

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи



**Филина Ольга Алексеевна**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЩЕТОЧНО-  
КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Щуров Николай Иванович,  
доктор технических наук, профессор  
Научный консультант:  
Цветков Алексей Николаевич  
кандидат технических наук, доцент

Новосибирск, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ УСТРОЙСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	13
1.1 Устройство тягового электродвигателя постоянного тока и щеточно-коллекторного узла.....	13
1.2 Современное применение тяговых электродвигателей постоянного тока .....	17
1.3 Анализ проблем контроля технического состояния тяговых электродвигателей и условий эксплуатации городского подвижного состава .....	19
1.4 Используемые направления повышения ресурса щеточно-коллекторного узла.....	23
Выводы по главе 1.....	25
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	26
2.1 Общее состояние проблемы и анализ состояния щеточно-коллекторного узла.....	26
2.2 Методы оценки повышения эксплуатационной надёжности и остаточного ресурса элементов щеточно-коллекторного узла.....	35
2.3 Методика расчета эксплуатационной надёжности щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока на основе комплексной математической модели.....	44
Выводы по главе 2.....	56
ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	58

3.1 Методика прогнозирования остаточного ресурса щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока .....	58
3.2 Расчет механических колебаний щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока с учетом вибрации.....	68
3.3 Способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторного узла с целью оценки состояния и определения остаточного ресурса .....	75
Выводы по главе 3.....	85
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЩЕТОЧНОГО УЗЛА.....	87
4.1 Конструкция и исследование усовершенствованного щеточного узла с повышенным ресурсом.....	87
4.2 Метод проведения эксперимента и способы измерений.....	96
4.3 Оценка и прогнозирование назначенного ресурса щёток.....	104
4.4 Верификация математической модели с экспериментальными данными ..	115
Выводы по главе 4.....	128
ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЩЕТОЧНОГО УЗЛА И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РАБОТ .....	129
5.1 Области внедрения усовершенствованного щеточного узла.....	129
5.2 Определение экономии от внедрения усовершенствованного щеточного узла (на примере троллейбусного депо г. Казани).....	130
5.3 Рекомендации по улучшению планово-предупредительных работ.....	137
Выводы по главе 5.....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	147
ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патенты на полезную модель, на изобретения и свидетельства на программы для ЭВМ.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акты внедрения и проведения экспериментов.....	173

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в мире эксплуатируется значительное количество тяговых электродвигателей постоянного тока (ЭДПТ), которые рассчитаны на определенный ресурс. После его выработки, надежность электродвигателей постоянного тока снижается. Продление остаточного ресурса электродвигателей постоянного тока на основе совершенствования его конструкции и прогноза его технического состояния на основе результатов диагностики экономически целесообразно.

Основными потребителями ЭДПТ - это такие отрасли как железнодорожный и городской электрический транспорт, металлургия, нефтехимия и другие потребители (краны различных производств, карьерные самосвалы, автотранспорт, авиация и водный транспорт).

Основные элементы ЭДПТ: статор (станина, главный и дополнительные полюса), якорь, щеточно-коллекторный узел (ЩКУ). Выделяются основные неисправности ЭДПТ: статор – неправильное чередование главных и дополнительных полюсов; якорь – обрыв в обмотке, соединение обмотки с корпусом, витковое замыкание, перегрев обмотки; ЩКУ – искрение щеток, сопровождающее повышенный нагрев коллектора и всего электродвигателя, чрезмерный износ и сколы щеток, их зависание и сдвиг щеток с линии геометрической нейтрали.

Щеточно-коллекторный узел (ЩКУ) - один из важных узлов ЭДПТ. Его отказ ведет к потере работоспособности всего электродвигателя. По причине отсутствия надежных методик контроля технического состояния ЩКУ и своевременного принятия мер по восстановлению работоспособности около 50-60 % ЭДПТ приходит в негодность из-за отказов щеток, не отработав до регламентного срока их замены.

Одним из методов повышения надежности ЩКУ является внедрение современных, высокоточных, объективных методов контроля технического состояния и диагностики, что позволяет своевременно определить зарождающиеся дефекты, спрогнозировать изменение технического состояния и принять меры к

предотвращению возникновения отказа.

На основе исследований существующих конструктивных решений и анализа опыта эксплуатации ЭДПТ, а также научных исследований, проведенных в этой области известными учеными, разработаны новая конструкция щеточного узла, метод контроля технического состояния и предложен план организационно-технических мероприятий по продлению работоспособного состояния ЭДПТ после выработки заданного ресурса работы и переходу на обслуживание по фактическому состоянию.

Одной из приоритетных задач на перспективу до 2030 года, изложенных в Стратегии по отраслевой научно-технической «Программе по диагностированию подвижного состава по ходу движения, без снятия с пути следования» от 15 октября 2008 г. № 2167р холдинга ОАО «РЖД» является повышение надежности тяговых электродвигателей [1] и Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020г. №1582-р.

**Проблемы исследования.** Улучшение качества коммутации и снижение вибрации в ЩКУ с измененной конструкцией узла влечет за собой увеличение ресурса ЭДПТ, снижение вероятности возникновения ресурсного отказа в процессе эксплуатации. Разработана новая конструкция ЩКУ, метод контроля технического состояния и организационно-технические мероприятия по продлению остаточного ресурса ЭДПТ после выработки работы по результатам вибродиагностики. Основное внимание уделено исследованию проблем повышения надежности и продления назначенного ресурса тяговых ЭДПТ, поскольку себестоимость таких электродвигателей относительно велика, а количество их в промышленности и на транспорте исчисляется сотнями тысяч.

Таким образом, исследования, направленные на выявление причин выхода из строя ЩКУ ЭДПТ и разработку мероприятий по повышению надежности их работ, являются актуальными.

**Степень разработанности темы исследования.** В решение проблем разработки электродвигателей постоянного тока и щеточно-коллекторного узла внесли вклад такие учёные как В.Д. Авилов, В.Н. Антипов, О.Г. Вегнер, В.Т. Касьянов, В.В. Харламов, М.Ф. Карасёв, А.С. Курбасов, В.П. Толкунов, П.С.

Лившиц и многие другие.

Из работ по повышению надежности электрических машин следует отметить труды В.В. Бублика, В.К. Фоменко, Е.С. Дорохиной, Д.Н. Хомченко, В.Н. Забоина, Р.Г. Идиятуллина, Е.Л. Степанова, И.П. Исаева, А.Л. Курочка, и многих других.

Вопросам вибродиагностики посвящены работы Р.Г. Гемке, В.Я. Кучера, В.С. Петухова, Ю.В. Ванькова, И.В. Ившина, Ю.А. Азовцева, В.А. Русова, А.В. Баркова, Н.А. Барковой, А.А. Гаузе, М.В. Акутина, А.Д. Умурзаковой, П.А. Зрюмова, М.Г. Баширова, Р. Бейкера, С.В. Боронина, А.В. Светличного, Ю.В. Горста, А.С. Завьялова, А.А. Сарварова, А.Н. Зубко, В.Г. Каширского и многих других.

**Объект исследования диссертационной работы:** является тяговый электродвигатель постоянного тока.

**Предмет исследования:** методы и средства, предназначенные для повышения надежности работы щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока.

**Целью диссертационной работы** является повышение надежности работы тягового электродвигателя постоянного тока на основе разработки усовершенствованного щеточного узла и внедрения эффективной системы контроля технического состояния.

Для достижения цели в диссертации были поставлены **следующие задачи:**

1. Провести анализ существующих конструкций щеточно-коллекторного узла, условий и особенностей эксплуатации, определить факторы, влияющие на надежность функционирования щеточно-коллекторного узла, разработать методы и технические средства для повышения надежности тягового электродвигателя постоянного тока;

2. Разработать математическую модель щеточно-коллекторного узла, с учетом его технических и конструкционных характеристик, с целью определения влияния различных видов отказов щеточно-коллекторного узла;

3. Разработать новый метод контроля технического состояния щеточно-коллекторного узла по результатам мониторинга вибрации тягового электродвигателя постоянного тока и создать компьютерную программу для

диагностики функционирования усовершенствованного щеточного узла тягового электродвигателя постоянного тока;

4. Разработать и создать щеточный узел усовершенствованной конструкции с целью снижения вибрации и продления ресурса щетки;

5. Разработать методы и алгоритмы определения остаточного ресурса щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока по результатам контроля технического состояния и провести экспериментальные исследования.

### **Научная новизна:**

1. Разработана математическая модель для выявления видов отказов щеточно-коллекторного узла с учетом его технических характеристик, влияющих на показатель надежности в процессе эксплуатации;

2. Разработан метод мониторинга вибрации щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока, который проводится без демонтажа тягового электродвигателя с подвижного состава и фактически может применяться для диагностики состояния основных узлов непосредственно в процессе эксплуатации для своевременного выявления дефектов;

3. Разработан и исследован опытный образец щеточного узла с усовершенствованной конструкцией нажимной пластины и составной щетки, улучшающие конструктивные и технические параметры электродвигателя при проектировании, повышающий качество коммутации и обеспечивающей высокую виброустойчивость щетки;

4. Разработана компьютерная программа по контролю технического состояния щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока по спектрам вибрации и созданы методы, направленные на повышение ресурса щеток в процессе эксплуатации с применением средств оценки технического состояния и отклонений от нормального функционирования.

**Теоретическая значимость** проведённых исследований заключается в разработке математической модели щеточно-коллекторного узла для выявления неисправностей и алгоритмов определения остаточного ресурса щеток, а также

созданный новый метод контроля технического состояния щеточно-коллекторного узла.

### **Практическая значимость результатов исследований:**

1. На основании исследования видов отказов щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока разработана усовершенствованная конструкция щеточного узла, которая позволяет увеличить ресурс работы щеток и снизить затраты на техническое обслуживание тяговых электродвигателей постоянного тока в процессе эксплуатации,

2. Результаты научных исследований внедрены на электротранспортных предприятиях Сервисное локомотивное депо Юдино-Казанский и ООО «ЛокоТех-Сервис» филиал «Западный» п. Юдино, Муниципальном унитарном предприятии «Метроэлектротранс» Троллейбусное депо № 2 г. Казань, и получены акты внедрения;

3. Разработаны алгоритмы для перехода к ремонту электродвигателей по фактическому состоянию для электроподвижного состава.

**Обоснованность и достоверность выводов и результатов работы** подтверждается использованием теоретических положений, опирающихся на классические труды в области теоретической электротехники, теории электрических машин, применением методов математического имитационного моделирования, корректностью принятых допущений при исследованиях, согласованностью результатов моделирования с расчетными данными и результатами численных инженерных экспериментов, положительными результатами полученных решений.

**Методология и методы диссертационного исследования.** При выполнении настоящей работы были использованы методы математической статистики, математического анализа и моделирования, физического эксперимента со значимым числом выборок технических параметров.

Расчёты выполнены с использованием сред математического моделирования интегрированных пакетов Mathcad, Statistica, MatLab, на языке программирования Visual Basic for Applications.



### **Соответствие диссертации научной специальности**

Диссертация соответствует специальности 2.4.2 –Электротехнические комплексы и системы. Полученные в работе научные результаты соответствуют пунктам Паспорта специальности:

п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования промышленного назначения» - Разработана математическая модель щеточно-коллекторного узла для выявления видов отказов, с учетом его технических характеристик, и усовершенствована конструкция нажимной пластины с целью уменьшения вибрации и продления ресурса;

п. 2 «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов» - Разработана система мониторинга вибрации щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя, которая проводится без демонтажа и фактически может применяться для диагностики состояния основных узлов непосредственно в процессе эксплуатации для своевременного выявления дефектов;

п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов» - Разработаны: а) алгоритм определения остаточного ресурса на основе диагностики и контроля щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя; б) компьютерная программа по контролю технического состояния щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя.

**Личный вклад автора.** Соискателю принадлежит проведение моделирования, разработка усовершенствованной конструкции щеточного узла, анализ полученных данных и разработка математической модели спектрального анализа вибрации щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя

постоянного тока, разработка способа мониторинга вибрации, проведение экспериментальных исследований.

Научный консультант Цветков А.Н. участвовал в выполнении практической части работы в г. Казань, а именно по разработке нового метода контроля технического состояния щеточно-коллекторного узла по результатам мониторинга вибрации тягового электродвигателя постоянного тока и созданию компьютерной программы для диагностики функционирования усовершенствованного щеточного узла тягового электродвигателя постоянного тока.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока, созданная на основе статистической обработки данных, собранных на эксплуатационных электротранспортных предприятиях с 2010 по 2022 годов г. Казани для выявления видов отказов щеточно-коллекторного узла, позволяющая формировать прогнозные данные об остаточном ресурсе щетки;

2. Метод мониторинга вибрации щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока, проводимый без демонтажа тягового электродвигателя на подвижном составе и применяемый для диагностики состояния основных узлов непосредственно в процессе эксплуатации;

3. Разработанный опытный образец щеточного узла с усовершенствованной конструкцией нажимной пластины и щетки, улучшающей качество коммутации, обеспечивающей высокую виброустойчивость щетки, увеличивающей ее ресурс и позволяющей снизить затраты на техническое обслуживание тягового электродвигателя постоянного тока в процессе эксплуатации;

4. Метод и компьютерная программа для диагностики функционирования щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока с применением метода оценки технического состояния по спектрам вибрации;

5. Метод и алгоритм определения остаточного ресурса щеточно-коллекторного узла по оценке технического состояния и отклонений от нормы функционирования, учитывающий пригодность к дальнейшей эксплуатации тягового электродвигателя постоянного тока.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались: на международных научно-технических конференциях: Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы (МНТК "ИМТОМ", Казань, 2017, 2018, 2019, 2022 гг.); International Scientific and Technical Conference (SES, Казань, 2019, 2021, 2022 гг.); Международная научно-практическая конференция молодых исследователей имени Д.И. Менделеева (ТИУ, Тюмень, 2019); Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС, Москва, 2018, 2019, 2020 гг.); Международный симпозиум «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение» (SUSE-2021, Казань); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (ICIEAM, Сочи, 2021, 2022, 2023 гг.); International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE, IEEE, Москва, 2022, 2023 гг.);

на всероссийских научно - технических конференциях: Информационные технологии в энергетическом комплексе (Екатеринбург, 2016 г.); Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития (Самара-Оренбург, 2017 г.); Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы (Саратов, 2018); Высокие технологии в машиностроении и ветроэнергетике (Рязань, 2021, 2022, 2023 гг.); Машины, агрегаты и процессы: проектирование, создание и модернизация (Санкт-Петербург, 2022).

### **Внедрение**

Полученные теоретические и практические результаты работы использованы:

- на базе Сервисного локомотивного депо Юдино-Казанский, ООО «ЛокоТех-Сервис» филиал «Западный» на электродвигателях серии ЭД118А. Имеется Акт реализации результатов предварительных и приемочных испытаний опытных усовершенствованных щеточных узлов (Приложение Б Акты внедрения и проведения экспериментов);

- в экспериментальном исследовании в Муниципальном унитарном предприятии «Метроэлектротранс» на подразделении Троллейбусное депо №2 на

тяговых электродвигателях серии ДК-410 троллейбусах ТролЗа на электромеханическом участке (ЭМУ). Имеются Акт реализации результатов предварительных и приемочных испытаний опытных усовершенствованных щеточных узлов и акт внедрения (Приложение Б Акты внедрения и проведения экспериментов).

### **Публикации**

Основное содержание диссертации изложено в печатных работах - 26, из них 19 статей, входящих в перечень ВАК из них 6 статей в журналах по специальности диссертации, 11 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS/WebOfScience. Получен 1 патент на полезную модель, 3 патента на изобретение, свидетельства о государственной регистрации Программы для ЭВМ – 3.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, перечня основных определений и сокращений, списка литературы, включающего 148 наименований, и 2-х приложений. Работа содержит 175 страниц машинописного текста, 66 рисунков и 17 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, д.т.н., заведующему кафедрой «Электротехнические комплексы» Щурову Николаю Ивановичу, а также научному консультанту – доценту, к.т.н. Цветкову Алексею Николаевичу за полезные консультации в ходе выполнения работы.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ УСТРОЙСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В главе рассмотрено устройство электродвигателя постоянного тока и щеточно-коллекторного узла, общее состояние проблемы, произведен анализ проблем контроля технического состояния и условий эксплуатации железнодорожного и городского подвижного состава, на котором они применяются, также проанализированы существующие директивные документы, которые не соответствуют современным требованиям эксплуатации электродвигателей, предложены основные направления повышения ресурса щеточно-коллекторного узла.

Основными узлами электродвигателя являются неподвижная часть, статор (корпус и полюса главный и дополнительный), якорь и щеточно-коллекторный узел. Обмотка якоря представляет собой большое число прямоугольных рамок, лежащих в разных плоскостях, и замыкаются они на пластины коллектора. Основные отказы электродвигателя приходятся на якорь и его обмотку, короткие замыкания на корпус, вибрация и искрение щеток и загрязнение коллекторных пластин. В результате чего щеточно-коллекторный узел является наиболее уязвимым местом электродвигателей постоянного тока.

### **1.1 Устройство тягового электродвигателя постоянного тока и щеточно-коллекторного узла**

Электродвигатели широко применяются как в быту, так и в промышленности. В настоящее время наибольшее распространение тяговых электродвигателей постоянного тока (ТЭД) получили на подвижном составе городского и железнодорожного транспорта, в металлургии (прокатные станы) и в горнодобывающей промышленности (карьерные самосвалы и самоходные краны) [1, 2].

Одним из важнейших условий для повышения надежности тягового ЭДПТ является объективный мониторинг состояния щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) в процессе эксплуатации для принятия своевременных мер поддержания надежности [3, 4].

Выступающая вверх часть коллекторных пластин, называемая «петушок», служит для присоединения секций обмотки якоря к пластинам коллектора. Каждая пластина в определенный момент контактирует со щеткой, с которой снимается напряжение [5, 6].

Современные щётки, перекрывающие коллекторные пластины, обеспечивают передачу электрического тока между статором и якорем, а также переключение сегментов обмотки при вращении якоря. Щетки подразделяются на графитовые и металлические, с использованием благородных и драгоценных металлов (в медицине) [7].

К настоящему времени разработан широкий ассортимент щеток, регламентируемый ГОСТ 21888-82 и ГОСТ 193-74 [8, 9]. Основная трудность классификации щеток заключается в том, что применение различных видов щёток определяется типом электрической машины, конструкцией коллектора и многофакторностью условий работы [10, 11]. Работа щёток состоит из двух частей: механическую и электрическую.

Основные преимущества электродвигателей постоянного тока:

- высокие удельные характеристики, возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин;
- простая система управления, чем у асинхронных и синхронных двигателей;
- возможность плавно, экономично и в широких пределах регулировать частоту вращения;
- значительный пусковой крутящий момент и одновременно незначительный пусковой ток, высокую способность к перегрузкам, и закон Ньютона для вращательного движения, справедлив для всех ЭМ

$$M_d - M_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1.1)$$

где  $M_d$  – момент вращения;

$M_r$  – момент сопротивления;

$\frac{d\Omega}{dt}$  - ускорение.

Во время возникновения отказов появляется отрицательное ускорение  $\frac{d\Omega}{dt} < 0$ , и частота вращения якоря начинает падать. Когда вращающий момент станет равным возросшему моменту сопротивления и равным нулю, то установится новая постоянная частота вращения .

Как указывается в [12], наибольшее распространение получили рычажные щёткодержатели. Пружины часового типа и кинематические схемы нажимного механизма не обеспечивали постоянства нажатия на щетку, а трудность плавной регулировки создавала предпосылку для большого разброса значений нажатия. Следующее направление в совершенствовании щеточно-коллекторного узла это применение рулонной (желобчатой) пружины и высоких щёток.

Основными потребителями щеток являются предприятия электрического транспорта (городского, железнодорожного) (рис. 1.1) на их долю приходится 47% объема потребителей. За ними идет нефтехимическая отрасль (23%) и металлургия (21%).

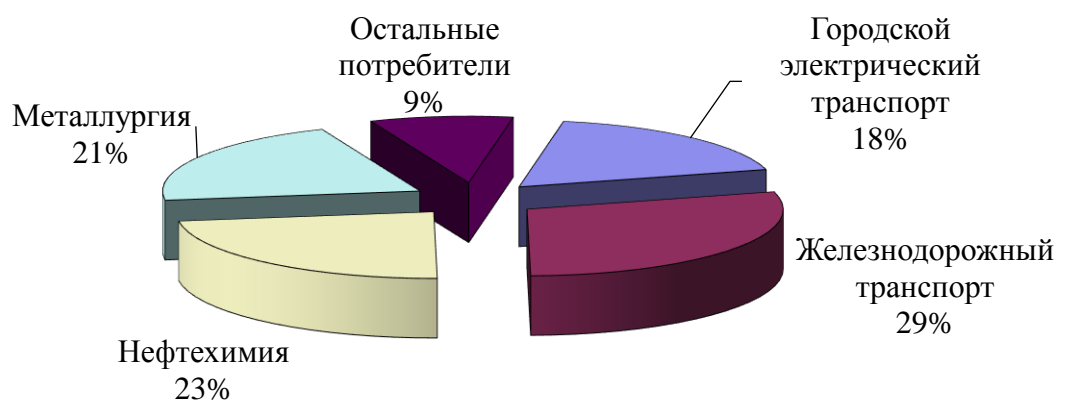


Рисунок 1.1 - Диаграмма потребителей щеток по отраслям

Количественный анализ рис. 1.1 показал, что тяговые электродвигатели постоянного тока конкурентно способные и продолжают эксплуатироваться в большом количестве.

Конструкция щеткодержателя (рис. 1.2) представляет собой траверсу, ось, закрепленную в щеткодержателе при помощи шплинта, на который насажены два фиксатора и нажимная пластина.



Рисунок 1.2 – Конструкция стандартного щеткодержателя ЭДПТ

На рис. 1.3. показана зависимость нажатия на щётку от её высоты для щеткодержателя типа НБ–418 тягового ЭДПТ [13]. Данные кривые показывают границу допустимого нажатия на щетку. При этом щетки, установленные на тяговых электродвигателях, изнашиваются до достижения пробега, на котором производится плановый ремонт ЭДПТ и соответственно осуществляется замена щеток, которая не отработала свой ресурс.

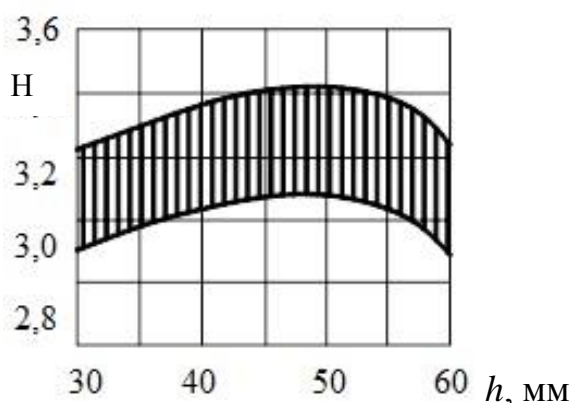


Рисунок 1.3 – Характеристики нажатия на щётку рулонной пружиной в зависимости от высоты щетки



Щеточно-коллекторный узел – это один из факторов, ограничивающих срок службы и скорость тягового электродвигателя. Случаи неисправности ЩКУ на один тяговый электродвигатель подвижного состава показаны на диаграмме (рис. 1.4).

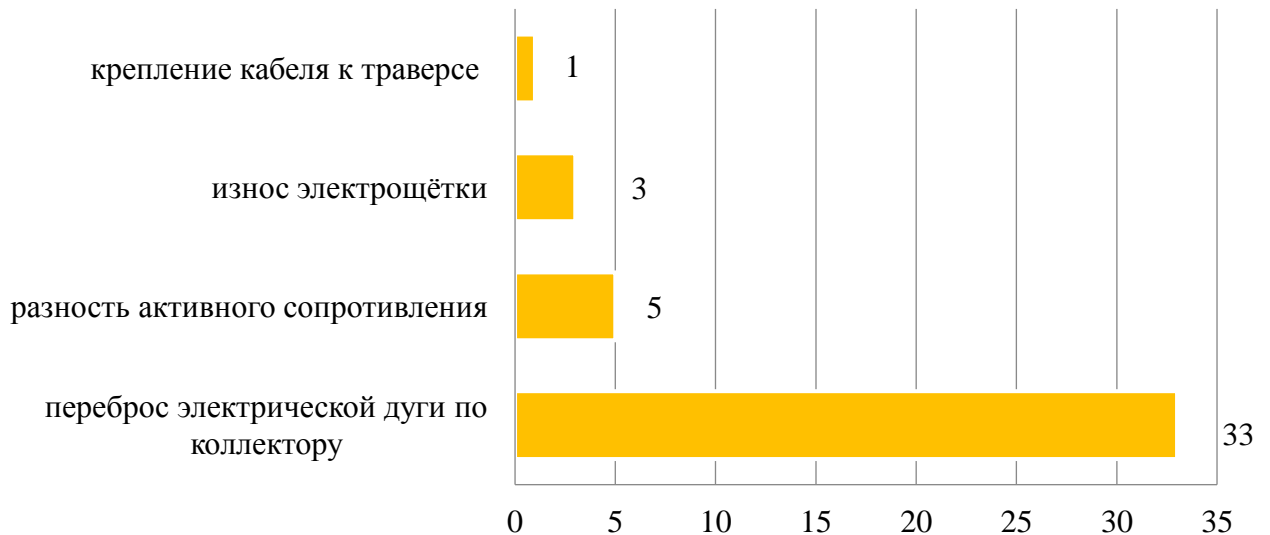


Рисунок 1.4 – Случаи неисправности ЩКУ на 1 ед. ЭДПТ

Под электрическим воздействием понимается нагрузка на щетку под действием токовой нагрузки и, как следствие, образование дуги и нагрев. Предельный износ щетки может привести к отказу ЩКУ [50, 51]. Из рисунка 1.4 видно, что отказы в ЩКУ нарушают коммутацию в узле и приводят к искрению щеток. Количество отказов, связанных с износом щеток незначителен, а при внедрении системы контроля технического состояния ЩКУ – сократятся до минимума.

## 1.2 Современное применение тяговых электродвигателей постоянного тока

Современное состояние промышленности в настоящее время характеризуется повышенными требованиями к надежности и ресурсу тяговых электродвигателей постоянного тока в любой сфере производства и обслуживания. К такой сфере, согласно ГОСТ 2582-2013 [14], относятся: локомотивы

(электровозы серии ВЛ, «Ермак», тепловозы с электропередачей); электропоезда и высокоскоростной наземный транспорт (ВСНТ); бронетехника и другие машины на гусеничном ходу; электромобили и большегрузные автомобили с электроприводом (в том числе подъемно-транспортные машины и самоходные краны, карьерные самосвалы); теплоходы с электроприводом (дизель-электроходы), атомоходы, подводные лодки; городской электротранспорт (трамваи, троллейбусы, метрополитен), беспилотные самолеты и вертолеты, а также в системы средств связи и в бытовой технике [15, 16].

В беспилотных самолетах, которые применяются в настоящее время очень широко (сельское хозяйство, пожаротушение, лесничество, на транспорте (при авариях в недоступных местах)) применяется вибрационный гироскоп (ВГ), который состоит из электродвигателя, закрепленного на оси ротора ВГ [17, 18], данное устройство относится к области навигационной техники.

Основными особенностями электродвигателей постоянного тока имеет место и в медицинском назначении:

- развиваемый силовой момент должен обладать линейной зависимостью от потребляемого электрического тока;
- минимальное время реакции на управляющие воздействия;
- наиболее целесообразно применение электродвигателей постоянного тока без ферромагнитного магнитопровода, коллекторный узел которого включает щетки из драгоценных металлов, присутствующих также в конструкции подшипников.

Не менее разнообразны условия применения тяговых ЭДПТ, режимы их работы и соответственно требования к надежности, например:

- для авиационных машин более существенным требованием является безотказность;
- для энергетических электродвигателей – долговечность.

Поиски конструктивных решений, направленных на повышение надежности работы ЩКУ, такие, как усовершенствование конструкции, применение различных композитных материалов щетки и коллекторных пластин, установка

компенсационной обмотки, различные технологии не привели к значительным результатам, а лишь снизили количество отказов и увеличили наработку ЭДПТ до остаточного отказа.

Проанализировав работы по решению проблем разработки, усовершенствованных ЩКУ можно выделить несколько основных.

В диссертации Ларченко А.В. рассмотрены методы идентификации дефектов ЩКУ и магнитной системы электрической машины (ЭМ). Целью работы являлось определение плохого электроконтакта, который приводит к увеличению сопротивления в элементе, что приводит к еще большему искрообразованию и нагару [19].

Рассмотренная в работах [20, 21] волочащаяся щётка позволяет увеличить ресурс на 30 – 40%, но тем самым загрязняет коллектор.

Механический и электроэрозионный износ обусловлен влиянием состояния коллектора и коммутационного искрения в скользящем контакте, которые, в свою очередь, зависят от многих факторов. Температура электродвигателя влияет на изоляцию обмоток, на работу подшипников, и другие активные элементы машины. Определение остаточного ресурса изоляции электродвигателя по температуре одного узла не является корректным. Следовательно, необходима такая система мониторинга, которая позволит получать полную информацию о состоянии всех узлов электродвигателя, в том числе, недоступную в период эксплуатации для непосредственного измерения [22].

### **1.3 Анализ проблем контроля технического состояния тяговых электродвигателей и условий эксплуатации городского подвижного состава**

В системе электрооборудования подвижного состава (ПС) электротранспорта (ЭТ) являются непосредственно основными объектами в обеспечении ПС движением и серьезно влияющие на технико-экономические показатели не только ПС, но всей организации перевозок пассажиров [23].

Анализ работы трамвайного депо и троллейбусного парка №2 МУП «Метроэлектротранс» г. Казани показывает, что ежегодно списываются 15-22%

единиц подвижного состава, выработавшего назначенный ресурс эксплуатации. Подвижной состав, который подлежит восстановлению по требованиям и системе оценок параметров планово-предупредительных работ (ППР), согласно табл. 1.1. [24, 25]. Данная система периодичности проведения технического обслуживания разработана без существующих систем диагностирования, поэтому следует пересмотрению и корректировки.

Таблица 1.1 - Периодичность технического обслуживания пассажирских трамвайных вагонов и троллейбусов

Наименование и обозначение технического обслуживания	Периодичность технического обслуживания	
	Трамвайные вагоны	Троллейбусы
Ежедневное обслуживание (ЕО)	Ежедневно до выпуска подвижного состава на линию	
Контрольно-профилактический осмотр (КПО)	-	1 раз в 7-9 суток в дневное время при чередовании КПО и ТО-1
Первое техническое обслуживание (ТО-1)	1 раз в 7-9 суток в дневное время	
второе техническое обслуживание (ТО-2)	6-8 тыс. км.	11-13 тыс. км
Кантовка тележек (КТ)	35-50 тыс. км	-
Сезонное обслуживание	Два раза в год по графику, установленному транспортным предприятием	

По результатам проведения технического осмотра ЭПС городского электрического транспорта оформляется диагностическая карта, форма которой утверждена постановлением Правительства Российской Федерации [26].

Из таблицы 1.1 следует высокая актуальность эффективного планирования сроков технического обслуживания и ремонта (ТО и ТР) на основе прогнозирования остаточного ресурса тягового ЭДПТ по фактическому техническому состоянию в процессе эксплуатации. Слабой стороной электродвигателей постоянного тока является обслуживание, так как во многих из них для коммутации используются щетки, которые со временем изнашиваются от контакта с подвижными частями. После ремонта электродвигатель вновь вводится в эксплуатацию.

Многие электрические узлы в процессе эксплуатации подвергаются непрерывным или периодически возникающим механическим воздействиям:

ударам, линейным ускорениям, вибрациям. Создаваемые при этом ускорения достигают иногда значений, превышающих допустимые. Наиболее чувствительны к механическим воздействиям разрывные и скользящие контакты, что необходимо учитывать при их эксплуатации.

Применение вибрационных методов диагностики дефектов состояния электродвигателей и генераторов обычно является первым этапом в диагностике [27, 28, 29, 30].

В парке подвижного состава МУП «Метроэлектротранс» г. Казани используются 180 единиц трамвая на постоянном токе Ленинградского (ЛМ) и Усть-Катавского (КТМ) трамвайно-вагонных заводов. Установка ЭДПТ различных серий на различные модели трамваев создает дополнительные проблемы в их обслуживании и, как следствие, приводит к снижению надежности. Можно сказать, что надежность ПС зависит от тягового ЭДПТ. Трамваи типа ЛМ и КТМ имеют в своем составе тяговые электродвигатели типа ДК-259 (серий Е, ЕЗ, Г, ГЗ, ДЗ), [31]. На рис. 1.5 показано размещение ЭДПТ на подвижном составе и ЩКУ с применяемыми составными щетками.



Рисунок 1.5 – Электродвигатель постоянного тока на ЭПС и ЩКУ с составными щетками

Ежедневно необходимое число единиц подвижного состава должно быть технически готово к работе на маршрутах городов. Техническое обслуживание и

ремонт подвижного состава в течение гарантийного пробега производится в соответствии с указаниями заводов-изготовителей. Восстановление утраченной работоспособности достигается: 1) устранением возникших в узлах, агрегатах и механизмах неисправностей, являющихся следствием выполненного объема работ (пробега), и 2) заменой деталей и узлов, хотя и работоспособных, но исчерпавших ресурс работоспособности из-за износа, старения, коррозии и т.д. Исправность щеточно-коллекторного узла проверяют при осмотре и необходимых измерениях [32].

Рассматривая труды по повышению надежности ЭДПТ, следует выделить предложенный Ю.Я. Безбородовым [33] метод оценки уровня искрения по средней и максимальной длительности дуговых разрядов более достоверно характеризует интенсивность искрения, поскольку данные параметры однозначно определяют износ щеток и ламелей коллектора для конкретного электродвигателя. Стоит отметить, что износ щеток не будет обусловлен только лишь воздействием механических или электрических факторов, так же повышается вибрация узла, биение, изменяется сила нажатия на щетку и коллектор.

Сигнал с разнополярных щеток ЭДПТ впервые предложил использовать для оценки интенсивности искрения Ромениус в 1956 г. Этот сигнал применен в качестве диагностического в ряде способов и устройств для оценки технического состояния ЭДПТ через знание значений пульсации напряжения [34]. Недостатком служит то, что не уделялось значительное внимание механической части данного узла.

В качестве метода для определения износа был применен метод гранулометрического анализа пылевидных продуктов износа щеток [35]. Была получена зависимость интенсивности износа щеток при изменении основных электрических и механических факторов в ЩКУ ЭДПТ

$$\Delta I_{щ} = 41,77 + 0,616 I_a + 5,88 A - 0,0168 n - 202,1 P_{щ} - 19,47 A \cdot P_{щ} + 0,079 n \cdot P_{щ}, \quad (1.2)$$

где  $I_a$  – ток якоря, А;

$n$  – частота вращения, об/мин;

$P_{щ}$  – давление на щетку.

Предложенный метод не давал полную картину по интенсивности износа щеток ЭДПТ. Факторы варьировались независимо друг от друга (уровни и интервалы тока якоря от 9 до 33 А, уровень искрения в пределах 1-3 А, частота вращения от 3300 до 2700 об/мин и давление на щетку от 0,36 до 0,120 кг/см<sup>2</sup>).

Очевидно, что совершенствование методов достоверного диагностирования и оценки технического состояния элементов и узлов ЭДПТ является актуальной задачей при эксплуатации и ремонте тягового электроподвижного состава, в том числе магистральных электровозов [36, 37].

#### **1.4 Используемые направления повышения ресурса щеточно-коллекторного узла**

В настоящее время в различных областях применения тяговых ЭДПТ существует достаточно много методов определения показателей надежности, отличающихся совокупностью решаемых задач и особенностями применяемого математического аппарата. Одним из важнейших элементов ресурса ЭДПТ является объективный мониторинг состояния щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) в процессе эксплуатации.

Критерии работоспособного состояния ЩКУ выполняют заданные функции, сохраняя полученные значения в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

К неработоспособному состоянию по причинам отказа относятся: искрение, биение, износ и повышенная температура коллектора, переходное сопротивление щеточного контакта, износ щеток.

Применяемая в настоящее время абразивная обработка (применение крупнозернистой стеклянной бумаги) отрицательно сказывается на работе ЩКУ. Безыскровая зона, снятая после данной обработки коллектора, дает положительные результаты (рис. 1.6) [38, 39].

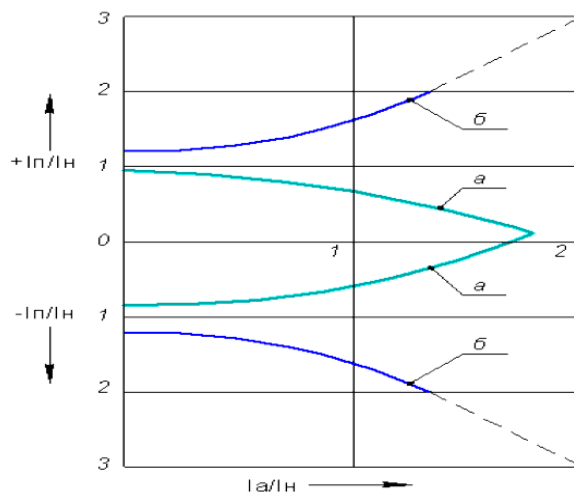


Рисунок 1.6 – Безыскровая зона: а – при нормальной политуре; б – после обработки коллектора

Данный метод электроискрового легирования (ЭИЛ) позволяет повысить надежность работы ЩКУ ЭДПТ, применяемых в подъемных кранах на высотах до 50м., позволяет получить высокие эксплуатационные свойства в поверхностных слоях за счет науглероживания коллекторных пластин материалом рабочих щеток, улучшить коммутационные свойства, повысить ресурс работы тягового электродвигателя. На больших высотах ухудшается процесс гашения электрической дуги, что приводит к увеличению искрения на коллекторах электрических машин [40, 41, 42, 43].

Недостатком данного метода является то, что он не снижает давление и вибрацию на всю ширину щетки, которые провоцируют дополнительный износ тела щетки, его сколы, не устраняют образование кругового огня.

Для повышения надежности ЩКУ также рассмотрена структурно-математическая модель [44, 45] пористой щетки с применением ЭВМ на основе определения удельного объема открытых пор и распределения удельного объема открытых пор по размерам их эффективных радиусов. На практике показало обратное, это приводит к недостаточному интенсивному выносу электропроводящих продуктов износа щеток.

Одним из важных направлений повышения надежности ЩКУ, это обеспечение бесперебойной работы данного узла. Этого можно избежать, заменой



материала коллекторных пластин с медного с присадкой серебра (сплав МС-1) на медно-кадмиевый сплав (бронзы) БрКд-1, который имеет низкий коэффициент трения и высокую стойкость к образованию наволакивания меди и обеспечивает снижение интенсивности износа коллекторов и щеток в 2 - 2,5 раза [46, 47]. Этот материал имеет низкий коэффициент трения и высокую стойкость к образованию наволакивания меди. Скользящая пара сплав БрКд-1 и щетки марки ЭГ61АК обеспечивают пробеги без обточки коллекторов грузовых электровозов не менее 600 тыс. км, а пассажирских 0,8 – 1 млн. км. Смена щеток требуется через 150 тыс. км на грузовых и через 200 тыс. км на пассажирских электровозах.

### **Выводы по главе 1**

1. В проведенном анализе было выявлено общее наличие проблемы контроля состояния тягового электродвигателя постоянного тока и щеточно-коллекторного узла. Выявлено, что самое большое количество отказов приходится на повышенное биение коллектора, повышенный износ щеток, круговой огонь по коллектору и пробой на корпус якоря. При этом наиболее частой причиной отказов тяговых ЭДПТ остается неудовлетворительная работа элементов ЩКУ и его техническое состояние.

2. В процессе анализа работ, опубликованных по данному вопросу, были рассмотрены основные используемые методы технического состояния ЭДПТ в условиях эксплуатации городского подвижного состава. Проведен анализ причин отказов тяговых ЭДПТ в эксплуатации. Значительно можно снизить количество отказов при выполнении требований нормативно-технической документации в части технического обслуживания и эксплуатации.

3. По проведенному анализу работ, опубликованных по повышению ресурса ЩКУ, выявлены основные направления. Поэтому искать причину и решать проблему контроля состояния тяговых ЭДПТ необходимо с учетом режимов эксплуатации. Для этого нужно выявить методы диагностики, а по полученным результатам определить причины и наметить пути решения этой проблемы.

## ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В данной главе рассмотрены технические требования и условия эксплуатации тягового электродвигателя постоянного тока, особенности отказов и неисправностей на нем, проанализирована методика существующего расчета эксплуатационной надежности, проведено исследование и расчет надежности ЭДПТ.

Поставлены следующие задачи:

- выявить основные причины отказов и неисправностей в период между плановыми ремонтами на тяговых электродвигателях постоянного тока;
- рассмотреть методы повышения надежности щеточно-коллекторного узла и методы оценки эксплуатационной надёжности элементов ЩКУ;
- определить основные направления для расчета остаточного ресурса и определить назначенный ресурс до определения отказа.


### **2.1 Общее состояние проблемы и анализ состояния щеточно-коллекторного узла**

Основными потребителями щеток являются ЭДПТ, установленные на предприятиях электрического транспорта, металлургии и горной промышленности. Щетки используются для замены изношенных при проведении плановых ремонтов.

Щетки электродвигателей постоянно подвержены механическому и электрическому воздействию, вызывающему их износ и снижение назначенного ресурса [48, 49].

Предприятия, эксплуатирующие подвижной состав, постоянно требуют обновления щеток, численное потребление которых, показано в табл. 2.1. на примере отделения Горьковской железной дороги депо Юдино-Казанский.

Таблица 2.1 - Данные по Горьковской железной дороге потребления щёток за 2017-2022 гг.

Служба	Наименование продукции	Размер	Кол – во
Техническое обеспечение и ремонт	Щетка угольная ЭГ-61АК 	2/12,5 × 40 × 52	6780
Дополнительное оборудование		10 × 40 × 64	810
Итого			7590

Количественный анализ применения щеток в МУП «Метроэлектротранс» г. Казани на 1 единицу трамвая и троллейбуса показан в табл. 2.2.

Таблица 2.2 - Количество щеток, применяемых на различных типах ЭПС ГЭТ

Тип подвижного состава	Тип тягового электродвигателя	Размер щётки по высоте, мм	Ресурс щётки по высоте, мм	Количество щёток на ТЭД/ЭПС	Марка щёток
КТМ-8	ДК-259	45*	22	8/16	ЭГ14, ЭГ74 ЭГ64- АК
Тролза-5	ДК-459	45*	22	8/8	ЭГ64- АК
* - по максимальному размеру щётки					

В настоящее время разработано и существует несколько методов увеличения срока службы ЩКУ и продления остаточного ресурса щеток при проведении очередных ТО подвижного состава.

В ходе проведения исследований выполнен анализ особенностей отказов и неисправностей ЭДПТ подвижного состава по результатам статистики, собранной за 2019...2022 года в МУП «Метроэлектротранс» г. Казани (Табл. 2.3) и в Сервисном локомотивном депо Юдино-Казанский, ООО «ЛокоТех-Сервис» филиал «Западный».

Таблица 2.3 - Анализ особенностей отказов и неисправностей ЭДПТ на ГЭТ

Вид отказа электродвигателя	Годы			
	2019	2020	2021	2022
Межвитковое замыкание обмотки якоря	350	228	172	181
Межламельное замыкание и пробой коллектора	196	182	145	139
Пробой обмотки якоря	44	36	30	31
Распай коллектора	69	26	12	12
Круговой огонь	69	38	24	18
Прочие браки и отказы	72	55	40	28
Итого	800	565	423	409

При рассмотрении статистики отказов ЭДПТ можно сделать вывод, что такие отказы как межламельное замыкание и пробой коллектора (рис. 2.1), распай коллектора и круговой огонь обычно вызываются неисправностью ЩКУ и могут быть объединены в единую группу отказов. В таком случае, можно сделать вывод, что в 2020 году количество отказов по причине неисправности ЩКУ составило 41,75% от общего числа отказов, в 2021 году – 43,54%, в 2022 году – в среднем составляет 42,7%.



Рисунок 2.1 – Пробой по поверхности изолятора щеткодержателя

Таким образом, почти половина отказов ЭДПТ подвижного состава вызвана неисправностями ЩКУ, работоспособность которого зависит от состояния щеток (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 - Переброс электрической дуги по коллектору ТЭД

Изношенные щетки не восстанавливаются и подлежат замене вместе с дорогостоящими элементами конструкции, такими как:

- токопроводящий провод гибкий неизолированный плетеный и луженые наконечники. Материал – рафинированная медь (цена составляет 662 руб за кг.).

- неизношенная часть щетки (рис. 2.3) (щетка изнашивается на 2/3 своей высоты). Материал – графит, сажа, медь.

- материалы для соединения токоведущего провода с угольно-графитовой частью щетки (конопатка, электропроводящий клей) [54, 55].

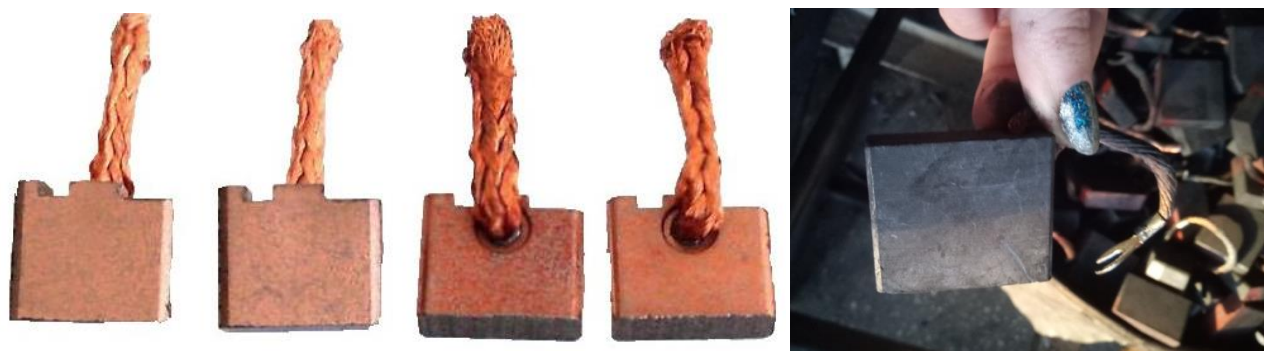


Рисунок 2.3 - Изношенные щётки ЭДТТ

Одной из наиболее часто встречающихся причин нарушений в работе ЩКУ, приводящих к ресурсному отказу, является ухудшение состояния мест крепления токоведущих проводов к щеткам.



Существуют требования к неисправностям щеточно-коллекторного узла, не допускаемые в дальнейшей эксплуатации [56], выявляемые при проведении очередного ТО:

1. Круговой огонь по коллектору или чрезмерное искрение под щетками, подгар коллектора, при этом на поверхности его появляются борозды, пластины подгорают (рис. 2.4). В результате коллектор и щетки быстро изнашиваются.



Рисунок 2.4 – Состояние политуры и неисправности коллектора

2. Перекрытие или пробой кронштейна щеткодержателя.



3. Пробой изоляции обмоток якорей.



4. Сильное искрение под щетками и срабатывание токовой защиты. Искрение оценивается в соответствии со шкалой степени искрения, рекомендуемой ГОСТ 183-74 [7, 57].

5. Шероховатость поверхности коллектора.

Причины возникновения таких неисправностей показаны ниже [58, 59]:

1. Щетки плохо притерты к коллекторным пластинам, неплотное прилегание, плохо пришлифованы, обломаны по краям или имеют царапины на прилегающей к коллектору поверхности. Изоляция между коллекторными пластинами выступает над ними, коллектор плохо прошлифован. Недопустимый износ щеток. Биение коллектора, низкое качество щеток, коллектора. Заклинивание щетки, коллектор загрязнен, межвитковое замыкание или выпадение секции обмотки якоря из петушков коллектора. Искрение на коллекторе может быть вызвано неисправностями коллектора, щеток, щеткодержателей и обмоток электродвигателей.

2. Избыток смазки, перекос подшипника может стать причиной искрения, поэтому, сначала проверяют их.

3. Попадание влаги и пыли в тяговый двигатель, перенапряжение, грязный кронштейн щеткодержателя.

4. Механические повреждения: резкое снижение сопротивления изоляции при частых перенапряжениях на двигателях, механическое повреждение изоляции, старение изоляции, снижение изоляционных свойств, вследствие частых перенапряжений.

5. Щетки слишком сильно прижаты к коллекторным пластинам, недостаточное или неравномерное нажатие щеток, слишком большой просвет между щеткой и обоймой, либо при плохом закреплении траверсы и щеткодержателя.

6. Замыкание между секциями обмоток якоря или коллекторными пластинами, повреждения обмотки якоря электродвигателя, короткое замыкание, распайка обмотки якоря в петушках, разрыв якорного проводника, замыкание на железо.

7. Размотаны бандажи якоря, и часть обломков отброшена в сторону вентиляционных отверстий.

8. Шероховатость поверхности коллектора возникает в результате царапин, нагара или слоя окиси на коллекторе. Царапины наносятся твердыми частицами, попавшими на коллектор под щетки. Нагар образуется от искрения, а слой окиси на коллекторе появляется после длительного нахождения электродвигателя в местах с повышенной влажностью.

Существует несколько способов восстановления щеточно-коллекторного узла по указанным причинам и неисправностям [60, 61], например:

- приработать щетки к коллекторным пластинам при малых скоростях вращения на стенде, продорожить, зачистить и отшлифовать коллектор, отрегулировать нажатие щеток.

В эксплуатации иногда наблюдаются такие неисправности щеткодержателей, как выработка их гнезд, изломы нажимных пальцев и пружин, изломы механизма регулировки нажатия на щетку. Давление пластины на середину щетки регулируется пружиной. На работу щеток влияет также окружающая температура. Так, в зимнее время нажатие на щетки необходимо повышать, а для того чтобы щетки не примерзали к щеткодержателю, хорошо их просушивать. Нередко возникают случаи, когда щетки просто «зависают», то есть, «застревают» в своих направляющих, и пружина не может поджать их к коллектору для надежного контакта или растягивается сама, прижимая их слабее. Под воздействием непостоянной силы трения при вращении коллектора щетка начинает вибрировать с частотой, зависящей от размеров щетки, условий нажатия и других факторов. Снизить вибрации можно путем уменьшения зазоров между щеткой и корпусом, увеличения высоты окна под щетку, применения разрезных щеток, состоящих из двух частей и изменить конструкцию нажимной пластины.

Часто, при эксплуатации подвижного состава, возникают ситуации, когда отсутствует возможность оперативной замены изношенной щетки на электровозе, находящемся на удалении от ремонтной базы. Практикой установлено [62, 63], что если электровоз проследует 600-700 км с дефектом ЩКУ на электродвигателе, то



щетка полностью изнашивается, скользя по коллектору, что вызывает оплавление и шероховатость поверхности. Эта ситуация влечет за собой необходимость оперативного вмешательства в ЩКУ по прибытии электровоза на ремонтную базу с заменой полного комплекта щеток. Кроме этого недопущение таких ситуаций требует введения дополнительных средств диагностики и определения остаточного ресурса ЩКУ при проведении очередных ТО на ремонтных базах.

Одним из путей минимизации механических износов щеток достигается путем правильной установки щеток в щеткодержатель с обеспечением необходимого уровня их давления 8,5-10,5 Н [64, 65]. Люфт щетки в гнезде щеткодержателя в направлении вращения коллектора не должен превышать 0,1 – 0,2 мм при толщине щетки 8 – 16 мм и 0,15 – 0,25 мм при толщине свыше 16 мм. Зазор между нижней кромкой обоймы щеткодержателя и поверхностью коллектора должен быть 2-3,5 мм. Трение между щеткой и обоймой щеткодержателя и в шарнирах ЩД должно быть минимальным.

Основное современное направление в повышении остаточного ресурса щёток обычно заключается в изменении конструкции самого щеточно-коллекторного узла и щётки с учетом того, что разработка и внедрение их не потребуют значительных финансовых затрат. Такие условия, как повышение плотности тока в щетках, высокие линейные и угловые скорости вращения коллекторов 2250 об/мин в течение 2 мин, предельно расширившийся диапазон других воздействующих факторов: рабочих температур, ударных и вибрационных нагрузок. На щетку ЭДПТ, помимо статического нажатия, создаваемого нажимным устройством щеткодержателя, действуют динамические силы, обусловленные вибрацией ЩКУ, подшипниковых узлов, неуравновешенностью якоря [66, 67,68].

Один из вариантов усовершенствования щетки был предложен Степановым Е.Л. [69], который рекомендовал повысить чистоту обработки рабочей поверхности коллектора и применять составные щетки с резиновыми амортизаторами в обойме, для уменьшения коэффициента трения щеток.

В диссертации Хомченко Д.Н. [70] «Увеличение эксплуатационного ресурса коллекторных тяговых двигателей электровозов на основе разработки новых

конструкций щеткодержателей» целью работы служило увеличение эксплуатационного ресурса коллекторных ТЭД электровозов путем разработки и внедрения теоретически обоснованных новых технических решений по улучшению качества коммутации ТЭД. В частности, было предложено применение щеток с нанесенной на поверхность политурной пленкой.

Политурная пленка снижает скорость износа узлов трения и способствует более равномерному распределению тока по параллельно работающим щеткам [71, 72]. Толщина слоя политурной пленки зависит от типа ЭЩ, материала коллектора, а также от режима работы и температуры в зоне контакта. Наличие данного слоя влаги на окисных и графитовых участках поверхности коллектора обуславливает гидродинамические условия трения [73]. По этой причине в зимний период щетки примерзали.

В диссертации Тимошенко В.Н. [74] рассмотрено снижение износа щеток в коллекторных машинах постоянного и переменного тока за счет применения смазывающих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена, и путем смещения щеток относительно геометрической нейтрали, а также уменьшения уровня радиопомех по мощности и напряжению в коллекторных машинах переменного тока. Недостатком данной работы можно считать, дополнительные условия для создания самих щеток, а смазывающие составляющие загрязняют коллекторные пластины.

В статье Рапопорт О.Л. [75] рассматривался мониторинг щеточно-коллекторного узла ТЭД при эксплуатации. Было предложено устройство индикации искрения. По нему выявлена зависимость величины напряжения от искрения. Данный мониторинг рассматривает только искрение, а остальные параметры не затрагивает.

Известен патент [75], согласно которому, усовершенствование щеточно-коллекторного узла заключалось в снабжении ЩКУ курком и дополнительным амортизирующим упругим элементом, цилиндрической пружины, один конец упругого элемента соединен со щеткой, а другой – с курком. Данный патент

требует дополнительной доработки ЩКУ и для замены щеток требуется больше времени.

Согласно патенту [75] «Способ контроля и визуализации работы щеточно-коллекторного узла электрического двигателя постоянного тока», техническим результатом является повышение точности выявления причины искрения щеточно-коллекторного узла. Данный способ контроля и визуализации измеряет температуру обмоток ротора, ток якорной обмотки, угловую скорость ротора, параметр, характеризующий искрение, преобразуют измеренные величины в цифровые коды и передают их в вычислительное устройство, например, компьютер, с помощью которого выполняют отображение, регистрацию и сравнение измеренных величин с допустимыми значениями.

## **2.2 Методы оценки повышения эксплуатационной надёжности и остаточного ресурса элементов щеточно-коллекторного узла**

Методы оценки надёжности изложены в ГОСТ 27410–87 «Надёжность в технике. Методы и планы статистического контроля показателей надёжности по альтернативному признаку» [75] и ГОСТ 27.002-2015 - «Надёжность в технике. Термины и определения» [76]. Основные характеристики надёжности носят вероятностный характер и оцениваются статистически на основании информации о надёжности.

Повышение показателя надёжности ЭДПТ должно осуществляться через временной показатель надёжности (долговечности) – остаточный ресурс щеток, а значит и всего ЩКУ.

Основная величина, влияющая на остаточный ресурс ЩКУ - износ щеток. Опыт, полученный при анализе эксплуатации, показывает, что распределение скорости износа щеток во времени приближается к нормальному закону.

Для расчета надёжности электрических машин воспользовались некоторыми основными понятиями, терминами и определениями из области надёжности, соответствующими ГОСТ 27.002—15.

Единственно возможным методом оценки надежности является ее моделирование для уникальных, единичных объектов [77]. Систематизируя и обобщая полученные экспериментальные данные, рассчитываются основные количественные показатели надежности работы ЩКУ: вероятность безотказной работы  $P(t)$ , вероятность отказа  $Q(t)=1-P(t)$ , частоту  $\alpha(t)$  и интенсивность  $\lambda(t)$  отказов, среднюю наработку до отказа  $T_{cp}$ , а также ресурс – суммарную наработку объекта до достижения предельного состояния [78, 79, 80]. Было также установлено в результате анализа статистической информации об отказах, что вероятность безотказной работы  $P(t)$  или закон изменения надежности ТЭД может меняться в зависимости от степени износа щеток, то есть числа предшествующих отказов.

Надежность щеточно-коллекторного узла во многих случаях может быть определена как вероятность безотказной работы щеток

$$P_{щк\text{у}}(t) \approx P_{щ}(t). \quad (2.1)$$

В дальнейших исследованиях принята надежность ЩКУ, находящегося в эксплуатации, изменяющаяся по экспоненциальному закону

$$P_{щк\text{у}}(t) = e^{-\lambda t} \approx e^{-\frac{t}{T_{cp}}}. \quad (2.2)$$

Основной количественной характеристикой группы любых подобных объектов (в том числе и щеток) является надежность или вероятность безотказной работы  $P(t)$  [120]. Она характеризует наиболее вероятную долю работоспособных щеток в рассматриваемый момент времени  $t$ . Очевидно, что функция  $P(t)$  является убывающей, так как щетки изнашиваются. Если охарактеризовать до начала работы устройства вероятность отказа устройства в тот или иной момент времени, то удобно пользоваться плотностью распределения  $f(t)$  времени безотказной работы [79], равной безусловной вероятности отказа в промежутке  $\Delta t$ . При этом в ходе самой работы устройство могло и не доработать до обсуждаемой точки времени, а могло и перейти данный момент – это является априорным показателем. Аналитические связи между этими параметрами следующие

$$f(t) = -dP/dt, \quad (2.3)$$

Число интервалов интенсивности износа щетки равно

$$k = \frac{T_{max} - T_{min}}{\Delta t}, \quad (2.4)$$

где  $T_{max}$  - максимальное время до наступления отказа щетки;

$T_{min}$  - минимальное время наступления отказа щетки;

$\Delta t$  – интервал интенсивности износа.

ЩКУ при данном расчете принимается, как некоторую резервированную систему с дробным коэффициентом резервирования, определяемым опытным путем по уравнению

$$k_p = \frac{N}{N-n}, \quad (2.5)$$

где  $N$  – общее число щеток в электродвигателе;

$n$  – допустимое число отказов щеток, не приводящее к остановке электродвигателя (определяется путем испытаний).

Случайное число отказов может иметь определенный ряд значений, и каждое значение принимается с определенной вероятностью. Тогда вероятность безотказной работы щетки можно представить в виде

$$P_{щ} = \frac{k}{T_{cp}} \int_0^{T_{cp}} i_{щ} dt, \quad (2.6)$$

где  $i_{щ}$  - плотность тока щетки;

$T_{cp}$  - среднее время наступления отказа щетки.

Тогда надежность ЩКУ в течение времени  $t$  может быть определена по экспоненциальному уравнению

$$P(t) = \exp(-t/T_{cp}), \quad (2.7)$$

где  $P(t)$  – функция распределения наработки до возникновения  $n$ -го отказа для случайной щетки;

$t$  – момент времени при отказе щетки.

По полученным вероятностям безотказной работы для каждого ЩКУ определяется ресурс

$$T_{\text{прщкку}} = - \frac{\ln(\dot{P}_{\text{прщкку}})}{\sum_{i=1}^N n \cdot \lambda_{\text{прщкку}}}, \quad (2.8)$$

где  $\lambda_{\text{прщкку}}$  - интенсивность отказов щеток в ЩКУ при эксплуатации;

$\dot{P}_{\text{прщкку}}$  - вероятность безотказной работы для ЩКУ при эксплуатации.

Выход ТЭД из строя характеризуется плотностью или интенсивностью отказов  $\lambda(t)$ . Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  – есть вероятность отказа устройства за время  $\Delta t$ , отнесенная к величине интервала  $\Delta t$ , при условии, что устройство доработало до заданного интервала  $\Delta t$  (это апостериорная вероятность) [121].

$$\lambda_{\text{щкку}}(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = - \frac{1}{P(t)} \cdot P'(t) = \frac{N(\Delta t_i)}{N_{\text{ср}i} \cdot \Delta t_i}, \quad (2.9)$$

где  $N(\Delta t_i)$  – число отказов щеток на интервале  $\Delta t_i$ ,

$N_{\text{ср}i}$  – число работоспособных объектов в середине интервала.

Интенсивность отказов щеток в ЩКУ при применении  $\lambda_{\text{пр}}$  и хранении  $\lambda_{\text{хр}}$  рассчитываются по формулам

$$\lambda_{\text{пр}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{ф}} K_{\text{пр}} K_{\text{р}}, \quad (2.10)$$

$$\lambda_{\text{хр}} = \lambda_{\text{х.с.г.}} K_{\text{пр}}, \quad (2.11)$$

где  $\lambda_{\text{б}}$  – базовая интенсивность отказов щетки при испытании в режиме номинальной электрической нагрузки и нормальной температуры;

$\lambda_{\text{х.с.г.}}$  – интенсивность отказов щетки по результатам испытаний на сохраняемость в упаковках заводов-изготовителей;

$K_{\text{пр}}$  – коэффициент приемки, отражающий уровень качества изготовления щетки;

$K_{\phi}$  – коэффициент фактической жесткости, учитывающий степень жесткости условий применения щетки;

$K_p$  – коэффициент режима, учитывающий изменение базовой интенсивности отказов в зависимости от электрической нагрузки и температуры окружающей среды.

Среднее статистическое значение времени отказов щеток определяется по выражению

$$\overline{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i, \quad (2.12)$$

где  $t_i$  – время отказа  $i$ -й щетки,

если во время испытаний откажет  $r$  щеток и испытания прекратятся к моменту времени  $t_r$  наступления  $r$ -го отказа, то

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=0}^r t_i + (n-r) \cdot t_r}{r}. \quad (2.13)$$

Среднеквадратическое отклонение отрезков времени

$$\sigma_{\text{щ}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \overline{T}_{\text{ср}})^2}. \quad (2.14)$$

Точность определения показателя надежности возрастает по мере увеличения повторности информации, приближаясь к своему пределу – математическому отклонению.

При большом числе  $n$  удобнее от статистической выборки перейти к статистическому ряду. В этом случае статистический ряд интервалов времени представляется в виде таблицы 2.4.

Таблица 2.4 - Статистический ряд интервалов

Интервалы	$t_2-t_1$	$t_3-t_2$	...	$t_i-t_{i+1}$	...	$t_k-t_{k+1}$
Частота	$f_1$	$f_2$	...	$f_i$	...	$f_k$

В таблице 2.4 показаны интервалы времени, в которые проводились замеры и частота отказов щеток за данный интервал.

Завершающий этап метода состоит в определении ресурса работы щетки  $T_{щр}$

$$T_{щр} = \frac{l_{щ} - l_{щд}}{\Delta I / \Delta t}, \quad (2.15)$$

где  $\Delta I$  – значение изменения износа щетки – интенсивность износа;

$l_{щ}$  – длина щетки;

$l_{щд}$  – длина щетки с дефектами.

Интенсивность износа щетки является сложным физико-химическим процессом. Общепринятым критерием отказа щетки считается ее износ  $\Delta h$  до половины начальной высоты  $H_0$ , но не превышающей предельно допустимой величины  $\Delta h_{пр}$ , то есть отказ щетки происходит, если

$$\Delta I = \Delta h_t > \Delta h_{пр} = 0,5 H_0, \quad (2.16)$$

а, следовательно, условием ее безотказной работы будет противоположное соотношение

$$\Delta h_t < \Delta h_{пр}, \quad (2.17)$$

где  $h_t$  – высота щётки, проработавшей в течение времени  $t$ , мм;

$h_{пр}$  – предельная высота щетки, мм.

Для того чтобы иметь возможность прогнозировать остаточный ресурс (износ) щеток, необходимо определить скорость износа и на основании этого предложить такую высоту (ресурс) щетки, чтобы она полностью выработала его до достижения времени выполнения ТР или ТО, где появляется возможность замены изношенных щеток на новые.

Для исправной эксплуатации ЩКУ необходимо оценить возможность обеспечения назначенного ресурса и срока службы за счет правильного комплектования щеток, запасных частей, инструментов.



Необходимость повышения надежности и остаточного ресурса щеточно-коллекторного узла электродвигателей постоянного тока (ЩКУ ЭДПТ) подвижного состава городского электрического транспорта обусловлено постоянно возрастающими требованиями к совершенствованию его конструкции, ростом скоростей, нагрузок, повышением требований к технико-экономической эффективности.

Основные факторы, влияющие на надежность электродвигателя при проектировании: выбор схемы и конструкционного решения при проектировании ЭДПТ; установление узлов, входящих в него; выбор материалов; назначение режимов нормальной эксплуатации; организация ТО и ремонта; выбор режимов обкатки и испытания электродвигателей; обоснование и разработка технологических процессов на изготовление или ремонт деталей и сборку.

При диагностике пользуются так называемым методом «слабых звеньев», сущность которого состоит в следующем: при исследовании рассматриваются те узлы ЭДПТ, надежность которых в данных условиях минимальна [81, 82]. Так, в ЭДПТ такими узлами являются щеточно-коллекторный узел, якорь, обмотка полюсов и подшипниковый узел.

Количественная оценка надежности работы различных узлов проводится путем констатации уровня надежности по данным соответствующих испытаний или эксплуатации аналогичных объектов [83].

Одним из методов повышения надежности является метод замены монолитной щетки на составную. Составная щетка - это щетка, состоящая из элементов, выполненных из двух различных материалов. Они могут быть склеены, либо иметь возможность относительного перемещения. Коммутирующие свойства составной щетки определяются материалом сбегавшего элемента [84]. Основной недостаток предложенной конструкции, если ЭДПТ не имеет поворотной траверсы, то процесс выемки изношенной части затруднителен.

Следующие разработки, предложенные в [85, 86], касаются введения разреза в тело щётки под углом, поперечной или замковой части, что, во-первых, является обеспечением надежности и стабильности контакта за счет создания равнозначных

условий токосъема с точки зрения виброустойчивости при реверсивном вращении коллектора, повышением износоустойчивости контактных пар и ликвидацией заволакивания коллекторных пластин. Во-вторых, изменяется масса щётки и за счёт неоднократного применения верхней части увеличивается ресурс.

Составная щетка (рис. 2.5) с повышенным ресурсом функционально также не отличается от серийной по типоразмеру, технологии изготовления и эксплуатации. Основное отличие заключается в конструкции тела щетки.

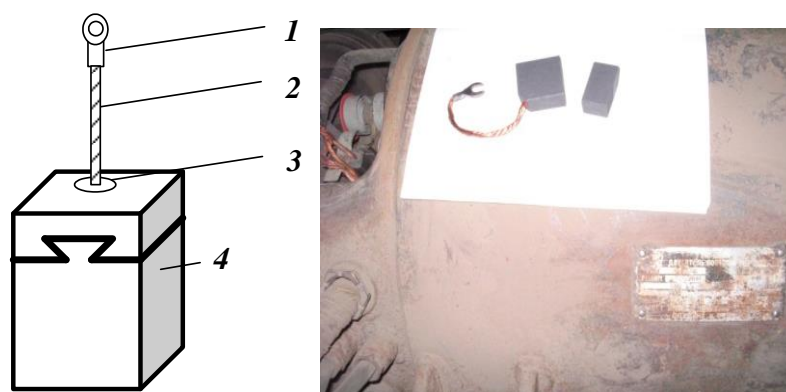


Рисунок 2.5 - Общий вид испытываемых составных щеток с повышенным ресурсом

Предлагаемая конструкция позволяет использовать верхнюю (неизнашиваемую) часть щетки неоднократно, что в свою очередь позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты электродвигателей и исключить утилизацию неизношенных частей. Это связано с тем, что при износе сменной вставки не требуется полной замены щетки. Достаточно только установить новую сменную вставку. Весь процесс замены сменной вставки значительно облегчает работу обслуживающего персонала, и сокращает время профилактических работ до 70 %. Данная конструкция была испытана в МУП «Метроэлектротранс» в Трамвайном и Троллейбусном депо № 2 г. Казани и в Сервисном локомотивном депо Юдино-Казанский, ООО «ЛокоТех-Сервис» филиал «Западный».

Одновременно с составными щетками на испытуемые электродвигатели были установлены щетки монолитного (серийного) исполнения и получены экспериментальные и расчетные данные (табл. 2.5) [87].

Таблица 2.5 - Статистические характеристики щеток

Марка полуфабриката	Износ, мм /50 ч			Коэффициент трения		
	$m_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	$\beta_{\Delta h}$	$m_{\mu}$	$\sigma_{\mu}$	$\beta_{\mu}$
ЭГ-14 (серийная)	0,04	0,018	0,993	0,17	0,037	0,905
ЭГ-14 (составная)	0,04	0,028	0,993	0,17	0,037	0,905
ЭГ-61АК (серийная)	0,07	0,037	—	0,17	0,031	—
ЭГ-61АК (составная)	0,07	0,037	—	0,17	0,031	—
ЭГ-61АК (с замковой частью)	0,07	0,037	—	0,17	0,031	—

В табл. 2.5 представлены данные для остаточного ресурса, полученные в ходе экспериментальных исследований, где  $\beta$  - вероятность того факта, что величина математического ожидания будет отличаться от средней величины генеральной совокупности не более чем на 3 %.

Распределения остаточного ресурса  $\Delta h$  цельных щеток представлен на рис. 2.6. Для щеток ЭГ-61АК был получен нормальный закон распределения следующие данные:

математическое ожидание  $m_{\Delta h} = 10,544 \cdot 10^{-3}$ ;

среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{\Delta h} = 2,826 \cdot 10^{-2}$ .

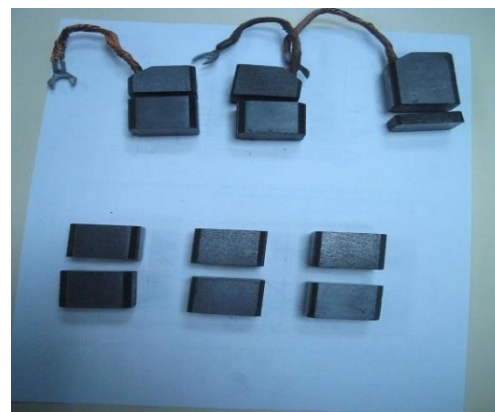
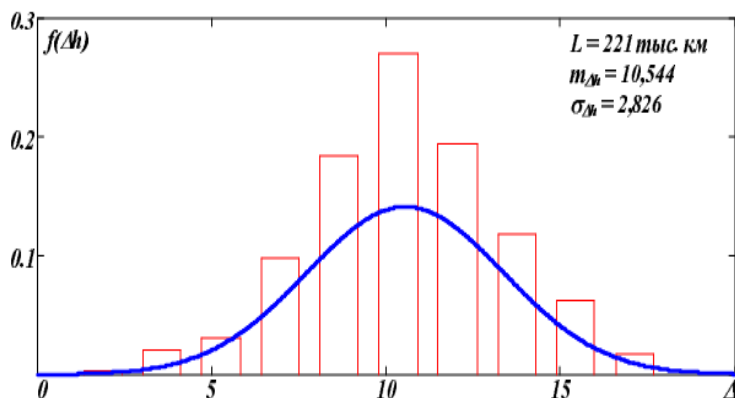


Рисунок 2.6 – Распределение параметров по высоте остаточного ресурса щеток

Следующим моментом, на который следует обратить внимание – это придание щеткам принципиально новых функций. Необходимость в данном мероприятии обусловлена тем, что на ряде промышленных объектов отсутствует система профилактических и плановых работ электротехнического оборудования, которое в силу этого «обречено» работать до появления отказа. Срок службы на таких машинах не регламентируется, и момент наступления их критического износа прогнозировать не представляется возможным, что сопряжено порой с неприятными последствиями: порча коллектора и щетки, из-за интенсивного искрения, непредвиденная остановка в работе оборудования.

Еще одним методом повышения надежности ЩКУ, а значит и остаточного ресурса, это изменение конструкции ЩКУ с применением усовершенствованной пластины, изменяющей распределение давления на щетку с целью повышения равномерности износа. Данный метод будет описан в последующих главах.

### **2.3 Методика расчета эксплуатационной надежности щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока на основе комплексной математической модели**

Остаточный ресурс щетки должен определяться при достижении предельной (минимальной) величины (высоты)  $h_{пр}$ . Под  $\Delta h_i$  понимается реальное, найденное в результате эксплуатации значение износа щетки. В связи с этим отказ щетки наступает, когда не выполняется условие (2.15).

Время наработки щетки до предельного состояния как элемента системы с постепенными отказами (время безотказной работы) – ее ресурс

$$t_p = \frac{H_0 - h_{[доп]}}{V_H} = \frac{\Delta h_{[доп]}}{V_H}, \quad (2.18)$$

где  $H_0$  и  $h_{[доп]}$  – начальное и допустимое значения высоты щетки;

$h$  – высота щетки, мм;

$V_h$  – интенсивность (скорость) ее износа.

Значения средней скорости износа щетки, полученные в процессе наблюдений, определяются как

$$\bar{v}_{\text{щ}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_{\text{щ}i}, \quad (2.19)$$

где  $\bar{v}_{\text{щ}}$  - средняя скорость износа щетки;

$n$  – объём выборки щёток для испытаний;

$v_{\text{щ}i}$  – скорость износа  $i$ -ой щетки;

При этом среднеквадратическое отклонение этой скорости будет равно

$$\bar{\sigma}_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (v_{\text{щ}i} - \bar{v}_{\text{щ}})^2}. \quad (2.20)$$

Вероятность того, что после момента времени  $t$  узел проработает безотказно в течение времени,

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}, \text{ при } n(t) \leq N, \quad (2.21)$$

где  $N$  – число испытаний щеток электродвигателя;

$n$  – допустимое число отказов щеток, не приводящее к остановке электродвигателя (определяется путем испытаний) за время  $t$ .

Для экспоненциального закона распределения объём выборки принимается по формуле

$$n = \frac{c}{2} + \frac{d(1+P_\alpha)}{2(1-P_\beta)}, \quad (2.22)$$

где  $d$  – параметр распределения Пуассона;

$P_\alpha$  – вероятность отказов у изготовителя;

$P_\beta$  – вероятность отказов у потребителя.

В результате испытаний число отказов  $n$  должно быть не больше приемочного числа, т.е.  $n \leq c$  (решающее правило). Данные отказы проявляются

постепенно в изменении одного или нескольких выходных параметров, поэтому их называют параметрическими. В процессе эксперимента применяется одно из 3-х решений: о приемке, отбраковке или продолжении испытаний [93, 94].

Если допустимое число отказов щеток в комплекте равно  $n$ , то вероятность события, что при  $N$  испытаниях встретиться не более  $n$  отказов основывается на последовательном критерии отношения правдоподобия (отношения вероятностей)

$$\gamma = \frac{P[T_\beta]}{P[T_\alpha]}, \quad (2.23)$$

где  $T_\alpha$  и  $T_\beta$  – средние времена наработки на отказ двигателя, которые соответствуют рискам изготовителя и потребителя соответственно

$$T_\alpha = \kappa \cdot T_\beta, \quad (2.24)$$

где  $\kappa$  - количество двигателей на подвижном составе.

Введем, согласно литературе [92] понятие условной случайной величины  $\tau_t$  – остаточный срок службы узла при условии, что он не отказал до момента времени  $t$ . Под вероятностью безотказной работы за время  $t$  понимается вероятность события  $\{\tau > t\}$ , состоящего в том, что за время  $t$  ЩКУ не откажет, т.е. символически это записывается так

$$p(t) = P\{\tau > t\}, \quad (2.25)$$

где  $t$  – время работы щетки;

$\tau$  – наработка щетки до отказа (случайная величина).

Так как рассматриваемый щеточно-коллекторный узел может находиться в работоспособном или в неработоспособном состоянии, то для любого момента времени  $t$  имеет место следующее тождество

$$p(t) + F(t) = 1, \quad (2.26)$$

где  $F(t) = P\{\tau \leq t\}$  – функция распределения наработки  $\tau$  до отказа (вероятность того, что за время  $t$  ЩКУ откажет).

Средняя наработка до отказа или математическое ожидание безотказной работы ЩКУ примет вид

$$T_0 = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (2.27)$$

Другой числовой характеристикой надежности ЩКУ является математическое ожидание срока службы до отказа

$$M(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x)dx. \quad (2.28)$$

Естественным влиянием на надежность щетки и на возникновение отказа является влияние скорости ее износа. При длительной эксплуатации ЩКУ неизбежно возникают повреждения щеток или нарушения работоспособности его элементов даже при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации. Развитие микродефектов на поверхности щетки, т.к. она постоянно находится под давлением и является нагруженным элементом, а отложения на коллекторных пластинах, препятствуют протеканию технического процесса.

Максимальная наработка щетки до достижения ее предельного состояния является отказом. Отказы ЩКУ можно разделить на три вида: механические, технологические и нарушения при эксплуатации. Доля отказов по третьему виду определяется в основном уровнем обслуживания на конкретном предприятии, определяя объём выборки данных о состоянии щетки при испытаниях [95, 96]. В качестве примера можно представить зависимость выходного параметра в функции времени

$$y = y_0 + a_0 t^\alpha. \quad (2.29)$$

где  $\alpha_0(t)$  – частота отказов.

Далее задается  $\Delta = y - y_0 = \delta$  и  $\delta/a_0 = V$ . Из (2.8) получено

$$t_n = \left[ \frac{\delta}{\alpha_0} \right]^{1/\alpha}, \quad (2.30)$$

где  $t_n$  - среднее время наступления отказа щетки;

$\delta$  - отклонения.

Параметр потока отказов есть производная

$$a(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.31)$$

где  $t$  – интервал времени до наступления отказов ЩКУ;

$T$  – время наработки на отказ ЩКУ;

$\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

Рассматривая случайную величину  $v(t)$  – число отказов ЩКУ за время  $t$ , за которое произойдет  $n$  отказов, определяется формулой

$$v(t) = -\frac{P'(t)}{P(t)} \approx \frac{P(t) - P(t+dt)}{dt \cdot P(t)} \approx \frac{\frac{n(t) - n(t+dt)}{N}}{dt \frac{n(t)}{N}} = \frac{dn}{dt \cdot n(t)} \quad (2.32)$$

$$P_c(t) \approx 1 - \frac{t^n \prod_{i=1}^n \lambda_i(t)}{n!} \quad (2.33)$$

где  $P(t)$  – функция распределения наработки до возникновения  $n$ -го отказа для случайной щетки;

$v(t)$  – число отказов ЩКУ за время  $t$ ;

$t$  – время, за которое произойдет  $n$  отказов;

$n$  – допустимое число отказов щеток, не приводящее к отказу электродвигателя (определяется путем испытаний);

$\lambda_i(t)$  – интенсивность отказов  $i$ -щетке на одном щеткодержателе;

$P_c(t)$  – функция распределения Эрланга суммарной наработки до возникновения  $n$ -го отказа.

В качестве приближенного закона распределения сроков наступления завершающего события, принимают нормальное распределение с математическим ожиданием  $t_{cp}$  и дисперсией  $\sigma^2(t)$  срока  $t$  наступления этого события.



Резерв времени  $R(i)$  наступления отказа  $i$  определяют, как разность между его поздним и ранним сроками наступления [97]

$$R(i) = t_{\text{п}}(i) - t_{\text{р}}(i). \quad (2.34)$$

Интенсивность отказов для составной щетки определяется законом Вейбула выражается в виде

$$P(t) = \exp[-\lambda t^\alpha], \quad (2.35)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов;

$\alpha$  – параметр потока отказов.

Оптимальная периодичность профилактик, определяемая максимумом вероятности появления неисправности, но не возникновения отказа определяется по следующей формуле

$$l = \ln(\lambda_{\text{н}}/\lambda_0) / (\lambda_{\text{н}} - \lambda_0). \quad (2.36)$$

Вероятность безотказной работы в течение наработки системы  $t_1 \div t_2$ , при условии работоспособности к началу интервала, определяется по формуле

$$P(t_1, t_2) = \frac{\exp\left[-\int_0^{t_2} \lambda(t) dt\right]}{\exp\left[-\int_0^{t_1} \lambda(t) dt\right]}. \quad (2.37)$$

С увеличением времени наработки вероятность безотказной работы снижается

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t) = a(t), \quad (2.38)$$

где  $F(t)$  – интегральная функция времени работы до отказа.

Данный метод основан на изучении статистических закономерностей появлений отказов множества однотипных устройств. Щетки не подлежат восстановлению, для этого её предельное состояние прописывается ТУ.

Таким образом, после определения скорости износа щетки, находим вероятность безотказной работы щеточно-коллекторного узла последовательно для каждого интервала времени при одном включении [98]

$$P_{\Delta\tau_i} = (1 - Q_{\Delta\tau_i})^{v_i}, \quad (2.39)$$

где  $Q_{\Delta\tau_i}$  - вероятность отказа;

$v_i$  - скорость износа.

Проработав случайное время  $\tau_1$ , ЩКУ выходит из строя и происходит замена на новый, который, проработав время  $\tau_2$ , выходит из строя и опять заменяется новым, и т.д. Отсюда считается, что  $\tau_i$  ( $i=1, 2, \dots$ ) – независимые и одинаково распределенные случайные величины с функцией распределения  $F(t)$ .

Определяется скорость износа щетки для каждого интервала времени  $\Delta\tau_i$  с учетом количества включений двигателя за этот интервал

$$v_i = f \Delta\tau_i, \quad (2.40)$$

Вероятность безотказной работы в функции времени получается путем последовательного перемножения значений  $P_{\Delta\tau_i}$  для каждого интервала времени  $\Delta\tau_i$

$$P_B(\tau) = \prod_{i=1}^n P_{\Delta\tau_i v_i}. \quad (2.41)$$

Межремонтный срок службы узлов может быть выражен следующим уравнением

$$\tau = \frac{S_{max} - S_{нач}}{tg\alpha}, \quad (2.42)$$

где  $\tau$  – межремонтный срок службы узла;

$S_{max}$  – предельно допустимое колебание пружины при износе;

$S_{нач}$  – величина, характеризующая начальное колебание приработанной щетки;

$tg\alpha$  – величина, характеризующая интенсивность нарастания износа щетки.

Комплект из  $N$  щёток в электродвигателе можно рассматривать как выборку объёмом  $N$  из большой генеральной совокупности, характеризуемой кривой надёжности  $P_{\text{щ}}(t)$ . Для некоторого выбранного момента времени  $t_i$  по исходной кривой надёжности определяют вероятность безотказной работы щётки и вероятность её отказа

$$Q_{\text{щ}}(t) = 1 - P_{\text{щ}}(t_i). \quad (2.43)$$

Вероятность не возникновения постепенных отказов ЩКУ ( $P_{\text{пос}}(t_2)$ ) определяется по формуле

$$\begin{aligned} P_{\text{пос}}(t_2) &= P_{(h_{\text{ост}} \geq h_{\text{кр}})} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(h_{\text{ост}})} \int_{h_{\text{кр}}}^{h_0} e^{-\frac{[h_{\text{ост}} - m(h_{\text{ост}})]^2}{2\sigma^2(h_{\text{ост}})}} d(h_{\text{ост}}) = \\ &= \Phi \left[ \frac{h_0 - m(h_{\text{ост}})}{\sigma(h_{\text{ост}})} \right] - \Phi \left[ \frac{h_{\text{кр}} - m(h_{\text{ост}})}{\sigma(h_{\text{ост}})} \right], \end{aligned} \quad (2.44)$$

где  $h_{\text{ост}}$  – величина оставшейся части щетки после расчетного времени работы  $t_2$ , мм;

$h_{\text{кр}}$  – критическая высота щетки, мм;

$h_0$  – первоначальная высота щетки, мм;

$\Phi$  – функция Лапласа.

Характер распределения значений величины скорости износа щетки подчиняется нормальному закону распределения, то вероятность отказа щетки к моменту времени  $t$  можно математически строго записать в виде

$$Q_{\text{ши}}(t_i) = P \left\{ V_{hi} \geq \frac{H_0 - h_{\text{доп}}}{t_i} \right\} = \frac{1}{\sigma_{m_h} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{\frac{H_0 - h_{\text{доп}}}{t_i}}^{\infty} \exp \left[ -\frac{(m_h - V_h)^2}{2 \cdot \sigma_{m_h}^2} \right] \cdot dm_h. \quad (2.45)$$

С помощью методов теории планирования экспериментов было определено время безотказной работы ЩКУ

$$t = \frac{(h - h_{\text{пр}})}{V_{\text{из}}}, \quad (2.46)$$

где  $h$  и  $h_{\text{пр}}$  – первоначальная и предельно допустимая высота щетки, мм;

$V_{из}$  – скорость износа щетки, мм/ч.

В качестве примера приведем аппроксимированные результаты исследований (табл. 2.6 и рис. 2.7), взятых с 85 единиц подвижного состава.

Таблица 2.6 - Результаты исследований по подвижному составу

Год эксплуатации	Количество двигателей, шт.	Количество ЭДПТ, отказавших из-за ЩКУ, шт.	$\lambda(t)$ , 1/год	$P(t)$	$Q(t)$	Ресурс, $T_{ср}$ , ч.
2019	340	276	0,504	0,448052	0,551948	102,8324
2020	340	208	0,38	0,379562	0,620438	136,4507
2021	340	151	0,27	0,307536	0,692464	187,9585
2022	340	94	0,17	0,21659	0,78341	301,9334

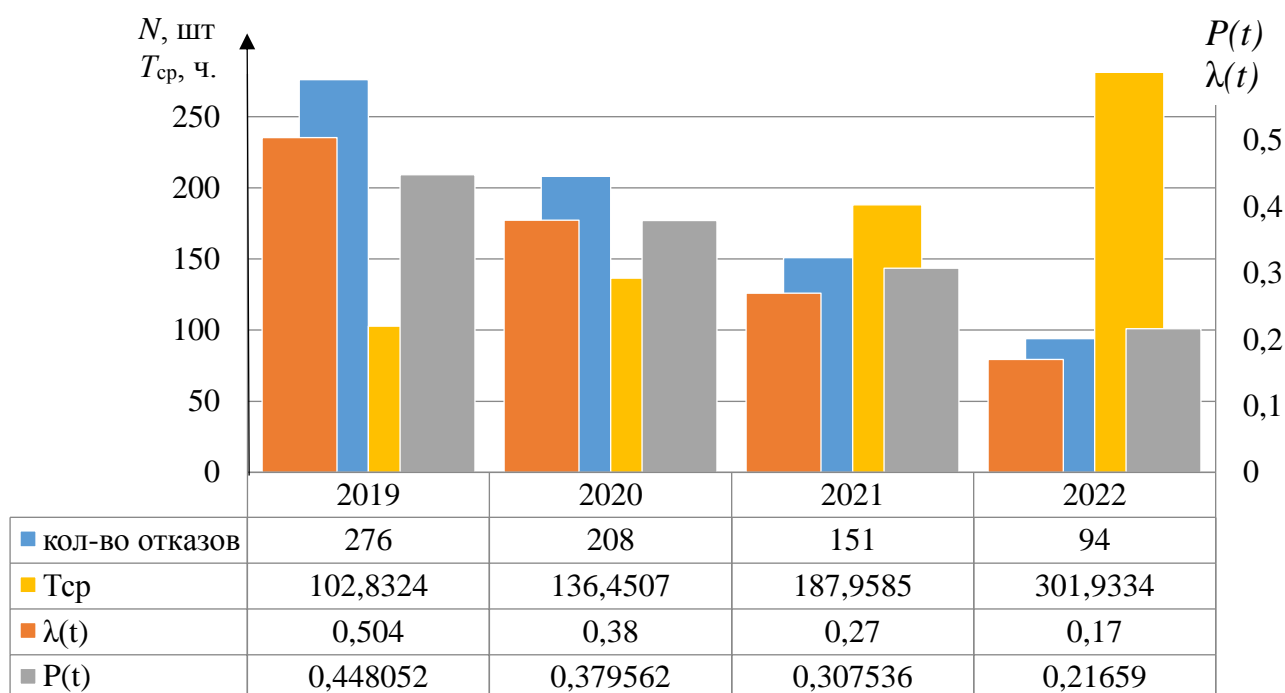


Рисунок 2.7 – Номограмма аппроксимированных результатов исследований

Принятие  $P_{\Delta t_i}$  (2.39) в качестве аргумента и увязка с ним значений средней скорости изнашивания щёток  $V_{щ}$ , полученных в процессе наблюдений за их эксплуатацией, позволили применить для их последующего математического

изучения и обобщения методы регрессионного анализа и аналитическую связь между ними представить формулой

$$\bar{V}_{щ} = A + BV_{щ} + CV_{щ}^2, \quad (2.47)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – постоянные ( $b_{щ}$ ,  $l_{щ}$  и  $h_{щ}$ ) определяемые маркой щёток и режимом работы ЭДПТ.

Перечисленные задачи предопределяют предпочтительность применения испытаний для получения наиболее достоверных данных о значениях  $V_{щ}$ .

Данные характеристики охватывают большое число факторов (конструктивно-технологических и эксплуатационных) и достаточно полно характеризуют надежность ЭДПТ в условиях эксплуатации. По полученным расчетам приведена зависимость вероятности безотказной работы  $P(l)$  ЩКУ к вероятности отказа  $Q(l)$  по причине износа щетки (рис. 2.8).

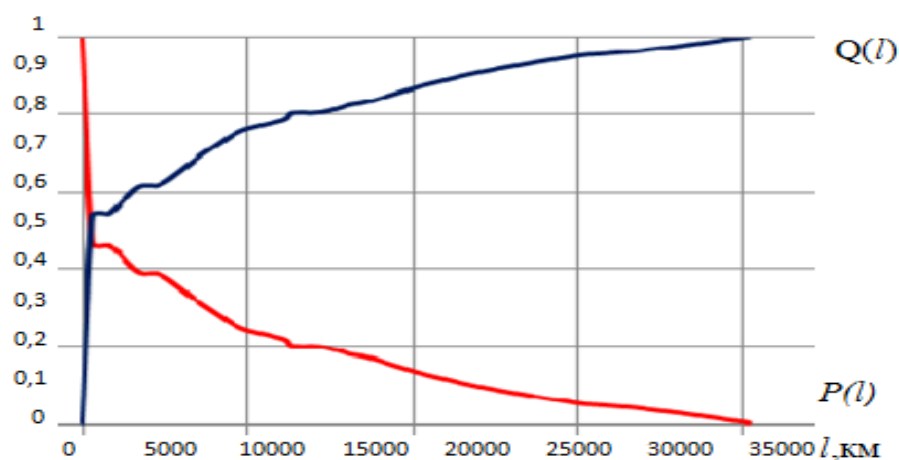


Рисунок 2.8 – Зависимость вероятности безотказной работы ЩКУ  $P(l)$  к вероятности отказа ЩКУ  $Q(l)$

Данная зависимость служит критерием для определения периодичности ТО, который задается исходя из технических, экономических и других соображений.

Исследование надежности электрических машин традиционно проводится набором статистики отказов, т.е. выходов из строя самого изделия. Щеточно-коллекторный узел с точки зрения надежности необходимо представить, как

систему, состоящую из последовательно соединенных элементов – коллектора и щетки [138]. Поэтому исследование состояния остаточного ресурса ЩКУ выполняется по алгоритмам, показанным на рисунках 2.9 и 2.10.

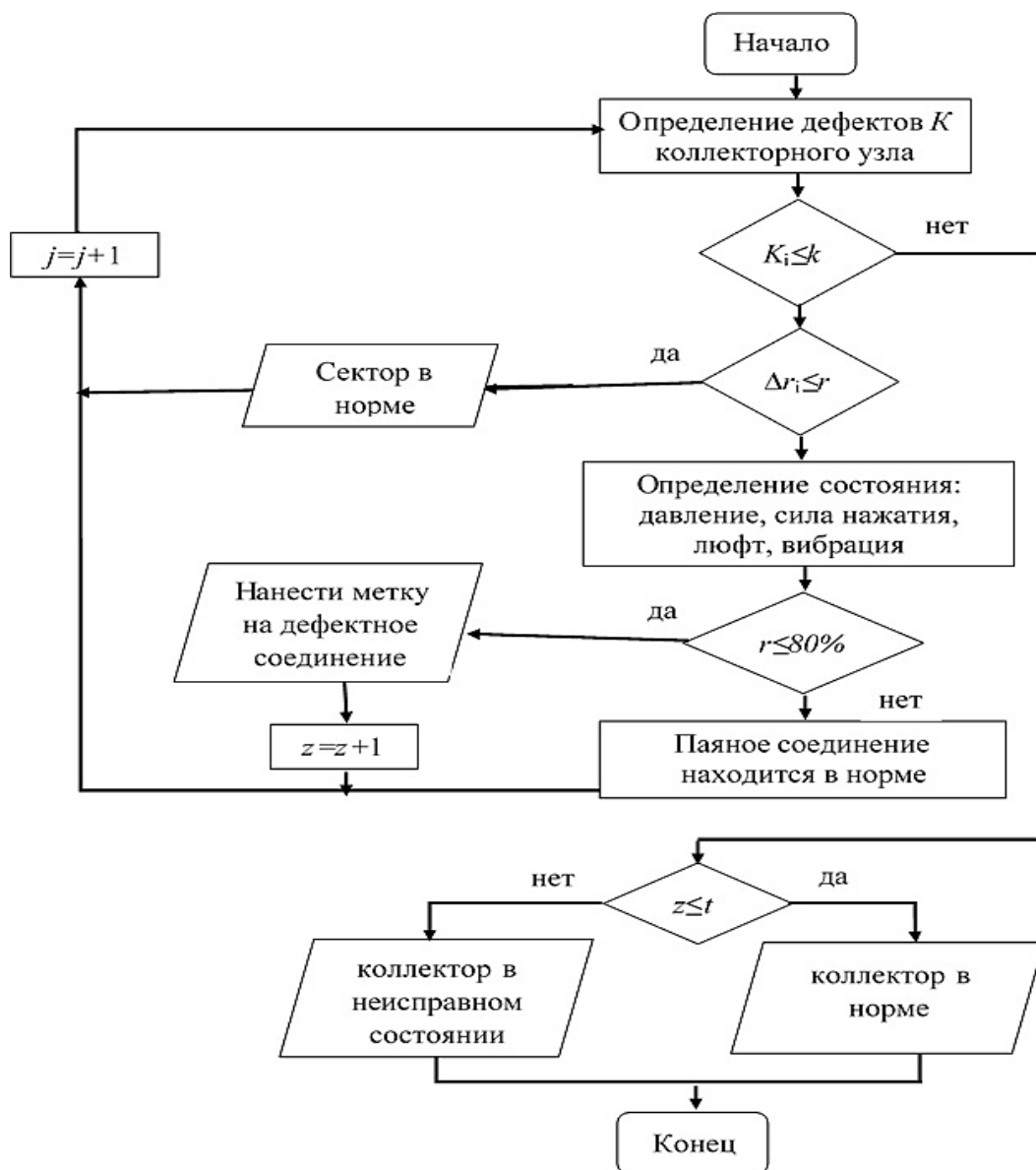


Рисунок 2.9 – Алгоритм оценки технического состояния коллектора ЭДПТ.

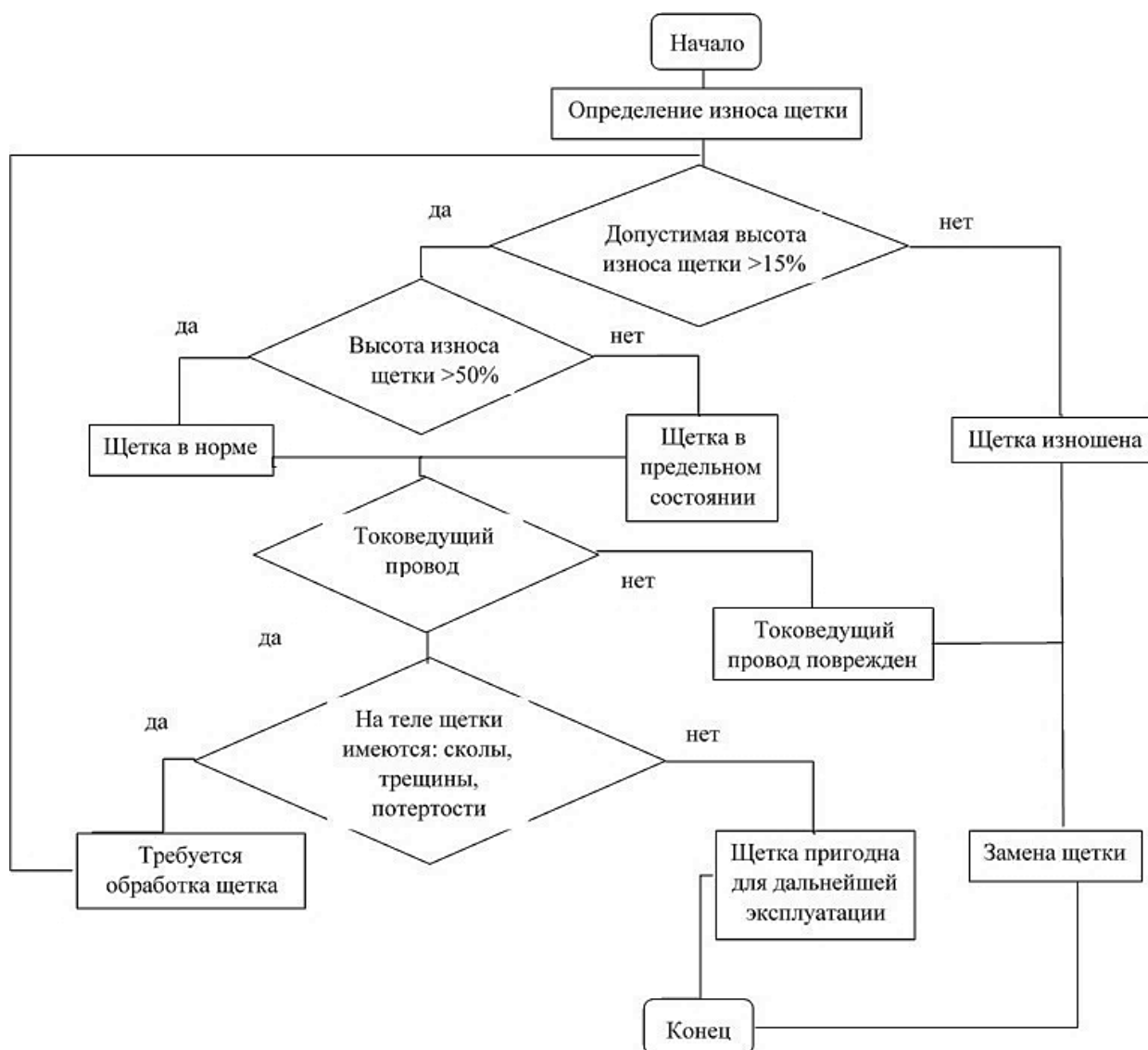


Рисунок 2.10 – Алгоритм оценки технического состояния щеток ЭДПТ.

Согласно алгоритмам, идет отбраковка сначала коллекторных пластин, как элементов, не подлежащих замене и оказывающих более сильное влияние на работоспособность всего электродвигателя, осуществляется принятие решения о пригодности коллектора, после этого переходят к анализу состояния щеток, также принимается решение о необходимости замены щеток и формируется окончательное решение об объеме необходимого ремонта.

Таким образом, цель технологических мероприятий, выполняемых по алгоритмам, в основном направлены на обеспечение лучших показателей износных свойств щёток. Возможность прогнозирования остаточного ресурса ЩКУ методом экстраполяции обеспечивается при одновременном наличии следующих условий:

- на основании обследования известны параметры технического состояния ЩКУ;
- известны определяющие параметры технического состояния, изменяющиеся соответственно выявленной скорости износа щетки;
- известны критерии предельного состояния щетки, достижение предельных значений которых возможно при развитии выявленных дефектов.

## **Выводы по главе 2**

1. Проведен анализ отказов ЭДПТ подвижного состава МУП «Метроэлектротранс» г. Казани за 2010...2022 года и Горьковской железной дорогой в Сервисном локомотивном депо Юдино-Казанский, ООО «ЛокоТех-Сервис» филиал «Западный» за 2018-2022 гг. Определена классификация видов отказов и их причин. Выявлены основные отказы: переброс электрической дуги по коллектору ЭДПТ, разрушение обмоток якоря, круговой огонь по коллектору, переброс электрической дуги по соединительной шине секции, короткое замыкание обмотки возбуждения тягового генератора, пробой изоляции обмоток якоря ТЭД, нарушение коммутации магнитной системы из-за излома двух щеток, оплавление гибкого шунта на траверсу.

2. Проведен анализ причин возникновения неисправностей ЩКУ, не допускаемые в эксплуатации. Показаны способы восстановления работоспособности щеточно-коллекторного узла по повреждениям коллектора и щеткодержателя. Из рассмотренных методов повышения надежности ЩКУ наиболее существенным является метод, основанный на изменении конструкции щетки, что в свою очередь требует модернизации конструкции нажимной пластины. Щетка является невосстанавливаемым элементом конструкции ЩКУ ЭДПТ.

3. Совместный анализ статистических данных, полученных в результате испытаний и экспериментов при эксплуатации тяговых электродвигателей, позволило создать математическую модель надежности ЩКУ. Моделирование надежности является единственно возможным методом ее оценки для уникальных, единичных объектов.



4. Задача прогнозирования технического состояния электродвигателя и ЩКУ аналитическими методами состояла в получении массива ретроспективных значений прогнозируемого параметра  $P_{щ}(t)$ , его анализ и выделение тренда в виде аппроксимирующей временной функции, определении прогнозируемой величины параметра и оценке точности прогноза остаточного ресурса (износ) щеток. На основании этого рассчитан ресурс работы щетки, необходимый до достижения времени выполнения Технических Работ и Технического Обслуживания, где появляется возможность замены изношенных щеток на новые. Численная величина ресурса показана в следующей главе.

### ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В данной главе проведено исследование щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока с применением разработанной математической модели и способа мониторинга вибрации.

Прогнозирование остаточного ресурса ЩКУ проводилось различными методами:

- экстраполяция данных о техническом состоянии ЩКУ, полученных ранее по результатам диагностирования;
- моделирование процессов износа щетки, математическими и экспериментальными моделями;
- анализ статистических данных об отказах и ресурсе более тысячи щеток при схожих режимах и условиях эксплуатации;
- методом вибродиагностики.

Испытания ЭДПТ на надежность являются неотъемлемой частью методики прогнозирования остаточного ресурса.

#### **3.1 Методика прогнозирования остаточного ресурса щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока**

Математическая модель для определения состояния ЩКУ и определения остаточного ресурса и методика, разработанная на ее основе, должны быть проверены на адекватность степени развития дефекта (частоты вибрации) на входные параметры и правильность формирования заключения работоспособности узла. Остаточный ресурс ЩКУ может наступать не только до истечения расчетного срока службы, но и после него, т.е. по фактическому техническому состоянию узла (назначенный ресурс).

На основе проведенных исследований скорости износа щеток на двигателе ДК-259, эксплуатируемом на подвижном составе МУП «Метроэлектротранс»,

получены статистические и экспериментальные данные и построены зависимости остаточного ресурса ЩКУ, подтверждающие правильность разработанной методики расчета эксплуатационной надежности и работы математической модели.

Прогнозирование момента наступления предельного состояния основано на анализе основных параметров, протекающих в ЩКУ и приводящих к отказам [106].

Основные методы определения физико-механических, коллекторных и эксплуатационных характеристик щеток подробно изложены в соответствующем стандарте. Средства измерений рабочих параметров щетки в проведении испытаний осуществлялись по ГОСТ Р МЭК 773-96 [107], согласно которому износ щетки (рис. 3.1) является важнейшей рабочей характеристикой, на которую влияют электрические, механические и внешние факторы и определяется по формуле

$$\overline{WR} = \frac{\overline{\Delta r} A}{l_{tot}}, \quad (3.1)$$

где  $\overline{WR}$  – средняя интенсивность износа (объемная), м/мм;

$\overline{\Delta r}$  – средний износ по длине щетки, м, (табл. 3.1);

$A$  – площадь поперечного сечения щетки, м<sup>2</sup>;

$l_{tot}$  – длина следа, оставленного щеткой, м.

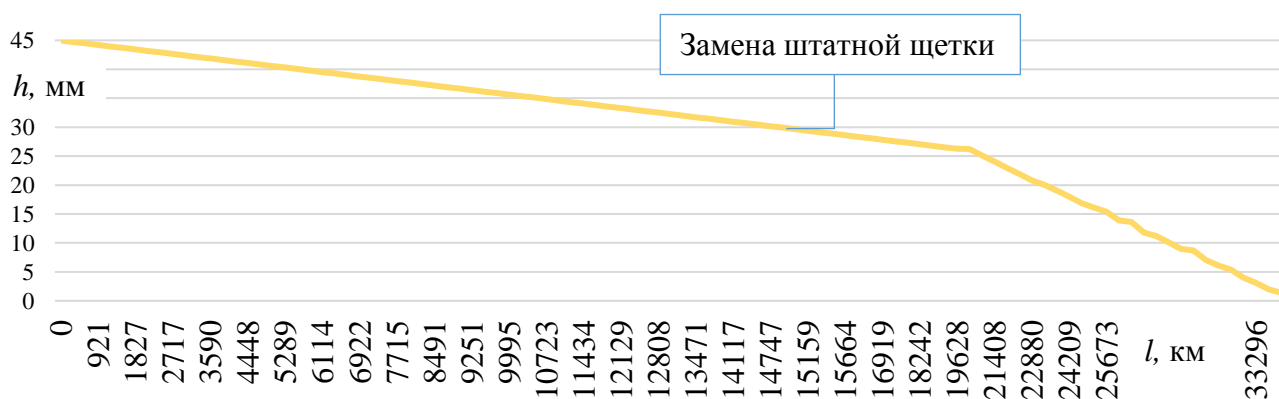


Рисунок 3.1 – Изменение износа щетки в зависимости от пробега ПС

Математическое моделирование особенно широко применяется для определения диагностических параметров и ограничений по надежности для тех

двигателей, методы расчета которых трудоемки и недостаточно разработаны [108, 109]. В результате эксплуатации значение износа составной щетки приведены в табл. 3.1, вызвавшее внезапный отказ ЭДПТ, по этой причине под  $\Delta h_i$  понимается реальное, найденное.

Таблица 3.1 - Данные по износу составной щетки ЭГ-64АК

№ п/п	Средний износ $\Delta h_i$ , мм, $10^{-2}$	Остаток высоты щеток, $H - \Delta h_i$ , мм, при $H=45$ мм	Километра ж пробега, $L$ , км	Километра ж износа ЭЩ, $l$ , км	Скорость износа ЭЩ, $V = \Delta h_i * 10^{-2} / l$ , мм* $10^{-2}$ /км (интервалы)	Время безотказной работы, $t$ , ч.
1	1,67	43,33	34664	2320	0,00071983	0
2	2,29	42,71	34168	2560	0,00089453	57,2872
3	3,38	41,62	33296	4960	0,00068145	116,704
4	4,27	40,73	32584	5040	0,00084722	165,434
5	5,65	39,35	31480	5600	0,00100893	216,715
6	6,35	38,65	30920	5840	0,00108733	230,8
7	7,32	37,68	30144	5945	0,00125342	270,508
8	8,94	36,06	28848	6540	0,00147039	328,12
9	9,23	35,77	28616	6980	0,00129635	399,0
10	10,35	34,65	27720	7120	0,00133376	477,5
11	11,44	33,56	26848	7240	0,00141584	537,6
12	12,07	32,93	26344	7350	0,00142335	603,221
13	13,87	31,13	24904	7480	0,00162033	750,14
14	14,19	30,81	24648	7640	0,00164236	780,1
15	15,67	29,33	23464	8020	0,00179702	1064,51
16	16,40	28,6	22880	8225	0,00188073	1194,38
17	17,13	27,87	22296	8560	0,00196445	1211,61
18	18,24	26,76	21408	9220	0,00207273	1211,6
19	19,31	25,69	20552	9700	0,00219432	1333
20	20,32	24,68	19744	10080	0,00228829	1531,01
21	21,08	23,92	19136	10860	0,00235268	1854,09
22	22,16	22,84	18272	11040	0,00200725	2067,54
23	23,26	21,74	17392	11840	0,00196453	2625,05
24	24,32	20,68	16544	12960	0,00187654	2707,56
25	25,42	19,58	15664	13360	0,00190269	3394,22
26	26,51	18,49	14792			3450,83
	(максимальный износ ЭЩ)	(минимальный остаток ЭЩ)		14400	0,00184097	Итого: 28381,74

По данным табл. 3.1 строится график безотказной работы щеточно-коллекторного узла в зависимости от высоты щетки (рис. 3.2).

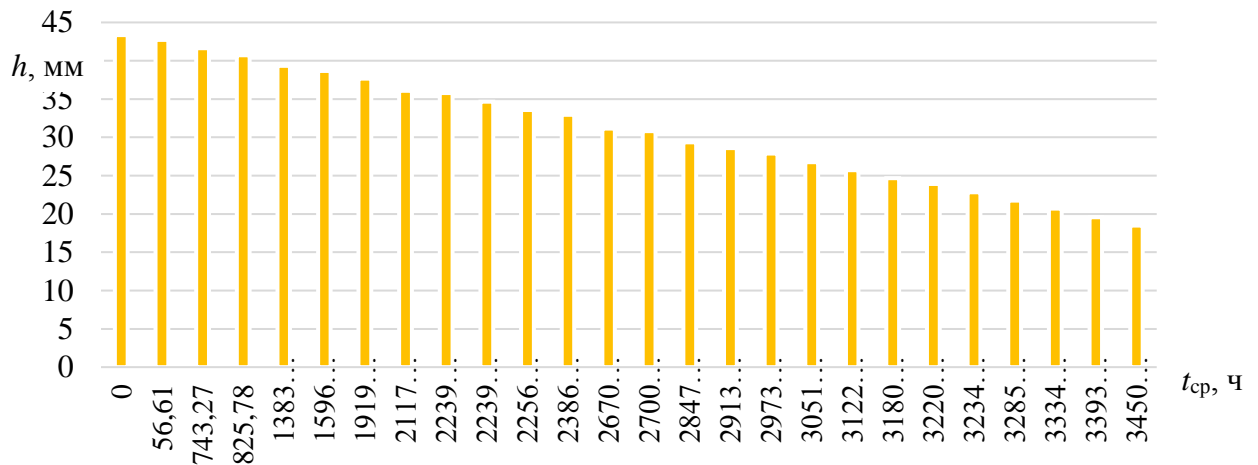


Рисунок 3.2 – Номограмма времени безотказной работы ЩКУ ЭДПТ от высоты щетки в период эксплуатации

Таким образом, после обработки полученных данных было установлено, что увеличение остаточного ресурса составной щетки (рис. 3.3) не выходит за пределы общего ресурса стандартной щётки согласно ТУ, а назначенный ресурс щетки увеличен и очередное ТО может быть отложено.

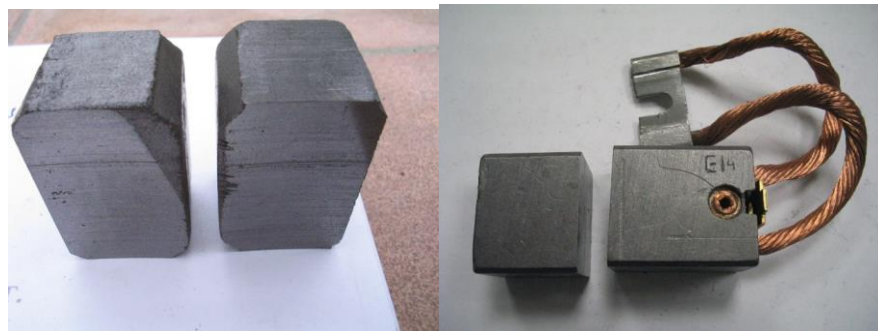


Рисунок 3.3 - Щетка с повышенным ресурсом и сменные вставки к ней

Средняя наработка на отказ

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n_{TK}} \quad (3.2)$$

По (3.2) можно определить время безотказной работы ЭДПТ [110]. Разбив на интервалы изменения высоты износа щеток (табл. 3.2 и рис. 3.4) можем найти количество значений, попавших в данный интервал до предельного износа щетки (рис. 3.5) [112].

Таблица 3.2 - Интервалы изменения высоты износа составных щеток

№ п/п	Интервалы изменения высоты щеток, $n_i$	Значение износа щетки, $\Delta h_i$ , мм	Количество значений $N$ , попадающих в данный интервал $n_i$	Схема вычислений		
				$\Delta h_i n_i$	$\Delta h^2_i$	$\Delta h^2_i n$
1	1,67	1,67	1	1,67	2,7889	2,7889
2	1,67...2,29	2,29	6	13,74	5,2441	31,4646
3	2,29...3,38	3,38	16	54,08	11,4244	182,7904
4	3,38...4,27	4,27	21	89,67	18,2329	382,8909
5	4,27...5,65	5,65	21	118,65	31,9225	670,3725
6	5,65...6,35	6,35	27	171,45	40,3225	1088,708
7	6,35...7,32	7,32	27	197,64	53,5824	1446,725
8	7,32...8,94	8,94	30	268,2	79,9236	2397,708
9	8,94...9,23	9,23	30	276,9	85,1929	2555,787
10	9,23...10,35	10,35	30	310,5	107,1225	3213,675
11	10,35...11,44	11,44	40	457,6	130,8736	5234,944
12	11,44...12,07	12,07	58	700,06	145,6849	8449,724
13	12,07...13,87	13,87	86	1192,8	192,3769	16544,41
14	13,87...14,19	14,19	88	1248,7	201,3561	17719,34
15	14,19...15,67	15,67	59	924,53	245,5489	14487,39
16	15,67...16,40	16,40	40	656	268,96	10758,4
17	16,40...17,13	17,13	34	582,42	293,4369	9976,855
18	17,13...18,24	18,24	30	547,2	332,6976	9980,928
19	18,24...19,31	19,31	30	579,3	372,8761	11186,28
20	19,31...20,32	20,32	30	609,6	412,9024	12387,07
21	20,32...21,08	21,08	27	569,16	444,3664	11997,89
22	21,08...22,16	22,16	21	465,36	491,0656	10312,38
23	22,16...23,26	23,26	21	488,46	541,0276	11361,58
24	23,26...24,32	24,32	20	486,4	591,4624	11829,25
25	24,32...25,42	25,42	10	254,2	646,1764	6461,764
26	25,42...26,51	26,51	5	132,55	702,7801	3513,901
Сумма столбцов			808	11396,88	-	184175

Используя закон нормального распределения величины износа, определяем вероятность безотказной работы ЩКУ в функции пробега и уровня износа щеток. Из них наблюдается вероятность отказа в рассчитанных пределах износа щетки. По

табл. 3.3 были построены плотности распределения вероятности остаточного ресурса щеток для электродвигателя постоянного тока ДК-259, графики которых показаны на рис. 3.6.

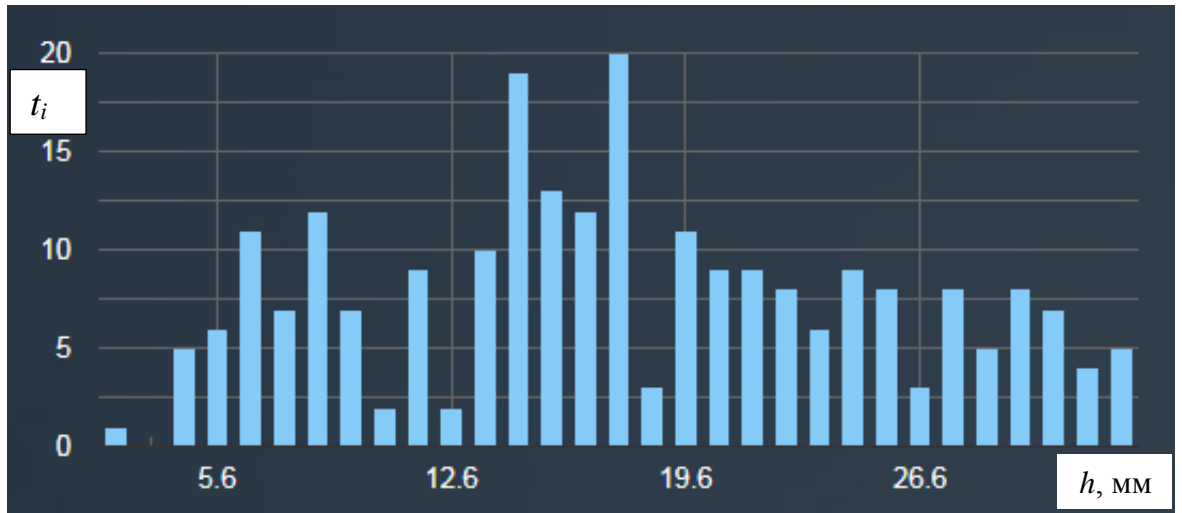


Рисунок 3.4 – Номограмма зависимости отказов от остаточного ресурса составной щетки за интервал времени

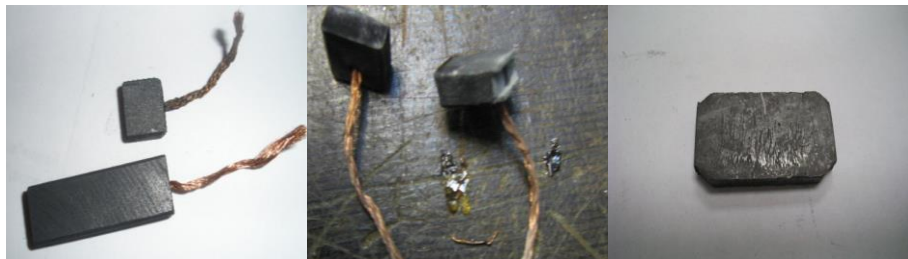


Рисунок 3.5 – Предельный износ стандартной щетки и составного блока



Рисунок 3.6 – Распределение контролируемых параметров по высоте остаточного ресурса щёток

На основании данных, показанных в таблице 3.2, можно построить количественные характеристики изменения интенсивности отказов ЩКУ (Рис. 3.7).

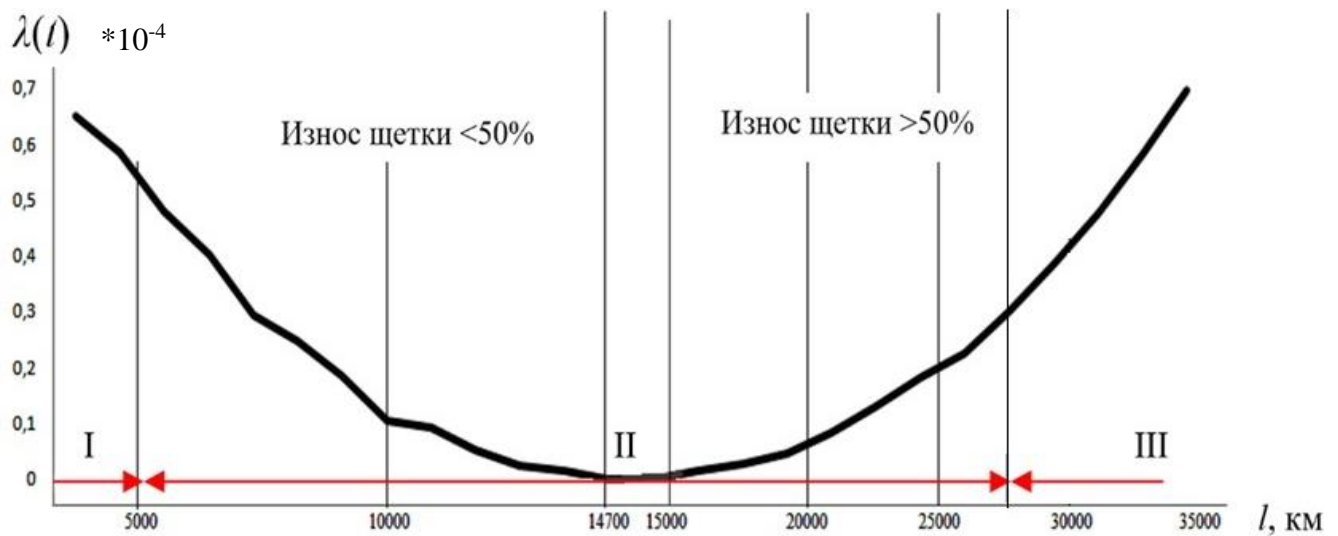


Рисунок 3.7 – Изменение интенсивности отказов ЩКУ: I – период притирки щетки, II – эксплуатация; III – аварийный износ щетки

Изменение интенсивности износа ЩКУ (щеток) ЭДПТ можно разделить на три периода: I – период притирки щетки (10% износ от высоты), II – эксплуатация (50% износ на 14700км); III – аварийный износ щетки ( $\geq 90\%$  износ от высоты). Интенсивность отказов определяет периодичность профилактики ЩКУ. Предсказание внезапных отказов и планирование различных мероприятий, связанных с обеспечением надежности ЭДПТ при его эксплуатации, осуществляется путем анализа характеристик  $\lambda(t)$ . Она характеризует надежность невосстанавливаемых частей, такой и является щетка.

Для определения (2.36) необходимо и достаточно знать только значения  $m_{\Delta h}$  и  $\sigma_{\Delta h}$  в каждый момент времени, задавая различные значения  $t_i$  и малые интервалы приращения  $\Delta h_i$ .

Индивидуальный прогноз ЩКУ исследования основан на знании математического ожидания  $m_h$  и условной дисперсии величины  $x$  в момент времени, предшествующие моменту обследования  $x(t_i)$ ,  $i=1, N$ , и принимаемой модели износа щеток.



Для проведения исследования скорости износа щеток на физической модели ЩКУ ЭДПТ использовались стандартные и разъемные щетки (ЭГ-74, ЭГ61-АК). Показатели износа и скорости износа по стандартным данным, полученным с помощью наблюдений. Результаты экспериментальных исследований и расчет статистических характеристик скорости износа составных щеток представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 - Вычисление значений математического ожидания и среднеквадратичного отклонения по результатам испытания составных щеток

Интервал износа щётки	Оставшийся ресурс щетки, $\Delta h_i$ , мм.	Кол-во щеток, $f_i$ , шт.	$\Delta h_i * f_i$	Накопленная частота, $S$	$ \Delta h_i  * f_i$	Дисперсия $D_x(x)$	Частота, $f_i/n$
35,1 – 33,45	9,9	1	9,9	1	3,899	15,205	0,00781
33,45 – 31,8	11,725	2	23,45	3	6,149	18,904	0,0156
31,8 – 30,15	13,90	4	52,60	7	8,998	20,239	0,0313
30,15 – 28,5	14,075	9	135,675	16	12,820	18,261	0,0703
28,5 – 26,85	14,25	27	384,75	43	16,184	9,701	0,2110
26,85 – 25,2	13,425	65	872,625	108	14,663	3,308	0,5080
25,2 – 23,55	12,6	11	138,6	119	11,556	12,141	0,0859
23,55 – 21,9	11,775	5	58,875	124	9,378	17,589	0,0391
21,9 -20,25	10,95	2	21,90	126	5,401	14,586	0,0156
20,25 – 18,5	10,125	2	20,25	128	7,051	24,860	0,0156
Итого	-	128	1747,275	-	96,1	154,794	1

Анализ данных таблицы 3.3 показывает, что значения остаточного ресурса имеют довольно большой разброс от математического ожидания. Полученное математическое ожидание показывает середину интервала значения износа щетки и возможное его значение продления срока службы до следующего ТО.

По данным испытаний (в таблице 3.3) по износу составной щётки электродвигателя постоянного тока, показанной на рисунке 3.7 можно определить показатели выборочных характеристик

$$\overline{m}_n = \frac{1}{N_{\text{ш}}} \cdot \sum_{i=1}^n m_{hi}, \quad (3.3)$$

$$m_{\Delta h} = \frac{1}{N_{\text{ш}}} \sum \Delta h_i n_i = \frac{1}{808} 11397 = 14,1. \quad (3.4)$$

Среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_{V_h} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{hi} - \bar{m}_h)^2}{n-1}}, \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{Щ}} - 1} (\sum \Delta h_i^2 n_i - m_{\Delta h}^2 N_{\text{Щ}})} = \sqrt{\frac{1}{808-1} (184175 - 14,10^2 \cdot 808)} = 5,4, \quad (3.6)$$

где  $m_h$  и  $V_{hi}$  – математическое ожидание и выборочные значения скорости износа щеток;

$\sigma_{V_h}$  - среднеквадратичное отклонение;

$n$  – число исследуемых щеток.

Среднеквадратичное отклонение 5,4 находится в допустимом значении (меньше 7,5) и интервал износа находится в допустимом пределе. Тогда доверительный интервал будет определяться следующим образом

$$T_p \pm k \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}}. \quad (3.7)$$

Для нахождения текущих параметров  $m_{\Delta h}$  и  $\sigma_{\Delta h}$  нормального распределения случайной величины  $h$  используют ее статистическую линеаризацию. При линеаризации изнашивания щетки с постепенными отказами соответствующие выражения для расчета  $m_{\Delta h}$  и  $\sigma_{\Delta h}$  в любом из требуемых режимов могут быть получены достаточно просто.

Принятую методику прогнозирования износа щеток можно реализовать при ограниченном числе

$$N_i^{\text{обр}} = \frac{n_{\text{обр}}}{n_{\text{вар}}} = \frac{65}{6} = 11 \text{ щёток каждого варианта}, \quad (3.8)$$

где  $n_{\text{обр}}$  – количество испытываемых щёток;

$n_{\text{вар}}$  – число выбранных вариантов заделок.

В результате были построены плотности распределения вероятности отказов щеток для ЭДПТ в зависимости от оставшегося ресурса (высоты) сменного блока щетки (рис. 3.8) [113].

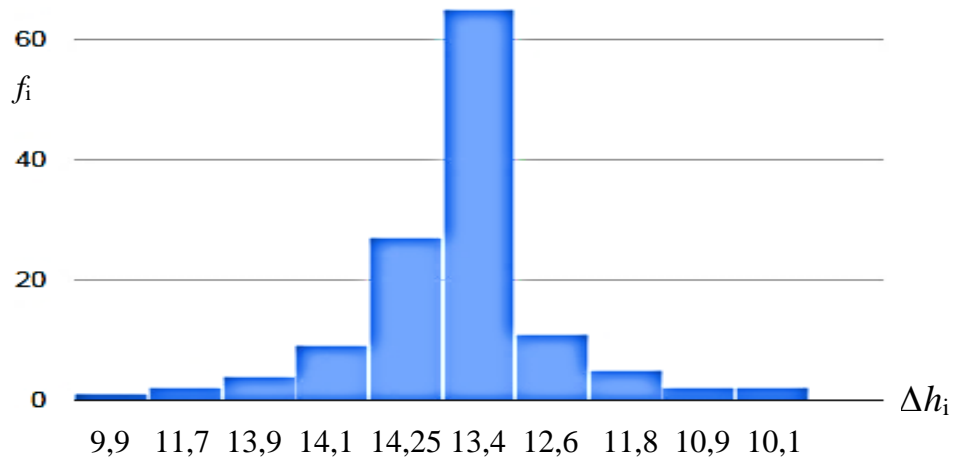


Рисунок 3.8 – Гистограмма плотности распределения вероятности отказа щеток ЭДПТ в зависимости от оставшегося ресурса

Среднеквадратическое отклонение показывает отклонение срока службы  $\tau$  от своего среднего  $M\tau$

$$\sigma = \sqrt{D\tau}, \quad (3.9)$$

где  $D_x(x) = \sum (x_i - \bar{x})^2 f_i$  – дисперсия

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 f_i}{\sum f_i} = \frac{154.79}{128} = 1.21 \quad (3.10)$$

Оценка среднеквадратического отклонения

$$s = \sqrt{S^2} = \sqrt{1.22} = 1.1, \quad (3.11)$$

где

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 f_i}{\sum f_i - 1} = \frac{154.79}{127} = 1.22 \quad (3.12)$$

Таким образом, для расчета  $m_{\Delta h}$ ,  $\sigma_{\Delta h}$  и  $Q_{щ}(t_i)$  необходимо и достаточно знать значения средней скорости  $V_h$  и высоты износа щетки  $\Delta h_{in_i}$  в каждом из предлагаемых режимов работы ЭДПТ. К постепенным отказам ЩКУ относится износ щеток. Износ коллектора по сравнению с износом щеток, как показывает опыт эксплуатации, ничтожно мал и поэтому в расчет не принимается.

### **3.2 Расчет механических колебаний щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока с учетом вибрации**

Для того чтобы иметь возможность прогнозировать остаточный ресурс (износ) щеток, необходимо определить скорость износа, зависящую от режима эксплуатации и состояния всех узлов электродвигателя, и на основании этого предложить такую минимальную остаточную высоту (ресурс) щетки, чтобы она полностью выработывала его до достижения времени выполнения технического обеспечения (ТО2), где появляется возможность замены изношенных щеток на новые, то есть предложить методику определения величины назначенного ресурса на основе результатов диагностики.

С целью прогнозирования скорости износа щетки разработана комплексная математическая модель обработки статистических данных для выявления видов отказов и прогнозирования остаточного ресурса щетки.

Методика прогнозирования остаточного ресурса ЭДПТ содержит перечень показателей надежности, входящих в состав математической модели, подлежащих контролю; метод проведения испытаний, план испытаний, перечень параметров, характеризующих состояние изделия, условия испытаний (значения воздействующих факторов, их последовательность, продолжительность) и решающее правило [90], кроме этого повышению точности работы методики способствует вибрационная диагностика, которая входит в состав разработанной математической модели [91].

Тяговый ЭДПТ конструктивно с точки зрения вибрации состоит из системы колебаний связанных узлов, которые однозначно должны учитываться при работе модели. В таком случае разрабатываемая модель «обрастает» целой системой осцилляторов, которые оказывают влияние на результат работы модели, и является комплексной. Математическая модель в свою очередь получает возможность выявления не только дефектов ЩКУ, а и дефектов остальных узлов электродвигателя, которые проявляются на спектрах вибрации.

Математическая модель обработки данных с целью формирования заключения о пригодности ЩКУ для работы до следующего ТО, то есть формирования величины остаточного ресурса обязательно должна содержать элементы вибрационной диагностики. Признаки предельного состояния ЩКУ, установленные в нормативно-технической документации являются критериями предельного состояния.

Изучение механики щёточно-коллекторного узла тяговых электродвигателей может выполняться в двух аспектах:

- анализ механических колебаний элементов щеточного узла;
- экспериментальное исследование действия механических факторов на работу щёточно-коллекторного узла.

При различных условиях эксплуатации, внешних факторов и в данной представленной модели скалярных показателей имеет функциональные зависимости. Сложность определения параметров заключается в изменяющихся параметрах, входящих в математическую модель ЩКУ является частота вибрации, характеризующая отдельные узлы и их состояние. Анализ алгоритма моделирования колебаний ЭДПТ производится путем представления отдельных узлов в виде связанных упруго осцилляторов (Рис. 3.9).

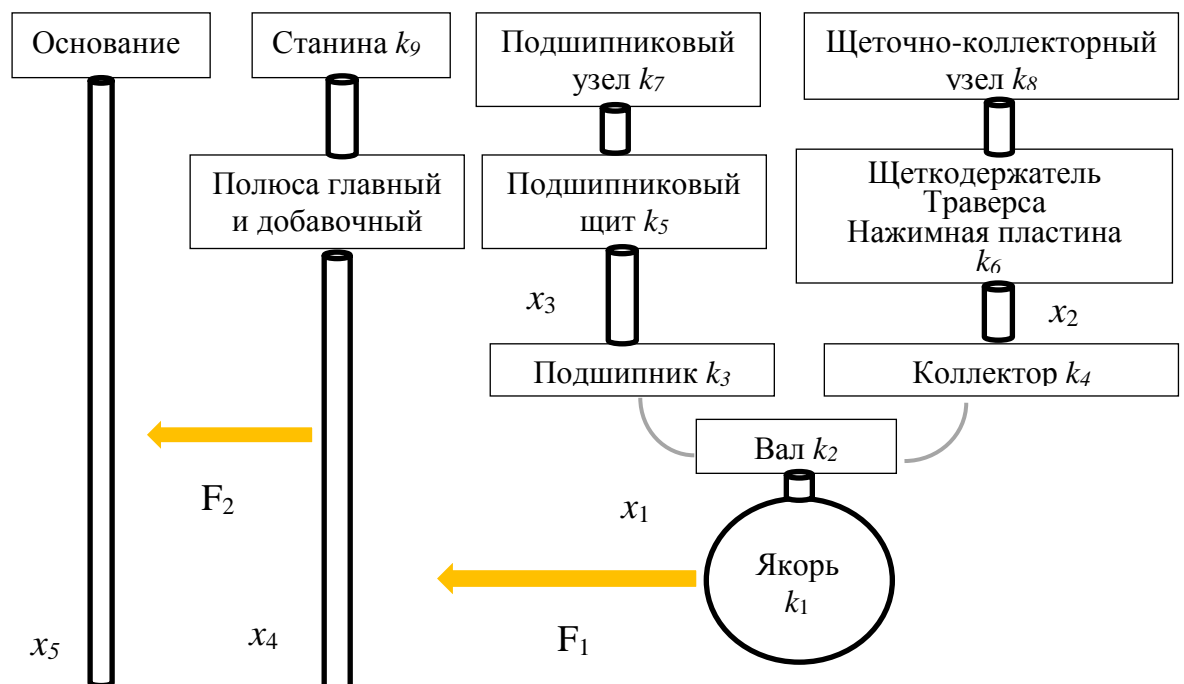


Рисунок 3.9 – Модель колебаний узлов электродвигателя

На основе синтезированной модели вибрации тягового ЭДПТ (рис. 3.9) и системы уравнений (3.14), с учетом типа электродвигателя и точечных узлов, коэффициентов демпфирования с большим количеством неопределенных технических параметров представлены в [99, 100].

Принимаемое датчиком колебание  $S(t)$  представляет собой сумму полезного сигнала на ЩКУ  $S_1(t)$  и помехи  $p(t)$  (остальные узлы) в одно результирующее

$$S(t) = S_1(t) + p(t) \quad (3.13)$$

Колебания  $S_1(t)$  координат смещения узлов относительно центра равновесия систем  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  описывает движения в системе уравнении (3.13) по каждому узлу.

$$S(t) = \begin{cases} m_1 \cdot d^2 tx_1 = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_2 k_4 + k_4 k_1} (x_1 - x_2 - x_3) - \frac{c_1 c_2 c_3 c_4}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_2 c_4 + c_4 c_1} (dtx_1 - dtx_2 - dtx_3) + F_1; \\ m_2 \cdot d^2 tx_2 = \frac{k_4 k_6}{k_4 + k_6} (x_1 - x_2) - \frac{c_4 c_6}{c_4 + c_6} (dtx_2 - dtx_3) + \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_2 k_4 + k_4 k_1} (x_1 - x_2 - x_3) - \\ - \frac{c_1 c_2 c_3 c_4}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_2 c_4 + c_4 c_1} (dtx_1 - dtx_2 - dtx_3); \\ m_3 \cdot d^2 tx_3 = \frac{k_3 k_5}{k_3 + k_5} (x_1 - x_3) - \frac{c_3 c_5}{c_3 + c_5} (dtx_1 - dtx_3) + \frac{k_4 k_6}{k_4 + k_6} (x_1 - x_2) - \frac{c_4 c_6}{c_4 + c_6} (dtx_2 - dtx_3) + \\ + \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_2 k_4 + k_4 k_1} (x_1 - x_2 - x_3) - \frac{c_1 c_2 c_3 c_4}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_2 c_4 + c_4 c_1} (dtx_1 - dtx_2 - dtx_3); \\ m_4 \cdot d^2 tx_4 = -k_9 (x_4 - x_1) - c_9 (dtx_4 - dtx_1) + \frac{k_3 k_4}{k_3 + k_4} (x_4 - x_2 - x_3) + \frac{c_3 c_4}{c_3 + c_4} (dtx_4 - dtx_2 - dtx_3); \\ m_5 \cdot d^2 tx_5 = k_9 (x_4 - x_5) + c_9 (dtx_4 - dtx_5) - \frac{k_7 k_8}{k_7 + k_8} x_4 + \frac{c_7 c_8}{c_7 + c_8} dtx_4 + F_2 \end{cases} \quad (3.14)$$

где  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  – точечные массы узлов, воздействующие на место соединения;

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  – смещение узлов относительно центра равновесия систем, коэффициенты жесткости и упругости узлов электродвигателя;

узлы электродвигателя:  $k_1$  – якорь,  $k_2$  – вал,  $k_3$  – подшипники,  $k_4$  – коллектор,  $k_5$  – подшипниковый щит,  $k_6$  – щеткодержатель, траверса и нажимное устройство,  $k_7$  – подшипниковый щит,  $k_8$  – щеточно-коллекторный узел,  $k_9$  – станина;

коэффициенты демпфирования узлов электродвигателя:  $c_1$  – якорь,  $c_2$  – вал,  $c_3$  – подшипники,  $c_4$  – коллектор,  $c_5$  – подшипниковый щит,  $c_6$  –

щеткодержатель, траверса и нажимное устройство,  $c_7$  – подшипниковый щит,  $c_8$  – щеточно-коллекторный узел,  $c_9$  – станина;

$F_1$  – сила тяги электродвигателя (на якоре);

$F_2$  – внешняя сила, действующая на станину.

Для решения системы уравнений (3.14) необходимо задать начальные положения масс и их начальные скорости смещения, т.е. сформулировать начальные условия задачи Коши:

$$x_1(0), x_2(0), x_3(0), x_4(0), x_5(0) \text{ и } v_1(0), v_2(0), v_3(0), v_4(0), v_5(0). \quad (3.15)$$

Силу, действующую на якорь двигателя, в простейшем случае можно представить, как гармоническую:

$$F_1 = F_{1,0} \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.16)$$

Что касается воздействия на станину двигателя, например, при движении всей системы по неравномерной поверхности, то, в общем случае, поскольку распределение неравномерностей по их высоте и протяженности является случайным, амплитуда и частота внешнего воздействия на станину, описываемого силой  $F_2$ , являются случайными величинами, и сила воздействия может быть задана, например, как случайный гауссовский «шум»:

$$F_2 = F_{2,0}(t) \cos[\omega(t) + \varphi], \quad (3.17)$$

где временные зависимости амплитуды и частоты будут генерироваться с помощью датчиков случайных чисел.

Один из важнейших вопросов в области экспериментального исследования узла токосъема тяговых двигателей заключается в выявлении условий потери контакта между щёткой и коллектором. Это непостоянство связано с исследованием динамических ускорений, действующих на щёткодержатель и щётку.

Условия отсутствия отрыва можно представить в следующем виде

$$\frac{P_{щ}}{c_6 r_0} \geq \sqrt{\left(\frac{\omega_1^2}{k^2} - 1\right)^2 + 4 \left(\frac{\pi \omega_1}{k}\right)^2} \quad (3.18)$$

где  $c_6$  – коэффициент упругости пружин;

$r_0$  – частота неровностей поверхности коллектора;

$n$  – коэффициент неупругого сопротивления пружин;

$w$  – измеренная величина виброускорения, мм/с<sup>2</sup>;

$m$  – масса щётки.

Расчет уровня вибрации, вызванной остаточной неуравновешенностью, ведется на основании уравнения собственных колебаний в вертикальной плоскости:

$$M_{\text{д}} \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0 \quad (3.19)$$

где  $x$  – радиальное смещение узлов относительно центра равновесия систем

$$X = \frac{M_{\text{я}} e}{M_{\text{д}}} \sin \omega t; \quad (3.20)$$

$M_{\text{д}}$  – масса двигателя;

$M_{\text{я}}$  – масса якоря;

$k$  – жесткость упругого узла.

Исходя из полной модели колебаний узлов электродвигателя можно выстроить функциональную схему объекта диагностики (рис. 3.10), которая содержит восемь узлов —  $Y1$  —  $Y8$ , имеет четыре внешних входных воздействия —  $x_1$  —  $x_4$ , и формирует четыре выходных коэффициента стадии развития дефекта —  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  (под развитием дефекта понимается процесс износа узлов в период эксплуатации ПС).

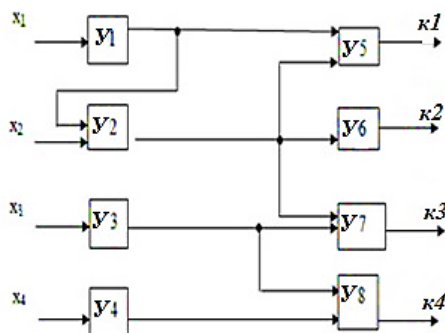


Рисунок 3.10 - Функциональная имитационная модель диагностирования узлов ЭДПТ



В функциональной имитационной модели диагностирования узлов ЭДПТ (рис. 3.10)  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – это выходные коэффициенты стадии развития дефектов того или иного узла:  $k_1$  – щетки;  $k_2$  – коллектор;  $k_3$  – якорь и  $k_4$  – подшипники.

Каждый узел формирует выходные коэффициенты стадии развития дефекта  $k_i$ , причем выходные коэффициенты стадии развития дефекта  $У5, У6, У7, У8$  совпадают с выходными стадиями развития дефекта. Примем, что  $x_i=1$  и  $k_i=1$ , если  $i$ -е входное воздействие на узел или выходная стадия развития дефекта  $i$ -го узла являются допустимыми; в противном случае  $x_i=0$  и  $k_i=0$  – наличие отказа [101, 102].

Поэтому возможные элементарные проверки отличаются только наборами контрольных точек, в которых осуществляется измерение. В этом случае задача построения алгоритма диагностики сводится к выбору совокупности контрольных точек, достаточных для решения задачи диагностики. На практике большое число проверок не может быть осуществлено, так как нет доступа к выходам некоторых узлов для подключения средств диагностики или невозможно подключиться сразу к выходам нескольких узлов вследствие создания помех  $p(t)$  (3.14).

Когда модель колебаний узлов ЭДПТ (3.13) исправна, на выходах всех элементов имеют место допустимые значения сигналов. Отказ какого-либо узла вызывает появление недопустимого значения сигнала  $p_0 - p_8$  (скачки вибрации) на его выходе и на выходах, всех связанных с ним узлов (рис. 3.8). На основании оценки работоспособности узлов ЭДПТ составлена таблица функций неисправностей (ТФН), составленная для системы (табл. 3.4) [103].

Данная ТФН (табл. 3.4) содержит всю необходимую информацию для расчетных и диагностических параметров. Каждая графа ТФН задает некоторую функцию, определяемую во время проверки. Функция равна единице, если узел ЭДПТ, находится в рабочем состоянии и ноль – в случае отказа узла. На практике возможны только те проверки, которые заключаются в измерении стадии развития дефекта на выходе одного из узлов системы, когда для измерения доступны выходы всего ЭДПТ. Обозначим элементарную проверку как  $\pi_i$ , которая представляет контроль развития дефекта на выходе  $i$ -го узла ( $i \in \{1, 2, \dots, 8\}$ ).

Таблица 3.4 - Таблица функций неисправностей

Узлы ЭДПТ в эксплуатации	Результат проверки для ЭДПТ, находящейся в состоянии рабочий – 1, отказа - 0								
	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$
Якорь - $\pi_1$	1	0	0	1	0	1	1	0	1
Вал - $\pi_2$	1	0	0	0	0	1	1	1	1
Подшипники - $\pi_3$	1	0	0	0	1	0	1	1	1
Коллектор - $\pi_4$	1	0	0	1	0	1	1	0	1
Подшипниковый щит - $\pi_5$	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Щеткодержатель, траверса и нажимная пластина - $\pi_6$	1	1	1	1	1	1	0	0	1
ЩКУ - $\pi_7$	1	0	0	1	0	1	0	0	1
Станина - $\pi_8$	1	1	1	1	1	1	0	1	0

Принцип действия разработанной комплексной математической модели можно показать с помощью представленного алгоритма, показанного на рисунке 3.11 [105, 143].

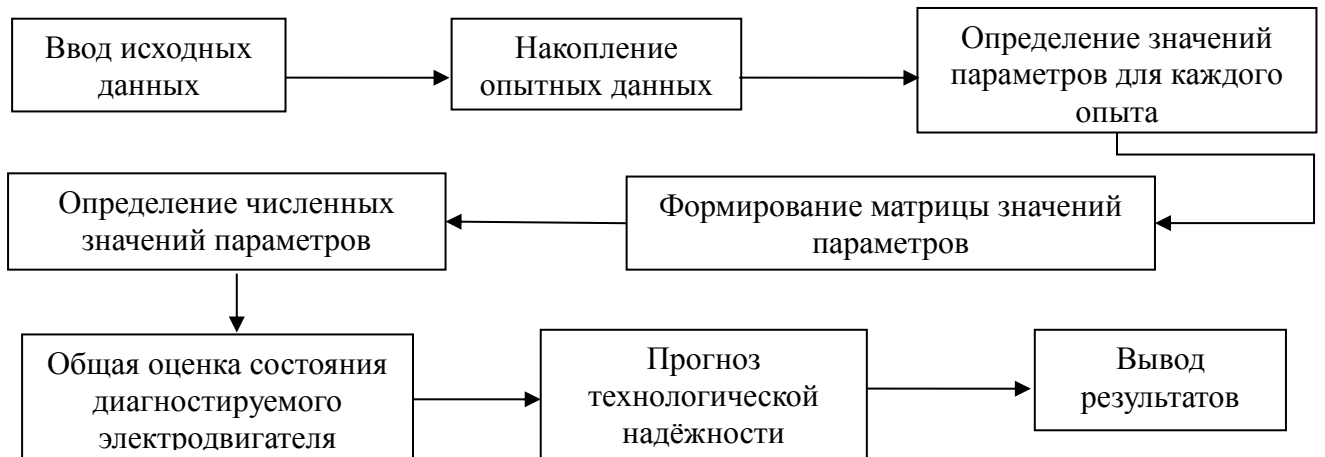


Рисунок 3.11 – Алгоритм анализа экспериментов по выявлению дефектов щетки

Введенные в функциональную имитационную модель диагностирования узлов ЭДПТ (рис. 3.10) данные должны задавать условия нормального режима работы электродвигателя, на основе которых осуществлен сбор и последующая обработка диагностической информации. Как показывает практика, перспективным является метод прогнозирования остаточного ресурса ЭДПТ по тенденции изменения их технического состояния [144].

Математическая модель для вибродиагностики асинхронных электрических машин Баркова А.В. [140, 145], которая рассматривала отказы подшипников послужила прототипом данной системы мониторинга диагностирования состояния ЩКУ ЭДПТ.

### **3.3 Способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторного узла с целью оценки состояния и определения остаточного ресурса**

Одним из наиболее важных параметров, входящих в математическую модель ЩКУ является набор показателей вибродиагностики, характеризующих состояние отдельных узлов. Для надежной работы машины необходимо, чтобы вибрации не находились вблизи от максимумов характеристики, указывающих на резонансные частоты.

Вибродиагностика – неразрушающий метод контроля технического состояния электродвигателя в целом либо отдельных его узлов по возникающим в процессе работы ЭДПТ акустическим сигналам [114, 115].

Вибродиагностика дефектов машин, приводящих к дискретному спектру вибраций, осуществляется в основном, путем частотного распознавания вибрационных составляющих спектра, обусловленных дефектами и проявляющихся на строго определенных частотах [116, 117, 118]. Причем уровни сигналов на этих боковых частотах часто превышают сигнал на несущей частоте.

Основными преимуществами вибрационной диагностики являются:

- применение метода позволяет определять наличие скрытых дефектов;
- диагностика, считывание вибросигнала, как правило, не требует разборки оборудования;
- относительно небольшое время считывания необходимого спектра вибросигнала;
- возможность обнаружения неисправностей на этапе их зарождения;
- снижение ожидаемого риска возникновения аварийной ситуации при эксплуатации оборудования.

Развитие методов вибродиагностики обуславливается не только наличие областей применения электродвигателей и требованием безаварийной работы систем, но и экономическими мотивами.

Разработанная и предложенная математическая модель, рассмотренная выше, реализована в виде программы ПК («Программа по контролю функционирования ЩКУ ЭДПТ с применением метода оценки технического состояния по спектрам вибрации» № 2021663040 от 11 августа 2021 г., заявка № 2021661990 от 02 августа 2021 г.) для реализации способа мониторинга вибрации электродвигателя с целью оценки остаточного ресурса щеток («Способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей постоянного тока» рег. № 2019119671/28 (038241) от 25.06.2019 г) (см. Приложение А Патенты на полезную модель, на изобретения и свидетельства на программы для ЭВМ).

Программа осуществляет контроль функционирования и оценку состояния щеточно-коллекторного узла двигателя постоянного тока по измеренным спектрам вибрации. Программа содержит в себе набор процедур, реализующих алгоритмы выявления неисправностей щеточно-коллекторного узла и степени износа щеток.

В программе решаются следующие задачи:

- получение набора спектров вибрации от измерителя вибрации по сети;
- накопление эталонных спектров вибрации;
- выявление частот, характерных для различных видов неисправностей;
- определение характерных неисправностей узлов электродвигателя;
- визуализацию спектров вибрации с наложением эталонов и результатов работы алгоритмов выявления неисправностей с указанием характерных частот.

Программа написана на языке программирования *VisualBasic*. В программу заложена большая база накопленных спектров вибрации различных двигателей с различной степенью износа щеток с возможностью сравнения полученных спектров и выявления типовых неисправностей в режиме реального времени.

Применение разработанной программы позволяет реализовать способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей постоянного тока.

Согласно способу, датчиками замера вибрации измеряют вибрацию электродвигателя, далее преобразуют с помощью аналогово-цифрового преобразователя полученные сигналы из аналоговой в цифровую форму и формируют с помощью вычислительных средств спектры вибрации, после чего производят спектральный анализ, при котором по несовпадению всех линий в спектрах делают вывод о наличии дефектов. При выявлении всплесков делают вывод о несоответствии спектра идеальному, выделяют для анализа характерные частоты, отвечающие за конкретные неисправности, а характер и степень развития неисправности выявляют путем сравнения значений амплитуд со значением идеального, делают вывод о хорошем техническом состоянии электродвигателя. Если указанная разница между амплитудами меньше заданной величины, делают вывод о наличии соответствующего данной характерной частоте повреждения, согласно предлагаемому изобретению для реализации способа используется штатный датчик анализатор, закрепленный на корпусе электродвигателя и применяемый для получения спектра, представляющего собой анализируемые сигналы, преобразуемые в эталонный и реальный спектры, при сравнении которых выявляются дефекты и прогнозируется их развитие.

На рисунке 3.12 представлена принципиальная схема для реализации системы мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей постоянного тока, с помощью, которой реализуется предлагаемый способ.

Способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей постоянного тока осуществляется следующим образом: на корпус электродвигателя 1 или исследуемый узел прикрепляется датчик виброметра 2, который несколько раз производит замеры и запись значений вибрации с линейной амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне от 0 до 1 кГц.

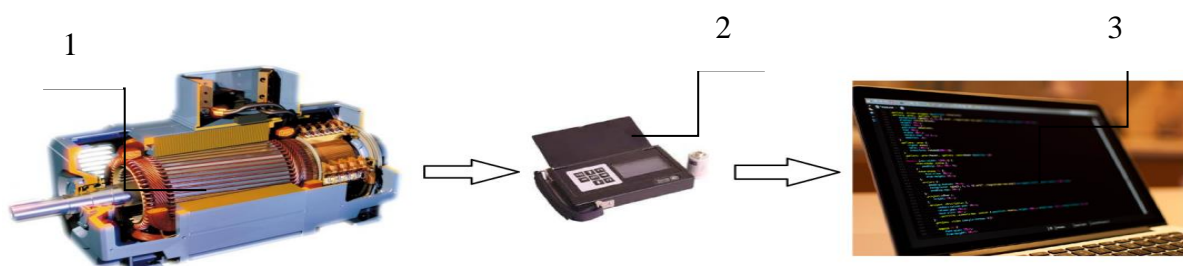


Рисунок 3.12 - Система мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов: 1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – виброметр; 3 – портативный компьютер

На рисунке 3.13 представлена блочно-функциональная система мониторинга; на рисунке 3.14 - частотная характеристика спектра вибрации электродвигателя при исправном щеточно-коллекторном узле в режиме реального времени; на рисунке 3.15 – представлена частотная характеристика спектра вибрации нового исправного (эталонного) электродвигателя в диапазоне частот от 0 до 1кГц.

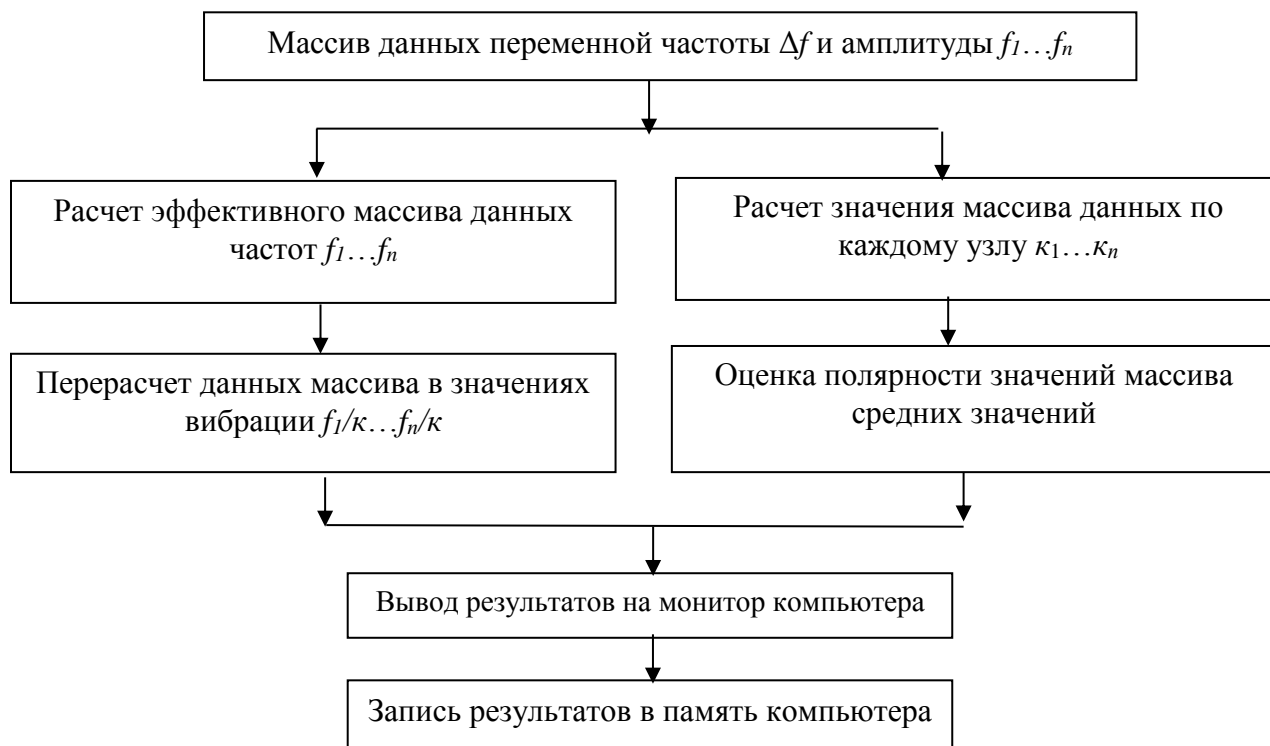


Рисунок 3.13 - Блочно-функциональная система мониторинга

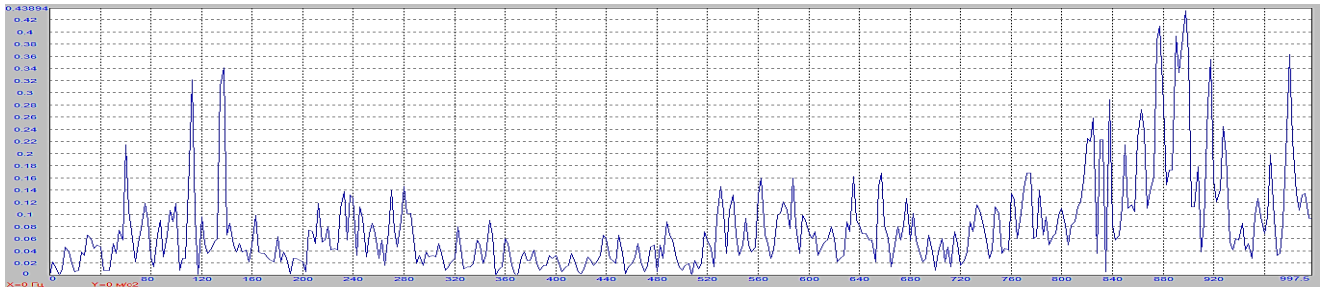


Рисунок 3.14 - Частотная характеристика спектра вибрации электродвигателя при исправном щеточно-коллекторном узле

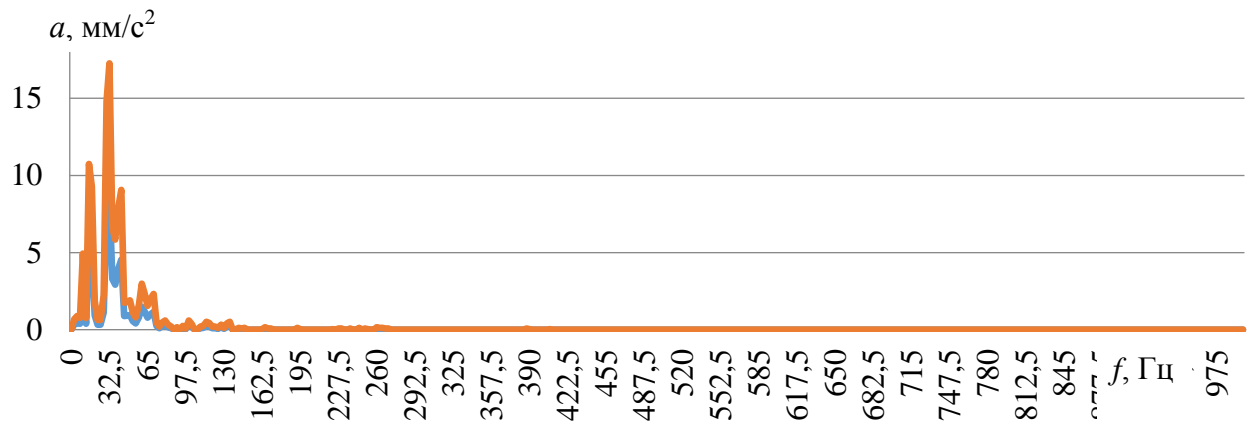


Рисунок 3.15 - Частотная характеристика спектра вибрации нового исправного (эталонный ТЭД) электродвигателя

На рисунке 3.16 - частотная характеристика спектра вибрации электродвигателя, при этом характер неисправности выявляют путем сравнения значений амплитуд.

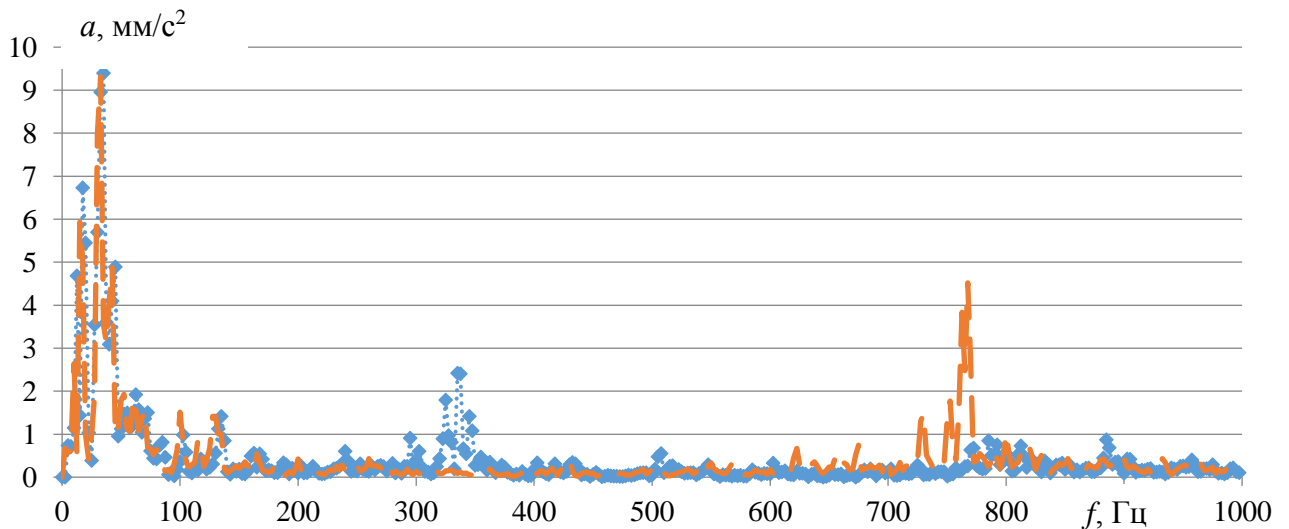


Рисунок 3.16 - Частотная характеристика спектра вибрации электродвигателя с неисправными подшипниками (синяя) и ЩКУ (оранжевая)

Диагностирование и прогнозирование технического состояния коллекторно-щеточного узла и подшипников электродвигателей постоянного тока производится путем измерения параметров вибрации виброметром, содержащим вибродатчик, электронное устройство, снабженное вычислителем спектра вибропроцесса, блок настроечных данных, содержащий: значения частоты вращения, амплитуды виброскоростей в спектре измеряемого вибропроцесса с расчетными значениями частоты  $\pm \Delta f$ , виброускорений и виброперемещений и последующего анализа полученных данных измерений.

Гармоники в спектре вибрации, соответствующие различным видам неисправностей, отличаются друг от друга. Поэтому обнаружение в спектре характерных гармоник позволяет однозначно идентифицировать электрические и механические неисправности электродвигателя.

Наличие основных признаков дефектов на электродвигателях постоянного тока можно подтвердить и расчётным путём, зная частоты составляющих вибрацию (табл. 3.5).

Таблица 3.5 - Частоты составляющих спектр вибрации, как диагностические признаки наличия дефектов электродвигателя постоянного тока

Название дефекта	Рост гармоник вибрации	Примечание
Статический эксцентриситет зазора, перекос полюсов	$f_{zn}, f_{zv}$ РилиТ	Рост вибрации при смене нагрузки
Дефекты обмоток якоря, обрыв пластины коллектора	$2p f_n$ $k f_{zn} \pm k_1 f_n$ $k f_{zv} \pm 2p f_n$ Рили Т	-
Дефекты обмоток возбуждения	$k f_{zv}$ Рили Т	-
Дефекты коммутации	$k_1 f_{zv} \pm k_2 f_n$ РилиТ	Рост при смене нагрузки
Износ щёток коллектора, биение коллектора	$k f_1$ Рили Т	-
Пульсации напряжения питания	$f_{zn}, f_{zv}$ РилиТ	-

Примечание:  $f_1$  – частота в сети питания, Гц;  $f_n$  – частота вращения якоря, Гц;  $f_{zn} = f_n Z_n$  – зубцовая частота, Гц;  $Z_n$  – число пазов якоря;  $f_{zv} = f_n Z_v$  – коллекторная частота, Гц;  $Z_v$  – число



пластин коллектора;  $p$  – число пар полюсов,  $k, k_1, k_2$  – коэффициенты развития дефекта для подшипников, коллектора и щеток соответственно (0 – нет дефекта, 1 – наличие дефекта);  $R, T$  – радиальное и тангенциальное направления возбуждения вибрации.

При наличии дефектов в щеточно-коллекторном узле [119] и подшипнике (вращающихся дефектов) колебания на частотах  $kf_{н.к}$  могут быть амплитудно-модулированными периодическими, возбуждаемыми этими дефектами, и в спектре вибрации машины появятся боковые полосы-группы дискретных линий. Частоты этих линий при учете только дефекта электродвигателя можно получить  $\omega_1 = 2\pi f_c$  и  $\omega_2 = 2\pi f_{н.к}$ . Эти частоты равны  $kf_{н.к} \pm nf_c$ , т.е. в спектре вибрации помимо  $k$  гармоник несущей частоты  $f_{н.к}$  появятся  $2k$  боковых составляющих. Во всех случаях производится мониторинг и спектральный анализ работающего электродвигателя постоянного тока.

При учете дефекта внутреннего (вращающегося с частотой  $f_B$ ) кольца подшипника и на коллекторе [т.е. если подставлять  $\omega_1 = 2\pi f_B$  и  $\omega_2 = 2\pi f_{н.к}$ ] в спектре должны появиться верхние и нижние боковые линии на частотах  $kf_{н.к} \pm nf_B$ .

К амплитудной модуляции может привести взаимодействие пульсирующего (с частотой  $f_n$ ) и вращающегося источников вибрации. В этом случае в спектре появятся боковые частоты  $kf_B \pm 2f_n$ , где  $f_n$  – частота пульсации источника (берется двойная частота пульсации)  $2f_n$ , поскольку вращающийся дефект коллектора за один оборот взаимодействует с пульсирующим источником дважды).

Тогда, например, при модуляции гармоник вращения коллектора (внутреннего кольца подшипника) комбинационной частотой первого вида [т.е. если принять  $\omega_1 = 2\pi(qf_{н.к} \pm mf_B)$ ,  $\omega_2 = 2\pi f_B$ ] – в спектре вибрации могут появиться боковые составляющие на частотах

$$kf_B \pm n(qf_{н.к} \pm mf_B), \quad (3.21)$$

а при модуляции сигнала на частоте  $kf_{н.к}$  второй комбинационной частотой [т.е.  $\omega_1 = 2\pi(q_1 f_B \pm m_1 f_C)$ ,  $\omega_2 = 2\pi f_{н.к}$ ] – на частотах

$$kf_{н.к} \pm n(q_1 f_B \pm m_1 f_C), \quad (3.22)$$

где  $q=1, 2, 3, \dots, m=1, 2, 3, \dots$  - номера гармоник.

Из результатов испытаний следует, что у всех щёткодержателей ускорение увеличивается при увеличении частоты вибрации. При повышении частоты вибрации колебания и ускорения не успевают уменьшиться до поступления следующего импульса, и получается сложение остаточного значения предыдущего ускорения с поступившим вновь и его вычитание в зависимости от того совпадают ли они по направления или нет. Поэтому при высоких частотах вибрации  $f_{ст} \geq 25$  Гц периодический характер не выдерживается точно.

Для выявления влияния частоты вращения коллектора при одновременном действии вибрации на значения ускорений щёткодержателя, они осциллографировались для всех щёткодержателей при различных частотах вибрации до наибольшей частоты вращения 1600 об/мин.

Влияние частоты вращения коллектора на изменение нажатия щёток под воздействием внешних вибраций аналогично подобному же нажатию при отсутствии внешних вибраций.

В математической модели мониторинга диагностирования состояния ЩКУ составляют расчетные критерии частоты, приведённые ниже (3.23)÷(3.28), которые позволяют построить диаграмму спектра вибрации и разбить ее по частотам развивающихся дефектов ЭДПТ для всех вращающихся узлов (подшипники, коллектор, якорь).

Расчетная частота вибрации при включении ЭДПТ, при которой возникают коммутационные перенапряжения,  $f_1$  (Гц)

$$f_1 = f_{вкл} \cdot 0,7, \quad (3.23)$$

где  $f_1$  – частота вибрации при коммутационных перенапряжениях;

0,7 – коэффициент, понижающий частоту вибрации до начальной частоты появления неисправностей вращающихся элементов ЭДПТ (коллектор, якорь, подшипники);

$f_{вкл}$  – расчетная частота вибрации при включении ЭДПТ.

- наличие дефектов на щетках диагностируется на следующих характерных частотах, которые можно рассчитать по следующим формулам

$$f_2 = f_c \cdot k_{щ} \cdot k_1 + \frac{f}{k_d}, \quad (3.24)$$

где  $f_2$  – частота наличия дефектов на щетках;

$f_c$  – частота питающей сети;

$k_{щ}$  – количество щеток;

$k_1=1 \dots n$  – коэффициенты стадии развития дефекта;

$f$  – характерная частота;

$k_d$  – количество дефектов на щетках.

- наличие повреждения элементов подшипников диагностируется на следующих характерных частотах, отражающих наличие неисправностей

$$f_3 = f_c \cdot k_{подш} \cdot k_3 + \frac{f}{k_d}, \quad (3.25)$$

где  $f_3$  – частота наличия повреждения элементов подшипников;

$k_{подш}$  – количество подшипников;

$k_3$  – коэффициент стадии развития дефекта подшипника.

- наличие повреждений (обрыва) на коллекторе диагностируется на следующих характерных частотах

$$f_4 = f_c \cdot K \cdot k_4 - f \cdot 2p, \quad (3.26)$$

где  $f_4$  – частота наличия повреждений (обрыва) на коллекторе;

$K$  – количество коллекторных пластин;

$2p$  – число пар полюсов;

$k_4$  – коэффициент стадии развития дефекта коллектора.

- биение коллектора на характерных частотах

$$f_5 = f \cdot 2p - f_k \cdot k_{щ}, \quad (3.27)$$

где  $f_5$  – частота при биении коллектора;

$f_k$  – характерная частота на коллекторе.

- наличие предельного износа щеток диагностируется на следующих характерных частотах

$$f_6 = f_{\text{я}} \cdot k_2 - f \cdot k_{\text{щ}}, \quad (3.28)$$

где  $f_6$  – частота наличия предельного износа щеток;

$f_{\text{я}}$  – частота вращения якоря;

$k_2=2$  – количество мест припоая коллекторных пластин к обмотке якоря;

$k_{\text{щ.о.}}$  – количество щеток в обойме.

Предпочтительно, измерения и их анализ производят с заданной периодичностью и создают базу данных измерений и результатов сравнения значений амплитуд на характерных частотах со значением сигнала на частоте ноль герц, по которой контролируют развитие повреждений по времени и прогнозируют остаточный ресурс оборудования [104, 146].

Мониторинг производится без внедрения в электродвигатель посторонних узлов, которые могут вызвать дополнительные помехи при считывании вибрации, при этом каждый диапазон спектра вибрации отвечает за свою частоту, указывающую на возникновение дефекта того или иного узла (рис. 3.17).

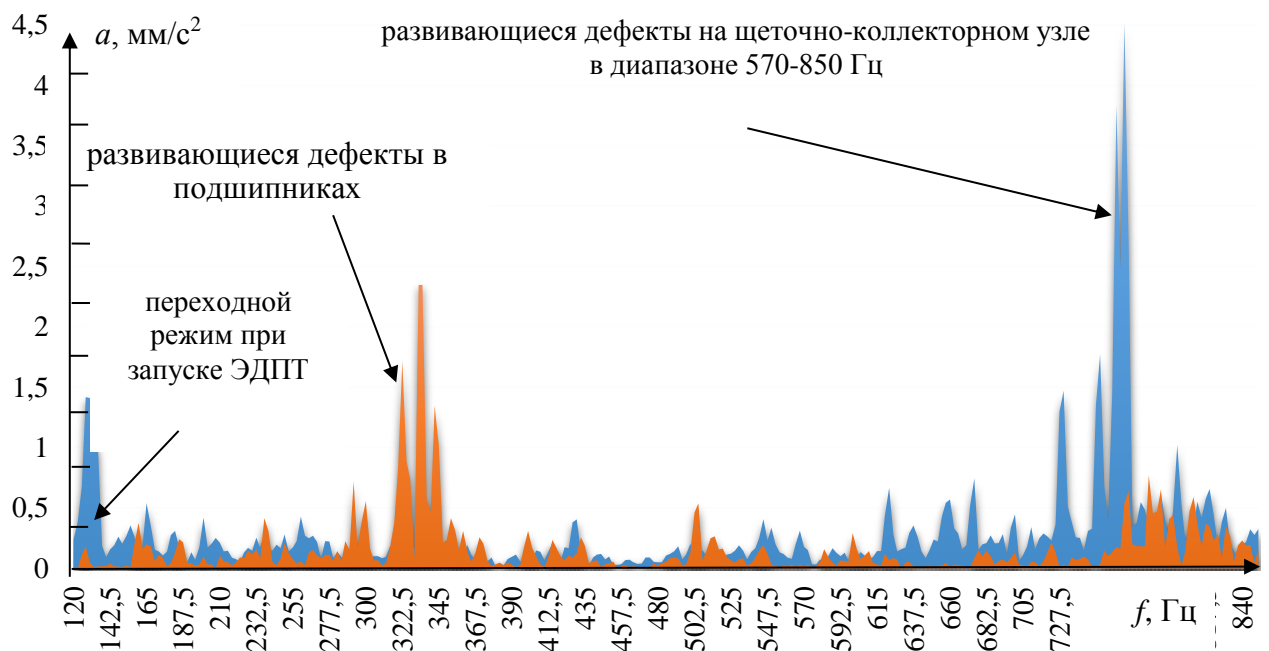


Рисунок 3.17 – Диаграмма спектра вибрации развивающихся дефектов на ЭДПТ

В целом заявляемый способ основан на спектральном анализе – процедуре записи сигналов электродвигателя для определения наличия электрических и механических неисправностей.

При возможности непрерывного контроля параметров (вибрации и износа щетки) технического состояния ЩКУ с помощью комплекса могут использоваться упрощенные методы, при которых прогнозирование осуществляется по одному параметру технического состояния:

- для ЩКУ, работающих в условиях статического нагружения и общей равномерной нагрузки, расчет проводится по снижению высоты щетки;
- для ЩКУ, для которых накоплен объем информации по функциональным параметрам, достаточный для экстраполяции значений на последующий период эксплуатации, расчет проводится по изменению этих параметров до предельных значений.

Благодаря диагностированию, в том числе вибродиагностике, предложенной в работе, своевременно выявленные дефекты и заранее подготовленные запчасти, могут снизить значительные потери рабочего времени и способствуют сокращению простоя вагонов в ремонте вследствие замены неисправных узлов и деталей.

### **Выводы по главе 3**

1. Выбор метода прогнозирования остаточного ресурса должен обосновываться точностью и достоверностью полученных экспериментальных данных и при эксплуатации, а также требованиями точности и достоверности прогнозируемого ресурса ЩКУ и риска его дальнейшей эксплуатации, наличия и надежности системы контроля его технического состояния. Разработана комплексная математическая модель обработки статистических данных для выявления видов отказов.

2. Рассмотрена методика расчета эксплуатационной надежности щеточно-коллекторного узла ЭДПТ. Повышение достоверности оценок достигнуто за счет контроля фактических режимов эксплуатации и мониторинга диагностических

параметров (вибрация, высота износа, биение, сила нажатия), характеризующих процесс деградации фактического технического состояния ЩКУ. Разработан способ мониторинга вибрации ЩКУ

3. Произведено исследование и расчет механических колебаний щеточно-коллекторного узла. Определена минимальная высота щетки, средняя скорость, среднее квадратическое отклонение и математическое ожидание износа сменного блока составной щетки. Удовлетворительное состояние щеточно-коллекторного узла тягового ЭДПТ при использовании составного блока щетки увеличивается на 14700км пробега подвижного состава.

4. Для рассмотренных типов тяговых электродвигателей и конкретных условий их применения разработаны методом вибродиагностики и экономически обоснованы оптимальные показатели безотказности и долговечности.

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЩЕТОЧНОГО УЗЛА

В данной главе диссертации рассмотрены конструкция и экспериментальные исследования усовершенствованного щеточно-коллекторного узла с применением способа мониторинга вибрации.

Основной целью экспериментальных исследований являлась проверка возможности аппроксимации кривых нормальным законом плотности распределения случайных значений скоростей износа  $\Delta h$  щеток типа ЭГ-61АК и влияние вибрации на неё, применяемых в ЩКУ электродвигателей постоянного тока серии ДК-259, ДК-410 трамвайного и троллейбусного депо МУП «Метроэлектротранс». Как уже отмечалось, применение усовершенствованной нажимной пластины позволяет увеличить остаточный ресурс ЩКУ.

### **4.1 Конструкция и исследование усовершенствованного щеточного узла с повышенным ресурсом**

Для ЭДПТ ДК-259, применяемых на подвижном составе подготовлена техническая документация и изготовлена в ремонтном цехе опытная партия щеткодержателей с усовершенствованной нажимной пластиной (рис. 4.1) и измененной конфигурацией щеток (приложения А Патенты на полезную модель, на изобретения и свидетельства на программы для ЭВМ) [120, 121].

Технический результат достигнут тем, что щеточный узел электрической машины, включает в себя щеткодержатель, с установленной в нем нажимной пластиной, составной щеткой и токоведущий кабель. Нажимная усовершенствованная пластина (рис. 4.1), прижимающая щетку к коллектору ЭДПТ, согласно полезной модели, создана из материала БрКд-1 для контакта со щеткой и выполнена рельефной, имеющей насечку в виде пилообразной поверхности, с углом наклона зуба около  $45^\circ$  для более равномерного нажатия на тело щётки (рис. 4.2).

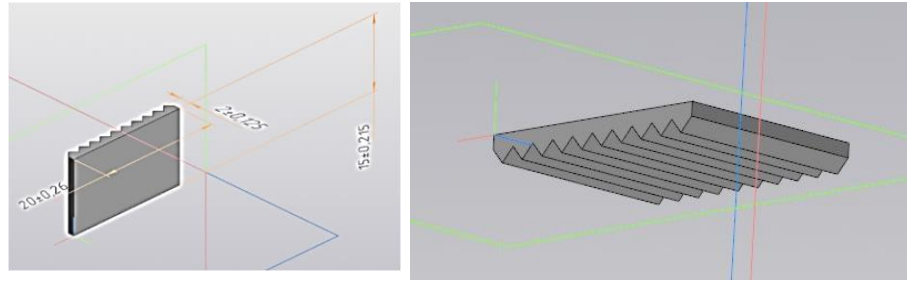


Рисунок 4.1 – Нажимная усовершенствованная пластина на ЩКУ

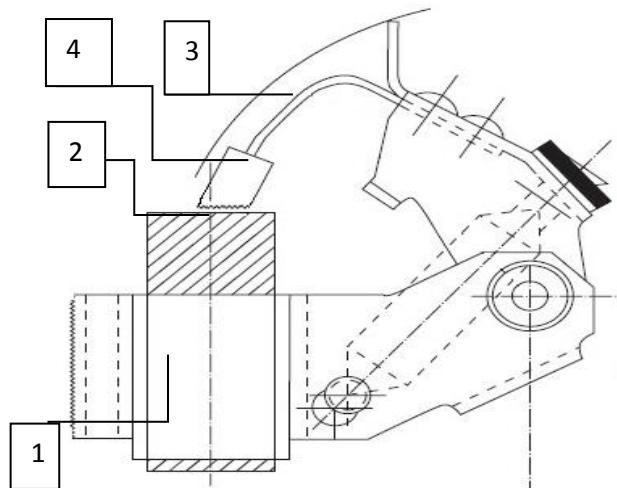


Рисунок 4.2 – Усовершенствованный щеточный узел: 1 – щеткодержатель, 2 – верхняя часть составной щетки, 3 – жгутик щетки, 4 - нажимная рельефная пластина

Техническим результатом является создание постоянства величины нажатия, обеспечение высокой виброустойчивости, снижение темпа износа щетки в щеткодержателе, жестко соединенной с пластиной с рельефной поверхностью.

При расчете на прочность прижимных пластин с жестким защемлением на действие равномерно распределенной нагрузки на всей площади щетки необходимо знать значения максимальных изгибающих моментов (момент сопротивления (1.1)) на опорах, значения максимальных поперечных сил, иногда максимальный прогиб и значения опорных реакций.

Для расчета прижимных пластин постоянной жесткости использовался коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$ . Пластины имеют жесткое защемление, на них действует равномерно распределенная нагрузка  $q$  (таблица 4.1).



Таблица 4.1 - Расчетные параметры нажимной пластины

Максимальный прогиб	$f_{max} = -k_1ql^4/(Eh^3)$
Изгибающие моменты в точке О	$M_x = k_2ql^2$ $M_z = k_3ql^2$
Изгибающие моменты в точке Н и К	$M_x = k_4ql^2$ $M_z = k_5ql^2$
Поперечные силы в точках Н и К	$Q_x = k_6ql$ $Q_z = k_7ql$
Реакции в точках Н и К	$V_x = k_8ql$ $V_z = k_9ql$
Суммарные реакции по краям	$\Sigma V_x = k_{10}ql^2$ $\Sigma V_z = k_{11}qlb$
Нормальные напряжения	$\sigma_x = 6M_x/h^2$ $\sigma_z = 6M_z/h^2$

Значения коэффициентов проверялись по различным инженерным справочникам (табл. 4.2).

Таблица 4.2 - Коэффициенты для прижимной пластины с соотношением сторон

$b/l$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$	$k_{10}$	$k_{11}$
<b>1</b>	0,0139	0,0231	0,0231	-0,0517	-0,0517	0,452	0,452	0,44	0,44	0,250	0,250
<b>1,1</b>	0,0165	0,0267	0,0234	-0,0554	-0,0538	0,448	0,412	0,45	0,473	0,253	0,271
<b>1,2</b>	0,0191	0,0302	0,0231	-0,0612	-0,0554	0,471	0,381	0,457	0,493	0,255	0,290
<b>1,3</b>	0,0211	0,0328	0,0224	-0,0687	-0,0563	0,491	0,352	0,462	0,505	0,256	0,306
<b>1,4</b>	0,0227	0,035	0,0215	-0,0726	-0,0568	0,505	0,327	0,464	0,51	0,256	0,320
<b>1,5</b>	0,0241	0,0368	0,0204	-0,0757	-0,0569	0,517	0,305	0,465	0,515	0,255	0,332
<b>1,6</b>	0,0251	0,0381	0,0193	-0,0784	-0,0571	-	-	0,465	0,518	0,255	0,343
<b>1,7</b>	0,026	0,0392	0,0182	-0,0807	-0,0571	-	-	0,465	0,519	0,254	0,352
<b>1,8</b>	0,0267	0,0401	0,0174	-0,0821	-0,0571	-	-	0,465	0,52	0,253	0,360
<b>1,9</b>	0,0272	0,0404	0,0165	-0,0826	-0,0571	-	-	0,465	0,518	0,252	0,367
<b>2</b>	0,0277	0,0407	-	-0,0829	-0,0571	-	-	0,465	0,515	0,252	0,374
<b>3</b>	0,0279	0,0408	-	-0,0832	-	-	-	0,465	0,51	0,251	0,412
<b>4</b>	0,0282	0,0409	-	-0,0833	-	-	-	0,465	0,505	0,251	0,432
<b>5</b>	0,0284	0,0413	-	-0,0833	-	-	-	0,465	0,505	0,25	0,450
<b>∞</b>	0,0284	0,0417	-	-0,0833	-	-	-	0,465	0,5	0,25	0,500

Обозначаем длину пластины -  $l$ , ширину пластины -  $b$  и  $h$  - толщину пластины

$$M_x^H = -ql^2/12 = -0,0833ql^2, \quad (4.1)$$

где  $M_x$  - эпюра моментов, действующих на сечения, перпендикулярные оси  $x$ ;

в середине пластины, как известно, значение момента в 2 раза меньше,

$$Q_x^H = ql/2 = 0,5ql. \quad (4.2)$$

В точке  $O$  данный момент пытается повернуть поперечное сечение вокруг оси  $z$ . Соответственно  $M_z$  - эпюра моментов, действующих на сечения, перпендикулярные оси  $z$ . В точке  $O$  данный момент пытается повернуть поперечное сечение вокруг оси  $x$ . Чем больше соотношение  $b/l$ , тем сильнее меняется вид эпюры  $M_z$ . Минус в значении моментов в точках  $H$  и  $K$  означает, что в данных точках растяжение будет в верхней зоне пластины.

Эпюры  $Q_{z(l/2)}$  и  $Q_{x(b/2)}$  показывают изменение максимальных значений поперечных сил в плоскостях, проходящих через точки  $A-D$  и  $A-B$  соответственно, т.е. на расстоянии  $l/2$  от оси  $z$  и на расстоянии  $b/2$  от оси  $x$  или проще говоря, по краям пластины. Полученные эпюры (рис. 4.3) зависят от соотношения сторон пластины.

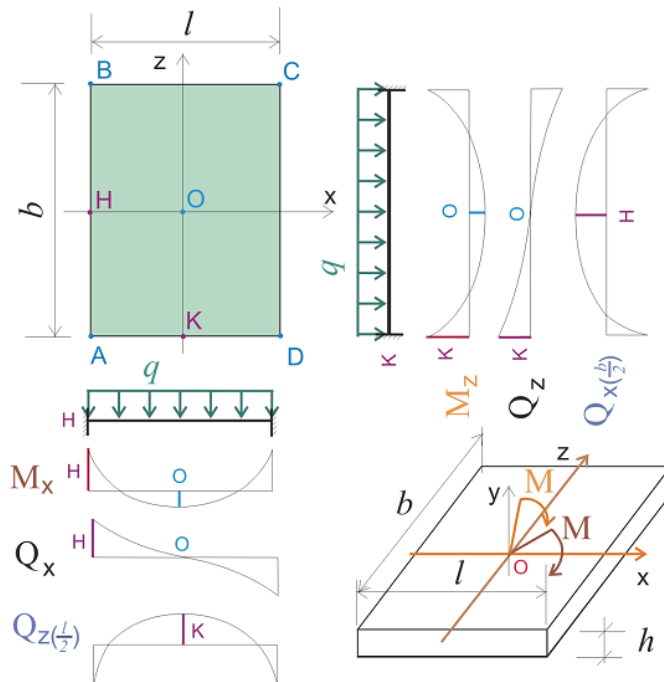


Рисунок 4.3 - Расчетные параметры нажимной пластины

Коэффициент трения щётки о коллекторную пластину определяется по закону Амонтона-Кулона

$$\mu = \frac{m}{Q \cdot R}, \quad (4.3)$$

где  $m$  – масса щетки;

$R$  – радиус коллектора, м;

$Q$  – суммарное усилие нажатия на испытываемые щетки ЭДПТ, Н;

$\mu$  – определяется как среднее арифметическое значений момента силы трения щеток, полученных при измерениях за последние 10 ч. работы, Н·м.

В таблице 4.2 отсутствуют значения некоторых коэффициентов для пластин с соотношением сторон более 1,5 по той причине, что такие пластины проще рассматривать как просто жестко заземленную балку, тем не менее, при желании произвести более точные расчеты для пластин с большим соотношением сторон можно брать нижние значения коэффициента из таблицы.

При уменьшении значения коэффициента Пуассона значение некоторых коэффициентов также будет уменьшаться. Например, при  $\mu=1/6$  значение коэффициентов  $k_2$  и  $k_3$  (при соотношении сторон  $l/b=1$ ) будет на 11% меньше приведенного в таблице, а значение коэффициентов  $k_4$  и  $k_5$  на 2% меньше приведенного в таблице 4.2. Причина тому - изменение геометрии поперечного сечения (и соответственно изменение момента инерции поперечного сечения) при изменении коэффициента Пуассона.

Скорость коллектора на первом этапе включения тягового ЭДПТ, когда скорость вращения соответствует равноускоренной, определяется

$$v_k = \sqrt{\frac{2\varphi_0 S(t)}{m_4}}, \quad (4.4)$$

где  $\varphi_0$  – суммарный приведенный угол между зубцами на пластине, его величина зависит от точности обработки и степени изношенности деталей;

$m_4$  – масса коллектора;

$S(t)$  – колебание (3.14), развиваемое двигателем за счет электромагнитного момента (1.1) за период времени  $t$ .

Для определения максимального усилия

$$S_{\max} = S(t) + v_k \sqrt{cm_4}, \quad (4.5)$$

где  $c$  – приведенная жесткость пластины.

Угол скоса оценивается в радианах

$$\varphi_{\text{ск}} = \frac{v_K b_3 \pi}{n}, \quad (4.6)$$

где  $n$  – количество зубцов;

$b_3$  - ширина зубца.

При выборе ширины зубца можно исходить из соотношения

$$b_3 \geq (1,2 \dots 1,6)h_3, \quad (4.7)$$

$$h_3 \approx (0,50 \dots 0,55)h. \quad (4.8)$$

Нажимное усилие пластины на щетку создается за счет деформации участка соприкосновения пластины с точкой контакта щетки. По мере износа щетки конфигурация участка соприкосновения пластины и щетки практически не меняется, благодаря чему сохраняется величина нажимного усилия пластины с рельефной поверхностью.

Положительными качествами предлагаемого устройства являются большая площадь соприкосновения рельефной поверхности пластины, обеспечивающая улучшенную коммутацию и снижение вибрации щетки.

Таким образом, предлагаемый щеточный узел надежен в работе, это доказывает работоспособность и практическую ценность предложенных методов, основанных на базовой коррекции результатов измерений. Поэтому замена цилиндрической пружины на рельефную пластину с постоянным нажатием является целесообразной в рассмотренном ЭДПТ, т.к. дает значительное увеличение ресурса ЩКУ, превышающий 28-30%.

Для проверки эффективности работы опытных усовершенствованных щеткодержателей со сменной щеткой в условиях эксплуатации, были смонтированы на тяговом электродвигателе трамваев КТМ-8 (71-608) и

троллейбусов ТролЗа МУП «Метроэлектротранс» г. Казани (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Трамвай КТМ-8 (71-608) № 3416 и троллейбус № 2341

Целью исследования, усовершенствованного ЩКУ является оценка влияния конструктивных изменений на величину остаточного ресурса узла в целом. Сбор, обработка и отображение экспериментальных данных приводились с использованием пакетов прикладных программ Mathcad и программирования в интегрированной среде Microsoft Visual Basic методами математической статистики, теории планирования эксперимента и математического моделирования его результатов с использованием (Приложения Б Акты внедрения и проведения экспериментов) [122].

Регулярные осмотры электродвигателей постоянного тока на в МУП «Метроэлектротранс», оборудованных опытными усовершенствованными щеточными узлами и составными щетками подтвердили результаты предварительных лабораторных испытаний в плане безопасности и надежности их эксплуатации на подвижном составе городского электрического транспорта.

Введенные данные должны однозначно задавать условия нормального режима работы электродвигателя, на основе которых был осуществлен сбор и последующая обработка диагностической информации.

Основная информация, необходимая для диагностирования ЭДПТ, поступает при проведении испытаний и экспериментов, в ходе которых регистрировались отказы и наличие дефектов в узлах.

Разработанный алгоритм (рис. 4.5) предусматривает различные способы формирования матрицы по отказам:

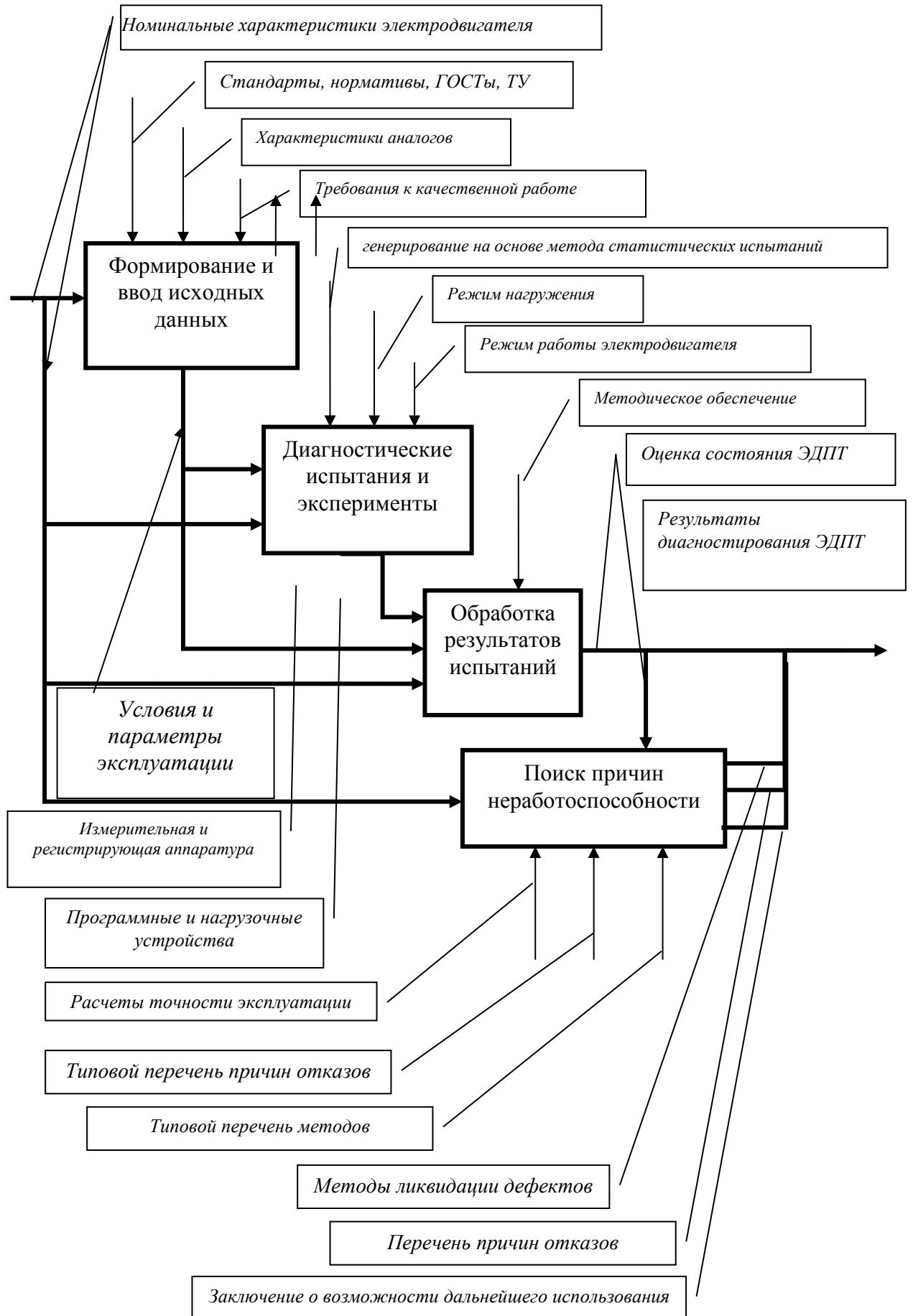


Рисунок 4.5. – Структурная диаграмма методики диагностирования

- генерирование на основе метода статистических испытаний;
- при программном нагружении;
- при обработке экспериментальной пластины – тестирование.

Завершающий этап диагностирования связан с поиском причин неработоспособности электродвигателя в настоящем и будущем. При этом устанавливают причины изменения состояния диагностируемого объекта и определяют методы устранения их отрицательного влияния.

Выполнение этого этапа базируется на оценке состояния ЭДПТ или оценке областей состояний всех регламентированных параметров. При этом рассматривают лишь параметры, у которых запас надежности близок к единице или меньше её. Учитывают сложившийся баланс факторов, определяющих динамику изменения выходного параметра.

При построении математических моделей надёжности усовершенствованного щеточно-коллекторного узла с составными щетками, а также при проверке их адекватности важнейшим этапом являются испытания на надёжность.

Если испытываемый электродвигатель и его узлы изношены незначительно и параметрические отказы по точности будут предположительно возникать лишь по отдельным выходным параметрам, то процесс диагностирования целесообразно проводить в следующей последовательности:

1. Выполнить оценку всех параметров при нагруженном наиболее форсированными режимами и прогревом электродвигателе.
2. Выполнить полный цикл нагружений при различных состояниях ЭДПТ с оценкой тех параметров, у которых запас надежности меньше или равен единице.
3. Определить причины потери электродвигателем работоспособности.

Итоговые результаты диагностирования ЭДПТ включают:

- Оценку состояния с указанием запасов надежности по важнейшим выходным параметрам;
- Перечень причин отказов (потери работоспособности) электродвигателя в настоящем и ближайшем будущем;

- Список методов ликвидации дефектов, приведших к параметрическим отказам;

Заключение о возможности использования ЭДПТ в его зафиксированном техническом состоянии.

#### **4.2 Метод проведения эксперимента и способы измерений**

Исследование надёжности щеточно-коллекторного узла представляет характерный пример применения методики бездемонтажной диагностики вибрационных испытаний для исследования надёжности отдельных элементов [123].

Испытания с применением программного обеспечения и способа мониторинга вибрации проводились на моделях определенного типа электродвигателей городского и железнодорожного подвижного состава и установленных на строительной технике. По согласованию с предприятием испытания на надежность, с учетом отказов и повреждений, вибрации, биения проводились на опытных образцах и серийных ЩКУ. Данные испытания выделялись и записывались в самостоятельные испытания.

Номенклатура параметров технического состояния ЩКУ содержит:

- наименование параметра (марка и год изготовления щетки);
- способ измерения параметров (по ГОСТу);
- характеристику погрешности измерения высоты щетки.

Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:

- усовершенствован ЩКУ;
- разработан способ и методика измерений определяющих величин;
- проведены экспериментальные исследования скоростей износа щетки и, влияющей на узел вибрации;
- получены критериальные значения реальных кривых спектра вибрации ЭДПТ;
- оценены параметры: статистическая значимость, адекватность и точность полученных моделей.



В методику проведения испытаний по вибродиагностике в состав периодического осмотра ЭДПТ были включены:

- периодичность проведения испытаний – в процессе стендовых испытаний ЭДПТ периодически через 5 ч работы замерялись параметры: высота износа щетки  $h$ , уровень вибрации, сила нажатия на щетку по мере необходимости разборки ЩКУ и каждые 3 месяца производились контрольные замеры;

- метод испытаний – стационарный;

- число испытуемых изделий – 808 щеток, притертые;

- режимы испытаний – в рабочем состоянии, обученным персоналом с квалификационной группой не ниже III при соблюдении следующих мер предосторожности и в холодном состоянии;

- перечень контролируемых параметров и периодичность их проверки – вибрация, биение, сила нажатия на щетку, высота остаточного ресурса;

- перечень необходимого испытательного и контрольного измерительного оборудования – динамометр, виброметр, глубинометр.

Фактические режимы испытаний проходили с естественными нагрузками ЭДПТ при соблюдении правил эксплуатации. При контроле конкретных параметров ЩКУ, все отказы, фиксировались при испытании и эксплуатации. При ускоренных испытаниях на надежность безотказной работы щетки, продолжительность её замера высоты составляло каждые 15 мин., при искусственно-созданном интенсивном износе до предельного состояния. При предельном износе составная щетка полностью отработала свой ресурс, остатки утилизировали через воздушный зазор. Данный момент отражен на спектре вибрации (рис. 4.6 на частоте 750-780 Гц). Замеры проводились с момента установки новых щеток до их полного износа. Учитывались отказы зависимые и возникшие одновременно с независимыми; вызванные воздействием внешних факторов, не предусмотренных в ТЗ и ТУ на изделие; вызванные нарушением обслуживающим персоналом при эксплуатации, ТО и ремонте.

Условия испытания менее напряженные, чем расчетные, что показало снижение интенсивности износа щетки. Через определенные периоды

эксплуатации  $t_1, t_2, \dots, t_n$  измерялись параметры: высота щетки, вибрация, сила нажатия на щетку, биение коллектора.

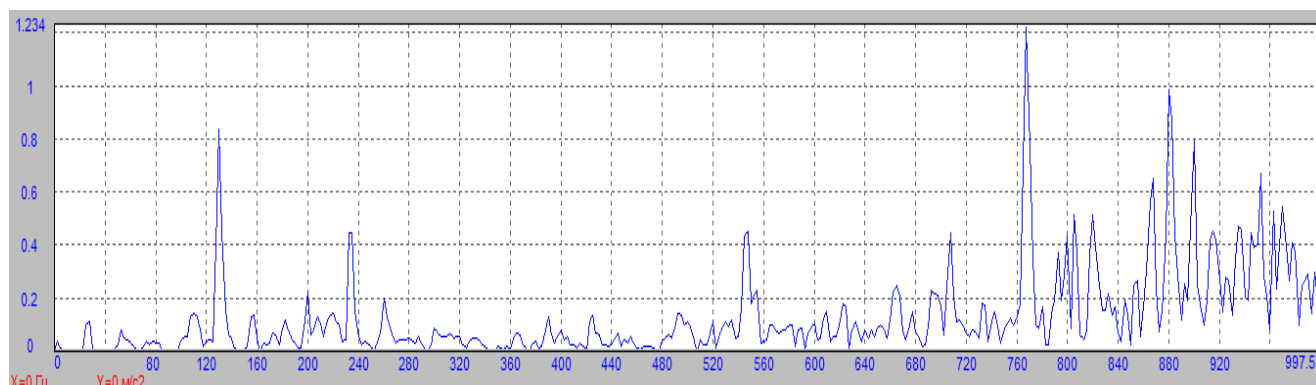


Рисунок 4.6 – Спектр допустимой вибрации ЩКУ

Величины, полученные с ЭДПТ анализировались и возникающие повреждения (износ, вибрация, биение)  $h_1, h_2, \dots, h_n$  экстраполировали зависимость до предельно допустимой величины повреждений.

Испытания по определению величины остаточного ресурса ЩКУ проводились по программе и методике в установленном порядке. Испытания обеспечиваются при одновременном наличии следующих условий: известны параметры, определяющие техническое состояние ЩКУ (ПТС); критерии предельного состояния узла; имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений ПТС. Программа испытаний содержит условия, определяющие готовность к проведению испытаний, порядок завершения отдельных этапов сборки данных и условия перехода к каждому последующему этапу испытаний на вибрацию с изменением остаточного ресурса (рис. 4.7).

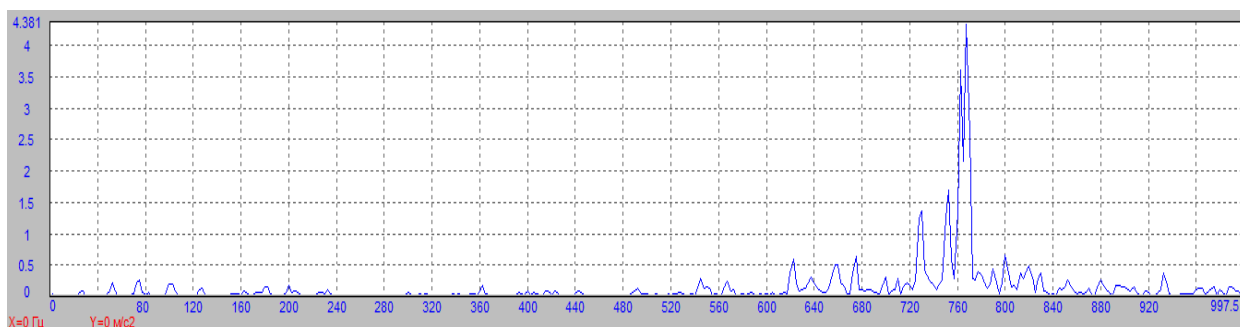


Рисунок 4.7 - Спектр вибрации предельного состояния ЩКУ

Далее применялся расчетно-экспериментальный метод, основанный на вычислении показателей надежности, отказов и повреждений по исходным данным ЭДПТ и полученным экспериментальным путём. При использовании экспериментальных и расчетно-экспериментальных методов контроля и диагностики показателей надежности (вибрация, биение, сила нажатия, остаточный ресурс), принято решение о соответствии или несоответствии щетки и её показателей заданным требованиям нормальной работы и бесперебойной эксплуатации. Решение об изменении показателей надежности ЩКУ, внесены в технические условия по эксплуатации для ТЭД ДК-410 и техническую карту (рис. 4.8) и закреплены в условиях эксплуатации, что подтверждается актом внедрения (приложение Б Акты внедрения и проведения экспериментов).

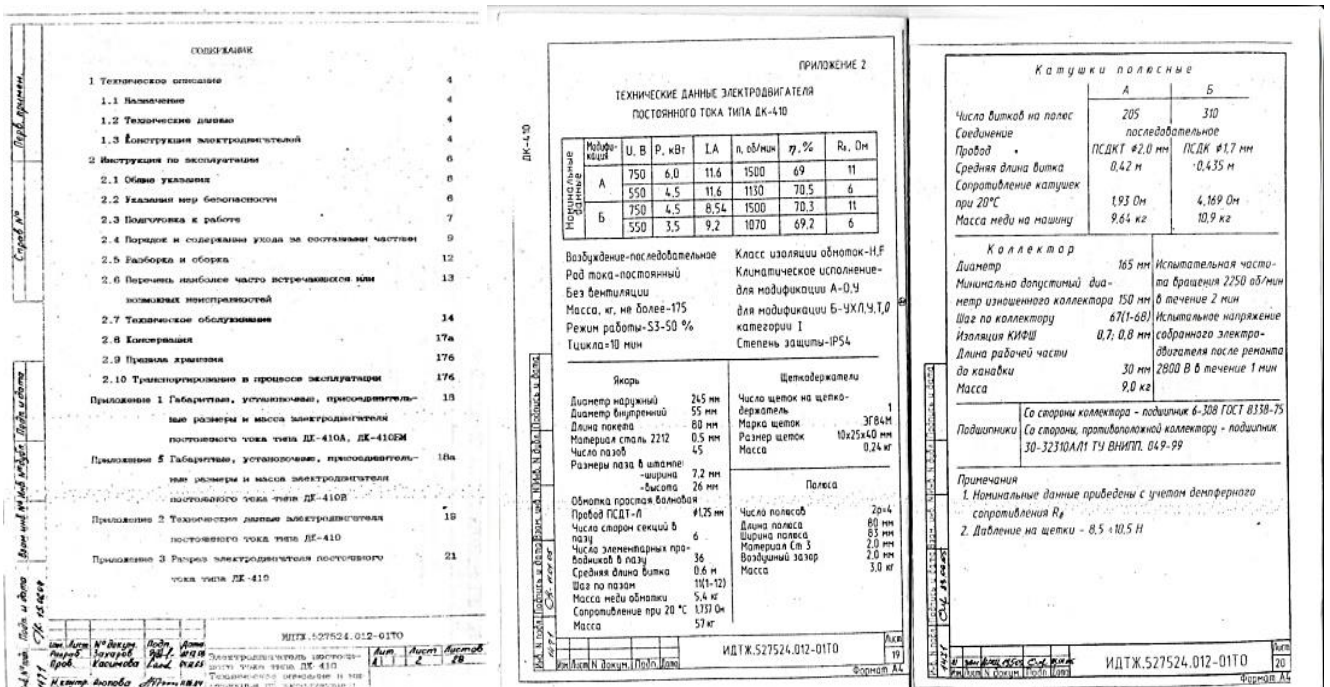


Рисунок 4.8 – Техническая карта экспериментальной установки на электродвигателе ДК-410 троллейбуса

В МУП «Метроэлектротранс» и в отделении «Юдино» Горьковской железной дороги, были проведены исследования ЩКУ электродвигателей подвижного состава, по проверке силы нажатия (стандартной и усовершенствованного щеточного узла с рельефной нажимной пластиной со

стандартной щеткой и со составной), ресурса щеток и зазоров в узле, результаты проверки занесены в табл. 4.3 и рис. 4.9.

Таблица 4.3. - Основные чертёжные и браковочные размеры узлов и деталей постоянного тока трамвайного вагона

№/№	Параметры технического состояния	Величина параметра по ГОСТ Р 51667-2000	Величина параметра при штатной пластине	Величина параметра после усовершенствования узла
1	Зазор между щёткой и щёткодержателем: - по толщине щётки - по ширине щётки вдоль коллектора	0,08 – 0,25 мм	Более 0,5 мм	0,11 мм
		0,01 – 0,3 мм	Более 0,6 мм	0,08 мм
2	Биение рабочей поверхности коллектора, измеренное индикатором в собранной машине в рабочем состоянии	0,02– 0,06 мм	Более 0,1 мм	0,041 мм
3	Нажатие на щётку	1,8 ± 0,4 Н	Менее 1,4 Н	2 Н
4	Вибрация	20 мкм	более 20 мкм	18 мкм

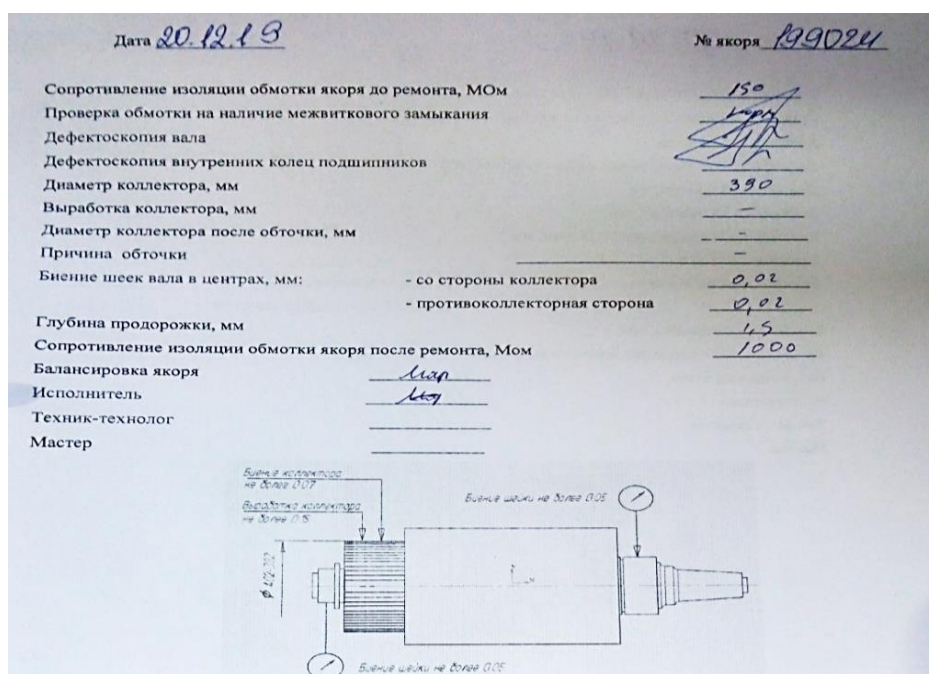


Рисунок 4.9 – Положения измерительного датчика при экспериментальных измерениях

В первой части эксперимента проводилось сравнение коллекторных характеристик стандартного и усовершенствованного щеточного узла с повышенным ресурсом.

Процесс приработки («притирки») щеток – операция трудоемкая и малопродуктивная, особенно для ЭДПТ ввиду того, что размеры и количество щеток, установленных на них соразмерны с мощностью ЭДПТ.

Износ и коэффициент трения для стандартного и усовершенствованного щеточного узла во время проведения испытания были заданы одинаковыми, т.к. щетки находились в одинаковых условиях.

Исследование износа щеток проводилось на физической модели ЩКУ электродвигателей ДК-259 и ДК-410 в МУП «Метроэлектротранс» в нормальных эксплуатационных условиях (табл. 4.4). Этот метод осуществляется только при постановке подвижного состава на плановый вид ремонта ТО – 3 и измерения размеров щетки и вибрации на узле.

Для щёток стандартных и составных приведено степенное выражение [127] для аппроксимации скорости изнашивания

$$V = k \cdot V_{\text{ск}}^m \cdot P^n, \quad (4.8)$$

где  $V$  – скорость изнашивания;

$k$  – безразмерный коэффициент;

$V_{\text{ск}}$  – скорость скольжения;

$P$  – контактное давление;

$m, n$  – показатели степени.

Приработка щеток проводилась при работе двух ЭДПТ по схеме взаимной нагрузки в течение 4 ч при номинальном токе нагрузки 810 А и номинальном напряжении на выводах ЭДПТ 1000 В.

Метод измерения линейного износа с помощью глубиномеров относится к прямым непосредственным измерениям. В ходе эксперимента определяется величина износа разрезной щетки следующим образом:

Таблица 4.4 - Проведение экспериментальных испытаний щеток с повышенным ресурсом

Название предприятия	Тип и характеристики двигателя	Место установки и дата начала испытаний		Примечание
МУП «Метроэлектротранс», г.Казань, трамвайное депо №3	ДК-259Г-3: -мощность, 50кВт, -напряжение, 275/550В, -частота вращения, 1200об/мин,	Трамвай №3362 КТМ-8	12.10.21	Установлено 2 щетки марки ЭГ61АК на ТЭД №2. (нижний щеткодержатель) ( $\Delta=8$ мм)
			19.10.21	Установлена 1 щетка марки ЭГ61АК на ТЭД №2. (верхний щеткодержатель) ( $\Delta=8$ мм)
			28.10.21	Установлено: 3 щетки марки ЭГ61АК на ТЭД №1. (2–верхний щеткодержатель, 1–нижний щеткодержатель), 3 щетки марки ЭГ61АК на ТЭД №2 (2 – верхний щеткодержатель, 1 – нижний щеткодержатель), 1 щетка марки ЭГ61АК на ТЭД №4 (верхний щеткодержатель). ( $\Delta=8+6$ мм)
МУП «Метроэлектротранс», г.Казань, троллейбусное депо №2	ДК-410А-3 - мощность, 110кВт, -напряжение, 550В, - частота вращения, 1500об/мин,	Троллейбус №1143	13.07.21	Установлено 4 щетки марки ЭГ61АК ( $\Delta=16$ мм) – по мере выработки заложенного ресурса 4 вставки были заменены (две - 22.11.21, две – 20.12.21.)
			25.10.21	Установлено 4 щетки марки ЭГ61АК ( $\Delta=8$ мм) по мере выработки заложенного ресурса 2 вставки были заменены (28.12.21.)
		Троллейбус №1145	17.10.21	Установлено 4 щетки марки ЭГ61АК ( $\Delta=8$ мм) – по мере выработки заложенного ресурса 4 вставки были заменены (10.11.21)
			25.10.21	Установлено 4 щетки марки ЭГ61АК ( $\Delta=8$ мм) – по мере выработки заложенного ресурса 1 вставка были заменены (22.01.21)
		Троллейбус №1135	17.10.21	Установлено 4 щетки марки ЭГ61АК ( $\Delta=8$ мм) – по мере выработки заложенного ресурса 4 вставки были заменены (24.11.21)
			25.10.21	Установлено 4 щетки марки ЭГ61АК ( $\Delta=8$ мм) – по мере выработки заложенного ресурса 4 вставки были заменены (две - 27.11.21, две- 22.01.22)

\*Примечание: где  $\Delta$  - высота первоначально установленной сменной вставки

Измерялся линейный износ щеток  $\Delta h_i$  с помощью штангенглубиномером ШГ 0 – 200. Рабочая смена подвижного состава на линии 16 ч. Замер величины износа ведётся от верхней кромки окна щеткодержателя глубиномером (рис. 4.10.).

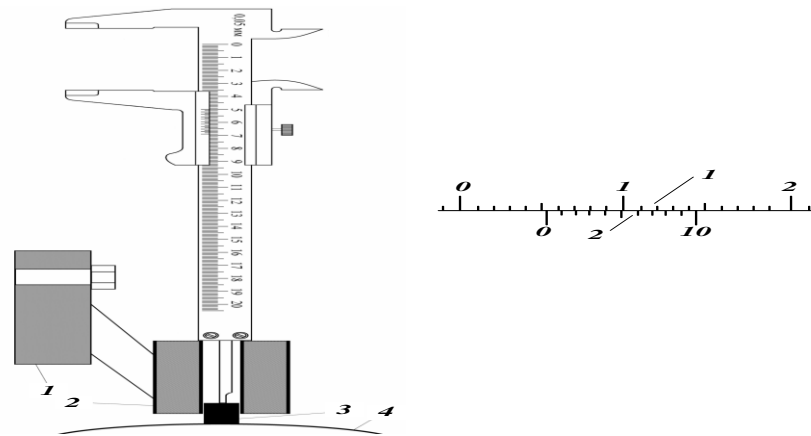


Рисунок 4.10 – Методика измерения линейного износа щеток:

- а) – размещение штангенглубиномера в окне щёткодержателя (1 - Кронштейн, 2 - Окно щёткодержателя, 3 - Щётка, 4 - Коллектор;  
 б) – вид шкалы с нониусом; в) (1 – основная шкала; 2 – шкала нониуса).

Измерялась сила нажатия со стандартной нажимной платиной и усовершенствованной рельефной пластиной из БрКд-1. На рис. 4.11 приведены графики зависимости высоты щетки от силы нажатия на щетку при идеальной механике ЩКУ для различных высот щетки (износа) в процессе наработки на ресурс. Из графиков видно, что каждая кривая имеет область ярко выраженного диапазона оптимальных нажатий на щетку, который достаточно узок на начальном этапе эксплуатации ЭДПТ, а затем расширяется по мере изнашивания щетки.

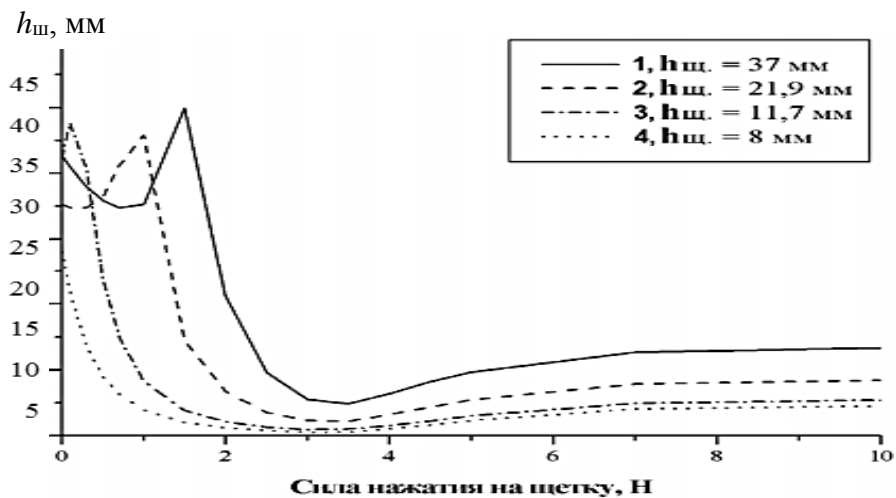


Рисунок 4.11 – Зависимости высоты щетки от силы нажатия на щетку при идеальной механике ЩКУ



Замер силы нажатия проводился при помощи акселерометра. По ГОСТ Р 51667-2000, усилие нажатия, (Н) на щётку не должен превышать 8 (кгс) (рис. 4.12).



Рисунок 4.12 - Модель измерения нажимного усилия на щетку: 1 – щеткодержатель, 2 – составная щетка, 3 – нажимная пластина с рельефной поверхностью, 4 – коллектор;  
регулирование усилия нажатия пружины на испытуемые щетки (усилие нажатия 2 кгс)

### 4.3 Оценка и прогнозирование назначенного ресурса щёток

Для осуществления оценки и прогнозирования назначенного ресурса щеток разработана технологическая модель скользящего контактирования с учетом основных факторов, влияющих на возникновение искрения щетки при ее отрыве от коллектора в динамике, дано ее математическое описание. Не маловажным направлением по повышению надежности является внедрение, и применение составных щеток ЭГ61-АК, что позволяет существенно повысить надежность ЩКУ ЭДПТ.

Для этого проведены экспериментальные исследования усовершенствованного ЩКУ с обычной и составной щетками с применением алгоритма расчета степени износа щетки (рис. 4.13).

Исходные данные для расчёта разделяются на две группы. Первая группа – показатели электрической машины, для которой производится расчёт щёток:  $P$  –



мощность, кВт;  $U$  – напряжение, В;  $I$  – ток, А;  $T_m$  – режим работы (генераторный, двигательный);  $D_k$  – диаметр коллектора, м;  $n_{я}$  – частота вращения, об/мин.

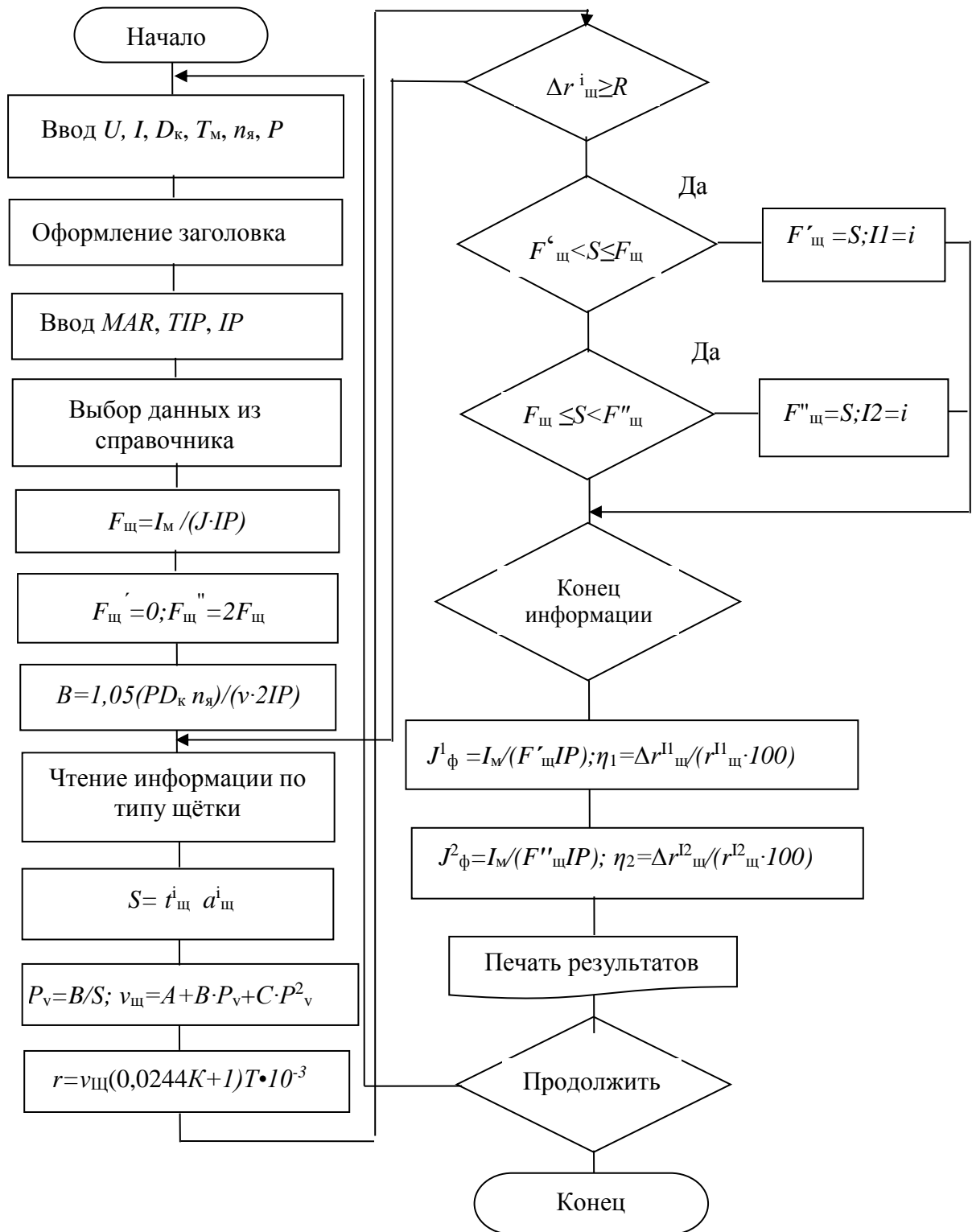


Рисунок 4.13 - Алгоритм программы расчёта степени износа щёток для тяговых электродвигателей заданной мощности

Вторая группа – показатели щёток и материала, из которого они изготовлены:  $t_{щ}$ ,  $a_{щ}$ ,  $r_{щ}$  – тангенциальный, аксиальный и радиальный размеры щёток, мм;  $\Delta r_{щ}$  – ресурс щёток, мм;  $\eta$  – коэффициент эффективности использования материала щёток, %;  $IP$  – число пар щёток;  $TIP$  – тип щёток;  $MAR$  – марка материала (марка щёток);  $J$  – допустимая плотность тока, А/см<sup>2</sup>;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $K$  – показатели, характеризующие свойства щёток по износу.

Суммарная площадь контактной поверхности всех щёток, подлежащих установке на ЭДПТ

$$\sum F_{щ} = I/J. \quad (4.9)$$

Потребное для этой цели число пар щёток разной полярности

$$p = \sum F_{щ} / F_{щ}, \quad (4.10)$$

а ток, проходящий на одну пару щёток разной полярности

$$I_{щ} = I_M / p. \quad (4.11)$$

Эти формулы могут быть использованы, если выбрана площадь контактной поверхности одной щётки:

$$F_{щ} = t_{щ} a_{щ}. \quad (4.12)$$

Размеры  $t_{щ}$  и  $a_{щ}$  намечаются предварительно, и на данном этапе расчёта необходимо определить, какое количество щёток с намеченными к использованию размерами сечения необходимо будет установить на машину заданной мощности. Ресурс щёток  $\Delta r_{щ}$  определялся по разности их радиальных размеров до и после испытаний.

На первом этапе вводятся параметры щетки, такие как ее масса  $m_{щ}$ , высота  $h_{щ}$  и ширина  $b_{щ}$ . Массу щётки уменьшить практически невозможно. Перед испытаниями износа составных щёток были сняты следующие параметры коллектора:

- биение коллектора;

- величина нажатия на щётки (стандартная пластина и усовершенствованная);
- профилограмма (рис. 4.14).

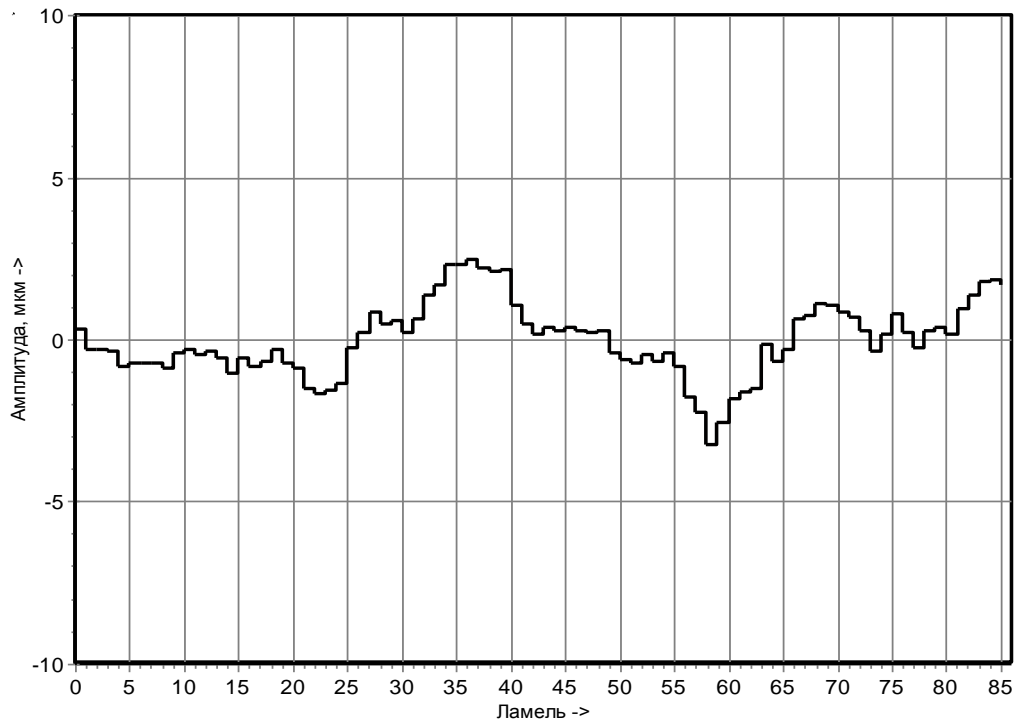


Рисунок 4.14 – Профилограмма коллектора

Расчетный профиль коллектора может быть также получен согласно следующему выражению

$$U_{\text{расч.пр}} = U_{\text{выд}} - U_{\text{дин}}, \quad (4.13)$$

где  $U_{\text{выд}}$  – выделенный профиль из первоначального массива измерений;

$U_{\text{дин}}$  – динамический профиль.

Данная профилограмма (рис. 4.14) получена по различным дорожкам установки щеток и видно, что биение поверхности коллектора соответствует норме. Программное обеспечение системы позволяет осуществлять запись профилограммы и распределения импульсов искрения по коллектору с выводом изображения на экран и печать, анализ полученных данных и определение технического состояния щеточно-коллекторного узла, диагностирование вида

неисправности и формирование рекомендаций по улучшению качества коммутации, а также хранение базы данных.

На рис. 4.15 приведено испытание расчетного профиля коллектора с экспериментальной нажимной пластиной.

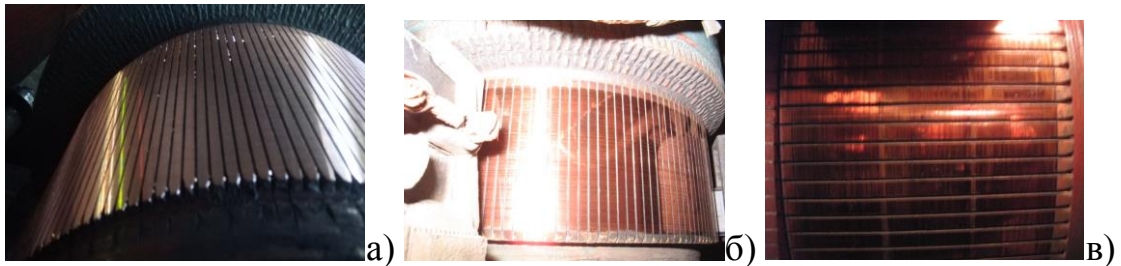


Рисунок 4.15 – Профиль коллектора и состояние политуры электродвигателей электровоза (а), троллейбуса (б) и трамвая (в) после испытаний:

а) Биение поверхности коллектора электровоза – 4,728 мкм; максимальный перепад – 1,318 мкм;

б) Биение поверхности коллектора троллейбуса – 4,813 мкм; максимальный перепад, 1,461 мкм;

в) Биение поверхности коллектора трамвая - хорошее, общее биение не превышает 0,05 мм.

Гамма – процентную наработку до отказа  $T_\gamma$ , ч, вычисляем по формуле

$$T_\gamma = \frac{r_d T}{l_{cp} + U_T S}, \quad (4.14)$$

где  $r_d$  – предельное значение изменения радиального размера щетки (износ), мм;

$T$  – продолжительность испытаний, ч (км. пробега);

$l_{cp}$  - выборочное среднеарифметическое значение износа за наработку  $T$ ;

$U_T$  - квантиль нормального распределения для односторонней вероятности  $\gamma/100$ ;

$S$  – выборочное среднеквадратичное отклонение значений износа.

Критерием отказа считается износ щетки, превышающий предельное значение, устанавливаемое в ТУ на щетки конкретных марок. В результате проведения экспериментальных исследований и проведения расчетов степени износа щеток, получены результаты, представленные в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Показатели надежности коллектора и щеток ЭДПТ

Показатели, ед. измерения	Марка щеток	
	ЭГ61 (без применения пластины)	ЭГ61-АК (с усовершенствованной пластиной)
<b>Показатели коллектора:</b>		
Средняя интенсивность изнашивания, мм/100 тыс. км.	0,064	0,036
Минимальная наработка до отказа, тыс. км	367	601
Гамма-процентная наработка до отказа $\lambda=0,9$ , тыс. км.	731	468
<b>Показатели щеток:</b>		
Средняя интенсивность изнашивания, мм/1000 км.	1,87	1,42
Минимальная наработка до отказа, тыс. км	15,6	17,5
Гамма-процентная наработка до отказа $\lambda=0,9$ , тыс. км.	14,4	19,5
Износ щеток, в мм за 1 км	0,0017 мм за 1 км	0,0013 мм за 1 км (увеличение 28%)

Результаты испытаний считаются удовлетворительными, т.к. полученные значения гамма-процентная наработка до отказа не менее значения, установленного в ТУ на щетку конкретных марок.

Анализ графиков (рис. 4.16) показывает, что наименьшая интенсивность износа щеток была достигнута при самом высоком значении нажатия на щетку. Диагностирование неисправностей производится путем сравнения и анализа соответствующих значений амплитуд модуля вибрации на характерных частотах,

т.е. обнаружение в спектре характерных гармоник позволяет определить наличие электрических и механических повреждений электродвигателя постоянного тока.

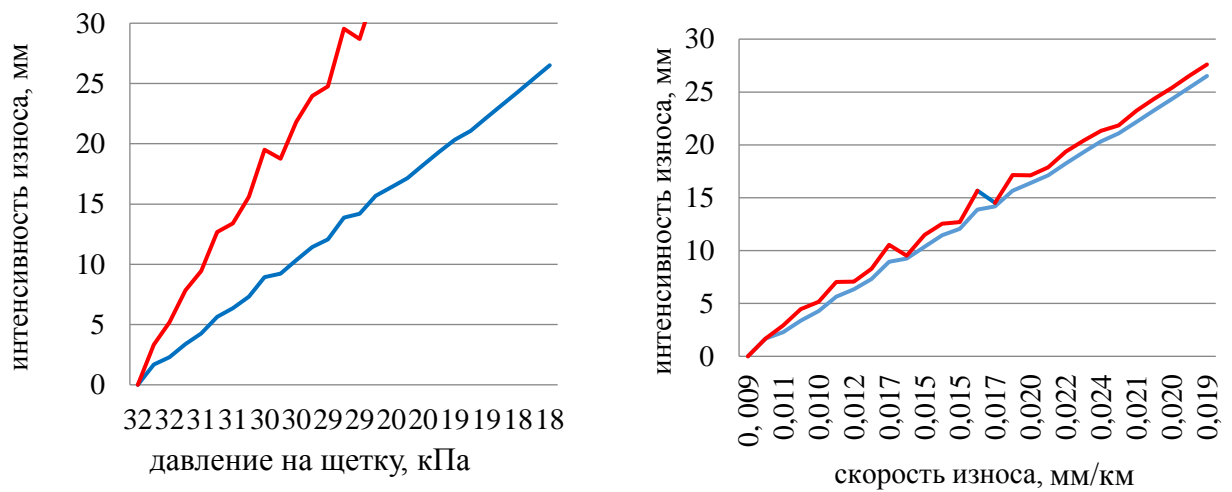


Рисунок 4.16 – Зависимость интенсивности износа щетки ЭГ61АК (красная без пластины, синяя – с усовершенствованной пластиной) от давления на щетку и скорости изнашивания

Для измерения интенсивности изнашивания, обусловленной фрикционной составляющей, было обеспечено вращение электродвигателя без тока в течение заданного времени  $\Delta t$  при неизменной величине нажатия на щетки  $P_{\text{ср.щ}}$  и частоте вращения  $n$ . Периодически, с интервалом 35-45 часов, производились измерения изнашивания щеток микрометром, а также измерения профиля коллектора электродвигателей при помощи безконтактного измерительного комплекса.

Диагностическая матрица представлена в таблице 4.6 и является основой автоматизированных логических устройств, применяемых в современных средствах технического диагностирования. Единица в месте пересечения строки и столбца означает возможность существования неисправности, а ноль — отсутствие такой возможности. С помощью, представленной в таблице диагностической матрицы решается задача локализации одной из трех возможных неисправностей объекта с помощью четырех диагностических параметров. Физический смысл решения задачи заключается в определении соответствия полученной комбинации диагностических параметров, вышедших за норматив, существованию одной из

неисправностей. Так, в рассматриваемом примере имеем: неисправность  $A_1$  возникает в случае одновременного выхода за норматив параметров  $S_1$  и  $S_3$ , неисправность  $A_2$  — параметров  $S_2$  и  $S_4$ , и неисправность  $A_3$  — параметров  $S_3$  и  $S_4$ .

Таблица 4.6 - Диагностическая матрица узлов ЭДПТ

Диагностические параметры	Возможные неисправности		
	Щетки - $A_1$	Коллектор - $A_2$	Подшипники - $A_3$
Щетка - $S_1$	0	1	1
Коллектор - $S_2$	0	0	1
ЩКУ - $S_3$	0	0	1
Подшипники - $S_4$	1	1	0

На основе исследований ряда щеток разных марок при различных нагрузениях установлено, что, с точки зрения влияния на долговечность, процесс надежности, может быть, представлен двумя параметрами:

- математическое ожидание  $\sigma$ , отражающее статическое смещение процесса нагружения щетки

$$\sigma = \sum x_i p_i. \quad (4.15)$$

- среднее квадратическое отклонение диагностических параметров  $S$ , характеризующее интенсивность динамического нагружения.

Следует также отметить, что в предложенном алгоритме принято допущение о постоянстве механических параметров ЩКУ в течение большого цикла расчета (десятки часов) (рис. 4.17), т.к. они изменяются значительно медленнее, чем величина контактного сопротивления или радиальный размер щетки при вращении коллектора с определенной скоростью вращения  $v_k$ , влияющие на процесс коммутации.

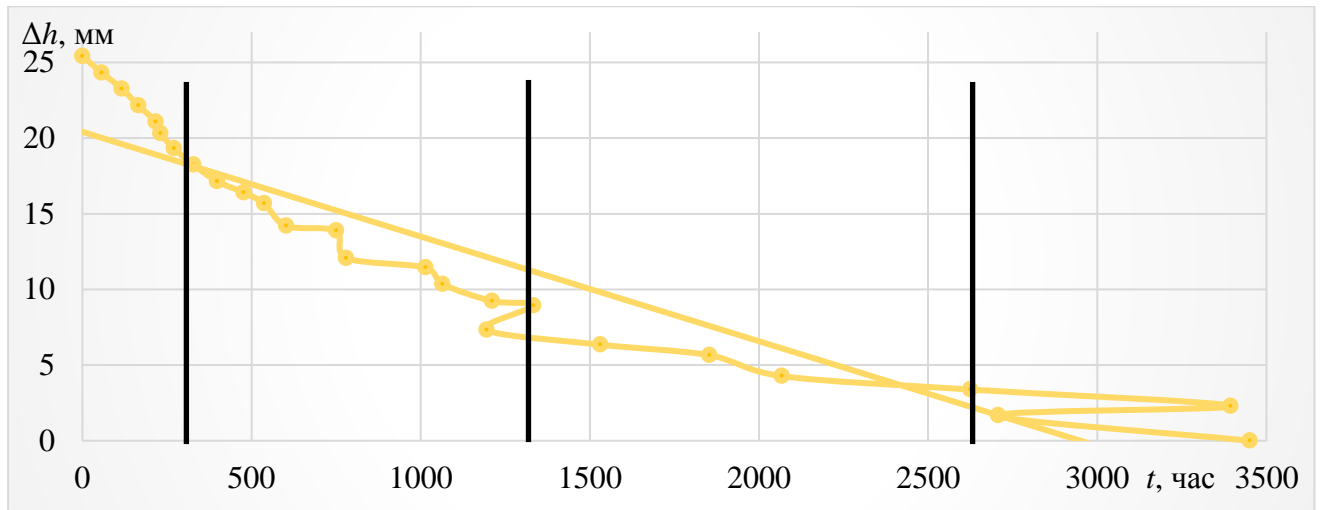


Рисунок 4.17 – Зависимость величины изнашивания составной щетки от допустимого значения высоты

Первый этап (0-477 ч.) наименее благоприятен с точки зрения скорости изнашивания составного блока щетки, т.к. начальное нажатие пластины на щетку достаточно велико, что приводит к интенсивному фрикционному изнашиванию (рис. 4.18, а). Следующий этап (477-1333 ч.) является, благоприятным, т.к. сила нажатия на щетку уже достаточно мала, одновременно с этим состояние ЩКУ все ещё удовлетворительное и не ведет к резкому возрастанию отказов (рис. 4.18, б). Заключительный этап (1333 – 2625 ч) показывает, что скорость изнашивания щеток возрастает, состояние ЩКУ ухудшается по мере накопления повреждений и возрастания механических напряжений скорость разрушения начинает увеличиваться и возрастает вплоть до полного разрушения щетки или всего узла (поломки, потери устойчивости, сквозного разрушения) (рис. 4.18, в).

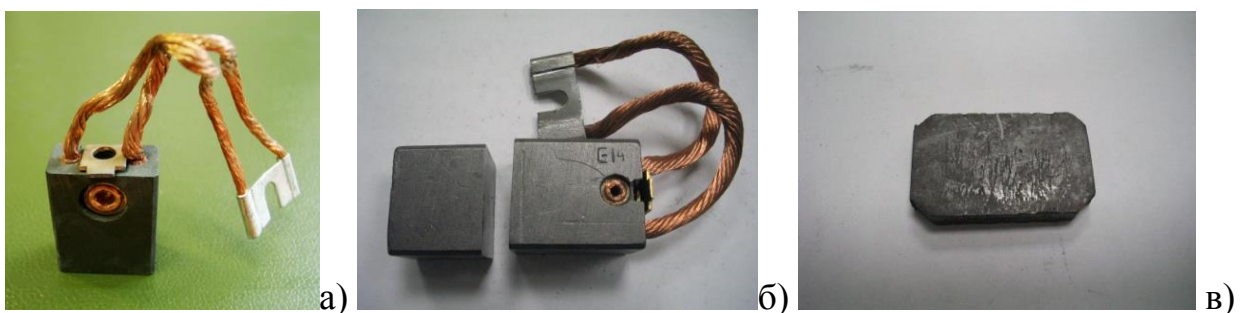


Рисунок 4.18 - Поэтапное изнашивание щетки



На рис. 4.19 изображены рассчитанные по данным опытно – промышленной эксплуатации щёток кривые вероятности безотказной работы  $P(t)$  щеток марки ЭГ61-АК. На первом этапе испытания ЭДПТ был оборудован щетками, радиальный размер которых составлял 45мм, на втором этапе – со ставными щетками и на следующем этапе — с усовершенствованным щеточным узлом с рельефной пластиной постоянного нажатия и со ставными щетками [125, 126].

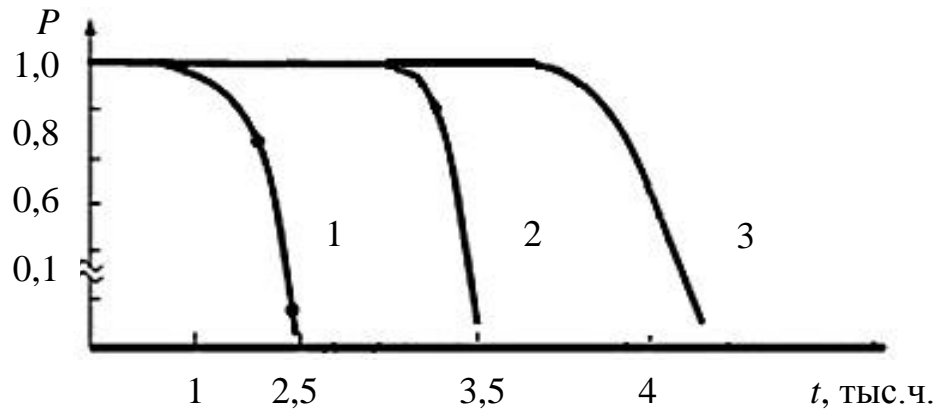


Рисунок 4.19 – Вероятность безотказной работы щёток ЭГ61-АК размером  $h=45$ мм (кривая 1), со ставной щеткой (кривая 2) и усовершенствованным щеточным узлом с составными щётками (кривая 3)

Вычисляется средний (ожидаемый) ресурс

$$T_{\text{ср}} = (h - \kappa_1) / (\kappa_2 - t_{\text{к}}), \quad (4.16)$$

где  $t_{\text{к}}$  – наработка на момент последнего контроля.

Определяется значение средней высоты износа составной щетки

$$\bar{h} = \frac{T_{\text{ср.макс}}}{h} = 16,77 \text{ мм}. \quad (4.17)$$

Далее осуществляется расчет гарантированного ресурса (срока службы) составной щетки по формуле

$$T_{\text{гар}} = T_{\text{ср}} (1 - U_{\text{гар}} V_h), \quad (4.18)$$

где  $U_{\text{гар}}$  – квантиль нормального распределения.

Продолжительность испытаний  $T_n$  должна быть не менее  $0,2 \cdot T_p$ , а вероятность обеспечения ресурса определяют по формуле

$$P(T_p) = \gamma / 100, \quad (4.19)$$

где  $T_p$  – ожидаемая наработка (ресурс) до предельного состояния;

$\gamma$  – число изделий, не достигающих с заданной вероятностью предельного состояния. Принимается равным 90, 95, 99 и 99,5%.

Ожидаемый срок службы (ресурс) традиционно определяют по средней скорости износа

$$T_p = h_n / c = 45 / 0,408 = 110 \text{ ч.} \quad (4.20)$$

Уточненная оценка коэффициента вариации скорости износа составной щетки для рассматриваемого времени определяется по формуле

$$V_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_{hi}^2 n_i}{N}}, \quad (4.21)$$

где  $V_{hi}$  – скорость износа составной щетки на  $i$ -м участке;

$n_i$  – число измерений высоты составной щетки на  $i$ -м участке;

$N$  – общее количество щеток.

Объем ускоренных испытаний при заданных параметрах достоверности оказывается связанным с продолжительностью испытаний обратно пропорциональной зависимостью

$$V = n t_n \quad (4.22)$$

где  $n$  – количество выборки;

$t_n$  – продолжительность испытаний.

Прогнозирование распределения остаточного ресурса [128, 129] также основывается на фундаментальном предположении о наличии у каждого образца щетки, что к моменту прогнозирования при данной истории нагружения исследуемого образца разрушения ЩКУ не произошло. Возможность прогнозирования величины остаточного ресурса ЩКУ обеспечивается при одновременном наличии следующих условий:

известны параметры, определяющие техническое состояние ЩКУ (ПТС);  
известны критерии предельного состояния узла;  
имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений ПТС.

Таким образом, применение составных щеток марок ЭГ14 и ЭГ61-АК позволяет снизить потери на трение в контакте, полностью исключить в эксплуатации случая возникновения заволакивания коллекторов ЭДПТ, уменьшить их износ. Усовершенствованный щеточный узел снижает нажатие щетки на коллектор ЭДПТ, отражающая реальную и специфическую работу щеточно-коллекторного узла ЭДПТ, позволяющий оценить ее не только в статистическом, но и динамическом режиме работы.

#### **4.4 Верификация математической модели вибродиагностики с экспериментальными данными**

Вибрационная диагностика, как и другие методы технической диагностики, решает задачи поиска неисправностей и оценки технического состояния исследуемого объекта. При работе двигателя вместе с его валом вращается коллектор и подшипник, с них снимаются анализируемые сигналы. Эти сигналы в процессе анализа преобразуют в амплитудно-частотный спектр гармонических составляющих, который отражает вклад каждой гармоники в измеряемое состояние.

При функционировании двигателя его корпус вибрирует, что связано с вращением вала, работой узлов, расположенных на корпусе двигателя. Эти вибрационные воздействия приводят к вибрации якоря и полюсов электродвигателя, и по этой причине влияют на характер генерируемого напряжения, содержащего постоянную составляющую, если используется генератор постоянного напряжения, или основную гармонику, если применяется генератор переменного напряжения, и дополнительные составляющие двух видов. Первые определяются вибрациями при отсутствии дефектов, и после обработки проявляются в эталонном спектре. Вторые вызваны появлением и развитием

дефектов, и возникшие вибрации отражаются в реальном спектре. Дефекты возникают в виде отказов в системе, приводящих к возникновению детонации, смещения резонансных частот вибрации двигателя, связанных с нарушением и отказами в крепежных элементах, появления микротрещин, разрушений в корпусе, лопатках вентилятора, подшипниках и т.п. С этими дефектами связано появление в анализируемом спектре дополнительных гармоник с частотами как ниже, так и выше частоты основной гармоники. Все эти дополнительные гармоники вносят изменения в спектр, получаемый после измерения и преобразования анализируемого напряжения. Он отличается от эталонного спектра, имеющего место при отсутствии дефектов. При наличии предварительно полученной информации о возможных изменениях спектра в случае появления того или иного дефекта двигателя или его агрегатов получают спектр конкретного дефекта. В дальнейшем выявление такого дефекта упрощается. После оценки скорости изменения соответствующей гармонической составляющей решается задача выявления, и прогнозирования развития отдельного дефекта с определением времени до возможного отказа двигателя или его узлов.

Вибродиагностика дефектов машин, приводящих к дискретному спектру вибраций, осуществляется в основном путем частотного распознавания вибрационных составляющих спектра, обусловленных дефектами и проявляющихся на строго определенных частотах.

На данный момент основным методом диагностирования ЭДПТ является предварительная оценка технического состояния узлов в результате слухового и зрительного восприятия. В неисправных или с повышенным износом узлов ЭДПТ появляются шумы, вибрации, и повышение температуры по которым судят о наличии дефекта.

На основе анализа работ по диагностике оборудования определены характерные частоты вибрации свойственные определенным дефектам. Частота биения вследствие неровностей со стороны коллектора лежит в широких пределах от 750 до 850 Гц, от 150 до 500 Гц – развивающиеся дефекты подшипников, от 200 до 450 Гц – дефекты в статоре и на полюсах (табл. 4.7).

Таблица 4.7 - Разложение спектра вибрации на диапазоны по неисправностям

<b>Частота</b>	<b>Неисправность</b>
от 3 до 10Гц	электрическими неисправностями двигателя (эксцентricность, «мягкая лапа» и т.д.) два пика, частоты которых различаются
До 20 Гц	- электрические пусковые пики
50 Гц	- вибрация электрического происхождения
100 Гц	- причина повреждения может быть связана с механическими повреждениями, например, ослаблением резьбовых соединений крепления полюсов к раме. - ослабление пакета стали электродвигателя - потенциальные проблемы с обмоткой на полюсах в ЭДПТ (требует наблюдения); - пробой изоляции и межвитковых замыканий обмоток главных и добавочных полюсов; - вибрация электрического происхождения; - разрушение якорных бандажей
128	- развивающиеся дефекты подшипников качения; - повреждения якорных подшипников;
150 Гц	- пик, превышающий уровень допустимых значений, может вызывать нагрев полюсов. - может приводить к термическому старению и высыханию лака обмоток (ухудшение изоляции обмоток) - вибрация электрического происхождения
200-300 Гц	- значительные дефекты в стали - дефект пробоя изоляции компенсационной обмотки
228	- развивающиеся дефекты подшипников качения
300-410	- пробой изоляции и межвитковых замыканий обмоток якоря
410-520	- повреждение выводов кабелей, выплавления припоя из петушков коллектора; - обнаруженные в подшипнике развитые дефекты – раковина наружного кольца
520 - 750	- дефекты обмоток якоря – обрыв пластины коллектора; - притирка щеток к коллектору; - повреждение выводов катушек полюсов; - повреждения пальцев, кронштейнов и щеткодержателей
750-850	- повреждение щеточно-коллекторного узла; - появление кругового огня по коллектору.
850-1000 Гц	- повреждения подшипников качения - средний уровень повреждений связан с образованием «энергетического горба»

Применяемый метод основан на анализе вибрационного сигнала, получаемого в результате считывания вибрации с поверхности узла и

преобразования полученного сигнала с помощью специальных технических средств («Способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей постоянного тока» Приложение А Патенты на полезную модель, на изобретения и свидетельства на программы для ЭВМ). Считывание сигнала производится при помощи лазерного датчика и датчика-акселерометра с последующим сбором и расшифровкой в виброанализаторе «Корсар++». При этом любой дефект какого-либо узла характеризуется индивидуальной вибрационной картиной. Метод позволяет определить различные параметры механического износа узлов. Определяются дефекты подшипников, в том числе износ наружного и внутреннего кольца, перекос кольца, износ тел качения, определяется износ шестерен, перекос валов, износ ЩКУ и другие.

Исследование вибрации щеточно-коллекторного узла проводится с использованием двух расчетных схем: дискретной и с распределенными параметрами:

- Дискретная схема соответствует случаю, когда масса щетки значительно больше массы прижимной пружины.
- Схема с распределенными параметрами вводится, если масса щетки соизмерима с массой пружины.

Достаточно высокая надежность щеточно-коллекторного узла достигается за счет увеличения размеров активных частей, применением дефицитных материалов, повышением точности механической обработки и пр.

Отличительной особенностью вибраций вращающихся элементов и деталей электродвигателя является то, что наибольшие амплитуды наблюдаются в поперечном направлении, а вибрационный сигнал хорошо передается по корпусным деталям.

Таким образом, при установке датчика на корпусе узла можно получить исходную информацию о вибрационном состоянии параметров каждого подшипника и параметров ЩКУ. Но следует учитывать, что вибрационный сигнал значительно затухает при передаче его через большое количество сопряжений между деталями, особенно корпусными.

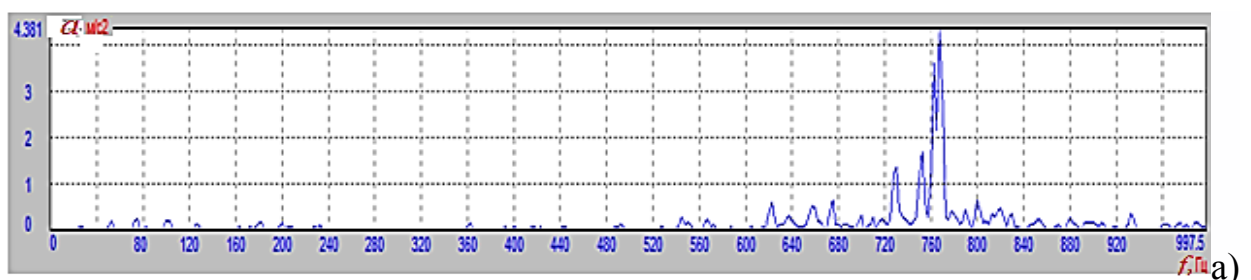
При работе ЭДПТ в подшипниках генерируются вибрации в широком частотном диапазоне. Появление вибраций в подшипниках, обусловлено их конструктивными особенностями. Составляющие элементы (вал, якорь, ЩКУ и подшипники), совершающие сложное кинематическое движение с различными угловыми скоростями, приводят к возникновению спектра вибраций в диапазоне от низких до высоких частот. Также появлению вибраций способствуют неточности деталей подшипников, образовавшиеся при их изготовлении. К ним относятся разностенность наружного и внутреннего кольца, некруглость и шероховатость тел качения и дорожек колец, погрешности, вызванные дефектами сборки узлов, в том числе перекося наружных и внутренних колец, дисбалансом вращающихся валов.

Вибросигнал несет в себе большое количество информации о состоянии, как самого электродвигателя, так и его элементов (подшипников, ЩКУ, якоря и вала), но в первоначальном виде вибросигнал не позволяет определить степень развития дефекта. Для получения более полной картины о состоянии ЭДПТ используют различные методы и средства анализа и преобразования вибросигнала.

Рассмотрим основные методы оценки технического состояния узлов ЭДПТ, основанные на анализе вибрационного сигнала:

1) диагностика по спектру вибросигнала или метод прямого спектра.

Метод основан на анализе вибрационного сигнала с точки зрения периодичности появления амплитудных всплесков (рис. 4.20 а и б). Вибрационный сигнал анализируется узкополосным спектральным анализатором и по частотному составу спектра можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника и ЩКУ.



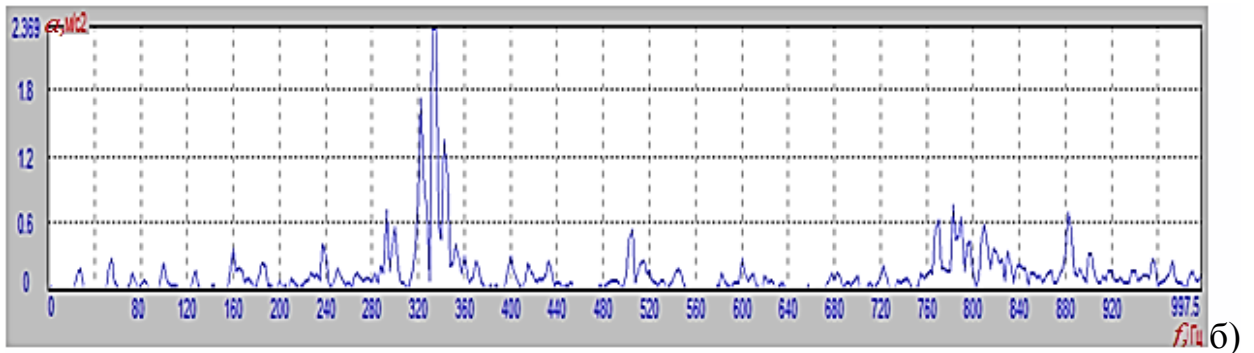


Рисунок 4.20 – Вибрационные сигналы с программного комплекса «Атлант»: а) Спектр вибрации при неисправности на щеточно-коллекторном узле, б) Спектр вибрации при неисправности на подшипниках

Метод наложения спектров вибрации с повреждениями на эталонный тяговый электродвигатель схематически представлен на рисунке 4.21.

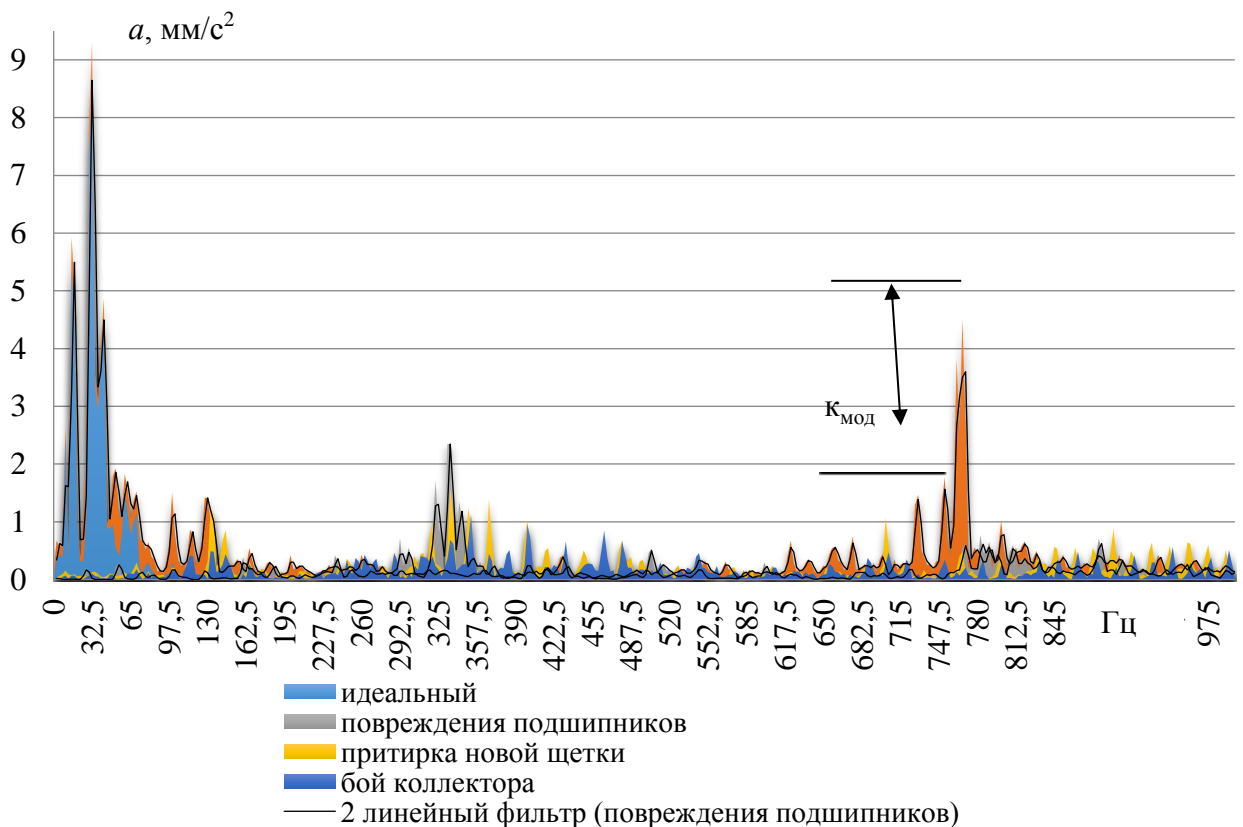


Рисунок 4.21 – Метод спектра огибающей частоты

Достоинства метода: высокая чувствительность, информативность, помехозащищенность.

2) метод ПИК-фактора.



Для контроля технического состояния ЩКУ и подшипников по этому методу необходимо иметь простой виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала:

- среднеквадратичное значение уровня (СКЗ) вибрации, т.е. энергии вибрации;
- пиковую амплитуду (ПИК) вибрации.

Достоинства метода: низкая стоимость, простота реализации.

Для исследования вибрационных характеристик ЭДПТ на кафедре «Электротехнические комплексы и системы» была собрана экспериментальная установка электродвигателя постоянного тока с прикрепленным датчиком виброприбора «КОРСАР ++» рис. 4.22.

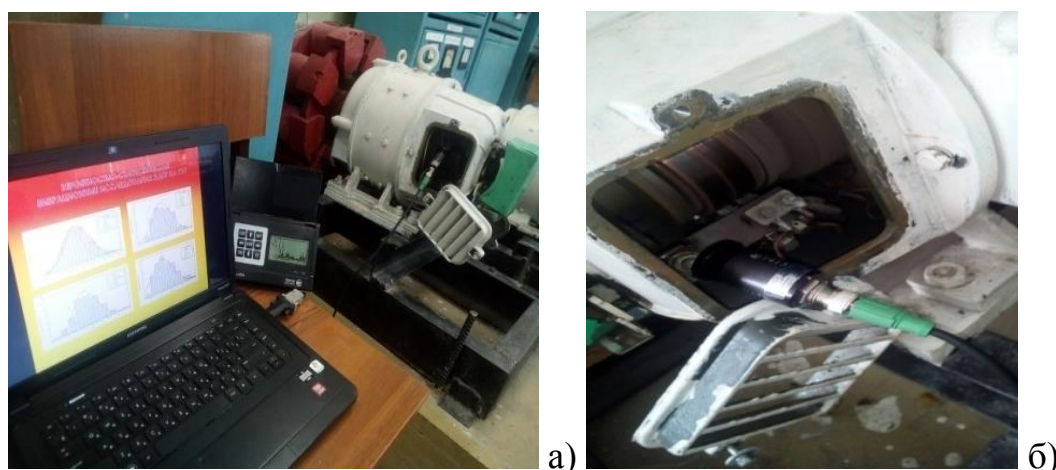


Рисунок 4.22 – Экспериментальная лабораторная установка электродвигателя постоянного тока (а) с прикрепленным датчиком виброприбора «Корсар++» (б)

Вибрационный сигнал принимается датчиком, который устанавливается в определенную точку узла ЭДПТ [130, 141]. Основным элементом экспериментальной установки являлся виброизмерительный прибор «Корсар» (рис. 4.23) и программный анализатор «Atlant» сигналов, были получены статистические характеристики виброускорения каждого щёткодержателя (рис. 4.24).

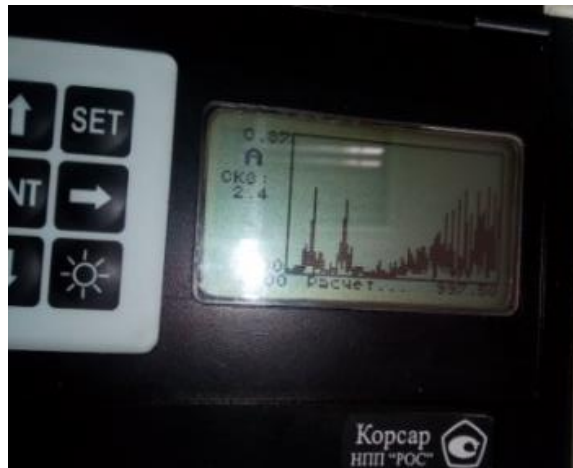


Рисунок 4.23 – Вибрационный спектр вибрации электродвигателя постоянного тока на приборе «Корсар++»

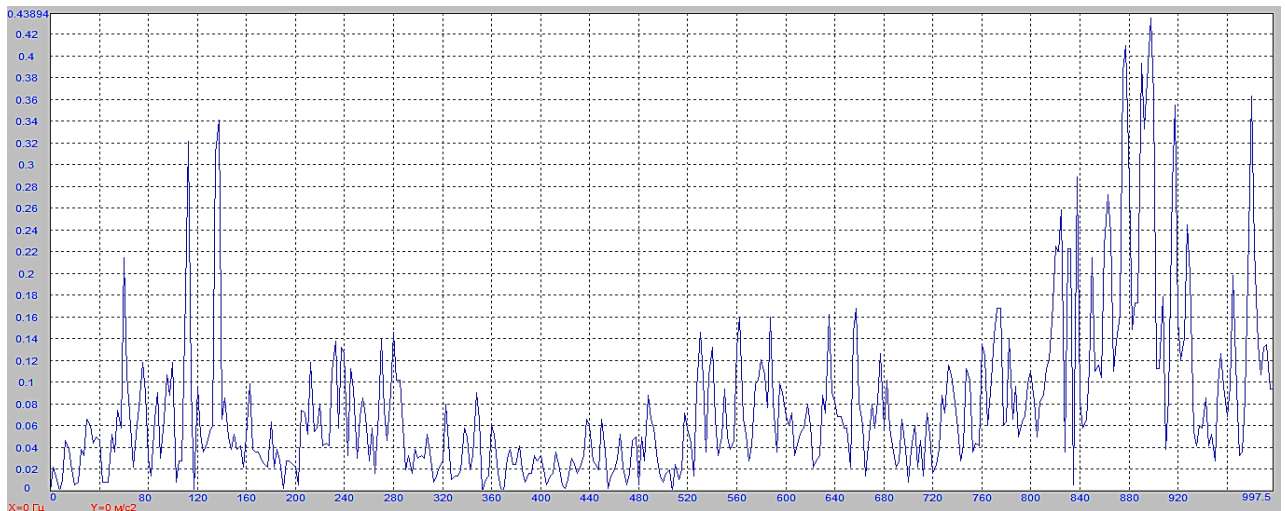


Рисунок 4.24 –Спектр сигнала с программного анализатора «Atlant»

В результате разработки методики вибродиагностики, создана модель для оценки срока службы ЩКУ и всего электродвигателя постоянного тока. В методике использованы следующие критерии результатов сравнения, эталонного и текущего спектров электродвигателей:

- коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum_1^n \left( x_i - \frac{1}{n} \sum_1^n x_i \right) \left( y_i - \frac{1}{n} \sum_1^n y_i \right)}{\sqrt{\sum_1^n \left( x_i - \frac{1}{n} \sum_1^n x_i \right)^2 \left( y_i - \frac{1}{n} \sum_1^n y_i \right)^2}} \quad (4.23)$$

- непараметрическая ранговая оценка Спирмена

$$\rho_{x,y} = \frac{M[R_x R_y] - M[R_x]M[R_y]}{\sqrt{(M[R_x^2] - (M[R_x])^2)} \sqrt{(M[R_y^2] - (M[R_y])^2)}} \quad (4.24)$$

- статистика знаков Фишера

$$F_{\text{ТЭД}} = \frac{S_x^2}{S_y^2} = \frac{\left(\frac{1}{n_1}\right) \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{\left(\frac{1}{n_1}\right) \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.25)$$

- Т-критерий Стьюдента

$$t_{\text{ТЭД}} = \left| \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2 + \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)n}}} \right| \quad (4.26)$$

где  $x_i, y_i$  – значения переменных эталон  $x$  и износ  $y$ ;

$M_x$  – средняя арифметическая величина эталона ( $x$ );

$M_y$  – средняя арифметическая величина износа ( $y$ );

$n_1$  и  $n_2$  – объемы выборок;

$S_x, S_y$  – площади спектров.

Выходы аналого-цифрового преобразователя соединены с ПЭВМ, имеющей устройство отображения информации в виде монитора и специализированного программного пакета «Атлант», в котором и создана архивная база данных по всем замерам на данном электродвигателе.

В качестве базового программного обеспечения выбран пакет прикладных программ Statistica, на языке программирования Visual Basic.

Мониторинг производится без внедрения в электродвигатель посторонних узлов, которые могут вызвать дополнительные помехи при считывании вибрации,

при этом каждый диапазон спектра вибрации отвечает за возникновение дефекта того или иного узла. Внешний вид программы, анализирующей спектр вибрации и выделяющий диапазон спектра, который отвечает за состояние щетки, представлен на рис. 4.25.

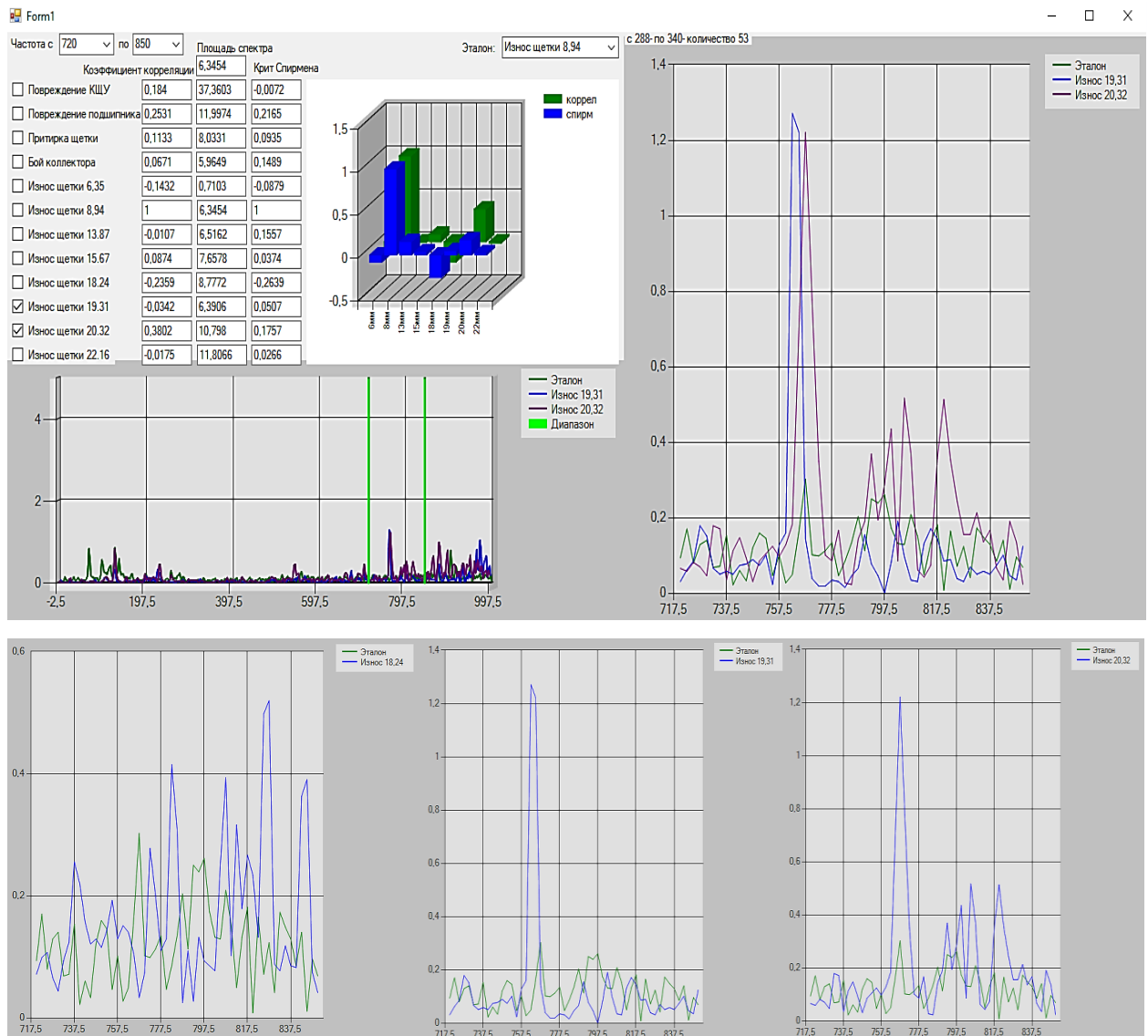


Рисунок 4.25 – Диапазон спектра вибрации по износу щетки в программном комплексе

Получив частоты вращения основных элементов можно проанализировать и «отфильтровать» спектр вибрационного сигнала, определив тем самым пиковые амплитуды колебаний этих элементов, соответствующие моментам соударения в местах дефектов. По полученным данным проводится исследование характера

дефекта и степени его развития, позволяющее также выявить зарождающиеся дефекты (рис. 4.26).

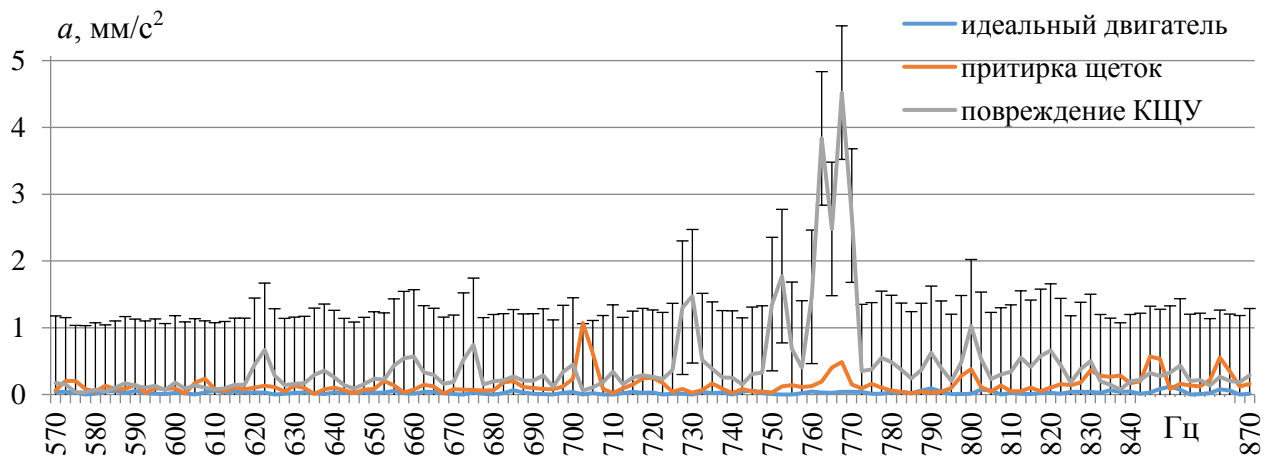


Рисунок 4.26 – Спектр вибрации зарождающихся дефектов на ЩКУ

На рис. 4.27 показан спектр вибрации со штатным нажимным механизмом и усовершенствованной пластиной. Усилие нажатие на щетку равномерное, что снижает вибрацию, тем самым надежность на ЩКУ увеличивается в два раза.

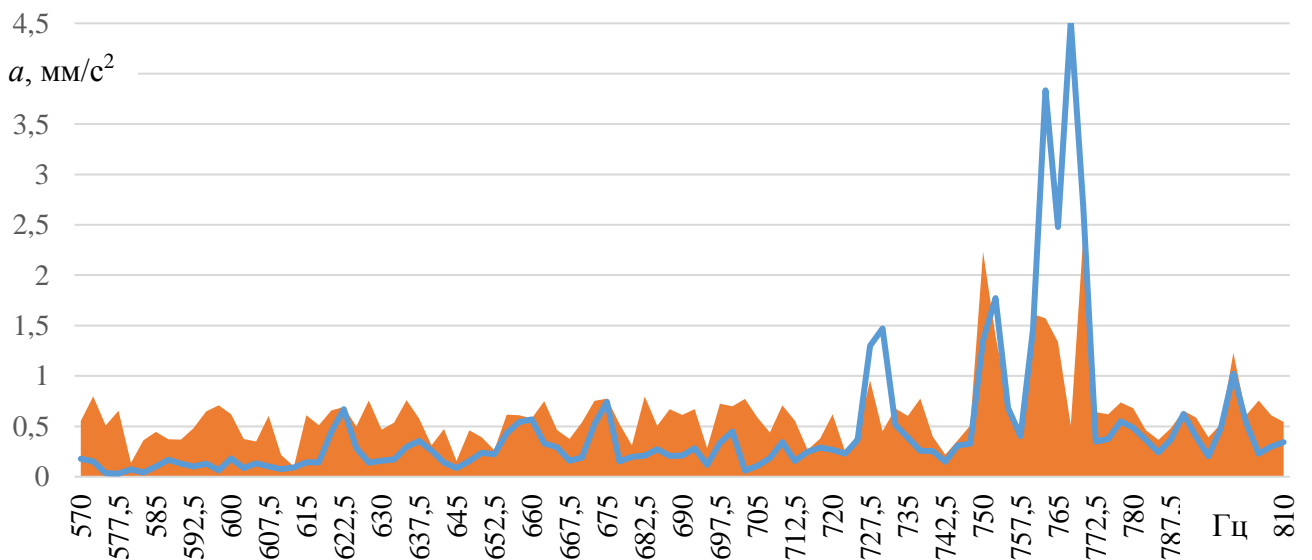


Рисунок 4.27 – Диапазон спектра вибрации по износу щетки: синяя – без усовершенствованного узла, красная – значения вибрации с пластиной

Благодаря предложенной математической модели, выявлены определенные дефекты, степень износа щеток, остаточный ресурс узла. Оценка спектров сигналов

вибрации показала наличие увеличения амплитуды в рассматриваемом диапазоне частот, выявляющих состояние коллекторно-щеточного узла.

Применение метода вибрационной диагностики дефектов ЭДПТ является основным этапом в оценке их состояния. Это позволяет оперативно анализировать состояние оборудования непосредственно во время его работы, без отрыва от производства, как принято называть в литературе, реализовать диагностику и мониторинг технического состояния в режиме «on-line» (рис. 4.28). Это повышает достоверность диагнозов дополнительно не менее чем на 10-15%.

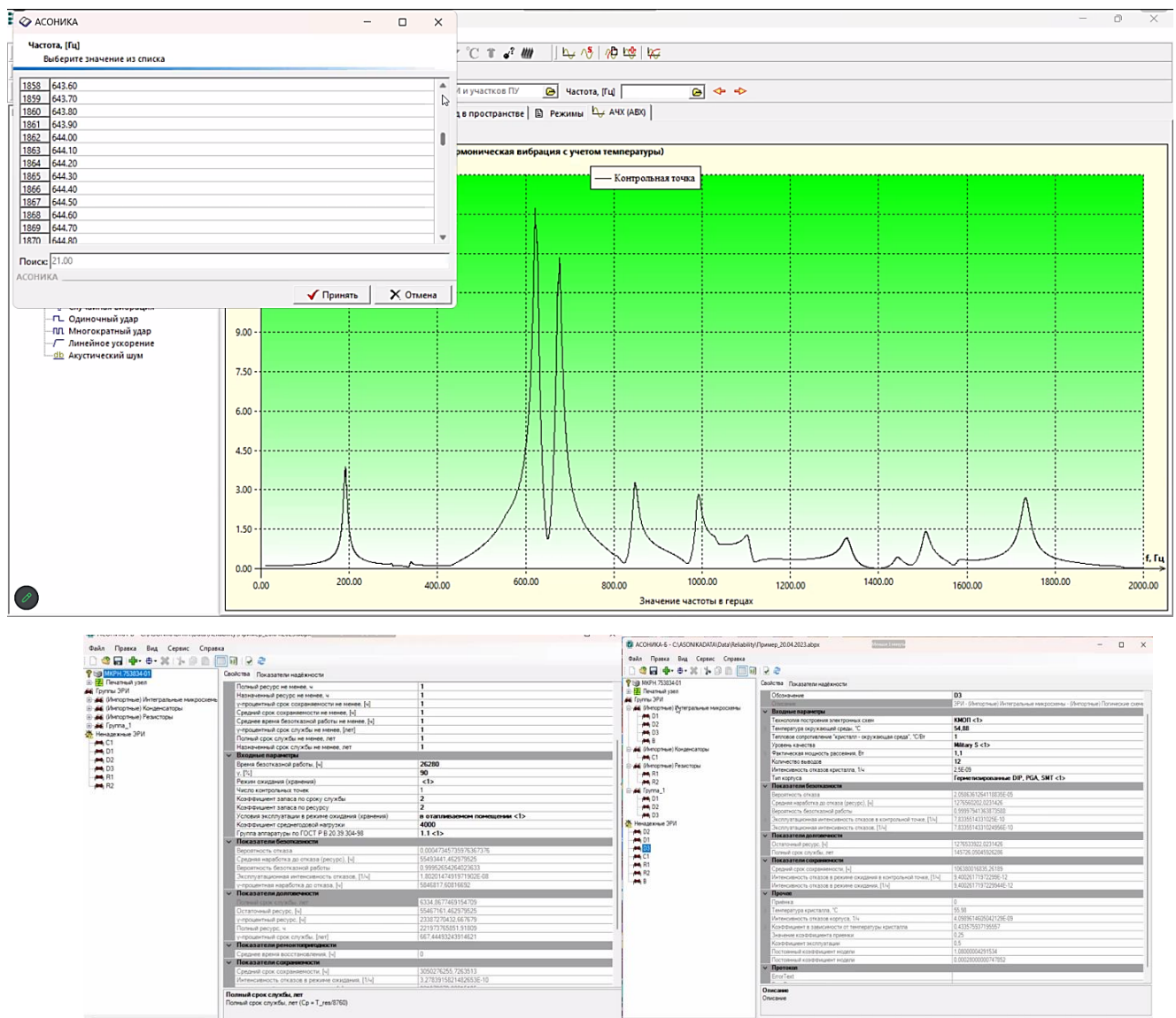


Рисунок 4.28 – Диагностирование при помощи программы АСОНИКА

Диагностирование учитывает весь спектр разнообразия возможных режимов работы, наличие дефектов, отказов, условий эксплуатации электродвигателя и их статических характеристик. Выявленные дефекты относят к допустимым или недопустимым и принимают решение о возможности дальнейшей эксплуатации, необходимости ремонта ЭДПТ или снятия его с эксплуатации.

Программные испытания имеют наибольший эффект:

1. Их объем позволяет применять статистические методы оценки выходных параметров;
2. Они включают в себя прогнозирование возможного изменения выходных параметров во времени с использованием всех видов доступной информации;
3. В их процессе применяют методы диагностирования для оценки причин влияющих на выходные параметры;
4. Оптимизируются выходные параметры узлов, определяющие их технические характеристики.

Выходные параметры вибродиагностирования электродвигателя – это числовые показатели технических характеристик узлов, определяющие его состояние и возможности выполнения заданных функций, т.е. характеристики по которым определяется качество изделия. Выходными параметрами могут быть:

1. точность функционирования ЭДПТ;
2. диагностические характеристики;
3. кинематические характеристики;
4. экономические показатели
5. величина остаточного ресурса ЩКУ.

Таким образом, создан эффективный и удобный способ диагностики и мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей постоянного тока, а также расширен арсенал способов диагностики электродвигателей. При этом повышена точность диагностирования, обеспечена возможность дистанционного диагностирования (на расстоянии от электродвигателя), упрощена процедура диагностирования (не требует отключения электродвигателя), обеспечена возможность полной автоматизации процесса

диагностики. Расширены диагностические возможности для определения наличия электрических и механических повреждений электродвигателя.

#### **Выводы по главе 4**

1. В условиях эксплуатации получены реальные результаты износа штатных и составных щеток, позволяющие достоверно прогнозировать остаточный ресурс щеточно-коллекторного узла.

2. Разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий оценивать текущее состояние и прогнозировать остаточный ресурс щеток тяговых электродвигателей постоянного тока.

3. Разработан модернизированный тип щеточного узла, существенно улучшающий коммутационный процесс и снижающий вибрацию ЩКУ, габаритные размеры опытного щеточного узла максимально унифицированы с серийными. При этом давление на щетку стало постоянным во всем диапазоне износа щетки, чем на стандартных, износ щетки снизился на 28% (акт испытаний и внедрения – Приложение Б Акты внедрения и проведения экспериментов).

4. Проведенные эксплуатационные испытания на тяговых электродвигателях трамваев КТМ-8 (71-608) в условиях трамвайного депо и троллейбусов Тролза в троллейбусном депо № 2 МУП «Метроэлектротранс» г. Казани показали, что новые усовершенствованные щеткодержатели с составной щеткой позволяют существенно повысить эксплуатационную надежность и получить следующие преимущества: снизить почти вдвое расход щеток; обеспечить увеличение межремонтных пробегов подвижного состава и ресурс работы щеточно-коллекторного узла ЭДПТ; обеспечить качественный токосъем с коллекторов ЭДПТ.

5. Приведено описание алгоритма определения остаточного ресурса щеток тяговых ЭДПТ, благодаря которому контролируется состояние коллекторных пластин и щетки по фактическому состоянию.



## ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЩЕТОЧНОГО УЗЛА И РАЗРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ПЛАНОВО- ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

В этой главе диссертации рассмотрен расчет жизненного цикла подвижного состава с учетом оптимизации усовершенствованного щеточного узла с составной щеткой и рельефной пластиной, определена экономия от внедрения данного узла и даны рекомендации по усовершенствованию планово-предупредительных работ (ППР), представлено технико-экономическое обоснование применения математической модели по измерению вибрации на электродвигателях постоянного тока [131, 132].

Задачами и целями данной главы является показать на расчетах оценку экономической целесообразности ремонта восстанавливаемой технической системы, на основе внедрения вибродиагностики отдельных узлов без демонтажа ТЭД со снижением трудозатрат на проведение ТО. Предложенный комплекс мероприятий по модернизации ППР и перевод на обслуживание по фактическому состоянию сократит время пребывания в ремонте и повысит срок эксплуатации тягового электродвигателя.

### **5.1 Области внедрения усовершенствованного щеточного узла**

Основными областями применения усовершенствованной конструкции щеточного узла остаются тяговые электродвигатели постоянного тока, применяемые на городском и железнодорожном транспорте, а также профессиональный электроинструмент, для которых щетки являются расходным материалом.

Область внедрения зависит от актуальности данной темы, поэтому обусловлена развитием и усовершенствованием ЭДПТ в области создания усовершенствованного щеточного узла в частности с внедрением датчиков различных физических параметров вибрации.

Разработанный усовершенствованный щеточный узел, проходил опытную эксплуатацию вместе с системой мониторинга технического состояния ЭДПТ в трамвайном и троллейбусном депо № 2 г. Казани.

Введенная в данную систему информация реализована в виде программного модуля, в котором инкапсулированы методы теории вероятности, математической статистики и др.

Динамическое воздействие подвижного состава на ЩКУ определяется сложными колебательными процессами, возникающими при движении, поэтому внедрение усовершенствованного щеточного узла снижает их воздействие на саму щетку и коллектор.

Надежность и долговечность работы ЭДПТ и ЩКУ в эксплуатации зависит от нагревания, воздействия внешних факторов и т.п. Экономичная работа электродвигателей в условиях эксплуатации во многом зависит от технического состояния элементов ЩКУ.

Таким образом, если трактовать качество не только как совокупность технико-экономических характеристик, превосходящих аналоги представленные на рынке, но и учитывать показатели надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, эксплуатационной технологичности), то становится ясно, что с увеличением надежности затраты на создание и изготовление усовершенствованного щеточно-коллекторного узла возрастают, а затраты на послепродажное сопровождение (эксплуатация, техническое обслуживание, ремонты) убывают.

## **5.2 Определение экономии от внедрения усовершенствованного щеточного узла (на примере троллейбусного депо г. Казани)**

Оценка экономической целесообразности ремонта ЭДПТ основывается в соотношении суммарной остаточной потребительной стоимости отдельных элементов всей системы с затратами на восстановление требуемых потребительских свойств технической системы.

Общая стоимость закупки требуемого количества щеток для трамвайных

депо составляет 1355,2 тыс. руб. Для локомотивного депо Юдино закупается около 12000 щеток в год, общей стоимостью 1900 тыс. руб. Эти затраты составляют от 15% до 20% от общих затрат на ремонт ЭПС. В связи с этим, увеличение назначенного ресурса щеток и снижение затрат на их закупку приведет к значительному снижению расходов на ремонт ТЭД и ЭПС в целом.

Применение технологии диагностирования щеточно-коллекторного узла и эксплуатации электродвигателя по техническому состоянию увеличивает заданный ресурс щеток и щеточно-коллекторного узла на 30%, что позволяет снизить затраты на эксплуатацию электродвигателей [134].

Если щеточно-коллекторный узел выходит из строя, то электродвигатель становится непригоден для эксплуатации. Поэтому возникает необходимость починки коллектора для ремонта якоря или замена его на новый [135].

Расчет эксплуатационной стоимости электродвигателя в год ведется по следующим статьям:

- сырье и материалы;
- заработная плата производственных рабочих;
- единый социальный налог;
- амортизация;
- общехозяйственные расходы.

В такой ситуации становится актуальным продление заданного срока службы щётки и введение системы прогнозирования срока службы электродвигателя, увеличивающее общий ресурс работоспособности ЩКУ, которая представлена на рис. 5.1.

На основе всех расходов, связанных с модернизацией щеточно-коллекторного узла и монтажом вибродатчика необходимо рассчитать полную себестоимость работы

$$C=C_M+C_{зп}+C_{есн.}+C_a+C_{пр}, \quad (5.1)$$

где  $C_M$  – материальные затраты;

$C_{зп}$  – затраты на оплату труда;

$C_{есн.}$  – расходы на социальные нужды;

$C_a$  – амортизация;

$C_{\text{пр}}$  – прочие затраты



Рисунок 5.1 – Блок-схема прогнозирования срока службы электродвигателя

Затраты на эксплуатацию щеток составляют

$$U = \sum C_i + \sum Z_j, \quad (5.2)$$

где  $C_i$  – затраты на закупку щеток;

$Z_j$  – трудозатраты рабочего персонала при замене изношенных щеток.

Расчет основной заработной платы в рублях производственных рабочих определяется по формуле

$$C_{\text{зп}} = \sum t_i \cdot K_{\text{Тi}} \cdot C_{\text{Тi}}, \quad (5.3)$$

где  $t_i$  – трудоемкость  $i$ -го вида работ;

$K_{\text{Тi}}$  – тарифный коэффициент, соответствующий разряду работ по  $i$ -му виду;

$C_{\text{Тi}}$  – часовая тарифная ставка.

При замене изношенной серийной щетки требуется слесарь-электрик 3 разряда. Следовательно, затраты за полтора года составляют на 1 единицу ПС:

- при ремонте серийных щеток

$$U_{\text{г.э.}} = 39,4 \times 8 \times 4 \times 3 = 3783 \text{ руб.}$$

- при эксплуатации серийных щеток

$$U_{\text{д.э.}} = 8 * 224,28 = 1794,24 \text{ руб.}$$

В пересчете затраты на закупку щеток и ремонт, составляют на 1 ед. ПС:

- при эксплуатации серийных щеток

$$C_{г.з} = 4032 + 3783 = 7815 \text{руб.}$$

- при применении новой технологии эксплуатации составной щетки

$$У_{д.с.} = 8 * 187,45 = 1499,6 \text{руб.}$$

Стоимость ремонта коллектора составляет 80848руб

$$C_{общ} = C_{г.з} + C_{кол} = 7815 + 80848 = 88663 \text{руб.} \quad (5.4)$$

Для изготовления усовершенствованной пластины габаритами 1,5x15x25мм, масса которой равна 0,025кг требуется профиль из медно-кадмиевого сплава (бронзы) БрКд-1 1200 руб. за кг., т.е. 30 руб. за одну пластинку.

Изготовление пластины

$$C_{из} = O_T * B + Ц_M + П \quad (5.5)$$

где  $C_{из}$  – стоимость изготовления пластины, руб.;

$O_T$  – оклад токаря 5-го разряда;

$B$  – время на изготовление, ч;

$Ц_M$  – цена на металл, руб.;

$П$  – премия.

Стоимость усовершенствованного щеткодержателя

$$C_{щ} = Ц_{щ} + C_{из} \quad (5.6)$$

где  $C_{щ}$  – стоимость усовершенствованного щеткодержателя, руб.;

$Ц_{щ}$  – цена щеткодержателя, руб.

Установка рельефной пластины усовершенствованного ЩКУ

$$У_{пл} = O_c * B + C_{щ} \quad (5.7)$$

где  $У_{пл}$  – стоимость установки пластины;

$O_c$  – оклад слесаря;

$B$  – время на работу.

При применении стандартной электрощетки ЭГ64-АК на один ЭДПТ

$$P_{щкy} = Y_{пл} * 8 + K_{ЭГ} * Ц_{ЭГ} \quad (5.8)$$

где  $K_{ЭГ}$  – количество щеток;

$Ц_{ЭГ}$  – цена одной щетки.

При установки разрезной щетки при первом использовании

$$P_{щкy} = Y_{пл} * 8 + K_{ЭГ} * Ц_{сост} + K_{ЭГ} * Ц_{ЭГ} \quad (5.9)$$

где  $Ц_{сост}$  – цена составного сменного блока.

В целом решение задачи простого воспроизводства и внедрения усовершенствованного узла на одну единицу подвижного состава в соответствии с рассмотренными рекомендациями по определению оптимального срока полезного использования щетки можно свести к следующей формуле

$$Z_{min} = \min \frac{K + n(S, T)_{to} \cdot Z_{to} + \sum_{j=1}^k n(S, T)_{prj} \cdot Z_{prj}}{T}, \quad (5.10)$$

где  $Z_{min}$  – минимум суммарных среднегодовых затрат;

$T$  – задаваемый срок службы;

$K$  – первоначальная стоимость средства труда;

$n(S, T)_{to}$  – количество проведенных технических обслуживаний в зависимости от значения показателя безотказности ( $S$ ) и задаваемого срока службы ( $T$ );

$Z_{to}$  – стоимость технического обслуживания;

$\sum_{j=1}^k n(S, T)_{prj} \cdot Z_{prj}$  – затраты на все виды ремонта ( $k$ ) за задаваемый срок службы;

$n(S, T)_{prj}$  – количество  $j$ -х видов ремонтов (текущий, средний, капитальный) за задаваемый срок службы;

$Z_{prj}$  – стоимость  $j$ -го вида ремонта.

На основе расчетов были вычислены оптимальные сроки службы электродвигателей по критерию минимума суммарных среднегодовых затрат.

Дальнейшее использование при применении составной щетки и усовершенствованного ЩКУ, затраты составят меньшую стоимость и сократится время на ремонт в 2 раза. Прижимная пластина и верхняя часть щётки, которая не

изнашивается с медным проводом будет не заменяема, съемным будет только сменный блок, цена которого составляет 45 руб.

Стоимость жизненного цикла (СЖЦ) (LCC – LifeCycleCost) – тягового ЭДПТ электрического транспорта определяется по формуле

$$\text{СЖЦ (LCC)} = C_{\text{пр}} + \sum_{t=1}^T (I_t + \Delta K_t - L_t) \cdot \alpha_t \quad (5.11)$$

где  $C_{\text{пр}}$  – цена приобретения тягового ЭДПТ (первоначальная стоимость), тыс. рублей. На стадии разработки концепции усовершенствованного ЩКУ и опытно-конструкторских работ (I-II стадии жизненного цикла) в качестве цены приобретения ЭДПТ с усовершенствованным ЩКУ может выступать ее лимитная цена;

$I_t$  – годовые эксплуатационные расходы, тыс. рублей;

$\Delta K_t$  – сопутствующие единовременные затраты, связанные с внедрением узла в эксплуатацию, тыс. рублей;

$L_t$  – ликвидационная стоимость объекта, тыс. рублей;

$\alpha_t$  – коэффициент дисконтирования;

$t$  – текущий год эксплуатации;

$T$  – конечный год эксплуатации, который устанавливается в соответствии с техническими требованиями или иной документацией (в том числе и учетной политикой предприятия, на балансе которого числится ПС).

Индекс доходности (индекс прибыльности) представляет отношение суммы приведенных эффектов к величине приведенных капиталовложений

$$\text{ИД} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_t - C_t)}{(1 + E_{\text{н}})^t} : \frac{\sum_{t=1}^T K_t}{(1 + E_{\text{н}})^t}, \quad (5.12)$$

где  $t$  – номер шага (месяца) расчета ( $t = 1, 2, 3 \dots T$ );

$T$  – горизонт расчета (1 год);

$P_t$  – результаты на шаге  $t$  (экономия)  $P_t = \text{Э}$ . Результаты реализации проектных решений включают доходы (выручку) от реализации работ, оказываемых с помощью разработки новой техники;

$C_t$  – текущие издержки;

$K_t$  – единовременные капиталовложения (стоимость щетки);

$E_H$  – норма дисконта. В условиях рыночной экономики  $E_H$  принимается равной или чуть больше банковской ставки по депозитным вкладам ( $E_H = 0,17$ );

$t$  – количество лет, в течение которых первоначально затраченные средства находились в «замороженном» состоянии.

Срок окупаемости (период полного возмещения) –  $T_{ок}$  представляет период времени от начала осуществления проекта до момента, когда нарастающий интегральный эффект полностью покрывает капитальные вложения

$$T_{ок} = \frac{1}{ИД} \quad (5.13)$$

Удельная СЖЦ единицы ЭДПТ определяется из выражения

$$LCC_{уд} = LCC / \sum_{t=1}^T (\sum Pl_{бр})_t, \quad (5.14)$$

где  $\sum Pl_{бр}$  – грузо- или пассажирооборот, осваиваемого ПС в год, ткм.бр.;

$T$  – продолжительность жизненного цикла (расчетный период), лет.

Расчет полезного эффекта осуществляется по формуле

$$\mathcal{E}_п = C_б \cdot (K_п \cdot K_д - 1) + \Delta LCC + \mathcal{E}_с + \mathcal{E}_к + \mathcal{E}_э, \quad (5.15)$$

где  $C_б$  – цена единицы базового подвижного состава и сложных технических систем электрического транспорта;

$K_п$  – коэффициент учета роста производительности усовершенствованного ЩКУ по сравнению с базовым. Рассчитывается как отношение  $(B_2:B_1)$  годовых объемов работы, выполняемых новым (модернизированным)  $(B_2)$  и базовым  $(B_1)$  техническим средством в соответствии с показателями, включенными в нормативно-техническую документацию, техническое задание и другие, или по соотношению потребных парков базового и нового (модернизированного) подвижного состава при выполнении одинаковой перевозочной работы. При этом учитываются показатели надежности усовершенствованного ЩКУ по сравнению с базовым;



$K_d$  – коэффициент учета изменения срока службы нового (модернизированного) подвижного состава или технической системы по сравнению с базовой моделью

$$K_d = (1/T_1 + E) / (1/T_2 + E), \quad (5.16)$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  – сроки службы усовершенствованного ЩКУ по сравнению с базовым.

Стоимость ремонта по трамвайному депо г. Казань, где парк составляет 148 вагонов, составит 13,12 млн. руб., по троллейбусному депо №2, парк 88 ед. ПС составит 8 млн. руб. Стоимость диагностического виброакустического комплекса составляет в среднем 1,5 млн. руб. Так, стоимость ремонта ЭДПТ за период его эксплуатации превышает затраты на его изготовление примерно в 10 раз.

Таким образом, внедрение усовершенствованного щеточного узла с разрезной щеткой и новой технологией диагностирования ЩКУ, эксплуатации электродвигателя даст экономию 544 тыс. руб., срок окупаемости составит 1,02 года, что составляет от общей суммы ремонта ЭПС 13%. Проблема утилизации отработанных составных щеток является решенной, т.к. при правильной организации процесса регенерации стоимость применения усовершенствованного щеточного узла на 40-70% ниже стоимости обычных щеток при практически одинаковом их качестве. Принимая во внимание техническую возможность в дальнейшем планируется переоборудование существующих ЩКУ на улучшенный.

### **5.3 Рекомендации по улучшению планово-предупредительных работ**

Преимущества системы ППР, заключается в возможности гарантировать ресурс и безопасную эксплуатацию наиболее ответственных элементов технической системы. Основной недостаток – высокий уровень затрат на регламентированный объем работ, необходимость полной разборки и принудительной замены деталей независимо от их работоспособности. Применение такой дорогостоящей системы целесообразно для обеспечения

высокого уровня безопасности движения и гарантии надежности по ресурсу работоспособности на строго определенный период эксплуатации.

Практика эксплуатации и опыт проведения ремонтов показывает, что плановые ремонты выполняются чаще, чем это требуется по техническому состоянию оборудования, при этом не исключается возможность пропуска дефекта.

При переводе транспортного предприятия с ППР на обслуживание по фактическому состоянию (ОФС) применяется модифицированная система ППР, некий симбиоз ППР и обслуживания по фактическому состоянию, называемый плано-диагностическим обслуживанием (ПДО).

Правильная организация и оптимальный выбор методов и средств диагностирования технического состояния электродвигателя в совокупности со своевременным принятием профилактических мер позволяет существенно снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Целью внедрения технического вибродиагностирования ЭДПТ является поддержание установленного уровня надежности, обеспечение требований безопасности и эффективности использования изделий.

Вибродиагностирование электродвигателя включает в себя следующие операции: сбор информации о состоянии объекта диагностики, прием информации и ее обработка, передача результатов обработанной информации, принятие решения о выполнении последующих операций или о дальнейшем использовании узлов на основании результатов оценки. Внедрение диагностического комплекса, автоматизация сбора и обработка информации дает возможность при сохранении ППР выполнять ремонт ЭПС по фактическому состоянию.

Предложенная методика позволяет снизить стоимость затрат на плановые ремонты. Возможен переход на ремонт по фактическому состоянию. Компьютерные и расчетные алгоритмы способны обрабатывать диагностические параметры, позволяя вносить в системы элементы прогнозирования отказов узлов (ЩКУ, подшипников и якорных обмоток).

Проведена оценка технико-экономического обоснования и эффективности внедрения математической модели контроля изменения вибрации в

электродвигателях на испытательных станциях вагоноремонтных заводов и локомотивных депо, депо городского подвижного электротранспорта для вибрационных испытаний ЭДПТ при ремонте. Следовательно, внедрение устройств контроля вибрации является на сегодняшний день крайне актуальным и экономически обоснованным.

Представленная функциональная схема (рис. 5.2) формирует комплексную модель мониторинга оценки технического состояния электродвигателей на предприятии с применением усовершенствованного ЩКУ и методики вибродиагностики (красная – система ППР, зелёная – переход по фактическому состоянию), увеличивает заданный ресурс щеток и щеточно-коллекторного узла на 30% (20% это заданный износ щетки + 10% допустимый предельный износ), данная информация по состоянию ЭДПТ обрабатывается техническим, эксплуатационным и планово-экономическими отделами.

Обслуживание по фактическому состоянию (ОФС) - это необходимый метод, который позволит выявить дефекты и с заданной вероятностью давать прогноз о продолжительности работоспособного состояния без вывода ЭДПТ в ремонт (рис. 5.3).

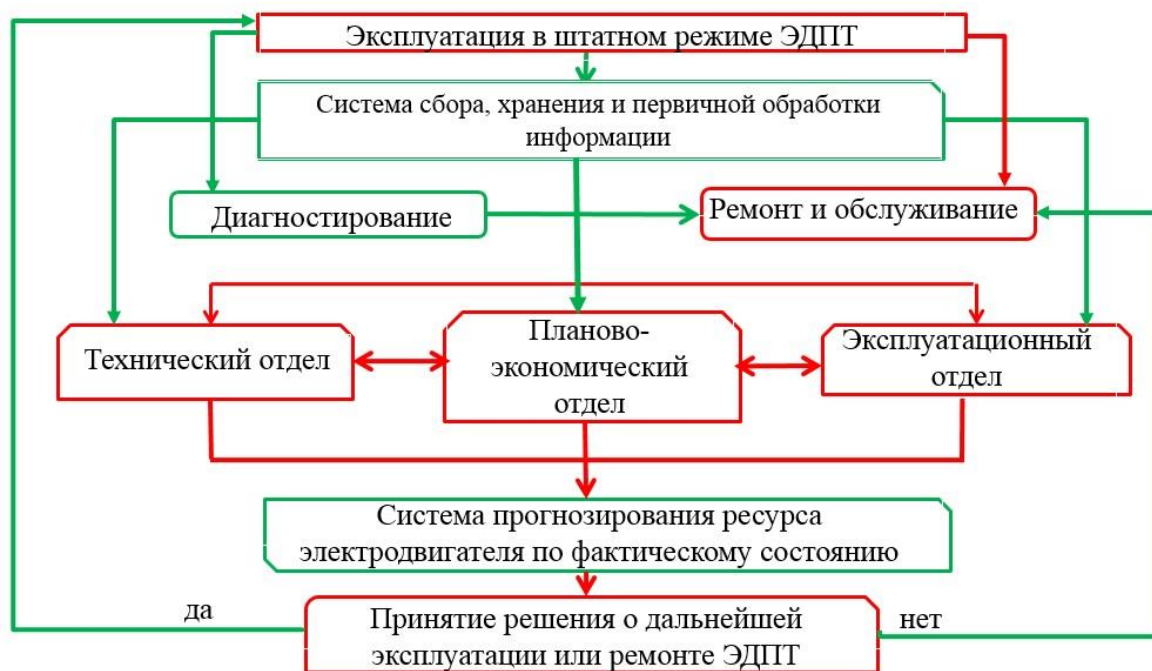


Рисунок 5.2 – Функциональная схема оценки состояния электродвигателей на предприятии

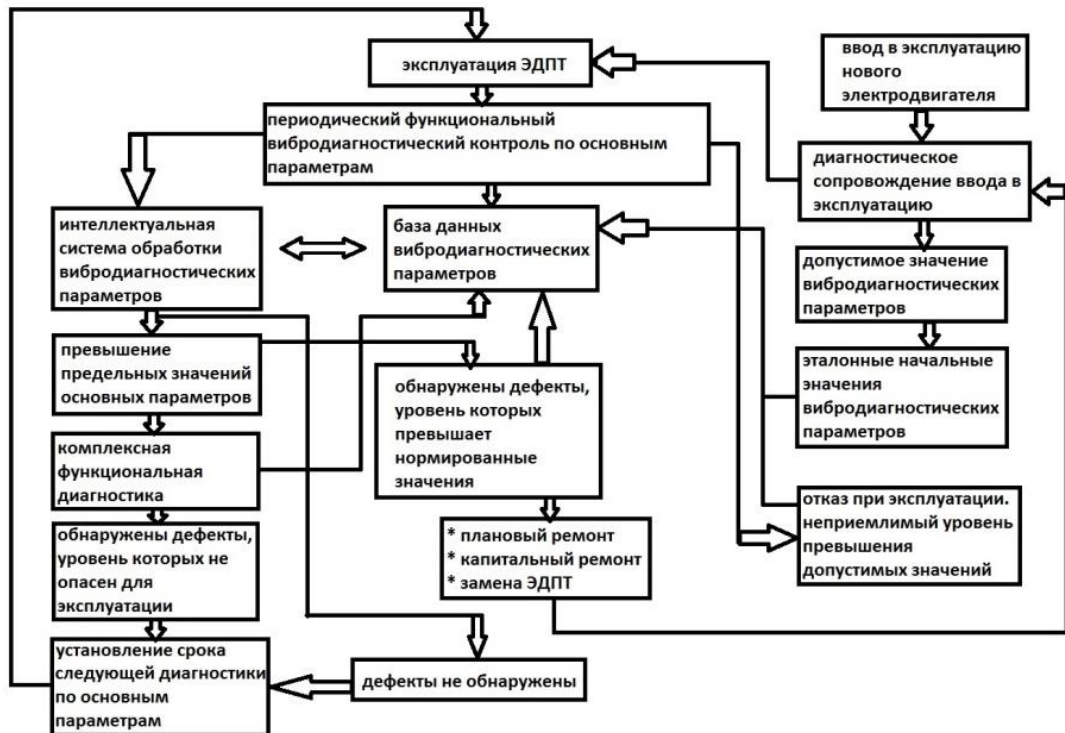


Рисунок 5.3 – Система обслуживания по фактическому состоянию электродвигателей в эксплуатационном отделе

Применение методов технической диагностики, как неотъемлемой части системы обслуживания по фактическому техническому состоянию повышает эффективность планирования и проведения ремонтов ЭДПТ, следовательно, повышает и эффективность его эксплуатации.

По результатам анализа комплекса вибродиагностических параметров определяется техническое состояние ЭДПТ и оценивается остаточный ресурс ЩКУ. Обработка вибродиагностических параметров осуществляется в несколько шагов. Первый шаг – предварительная подготовка массивов данных и их фильтрация. На втором: происходит дифференциальная обработка, определяется вид и уровень дефекта по каждому параметру. На третьем: обрабатываются взаимные связи исследуемых параметров и дефектов, определяются возможные ложные дефекты и отбрасываются ложные дефекты и уровень развития данного повреждения. На четвертом уровне проводится интегральная оценка по всем параметрам, с учетом всех дефектов определяется общее состояние ЭДПТ и дается прогноз о сроке возможной безопасной эксплуатации.

Данные эксплуатации и эксперимента полученные в [136, 137] показывают, что износ коллекторов при непрерывной работе ЭДПТ находятся в пределах 0,03 – 2 мм в год за 10000 ч, что также оказывает влияние на показатели надежной работы ЩКУ.

Центром комплексного метода диагностики является диагностическая база данных, которая корректируется с учетом проведения ремонтов, обнаруженных и зафиксированных дефектов. Важным элементом системы обслуживания по фактическому состоянию является реализация постоянного или периодического контроля технического состояния ЩКУ, а также определение остаточного ресурса ЩКУ. В данном случае принятие решений о ремонте производится на основе информации о техническом состоянии контролируемого узла, формируемой при помощи системы вибродиагностики включающей интеллектуальную систему обработки параметров. Ограниченный ряд параметров контролируется в автоматическом режиме, а остальные параметры – в ручном, чем достигается целостность информации и повышается скорость обработки данных. Точность комплексного метода вибродиагностики повышается с ростом набора статистических данных по однотипному оборудованию. Более точный прогноз достигнут путем сравнения диагностируемых параметров с эталонными и предельными сигналами, полученными на заведомо исправном и неисправном ЭДПТ. Если интеллектуальная система обнаружит признаки дефектов, но параметры находятся в рамках норм и определенный остаточный ресурс соответствует требуемому, принимается решение о сроке следующей периодической диагностики по основным параметрам. В противном случае принимается решение о выводе ЭДПТ в ремонт и его дальнейшей работе или замене.

Схема (рис. 5.4) может быть реализована на ПС, практикующие планово-профилактическое техническое обслуживание, но переходящие на ОФС, считающиеся достаточным для удовлетворительной работы электродвигателя, согласно данным технического аудита.



Рисунок 5.4 – Организация работ при переводе обслуживания от ППР к ОФС в техническом отделе

Группа планирования ремонта обычно уже существует на любом достаточно крупном предприятии в том или ином виде (с различными названиями), например, в виде группы профилактического обслуживания ОГМ предприятия, однако ее функции несколько расширяются от долгосрочного планирования (год и более) повседневной работы ремонтной службы к полномасштабному (краткосрочному и долгосрочному) планированию ТО.

Эта группа должна осуществлять следующие основные функции:

- координация повседневной плано-профилактической работы службы ремонта подразделения, необходимого планового периодического ТО с распознаванием состояния оборудования ПС, сроков и обстоятельств проведения технического обслуживания с руководством производства (с учетом минимизации последствий остановки или снижения производительности производства);

- планирование объема работ по ТО, включая процедуры, инструмент, запасные части, трудозатраты, осмотры и обследования и т.д.;
- контроль за выполнением работ и отслеживание затрат, включая функционально-стоимостной анализ;
- оценка тенденций изменения межремонтных интервалов и ресурса оборудования для нужд возможной модернизации или замены оборудования и ведение, и хранение паспортов (истории) агрегатов.

Группа обеспечения надежности (технической диагностики и мониторинга) все усилия сначала направляет на правильную организацию мониторинга технического состояния оборудования ПС, и только спустя некоторое время, по мере развития группы, делает шаги в направлении обслуживания.

На этой стадии важность обучения нельзя недооценивать: грамотное обучение может сократить сроки перехода на ОФС многократно, отсутствие обучения ставит под сомнение возможность перехода.

Осуществление мероприятий по повышению надежности требует дополнительных затрат труда и средств (Рис. 5.5) [139].

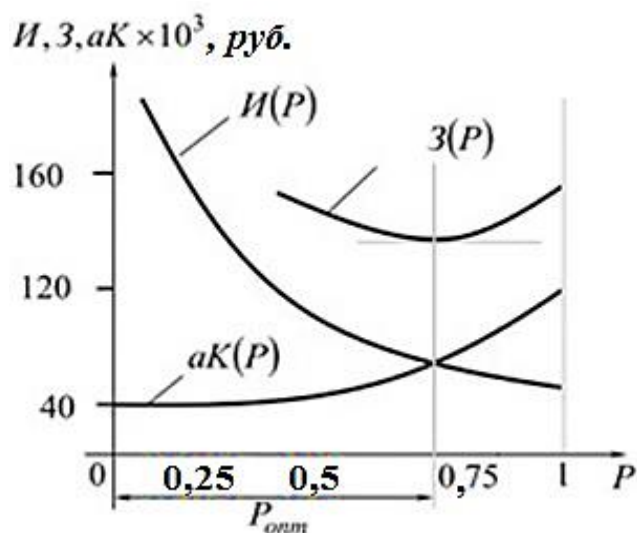


Рисунок 5.5 – Зависимости затрат от уровня надежности  $P$  ЩКУ ЭДПТ:  $аК$  – капитальные вложения;  $И(P)$  – эксплуатационные;  $З(P)$  – приведенные затраты

Представлены зависимости затрат от уровня надежности  $P$  ЩКУ ЭДПТ:  $aK$  – капитальные вложения включают в себя затраты на совершенствование процесса диагностирования;  $I(P)$  – эксплуатационные включают в себя уменьшение расходов на внеплановые ремонты ЩКУ за счет сокращения числа отказов при эксплуатации, сокращение расходов на ТОиР и внедрению ремонта по фактическому состоянию;  $Z(P)$  – приведенные затраты.

Была получена экономическая эффективность применения, усовершенствованного ЩКУ ЭДПТ с повышенной надежностью и рассчитан срок окупаемости единовременных затрат на внедрение усовершенствованного ЩКУ ЭДПТ с повышенной надежностью, что составил около 1,2 года. Более надежный ЩКУ ЭДПТ дешевле в эксплуатации, т.к. затраты для поддержания его работоспособного состояния меньше.

Даны рекомендации по переходу к ремонту ЭДПТ по фактическому состоянию:

1. Поэтапный переход к системе обслуживания электродвигателей по фактическому техническому состоянию способствует сокращению материальных и трудовых затрат на ТО и ремонты.

2. При проектировании новых электродвигателей должны использоваться основные положения ППР с учетом соответствия ресурсов узлов заданным межремонтным периодам и установленным видам ТО и ТР по фактическому состоянию.

3. Для высокой эффективности ремонта ЭДПТ по фактическому состоянию требуется назначение межремонтных пробегов на основе данных о процессах износа и прогнозирования его состояния.

4. Основным методом определения фактического технического состояния ЭДПТ в межремонтный период является статистическое диагностирование, которое заключается в оценке остаточного ресурса конкретного узла (детали), по величине достигнутой этим узлом наработки после ремонта.

5. Применение комплексных систем диагностики ЭДПТ позволяет реализовать технологию обслуживания по фактическому состоянию и снизить



издержки от аварийных отказов за счет раннего обнаружения дефектов и контроля их развития, своевременно планировать ремонт.

6. Достоинства данной системы в том, что все узлы и щетки изнашиваются до предела, т.е. используется полный ресурс работоспособности.

Такие показатели с достаточной степенью вероятности позволяют прогнозировать количество ремонтных работ, время их проведения и связанные с ними расходы.

Опыт эксплуатации ЭДПТ показывает, что затраты на поддержание (восстановление) надежности с помощью технического обслуживания (ТО) и технического ремонта (ТР) за срок службы в несколько раз превышают затраты на их создание с определенным уровнем надежности. Именно этот факт вызывает необходимость совершенствования и оптимизации системы их ТО и ТР.

Таким образом, рассчитав время проведения ремонтов, можно сформировать усовершенствованную систему планово-предупредительных ремонтов, являющуюся частью общей системы управления воспроизводством. Критерий принятия решения о выводе ППР в ремонт по фактическому состоянию основан на расчете показателя безотказной работы ЭДПТ, что обеспечивает заданный уровень их надежности.

## **Выводы по главе 5**

1. Установлена и подсчитана экономия от внедрения усовершенствованного щеточного узла вместе с составной щеткой, которая составила 544 тыс. руб. и срок окупаемости составит 1,02 года, это 13% от общей стоимости ремонта ЭПС.

2. В предложенной усовершенствованной системе ППР и повышение надежности тяговых электродвигателей являются одним из основных критериев управления воспроизводством, на основе которого формируется система ремонтно-технического обслуживания электродвигателей. Разработка комплексной системы диагностики базировалась на нескольких взаимодополняющих методах, которые дают возможность определить наибольшее количество самых опасных дефектов.

Оценка технического состояния производится на основе многофакторного анализа: износ щетки, биение, спектральный анализ полученных сигналов вибрации. Наличие нескольких диагностических параметров разной физической природы, позволяющих определить определенный вид повреждения, дает возможность провести более точный анализ возникшего дефекта и максимально исключить ошибку ложного определения, а также отбросить возникающие помехи.

3. Предложенная блок-схема прогнозирования срока службы электродвигателя с применением усовершенствованного ЩКУ и методики вибродиагностики позволяет увеличить заданный ресурс щеток и щеточно-коллекторного узла на 30%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ работы электродвигателей постоянного тока, выявлены узлы, которые подвержены основному износу. В процессе анализа рассмотрены и выявлены проблемы контроля за техническим состоянием электродвигателей, условий эксплуатации подвижного состава, физические механизмы возникновения и протекания вибрационного процесса. Приведены известные способы и направления по повышению надежности ЩКУ и его улучшения.

В диссертационной работе были получены следующие обобщающие результаты:

1. На основании статистических данных, собранных по эксплуатации щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока на предприятиях МУП «Метроэлектротранс» в Трамвайном депо и Троллейбусном депо №2 с 2010 по 2022 года и их последующей обработки выявлены виды отказов щеточно-коллекторного узла и определены законы распределения вероятности безотказной работы ЩКУ ЭДПТ;

2. Разработан способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторного узла, который производится без демонтажа тягового электродвигателя на подвижном составе и может применяться для диагностики состояния основных узлов тягового ЭДПТ непосредственно в процессе эксплуатации для своевременного выявления дефектов;

3. Разработан, создан и исследован опытный образец щеточного узла усовершенствованной конструкции с составной щеткой и нажимной пластиной, улучшающий качество коммутации, обеспечивающей высокую виброустойчивость щетки, увеличивающий ее ресурс на 28-30% и позволяющий снизить затраты на техническое обслуживание тягового ЭДПТ в процессе эксплуатации на 70%. Внедрение составных щеток позволит сократить их потребление до 35%;

4. Создана компьютерная программа по контролю функционирования щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока на основе метода оценки технического состояния по спектрам вибрации. Систематический контроль

позволяет постоянно поддерживать ЩКУ в технически исправном состоянии, что продлевает срок его службы;

5. Разработан алгоритм определения технического ресурса ЩКУ с применением методов и средств оценки технического состояния и отклонений от нормы функционирования.

Задачи, поставленные в диссертационной работе, решены и имеют перспективы дальнейшего научного развития, в области определения дефектов электродвигателей подвижного состава, расположенных в труднодоступных местах и в условиях, где диагностика затруднена в том числе и из-за климатических, температурных условий и, если требуется принятие решения о месте неотложного ремонта электродвигателя при нахождении на отдаленном расстоянии от ремонтного цеха. Разработанные методики и рекомендации могут быть использованы в научно-исследовательских учреждениях, конструкторских и проектных бюро, производственных предприятиях, на транспорте и других организациях, занимающихся разработкой, производством и эксплуатацией электротранспортных средств, так и других механических систем различного назначения.

## ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Безотказность единицы ТПС – способность единицы ТПС

ВСНТ - высокоскоростной наземный транспорт

МУП – Муниципальное унитарное предприятие

Надежность единицы ТПС – комплексное свойство единицы ТПС, характеризующееся безотказностью, ремонтпригодностью, долговечностью и сохраняемостью или определенными сочетаниями свойств

Назначенный ресурс - суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта может быть продолжена только после принятия решения о возможности продления данного показателя

НК – неразрушающий контроль

НТД – нормативно-техническая документация

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния

Отказ единицы ТС – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния единицы ТС, до восстановления которого эксплуатация единицы запрещена.

ОФС - обслуживание по фактическому состоянию

ПДО - планово-диагностическим обслуживанием

ППР – планово-предупредительные работы

ППТО – Планово-предупредительный характер системы технического обслуживания

Причина отказа – явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта.

ПС - подвижного состава

ПТЭ - Правила Технической Эксплуатации

Ресурсный отказ – отказ, в результате которого объект достигнет предельного состояния

СЖЦ – стоимость жизненного цикла тягового ЭДПТ (LCC – Life Cycle Cost).

СК – скользящий контакт

СКЗ – среднеквадратическое значение

ТФН - таблица функций неисправностей

ФЗ – Федеральный Закон

ЩКУ – щёточно-коллекторный узел

ЭДПТ – электродвигатель постоянного тока

ЭИЛ - электроискровое легирование

ЭГЩ – электрографитовая щётка

Электроподвижной состав (ЭПС) – подвижной состав, обладающий тяговыми свойствами для осуществления и обеспечения перевозочного процесса

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 15 октября 2008 г. № 2167-р. Режим доступа: <https://www.mintrans.ru/documents/2/1010> (дата обращения 03.04.2012 г.)
2. Копылов, И. П. Электрические машины специального назначения. Раздел 20. Тяговые электрические машины / Под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова — М.: Энергоатомиздат, 1989. — Т. 2. — 688 с. — ISBN 5-283-00531-3
3. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. — М. : Транспорт, 1991. — 343 с.
4. Авилов, В.Д. Исследование работы скользящего контакта в электрических машинах / В.Д. Авилов, В.В. Харламов, П.К. Шкодун // Железнодорожный транспорт. — 2010. - № 11. — С. 69.
5. Солдаткин, А.В. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электрических машин за счет совершенствования технологии ремонта коллекторов дис. канд. техн. наук: 05.22.07: 2004 / Солдаткин Александр Владимирович. — Омск — 2004 — 132 с.
6. Белан, Д.Ю. Совершенствование технологической подготовки ремонта тяговых электродвигателей магистральных электровозов дис. канд. техн. наук: 05.22.07: 2011 / Белан Дмитрий Юрьевич. — Омск — 2011 — 133 с.
7. Дербенёв, В. А. Некоторые аспекты разработки новых конструктивных исполнений щёток электрических машин [Текст] / В. А. Дербенёв, В. П. Степанов, И. К. Бороха // Электротехника. — 2002. — № 8. — С. 55–58.
8. ГОСТ 21888–82. Щётки, щёткодержатели, коллекторы и контактные кольца электрических машин. Термины и определения [Текст]. — Введ. 01.01.1983, изм. 23.06.2009. — М.: Изд-во стандартов, 2005. — 27 с.
9. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. — М.: Изд-во стандартов, 1974. — 27 с.

10. Авилов, В. Д. Особенности коммутации коллекторных машин малой мощности с составными щётками [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Д. Авилов. – Омск, 1968. – 37 с.

11. Антипов, В. Н. Щёточно-контактный аппарат второго поколения, как основа дальнейшего развития коллекторных электрических машин [Текст] / В. Н. Антипов, И. А. Глебов // Электротехника. – 1995 – № 5. – С. 27–30.

12. Барсуков, И. А. Измерение деформации коллекторов электрических машин в динамическом режиме [Текст] / Барсуков, И. А. // Вестник электротехнической промышленности. - 1958.- № 5 . -С.36-38.

13. Колесников, С.В. Разработка метода расчета эксплуатационной надежности электродвигателей трамваев, выработавших заданный технический ресурс дис. канд. техн. наук: 05.09.03: 2004 / Колесников Сергей Васильевич. - Казань : КГЭУ, 2004. - 191 с.

14. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (с Поправкой). - М.: Изд-во стандартов, 2014. – 56 с.

15. Филина, О.А. Техническое состояние изделия и его бездемонтажная диагностика / Филина О.А. // В сборнике: Наука сегодня сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Научный центр «Диспут». 2014. С. 74.

16. Растунин, Д.В. Разработка методов расчета эксплуатационной надежности коллекторов тяговых электрических машин постоянного тока дис. канд. техн. наук: 05.09.01: 2010 / Растунин Дмитрий Владимирович. – Казань – 2010 – 110 с.

17. Филина, О.А. Анализ работы гиросtabilизатора с ротором, имеющим перемещающиеся массы / Баженов Н.Г., Филина О.А. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 3-4. С. 135-138.

18. Филина, О.А. Использование одноосного гиросtabilизатора для системы гироскопической стабилизации в автономных системах управления / Баженов Н.Г., Филина О.А., Озерова Е.Ю. // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 202-206.



19. Ларченко, А. В. Методы идентификации дефектов щеточно-коллекторного узла и магнитной системы электрических машин дис. канд. техн. наук: 05.09.01: 2011 / Ларченко Алексей Владимирович. – Москва – 2011 – 189 с.
20. Veselka, F. Měřicí zařízení pro aplikaci metody prachových částic [Текст] / F. Veselka. – Technický týdeník, 2011, – roč. 59, – č. 7, s. 30 – 30. – ISSN: 0040-1064.
21. Захарченко, Д. Д. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электромашини и трансформаторы [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. – М. : Транспорт, 1968. – 296 с.
22. Лившиц, П. С. Справочник по щёткам электрических машин [Текст] / П. С. Лившиц. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.
23. Трошин, И.А. Анализ методов и средств диагностирования коммутации электрических двигателей постоянного тока [Текст] / Трошин, И.А. // Электрифікація транспорту. – 2013. - № 5. – С.59-66. ISSN 9516-5456
24. Приказ Минжилкомхоза РСФСР от 20.04.1989 N 117 "О введении Типовой системы технического обслуживания и ремонта трамвайных вагонов и троллейбусов". – Режим доступа <http://lawru.info/dok/1989/04/20/n1179160.htm> (дата обращения 02.09.2018 г.)
25. Филина, О.А. Техническая диагностика электрооборудования / Филина О.А., Кочкин Д.К., Сабирова Я.О., Фахертдинов Д.Ш. // В сборнике: XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2018) Сборник трудов конференции. 2019. С. 216-219.
26. Правила заполнения диагностической карты к приказу Министерства транспорта РФ от 21 августа 2013 г. N 274 С изменениями и дополнениями от: 25 февраля 2014 г., 12 марта 2018 г. - Режим доступа: <http://base.garant.ru/70441598/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения 02.06.2020 г.)
27. Toliyat, Hamid A. Handbook of Electric Motors [Text] / Hamid A. Toliyat, Gerald B. Kliman. – New York : Marcel Dekker, 2004. – 850 p.
28. Филина, О.А. Структура системы оперативной вибрационной диагностики газоперекачивающих агрегатов / Филина О.А., Галиуллин Д.Р., Гиматдинов Ф.С. // В

сборнике: Новые задачи технических наук и пути их решения сборник статей международной научно-практической конференции. 2016. С. 174-176.

29. Арнольд, Э. Машины постоянного тока [Текст]. В 2 т. Т. 1. Теория и исследование / Э. Арнольд, И. Л. Ла-Кур; пер. с нем. М. М. Елина. – М. : Гостехиздат, 1931. – 496 с. : ил.

30. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев // Санкт-Петербург. 1997. С. 286.

31. Филина, О.А. Построение проверяющего и диагностического тестов функциональной схемы объекта диагноза / Филина О.А., Яшагина А.В., Иванов Н.С., Колесов А.А. // В сборнике: XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019) Сборник трудов конференции. 2020. С. 876-879.

32. Ахметзянов, Г. Г. Совершенствование диагностирования коллекторно-щёточного узла однофазных коллекторных двигателей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Г. Г. Ахметзянов ; Ом. гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2008. – 164 с.

33. Безбородов, Ю. Я. Исследование связи длительностей дуговых разрядов на коллекторе со степенью искрения в баллах [Текст] / Ю. Я. Безбородов, В. П. Клюка, В. С. Стукач, В. И. Тимошина // Омский ин-т инж. Ж.-д. трансп. – Омск, 1982. – 18 с.- Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 23.06.82, № 1684.

34. Kaminskiy, M. Reliability engineering and risk analysis : a practical guide [Text] / M. Kaminskiy, V. Krivtsov ; ed. M. Modarres. – 2 ed. – Dearborn : CRC Press, 2009. – 454 p.

35. Исмаилов, Ш. К. Определение влияния качества обработки рабочей поверхности коллекторов на качество коммутации тяговых электродвигателей с помощью однофакторного дисперсионного анализа / Ш. К. Исмаилов, В. В. Бублик и др. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 2. С. 398 – 401.

36. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации" (ред. от 03.07.2001) (УТВ. МПС РФ 26.05.2000 N ЦРБ-756). - Режим доступа: <https://zakonbase.ru/content/base/118782> (дата обращения 02.07.2010 г.)

37. Смазнов, П. П. Характеристики щеточно-коллекторного узла тяговых электрических машин при использовании щеток с мономодальной пористой структурой. - М., 1993. - 257 С (МИИТ)

38. Абрамов, Н. Г. О перебросах дуги по коллектору двигателя [Текст] / Н. Г. Абрамов // Электротехническая и тепловозная тяга. – 1978. - № 6.

39. Лившиц, П. С. Исследование износа элементов скользящего контакта электрических машин постоянного тока общепромышленного назначения [Текст] / П. С. Лившиц // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины. – 1982. – № 5 (135). – С. 12–15.

40. Ившин, И. В. Методика оценки результатов диагностики кабельных линий среднего напряжения с применением вероятностей модели надежности / Н. К. Мифтахова, И. В. Ившин, В. А. Гаврилов, Р. А. Гимадиев // Проблемы энергетики. – Казань - 2013 - № 5-6 – с. 114-118.

41. Никулин, С.В. Применение смазывающих щеток для снижения износа элементов узлов токосъема в электрических машинах / Изотов А.И., Мамаев Г.А., Беспалов В.Я., Фоминых А.А., Никулин С.В., Тимошенко В.Н., Новиков Л.И., Изотов С.А. // Ж. Электричество 2015. Вып. №3. – с. 53-57.

42. Бочаров, В. И. Результаты эксплуатационных исследований износных показателей скользящего контакта тяговых двигателей электровозов с различными коллекторными и щёточными материалами тока [Текст] / В. И. Бочаров, В. Г. Щербаков // Материалы 5 всесоюзной конференции по коммутации электрических машин. – Омск : ОмИИТ, 1976. – С. 146–148.

43. Филина, О.А. Общие требования к системам диагностики в щёточно-коллекторном узле / Филина О.А., Зараменских А.Н., Пасечник С.В. // В сборнике: III международные научные чтения (И.И. Ползунова) сборник статей международной научно-практической конференции. Европейский фонд инновационного развития. 2016. С. 19-22.

44. Лифшиц, П. С. О некоторых итогах работ по повышению надёжности щёток [Текст] / П. С. Лифшиц, И. И. Бодров, В. Е. Кубарев // Промышленная энергетика. – 1985. – № 2. – С. 42–45.

45. Филина, О.А. Разработка программных комплексов контроля и диагностики состояния энергетических объектов с помощью теории шкал / Филина О.А., Михайловский А.Е., Яшагина А.В. // В сборнике: Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы Сборник материалов VIII Международной молодежной научной конференции. 2018. С. 369-372.

46. Исмаилов, Ш. К. Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава [Текст]: монография / Ш. К. Исмаилов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2007. – 391 с.

47. Филина, О.А. Техническая диагностика газотранспортного оборудования, городского электрического транспорта и железнодорожного транспорта / Филина О.А., Степанов Е.Л. // Наука и современность. 2014. № 29. С. 200-205.

48. Правила по охране труда при техническом обслуживании и текущем ремонте тягового подвижного состава и грузоподъемных кранов на железнодорожном ходу. ПОТ РО-32-ЦТ-668-99" (УТВ. МПС РФ 31.05.99). - Режим доступа: <https://zakonbase.ru/content/base/126761> (дата обращения 02.10.2013 г.)

49. Филина, О.А. Современные возможности вибродиагностики ГЭТ / Филина О.А., Елисеев Б.О., Гиматдинов Ф.С. // В сборнике: Материалы IX Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2018» (МНТК «ИМТОМ-2018») Материалы IX Международной научно-технической конференции. Казань, 2018. С. 260-263.

50. Приказ МПС РФ от 5 апреля 1999 г. N 20Ц "Об утверждении Правил перевозок смерзающихся грузов на железнодорожном транспорте" (с изменениями и дополнениями 12 декабря 2008 г.). - Режим доступа: <http://base.garant.ru/180439/> (дата обращения 01.12.2016 г.)

51. Гиоев, З. Г. Основы виброакустической диагностики электромеханических систем локомотивов : монография [Текст] / З. Г. Гиоев. – М. : Маршрут, 2006. – 273 с.

52. Распоряжение от 17 января 2005 г. N 3р О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО "РЖД" (В ред. Распоряжений ОАО

"РЖД" от 03.04.2007 N 558р, от 22.06.2012 N 1246р). Режим доступа - <https://jd-doc.ru/2005/yanvar-2005/11745-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-17-01-2005-n-3r> (дата обращения 02.01.2010 г.)

53. Кармадонов, А. Ф. Исследование износа и долговечности дисульфидмолибденовой пленки при граничном трении / Кармадонов А. Ф., Брудный А. И., Кирьянов А. М. //Твердые смазочные покрытия. - М. : Наука, 1977. С. 53-61.

54. Копылов, И. П. Электрические машины специального назначения. Раздел 20. Тяговые электрические машины / Под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова — М.: Энергоатомиздат, 1989. — Т. 2. — 688 с. — ISBN 5-283-00531-3

55. Filina, O.A. Evaluation of the operational life of direct current motors / Filina O.A., Tsvetkov A.N. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. С. 012016.

56. Распоряжение от 9 июля 2003 г. N АК-9-р "Об утверждении Методических рекомендаций по проведению анализа исполненного движения на маршрутах городского электрического транспорта". Режим доступа - <https://dokipedia.ru/document/1721025> (дата обращения 02.06.2013 г.)

57. Филина, О.А. Модель технического объекта / Филина О.А., Сидорова А.А., Мукимов А.Х. // В сборнике: Наука. Технологии. Инновации Сборник научных трудов. В 9-ти частях. 2018. С. 252-255.

58. Филина, О.А. Исследование эксплуатационного ресурса электродвигателя постоянного тока подвижного состава / Филина О.А. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 9-10. С. 133-139.

59. Давыдов, Ю. А. Тяговые электрические машины: учебное пособие / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2012.–126 с.:ил.

60. Филина, О.А. Повышение эффективности щеткодержателей / Филина О.А. // В мире научных открытий. 2010. № 6-1 (12). С. 227-230.

61. Распоряжение от 26 декабря 2016 г. N 2676р Об утверждении и введении в действие правил эксплуатации специального железнодорожного подвижного состава на инфраструктуре ОАО "РЖД". Режим доступа - <https://rulaws.ru/acts/Rasporyazhenie-OAO-RZHD-ot-26.12.2016-N-2676r/> (дата обращения 01.09.2022 г.)

62. Распоряжение от 21 августа 2017 г. N 1697р Об утверждении положения об организации расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта на инфраструктуре ОАО "РЖД". Режим доступа - <https://rulaws.ru/acts/Rasporyazhenie-OAO-RZHD-ot-21.08.2017-N-1697r/> (дата обращения 03.10.2018 г.)

63. Девликамов, Р. М. Повышение эксплуатационной надежности коллекторно-щеточного узла тяговых двигателей электроподвижного состава железных дорог : дис. канд. техн. наук: 05.22.07: / Девликамов Рашит Музаферович - Ростов-на-Дону, 2007. - 151 с. : ил.

64. Филина, О.А. Исследование ресурса электрощёток тяговых электрических машин / Рылов Ю.А., Степанов Е.Л., Филина О.А. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 1. С. 320-323.

65. . А.с. 771808 СССР, МКИ H02K 13/14. Устройство для улучшения коммутации коллекторных электрических машин с волновой обмоткой якоря / А. И. Скороспешкин, Э. Г. Чеботков, В. А. Прудников и др. // Бюллетень изобретений. – 1980. - № 32.

66. А.с. 1150593 СССР, МКИ G01R 31/34. Устройство контроля скользящего контакта электродвигателя [Текст] / В. Ф. Герман, И. Б. Малинский, В. Н. Потапов, Ю. Г. Салиенко // Открытия. Изобретения. – 1985. - № 30.

67. Пат. 2365005 RU, МПК C2 H01R39/18. Составная разъемная щётка с замковой частью [Текст] / Степанов Е. Л., Рылов Ю. А. ; патентообладатель Е. Л Степанов. – № 2007143694/09 ; заявл. 16.11.2007 ; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23. – 3 с. : ил.

68. Хомченко, Д.Н. Увеличение эксплуатационного ресурса коллекторных тяговых двигателей электровозов на основе разработки новых конструкций щеткодержателей дис. канд. техн. наук: 05.22.07: 2015 / Хомченко Дмитрий Николаевич. – Ростов-на-Дону. – 2015. – 108 с.

69. Патент 2095895. Устройство для контроля и испытания щеток тяговых электрических машин. / Л.Г. Козлов, В.П. Феоктистов, П.П. Смазнов, В.А. Коновалов, В.Н. Черняховская, А.А. Реморов. - Опубл. в Б.И., 1997, № 31

70. Абрамов, Н. Г. О перебросах дуги по коллектору двигателя [Текст] / Н. Г. Абрамов // Электрическая и тепловая тяга. – 1978. - № 6.
71. Давыдов, Ю. А. Тяговые электрические машины: учебное пособие / Ю. А. Давыдов. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. – 116 с. : ил..
72. Тимошенко, В. Н. Снижение износа щеток в коллекторных машинах постоянного и переменного тока дис. канд. техн. наук: 05.09.01: 2018 / Тимошенко Вячеслав Николаевич. – Киров – 2018 – 152 с.
73. Рапопорт, О. Л. Мониторинг щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя при эксплуатации / А. А. Осадченко, А. Б. Цукублин, О. Л. Рапопорт // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. — 2005. — Т. 308, № 7. — С. 107-109.
74. А.с. 951204 СССР, МКИ G01R 31/34. Способ диагностирования скользящего контакта электродвигателя [Текст] / В. Н. Потапов, В. Ф. Герман // Открытия. Изобретения. – 1982. - № 30.
75. А.с. 1112495 СССР, МКИ H02K 13/14. Устройство для улучшения коммутации коллекторных электрических машин с волновой обмоткой якоря / [Текст] / Л. Я. Макаровский, А. Б. Немногов, В. А. Прудников, И. А. Скоробогатов // Открытия. Изобретения. – 1984. - № 83
76. ГОСТ 27.410–87 «Надёжность в технике. Методы и планы статистического контроля показателей надёжности по альтернативному признаку» [Текст]. – Введ. 01.01.1989, изм. 23.11.2008. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 114 с.
77. ГОСТ 27.002-2015 - «Надёжность в технике. Термины и определения» [Текст]. – Введ. 1.03.2017, - М. : Изд-во Стандартиформ, 2016. – 28 с.
78. Тищенко, Н. А. Модернизация щёточно-контактного аппарата электрических машин [Текст] / Н. А. Тищенко, Е. П. Егоров, Д. М. Малкин, И. Г. Мартынов // Сталь. – 1977. – № 11. – С. 49–65.
79. Долгова, А. В Совершенствование технологии диагностирования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей магистральных электровозов дис. канд. техн. наук: 05.22.07: 2013 / Долгова, Анна Владимировна. – Омск – 2013 – 212 с.

80. Лифшиц, П. С. О некоторых итогах работ по повышению надёжности щёток [Текст] / П. С. Лифшиц, И. И. Бодров, В. Е. Кубарев // Промышленная энергетика. – 1985. – № 2. – С. 42–45.

81. Коршунов, Г. М. К вопросу обеспечения надёжной работы узла токосъёма электрических машин [Текст] / Г. М. Коршунов, В. А. Дербенёв, В. П. Степанов // Электротехника. – 2001. – № 8. – С. 31–32.

82. Дербенёв, В. А. Некоторые аспекты разработки новых конструктивных исполнений щёток электрических машин [Текст] / В. А. Дербенёв, В. П. Степанов, И. К. Бороха // Электротехника. – 2002. – № 8. – С. 55–58.

83. Кузнецов, Н.Л. Надёжность электрических машин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.

84. Филина, О.А. Сравнительные оценки методов диагностики ГПС / Филина О.А., Аскаков Ф.Ф., Галиуллин Д.Р., Пасечник С.В. // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 11-3. С. 96-97.

85. Ваньков, Ю.В. Программно-алгоритмическое обеспечение экспресс-контроля корпуса турбокомпрессора двигателя КАМАЗ / Ю.В. Ваньков, И.В. Ившин, А.Р. Загретдинов, М.Ф. Низамиев // Вестник технологического университета. – 2015 – Т. 18 - №5 – с.141 – 143

86. Степанов, Е.Л. Методы и средства повышения ресурса щёток тяговых электродвигателей дис. канд. техн. наук: 05.09.01: 2010 / Степанов Евгений Леонидович. – Новосибирск – 2010 – 214 с.

87. Бордаченков, А. М. Коллекторно-щёточный узел тяговых электрических машин локомотивов [Текст] / А. М. Бордаченков, Б. В. Гнездилов. – М. : Транспорт, 1974. – 158 с.

88. Лившиц, П. С. Развитие исследований и разработка метода расчёта скользящих контактов электрических машин постоянного тока [Текст] / П. С. Лившиц // Электричество. – 1984. – № 4. – С. 13–17.

89. Филина, О.А. Аппроксимация вольтамперной характеристики щеточного контакта составной щётки с повышенным ресурсом / Филина О.А., Идиятуллин Р.Г. // Современные тенденции развития науки и техники. – 2015. – №8-1. – С.134 – 136.



90. Филина, О.А. Опыт эксплуатации электрощеток с повышенным ресурсом в реальных технологических условиях / Хуснутдинов А.Н., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э., Филина О.А. // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 56-59.

91. Филина, О.А. Оценка качества продукции / Филина О.А., Пасечник С.В., Зараменских А.Н. // Journal of Advanced Research in Natural Science. 2017. № 1. С. 34-36.

92. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р. - Режим доступа <https://www.mintrans.ru/documents/2/1010> (дата обращения 03.12.2014 г.)

93. Адаптивное цифровое прогнозирующее устройство / О.А. Филина, Бутаков В.М., Литвиненко Р.С., Магданов Г.С. // Патент на изобретение RUS № 2707417, заявка № 2019114853 от 14.05.2019, Бюл. № 33 от 26.11.2019

94. Пуйло, Г. В. Тепловой расчет однофазных коллекторных двигателей при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы / Г. В. Пуйло, С. Н. Пирковский. // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2000. - № 54. – С.99-103.

95. «Технические требования к электроподвижному составу московского метрополитена для поставки в 2016-2022 годах». Режим доступа - [http://www.vniizht.ru/ic/dop\\_oblast3.pdf](http://www.vniizht.ru/ic/dop_oblast3.pdf) (дата обращения 02.10.2022 г.)

96. Адаптивное сглаживающее устройство / О.А. Филина, П.П. Павлов, Магданов Г.С. // Патент на изобретение RUS № 2714613, заявка № 2019114852 от 14.05.2019, Бюл. № 5 от 18.02.2020

97. ГОСТ 32884-2014 Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт железнодорожного подвижного состава. Термины и определения

98. Filina, O.A. Construction of verification and diagnostic tests for the functional diagram of the object of diagnosis / Filina O.A., Salnikova O.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020. С. 012111. doi:10.1088/1757-899X/747/1/012111

99. Курбасов, А.С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей [Текст] / А. С. Курбасов. – М. : Транспорт, 1977. – 224 с.

100. Филина, О.А. Техническая диагностика газотранспортного оборудования, городского электрического транспорта и железнодорожного транспорта / Филина О.А., Степанов Е.Л. // Наука и современность. 2014. № 29. С. 200-205.

101. Филина, О.А. Вольт-амперные характеристики составных электрощёток с поперечным разрезом / Н.И. Щуров, М.Е. Вильбергер, Е.Л. Степанов, О.А. Филина // Сб. науч. Тр. НГТУ. – 2010. -№3(61). С. 123-128.

102. Filina, O.A. Vibration model as a system of coupled oscillators in a direct current electric motor / O A Filina, A N Tsvetkov, P P Pavlov, D. Radu and V M Butakov // Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), E3S Web Conf., Том 124, 02002 (2019), DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402002>.

103. Лившиц, П.С. Исследование износа элементов скользящего контакта электрических машин постоянного тока общепромышленного назначения [Текст] / П. С. Лившиц // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины. – 1982. – № 5 (135). – С. 12–15.

104. Filina, O. "Vibration Diagnostics of the Brush-Collector Assembly, as Means of Assessing," 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/REEPE53907.2022.9731424.

105. Котеленец, Н. Ф. Испытания и надёжность электрических машин [Текст] / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М. : Высш. шк., 1988. – 232 с.

106. Филина, О.А. Современные возможности вибродиагностики электротехнических комплексов и систем / Филина О.А., Сидорова А.А., Мукимов А.Х. // В сборнике: Электротехнические комплексы и системы Материалы Международной научно-практической конференции. Уфа, 2018. С. 48-50.

107. Филина, О.А. Система – технической диагностики оборудования подвижного состава / Филина О.А., Пасечник С.В., Бикчуров И.Р. // В сборнике: молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития материалы Международной научно-исследовательской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников: в 3 частях. 2017. С. 149-150.

108. ГОСТ 27.002—89. Надёжность в технике (ССНТ). Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введ. 01.07.1990, изм. 01.03.2017. М. : Изд-во стандартов, 1989. – 24 с.

109. ГОСТ Р МЭК 773–96. Щётки электрических машин. Методы испытаний и средства измерений рабочих характеристик [Текст]. – Введ. 1998–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 39 с.

110. Лившиц, П. С. Скользящий контакт электрических машин / П.С. Лившиц // - М. Энергия, 1974. – 231 с. Лившиц, П. С. Щётки для электрических машин [Текст] / П. С. Лившиц. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 216 с.

111. Филина, О.А. Оперативная диагностика энергетических установок / Филина О.А., Пасечник С.В., Гараева А.Р. // В сборнике: Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017 (МНТК «ИМТОМ-2017») Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 257-261.

112. Ермолин, Н. П. Надёжность электрических машин [Текст] / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.

113. Лившиц, П. С. О некоторых итогах работ по повышению надёжности щёток [Текст] / П. С. Лившиц, И. И. Бодров, В. Е. Кубарев // Промышленная энергетика. – 1985. – № 2. – С. 42–45.

114. Галкин, В. Г. Надёжность тягового подвижного состава [Текст] : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четвергов. – М. : Транспорт, 1981. – 184 с.

115. Идиятуллин, Р. Г. Надёжность тяговых электрических машин [Текст] / Р. Г. Идиятуллин. – М. : Мехнат, 1987. – 152 с.

116. Дуюн, Т.А. Технологическое обеспечение качества коллекторов электрических машин дис. канд. техн. наук: 05.02.08: 2010 / Дуюн, Татьяна Александровна. – Белгород – 2010 – 2010. – 350 с.

117. Кузнецов, Н. Л. Надёжность электрических машин [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. Л. Кузнецов. – М. : Изд. дом МЭИ, 2006. – 432 с. : ил.

118. Темкин, И. В. Производство электроугольных изделий [Текст] : учеб. для подготовки рабочих на производстве / И. В. Темкин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1980. – 248 с. : ил.

119. Филина, О.А. Техническая диагностика электрооборудования электродвигателей постоянного тока подвижного состава и металлургической промышленности / Филина О.А., Булат И.С., Зайнуллин И.И., Фахертдинов Д.Ш. // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 3-1 (47). С. 163-168.

120. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е изд., доп. М. : Спектр. - 2013. – С.544.

121. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике [Текст] / Б. А. Ивоботенко, И. П. Ильинский, И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1975. – 184 с.

122. Исмаилов, Ш. К. Статистическое исследование зависимости частоты отказов от качества коммутации тяговых электродвигателей / Ш. К. Исмаилов, В. В. Бублик и др. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 402 – 404.

123. Щеточный узел электрической машины / Филина О.А., Идиятуллин Р.Г. // Патент на полезную модель RUS 182855 № 2017127124 заявл. 27.07.2017; опубл. 05.09.2018 Бюл. № 25. 5с.

124. Лившиц, П.С. Скользящий контакт электрических машин. М. Энергия, 1974. -321 с.

125. Ермолин, Н. П. Надёжность электрических машин [Текст] / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.

126. Щербаков, В. Г. Выбор оптимальной ширины электрощеток для тяговых электродвигателей электровозов / В. Г. Щербаков // Электротехника. 1974. - № 5. – С. 32-36.

127. Лившиц, П. С. Характеристики и области применения электрощёток отечественного и зарубежного производства [Текст] / П. С. Лившиц, В. Н. Фирштенберг. – М. : Информстандартэлектро, 1967. – 12 с.

128. Филина, О.А. Техническая диагностика и методы технического диагностирования / Филина О.А., Сидорова А.А., Мукимов А.Х., Спургис В.С. // В

сборнике: Эксперт года 2019 сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. 2019. С. 48-52.

129. Филина, О.А. Техническая диагностика газотранспортного оборудования и коллекторно-щеточного узла / Филина О.А., Назмиев А.И., Гусамов Б.Р., Гиматдинов Ф.С. // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2016. № 31. С. 82-86.

130. Энергетическая стратегия холдинга российские железные дороги на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года. Режим доступа - [http://www.rzd-expro.ru/doc/Energ\\_Strateg\\_new.pdf](http://www.rzd-expro.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf) (дата обращения 02.08.2020 г.)

131. Филина, О.А. Техническая диагностика энергетического оборудования / Филина О.А., Ахмадеев Р.И., Грачёв В.С. // В сборнике: Информационные технологии в энергетическом комплексе Сборник материалов и докладов Всероссийской научной конференции (с международным участием). 2016. С. 46-49.

132. Исмаилов, Ш. К. Технология диагностирования ремонта и наладки коммутации тяговых электродвигателей / Ш. К. Исмаилов, В. В. Бублик и др. // Новые технологии – железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств: Сб. науч. ст. Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. 2000. Ч. 3. С. 341, 342.

133. Долгова, А.В. К вопросу о совершенствовании технологии ремонта тяговых электродвигателей локомотивов / Долгова А.В., Шкодун П. К. // Молодой ученый. — 2010. — №1-2. Т. 1. — С. 51-54. — URL <https://moluch.ru/archive/13/1064/>

134. Золкин, А.Л. Совершенствование контроля и прогнозирования износа коллекторов тяговых электродвигателей тепловозов дис. канд. техн. наук: 05.22.07: 2009 / Золкин Александр Леонидович. – Самара – 2009 – 128 с.

135. Филина, О.А. Исполнительная подсистема диагностического контроля / Филина О.А., Мукимов А.Х., Сидорова А.А. // В сборнике: Электротехнические комплексы и системы Материалы Международной научно-практической конференции. Уфа, 2018. С. 163-165.

136. Водолазов, В.Н. Обоснование параметров системы планово-предупредительного ремонта тяговых электродвигателей, выработавших заданный ресурс дис. канд. техн. наук: 05.22.07: 2004 / Водолазов, Владимир Николаевич. – Самара – 2004 – 127 с.

137. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года (с изменениями на 12 мая 2018 года) от 22 ноября 2008 года N 1734-р. Режим доступа - <http://docs.cntd.ru/document/902132678> (дата обращения 02.10.2013 г.)

138. Федеральный закон от 1 июля 2011 г. N 170-ФЗ "О техническом осмотре транспортных средств и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями 30 ноября, 3 декабря 2011 г., 28 июля, 25 декабря 2012 г., 2, 23 июля, 28 декабря 2013 г., 4 июня 2014 г., 23 апреля 2018 г., 1 мая 2019 г). Режим доступа - <http://base.garant.ru/12187349/> (дата обращения 02.01.2020 г.)

139. Filina, O.A. Designing the Fault-Detection and Troubleshooting Tests For the Troubleshooting Target Flowchart» / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 915 (2020) 012033 doi:10.1088/1757-899X/915/1/012033

140. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". Режим доступа - <https://rg.ru/2009/11/27/energo-dok.html> (дата обращения 02.10.2013 г.)

141. Малозёмов, Б.В. Оценка надёжности и прогнозирование работоспособности систем электрического транспорта (На примере троллейбуса): Дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03: 2005 / Малозёмов Борис Витальевич. – Новосибирск - 2005 - 248 с.

142. Филина, О.А. Система мониторинга вибрации щеточно-коллекторного узла электродвигателя постоянного тока / Н.И. Щуров, Филина О.А., Б.В. Малозёмов // Электропитание. – 2022. – № 3. – С. 10-22.

143. Филина, О.А. Математическая модель прогнозирования остаточного ресурса электрощетки / О.А. Филина, Б.В. Малоземов, Н.И. Щуров // Электропитание. – 2022. – № 3. – С. 35-48.

144. Filina, O. "Classification of vibration diagnostic systems Brush-collector assembly," 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE57272.2023.10086895.

145. Программа для системы автоматизированного управления режимами работы тяговых электродвигателей транспортных средств городского электрического транспорта / Аухадеев А.Э., Павлов П.П., Литвиненко Р.С., Филина О.А., ЛеКхакТхинь, Вахитов Х.Ф., Абдуллина А.Р. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022618870, 18.05.2022. Заявка № 2022618163 от 05.05.2022.

146. Программа моделирования процесса функционирования иерархически сложной технической системы для определения ее надежности / П.П. Павлов, А.Э. Аухадеев, Р.С. Литвиненко, Филина О.А. [и др.] / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615169 опубли. 10.03.2023, № 2023613544: заявл. 28.02.2023

147. Программа моделирования процесса выявления и детектирования момента провисания и локализации обрыва контактного провода городского электрического транспорта / П.П. Павлов, Р.С. Литвиненко, Филина О.А. [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023616882, 3.04.2023, заявка № 2023615465 от 24.03.2023

148. Filina, O.A. «Control Methods and Structure of DC Motor Control System», Proceedings - 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2023, pp. 357–362, doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787255.

## Приложение А

Патенты на полезную модель, на изобретения и свидетельства на программы  
для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 182855

**ЩЕТОЧНЫЙ УЗЕЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (RU)*

Авторы: *Филина Ольга Алексеевна (RU),  
Идиятуллин Ренат Гайсович (RU)*

Заявка № 2017127124

Приоритет полезной модели 27 июля 2017 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 05 сентября 2018 г.Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 27 июля 2027 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2707417

### АДАПТИВНОЕ ЦИФРОВОЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (ФГБОУ ВО "КГЭУ") (RU)*

Авторы: *Бутаков Валерий Михайлович (RU), Литвиненко Руслан Сергеевич (RU), Магданов Геннадий Саяфович (RU), Филина Ольга Алексеевна (RU)*

Заявка № 2019114853

Приоритет изобретения 14 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 26 ноября 2019 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 14 мая 2039 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2714613

АДАПТИВНОЕ ЦИФРОВОЕ СГЛАЖИВАЮЩЕЕ  
УСТРОЙСТВО

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (ФГБОУ ВО "КГЭУ") (RU)*

Авторы: *Магданов Геннадий Саяфович (RU), Павлов Павел Павлович (RU), Филина Ольга Алексеевна (RU)*

Заявка № 2019114852

Приоритет изобретения 14 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 18 февраля 2020 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 14 мая 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2730109

**Способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей постоянного тока**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (ФГБОУ ВО "КГЭУ") (RU)*

Авторы: *Филина Ольга Алексеевна (RU), Цветков Алексей Николаевич (RU)*

Заявка № 2019119671  
 Приоритет изобретения 25 июня 2019 г.  
 Дата государственной регистрации в  
 Государственном реестре изобретений  
 Российской Федерации 17 августа 2020 г.  
 Срок действия исключительного права  
 на изобретение истекает 25 июня 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
 по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2021663040**

**Программа по контролю функционирования ЩКУ  
ЭДПТ с применением метода оценки технического  
состояния по спектрам вибрации**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Казанский государственный энергетический  
университет» (RU)*

Авторы: *Цветков Алексей Николаевич (RU), Филина Ольга  
Алексеевна (RU)*

Заявка № **2021661990**

Дата поступления **02 августа 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **11 августа 2021 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*





## Приложение Б

## Акты внедрения и проведения экспериментов

# ЛокоТех

Сервис


Филиал «Западный»

Сервисное локомотивное депо Юдино-Казанский  
420078, Республика Татарстан, г.Казань,  
ул. Революционная, д.1

+7 (831) 261-36-75 (доб.500)  
tmhs.locotech.ru  
g.m.tsygankova@tmh-service.ru

ОГРН 1107746515887  
ИНН 7704758153

Утверждено начальником  
Сервисного локомотивного  
депо Юдино-Казанский  
Е.Ю. Ефимов

  
29.01.2020  
подпись дата

## АКТ

предварительных и приемочных испытаний опытных усовершенствованных  
щеточных узлов

Испытания опытных усовершенствованных щеточных узлов были проведены на участке по ремонту электрических машин (Группа).

Опытный усовершенствованный щеточный узел разработан ФГБОУ ВО КГЭУ на кафедре ЭТКС старшим преподавателем Филиной Ольгой Алексеевной по теме диссертации «Усовершенствованный щеточно-коллекторный узел электродвигателя постоянного тока с повышенной надежностью». Опытный усовершенствованный щеточный узел разработан и изготовлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.201 и ОСТ 32.181. Конструкция опытного усовершенствованного щеточного узла отвечает требованиям стандартов безопасности по ГОСТ 12.1.007, ГОСТ 12.1.005, ГОСТ 12.1.018, ГОСТ 12.4.021. Конструкция опытного усовершенствованного щеточного узла максимально унифицирована с серийными щеткодержателями и щетками.

Испытания проводились на двигателе ЭД118А при номинальном токе и частоте вращения 1000 об/мин. В данном режиме работы биение составляет 0,041 мм, что также удовлетворяет ГОСТ, сила нажатия по ГОСТ Р51318.14.1-99 – составляет в диапазоне 52-60 кгс, а при усовершенствованном щеточном узле 18-32 кгс, без внедрения вибрация достигала 4,5 мм, с внедрением снизилась до 2,5 мм, межремонтный пробег увеличен на 14792 км, что в свою очередь влечет за собой увеличение срока службы данного узла на 2700ч.

Опытный усовершенствованный щеточный узел может быть рекомендован к внедрению.

Согласовано  
инженер тех. отдела  
А.В. Офицеров



УТВЕРЖДАЮ  
 Директор  
 Тrolleyбусного депо №2  
 Д.Ф. Юлбарисов  
 26 августа 2020 г.



### АКТ

предварительных и приемочных испытаний опытных усовершенствованных  
 щеточных узлов

Испытания опытных усовершенствованных щеточных узлов были проведены на двигателе в электро-механическом участке (ЭМУ).

Опытный усовершенствованный щеточный узел разработан ФГБОУ ВО КГЭУ на кафедре ЭТКС старшим преподавателем Филиной Ольгой Алексеевной по теме диссертации «Усовершенствованный щеточно-коллекторный узел электродвигателя постоянного тока с повышенной надежностью». Опытный усовершенствованный щеточный узел разработан и изготовлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.201 и ОСТ 32.181. Конструкция опытного усовершенствованного щеточного узла отвечает требованиям стандартов безопасности по ГОСТ 12.1.007, ГОСТ 12.1.005, ГОСТ 12.1.018, ГОСТ 12.4.021. Конструкция опытного усовершенствованного щеточного узла максимально унифицирована с серийными щеткодержателями и щетками.

Испытания проводились на двигателе ДК410 при номинальном токе и частоте вращения 1500 об/мин. В данном режиме работы биение составляет 0,056 мм, что также удовлетворяет ГОСТ, сила нажатия по ГОСТ Р51318.14.1-99 – составляет в диапазоне 52-60 кгс, а при усовершенствованном щеточном узле 18-32 кгс, без внедрения вибрация достигала 4,5 мм, с внедрением снизилась до 2,5 мм, межремонтный пробег увеличен на 14792 км, что в свою очередь влечет за собой увеличение срока службы данного узла на 2700ч.

Опытный усовершенствованный щеточный узел может быть рекомендован к внедрению.

Согласованно Начальник ЭМУ



И.А. Агапова

УТВЕРЖДАЮ

Директор

троллейбусного депо № 2

Р.Р. Каримов

«26» августа 2022 г.



## АКТ

об использовании результатов диссертационной работы О.А. Филиной  
«Методы и средства повышения надежности щеточно-коллекторного узла  
тяговых электродвигателей постоянного тока»

Настоящий акт подтверждает, что следующие разделы диссертационного исследования О.А. Филиной «Методы и средства повышения надежности щеточно-коллекторного узла тяговых электродвигателей постоянного тока», приняты для использования при диагностике тягового электродвигателя:

1. Установлен опытный образец усовершенствованного щеточного узла.
2. Оптимизирована система мониторинга тяговых электродвигателей с помощью вибродиагностики узлов.
3. Технический эффект применения переданных результатов диссертации О.А. Филиной заключается в более полном использовании ресурса узлов тяговых электродвигателей, а именно износ щетки уменьшился на 28% на ед. пробега; в повышении надежности тяговых электродвигателей, что в конечном итоге привело к снижению капитальных и эксплуатационных затрат при обслуживании и ремонте электродвигателей.

Согласовано комиссией:

Заместитель директора по ремонту

Куличков А.Г.

Начальник участка технического осмотра

Пухов А.А.

Начальник электромеханического участка

Агапова И.А.