

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Омский государственный университет путей сообщения»  
(ОмГУПС (ОМИИТ))

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

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Харламов Виктор Васильевич

ОМСК 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ И ОТКАЗОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 220 ТОНН.....	12
1.1 Анализ отказов тяговых электродвигателей постоянного тока .....	15
1.2 Классификация причин отказов тяговых электродвигателей карьерных самосвалов БЕЛАЗ .....	20
1.2.1 Недостатки технического обслуживания при эксплуатации ТЭД.....	20
1.2.2 Режимы эксплуатации, приводящие к отказам тяговых .....	23
электродвигателей.....	23
1.2.3 Возможные неисправности при использовании не предусмотренных запасных частей и расходных материалов .....	26
1.2.4 Отказы тяговых электродвигателей из-за производственного брака.....	27
1.2.5 Отказы тяговых электродвигателей, связанные с нарушением в работе электромеханической трансмиссии.....	28
1.3 Анализ работы тяговых электродвигателей автосамосвалов БЕЛАЗ в эксплуатации.....	28
1.4 Причины неудовлетворительной коммутации электродвигателей постоянного тока .....	36
1.4.1 Анализ механического состояния коллектора тягового электродвигателя ЭДП-800 .....	37
1.4.2 Оценка потенциальных условий для ЭДП-800 .....	38
1.4.3 Оценка коммутационных свойств ЭДП-800 .....	41
1.5 Исследование тепловых процессов в КЩУ .....	44
1.6 Выводы по главе.....	47
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ СИГНАЛА.....	49
ВИДИМОГО ИСКРЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ .....	49
ВИДЕОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА.....	49
2.1 Анализ существующих методов и способов оценки состояния .....	49

коммутации .....	49
2.2 Разработка автоматизированного видеоизмерительного.....	55
комплекса оценки коммутации тяговых электродвигателей.....	55
постоянного тока карьерных самосвалов БЕЛАЗ.....	55
2.2.1 Структура и описание работы автоматизированного	
видеоизмерительного комплекса оценки состояния коммутации .....	56
2.2.2 Порядок проведения исследования коммутации тяговых	
электродвигателей карьерного самосвала БЕЛАЗ в условиях .....	60
эксплуатации с применением АВК-ОК .....	60
2.2.3 Обработка сигнала видимого искрения в программе.....	62
«DC motor Commutation».....	62
2.2.4 Алгоритм программы «DC motor Commutation» .....	66
2.3 Выводы по главе.....	70
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОММУТАЦИИ	
КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ	
ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭДП-800 ДЛЯ КАРЬЕРНОГО .....	71
САМОСВАЛА БЕЛАЗ.....	71
3.1.Исходные данные для моделирования процесса коммутации	
коллекторно-щеточного узла тягового двигателя постоянного тока .....	72
3.2 Моделирование работы тягового электродвигателя самосвала БЕЛАЗ в	
тяговом режиме .....	75
3.2.1 Регрессионная модель для моделирования процесса коммутации	
коллекторно-щеточного узла тягового двигателя постоянного тока	
самосвала БЕЛАЗ в тяговом режиме.....	76
3.2.2 Проверка адекватности регрессионной модели.....	83
3.3. Выводы по главе.....	85
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ КОММУТАЦИОННОЙ	
УСТОЙЧИВОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ БЕЛАЗ В	
УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....	86

4.1 Описание методики повышения коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей БЕЛАЗ в условиях эксплуатации .....	90
4.2 Пример реализации методики повышения коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей БЕЛАЗ в эксплуатации .....	91
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ.....	95
КОММУТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЯГОВЫХ .....	95
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БЕЛАЗ В .....	95
ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	95
5.1 Расчет интенсивности износа щеток при эксплуатации тяговых электродвигателей и факторы, влияющие на износ щеток.....	95
5.2 Расчет стоимости жизненного цикла тягового электродвигателя ЭДП-800 .....	98
5.3 Выводы по главе.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	108
Список сокращений и условных обозначений .....	110
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	111
Приложение А .....	131
Приложение Б .....	132
Приложение В.....	134
Приложение Г .....	135

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** В соответствии с программой развития угольной промышленности России на период до 2035 года предусмотрены меры по повышению производительности и надежности объектов инфраструктуры добывающих предприятий [1]. 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 [43]. 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 (ЭМТ), из них до 34% приходится на долю тяговых электродвигателей (ТЭД). В качестве ЭМТ на карьерных самосвалах БЕЛАЗ применяются трансмиссии переменного-переменного и переменного-постоянного тока. Несмотря на ряд преимуществ ЭМТ переменного-переменного тока, среди самосвалов грузоподъемностью 130-240 наиболее популярными являются карьерные самосвалы с ЭМТ переменного-постоянного тока, это обусловлено более низкой ценой и наличием развитой инфраструктуры для обслуживания составных частей такой ЭМТ [42].

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 «техническое состояние коллекторно-щеточного узла (КЩУ) является одним из критических элементов, определяющих надежность ТЭД, и карьерного самосвала в целом» [13, 22, 47, 111].

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 [2].

**Степень разработки 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, Е. Шоберт, В. Д. Авилов, В. Т. Касьянов, О. Г. Вегнер, Р. Ф. Бекишев, А. С. Курбасов, А. И. Скороспешкин, Э. К. Стрельбицкий, В. В. Толкунов, В. В. Фетисов, С. И. Качин, В. В. Харламов, И. В. Плохов 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, но такая проверка должна быть согласована с заказчиком.

Разработанные инструментальные методы и 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.

**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 и сформировать рекомендации по повышению коммутационной устойчивости.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является тяговые электродвигатели постоянного тока карьерного самосвала БЕЛАЗ; 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 14, Microsoft Office 2013, Matlab 2019*.

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 автосамосвалов 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) метод оценки состояния коммутации ТЭД, позволяющий определить интенсивность искрения щеток ТЭД карьерных автосамосвалов в условиях эксплуатации по видеоизображению;

3) регрессионная модель, позволяющая оценить воздействия параметров режима работы ТЭД на интенсивности искрения щеток;

4) методика повышения коммутационной устойчивости ТЭД постоянного тока автосамосвала 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» (Приложение А – В).

**Апробация работы.** Основные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы докладывались и обсуждались на XII международной научно-практической конференции «Наука и образование», г. Екатеринбург, 2015г; 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 способа 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, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка из 129 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 135 страниц, 20 таблиц и 43 рисунка.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ И ОТКАЗОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 220 ТОНН

В карьерных самосвалах БЕЛАЗ 75306 грузоподъемностью 220-240 тонн, используется тяговый электропривод (ТЭП) переменного-постоянного тока (рисунок 1.1) [51, 53, 54].

ТЭП обеспечивает управление процессом преобразования механической энергии, вырабатываемой дизелем, в электрическую энергию и обратного преобразования электрической энергии в механическую, которая используется на ведущих колесах для создания регулируемого вращающего и тормозного момента [13].

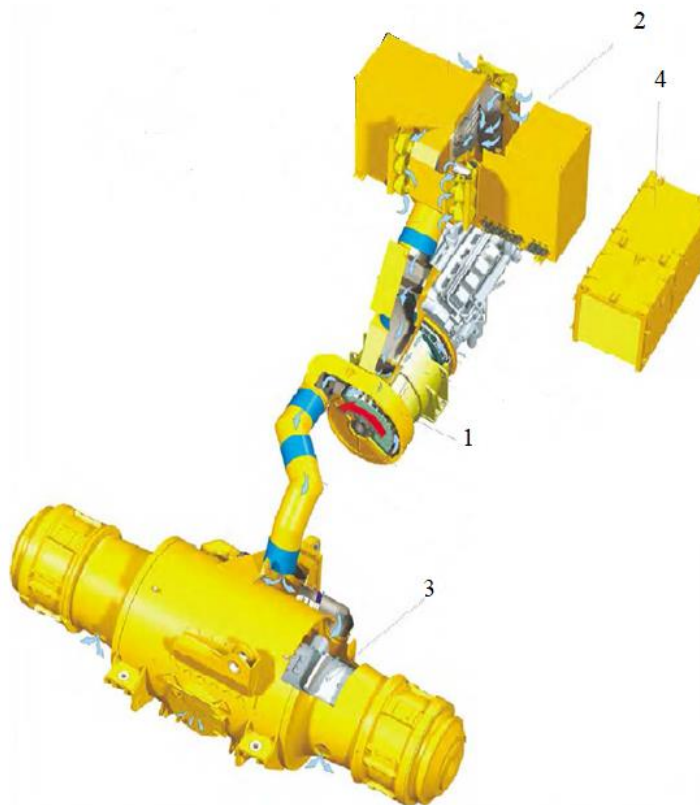


Рисунок 1.1 – 3D изображение составных частей тягового  
электропривода БЕЛАЗ переменного-постоянного тока

(1 – тяговый генератор; 2 – шкаф преобразователей с аппаратурой  
управления; 3 – тяговый электродвигатель; 4 – установка вентилируемых  
тормозных резисторов)

Тяговый синхронный генератор переменного тока приводится во вращение дизельным двигателем. Тяговый генератор имеет две электрически не связанных между собой трехфазных обмоток, которые соединены в звезду, а также однофазную вспомогательную обмотку самовозбуждения, уложенную в пазах статора. Концы обмотки самовозбуждения подключаются к тиристорному регулятору возбуждения, который в свою очередь питает через контактные кольца обмотку возбуждения, размещенную на роторе тягового генератора. Статорные трехфазные обмотки тягового генератора подключены к входным зажимам выпрямителей. Выпрямители состоят из диодов с охладителями, расположенными в центральном отсеке шкафа с пускорегулирующей аппаратурой.

Тяговые электродвигатели электромотор-колес постоянного тока подключаются к выходным зажимам выпрямителей. ТЭД имеют последовательное возбуждение, работают в двигательном и в генераторном режиме (в режиме электродинамического торможения на тормозные резисторы  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$ ), с принудительным охлаждением, реверсивные, оборудованы датчиками контроля температуры подшипниковых узлов и компенсационной обмотки.

В качестве тяговых электродвигателей, применяемых в электроприводе переменного-постоянного тока карьерных самосвалов БЕЛАЗ серии 75306 применяются электродвигатели постоянного тока ЭДП-800 производства ООО «Сибэлектропривод» (г. Новосибирск) и ДК-724 производства ЗАО «ПТФК «ЗТЭО» (г. Набережные Челны) [52].

ТЭД являются взаимозаменяемыми по присоединительным размерам, но имеют разные характеристики, поэтому не допускается установка разных производителей в одном шасси. Характеристики применяемых ТЭД приведены в таблице 1.1 и 1.2; изображения на рисунке 1.2 а, б.

Таблица 1.1 – Характеристики тяговых электродвигателей

Наименование	Значение	
	ДК-724С	ЭДП-800 УХЛ2
Мощность, кВт	560	800
Напряжение, В	700	890
Ток, А	900	980
Номинальная частота вращения, с <sup>-1</sup>	590	600
Максимальная частота вращения, с <sup>-1</sup>	1850	2000
Коэффициент полезного действия, %	92	92
Класс нагревостойкости изоляции обмотки якоря	Н	Н
Класс нагревостойкости изоляции катушки главных и добавочных полюсов	F	F
Режим работы	S2	S2
Число полюсов	6	6
Масса, кг	4100	4500

Таблица 1.2– Конструктивные особенности ТЭД

Узел	Параметр	ДК-724	ЭДП-800
1	2	3	4
Якорь	Число кол. Пластин	324	324
	Размеры провода	2,0х7,1 ППИК-2	2,0х7,1 ППИК-2
	Размеры уравнивателя	2х3,55 ПСДК	2х3,55 ПСДКТ
	Витков в секции	1	1
	Шаг по пазам	1-14	1-14
	Шаг по коллектору	1-2	1-2
	Шаг по уравнителям	1-109	1-109
	Длина пакета железа, мм	500	550
Полюс главный	Катушка ГП, витков	10	13
	Размеры провода	2,5х50,0	2,44х55,0
	Параллельных проводников	2	2
	Длина пакета железа, мм	500	550
	Воздушный зазор, мм	5	5
Компенсационная обмотка	Катушка компен., витков	6	6
	Размеры провода	2,83х26,3	2,83х26,3
	Параллельных проводников	2	2
	Длина пакета железа, мм	500	550

Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4
Полюс добавочный	Катушка ДП, витков	6	6
	Размеры провода	5,6х14	5,00х35,00
	Параллельных проводников	2	2
	Длина пакета железа, мм	500	540
	Магнитный шунт	-	+
	Воздушный зазор, мм	6	11
	Прокладки	Л63, 12 мм	Л63-5 мм Л63-5+3 мм Ст-4 мм
Щеткодержатель	Размер и количество окон	3 окна 25х32	3 окна 25х40



а)



б)

Рисунок 1.2 – Внешний вид тяговых электродвигателей постоянного тока  
ЭДП-800 (а) и ДК-724 (б)

### 1.1 Анализ отказов тяговых электродвигателей постоянного тока

Отказ любой из систем влияет на коэффициент технической готовности (КТГ), который является важным технико-экономическим показателем при эксплуатации карьерных самосвалов[5], т.к. его значение указывается в нормативно-технической документации, а также в договорных отношениях. Обычно предъявляется требование по обеспечению КТГ на уровне не ниже 0,95.

Для вычисления КТГ пользуются формулой (1.1) [5],

$$K_{ТГ} = \frac{K\Phi B - T_{рем} - T_{орг}}{K\Phi B}, \quad (1.1)$$

где  $K\Phi B$  – календарный фонд времени, ч;

$T_{рем}$  – время восстановления работоспособности, ч;

$T_{орг}$  – общее время организационных простоев, ч.

Если оценивать отдельно КТГ для каждой из систем самосвала, то из формулы (1.1) видно, что определяющим фактором является время восстановления работоспособности, которое сильно зависит от сложности технических операций по выполнению ремонта. Как правило, вышедшие из строя узлы заменяют на исправные из обменного фонда, это позволяет сократить время простоя карьерного самосвала. Наиболее трудоемкими операциями являются работы по замене дизеля, тягового генератора и тяговых электродвигателей, т.к. требует дополнительного демонтажа оборудования самосвала, поэтому к этим узлам предъявляются особые требования по надежности. По данным полученным из эксплуатации КТГ дизельных силовых установок находится в пределах 0,93-0,95, тяговых генераторов – 0,95-0,97, и тяговых электродвигателей на уровне 0,9-0,95.

По имеющимся данным, собранным в разных угольных разрезах, на долю отказа тягового электропривода приходится до 18% всех отказов (рисунок 1.3) из них 34% приходится на ТЭД [18].

Исходя из того, что ТЭД является дорогим узлом, а его выход из строя вызывает длительные простои и приводит к существенному снижению КТГ, то вопрос о повышении его надежности является весьма актуальным.

Для повышения качества и выявления наиболее слабых мест в конструкции ТЭД ЭДП-800 на заводе ООО «Сибэлектропривод» было принято решение провести мониторинг выпускаемой продукции в эксплуатации.



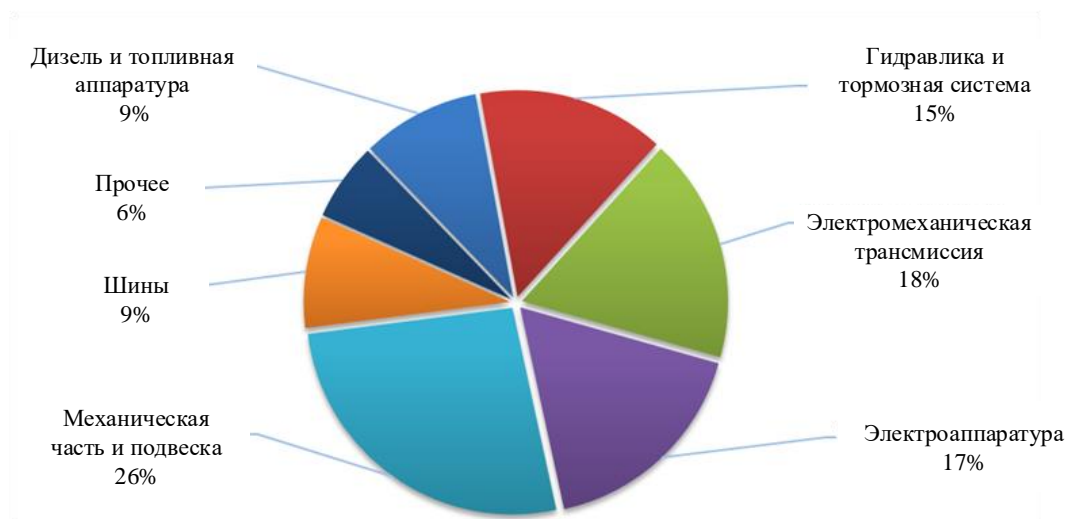


Рисунок 1.3 – Распределение отказов по системам карьерного самосвала

По данным рекламационной работы ООО «Сибэлектропривод» за 2016-2020 гг автором проведен анализ отказов ТЭД. Для ТЭД ЭДП-800 характерны отказы, приведенные в таблице 1.3.

Таблица 1.3– Виды отказов ТЭД ЭДП-800

Виды отказов и повреждений	Количество отказов, шт	Процент отказов, %
1	2	3
Повышенное биение (потемнение) коллектора (повышенный износ щеток)	32	42,1
Пробои изоляции обмотки якоря (замыкание на конус нажимной)	11	14,5
Круговой огонь	9	11,8
Выход из строя подшипников	5	6,6
Межвитковые замыкания обмотки якоря	4	5,3
Повреждение щеткодержателей	4	5,3
Прочие повреждения	3	3,9
Прогар коллектора якоря	3	3,9
Пробои изоляции главных полюсов (ГП)	2	2,6
Пробои изоляции компенсационных обмоток (КО)	1	1,3
Разрушения бандажей якорей	1	1,3

Окончание таблицы 1.3

1	2	3
Механическое повреждение поверхности коллектора	1	1,3
Пробой изоляции дополнительных полюсов (ДП)	0	0,0
Замыкание межкатушечных соединений и повреждение соединительных проводов	0	0,0
Повреждение изоляции выводных кабелей	0	0,0

Анализа диаграммы Парето (рисунок 1.4) позволяет сделать вывод о том, что причинами 80 % отказов тяговых электродвигателей ЭДП-800 являются: радиальное биение коллектора (повышенный износ щеток), круговой огонь по коллектору, пробой изоляции обмотки якоря (пробой на конус нажимной) и повреждение подшипников.

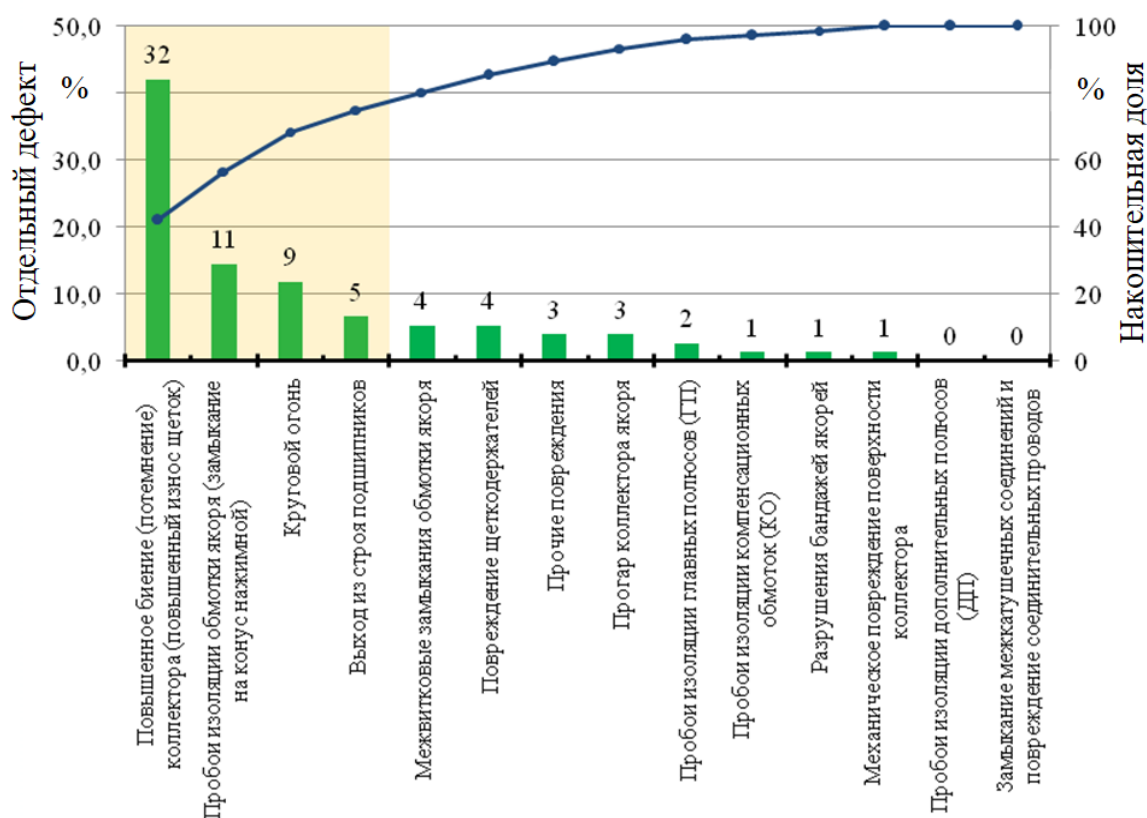


Рисунок 1.4 – Диаграмма Парето по видам отказов ЭДП-800

Повышенное биение коллектора может быть обусловлено нарушением его монолитности под действием тепловых и центробежных деформаций, неисправностью подшипников электродвигателя, неверной центровкой якоря, деформацией вала ротора, неравномерным износом дорожек скольжения из-за неудовлетворительной коммутации [22, 117, 118].

Пробой изоляции якоря включают в себя: пробой на нажимной конус якоря; пробой катушки якоря в лобовой, пазовой части или в «ножке». Прогар по бандажу со стороны коллектора является следствием многих факторов, основными из которых является возникновение перенапряжений, превышение допустимой температуры коллектора и обмотки, а также старение и (или) разрушение изоляции. Комплексное воздействие проявляется в том, что под воздействием повышенной температуры, вибрации и ударов развивается трещина между торцом коллектора и бандажом, в которых скапливается токопроводящая пыль и влага, а при перенапряжениях или резких изменениях тока якоря, под воздействием нескомпенсированной реакции якоря происходит перенапряжение между соседними ламелями, что приводит к возникновению тлеющего разряда, разрушающего изоляцию нажимного конуса и приводит пробоем на корпус [37].

Понижение сопротивления изоляции из-за загрязнения поверхности коллектора, при наличии перенапряжений и интенсивного искрения на сбегавшем крае щетки, может вызвать круговой огонь с перебросом на корпус и выгоранием деталей машины, попавших в область горения дуги.

Повреждение подшипника может быть связано с масляным голоданием в связи с нарушением интервалов пополнения смазки или использованием некачественной смазки, а также из-за нарушения правил монтажа подшипников или нарушением работы смежных узлов (тягового редуктора).

Межвитковые замыкания обмотки якоря, как правило, встречаются редко и происходят из-за некачественной собственной изоляции провода или при повреждении изоляции катушки якоря при укладке или транспортировке.

## 1.2 Классификация причин отказов тяговых электродвигателей карьерных самосвалов БЕЛАЗ

Причинно-следственные связи выхода из строя ТЭД, карьерных самосвалов в эксплуатации приведены на диаграмме Исикавы [11, 27, 103] (рисунок 1.5).

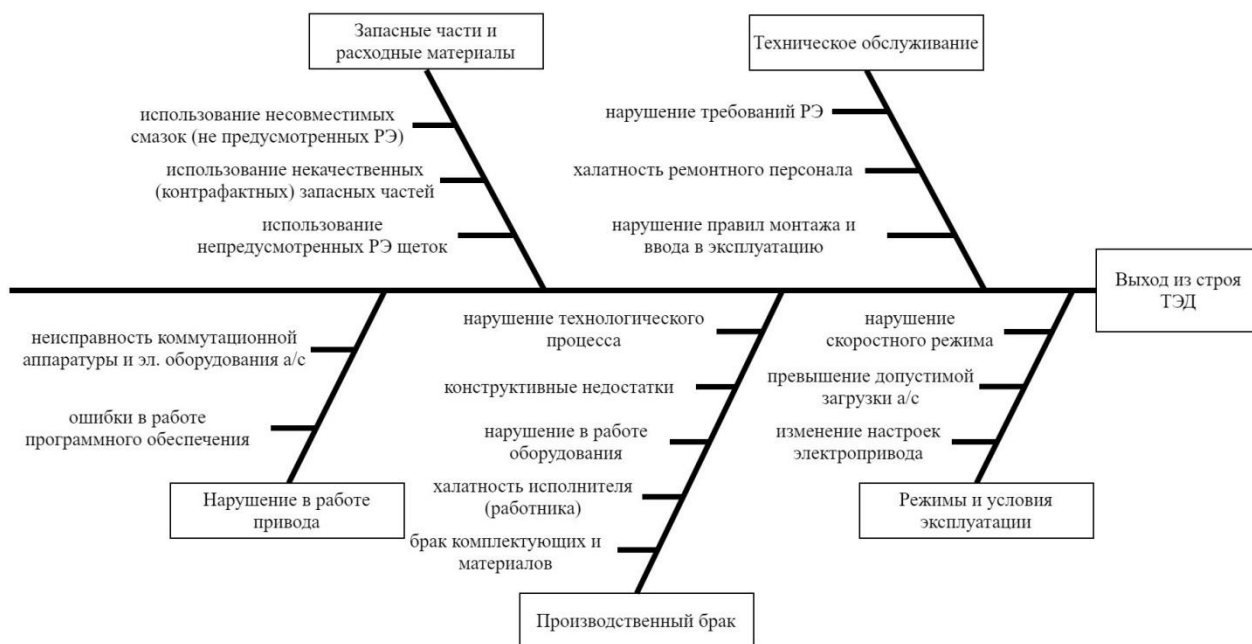


Рисунок 1.5 – Причинно-следственные связи выхода из строя ТЭД

### 1.2.1 Недостатки технического обслуживания при эксплуатации ТЭД

Некачественное техническое обслуживание, проявляется:

1. Нарушение требований руководства по эксплуатации, особенно в части интервалов и объема обслуживания.

Нарушение интервалов обслуживания – согласно руководству по эксплуатации, техническое обслуживание состоит из ежедневных осмотров (ЕО) и технического обслуживания 1, 2 и 3 объемов (ТО-1, ТО-2 и ТО-3). Для сокращения времени простоя и выполнения нормы перевозок, эксплуатирующие организации зачастую увеличивают межсервисный интервал, что способствует возникновению постепенных и внезапных отказов. При увеличении межсервисных интервалов может быть

упущена замена изношенных щеток, произойти недопустимое загрязнение межламельного пространства, повышенный нагрев подшипниковых узлов вследствие дефицита смазки.

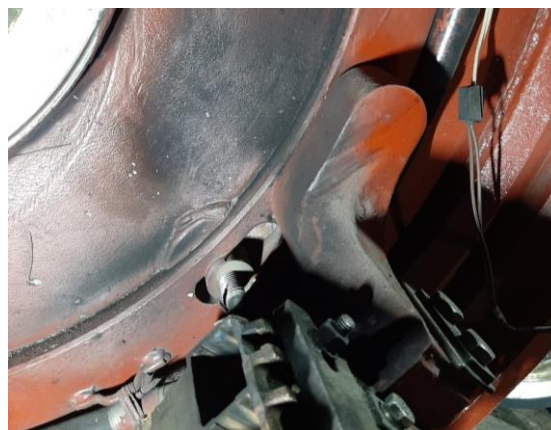
Нарушение объема обслуживания – в руководстве по эксплуатации прописаны мероприятия, которые требуется выполнять при том или ином объеме ТО, но реально не всегда они выполняются. Причины нарушения объема обслуживания: халатность исполнителя; стремление сократить время ТО; недостаточная квалификация обслуживающего персонала; отсутствие необходимых расходных материалов, инструментов и оборудования.

По результату мониторинга выпускаемой продукции основными замечаниями к качеству проведения ТО являются:

- загрязнение на поверхности бандажа конуса якоря и на поверхности изоляторов щеткодержателей – что способствует пробоем электрической дуги на корпус ТЭД, способствует повреждению бандажа конуса якоря, разрушению изоляции конуса якоря, разрушению щеток и повреждению поверхности коллектора (рисунок 1.6).



а)



б)

Рисунок 1.6 – Последствия некачественного обслуживания

а) пробой по поверхности бандажа конуса якоря; б) пробой по поверхности изолятора щеткодержателя

- несвоевременная замена щеток – может приводить к круговому огню в следствии полного истирания щеток и замыканию коллекторных пластин проводниками щетки (рисунок 1.7).



а)



б)

Рисунок 1.7 – Последствие кругового огня

- зависание щеток в окне щеткодержателя – приводит к появлению неудовлетворительной коммутации, перераспределению плотности тока под каждой из щеток, и как следствие снижение ресурса КЩУ.
- игнорирование операции по измерению сопротивления изоляции – данная операция предназначена для своевременного выявления низкого сопротивления изоляции и предупреждения пробоя на корпус или замыкания между обмоток. Однако игнорирование контроля сопротивления изоляции приводит к серьезным повреждениям и дорогостоящему ремонту, связанному с заменой катушек и восстановлением вышедших из строя узлов.
- игнорирование операции по измерению биения коллектора – не позволяет вовремя диагностировать ухудшение механического контакта щетка-коллектор, что приводит к ухудшению коммутации и ускоренному износу щеток и самого коллектора, в особенно запущенных случаях может приводить к возникновению кругового огня. Причиной игнорирования этой операции является отсутствие измерительного инструмента и сложность проведения самой операции. Для измерения биения коллектора необходимо произвести вращение ТЭД, но это возможно сделать только при извлечении торсионного вала редуктора, либо при подъеме заднего моста и прокручивании якоря ТЭД вместе с редуктором и колесом автосамосвала.
- игнорирование операции по измерению усилия нажатия щеткодержателей – несвоевременный контроль, может приводить к неравномерному износу щеток и ухудшению коммутации.

2. Халатность ремонтного и обслуживающего персонала. Забытые инструменты и материалы в корпусе ТЭД, неустановленные щетки в окна щеткодержателя, незатянутые болты являются следствием невнимательности обслуживающего персонала, но проявляются с регулярной постоянностью и приводят к достаточно тяжелым выходам из строя – круговому огню, повреждению изоляции.

3. Нарушение правил хранения, транспортировки, монтажа и подготовке электродвигателя к эксплуатации также является серьезной и распространенной проблемой. Транспортировка электродвигателя вдоль движения без фиксирующего устройства якоря приводит к появлению царапин на обойме подшипника, что делает невозможным его нормальную эксплуатацию в дальнейшем. При длительном хранении требуется защитить электродвигатель от атмосферных осадков и рекомендуется проложить прокладки из фторопласта между коллектором и щетками. Пренебрежение рекомендациями по хранению приводит к появлению патины и коррозии коллектора, которые не устраняются путем протирки спирто-бензиновой смесью и требуют операции по шлифовке. Шлифовка не выполняется или выполняется неправильно, что приводит к неудовлетворительной коммутации на «поврежденных» ламелях и прогрессированию электроэрозионного износа коллектора. Атмосферные осадки могут вызывать коррозию стальных частей щеткодержателей, что приводит к заклиниванию или неравномерному движению курков, при этом не обеспечивается равномерное нажатие на щетки.

### **1.2.2 Режимы эксплуатации, приводящие к отказам тяговых электродвигателей**

Еще одной весомой причиной выхода из строя тяговых электродвигателей являются нарушение режимов эксплуатации, которые проявляются в следующем:

1. Превышение допустимой загрузки автосамосвала (рисунок 1.8), что приводит к увеличению пусковых токов и тока силовой цепи в тяговом режиме, необходимости применять более интенсивное торможение на спусках. Протекание



большого пускового тока через неподвижный коллектор может вызывать подгар ламелей, что делает невозможной безыскровую работу КЩУ и ведет к ускоренному износу щеток и коллектора и как следствие преждевременному демонтажу ТЭД для проточки коллектора.

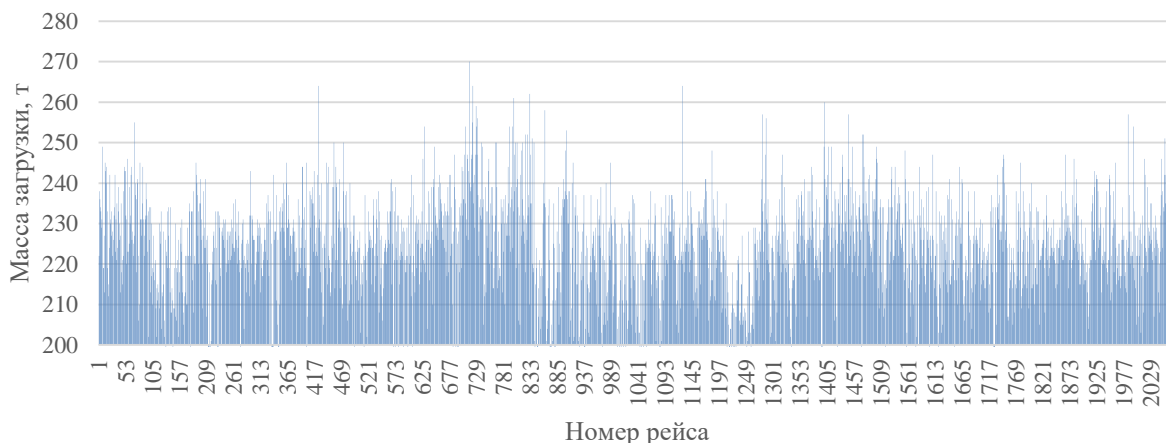


Рисунок 1.8 – Данные по загрузке автосамосвала БЕЛАЗ 75306

2. Изменение настроек системы управления ЭМТ – распространенное и грубое нарушение эксплуатации. Для улучшения каких-либо свойств вносятся изменения в настройки системы управления, что далеко не всегда положительно сказывается на надежности ЭМТ.

Для улучшения электрического торможения изменяются настройки в таблице ограничения напряжения динамического торможения по условиям коммутации (рисунок 1.9)

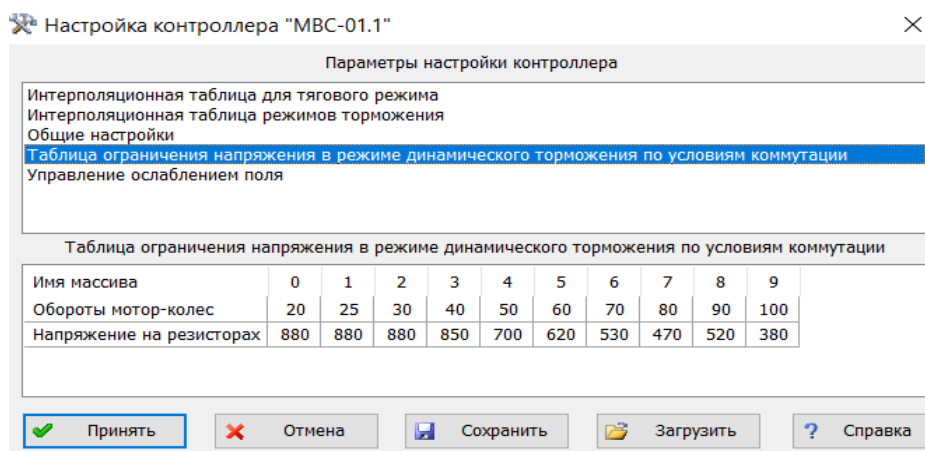


Рисунок 1.9 – Окно настройки контроллера MBC



При увеличении допустимого напряжения на высоких оборотах существенно ухудшается коммутация до 2-3 баллов, что может приводить к подгару ламелей, разрушению щеток и способствует возникновению кругового огня. При затяжном спуске, длительное протекание тока с неудовлетворительной коммутацией может вызвать перегрев коллектора и обмоток ТЭД, к тому же может произойти перегрев УВТР и выход его из строя, в этом случае самосвал практически остается без тормозов, т.к. на скорости более 10 км/ч механические тормоза не эффективны.

Изменение ограничения скорости – негативно влияет на работу ТЭД, т.к. на высоких оборотах ухудшается коммутация вследствие недопустимо большого ослабления поля. При длительном превышении допустимых оборотов ТЭД, под действием центробежных сил, может нарушиться механическая прочность коллектора и бандажей (рисунок 1.10).

Для улучшения разгона, часто снижают скорость включения режима ослабления поля, при этом не учитываются другие параметры системы управления. В результате разгон карьерного самосвала происходит немного быстрее, но из-за ограничения мощности происходит выключение-включение возбуждения генератора и как следствие импульсный характер тока силовой цепи, что негативно сказывается на коммутации ТЭД.



а)



б)

Рисунок 1.10 – Возможные последствия превышения допустимых

оборотов а) разрушение коллектора, б) разрушение бандажа якоря со стороны привода

### **1.2.3 Возможные неисправности при использовании не предусмотренных запасных частей и расходных материалов**

Использование неподходящих или некачественных запасных частей и расходных материалов может приводить к выходу из строя ТЭД.

1. Использование непредусмотренных эксплуатационной документацией марок или конфигурации электрических щеток. Щетка является активным элементом скользящего контакта МПТ и во многом определяет качество работы КЩУ, поэтому применять другие щетки без проведения серьезных испытаний крайне нежелательно, а в гарантийный период недопустимо, т.к. может стать причиной снятия гарантии. Важным элементом щетки так же является форма накладки, т.к. влияет на нажатие.

2. Серьезной проблемой является подделка запасных частей и расходных материалов или их низкое качество. Наиболее часто подделывают электрические щетки, в этом случае щетка не выполняет своих свойств и может приводить к серьезному выходу из строя элементов КЩУ. Серьезную проблему представляет продажа неликвидных или восстановленных подшипников, с заведомо низким ресурсом. Заклинивание подшипника, как правило приводит к серьезным повреждениям ТЭД, как правило происходит перегрев посадочных мест в ступице и на валу, повреждение коллектора, обмоток статора, что приводит к дорогостоящему ремонту.

3. Одной из причин выхода из строя подшипниковых узлов ТЭД является использование несовместимых смазок. В подшипниковых узлах ЭДП-800 заложена пластичная смазка ЛИТОЛ-24 на основе минерального масла и литиевого загустителя, но для унификации обслуживания бывает используют другие смазки, которые при этом могут не совместимы друг с другом. Например, могут применять смазку с загустителем на основе полимочевины, которая не смешивается с литиевыми смазками, в таком случае не обеспечиваются необходимые свойства смазочных материалов и происходит перегрев и выход из строя подшипникового узла.

### 1.2.4 Отказы тяговых электродвигателей из-за производственного брака

Брак при изготовлении ТЭД, тоже имеет место быть, согласно статистики ООО «Сибэлектропривод» число принятых рекламаций по гарантийным электродвигателям ЭДП-800 не превышает 3%.

Наиболее серьезными причинами выхода из строя по вине производителя являются конструктивные недостатки и нарушение технологического процесса изготовления, т.к. приводят к массовому браку. Как правило, такие недоработки выявляются на опытных образцах или в первые годы эксплуатации.

1. Конструктивные недостатки являются самыми серьезными причинами выхода из строя по вине производителя, т.к. приводят к массовому браку. Для ЭДП-800 характерными «детскими» болячками были: не монолитность коллектора и неудовлетворительная коммутация. В результате изменили конструкцию коллектора с арочного нажимного на арочный болтовой, и изменили технологию формовки коллектора. Для улучшения коммутации провели оптимальную настройку добавочных полюсов по зонам безыскровой работы [101].

2. Нарушение технологии изготовления узлов и деталей может приводить как к массовым, так и к единичным отказам, зависит от того, как быстро было обнаружено несоответствие и сколько несоответствующих нормативной документации изделий было выпущено. Нарушение технологии сборки, обычно, приводит к единичным отказам и связано с недостаточной квалификацией исполнителя, его невнимательности или халатностью

3. Основными причинами являются недостаточная квалификация исполнителя, халатность или сбои в рабочей программе станка (для обрабатываемых деталей).

4. К производственным причинам так же можно отнести недостаточную квалификацию исполнителя, халатность или сбои в работе станка (для обрабатываемых деталей).

5. Частой причиной производственного брака является использование некачественных комплектующих и материалов, т.к. провести полную проверку их технических характеристик не представляется возможным.

Косвенными причинами попадания брака к потребителю является не выполнение или несовершенство контрольных мероприятий, к которым входной контроль комплектующих и материалов, приемка изготовленных узлов контролерами ОТК и проведение приемо-сдаточных испытаний, что направленно на своевременное обнаружение дефектных изделий. Однако скрытые дефекты сложно обнаружить, в таком случае они могут проявиться в эксплуатации с течением времени или под действием других факторов.

### **1.2.5 Отказы тяговых электродвигателей, связанные с нарушением в работе электромеханической трансмиссии**

Еще одной причиной выхода из строя ТЭД является нарушение в работе привода и других систем карьерного самосвала. Нарушение в работе программного обеспечения, коммутационной аппаратуры, устройств управления и защиты может привести к недопустимым режимам работы привода, что может стать причиной постепенного или внезапного отказа ТЭД. Встречается нарушение нормальной работы ТЭД при выходе из строя защитного конденсатора выпрямителя, при этом по якорной цепи протекает пульсирующий ток и существенно ухудшается коммутация. Также не редко электродвигатели выходят из строя из-за пожара в заднем мосту по причине заклинивания дисковых тормозов и из-за попадания тормозной жидкости в корпус ТЭД при обрыве тормозной магистрали.

## **1.3 Анализ работы тяговых электродвигателей автосамосвалов БЕЛАЗ в эксплуатации**

По результатам проведенных осмотров и измерений основной причиной радиального биения коллектора является электроэрозионный износ коллектора

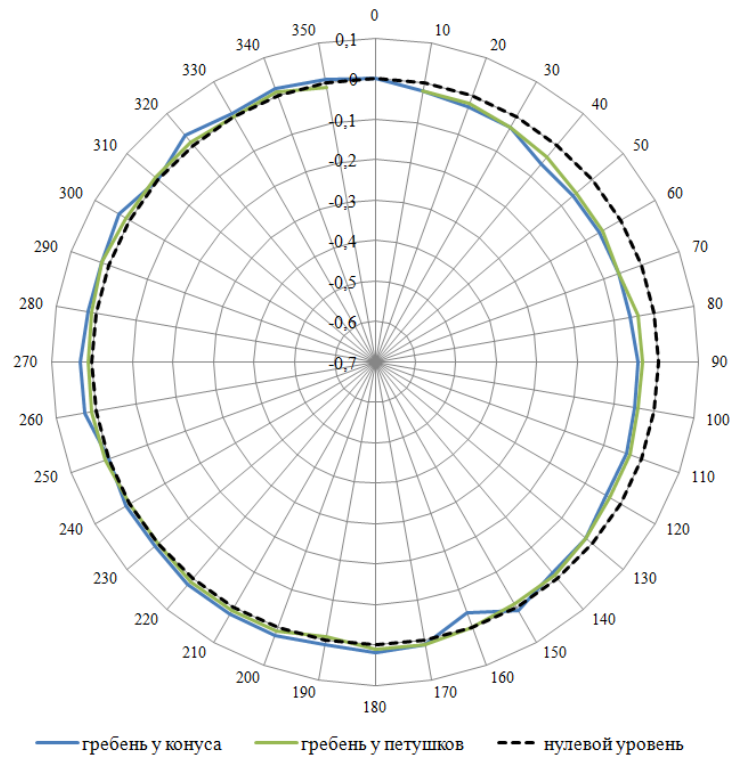
вследствие неудовлетворительной коммутации. На неудовлетворительную коммутацию указывает состояние электрощеток на сбегающем крае которых образуются подгары (рисунок 1.11), также этот факт подтверждают снятые профилограммы проблемных ТЭД, на рисунке 1.12 видно, что значительное биение имеется на рабочих дорожках коллектора (до 1,1 мм), но при этом биение «на гребнях» (на нерабочей части коллектора) не превышает устанавливаемой в нормативно-технической документации (не более 0,08мм).



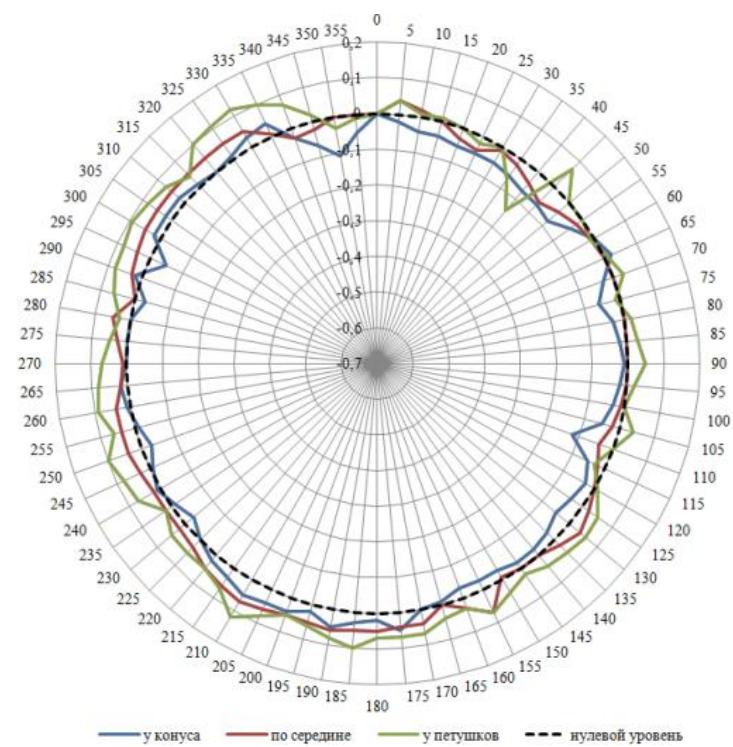
Рисунок 1.11 – Следы подгаров на сбегающем крае щеток

О влиянии коммутации на ресурс КЩУ и электродвигателей постоянного тока в целом написано много трудов [29, 56, 58, 119, 120]. Основной вывод по этому вопросу – неудовлетворительная коммутация значительно увеличивает износ контактных элементов и сокращает ресурс ТЭД.

Повышенный износ щеток является следствием неудовлетворительной коммутации, приводящий к ускорению взаимосвязанных процессов электроэрозионного и механического износа.



а)



б)

Рисунок 1.12 – Измерение профиля коллектора тягового электродвигателя ЭДП-800 зав. № 170 а) измерения по нерабочей части коллектора; б) измерения по рабочей части коллектора

Скорость износа щеток можно принять как показатель стабильности и качества работы тягового электродвигателя, к тому же затраты на их замену – это прямые эксплуатационные расходы. Для оценки скорости износа щеток проводились контрольные замеры на карьерном самосвале БЕЛАЗ 75306 ш.1207 на ЭДП-800 зав.№№321,322. Оба ТЭД были установлены новыми и показали схожие результаты, на рисунке 1.13 приведен график износа для одного из щеткодержателей ЭДП-800 зав.№321. График истирания щеток свидетельствует о замене щеток с интервалом, не превышающим 20 тыс. км, при требовании в 50 тыс. км.

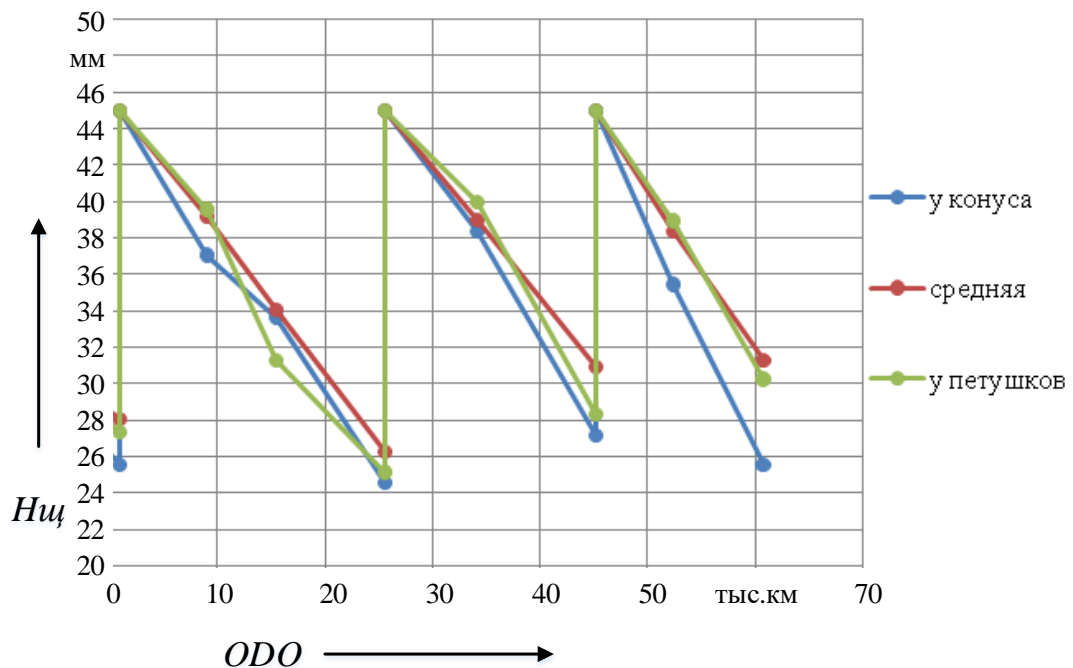


Рисунок 1.13 – График износа щеток ЭДП-800

( $H_{щ}$  – высота щетки,  $ODO$  – пробег самосвала)

Система управления тяговым электроприводом СУТЭП или СКАТ позволяет проводить мониторинг работы элементов ЭМТ, т.к. измеряет и обрабатывает множество переменных участвующих в управлении, в том числе переменные характеризующие работу ТЭД, пример записи графика переменных, характеризующих работу ТЭД приведен на рисунок 1.14.



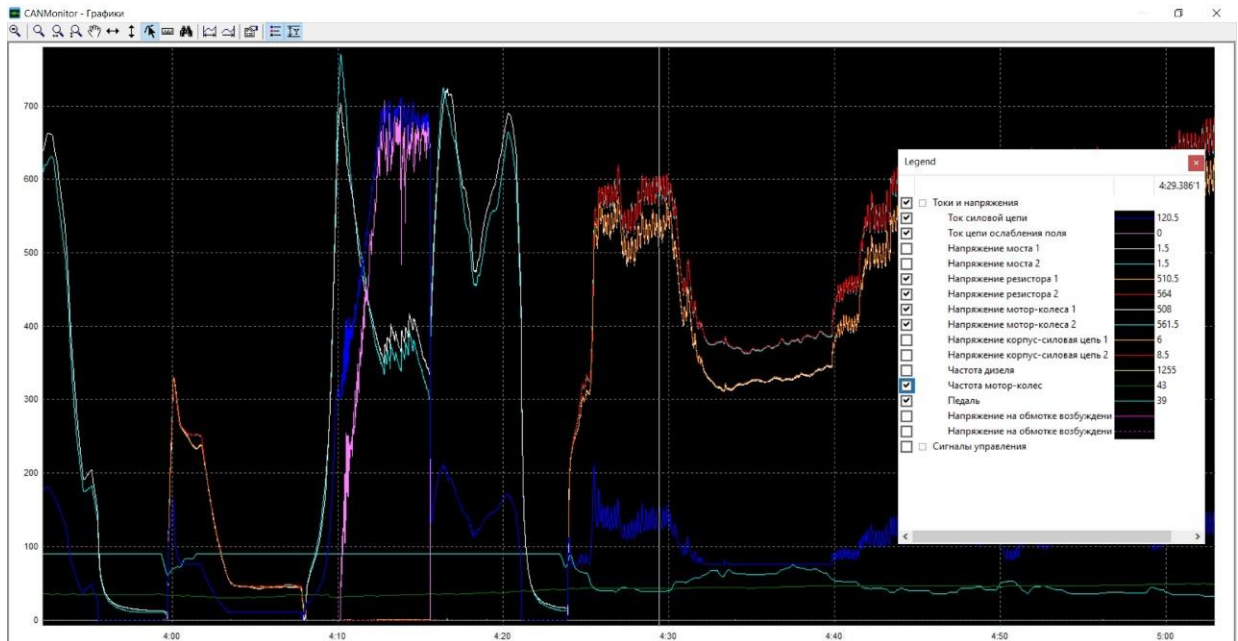


Рисунок 1.14 – Окно программы Can Monitor

Программа «Can Monitor» [124, 128] позволяет экспортировать результат мониторинга в формат .mat (разрешение программы «Matlab»), в которой можно провести необходимый анализ. По результату анализа можно сделать вывод, что продолжительность режимов работы ТЭД зависит от условий его эксплуатации, т.е. от величины и продолжительности уклонов, радиусов поворотов и т.д. Однако по усредненным данным для конкретного угольного разреза характерно распределение режимов, приведенное на рисунок 1.15.

В тяговом режиме с полным полем возбуждения ток якоря изменялся в диапазоне от 0 до 800А, напряжение ТЭД от 0 до 1000В, частота вращения от 0 до 1600 об/мин и коэффициент пульсации в основном находится в диапазоне от 0 до 0,2 (рисунок 1.16).



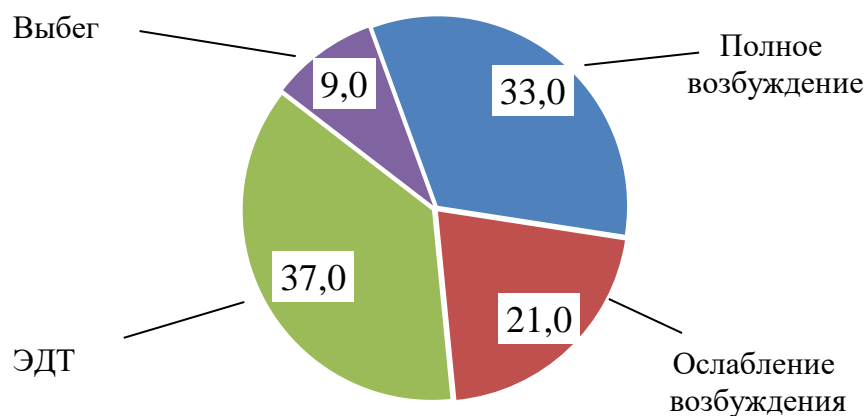


Рисунок 1.15 – Продолжительность режимов работы ТЭД

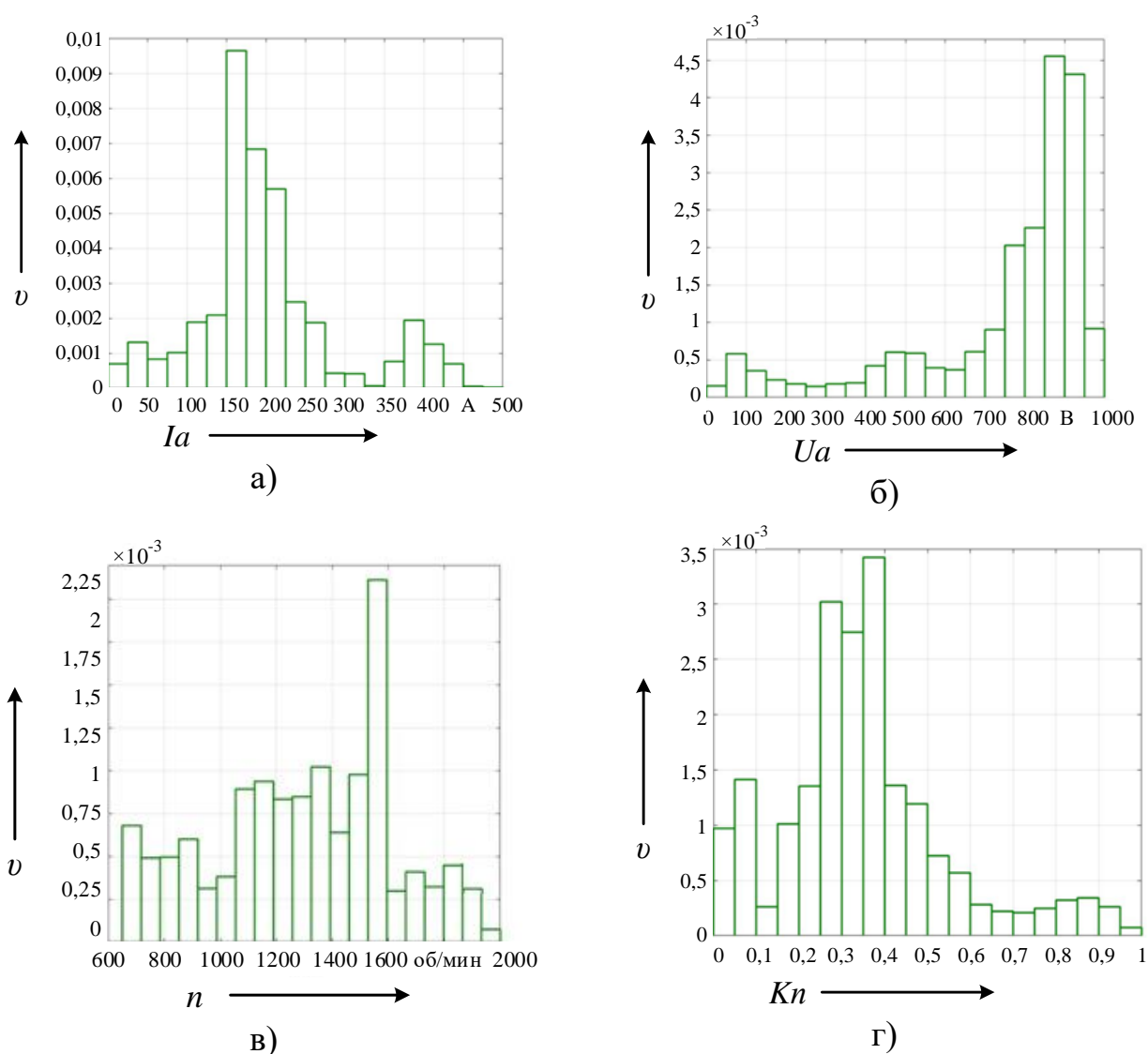


Рисунок 1.16 – Анализ режима работы ТЭД с полным возбуждением

( $v$  – относительная частота, о.е.)

(а) – распределение тока якоря; б) – распределение напряжения; в) – распределение частоты вращения; г) – коэффициент пульсации тока якоря

В тяговом режиме с ослабленным полем возбуждения ток якоря изменялся в диапазоне от 0 до 700А, напряжение ТЭД от 800 до 1050В, коэффициент пульсации в основном находится в диапазоне от 0,1 до 0,5 и коэффициент возбуждения в диапазоне 0,1 до 0,9 (рисунок 1.17 а-г).

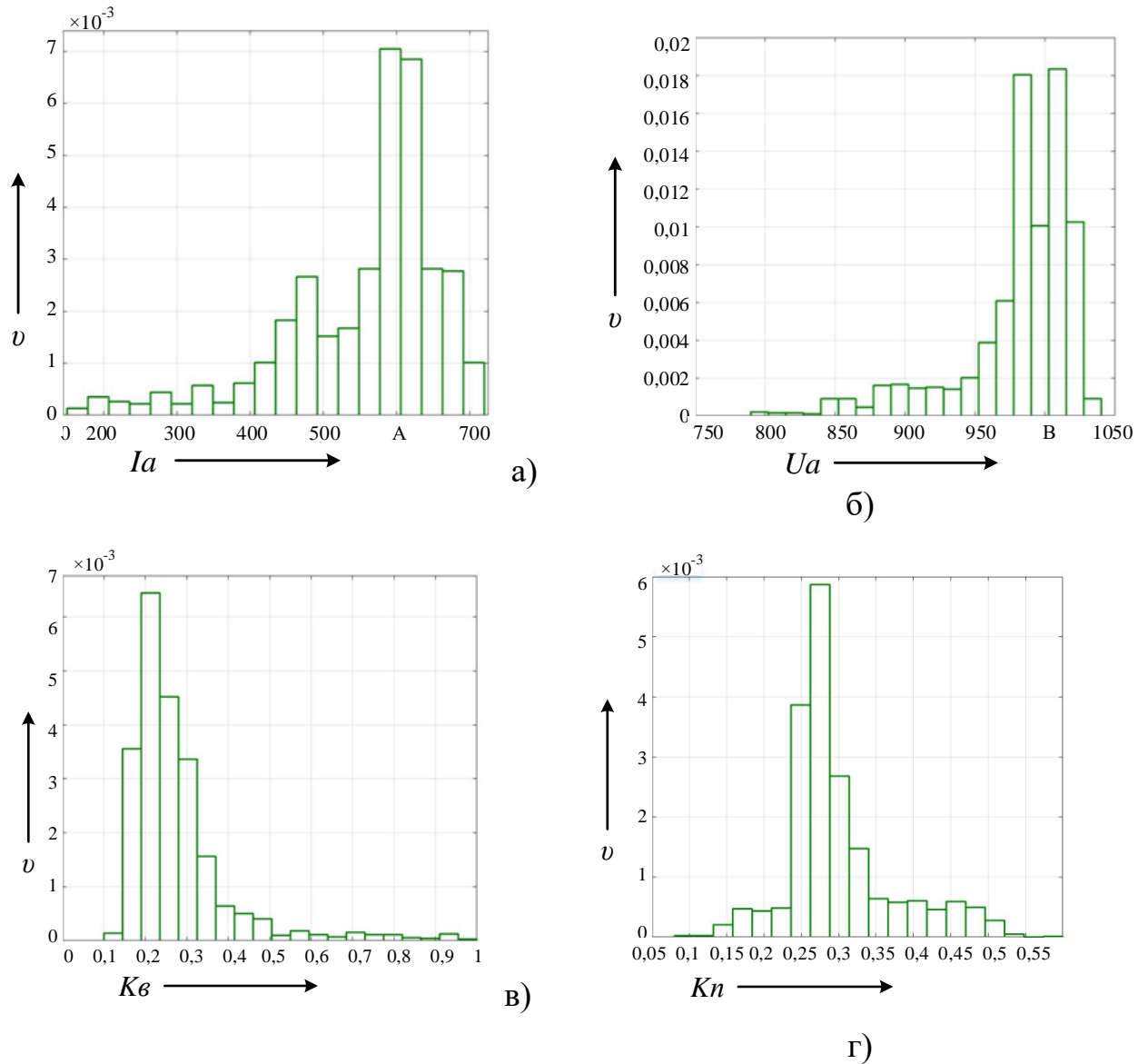


Рисунок 1.17 – Анализ режима работы ТЭД с ослаблением возбуждения

( $v$  – относительная частота, о.е.)

(а) – распределение тока якоря; б) – распределение напряжения; в) – коэффициент возбуждения; г) – коэффициент пульсации тока якоря

В тормозном режиме ток якоря изменялся в диапазоне от 0 до 1000 А, напряжение ТЭД от 0 до 700 В, частота вращения от 600 до 1800 об/мин, коэффициент пульсации в основном находится в диапазоне от 0,1 до 0,5 (рисунок 1.18 а-г).

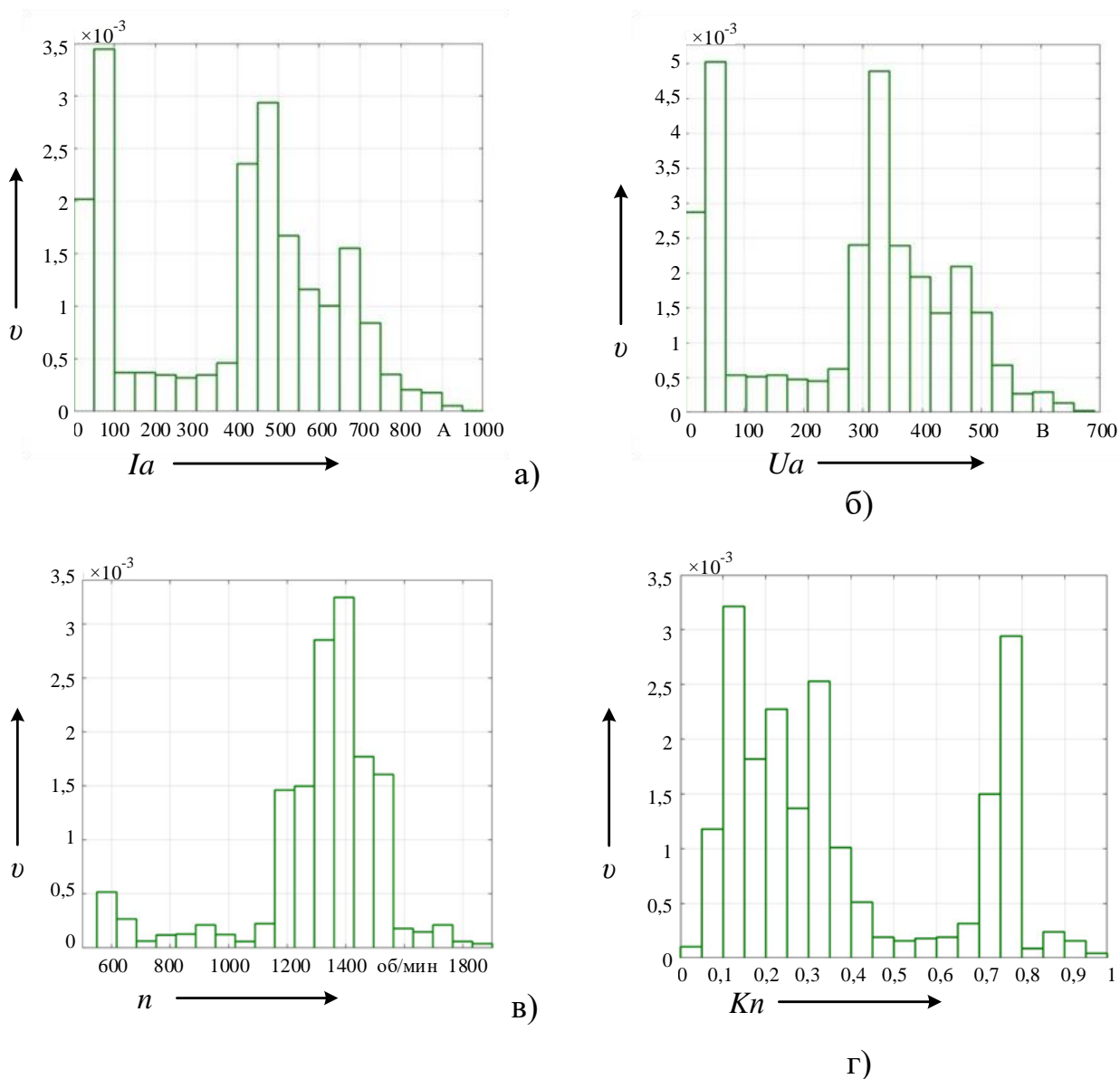


Рисунок 1.18 – Анализ режима работы ТЭД в режиме электродинамического торможения ( $v$  – относительная частота, о.е.)

(а) – распределение тока якоря; б) – распределение напряжения; в) – распределение частоты вращения; г) – коэффициент пульсации тока якоря

Анализ показал, что режим ослабления поля может быть тяжелым режимом для тяговых электродвигателей в отношении качества коммутации, т.к. возбужде-

ние меньше 32%, которое заявлено в технических условиях, а коэффициент пульсации превышает 0,2. Для режим электродинамического торможения характерно частое изменение тока якорной цепи, о чем говорит высокий коэффициент пульсации, что также негативно может влиять на процесс коммутации.

#### **1.4 Причины неудовлетворительной коммутации электродвигателей постоянного тока**

«Процесс коммутации машины постоянного тока представляет собой динамическую систему, параметры которой изменяться в процессе работы, что может приводить к нарушению условий коммутации и вызывать искрение на сбегающем крае щеток, при этом одновременно могут измениться несколько факторов, действие которых в той или иной степени определит условия коммутации» [115].

Искрение щеток может быть вызвано множеством причин, к основным относятся: механические, потенциальные и коммутационные.

Механические причины искрения в основном связаны с нарушением контакта щетка-коллектор, например, из-за недостаточного усилия нажатия, повышенного биения коллектора или его эллиптичности, загрязнения поверхности коллектора, выступания межломельной изоляции над коллекторными пластинами, нарушения крепления щеткодержателя, а также другие причины, влияющие на стабильную работу КЩУ.

Потенциальные причины искрения вызваны нарушением потенциальных условий, то есть превышением допустимого напряжения между смежными коллекторными пластинами. Нарушение потенциальных условий, как правило, сопровождается дуговыми разрядами и является наиболее опасным, так как способствует возникновению кругового огня.

Коммутационные причины искрения являются «следствием физических процессов, происходящих в машине при переходе секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую» [78].

В общем случае коммутация описывается нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$L \frac{di(t)}{dt} + \sum_{k=1} M_k \frac{di_k(t)}{dt} = \Delta u(J_{\text{наб}}(t)) - \Delta u(J_{\text{сб}}(t)) - iR_S - e_k(t), \quad (1.2)$$

где  $e_L = -L \frac{di(t)}{dt}$  – ЭДС самоиндукции;

$$e_M = - \sum_{k=1} M_k \frac{di_k(t)}{dt} - \text{ЭДС взаимной индукции};$$

$\Delta u(J_{\text{наб}}(t))$  и  $\Delta u(J_{\text{сб}}(t))$  – переходные падения напряжения под набегавшим и сбегавшим краями щетки;

$R_S$  – сопротивление коммутируемой секции;

$e_k(t)$  – коммутирующая ЭДС, которая наводится в секции при ее взаимодействии с магнитным полем в зоне коммутации.

#### 1.4.1 Анализ механического состояния коллектора тягового электродвигателя ЭДП-800

На испытательной станции ООО «Сибэлектропривод» было проведено измерение профиля коллектора с помощью прибора ПКК-7Ц [83], разработанного на кафедре «Электрические машины и общая электротехника», омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

На рисунке 1.19 и 1.20 приведены профилограммы коллектора ЭДП-800 в горячем и холодном состоянии при разной частоте вращения. По оси абсцисс расположены порядковые номера коллекторных пластин, по оси ординат отклонение от среднего значения (нулевого уровня). Профиль коллектора вновь изготавливаемых ТЭД соответствует требованиям нормативно-технической документации [26] и справочной литературе и с большой долей вероятности не является причиной неудовлетворительной коммутации [12, 23].

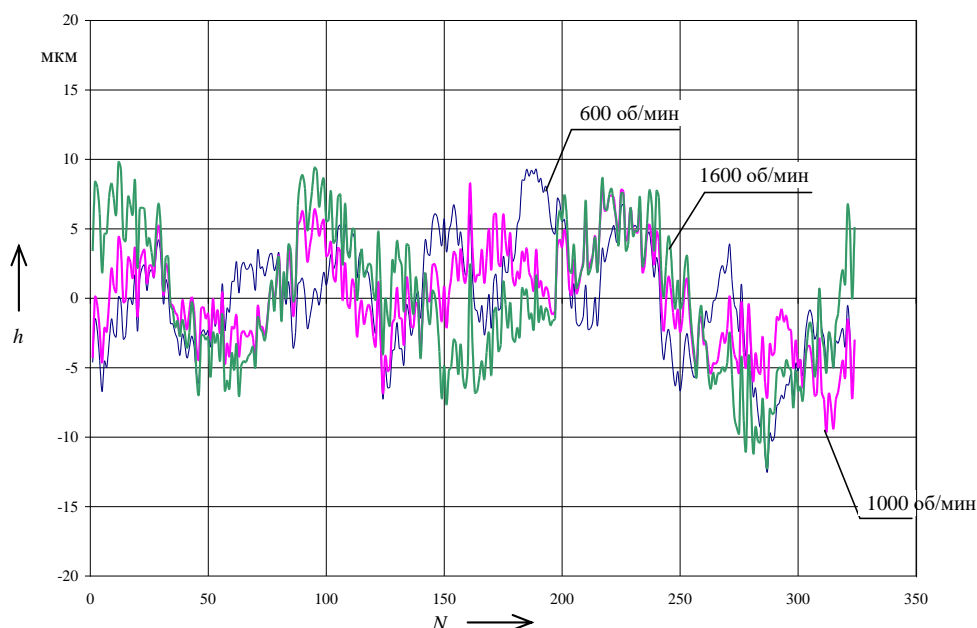


Рисунок 1.19 – Профиль коллектора ТЭД ЭДП-800 в горячем состоянии ( $h$  – высота коллекторной пластины;  $N$  – номер коллекторной пластины)

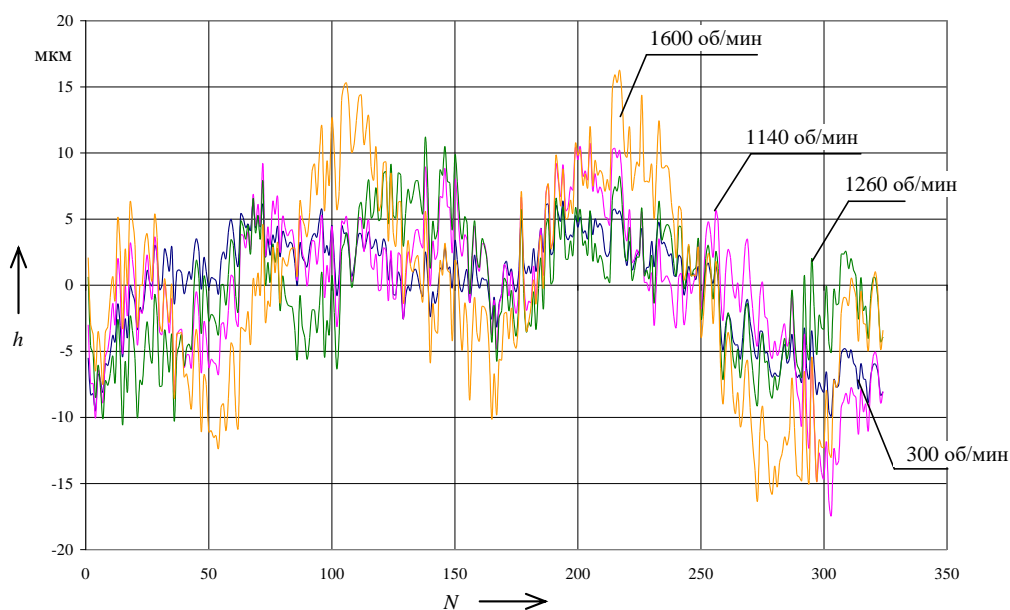


Рисунок 1.20 – Профиль коллектора ТЭД ЭДП-800 в холодном состоянии ( $h$  – высота коллекторной пластины;  $N$  – номер коллекторной пластины)

#### 1.4.2 Оценка потенциальных условий для ЭДП-800

Первичная дуга может образовываться между пластинами лишь тогда, когда напряжение между ними не менее критического  $U_{мл.кр}$ , В, зависящего от толщины изоляции между ними [35]:

$$U_{\text{мл.кр}} \cong 34 + (\Delta_{\text{из}} - 0,6) = 34,6 \text{ В}, \quad (1.3)$$

где  $\Delta_{\text{из}}$  – толщина изоляции между коллекторными пластинами,  $\Delta_{\text{из}} = 1,2$  мм.

Среднее межламельное напряжение для тяговых электродвигателей с компенсационной обмоткой не должно превышать 17-19 В [50, 61].

Теоретическое значение среднего межламельного напряжения можно определить [35]:

$$U_{\text{мл.ср}} = \frac{2 \cdot p \cdot U}{K}, \quad (1.4)$$

где  $p$  – количество пар полюсов,  $p=3$ ;

$U$  – напряжение на двигателе, В;

$K$  – количество коллекторных пластин,  $K=324$ .

Более точно оценить межламельное напряжение можно по выражению [61].

$$U_{\text{мл}}(x) = 2 \cdot B(x) \cdot l_a \cdot V_a, \quad (1.5)$$

где  $B(x)$  – функция магнитной индукции, Тл;

$l_a$  – длина железа якоря, м;

$V_a$  – окружная скорость, м/с.

Результаты поверочного расчета межламельного напряжения в зависимости от режима работы приведены в таблице 1.4 [40], при этом значение магнитной индукции в магнитном зазоре определялось с помощью моделирования в программе FEMM (Finite Element Method Magnetism) [21].

Таблица 1.4 – Расчетное значение межламельного напряжения

Режим работы электродвигателя	Среднее значение, В	Максимальное значение, В
1	2	3
Двигательный, полное поле, напряжение 1000 В, ток якоря 900 А, частота вращения 703 об/мин	17,6	38,0
Двигательный, ослабленное поле (32%), напряжение 1000 В, ток якоря 500 А, частота вращения 2069 об/мин	18,0	40,5

Окончание таблицы 1.5

1	2	3
Электродинамического торможения (генератора с независимым возбуждением) при частоте вращения 1424 об/мин и напряжении 900 В на тормозном резисторе (сопротивление тормозного резистора 0,7 Ом)	17,4	38,6

Анализ полученных расчетных зависимостей величин межламельных напряжений по окружности коллектора в пределах межполюсного деления для заданных режимов работы показывает:

- наличие существенных пульсаций индукции магнитного поля в зазоре ТЭД вследствие выполнения в основных полюсах пазов для размещения компенсационной обмотки обуславливает возникновение соответствующих пульсаций величины напряжения между соседними коллекторными пластинами;

- средние значения межламельных напряжений в исследованных двигательных режимах не превышают рекомендованных в технической литературе величин;

- максимальные значения межламельных напряжений во всех исследуемых режимах работы ТЭД превосходят критическую величину (34,6 В), что не исключает возникновения местных искровых разрядов потенциального характера между ламелями в указанных режимах работы;

- минимальные значения (по модулю) межламельных напряжений даже в области основных полюсов не превышают критической величины в 34,6 В во всех исследованных режимах работы двигателем. Соответственно, даже при возникновении местной дуги между соседними ламелями коллектора в местах, где величина межламельного напряжения превышает критическую величину, она не может распространиться на всё межщеточное пространство, поскольку в процессе поворота якоря напряжение между данными коллекторными пластинами падает до величины, существенно меньшей критической, в результате чего ее горение перестает поддерживаться, и она гаснет. Развитие кругового огня по коллектору в этих усло-







виях возможно в случае сочетания неблагоприятных факторов, таких как загрязнение или заволакивание коллектора, наличие токопроводящей пыли в коллекторной камере.

### 1.4.3 Оценка коммутационных свойств ЭДП-800

Согласно техническим условиям на электродвигатель тяговый типа ЭДП-800 ГПИН.652441.006 ТУ каждое изделие проходит программу приемо-сдаточных испытаний, в которую включена проверка коммутации по режимам 1, 2 4, 6, приведенным в таблице 1.5. Электродвигатель считается выдержавшим испытания, а коммутация удовлетворительной, если при испытаниях не возникает кругового огня, остаточных деформаций или механических повреждений коллектора и щеткодержателей и они пригодны для дальнейшей работы без очистки или какого-либо исправления, а также степень искрения не превышает 1½ [26].

Таблица 1.5 – Режимы проверки степени искрения и результаты периодических испытаний по ГОСТ.2582-2013

		При работе двигателем в режимах				При работе генератором в режимах	
		1	2	3	4	5	6
Напряжение, В		890	370	1000	1000	900	525
Ток, А		980	2000	920	740	1280	750
Степень возбуждения, %		100	100	100	-	-	-
Частота вращения, об/мин		Обеспеч.указ.парам.			2000	1330	2000
Продолжительность режима, мин		60	0,5	10	10	5	5
Класс коммутации ЭДП-800 зав.№312		1	1¼	1¼	1¼	1	1
		1	1¼	1	1¼	1¼	1¼
Класс коммутации ЭДП-800 зав.№312		1	1¼	1¼	1¼	1¼	1¼
		1	1¼	1¼	1¼	1¼	1

При периодических испытаниях степень искрения проверяется во всех режимах работы, приведенных в таблице 1.4, дополнительно определяется области безыскровой работы [26].

Коммутационные испытания тяговых электродвигателей постоянного тока типа ЭДП-800 проводились в испытательном центре ООО «Сибэлектропривод» по методу взаимной нагрузки.

Для проведения коммутационных испытаний собрана электрическая схема подпитки дополнительных полюсов, приведенная на рисунок 1.21, на котором: ИД – контролируемый электродвигатель; КО – компенсационная обмотка ИД; ДП – добавочные полюса ИД; А - переключатель, отключающий схему подпитки; ПГ - подпитывающий генератор постоянного тока; Ш – амперметр с шунтом для контроля тока подпитки  $I_{пн}$ ; Д – приводной двигатель генератора; ОВ<sub>пг</sub> – обмотка возбуждения подпитывающего генератора; П – переключатель полярности тока подпитки ( $+I_{пн}$ ,  $-I_{пн}$ ); АТр – автотрансформатор; В – выпрямитель; А2 – амперметр контроля тока  $I_v$  возбуждения ПГ.

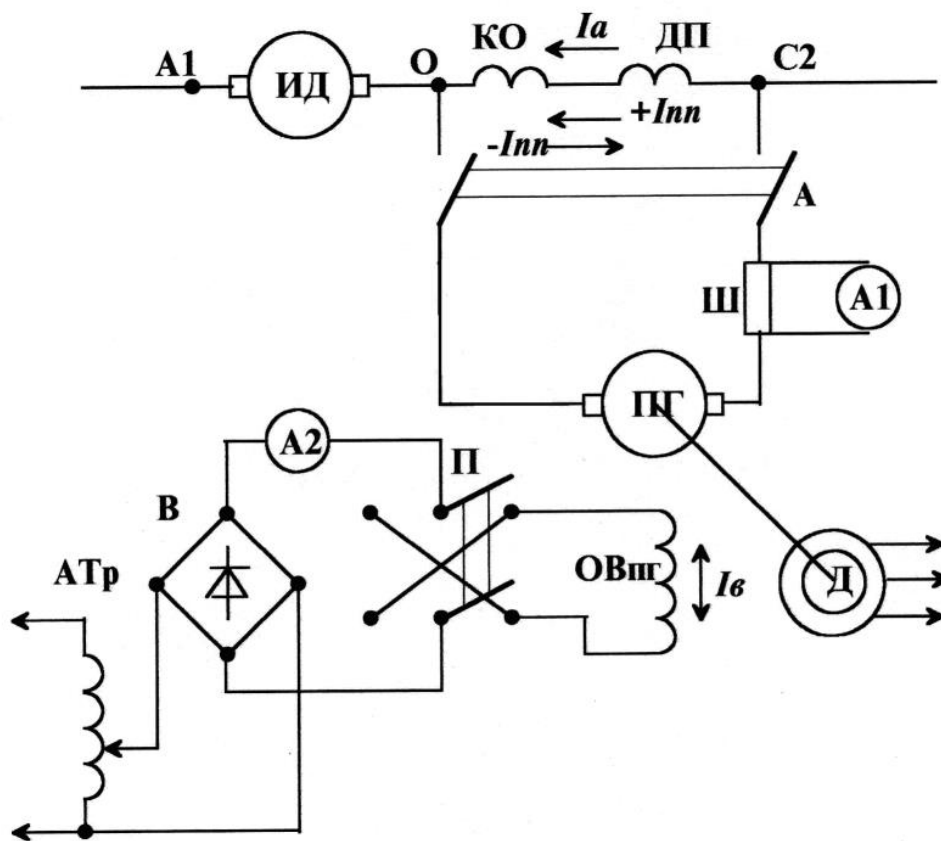


Рисунок 1.21 – Временная схема подпитки дополнительных полюсов

Подпитывающий генератор ПГ при включенном переключателе А создает дополнительный ток по обмотке дополнительных полюсов  $I_{\text{пп}}$ , величина и направление которого определяются током возбуждения  $I_{\text{в}}$ . Полярность тока  $I_{\text{в}}$  изменяется переключателем П, а его значение регулируется автотрансформатором АТр. При совпадении направлений тока  $I_{\text{пп}}$  и тока якорной цепи  $I_{\text{а}}$  происходит увеличение магнитодвижущей силы по поперечной оси машины, что приводит к искрению щеток от перекоммутированных секций. В случае противоположного направления токов  $I_{\text{а}}$  и  $I_{\text{пп}}$  возникает искрение щеток от недокоммутации. Такой метод позволяет вызывать искрение и плавно регулировать его интенсивность при любом токе нагрузки якоря. Параметры схемы определены исходя из максимального значения тока подпитки  $I_{\text{ппmax}}$ , которое составляет около 10 % от номинального значения тока якоря  $I_{\text{ан}}$ : для ТЭД типа ЭДП-800 – около 80 А.

В соответствии с изложенным порядком проведения эксперимента выполнены измерения, соответствующие режимам полного поля и ослабления поля в двигательном режиме ТЭД, а также в генераторном режиме. Результаты испытаний ТЭД в указанных режимах показаны на рисунке 1.22.

Отметим, что в режиме генератора и при ослаблении поля зона безыскровой работы находится симметрично относительно оси абсцисс и смещена вверх в режиме полного возбуждения. Это может быть вызвано насыщением магнитной цепи добавочных полюсов в режиме полного возбуждения, что не происходит в режиме ослабления поля и электродинамическом торможении из-за пропорционального изменения реактивной и коммутационной ЭДС. Однако ширина зоны в режиме генератора и при ослаблении поля может не обеспечить удовлетворительную коммутационную устойчивость в переходных режимах работы ТЭД.

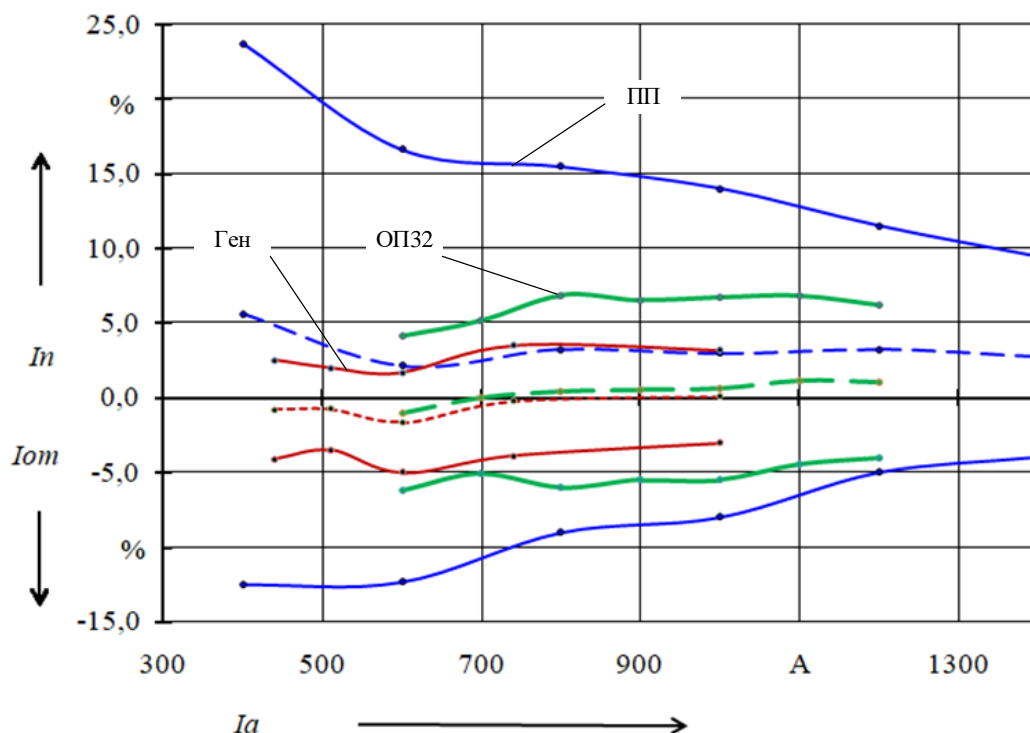


Рисунок 1.22 – Зона безыскровой работы ЭДП-800, синяя линия при работе в режиме двигателя ( $U = 890$  В,  $ПП = 100\%$ ), зеленая линия при работе в режиме ослабления поля 32% ( $U = 890$  В,  $ОП = 32\%$ ); красная линия при работе в генераторном режиме

Проведенные опытные работы показали, что тяговые электродвигатели ЭДП-800 имеют удовлетворительную настройку коммутации, однако на стенде проверка проводилась в стационарном режиме, что не соответствует реальным условиям эксплуатации, в которых преобладают переходные нестационарные режимы.

### 1.5 Исследование тепловых процессов в КЩУ

При неправильной работе КЩУ происходит повышение температуры в контакте, что в свою очередь в большей степени ускоряет износ коллектора и электрических щеток [6,13, 118].

«На температуру в зоне скользящего контакта оказывают влияния следующие процессы: механическое трение при скольжении щетки по поверхности коллектора,

протекание тока через коллектор и щетку, искрение различной степени» [70116], тепловая модель зоны контакта приведена на рисунок 1.23.

Мощность источников потерь в зоне контакта, складывается из трех составляющих [116]:

$$P_{\text{конт}} = P_{\text{эл.конт}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{д}}, \quad (1.6)$$

где  $P_{\text{эл.конт}}$  —потери, связанные с протеканием электрического тока через переходное сопротивление контакта при падении напряжения  $\Delta U_{\text{щ}}$ , Вт;

$P_{\text{мех}}$  —потери, выделяющиеся в контакте за счет трения, Вт;

$P_{\text{д}}$  —потери, связанные с искрением в зоне контакта, Вт.

$$P_{\text{эл.конт}} = I_{\text{щ}} \Delta U_{\text{щ}}, \quad (1.7)$$

где  $I_{\text{щ}}$  — ток, проходящий через щетку, А;

$\Delta U_{\text{щ}}$  — падение напряжения в контактном слое, В.

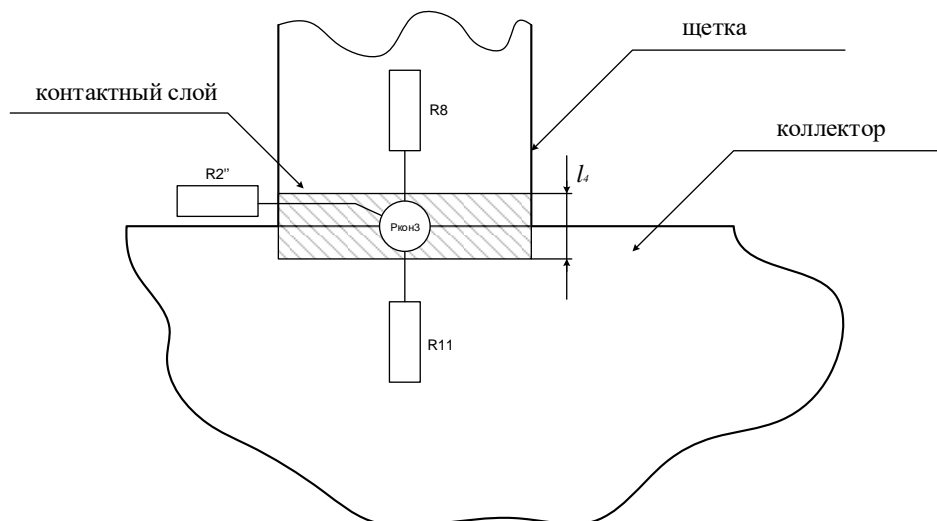


Рисунок 1.23 – Тепловая модель зоны контакта

Нажатие на щетку также является влияющим на процесс нагрева параметром. Мощность источника потерь в контакте за счет трения, определяется по формуле [65]:

$$P_{\text{мех}} = \mu P v S_{\text{щ}}, \quad (1.8)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения;

$P$  — сила нажатия на щетку, кг;

$v$  — скорость вращения коллектора, об/мин;

$S_{щ}$  – площадь контакта щетка-коллектор,  $\text{м}^2$ ;

Предлагается рассчитывать мощности источника потерь при электродуговом искрении, используя количество электричества, проходящее через электродуговые разряды [114].

$$P_d = \sum \frac{W_{д,i}}{\tau_{дi}}, \quad (1.9)$$

где  $W_{д,i}$  – энергия, выделяемая единичным разрядом, Дж;

$\tau_{дi}$  – время горения дуги (единичного разряда), с;

$$W_d = k_1 U_d \tau_d^2, \quad (1.10)$$

где  $k_1 = \frac{V_d}{2L_p}$  – коэффициент пропорциональности;

$V_d$  – напряжение дуги;

$\tau_d$  – время горения дуги;

$L_p$  – результирующая индуктивность секции.

Экспериментальные исследования теплового состояния КЩУ МПТ показывают, что нагрев в существенной степени зависит от уровня искрения в зоне контакта щетка-коллектор [7]. Кривые нагрева при различных уровнях искрения приведены на рисунке 1.24.

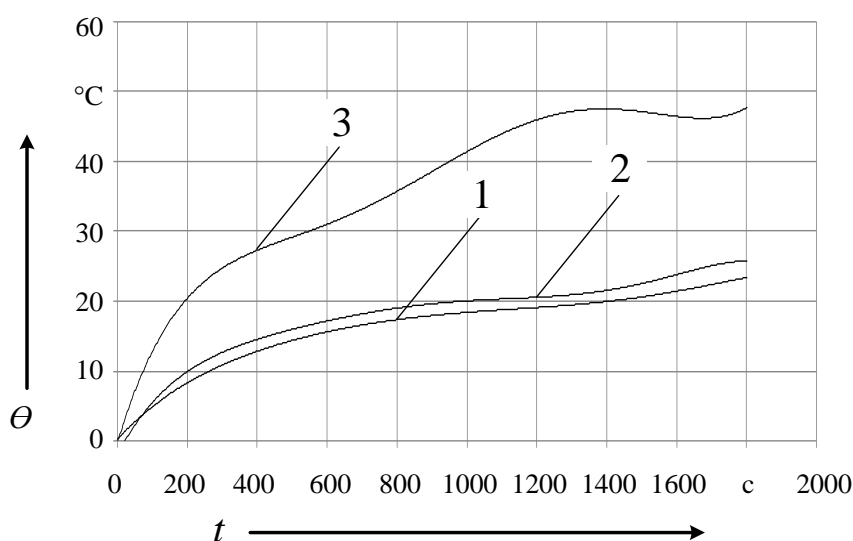


Рисунок 1.24 – Кривые нагрева зоны контакта щетка-коллектор при разной интенсивности искрения: 1 –отсутствие искрения, 2 – искрение в 1¼ балла, искрение в 1½ балла.

Как видно из рисунка 1.24 интенсивность искрения существенно влияет на нагрев в зоне контакта «щетка-коллектор», что может еще в большей степени приводить к расстройству процесса коммутации и снижать ресурс элементов КЩУ.

## **1.6 Выводы по главе**

1. Проведен анализ отказов ТЭД постоянного тока автосамосвалов БЕЛАЗ грузоподъемностью 220 тонн, предложена классификация видов отказов, а также проведен анализ причин отказов. Выявлено, что самое большое количество отказов приходится на повышенное биение коллектора, повышенный износ щеток, круговые огни по коллектору и пробой на корпус якоря. При этом наиболее частой причиной отказов ТЭД остается неудовлетворительная работа элементов КЩУ и его техническое состояние.

2. Проведен анализ причин отказов ТЭД в эксплуатации, которые можно разделить на: техническое обслуживание, эксплуатационные, брак производителя, нарушение в работе привода и некачественные запасные части, и материалы. Значительно можно снизить количество отказов ТЭД и других систем автосамосвала при выполнении требований нормативно-технической документации в части технического обслуживания и эксплуатации.

3. Из проведенного анализа графиков движения автосамосвала БЕЛАЗ видно, что режимы работы часто меняют друг друга и фактически ТЭД работают в постоянном переходном режиме. Статистика отказов и характерное внешнее состояние ТЭД позволяет сделать вывод о том, что основным фактором, снижающим надежность тяговых электродвигателей карьерных самосвалов БЕЛАЗ 75306 является неудовлетворительная коммутация.

4. Проведен анализ причин неудовлетворительной коммутации, исследованы механические и электрические факторы, негативно влияющие на коммутацию.

Исследование профиля коллектора показало, что механические факторы не являются первоисточником расстройства коммутации, т.к. отсутствуют дефекты, способствующие этому.

Расчет значения межламельного напряжения показал, что средние значения не превышают рекомендованных в технической литературе величин, однако максимальные значения межламельных напряжений во всех исследуемых режимах работы ТЭД превосходят критическую величину, что не исключает возникновения местных искровых разрядов потенциального характера между ламелями.

Испытания тягового электродвигателя ЭДП-800 в условиях испытательного центра ООО «Сибэлектропривод». По результатам испытаний тяговый электродвигатель ЭДП-800 соответствует техническим условиям ГПИН.652441.006ТУ и ГОСТ.2582-2013. Характер зоны коммутации говорит о некоторой недокоммутации в режиме полного поля, при этом интенсивность искрения не превышает  $1\frac{1}{4}$  при проверке качества коммутации.

5. Исследование тепловых процессов КЩУ показало, что интенсивность искрения существенно влияет на нагрев в зоне контакта «щетка-коллектор», что может еще в большей степени приводить к расстройству процесса коммутации и снижать ресурс элементов КЩУ

6. Каждый двигатель ЭДП-800 производства ООО «Сибэлектропривод» проходит жесткий контроль на стадии производства и программу приемо-сдаточных испытаний. При проверке качества коммутации предъявляется требование более строгие, чем указано в ГОСТ 2582-2013, ни один из изготовленных и отремонтированных двигателей не будет передан в отдел сбыта при коммутации больше  $1\frac{1}{4}$ . Поэтому искать причину и решать проблему неудовлетворительной коммутации ТЭД необходимо с учетом режимов эксплуатации. Для этого нужно выявить эксплуатационные режимы, негативно влияющие на коммутацию ТЭД, а по полученным результатам определить причины и наметить пути решения этой проблемы.



## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ СИГНАЛА ВИДИМОГО ИСКРЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ВИДЕОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

Исходя из выводов главы 1, неудовлетворительная коммутация неблагоприятно влияет на ресурс и надежность ТЭД, а основная проблема в том, что проявляется это только в эксплуатации. Поэтому требуется провести анализ коммутационных процессов с учетом режимов эксплуатации, а для этого необходимо выявить неблагоприятные режимы работы.

### **2.1 Анализ существующих методов и способов оценки состояния коммутации**

Методика проверки коммутации, согласно п. 8.12 ГОСТ 2582-2013, предусматривает проверку на нагретой до рабочего состояния электрической машине визуально, допустимо выполнять с помощью видеокамер или индикаторами, обеспечивающими достоверную оценку степени искрения. Соответственно существующие способы определения интенсивности искрения можно классифицировать как визуальный и инструментальный (рисунок 2.1).

Для оценки коммутации при производстве и ремонте электрических машин постоянного тока наиболее широко применяются визуальные методы, при котором оператор (испытатель) невооруженным глазом дает оценку интенсивности искрения по стандартной шкале. Преимущество этого метода заключается в его простоте и скорости оценки интенсивности искрения, однако он имеет ряд недостатков:

- субъективность оценки – результат существенно зависит от опыта оператора;
- необходимость приближаться к вращающимся и токоведущим частям;
- не всегда возможно заглянуть под все щеткодержатели;
- невозможно синхронизировать процесс оценки интенсивности искрения и измерения переменных, характеризующих работу ЭМ;
- нет численной оценки интенсивности искрения;

- невозможно применить в эксплуатации.

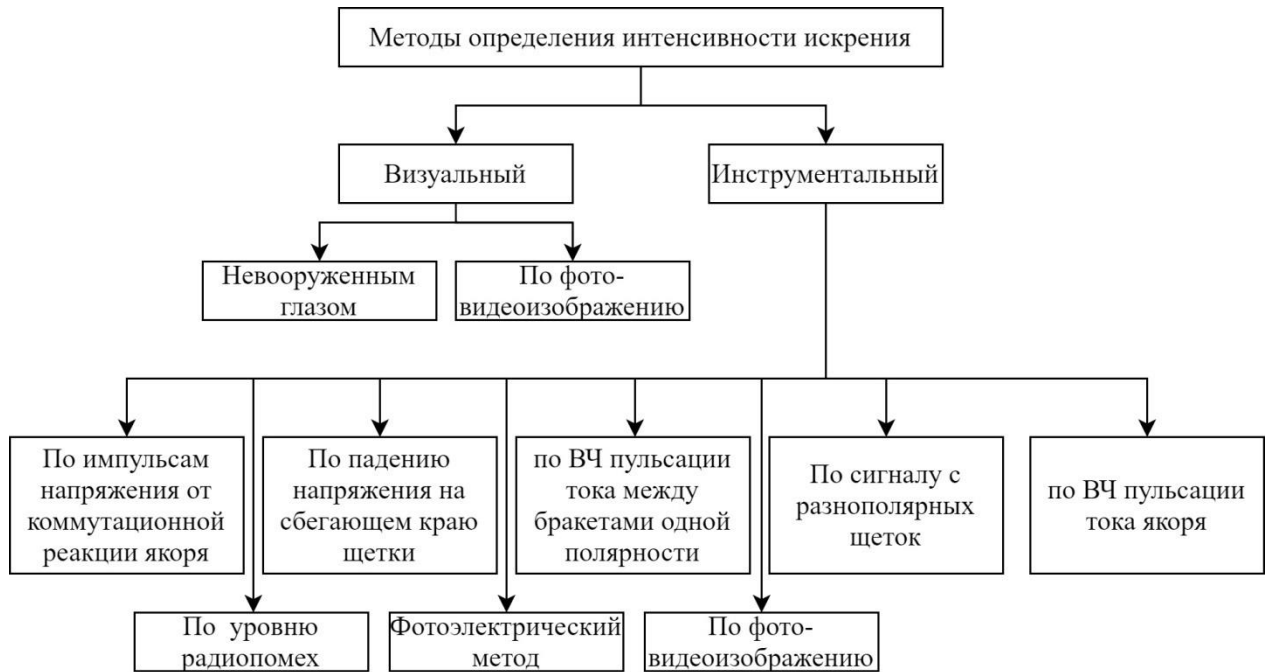


Рисунок 2.1 Классификация методов определения интенсивности искрения

Основные недостатки, визуального метода (субъективность оценки и необходимость присутствия оператора в зоне испытаний) исключают инструментальные методы определения интенсивности искрений:

1) Метод оценки интенсивности искрения по сигналу от фотоэлектрических элементов.

Устройства на основе фотоэлектрических элементов описываются в работах [62, 63, 73, 89, 87], метод основан на анализе спектра искрения и дуговых разрядов, авторы устройств приводят рекомендации по выбору фотоэлементов, и способы обработки и интерпретации полученных сигналов. Например, Ю.Е. Неболюбов предложил использовать «интегрирующее устройство для усреднения импульсов фототока с последующей их регистрацией на осциллографе» [73]. Предложенные НИИЭМ (г. Томск) фотоэлектрические индикаторы искрения «фиксируют среднее значение фототока, который преобразуется из световой энергии, выделяющейся при искрении» [45,110]. Применение новых фотоэлементов, светофильтров и световодов позволило расширить область применения ранее разработанных устройств [49].

Авторами [97] разработаны приборы, позволяющие оценивать уровень искрения отдельно на всех коллекторных пластинах, для этого производится измерение длительности импульсов фототока.

На интенсивность светового излучения влияет множество факторов, таких как атмосферное давление, расположение дуги в клиновидном пространстве между щеткой и коллектором, марка щеток и их полярность [106]. Кроме того, фотодатчики измеряет не всю энергию электрического разряда, а лишь ее часть, выделяющуюся в виде световой энергии. Поэтому существенной трудностью является правильная установка и настройка фотоприемников в коллекторной камере, что накладывает ограничение для оценки степени искрения коллекторных машин в эксплуатации.

2) Метод, предложенный авторами [125, 127, 50], позволяет оценить значение тока разрыва коммутируемой секции используя в качестве диагностического признака напряжение импульсов от коммутационной реакции якоря. Для этого на главном полюсе ГП испытуемой машины располагают измерительную обмотку, которую подключают к осциллографу. В процессе работы электрической машины в измерительной обмотке наводятся импульсы напряжения, по которым можно оценить величину тока разрыва коммутируемой секции.

Однако на машинах средней и большой мощности невозможно выделить импульсы напряжения от дуговых разрядов из-за значительного снижения их амплитуды в результате возникновения вихревых токов в магнитопроводе и взаимной индукции с обмоткой возбуждения. А так как метод требует вмешательство в конструкцию ТЭД, то его невозможно применить в эксплуатации.

3) Метод оценки коммутации по высокочастотные пульсации тока между bracketами одноименной полярности [84, 31], заключается в измерении амплитуды токовых пульсаций, измеренных на шунте, включенном между этими bracketами. Для этого из общего сигнала нужно выделить переменную составляющую содержащую информацию о процессе коммутации.

Отсутствие необходимости вмешиваться в конструкцию машины и простота получения диагностического сигнала являются преимуществом данного метода, но

выделение полезного сигнала и его обработка, является сложной задачей, что существенно ограничивает его применение в эксплуатации из-за наличия большого количества помех в сигнале. Также данный метод возможно применен только в машинах с числом пар полюсов более двух с волновой обмоткой якоря или петлевой с уравнивателями.

4) Ток разрыва коммутирующей секции возможно оценить по высокочастотным пульсациям, возникающих в цепи якоря, «для получения диагностического сигнал применяется трансформатор тока, преобразующий токовые пульсации в пропорциональный сигнал напряжения. Этот метод основан на определении отношения пикового и средневывпрямленного значений импульсов напряжения, а также на измерении и расчете коэффициента пульсаций в специально заданных режимах работы электрических машин» [80, 85].

Зависимость амплитуды коммутационных импульсов от параметров внешней цепи и режимов работы, приводит к погрешности результатов измерения уровня искрения, что является недостатком данного метода. Также на результат измерения оказывает искрение других МПТ, имеющих электрическую связь с испытуемой машиной и существенно затрудняют обработку сигнала импульсы от тиристорных преобразователей, так как в диагностическом сигнале появляется импульсная помеха значительной амплитуды, требующая дополнительной фильтрации. В совокупности недостатки данного метода не позволяют использовать данный способ в реальных условиях работы ТЭД.

5) В основе метода оценки качества коммутации по уровню радиопомех, предложенный авторами [1,10, 64, 86], «лежит принцип измерения интенсивности электромагнитного излучения, возникающего при искрении и дуговых разрядах в КЩУ» [86]. Измерение уровня радиопомех осуществляются с помощью антенны, к которой предъявляются особые требования по чувствительности и помехозащищенности, а также к диапазону воспринимаемых частот. Приборы, реализующие этот метод, чувствительны к радиопомехам, создаваемыми другими электрическими машинами, работающими в общей схеме, также величина электромагнитного излучения зависит от параметров внешней и внутренней цепи. Таким образом,

использование данных приборов для оценки интенсивности искрения в условиях массового производства, а тем более в эксплуатации нецелесообразно.

б) Измерение напряжения на сбегавшем крае щетки позволяет получить информацию о коммутационных процессах. Для реализации данного метода используется дополнительная щетка ширины, которой не должна превышать ширины изоляционного промежутка между коллекторными пластинами, щетка-датчик устанавливается у сбегавшего края основной щетки [64, 74, 110, 49]. Измерительная щетка подключается к измерительному прибору, что позволяет фиксировать высокочастотные импульсы от тока разрыва и пульсации напряжения в контакте, для гальванической развязки вспомогательной щетки и измерительного прибора используют трансформаторы тока и специальные датчики на основе преобразователей Холла [80].

М. Ф. Карасевым и В. П. Суворовым для настройки коммутирующей ЭДС был применен прибор, подключаемый к рабочей и дополнительной щеткам и осциллографу [46]. Индикатор измеряет напряжение между рабочей и дополнительной щеткой, производит фильтрацию импульсов искрения из общего сигнала, их усреднение. Метод позволяет оценить влияние различных факторов на интенсивность искрения МПТ, в том числе в переходных режимах, и может быть применен для настройки коммутации в лабораторных условиях [45, 72, 123, 9, 3, 82, 48, 94, 109]. Приборы данного типа затруднительно использовать вследствие недостатков, присущих контактному первичному преобразователю – измерительной щетке, которой требуется периодическая настройка, что занимает значительное время.

Для оценки качества коммутации и износа щеток от электроэрозионного износа авторами [9, 36, 95, 100, 110], был предложен способ оценки искрения по максимальной длительности дуговых разрядов при измерении напряжения на сбегавшем крае щетки, качестве первичного преобразователя был применен бесконтактный датчик емкостного типа, устанавливаемый на сбегавшем крае щетки.

«Бесконтактный преобразователь емкостного типа по сравнению с контактными преобразователями (измерительной щеткой) обеспечивает значительное сокра-

щение времени на подготовку испытаний, что позволяет использовать данный прибор в условиях массового производства» [36, 65, 107, 90], однако все равно его сложно применить в реальных условиях эксплуатации, т.к. требуется строгая установка зазора и фильтрация помех в сигнале, которую сложно выполнить из-за постоянно меняющегося режима работы карьерного самосвала.

7) Идею оценки интенсивности искрения по сигналу от разнополярных щеток МПТ впервые предложил использовать С.Ромениус [126]. «Напряжение, измеряемое на разнополярных щетках, содержит низкочастотные и высокочастотные составляющие сигнала» [30, 41, 60, 91, 99]. Диагностический признак, используемый в данном методе, зависит от режима работы электрической машины, а также от процесса коммутации [41, 87], при этом по полярности импульсов можно судить о характере коммутации (недо- или перекоммутация), что в свою очередь позволяет оценить эффективность настройки дополнительных полюсов. Для выделения высокочастотных импульсов искрения осуществляется фильтрация сигнала от разнополярных щеток [47, 67, 126]. Амплитуда сигнала, в том числе высокочастотных импульсов, зависит от параметров внешней цепи МПТ, искрения машин, имеющих между собой электрическую связь и одновременность размыкания секций. Ослабить это влияние позволяет применение фильтров в питающей цепи, автоматическое регулирование усиления прибора [96], а также оценка степени искрения по длительности высокочастотных импульсов [93].

«Отсутствие первичных преобразователей и возможность оценки уровня искрения всей машины в целом является преимуществом данного метода. Такие приборы позволяют использовать сигнал от разнополярных щеток для оптимальной настройки добавочных полюсов МПТ в лабораторных условиях, а также для оценки интенсивности искрения при контрольных испытаниях» [111], однако требует серьезной доработки аппаратной и программной части для возможности применения в эксплуатации.

8) Оценка коммутации по фото- видеоизображению сочетает в себе визуальный и инструментальный метод одновременно и является наиболее простым и универсальным методом для качественной оценки интенсивности искрения [71, 81,

92]. При применении алгоритмов распознавания искрения и правильной его классификации, возможно этот метод использовать для количественной оценки интенсивности искрения в соответствие со стандартной шкалой. Из недостатков такого метода можно выделить то, что оценка проводится лишь по одному щеткодержателю и невозможно оценить характер и количественную величину самого разряда, а также для обработки видеосигнала требуется персональный компьютер большой мощности. Существенным достоинством является простота этого метода и возможность оценить качество работы КЩУ без вмешательства в конструкцию электрических машин и самих транспортных средств.

Анализ существующих способов и устройств оценки интенсивности искрения свидетельствует о том, что для каждого типа приборов существует своя наиболее целесообразная область применения, и для эффективного решения поставленных задач нужно выбирать наиболее подходящий для этого метод.

## **2.2 Разработка автоматизированного видеоизмерительного комплекса оценки коммутации тяговых электродвигателей постоянного тока карьерных самосвалов БЕЛАЗ**

Для оценки работы КЩУ тяговых электродвигателей постоянно тока, используемых в карьерных самосвалах БЕЛАЗ грузоподъемностью 120-240 тонн, разработан универсальный автоматизированный видеоизмерительный комплекс оценки состояния коммутации (АВК-ОК), позволяющий рассмотреть и оценить максимально полную картину работы коллекторно-щеточного узла при эксплуатации автосамосвала [17].

К измерительному комплексу предъявляются следующие требования:

1. Предполагаемый комплекс должен быть универсальным, подходить для установки на карьерные самосвалы БЕЛАЗ серии 7513 (ЭДП-600, ЭК-590), так и серии 7530 (ЭДП-800, ДК-724, ЭК-735).

2. У оператора должна быть возможность дистанционного управления компонентами комплекса и мониторинга поступающих данных.

3. Комплекс должен быть прост в монтаже (демонтаже), с целью уменьшения времени простоя самосвала.

4. Комплекс не должен мешать работе водителя и нарушать работу карьерного самосвала в целом.

5. Оборудование должно быть устойчиво к воздействию вибрационных нагрузок в диапазоне частот 1 – 80 Гц с максимальным ускорением 50м/с<sup>2</sup> (5g). Температура окружающей среды в заднем мосту автосамосвала может достигать 80 °С при относительной влажности 60%.

### 2.2.1 Структура и описание работы автоматизированного видеоизмерительного комплекса оценки состояния коммутации

Структура автоматизированного видеоизмерительного комплекса оценки состояния коммутации приведена на рисунке 2.2, а состав и описание элементов комплекса в таблице 2.1.

Для получения видеосигнала служат IP видеокамеры и коммутатор, для получения данных от системы управления БЕЛАЗ по CAN шине служит комплект наладчика КН-1.

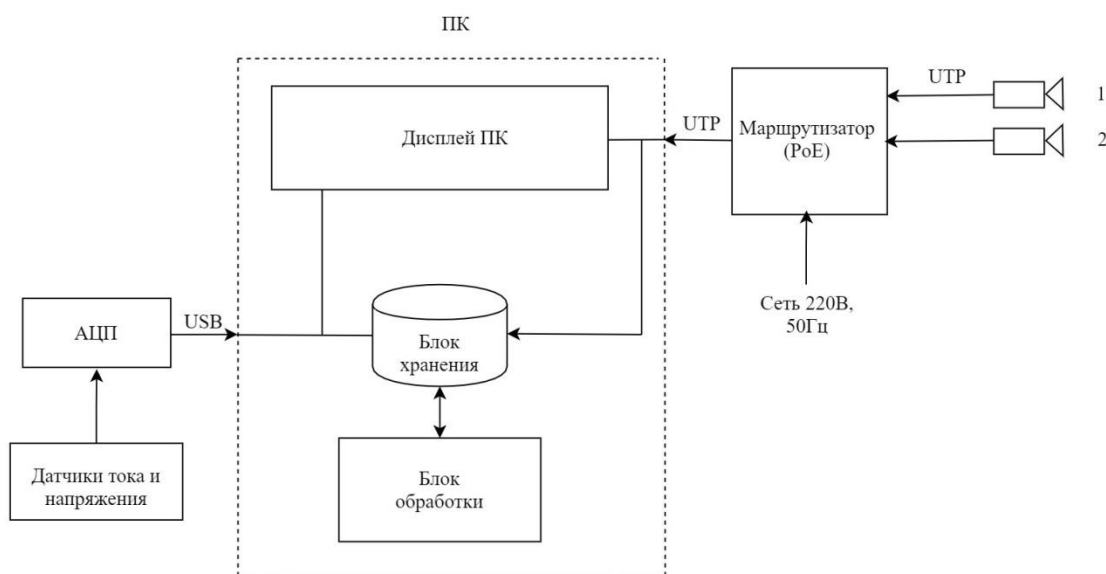


Рисунок 2.2 – Структура автоматизированного видеоизмерительного комплекса



Таблица 2.1 – Комплектность АВК-ОК

	Наименование	Кол-во, шт	Краткие характеристики
1	2	3	4
1	Комплект наладчика КН-1	1	CAN-USB конвертор, используется для наладки, а также обеспечивает программирование и диагностику систем и электронных модулей большегрузных карьерных самосвалов БЕЛАЗ.
2	Ноутбук Dell Precision 3530	1	15,6"(1920x1080)/Intel Core i7-8850H (2,6Ghz)/ NVIDIA Quadro P600 4Gb/16GbRAM /500Gb.
3	Коммутатор TP-LINK TL-SF1008P	1	4 из 8 портов RJ45 с автоматическим определением (с 1-го по 4-й порт) поддерживают технологию PoE (питание по Ethernet кабелю). Эти порты могут автоматически определять и подавать питание устройствам на базе стандарта стандарт IEEE 802.3af.
4	IP видеокамера ACV-442MPXIP с объективом ACV-5622AVCS	2	IP видеокамера 2 Мрх, С/СS, 1/2.8"" SonyExmor 2.1Мрх, SonyXarin, PoE. 1/3", 6.0-22.0 mm, CS, IR, DC APД.
5	Инвертор автомобильный 24/220В	1	Преобразует постоянное напряжение бортовой сети 24В в переменное 220В промышленной частоты 50 Гц, мощность 1500 Вт.
6	Крепление видеокамер	2	ИЦ09.14.000000 приспособление для крепления видеокамеры к остоу ТЭД.

Данные о режиме работы ТЭД по CAN шине от модуля высоковольтных сенсоров (МВС) 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 МВС и видеокамер поступают синхронно, что дает возможность оператору определить режим работы и дать оценку коммутации. Коммутатор и видеокамеры должны поддерживать тех-

нологию PoE, которая позволяет передавать удаленному устройству электрическую энергию вместе с данными по витой паре в сети Ethernet [75]. Питание коммутатора осуществляется через инвертор 24/220В от бортовой сети самосвала 24В постоянного тока.

МВС предназначен для измерения высоковольтных сигналов по напряжению, а также формирует тяговые, тормозные характеристики, выполняет расчет управляющего сигнала и его передачу по CAN шине. Также МВС позволяет выполнять мониторинг процессов в силовой части тягового электропривода (ТЭП) большегрузных самосвалов БЕЛАЗ.

Для крепления видеокамеры в заднем мосту самосвала было разработано специальное крепление ИЦ09.14.000000 приспособление для крепления видеокамеры на ЭДП-800], которое фиксируется в техническом проеме электродвигателя со стороны коллектора и позволяет направить обзор камеры на сбегающий край щеток (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Приспособление для закрепления видеокамеры к остову ТЭД

Оператор имеет возможность провести оценку коммутации в реальном времени или по средству сохраненного архива данных. Рабочее окно оператора приведено на рисунке 2.4.

Изображение КЩУ в режиме реального времени отображаются на экране ПК и сохраняются в его памяти с помощью программы Video Surveillance Software. Благодаря программному обеспечению CAN monitor (Strim Software) оператор может получать сообщения по CAN шине, в режиме реального времени строить графики токов, напряжения, скорости движения и т.д., а так же сохранять их в оригинальном формате \*.cmdt и экспортировать в формат \*.mat[2]. Функция экспорта данных в \*.mat дает хорошую возможность для исследования электромагнитных процессов в программе MatLab.

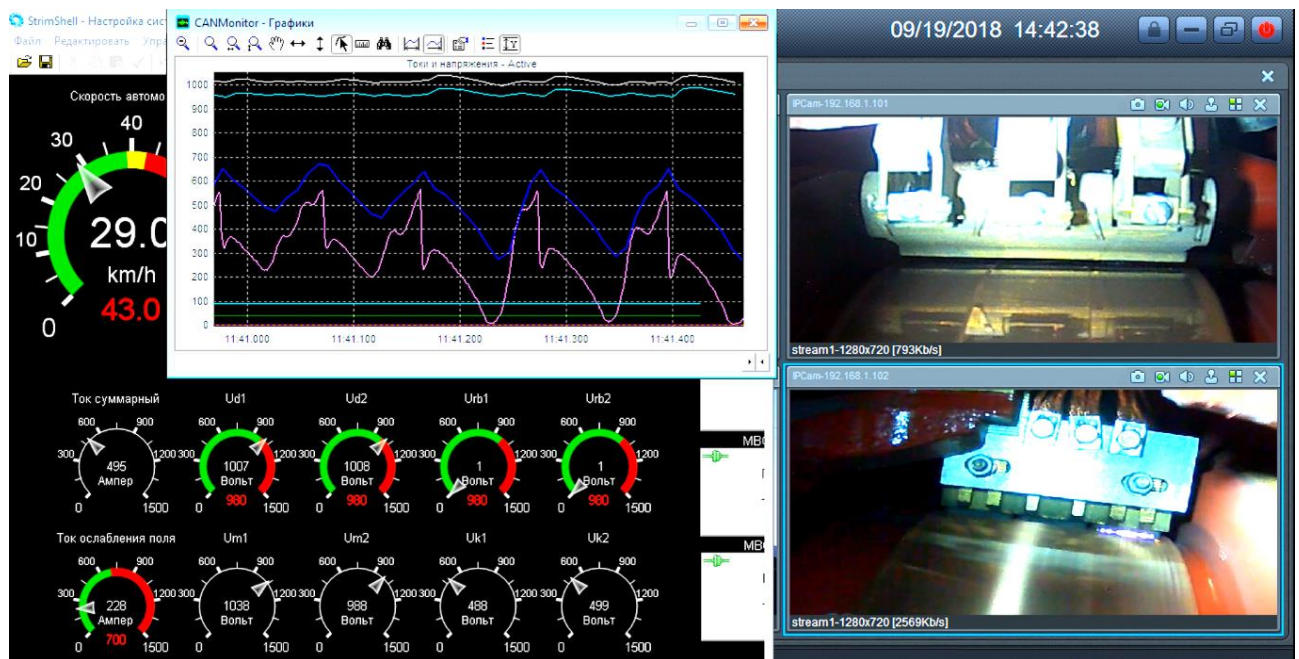


Рисунок 2.4 – Данные, выводимые на ПК оператора

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.

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

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 ПО;
- 4) простота и скорость монтажа и демонтажа – суммарное время монтажа-демонтажа не превышает 1 часа;
- 5) возможность модернизации комплекса путем внедрения новых компонентов.

### **2.2.2 Порядок проведения исследования коммутации тяговых электродвигателей карьерного самосвала БЕЛАЗ в условиях эксплуатации с применением АВК-ОК**

Исследования коммутации ТЭД в условиях эксплуатации с применением АВК-ОК можно разделить на четыре этапа.

Первый этап – монтаж и наладка видеоизмерительного комплекса. Монтажные работы включают в себя:

1) установку двух видеокамер на корпус ТЭД в заднем мосту (для фиксации коммутации) и одну на палубе карьерного самосвала (для фиксации профиля маршрута);

2) прокладку и подключение кабеля передачи данных от видеокамер до маршрутизатора и от маршрутизатора до ПК (провода передачи данных провести отдельно от силовых кабелей, подключение осуществляется через интерфейс RJ-45, видеокамеры подключаются к портам маршрутизатора с поддержкой PoE),

маршрутизатор и инвертор разместить на палубе в боксе с аккумуляторными батареями, ПК и оператор находятся в кабине водителя;

3) комплект наладчика КН-1 подсоединить к модулю МВС-01 в шкафу управления на палубе, провод передачи данных провести в кабину водителя подключить к ПК через USB порт.

Наладка заключается в том, чтобы видеокамеры, установленные в заднем мосту, фиксировали сбегаящий край щетки при движении самосвала вперед. Видеокамера, установленная на борту, должна фиксировать общий план по ходу движения самосвала. Настроить синхронное отображение изображений с видеокамер и данных, получаемых с комплекта наладчика КН-1, для чего запустить приложение VSS cam, Strim Software разместить их окна на одном рабочем столе, запустить видеозапись в приложении VSS cam, запустить программу захвата экрана Free Screen Video Recorder, начать запись рабочего стола.

Второй этап – выполнение плановых поездок и сбор данных. Самосвал выполняет 2-3 рейса по погрузке-разгрузке. Оператор по видеоизображению контролирует процессы, происходящие в ТЭД, следит за исправной работой видеоизмерительного комплекса и оборудования самосвала, делает заметки о режиме работы самосвала (движение с полным полем, при ослаблении поля возбуждения, режим торможения, маневрирование).

Третий этап – демонтаж видеоизмерительного комплекса. Осуществляется в обратной последовательности. Демонтаж проводов проводится аккуратно, с целью использования в следующем исследовании.

Четвертый этап – обработка данных, оценка результатов. По полученным данным определить режимы работы ТЭД и их продолжительность. По видеоизображению дать балльную оценку коммутации и определить режим работы, при которых возникает искрение (ток якоря, напряжение, ток ослабления поля, частота вращения, напряжение на тормозных резисторах). Оценить факторы, влияющие на неудовлетворительную коммутацию (если коммутация превышает 1,5 балла). В рамках диссертационной работы, для проведения обработки полученной информации в среде

MatLab 2017b была разработана программа «DC motor Commutation» [104] (Приложение В).

### 2.2.3 Обработка сигнала видимого искрения в программе «DC motor Commutation»

Программа служит для оценки интенсивности искрения тяговых двигателей постоянного тока карьерных самосвалов БЕЛАЗ грузоподъемностью 130-240 тонн по видеоизображению коллекторно-щеточного узла. Так же программой позволяет синхронизировать результат обработки видеофайла с переменными полученными от системы управления СКАТ.

Программа позволяет обработать видеоизображение, построить графики интенсивности искрения в баллах согласно ГОСТ 2582-2013, окно программы представлено на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Окно программы «DC motor commutation»

Для работы нужно загрузить видеофайл в формате .mp4 нажав кнопку «OpenVideofile», в поле «начало видео» и «конец видео» ввести время в секундах для того чтобы программа понимала какой промежуток видеофайла требуется обработать.

В поле «Выбор зоны коммутации  $i$ -ой щетки» нужно ввести граничные значения области контакта щетка-коллектор. В поле «Номер кадра без коммутации» нужно ввести номер кадра на котором искрение отсутствует. Для определения граничных значений и кадра с коммутацией класс 1 служит окно Figure, которое появляется при нажатии кнопки «View». Благодаря инструменту Datasursor определяем координаты зоны коммутации для каждой щетки и визуально оцениваем класс коммутации (рисунок 2.6).

После этого можно нажать кнопку «StartPz», при этом начинается обработка видео, в поле «процесс» отображаются проценты выполнения задачи. По окончании процесса обработки в поле «график процента засветки по кадрам» выводится соответствующая зависимость от номера кадра  $P_z(N_k)$ .

$$P_z(N_k) = \frac{N_{wp}}{Np}, \quad (2.1)$$

где  $N_{wp}$  – количество белых пикселей;

$Np$  – разрешение изображения (общее количество пикселей).

Для получения графика интенсивности искрения  $B_i(N_k)$ , после обработки видео, нужно нажать кнопку «StartBi», зависимость будет отображаться в поле «график бальности искрения по кадрам».

В поле «калибровка бальности искрения» предустановленны границы интервалов для каждого класса коммутации, по ним ведется первоначальный расчет. В качестве критерия для оценки класса коммутации служит процент засветки ( $P_z$ ). Далее оператор по графикам  $P_z(N_k)$ ,  $B_i(N_k)$  и покадровому просмотру фрагментов видео делает вывод о корректности результатов вычисления



интенсивности искрения, при необходимости корректирует границы интервалов и повторяет расчет  $B_i(N_k)$ .

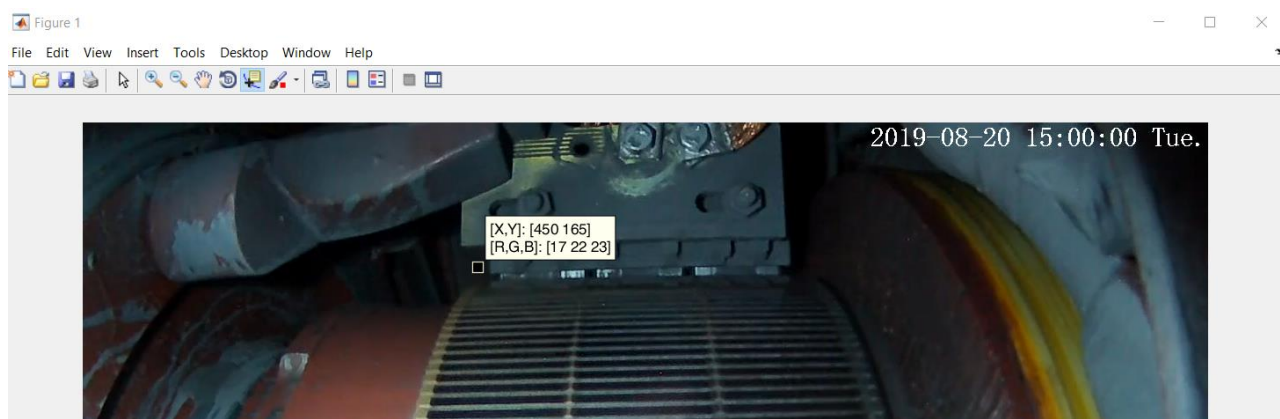


Рисунок 2.6 – Окно Axis

Для загрузки переменных нужно нажать на кнопку «Openvariablefile» и выбрать архив в формате .mat. Для синхронизации переменных и видеофайла в поле «Начальное значение переменных» и «Конечное значение переменных» ввести требуемый промежуток времени. При нажатии кнопки «Save» появляется окно, где нужно выбрать место сохранения и имя архива переменных.

Из исходного файла, полученного от системы управления карьерного самосвала, используем переменные, указанные в таблицы 2.2.

Таблица 2.2 – Исходные переменные

№	Имя переменной	Расшифровка
1.	Current_D01	Ток силовой цепи (ток якоря M1 и M2 в режиме двигателя), А
2.	Current_D11	Ток ослабления поля, А
3.	Um1_D10	Напряжение на мотор-колесе M1, В
4.	Um2_D10	Напряжение на мотор-колесе M2, В
5.	Ur1_D00	Напряжение на тормозном резисторе M1, В
6.	Ur2_D00	Напряжение на тормозном резисторе M2, В
7.	Fbr_FF00	Частота датчика оборотов, Гц

В результате обработки, после окончания всех расчетов, получаем переменные, приведенные в таблице 2.3.



Таблица 2.3 – Выходные переменные

№	Имя переменной	Описание	Формула
1	2	3	4
1.	$I_a$	Ток силовой цепи (ток якоря М1 и М2 в режиме двигателя), А	$I_a = \text{Current\_D01}$
2.	$I_{op}$	Ток ослабления поля, А	$I_{op} = \text{Current\_D11}$
3.	$I_{R1}$	Ток тормозного резистора 1, А	$I_{r1} = \frac{U_{r1\_D00}}{0,7}$
4.	$I_{R2}$	Ток тормозного резистора 2, А	$I_{r2} = \frac{U_{r2\_D00}}{0,7}$
5.	$Um1$	Напряжение на мотор-колесе М1, В	$Um1\_D10$
6.	$Um2$	Напряжение на мотор-колесе М2, В	$Um2\_D10$
7.	$N$	Частота вращения мотор колес (средняя), об/мин	$N = \frac{0,75 \cdot 16,68 \cdot F_{br\_FF00} \cdot K_p}{2 \cdot \pi \cdot R_k}$
8.	$K_\phi$	Коэффициент возбуждения	$K_{op} = \frac{I_{a<\frac{1}{10}>} - I_{op<\frac{1}{10}>}}{I_{a<\frac{1}{10}>}}$
9.	$K_p$	Коэффициент пульсации тока якоря	$K_p = \frac{I_{aMax<\frac{1}{10}>} - I_{aMin<\frac{1}{10}>}}{2 \cdot I_{aAv<\frac{1}{10}>}}$
10.	$P_Z$	Процент засветки	$P_Z$ определяется при нажатии кнопки «StartPz»
11.	$Bi$	Оценка интенсивности искрения	$Bi$ определяется по нажатии кнопки «StartBi», по заданным интервалам значений $P_Z$

## Примечание

$F_{br\_FF00}$  – частота датчика оборотов;

$K_p$  – коэффициент редуктора ( $K_p = 28,38$ );

$R_k$  – радиус колеса в метрах ( $R_k = 1,64$ );

$I_{a<\frac{1}{10}>}$  – среднее значение тока якоря (Current\_D01) за 1/10 с;

$I_{op<\frac{1}{10}>}$  – среднее значение тока ослабления поля (Current\_D11) за 1/10 с;

$I_{aMax<\frac{1}{10}>}$  – максимальное значение тока якоря (Current\_D01) за 1/10 с;

$I_{aMin<\frac{1}{10}>}$  – минимальное значение тока якоря (Current\_D01) за 1/10 с;

$I_{aAv<\frac{1}{10}>}$  – среднее значение тока якоря (Current\_D01) за 1/10 с.

### 2.2.4 Алгоритм программы «DC motor Commutation»

Графическая схема алгоритма оценки коммутации тяговых двигателей постоянного тока в зависимости от режима работы по видеоизображению приведена на рисунке 2.7. Алгоритм реализован в программе MatlabR 2017b [32, 25, 105]. На первом этапе проводится загрузка видеофайла (блок 1) и переменных от системы управления БЕЛАЗ (блок 2).

Для программы видеофайл представляет собой поток кадров – последовательность растровых изображений с разрешением  $1280 \times 720$  пикселей и частотой 25 кад/с. «С математической точки зрения цифровое изображение представляет собой двумерную матрицу  $(x, y)$  размером  $X \times Y$ , где  $x$  – целое число от 0 до  $X-1$ , описывающее номер элемента в строке матрицы,  $y$  – целое число от 0 до  $Y-1$ , описывающее номер строки матрицы, в которой расположен данный элемент» [76]. Каждый пиксель представляет собой оттенок цвета, который задан кодом RGB в диапазоне от 0 до 255.

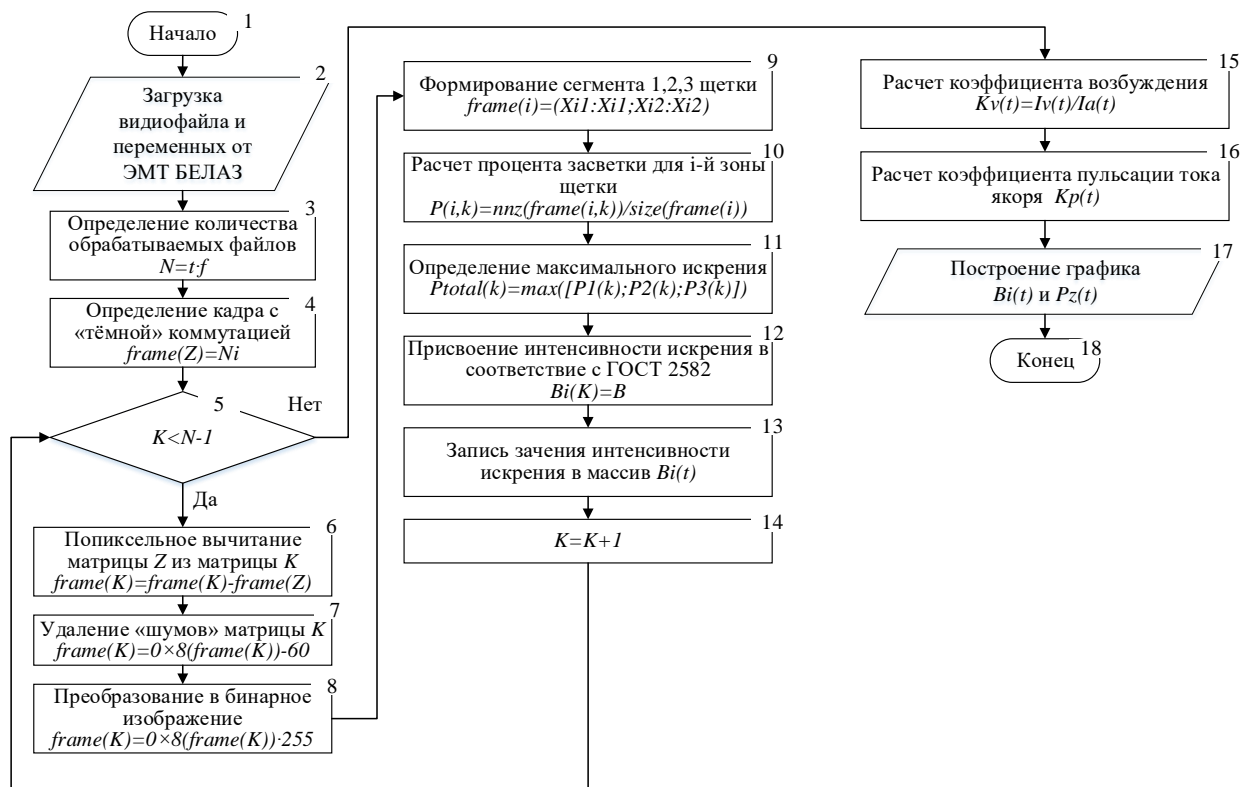


Рисунок 2.7 – Граф-схема алгоритма оценки коммутации по видеоизображению

После загрузки видеофайлов в программу получаем некоторое количество матриц  $N$ , которое определяется командой “nFrames” (блок 3) или по формуле:

$$N = t \cdot f, \quad (2.2)$$

где  $t$  – это время видеозаписи, с;

$f$  – частота видеозаписи, кад/с.

Главной целью обработки является определение искрения на видеоизображении и присвоение классификации в соответствии с ГОСТ2582-2013. Для этого каждый кадр проходит определенный порядок процедур, который заключен в тело цикла (блок 5).

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

$$frame(K) = frame(K) - frame(Z), \quad (2.3)$$

где  $K$  – порядковый номер кадра;

$Z$  – номер кадра, на котором темная коммутация (кадр определяет оператор при обработке видеофайла).

Путем попиксельного вычитания  $0 \times 60$  мы уstraняем шумы (блок 7):

$$frame(K) = 0 \times 8(frame(K)) - 60. \quad (2.4)$$

«Для компьютерного зрения искра представляет собой белый цвет или близкой к нему, т.е. числовое обозначение RGB стремится к максимальным значениям (255,255,255)» [32]. 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:

$$frame(K) = 0 \times 8(frame(K)) \cdot 255. \quad (2.5)$$

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

$$frame(i) = (X_{i1}:X_{i2}; Y_{i1}:Y_{i2}), \quad (2.6)$$

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), что соответствует рекомендациям ГОСТ2582-2013 при визуальной оценке.

$$P_i(K) = \frac{nnz(frame_i(K))}{size(frame_i(K))} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

где  $nnz(frame_i(K))$  – 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):





$$P_{max}(K) = \max([P_1(K), P_2(K), P_3(K)]). \quad (2.8)$$

Следующим шагом является присвоение класса коммутации для  $K$ -го кадра (блок 12)  $Bi(K)$ . Для этого методом экспертных оценок были выделены кадры с интенсивностью искрения от  $1\frac{1}{4}$  до 2 и для каждого рассчитан граничный процент "засветки" (таблица 2.4).

Таким образом, обрабатывается каждый кадр и формируется матрица интенсивности искрения от времени  $Bi(t)$  (блок 13).

Конечным этапом является построение графиков интенсивности искрения (рисунок 2.8) и синхронизированных с ним переменных от системы управления. Для анализа причин искрения также были рассчитаны коэффициенты пульсации ( $K_p$ ) и ослабления магнитного потока ( $K_{op}$ ).

Таблица 2.4 - Критерии оценки интенсивности искрения

Визуальное представление коммутации	Характеристика степени искрения	Класс коммутации	Процент «засветки», %
	Отсутствие искрения (темная коммутация).	1	$Bi(K) < 3$
	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки.	$1 \frac{1}{4}$	$3 < Bi(K) < 30$
	Слабое искрение под большей частью щетки.	$1 \frac{1}{2}$	$30 < Bi(K) < 75$
	Искрение под всем краем щетки.	2	$Bi(K) > 75$

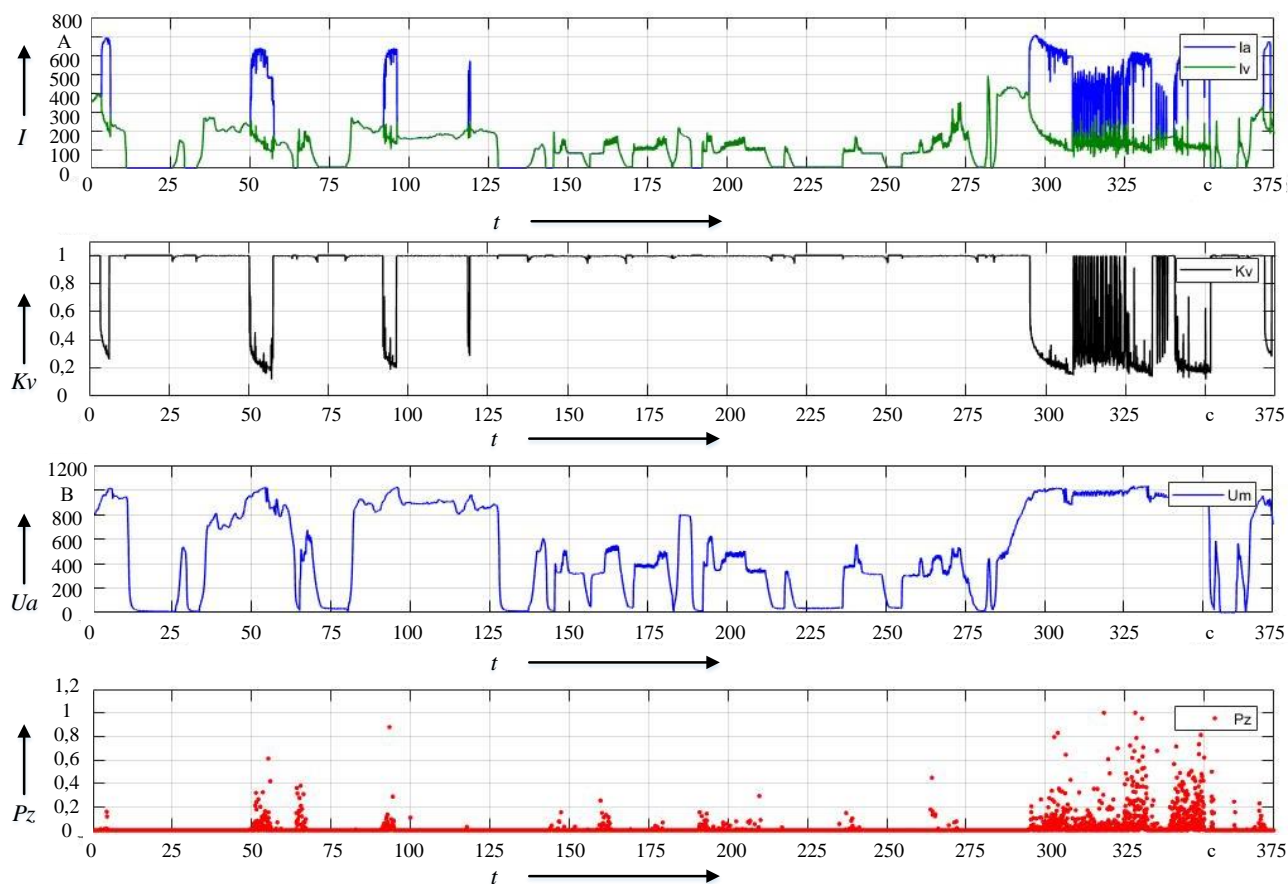


Рисунок 2.8 – Графики после обработки видеофайла и переменных от CAN monitor

### 2.3 Выводы по главе

Анализ существующих методов и способов оценки состояния коммутации МПТ, показал, что для каждого типа приборов существует своя наиболее целесообразная область применения, однако применение существующие методы и способы для диагностирования коммутации ТЭД карьерных самосвалов в условиях эксплуатации требует их усовершенствование и адаптация.

Для оценки работы КЩУ тяговых электродвигателей постоянно тока, используемых в карьерных самосвалах БЕЛАЗ, усовершенствован метод определения интенсивности искрения на сбегавшем 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.

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, а после их реализации сделать заключение об их эффективности.

### **ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОММУТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭДП-800 ДЛЯ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БЕЛАЗ**

Необходимые исходные данные для моделирования процесса коммутации коллекторно-щеточного узла тягового двигателя постоянного тока ЭДП-800 карьерного самосвала «БЕЛАЗ» были получены в результате экспериментальных исследований на самосвале, который эксплуатируется в угольном разрезе. Опытные работы были проведены в условиях угольного разреза «Березовский», находящегося на территории Прокопьевского и Новокузнецкого районов, Кемеровской области. Для оценки качества работы ТЭД был выбран недавно введенный в эксплуатацию карьерный самосвал БЕЛАЗ 75306 ш.1233 2019 г.в., установленными ТЭД ЭДП-800УХЛ2 зав.№№544, 562 с пробегом 34600км. Небольшой пробег позволяет минимизировать механические причины неудовлетворительной коммутации. Самосвал эксплуатируется на определенном участке, где работает по одному и тому же маршруту с одинаковой нагрузкой.

Система мониторинга работы ТЭП самосвала БЕЛАЗ позволяет контролировать многие параметры работы ЭМТ, для оценки работы ТЭД наиболее важными являются значения напряжения якоря ( $U_a$ ), тока якоря ( $I_a$ ), тока ослабления поля ( $I_{on}$ ), тока тормозного резистора ( $I_{r1}$ ,  $I_{r2}$ ) частоты вращения якоря ( $n$ ).

Условия работы карьерных самосвалов могут существенно отличаться, разные уклоны, плечи, установленные скорости движения и т.д., от этого существенно зависят режимы работы ТЭД и их длительность. Для УР «Березовский» характерно распределение длительности режимов работы и интенсивности искрения, представленное на рисунке 3.1[4].

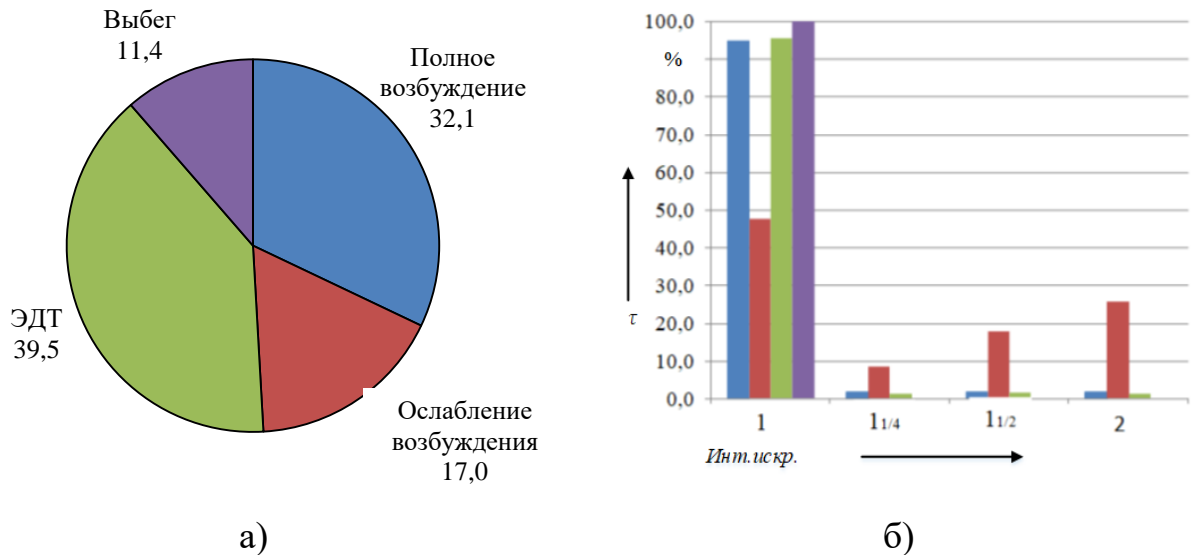


Рисунок 3.1 – Анализ выходных данных АВК-ОК

(а) – длительность режимов работы в процентах, б) – распределение интенсивности искрения в зависимости от режима работы)

### 3.1. Исходные данные для моделирования процесса коммутации коллекторно-щеточного узла тягового двигателя постоянного тока

Математическая модель в качестве входных данных предполагает задание значения напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения из допустимых диапазонов их изменения в заданном режиме работы ТЭД [116].

На основании мониторинга работы ТЭД в эксплуатации были получены графики изменения: напряжения якоря  $U_a = f(t)$ ; тока якоря  $I_a = f(t)$ ; тока возбуждения  $I_e = f(t)$ , а также график изменения «процента засветки»  $P_z = f(t)$ .

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. [77].



Как известно, частота вращения якоря имеет непосредственную функциональную связь с напряжением якоря, током якоря и током возбуждения [19], поэтому для упрощения модели можно исключить эту зависимую величину из входных данных модели.

Коэффициенты пульсации напряжения и тока якоря, а также напряжения и тока возбуждения зависят от используемой на самосвале схемы выпрямления и работы системы ослабления возбуждения, поэтому можно определить функциональную зависимость этих коэффициентов от среднего значения напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения.

Выходными данными являются плотность вероятности появления дискретной случайной величины классов искрения (1; 1¼; 1½; 2; 3), которые соответствуют стандартным значениям по ГОСТ 2582-2013.

Как было отмечено ранее, для определения класса искрения в соответствии со стандартной шкалой искрения методом экспертных оценок определяются диапазоны величины процента засветки  $P_z$ . Эти диапазоны приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Определение класса искрения по величине процента засветки

№	Диапазоны процента засветки	Соответствие стандартной шкале искрения
1	$P_z < x_1$	1
2	$x_1 \leq P_z < x_2$	1 1/4
3	$x_2 \leq P_z < x_3$	1 1/2
4	$x_3 \leq P_z < x_4$	2
5	$P_z \geq x_4$	3
Примечание: Для рассматриваемого примера значения $x_1 = 0,005$ ; $x_2 = 0,01$ ; $x_3 = 0,05$ ; $x_4 = 0,085$ (в о.е.).		

На основании определенных диапазонов в таблице 3.1, была выполнена подготовка экспериментальных данных для построения регрессионной модели. Все измеренные значения были представлены в виде двухмерного массива размером ( $N \times 4$ ), где  $N$  – это количество строк, соответствующих экспериментальным данным. Четыре столбца содержат сведения об измеренных значениях тока якоря ( $I_a$ ), тока возбуждения ( $I_e$ ), напряжения якоря ( $U_a$ ), процента засветки ( $P_z$ ).

Для построения регрессионной модели был использован массив данных размерностью ( $N \times 4$ ), где  $N$  – количество измерений ( $N = 4589$ ).

На рис. 3.2 представлены графики изменения различных величин в относительных единицах. Величины в относительных единицах определены относительно номинальных значений напряжения якоря ТЭД ЭДП-800 890 В и тока якоря 980 А.

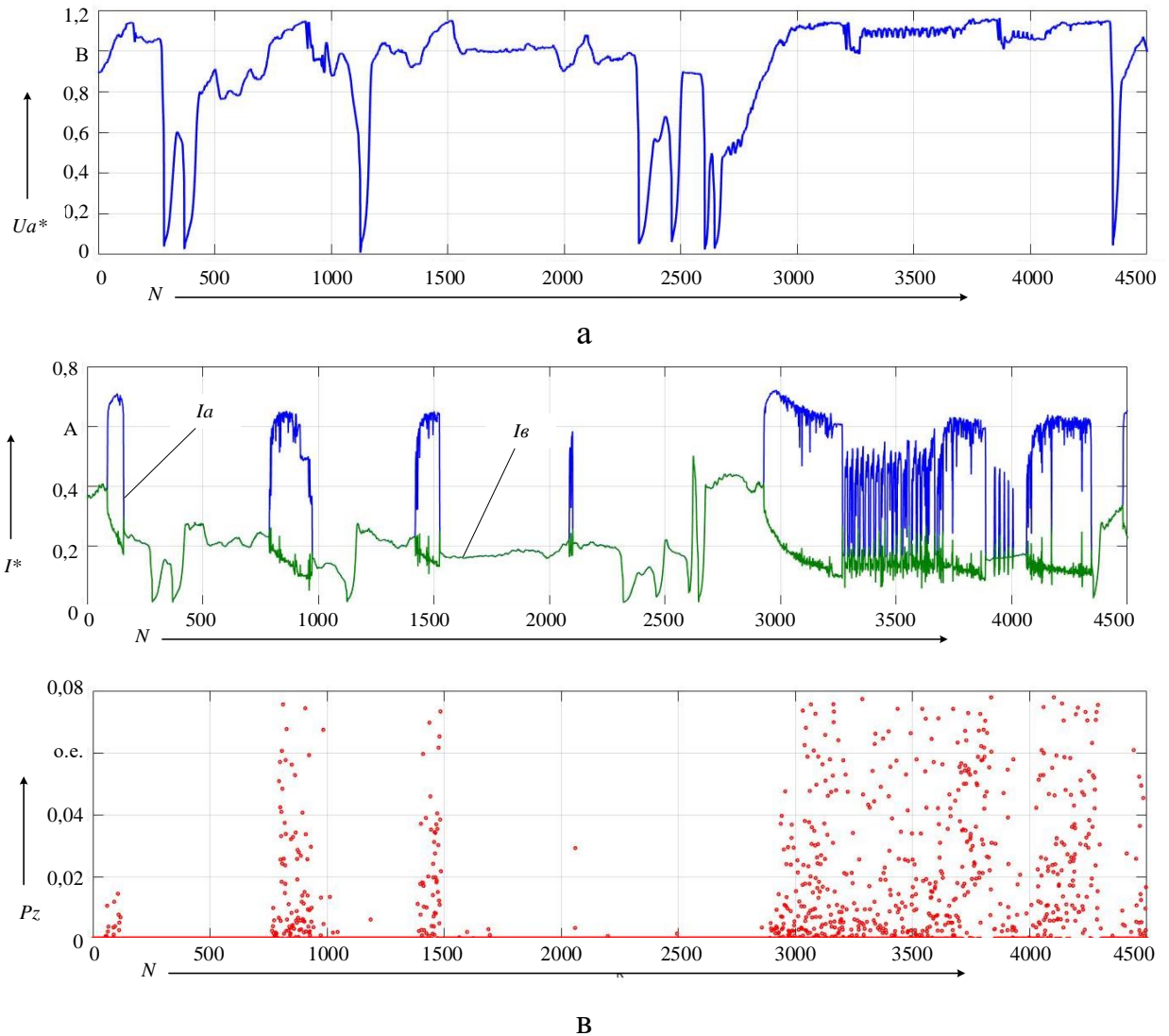


Рисунок 3.2 – Графики изменения входных и выходных величин для математической модели процесса коммутации коллекторно-щеточного узла ТЭД постоянного тока: а) – напряжения якоря; б – тока якоря и тока возбуждения; в – график изменения «процента засветки»

### 3.2 Моделирование работы тягового электродвигателя самосвала БЕЛАЗ в тяговом режиме

В тяговом режиме ТЭД работает с полным возбуждением и ослаблением поля, в установившемся режиме напряжение ( $U_a$ ), приложенное к якору, в соответствии со вторым законом Кирхгофа уравнивается противо-ЭДС ( $E_a$ ), наведенной в якоре и падением напряжения в якорной цепи:

$$U_a = E_a + I_a R_a, \quad (3.1)$$

где  $R_a$  – сопротивление якорной цепи двигателя, Ом, включающее сопротивления обмотки якоря, щеточного контакта, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки.

Противо-ЭДС якоря можно определить по выражению:

$$E_a = \frac{\pi}{30} k \Phi n, \quad (3.2)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, Вб;

$n$  – частота вращения якоря, об/мин;

$k$  – конструктивный коэффициент машины постоянного тока.

$$k = \frac{p N_{пр}}{2\pi a}, \quad (3.3)$$

где  $p$  – число пар полюсов машины постоянного тока,  $p = 3$ ;

$N_{пр}$  – число активных проводников обмотки якоря,  $N_{пр} = 648$ ;

$a$  – число пар параллельных ветвей обмотки якоря,  $a = 2$ .

Таким образом, конструктивный коэффициент ТЭД  $k = 154,7$ .

С использованием выражений (3.1) – (3.3) можно записать зависимость между напряжением, током якоря и током возбуждения и частотой вращения якоря:

$$n(U_a, I_a, I_B) = \frac{30}{\pi} \left( \frac{U_a - I_a R_a}{k \Phi(I_a, I_B)} \right). \quad (3.4)$$

### 3.2.1 Регрессионная модель для моделирования процесса коммутации коллекторно-щеточного узла тягового двигателя постоянного тока самосвала БЕЛАЗ в тяговом режиме

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 [20, 33, 122]. Сумма квадратов отклонений экспериментальных и теоретических значений «процента засветки» было получено для следующей нелинейной функции:

$$P_{z.model}(I_a, I_B, U_a) = a_0 + a_1 I_a^{d_1} + a_2 I_B^{d_2} + a_3 U_a^{d_3}, \quad (3.5)$$

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

$d_1, d_2, d_3$  – показатели степени факторов.

С использованием массива данных размерностью ( $N \times 4$ ) необходимо методом наименьших квадратов определить коэффициенты  $a_0, a_1, a_2, a_3$  функциональной зависимости (3.5), для этого необходимо найти минимум следующего функционала:

$$F_{\min}(a_0, a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1 I_a^{d_1} + a_2 I_B^{d_2} + a_3 U_a^{d_3} - P_{z.экс i})^2 \rightarrow \min. \quad (3.6)$$

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 (3.5) и упростить определение коэффициентов  $a_0, a_1, a_2, a_3$  методом наименьших квадратов [14].

Для вычисления коэффициентов  $a_0, a_1, a_2, a_3$ , для которых функция (3.6) принимает минимальное значение (при постоянных значениях показателей степени  $d_1, d_2, d_3$ ) определим частные производные по каждой из переменной функции (3.6):

$$\frac{dF_{\min}(a_0, a_1, a_2, a_3)}{da_0} = 2Na_0 + 2 \sum_{i=1}^N I_{a.i}^{d_1} a_1 + 2 \sum_{i=1}^N I_{B.i}^{d_2} a_2 + 2 \sum_{i=1}^N U_{a.i}^{d_3} a_3 - 2 \sum_{i=1}^N P_{z.экс.i}; \quad (3.7)$$

$$\frac{dF_{\min}(a_0, a_1, a_2, a_3)}{da_1} = 2 \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} a_0 + 2 \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{2 \cdot d1} a_1 + 2 \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} I_{b,i}^{d2} a_2 + 2 \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} U_{a,i}^{d3} a_3 - 2 \sum_{i=1}^N P_{z, \text{экс}, i} I_{a,i}^{d1}; \quad (3.8)$$

$$\frac{dF_{\min}(a_0, a_1, a_2, a_3)}{da_2} = 2 \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d2} a_0 + 2 \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} I_{b,i}^{d2} a_1 + 2 \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{2 \cdot d2} a_2 + 2 \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d2} U_{a,i}^{d3} a_3 - 2 \sum_{i=1}^N P_{z, \text{экс}, i} I_{b,i}^{d2}; \quad (3.9)$$

$$\frac{dF_{\min}(a_0, a_1, a_2, a_3)}{da_3} = 2 \sum_{i=1}^N U_{a,i}^{d3} a_0 + 2 \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} U_{a,i}^{d3} a_1 + 2 \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d2} U_{a,i}^{d3} a_2 + 2 \sum_{i=1}^N U_{a,i}^{2 \cdot d3} a_3 - 2 \sum_{i=1}^N P_{z, \text{экс}, i} U_{a,i}^{d3}. \quad (3.10)$$

Приравняем частные производные по каждой из переменной (3.7) – (3.10) к нулю и запишем полученную систему линейных уравнений в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} N & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} & \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d2} & \sum_{i=1}^N U_{a,i}^{d3} \\ \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{2 \cdot d1} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} I_{b,i}^{d2} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} U_{a,i}^{d3} \\ \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d2} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} I_{b,i}^{d2} & \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{2 \cdot d2} & \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d2} U_{a,i}^{d3} \\ \sum_{i=1}^N U_{a,i}^{d3} & \sum_{i=1}^N I_{a,i}^{d1} U_{a,i}^{d3} & \sum_{i=1}^N I_{b,i}^{d2} U_{a,i}^{d3} & \sum_{i=1}^N U_{a,i}^{2 \cdot d3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N P_{z, \text{экс}, i} \\ \sum_{i=1}^N P_{z, \text{экс}, i} I_{a,i}^{d1} \\ \sum_{i=1}^N P_{z, \text{экс}, i} I_{b,i}^{d2} \\ \sum_{i=1}^N P_{z, \text{экс}, i} U_{a,i}^{d3} \end{pmatrix}. \quad (3.11)$$

В результате решения системы линейных алгебраических уравнений (3.11) для заданных показатели степени факторов  $d_1, d_2, d_3$  можно определить коэффициенты  $a_0, a_1, a_2, a_3$ .

На следующем этапе степени  $d_1, d_2, d_3$  уточняются, 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 (3.6).

С использованием экспериментальных данных система алгебраических уравнений (3.11) была решена многократно [20] 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 (3.6) было получено для следующих значений  $d_1 = 0,5$ ;  $d_2 = -0,3$ ;  $d_3 = 4,5$ .

Запишем систему алгебраических уравнений (3.11) с учетом определенных значений коэффициентов  $d_1, d_2, d_3$  для входных величин, заданных в абсолютных единицах:

$$\begin{pmatrix} 4,59 \cdot 10^3 & 7,84 \cdot 10^4 & 1,01 \cdot 10^3 & 8,69 \cdot 10^{16} \\ 7,84 \cdot 10^4 & 1,48 \cdot 10^6 & 1,7 \cdot 10^4 & 1,67 \cdot 10^{18} \\ 1,01 \cdot 10^3 & 1,7 \cdot 10^4 & 230,65 & 1,89 \cdot 10^{16} \\ 8,69 \cdot 10^{16} & 1,67 \cdot 10^{18} & 1,89 \cdot 10^{16} & 2,16 \cdot 10^{30} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 103,01 \\ 2,358 \cdot 10^3 \\ 23,999 \\ 3,201 \cdot 10^{15} \end{pmatrix}.$$

В результате решения этой системы получаем значения неизвестных коэффициентов для входных величин в абсолютных единицах (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Значения неизвестных коэффициентов нелинейной модели для входных величин в абсолютных единицах

Коэффициенты	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Значение	$-137,42 \cdot 10^{-3}$	$3,023 \cdot 10^{-3}$	$361,048 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-15}$

Нелинейная функция модели с определенными коэффициентами для входных величин в абсолютных единицах:

$$P_{z.model}(I_a, I_B, U_a) = 0,13742 + 3,023 \cdot 10^{-3} I_a^{0,5} + 0,361 I_B^{-0,3} + 1,51 \cdot 10^{-15} U_a^{4,5}. \quad (3.12)$$

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 меньшие 0,05, при этом большая часть значений «процента засветки» полученных экспериментально находится в диапазоне от 0 до 0,01.

Для того чтобы коэффициенты основной матрицы имели один порядок необходимо рассмотреть факторы в относительных величинах (относительно номинальных значений напряжения и тока якоря ТЭД).

Для определения неизвестных коэффициентов  $a_0, a_1, a_2, a_3$  и показателей степени  $d_1, d_2, d_3$  в выражении (3.5) можно также использовать систему уравнений (3.11).

Запишем систему алгебраических уравнений (3.11) для входных величин в относительных единицах:

$$\begin{pmatrix} 4589 & 2504,73 & 7993,84 & 4640 \\ 2504,73 & 1513,12 & 4279,93 & 2851,86 \\ 7993,84 & 4279,93 & 14377,43 & 7975,83 \\ 4640 & 2851,86 & 7975,83 & 6156,42 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 103,15 \\ 75,34 \\ 189,48 \\ 171,04 \end{pmatrix}.$$

В результате решения этой системы получаем значения неизвестных коэффициентов для входных величин в относительных единицах (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Значения неизвестных коэффициентов нелинейной модели для входных величин в относительных единицах

Коэффициенты	$a_0^*$	$a_1^*$	$a_2^*$	$a_3^*$
Значение	$-137,42 \cdot 10^{-3}$	$94,63 \cdot 10^{-3}$	$45,73 \cdot 10^{-3}$	$28,27 \cdot 10^{-3}$

Необходимо отметить, что коэффициенты  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  для факторов в относительных единицах будут иметь такие же значения:  $d_1 = 0,5$ ;  $d_2 = -0,3$ ;  $d_3 = 4,5$ .

Нелинейная функция модели с определенными коэффициентами для входных величин в относительных единицах:

$$P_{z.model}(I_{a*}, I_{\phi*}, U_{a*}) = 0,13742 + 94,63 \cdot 10^{-3} I_{a*}^{0,5} + 45,73 I_{\phi*}^{-0,3} + 28,27 \cdot 10^{-3} U_{a*}^{4,5}. \quad (3.13)$$

На рисунке 3.2 представлены двухмерные функции изменения значения  $P_z$ , определенные с использованием уравнения (3.9) для напряжений якоря от 800 до 1100 В с шагом 100 В, при этом вместо тока возбуждения был рассчитан коэффициент ослабления поля по выражению:

$$\beta = \frac{I_B}{I_a}. \quad (3.14)$$

Как видно из рисунка 3.3, среднее значение процента засветки увеличивается при увеличении напряжения якоря и уменьшении коэффициента ослабления воз-

буждения, т.к. в первом случае увеличивается разность потенциалов между коллекторными пластинами, а во втором случае увеличивается пульсации тока возбуждения, что оказывает негативное влияние на процесс коммутации КЩУ.

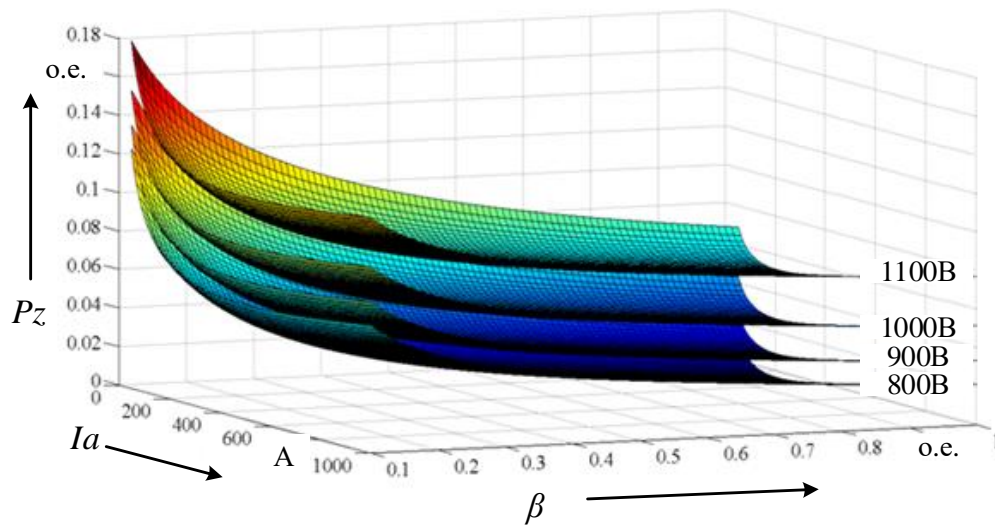


Рисунок 3.3 – Значения  $P_z$ , рассчитанные с использованием уравнения регрессионной модели при напряжениях якоря 800, 900, 1000 и 1100 В

Процесс возникновения искрения в КЩУ имеет вероятностную природу, поэтому необходимо определить закон распределения остатков регрессионной модели [122]. Распределение остатков регрессионной модели и кривая теоретического закона распределения вероятности приведена на рисунке 3.4.

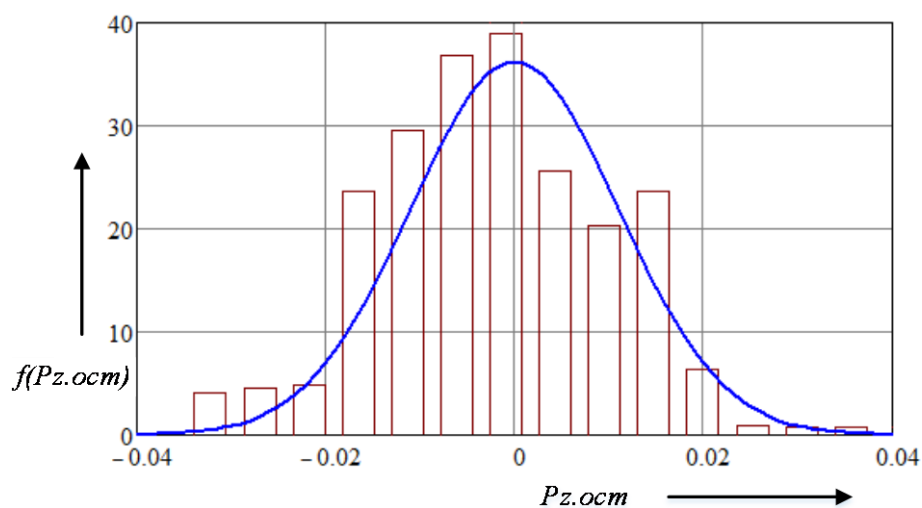


Рисунок 3.4 – Эмпирическая гистограмма процента засветки и выравнивающая кривая нормального закона распределения ( $\mu = 0$  и  $\sigma = 0,011$ )



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  $\sigma = 0,011$ .

Функция плотности вероятности остатков регрессионной модели:

$$f(X_{\text{ост}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(X_{\text{ост}} - 0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right). \quad (3.15)$$

Генерация случайных чисел, распределенных по нормальному закону может привести к отрицательным значениям величины процента засветки. Для средних значений близких к нулю может возникать ситуация, когда появляется вероятность появления отрицательных значений процента засветки. Для того чтобы процент засветки был больше единицы необходимо использовать усеченный нормальный закон распределения [122]. При этом площадь, ограниченная кривой плотности распределения вероятности должна быть равна единице, поэтому необходимо использовать нормирующий множитель. Нормирующий множитель для перехода от нормального закона распределения к усеченному равен:

$$A_{\text{ус}} = \frac{1}{\int_0^{\infty} f(X_{\text{ост}}) dX_{\text{ост}}}. \quad (3.16)$$

Плотность распределения усеченного нормального распределения на интервале  $[0, +\infty]$  будет равна:

$$f(X_{\text{ост}}) = \frac{A_{\text{ус}}}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,011} \exp\left(-\frac{(X_{\text{ост}} - 0)^2}{2 \cdot 0,011^2}\right). \quad (3.17)$$

В этом случае все сгенерированные случайные числа с использованием регрессионной модели будут иметь положительные значения.

Таким образом, функция плотности вероятности процента засветки:

$$f(P_z) = \frac{A_{\text{ус}}}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,011} \exp\left(-\frac{(X_{\text{ост}} - P_{z.model})^2}{2 \cdot 0,011^2}\right). \quad (3.18)$$

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 3.1:

$$B_i(x_k \leq P_z < x_{k+1}) = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f(P_z) dP_z, \quad (3.19)$$

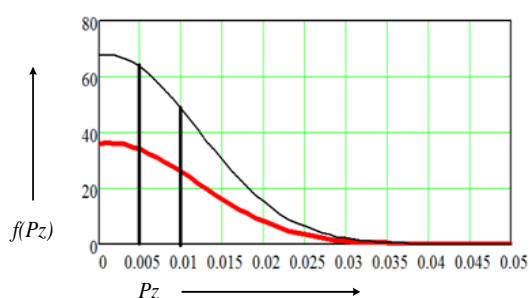
где  $x_k$  – граничные значения процента засветки в соответствии с таблицей 3.1.

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

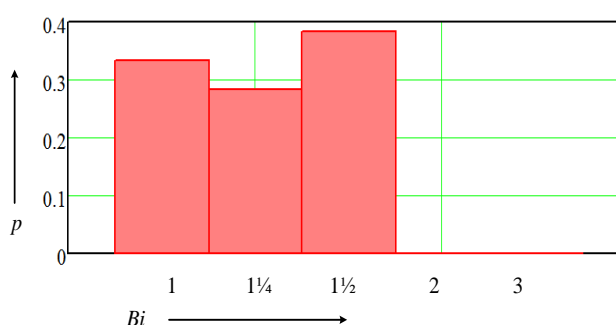
Для пояснения работы предложенной математической модели выполним моделирование с различными значениями напряжения, тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения, приведенными в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Исходные данные для моделирования

Величина	$U_a$ , В( $U_a$ , о.е.)	$I_a$ , А ( $I_a$ , о.е.)	$\beta$ , о.е.	$P_z.model$ (формула 3.9 или 3.10)
Значения 1	750(0,843)	550(0,561)	1	0,0009
Значения 2	900(1,011)	500(0,510)	0,6	0,0251
Значения 3	1100(1,236)	1000(1,020)	0,3	0,0967



а)



б)

Рисунок 3.5 – Плотность распределения вероятности при  $U_a = 750$ В,  $I_a = 550$ А,  $\beta = 1$ : а – процента засветки; б – распределение дискретной случайной величины классов искрения в соответствии со стандартной шкалой

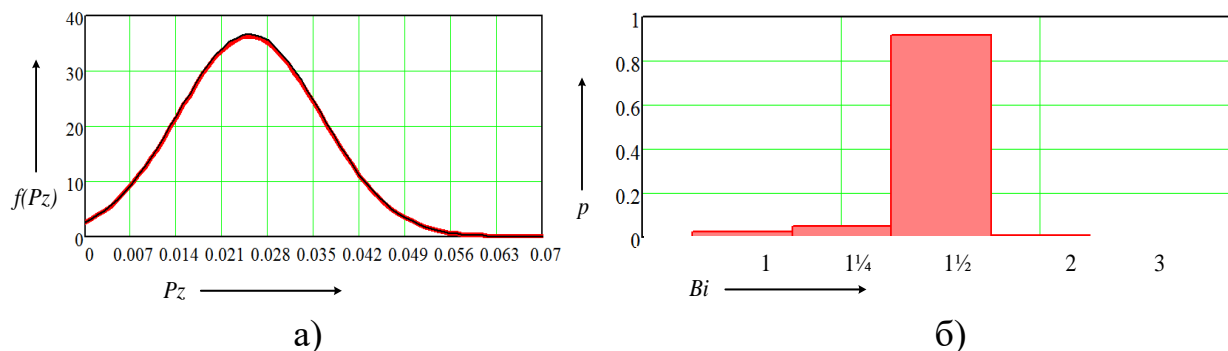


Рисунок 3.6 – Плотность распределения вероятности при  $U_a = 900\text{В}$ ,  $I_a = 500\text{А}$ ,  $\beta = 0,6$ : а – процента засветки; б – распределение дискретной случайной величины классов искрения в соответствии со стандартной шкалой

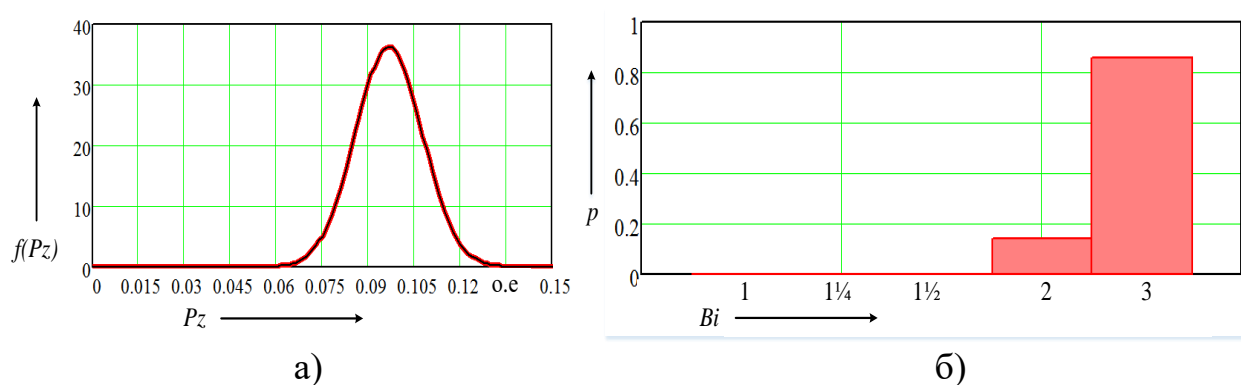


Рисунок 3.7 – Плотность распределения вероятности при  $U_a = 1100\text{В}$ ,  $I_a = 1000\text{ А}$ ,  $\beta = 0,3$ : а – процента засветки; б – распределение дискретной случайной величины классов искрения в соответствии со стандартной шкалой

С использованием предложенной регрессионной модели можно определить допустимые режимы работы автосамосвала и разработать организационные и технические мероприятия направленные на повышение коммутационной устойчивости ТЭД в эксплуатации.

### 3.2.2 Проверка адекватности регрессионной модели

«Коэффициент детерминации обычно рассматривают в качестве основного показателя, отражающего меру качества регрессионной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели. Коэффициент детерминации показывает, какая доля вариации переменной  $P_z$  учтена в модели и

обусловлена влиянием на нее факторов, включенных в модель» [33]. Определим коэффициент детерминации по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_{z.экc.i} - P_{z.model.i})^2}{\sum_{i=1}^N (P_{z.экc.i} - P_{z.сp})^2}, \quad (3.20)$$

где  $P_{z.сp}$  – среднее значение величины по экспериментальным данным.

Коэффициент детерминации для регрессионного уравнения (3.20) 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.

Определим критерий Фишера для проверки статистической значимости параметров регрессионной модели:

$$F_{набл} = \frac{R^2}{(1 - R^2)} \frac{(N - k)}{(k - 1)} > F_{крит}, \quad (3.21)$$

где  $k$  – количество независимых переменных регрессионной модели ( $k = 3$ ).

В результате расчета по выражению (3.18) критерий Фишера равен:

$$F_{набл} = \frac{0,62}{(1 - 0,62)} \frac{(4589 - 3)}{(3 - 1)} = 3741,2.$$

Критическое значение распределения Фишера для уровня доверия 0,95, трех факторов и 4589 измерений равно  $F_{крит} = 2,6$ . Если  $F_{набл} > F_{крит}$ , то можно принять гипотезу о статистической значимости параметров уравнения регрессии [122].

### 3.3. Выводы по главе

В третьей главе был выполнен моделирование процесса коммутации ТЭД самосвала БЕЛАЗ.

1. На основании анализа экспериментальных данных, полученных из системы мониторинга работы ТЭД самосвала БЕЛАЗ, определена длительность работы тяговых электрических машин самосвала в различных режимах, оценено влияние режимов работы на интенсивность искрения.

2. Приведены расчетные выражения, постоянные коэффициенты ТЭД ЭДП-800 необходимые для расчета частоты вращения якоря в зависимости от напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения.

3. На основании экспериментальных данных, полученных из системы мониторинга ТЭД самосвала БЕЛАЗ, составлена нелинейная регрессионная модель, которая позволяет оценить влияние напряжения якоря, тока якоря, тока возбуждения ТЭД на степень искрения в КЩУ.

4. С использованием регрессионной модели определены вероятности появления искрения в КЩУ с различными классами коммутации в зависимости от заданных значений напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения ТЭД.

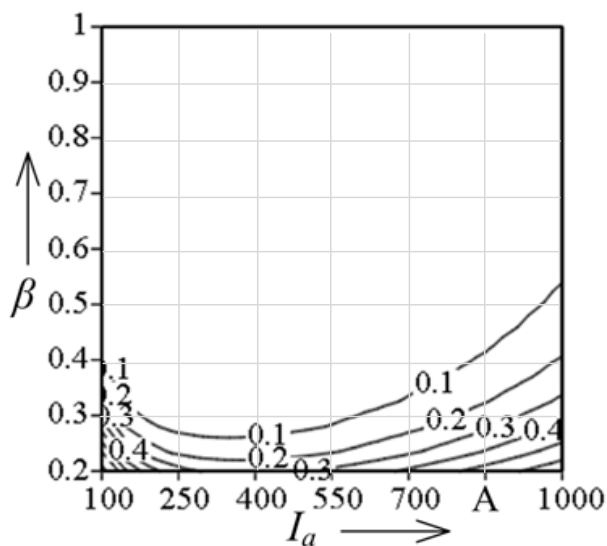
5. Для оценки адекватности предложенной регрессионной модели было выполнено сравнение полученных экспериментальных данных и данных математической модели, коэффициент детерминации составил 0,62, что указывает на то, что вариация результативного признака на 62 % зависит от вариации факторных признаков. Критерий Фишера больше своего критического значения распределения, что свидетельствует о статистической значимости параметров уравнения регрессии.

## **ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ КОММУТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ БЕЛАЗ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

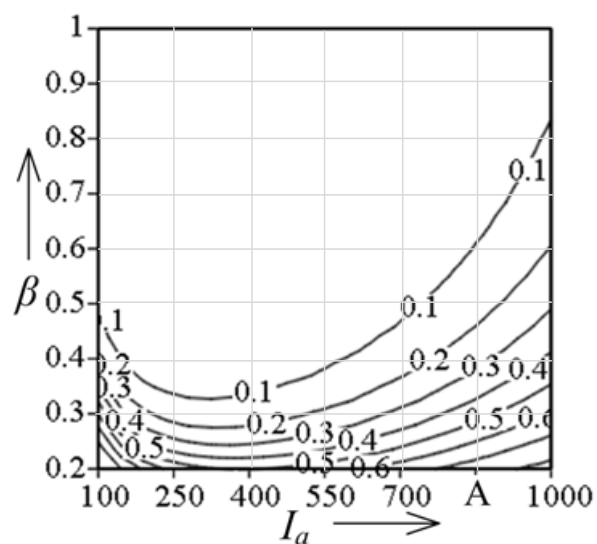
Во время эксплуатации карьерного самосвала в угольном разрезе тяговые машины работают в двигательном режиме с полным возбуждением и ослаблением поля, в режиме динамического торможения. В условиях эксплуатации нужно непрерывно изменять режимы работы ТЭД для обеспечения необходимой скорости движения и силы тяги, в некоторых режимах имеет место появления неудовлетворительной коммутации КЩУ[118]. Анализ данных, полученных с помощью видеоизмерительного комплекса, показал, что в двигательном режиме с ослаблением поля появляются условия, приводящие к возникновению неудовлетворительной коммутации, в остальных же режимах преобладает «темная коммутация» [38].

Разработанная регрессионная модель позволяет рассчитывать математическое ожидание величины «процента засветки» (3.9) в зависимости от тока якоря, тока возбуждения и напряжения якоря во всей область адекватности модели. По известной плотности вероятности «процента засветки» (3.14) для заданных значений напряжения якоря, тока якоря и возбуждения можно определить закон распределения дискретной случайной величины возникновения искрения с различными баллами соответствующими стандартной шкале (3.15).

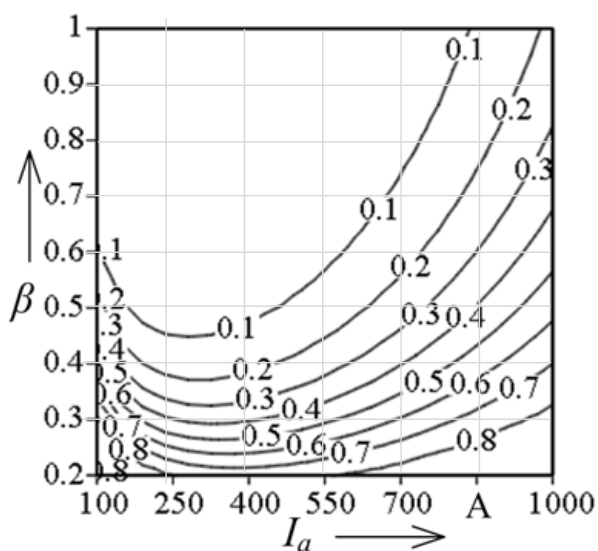
На рисунке 4.1 приведены линии уровня вероятностей появления степени искрения в 2 балла при изменении тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения для различных напряжений якоря, полученных в результате моделирования с заданными граничными значениями «процента засветки» от 0,05 до 0,09.



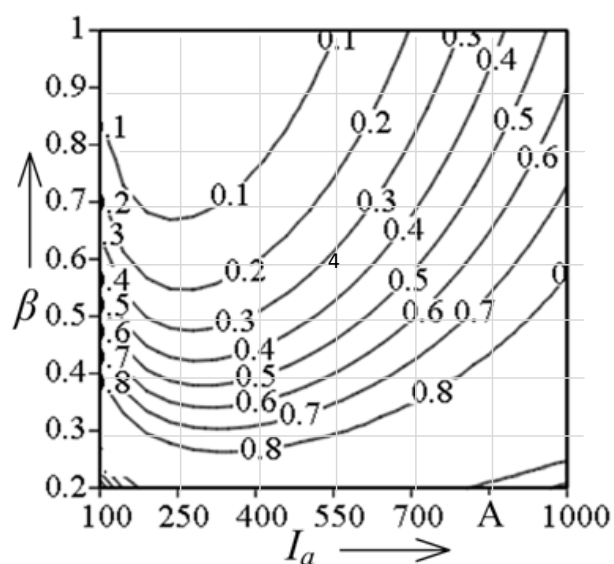
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.1 – Вероятности появления искрения в 2 балла при изменении тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения для различных напряжений якоря (а)  $U_a = 900\text{В}$ ; б)  $U_a = 950\text{В}$ ; в)  $U_a = 1000\text{В}$ ; г)  $U_a = 1050\text{В}$ )

При увеличении напряжения якоря область допустимых значений тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения, при которых вероятность появления искрения 2 балла ниже 0,1 уменьшается и смещается вверх.

Увеличение вероятности появления искрения в 2 балла имеет место в случаях увеличении напряжения якоря, что можно объяснить увеличением разности потен-

циалов между коллекторными пластинами и при уменьшении коэффициента возбуждения, что можно объяснить увеличением пульсаций токов якоря и возбуждения, обусловленных работой системы управления ТЭП. Режим работы, при котором напряжение якоря более 1000 В и коэффициент ослабления возбуждения менее 0,3-0,4 приводит к появлению искрения КЩУ в 2 балла с высокой вероятностью (см. рисунок 4.1, в, г).

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  $p$ .

Для пояснения на рисунке 4.2 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 (3,9), не должно превышать 0,032. Для приведенного примера вероятность возникновения искрения со степенью 2 балла равна  $p = 0,05$ . По выражению (3,9) определим значение  $P_{z.model}$ , при котором вероятность искрения 2 балла будет равна значению 0,05 (нормирующий множитель  $A_{ус}$  равен 1,002),  $P_{z.model.p} = 0,032$ .

Таким образом, можно определить максимально допустимое значение напряжения якоря при различных коэффициентах ослабления возбуждения и токе якоря, при котором вероятность возникновения искрения в 2 балла равна  $p$ :

$$U_a(I_a, \beta) = \sqrt[3]{\frac{P_{z.model.p} + a_0 - a_1 I_a^{d1} - a_2 (\beta I_a)^{d2}}{a_3}}. \quad (4.1)$$



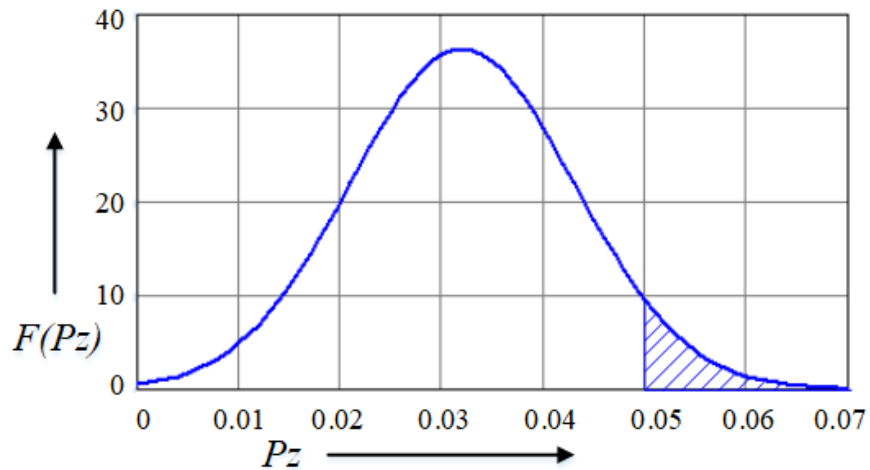


Рисунок 4.2 – Плотность распределения вероятности при  $P_{z,model} = 0,032$

На рисунке 4.3 приведены области допустимых значений напряжения якоря при различных значениях коэффициента ослабления возбуждения и тока якоря. Область допустимых значений напряжения якоря и тока якоря ограничена соответствующей кривой и осями абсцисс и ординат, при различных значений коэффициента ослабления возбуждения.

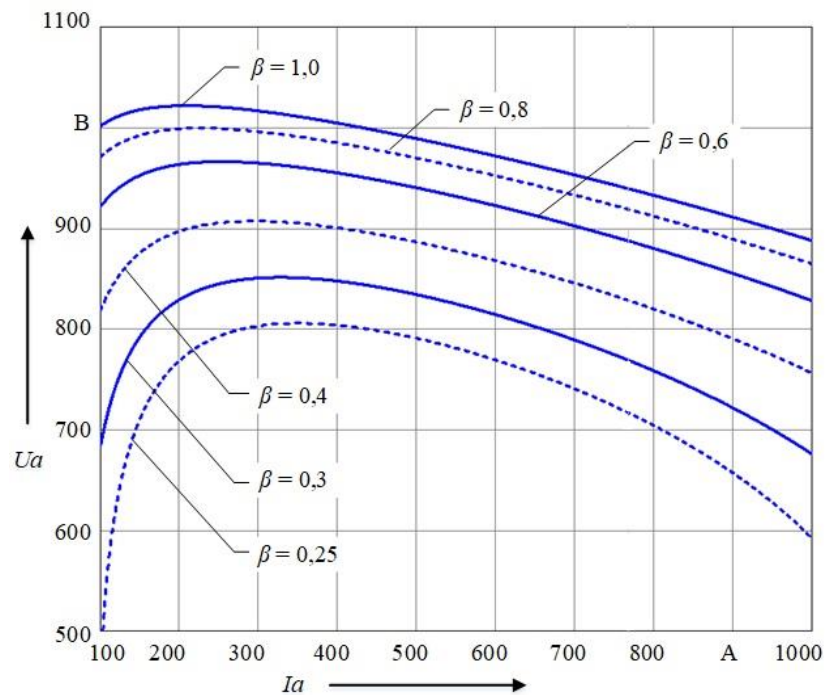


Рисунок 4.3 – Допустимые значения напряжения якоря при различных значениях тока якоря и коэффициента ослабления возбуждения для вероятности возникновения искрения 2 балла равной  $p = 0,05$

#### 4.1 Описание методики повышения коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей БЕЛАЗ в условиях эксплуатации

Для определения допустимых режимов работы ТЭД карьерного самосвала БЕЛАЗ с удовлетворительной коммутацией, разработана методика [113], алгоритм которой приведен на рисунке 4.4. В качестве критерия удовлетворительной коммутации был выбран уровень 1 ½ балла по стандартной шкале.

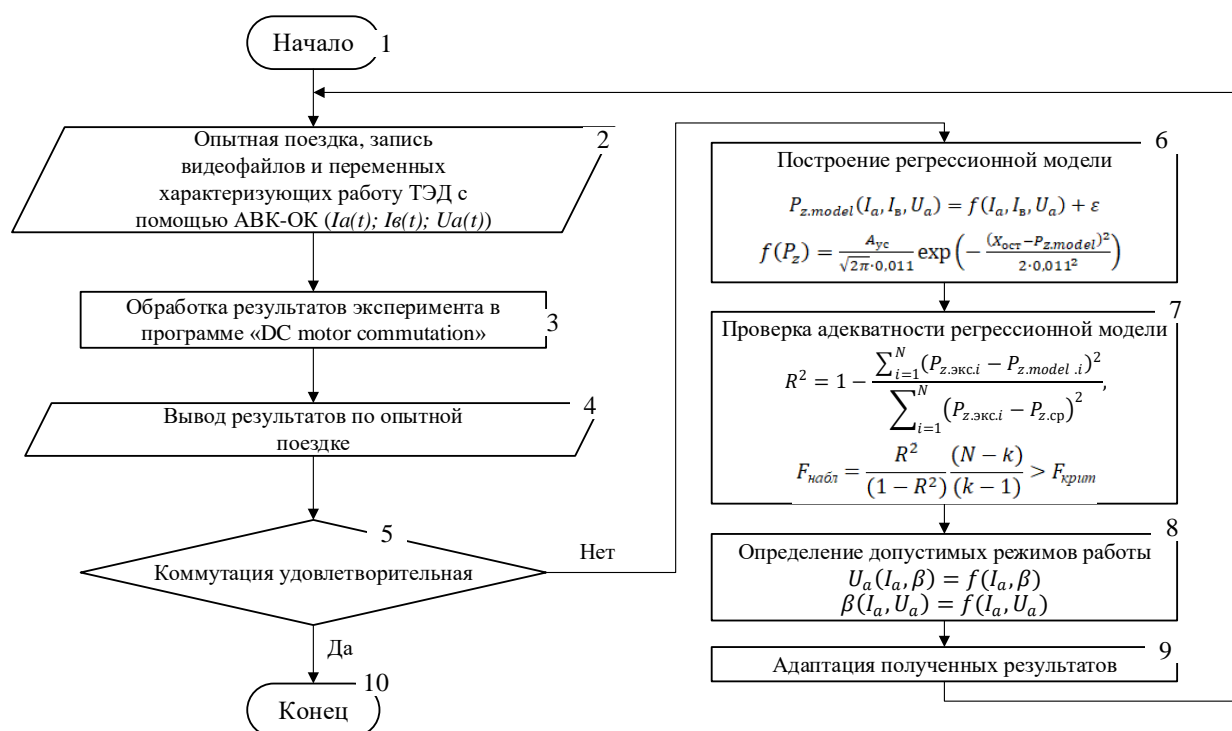


Рисунок 4.4 – Алгоритм определения допустимых режимов работы ТЭД карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации

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) обработка результатов эксперимента с помощью программы «DC motor commutation» (блок 3);
- 3) формирование отчета о качестве коммутации и режимах работы ТЭД (блок 4);

4) оценка качества коммутации ТЭД для выбранного участка эксплуатации карьерного самосвала (блок 5);

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

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

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

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

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

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.

#### **4.2 Пример реализации методики повышения коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей БЕЛАЗ в эксплуатации**

Используя результаты регрессионной модели специалистами ООО «Сиб-электропривод», ОДО «СТРИМ» и ОАО «БЕЛАЗ» проведены опытные работы по настройке ЭМТ с учетом коммутации на ТЭД [38]. На полигоне ОАО «БЕЛАЗ» провели подбор условий включения и ограничения режимов работы ЭМТ, а также доработано программное обеспечение блока управления тиристорами ослабления поля (БУТОП) и модулей высоковольтных сенсоров (МВС). Принятые меры поз-

волили снизить коэффициент пульсации тока возбуждения и тока якоря, ограничить глубину ослабления поля 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 на коммутацию ТЭД.

При заводских настройках:

1) наблюдался класс коммутации  $1\frac{1}{4}$ –  $1\frac{1}{2}$ с повышением до 2– в режиме ослабления поля, 1 – в режиме двигателя с полным полем,  $1\frac{1}{4}$  –  $1\frac{1}{2}$ в генераторном режиме (эл. динамическое торможение) – рисунок 4.5 а;

2) в режиме ослабления поля наблюдались значительные пульсации тока якоря, коэффициент пульсации составил 0,25, степень ослабления поля на некоторых участках была ниже 0,3.

После обновления ПО:

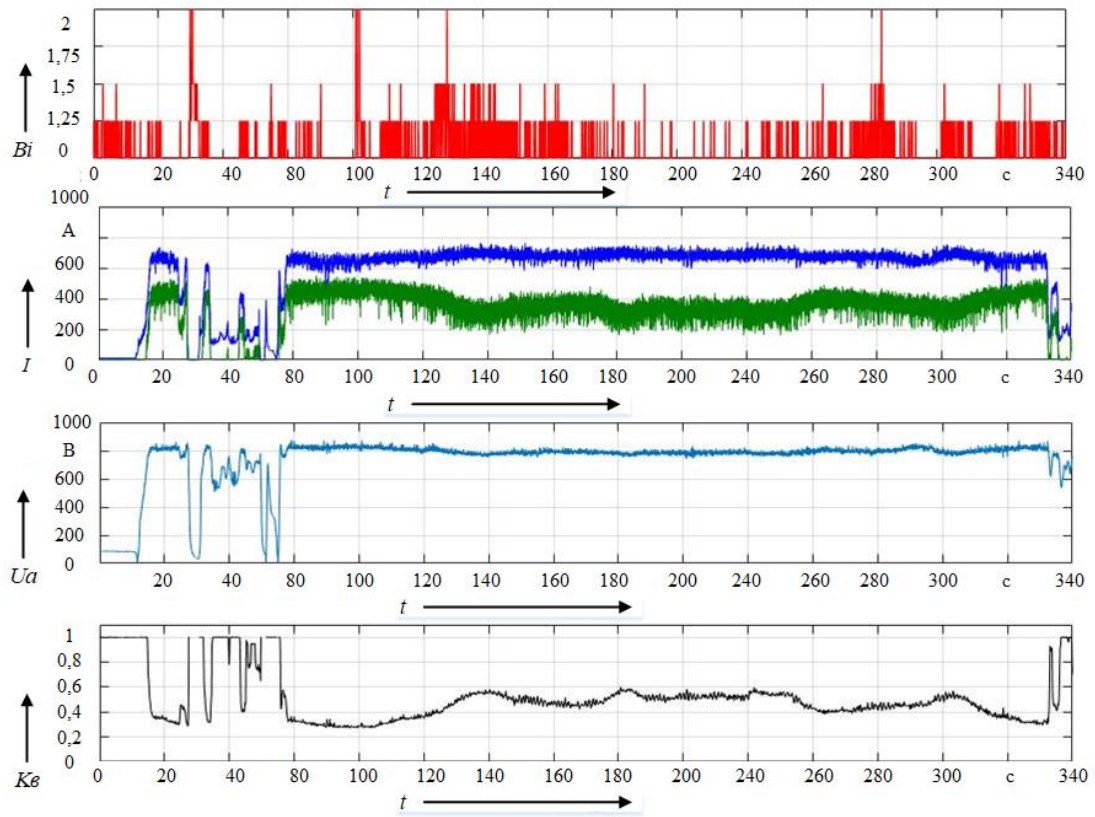
1) наблюдался класс коммутации  $1\frac{1}{4}$ с повышением до  $1\frac{1}{2}$  (редко 2) – в режиме ослабления, 1 – в режиме двигателя с полным полем,  $1\frac{1}{4}$ – в генераторном режиме (эл. динамическое торможение) – рисунок 4.5 б;

2) в режиме ослабления поля наблюдались значительные пульсации тока якоря, коэффициент пульсации составил 0,1-0,15.

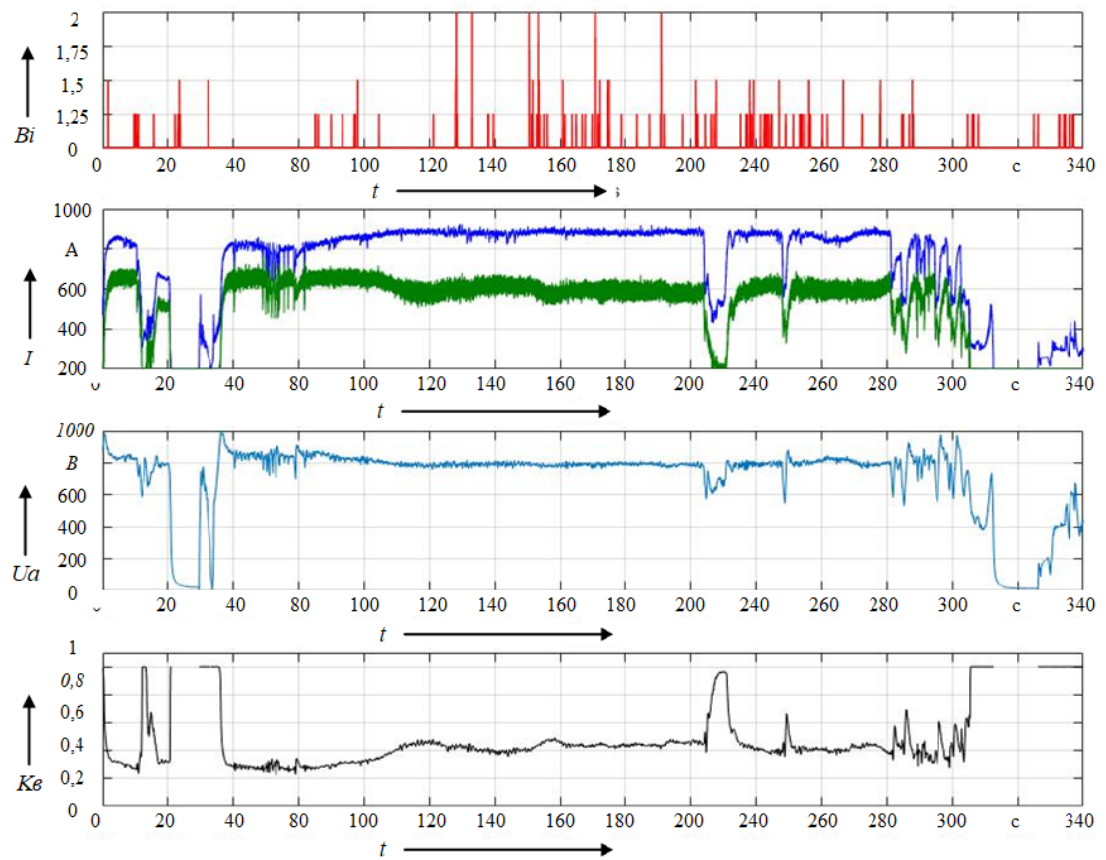
В таблице 4.1 приведено сравнение интенсивности искрения при заводских настройках и после обновления ПО.

Таблица 4.1 – Продолжительность работы в зависимости от интенсивности искрения

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



а)



б)

Рисунок 4.5 – Графики коммутации и электрических параметров правого ТЭД  
(а – с заводскими настройками; б – после обновления ПО)

Новое программное обеспечение и настройки позволяют:

- снизить коэффициент пульсации тока силовой цепи и контролировать степень ослабления поля;
- повысить коммутационную устойчивость ТЭД, тем самым увеличив продолжительность работы с «темной коммутацией» в тех же режимах работы на 14,94%.

Предложенный подход к определению допустимых режимов работы карьерного самосвала, позволяет повысить коммутационную устойчивость ТЭД в эксплуатации. Используя данную методику возможно повысить надежность ТЭД и сократить эксплуатационные расходы.

## ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КОММУТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БЕЛАЗ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

### 5.1 Расчет интенсивности износа щеток при эксплуатации тяговых электродвигателей и факторы, влияющие на износ щеток

В соответствие с установившимися взглядами износ представляет собой динамическое взаимодействие контактирующих элементов, его следствием является уменьшение размеров этих элементов, изменение состояния поверхностей взаимодействия и, в конечном счете, изменение служебных качеств, находящихся в контакте тел [66]. Износ обусловлен многими факторами – механическими, электрическими, химическими и электролитическими факторами, также на износ влияет температура и влажность окружающей среды.

Процесс износа электрощеток и факторы на него влияющие подробно рассмотрен в работах Р. Хольма, А.Д. Авилова, В.В., Харламова, С.И. Качина, Плохова и др. [121, 16, 57, 98]. Все исследователи сходятся во мнении, что коммутация существенно влияет на ресурс КЩУ – приводит к ускоренному износу щеток и коллектора.

Основной вклад в изнашивание контактирующих поверхностей вносят механические и электрические факторы [78], рассмотрим их подробнее и для упрощения расчета, не будем брать остальные, т.к. их действие сравнительно не велико и существенно не повлияет на конечный расчет.

На износ влияют три составляющие:

1) Фрикционная составляющая интенсивности изнашивания щеток:

$$\frac{\Delta I_{\phi}}{\Delta t} = K_{\phi} \cdot n \cdot P_{щ.ср.}, \quad (5.1)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент, характеризующий фрикционную составляющую;

$P_{щ.ср.}$  – среднее давление на щетку, Н/м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – рассматриваемый временной интервал, с.

2) Электрокоррозионная составляющая интенсивности изнашивания щеток:

$$\frac{\Delta I_{ЭК}}{\Delta t} = K_{ЭК} \cdot n^{\frac{3}{4}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot P_{щ.ср.}^{\frac{1}{2}}, \quad (5.2)$$

где  $K_{ЭК}$  – коэффициент, характеризующий электрокоррозионную составляющую.

3) Электроэрозионная составляющая интенсивности изнашивания щеток:

$$\frac{\Delta I_{ЭР}}{\delta t} = K_{ЭР} \cdot W_{и} \cdot n, \quad (5.3)$$

где  $K_{ЭР}$  – коэффициент, характеризующий электроэрозионную составляющую;

$W_{и}$  – энергия искрения под щеткой в относительных единицах, о.е.

Зная все три составляющие, можно получить изнашивание щеток ТЭД:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\Delta I_{\phi}}{\Delta t} + \frac{\Delta I_{ЭК}}{\Delta t} + \frac{\Delta I_{ЭР}}{\delta t}. \quad (5.4)$$

Оценка интенсивности искрения с новыми и старыми настройками системы управления ТЭД проводилась практически в одинаковых условиях и с одинаковыми нагрузками, поэтому будем считать, что изменения не повлияли на фрикционный и электрокоррозионный износ.

$$\frac{\Delta I_{\phi 1}}{\Delta t} = \frac{\Delta I_{\phi 2}}{\Delta t} = \frac{\Delta I_{\phi}}{\Delta t} = const, \quad (5.5)$$

где  $\frac{\Delta I_{\phi 1}}{\Delta t}, \frac{\Delta I_{\phi 2}}{\Delta t}$  – фрикционная составляющая изнашивания щеток до и после изменения настроек СУ соответственно.

$$\frac{\Delta I_{ЭК 1}}{\Delta t} = \frac{\Delta I_{ЭК 2}}{\Delta t} = \frac{\Delta I_{ЭК}}{\Delta t} = const, \quad (5.6)$$

где  $\frac{\Delta I_{ЭК 1}}{\Delta t}, \frac{\Delta I_{ЭК 2}}{\Delta t}$  – электрокоррозионная составляющая изнашивания щеток до и после изменения настроек СУ соответственно.

С учетом данных таблицы 4.1 перепишем выражение (5.3) для электроэрозионного износа со старыми и новыми настройками СУ:



$$\frac{\Delta I_{\text{ЭК1}}}{\Delta t} = K_{\text{ЭР}} \cdot n \cdot (86,9W_{u(1)} + 11,5W_{u(1\frac{1}{4})} + 1,44W_{u(1\frac{1}{2})} + 0,12W_{u(2)}), \quad (5.7)$$

$$\frac{\Delta I_{\text{ЭК2}}}{\Delta t} = K_{\text{ЭР}} \cdot n \cdot (95,18W_{u(1)} + 4,14W_{u(1\frac{1}{4})} + 0,55W_{u(1\frac{1}{2})} + 0,14W_{u(2)}) \quad (5.8)$$

где  $W_{u(i)}$  – энергия искрения под щеткой для соответствующего класса коммутации, о.е.

Энергию искрения под щетками можно определить по экспериментальным данным с помощью прибора контроля коммутации ПКК-5Ц [111]. Для ЭДП-800 границы интервалов баллов интенсивности искрения приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Соотношение интенсивности искрения и энергии коммутации для ЭДП-800

Баллы по ГОСТ 2582-2013	1	1 1/4	1 1/2	2
Энергия искрения, о.е.	0-20	20-40	40-70	70-100
Средние значения энергии искрения $W_{u(i)}$ , о.е.	10	30	55	85

Подставив значение  $W_{u(i)}$  в выражения (5.7) и (5.8) определим отношение электроэрозионного износа при новых настройках системы управления ТЭД к износу со старыми настройками, получим:

$$\frac{\Delta I_{\text{ЭК2}}}{\Delta I_{\text{ЭК1}}} = 0,64.$$

Снижение общего износа щеток можно определить по формуле (5.9):

$$k = \left(1 - \frac{\Delta I_1}{\Delta I_2}\right) \cdot 100\%. \quad (5.9)$$

$$k = \left(1 - \frac{\Delta_{\text{щ.ф.}} + \Delta_{\text{щ.л}} + 0,64 \cdot \Delta_{\text{щ.э1}}}{\Delta_{\text{щ.ф.}} + \Delta_{\text{щ.л}} + \Delta_{\text{щ.э1}}}\right) \cdot 100\%. \quad (5.10)$$

Проведенные исследования показали, что на интервале времени  $\Delta t$  при искрении в КЩУ и номинальном токе каждая из трех составляющих делает свой вклад в изнашивание щетки в соответствии с таблицей 5.3 [6].

Таблица 5.2 – Вклад составляющих процесса изнашивания на износ щетки

Фактор	$\Delta I_{\phi}$	$\Delta I_{\text{ЭК}}$	$\Delta I_{\text{ЭР}}$
Вклад, %	30	15	55

Зная весовые коэффициенты, определим снижение общего износа по формуле (4.10):

$$k = \left(1 - \frac{30+15+0,64 \cdot 55}{30+15+55}\right) \cdot 100 = -19,8\%.$$

## 5.2 Расчет стоимости жизненного цикла тягового электродвигателя ЭДП-800

«Затраты жизненного цикла технического средства включают все затраты потребителя, связанные с его приобретением и владением им, то есть цену приобретения, сопутствующие единовременные расходы, а также эксплуатационные издержки за весь срок службы и расходы на утилизацию» [69].

Авторы многих работ отмечают, что «для сложных машиностроительных изделий стоимости обслуживания, топлива, ремонтов на протяжении жизни в несколько раз превышают стоимость приобретения и запуска изделия» [28, 108].

Стоимость жизненного цикла (СЖЦ) изделия разделяется на две основные части [28, 69]:

- 1) затраты, связанные с приобретением;
- 2) затраты, связанные с владением и утилизацией.

СЖЦ для ТЭД определяются по формуле, тыс.руб:

$$C_{\text{ЖЦ}} = C_{\text{пр}} + C_{\text{э}} + K_{\text{н}} - C_{\text{у}}, \quad (5.11)$$

где  $C_{\text{пр}}$  – цена приобретения объекта (первоначальная стоимость), тыс.руб;

$C_{\text{э}}$  – годовые эксплуатационные расходы при эксплуатации электродвигателя, тыс. руб.;

$K_{\text{н}}$  – сопутствующие единовременные затраты, связанные с внедрением новых инновационных решений в конструкцию электродвигателя, руб. Данные затраты при эксплуатации электродвигателя отсутствуют;

$C_{\text{у}}$  – ликвидационная стоимость электродвигателя, тыс. руб.

В общем случае цена приобретения объекта складывается из затрат на приобретение, установку, наладку, запуск на старте эксплуатации изделия.

В нашем расчете, в качестве ( $C_{\text{пр}}$ ), будем учитывать только рыночную стоимость ТЭД, т.к. он является составной частью более сложного изделия и все расходы, связанные со сборкой и пуско-наладкой карьерного самосвала потребитель несет на старте эксплуатации за конечный продукт.

По информации официальных дилеров примем  $C_{\text{пр}}=3350$  тыс. руб.

«Ликвидационная стоимость, рассчитываемая на конечной стадии эксплуатации электродвигателя с учетом дисконтирования, является величиной достаточно малой, поэтому при определении СЖЦ ее можно не учитывать» [68], соответственно  $C_{\text{у}}=0$  тыс.руб.

Структура эксплуатационных расходов состоит из затрат на плановое техническое обслуживание и неплановыми работами из-за отказа или снижения характеристик ТЭД:

$$C_{\text{э}} = K_{\text{н.з.ТО}} + K_{\text{н.з.Р}} + K_{\text{зч.ТО}} + K_{\text{зч.Р}}, \quad (5.12)$$

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

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

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

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

Техническое обслуживание электродвигателя включает в себя ежедневные осмотры и осмотры первого, второго и третьего объемов, которые направлены на поддержание его постоянной работоспособности. Руководство по эксплуатации не предусматривает плановых средних или капитальных ремонтов, однако предусматривает ремонт ТЭД и замену запасных частей по состоянию или пробегу.

Виды и периодичность технического обслуживания электродвигателя тягового ЭДП-800 УХЛ2 приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Виды и периодичность технического обслуживания электродвигателя тягового ЭДП-800 УХЛ2

Наименование видов технического обслуживания	Периодичность технического обслуживания
Ежедневное обслуживание (ЕО)	Ежедневно
Техническое обслуживание 1 (ТО-1)	Через каждые 250 ч.
Техническое обслуживание 2 (ТО-2)	Через каждые 500 ч.
Техническое обслуживание 3 (ТО-3)	Через каждые 1000 ч.

Ориентировочное количество ТО по годам эксплуатации приведено в таблице 5.4, за основу расчета взяты усредненные показатели из эксплуатации автосамосвала, среднегодовой пробег 8000мч, среднегодовая скорость 12 км/ч.

Таблица 5.4 – Интервалы ТО за срок службы электродвигателя

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Итого за ЖЦ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ЕО	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	3650
ТО1	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	160
ТО2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	80
ТО3	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	80
Проточка коллектора			1		1		1		1		4
Замена подшипников			1		1		1		1		4

Объемы работ по техническому обслуживанию электродвигателя, трудоемкости их выполнения приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Трудоемкость и объем технического обслуживания тягового электродвигателя ЭДП-800

Вид ТО	Выполняемые работы	Трудоемкость работ, н-ч
1	2	3
Ежедневное обслуживание (ЕО)	1. Проверить внешним осмотром состояние замков и уплотнений смотровых люков и выводных проводов электродвигателя	0,1
Техническое обслуживание ТО-1	1. Провести обслуживание как в ЕО. 2. Продуть внутренние полости электродвигателя сухим сжатым воздухом. 3. Обслуживание щеточно - коллекторного узла. Проверка отсутствия зависания щеток, проверка состояния щеток и замена при необходимости. 4. Проверка состояния кронштейнов, изоляторов и обойм щеткодержателей. 5. Проверка состояния коллектора.	0,6
Техническое обслуживание ТО-2	1. Произвести обслуживание как в ТО-1. 2. Замерить износ щеток и при необходимости заменить их. 3. Проверить состояние изоляции обмоток электродвигателя и замерить ее сопротивление. 4. Пополнить смазку подшипников.	0,9
Техническое обслуживание ТО-3	1. Произвести обслуживание как в ТО-1, ТО-2. 2. Проверить усилие нажатия на щетки. 3. Проверить биение коллектора.	1,3

Расчет стоимости работ по техническому обслуживанию электродвигателя за жизненный цикл по формуле:

$$K_{п.з.ТО} = [e_q \cdot T_i \cdot k_{всп} \cdot k_{соц}] \cdot n_{pi}, \quad (5.13)$$

где  $e_q$  – часовая тарифная ставка слесаря 5 или 3 разряда с учетом всех видов доплат и премий;

$T_i$  – трудоемкость технического обслуживания, н-ч;

$k_{всп}$  – коэффициент, учитывающий затраты времени на вспомогательные нужды  $k_{всп} = 1,093$ ;

$k_{соц} = 1,304$  – коэффициент, учитывающий выплаты по социальному налогу;  
 $n_{pi}$  – количество технических обслуживаний электродвигателя по видам за жизненный цикл.

При расчете времени продолжительности эксплуатации принимаем:

- жизненный цикл – 10 лет – срок службы электродвигателя;
- автосамосвал эксплуатируется 8000 ч в год.

Продолжительность эксплуатации электродвигателя ЭДП-800 УХЛ2 за жизненный цикл (Т), час:

$$T = 10 \cdot 8000 = 80000 \text{ч.}$$

Расчет затрат связанные с выплатой заработной платы обслуживающему персоналу приведен в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Расчет затрат связанные с выплатой заработной платы обслуживающему персоналу

Вид технического обслуживания и осмотра	Разряд работ	Час.тарифная ставка с учетом соц. налога, тыс.руб.	Трудоемкость технического обслуживания с учетом вспомогательного времени, н-ч	Количество технических обслуживаний за жизненный цикл	Стоимость трудозатрат на электродвигатель, тыс. руб
ЕО	3	0,35	0,1	3650	182,08
ТО-1	3	0,35	0,6	160	47,89
ТО-2	5	0,5	0,9	80	51,31
ТО-3	5	0,5	1,3	80	74,11
Итого ( $K_{н.з.ТО}$ ):					355,39

Основными расходными материалами при проведении технического обслуживания является консистентная смазка Литол-24-Мли 4/12-3 ГОСТ 21150-87 для подшипниковых узлов и щетки ЭГ-841 ТУ 16-538.218-74.

В процессе эксплуатации необходимо своевременно пополнять смазку подшипников через 500(±25) часов работы электродвигателя, а также проводить полную замену смазки при замене подшипников и при каждом разборе ТЭД.

Количество смазки для периодического пополнения: в шариковый подшипник – 80(+10) г; в роликовый подшипник – 100(+10) г. Количество смазки при полной замене: в шариковый подшипник – 800(+10) г; в роликовый подшипник – 1000(+10) г.

Величина затрат на пополнение смазки рассчитана по формуле:

$$K_{см} = \Pi_{см} (g_1 n_{см} + g_2 \cdot n_{дон}), \quad (5.14)$$

где  $\Pi_{см}$  – стоимость 1 кг смазки Литол-24-Мли 4/12-3 ГОСТ 21150 – 0,16 тыс. руб;

$g_1$  – расход на полную замену смазки – 1,82 кг;

$n_{см}$  – количество интервалов полной замены смазки;

$n_{дон}$  – количество пополнений смазки.

$$K_{см} = 0,16 \cdot (1,82 \cdot 4 + 0,18 \cdot 160) = 5,82 \text{ тыс.руб.}$$

Величина затрат на замену щеток рассчитана по формуле:

$$K_{щ} = \Pi_{щ} n_{щ}, \quad (5.15)$$

где  $\Pi_{щ}$  – стоимость одного комплекта щеток (18шт) (ЭГ-841 ТУ 16-538.218-74(2/12,5)х40х50, изготовитель завод «Прожекторные угли» г. Елец, Липецкой обл.) – 6,75 тыс. руб;

$n_{щ}$  – количество замен щеток за срок службы электродвигателя.

$$K_{щ} = 6,75 \cdot 65 = 438,75 \text{ тыс.руб.}$$

$$K_{зч.ТО} = K_t^{см} + K_t^{щ} = 5,82 + 438,75 = 444,22 \text{ тыс.руб.}$$

К техническому обслуживанию тягового электродвигателя относится проточка коллектора, а также замена подшипников. Проточка коллектора проводится по результатам замера биения коллектора при проведении ТО-3, в случае биения более 0,08 мм тяговый электродвигатель необходимо снять, и обслужить коллектор в соответствии с рекомендациями завода изготовителя. Для снятия ТЭД для проточки коллектора, производится его разборка, проводится проточка коллектора на станке, продорожка, снятие фасок и шлифовка, так же рекомендуется отчистить от загрязнения магнитную систему и подшипниковые щиты. По данным эксплуатирующих организаций проточка коллектора осуществляется каждые 140-200 тыс.км, но как правило не требуется первые два года эксплуатации.

Руководство по эксплуатации предписывает проводить замену подшипников каждые 200 тыс. км.

Таким образом затраты, связанные с выплатой заработной платы ремонтному персоналу, выполняющие ремонтные работы ТЭД ( $I_t^{om.3n}$ ) можно определить по формуле:

$$K_{п.з.р} = \sum [e_{\text{ч}} \cdot T_j \cdot k_{\text{всп}} \cdot k_{\text{соц}}] \cdot n_{pj}, \quad (5.16)$$

где  $e_{\text{ч}}$  – часовая тарифная ставка слесаря 5 или 3 разряда с учетом всех видов доплат и премий;

$T_j$  – трудоемкость технического обслуживания, н-ч;

$n_{pj}$  – количество технических обслуживаний электродвигателя по видам за жизненный цикл.

Расчет затрат на заработную плату ремонтному персоналу приведен в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Расчет затрат связанные с выплатой заработной платы ремонтному персоналу

Вид технического обслуживания и осмотра	Разряд работ	Час.тарифная ставка с учетом соц. налога, тыс.руб.	Трудоемкость технического обслуживания с учетом вспомогательного времени, н-ч	Количество технических обслуживаний за жизненный цикл	Стоимость трудозатрат на электродвигатель, тыс. руб
1	2	3	4	5	6
Демонтаж ТЭД и его разбора	5	0,5	33,6	4	95,78
Обработка коллектора	5	0,5	14,7	4	41,90
Замена подшипников	5	0,5	2,5	4	7,13



Окончание таблицы 5.7.

1	2	3	4	5	6
Мойка магнитной системы и якоря	3	0,35	0,5	4	1,00
Сушка магнитной системы и якоря	3	0,35	8	4	15,96
Сборка ТЭД, испытание и его монтаж	5	0,5	38,6	4	110,03
				Итого ( $K_{н.з.Р}$ ):	271,8

Затраты на запасные части для проведения ремонтных и восстановительных работ ( $I_t^{от.зч}$ ) определяются из стоимости, необходимого количества деталей и расходных материалов.

$$K_{зч.Р} = \sum C_j n_j, \quad (5.17)$$

где  $C_j$  – цена детали или материалов, тыс.руб;

$n_j$  – количество интервалов замены (использования);

Таблица 5.8 – Расчет затрат, связанных с ремонтом тягового электродвигателя

Наименование	Ед.изм	Кол-во за ЖЦ	Цена за ед, тыс. руб	Цена за ЖЦ, тыс. руб
Подшипник роликовый FAG 6326M.C4	шт	4	23,136	92,54
Подшипник шариковый FAG NU326.M1C3	шт	4	28,92	115,68
Щетки ЭГ-841 ТУ 16-538.218-74	шт	72	0,375	27,00
Проникающая смазка WD40	шт	5	0,24	1,2
Ветошь обтирочная ГОСТ 4643-75	м:2	10	0,25	0,25
Шкурка стеклянная	м	2,5	0,1	0,25
Лак электротехнический	кг	3	0,38	1,14
Общепроизводственные расходы	руб	4	21,3	85,20
			Итого	325,51

Эксплуатационные затраты за жизненный цикл определяем по формуле (5.12):

$$C_3 = 355,39 + 271,8 + 444,22 + 325,51 = 1396,93 \text{ тыс.руб.}$$

Стоимость жизненного цикла определяем по формуле (5.11):

$$C_{жц} = 3350,0 + 1396,93 = 4746,93 \text{ тыс.руб.}$$

### 5.3 Выводы по главе

Учитывая положительный эффект от мероприятий по повышению коммутационной устойчивости ТЭД определим на сколько изменится стоимость жизненного цикла по выражениям (5.10) – (5.17), результаты расчета приведены в таблице 5.9 и рисунке 5.1.

Таблица 5.9 – Сравнение стоимости владения ТЭД при новых и старых настройках СУ

	$C_{ПР}$	$K_{пзТО}$	$K_{пзР}$	$K_{зчТО}$	$K_{зчР}$	$C_{жц}$	$\Delta C_{жц}$
	Тыс.руб						
До изменения ПО	3350,00	355,39	271,80	444,22	325,51	4746,93	134,69
После изменения ПО	3350,00	307,50	271,80	357,42	325,51	4612,23	

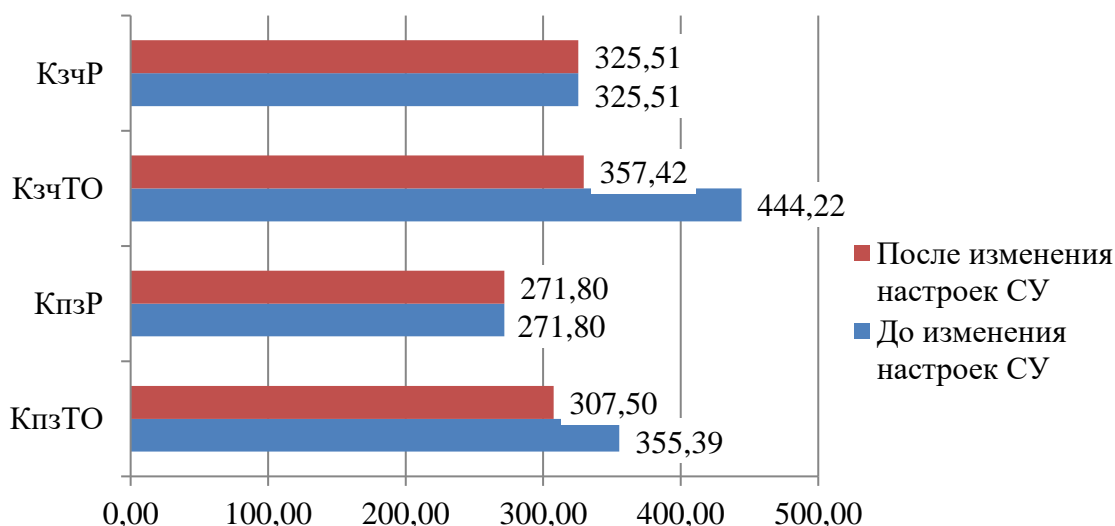


Рисунок 5.1 – Влияние повышения коммутационной устойчивости на эксплуатационные расходы

Повышение коммутационной устойчивости ТЭД за счет оптимальной настройки системы управления позволяет снизить интенсивность износа щеток более чем на 25%, что в свою очередь позволяет снизить эксплуатационные расходы.

Учитывая условия эксплуатации, показатели надежности и риски, эксплуатирующие организации могут изменить техническую политику и перейти на межсервисный интервал 500 ч, что так же положительно влияет на снижение эксплуатационных расходов и уменьшает время плановых простоев самосвалов.

Повышение коммутационной устойчивости ТЭД за счет оптимальной настройки системы управления позволяет снизить стоимость жизненного цикла на 134,69 тыс. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены технические и технологические решения, направленные на повышение коммутационной устойчивости ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов с использованием усовершенствованного 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. Разработан автоматизированный видеоизмерительный комплекс, позволяющий 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.

6) 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 сокращений и условных обозначений**

ЭМТ – электромеханическая трансмиссия;

ТЭД – тяговый электродвигатель;

КЩУ – коллекторно-щеточный узел;

АВК-ОК – автоматизированный видеоизмерительный комплекс;

ОмГУПС – Омский государственный университет путей сообщений;

ТЭП – тяговый электропривод;

КТГ – коэффициент технической готовности;

ЕО – ежедневное обслуживание;

ТО – техническое обслуживание;

УВТР – установка вентилируемых тормозных резисторов;

МПТ – машина постоянного тока.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года (утверждена распоряжением правительства Российской Федерации от 13.06.2020 № 1582-р). – Текст : электронный// Министерство энергетики Российской Федерации : [Сайт]. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/433> (дата обращения 03.07.2021).
2. Авилов, В.Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока / В.Д.Авилов; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – 356 с. ISBN 978-5-91306-054-9. – Текст : непосредственный.
3. Авилов, В.Д. Перспективы разработки устройств по измерению энергии коммутационного искрения / В.Д. Авилов, Л.В. Ющенко, А.А. Рябцун, Ю.С. Лельский // Материалы республиканской науч.-техн. конф. / Украинский заочный политехн. ин-т. Харьков, – 1984. Ч.1. – С. 32-33. – Текст : непосредственный.
4. 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.
5. Анистратов, К.Ю. Исследование показателей работы карьерных самосвалов для обоснования структуры парка и норм выработки автотранспорта / К.Ю. Анистратов, Л.В. Борщ-Компониец // Горная промышленность. – 2011. – №4. – С. 38–45. – Текст : непосредственный.
6. Байсадыков, М.Ф. Исследование влияния механических и электрических факторов на износ электрических щеток машин постоянного тока / М.Ф. Байсадыков, А.С. Хлопцов // Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени: материалы X Международной

научно–практической конференции. – Екатеринбург, 2015. – С. 21–23. – Текст : непосредственный.

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

8. Безбородов, Ю.Я. Исследование связи длительностей дуговых разрядов на коллекторе со степенью искрения в баллах: Деп. в ЦНИИ ТЭИ МПС / Ю.Я. Безбородов, В.П. Клюка, В.С. Стукач, В.И. Тимошина; Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск: 1982. – 18 с. – №1684 от 23.06.82. – Текст : непосредственный.

9. Безбородов, Ю.Я. Прибор контроля качества коммутации / Ю.Я. Безбородов, В.Н. Козлов, В.И. Тимошина, В.В. Харламов // Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск: – 1981. – С. 44–50. – Текст : непосредственный.

10. Бекишев, Р.Ф. Исследование уровня радиопомех при работе коллекторных электрических машин постоянного тока / Р.Ф. Бекишев, А.И. Селяев // Электротехника. – 1980. – №4. – С. 44–46. – Текст : непосредственный.

11. Белов, П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование: в 2 т.: учебник и практикум / П.Г. Белов. – М.: Юрайт, 2015. – Т. 1. – 728 с. – ISBN 978-5-9916-4703-8. – Текст : непосредственный.

12. Блюменкранц, Д.М. Технология крупного электромашиностроения. Том 3. Крупные машины. / Д.М. Блюменкранц. – Л.: Энергоатомиздат: 1991. – 330 с. – ISBN 0169/БН2-10022017/41. – Текст : непосредственный.

13. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение: 1984. – 312 с. – Текст : непосредственный.



14. Бурмистров, Г.А. Основы способа наименьших квадратов / Г.А.Бурмистров. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр: – 1975. – 392 с. – Текст : непосредственный.

15. Буянкин, А.В. Карьерные перевозки: учебное пособие / А.В. Буянкин, Д.В. Стенин, Н.А. Стенина. – Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2018. – 104 с. – ISBN978-5-00137-013-0. – Текст : непосредственный.

16. Взаимодействие элементов коллекторно-щеточного узла при изменении механических параметров работы тяговых двигателей / В.В. Харламов, М.Ф. Байсадыков, Д.И. Попов // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: материалы второй международной научно-практической конференции / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск: ОмГУПС, – 2016. – С.186–194. – Текст : непосредственный.

17. Видеоизмерительный комплекс оценки состояния коммутации тяговых электродвигателей карьерного самосвала БЕЛА375306 в условиях эксплуатации / С.Н. Найденов // 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.

18. Власов, Ю.А. Анализ причин низкой эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов научное обозрение. / Ю.А. Власов и др. // Технические науки. – 2016. – № 5 – с. 37-44. – Текст : непосредственный.

19. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. Заведений / А.И. Вольдек – 3-изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832с. – Текст : непосредственный.

20. Воскобойников, Ю.Е. Регрессионный анализ данных в пакете Mathcad: Учебное пособие / Ю.Е. Воскобойников. – СПб.: Лань, 2011. – 224с. – ISBN978-5-8114-1096-5. – Текст : непосредственный.

21. Вяльцев, Г.Б. Расчет магнитных полей методом конечных элементов в программе FEMM для решения задач электромеханики: учебное пособие /

Г.Б. Вяльцев, Д.М. Топорков, Т.В. Честюнина. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2018. – 115 с. – ISBN 978-5-7782-3688-2. – Текст : непосредственный.

22. Гемке, Р.Г. Неисправности электрических машин. 8-е изд., испр. и доп. – Л.: Энергия, 1975. – 296 с. – Текст : непосредственный.

23. Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / О.Д. Гольдберг, Э.С. Гурин, И.С. Свириденко; под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с. – Текст : непосредственный.

24. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. 3-е изд. – М.: Техносфера, 2019. – 1104 с. – ISBN 978-5-94836-331-8. – Текст : непосредственный.

25. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006 г. – 616 с. – ISBN 5-94836-092-X. – Текст : непосредственный.

26. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия: изд. офиц.: утв. и введен в действие Федер. Агентством по техн. Регулированию и метрологии: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 5 ноября 2013 г. №61-П / разраб. ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Стандартинформ, 2014. – 119 с. – Текст : непосредственный.

27. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения : межгосударственный стандарт: изд. офиц.: утв. и введен в действие Техническим комитетом по стандартизации ТК119 «Надежность в технике» и ФГУП ВНИИИНАШ / принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 декабря 2015 г. №83-П) / разраб. ООО «ИНМиТ». – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с. – Текст : непосредственный.

28. ГОСТ Р 58302-2018. Управление стоимостью жизненного цикла. Номенклатура показателей для оценивания стоимости жизненного цикла изделия. Общие требования: нац. Стандарт Российской Федерации: изд.офиц.: утв. и введен в действие Приказом Федер. Агентства по техн. Регулированию и метрологии от 5 дек. 2018г. №1073: введ. впервые: дата введ. 2018-12-05 / разработ. АО НИЦ «Прикладная логистика». – М.: Стандартинформ, 2019. – IV, 12 с. – Текст : непосредственный.

29. Деева, В.С. Живучесть щеточного контакта электрических машин / В.С. Деева, М.С. Слободян, С.М. Слободян // Электричество. – 2013. – №4. – С. 45–49. – Текст : непосредственный.

30. Дерябин, Л.И. Наладка коммутации тяговых двигателей электровозов постоянного и переменного тока / Л.И. Дерябин, Ю.А. Рунов – М.: Транспорт, 1969. – 76 с. – Текст : непосредственный.

31. Дудырев, А.К. К вопросу объективной оценки коммутации машин постоянного тока / А.К. Дудырев // Материалы V всесоюзной конф. по коммутации электрических машин / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск, 1976. С.144–146. – Текст : непосредственный.

32. Дьяконов, В.П. MATLAB. Обработка сигналов и изображений : специальный справочник / В.П. Дьяконов, И.В. Абраменкова – СПб.: Питер, 2002, – 608 с. – Текст : непосредственный.

33. Елисеева, И.И. Общая теория статистики: учебник для вузов / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев. – 5-изд. пер. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 656с. – ISBN5-279-02414-7 – Текст : непосредственный.

34. Ермолин, Н.П. Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с. – Текст : непосредственный.

35. Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические машины : учебник для вузов ж.-д. трансп. / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов – М.: Транспорт, 1991. – 343 с. – Текст : непосредственный.

36. Идрисов, З.Ф. К вопросу оценки интенсивности искрения коллекторных машин постоянного тока / З.Ф. Идрисов, Г.А. Сипайлов, А.Я. Цирулик // Материалы V всесоюзной конф. по коммутации машин постоянного тока / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1976. – С. 104–105. – Текст : непосредственный.

37. Исмаилов, Ш.К. Тепловое состояние тяговых и вспомогательных электрических машин электровозов постоянного и переменного тока: монография / Ш.К. Исмаилов; – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2001. – 75 с. – Текст : непосредственный.

38. 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.

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

40. Исследование распределения межламельных напряжений по коллектору двигателя ЭДП-800 в программе Femm: пояснительная записка / ООО «Сибэлектропривод»; исполнитель Быков А.И. – Новосибирск, 2018. – 22 с. – Текст : непосредственный.

41. Исследование способа оценки коммутации по переменной составляющей напряжения на якоре / Н.И. Андросов // Повышение надежности локомотивов и увеличение пробегов между их ремонтами: материалы IV науч.-

техн. конф. Уральский электромеханический ин-т инж.ж.-д. трансп. / Свердловск, 1965. Вып. 1. С. 138–146. – Текст : непосредственный.

42. Казубенко, А.Ф. Самосвалы БЕЛАЗ с электромеханической передачей / А.Ф. Казубенко // Уголь. – 2019. – №5 (1118). – С.50-51. – Текст : непосредственный.

43. Как своевременное ТО поможет избежать простоев карьерной техники. Текст : электронный //КОМЕК : [Сайт]. – URL: <https://www.komek.ru/staty/kak-svoevremennoe-to-pomozhet-izbezhat-prostoev-karernoj-tekhniki> / (дата обращения 03.07.2021).

44. Карасев, М.Ф. Индикатор искрения ИИ / М.Ф. Карасев, В.П. Парамзин, И.В. Сенкевич // Науч.тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1965. С.134–144. – Текст : непосредственный.

45. Карасев, М.Ф. Индикатор искрения щеток коллекторных машин ИИ-1 / М.Ф. Карасев, В.Я. Майстровой // Науч.тр. / Томский электромех. ин-т инж. ж.-д. трансп. Томск, 1957. Т.24. С.3–18. – Текст : непосредственный.

46. Карасев, М.Ф. Метод оценки искрения / М.Ф. Карасев, В.П. Суворов // Вестник электропромышленности. 1962. №1. – С. 76–78. – Текст : непосредственный.

47. Карасев, М.Ф. Прибор для диагностики и определения уровня искрения машин постоянного тока по сигналу с разнополярных щеток / М.Ф. Карасев, А.В. Сазонов, В.А. Серегин, В.И. Тимошина // Науч.тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск: –1975. Т.164. – С.34–37. – Текст : непосредственный.

48. Карасев, М.Ф. Прибор контроля коммутации ПКК-2У4 и исследование областей его применения / М.Ф. Карасев, В.Д. Авилов, А.В. Сазонов и др. // Электротехническая промышленность. – 1979. Вып.6 (100). – С. 16-17. – Текст : непосредственный.

49. Карасев, М.Ф. Фотоэлектрический индикатор для стендовых испытаний интенсивности искрения тяговых локомотивов / М.Ф. Карасев, А.М.

Трушков, В.П. Беляевидр. // Науч.тр. / Омский ин-т инж.ж.-д. трансп. Омск, 1972. – Т.133. – С.102–106. – Текст : непосредственный.

50. Карасев, М.Ф., Анализ искрения коллекторных машин / М.Ф. Карасев, В.П. Суворов // Электричество. 1959. №12. – С.50–54. – Текст : непосредственный.

51. Карьерная техника: справочник специалиста / под редакцией П.Л. Мариева, К.Ю. Анистратова. – Минск: ПО БелАЗ, 2007. – 327 с. – Текст : непосредственный.

52. Карьерные самосвалы серии 7530–ОАО «БЕЛАЗ». Текст : электронный // ОАО«БЕЛАЗ» : официальный сайт. Республика Беларусь. – URL: [https:// belaz.by/products/products-belaz/dumpers/dump-trucks-with-electromechanical-transmission/dumpers-series7530](https://belaz.by/products/products-belaz/dumpers/dump-trucks-with-electromechanical-transmission/dumpers-series7530) / (дата обращения:11.03.2021).

53. Карьерные самосвалы серии БЕЛАЗ-7530. Руководство по эксплуатации 75306-3902015РЭ – ОАО БЕЛАЗ – Управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». – 2015. – 198 с. – Текст : непосредственный.

54. Карьерный самосвал БЕЛАЗ 75306. Устройство, эксплуатация и техническое обслуживание – ОАО «Белорусский автомобильный завод». – 2012. – 65 с. – Текст : непосредственный.

55. Касьянов, В.Т. Регулирование дополнительных полюсов машин постоянного тока / В.Т. Касьянов // Электричество: – 1934. -№20. – С. 1–8. – Текст : непосредственный.

56. Качин, О.С. Повышение ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей: специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»: автореф. дис. кандидата технических наук / О.С. Качин; Томский политехнический университет. – Томск, 2008. – 21 с. – Текст : непосредственный.

57. Качин, О.С. Увеличение ресурса скользящего контакта электрических машин: монография / О.С. Качин, С.И. Качин – LAPLAMBERT Academic Publishing, 2012. – 165 с. – Текст : непосредственный.

58. Качин, С.И. Моделирование процессов износа электрических щеток универсальных электродвигателей с учетом механических факторов / С.И.Качин, О.С. Качин // Электричество. – 2009. – №12. – С. 68–70. – Текст : непосредственный.

59. Коммутация в тяговых двигателях с новым скользящим контактом / В.Д. Авилов, Ф. Веселка // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии: материалы IX международной научно-технической конференции (5–6 декабря 2013г.) / Омск: ОмГУПС, 2013. – С. 12–18. – Текст : непосредственный.

60. Курбасов, А.С. Приборы для контроля коммутации тяговых электродвигателей / А.С. Курбасов // Вестник электропромышленности. – 1963. – №6. С. 53–56. – Текст : непосредственный.

61. Курбасов, А.С. Проектирование тяговых электродвигателей: Учеб. Пособие для вузов ж.-д. трансп. / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин; под редакцией А.С. Курбасова. – М: Транспорт, –1987. – 536 с. – Текст : непосредственный.

62. Лавринович, Л.Л. Настройка коммутации при помощи измерительных приборов / Л.Л. Лавринович // Вестник электропромышленности. – 1959. – №4. – С. 33–35. – Текст : непосредственный.

63. Лавринович, Л.Л. Применение фотоэлектронных умножителей для настройки коммутации электрических машин / Л.Л. Лавринович // Вестник электропромышленности. – 1957. – №12. – С. 40–44. – Текст : непосредственный.

64. Лавринович, Л.Л. Экспериментальные исследования в скользящем контакте / Л.Л. Лавринович // Вестник электропромышленности. – 1956. – №11. – С. 45–50. – Текст : непосредственный.

65. Лепеш, Г.В. Исследование математической модели процесса высокоскоростного трения и изнашивания / Г.В. Лепеш, А.Г. Лепеш // ТТПС, –2015. – №2(32). – С. 60–66. – Текст : непосредственный.

66. Лившиц, П.С. Скользящий контакт электрических машин / П.С.Лившиц // – М.: Энергия, 1974. – 272 с. – Текст : непосредственный.
67. Ломакин, В.А. Прибор для интегральной оценки интенсивности искрения коллекторных машин постоянного тока / В.А. Ломакин // Известия вузов. Приборостроение. – 1967. – №10. – С. 18–21. – Текст : непосредственный.
68. Ляпина, С.Ю. Управление инновационными процессами на железнодорожном транспорте: учеб.пособие / Под редакцией С.Ю. Ляпиной – М.: МГУПС (МИИТ), – 2016. – 555 с. – Текст : непосредственный.
69. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта: утвержденная распоряжением ОАО РЖД от 27.12.2007г. №2459р. / ОАО «РЖД». – Москва. – 2007. – 62 с. – Текст : непосредственный.
70. Методика расчета потерь в зоне контакта щетка-коллектор при электродуговом искрении / В.В. Харламов, С.Н. Найден, А.И. Стретенцев, А.С. Хлопцов // Вестник Псковско государственного университета. Серия «Технические науки». Выпуск 4 / Псковский государственный университет. Псков, – 2016. – С. 51–57. – Текст : непосредственный.
71. Миронов, А.А Анализ степени искрения отдельных коллекторных пластин электрических машин фотостробоскопическим методом / А.А. Миронов А.А., Р.Х. Сайфутдинов. // Электротехника. – 2016. – №2. – С. 3–5. – Текст : непосредственный.
72. Модернизация индикатора искрения с применением полупроводниковых линейно-импульсных микросхем / Сазонов А.В. // Материалы V всесоюзной конф. по коммутации электрических машин / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1976. – С.12,13. – Текст : непосредственный.
73. Неболюбов, Ю.Е. Фотоэлектрический метод исследования и настройки коммутации / Ю.Е. Неболюбов // Электричество. – 1956. – №11. – С.34–37. – Текст : непосредственный.



74. Нейкирхен, К. Угольные щетки и причины непостоянства условий коммутации машин постоянного тока / К. Нейкирхен // ОКТИ НКТТ СССР. М.: – 1937. – 163 с. – Текст : непосредственный.

75. О технологии PoE простыми словами. Текст : электронный // группа компаний LARGA. – URL: <https://larga.ru/article/poe-kak-rabotaet>(дата обращения 03.07.2021).

76. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQ Vision. / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, В.А. Князь [и др.] – М.: ДМК Пресс, 2008. – 464 с. – ISBN5-94074-348X. – Текст : непосредственный.

77. Определение влияния режимов работы тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала на процесс коммутации / В.В. Харламов, С.Н. Найденов, 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.

78. Определение интенсивности изнашивания электрических щеток коллекторных машин постоянного тока с учетом воздействия профиля коллектора / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков // Проблемы машиноведения : материалы III Международной научно-технической конференции / Омский государственный технический университет. – Омск: Издательство ОмГТУ, 2019. – С. 302–309. – Текст : непосредственный.

79. Осинцев, И. А. Устройства и работа электрической схемы электровазозов серии ВЛ10 и ВЛ10У: учебное пособие / И. А. Осинцев. – М.: ФГОУ УМЦ ЖДТ, 2013. – 384 с. – ISBN 978-5-89035-640-6. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/35852> (дата обращения: 12.09.2020). – Режим доступа : для авториз. пользователей.

80. Патент №1000953 СССР, МКИ G01R 31/34. Устройства контроля скользящего контакта электродвигателя постоянного тока : №3356595/24-07 : заявл.18.11.1981 : опубл. 28.02.1983 / В.Н. Потапов, А.С. Кураев, Ю.И. Косенко и др.; заявитель Рижский Краснознаменный институт инженеров гражданской авиации им. Ленинского комсомола. – 3 с.ил. – Текст : непосредственный

81. Патент №102149 Российская Федерация, МПК H01R 39/46 (2006.01). Устройство для визуальной оценки искрения щеток коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока под сбегаящим и набегаящим краями щеток : №2010115867/07 : заявлено 21.04.2010 : опубликовано 10.02.2011 / Шибает Д.Е., Шибает А.Е., Рапопорт О.Л., Цукублин А.Б.; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский политехнический университет». – 13 с.: ил. – Текст: непосредственный.

82. Патент №1067567 СССР, МКИ H02K 13/10. Устройство для исследования коммутации : №3394094/24-07 : заявл.17.02.1982 : опубл. 15.01.1984 / Л.В. Ющенко, В.Д.Авилов.; заявитель Хабаровский институт инженеров железнодорожного транспорта. – 4 с.ил. – Текст : непосредственный.

83. Патент №108833 Российская Федерация, МПК G01B 7/28. Прибор контроля профиля коллектора машин постоянного тока : №108833 : заявл. 08.06.2011: опубл. 27.09.2011, / В.В. Харламов, Д.А. Ахунов и др.; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Омский государственный университет путей сообщения. – 13 с. ил. – Текст : непосредственный.

84. Патент №1112495 СССР, МКИ H02K13/14. Устройство для улучшения коммутации коллекторных электрических машин с волновой обмоткой якоря : №3604060/24-07 : заявл.10.06.1983 : опубл.07.09.1984 / Л.Я. Макаровский, А.Б. Немнонов, В.А. Прудников, И.А. Скоробогатов; заявитель Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт им. Куйбышева. – 4 с.ил. – Текст : непосредственный.

85. Патент №1193610 СССР, МКИ G01R 31/34. Устройство для диагностирования коллекторных электрических машин: №3693934/24-21: заявл. 24.01.1984 : опубл. 23.11.1985 / И.В. Кабашкин, В.Н.Потапов, В.Д.; заявитель-Рижский Краснознаменный институт инженеров гражданской авиации им. Ленинского комсомола. – 3 с.ил. – Текст : непосредственный.

86. Патент №2037835 Российская Федерация, МПК G01R31/34. Прибор для измерения тока разрыва при контроле интенсивности искрения щеток электрических машин : №20031154/09 : заявл. 13.07.1992 :опубл. 19.06.1995 / Рябцун А.А., Чжан А.Ю. ; заявитель Липецкий Рябцун А.А. – 4с. ил. – Текст : непосредственный.

87. Патент №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.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения». – 4 с. : ил. – Текст: непосредственный.

88. Патент №2250549 Российская Федерация, МПК H02 K 13/14, G01R31/34. Устройство для улучшения коммутации коллекторных машин постоянного тока : №20031154/09 : заявл. 21.05.2003 :опубл. 20.04.2005 / Битюцкий И.Б., Котов А.И., Требунцов А.В. ; заявитель Липецкий государственный технический университет. – 6 с. ил. – Текст : непосредственный.

89. Патент №2551429 Российская Федерация, МПК H01R 39/58 (2006/01), G01R 31/34 (2006.01), H02K 13/00 (2006/01), H02K 13/10 (2006/01). Способ диагностики состояния коммутации коллекторных электрических машин : №2013152991/07: заявл. 29.11.2013 :опубл. 27.05.2015 / Сайфутдинов Р.Х., Миронов А.А.; заявитель Федеральное государственное бюджетное обра-

зовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» – 13 с. ил. – Текст : непосредственный.

90. Патент №2668996 Российская Федерация, МПК H01R 39/58 (2006/01), H02K 11/20 (2016/01), G01R 31/34 (2006.01). Способ диагностирования состояния коммутации коллекторных электрических машин : №2017143285 : заявл. 11.12.2017 :опубл. 05.10.2018 / Харламов В.В., Попов Д.И., Стретенцев А.И.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» – 8 с. ил. – Текст : непосредственный.

91. Патент №2725535 Российская Федерация, МПК G01R 31/34 (2006.01). Способ контроля состояния коммутации электрических машин постоянного тока : №2019140773 : заявл. 09.12.2019 :опубл. 02.07.2020 / Долгова А.В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» – 6 с. ил. – Текст : непосредственный.

92. Патент №75254 Российская Федерация, МПК H02R 43/14 (2006.01). Устройство для оценки интенсивности искрения щеток коллекторно-щеточного узла : №2008108227/22 : заявлено 23.03.2008 : опубликовано 27.07.2008 / Рапопорт О.Л., Цукублин А.Б., Осадченко А.А., Шибает Д.Е.; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский политехнический университет». – 3 с. : ил. – Текст: непосредственный.

93. Патент №855873 СССР, МКИ H02K 15/00. Устройство для объективной оценки коммутации электрической машины : №2800395/24-07 : заявл. 20.07.1979 : опубл.15.08.1981 / А.С. Курбасов, В.В. Шумейко, В.К. Волков, Б.Г. Максимов; заявитель Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно исследовательский институт железнодорожного транспорта. – 2 с.ил. – Текст : непосредственный.

94. Патент №968878 СССР, МКИ H02K 13/14. Устройство для анализа коммутации коллекторных электрических машин постоянного тока : №3276164/24-07 : заявл. 16.04.1981 : опубл. 23.10.1982 / Ю.Я. Безбородов, В.Ф. Шкреба, В.В.; заявитель Омский институт железнодорожного транспорта. – 2 с.ил. – Текст : непосредственный.

95. Патент №970570 СССР, МКИ H02K 13/14. Устройство контроля работы щеточно-коллекторного узла электрической машины : №3276165/24-07 : заявл. 16.04.1981 : опубл. 30.10.1982 / Ю.Я. Безбородов, В.И. Тимошина, В.С. Стукач; заявитель Омский институт железнодорожного транспорта. – 3 с.ил. – Текст : непосредственный.

96. Патент №987733 СССР, МКИ H01R 39/58. Устройство для диагностики и определения уровня искрения щеток электрических машин постоянного тока : №3336435/24-07 : заявл. 17.09.1981 : опубл. 07.01.1983 / Э.С. Ушаков, А.Х. Газиев, Ф.А. Муракаев, В.И. Жидков; заявители Э.С. Ушаков, А.Х. Газиев, Ф.А. Муракаев, В.И. Жидков. – 3 с.ил. – Текст : непосредственный.

97. Патент №987747 СССР, МКИ H02K 13/14. Устройство для измерения интенсивности искрения на коллекторе электрической машины : №3346283/24-07 : заявл. 16.10.1981 : опубл. 07.01.1983 / Б.Е. Сире, Л.В. Ложкин, Ю.Я. Лапенко; заявитель Тольяттинский политехнический институт. – 6 с.ил. – Текст : непосредственный.

98. Плохов, И.В. Структура и алгоритмы имитационного моделирования динамики электрофрикционного взаимодействия / И.В. Плохов, А.В. Ильин, О.И. Козырева. – Текст : непосредственный // Вестник Псков ГУ. Серия «Экономические и технические науки». – 2014. – №4. – С. 192–199. – Текст : непосредственный.

99. Плющ, В.М. Об измерении интенсивности искрения в машинах постоянного тока / В.М. Плющ, В.А. Ломакин // Известия вузов. Электромеханика. – 1969. – №4. – С. 385–390. – Текст : непосредственный.

100. Применение первичного преобразователя емкостного типа в устройствах для оценки интенсивности искрения щеток коллекторных электрических машин / Авилов В.Д., Безбородов Ю.Я., Козлов В.Н., Тимошина В.И.; Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1981. – 27 с. – Деп.в ЦНИИ ТЭИ МПС06.07.81, №1592. – Текст : непосредственный.

101. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / подред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с. – Текст : непосредственный.

102. Расчет и проектирование тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока (с элементами исследований): методические указания по курсовому проектированию / сост.: А.С. Курбасов. – Москва : 1984. – Текст : непосредственный.

103. РД50-699-90. Надежность в технике, общие правила классификации отказов и предельных состояний. Руководящий нормативный документ: изд. офиц.: утв. и введен Государственным комитетом СССР по управлению качеством продукции и стандартам : дата введ. 1992-01-01. – М.: Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 1991. – 14 с. – Текст : непосредственный.

104. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019664616 Российская Федерация. DC Motor Commutation : №2019663615 : заявл. 31.10.2019 : опублик. 11.11.2019 / Найден С.Н., Хлопцов А.С.; правообладатель общество с ограниченной ответственностью «Сибэлектропривод». – Текст : непосредственный

105. Солонина, А.В. Цифровая обработка сигналов MATLAB / А.В. Солонина, Д.М. Клионский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов. – СПб.: BHV, 2014. – 512 с. – ISBN 978-5-9775-0919-0. – Текст : непосредственный.

106. Стрельбицкий, Э.К. Износ коллекторов машин постоянного тока коммутационным искрением и расчет долговечности коллекторов / Э.К. Стрельбицкий, В.С. Стукач, А.Я. Цирулик // Известия Томского политехн. ин-та. Томск, 1970. – Т.211. – С. 111–115. – Текст : непосредственный.

107. Стукач, В.С. Способ осциллографирования напряжений на сбегающих краях щетки коллекторных электрических машин / В.С. Стукач, А.Я. Цирулик // Известия Томского политехн. ин-та. Томск, 1970. – Т.242. – С.240–242. – Текст : непосредственный.

108. Терешина, Н.П. Управление жизненным циклом технических систем на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / Н.П. Терешина, В.А. Подсорин: – М.: Вега-Инфо, 2012. – 316 с. – ISBN978-5-91590-015-7. – Текст : непосредственный.

109. Устройство, АСК-1 для анализа состояния коммутации коллекторных электрических машин / В.Д. Авилов, Ю.Я. Безбородов, В.И. Тимошина, В.Ф.Шкреба // Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск, 1980. – С. 43–50. – Текст : непосредственный.

110. Фалеев, В.А. Контроль искрения щеток с помощью фотоэлектрического индикатора / В.А. Фалеев // Науч.тр. / Томский электромех. ин-т инж. ж.-д. трансп. Томск, 1957. – Т.24. – С. 133–150. – Текст : непосредственный.

111. Харламов, В.В. Диагностирование состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока в условиях приемосдаточных испытаний с учетом параметров неидентичности коммутационных циклов / В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.П. Афонин // Омский научный вестник. – 2017. – №5(155). – С. 66–71. – Текст : непосредственный.

112. Харламов, В.В. Математическая модель и методика расчета превышения температуры в узлах коллекторно-щеточного устройства тягового двигателя ЭДП-800 карьерного самосвала БелАЗ в стационарном режиме / В.В. Харламов, С.Н. Найден, А.С. Хлопцов, П.Г. Петров // Омский научный вестник. – 2018. №2 (158). – С. 27–32. – DOI:10.25206/1813-8225-2018-158-27-32. – Текст : непосредственный.

113. 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.

114. Харламов, В.В. 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.

115. Харламов, В.В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография / В.В. Харламов. –Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2002. – 233 с. – Текст : непосредственный.

116. 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.

117. Харламов, В.В. Определение диагностических параметров для оценки состояния профиля коллектора тягового электродвигателя / В.В. Харламов, Д.А. Ахунов, Р.В. Сергеев [и др.] // Омский научный вестник. Серия : Приборы, машины и технологии. – 2011. – Выпуск 1 (97). – С. 121–125. – Текст : непосредственный

118. Харламов, В.В. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов / В.В.Харламов, Д.И.Попов, Е.Ю. Чупрынаидр // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. – Т.329. №7. – С. 138-147. – Текст : непосредственный.

119. Харламов, В.В.Алгоритм прогнозирования ресурса работы электрических щеток тяговых электродвигателей / В.В. Харламов, Д.И.Попов, М.Ф. Байсадыков // Известия Транссиба. 2017. №1(29). – С. 47–56. – Текст : непосредственный.



120. Харламов, В.В. Методика настройки тяговых электродвигателей с критерием минимального износа элементов контактной пары / В.В. Харламов, Д.И. Попов, М.Ф. Байсадыков // Вестник РГУПС. 2018. – №3 (71). – С. 68-75. – Текст : непосредственный.

121. Хольм, Р. Электрические контакты / Р.Хольм. – Москва: Издательство иностранной литературы, 1961 – 464 с. – Текст : непосредственный.

122. Шашков, В.Б. Прикладной регрессионный анализ (многофакторная модель) / В.Б. Шашков. – Оренбург: ГОУОГУ, 2003. – 363 с. – Текст : непосредственный.

123. Ющенко, Л.В. Контроль качества коммутации тяговых электродвигателей подвижного состава / Л.В.Ющенко, В.Д. Авилов, А.А. Рябцун, Р.Х. Сайфутдинов // Науч.тр. / Хабаров. ин-т инж. ж.-д. трансп. Хабаровск, – 1984. – №49. – С. 33–37. – Текст : непосредственный.

124. CAN монитор, руководство оператора ВУ/112/28330147/00003-023402, 2007. – 33 с. – Текст : непосредственный.

125. Holm, R. Theory of the Sparking during Commutation on dynames / R. Holm // Power apparatus and systems. –1962. №63. – P. 588–590. – URL: <https://inspirehep.net/literature/130473> (date accessed 20.03.2019) – Text : electronic.

126. Roumanis, S.J. Thenull point method of commutation adjustment / Roumanis S.J // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III Power Apparatusand Systems. Part III: Power Apparatusand Systems – 1956. Volume75. – Issue3. – P. 147–152. – Direct text.

127. Shobert, E.J. A new method of investigate on commutation a sapplied to automative generators / Shobert E.J., Diehl J.E. // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III Power Apparatus and Systems. – 1957. Volume 73. – Issue3. – P. 187–202. – Direct text.

128. STRIM soft: программное обеспечение / разработчик ОДО «СТРИМ». – Республика Беларусь. 1С, 2015. URL: <https://strim-tech.com/dlja-klientov/> (дата обращения 15.05.2021). – Загл. с титул. экрана.

129. Yoshihiro M. Development of a collecting monitor for sparking detection on generators / M.Yoshihiro, T.Satoshi, J. Shigeru, W. Takashi, M. Ikuro // Transactions on Power Apparatus and Systems. – United States. – 1983. Volume 14. – Issue 23. – P. 928–933. – Direct text.

## Приложение А

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО «Омский государственный  
университет путей сообщения  
(ОмГУПС (ОМИИТ))»

Т. В. Комякова

2021 г.



о внедрении результатов диссертационной работы  
Найдена Сергея Николаевича в учебный процесс  
в Омском государственном университете путей сообщения

Комиссия в составе:

Баландина С. А. – к. и. н., доцента, начальника учебно-методического управления,

Сергеева Р. В. – к. т. н., доцента, директора института электрического транспорта и систем энергообеспечения,

Харламова В. В. – д. т. н., профессора, заведующего кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Найдена С.Н., а именно: способ оценки интенсивности искрения по видеоизображению, программный продукт, реализующий предложенный способ, и методика повышения коммутационной устойчивости ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов путем оптимальной настройки системы управления, внедрены в учебный процесс на основании решения заседания кафедры «Электрические машины и общая электротехника» от 19 февраля 2021 г., протокол № 8.

Указанные результаты используются при изучении дисциплины «Электромеханика и электрические аппараты» аспирантами, обучающимися по направлению подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника» (направленность «Электромеханика и электрические аппараты»), и выполнении выпускных квалификационных работ студентами очной формы обучения по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и специальностям 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» (специализация «Электрический транспорт железных дорог») и 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» (специализация «Электроснабжение железных дорог»).

Начальник учебно-методического  
управления

С. А. Баландин

Директор института электрического  
транспорта и систем энергообеспечения

Р. В. Сергеев

Заведующий кафедрой «Электрические  
машины и общая электротехника»

В. В. Харламов

## Приложение Б

Общество с ограниченной ответственностью «Сибэлектропривод»

## АКТ

от «22» марта 2021 г.  
г. Новосибирск

УТВЕРЖДАЮ»  
Технический директор  
ООО «Сибэлектропривод»  
Е. Ю. Чупрына  
22 03 2021 г.



Об использовании результатов  
научных исследований и разработок  
на производстве

Основание: Разработка Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), выполненная под руководством заведующего кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», профессора, д.т.н. Харламова В. В., при личном участии доцента, к. т. н. Москалева Ю.В. и инженера Найдена С.Н.

**Технология диагностирования коммутации тяговых электродвигателей постоянного тока карьерных самосвалов и методика повышения их коммутационной устойчивости.**

Разработка выполнена в соответствии с планом научно-технических работ Омского государственного университета путей сообщения № ГР АААА-А18-118111690043-5.

Составлен комиссией в составе:

Представителей предприятия – ООО «Сибэлектропривод»:

главный технолог Осьмук А.А. – председатель комиссии;

зам. генерального директора по качеству Шумилова Ю.Е.

Представители ОмГУПС:

заведующий кафедрой, профессор, д. т. н. Харламов В. В.;

доцент, к. т. н. Москалев Ю.В.;

инженер Найден С.Н.

1. Разработки ОмГУПС, характеризующиеся основными особенностями (признаками):

1.1. Разработанная технология диагностирования коммутации тяговых электродвигателей (ТЭД) постоянного тока карьерных самосвалов основана

на использовании видеоизображения для оценки интенсивности искрения; в качестве диагностического признака используется параметр «процент засветки» (процент площади белых пикселей от общей площади, контролируемой видеокамерой зоны сбегающего края щеток);

1.2. Предлагаемая методика повышения коммутационной устойчивости ТЭД постоянного тока карьерных самосвалов путем оптимальной настройки системы управления 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 ГОСТ 2582-2013.

2. Автоматизированный видеоизмерительный комплекс оценки коммутации, технология диагностирования и методики повышения коммутационной устойчивости ТЭД, приняты к использованию для проведения опытно-конструкторских работ и мониторинга качества работы тяговых электродвигателей производства ООО «Сибэлектропривод» в условиях эксплуатации карьерных самосвалов БЕЛАЗ.

3. Предложения о дальнейшем использовании и другие замечания:

Рекомендуется широкое использование указанных в акте разработок для повышения коммутационной устойчивости ТЭД в эксплуатации за счет оптимальной настройки работы электропривода в условиях эксплуатации.

Составлен в трех экземплярах:

1-й экземпляр – ОмГУПС, НИЧ;


2-й экземпляр ООО «Сибэлектропривод»;

3-й экземпляр – ОмГУПС, разработчику.

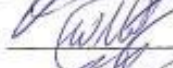
Председатель комиссии

 А. А. Осмук

Члены комиссии

 Ю. Е. Шумилова

 В. В. Харламов

 Ю. В. Москалев

 С. Н. Найден



## Приложение В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019664616

DC Motor Commutation

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью*  
*«Сибэлектропривод» (RU)*

Авторы: *Найден Сергей Николаевич (RU),*  
*Хлопцов Андрей Сергеевич (RU)*



Заявка № 2019663615

Дата поступления 31 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 11 ноября 2019 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## Приложение Г

