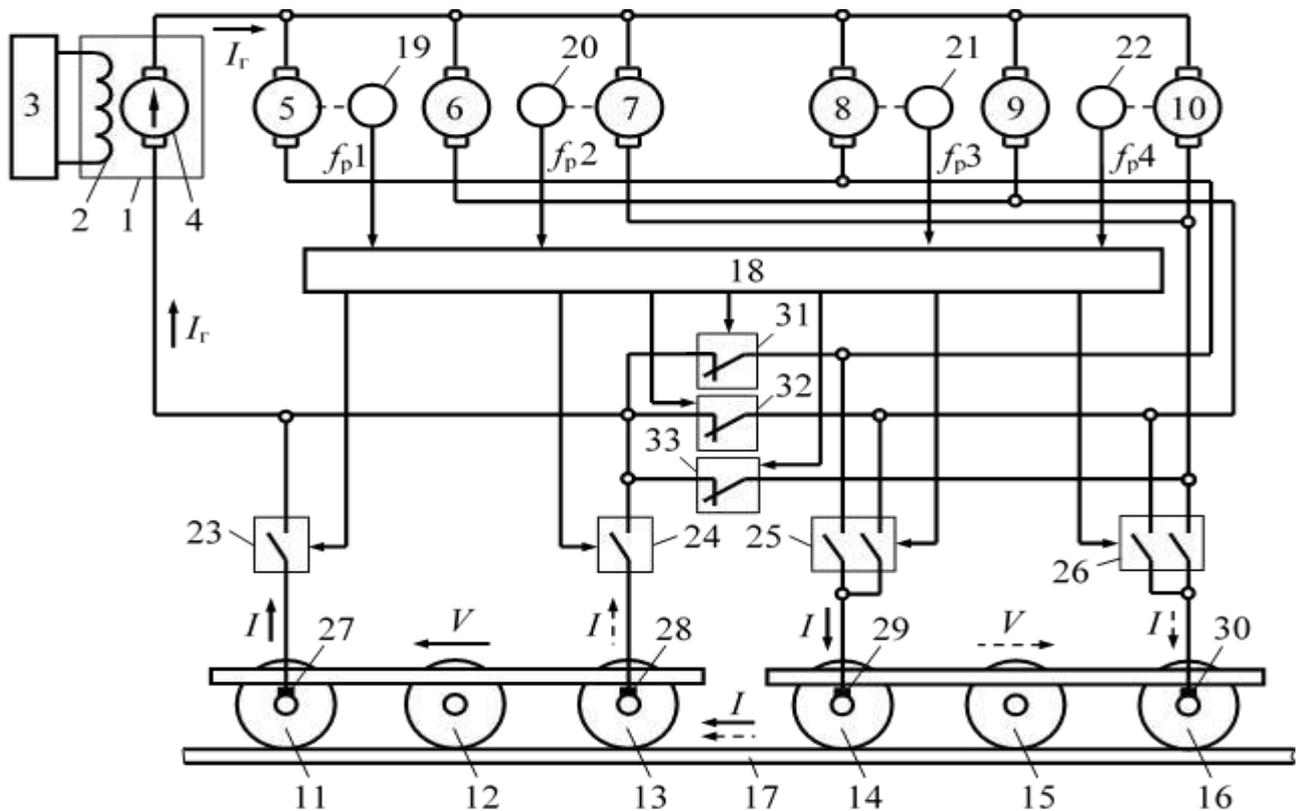
Импульсы тока имеют постоянную длительность $t_{и}$, которую устанавливают больше времени выхода колесных пар из режима боксования Δt_1 . Его необходимо определить при наиболее тяжелых по сцеплению условиях эксплуатации для конкретных величин тока в контактах колес и рельсов. В таком случае боксование колесной пары будет гарантированно завершено в момент времени t_k , и не потребуются фиксировать блоком 18 ускорения $w < 0,45 \text{ м/с}^2$. Для паузы также характерна постоянная длительность $t_{п}$. При этом она должна быть меньше времени перехода колесных пар в режим боксования Δt_2 при указанных выше условиях эксплуатации. Поэтому очередной импульс тока поступает в контакты колесных пар с рельсами до момента времени $t_{н2}$, определяющего начало ожидаемого режима боксования, и предупреждает его. Тогда отпадает необходимость фиксации возникновения режима боксования, в связи с чем в блоке управления отсутствует операция измерения ускорения $w \geq 0,5 \text{ м/с}^2$.

При движении тепловоза в другом направлении передними являются колесные пары 13, 16. В этом случае в аналогичном алгоритме работы системы участвуют генераторы сигналов 39, 40 и коммутирующие устройства 26, 27, 29, 30. В результате импульсы тока тягового генератора, имеющие неизменные длительность и паузы, поступают по очереди на соединения колесных пар 12, 15 и 13, 16.

При импульсном регулировании электрического тока в контактах колесных пар и рельсов происходят многократно повторяющиеся коммутации электрического тока большой величины в силовых цепях ЭСПС. Поэтому коммутирующие устройства и скользящие контакты работают в тяжелых условиях,

что влияет на их надежность и сроки службы. В вариантах ЭСПС с постоянной подачей тока работа этих элементов отличается меньшей напряженностью.

Предложена система, в которой реализовано прохождение постоянного тока (без импульсов) по передним колесным парам и рельсам в процессе срыва их сцепления, которое сопровождается позитивным токораспределением в тяговых электродвигателях [92]. При нормальных условиях эксплуатации такая ЭСПС работает по обычной схеме электропередачи тепловоза (рисунок 1.10), не отличаясь от ранее рассмотренных вариантов.



1-4 – генератор; 5-10 – тяговые электродвигатели; 11-16 – колесные пары; 17 – рельс; 18 – блок управления; 19-22 – датчики скорости; 23-26 – коммутирующие устройства; 27-30 – скользящие контакты; 31-33 – коммутирующие устройства

Рисунок 1.10 - Схема электрической передачи тепловоза с подачей тока тягового генератора в зоны контакта колес с рельсами и токораспределением

При срыве сцепления, разгруженных в режиме тяги передних колесных пар блок управления 18 подает команды на коммутирующие устройства 23, 25 (24, 26). Эти устройства с помощью скользящих контактов 27, 29 (28, 30) подключают к цепи тягового генератора 1 колесные пары 11, 14 (13, 16). Далее по сигналам блока

18 устройства 31, 32 (32, 33) отключают тяговые электродвигатели 5, 6, 8, 9 (6, 7, 9, 10) от якоря 4 тягового генератора.

Выполненные переключения позволяют сформировать электрические цепи, которые обеспечивают прохождение бóльшей части тока генератора I_T через контакты передних колесных пар и рельсов 17 последовательно с тяговыми электродвигателями. В результате происходит значимое увеличение сцепления этих колесных пар с рельсами.

Одновременно к электрическим цепям тяговых двигателей передних и средних колесных пар последовательно подключаются сопротивления скользящих контактов R_1 и контактов колес с рельсами R_2 (рисунок 1.11). При этом тяговые электродвигатели, установленные на задних колесных парах тележек, имеют прямое электрическое соединение тяговым генератором. Таким образом, по тяговым двигателям передних и средних колесных пар проходят меньшие токи I_1 , а токи двигателей, перегруженных задних колесных пар I_2 имеют бóльшие значения.

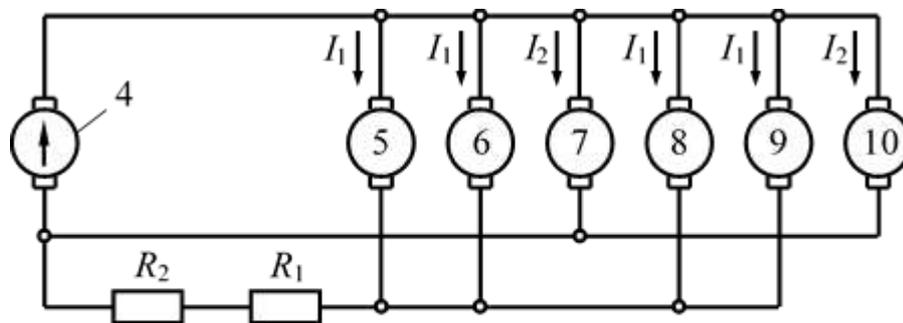


Рисунок 1.11 - Схема токораспределения

В результате образовавшееся токораспределение способствует уменьшению вращающих моментов двигателей передних и средних колесных пар и соответствующему увеличению моментов тяговых двигателей на задних колесных парах. Это приводит к снижению касательной силы тяги и устранению предполагаемого срыва сцепления средних колесных пар, также подвергающихся некоторой разгрузке.

На более разгруженных передних колесных парах одновременно реализуется два процесса: повышение наибольшей по сцеплению силы тяги, обусловленное

значительным увеличением сцепления колес с рельсами и уменьшение касательной силы тяги, вызванное падением токов их двигателей. Следствием этого является восстановление сцепления и прекращение боксования передних колесных пар.

Для проверки работоспособности рассмотренных выше вариантов ЭСПС были выполнены предварительные испытания опытной секции грузового тепловоза 2ТЭ10У, оснащенной макетной электрической системой повышения сцепления [27]. Результаты проверки позволили прогнозировать положительный эффект от возможного применения этих систем, а также поставили ряд задач, решение которых требуют проведения дальнейших исследований.

1.4 Выводы раздела 1

1 Проведенный анализ работ в области исследований фрикционного взаимодействия колес локомотива с рельсами показал, что их сцепные и, следовательно, тяговые качества непосредственно связаны с процессами трения. Сложность этих процессов, обусловленная различными физико-механическими и механико-химическими явлениями в зонах контакта и их противоречивым характером по отношению к протеканию процессов, до настоящего времени не позволила выработать единую теорию по данной проблеме.

2 Характеристики сцепления и зависимости для коэффициентов сцепления, полученные разными исследователями, несмотря на схожесть, имеют существенные различия. Это может привести к ошибкам при прогнозировании тяговых качеств локомотивов, расчетах массы транспортируемых составов, а также при разработке средств повышения сцепления.

3 Проведенный обзор показал, что разработанные в настоящее время средства повышения сцепления нередко отличаются большой сложностью и высокой стоимостью.

4 При подаче электрического тока и кварцевого песка в контакт колеса с рельсом коэффициенты сцепления имеют близкие значения, что позволяет сопоставить два этих способа повышения сцепных качеств локомотива. Однако

величины коэффициента ψ_0 при подаче тока получены на экспериментальном стенде, а испытания опытного тепловоза дали качественные результаты при его заторможенном состоянии. Проведенные исследования не позволяют оценить реальные возможности этого способа в движении локомотива при изменении его скорости.

5 По результатам анализа исследований и разработок в рассматриваемой области необходимо:

- разработать и изготовить макетную электрическую систему повышения сцепления опытного тепловоза, которая необходима для решения задач диссертационных исследований;

- выполнить математическое моделирование тягового привода опытной секции тепловоза для предварительного теоретического анализа работы макетной ЭСПС;

- установить закономерности увеличения предельных значений физического коэффициента сцепления в процессе движения тепловозов, оборудованных электрическими системами повышения сцепления;

- провести оценку прогнозируемого повышения тяговых качеств тепловозов, оборудованных ЭСПС.

2 МАКЕТНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОВЫШЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ ОПЫТНОГО ТЕПЛОВОЗА

2.1 Обоснование метода экспериментальных исследований сцепных качеств локомотива с применением макетных систем

При проведении научных исследований разнообразных физических процессов в настоящее время применяют различные методы. Выбор метода осуществляют с учетом стоящих задач, а также характера выполняемых исследований и требований к их результатам.

Для решения всевозможных аспектов контактной задачи относительно колес локомотива и рельсов широко используют численные методы и компьютерные модели, физическое моделирование системы «колесо-рельс» на основе теории подобия, экспериментальные исследования на лабораторных натуральных стендах, проводят испытания локомотивов в условиях эксплуатации [13, 26-28, 43, 97, 108 и др.]. Физические процессы, происходящие в контакте колеса и рельса, отличаются высокой сложностью и недостаточной изученностью. Поэтому не всегда возможно применять метод компьютерного моделирования. Результаты экспериментальных исследований физических моделей часто не дают достаточной точности для оценки прохождения процесса в натурном контакте. Так, при исследованиях сцепных свойств на физических моделях [13, 43] с подачей магнитного потока и электрического тока в контакт стального диска и плоского образца рельсовой стали не обеспечено моделирование реальных условий контактирования колеса и рельса. Кроме того, даже при выполнении такого моделирования [25] пересчет результатов на натурный контакт дает существенные погрешности. Таким образом, в случаях применения метода физического моделирования получаемые показатели являются по большей части качественными.

Необходимой точности протекания некоторого физического процесса можно достичь с помощью натуральных экспериментальных стендов. При этом величины показателей процесса, полученные во время исследований на стенде, фактически

не имеют отличий от оригинальных величин. Вместе с тем для сложных систем, к которым относится система «колесо рельс», свойственны различные проблемы, требующие изучения. Создание натурального стенда, позволяющего проводить исследования по всем направлениям в указанной области представляет собой сложную и затратную задачу. Поэтому обычно разрабатывают специализированные стенды для решения каждой научной проблемы. В частности, с целью определения предельных сцепных (тяговых) свойств фрикционной пары «колесо – рельс» были проведены эксперименты на натуральных стендах [26, 108], в которых предусмотрена возможность прохождения электрического тока через контакт колеса и рельса. Однако эта экспериментальная специализация не дает возможности для исследований процессов динамики тягового привода, проведения ресурсных испытаний, также нельзя установить зависимости физического коэффициента сцепления от скорости линейного перемещения колеса в широком диапазоне и др.

Не вызывающие сомнений результаты можно получить только при натуральных испытаниях конкретного локомотива в действительных условиях эксплуатации. Этот метод большей частью используют при доведении опытных образцов локомотивов и их систем, а также для проверки результатов научных изысканий, полученных другими путями. Кроме того, на испытаниях уточняют различные характеристики локомотивов после появления определенных изменений в их конструкции и условиях эксплуатации. Натурные исследования также могут быть единственно возможным методом при решении ряда специфических научных задач.

Многие технические решения предварительно получают в виде определенного предположения, а также прорабатывают в лабораторных условиях. Для подтверждения их работоспособности в реальной эксплуатации нерационально изготавливать и оборудовать локомотив сложными и дорогостоящими образцами. Уместно выполнить исследования макетных устройств или систем, которые воспроизводят базовые принципы работы, снижают затраты и сокращают время проведения испытаний. Так, для оценки влияния

Стыки рельсов оборудованы электрическими изоляторами. В результате была построена силовая цепь, обеспечивающая прохождение части тока тягового генератора Г, являющейся суммой токов тяговых двигателей 1..3, через контакты колесной пары I с рельсами. В этой схеме воплощена макетная система повышения сцепления тепловоза, реализующая указанный основной физический процесс. Для работы тепловоза в штатном режиме предусмотрен провод 03, который обеспечивал прямое соединение тягового генератора с электродвигателями.

При испытаниях опытная секция находилась в практически заторможенном состоянии, что было обеспечено второй секцией, исполняющей функции тормозной единицы. Дискретное регулирование тока в контактах первой колесной пары с рельсами осуществлялось путем последовательного подключения к ней электродвигателей 1...3 и набора позиций контролера машиниста. По итогам выполненных исследований получен реальный рост тяговых (сцепных) свойств тепловоза.

Испытания натурального локомотива также целесообразно провести для определения воздействия электрического тока на сцепление колес с рельсами при движении в различных эксплуатационных условиях, что является основной задачей исследований в рамках настоящей диссертационной работы. Решить эту проблему возможно на натурном экспериментальном стенде. Однако при таком методе исследований трудно воспроизвести необходимые условия проведения экспериментов, в частности, обеспечить требуемые скоростные режимы с достижением срыва сцепления колеса с рельсом.

Следует отметить, что в настоящее время не существует какой-либо информации об указанных исследованиях. Поэтому существует опасность получения неудовлетворительных результатов, что при испытаниях опытных ЭСПС может привести к значительному материальному ущербу. Предпочтительной является разработка менее затратной макетной ЭСПС, которая отвечает требованиям, обусловленным задачами диссертационных исследований:

– система должна имитировать основные процессы работы ЭСПС с возможностью требуемых переключений силовой электрической цепи;

- система должна обеспечить подачу в зоны контакта передних в направлении движения колесных пар тележек с рельсами и необходимое регулирование тока тягового генератора;
- узлы подвода тока к колесным парам должны быть рассчитаны на прохождение максимального тока тягового генератора при проведении экспериментов в заданном диапазоне скоростей движения локомотива;
- колесно-моторные блоки должны быть обеспечены электрической изоляцией от других элементов конструкции тепловоза;
- регистрация параметров опытов должна осуществляться с достаточно высокой точностью.

2.2 Устройство макетной системы повышения сцепления колес с рельсами опытного тепловоза

2.2.1 Общее устройство и принцип действия системы

Принцип действия всех ЭСПС основан на подаче в контакты колес с рельсами электрического тока от тягового генератора магистрального грузового тепловоза [26, 27, 97]. Поэтому для проведения исследований в объеме поставленных задач диссертации использована секция тепловоза 2ТЭ116 (рисунок 2.2).

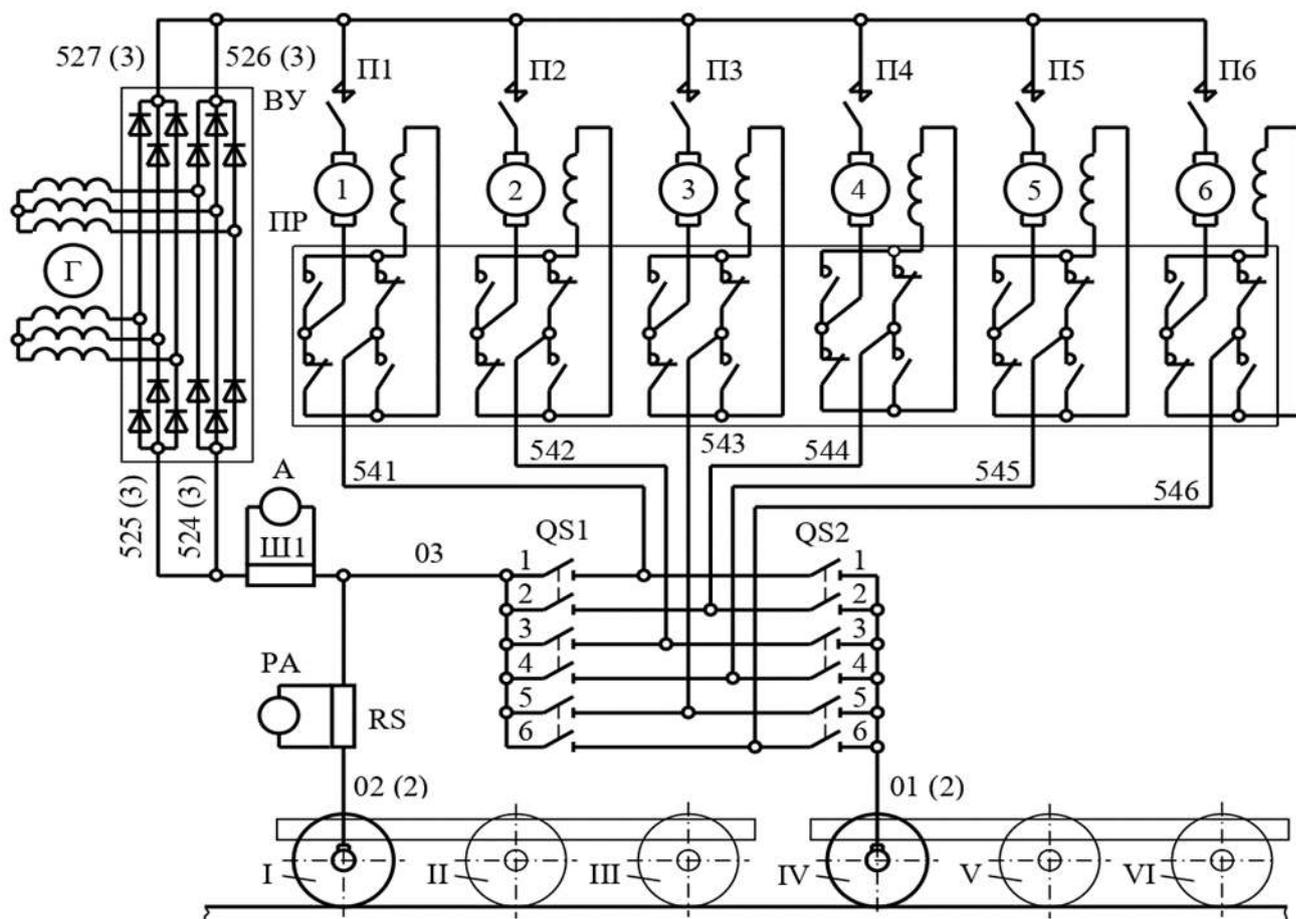
Для обеспечения подачи тока в тяговые контакты в рассмотренных ЭСПС предусмотрены коммутирующие устройства, которые работают в автоматическом режиме по сигналам, поступающим от блоков управления. При этом предложено несколько алгоритмов, выполняемых этими блоками. Вместе с тем запланированные в диссертации исследования не предусматривали изучение и оптимизацию таких алгоритмов управления, а направлены на установление закономерностей изменения коэффициента сцепления и, следовательно, тяговых характеристик тепловоза под воздействием электрического тока в движении. Поэтому опытную секцию тепловоза можно оснастить относительно простыми коммутирующими устройствами с ручным управлением.



Рисунок 2.2 – Опытная секция тепловоза 2ТЭ116

В силовой цепи секции тепловоза 2ТЭ116 [112] установлены (рисунок 2.3) многополюсные коммутирующие устройства QS1 и QS2, которые имеют рукоятки для пополюсного оперирования. Провода 541...546 отсоединены от измерительного шунта Ш1 и подключены к указанным разъединителям. Кроме того, в силовую цепь включены новые провода 01, 02 и 03. Два провода 01 соединяют разъединитель QS2 с осью колесной пары IV, а провода 02, связанные с передней по направлению движения колесной парой I, подключены через шунт RS к шунту Ш1. Электрическую связь цепи с осями колесных пар осуществляют специально разработанные буксовые токоподводы. На шунте Ш1 также закреплен провод 03, другим концом соединенный с разъединителем QS1. Такое построение силовой цепи позволяет выполнять ее переключения, которые обеспечивают прохождение по контактам колесных пар I и IV с рельсами дискретно регулируемого тока тягового генератора.

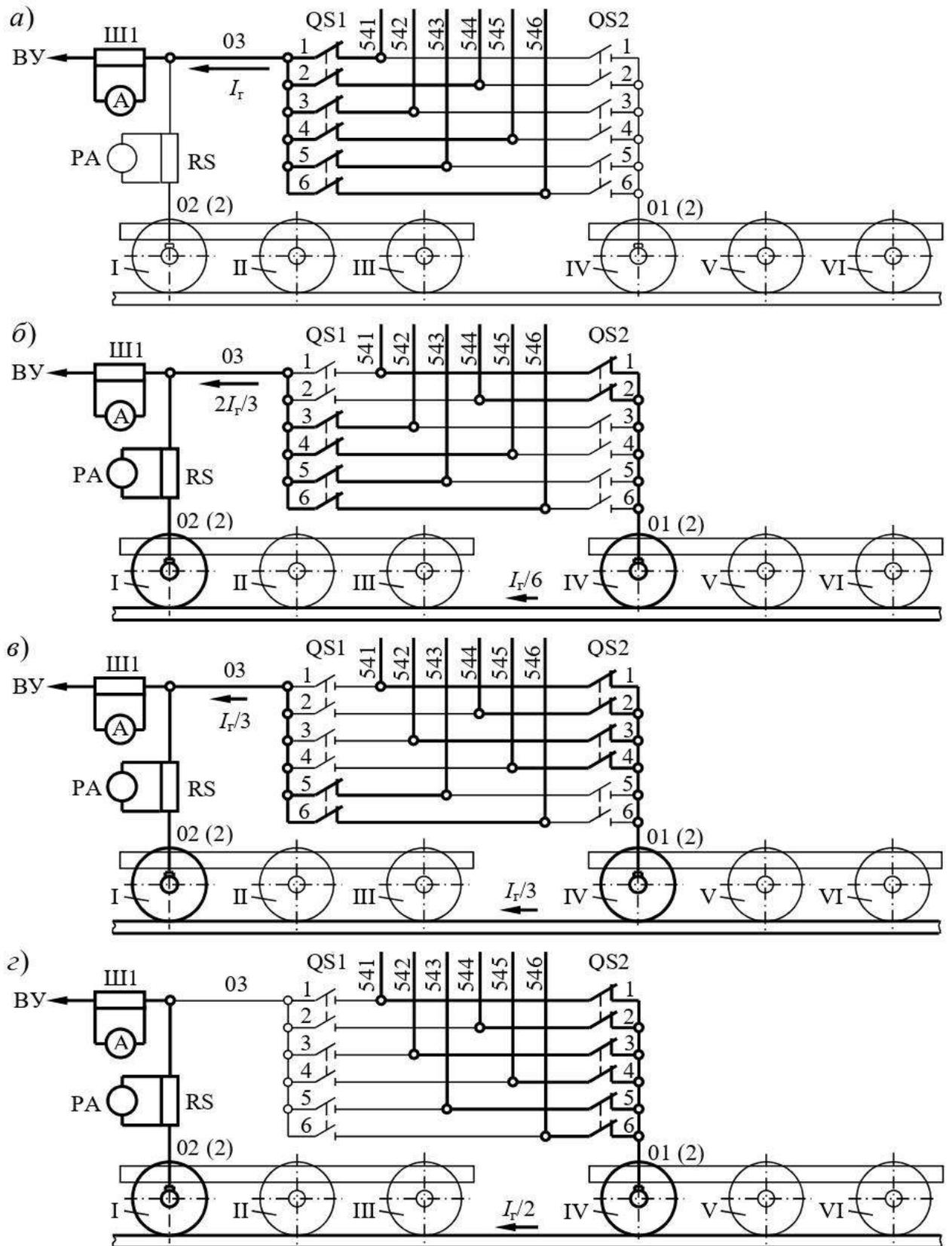
Работу тепловоза в штатном режиме обеспечивают включением всех контактов разъединителя QS1 и отключением контактов QS2 (рисунок 2.4, а). При этом электродвигатели 1...6 соединены с тяговым генератором по обычной схеме, и электрический ток в контактах колесных пар с рельсами отсутствует.



Г – генератор; П1-П6 – контакторы; 1-6 – тяговые двигатели; Ш1 – шунт; А – амперметр; Ш1 – шунт; QS1, QS2 – многополюсные коммутирующие устройства I-VI – колесные пары; RS – шунт; РА - амперметр

Рисунок 2.3 - Силовые электрические цепи опытной секции тепловоза 2ТЭ116

Для регулируемой подачи тока тягового генератора на колесные пары в схеме предусмотрено размыкание и замыкание в установленном порядке контактов разъединителей QS1 и QS2. Так, при размыкании контактов 1, 2 разъединителя QS1 (рисунок 2.4, б) и замыкании контактов 1, 2 разъединителя QS2 рассматриваемая макетная система будет подготовлена к прохождению $\approx 1/6$ тока тягового генератора I_G через контакты колес с рельсами. При последующем размыкании и замыкании соответствующих контактов 3, 4 (рисунок 2.4, в) в тяговых контактах будет проходить ток, равный $\approx 1/3 I_G$. При всех выключенных полюсах QS1 и включенных полюсах QS2 (рисунок 2.4, г) ток в контактах колес и рельсов составит $\approx 1/2$ полного тока тягового генератора. Аналогичные переключения разъединителей по одному контакту обеспечивают регулировку исследуемого тока ($1/12, 1/6, 1/4, 1/3, 5/12, 1/2$) I_G .



Г – генератор; П1-П6 – контакторы; 1-6 – тяговые двигатели; Ш1 – шунт; А – амперметр; Ш1 – шунт; QS1, QS2 – многополюсные коммутирующие устройства I-VI – колесные пары; RS – шунт; PA - амперметр

Рисунок 2.4 – Схемы подключения контактов колес с рельсами к силовым цепям тепловоза

Кроме того, в случае использования на тепловозе 2ТЭ116 характеристика тягового генератора ГС-501А (рисунок 2.5) позволяет также дискретно регулировать силу тока I_T при изменении позиций контроллера машиниста. Таким образом, посредством проведения необходимых переключений можно реализовать подачу на передние колесные пары I, IV электрического тока, сила которого соответствует условиям проведения эксперимента.

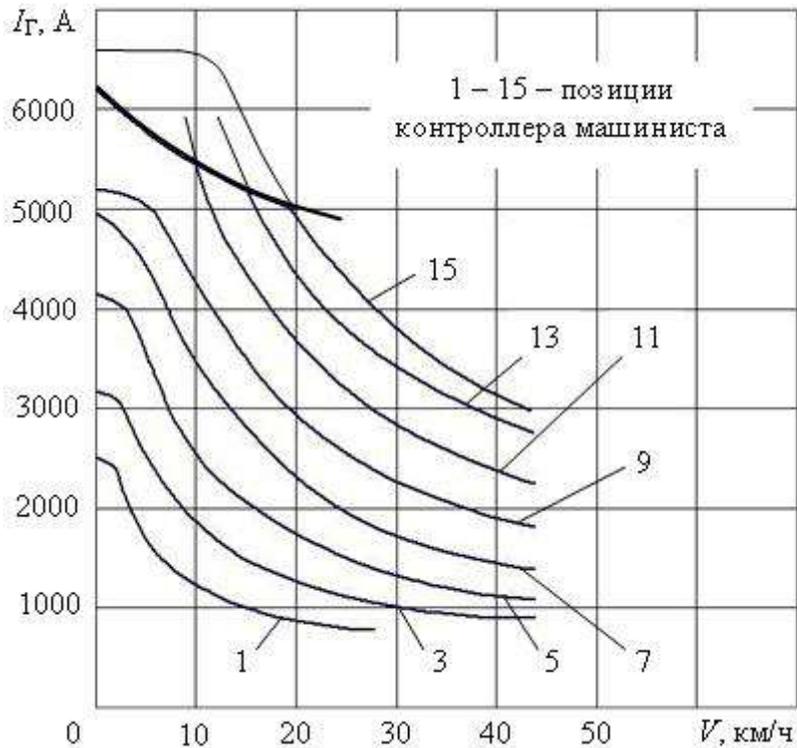


Рисунок 2.5 – Ток тягового генератора тепловоза 2ТЭ116 при полном поле возбуждения тяговых электродвигателей

Для выполнения изменений в соответствии со схемой (рисунок 2.3) разъединители QS1 и QS2 размещены рядом с элементами силовой цепи, задействованными в монтажных работах (рисунок 2.6). Одновременно с этим решен вопрос по возможности удобного доступа к органам управления для проведения переключений.

Таким образом, макетная ЭСПС моделирует основной рабочий процесс систем, рассмотренных в подразделе 1.3. При этом отсутствует необходимость в формировании импульсов электрического тока, так как различие во влиянии постоянного и импульсного токов на коэффициент сцепления локомотива не значительно [30]. Для проведения экспериментальных исследований, которые обусловлены поставленными задачами диссертации, в системе предусмотрено

регулирование электрического тока, подаваемого в испытываемые тяговые контакты, при движении тепловоза [52].



Рисунок 2.6 - Блок разъединителей

Следует отметить, что схема подключения, приведенная на рисунке 2.4, в, принципиально соответствует ЭСПС (рисунок 1.9) во включенном состоянии при движении тепловоза в одном из направлений. Это позволяет оценить совместное воздействие на тяговые качества локомотива электрического тока, подаваемого на наиболее разгруженные колесные пары, и полезного токораспределения между тяговыми двигателями разгруженных и перегруженных колесных пар.

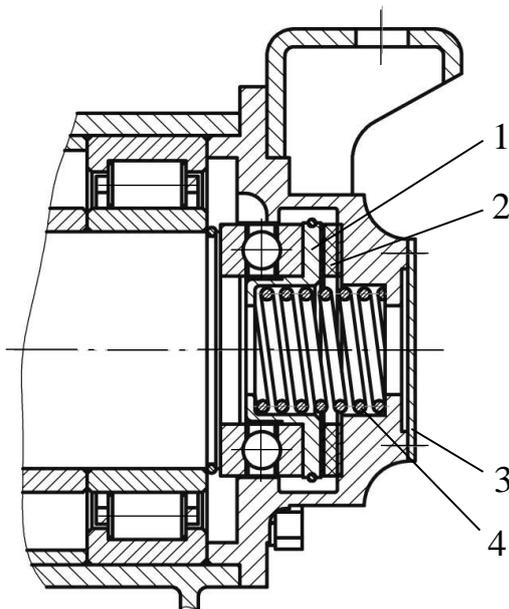
2.2.2 Буксовый узел подвода тока тягового генератора к оси колесной пары

Для создания, предусмотренного схемой (рисунок 2.3) электрического соединения осей колесных пар I и IV с силовыми цепями в макетной ЭСПС необходимо использовать скользящие контакты, обеспечивающие связь между подвижными и неподвижными элементами. Функции таких контактов могут выполнить вкладыши моторно-осевых подшипников тяговых электродвигателей [97, 27]. Однако это приведет к прохождению по подшипникам тока, который может вызвать возникновение явления электрокоррозии и их дополнительный износ.

Современные электровозы (ЭП1, ЭС5, 2ЭС10 и др.) снабжены буксовыми токоотводящими устройствами, которые служат для отвода тока силовой цепи в

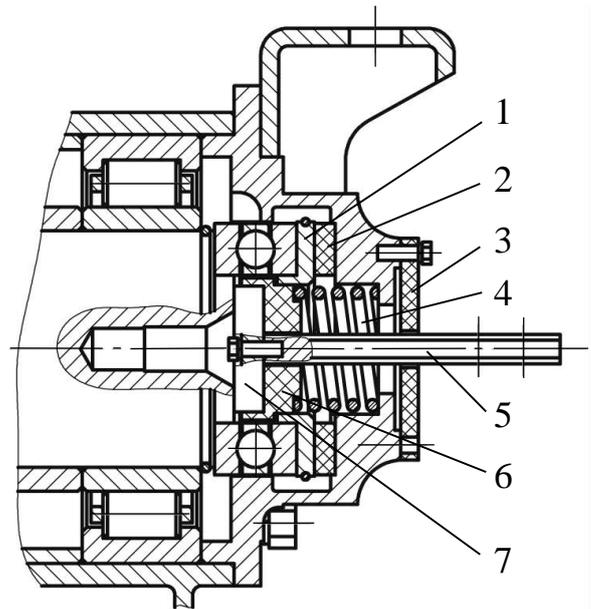
рельсы через торец оси колесной пары, что исключает повреждение отдельных частей механической части и подшипников. Отдельные конструкции токоотводов были приняты в качестве прототипов при разработке буксового узла подвода тока к оси опытной секции тепловоза.

Для оснащения торца оси скользящим контактом в осевом упоре штатной буксы тепловоза 2ТЭ116 произведены изменения. Кроме шарикоподшипника основными элементами осевого упора (рисунок 2.7) являются упор 1, резинометаллический амортизатор 2, гарантирующий требуемый разбег крайних колесных пар тепловоза, крышка 3 и пружина 4, обеспечивающая прижатие подшипника к торцу оси [112]. В видоизмененном упоре 1 (рисунок 2.8) зафиксирован держатель 6, в котором с радиальным зазором установлен контакт 7. Пружина 4 создает расчетную силу нагружения контакта 7 на торец оси и не выполняет функцию поджатия подшипника. Для этого предназначен амортизатор 2, выполненный из полиуретана и установленный при сборке с начальной упругой деформацией.



1 – упор; 2 – амортизатор; 3 – крышка;
4 – пружина [112]

**Рисунок 2.7 – Осевой упор буксы
тепловоза**



1 – упор; 2 – амортизатор; 3 – крышка; 4 –
пружина; 5 – шина; 6 – держатель; 7 – контакт

**Рисунок 2.8 – Осевой упор буксы с
токоподводом**

Крышка 3 и держатель 6 изготовлены из материала, обладающего электроизолирующими свойствами (текстолита). В них выполнены отверстия прямоугольной формы для возможности монтажа и противодействия провороту

шины 5, закрепленной на контакте 7. На шине выполнены два отверстия для болтового соединения с силовым проводом (рисунок 2.9).

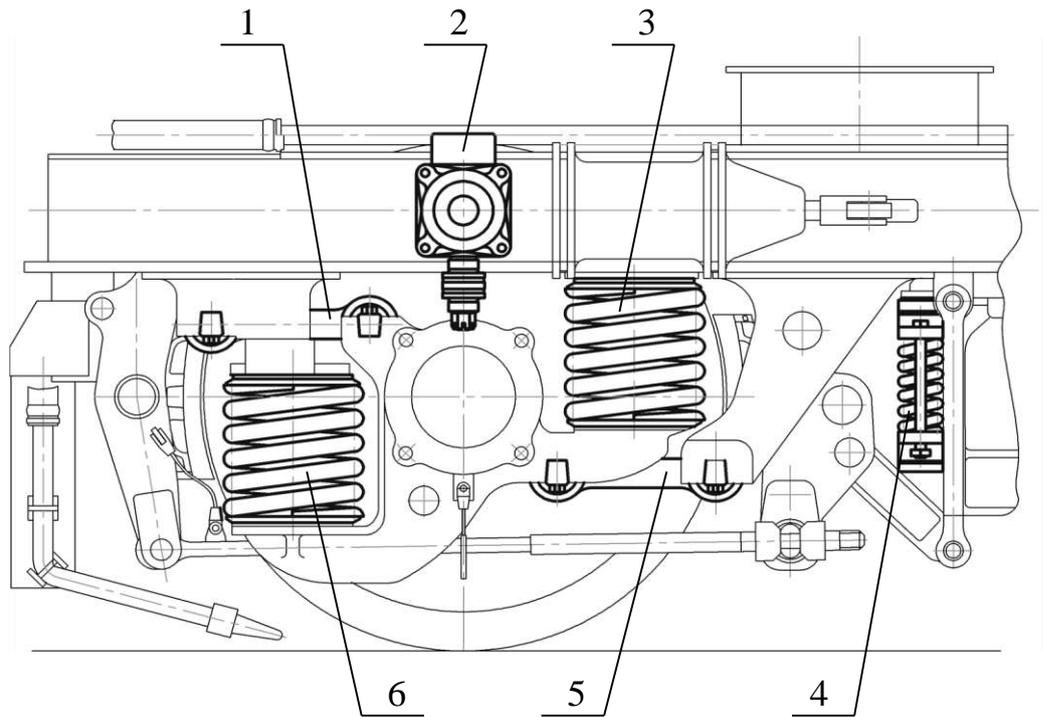


Рисунок 2.9 – Букса с токоподводом

На опытной секции установлено четыре дополнительных провода, соединяющих токоподводящие буксы с определенными элементами силовой цепи (рисунок 2.3), что обеспечивает электрическое подключение исследуемых колесных пар к тяговому генератору.

2.2.3 Электрическая изоляция колесно-моторных блоков

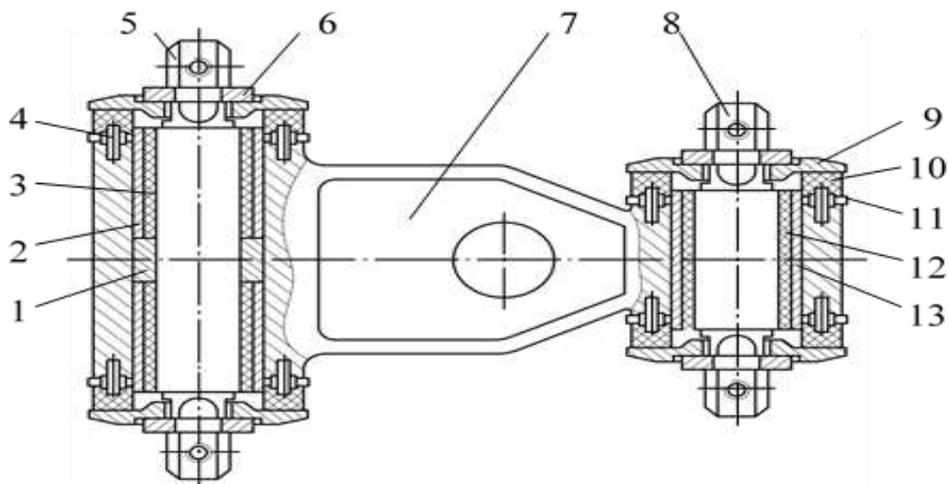
При рассмотренном соединении электрической схемы тепловоза с осями колесных пар возникают условия для прохождения части тока тягового генератора по нескольким параллельным ветвям, объединенным рамами тележек. Причиной этого является связь осей с рамами через токопроводящие элементы колесно-моторных блоков (КМБ), а также через поводки 1, 5, гасители колебаний 2, комплекты пружин рессорного подвешивания 3, 6 и подвески тяговых электродвигателей 4 (рисунок 2.10). В результате не весь исследуемый ток поступает в контакты колес с рельсами, и имеются трудности в определении его значения. Кроме того, существует опасность коррозии буксовых и моторно-осевых подшипников КМБ.



1, 5 – поводки; 2 – гаситель колебаний; 4 – подвеска ТЭД; 3, 6 – комплекты пружин [112]

Рисунок 2.10 – Установка колесно-моторного блока

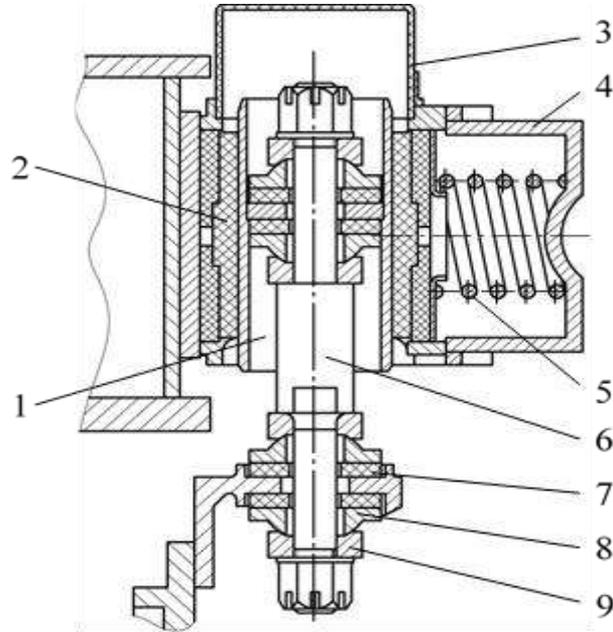
Для исключения указанных негативных факторов все поверхности контактов КМБ с рамой оснащены встроенной в оборудование или дополнительной электрической изоляцией. Так, в поводке (рисунок 2.11) функции изоляции выполняют резиновый элемент 10 и резиновая втулка 12.



1, 6 – полукольца; 2, 13 – втулки; 3, 12 – резиновые втулки; 4 – штифты; 5, 8 – валик;
7 – корпус; 9 – шайбы; 10 – резиновые элементы; 11 – кольца [112]

Рисунок 2.11 - Поводок буксы:

Изолирующие свойства фрикционного гасителя колебаний (рисунок 2.12) обеспечивают накладки 2 и амортизаторы 7. Вместе с тем это устройство предназначено для гашения колебаний в экипажной части в процессе движения локомотива, которые возникают при достаточно больших скоростях.



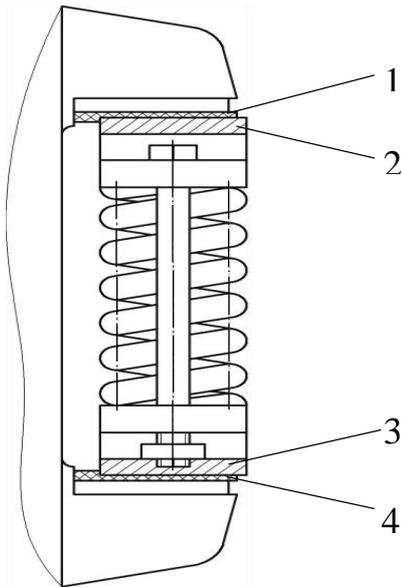
1 – гильза поршня; 2 – накладки; 3, 4 – крышка; 5 – пружина; 6 – штанга; 7 – амортизаторы; 8 – сухари; 9 – обоймы [112]

Рисунок 2.12 - Фрикционный гаситель колебаний:

Поэтому в зоне малых скоростей, характерных проводимым экспериментам, его можно отсоединить от буксового узла. Свою изоляцию имеют траверсное подвешивание тяговых электродвигателей (рисунок 2.13) и комплекты пружин рессорного подвешивания тепловоза (рисунок 2.14).

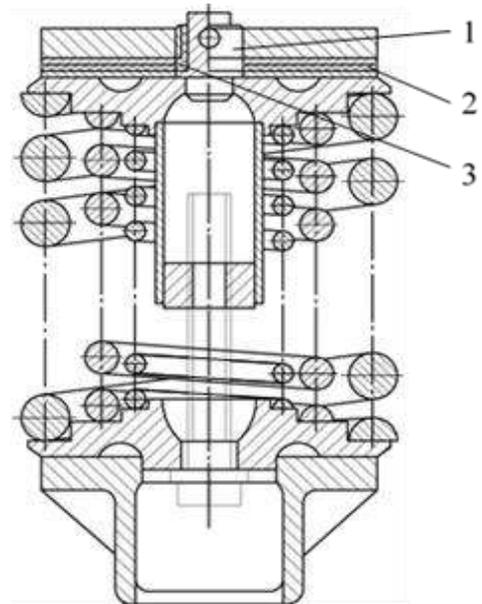
В первом устройстве изоляция выполнена путем отделения верхней 2 и нижней 3 балочек траверсы от носиков тяговых электродвигателей полиуретановыми прокладками 1, 4 (рисунок 2.13).

Комплекты пружин (рисунок 2.14) отделены от рамы тележки резинометаллическими амортизаторами 2. Для обеспечения полной электрической изоляции в данных местах контакта необходимо убрать токопроводящую связь между рамой и фиксирующим отделены от рамы тележки резинометаллическими амортизаторами 2.



1, 4 – прокладки изоляционные;
2, 3 – балочки верхняя, нижняя

Рисунок 2.13 – Подвешивание тягового электродвигателя



1 – штырь; 2 – амортизатор; 3 – изолятор

Рисунок 2.14 – Комплект пружин рессорного подвешивания

Для обеспечения полной электрической изоляции в данных местах контакта необходимо убрать токопроводящую связь между рамой и штырем 1 каждого комплекта, в связи с чем на штыри установлены изоляторы 3.

2.3 Испытательный комплекс для проведения исследований тяговых (цепных) качеств опытного тепловоза

2.3.1 Общее устройство испытательного комплекса

Для исследования опытной секции тепловоза, оборудованной макетной ЭСПС, были сформирован специальный испытательный комплекс. В состав комплекса вошла непосредственно опытная секция 1 (рисунок 2.15), с которой автосцепными устройствами связаны динамометрический вагон 2 и далее тормозной модуль 3.



Рисунок 2.15 – Испытательный комплекс

Динамометрический вагон 017-72961 служит для регистрации и обработки данных, поступающих от датчиков, которыми оснащены цепи исследуемой макетной ЭСПС, а также отдельные элементы локомотива и непосредственно вагона-лаборатории. Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) вагона организован на программно-аппаратной платформе Fastwel I/O, разработанной российскими специалистами [16].

Тормозной модуль МТ-01 (рисунок 2.16) представляет собой тормозную единицу, созданную на базе экипажной части тепловоза ТЭМ14. Он предназначен для имитации поездной нагрузки при проведении тягово-энергетических



Рисунок 2.16 – Модуль тормозной МТ-01

испытаний магистральных, маневровых локомотивов и специального подвижного состава.

Модуль оборудован реостатным тормозом, состоящим из четырёх блоков резисторов с мотор-вентиляторами охлаждения. Восемь тяговых электродвигателей типа ЭД-133 тормозного модуля имеют независимое возбуждение. Каждый из них подключён к своей группе резисторов. При этом нагрузочный локомотив обеспечен микропроцессорной системой управления, которая контролирует параметры работы модуля и формирует требуемую тяговую нагрузку испытательного комплекса.

2.3.2 Измерительно-вычислительный комплекс динамометрического вагона

В состав ИВК входят центральная стойка контроля и управления, блоки сбора первичной информации с датчиков и преобразователей, подключаемых к испытываемому оборудованию локомотива [16].

Центральная стойка контроля и управления (рисунок 2.17) расположена непосредственно в динамометрическом вагоне-лаборатории.



Рисунок 2.17 – Центральная стойка контроля и управления

Она содержит промышленный компьютер, источник бесперебойного питания и собственный блок сбора первичной информации с датчиков, установленных на вагоне. К стойке подключены два монитора с клавиатурой, с помощью которых оператор осуществляет управление комплексом.

Блок сбора первичной информации контролирует следующие параметры:

- силу тяги, фиксируемую с помощью сменных динамометрических кассет, которые устанавливаются в автосцепном устройстве;
- скорость движения и пройденный путь по сигналам датчиков скорости и пути, расположенных на колесных парах вагона;
- давления в воздушных магистралях состава и другие показатели.

Для проведения измерений на испытываемом локомотиве используют дополнительные блоки сбора первичной информации. Их устанавливают в непосредственной близости к месту подключения датчиков и преобразователей на исследуемом оборудовании.

В состав каждого блока входит программируемый контроллер СРМ713-01, модули Fastwel I/O и преобразователи питания для измерительных приборов. Контроллер и подключенные к нему до 64 различных модулей ввода-вывода установлены на DIN-рейке.

Контроллер отвечает за опрос модулей, первичную обработку поступающих данных в реальном времени и передачу данных в центральную стойку. В модулях АИМ и ДИМ различных исполнений, преобразующих аналоговый сигнал в цифровое значение, применены 22-разрядные аналого-цифровые преобразователи, которые обеспечивают погрешность измерения сигнала не более 0,05 %. При этом модули обеспечивают преобразование сигналов датчиков по токам, напряжениям, температурам, давлениям, частотам вращения, скорости и пройденному пути, показателям автоматической локомотивной сигнализации и др. Измерение тока и напряжения осуществляют путем подключения к соответствующему модулю датчиков с внешним питанием, например, преобразователя постоянного напряжения Е857/3 или преобразователя постоянного тока Е856/7. Для измерения температуры используют датчики ТСМ9620 и Pt100. Частоту вращения и скорость определяют при помощи оптических, индуктивных датчиков, датчиков Холла, шифраторов, например, Е6С3-СWZ5GH или ППЭ-Д2.

Наряду с датчиками общепромышленного назначения в состав ИВК входят специализированные датчики, в частности, сменные динамометрические кассеты для измерения силы тяги, устанавливаемые в автосцепку вагона (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18 – Установка динамометрической кассеты

Чтобы перенести данные из блоков сбора информации в центральную стойку комплекса используют специальный сетевой кабель, а в условиях сильных электромагнитных помех, приводящих к искажениям сигналов, предусмотрено применение оптоволоконной линии связи. Если при проведении исследований задействовано несколько блоков сбора информации, то их можно соединить между собой, уменьшая длину кабеля, необходимого для включения узлов комплекса в сеть. В случае большого удаления блока от центральной стойки их связь осуществляют по беспроводному каналу, радиус действия которого можно увеличить с помощью направленной WiFi-антенны.

Для общения с блоками сбора информации по протоколу Modbus RTU в компьютере центральной стойки установлена программа-сервер, которая также реализует интерфейс Open Platform Communications (OPC). OPC представляет собой универсальное средство обмена данными и обеспечивает возможность дальнейшей обработки и записи измеряемых параметров. Непосредственную обработку, запись и отображение значений параметров осуществляет программный комплекс Genesis64. Он обеспечивает вывод на экраны мониторов значений всех

необходимых параметров испытываемого локомотива в компактном и понятном виде и непрерывную запись этих параметров для дальнейшей обработки.

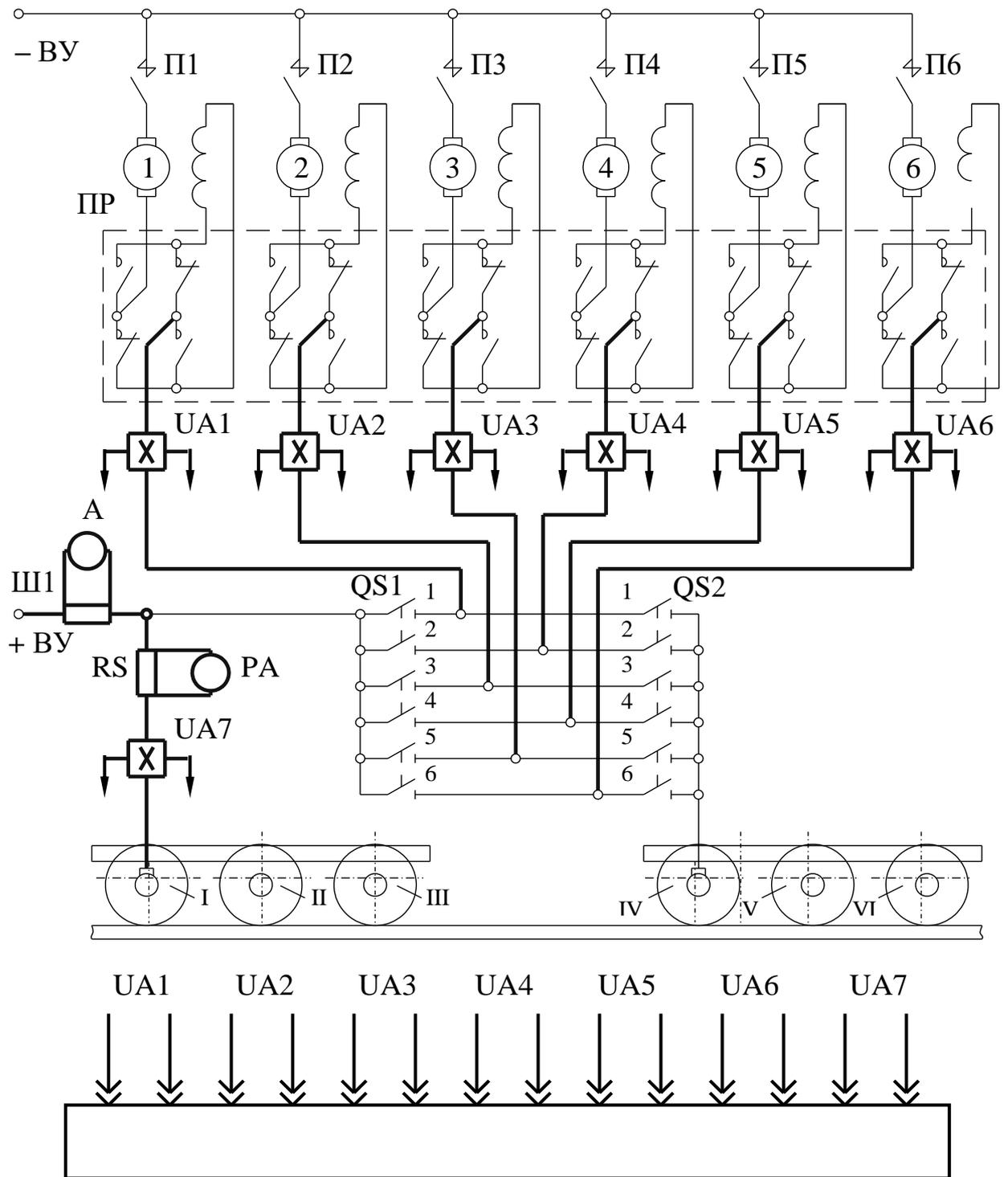
2.3.3 Система регистрации параметров экспериментов

При проведении исследований опытной секции тепловоза предусмотрено получение информации о параметрах изучаемых процессов. Для измерения силы тяги предназначена специальная динамометрическая кассета (рисунок 2.18). На передних колесных парах тележек (I и IV) установлены датчики перемещения (рисунок 2.19), позволяющие регистрировать разгрузку колесных пар, которая необходима для определения коэффициента использования сцепного веса тепловоза.



Рисунок 2.19 – Датчик перемещения

В силовых электрических цепях секции установлены датчики UA1...UA6, обеспечивающие регистрацию токов тяговых электродвигателей 1...6 и два датчика тока в тяговых контактах UA7 (рисунок 2.20). Визуальный контроль величин тока тягового генератора и тока в контактах колес с рельсами можно осуществить при помощи дополнительного шунта RS с амперметром PA и штатного шунта Ш1 с амперметром А.



BY – выпрямительная установка; $\Pi 1$ – $\Pi 6$ – контакторы; 1-6 – тяговые двигатели;
 $UA 1$ – $UA 7$ – датчики тока; $\text{Ш}1$ – шунт; $QS 1$, $QS 2$ – полюсные переключатели;
 I–VI – колесные пары

Рисунок 2.20 – Силовые электрические цепи опытного тепловоза с системой регистрации параметров экспериментов

Сигналы датчиков передаются через сетевой кабель в центральную стойку вагона-лаборатории.

2.4 Математическое моделирование тягового электропривода опытной секции тепловоза

С целью проведения предварительного теоретического анализа планируемого повышения сцепных и, следовательно, тяговых свойств секции тепловоза, оборудованной ЭСПС, выполнено математическое моделирование ее электрического привода. Опытная секция содержит шесть ведущих колесных пар, тяговый электропривод каждой из которых представляет собой сложную электромеханическую систему, в состав которой входят (рисунок 2.21):

- синхронный тяговый генератор Г;
- выпрямительная установка;
- тяговый электрический двигатель ТЭД;
- механическая часть привода МЧ, включающая зубчатую передачу и колесную пару;
- нагрузка Н, характерной особенностью которой является большая инерционность, присущая поезду.

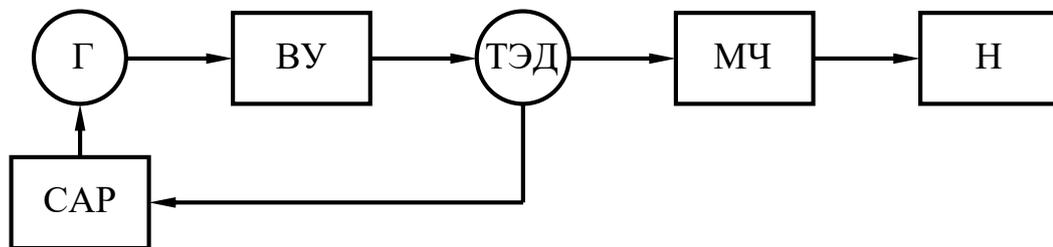


Рисунок 2.21 – Функциональная схема электропривода

Взаимодействие элементов системы происходит под управлением системы автоматического регулирования САР.

Каждый из элементов имеет сложную структуру, и его параметры могут существенно влиять на поведение системы в целом. При исследованиях привода учитывалось влияние свойств ТЭД, питающего напряжения и изменения нагрузки, в связи с чем сделаны следующие допущения:

- тяговый генератор является источником напряжения бесконечно большой мощности;
- тяговый электродвигатель рассматриваем как систему индуктивно связанных катушек.

ТЭД является одним из основных элементов электропривода, поэтому его математическая модель во многом определяет и модель всей системы. В настоящее время большое применение получил численный анализ электромагнитных полей в электрических машинах с использованием метода конечных разностей или метода конечных элементов [6]. Он позволяет учесть практически все факторы, влияющие на работу машины. Однако использование такой модели при исследованиях электромеханической системы вызывает существенные трудности при проведении расчетов. Метод проводимостей зубцовых контуров [111] дает возможность строить математические модели машин с расчетом электромагнитного поля в относительно малой зоне и дальнейшей интеграцией результатов по всей обмотке. Однако и этот метод имеет свою специфику, определяющую сложность проведения теоретических исследований [41].

Математическая модель тяговых двигателей опытной секции получена классическим путем с использованием понятия обобщенной электрической машины, которая представляет собой идеализированную двухполюсную двухфазную машину [40, 42]. В такой модели применяют ортогональные системы осей: оси d , q , которые вращаются вместе с ротором, и α , β неподвижные в пространстве. Она существенно упрощает сопоставление положения ротора относительно фаз статора для различных моментов времени от начала переходного процесса и составление уравнений машины. Магнитное поле двигателя постоянного тока неподвижно относительно статора. В этом случае математическое моделирование целесообразно выполнять в осях α , β . Такому преобразованию отвечают уравнения электрического равновесия машины, сформулированные при помощи потокосцеплений обмоток Ψ_i , и уравнение электромеханического преобразования энергии [40]:

$$\left. \begin{aligned}
 u_{1\alpha} &= i_{1\alpha} R_1 + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}, \\
 u_{1\beta} &= i_{1\beta} R_1 + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}, \\
 u_{2\alpha} &= i_{2\alpha} R_2 + \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} + \omega_{\text{эл}} \Psi_{2\beta}, \\
 u_{2\beta} &= i_{2\beta} R_2 + \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} - \omega_{\text{эл}} \Psi_{2\alpha}, \\
 M &= p_{\text{п}} L_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}),
 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где u_i и i_i – напряжения и токи обмоток (индекс i принимает значения $1\alpha, 1\beta, 2d, 2q$, соответствующие осям, с которыми связаны обмотки);

$d\Psi/dt$ – изменение потокосцепления по времени;

ω – угловая скорость;

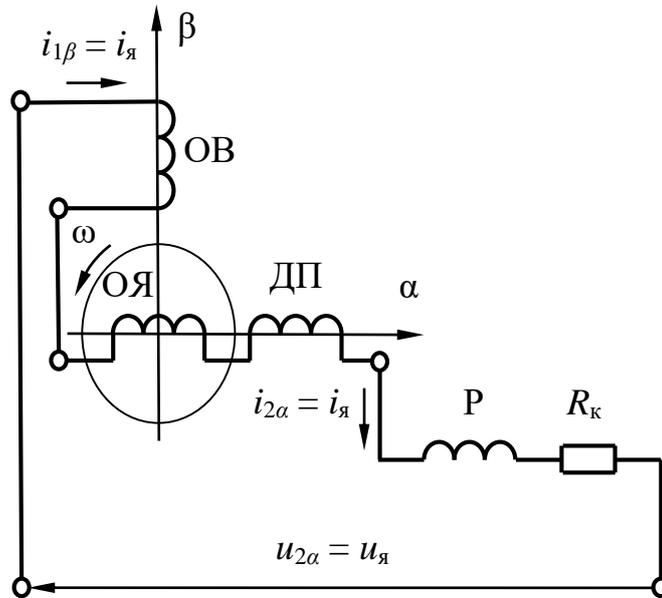
R_1 и R_2 – активное сопротивление фазы статора (индекс 1) и приведенное активное сопротивление фазы ротора (индекс 2) машины; $p_{\text{п}}$ – количество пар полюсов;

M – электромагнитный момент;

L_{12} – взаимная индуктивность.

Для двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением в системе осей α, β действительным переменным токам обмотки ротора эквивалентна одна якорная обмотка, обтекаемая постоянным током $i_{\text{я}}$. Этот ток создает неподвижное в пространстве поле, которое направленно совместно с полем обмоток дополнительных полюсов ДП по оси α , совпадающей с осью щеток двигателя (рисунок 2.22).

В рассматриваемой схеме ток $i_{\text{я}}$ проходит также по обмотке возбуждения ОВ, она включена последовательно в цепь якоря и формирует МДС статора, ориентированную по оси β . Кроме того, к якорной цепи подключено полное контактное сопротивление $R_{\text{к}}$ буксовых токоподводов и контактов колес с рельсами, а также индуктивность сглаживающего реактора, которая должна быть учтена при анализе влияния формы фронта нарастания тока в контактах на тяговые (сцепные) качества.



ОВ – обмотка возбуждения; ОЯ – обмотка якоря; ДП – дополнительный полюс;
Р – сглаживающий реактор; $R_{к}$ – контактное сопротивление

Рисунок 2.22 – Схема модели двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

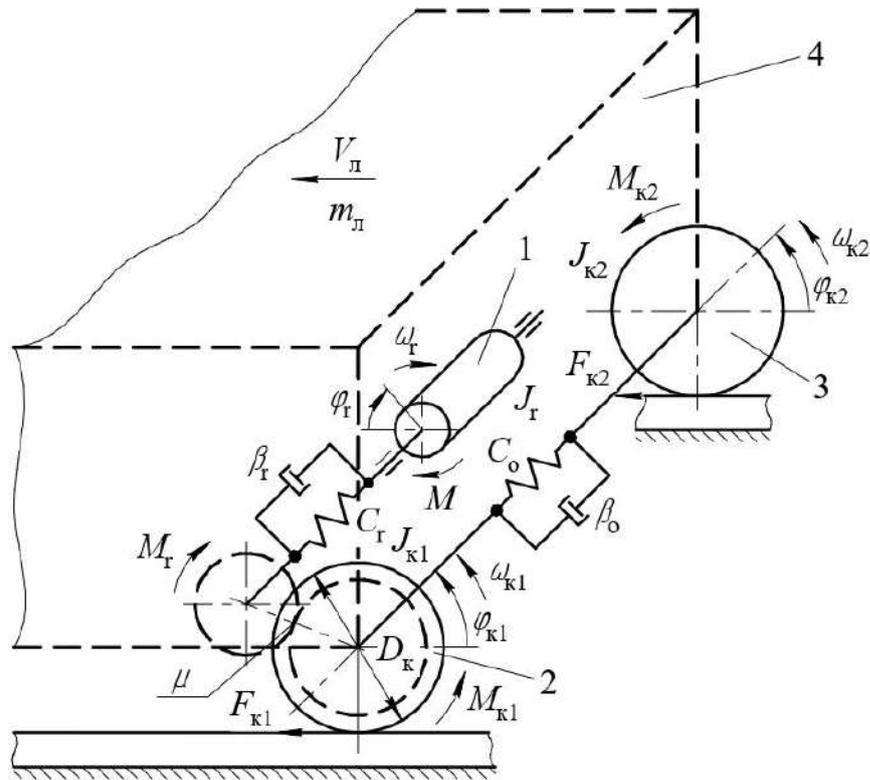
В соответствии со схемой (рисунок 2.22) в уравнениях (2.1) принято [40]:
 $u_{1\alpha} = 0; u_{1\beta} = 0; u_{2\alpha} = u_{я}; u_{2\beta} = 0; i_{1\alpha} = 0; i_{1\beta} = i_{я}; i_{2\alpha} = i_{я}; i_{2\beta} = 0; R_2 = R_{я\Sigma}; \Psi_{2\alpha} = L_{я\Sigma}i_{я};$
 $\Psi_{2\beta} = L_{12}i_{я}$, где $R_{я\Sigma} = R_{я} + R_{дп} + R_{в} + R_{р} + R_{к}$ – суммарное сопротивление цепи якоря, включающее сопротивления всех обмоток якоря, а также обмотки возбуждения $R_{в}$, полное сопротивление контактов буксовых токоподводов и контактов колес с рельсами $R_{к}$, сопротивление сглаживающего реактора $R_{р}$;
 $L_{я\Sigma} = L_{я} + L_{дп} + L_{в} + L_{р}$ – суммарная индуктивность якорной цепи, содержащая индуктивности рассеяния обмоток якоря $L_{я}$ и дополнительных полюсов $L_{дп}$, полную индуктивность обмотки возбуждения $L_{в}$, полную индуктивность сглаживающего реактора $L_{р}$.

Тогда система уравнений (2.1) принимает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{я} &= i_{я}R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \frac{di_{я}}{dt} + p_{п}L_{12}i_{я}\omega, \\ M &= p_{п}L_{12}i_{я}^2. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Моделирование механической части электропривода колесной пары выполнено по расчетной схеме (рисунок 2.23), в состав которой входят ротор

тягового электродвигателя 1 с моментом инерции J_r , колесная пара с колесами 2, 3, имеющими моменты инерции J_{k1} , J_{k2} и элемент тепловоза массой $m_{\text{л}}$ (состава m_c), принятой для одной оси. В двигателе вырабатывается электромагнитный момент



1 – ротор двигателя; 2, 3 – колеса колесной пары; 4 – локомотив и поезд

Рисунок 2.23 – Расчетная схема механической части привода колесной пары

M , приложенный к ротору при угловой скорости ω_r . Через тяговый редуктор с передаточным отношением μ нагружаются тяговыми моментами M_{k1} и M_{k2} первое и второе колеса соответственно. Вращение колес происходит с угловыми скоростями ω_{k1} и ω_{k2} . Касательные силы тяги F_{k1} и F_{k2} приложены в условных точках контакта соответствующих колес с рельсами.

Угловые жесткости вала ротора C_r и оси колесной пары C_o определяют упругие свойства системы. Диссипация в элементах привода учтена включением в модель коэффициентов вязкого трения вала ротора β_r и оси колесной пары β_o .

При моделировании не принимались во внимание колебания подрессоренных частей экипажа, тележки и рельсового основания. Кроме того, на

данном этапе исследований не учитывались возмущающие воздействия на электропривод со стороны пути.

Математическое описание работы привода, соответствующее рассматриваемой расчетной схеме, сформулировано в системе уравнений (2.3), в которых дополнительно к названным выше параметрам учтены моменты упругих сил на валу ротора M_r и на оси колесной пары M_o , диаметры колес D_{k1} и D_{k2} , силы вертикального нажатия колес на рельсы N_{k1} , N_{k2} , потенциальный коэффициент сцепления ψ_0 , а также выраженные в относительных единицах коэффициенты сцепления первого и второго колеса с рельсом k_1 , k_2 .

$$\left. \begin{aligned}
 J_r \frac{d\omega_r}{dt} &= M - M_r - \beta_r (\omega_r - \mu \cdot \omega_{k1}), \\
 J_{k1} \frac{d\omega_{k1}}{dt} &= M_r \cdot \mu + \beta_r \cdot \mu (\omega_r - \mu \cdot \omega_{k1}) - M_o - \beta_o (\omega_{k1} - \omega_{k2}) - M_{k1}, \\
 J_{k2} \frac{d\omega_{k2}}{dt} &= M_o + \beta_o (\omega_{k1} - \omega_{k2}) - M_{k2}, \\
 (m_{\text{л}} + m_{\text{с}}) \frac{dv_{\text{л}}}{dt} &= F_{k1} + F_{k2} - F_{\text{с}}, \\
 \frac{dM_r}{dt} &= C_r (\omega_r - \mu \cdot \omega_{k1}), \\
 \frac{dM_o}{dt} &= C_o (\omega_{k1} - \omega_{k2}), \\
 F_{k1} &= N_{k1} \cdot \psi_0 \cdot k_1, \\
 F_{k2} &= N_{k2} \cdot \psi_0 \cdot k_2, \\
 M_{k1} &= F_{k1} \frac{D_{k1}}{2}, \\
 M_{k2} &= F_{k2} \frac{D_{k2}}{2}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

При проведении исследований работы локомотива в режиме пуска и разгона необходимо принимать во внимание падающий нелинейный вид зависимости расчетного коэффициента сцепления, который для тепловоза 2ТЭ116 обусловлен формулой:

$$\psi_p = 0,118 + 5/(27,5 + v) \quad [99], \quad (2.4)$$

где v – скорость движения.

Вместе с тем основанием для использования этой эмпирической зависимости в практических расчетах являются результаты большого числа измерений в условиях эксплуатации локомотивов с последующей статистической обработкой. Однако значения коэффициента ψ_p являются усредненными и вычисляются для сухих контактов колес и рельсов. Попадание в тяговые контакты различных загрязнений приводит к уменьшению физического коэффициента сцепления ψ [26, 97]. В частности, фактор наличия масла является причиной снижения ψ до значений менее 0,1.

Одним из способов, способствующих увеличению коэффициента сцепления, является подача в зоны указанных контактов электрического тока. Это определено регрессионными моделями [26, 97], представляющими собой зависимости повышения предельного коэффициента сцепления локомотива ψ_0 от токов разного вида при различных загрязнениях контактов. При выполнении диссертационных исследований были учтены зависимости коэффициента ψ_0 от силы постоянного тока I для сухого и чистого контакта (2.5), при наличии в контакте воды (2.6) и при сильном загрязнении поверхностей катания (2.7) :

$$\psi_0 = 0,36 + 2,82 \cdot 10^{-5} I + 1,47 \cdot 10^{-8} I^2, \quad (2.5)$$

$$\psi_0 = 0,26 + 2,36 \cdot 10^{-5} I + 1,29 \cdot 10^{-8} I^2, \quad (2.6)$$

$$\psi_0 = 0,1 + 1,62 \cdot 10^{-5} I + 1,09 \cdot 10^{-8} I^2. \quad (2.7)$$

При анализе тяговых свойств опытного тепловоза необходимо также учитывать вертикальное нагружение колесных пар при работе локомотива в режиме тяги [45]. Моделируемая секция тепловоза 2ТЭ116 имеет две трехосные тележки, тяговые электродвигатели которых оборудованы опорно-осевым подвешиванием. Для построения модели серийной тележки тепловоза 2ТЭ116 (рисунок 2.24) был использован программный комплекс «Универсальный механизм» (УМ). Моделирование разгона тепловоза в УМ с составом и без состава позволяет выявить перераспределение вертикальных нагрузок осей локомотива в результате работы тяговых электродвигателей. Перераспределение нагрузок зависит от массы состава: чем больше масса, тем больше разгружаются передние оси тележек и нагружаются задние оси. Таким образом, наиболее разгруженными

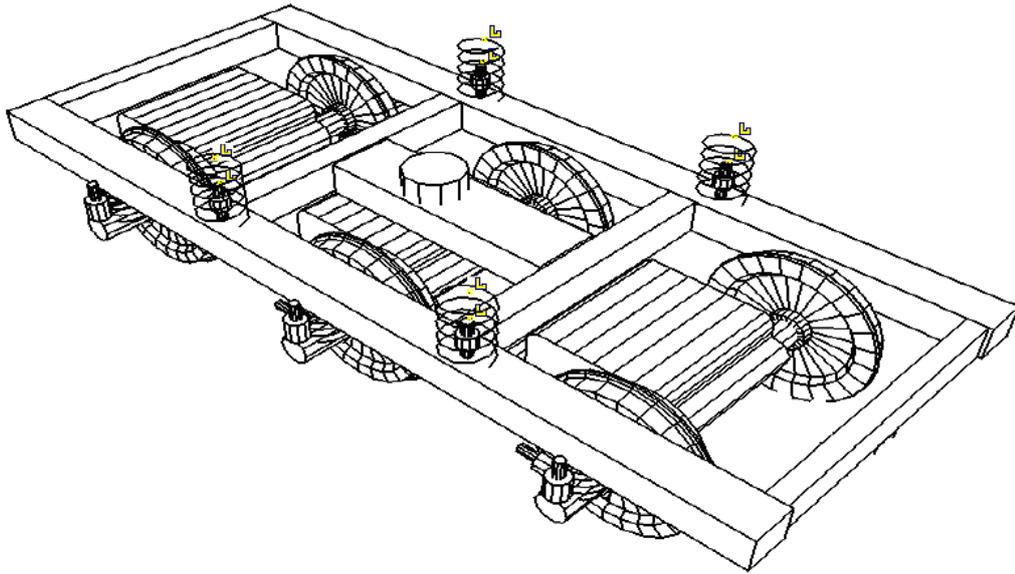


Рисунок 2.24. Модель серийной тележки тепловоза 2ТЭ116

в процессе разгона оказываются первая и четвертая колесные пары локомотива, и срыв их сцепления наиболее вероятен.

Для получения модели механической части шестиосного локомотива уравнения привода колесной пары (2.3) повторены шесть раз, силы тяги колес всех осей суммированы, и общая сила приложена к заданной массе локомотива (и состава при его наличии). Реализовано индивидуальное определение и задание сил вертикального нажатия на рельсы и коэффициентов сцепления колес для каждой оси. Анализ работы электрической системы повышения сцепления выполнен путем совместного моделирования электрической и механической частей тягового электропривода тепловоза, оснащенного исследуемой ЭСПС.

Компьютерная модель секции опытного тепловоза выполнена в основной библиотеке MatLab/Simulink с использованием подсистем. На рисунке 2.25 приведен фрагмент модели, который включает подсистему контроллера машиниста, занимающую левую часть поля схемы, и подсистему электродвигателя первой колесной пары, расположенную в правой части.

На фрагменте II модели (рисунок 2.26) отражены подсистемы электродвигателя второй оси (левая часть), механической части привода второй

колесной пары (средняя часть) и сумматора сил тяги всех шести осей с приложением общей силы к массе локомотива (правая часть).

В приложении помещена полная версия компьютерной модели опытной секции, которая содержит все связанные между собой подсистемы, Модель

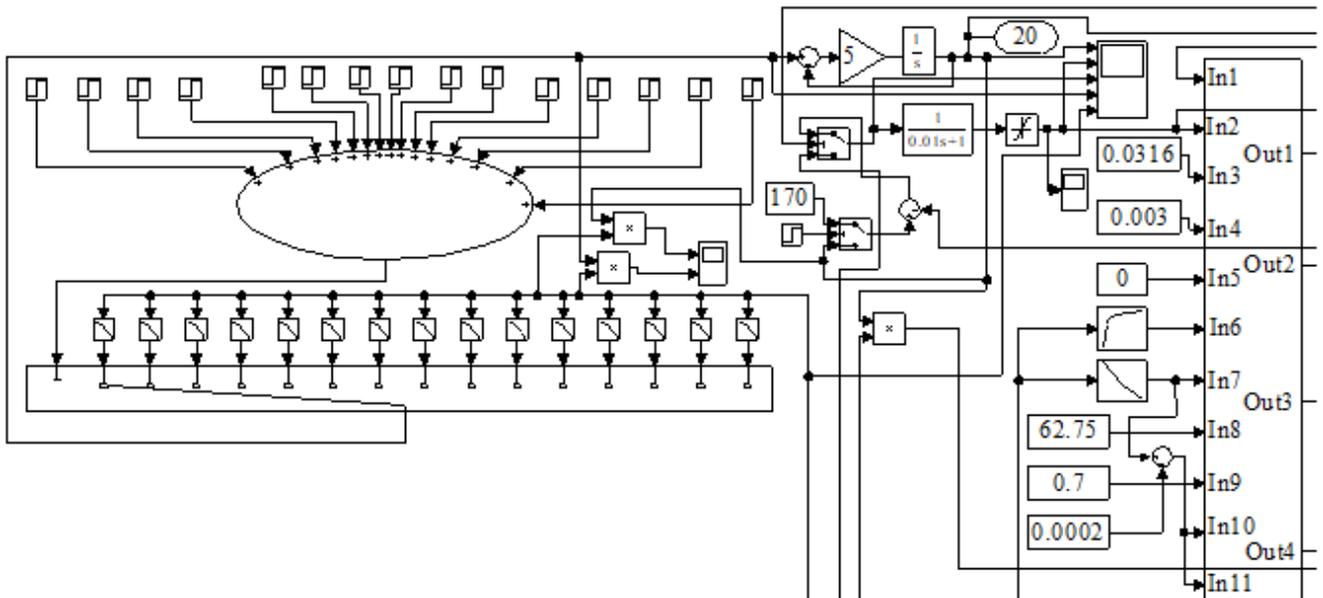


Рисунок 2.25 – Фрагмент I компьютерной модели опытного тепловоза

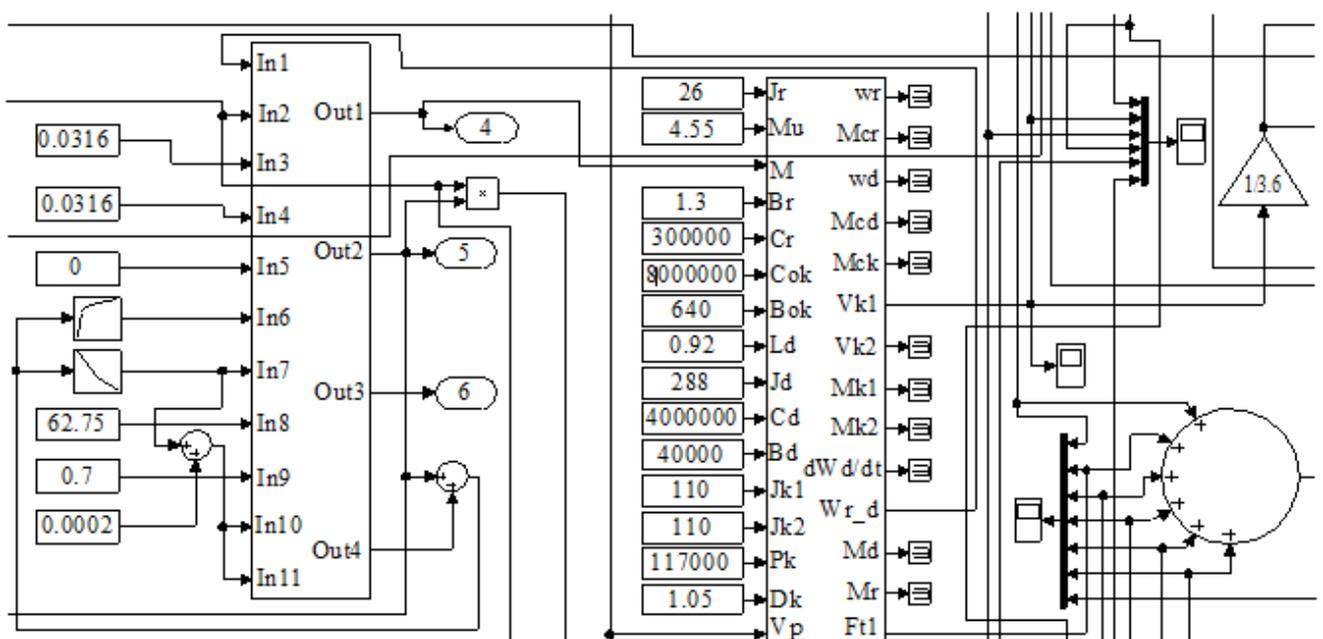


Рисунок 2.26 – Фрагмент II компьютерной модели

математически описывает работу электрического привода локомотива, оборудованного макетной системой повышения сцепления.

Было выполнено моделирование исследуемой системы в процессе разгона тепловоза при наиболее неблагоприятных условиях по распределению вертикальных нагрузок на колеса и при сильном загрязнении рельсов.

В модели тягового электродвигателя использованы параметры двигателя, приведенные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры тягового двигателя ЭД-118А

Параметр	Значение
Мощность, кВт	305
Напряжение, В	463/700
Ток, А	720/476
Частота вращения, об/мин	585/2500
КПД, %	91,6
Вращающий момент при низшей номинальной скорости, Н·м	4976
Максимальный ток при трогании, А	1080
Активное сопротивление обмотки главных полюсов, Ом	0,0105
Активное сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом	0,00812
Активное сопротивление обмотки якоря, Ом	0,013
Суммарная индуктивность рассеяния якорной цепи, Гн	0,0032

Насыщение магнитной цепи учитывалось по кривым намагничивания электродвигателя.

Переключение позиций контроллера машиниста моделировалось переходом на соответствующую внешнюю характеристику генератора, приведенную к выходу выпрямительной установки. При моделировании данные характеристики задавались таблично с интерполяцией промежуточных значений, инерционность дизель-генераторной установки учитывалась апериодическим звеном.

Потенциальный коэффициент сцепления ψ_0 задавался на основе результатов расчета (таблица 2.2) по зависимости (2.6) с учетом предполагаемого уменьшения ψ_0 с ростом скорости движения локомотива V подобно расчетному коэффициенту сцепления тепловоза 2ТЭ116, рассмотренному в разделе 1 диссертации.

Таблица 2.2 – Результаты расчета потенциального коэффициента сцепления

Сила тока, А	Коэффициент ψ_0 при скорости движения тепловоза V , км/ч					
	0	10	20	30	40	50
0	0,1	0,084	0,074	0,068	0,064	0,061
500	0,111	0,093	0,083	0,076	0,071	0,068
1000	0,138	0,116	0,103	0,094	0,088	0,084
1500	0,149	0,125	0,111	0,102	0,095	0,091
2000	0,176	0,148	0,131	0,120	0,113	0,107
2500	0,209	0,175	0,156	0,143	0,134	0,127
3000	0,247	0,207	0,184	0,169	0,158	0,150

При моделировании характеристика сцепления в относительных единицах (рисунок 2.27) задавалась таблично с интерполяцией промежуточных значений. На характеристике параметр k является отношением силы сцепления (крипа) к ее предельному значению для заданного состояния рельсов, ξ – продольная составляющая жесткого крипа, определяемая как отношение соответствующей компоненты скорости точки колеса в точке контакта относительно рельса к скорости продольного движения колесной пары.

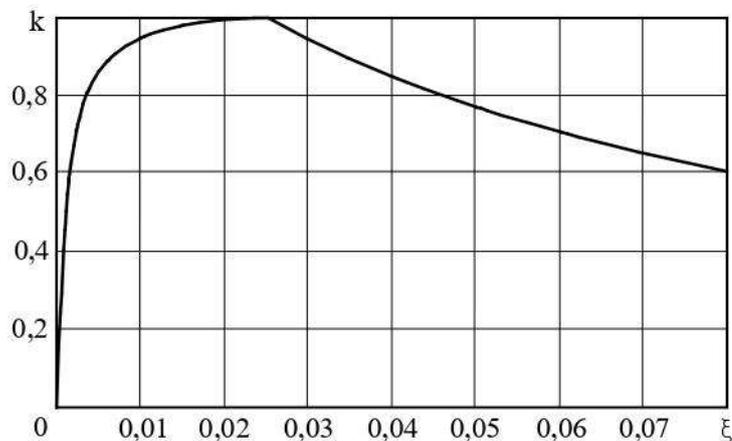
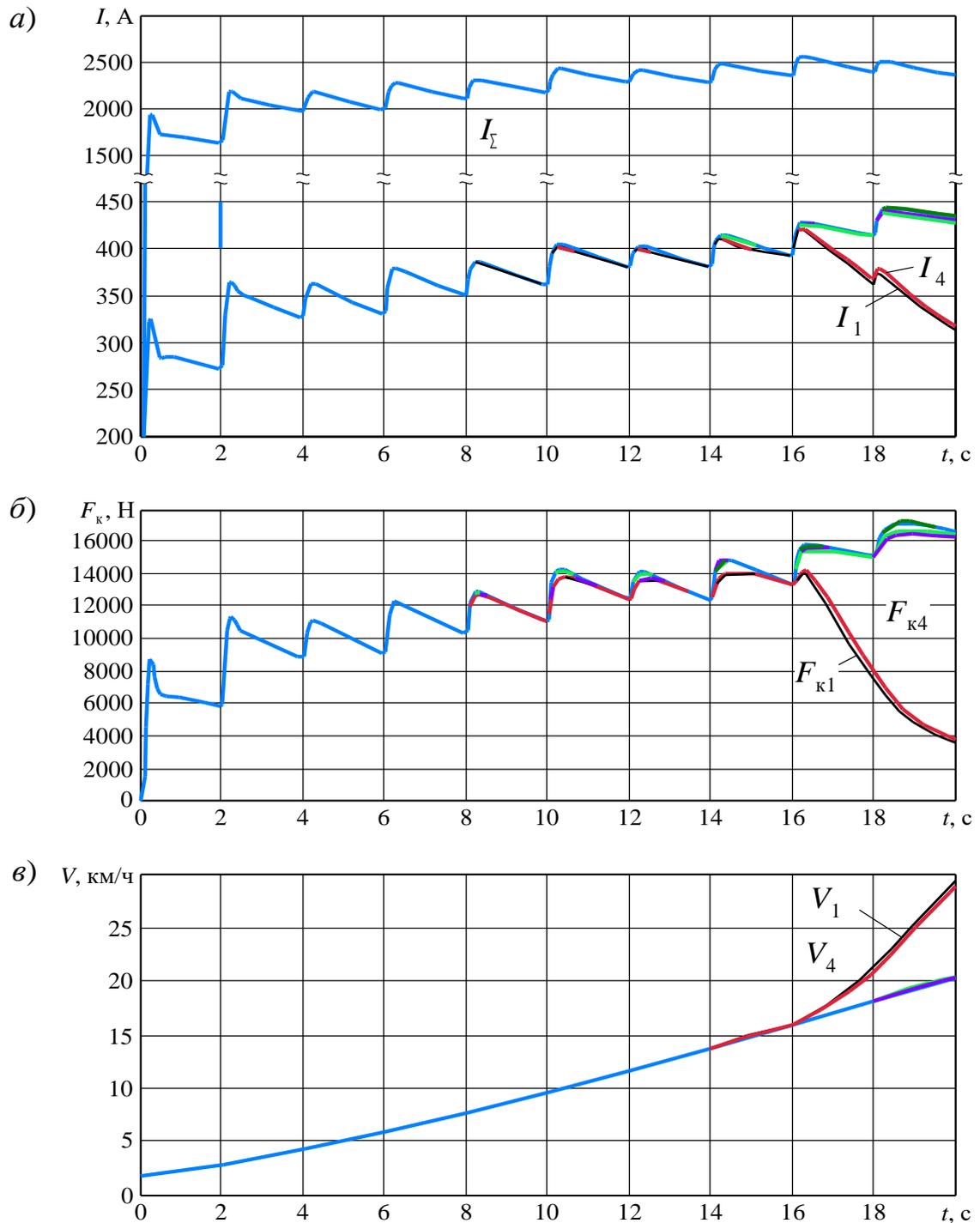


Рисунок 2.27 – Характеристика сцепления

В ходе компьютерного моделирования реализованы трогание с места одной секции тепловоза 2ТЭ116 и дальнейший разгон. Из графиков (рисунок 2.28) видно, что при увеличении скорости на сильно загрязненных рельсах без применения ЭСПС произошел последовательный срыв сцепления колес наиболее разгруженных первой и затем четвертой колесных пар.

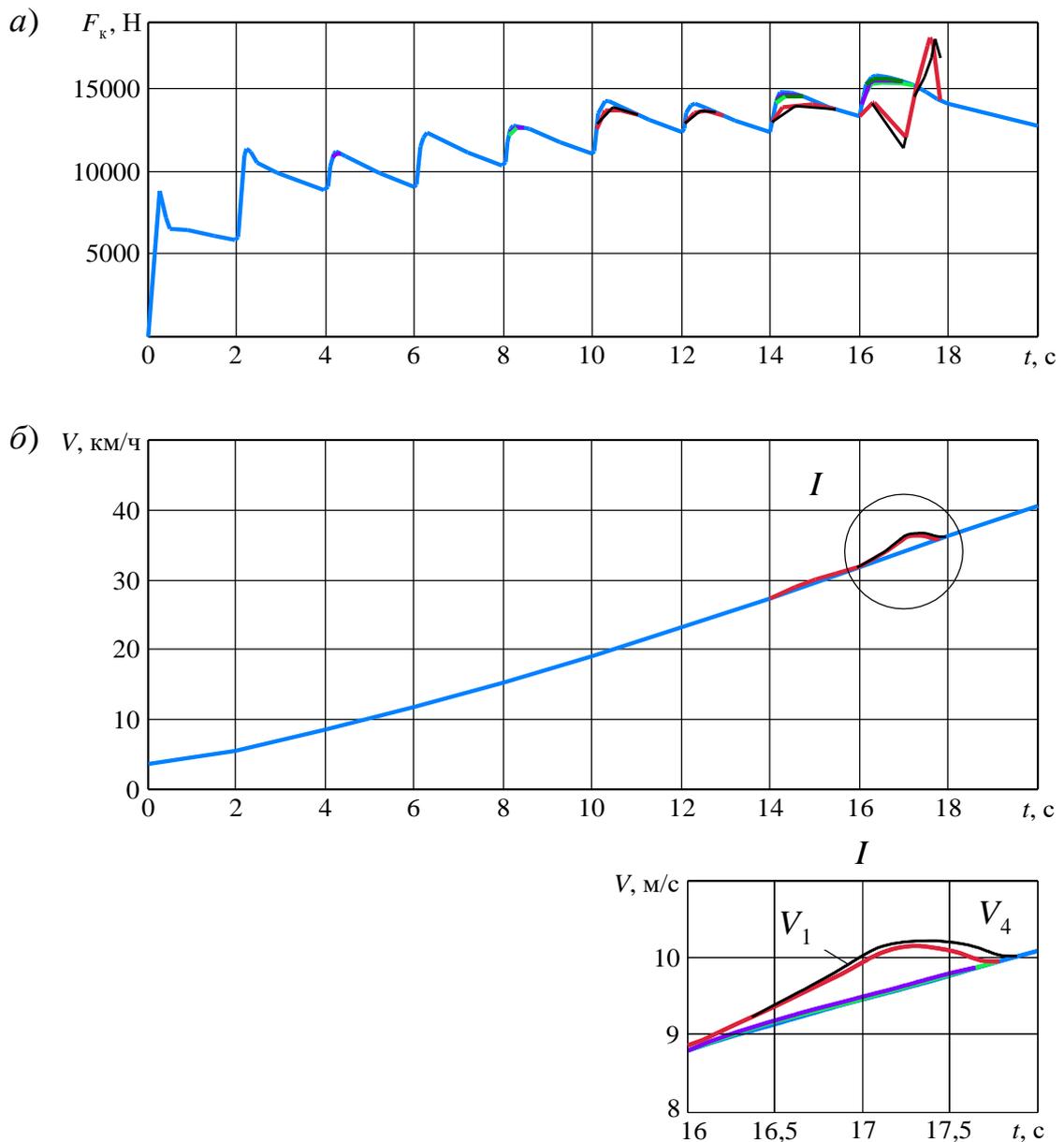


a – токи тяговых электродвигателей и суммарный ток; $б$ – силы тяги колесных пар;
 $в$ – линейные скорости секции и колесных пар

Рисунок 2.28 – Результаты моделирования движения секции тепловоза 2ТЭ116 с ЭСПС

Он сопровождался быстрым снижением соответствующих токов (рисунок 2.28, а) и сил тяги (рисунок 2.28, б). При этом отмечено существенное увеличение линейных скоростей первой и четвертой колесных пар по отношению к скорости локомотива (рисунок 2.28, в).

Для проведения теоретического анализа работы секции тепловоза, оборудованной ЭСПС, моделировалось включение системы в момент превышения линейной скоростью колеса скорости локомотива на 0,5 м/с (рисунок 2.29).



а – силы тяги колесных пар; б – линейные скорости секции и колесных пар

Рисунок 2.29 – Результаты моделирования движения секции тепловоза 2ТЭ116 с ЭСПС

При этом в контакты первой и четвертой колесных пар с рельсами подавался ток $I_{\Sigma}/2$. Кроме того, после срабатывания ЭСПС набор позиций контроллера машиниста не моделировался, что предотвращало возможность повторного срыва сцепления.

Результаты моделирования показали, что произошло подавление процесса боксования. При этом превышение скорости колес над скоростью локомотива составляет не более 1 м/с (рисунок 2.29, б).

2.5 Выводы раздела 2

1 Выполнен анализ методов проведения научных исследований физических процессов, происходящих в контактах колес локомотива и рельсов. На основании результатов анализа обоснован выбор метода проведения натурных экспериментальных исследований сцепных качеств локомотива с применением макетных систем, который предпочтителен для решения основных задач диссертационной работы. Сформулированы главные требования к построению макетной электрической системы повышения сцепления опытного тепловоза.

2 Разработана макетная ЭСПС, предназначенная для оснащения и испытаний секции тепловоза 2ТЭ116. Изготовлены основные узлы системы, которые обеспечивают подачу тока тягового генератора на оси колесных пар и дискретное регулирование силы тока, проходящего через исследуемые контакты колес с рельсами. Макетная система позволяет воспроизводить базовые принципы работы всех существующих ЭСПС и моделировать требуемые режимы исследований.

3 Для проведения экспериментальных исследований опытной секции тепловоза сформирован специальный комплекс, в состав которого включен динамометрический вагон, оснащенный измерительно-вычислительными приборами, и тормозной модуль, обеспечивающий создание необходимой тяговой нагрузки испытываемого тепловоза. Применение комплекса дает возможность исследовать сцепные качества локомотива в движении с заданными скоростями.

4 Разработана математическая модель тягового электропривода опытной секции тепловоза 2ТЭ116, позволяющая проводить теоретический анализ предполагаемого повышения сцепных качеств при воздействии на контакты колес

с рельсами электрическим током с учетом разгрузки колесной пары и наличия в контактах различных загрязнений.

5 Выполнено компьютерное моделирование движения опытной секции тепловоза с использованием основной библиотеки MatLab/Simulink и программного комплекса «Универсальный механизм», которое показало возможности ЭСПС в подавлении процесса боксования.

3 ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ КАЧЕСТВ ТЕПЛОВОЗА С МАКЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПОВЫШЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ

3.1 Обоснование диапазонов варьирования внешних факторов

В процессе диссертационной работы были проведены испытания опытной секции грузового тепловоза 2ТЭ116, силовые электрические цепи которой оснащены дополнительными элементами, формирующими макетную электрическую систему повышения сцепления. Устройство и возможности системы рассмотрены в подразделе 2.2 работы. Секция была включена в состав специального испытательного комплекса (подраздел 2.3), который обеспечивал создание требуемых условий выполнения экспериментов и регистрацию значений параметров исследуемых процессов.

Для осуществления процесса энергетического воздействия током тягового генератора на контакты колес с рельсами в макетной ЭСПС предусмотрены специальные токоподводящие (токоотводящие) устройства. Эти токоподводы размещены в осевых упорах буксовых узлов колесных пар и представляют интерес для оценки возможного применения подобных конструкций на локомотивах с предлагаемыми ЭСПС (подраздел 1.3). Поэтому одной из задач испытаний являлась проверка работоспособности буксовых токоподводящих устройств при прохождении через них токов больших величин.

Главная задача исследований заключалась в установлении регрессионной связи предельного коэффициента сцепления с силой электрического тока в тяговых контактах и скоростью движения тепловоза при загрязнении контактирующих поверхностей различными фракциями. Концепция выполнения испытаний заключалась в проведении циклов экспериментов при сильном загрязнении рельсов, в условиях присутствия в контактах колес и рельсов воды с определенным содержанием машинного масла, тонкого слоя машинного масла, а также при относительно чистых контактирующих поверхностях.

При проведении исследований целесообразно применять математические методы планирования экспериментов, что позволяет избежать значительных затрат времени и средств. По итогам выполнения всех этапов планирования эксперимента должна быть получена регрессионная модель изучаемой системы, которая обобщенно имеет вид полинома, являющегося функцией расчетного критерия оптимизации \hat{y} от влияющих на него управляющих факторов x_i, x_j [107]:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2. \quad (3.1)$$

В этом выражении параметр k определяет число управляющих факторов, а коэффициенты регрессии b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} вычисляются по специальной методике, обусловленной регрессионным анализом, проведенным в пункте 3.3.2.

В настоящих экспериментальных исследованиях критерием оптимизации служит коэффициент сцепления наиболее разгруженной первой колесной пары, который определяет коэффициент сцепления тепловоза в рассматриваемых условиях. В соответствии с поставленными диссертационными задачами при планировании экспериментов приняты два управляющих или основных фактора: сила электрического тока I в тяговых контактах и скорость движения опытной секции тепловоза V в исследуемых зонах.

Сила тока тягового генератора на выходе выпрямительной установки тепловоза 2ТЭ116 достигает значений более 6000 А (рисунок 2.5). Поэтому при проведении испытаний существует возможность регулирования тока, направляемого в контакты колес с рельсами в интервале 0 до 3000 А.

Переход с участка ограничения по сцеплению $F_{к\text{ сц}}(V)$ на тяговую характеристику у разных тепловозов осуществляется при скорости 12...20 км/ч. В диапазоне малых скоростей значения касательной силы тяги тепловоза могут достичь и превысить предел сцепления, что приводит к режиму боксования. На тепловозе 2ТЭ116 эту зону занимают скорости движения локомотива от 0 до 20 км/ч (рисунок 3.1), на которых уместно провести исследования, определенные задачами настоящей диссертации.

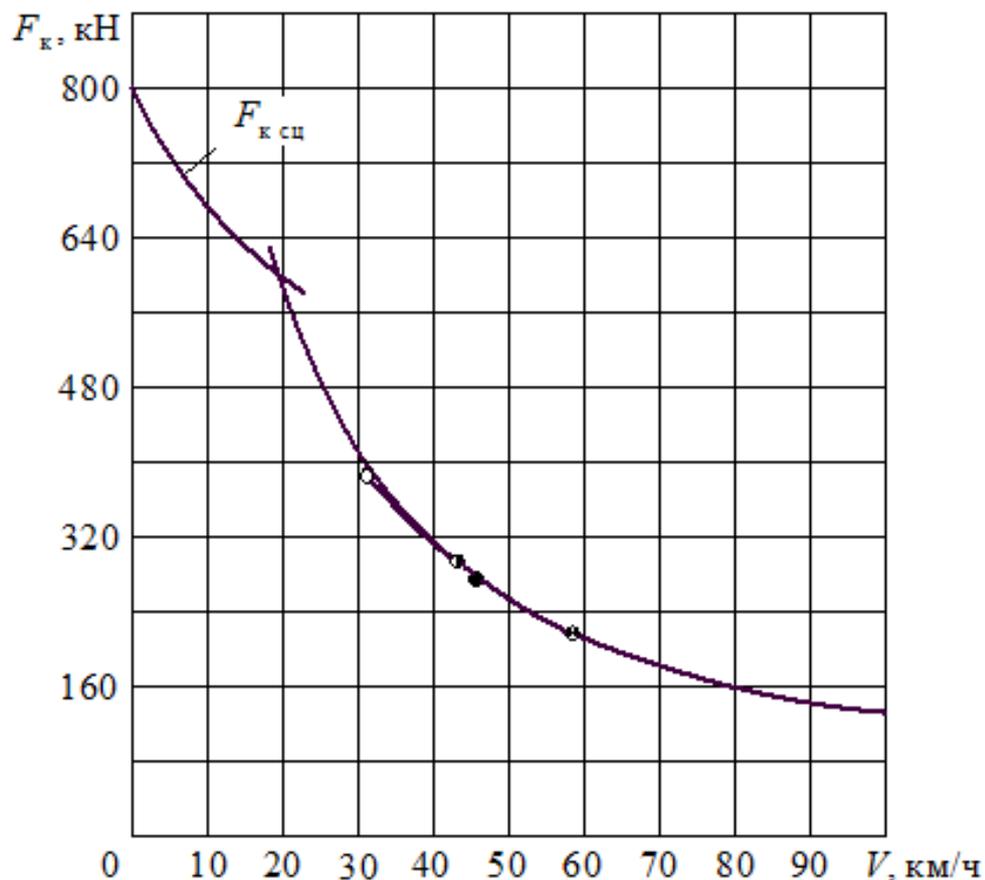


Рисунок 3.1 – Тяговые характеристики тепловоза 2ТЭ116

Применение методики полного факторного эксперимента при рассматриваемых испытаниях не позволит достичь требуемой точности в силу нелинейности зависимостей коэффициента сцепления от силы тока в контакте колеса и рельса (рисунки 1.5, 1.6). Эти зависимости были получены по результатам исследований на экспериментальных стендах, при выполнении которых линейная скорость колеса по отношению к рельсу была практически равна нулю. В то же время предельная сила тяги тепловоза по сцеплению $F_{k\text{ сц}}$ и, следовательно, коэффициент сцепления, нелинейно уменьшаются с ростом скорости V (рисунок 3.1). Таким образом, существуют основания считать нелинейной искомую зависимость коэффициента сцепления одновременно от двух управляющих факторов. Поэтому для проведения исследований применено ротатабельное планирование экспериментов второго порядка [107].

Для реализации ротатабельного плана второго порядка назначен диапазон варьирования силы тока I (А):

$$0 \leq I \leq 3000. \quad (3.2)$$

Диапазон значений скорости движения тепловоза V составил (км/ч)

$$0 \leq V \leq 20. \quad (3.3)$$

Загрязнение тяговых контактов (сильное загрязнение, наличие в контактах воды, машинного масла или их отсутствие) учитывалось как контролируемый фактор. Его задавали и не изменяли в процессе каждого цикла экспериментов.

3.2 Планирование эксперимента

Принятый метод планирования определяет соответствующая матрица, задающая порядок проведения экспериментов. Элементами матрицы планирования служат кодированные значения управляющих факторов x_i , которые связаны с текущими натуральными значениями факторов c_i , значениями факторов на нулевом уровне c_{0i} и с интервалами варьирования ε зависимостью [107]

$$x_i = \frac{c_i - c_{0i}}{\varepsilon}. \quad (3.4)$$

Ротатабельный план второго порядка при двух основных факторах предусматривает тринадцать точек экспериментов, которые объединяют четыре опыта в «ядре» плана, четыре опыта в «звездных» точках, находящихся на расстоянии плеча 1,414 от центра эксперимента и пять нулевых точек (центр эксперимента) [107].

В области определения факторов (3.2, 3.3) выбрана нулевая точка, приняты кодированные значения факторов (таблица 3.1) и рассчитаны их натуральные значения по зависимостям $I = 1500 + 1000x_1$ и $V = 10 + 7x_2$, полученных из (3.4).

Таблица 3.1 – Кодированные и натуральные значения факторов

Факторы	Интервалы варьирования (ε)	Уровни варьирования				
		-1,414	-1	0	+1	+1,414
$I, A (x_1)$	1000	85	500	1500	2500	2900
$V, \text{ км/ч } (x_2)$	7	0	3	10	17	20

По матрице планирования с использованием таблицы 3.1 построена рабочая матрица (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Матрицы ротатабельного планирования

№ опыта	Матрица планирования		Рабочая матрица	
	x_1	x_2	I, A	$V, \text{км/ч}$
1	+	+	2500	17
2	–	+	500	17
3	+	–	2500	3
4	–	–	500	3
5	–1,414	0	85	10
6	+1,414	0	2900	10
7	0	–1,414	1500	0
8	0	+1,414	1500	20
9	0	0	1500	10
10	0	0	1500	10
11	0	0	1500	10
12	0	0	1500	10
13	0	0	1500	10

Полученный ротатабельный план второго порядка является рациональным [107]. Он позволяет варьировать факторами на трех уровнях, благодаря чему можно построить модели в виде полиномов второй степени и, следовательно, дать достаточно точное математическое описание объекта исследований.

3.3 Результаты экспериментов

3.3.1 Методика проведения экспериментов

В соответствии с рабочей матрицей (таблица 3.2) проведено три цикла экспериментов при наличии в контактах колес тепловоза с рельсами различных загрязнений:

- при сильном загрязнении рельсов разными фракциями;
- при наличии в контактах воды с присутствием машинного масла;
- при наличии на рельсах тонкого слоя машинного масла.

Для выполнения первого цикла экспериментов был выбран участок железнодорожного пути с существенным загрязнением рельсов машинным маслом, ржавчиной и другими фракциями. Условия второго и третьего циклов обеспечивались соответственно путем увлажнения рельсов водой и нанесения на рабочие поверхности рельсов тонкого слоя масла.

Перед проведением исследований были выполнены предварительные испытания, в процессе которых осуществлена проверка работоспособности буксовых токоподводящих устройств и других элементов макетной системы, а также проверена работа системы регистрации параметров экспериментов. Испытания были выполнены при запущенном дизеле опытной секции тепловоза в следующем порядке:

- включение всех контактов разъединителя QS1 и отключение контактов QS2 (рисунок 2.4, а);
- обеспечение тормозным агрегатом полного торможения испытательного комплекса;
- перевод секции в режим тяги «вперед» и получение кратковременного срыва сцепления (боксования) передних колесных пар I, IV путем набора позиций контроллера машиниста;
- регистрация по приборам тока тягового генератора I_T – амперметром А (рисунок 2.19), токов тяговых электродвигателей – датчиками UA1...UA6 и измерительными средствами динамометрического вагона, силы тяги тепловоза F_T – измерительными средствами динамометрического вагона, разгрузки h_i передних колесных пар I, IV – датчиками перемещения и измерительными средствами динамометрического вагона;
- перевод опытной секции в режим холостого хода;
- переключение силовой цепи для работы тепловоза при прохождении $\approx 1/6$ тока тягового генератора I_T через контакты первой и четвертой колесных пар с рельсами (рисунок 2.4, б);
- перевод секции в режим тяги «вперед» и получение кратковременного срыва сцепления передних колесных пар I, IV путем набора позиций контроллера машиниста;

– регистрация по приборам тока тягового генератора I_T – амперметром А (рисунок 2.19), тока в тяговых контактах – амперметром РА и измерительными средствами динамометрического вагона посредством двух датчиков UA7, токов тяговых электродвигателей – датчиками UA1...UA6 и измерительными средствами динамометрического вагона, силы тяги тепловоза F_T – измерительными средствами динамометрического вагона, разгрузки h_i передних колесных пар I, IV – датчиками перемещения и измерительными средствами динамометрического вагона;

– перевод опытной секции на холостой ход;

– контроль температуры нагрева буксовых токоподводящих устройств, измерение суммарного сопротивления скользящих контактов и контактов колесных пар I, IV с рельсами;

– проведение опытов с прохождением тока через тяговые контакты по схемам (рисунки 2.4, в и 2.4, з);

– проверка работоспособности систем при движении опытной секции и с подачей тока в тяговые контакты по схемам (рисунки 2.4, б... 2.4, з).

Предварительные испытания показали работоспособность систем, обеспечивающую выполнение основных экспериментальных исследований.

Основные исследования проведены на участке железнодорожного пути с электрически связанными на стыках рельсами. При этом была учтена возможность свободного перемещения испытательного комплекса на расстояние 200...300 м. Методика выполнения опытов, включенных в запланированные циклы экспериментов, основана на особенностях устройства и возможностях макетной системы повышения сцепления и испытательного комплекса (раздел 2):

– переключение контактов разъединителей QS1 и QS2 в положения, обеспечивающие прохождение заданной силы тока через тяговые контакты (таблица 3.2) с учетом результатов предварительных испытаний и характеристики тягового генератора (рисунок 2.5);

– задание силы сопротивления тормозного агрегата с учетом предполагаемого максимального значения касательной силы тяги для заданной скорости движения (таблица 3.2);

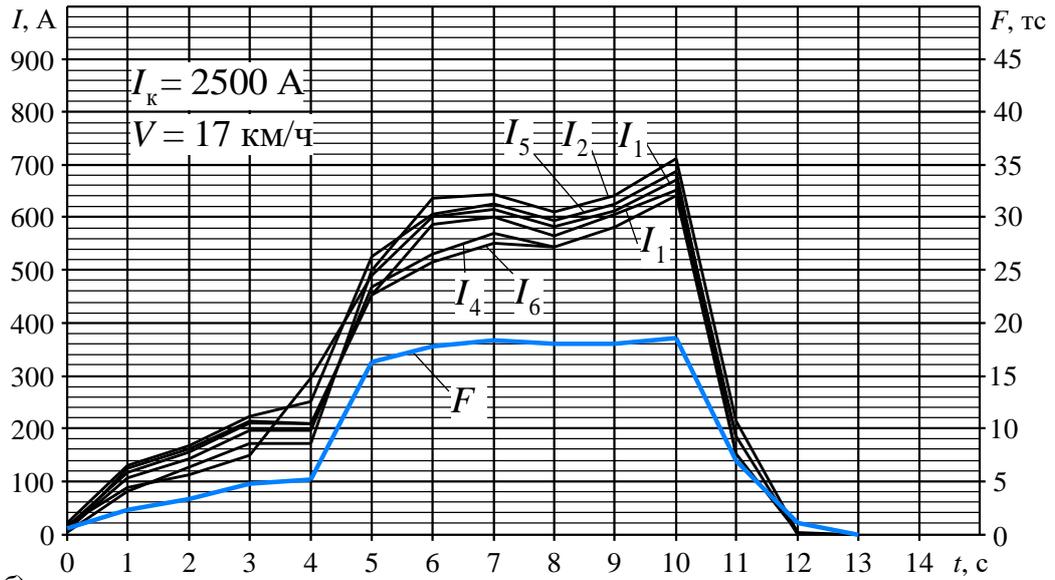
– перевод секции в режим тяги «вперед»;

- получение кратковременного срыва сцепления колесной пары I путем набора позиций контроллера машиниста;
- корректировка положений контактов разъединителей QS1 и QS2 и силы сопротивления тормозного агрегата и повторение опыта (при необходимости);
- регистрация параметров процесса по приборам:
 - 1 ток тягового генератора I_T – амперметром А (рисунок 2.19);
 - 2 ток в тяговых контактах – амперметром РА и измерительными средствами динамометрического вагона посредством двух датчиков UA7;
 - 3 токи тяговых электродвигателей – датчиками UA1...UA6 и измерительными средствами динамометрического вагона;
 - 4 силу тяги тепловоза F_T – измерительными средствами динамометрического вагона;
 - 5 разгрузку h_i передних колесных пар I, IV – датчиками перемещения и измерительными средствами динамометрического вагона.

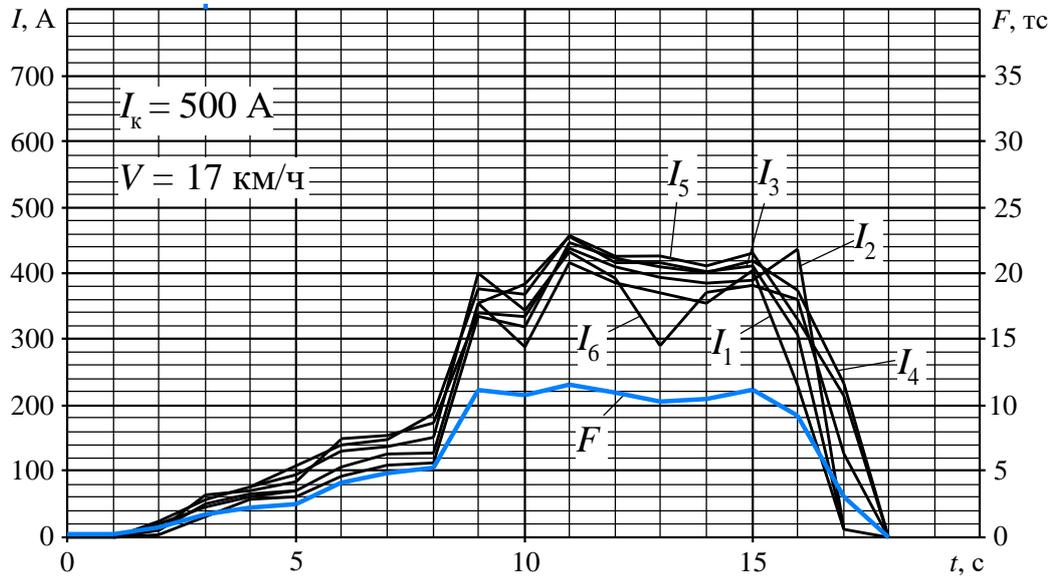
3.3.2 Проведение и обработка результатов экспериментов

Результаты опытов представляют собой осциллограммы, на которых записаны основные параметры исследуемых процессов. В каждом цикле опытов получено тринадцать осциллограмм соответственно ротатабельному плану (таблица 3.2). Так, на рисунке 3.2 приведены осциллограммы процессов для цикла экспериментов № 1, проводимого при сильном загрязнении рельсов. На осциллограммах отражены следующие параметры: F – сила тяги опытной секции, определяющая касательную силу тяги локомотива $F_{кл}$; $I_1...I_6$ – силы тока тяговых электродвигателей; I_k – сила тока в контактах колесных пар I, IV с рельсами; V – скорость движения секции.

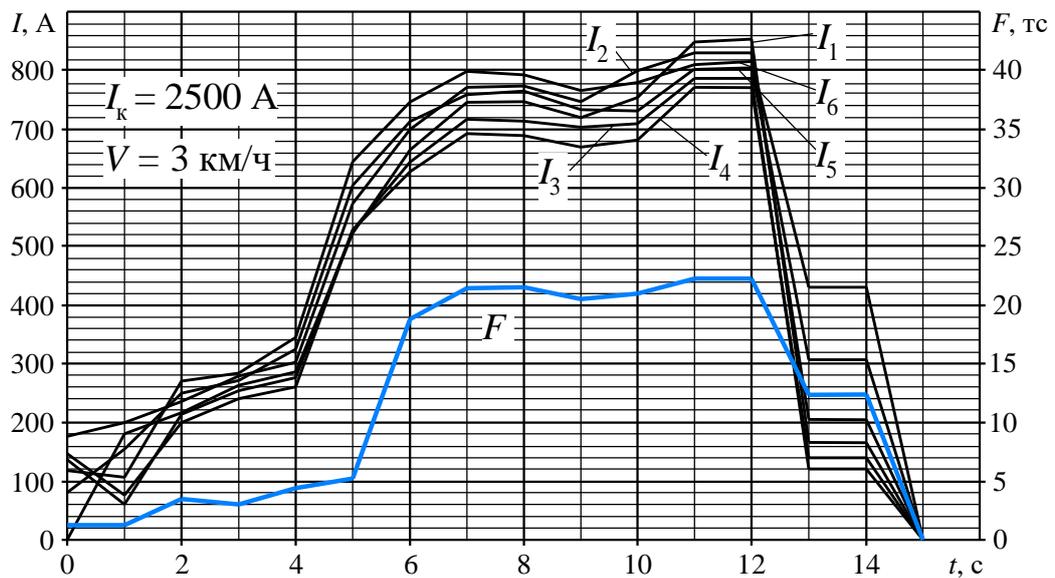
а) ОПЫТ № 1



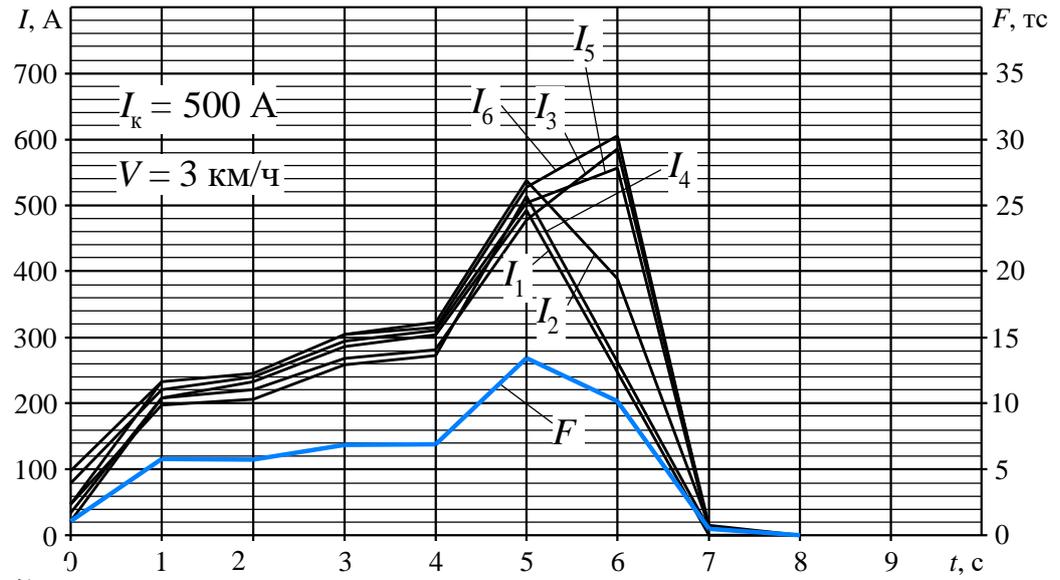
б) ОПЫТ № 2



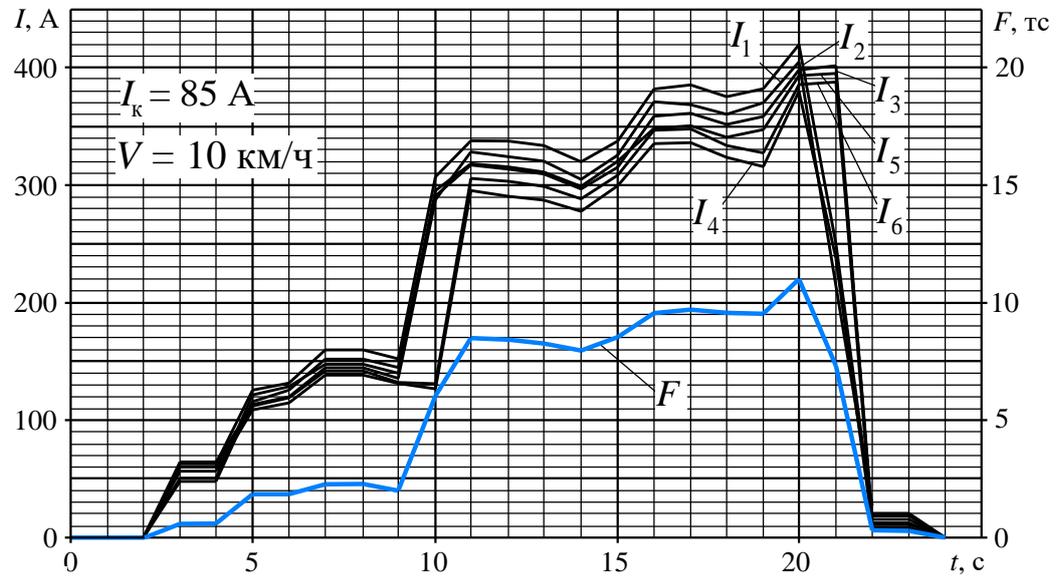
в) ОПЫТ № 3



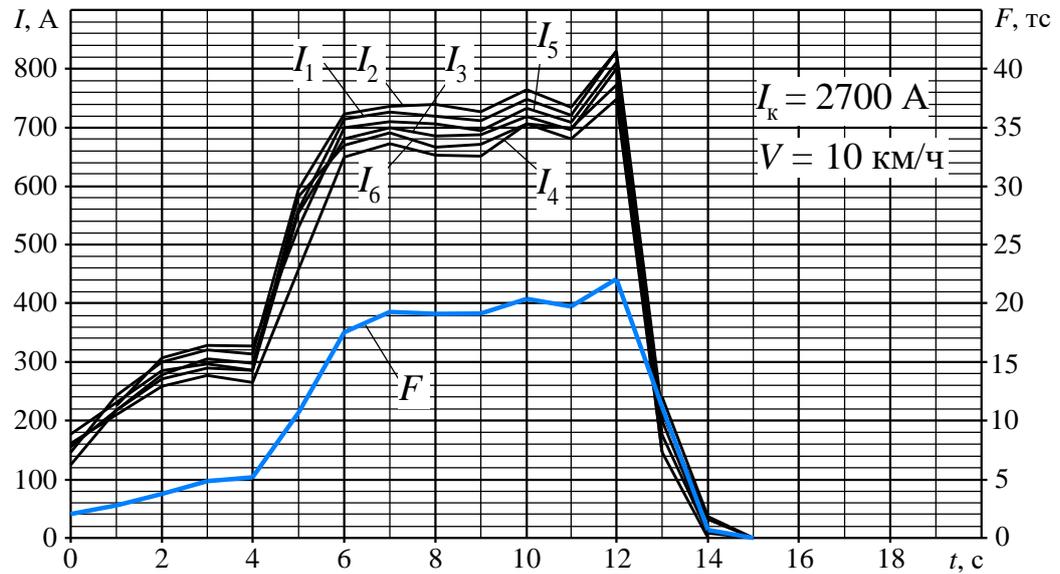
з) ОПЫТ № 4



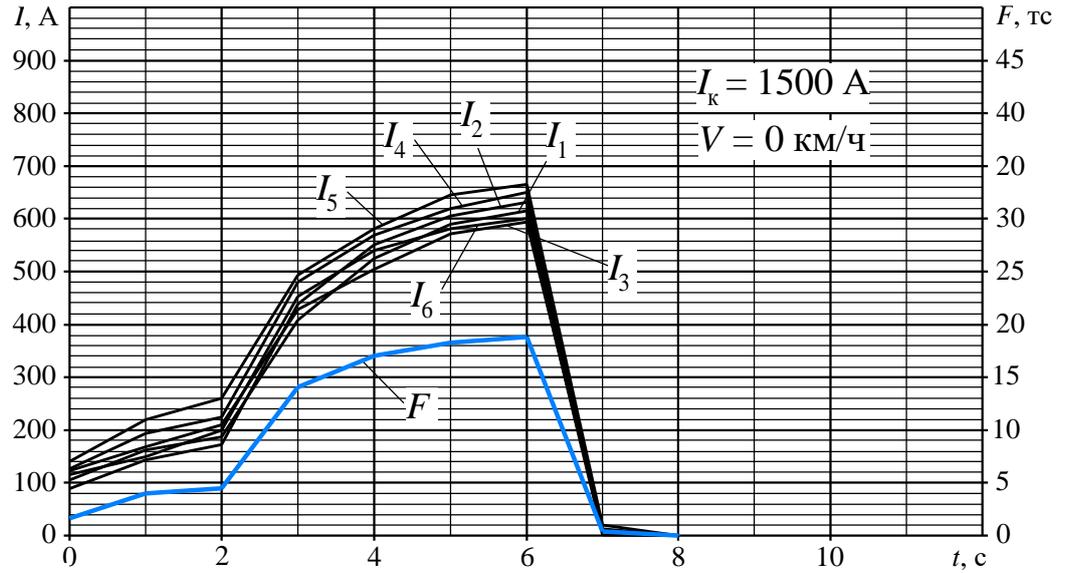
д) ОПЫТ № 5



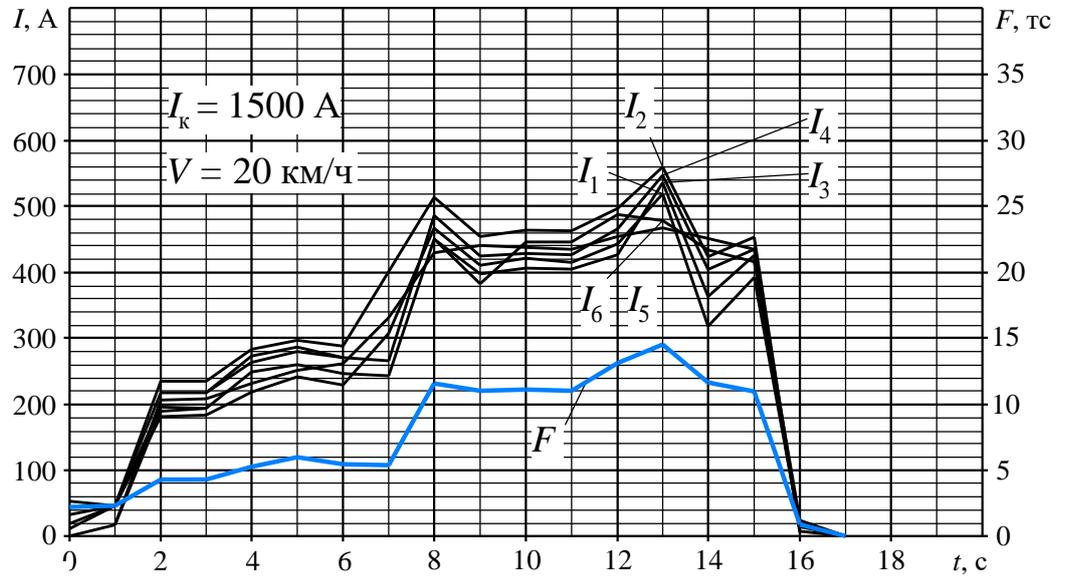
е) ОПЫТ № 6



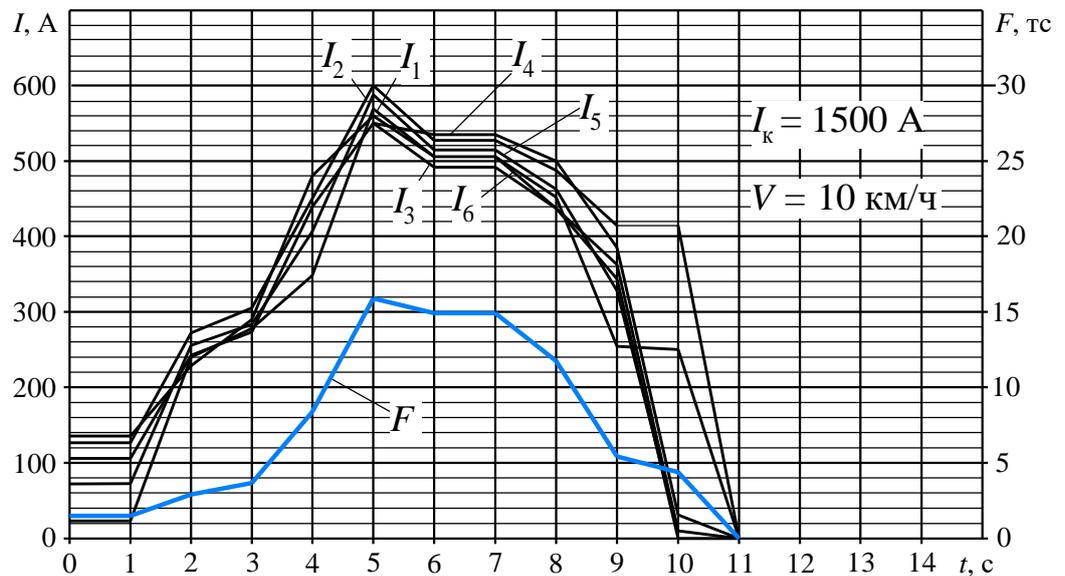
ж) ОПЫТ № 7



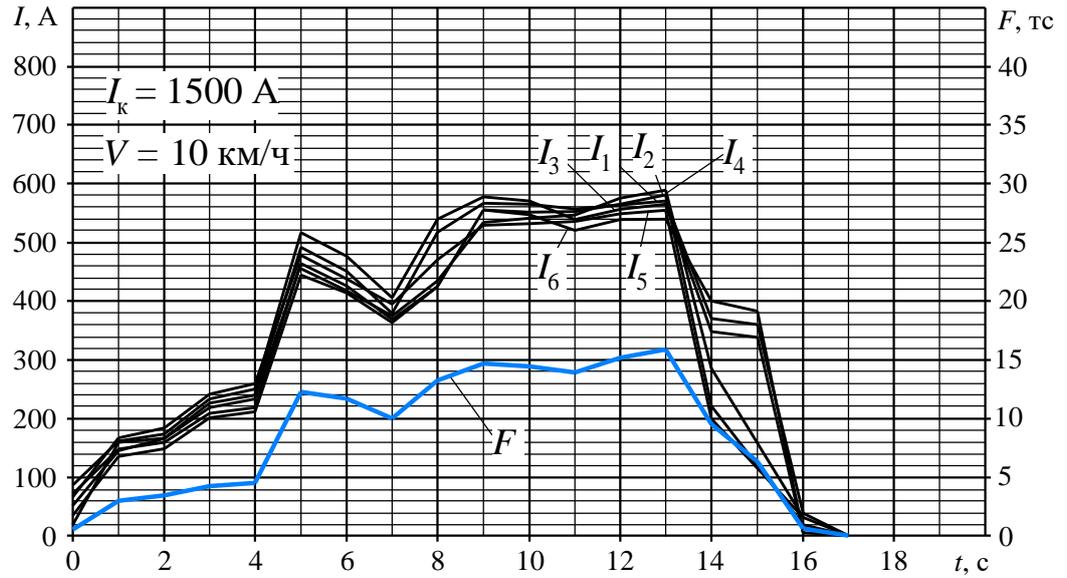
з) ОПЫТ № 8



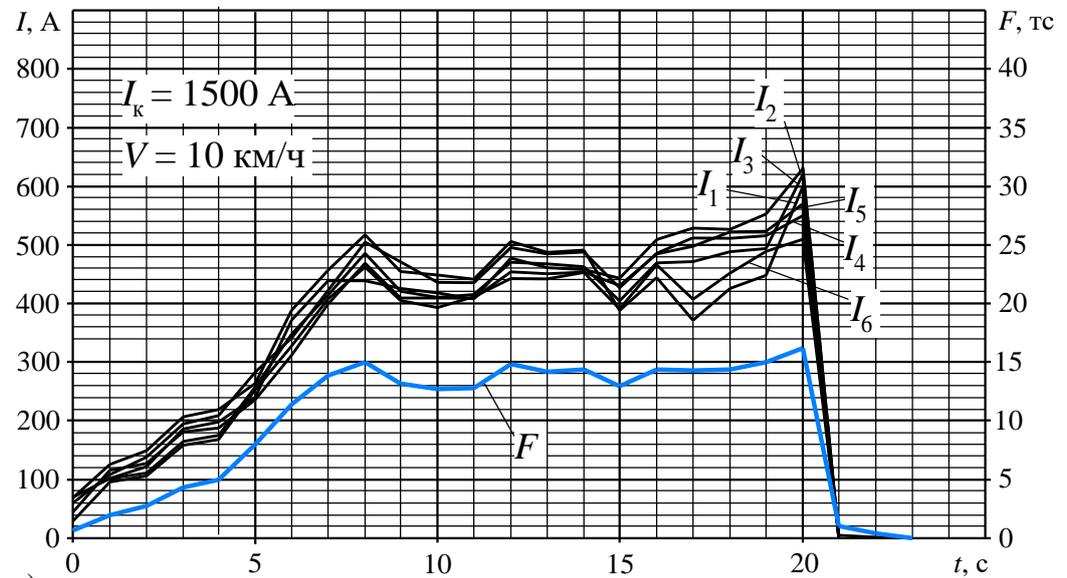
и) ОПЫТ № 9



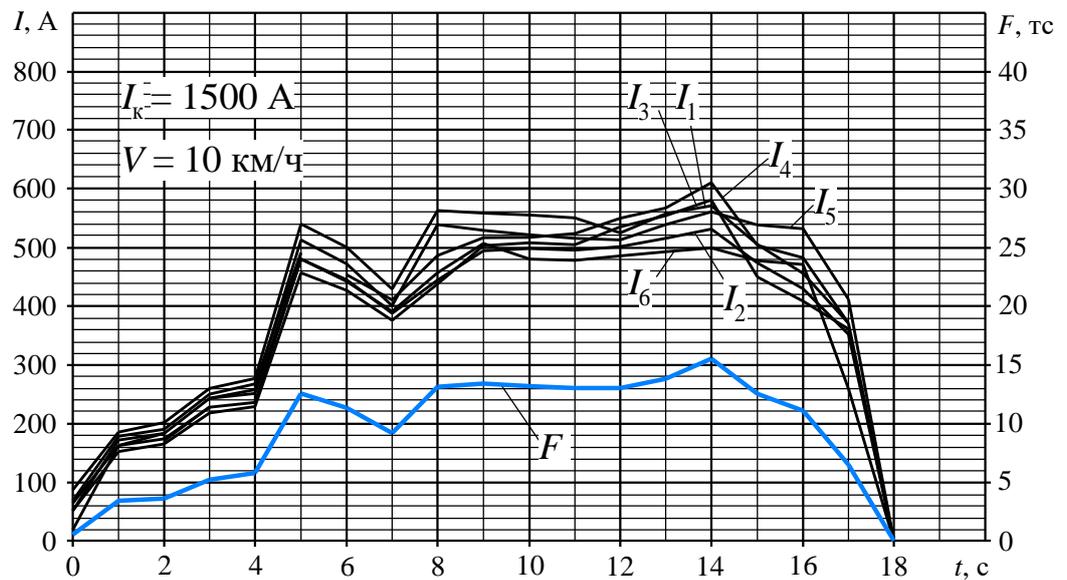
к) ОПЫТ № 10



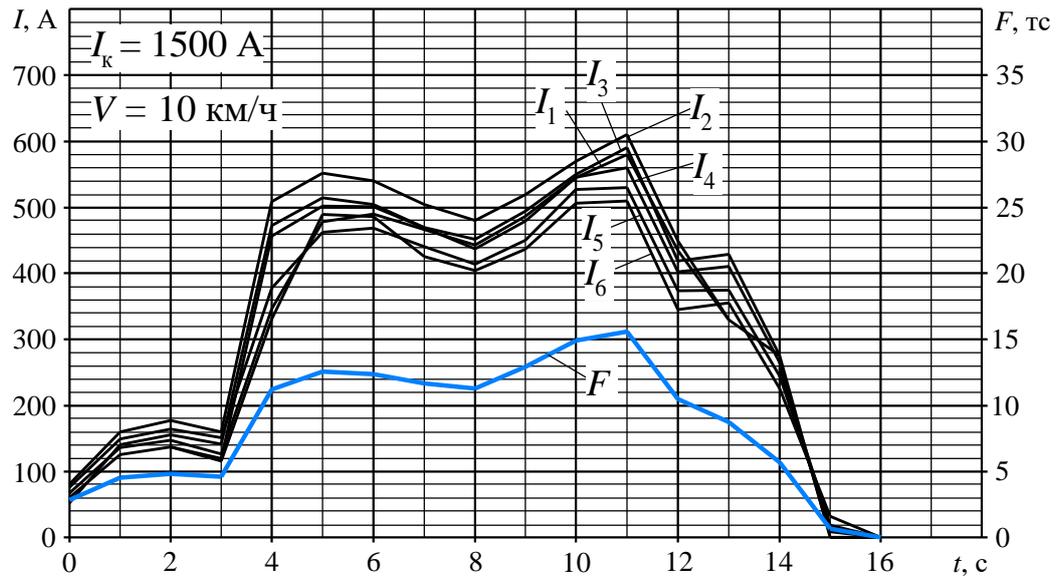
л) ОПЫТ № 11



м) ОПЫТ № 12



н) ОПЫТ № 13



a – опыт №1; *b* – опыт №2; *в* – опыт №3; *г* – опыт №4; *д* – опыт №5; *e* – опыт №6;
жс – опыт №7; *з* – опыт №8; *и* – опыт №9; *к* – опыт №10; *л* – опыт №11; *м* – опыт №12;
н – опыт №13

Рисунок 3.2 – Осциллограммы процессов для цикла экспериментов №1

При выполнении анализа осциллограмм рассматриваемого цикла в каждом опыте была определена с достаточной степенью точности касательная сила тяги первой колесной пары $F_{к1}$. Учитывая прямую пропорциональность зависимости $F_{к1}$ от силы тока первого тягового электродвигателя I_1 для ненасыщенной магнитной цепи двигателя, значения $F_{к1}$ были найдены по величине силы тяги секции F и соотношению тока I_1 к полному току тягового генератора

$$I_{\Gamma} = \sum I_i, \quad (3.5)$$

где I_i – токи тяговых двигателей опытной секции тепловоза.

С целью определения статического коэффициента использования сцепного веса $\eta_{и}$ первой колесной пары были выполнены измерения ее разгрузки h_1 при помощи датчиков перемещения (рисунок 3.3).

Значения $\eta_{и}$ вычислены по формуле

$$\eta_{и} = \frac{2\Pi - \Delta\Pi}{2\Pi}, \quad (3.6)$$

где $\Delta\Pi = h_1 C_1$ – уменьшение нагрузки колесной пары;

C_1 – жесткость рессорного подвешивания колесной пары;

2Π – статическая нагрузка на колесную пару.

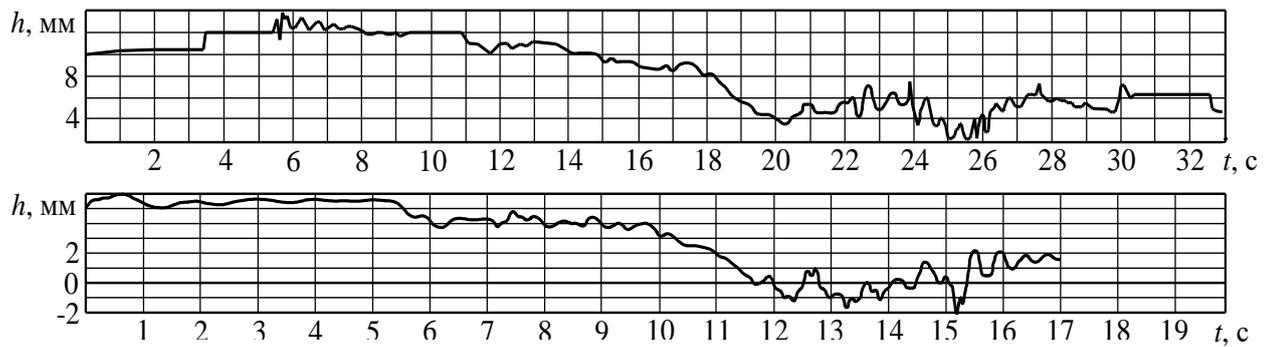


Рисунок 3.3 – Характерные осциллограммы разгрузки колесной пары

Для определения экспериментальных значений коэффициента сцепления первой колесной пары была использована зависимость

$$\psi = \frac{F_{кл}}{2P\eta_{и}}, \quad (3.7)$$

Результаты анализа осциллограмм цикла экспериментов № 1 с выполненными расчетами по зависимостям (3.6) и (3.7) сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты анализа осциллограмм цикла №1

№ опыта	$F_{кл\ max}$, кН	I_T , А	I_1 , А	$F_{кл}$,кН	$\eta_{и}$	ψ_u
1	186	4000	670	31	0,87	0,155
2	111	2430	405	18,5	0,95	0,085
3	223	4860	855	39	0,84	0,202
4	134	3040	490	21,5	0,93	0,100
5	110	2360	410	19	0,95	0,087
6	221	4790	830	38	0,84	0,197
7	188	3750	615	31	0,87	0,155
8	145	3110	520	24	0,93	0,112
9	159	3420	570	26,5	0,9	0,128
10	158	3400	570	26,5	0,89	0,129
11	162	3480	600	28	0,88	0,138
12	156	3350	570	26,5	0,91	0,127
13	157	3380	580	27	0,92	0,128
$\sum_{u=1}^{13} \psi_u = 1,743$, где u – номер опыта						

При этом статическая нагрузка на колесную пару принята $2P = 230$ кН.

На основе полинома (3.1) выведено уравнение регрессии, отвечающее ротатбельному плану второго порядка, и имеющее в общем случае вид [107]:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \quad (3.8)$$

Это уравнение использовано для формирования математической (регрессионной) модели коэффициента сцепления ψ при двух принятых управляющих факторах. Определение значений коэффициентов регрессии было выполнено по матрице планирования и полученным экспериментальным значениям ψ_u согласно зависимостям [107]:

$$\begin{aligned} b_0 &= a_1 \sum_1^N \psi_u - a_2 \sum_1^k \sum_1^N x_{iu}^2 \psi_u, & b_1 &= a_3 \sum_1^N x_{1u} \psi_u, & b_2 &= a_3 \sum_1^N x_{2u} \psi_u, \\ b_{12} &= a_4 \sum_1^{n_{я}} x_{1u} x_{2u} \psi_u, & b_{11} &= a_5 \sum_1^N x_{1u}^2 \psi_u + a_6 \sum_1^k \sum_1^N x_{iu}^2 \psi_u - a_7 \sum_1^N \psi_u, & (3.9) \\ b_{22} &= a_5 \sum_1^N x_{2u}^2 \psi_u + a_6 \sum_1^k \sum_1^N x_{iu}^2 \psi_u - a_7 \sum_1^N \psi_u, \end{aligned}$$

где: $a_1 = 0,2$;

$a_2 = 0,1$;

$a_3 = 0,125$;

$a_4 = 0,25$;

$a_5 = 0,125$;

$a_6 = 0,0187$;

$a_7 = 0,1$ [107];

$n_{я} = 4$ – число опытов в «ядре»;

$N = 13$ – общее число опытов;

u – номер опыта.

В результате получены расчетные значения коэффициентов и соответствующее им уравнение регрессии:

$$b_0 = 0,13; b_1 = 0,0409; b_2 = -0,0154; b_{12} = -0,008; b_{11} = 0,0053; b_{22} = -0,0011;$$

$$\hat{y} = 0,13 + 0,0409x_1 - 0,0154x_2 - 0,008x_1x_2 + 0,0053x_1^2 - 0,0011x_2^2. \quad (3.10)$$

Проведен статистический анализ результатов экспериментов, который заключался в проверке адекватности полученного уравнения и в проверке значимости коэффициентов регрессии. С этой целью предварительно рассчитаны значения критерия оптимизации $\hat{\Psi}$ и его отклонения от экспериментальных величин (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Результаты расчетов коэффициента сцепления для цикла № 1

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
$\hat{\Psi}_u$	0,152	0,086	0,199	0,101	0,083	0,198	0,150
$(\Psi_u - \hat{\Psi}_u)^2$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
№ опыта	8	9	10	11	12	13	Σ
$\hat{\Psi}_u$	0,106	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,725
$(\Psi_u - \hat{\Psi}_u)$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-5}$

Для проверки адекватности уравнения регрессии (3.10) был применен критерий Фишера, вычисленный по дисперсиям адекватности $s_{ад}^2$ и воспроизводимости $s_{\{\bar{\Psi}\}}^2$ [107]:

$$F_{расч} = \frac{s_{ад}^2}{s_{\{\bar{\Psi}\}}^2}. \quad (3.11)$$

Указанные дисперсии были вычислены по формулам [106, 107]:

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (\Psi_u - \hat{\Psi}_u)^2 - \sum_{0i=1}^{n_0} (\Psi_{0i} - \bar{\Psi}_0)^2}{N - \lambda - (n_0 - 1)}, \quad (3.12)$$

$$s_{\{\bar{\Psi}\}}^2 = \frac{\sum_{0i=1}^{n_0} (\Psi_{0i} - \bar{\Psi}_0)^2}{n_0 - 1}, \quad (3.13)$$

в которых Ψ_{0i} и $\bar{\Psi}_0$ являются результатами опытов в нулевой точке и их средним арифметическим значением. Кроме того, в данных зависимостях учтены число

коэффициентов уравнения регрессии $\lambda = 6$ и число повторений опытов в нулевой точке $n_0 = 5$. Выражения в знаменателях $N - \lambda - (n_0 - 1) = f_{ад}$ и $n_0 - 1 = f_E$ представляют собой числа степеней свободы соответственно для дисперсий адекватности и воспроизводимости.

В результате выполненных вычислений были получены значения дисперсий $s_{ад}^2 = 9,8 \cdot 10^{-5}$ и $s_{\{\bar{\Psi}\}}^2 = 2,05 \cdot 10^{-5}$. Критерий Фишера, рассчитанный по формуле (3.10), составил $F_{расч} = 4,78$.

В рассматриваемой регрессионной модели бóльшая дисперсия имеет число степеней свободы $f_{ад} = 3$, а меньшая – $f_E = 4$. Тогда при доверительной вероятности 0,95 по таблице выбрано критическое значение критерия Фишера $F_{крит} = 6,59$ [107]. Сопоставление табличного и расчетного значений критерия Фишера ($F_{крит} > F_{расч}$) показало, что с отмеченной доверительной вероятностью модель второго порядка (3.10) можно считать адекватной.

Для оценки значимости коэффициентов регрессии в уравнении (3.10) были использованы зависимости квадратичных ошибок в определении коэффициентов $s\{b_0\}, s\{b_i\}, s\{b_{ii}\}, s\{b_{ij}\}$ от полученного ранее значения дисперсии воспроизводимости $s_{\{\bar{\Psi}\}}^2$ [107]:

$$s_{\{b_0\}}^2 = 0,2s_{\{\bar{\Psi}\}}^2, \quad s_{\{b_i\}}^2 = 0,125s_{\{\bar{\Psi}\}}^2, \quad s_{\{b_{ii}\}}^2 = 0,1438s_{\{\bar{\Psi}\}}^2, \quad s_{\{b_{ij}\}}^2 = 0,25s_{\{\bar{\Psi}\}}^2.$$

Погрешности в оценке коэффициентов составили:

$$\Delta b_0 = \pm 2s\{b_0\} = \pm 0,004; \quad \Delta b_i = \pm 2s\{b_i\} = \pm 0,0032; \quad \Delta b_{ii} = \pm 2s\{b_{ii}\} = \pm 0,0034;$$

$$\Delta b_{ij} = \pm 2s\{b_{ij}\} = \pm 0,0045.$$

Для принятия решения о целесообразности включения в модель отдельных коэффициентов регрессии было проведено сравнение их абсолютных величин и соответствующих погрешностей. При этом определено существенное превышение значения коэффициента $b_{22} = -0,0011$ погрешностью в его оценке $\Delta b_{22} = \pm 0,0034$, и b_{22} можно исключить из уравнения. Значимыми с доверительной вероятностью

0,95 следует считать коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_{11} и b_{12} . Поэтому уравнение (3.10) можно представить в упрощенном виде:

$$\hat{y} = 0,13 + 0,0409x_1 - 0,0154x_2 - 0,008x_1x_2 + 0,0053x_1^2. \quad (3.14)$$

Искомая математическая модель получена путем перехода от кодированных к именованным величинам посредством формулы (3.4):

$$\psi = 0,085 + 3,64 \cdot 10^{-5} I - 4,9 \cdot 10^{-4} V - 1,14 \cdot 10^{-6} I \cdot V + 0,5 \cdot 10^{-8} I^2. \quad (3.15)$$

Эта зависимость определяет максимально возможные значения коэффициента сцепления тепловоза в зоне движения с малыми скоростями V (км/ч) при воздействии на контакты колес с рельсами током тягового генератора I (А) и при сильном загрязнении рабочих поверхностей рельсов различными фракциями.

На основании уравнения регрессии (3.14) построена поверхность в трехмерной системе координат (рисунок 3.4), являющаяся наглядным представлением о геометрическом образе функции отклика. Для визуальной оценки сходимости результатов расчета коэффициента сцепления по формуле (3.14) и экспериментально полученных зависимостей были построены сечения поверхности отклика (рисунок 3.5). Выполнение операции совмещения сечений с экспериментальными графиками показало ожидаемую сходимость рассматриваемых результатов.

По рассмотренной выше методике были выполнены исследования для циклов № 2 и № 3. Эксперименты цикла № 2 проводились при наличии в тяговых контактах воды с присутствием машинного масла. В таблице 3.5 приведены значения коэффициента сцепления, полученные на основании опытов по матрице планирования (таблица 3.2).

По рассмотренной выше методике были выполнены исследования для циклов № 2 и № 3. Эксперименты цикла № 2 проводились при наличии в тяговых контактах воды с присутствием машинного масла. В таблице 3.5 приведены значения коэффициента сцепления, полученные на основании опытов по матрице планирования (таблица 3.2).

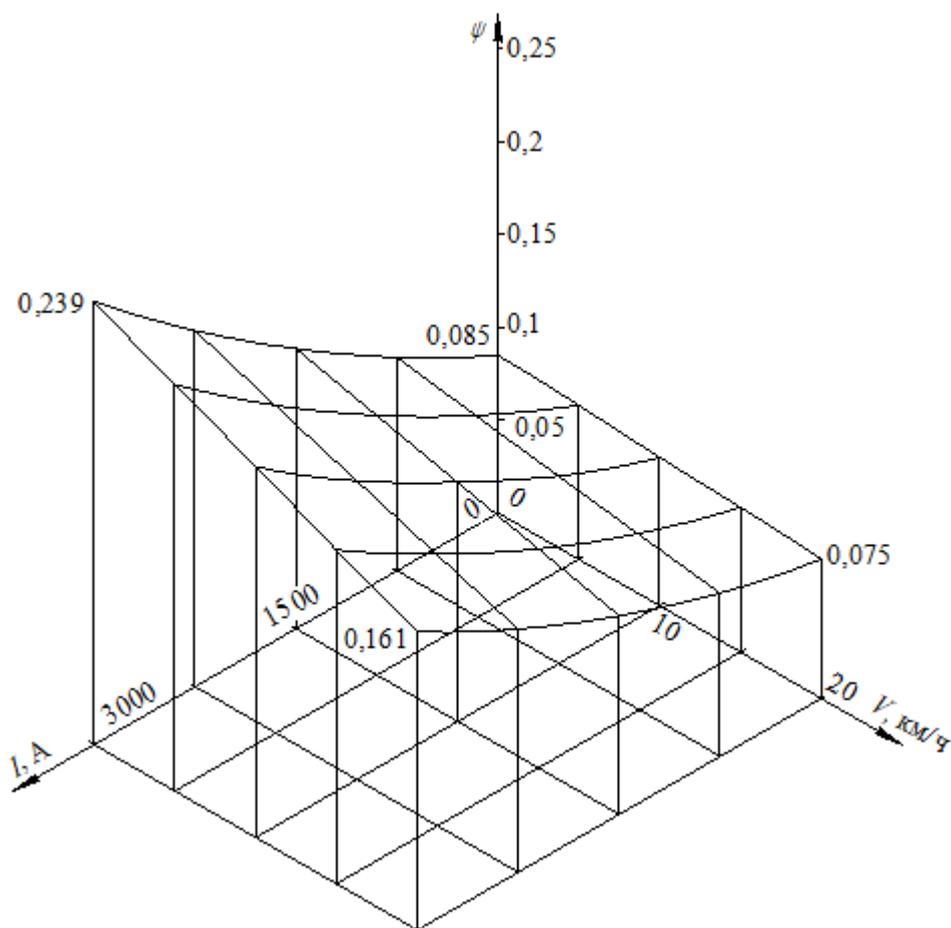
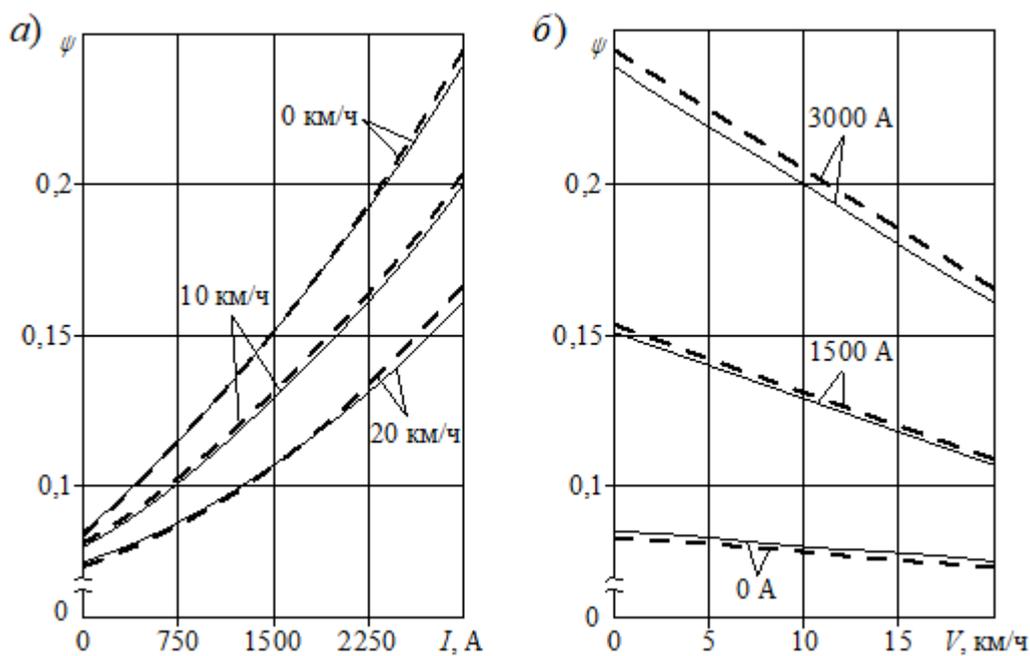


Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициента сцепления от силы тока в контактах колес с рельсами I и скорости движения тепловоза V при сильном загрязнении рабочих поверхностей рельсов



— — — — — эксперимент, ————— расчет
 a – от силы тока; b – от скорости движения

Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента сцепления

Таблица 3.5 – Экспериментальные значения коэффициента сцепления для цикла № 2

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
ψ_u	0,207	0,152	0,254	0,186	0,163	0,248	0,222
№ опыта	8	9	10	11	12	13	Σ
ψ_u	0,165	0,186	0,188	0,184	0,190	0,184	2,529

После выполненных расчетов по зависимостям (3.8) значения коэффициентов регрессии составили:

$$b_0 = 0,1864; \quad b_1 = 0,0304; \quad b_2 = -0,0202; \quad b_{12} = -0,0033;$$

$$b_{11} = 0,0095; \quad b_{22} = 0,0034.$$

В результате их подстановки в (3.7), получено уравнение

$$\hat{\psi} = 0,1864 + 0,0304x_1 - 0,0202x_2 - 0,0033x_1x_2 + 0,0095x_1^2 - 0,0034x_2^2, \quad (3.16)$$

с помощью которого рассчитаны значения коэффициента сцепления $\hat{\Psi}$ и его отклонения от экспериментальных величин (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Результаты расчетов коэффициента сцепления для цикла № 2

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
$\hat{\Psi}_u$	0,206	0,152	0,253	0,186	0,162	0,248	0,222
$(\Psi_u - \hat{\Psi}_u)^2$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	0	$0,1 \cdot 10^{-5}$	0	$0,1 \cdot 10^{-5}$	0	0
№ опыта	8	9	10	11	12	13	Σ
$\hat{\Psi}_u$	0,165	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186	2,524
$(\Psi_u - \hat{\Psi}_u)$	0	0	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$

Для проверки адекватности уравнения (3.16) были определены дисперсии адекватности (3.12) и воспроизводимости (3.13):

$$s_{ад}^2 = 0,3 \cdot 10^{-5},$$

$$s_{\{\bar{\psi}\}}^2 = 0,7 \cdot 10^{-5}.$$

В соответствии с (3.11) найден критерий Фишера, который равен

$$F_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{\{\psi\}}^2} = 0,43. \text{ Определенное по табличным данным критическое значение}$$

критерия Фишера для степеней свободы $f_E = 4$ и $f_{\text{ад}} = 3$ составило $F_{\text{крит}} = 9,12$ [107], т. е. выполнено условие $F_{\text{крит}} > F_{\text{расч}}$. Поэтому следует считать подтвержденной гипотезу об адекватности модели (3.16) с доверительной вероятностью 0,95.

По рассчитанным квадратичным ошибкам $s\{b_0\}, s\{b_i\}, s\{b_{ii}\}, s\{b_{ij}\}$ были определены погрешности в оценке коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_0 = \pm 0,0024, \Delta b_i = \pm 0,0019, \Delta b_{ii} = \pm 0,002, \Delta b_{ij} = \pm 0,0026.$$

Путем сопоставления этих погрешностей и абсолютных значений соответствующих коэффициентов регрессии была проверена их значимость. В итоге такой оценки все коэффициенты рассматриваемой регрессионной модели признаны значимыми с доверительной вероятностью 0,95.

Для получения математической модели исследуемого процесса в уравнении (3.15) кодированные значения факторов были выражены через натуральные

$$\text{величины по зависимости (3.4): } x_1 = \frac{I}{1000} - 1,5; \quad x_2 = \frac{V}{7} - 1,43.$$

$$\psi = 0,191 + 0,6 \cdot 10^{-5} I - 3,6 \cdot 10^{-3} V - 4,7 \cdot 10^{-7} I \cdot V + 1,0 \cdot 10^{-8} I^2 + 6,9 \cdot 10^{-5} V^2. \quad (3.17)$$

Поверхность отклика для изучаемого критерия оптимизации ψ , построенная в области эксперимента по зависимости (3.17), приведена на рисунке 3.6. Построение сечений этой поверхности выполнено при фиксированных значениях скорости $V = \{0 \text{ км/ч}, 10 \text{ км/ч}, 20 \text{ км/ч}\}$ и тока $I = \{0 \text{ А}, 1500 \text{ А}, 3000 \text{ А}\}$. В выбранных сечениях получены зависимости коэффициента сцепления ψ от силы тока в тяговых контактах (рисунок 3.7, а) и от скорости тепловоза (рисунок 3.7, б), которые были сопоставлены с экспериментальными кривыми.

Результаты цикла экспериментов №3, выполненного при нанесении на рабочие поверхности рельсов тонкого слоя машинного масла, сведены в таблицу 3.7.

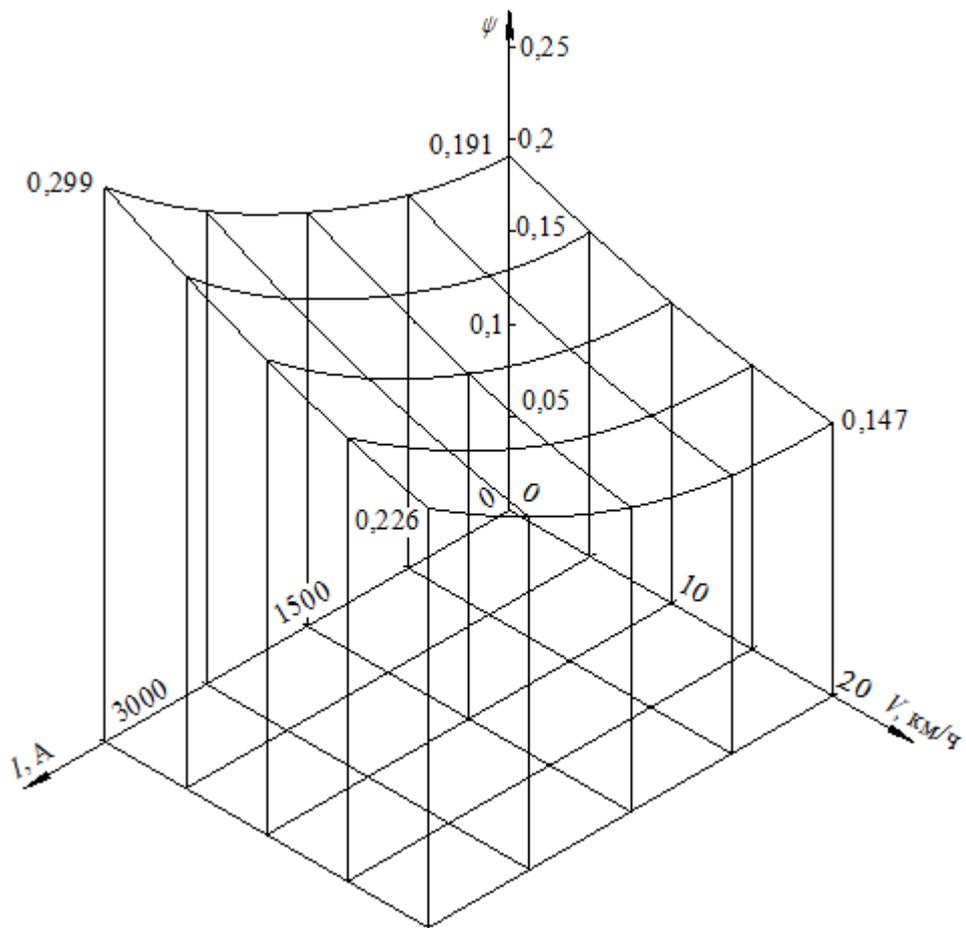


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента сцепления от силы тока в контактах колес с рельсами I и скорости движения тепловоза V при наличии в контактах воды с присутствием машинного масла

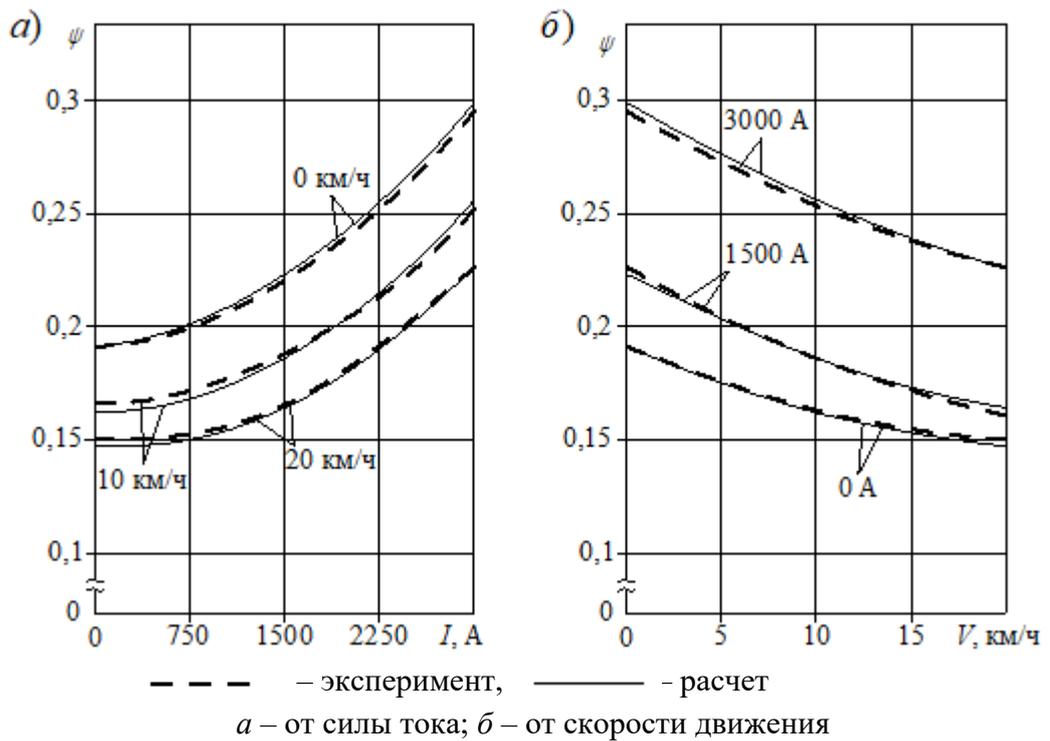


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента сцепления

Таблица 3.7 – Экспериментальные значения коэффициента сцепления для цикла № 3

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
ψ_u	0,207	0,104	0,254	0,127	0,105	0,256	0,188
№ опыта	8	9	10	11	12	13	Σ
ψ_u	0,140	0,160	0,158	0,162	0,156	0,160	2,177

Рассчитаны коэффициентов регрессии

$$b_0 = 0,1592; \quad b_1 = 0,0554; \quad b_2 = -0,0172; \quad b_{12} = -0,006;$$

$$b_{11} = 0,0107; \quad b_{22} = 0,0024,$$

которые определили вид полинома для расчетного критерия оптимизации:

$$\hat{y} = 0,1592 + 0,0554x_1 - 0,0172x_2 - 0,006x_1x_2 + 0,0107x_1^2 - 0,0024x_2^2. \quad (3.18)$$

Выполнены необходимые вычисления с использованием зависимости (3.18), результаты которых приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчетов коэффициента сцепления для цикла № 3

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
$\hat{\Psi}_u$	0,205	0,106	0,251	0,128	0,102	0,259	0,188
$(\Psi_u - \hat{\Psi}_u)^2$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	0
№ опыта	8	9	10	11	12	13	Σ
$\hat{\Psi}_u$	0,140	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	2,174
$(\Psi_u - \hat{\Psi}_u)^2$	0	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$

Сравнение расчетного критерия Фишера $F_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{\{\bar{y}\}}^2} = \frac{1,2 \cdot 10^{-5}}{0,525 \cdot 10^{-5}} = 2,28$ с

табличным значением $F_{\text{табл}} = 6,59$ [107] показало адекватность уравнения (3.18) с доверительной вероятностью 0,95.

Рассчитаны погрешности $\Delta b_0 = \pm 0,0024$, $\Delta b_i = \pm 0,0019$, $\Delta b_{ii} = \pm 0,002$, $\Delta b_{ij} = \pm 0,0026$, с помощью которых установлена значимость всех коэффициентов регрессии уравнения (3.18) с доверительной вероятностью 0,95.

Математическая модель процесса, выраженная через натуральные значения факторов, после преобразования приняла вид

$$\psi = 0,117 + 3,2 \cdot 10^{-5} I - 2,2 \cdot 10^{-3} V - 8,6 \cdot 10^{-7} I \cdot V + 1,1 \cdot 10^{-8} I^2 + 4,9 \cdot 10^{-5} V^2. \quad (3.19)$$

Построена поверхность отклика критерия оптимизации (рисунок 3.8) и выполнены ее сечения, совмещенные с экспериментальными графиками (рисунок 3.9).

Дополнительно были проведены испытания опытной секции тепловоза 2ТЭ116 с подачей тока тягового генератора в сравнительно чистые контакты колес с рельсами, которые находились в сухом состоянии или были увлажнены атмосферными осадками. Эксперименты также выполнены на сформированном испытательном комплексе, рассмотренном в подразделе 2.3. При этом были реализованы режимы работы опытной секции в фактически неподвижном состоянии с выходом на максимально возможную силу тяги, а также режимы движения комплекса с определенными скоростями.

Типичные осциллограммы исследуемых процессов приведены на рисунке 3.10. На заторможенной секции производился набор позиций контроллера машиниста, сопровождающийся ростом силы тока тягового генератора до максимальных значений $I_r = 6100-6200$ А (рисунок 3.10, *а*). Эти значения I_r поддерживались системой ограничения тока тягового генератора до конца выполнения опыта. Одновременно возрастала до наибольшей величины сила тяги F . Для осциллограммы характерны почти постоянные токи тяговых двигателей I_1 – I_6 , что указывает на отсутствие срывов сцепления всех колесных пар.

В режиме поддержания скорости движения секции и при увеличении ее силы тяги отмечено некоторое снижение силы тока тягового двигателя первой колесной пары (рисунок 3.10, *б*). К этому может привести небольшое скольжение ее колес, которое не приводит к срыву сцепления. Отсутствие боксования в этом случае можно объяснить достаточным сцеплением в системе.

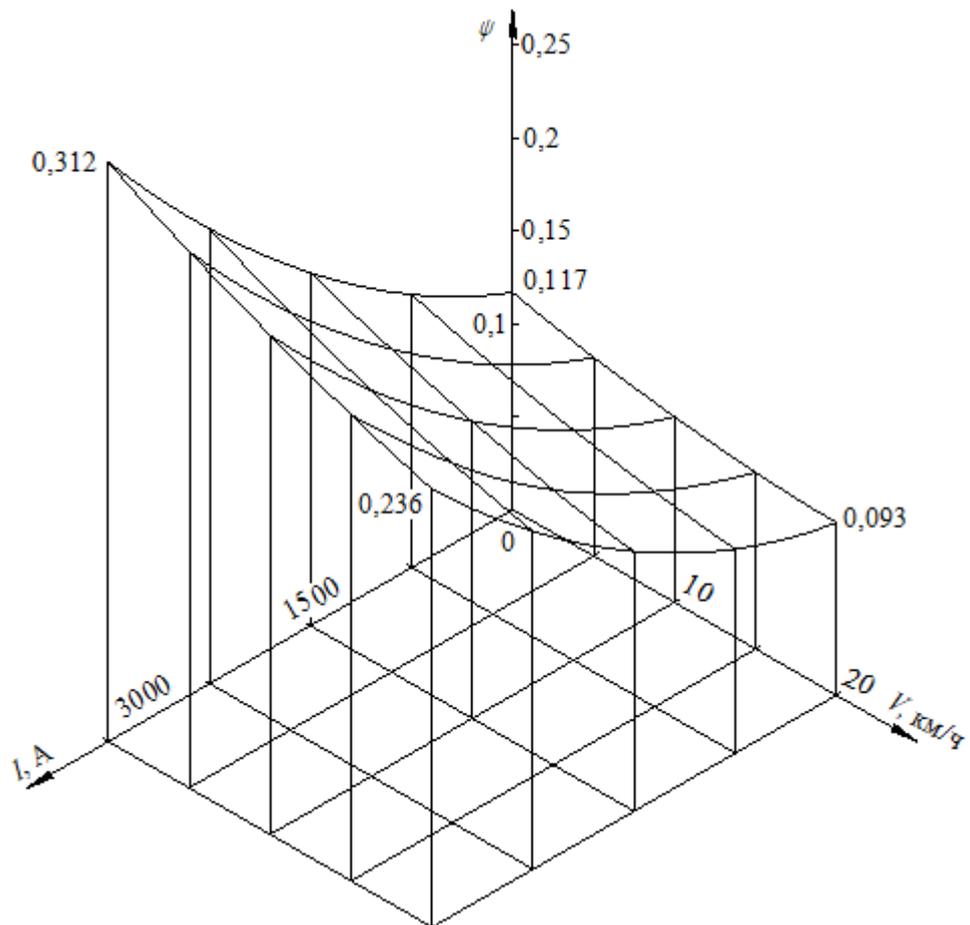


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента сцепления от силы тока I в контактах колес с рельсами и скорости движения тепловоза V при наличии в контактах тонкого слоя машинного масла

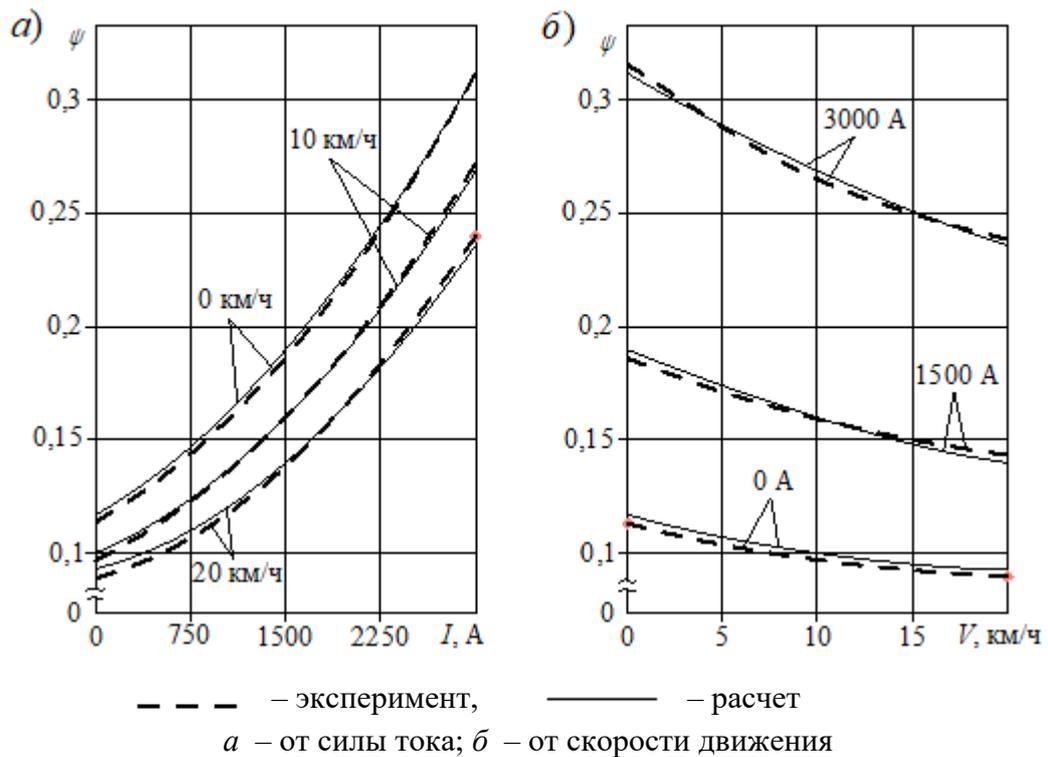


Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента сцепления

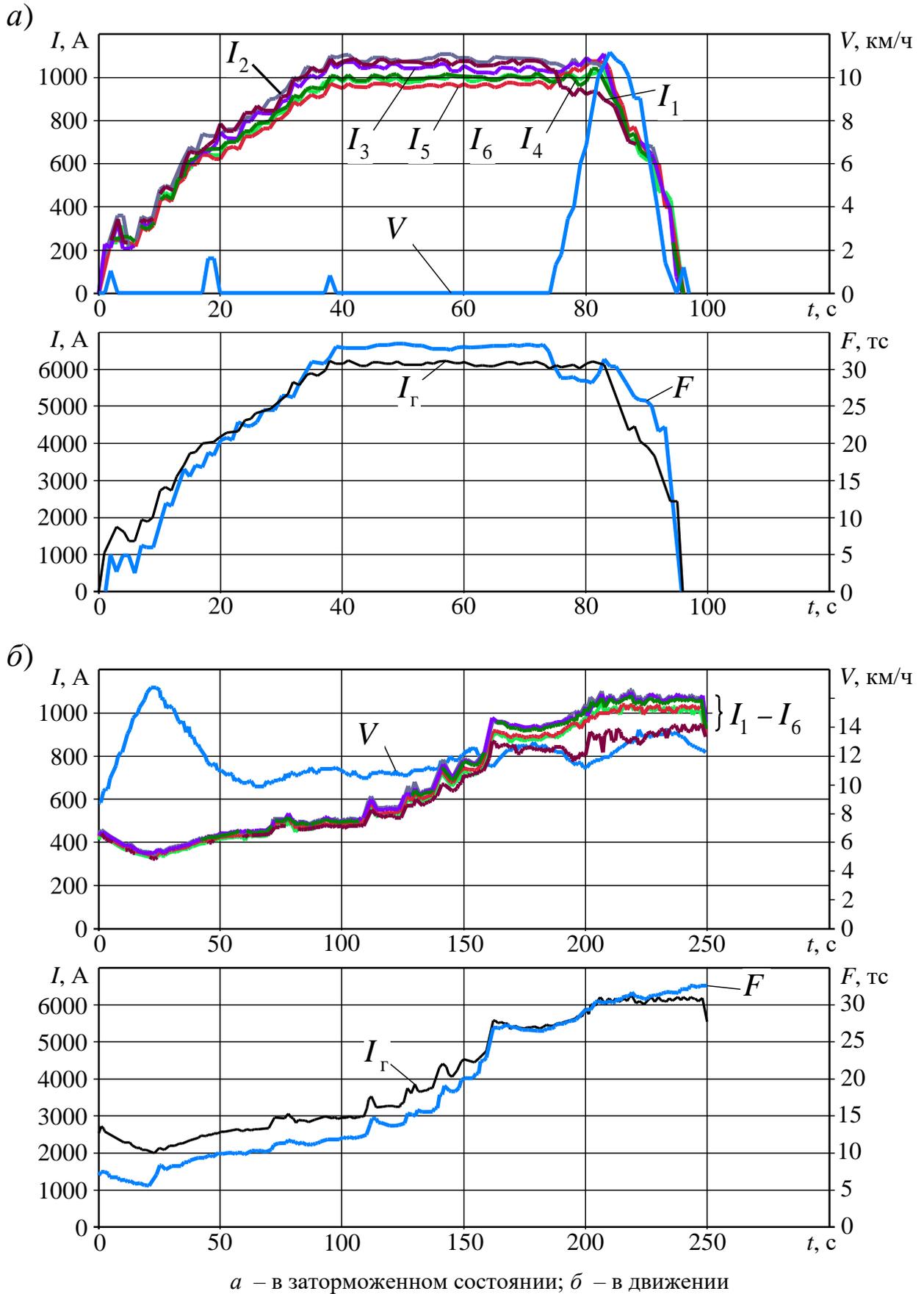


Рисунок 3.10 – Осциллограммы испытаний опытной секции

В обоих режимах тяговый генератор работал с наибольшими токами, при которых не происходил срыв сцепления колесных пар с рельсами. Это не позволило определить максимально возможные значения силы тяги и коэффициента сцепления тепловоза.

3.4 Выводы раздела 3

1 С использованием ротатбельного планирования эксперимента второго порядка получены регрессионные модели, представляющие собой математические зависимости максимально возможного коэффициента сцепления от силы тока в тяговых контактах, а также от скорости движения при трогании с места и разгоне локомотива. Модели позволяют оценить сцепные качества тепловоза при сильном загрязнении рельсов, при наличии в контактах воды с присутствием машинного масла, а также при наличии на рельсах тонкого слоя машинного масла.

2 Коэффициент сцепления ψ имеет нелинейную зависимость от силы электрического тока I в контактах колес и рельсов, а также от скорости движения тепловоза V . С увеличением I происходит существенный рост ψ . Увеличение V в диапазоне скоростей разгона приводит к снижению ψ .

При сильном загрязнении рельсов получено минимальное значение коэффициента сцепления 0,075 при скорости движения 20 км/ч и отсутствии тока в контактах. Наибольшего значения 0,239 коэффициент ψ достиг при $V = 0$ км/ч и $I = 3000$ А. В условиях присутствия в контактах колес и рельсов воды с включением машинного масла отмечено изменение коэффициента ψ в диапазоне от 0,147 до 0,299, а при наличии на рельсах тонкого слоя машинного масла этот диапазон составил 0,093...0,312.

3 Испытания опытной секции тепловоза 2ТЭ116 на относительно чистых рельсах не привели к возникновению режима боксования колесных пар, что не позволило определить максимально возможные для таких условий значения коэффициента сцепления тепловоза.

4 По результатам исследований подтверждена работоспособность разработанных буксовых токоподводящих устройств при прохождении через них токов больших величин.

4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЯГОВЫХ КАЧЕСТВ ТЕПЛОВЗОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ПОВЫШЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ

4.1 Исследовательский и программный прогнозы

Научно-техническое прогнозирование представляет собой оценку возможных путей развития науки и техники, а также необходимых в будущем ресурсов и организационных мер. При общем подходе задача прогнозирования заключается в предсказании будущего исходя из имеющейся информации. Планирование экспериментов позволяет получить такую информацию в виде, который удобен для эффективной оценки возможных результатов последующего развития исследуемой области технических наук.

При положительных результатах исследований, связанных с планированием эксперимента, обычно предусмотрено их использование на практике в кратчайшие сроки. Поэтому для полученной в третьем разделе информации целесообразно применить краткосрочное прогнозирование, заключающееся в разработке исследовательского (операционного), программного и организационно-экономического прогнозов. Исследовательский прогноз направлен выявление и формулировку новых возможностей с учетом найденных закономерностей. Программный прогноз исходит из данных, полученных на этапе исследовательского прогноза. Он связан с оценкой ожидаемых результатов, путей и технических средств их достижения, носит прикладной характер. При разработке организационно-экономического прогноза оценивают ресурсы, требуемые для эффективной реализации операционного и программного прогнозов.

Задачей научно-технического прогнозирования в рамках диссертационных исследований являлась оценка тяговых качеств магистральных тепловозов, эксплуатируемых в системе РЖД и находящихся на стадии разработки, а также средств их достижения на основе полученных зависимостей сцепления локомотивов от силы тока в тяговых контактах и скорости движения.

Для получения исследовательского и программного прогнозов были использованы основы методов экстраполяции, заключающейся в переносе выводов, сделанных по результатам одной части исследования на другую часть. Применение экстраполяции при прогнозировании отличается своей простотой и обосновано при допущении стабильности и неизменности развития функции цели [107]. При этом анализируемый процесс должен обладать инерционностью и на него не ожидается сильных внешних воздействий, которые могут серьезно повлиять на возможную тенденцию развития. На первом этапе был выполнен анализ результатов экспериментов по изучению сцепления тепловоза, выраженных в виде функций отклика на определенные внешние факторы (подраздел 3.4). Для получения исследовательских прогнозов была использована простая экстраполяция, которая предполагает сохранность всех тенденций в полном объеме, так как действовавшие факторы останутся неизменными.

В случае эксплуатации локомотивов на сильно загрязненных рельсах их коэффициент сцепления ψ может быть увеличен при подаче в тяговые контакты электрического тока силой $0 \dots 3000$ А (рисунки 3.4, 3.5):

- при трогании с места ($V = 0$ км/ч) – от 0,085 до 0,239;
- при скорости движения $V = 10$ км/ч – от 0,08 до 0,2;
- при скорости движения $V = 20$ км/ч – от 0,075 до 0,161.

Таким образом, в интервале скоростей $0 \dots 20$ км/ч, соответствующем троганию и разгону тепловоза, при подаче в контакты колес с рельсами максимально возможного тока $I = 3000$ А вероятно снижение коэффициента сцепления с 0,239 до 0,161. Сравнение этих значений ψ с его значениями для обычного режима работы ($0,085 \dots 0,075$) показало прогнозируемый рост коэффициента на 180...115 %.

Аналогично были проанализированы результаты исследований опытной секции тепловоза при других состояниях контактов колес с рельсами. Это позволило дать вероятные прогнозы сцепных качеств локомотивов, работающих в рассматриваемых условиях (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Анализ исследований и прогноз сцепных качеств локомотивов

Состояние контактов	Коэффициент ψ при $V = 0 - 20$ км/ч		Прогнозируемое увеличение ψ , %
	$I = 0$ А	$I = 3000$ А	
Вода, масло	0,191 – 0,147	0,299 – 0,226	55
Масло	0,117 – 0,093	0,312 – 0,236	165 – 155

На этапе программного прогнозирования придается прикладной характер знаниям, полученным при первом типе прогноза. Для этого формулируется гипотеза о перспективных возможностях взаимного влияния различных факторов, которая направлена на достижение возможных целей развития рассматриваемой области технических наук.

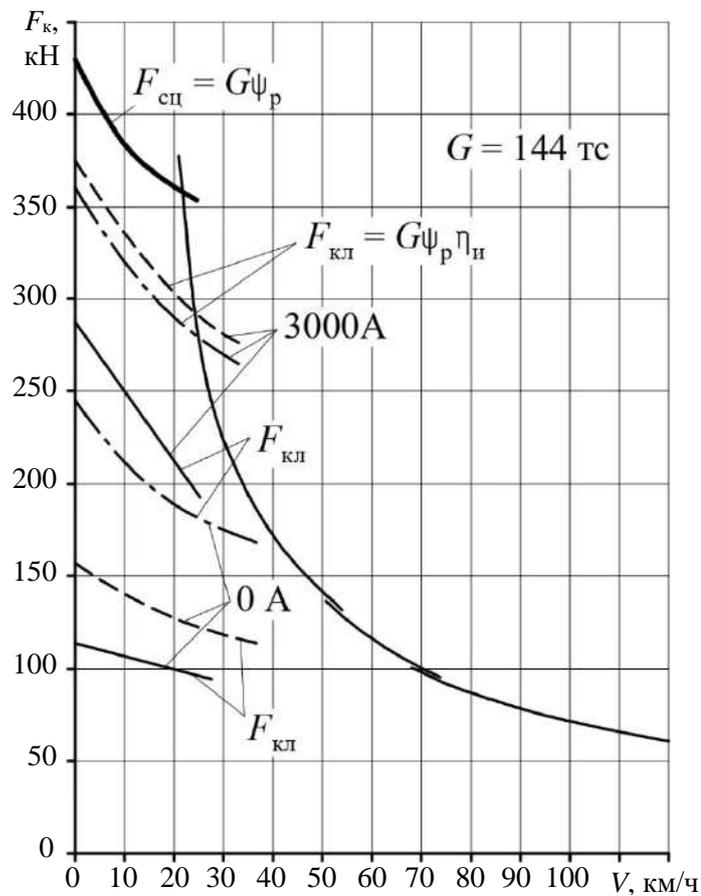
На провозную и пропускную способность железных дорог влияет вес состава, который является важным показателем, влияющим на эффективность работы железнодорожных линий. Допустимое увеличение веса состава снижает себестоимость, повышает экономичность перевозок, улучшает использование мощности локомотива. Нормативы веса грузового состава устанавливаются, исходя из использования максимальной силы тяги локомотива при равновесной скорости движения на расчетном подъеме. Полученный таким образом вес состава проверяют по условию трогания поезда с места, которое обусловлено участком ограничения по сцеплению тяговой характеристики локомотива.

Для получения программного прогноза выполнены расчеты наибольшей по сцеплению силы тяги по известной формуле $F_{кл} = G\psi\eta_{и}$ в зависимости от сцепного веса локомотива G с учетом результатов исследовательского прогноза, определенных по выражениям (3.14, 3.16, 3.18) и отражающих влияние на коэффициент сцепления силы тока в тяговых контактах и скорости движения тепловоза. Кроме того, использованы значения статического коэффициента использования сцепного веса $\eta_{и}$, которые были получены в третьем разделе работы.

Расчеты $F_{кл}$ произведены с целью определения прогнозируемого повышения тяговых качеств для одной секции тепловозов 2ТЭ25К, ТЭ10М, М62, 2ТЭ116 в зоне трогания с места и разгона при различном состоянии контактирующих поверхностей по степени загрязнения. В каждом случае рассмотрены два режима: без подачи тока в контакты колес с рельсами и при прохождении через них тока

3000 А. Полученные в графическом виде зависимости $F_{кл}$ совмещены с расчетными тяговыми характеристиками тепловозов.

В случае сильного загрязнения рельсов различными фракциями (маслом, ржавчиной и др.) для секции тепловоза 2ТЭ25К (рисунок 4.1) возможно увеличение касательной силы тяги $F_{кл}$ от 115 кН до 290 кН при трогании локомотива ($V = 0$ км/ч) и от 100 кН до 210 кН при скорости движения $V = 20$ км/ч. Таким образом, прогнозируемый рост силы тяги тепловоза составляет 150...110 %.



- — при сильном загрязнении тяговых контактов;
- — при наличии в контактах воды и машинного масла;
- - - - - при наличии в контактах тонкого слоя машинного масла

Рисунок 4.1 – Тяговые характеристики секции тепловоза 2ТЭ25К

При наличии в контактах колес с рельсами воды и машинного масла $F_{кл}$ может увеличиться от 245 кН до 360 кН для $V = 0$ км/ч и от 190 кН до 290 км/ч для $V = 20$ км/ч. Это обусловило прогноз роста касательной силы тяги около 50 %.

При наличии в контактах тонкого слоя масла отмечено соответствующее увеличение $F_{\text{кл}}$ в интервалах 155 – 375 кН и 125 – 305 кН, что составило 140...145 %.

В настоящее время на железных дорогах ОАО «РЖД» в эксплуатации находится около 5500 секций тепловозов более раннего производства. На Дальневосточной, Северной, Забайкальской и других дорогах используются свыше 3100 секций тепловозов типа ТЭ10. Тепловозы М62 в количестве 820 секций нашли применение, главным образом, на Московской и Октябрьской железных дорогах. Тепловозы ТЭ116 в основном применяются на Свердловской, Октябрьской, Юго-восточной и Северной дорогах. Предполагаемое улучшение тяговых качеств этих локомотивов может существенно повысить эффективность их работы в различных климатических и погодных условиях на железнодорожных путях с разным состоянием рельсов.

На основании анализа рассчитанных зависимостей $F_{\text{кл}}$ одной секции тепловозов типа ТЭ10М (рисунок 4.2) получен возможный рост касательной силы тяги:

- при сильном загрязнении рельсов (сплошные линии) 110 – 285 кН для $V = 0$ км/ч и 100 – 205 кН для $V = 20$ км/ч;
- при наличии в контактах воды и машинного масла (штрих-пунктирные линии) 240 – 350 кН для $V = 0$ км/ч и 185 – 275 кН для $V = 20$ км/ч;
- при наличии в контактах тонкого слоя машинного масла (штриховые линии) 150 – 370 кН для $V = 0$ км/ч и 125 – 295 кН для $V = 20$ км/ч.

Для секции тепловозов типа М62 (рисунок 4.3) рост $F_{\text{кл}}$ составил:

- при сильном загрязнении рельсов (сплошные линии) 100 – 260 кН для $V = 0$ км/ч и 90 – 185 кН для $V = 20$ км/ч;
- при наличии в контактах воды и машинного масла (штрих-пунктирные линии) 225 – 325 кН для $V = 0$ км/ч и 175 – 255 кН для $V = 20$ км/ч;
- при наличии в контактах тонкого слоя машинного масла (штриховые линии) 140 – 330 кН для $V = 0$ км/ч и 110 – 270 кН для $V = 20$ км/ч.

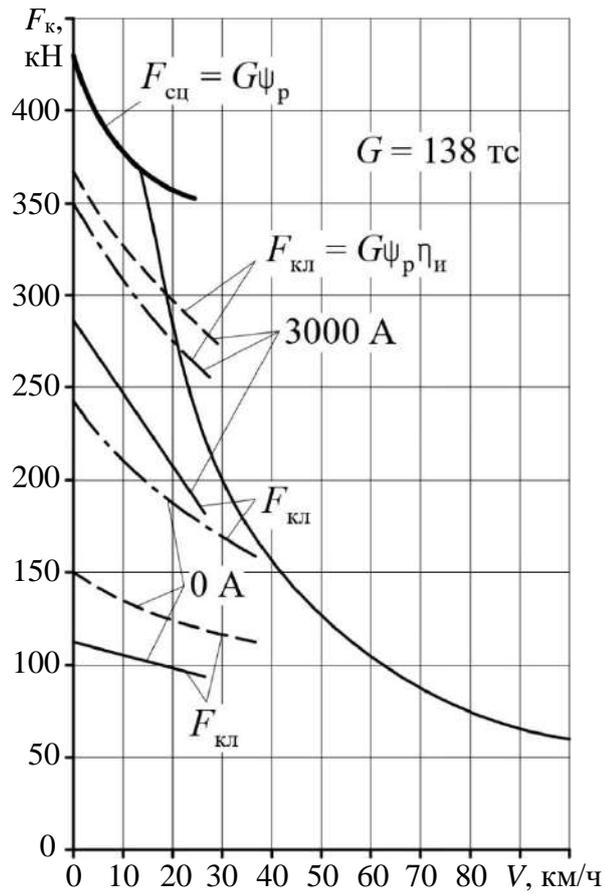


Рисунок 4.2 – Тяговые характеристики секции тепловозов типа ТЭ10М

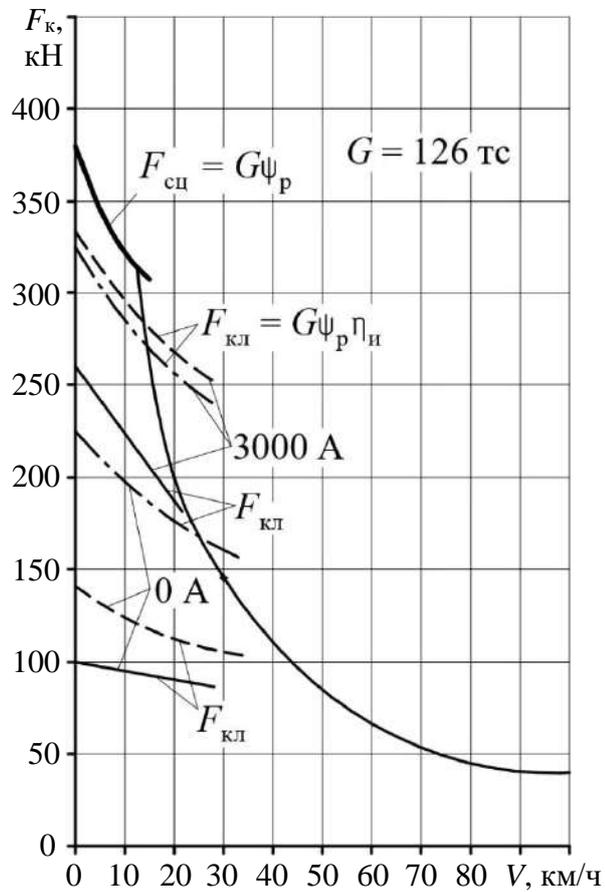


Рисунок 4.3 – Тяговые характеристики секции тепловозов типа М62

Касательная сила тяги $F_{кл}$ секции тепловоза 2ТЭ116 может быть увеличена (рисунок 4.4):

– при сильном загрязнении рельсов (сплошные линии) 110 – 285 кН для $V = 0$ км/ч и 100 – 205 кН для $V = 20$ км/ч;

– при наличии в контактах воды и машинного масла (штрих-пунктирные линии) 240 – 350 кН для $V = 0$ км/ч и 185 – 275 кН для $V = 20$ км/ч;

– при наличии в контактах тонкого слоя машинного масла (штриховые линии) 150 – 370 кН для $V = 0$ км/ч и 125 – 295 кН для $V = 20$ км/ч.

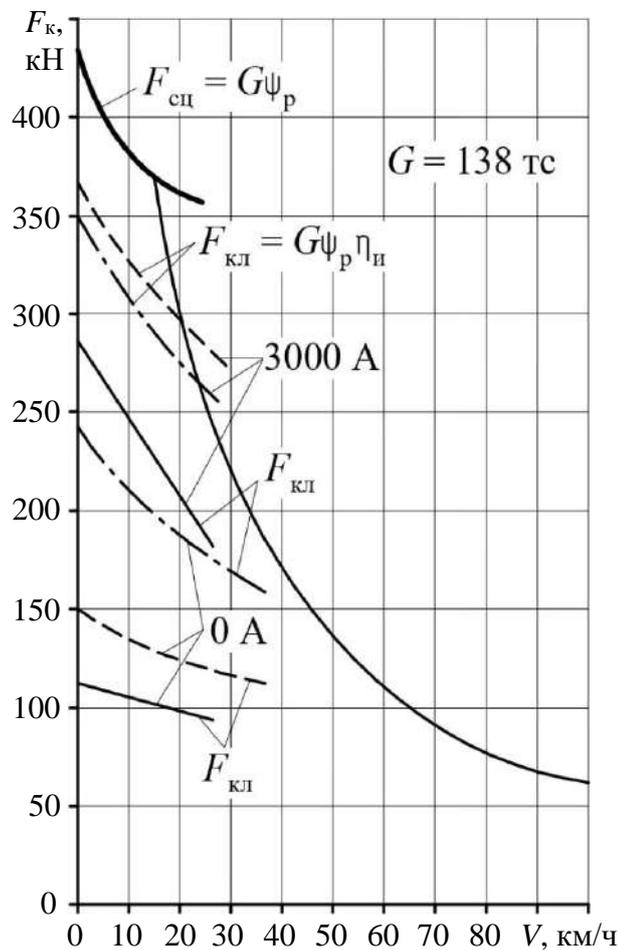


Рисунок 4.4 – Тяговые характеристики секции тепловоза 2ТЭ116

На основании анализа наибольших по сцеплению сил тяги тепловозов ТЭ10М, М62 и 2ТЭ116 получен прогноз повышения тяговых качеств в рассматриваемых условиях (таблице 4.2).

Таблица 4.2 – Прогноз тяговых качеств тепловозов

Тип тепловоза	Состояние тяговых контактов	Прогнозируемое увеличение $F_{кл}$, %
ТЭ10М	Сильное загрязнение	160 – 105
	Наличие воды и машинного масла	45 – 50
	Наличие тонкого слоя машинного масла	145 – 135
М62	Сильное загрязнение	160 – 100
	Наличие воды и машинного масла	45
	Наличие тонкого слоя машинного масла	135 – 145
2ТЭ116	Сильное загрязнение	160 – 105
	Наличие воды и машинного масла	45 – 50
	Наличие тонкого слоя машинного масла	145 – 135

Таким образом, результаты анализа возможного повышения касательных сил тяги тепловозов 2ТЭ25К, ТЭ10М, М62 и 2ТЭ116, используемых на железных дорогах ОАО «РЖД», позволяют сделать предположение о возможном улучшении эффективности их эксплуатации.

4.2 Организационно-экономический прогноз

4.2.1 Современное состояние проблемы

Организационно-экономический (организационный) прогноз основывается на представлениях об общих закономерностях и тенденциях развития изучаемого объекта, определенных исследовательским и программным прогнозами. Он предназначен для получения обоснованных предположений относительно состава и объемов ресурсов, которые необходимы для достижения поставленных целей. Основой организационного прогноза является определение предполагаемой финансовой поддержки планируемых программ исследований и разработок. Для получения этого типа прогноза можно использовать расчеты, позволяющие оценить экономическую эффективность от внедрения рассматриваемой разработки.

В настоящее время в сутки на сети железных дорог эксплуатируется порядка 1,5 тыс. единиц тепловозов, которые на тяжелых участках пути и плохих погодных условиях при снижении сцепления колесных пар с рельсами применяют песок.

В свою очередь применение песка влияет на засоренность (загрязнение) железнодорожных путей. Песок в процентном соотношении составляет примерно 40 % загрязнений, наряду с 60 % другими составляющими, такими как частицы грунтов, угольная пыль, влага и другие. Состав и процентное соотношение загрязнений зависит от местных условий. При наличии в верхнем строении пути загрязнений приводит к изменению его упругих и дренирующих свойств, создается благоприятная среда для произрастания травы и кустарников.

При высокой засоренности требуется восстановление свойств балласта, это проводится двумя способами: полной заменой балласта или его очисткой. Восстановления свойств балласта его полной заменой является очень дорогостоящей процедурой, поэтому капитальный ремонт железнодорожного пути проводят с применением глубокой очистки, это считается более экономичной альтернативой. Очистка балласта производится специальными машинами путем пропускания его через грохоты, это способствует отсеиванию мелких частиц (песка, земли, угольной пыли и др.). Наилучший эффект достигается только при очистке щебеночных балластов.

Очистка щебня дает возможность сэкономить на таких работах как: уменьшение работ по подбивке просевших шпал, а также по выправке пути в плане и профиле; срок службы рельсов, шпал, рельсовых скреплений и деталей стрелочных переводов увеличивается, уменьшение трудозатрат для их замены; уменьшаются или исключаются затраты рабочей силы на разгрузку и распределение нового балласта и др. Все перечисленные выше мероприятия дают большую экономию на рабочей силе. Интенсивность и характер загрязнений зависят от конкретных условий, а также дефектов балласта, из-за этой многофакторности размеры экономии в человеко-часах и, соответственно, в денежном выражении определить очень трудно. При этом стоимость очистки щебня балластной призмы с помощью щебнеочистительных машин на рельсовом

ходу составляет порядка 350 тыс. руб. за километр при глубине очистки от 20 до 25 см ниже подошвы шпал.

Система подачи песка, применяемая на локомотивах, включает в себя бункеры (емкости) вместимостью 200 кг (на секцию тепловоза приходится четыре бункера), форсунки, трубопроводы, воздухораспределители и электропневматические клапаны. Экипировка песком локомотивов осуществляется в депо одновременно с заправкой топливом и смазкой. При этом качество песка должно соответствовать определенным требованиям: используется максимально чистый материал с однородной структурой – кварцевый песок, размер фракций которого составляет от 0,2 до 0,5 мм, прошедший очистку и высушивание в печах при температуре не более 350 °С (для достижения влажности менее 0,5 %). Для обеспечения таких параметров в подготовку материала необходимы соответствующие финансовые вложения.

На основании исследовательского и программного прогнозов по применению электрических систем повышения сцепления следует ожидать значимого снижения затрат на песок и системы его подачи и, следовательно, на ремонт локомотивов и путевого хозяйства в части очистки балластного слоя от загрязнений.

Технико-экономическое обоснование применения на тепловозах ЭСПС выполнено на примере тепловоза 2ТЭ116 путем сравнения вариантов сохранения силы тяги тепловоза при рассмотрении следующих моделей:

- с подачей песка в тяговые контакты;
- с подачей электрического тока в тяговые контакты (без использования песка).

При выполнении расчетов были использованы действующие в ОАО «РЖД» методические материалы [72, 73, 74, 75].

4.2.2 Расчет годовых текущих расходов на песок, сервисное обслуживание и ремонт пескоснабжающих устройств

Технико-экономическая оценка работы ЭСПС проведена на основе расчета годового экономического эффекта ее применения на тепловозах. Расчеты проведены в части годовых текущих расходов по базовому варианту (с применением песка). При этом оценены расходы на песок тепловозом серии 2ТЭ116, сервисное обслуживание и ремонт пескоснабжающего устройства (СО и Р).

В качестве исходной информации приняты данные об эксплуатационных и стоимостных показателях для тепловоза 2ТЭ116 (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Исходные данные для расчета расходов на песок

Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя
Рабочий парк тепловозов	ед. /сутки	1007
Среднегодовой пробег тепловоза	тыс. км	160
Средняя стоимость 1м ³ подготовленного песка (без НДС)	руб.	2586,13
Средняя стоимость очистки щебня балластной призмы с помощью щебнеочистительных машин (без НДС)	тыс. руб.	350
Среднегодовой объем очистки балластной призмы	км	5000

Согласно Приложению 4.3 «Нормы расхода песка локомотивами» [31] средняя норма расхода песка тепловозом 2ТЭ116 при эксплуатации на участках железных дорог I типа профиля пути с поездами массой 6000 т составляет 0,15 м³/млн. ткм брутто, максимальная норма – 0,23 м³/млн. ткм брутто.

При эксплуатации тепловоза 2ТЭ116 на участках с тяжелыми профильными условиями (IV тип профиля пути) с поездами массой 4500 т норма расхода песка составляет от 0,28 м³/млн. ткм (средняя норма) до 0,36 м³/млн. ткм брутто (максимальная норма).

Годовые текущие затраты на песок определяют по формуле:

$$I_{\text{п}} = C_{\text{п}} \cdot H \cdot Q \cdot S_{\text{год}} \cdot 10^{-6}, \text{ т} \quad (4.1)$$

где $C_{\text{п}}$ – стоимость 1 т подготовленного песка, $C_{\text{п}} = 2586,13$ руб./м³ (в среднем по сети);

H – норма расхода песка грузовым тепловозом, м³/млн. ткм брутто;

Q – вес поезда, т;

$S_{\text{год}}$ – годовой пробег локомотива, тыс. км.

В таблице 4.4 приведены результаты расчета годовых затрат на песок тепловозом 2ТЭ116 при годовом пробеге 160 тыс. км.

Таблица 4.4 – Расчет годовых текущих расходов на песок тепловозом 2ТЭ116

Тип профиля / масса поезда, т	Норма	Годовые текущие расходы на песок, тыс. руб.
I / 6000 т	средняя 0,15	372,4
	макс. 0,23	571,02
IV / 4500 т	средняя 0,28	521,36
	макс. 0,36	670,32
в среднем		533,78

По варианту с применением ЭСПС текущие затраты на эксплуатацию в части расходов на песок и обслуживание системы снабжения песком предположительно отсутствуют.

Таким образом, экономия годовых затрат на песок может составить в среднем на один тепловоз 533,78 тыс. руб. или на рабочий парк тепловозов, составляющий в сутки 1007 единиц согласно данных Статистического отчета о работе железнодорожного транспорта, – 537516,46 тыс. руб. или 537,5 млн. руб./год.

Расчет годовых текущих расходов на сервисное обслуживание и ремонт пескоснабжающих устройств выполнен по формуле:

$$I_{\text{СОИР}}^{\text{п}} = e_{\text{СО}} \cdot d_{\text{СО}}^{\text{п}} \cdot S_{\text{год}} + (C_{\text{СР}} \cdot d_{\text{СР}}^{\text{п}} \cdot n_{\text{СР}} + C_{\text{КР}} \cdot d_{\text{КР}}^{\text{п}} \cdot n_{\text{КР}}) / T_{\text{сл}}, \quad (4.2)$$

где $e_{\text{СО}}$ – сервисная ставка по техническому обслуживанию и текущему ремонту тепловоза 2ТЭ116, руб./км за одну секцию, составляет для условий Свердловской ж.д. 43,87 руб./км пробега, Южно-Уральской ж.д. 68,32 руб./км пробега, Куйбышевской ж.д. 45,47 руб./км пробега или в среднем 52,55 руб./км пробега;

$d_{\text{СО}}^{\text{п}}, d_{\text{СР}}^{\text{п}}, d_{\text{КР}}^{\text{п}}$ – доля затрат на ремонт и обслуживание пескоснабжающего устройства при сервисном обслуживании, среднем и капитальном ремонте, соответственно;

$C_{\text{СР}}, C_{\text{КР}}$ – стоимость среднего и капитального ремонта тепловоза 2ТЭ116, соответственно, тыс. руб./секц.;

$n_{\text{СР}}, n_{\text{КР}}$ – количество средних и капитальных ремонтов за жизненный цикл (срок службы) тепловоза (определяется исходя из межремонтных пробега);

$T_{\text{сл}}$ – срок службы тепловоза, составляет 40 лет.

Годовые текущие расходы по сервисному обслуживанию и ремонту пескоснабжающих устройств тепловоза составят:

$$\begin{aligned} I_{\text{СОИР}}^{\text{п}} &= 52,55 \cdot 160 \cdot 3,83 \cdot 10^{-2} + (23935 \cdot 1,59 \cdot 10^{-2} \cdot 4 + 27611 \cdot 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 3) / 40 = \\ &= 382,054 \text{ тыс. руб./секц.} \quad \text{или} \quad 764,11 \text{ тыс. руб./тепловоз.} \end{aligned}$$

Суммарные годовые затраты на песок, сервисное обслуживание и ремонт пескоснабжающих устройств тепловоза 2ТЭ116 составят:

$$I = I_{\text{п}} + I_{\text{СОИР}}^{\text{п}} = 533,78 + 764,11 = 1297,89 \text{ тыс. руб. в год на один тепловоз.}$$

Поскольку при использовании на тепловозах ЭСПС потребность в песке отпадает, то в расчете на рабочий парк тепловозов для всей сети железных дорог экономия годовых эксплуатационных расходов за счет исключения затрат на песок и сервисное обслуживание систем пескоподачи составит:

$$I_{\text{парк}} = 1297,89 \cdot 1007 = 1\,306\,975,23 \text{ тыс. руб.}$$

4.2.3 Расчет экономии текущих расходов по очистке щебня при использовании тепловозов с электрическими системами повышения сцепления

Согласно данным открытых источников стоимость составляет около 350 тыс. руб. (без НДС) за километр при очистки щебня балластной призмы с помощью щебнеочистительных машин на рельсовом ходу на глубину очистки от 20 до 25 см ниже подошвы шпал.

Годовая экономия затрат по очистке щебеночного балласта может быть определена исходя из снижения сорокапроцентной загрязненности балласта песком, используемым тепловозами для повышения сцепных свойств в тяжелых профильных и погодных условиях, и годового объема работ по очистке балластной призмы 5000 км и удельном весе неэлектрифицированных линий (тепловозной тяги) по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{щ}} = C_{\text{щ}} \cdot L \cdot \Delta_{\text{щ}} \cdot \gamma, \quad (4.3)$$

где $C_{\text{щ}}$ – стоимость очистки 1 км щебеночного балласта, тыс. руб.;

L – протяженность пути, подлежащего глубокой очистке балласта, км/год;

$\Delta_{\text{щ}} = 0,4$ – доля засоренности балласта песком;

γ – доля линий с тепловозной тягой (неэлектрифицированных), составляет 48,2 % от протяженности сети железных дорог России.

Годовая экономия затрат по очистке балласта за счет снижения объемов работ по очистке при использовании ЭСПС составит:

$$\mathcal{E}_{\text{щ}} = 350 \cdot 5000 \cdot 0,4 \cdot 0,482 = 337\,400 \text{ тыс. руб.}$$

Общий годовой эффект от применения на тепловозах ЭСПС в части отсутствия затрат на песок и ремонт систем подачи песка, а также уменьшения объема работ по очистке щебеночного балласта составит в расчете на рабочий парк тепловозов:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 1\,306\,975,23 + 337\,400 = 1\,644\,375,23 \text{ тыс. руб. или } 1\,644,4 \text{ млн. руб./сеть.}$$

4.2.4 Расчет инвестиций на оснащение парка тепловозов 2ТЭ116 электрическими системами повышения сцепления и срока их окупаемости

В состав всех предлагаемых ЭСПС (подраздел 1.3), предназначенных для применения на тепловозах, входит следующее оборудование: тиристорное коммутирующее устройство с системой управления, обеспечивающее переключение соединений тяговых электродвигателей с колесными парами и тяговым генератором, буксовые токоподводящие (отводящие) устройства, датчики скорости и пути, провода и кабели.

Ориентировочная стоимость указанного оборудования приведена в таблице.

4.5.

Таблица 4.5 – Стоимость устанавливаемого оборудования

Наименование оборудования	Стоимость, руб. (без НДС)
Датчики пути и скорости	35 000
Тиристорное переключающее устройство	2 150 000
Электрические скользящие контакты букс	55 000
Кабельная продукция	48 000
Итого :	
– на одну секцию	2 288 000
– на локомотив	4 576 000

В расчете на парк тепловозов объем дополнительных инвестиций на оснащение их электрическими системами повышения сцепления составит:

$$K_{\text{парк}} = 4576,0 \cdot 1007 = 4\,608\,032,0 \text{ тыс. руб.}$$

Расчет простого срока окупаемости $T_{\text{ок}}$ инвестиционных затрат от применения на тепловозах ЭСПС выполнен без учета приведения затрат и результатов (эффектов) к стоимости расчетного (нулевого) года, т.е. не учтено дисконтирование. В этом случае $T_{\text{ок}}$ можно определить по формуле

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{парк}} / \mathcal{E}_{\text{год}} \quad (4,4)$$

Простой срок окупаемости инвестиционных затрат от применения на тепловозах электрических систем повышения сцепления составит:

$$T_{\text{ок}} = 4\,608\,032,0 / 1\,644\,375,23 = 2,8 \text{ года.}$$

4.3 Выводы раздела 4

1 Увеличение коэффициента сцепления тепловозов ψ , полученное на основании исследовательского прогноза, зависит от состояния контактов колес и рельсов по степени загрязнения. При сильном загрязнении и подаче в тяговые контакты электрического тока силой до 3000 А в интервале скоростей 0...20 км/ч возможен соответствующий рост коэффициента на 180...115 % по сравнению с обычным режимом работы. При наличии в контактах воды с присутствием машинного масла прогнозируемое увеличение ψ составило около 55 %, а при наличии тонкого слоя машинного масла – 165...155 %.

2 Программный прогноз позволил определить предполагаемое увеличение наибольшей по сцеплению силы тяги для наиболее массовых тепловозов железных дорог ОАО «РЖД». Улучшение тяговых качеств этих локомотивов может существенно повысить эффективность их работы.

3 Выполнены экономические расчеты, определяющие организационный прогноз результатов возможного внедрения ОАО «РЖД» электрических систем повышения сцепления тепловозов. Общий годовой эффект от применения на тепловозах ЭСПС в расчете на рабочий парк тепловозов ОАО «РЖД» может составить 1 644,4 млн. руб. При этом объем дополнительных инвестиций на оснащение тепловозов ЭСПС может достичь 4 608,032 млн. руб.

Прогнозируемый срок окупаемости потребных инвестиционных затрат 2,8 года существенно ниже нормативного периода окупаемости дополнительных капитальных вложений, что подтверждает эффективность и целесообразность предлагаемого технического решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Создана макетная электрическая система повышения сцепления позволяющая проводить экспериментальные исследования влияния тока тягового генератора, подаваемого в зоны тяговых контактов, на величину физического коэффициента сцепления при движении опытного тепловоза. Система имитирует основной физический процесс, определяющий принцип действия предложенной ЭСПС.

2 Разработана методика проведения экспериментов, которая основана на особенностях устройства макетной системы повышения сцепления, а также на возможностях специально сформированного испытательного комплекса.

3 Разработана математическая модель тягового электропривода секции тепловоза 2ТЭ116 на основании проведенного теоретического анализа повышения сцепных качеств тепловоза, оборудованного макетной ЭСПС, на основе разработанной математической модели тягового электропривода секции тепловоза 2ТЭ116.

4 Выполнено компьютерное моделирование движения опытной секции тепловоза с использованием основной библиотеки MatLab/Simulink и программного комплекса «Универсальный механизм», которое показало возможности ЭСПС в подавлении процесса боксования с кратковременным превышением линейной скорости на поверхности катания колес над скоростью локомотива не более 1 м/с.

4 Установлено, что коэффициент сцепления тепловоза ψ нелинейно зависит от силы электрического тока в контактах колес и рельсов, а также от скорости движения локомотива. С увеличением силы тока происходит существенный рост ψ . Увеличение скорости движения в диапазоне скоростей разгона приводит к снижению ψ .

5 Получены регрессионные модели на основании ротатбельного планирования эксперимента второго порядка, позволяющие оценить сцепные

качества тепловоза при различных состояниях контактов колес с рельсами по степени загрязнения и представляющие собой математические зависимости максимально возможного коэффициента сцепления от силы тока в тяговых контактах.

6 Получено на основании исследовательского прогноза ожидаемое увеличение коэффициента сцепления тепловозов при подаче в тяговые контакты электрического тока. В интервале скоростей 0...20 км/ч для силы тока до 3000 А увеличение ψ в сравнении с обычным режимом работы составляет: при сильном загрязнении тяговых контактов – 180...115 %; при наличии в контактах воды с присутствием машинного масла – около 55 %; при наличии тонкого слоя машинного масла – 165...155 %. Программный прогноз позволил определить предполагаемое увеличение наибольшей по сцеплению силы тяги для наиболее массовых тепловозов железных дорог ОАО «РЖД».

7 Результатом организационно-экономического прогноза общий годовой эффект от применения на тепловозах ЭСПС в расчете на рабочий парк тепловозов ОАО «РЖД» может составить 1 644 400 000 руб. При этом объем дополнительных инвестиций на оснащение тепловозов ЭСПС может достичь 4 608 032 000 руб. Прогнозируемый срок окупаемости потребных инвестиционных затрат составляет 2,8 года, что существенно ниже нормативного периода окупаемости дополнительных капитальных вложений. Это подтверждает эффективность и целесообразность использования ЭСПС.

8 Рекомендуется использовать положительные результаты разработки макетной системы повышения сцепления опытного тепловоза для создания ЭСПС локомотивов, эксплуатируемых на транспорте.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является разработка технических решений автоматизации устройств ЭСПС для реализации повышения тяговых свойств локомотивов. Исследование сцепных качеств локомотива при комплексном воздействии электрическим током и магнитным полем на зоны контакта колес с рельсами.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЛСН – автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного действия;

ДП – дополнительный полюс;

ИВК – измерительно- вычислительный комплекс;

КМБ – колесно-моторный блок;

МДС – магнитодвижущая сила;

МУКС – магнитный усилитель коэффициента сцепления;

ОВ – обмотка возбуждения;

ЭСПС – электрическая система повышения сцепления;

АИМ – модуль аналогового ввода;

ДИМ – многофункциональный модуль дискретного ввода сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Андреев, А. В.** Передача трением : [монография] / А. В. Андреев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1978. – 176 с. : ил. – Библиогр.: с. 175. – 60 экз. – Текст : непосредственный.
- 2 **Андреев, А. В.** Расчет деталей машин при сложном напряженном состоянии / А. В. Андреев. – Москва : Машиностроение, 1981. – 216 с. : ил. ; 22 см. – Библиогр.: с. 215. – 14600 экз. – Текст: непосредственный.
- 3 **Барский, М. Р.** Экспериментальное исследование процессов боксования и юза тепловозов / М. Р. Барский, И. Н. Сердинова. // Проблемы повышения эффективности работы транспорта / Академия наук СССР. – Москва, 1953. – Вып. 1. – С. 130–180. – Текст : непосредственный
- 4 **Беляев, Н. М.** К вопросу о местных напряжениях в связи с сопротивлением рельсов смятию / Н. М. Беляев. // Труды ЛИИПС. – Ленинград, 1929. – Вып. 99. – С. 283–296. – Текст : непосредственный
- 5 **Беляев, Н. М.** Применение теории Герца к подсчетам местных напряжений в точке соприкосновения колеса и рельса / Н. М. Беляев. // Труды по теории упругости и пластичности. – Москва : Гостехиздат, 1957. – С. 9–30. – Текст : непосредственный
- 6 **Бинс, К.** Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон // Перевод с англ. И. И. Талалова. – Москва : Энергия, 1970. – 376 с. : ил. – Библиогр.: с. 371. – 10000 экз. – Текст : непосредственный.
- 7 **Буше, Н. А.** Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытько. – Москва : Наука, 1981. – 127 с. : ил. ; 22 см. – Библиогр.: с. 119–125. – 2000 экз. – Текст : непосредственный.
- 8 **Бычковский, А. В.** Новый метод экспериментального исследования сцепления между рельсами и одиночными осями электровозов и тепловозов / А. В. Бычковский. // Вестник ВНИИЖТ. – 1958. – № 2. – С. 52–54. – Текст : непосредственный
- 9 **Вейко, В. П.** Лазерная очистка рельсового пути / В. П. Вейко [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2011. – Т. 52. – № 2. – С. 61–64. – Текст : непосредственный.

10 **Вербек, Г.** Современное представление о сцеплении и его использовании / Г. Вербек. // Железные дороги мира. – 1974. – № 4. – С. 23–53. – Текст : непосредственный.

11 **Вилькевич, Б. И.** Электрические схемы тепловозов типов ТЭ10М и ТЭ10У / Б. И. Вилькевич. – Москва : Транспорт, 1993. – 144 с. : ил. – Библиогр.: с. 180–181. – 12000 экз. – ISBN 5-277-01394-6. – Текст : непосредственный.

12 **Волков, В.Г.** Экспериментальные исследования электромагнитного устройства для увеличения сцепной силы тяги рудничного электровоза / В.Г. Волков. // Известия вузов (Горный журнал). – 1963. – № 3. – С. 24–31. – Текст : непосредственный.

13 **Воробьев, Д. В.** Улучшение фрикционных характеристик пары трения колесо – рельс за счет воздействия на контакт электрического тока и магнитного поля : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Воробьев Дмитрий Владимирович ; БГТУ. – Брянск, 2005. – 20 с. – Текст : непосредственный.

14 **Гайдуков, В. Е.** Повышение тяговых свойств подвижного состава / В. Е. Гайдуков, В. П. Андрейченко, Н. С. Цвиркун. // Коммунальное хозяйство городов. Научно технический сборник. – 2006. – № 72. – С. 244–247. – Текст : непосредственный.

15 **Голубенко, А. Л.** Сцепление колеса с рельсом : монография / А. Л. Голубенко. – Луганск : Изд-во ВУГУ, 1999. – 476 с. : ил. – Библиогр.: с. 426–476. – 1000 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

16 **Гриневич, В. П.** Измерительно-вычислительный комплекс для проведения тягово-энергетических испытаний / В. П. Гриневич, Ю. Д. Пронин, П. С. Фролов. // Вестник ВНИКТИ. – 2018. – № 101. – С. 22–31. – Текст : непосредственный.

17 **Демкин, Н. Б.** Фактическая площадь касания твердых тел / Н. Б. Демкин. – Москва, Изд-во АН СССР, 1962. – 111 с. : ил. – Библиогр.: с. 105–109. – 2000 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

18 **Демкин, Н. Б.** Контактное трение шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – Москва : Машиностроение, 1970. – 227 с. : ил. – Библиогр.: с. 213–225. – 2500 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

19 **Демкин, Н. Б.** Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 244 с. : ил. – Библиогр.: с. 236–242. – 2450 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

20 **Дерягин, Б. В.** Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга. – Москва : Наука, 1973. – 279 с. : ил. – Библиогр.: в конце глав – 3400 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

21 **Джонсон, К.** Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – Москва : Мир, 1989. – 510 с. : ил. – Библиогр.: с. 432–447. – 4100 экз. – ISBN 0521255767. – Текст : непосредственный.

22 **Дзялошинский, И. Е.** Общая теория Ван-дер-Вальсовых сил / И. Е. Дзялошинский, Е. М. Лившиц, Л. П. Питаевский. // УФН. – 1961. – Т. 73. – Вып. 3. – С. 381–422. – Текст : непосредственный

23 **Желев, Ж. Д.** Влияние изменения осевой нагрузки и геометрии бандажа локомотива на коэффициент сцепления : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Желев Живко Добринов ; МИИТ. – Москва, 1977. – 204 с. – Текст : непосредственный.

24 **Ивахин, А.И.** Управление тяговыми качествами тепловозов с электрической передачей мощности / А.И. Ивахин, Д.И. Петраков. // Тяжелое машиностроение. – 2011. – № 3. – С. 11–16. – Текст : непосредственный

25 **Ивахин, А. И.** Моделирование пятна контакта колеса с рельсом в устройствах для исследования динамических процессов в тяговом приводе локомотива / А. И. Ивахин, В. И. Травиничев, Д. И. Петраков. // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 33–36. – Текст : непосредственный

26 **Ивахин, А. И.** Экспериментальные исследования влияния электрического тока на сцепные качества локомотивов / А. И. Ивахин, Д. И. Петраков. // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 1. – С. 27–34. – Текст : непосредственный

27 **Ивахин, А. И.** Испытания грузового тепловоза с макетной системой повышения тяговых качеств / А. И. Ивахин, В. И. Травиничев, Д. И. Петраков. // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 17–21. – Текст : непосредственный

28 **Ивахин, А. И.** Макетные электрические системы повышения сцепления тепловоза / А. И. Ивахин, Ю. В. Бабков, Д. В. Котяев, Ю. И. Клименко. // Тяжелое машиностроение. – 2020. – № 10. – С. 25–29. – Текст : непосредственный

29 **Ивахин, А. И.** Системы повышения сцепления тепловозов с электропередачей / А. И. Ивахин, Ю. В. Бабков, Д. В. Котяев, Ю. И. Клименко. // Тяжелое машиностроение. – 2021. – № 1–2. – С. 39–44. – Текст : непосредственный

30 **Ивахин, А. И.** Использование импульсного электрического тока для улучшения тяговых качеств тепловозов / А. И. Ивахин, Ю. В. Бабков, Д. В. Котяев, Ю. И. Клименко. // Тяжелое машиностроение. – 2021. – № 10. – С. 32–36. – Текст : непосредственный

31 Инструкции по расчету наличной пропускной способности железных дорог : Утв. М-вом путей сообщ. СССР 24.04.89. – Москва : Транспорт, 1991. – 302 с. – Текст : непосредственный.

32 **Исаев, И. П.** Случайные факторы и коэффициент сцепления / И. П. Исаев. – Москва : Транспорт, 1970. – 182 с. : ил. – Библиогр.: с. 180–182. – 2500 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

33 **Исаев, И. П.** Коэффициент сцепления как результат нестационарного случайного процесса сцепления колес локомотива с рельсами / И. П. Исаев. // Железные дороги мира. – 1972. – № 7. – С. 3–12. – Текст : непосредственный

34 **Исаев, И. П.** Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами / И. П. Исаев, Ю. М. Лужнов. – Москва : Машиностроение, 1985. – 240 с. : ил. – Библиогр.: с. 235–236. – 10000 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

35 **Исаев, И. П.** Совершенствование экспериментальных исследований сцепления колеса локомотива с рельсом / И. П. Исаев, А. Л. Голубенко. // Железные дороги мира. – 1988. – № 10. – С. 2–10. – Текст : непосредственный

36 **Исаев, И. П.** Особенности сцепления колес локомотива с рельсами в режиме торможения / И. П. Исаев. // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 6. – С. 20–26. – Текст : непосредственный

37 **Ишлинский, А. Ю.** О проскальзывании в области контакта при трении качения / А. Ю. Ишлинский. // Известия АН СССР, Отд. техн. наук. – 1956. – № 6. – С. 3–15. – Текст : непосредственный

38 **Кащеев, Н. Т.** Заклинивание колесных пар и меры его предупреждения / Н. Т. Кащеев, М. А. Спицин. – Москва : Транспорт, 1964. – 176 с. : ил. – Библиогр.: с. 171–174. – 4500 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный

39 **Керопян, А. М.** Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы колесо-рельс карьерных локомотивов в режиме тяги : специальность 05.05.06 «Горные машины» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Керопян Амбарцум Мкртичевич ; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – Екатеринбург, 2015. – 233 с. – Текст : непосредственный.

40 **Ключев, В. И.** Теория электропривода : учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. : ил. – Библиогр.: с. 689. – 1000 экз. – ISBN 5-283-00642-5. – Текст : непосредственный.

41 **Копылов, И. П.** Математическое моделирование электрических машин : учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / И. П. Копылов. – Москва : Высшая школа, 2001. – 327 с. : ил. – Библиогр.: с. 319. – 8000 экз. – ISBN 5-06-003861-0. – Текст : непосредственный.

42 **Копылов, И. П.** Электрические машины : учебник для бакалавров. – 2-е изд., перераб. и доп. / И. П. Копылов. – Москва : Юрайт, 2012. – 675 с. : ил. ; 21 см. – 1000 экз. – ISBN 978-5-9916-1501-3. – Текст : непосредственный.

43 **Корчагин, В. О.** Улучшение тяговых качеств тепловозов воздействием постоянного магнитного поля на контакт трибосистемы колесо – рельс : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Корчагин Вадим Олегович ; РУТ (МИИТ). – Москва, 2017. – 145 с. – Текст : непосредственный.

44 **Косиков, С. И.** Фрикционные свойства железнодорожных рельсов / С. И. Косиков. – Москва : Наука, 1967. – 112 с. : ил. – Библиогр.: с. 109–111. – 4500 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

45 **Космодамианский, А. С.** Математическая модель тягового электропривода колесной пары тепловоза с электрической системой повышения сцепных качеств / А. С. Космодамианский, А. И. Ивахин, Д. В. Котяев. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3. – С. 67–73. – Текст : непосредственный

46 **Космодамианский, А. С.** Совершенствование параметров импульсов электрического тока в системах повышения тяговых качеств многоосных тепловозов / А. С. Космодамианский, А. И. Ивахин, Д. В. Котяев, А. Г. Галичев. // Совершенствование энергетических машин : сборник научных трудов. – Брянск : БГТУ, 2021. – С. 130–136. – Текст : непосредственный

47 **Коссов, В. С.** Снижение нагруженности ходовых частей локомотивов и пути : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Коссов Валерий Семенович ; Моск. гос. ун-т путей сообщ. МПС РФ. – Москва, 2001. – 339 с. – Текст : непосредственный.

48 **Коссов, В. С.** Реализация локомотивами предельных тяговых усилий / В. С. Косов [и др.] . // Мир транспорта. – 2009. – № 1. – С. 34–41. – Текст : непосредственный

49 **Коссов, В. С.** Электрические системы повышения сцепных качеств тепловозов как возможность увеличения ресурса колеса / В. С. Коссов, Д. В. Котяев, А. И. Ивахин // Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта : сборник трудов международной научн. конф., 22 июня 2021 г. – Коломна, 2021. – С. 208–215. – Текст : непосредственный.

50 **Костецкий, Б. И.** Структурно-энергетическая теория трения, смазки и износа / Б. И. Костецкий. // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1986. – № 9. – С. 45–59. – Текст : непосредственный

51 **Котяев, Д. В.** Электрические системы повышения сцепления тепловозов / Д. В. Котяев, А. С. Космодамианский, А. И. Ивахин, А. Г. Галичев. // Совершенствование энергетических машин: Сборник научных трудов. – Брянск : БГТУ, 2021. – С.114–122. – Текст : непосредственный

52 **Котяев, Д. В.** Применение макетной системы для проведения натурных экспериментальных исследований влияния электрического тока на повышение тяговых качеств тепловоза / Д. В. Котяев, А. С. Космодамианский, А. И. Ивахин. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 1. – С. 10–17. – Текст : непосредственный

53 **Кравченко, В. Я.** Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации / В. Я. Кравченко // ЖЭТФ. – 1966. – С. 6–10. – Текст : непосредственный.

54 **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. – Москва : Машиностроение, 1968. – 480 с. – Текст : непосредственный.

55 **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1977. – 526 с. : ил. – Библиогр.: с. 483–515. – 11000 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

56 **Креттек, О.** Современные достижения в исследовании проблемы сцепления / О. Креттек. // Железные дороги мира. – 1974. – № 10. – С. 03–16. – Текст : непосредственный

57 **Лубягов, А. М.** Повышение величины и стабильности коэффициента сцепления колес локомотива с рельсами путем применения модификаторов трения (на примере электровоза ВЛ-80) : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидат технических наук / Лубягов Александр Михайлович ; РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2002. – 18 с. – Текст : непосредственный.

58 **Лужнов, Ю. М.** О механизме образования слоев загрязнений на поверхностях трения железнодорожных колес и рельсов / Ю. М. Лужнов, Р. Г. Черепашенец. // Труды МИИТ. – Москва, 1973. – Вып. 445. – С. 39. – Текст : непосредственный

59 **Лужнов, Ю. М.** Физические основы и закономерности сцепления колес локомотивов с рельсами : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лужнов Юрий Михайлович ; МИИТ. – Москва, 1978. – 403 с. – Текст : непосредственный.

60 **Лужнов, Ю. М.** Сцепление колес с рельсами (природа и закономерности) / Ю. М. Лужнов. // Труды ВНИИЖТ. – Москва : Интекст, 2003. – 144 с. – Текст : непосредственный

61 **Лужнов, Ю. М.** Сцепление колес с рельсами в условиях ужесточения их режимов нагружения / Ю. М. Лужнов. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 7. – С. 20–25. – Текст : непосредственный

- 62 **Лужнов, Ю. М.** Нанотрибология сцепления колес с рельсами / Ю. М. Лужнов. – Москва : Интекст, 2009. – 176 с. – Текст : непосредственный
- 63 **Лужнов, Ю. М.** Модель фрикционного контакта колеса с рельсом и возможности управления его свойствами / Ю. М. Лужнов, В. А. Попов, Г. М. Седов. // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – № 1. – С. 30–32. – Текст : непосредственный
- 64 **Лурье, Л. И.** Пространственные задачи теории упругости / Л. И. Лурье. – Москва : Гостехтеоретиздат, 1955. – 492 с. : ил. – Библиогр.: в конце глав. – 5000 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.
- 65 **Ляпушкин, Н. Н.** Физические процессы при скольжении колеса по рельсу / Н. Н. Ляпушкин. // Мир транспорта. – 2006. – № 4. – С. 16-23. – Текст : непосредственный
- 66 **Ляпушкин, Н. Н.** Сопоставление процессов холодной сварки в условиях трения скольжения и качения колеса по рельсу со скольжением / Н. Н. Ляпушкин. // Наука и техника транспорта. – 2007. – № 2. – С. 73–78. – Текст : непосредственный
- 67 **Ляпушкин, Н. Н.** Модель физических процессов в пятне контакта при движении колеса по рельсу со скольжением / Н. Н. Ляпушкин, А. Н. Савоськин. // Проблемы механики на транспорте. – 2008. – № 1. – С. 33–42. – Текст : непосредственный
- 68 **Марков, Д. П.** Коэффициенты трения и сцепления при взаимодействии колес с рельсами / Д. П. Марков. // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – № 4. – С. 3–9. – Текст : непосредственный
- 69 **Меншутин, Н. Н.** Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях / Н. Н. Меншутин. // Труды ЦНИИ МПС. – Москва : Трансжелдориздат, 1960. – Вып. 188. – С. 113–132. – Текст : непосредственный
- 70 **Меншутин, Н. Н.** Скольжение тяговых колес и новая методика его определения / Н. Н. Меншутин. // Вестник ВНИИЖТ. – 1958. – № 3. – С. 15–19. – Текст : непосредственный
- 71 **Меншутин, Н. Н.** Зависимость между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары локомотива / Н. Н. Меншутин. // Вестник ВНИИЖТ. – 1960. – № 7. – С. 13–15. – Текст : непосредственный

72 Методика определения экономической эффективности маневровых и промышленных тепловозов. Издание официальное. РТМ 24.040.016-81. Москва: Министерство тяжелого и транспортного машиностроения, 1981. -194 с. – 220 экз... и пр. – Текст : непосредственный

73 Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта. Утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 27 декабря 2007 года № 2459р. – 2007. – 62 с. – Текст : непосредственный

74 Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Вторая редакция. Утверждены Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике, № ВК 477 от 21.06.1999 г. – Москва: «Экономика». – 2000. – 421 с. – 10000 экз. – Текст : непосредственный

75 Методическими рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте. Утверждены Указанием МПС России от 31.08.1998г. № В-1024у. – 124 стр. – Библиогр.: с. 120 – 123. – Текст : непосредственный

76 **Минов, Д. К.** Роль скольжения колес при реализации тягового усилия и структура коэффициента сцепления при электрической тяге / Д. К. Минов. // Известия АН СССР, ОТН. – 1947. – № 4. – С. 03–06. – Текст : непосредственный

77 **Минов, Д. К.** Теория процесса реализации сил сцепления при электрической тяге и способы повышения их использования / Д. К. Минов. // Проблемы повышения эффективности работы транспорта : сборник научных трудов. – Москва : АН СССР, 1953. – Вып. 1. – С. 08–09. – Текст : непосредственный

78 **Минов, Д. К.** Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей / Д. К. Минов. – Москва : Транспорт, 1965. – 268 с. : ил. – Библиогр.: с. 262–264. – 4000 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

79 **Михин, Н. М.** Внешнее трение твердых тел / Н. М. Михин. – Москва : Наука, 1977. – С. XX. : ил. – Библиогр.: с. 210–219. – 2500 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

80 **Мугинштейн, Л. А.** Нестационарные режимы тяги. Сцепление. Критическая норма массы поезда / Л. А. Мугинштейн, Л. А. Лисицын. – Москва : Интекст, 1996. –

176 с. : ил. – Библиогр.: с. 173–175. –500 экз. – ISBN 5-89277-001-X. – Текст : непосредственный.

81 **Мухелишвили, Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – Москва : Наука, 1966. – 708 с. : ил. – Библиогр.: с. 670–698. – 11000 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

82 **Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса: монография / У.Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн, Х. Турне, В. Эберсен.** – Москва : Интертекст, 2002. – 408 с. : ил. – Библиогр.: с. XX–XX. – XX00 экз. – ISBN 5-89277-037-0. – Текст : непосредственный.

83 **Осипов, С. И.** Основы электрической и тепловозной тяги / С. И. Осипов. – Москва : Транспорт, 1985. – 408 с. : ил. – Библиогр.: с. 377–379. – 1000 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

84 Патент № 2252166 Российская Федерация, МПК В61С 15/08 (2006.01). Способ повышения сцепных свойств рельсового транспортного средства и устройство для его осуществления : № 2003134406/11 : заявл. 28.11.2003 : опубл. 20.05.2005 / Ламанов А. В., Щурин К. В., Слутин А. Ф. – Текст : непосредственный.

85 Патент № 2281216 Российская Федерация, МПК В61С 15/08 (2006.01). Устройство для повышения коэффициента сцепления ведущих колес локомотива с рельсами : № 2005103809/11 : заявл. 14.02.2005 : опубл. 10.08.2006 / Лемешко В. И., Багров Г. В., Хохлов Д. А., Воробьев В. И., Воробьев Д. В., Ивахин А. И. – Текст : непосредственный.

86 Патент № 2314948 Российская Федерация, МПК В61С 9/00 (2006.01), В61С 15/08 (2006.01). Электрическая передача тепловоза : № 2006117633 : заявл. 22.05.2006 : опубл. 20.01.2008 / Ивахин А. И., Коссов В. С., Бабков Ю. В., Волохов Г. М. – Текст : непосредственный.

87 Патент № 2340491 Российская Федерация, МПК В61С 15/00 (2006.01). Устройство для увеличения сцепления колесной пары тепловоза с рельсами : № 2007133051/11 : заявл. 03.09.2007 : опубл. 10.12.2008 / Багров Г. В., Мицкович В. С., Воробьев В. И. и [др.]. – Текст : непосредственный.

88 Патент № 2405696 Российская Федерация, МПК В61С 15/00 (2006.01). Устройство для повышения коэффициента сцепления колес локомотива с рельсами : №

2009132121/11 : заявл. 27.08.2009 : опубл. 10.12.2010 / Попов В. А., Лужнов Ю. М. – Текст : непосредственный.

89 Патент № 2467899 Российская Федерация, МПК В61С 15/08 (2006.01). Электрическая передача тепловоза : 2011115033/11 : заявл. 18.04.2011 : опубл. 27.11.2012 / Ивахин А. И., Яцков М. В. – Текст : непосредственный.

90 Патент № 2502623 Российская Федерация, МПК В61С 15/10 (2006.01). Устройство для подачи песка под колеса локомотива : № 2012124480/11 : заявл. 14.06.2012 : опубл. 27.12.2013 / Керопян А. М., Лужнов Ю. М. – Текст : непосредственный.

91 Патент № 2504492 Российская Федерация. Способ увеличения сцепления колеса с рельсом : № 2012124483 : заявл. 14.06.2012 : опубл. 20.01.2014 / Керопян А. М., Лужнов Ю. М. – Текст : непосредственный.

92 Патент № 2730723 Российская Федерация, МПК В60L 50/11 (2019.01), В61С 15/08 (2006.01). Электрическая передача тепловоза: № 2020105528 : заявл. 06.02.2020 : опубл. 25.08.2020 / Ивахин А. И., Коссов В. С., Котяев Д. В. [и др.]. – Текст : непосредственный.

93 Патент № 2735165 Российская Федерация, МПК В60L 50/11 (2019.01), В61С 15/08 (2006.01), В60L 15/20 (2006.01). Электрическая передача тепловоза : № 2020105526 : заявл. 06.02.2020 : опубл. 28.10.2020 / Ивахин А. И., Коссов В. С., Котяев Д. В. [и др.]. – Текст : непосредственный.

94 **Петров, Н. П.** О непрерывных тормозных системах / Н. П. Петров // Известия Санкт-Петербургского технологического института. – Санкт-Петербург, Типография Императорской Академии наук, 1878. – № 4. – С. 08–14. – Текст : непосредственный.

95 **Петров, Н. П.** Сопротивление поезда на железной дороге / Н. П. Петров. – Санкт-Петербург, 1889. – 394 с. – Текст : непосредственный.

96 **Петров, Н. П.** К вопросу о сопротивлении паровоза и силе его тяги / Н. П. Петров // Записки Русского технического общества. – 1904. – № 1. – С. 35–53. – Текст : непосредственный.

97 **Петраков, Д. И.** Оценка тяговых качеств тепловозов с электропередачей с учетом воздействия электрического тока на зоны контакта колес с рельсами : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и

электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук / Петраков Дмитрий Иванович ; БГТУ. – Брянск, 2013. – 138 с. – Текст : непосредственный.

98 **Попов, В. А.** Проблемы обмена энергией во фрикционном контакте колеса локомотива и рельса / В. А. Попов, Ю. М. Лужнов. – Текст : непосредственный // V Международный симпозиум по трибофатике: сборник трудов международной научн. конф., 25 октября – 1 ноября 2010 г., г. – Минск, 2010. – С. 169–172.

99 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с. – Текст : непосредственный.

100 **Сакало, В. И.** Контактные задачи железнодорожного транспорта / В. И. Сакало, В. С. Коссов. – Москва : Машиностроение, 2004. – 496 с : ил. – Библиогр.: с. 482–492. – 1000 экз. – ISBN 5-217-03211-1. – Текст : непосредственный.

101 **Самме, Г. В.** Закономерности силы трения контакта колесо-рельс в режиме тяги локомотива : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук / Самме Георгий Вольдемарович; – Москва, 1985. – 266 с. – Текст : непосредственный.

102 **Самме, Г. В.** Возможность повышения силы тяги электровозов по сцеплению / Г. В. Самме. // Железнодорожный транспорт. – 1995. – № 6. – С. 35–38. – Текст : непосредственный.

103 **Самме, Г. В.** Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами : монография / Г. В. Самме. – Москва : Маршрут, 2005. – 80 с. : ил. – Библиогр.: с. 76–78. – 1000 экз. – ISBN 5-89035-221-0. – Текст : непосредственный.

104 Самме, Г. В. Новые результаты в теории сцепления локомотива / Г. В. Самме. // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 3 (28). – С.14–16. – Текст : непосредственный

105 **Спицын, М. А.** Физическая природа сцепления колес с рельсами и способы повышения коэффициента сцепления / М. А. Спицын. // Науч. труды Всесоюз. заоч. Ин-та инж. ж/д транспорта. – Москва, 1961. – Вып. 212. – 34 с. – Текст : непосредственный

106 **Степнов, М. Н.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М. Н. Степнов. – Москва : Машиностроение,

1985. – 232 с. : ил. – Библиогр.: с. 223–224. – 10500 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

107 **Тихомиров, В. Б.** Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. – Москва : Легкая индустрия, 1974. – 262 с. : ил. – Библиогр.: с. 258–261. – 5400 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

108 **Ткаченко, В. П.** Кинематическое сопротивление движению рельсовых экипажей: монография / В. П. Ткаченко. – Луганск: ВУГУ, 1996. – 200 с. : ил. – Библиогр.: с. 192–197. – 1000 экз. – ISBN 5-7763-8884-8. – Текст : непосредственный.

109 **Топоров, Ю. В.** К вопросу о влиянии влажности на внешнее трение твердых тел / Ю. В. Топоров. // Инженерно-физический журнал, Т. III. – 1966. – № 4. – С. 215–218. – Текст : непосредственный

110 **Троицкий, О. А.** Электропластический эффект в металлах / О. А. Троицкий, А. Г. Розно. // ФТТ. – 1970. – Т. 12. – Вып. 1. – С. 203–210. – Текст : непосредственный

111 Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах : монография / А.В. Иванов-Смоленский, Ю. В. Абрамкин, А. И. Власов [и др.]; под общ. ред. А. В. Иванова-Смоленского. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 216 с. : ил. – Библиогр.: с. 210–213. – 4400 экз. – ISBN отсутствует. – Текст : непосредственный.

112 **Филонов, С. П.** Тепловоз 2ТЭ116 / С. П. Филонов [и др]. – Москва : Транспорт, 1996. – 334 с. : ил. – Библиогр.: отсутствует. – 10000 экз. – ISBN 5-277-01295-8. – Текст : непосредственный.

113 **Флячинский, К. П.** Влияние условий взаимодействия колеса и рельса на фрикционные процессы в зоне контакта : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой должности кандидат технических наук / Флячинский Константин Павлович ; ВНИИЖТ. – Москва, 1993. – 179 с. – Текст : непосредственный.

114 **Френкель, Э. М.** К вопросу о сцеплении колеса с рельсом / Э. М. Френкель. // Труды ХИИТ. – Москва : Трансжелдориздат. – 1953. – Вып. 23. – С. 106 – 112. – Текст : непосредственный

115 **Френкель, Я. И.** Теория электрических контактов между металлами / Я. И. Френкель. // ЖЭТФб. – 1946. – Т. 16. – Вып. 4. – 216 с. – Текст : непосредственный

- 116 **Фролов, А. В.** Повышение тяговых свойств тепловозов / А. В. Фролов. // Известия ПГУПС. – 2011. – № 1. – С. 91–100. – Текст : непосредственный
- 117 **Чичинадзе, А. В.** Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для технических вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и [др.]; под ред. А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 2001. – 664 с. : ил. – Библиогр.: с. 660. – 1000 экз. – ISBN 5-217-03053-4. – Текст : непосредственный.
- 118 **Штаерман, И. Я.** Контактная задача теории упругости / И. Я. Штаерман. – Москва: Гостехтеоретиздат, 1949. – 270 с. : черт. ; 22 см. – Текст : непосредственный.
- 119 **Andrews H. J.** The adhesion of electric locomotives / H. J. Andrews // The proceeding of the Institution of Electrical Engineers. – 1955. – Vol. 102, Part. A, № 6. – P. 785–803.
- 120 **Aydelott J. C.** Brake Applications Limit Wheel Slip / J. C. Aydelott // Ry Loc. & Cars. – 1961. – Vol. 135, № 3. – P. 101–108.
- 121 **Barwell F. J.** Surface contact in theory and practice / F. J. Barwell // Proc. Inst. Mech. London. – 1961. – P. 175, 853.
- 122 **Barwell F. J.** The N.E.L. contribution to adhesion studies / F. J. Barwell, R.G. Woolacot // Convention on adhesion. Paper 9. London. – 1963. – Vol. 178. – P. 39–40.
- 123 **Barwell F. J., Woolacot R.G.** Further studies of adhesion / F. J. Barwell, R. G. Woolacot // Mechanical engineering research laboratory. London. – 1965, January. – Vol. 123. – P. 85–90.
- 124 **Bowden F. P., Tabor D.** The friction and lubrication of solids / F. P. Bowden, D Tabor // Oxford. – 1954. – P.195.
- 125 **Carter F. W.** On the Action of Locomotive Driving Wheel / F. W. Carter // Proc. Royal Society. – 1926. – Ser. A, Vol. 112. – P. 151.
- 126 **Collins A. H.** Recent research on Adhesion / A. H. Collins, C. Pritchard // The Railway Engineering Journal. – 1972. – № 5 – P. 19–34.
- 127 **Fromm H.** Berechnung des Schlupfes beim Rollen deformierbaren Scheiben / H. Fromm // ZAMM. – 1927. – Vol. 7. – P. 27–58.
- 128 **Ivakhin A. I.** Wykorzystanie prądu elektrycznego w układach lokomotiw spalinowych z przekładnią elektryczną do zwiększenia przyczepności kół pojazdu z szyną /

A. I. Ivakhin, D. V. Kotiaev, M. Babel // Technika transport szynowego. – 2020. – № 3–4. – C. 53–57.

129 **Johnson K. L.** The effect of a tangential contact force upon the rolling motion of an elastic sphere on a plane / K. L. Johnson // Trans. ASME. – 1958. – Appl. Mech. Ser. E. J., Vol. 25. – P. 339–344.

130 **Johnson K. L.** The effect of spin upon the rolling motion of an elastic sphere on a plane / K. L. Johnson // Trans. ASME. – 1958. – Appl. Mech. Ser. E. J., Vol. 25. – P. 332–338.

131 **Johnson K. L.** Rolling Contact Phenomena. Plastic Deformation in Rolling Contact / K. L. Johnson // CISM Courses. Udine, Itali. – 2001. – N-411.– P. 163–201.

132 **Kalker J. J.** Simplified theory of rolling contact / J. J. Kalker // Delft progress report. Series C: Mechanical and aeronautical engineering and shipbuilding. – 1973. – № 1. – P. 1–10.

133 **Kalker J. J.** Some new results in rolling contact / J. J. Kalker, J. Piotrowski // Vehicle System Dynamics. – 1989. – 18. – P. 223–242.

134 **Kalker J. J.** There-dimensional elastic bodies in rolling contact / J. J. Kalker. – Dordrecht; Boston; London: Kluwer academic publishers, 1990. – 314 p.

135 **Logston C. F.** Locomotive Friction Creep Studies / C. F. Logston, G. S. Itamic // Trans ASME, J. Jng., 102. – 1980. – № 9. – P. 275–281.

136 **Lucas H.** Automatic wheelslip control / H. Lucas, B. Wojtas // The Institution of Locomotive Engineers . – 1966/67. Vol. 56, Part №5.– P. 67–72.

Акт опытных испытаний

ГАЗПРОМТРАНС

АКТ

опытных испытаний

«27» апреля 2023 г.Обская

Комиссия в составе:

председатель комиссии: Начальник Управления эксплуатации пути и
тягового состава Размадзе Владимир ГогиевичЧлены комиссии: Начальник отдела локомотивного хозяйства Безносов
Эдуард ВладимировичЗаместитель начальника отдела локомотивного хозяйства
Кравченко Валентин НиколаевичНачальник лаборатории неразрушающего контроля,
технической диагностики Кратасюк Александр
Александрович

провела опытные испытания электрической системы повышения сцепления колес с рельсами тепловоза ТЭМ7А 0441. Испытания проводились на участке ж.д. линия Обская-Карская.

При использовании упрощенной электрической системы повышения сцепления подача песка под колесные пары тепловоза сокращена на 40-50%.

Председатель комиссии

В.Г. Размадзе

Члены комиссии

Э.В. Безносов

В.Н. Кравченко

А.А. Кратасюк