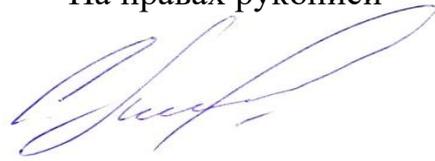


На правах рукописи



НАЙДЕН СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ КОММУТАЦИИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Омск 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения».

Научный руководитель:

Харламов Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения».

Официальные оппоненты:

Плохов Игорь Владимирович,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика, электропривод и системы автоматизации» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Псковский государственный университет»;

Орленко Алексей Иванович,

кандидат технических наук, доцент, И. о. директора Красноярского института железнодорожного транспорта – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров.

Защита диссертации состоится 23 декабря 2021 г. в 15:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.162.02, созданного на базе Омского государственного технического университета и Омского государственного университета путей сообщения, по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, д.11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета и на сайте <http://www.omgtu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11, диссертационный совет Д 999.162.02. Тел.: (3812) 65-24-79, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 999.162.02,
кандидат технических наук, доцент



О. А. Лысенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В соответствии с программой развития угольной промышленности России на период до 2035 года предусмотрены меры по повышению производительности, эффективности и надежности объектов инфраструктуры добывающих предприятий. Важной частью инфраструктуры угольных разрезов являются карьерные самосвалы, которые осуществляют перемещение горных масс от места добычи до пунктов разгрузки, и являются основной транспортной единицей в технологическом цикле при добыче полезных ископаемых открытым способом. Отказ любой из систем карьерного самосвала, вызывающий внеплановый простой, приводит к существенным экономическим потерям, которые связаны с непосредственным восстановлением работоспособного состояния так и упущенной выгодой, вследствие уменьшения производительности участка из-за нарушения технологического цикла добычи полезных ископаемых. Поэтому важно минимизировать количество и время внеплановых ремонтов. Наиболее трудоемкими операциями являются работы по замене дизеля, тягового генератора и тяговых электродвигателей, так как требует дополнительного демонтажа оборудования самосвала, поэтому к этим узлам предъявляются особые требования по надежности.

Статистические данные показывают, что до 18% внеплановых ремонтов карьерных самосвалов БЕЛАЗ связаны с отказом составных частей электромеханической трансмиссии, из них до 34% приходится на долю тяговых электродвигателей (ТЭД). Для ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов основными причинами отказов являются: возникновение кругового огня, нарушение рабочей поверхности коллектора и повышенный износ щеток, на долю этих неисправностей приходится до 72% внеплановых ремонтов ТЭД. Таким образом, можно согласиться с мнением многих ученых, занимающихся диагностированием технического состояния машин постоянного тока, что коллекторно-щеточный узел (КЩУ) является одним из критических элементов, определяющих надежность ТЭД, и карьерного самосвала в целом.

Особенность эксплуатации ТЭД карьерных самосвалов является работа во всех возможных режимах и частота их изменения из-за сложного дорожного профиля, включающего в себя повороты, спуски и подъемы. Такие условия работы затрудняют настройку коммутации ТЭД постоянного тока и требуют изучения особенностей эксплуатации электродвигателей. Многие исследования показывают, что процесс коммутации существенно влияет на ресурс КЩУ, и следует стремиться к минимизации искрения во время работы ТЭД в любом из режимов.

Степень разработанности темы диссертации.

Изучением физических процессов, протекающих в коллекторно-щеточном узле двигателей постоянного тока, и диагностированием неудовлетворительной коммутации занимались такие ученые как М. Ф. Карасев, Э. Арнольд, В. Д. Авилов, В. Т. Касьянов, О. Г. Вегнер, Р. Ф. Бекишев, А. С. Курбасов, А. И. Скороспешкин, Э. К. Стрельбицкий, С. И. Качин, В. В. Харламов, А. И. Изотов, И. В. Плохов, А. И. Орленко и другие.

В настоящее время разработано достаточно много способов определения интенсивности искрения КЩУ, с 2020г в ГОСТ 2582-2013 «Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия» внесено изменение, которое позволяет использовать инструментальные методы для оценки коммутации наряду с визуальным методом, при согласовании с заказчиком.

Разработанные инструментальные способы оценки интенсивности искрения показали свою эффективность при оценке и настройке коммутации в лабораторных

условиях, однако их довольно проблематично использовать для этих целей в эксплуатации, т.к. требуется серьезное вмешательство в конструкцию ТЭД и тщательная подготовка исследования.

Целью диссертационной работы является повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей карьерных самосвалов за счет определения допустимых режимов работы тяговых электродвигателей, обеспечивающих минимум интенсивности искрения электрических щеток в эксплуатации.

Для достижения указанной цели были сформированы и решены следующие **задачи:**

1) провести анализ и выполнить классификацию отказов ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов, выявить причины отказов;

2) разработать метод оценки интенсивности искрения ТЭД карьерных самосвалов при эксплуатации по видеоизображению;

3) разработать автоматизированный видеоизмерительный комплекс оценки коммутации;

4) исследовать влияние эксплуатационных режимов работы ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов на процесс коммутации и разработать регрессионную модель коммутации ТЭД с учетом его режимов работы при эксплуатации;

5) предложить методику определения допустимых режимов работы тягового двигателя карьерного самосвала, для обеспечения удовлетворительной коммутации, при его эксплуатации.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является тяговые электродвигатели постоянного тока карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 220 тонн; предметом исследования – процесс коммутации ТЭД, способы и средства диагностирования интенсивности искрения.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы методы математического, статистического и регрессионного анализа, методы прогнозирования и основные положения теории электрических машин. Для проведения математических расчетов были использованы лицензионные программные продукты *MathCAD, Microsoft Office, Matlab*.

Для оценки интенсивности искрения по видеоизображению и синхронизации с данными от системы мониторинга карьерного самосвала создано программное обеспечение, разработанное в среде *Matlab*.

Экспериментальные исследования проводились в испытательном центре ООО «Сибэлектропривод», а также в условиях полигона ОАО «БЕЛАЗ» и угольных разрезов Кемеровской области на карьерных самосвалах БЕЛАЗ 75306.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Рассматриваемая область исследования соответствует паспорту специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты», по следующим пунктам: п.1 «Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов»; п.5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов».

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) разработан метод оценки состояния коммутации ТЭД по видеоизображению, с использованием в качестве диагностического параметра «процента засветки» области скользящего контакта;
- 2) разработана регрессионная модель для определения класса коммутации ТЭД постоянного тока в зависимости от режима его работы в эксплуатации;
- 3) предложена методика определения допустимых режимов работы ТЭД с использованием усовершенствованного метода оценки интенсивности искрения КЩУ.

Теоретическая и практическая ценность диссертации заключается:

- 1) предложенный метод оценки состояния коммутации ТЭД позволяет определить интенсивность искрения щеток ТЭД карьерных самосвалов в условиях эксплуатации по видеоизображению;
- 2) разработаны автоматизированный видеоизмерительный комплекс и программное обеспечение для оценки интенсивности искрения ТЭД постоянного тока в эксплуатации, позволяющий дать качественную и количественную оценку коммутации в КЩУ;
- 3) разработанная регрессионная модель позволяет производить оценку воздействия параметров работы ТЭД на интенсивность искрения щеток, благодаря чему возможно провести анализ качества работы ТЭД постоянного тока, во всем возможном диапазоне его работы учитывая условия эксплуатации;
- 4) предложенная методика определения допустимых режимов работы ТЭД обеспечивает снижение интенсивности искрения электрических щеток при эксплуатации, за счет оптимальной настройки электромеханической трансмиссии по критерию качества коммутации в КЩУ.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) классификация отказов ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов БЕЛАЗ, позволяющая структурировать отказы и причины выхода из строя;
- 2) способ определения интенсивности видимого искрения по видеоизображению;
- 3) регрессионная модель, позволяющая оценить воздействия параметров режима работы ТЭД на интенсивности искрения щеток;
- 4) методика повышения коммутационной устойчивости ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов БЕЛАЗ с учетом режимов эксплуатации.

Степень достоверности научных исследований и результатов диссертационной работы обоснована теоретически и подтверждается экспериментальной проверкой, а также совпадением результатов, полученных в работе с данными экспериментов других исследователей. При статистической проверке гипотез принят пятипроцентный уровень значимости. Расхождение экспериментальных данных, полученных при оценке интенсивности искрения и результатов расчетов по регрессионной модели не превышает 10%.

Реализация результатов работы. Способ оценки интенсивности искрения по видеоизображению, автоматизированный видеоизмерительный комплекс оценки коммутации (АВК-ОК), программный продукт («*DC motor commutation*»), реализующий предложенный способ и методика повышения коммутационной устойчивости ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов путем оптимальной настройки системы управления внедрены в производственные процессы ООО «Сибэлектропривод» и в учебном процессе на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, получен патент на полезную модель «Устройство регистрации интенсивности

искрения тяговых двигателей в условиях эксплуатации».

Апробация работы. Основные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы докладывались и обсуждались на XII международной научно-практической конференции «Наука и образование», Екатеринбург, 2015; на III всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», Омский гос. ун-т путей сообщения, Омск, 2018; на IV международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения», Омский гос. тех. ун-т, Омск, 2020; на научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте», Омский гос. ун-т путей сообщения, Омск, 2020; на IV всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», Омский гос. ун-т путей сообщения, Омск, 2020; на V международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения», Омский гос. тех. ун-т, Омск, 2021; на международной научно-практической конференции «Современные инновации в технике и производстве», Псковский государственный университет, Псков, 2021.

Личный вклад автора. Автору работы лично принадлежат результаты по постановке и проведению экспериментальных и теоретических исследований, обработке и интерпретации полученных результатов. Автор принимал непосредственное участие в разработке метода оценки интенсивности искрения по видеоизображению и при создании видеоизмерительного комплекса оценки состояния коммутации, в том числе в разработке программного обеспечения; в разработке регрессионной модели определения интенсивности искрения.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 11 печатных работах, из них три статьи в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, один патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографического списка из 129 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 135 страниц, 20 таблиц и 43 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и указана степень разработанности темы научного исследования, приведены цель и задачи, положения, выносимые на защиту, сформулирована научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, методы и методология исследования, степень достоверности и апробация полученных результатов.

Первый раздел диссертационной работы посвящен анализу условий работы ТЭД постоянного тока карьерного самосвала БЕЛАЗ и анализу статистических данных отказов ТЭД, который показывает, что значительное число отказов связано с повреждениями и неисправностями КЩУ, повышенным износом щеток и коллектора в связи с неудовлетворительной коммутацией (рис.1). Также предложена классификация отказов ТЭД постоянного тока для карьерных самосвалов по внешним признакам и причинам (рис. 2).

В главе проведен анализ основных факторов механической и электрической природы, воздействующих на процесс коммутации и изнашивания электрических щеток и коллектора.

На основе проведенного анализа состояния вопроса сформулированы цель исследования, поставлены задачи для её достижения.

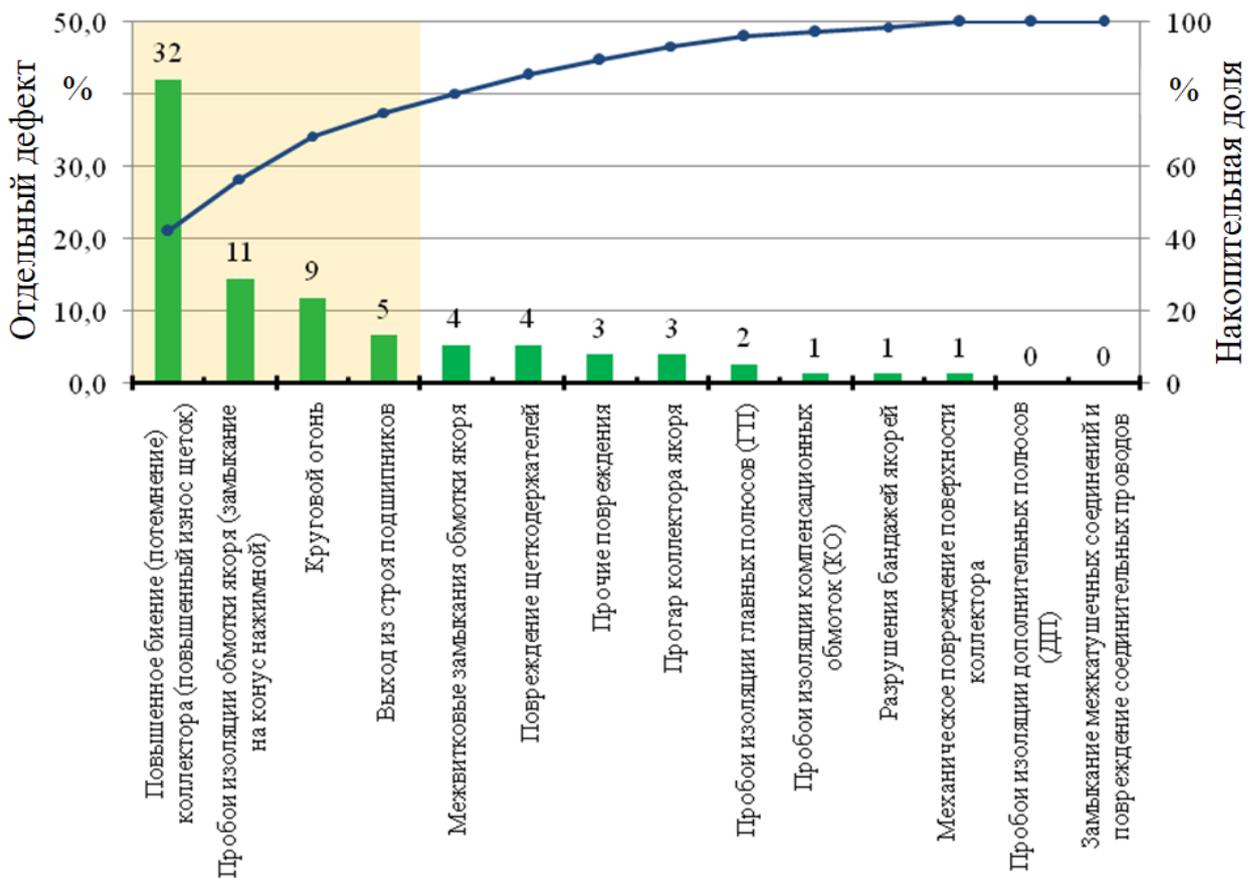


Рис. 1– Распределение основных неисправностей гарантийных тяговых электродвигателей ЭДП-800 за 2015-2020 гг

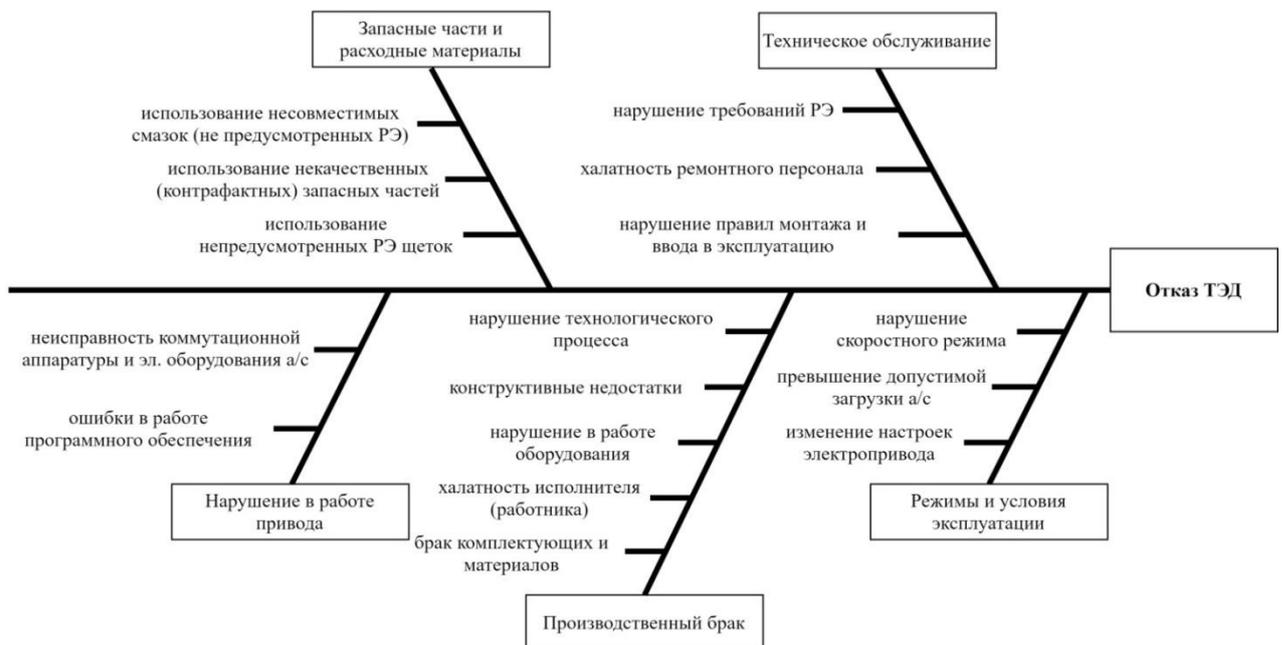


Рис. 2– Причинно-следственные связи отказов ТЭД

Во втором разделе проведен анализ существующих методов и способов оценки состояния коммутации МПТ. Анализ показал, что существующие методы и способы невозможно или затруднительно использовать для диагностирования коммутации ТЭД карьерных самосвалов в условиях эксплуатации, поэтому для этих целей требуется их усовершенствование и адаптация.

Для оценки работы КЩУ тяговых электродвигателей постоянно тока, используемых в карьерных самосвалах БЕЛАЗ, предложен метод определения интенсивности искрения на сбегающем крае щетки в видимом спектре по видеоизображению. Разработан универсальный автоматизированный видеоизмерительный комплекс оценки состояния коммутации (АВК-ОК), позволяющий рассмотреть и оценить максимально полную картину работы коллекторно-щеточного узла при эксплуатации автосамосвала.

Структура автоматизированного видеоизмерительного комплекса оценки состояния коммутации приведена на рис. 3.

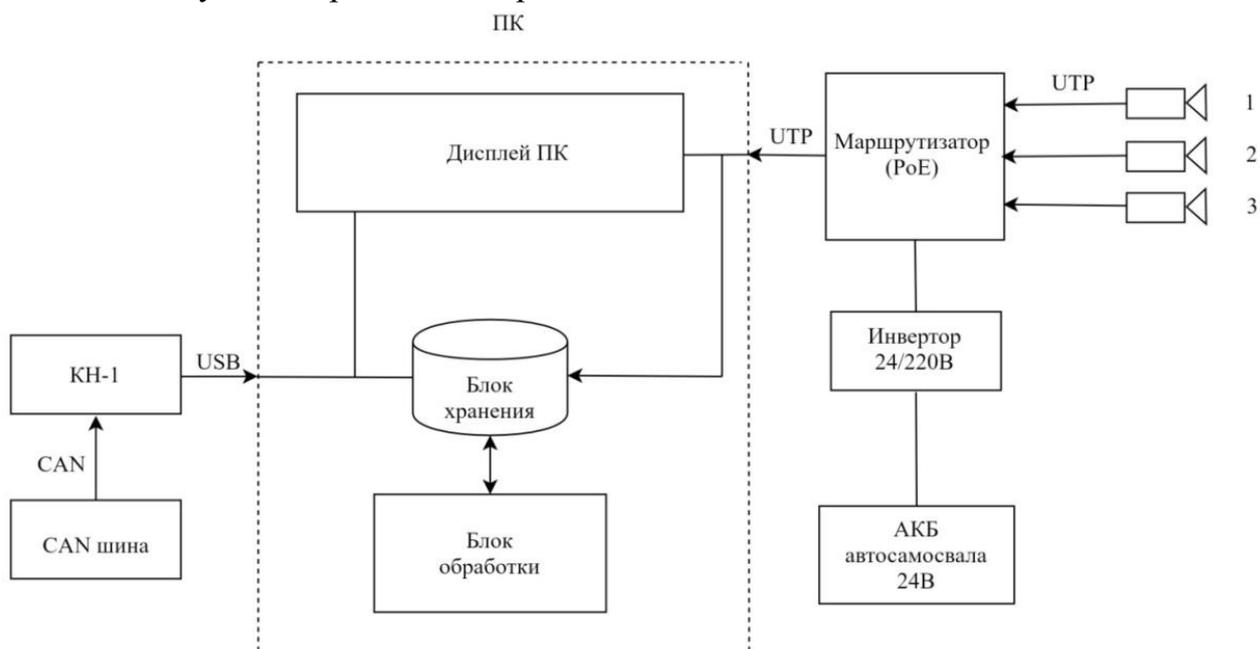


Рис. 3 – Структура автоматизированного видеоизмерительного комплекса (АВК-ОК)

Для получения видеосигнала служат IP видеокамеры и коммутатор, для получения данных от системы управления БЕЛАЗ по CAN шине служит комплект наладчика КН-1. Данные о режиме работы ТЭД по CAN шине от системы управления автосамосвала поступают на ПК через комплект наладчика КН-1. На ПК через коммутатор в онлайн режиме производится фиксация видеоизображений поступающих от IP видеокамер, установленных в заднем мосту самосвала направленных на сбегающий край коллекторно-щеточного узла.

Данные от системы управления и видеокамер поступают синхронно, что дает возможность оператору определить режим работы и оценить интенсивность искрения. Передача данных и питание IP видеокамер осуществляется по витой паре, поэтому коммутатор и видеокамеры должны поддерживать технологию *PoE (Power over Ethernet)*, которая позволяет передавать удаленному устройству электрическую энергию вместе с данными по сети *Ethernet*.

Питание коммутатора осуществляется через инвертор 24/220 В от бортовой сети самосвала 24 В постоянного тока.

Для крепления видеокамеры в заднем мосту самосвала было разработано специальное крепление ИЦ09.14.000000 СБ, которое фиксируется в техническом проеме электродвигателя со стороны коллектора и позволяет направить обзор камеры на сбегающий край щеток (рис. 4).



Рис. 4 – Приспособление для закрепления видеокамеры к остову ТЭД

В процессе опытной поездки в памяти устройства сохраняется видеоархив и переменные, полученные от системы управления, а после проведения оператором обработки хранятся ее результаты. Блок обработки – это программный блок, в котором происходит синхронизация, обработка и анализ сохраненных данных. Оператор имеет возможность провести оценку коммутации в он-лайн режиме или по средству сохраненного архива данных. Рабочее окно оператора приведено на рис.5.

Достоинством видеоизмерительного комплекса являются:

- 1) измерения проводятся дистанционно – оператор находится на пассажирском сиденье в кабине водителя вдали от движущихся частей и высокого напряжения;
- 2) универсальность применения – возможно применять для мониторинга различных моделей тяговых электродвигателей благодаря специальному креплению;
- 3) наглядность результатов исследования и простота обработки результатов мониторинга благодаря специальному программному обеспечению;



Рис. 5 – Окно оператора АВК-ОК

4) простота и скорость монтажа и демонтажа – суммарное время монтажа-демонтажа не превышает 1 часа;

5) возможность модернизации комплекса путем внедрения новых компонентов.

Для реализации блока обработки переменных и видеофайлов разработана программа «DC motor commutation» (рис. 6), которая позволяет синхронизировать видеоархив и архив данных, оценить состояние коммутации по видеоизображению и рассчитать необходимые переменные для анализа результатов. Программа позволяет

обработать видеоизображение, построить графики интенсивности искрения в баллах согласно ГОСТ 2582-2013. Алгоритм реализован в программе *MatLab* (рис. 7).



Рис. 6 – Окно программы «DC motor commutation»

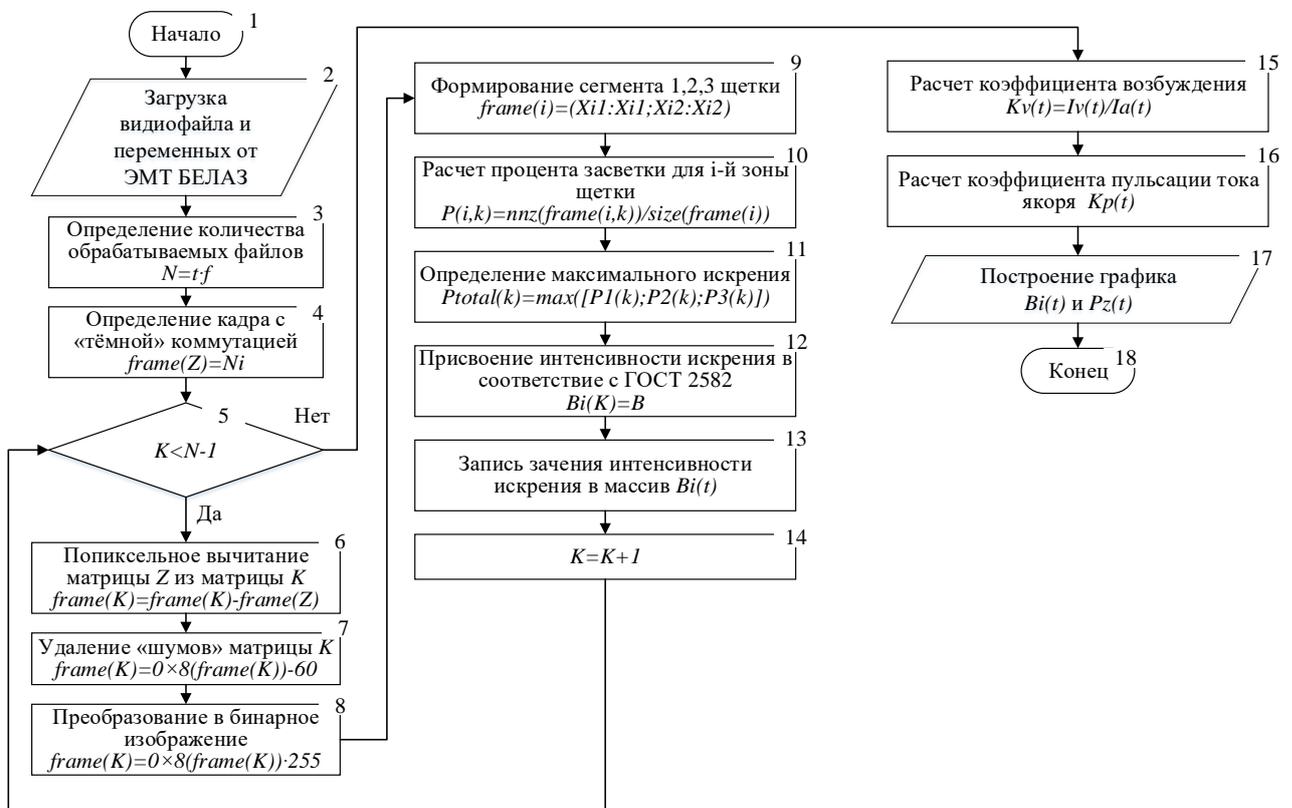


Рис. 7 – Граф-схема алгоритма оценки коммутации по видеоизображению

Для программы видеофайл представляет собой поток кадров – последовательность растровых изображений с разрешением 1280×720 пикселей и частотой 25 кад/с. Каждый пиксель представляет собой оттенок цвета, который задан кодом RGB (*red, green, blue*) в диапазоне от 0 до 255.

После загрузки видеофайлов в программу получаем некоторое количество матриц N , которое определяется командой « $nFrames$ » (блок 4).

На изображении присутствуют разного рода помехи – блики от источника освещения и шумы, чтобы от них избавиться, проводится операция вычитания из матрицы кадра K матрицу кадра Z (блок 6):

$$frame(K) = frame(K) - frame(Z), \quad (1)$$

где K – порядковый номер кадра;

Z – это номер кадра, на котором отсутствует искрение (кадр определяет оператор при обработке видеофайла).

Путем попиксельного вычитания 0×60 мы устраняем шумы (блок 7):

$$frame(K) = 0 \times 8(frame(K)) - 60. \quad (2)$$

Для компьютерного зрения искра представляет собой белый цвет или близкой к нему, т.е. числовое обозначение RGB стремится к максимальным значениям (255, 255, 255). Для ускорения и упрощения обработки удобнее работать с бинарным изображением, в котором белые пиксели обозначаются логической единицей, а черные логическим нулем (блок 8).

Таким образом, после фильтрации на кадре с проявлением коммутации остается только черный фон и само искрение в виде белых пикселей:

$$frame(K) = 0 \times 8(frame(K)) \cdot 255. \quad (3)$$

Т.к. в каждом щеткодержателе установлено по три щетки, то, соответственно, оценку нужно проводить по каждой, поэтому оператору требуется определить все зоны контакта, (блок 9):

$$frame(i) = (X_{i1}:X_{i2}; Y_{i1}:Y_{i2}), \quad (4)$$

где i – номер щетки в щеткодержателе.

В качестве критерия оценки интенсивности искрения принято отношение количества белых пикселей к размеру зоны коммутации под i -ой щеткой – «процент засветки» (блок 10).

$$P_i(K) = \frac{nz(frame_i(K))}{size(frame_i(K))} \cdot 100\%; \quad (5)$$

где $nz(frame_i(K))$ – количество белых пикселей в зоне коммутации i -ой щетки K -ого кадра;

$size(frame_i(K))$ – размер зоны коммутации i -ой щетки.

Программа рассчитывает «процент засветки» под каждой щеткой и для присвоения класса коммутации выбирается наибольшее значение (блок 11):

$$P_{max}(K) = \max([P_1(K), P_2(K), P_3(K)]). \quad (6)$$

Следующим шагом является присвоение класса коммутации для K -го кадра (блок 12) $V_i(K)$. Для этого методом экспертных оценок были выделены кадры с интенсивностью искрения от $1\frac{1}{4}$ до 2 и для каждого класса определены диапазоны величины процента засветки (таблица 1).

Таким образом, обрабатывается каждый кадр и формируется матрица интенсивности искрения от времени $V_i(t)$ (блок 14).

Определение интенсивности искрения по величине процента засветки

№	Диапазон «процента засветки» (P_z)	Соответствие стандартной шкале искрения (B_i)
1	$P_z < x_1$	1
2	$x_1 \leq P_z < x_2$	1¼
3	$x_2 \leq P_z < x_3$	1½
4	$x_3 \leq P_z < x_4$	2
5	$P_z \geq x_4$	3

Примечание:
Для рассматриваемого примера значения $x_1 = 0,5$; $x_2 = 1,0$; $x_3 = 5,0$; $x_4 = 8,5$.

Конечным этапом является формирование архива переменных, содержащего информацию об интенсивности искрения и режимах работы ТЭД.

По полученным данным оператор и другие заинтересованные специалисты могут дать качественную оценку работы тягового электродвигателя в рассмотренных условиях эксплуатации, а при необходимости разработать мероприятия направленные на улучшение коммутации.

Третья глава посвящена разработке регрессионной модели, которая позволяет рассчитывать математическое ожидание величины «процента засветки» в зависимости от тока якоря, тока возбуждения и напряжения якоря из допустимых диапазонов их изменения в заданном режиме работы ТЭД. Из анализа экспериментальных данных для различных самосвалов были выявлены границы изменения тока якоря, тока возбуждения, напряжения якоря, в которых работает ТЭД в эксплуатационных условиях, что позволило определить границы адекватности модели. Ток якоря и ток возбуждения изменяются в диапазоне от 100 до 1000 А, напряжение якоря – в диапазоне от 700 до 1100 В. Эти три величины выбраны в качестве независимых переменных модели, потому что напряжение якоря, ток возбуждения задаются системой управления ТЭД в зависимости от необходимой скорости движения, а ток якоря непосредственно зависит от вращающего момента на валу ТЭД, который зависит от массы перевозимого груза, профиля пути и т.д. Выходными данными являются плотность вероятности появления дискретной случайной величины классов искрения (1; 1¼; 1½; 2; 3), которые соответствуют стандартным значениям по ГОСТ 2582-2013.

Необходимые исходные данные для моделирования процесса коммутации коллекторно-щеточного узла тягового двигателя постоянного тока ЭДП-800 карьерного самосвала «БЕЛАЗ» были получены с использованием АВК-ОК при проведении экспериментальных исследований в угольном разрезе. На основании мониторинга работы ТЭД были получены графики изменения (рис.8): напряжения якоря $U_a = f(t)$; тока якоря $I_a = f(t)$; тока возбуждения $I_e = f(t)$; а также график изменения «процента засветки» $P_z = f(t)$. Для определения класса искрения в соответствии со стандартной шкалой искрения методом экспертных оценок был определен диапазоны величины «процента засветки» P_z .

Массив экспериментальных данных содержит $N = 4589$ строк, количество строк, для которых процент засветки принимал значения меньше x_1 ($x_1 = 0,005$) равно 3602, больше x_1 – 987. Относительная частота появления искрения КЩУ с классом больше 1 составляет 0,215.

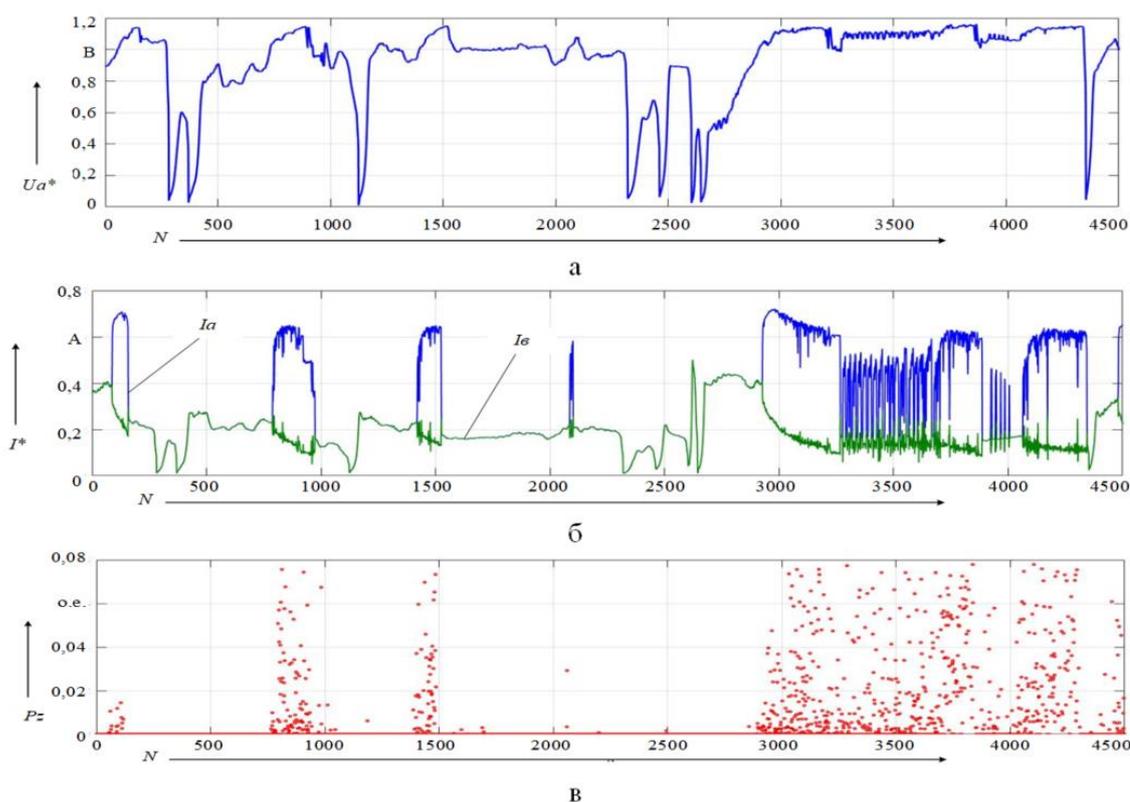


Рис. 8 – Графики изменения входных и выходных величин для математической модели процесса коммутации коллекторно-щеточного узла ТЭД постоянного тока: а) – напряжения якоря (в относительных единицах); б – тока якоря и тока возбуждения (в относительных единицах); в – график изменения «процента засветки»

Для выявления аналитической формы связи, в которой изменение величины «процента засветки» обусловлено влиянием трех факторных признаков (напряжения якоря, тока якоря, тока возбуждения) были рассмотрены несколько функций регрессии.

Сумма квадратов отклонений экспериментальных и теоретических значений «процента засветки» было получено для следующей нелинейной функции:

$$P_{z,model}(I_{a*}, I_{в*}, U_{a*}) = a_0 + a_1 I_{a*}^{d_1} + a_2 I_{в*}^{d_2} + a_3 U_{a*}^{d_3}, \quad (7)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты регрессии;

d_1, d_2, d_3 – показатели степени факторов;

I_{a*} – ток якоря в относительных единицах;

$I_{в*}$ – ток возбуждения в относительных единицах;

U_{a*} – напряжение якоря в относительных единицах.

Для того чтобы коэффициенты основной матрицы, при определении неизвестных значений a_0, a_1, a_2, a_3 и d_1, d_2, d_3 , имели один порядок факторы модели приведены в относительных величинах (относительно номинальных значений напряжения (890 В) и тока якоря (980 А) ТЭД). Это обусловлено тем, что при составлении модели с входными величинами в абсолютных единицах порядок факторов регрессионной модели и значений «процента засветки» значительно отличается. Токи якоря, возбуждения и напряжения якоря изменяются в диапазоне от 100 до 1000 единиц, а «процент засветки» принимает значения меньше 0,05, при этом большая часть значений «процента засветки» полученных экспериментально находится в диапазоне от 0 до 0,01.

С использованием массива данных размерностью $(N \times 4)$ методом наименьших квадратов можно определить коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 функциональной зависимости (7), для этого необходимо найти минимум следующего функционала:

$$F_{\min}(a_0, a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1 I_{a^*}^{d_1} + a_2 I_{B^*}^{d_2} + a_3 U_{a^*}^{d_3} - P_{z.экс. i})^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Для того чтобы упростить определение неизвестных коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3 показатели степени d_1, d_2, d_3 на первом этапе были заданы постоянными значениями равными единице, что позволило линеаризовать уравнение (7) и упростить определение коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3 методом наименьших квадратов.

Для вычисления коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3 , нужно определить частные производные по каждой из переменной функции (8) и приравнять их к нулю. В результате получим систему линейных уравнений в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} N & \sum_{i=1}^N I_{a^*}^{d_1} & \sum_{i=1}^N I_{B^*}^{d_2} & \sum_{i=1}^N U_{a^*}^{d_3} \\ \sum_{i=1}^N I_{a^*}^{d_1} & \sum_{i=1}^N I_{a^*}^{2 \cdot d_1} & \sum_{i=1}^N I_{a^*}^{d_1} I_{B^*}^{d_2} & \sum_{i=1}^N I_{a^*}^{d_1} U_{a^*}^{d_3} \\ \sum_{i=1}^N I_{B^*}^{d_2} & \sum_{i=1}^N I_{a^*}^{d_1} I_{B^*}^{d_2} & \sum_{i=1}^N I_{B^*}^{2 \cdot d_2} & \sum_{i=1}^N I_{B^*}^{d_2} U_{a^*}^{d_3} \\ \sum_{i=1}^N U_{a^*}^{d_3} & \sum_{i=1}^N I_{a^*}^{d_1} U_{a^*}^{d_3} & \sum_{i=1}^N I_{B^*}^{d_2} U_{a^*}^{d_3} & \sum_{i=1}^N U_{a^*}^{2 \cdot d_3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N P_{z.экс.} \\ \sum_{i=1}^N P_{z.экс.} I_{a^*}^{d_1} \\ \sum_{i=1}^N P_{z.экс.} I_{B^*}^{d_2} \\ \sum_{i=1}^N P_{z.экс.} U_{a^*}^{d_3} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

На следующем этапе степени уточняются d_1, d_2, d_3 , это реализуется следующим образом: задаются различные значения d_1, d_2, d_3 , определяются коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 , расчет многократно повторяется и завершается при условии минимального значения функционала (8).

С использованием экспериментальных данных система алгебраических уравнений (9) была решена многократно для различных значений коэффициентов d_1, d_2, d_3 , которые задавались с шагом 0,01 в диапазоне от -5 до 5. Минимальное значение функционала (8) было получено для неизвестных коэффициентов, приведенных в таблице 2.

Таблица 2

Значения неизвестных коэффициентов регрессионной модели

Коэффициент	a_0	a_1	a_2	a_3	d_1	d_2	d_3
Значение	$-137,42 \cdot 10^{-3}$	$94,63 \cdot 10^{-3}$	$45,73 \cdot 10^{-3}$	$28,27 \cdot 10^{-3}$	0,5	-0,3	4,5

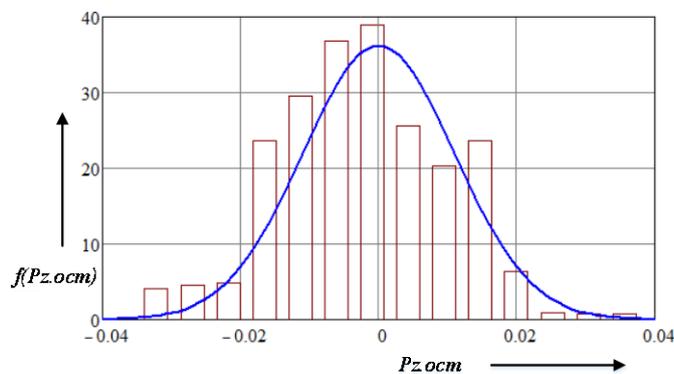


Рис. 9 – Гистограмма остатков «процента засветки» и выравнивающая кривая нормального закона распределения ($\sigma = 0,011$)

Процесс возникновения искрения в КЩУ имеет вероятностную природу, поэтому необходимо определить закон распределения остатков регрессионной модели. Распределение остатков регрессионной модели и кривая теоретического закона распределения вероятности приведена на рис. 9.

Проверка правдоподобия гипотезы о нормальном распределении остатков регрессионной модели выполнена с использованием критерия Пирсона. Распределение остатков регрессионной модели соответствует

нормальному закону распределения с математическим ожиданием равным нулю ($\mu = 0$) и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,011$.

Генерация случайных чисел, распределенных по нормальному закону, может привести к отрицательным значениям «процента засветки» при математическом ожидании близком к нулю. Для того чтобы исключить появление отрицательных значений «процента засветки», которые не имеют физического смысла, использован усеченный нормальный закон распределения. Нормирующий множитель для перехода к усеченному нормальному закону распределения равен:

$$A_{yc} = \frac{1}{\int_0^{\infty} f(X_{ост})dX_{ост}}. \quad (10)$$

Таким образом, функция плотности вероятности процента засветки:

$$f(P_z) = \frac{A_{yc}}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,011} \exp\left(-\frac{(X_{ост} - P_{z,model})^2}{2 \cdot 0,011^2}\right) \quad (11)$$

По известному закону распределения величины процента засветки для различных значений тока якоря, тока возбуждения, напряжения якоря можно определить вероятность попадания в заданный интервал значений P_z , соответствующие таблице 1:

$$B_i(x_k \leq P_z < x_{k+1}) = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f(P_z)dP_z, \quad (12)$$

где x_k – граничные значения процента засветки.

В результате можно определить закон распределения дискретной случайной величины классов искрения КЩУ соответствующий стандартной шкале искрения.

Коэффициент детерминации обычно рассматривают в качестве основного показателя, отражающего меру качества регрессионной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели. Коэффициент детерминации для регрессионного уравнения (7) составляет 0,62, поэтому имеет место заметная связь между переменной P_z и учитываемыми в модели факторами. Таким образом, в 62 % на искрение в КЩУ ТЭД самосвала БЕЛАЗ оказывает влияние значение напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения ТЭД, в 38 % случаев оказывает влияние другие факторы, не учтенные в регрессионной модели.

Статистическую значимость параметров регрессионной модели оценим при помощи F-критерия Фишера. Для рассмотренного примера критическое значение распределения Фишера для уровня доверия 0,95, трех факторов и 4589 измерений равно $F_{крит} = 2,6$, а $F_{набл} = 3742,2$. Если $F_{набл} > F_{крит}$, то можно принять гипотезу о статистической значимости параметров уравнения регрессии.

В четвертом разделе предложена методика повышения коммутационной устойчивости ТЭД, описан процесс реализации данной методики.

В соответствии с ГОСТ 2582-2013, коммутацию ТЭД можно считать удовлетворительной, если степень искрения не превышает 1½ балла в длительных рабочих режимах в пределах рабочих характеристик.

С использованием регрессионной модели можно определить допустимые диапазоны изменения напряжения якоря, тока якоря и возбуждения ТЭД, для которых вероятность появления искрения в КЩУ со степенью искрения 2 балла (и больше) будет равна минимальному заданному значению.

В качестве примера зададим вероятность возникновения искрения со степенью 2 балла равной $p = 0,05$. По выражению (11) можно найти значение $P_{z,model}$, при котором

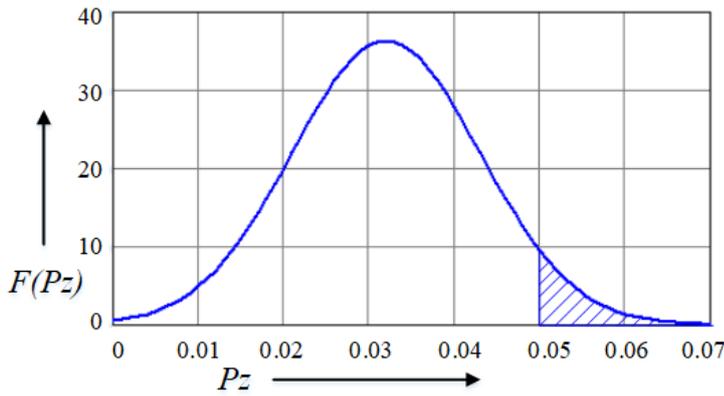


Рис. 10 – Плотность распределения вероятности при $P_{z.model} = 0,032$

вероятность искрения 2 балла будет равна значению 0,05. Для пояснения на рис. 10 приведена кривая распределения плотности вероятности «процента засветки», площадь заштрихованной области равна заданной вероятности возникновения искрения 2 балла.

Математическое ожидание величины «процента засветки», определяемое по выражению (7), не должно превышать 0,032 для рассматриваемого примера.

Таким образом, с использованием выражения (7) можно определить максимально допустимое значение напряжения якоря при различных коэффициентах ослабления возбуждения и токе якоря, при котором вероятность возникновения искрения в 2 балла равна p :

$$U_{a*}(I_{a*}, \beta) = \sqrt[3]{\frac{P_{z.model.p} + a_0 - a_1 I_{a*}^{d1} - a_2 (\beta I_{a*})^{d2}}{a_3}}, \quad (15)$$

где β – коэффициент ослабления возбуждения:

$$\beta = \frac{I_{B*}}{I_{a*}}. \quad (16)$$

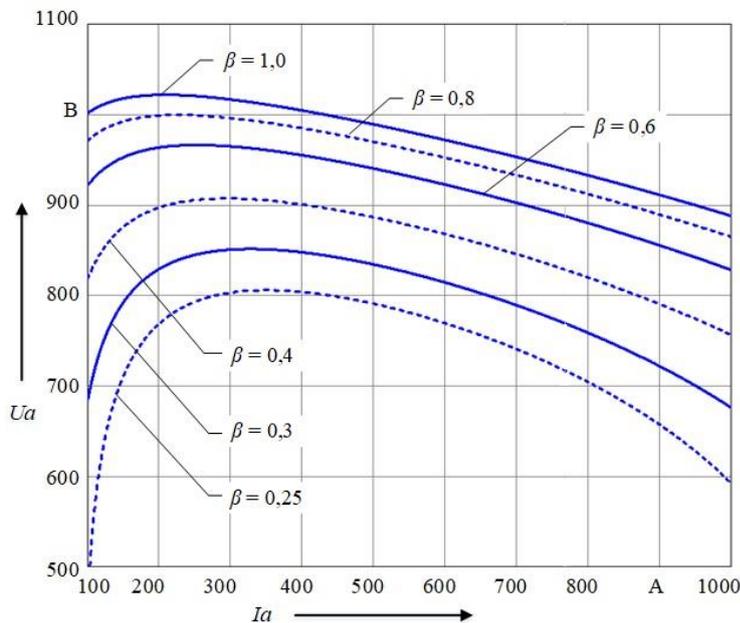


Рис. 11 – Допустимые значения напряжения якоря при различных значениях тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения для вероятности возникновения искрения 2 балла равной $p = 0,05$ (в абсолютных единицах)

На рис. 11 приведены области допустимых значений напряжения якоря (U_a) при различных значениях коэффициента ослабления возбуждения (β) и тока якоря (I_a). Для заданного коэффициента ослабления возбуждения область допустимых значений напряжения якоря и тока якоря ограничена соответствующей кривой и осями абсцисс и ординат.

Зависимость (15) позволяет рассчитать допустимые интервалы изменения напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения, при которых вероятность появления искрения в 2 балла будет равна заданному минимальному значению.

Для определения допустимых режимов работы ТЭД карьерного самосвала и для обеспечения удовлетворительной коммутации разработана методика, алгоритм которой приведен на рис. 12.

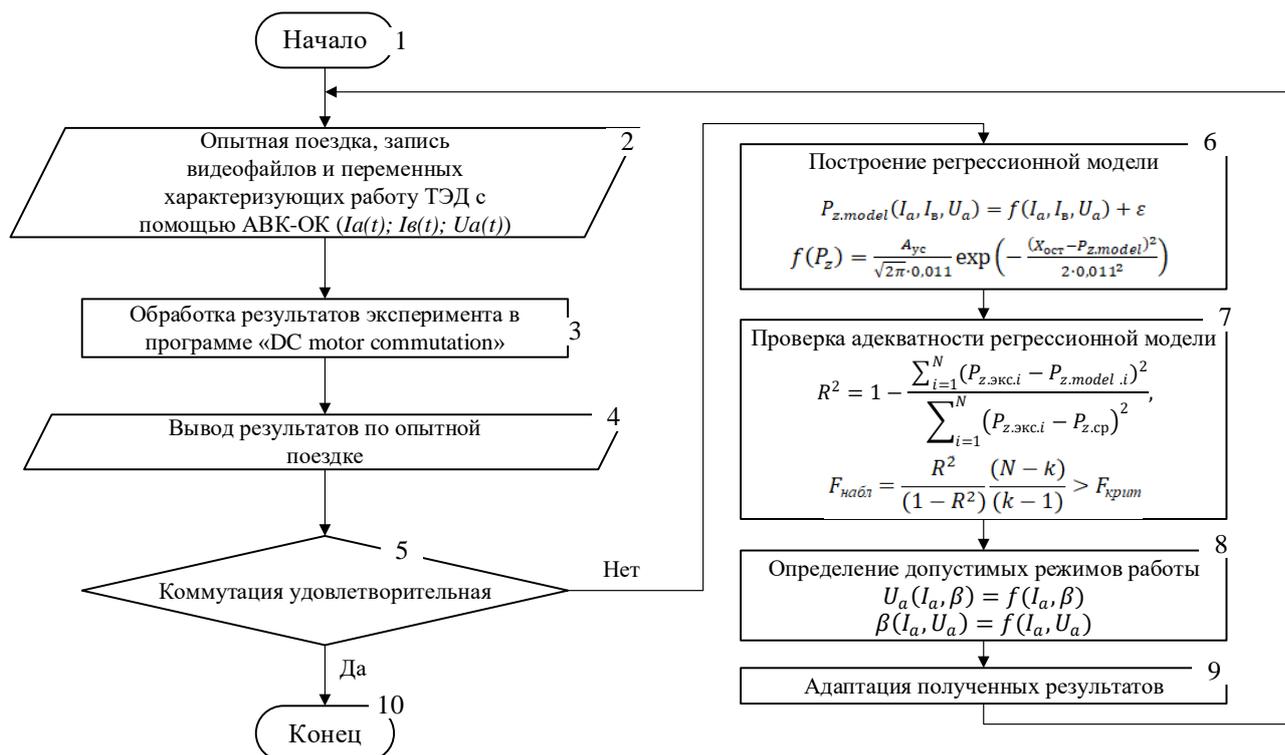


Рис. 12 – Алгоритм определения допустимых режимов работы ТЭД

Предложенная методика состоит из следующих этапов:

1) опытная поездка, получение данных измерений от АВК-ОК, установленного на карьерном самосвале (временные ряды данных изменения напряжения якоря, тока якоря, тока возбуждения, величины «процента засветки») (блок 2);

2)

3) обработка результатов эксперимента с помощью программы «DC motor commutation» (блок 3);

4) формирование отчета о качестве коммутации и режимах работы ТЭД (блок 4);

5) оценка интенсивности искрения ТЭД для выбранного участка эксплуатации карьерного самосвала (блок 5);

6) построение регрессионной модели для выявления связей между величиной «процента засветки» и напряжением якоря, током якоря, током возбуждения (блок 6);

7) проверка адекватности регрессионной модели с использованием показателей: коэффициента детерминации и критерия Фишера (блок 7);

8) определение допустимых диапазонов изменения напряжения якоря, тока якоря, тока возбуждения, при которых обеспечивается удовлетворительная коммутация КЩУ ТЭД карьерного самосвала (блок 8);

9) адаптация полученных результатов – настройка системы управления автосамосвала с учетом допустимых диапазонов изменения напряжения якоря, тока якоря, тока возбуждения (блок 9);

10) повторить опытную поездку и дать заключение по результатам проделанной работы (блок 2-4).

Используя результаты регрессионной модели автором, совместно со специалистами ООО «Сибэлектропривод», ОДО «СТРИМ» и ОАО «БЕЛАЗ», проведены опытные работы по настройке системы управления карьерного самосвала с учетом коммутации на ТЭД по предложенной методике. На полигоне ОАО «БЕЛАЗ» провели

подбор условий включения и ограничения режимов работы электромеханической трансмиссии, а также доработано программное обеспечение блока управления тиристорами ослабления поля и модулей высоковольтных сенсоров. Принятые меры позволили снизить коэффициент пульсации тока возбуждения и тока якоря, ограничить ослабление возбуждения и снизить скорость нарастания тока силовой цепи в переходных режимах.

В условиях УР «Березовский» на карьерном самосвале БЕЛАЗ 75306 ш. 1495 проводилась проверка изменений настроек системы управления с учетом коммутации ТЭД. В таблице 3 и на рис.13-14 приведена продолжительность работы ТЭД с интенсивностью искрения соответствующей стандартной шкале по ГОСТ 2582-2013 при исходных настройках системы управления и после её настройки по предложенной методике.

Таблица 3

Продолжительность работы в зависимости от класса коммутации

Баллы по ГОСТ 2582-2013	1	1¼	1½	2
Продолжительность, % (новое ПО)	94,80	3,29	1,67	0,24
Продолжительность, % (зав. настройки)	79,86	9,50	6,38	4,26

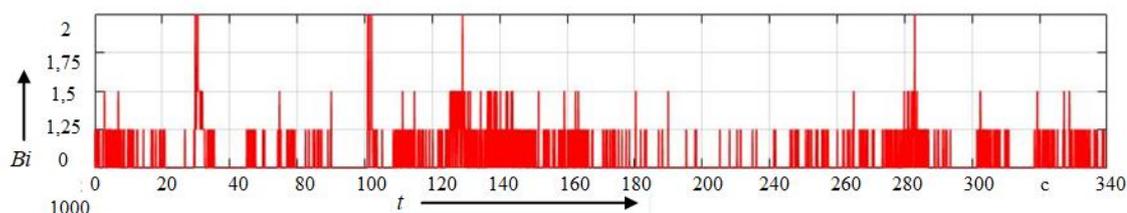


Рис. 13 – Графики коммутации и электрических параметров правого ТЭД (груженный) с заводскими настройками (V_i – интенсивность искрения в баллах согласно ГОСТ 2582-2013; t – продолжительность опытной поездки, с)

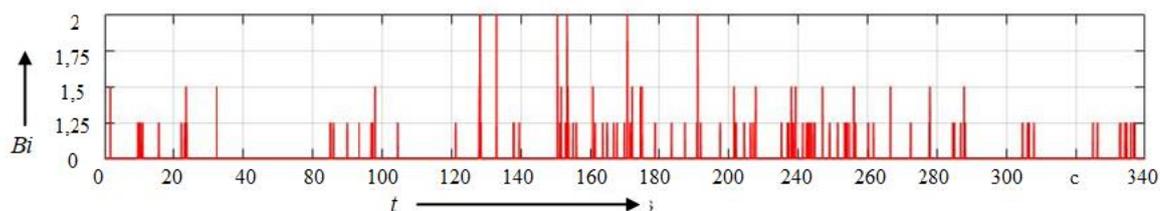


Рис. 14 – Графики коммутации и электрических параметров правого ТЭД (груженный) с учетом параметров, полученных по предложенной методике (V_i – интенсивность искрения в баллах согласно ГОСТ 2582-2013; t – продолжительность опытной поездки, с)

В пятом разделе рассчитано ожидаемое снижение интенсивности изнашивания щеток за счет увеличения времени работы ТЭД с «темной» коммутацией, а также проведен расчет стоимости жизненного цикла ТЭД, дана оценка экономического эффекта от проведенных мероприятий по снижению интенсивности искрения.

Благодаря проведенным работам удалось увеличить время работы ТЭД с «темной» коммутацией на 14,94%, что позволяет экономить на эксплуатационных расходах за счет снижения износа щеток и увеличения межсервисных интервалов технического обслуживания ТЭД.

$$C_3 = K_{п.з.ТО} + K_{п.з.Р} + K_{зч.ТО} + K_{зч.Р}, \quad (17)$$

где C_3 – эксплуатационные расходы при использовании электродвигателя по назначению, тыс. руб

$K_{н.з.ТО}$ – затраты на оплату труда персонала, выполняющего работы по ТО, тыс. руб;
 $K_{н.з.Р}$ – затраты на оплату труда персонала, выполняющего работы по ремонту, тыс. руб;

$K_{зч.ТО}$ – затраты на запасные части и расходные материалы для проведения технического обслуживания, тыс. руб;

$K_{зч.Р}$ – затраты на запасные части для проведения ремонтных и восстановительных работ, тыс. руб.

Данные мероприятия позволяют экономить более 134 тыс. руб на каждом ТЭД за жизненный цикл изделия (10 лет), см. рис. 15.

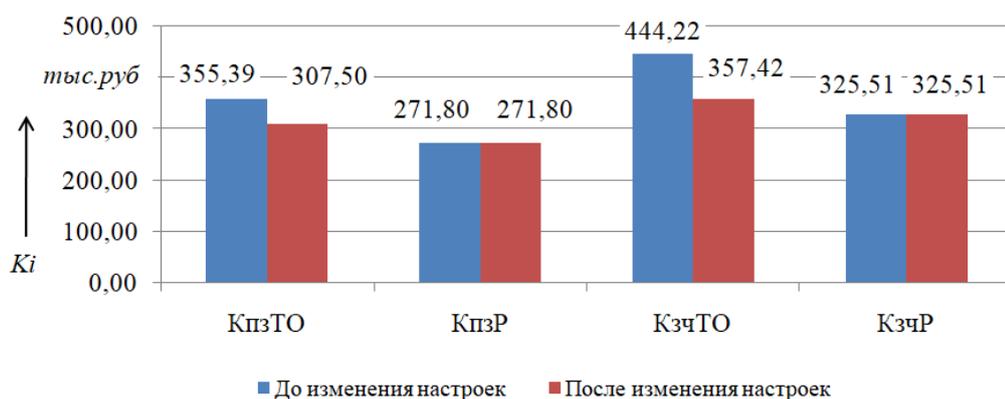


Рис. 15 – Влияние повышения коммутационной устойчивости на эксплуатационные расходы

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены технические и технологические решения, направленные на повышение коммутационной устойчивости ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов с использованием разработанного метода оценки коммутации в условиях эксплуатации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1) В результате анализа отказов ТЭД карьерных самосвалов выявлено, что 72% из них приходится на повышенное биение коллектора, повышенный износ щеток, круговые огни по коллектору и пробой на корпус якоря. При этом одной из наиболее частых причин возникновения отказов ТЭД остается неудовлетворительная коммутация и техническое состояние КЩУ. Для более точной оценки неисправностей ТЭД была предложена классификация отказов по внешним признакам и причинам.

2) Анализ причин неудовлетворительной коммутации ТЭД в условиях завода изготовителя показал, что в стационарном режиме не происходит нарушений в работе КЩУ, однако в процессе эксплуатации наблюдается неудовлетворительная коммутация, которая существенно ухудшает техническое состояние электродвигателя.

3) Разработан метод оценки интенсивности искрения по видеоизображению, который позволяет провести исследование и анализ режимов работы ТЭД и их влияния на процесс коммутации в условиях эксплуатации. Разработано устройство регистрации интенсивности искрения тяговых двигателей в эксплуатации, позволяющее оперативно оценить качество работы КЩУ и получить информацию для более детального анализа.

4) Разработана нелинейная регрессионная модель коммутации ТЭД карьерных самосвалов с учетом режимов эксплуатации, позволяющая определить допустимые режимы

работы автосамосвала и разработать организационные и технические мероприятия направленные на повышение коммутационной устойчивости ТЭД в эксплуатации.

5) Предложена методика определения допустимых режимов работы ТЭД карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации. Методика позволяет на основании анализа экспериментальных данных определить допустимые диапазоны изменения напряжения, тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения, при которых степень искрения не превышает 1½ балла в соответствии с требованиями стандартов.

б) Сформированы и реализованы рекомендации по выбору режимов работы ТЭД карьерных самосвалов, обеспечивающих минимальный уровень искрения. В результате реализации предложенных изменений удалось увеличить время работы ТЭД с «темной» коммутацией с 80,1% до 94,8%, что существенно повышает коммутационную устойчивость и надежность работы КЩУ. Экономическая эффективность применения предложенных разработок заключается в снижении эксплуатационных расходов, за счет возможности увеличения интервалов технического обслуживания до 500 мч и снижения интенсивности износа щеток.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается разработать и реализовать технические мероприятия, направленные на повышение коммутационной устойчивости непосредственно ТЭД, с целью улучшения потенциальных условий и оптимальную настройку добавочных полюсов с учетом режимов эксплуатации.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

а) научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Харламов В. В. Методика оценки состояния коммутации тяговых электродвигателей карьерных самосвалов в условиях эксплуатации / В. В. Харламов, С. Н. Найден, П.К. Шкодун, П.Г. Петров, А. С. Хлопцов // Омский научный вестник. – 2019. – №4 (166). – С. 23–28. – Текст : непосредственный.

2. Харламов В. В. Моделирование процесса коммутации тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала / В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, С. Н. Найден // Омский научный вестник. – 2020. № 2 (170). – С. 31–36. – Текст : непосредственный.

3. Харламов В. В. Методика определения допустимых режимов работы тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации / В. В. Харламов, Ю.В. Москалев, С.Н. Найден // Омский научный вестник. – 2021. – № 2 (176). – С. 36–40. – Текст : непосредственный.

б) патенты на изобретения и регистрация программ для ЭВМ:

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664616 Российская Федерация. *DC Motor Commutation*: № 2019664616: заявлено 31.10.2019: опубликовано (зарегистрировано) 11.11.2019 / С.Н. Найден, А.С. Хлопцов; заявитель ООО «Сибэлектропривод». – 1 с. – Текст: непосредственный.

5. Патент на полезную модель №206379 Российская Федерация, МПК H02K11/20 (2016.01) G01R31/34 (2006.01). Устройство регистрации интенсивности искрения тяговых двигателей в условиях эксплуатации : №2021101748 : заявлено 26.01.2021 : опубликовано 08.09.2021 / Харламов В.В., Москалев Ю.В., Попов Д.И., Найден С.Н.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения». – 3с. : ил. – Текст: непосредственный.

в) научные работы, опубликованные в других изданиях:

6. Исследование интенсивности нагрева контакта щетка-коллектор машины постоянного тока / М.Ф. Байсадыков, А.С. Хлопцов, С.Н. Найден // Современные научные исследования: инновации и опыт: материалы XII Международной научно-практической конференции / Межотраслевой институт «Наука и образование». Екатеринбург, 2015. С. 68–71. – Текст : непосредственный.

7. Методика расчета потерь в зоне контакта щетка-коллектор при электродуговом искрении / В.В. Харламов, С.Н. Найден, А.И. Стретенцев, А.С. Хлопцов // Вестник псковского государственного университета. Серия: технические науки. – 2016. № 4. – С. 51-57. – Текст : непосредственный.

8. Видеоизмерительный комплекс оценки состояния коммутации тяговых электродвигателей карьерного самосвала БЕЛАЗ 75306 в условиях эксплуатации / С.Н. Найден // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы III всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 88–94. – Текст : непосредственный.

9. Анализ процесса коммутации тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала с учетом режима работы двигателя в эксплуатации / В. В. Харламов, Ю.В. Москалев, С.Н. Найден // Проблемы машиноведения: материалы IV международной научно-технической конференции / Омский гос. тех. ун-т. Омск, 2020. – С. 205–210. – Текст : непосредственный.

10. Определение влияния режимов работы тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала на процесс коммутации / В.В. Харламов, С.Н. Найден, Ю.В. Москалев // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2020. – С. 329–336. – Текст : непосредственный.

11. Использование автоматизированного видеоизмерительного комплекса оценки коммутации для настройки системы управления тяговыми электродвигателями / С.Н. Найден, Ю.В. Москалев // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 344–351. – Текст : непосредственный.

12. Регрессионная модель для анализа интенсивности искрения тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала / В.В. Харламов, Ю.В. Москалев, С.Н. Найден // Современные инновации в технике и производстве. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – Псков: Псковский государственный университет, 2021. – С. 31 – 36. – Текст : непосредственный.

13. Прогнозирование интенсивности искрения тяговых электродвигателей постоянного тока с учетом режимов эксплуатации / П.К. Шкодун, С.Н. Найден, В.В. Харламов, А.С. Хлопцов // V Международная научно-техническая конференция «Проблемы машиноведения/ Омский гос. тех. ун-т. Омск, 2021. – С. 132–136. – Текст : непосредственный.