

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск, 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Щуров Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор

Научный консультант: **Цветков Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (г. Казань), доцент кафедры Электроснабжение промышленных предприятий.

Официальные оппоненты: **Харламов Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (г. Омск), заведующий кафедрой Электрические машины и общая электротехника;

Исмагилов Флюр Рашитович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа), профессор кафедры Электромеханики.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта РУТ (МИИТ)» (г. Москва).

Защита диссертации состоится «07» декабря 2023 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» октября 2023г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент

Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Основные потребители тяговых ЭДПТ - это такие отрасли как железнодорожный и городской электрический транспорт, металлургия, горнодобывающая промышленность и другие потребители (краны различных производств, карьерные самосвалы, автотранспорт, авиация и водный транспорт).

Выделяются основные неисправности тяговых электродвигателей постоянного тока: на якоре – обрыв обмотки в месте припоя с коллектором; в щеточно-коллекторном узле (ЩКУ) характерен повышенный износ щеток, и их искрение, приводящие к перегреву коллектора и всего электродвигателя, сдвиг щеток с линии геометрической нейтрали; на коллекторе - износ коллекторных пластин и загрязнение ламелей; в щеткодержателе – неисправности нажимных пластин щеткодержателей.

Щеточно-коллекторный узел - один из важных узлов тяговых 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% тяговых 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.

В диссертации, на основе исследования существующих конструктивных решений и анализа опыта эксплуатации тяговых ЭДПТ, а также научных исследований, проведенных в этой области известными учеными, разработана новая конструкция ЩКУ, метод контроля технического состояния и предложены технические решения по продлению работоспособного состояния тяговых ЭДПТ после выработки заданного ресурса работы и переходу на обслуживание по техническому состоянию. Основное внимание уделено исследованию проблем продления жизненного цикла тяговых ЭДПТ, поскольку себестоимость таких электродвигателей относительно велика, а количество их в промышленности и на транспорте исчисляется сотнями тысяч. Улучшение качества коммутации и снижение вибрации щеточно-коллекторного узла с измененной конструкцией нажимной пластины влечет за собой увеличение ресурса тяговых ЭДПТ, снижение вероятности возникновения отказов и уменьшение затрат на техническое обслуживание ЩКУ в процессе эксплуатации.

Степень разработанности проблемы. В решение проблем разработки ЭДПТ и ЩКУ внесли вклад такие учёные как В.Д. Авилов, В.В. Харламов, В.Н Антипов, О.Г. Вегнер, В.Т. Касьянов, 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, И.П. Исаева, А.Л. Курочка, Е.Л. Степанова и многих других.

Вопросам вибродиагностики посвящены работы Ю.А. Азовцева, А.В. Баркова, Н.А.

Барковой, А.А. Гаузе, Р.Г. Гемке, А.С. Завьялова, А.А. Сарварова, А.Н. Зубко, В.Г. Каширского, В.Я. Кучера, И.В. Ившина, Ю.В. Ванькова, В.А. Русова и многих других.

Объектом исследования 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 поставленной цели сформулированы и решены **следующие основные задачи исследования:**

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

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

3. Разработан новый метод контроля технического состояния щеточно-коллекторного узла по результатам мониторинга вибрации тягового электродвигателя постоянного тока и создана компьютерная программа для диагностики функционирования усовершенствованного щеточного узла тягового электродвигателя постоянного тока;

4. Разработан и создан щеточный узел усовершенствованной конструкции с целью снижения вибрации и продления ресурса щетки;

5. Разработаны методы и алгоритмы определения остаточного ресурса щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока по результатам контроля технического состояния и проведены 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 ЩКУ тягового ЭДПТ, 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 ЩКУ для выявления неисправностей и алгоритмов определения остаточного ресурса щеточно-коллекторного узла, а также созданный новый метод контроля технического состояния щеточно-коллекторного узла.

Практическая значимость:

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

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

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

Достоверность и обоснованность полученных научных положений и выводов диссертации 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, п. 2, п. 4.

Реализация результатов работы. Научно-технические решения по повышению эффективности тяговых электродвигателей постоянного тока серии ДК-259, ДК-410 были внедрены в МУП «Метроэлектротранс», г. Казань, в Сервисном локомотивном депо Юдино-Казанский, ООО «ЛокоТех-Сервис» филиал «Западный» на электродвигателях серии ЭД118А в период с 2010 по 2022 года.

Личный вклад автора. Соискателю принадлежит 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. В соавторстве участвовала 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 ЭДПТ.

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).

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/Web Of Science, 1 патент на полезную модель, 3 патента на изобретение, Свидетельств 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, 8 приложений. Содержит 173 страниц машинописного текста, 65 рисунков и 17 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи исследования, описываются научная новизна и практическая ценность работы, обосновывается достоверность результатов, кратко излагается содержание работы по главам.

В первой главе рассмотрены неисправности тяговых электродвигателей постоянного тока (ЭДПТ). Выполнен анализ способов контроля технического состояния тяговых электродвигателей с целью повышения надежности в различных условиях эксплуатации городского и железнодорожного электроподвижного состава. Потребность щеток по различным отраслям составляет: на железнодорожный транспорт 29%, нефтехимия – 23%, металлургия – 21%, городской электрический транспорт – 18% и остальные потребители – 9%.

Выполнен систематический сбор данных и анализ директивных документов, существующих программ, технических условий. Выявлены основные направления по повышению надежности щеточно-коллекторного узла, отличающиеся совокупностью решаемых задач и особенностями применяемого математического аппарата. Одним из важнейших условий для повышения ресурса тягового ЭДПТ является объективный мониторинг состояния щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) в процессе эксплуатации для принятия своевременных мер поддержания надежности.

На основе проведенного анализа результатов диагностирования состояния тягового ЭДПТ намечены пути совершенствования конструкции с целью повышения ресурса работы ЩКУ и увеличения межремонтного пробега подвижного состава.

Во второй главе исследована надежность щеточно-коллекторного узла. Представлено общее состояние проблемы, выявлены методы повышения надежности. Приведен анализ существующей методики расчета надежности тягового электродвигателя постоянного тока. Рассмотрены способы оценки отказов и неисправностей по срокам эксплуатации на подвижном составе городского и железнодорожного транспорта. Результаты проведенного анализа показывают необходимость разработки методики оценки состояния тягового ЭДПТ, позволяющей осуществлять мониторинг по отказам и неисправностям ЩКУ тяговых электродвигателей при работе на подвижном составе [1]. Проведено исследование и выполнен расчет надежности ЭДПТ и ЩКУ во время эксплуатации. Представлен анализ особенностей отказов и неисправностей тяговых ЭДПТ серии ДК-410 троллейбусов ТролЗа МУП «Метроэлектротранс» г. Казани (Табл. 1).

Таблица 1 - Анализ особенностей отказов и неисправностей ЭДПТ

Вид отказа электродвигателя	Число отказов по годам			
	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

Выявлена вероятность безотказной работы ЩКУ последовательно для каждого интервала времени при последующих включениях до минимально допустимого значения износа равна

$$P_{\Delta\tau_l} = 1 - Q_{щi}, \quad (1)$$

где $Q_{щi}$ - вероятность отказа щетки.

Вероятность отказа щетки к моменту времени t

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

где m_h – математическое ожидание износа щетки; $h_{\text{доп}}$ – допустимый износ щетки; H_0 – высота щетки; V_{hi} – скорость износа щетки на i -м участке; $h_{\text{ост}}$ – величина оставшейся части щетки после расчетного времени работы t_2 , мм; $h_{\text{кр}}$ – критическая высота щетки, мм; t – остаточный ресурс; $\sigma_{\Delta h}$ – среднеквадратичное отклонение.

Время до минимально допустимого значения износа определяется с помощью формулы

$$t_i = \Delta r_{\text{щ}} / (2,44\sigma + V_{\text{щ}}), \quad (3)$$

где $v_{\text{щ}}$ – скорость изнашивания щёток; $\Delta r_{\text{щ}}$ – резерв износа щетки.

Среднеквадратичное отклонение по высоте износа щетки:

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{щ}} - 1} (\Sigma \Delta h_i^2 n_i - m_{\Delta h}^2 N_{\text{щ}})} \quad (4)$$

среднеквадратичное отклонение по скорости износа:

$$\bar{\sigma}_v = \sqrt{\frac{1}{n - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (v_{\text{щ}i} - \bar{v}_h)^2}. \quad (5)$$

Принятие $P_{\Delta r_i}$ в качестве аргумента и увязка с ним значений средней скорости изнашивания щёток V_h , полученных в процессе наблюдений за их эксплуатацией на предприятиях МУП «Метроэлектротранс» Троллейбусное депо № 2; в Сервисном локомотивном депо Юдино-Казанский, ООО «ЛокоТех-Сервис» филиал «Западный» позволили применить для их последующего математического изучения и обобщения методы регрессионного анализа и аналитическую связь между ними и представить формулой

$$\bar{V}_h = A + BV_{\text{щ}} + CV_{\text{щ}}^2, \quad (6)$$

где A, B и C – постоянные, определяемые маркой щёток и режимом работы ЭДПТ.

По полученной математической модели определяются зависимости интенсивности отказов ЩКУ (рис. 1).

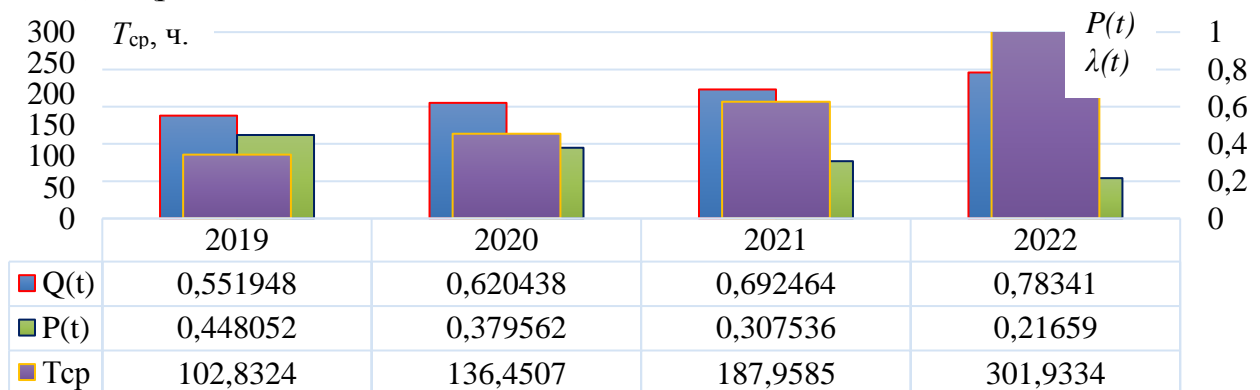


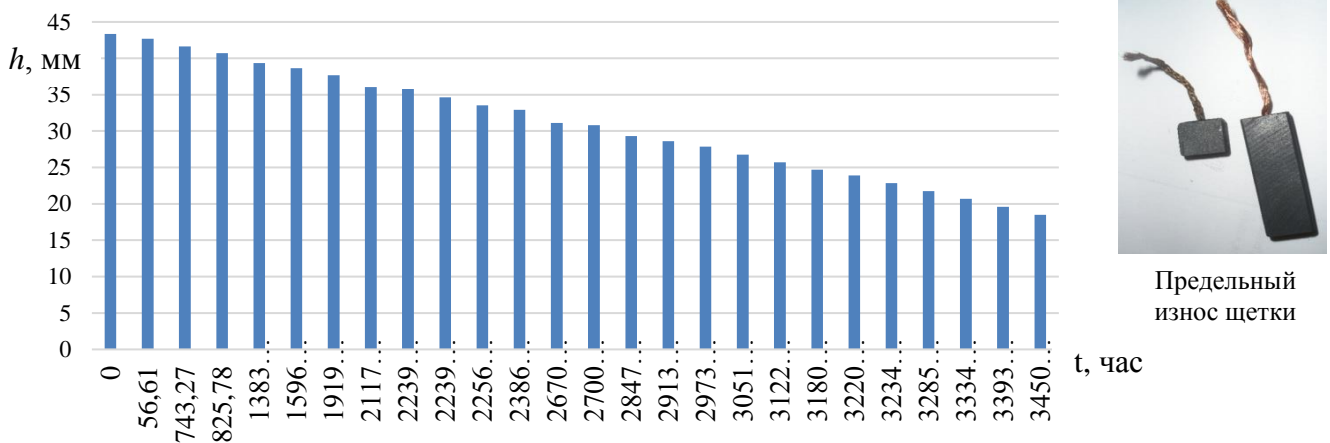
Рисунок 1 – Номограмма аппроксимированных результатов исследований

Одним из важнейших элементов прогнозирования остаточного ресурса тягового ЭДПТ является объективный мониторинг состояния щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) в процессе эксплуатации. Щеточно-коллекторный узел с точки зрения надежности можно представить, как систему, состоящую из последовательно соединенных элементов. Был составлен алгоритм определения технического состояния ЩКУ, благодаря которому контролируется состояние щетки по фактическому

состоянию. По данному алгоритму проводилось исследование ЩКУ для определенного интервала времени, и по полученным данным выполнялся расчет надежности [2, 3]. Таким образом, данный метод позволяет отложить очередное ТО-3, при котором происходит замена щетки, при условии проведения диагностики состояния ЩКУ и продлить эксплуатацию по текущему состоянию.

В третьей главе рассмотрена методика прогнозирования остаточного ресурса работы щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока, разработана математическая имитационная модель ЩКУ на основе вибродиагностики, предложен способ мониторинга состояния узла и щетки.

Определен износ коллекторных пластин по глубине (не должен превышать 0,3-0,35 мм) при котором не ухудшаются условия работы щетки и не появляются отколы. Как показали исследования, износ щетки подчиняется нормальному закону распределения, определяем вероятность безотказной работы ЩКУ по времени и уровню износа щеток. На рисунке 2 показана номограмма времени безотказной работы ЩКУ ЭДПТ и предельный износ щетки.



Предельный износ щетки

Рисунок 2 – Номограмма времени безотказной работы ЩКУ ЭДПТ и предельный износ щетки

Задавая различные значения времени t_i и интервалы приращения износа щеток Δh_i , можно определить показатели выборочных характеристик. Определяется количество значений, находящиеся в интервале изменения высоты износа щеток Δh_i определяется количество значений, попавших в интервал до предельного износа щетки (Табл. 2).

Таблица 2 - Вычисление значений математического ожидания и среднеквадратичного отклонения по результатам испытания составных щеток

Размер износа щётки	Середина интервала, Δh_i	Количество отказов на данном интервале, n_i	$\Delta h_i * n_i$	$ \Delta h_i * n_i$	$(\Delta h_i)^2 * n_i$	Частота, n_i/n
35,1 - 33,45	1,65	1	1,65	3,899	15,205	0,00781
33,45 - 31,8	1,6725	2	3,345	6,149	18,904	0,0156
31,8 - 30,15	1,59	4	6,36	8,998	20,239	0,0313
30,15 - 28,5	1,5075	9	13,5675	12,82	18,261	0,0703
28,5 - 26,85	1,425	27	38,475	16,184	9,701	0,211
26,85 - 25,2	1,3425	65	87,2625	14,663	3,308	0,508
25,2 - 23,55	1,26	11	13,86	11,556	12,141	0,0859
23,55 - 21,9	1,1775	5	5,8875	9,378	17,589	0,0391
21,9 - 20,25	1,095	2	2,19	5,401	14,586	0,0156
20,25 - 18,5	1,0125	2	2,025	7,051	24,86	0,0156

Данная таблица 2 показывает отношение износа и количества щеток n_i в интервале Δh_i . По проведенным расчетам, табл. 2, можно определить математическое ожидание всего количества значений Δh_i щеток $N_{щ}$, входящих в средний интервал износа n_i и применяемых на подвижном составе

$$m_{\Delta h} = \frac{1}{N_{щ}} \sum \Delta h_i n_i = \frac{1}{808} 11397 = 14,1 \text{ мм.} \quad (7)$$

Получены количественные характеристики изменения интенсивности отказов ЩКУ (Рис. 3).

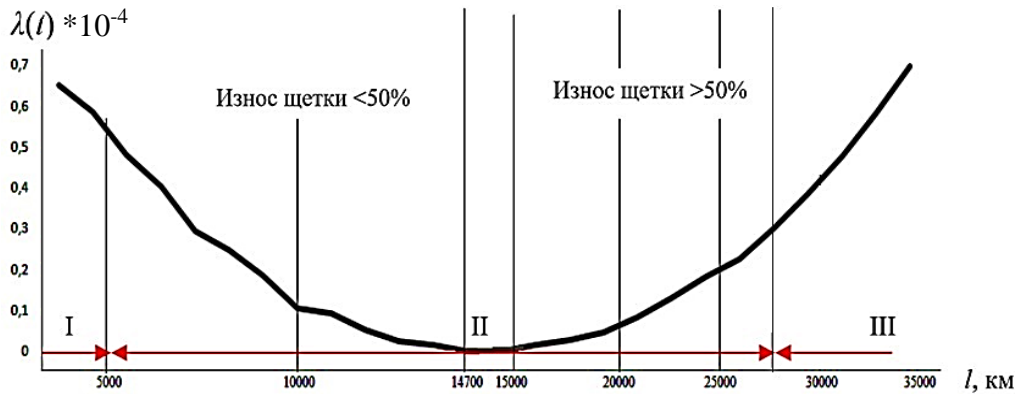


Рисунок 3 – Интервальное изменение интенсивности отказов ЩКУ: I – период притирки щетки, II – эксплуатация; III – аварийный износ щетки

Определены основные периоды: I – период притирки щетки, II – эксплуатация; III – аварийный износ щетки. Периодичность профилактики ЩКУ тесно связана с величиной интенсивности отказов. Данная зависимость служит критерием для определения периодичности Технического обслуживания (ТО), которая задается, исходя из технических, экономических и других соображений. На сегодняшний день принято правило замены щетки при прохождении ТО-3 согласно планово- предупредительным работам (ППР), при этом износ щетки составляет менее 50%. Из рис. 4 можно сделать вывод о том, что при пробеге подвижного состава около 14700 км, интенсивности отказов ЩКУ минимален. При этом износ щетки находится в допустимом интервале (50...90%) и нет необходимости ее замены.

Одним из наиболее важных параметров, входящих в математическую модель ЩКУ является частота вибрации, характеризующая отдельные узлы и их состояние. Разработан алгоритм моделирования колебаний ЭДПТ, основанный на представлениях отдельных узлов в виде упруго связанных осцилляторов. Расчет осцилляторов связан с разумным упрощением, который стремится отобразить наиболее существенные факторы рассматриваемой системы. Принимаемое датчиком колебание $S(t)$ представляет собой сумму полезного сигнала на ЩКУ $S_1(t)$ и помехи $p(t)$ (остальные узлы) в одно результирующее:

$$S(t) = S_1(t) + p(t) \quad (8)$$

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 (9) по каждому узлу. Решение системы уравнений (9) дает полную картину состояния тягового электродвигателя на основе входных данных – масс отдельных элементов тягового электродвигателя, коэффициентов жесткости и демпфирования для этих элементов, таких как механическое поперечное возбуждение вращающегося якоря, коллектора, подшипников, колебания щеткодержателя, полюсов и станины, сил (например, вследствие движения объекта, на котором установлен ЭДПТ) и спектров вибрации. Внешняя сила F_2 является консервативной, поэтому полная энергия механических колебаний остаётся постоянной.

Данные смещения представляют собой боковые частоты, которые часто превышают сигнал на несущей частоте.

$$S(t) = \begin{cases} m_1 \cdot d^2 tx_1 = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_2 k_4 + k_4 k_1} (x_1 - x_2 - x_3) - \frac{c_1 c_2 c_3 c_4}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_2 c_4 + c_4 c_1} (dtx_1 - dtx_2 - dtx_3) + F_1; \\ m_2 \cdot d^2 tx_2 = \frac{k_4 k_6}{k_4 + k_6} (x_1 - x_2) - \frac{c_4 c_6}{c_4 + c_6} (dtx_2 - dtx_3) + \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_2 k_4 + k_4 k_1} (x_1 - x_2 - x_3) - \\ - \frac{c_1 c_2 c_3 c_4}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_2 c_4 + c_4 c_1} (dtx_1 - dtx_2 - dtx_3); \\ m_3 \cdot d^2 tx_3 = \frac{k_3 k_5}{k_3 + k_5} (x_1 - x_3) - \frac{c_3 c_5}{c_3 + c_5} (dtx_1 - dtx_3) + \frac{k_4 k_6}{k_4 + k_6} (x_1 - x_2) - \frac{c_4 c_6}{c_4 + c_6} (dtx_2 - dtx_3) + \\ + \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_2 k_4 + k_4 k_1} (x_1 - x_2 - x_3) - \frac{c_1 c_2 c_3 c_4}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_2 c_4 + c_4 c_1} (dtx_1 - dtx_2 - dtx_3); \\ m_4 \cdot d^2 tx_4 = -k_9 (x_4 - x_1) - c_9 (dtx_4 - dtx_1) + \frac{k_3 k_4}{k_3 + k_4} (x_4 - x_2 - x_3) + \frac{c_3 c_4}{c_3 + c_4} (dtx_4 - dtx_2 - dtx_3); \\ m_5 \cdot d^2 tx_5 = k_9 (x_4 - x_5) + c_9 (dtx_4 - dtx_5) - \frac{k_7 k_8}{k_7 + k_8} x_4 + \frac{c_7 c_8}{c_7 + c_8} dtx_4 + F_2 \end{cases} \quad (9)$$

Где m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 – точечные массы узлов, воздействующие на место соединения (m_1 – масса якоря; m_2 – масса вала; m_3 – масса подшипников; m_4 – масса коллектора и m_5 – масса подшипниковых щитов), x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – смещение узлов относительно центра равновесия систем, k_i – коэффициент характеризует частоты свободных колебаний узлов 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, c_i – характеризует коэффициент упругости i -той связи между узлами 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, F_2 – внешняя сила, воздействующая на станину; dtx_i – производная по времени смещения, $d^2 t$ – знак второй производной.

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

$$f_1 = f_{\text{вкл}} \cdot 0,7, \quad (10)$$

где f_1 – частота при коммутационных перенапряжениях; 0,7 – коэффициент, понижающий частоту вибрации до начальной частоты появления неисправностей вращающихся элементов ЭДПТ (коллектор, якорь, подшипники); $f_{\text{вкл}}$ – расчетная частота вибрации при включении ЭДПТ.

Диапазоны спектра вибрации, указывающие на возникновение и развитие дефекта ЭДПТ для всех вращающихся узлов (подшипники, коллектор, якорь) на строго определенных частотах:

- наличие дефектов на щетках диагностируется на следующих характерных частотах

$$f_2 = f_c \cdot k_{\text{щ}} k_1 + \frac{f}{k_d} \quad (11)$$

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

$$f_3 = f_c \cdot k_{\text{подш}} k_3 + \frac{f}{k_d} \quad (12)$$

где f_3 - частота наличия повреждения элементов подшипников; $k_{\text{подш}}$ – количество подшипников; k_3 - коэффициент стадии развития дефекта подшипника.

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

$$f_4 = f_c \cdot K \cdot k_4 - f \cdot 2p \quad (13)$$

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

$$f_5 = f \cdot 2p - f_k \cdot k_{щ} \quad (14)$$

где f_5 – частота при биении коллектора; f_k –характерная частота на коллекторе.

- наличие предельного износа щеток диагностируется на следующих характерных частотах

$$f_6 = f_y \cdot k_2 - f \cdot k_{щ} \quad (15)$$

где f_6 – частота наличия предельного износа щеток; f_y – частота вращения якоря; $k_2=2$ – количество мест припоя коллекторных пластин к обмотке якоря; $k_{щ.о.}$ – количество щеток в обойме.

Задача данной системы заключается в выполнении частотной фильтрации и отделении «полезного» сигнала ЩКУ от помех. При этом установлены опытным путем диапазоны спектра частот вибрации, указывающие на возникновение дефекта того или иного узла. Результаты по формулам (10)-(15) изложены [4, 5].

Анализ спектров вибрации (Рис. 4), полученных в ходе экспериментов, подтверждает справедливость распределения диапазонов в соответствии с неисправностями и позволяет на основе данных методики проводить мониторинг вибрации.

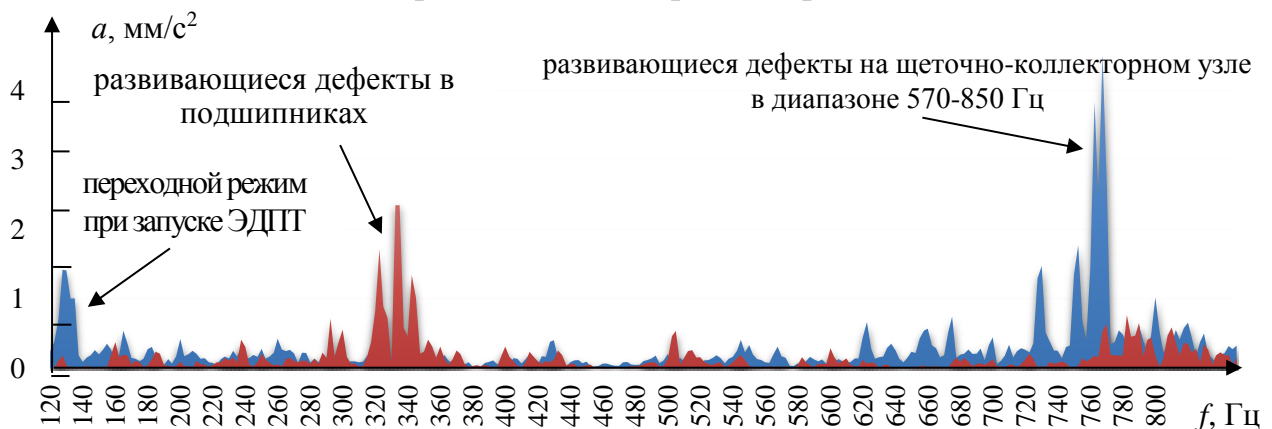


Рисунок 4 – Полученные спектры вибраций электродвигателя постоянного тока с указанными дефектами подшипников (красная) и щеточно-коллекторного узла (синяя)

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. Необходимые измерения выполняются на работающем оборудовании (не требуется его отключение). На рисунке 4 – частотная характеристика спектра вибрации тягового электродвигателя при наличии дефектов в щеточно-коллекторном узле и в подшипниках. При возможности непрерывного контроля параметров (вибрации и износа щетки) технического состояния ЩКУ с помощью комплекса могут использоваться упрощенные методы, при которых прогнозирование осуществляется по параметрам технического состояния.

Разработанная математическая модель легла в основу созданной методики и программы по контролю функционирования ЩКУ ЭДПТ с применением метода оценки технического состояния по спектрам вибрации [6, 12] и предложен способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей постоянного тока [7, 15].

В четвертой главе представлена конструкция и экспериментальные исследования усовершенствованного щеточного узла с применением способа мониторинга вибрации, показан метод проведения эксперимента.

Основной причиной износа щетки служит вибрация, которая не должна превышать по амплитуде 0,7 – 0,9 мм на частоте 760-770 кГц. При увеличении амплитуды биения коллектора электродвигателя с 0,04 до 0,12 мм износ щеток марки ЭГ61-АК снижается с 0,0017 до 0,0013 мм на 1 км пробега [8], что подтверждено актами о проведении экспериментов и внедрения. После анализа существующих конструкций ЩКУ был произведен расчет на прочность прижимных пластин с жестким заземлением (зубцовая зона) на действие равномерно распределенной нагрузки на всей площади щетки. Для расчета необходимо знать значения максимальных изгибающих моментов на опорах, значения максимальных поперечных сил, максимальный прогиб и значения опорных реакций. Для расчета прижимных пластин постоянной жесткости использовался коэффициент Пуассона $\mu=0,3$. Пластины имеют жесткое заземление, на них действует равномерно распределенная нагрузка q и давление на щетку P . Скорость коллектора, если принять вращение равноускоренным

$$v_K = \sqrt{\frac{2\varphi_0 S_1(t)}{m_4}}, \quad (16)$$

где φ_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 (9), развиваемое двигателем за счет электромагнитного момента за период времени t .

Для определения максимального колебания

$$S_{\max} = S(t) + v_K \sqrt{cm_4}, \quad (17)$$

где c – приведенная жесткость пластины.

Угол скоса оценивается в радианах

$$\varphi_{\text{ск}} = \frac{v_K b_3 \pi}{n}, \quad (18)$$

где n – количество зубцов; b_3 – ширина зубца.

При выборе ширины зубца можно исходить из соотношения

$$b_3 \geq (1,2 \dots 1,6)h_3, \quad (19)$$

$$h_3 \approx (0,50 \dots 0,55)h. \quad (20)$$

По полученным данным выполнена замена формы нажимной пластины (рис. 5) с целью устранения люфта, превышающего допустимые значения 2-4 мм, и снижения вибрации щеточно-коллекторного узла [19]. Это позволило повысить надежность устройства и виброустойчивость ЩКУ, увеличен остаточный ресурс работы ЭДПТ на 14700 км, а время безотказной работы t составило 2625 ч.

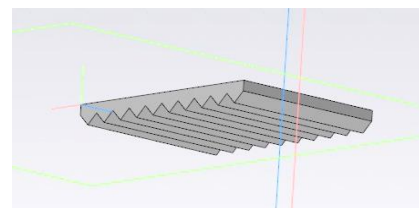


Рисунок 5 –
Усовершенствованная
нажимная пластина
щеточного узла

Для проверки эффективности работы в условиях эксплуатации были установлены опытные усовершенствованные ЩКУ в условиях эксплуатации на тяговых электродвигателях троллейбусов ТролЗа ДК-259 и трамваев КТМ-8 (71-608) ДК-410 МУП «Метроэлектротранс» г. Казани. На этапе эксперимента вводились параметры щетки, такие как ее масса $m_{щ}$, высота $h_{щ}$ и ширина $b_{щ}$. Перед испытаниями износа щёток были измерены следующие параметры ЩКУ: - биение коллектора (биение поверхности коллектора – 4,813 мкм; максимальный перепад, 1,461 мкм); - величина давления на щётки (стандартная пластина - 3,6 кПа и усовершенствованная – 3 кПа). Проверка показала ожидаемое увеличение надежности ЩКУ и снижение износа щетки (Табл. 3).

Таблица 3 - Показатели надежности коллектора и щеток ЭДПТ

Показатели, ед. измерения	Марка щеток	
	ЭГ61 (без применения пластины)	ЭГ61АК (с усовершенствованн ой пластиной)
Показатели коллектора:		
Средняя интенсивность изнашивания, мм/100тыс. км.	0,064	0,036
Минимальная наработка до отказа, тыс. км	367	601
Показатели щеток:		
Средняя интенсивность изнашивания, мм/1000 км.	1,87	1,42
Минимальная наработка до отказа, тыс. км	15,6	17,5
Износ щеток, в мм за 1 км	0,0017 мм за 1 км	0,0013 мм за 1 км (увеличение 28%)

В процессе работы ЭДПТ происходит процесс изнашивания щетки, вследствие чего изменяется ее радиальный размер и масса, а также сила ее нажатия на рабочую поверхность коллектора и коэффициент трения щётки о коллекторную пластину

$$\mu = \frac{m}{Q \cdot R}, \quad (21)$$

где m – масса щетки; R – радиус коллектора, м; Q – суммарное усилие нажатия на испытываемые щетки ЭДПТ, Н; μ – определяется как среднее арифметическое значений момента силы трения щеток, полученных при измерениях за последние 10ч. работы, Н·м.

На рисунке 6 изображены рассчитанные по данным опытов вероятности безотказной работы $P(t)$ щеток марки ЭГ61-АК. На первом этапе испытания ЭДПТ был оборудован щетками, радиальный размер которых составлял 45 мм (кривая 1), а на втором этапе – установлены составные щетки (кривая 2), на следующем этапе — с

усовершенствованным узлом с рельефной пластиной постоянного нажатия и составными щетками (кривая 3).

Мониторинг вибрационных сигналов проводился следующим образом: пьезоэлемент ВК-310А крепится на щеткодержатель электродвигателя и при помощи считывания с коллектора лазерным лучом, и соединяется с аналого-цифровым преобразователем (АЦП), в качестве которого используется 2-х канальный прибор – анализатор «КОРСАР++», специального программного пакета «Атлант» и системы сбора и обработки при помощи адаптивного цифрового прогнозирующего и сглаживающего устройств [21, 22] данных спектров вибрации в диапазоне частот колебаний от 0 до 1 кГц с шагом каждые 2,5 Гц. Сигналы вибрации, соответствующие колебаниям ЩКУ, поступают на АЦП, где оцифровываются, и в виде сигнала вибрации поступают на ПК (рис. 7).

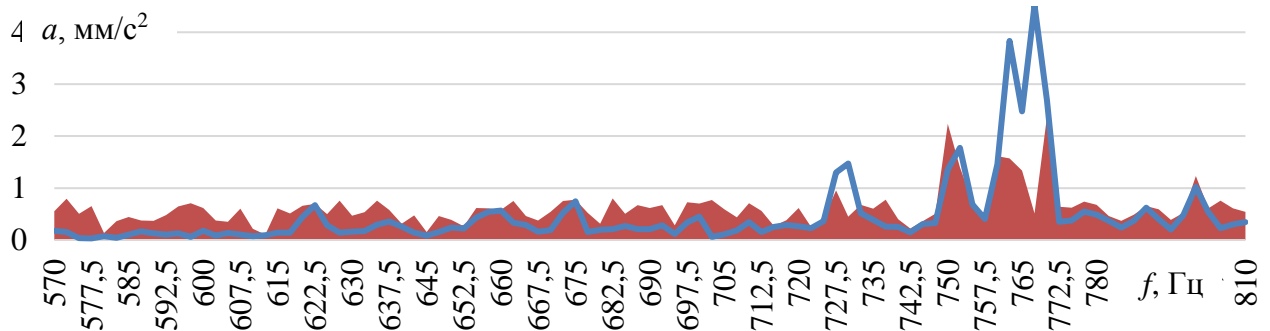


Рисунок 7 – Вибрационные сигналы с программного комплекса «Атлант»: а) Спектр вибрации при неисправности на щеточно-коллекторном узле (синяя), б) Спектр вибрации при неисправности на подшипниках (красная)

В соответствии с предложенной системой мониторинга проведен статистический анализ отказов ЩКУ, и выполнен сравнительный анализ исследования частот вибрации в ЭДПТ с дефектами и методом наложения на частотную характеристику спектра вибрации нового исправного электродвигателя. Частота биения вследствие неровностей со стороны коллектора лежит в широких пределах от 750 до 850 Гц, а развивающиеся дефекты подшипников от 150 до 500 Гц, от 200 до 450 Гц – дефекты на полюсах. Характеристики амплитуд частот вибрации в зависимости от времени эксплуатации и, следовательно, износа щеток, дает возможность по экспериментальным данным установить степень износа от спектра вибрации [15]. При этом рассчитывается площадь спектра, коэффициенты корреляции, критерии Спирмена, статистика знаков Фишера и Т-критерий Стьюдента для участка спектра относительно спектра щетки на начальном этапе износа (8,94 мм) [20]:

- коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum_1^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_1^n x_i) (y_i - \frac{1}{n} \sum_1^n y_i)}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_1^n x_i)^2 \sum_1^n (y_i - \frac{1}{n} \sum_1^n y_i)^2}}, \quad (22)$$

- непараметрическая ранговая оценка Спирмена

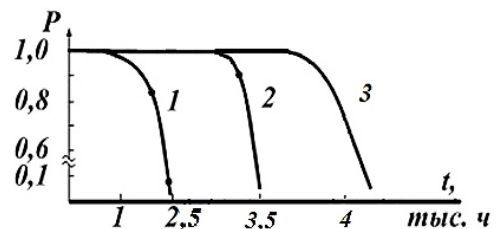


Рисунок 6 – Вероятность безотказной работы щёток ЭГ61АК размером $h=45$ мм – промышленной эксплуатации щёток кривые (кривая 1), со ставной щеткой (кривая 2) и с усовершенствованным щеточным узлом с составными щётками (кривая 3)

$$\rho_{x,y} = \frac{M[R_x R_y] - M[R_x]M[R_y]}{\sqrt{(M[R_x^2] - (M[R_x])^2)} \sqrt{(M[R_y^2] - (M[R_y])^2)}}, \quad (23)$$

- статистика знаков Фишера

$$F_{\text{щкы}} = \frac{S_x^2}{S_y^2} = \frac{\left(\frac{1}{n_1}\right) \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{\left(\frac{1}{n_1}\right) \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (24)$$

- Т-критерий Стьюдента

$$t_{\text{эмп}} = \left| \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2 + \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)n}}} \right|. \quad (25)$$

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.

Применение вибродиагностики дефектов ЭДПТ является основным этапом в оценке состояния ЩКУ. Это позволяет оперативно анализировать состояние ЭДПТ непосредственно во время его работы, без отрыва от производства, как принято называть в литературе, реализовать диагностику и мониторинг технического состояния ЩКУ в режиме «on-line» (Рис. 8) [12].

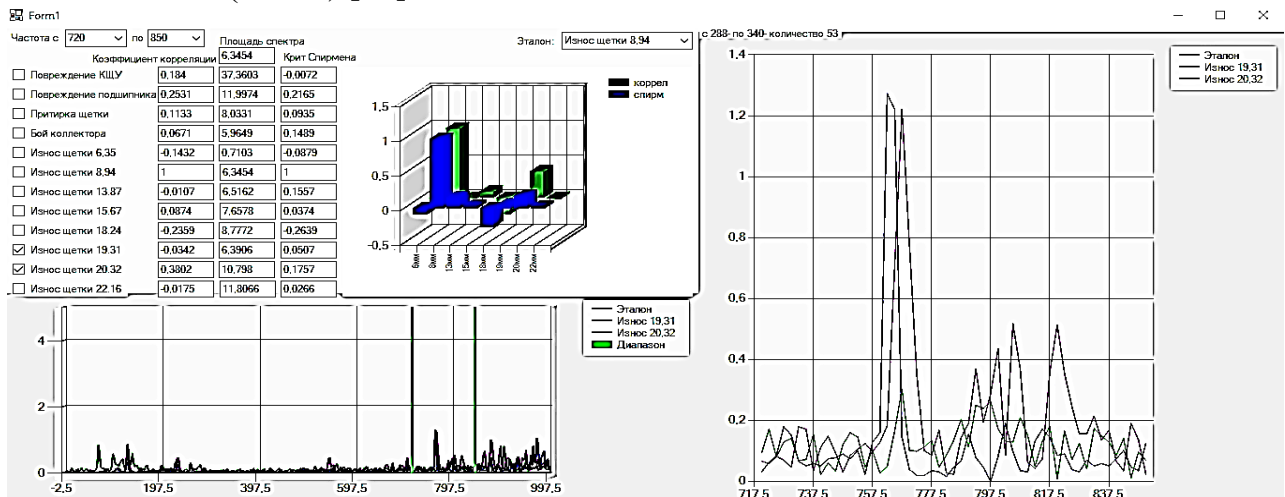


Рисунок 8 - Диапазон спектра вибрации по износу щетки в программном комплексе

После проведения вибродиагностики, создана программа для оценки срока службы ЩКУ. В ее основе использованы критерии результатов сравнения, эталонного и текущего спектров электродвигателей. На одном из этапов проведения экспериментальных исследований были изучены полученные спектры с электродвигателей, установленных на подвижном составе при различной степени износа щеток. Изучение спектров сигналов вибрации показало наличие увеличения амплитуды в рассматриваемом диапазоне частот, указывающее на состояние щеточно-коллекторного узла. Анализ показал возможность оценки состояния по данным критериям для уточнения работы предложенной программы, особенно при большой степени износа щетки [23]. Регулярное проведение измерений (мониторинга) электродвигателя позволяет выявлять неисправности на ранней стадии возникновения, отслеживать динамику их развития, определять остаточный ресурс узлов и планировать рациональные сроки проведения ремонтов. В целом заявляемый способ основан на спектральном анализе сигналов виброускорения узлов электродвигателя с целью определения наличия электрических и механических неисправностей.

В пятой главе рассматривается расчет стоимости жизненного цикла (LCC – LifeCycleCost) тягового ЭДПТ с учетом оптимизации и усовершенствования щеточного узла с рельефной пластиной, определена экономия от внедрения данного узла и даны рекомендации по усовершенствованию планово-предупредительных работ, представлено технико-экономическое обоснование применения математической модели по измерению вибрации на электродвигателях постоянного тока.

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

$$\text{СЖЦ(LCC)} = C_{\text{пр}} + \sum_{t=1}^T (I_p + \Delta K_t - L_t) \cdot \alpha_t \quad (26)$$

где $C_{\text{пр}}$ – цена приобретения 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, $I_{(P)}$ – годовые эксплуатационные расходы, тыс. рублей, ΔK_t – сопутствующие единовременные затраты, связанные с внедрением узла в эксплуатацию, тыс. рублей, L_t – ликвидационная стоимость объекта, тыс. рублей, α_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).

Поскольку экономически обоснованный уровень надежности является основным критерием формирования системы ТО ЩКУ ЭДПТ, экономически же эффект от повышения надежности ЩКУ проявляется в увеличении времени полезной работы, продлении остаточного ресурса ЩКУ по результатам диагностики, сокращении потребности в ПС, материалах, энергии и т.п. Осуществление мероприятий по повышению надежности требует дополнительных затрат труда и средств (Рис. 9). При этом предприятие, осуществляющее эксплуатацию подвижного состава, получает возможность пересмотра в сторону увеличения значения назначенного ресурса. Была оценена экономическая эффективность применения усовершенствованного ЩКУ ЭДПТ с повышенным ресурсом работы. Рассчитанный срок окупаемости единовременных затрат на внедрение усовершенствованного ЩКУ ЭДПТ с повышенным ресурсом составил около 1,2 года. Более надежный ЩКУ ЭДПТ дешевле в эксплуатации, т.к. затраты для поддержания его работоспособного состояния меньше.

Проведено технико-экономическое обоснование и оценка эффективности внедрения математической модели и способы контроля вибрации в электродвигателях на испытательных станциях вагоноремонтных заводов и локомотивных депо, депо городского подвижного электротранспорта для вибрационных испытаний ТЭД при ремонте. Применение методов технической диагностики, как неотъемлемой части системы обслуживания по фактическому техническому состоянию, повышает эффективность планирования и проведения ремонтов оборудования; следовательно, повышает и эффективность его эксплуатации.

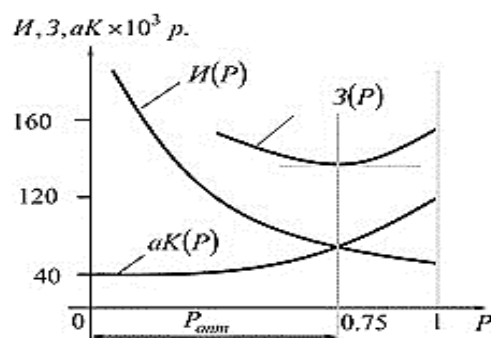


Рисунок 9 – Зависимости затрат от уровня надежности P ЩКУ ЭДПТ: aK – капитальные вложения; $I(P)$ – эксплуатационные; $Z(P)$ – приведенные затраты

Возможные области применения разработанной модели диагностирования: использование в транспортной отрасли (городской и железнодорожный подвижной состав), карьерных самосвалах и кранах, в металлургии. Произведена оценка результатов измерений и выявлены возможные области применения результатов в научно-образовательном процессе, в профильных ВУЗах, в диагностических центрах, а также при создании электронных научных фондов.

В приложениях приведены акты первичных экспериментальных данных, программы для обработки и описания полученных результатов, патенты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Проведен анализ работы тяговых электродвигателей постоянного тока, выявлены узлы, которые подвержены интенсивному износу. В процессе анализа рассмотрены и выявлены проблемы контроля технического состояния электродвигателей, условий эксплуатации подвижного состава, физические механизмы возникновения дефектов и протекания вибрационного процесса. Приведены известные способы и методы по повышению надежности щеточно-коллекторного узла и разработаны технические средства, повышающие ресурс безотказной работы ЩКУ.

В диссертационной работе были получены следующие обобщающие результаты:

1. Создана математическая имитационная модель на основе статистической обработки данных по эксплуатации щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока на эксплуатационных электротранспортных предприятиях МУП «Метроэлектротранс» в Троллейбусном депо №2 г. Казань с 2010 по 2022 год для выявления видов отказов щеточно-коллекторного узла;

2. Разработан способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторного узла, который производится без демонтажа тягового электродвигателя на подвижном составе и фактически может применяться для диагностики состояния основных узлов тягового ЭДПТ непосредственно в процессе эксплуатации для своевременного выявления дефектов;

3. Разработан и создан опытный образец ЩКУ усовершенствованной конструкции нажимной пластины, улучшающей качество коммутации, обеспечивающей высокую виброустойчивость щетки, увеличивающей ее ресурс и позволяющей снизить затраты на техническое обслуживание тягового ЭДПТ в процессе эксплуатации;

4. Создана компьютерная программа по контролю функционирования щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя постоянного тока с применением метода оценки технического состояния по спектрам вибрации для продления его срока службы;

5. Разработан алгоритм определения технического ресурса ЩКУ с применением методов и средств оценки технического состояния и отклонений от нормы функционирования.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Филина, О.А. Система мониторинга вибрации щеточно-коллекторного узла электродвигателя постоянного тока / Н.И. Щуров, Филина О.А., Б.В. Малоземов // Электропитание. – 2022. – № 3. – С. 10-22.

2. Филина, О.А. Математическая модель прогнозирования остаточного ресурса электрощетки / О.А. Филина, Б.В. Малоземов, Н.И. Щуров // Электропитание. – 2022. – № 3. – С. 35-48.

3. Филина, О.А. Повышение надежности усовершенствованного щеточно-коллекторного узла электродвигателя постоянного тока подвижного состава / Филина О.А., Цветков А.Н., Хуснутдинов А.Н., Логачева А.Г. // Вестник Пермского национального

исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 1. С. 46-60.

4. 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.

5. Филина, О.А. Исследование эксплуатационного ресурса электрощеток электродвигателя постоянного тока подвижного состава // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 9-10. С. 133-139.

6. Филина, О.А. Принцип определения ориентирных направлений с помощью вибрационных гироскопов / Баженов Н.Г., Филина О.А., Ермакова Е.Ю. // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1104-1112.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus:

7. 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. doi:10.1088/1757-899X/489/1/012016.

8. 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>.

9. Filina, O.A. «Determination of the Characteristic Points of Approximation for Traction Electric Machines of Electric Rolling Stock», *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109 / ICIEAM 51226.2021.9446470.

10. 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.

11. 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

12. Filina, O.A. "Determination of the Characteristic Points of Approximation for Traction Electric Machines of Electric Rolling Stock in Vibration model", *E3S Web Conf. Volume 288, 01016 (2021) International Symposium "Sustainable Energy and Power Engineering 2021" (SUSE-2021)*, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801016>

13. Filina, O.A. Vibration Diagnostics of the Brush-Collector Assembly, as Means of Assessing, *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering*, REEPE 2022, DOI 10.1109/REEPE53907.2022.9731433

14. Filina, O.A. Investigation of reactive power parameters in the elements of the power supply system *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering*, REEPE 2022, ISBN 978-166541434-0 DOI 10.1109/REEPE53907.2022.9731433

15. Filina, O.A. "Technical Condition as an Assessment of Condition of the Object," *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2022, pp. 102-107, doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787255.

16. Filina, O.A. "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.

17. 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.

Патенты на полезные модели и изобретения:

18. 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.

19. Программа по контролю функционирования ЩКУ ЭДПТ с применением метода оценки технического состояния по спектрам вибрации / **Филина О.А.**, Цветков А.Н. // свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663040 от 11 августа 2021 г., заявка № 2021661990 от 02 августа 2021 г.

20. 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

21. Адаптивное сглаживающее устройство / **О.А. Филина**, П.П. Павлов, Г.С. Магданов // Патент на изобретение RUS № 2714613, заявка № 2019114852 от 14.05.2019, Бюл. № 5 от 18.02.2020

22. Способ мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей постоянного тока / **Филина О.А.**, Цветков А.Н. // патент на полезную модель RUS 2730109 № 2019119671 заявл. 25.06.2019; опубл. 17.08.2020 Бюл. № 23. 3с.

23. 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.

24. Программа моделирования процесса функционирования иерархически сложной технической системы для определения ее надежности / П.П. Павлов, А.Э. Аухадеев, Р.С. Литвиненко, **Филина О.А.** / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615169 опубл. 10.03.2023, № 2023613544: заявл. 28.02.2023