

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

На правах рукописи

Хлопцов Андрей Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

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 2016

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ	14
1.1 Анализ отказов электровозов по сети железных дорог за 2013-2015 годы	14
1.2 Факторы, влияющие на процесс коммутации МПТ	22
1.3 Связь между техническим состоянием и нагревом элементов КЩУ	25
1.4 Методы контроля температуры в машинах постоянного тока.....	27
1.5 Выводы	29
1.6 Постановка задач исследования	30
2 ДИАГНОСТИРОВАНИЕ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ	31
2.1 Граф-модель диагностирования технического состояния КЩУ МПТ	31
2.2 Декомпозиция рабочей граф-модели	41
2.3 Формирование множества диагностических параметров технического состояния КЩУ МПТ	58
2.4 Выводы	61
3 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КЩУ МПТ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ И ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМАХ РАБОТЫ	62
3.1 Электромагнитная и механическая природа нагрева в зоне контакта «щетка-коллектор».....	63
3.2 Тепловая схема замещения КЩУ МПТ	66
3.3 Расчет превышения температуры в узлах тепловой схемы замещения КЩУ МПТ	74
3.4 Математическая модель нагрева элементов МПТ при переходном режиме работы.....	78
3.5 Переходные тепловые процессы для основных элементов МПТ	80
3.6 Расчет переходных тепловых процессов для локальной системы КЩУ	85
3.7 Имитационное моделирование в ANSYS	88

3.8 Выводы	93
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ НАГРЕВА ЗОНЫ КОНТАКТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ РАБОТЫ МАШИНЫ НА ЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ	94
4.1 Применение тепловизионного обследования для исследования тепловых процессов в КЩУ	94
4.2 Исследование влияния факторов работы машины на интенсивность нагрева контакта «щетка-коллектор».....	100
4.3 Оценка адекватности уравнения регрессии.....	104
4.4 Выводы	109
5 МОДЕРНИЗАЦИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КЩУ МПТ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОГО ПАРАМЕТРА	110
5.1 Способ определения температуры зоны контакта щетка-коллектор при обработке термограмм	110
5.2 Обработка кривых нагрева зоны контакта щетка-коллектор	113
5.3 Программная реализация расчета интенсивности нагрева	114
5.4 Функциональная схема аппаратно-программного комплекса.....	116
5.5 Достоверность диагностирования на основе принятой модели.....	122
5.6 Оценка технико-экономической эффективности использования предложенного аппаратно-программного комплекса.....	126
5.6.1 Методика оценки экономической эффективности	126
5.6.2 Определение экономического эффекта от улучшения коммутации	129
5.6.3 Дополнительные эксплуатационные затраты на диагностирование	132
5.6.4 Определение показателей экономической эффективности	133
5.7 Выводы	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138
Приложение 1	149
Приложение 2	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Широкое применение машин постоянного (МПТ) тока в промышленности и на транспорте обусловлено хорошими пусковыми свойствами, плавностью регулирования, а также устойчивостью к перегрузкам [7]. Одной из сфер применения МПТ, наиболее ярко отражающей требования к высокой надежности эксплуатации, является железнодорожный транспорт.

Ключевым фактором эксплуатации сложного и дорогостоящего оборудования в крупной хозяйственной отрасли страны, такой как железнодорожный транспорт, является экономическая эффективность применения. Одним из наиболее значимых аспектов экономической эффективности использования сложного оборудования являются экономически обоснованные эксплуатационные расходы. При этом 30 – 35 % затрат локомотивного хозяйства приходится на обслуживание и ремонт электровозов. Анализ статистических данных по рекламационной работе сети железных дорог, позволяет сделать вывод, что неисправности тяговых электродвигателей составляют не менее 30% от всех отказов локомотивов. Существенную долю отказов электродвигателей составляют неисправности коллекторно-щеточного узла (КЩУ). [59].

Одним из важнейших факторов, влияющих на техническое состояние и надежность электрической машины, является процесс коммутации [81]. Исследованию коммутационной устойчивости электрических машин посвящено большое количество научных работ, изданных научными коллективами под руководством М. Ф. Карасева, В. Т. Касьянова, О. Г. Вегнера, Р. Ф. Бекишева, В. Д. Авилова, А. С. Курбасова, А. И. Скороспешкина, Г. А. Сипайлова, Э. К. Стрельбицкого, В. В. Толкунова, В. В. Фетисова, В. В. Харламова, С. И. Качина и многих других.

Процесс коммутации МПТ в значительной степени связан с тепловым состоянием машины [87]. На нагрев элементов КЩУ оказывают влияние большое количество факторов различной природы. Чрезмерный нагрев является следстви-

ем неисправности КЩУ или же неправильно настроенного режима работы машины постоянного тока. С повышением температуры в зоне контакта «щетка-коллектор» изменяются токопроводящие свойства элементов КЩУ, что влияет на параметры работы машины и коммутационную устойчивость. В результате нарушение теплового состояния КЩУ МПТ может привести к интенсивному искрению щеток, и, как следствие, к повышенному износу и преждевременному выходу из строя машины. Зная характер воздействия параметров работы машины на нагрев элементов в зоне КЩУ, возможно дать определенную численную оценку причинно-следственным связям, что может быть использовано в процессе диагностирования технического состояния КЩУ и распознавания дефектов.

Таким образом, совершенствование методов диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла МПТ с учетом его теплового состояния является актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с госбюджетной научно-исследовательской работой Омского государственного университета путей сообщения «Повышение качества и экономичности работы электромеханических преобразователей и устройств. Разработка методов исследования и средств диагностирования и контроля» ГБЗ 116 № ГР 01.9.60000796.

Цель работы – повышение качества и достоверности диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла для обеспечения работоспособности машин постоянного тока.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- на основе анализа влияния различных факторов на интенсивность искрения щеток уточнить граф-модель диагностирования КЩУ МПТ с учетом воздействия на процесс коммутации параметров профиля коллектора и температуры скользящего контакта;
- определить эффективное множество параметров диагностирования технического состояния КЩУ, обладающих наибольшей информативностью и различительной способностью;

- составить уточненную тепловую схему замещения МПТ с учетом тепловых процессов в КЩУ;
- сформировать математическую модель нагрева элементов КЩУ МПТ в стационарном и переходном режимах;
- провести экспериментальные исследования процесса нагрева элементов КЩУ и определить влияние параметров работы на интенсивность нагрева;
- разработать методику диагностирования технического состояния КЩУ с учетом параметров профиля коллектора и интенсивности нагрева КЩУ и на ее основе предложить аппаратно-программный комплекс диагностирования технического состояния КЩУ МПТ, оценить экономическую эффективность внедрения комплекса.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Составлена уточненная граф-модель диагностирования технического состояния КЩУ МПТ, учитывающая воздействия на процесс коммутации параметров профиля коллектора и температуры скользящего контакта, и определено эффективное множество диагностических параметров, обладающих наибольшей информативностью и различительной способностью.
2. Сформированы уточненная тепловая схема замещения МПТ с учетом тепловых процессов в КЩУ и математическая модель нагрева элементов КЩУ МПТ в стационарном и переходном режимах.
3. Получены регрессионные зависимости, отражающие влияние параметров работы машины на интенсивность нагрева элементов КЩУ МПТ.
4. Разработана методика диагностирования технического состояния КЩУ МПТ с учетом интенсивности нагрева в зоне контакта и параметров профиля коллектора.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Уточненная граф-модель и предложенное множество диагностических параметров позволяют повысить достоверность диагностирования технического состояния КЩУ МПТ.

2. Сформированные тепловая схема замещения и математическая модель дают возможность оценить влияние факторов как электрической, так и механической природы на нагрев элементов КЩУ.

3. Предложен способ определения времени контроля интенсивности нагрева элементов КЩУ МПТ на основе полученных регрессионных зависимостей.

4. Разработан аппаратно-программный комплекс, реализующий предложенную методику диагностирования технического состояния КЩУ, который позволяет определять неисправности КЩУ, связанные с действием факторов как электромагнитной, так и механической природы.

Методы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования процесса нагрева в зоне КЩУ в машинах постоянного тока проведены на основе теории электрических машин, теории информации, теории планирования эксперимента, а также статистических методов проверок гипотез. В процессе расчета математических зависимостей и анализа данных применялись математическая программа MathCAD, электронные таблицы Excel, программный пакет для расчета методом конечных элементов ANSYS. Разработка оригинальных программных продуктов осуществлялась в среде Borland C++ Builder. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанной модельной установке, действующих лабораторных установках кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения, а также на действующем испытательном стенде локомотивного ремонтного депо.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Уточненная граф-модель КЩУ МПТ и эффективное множество диагностических параметров для оценки технического состояния КЩУ с учетом воздействия на процесс коммутации параметров профиля коллектора и температуры скользящего контакта.
2. Уточненная тепловая схема замещения и математическая модель нагрева элементов КЩУ МПТ в стационарном и переходном режимах.
3. Методика диагностирования технического состояния КЩУ МПТ с учетом интенсивности нагрева в зоне контакта и параметров профиля коллектора.

Достоверность научных исследований и результатов диссертационной работы обеспечивается корректным использованием основных положений теории электрических машин и теории теплопередачи, уместным применением методов математического и имитационного моделирования и подтверждается экспериментальной проверкой, сходимостью результатов автора с экспериментальными данными, полученными другими исследователями. При статистической проверке гипотез принят пятипроцентный уровень значимости.

Реализация результатов работы. Метод оценки интенсивности нагрева КЩУ МПТ при работе, программное обеспечение, реализующее анализ термограмм, полученных с помощью тепловизора используются в учебном процессе на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа. Аппаратно-

программный комплекс, реализующий предложенные методики, внедрен и используется в лаборатории ОмГУПСа, а также в технологическом процессе технического обслуживания и ремонта машин постоянного тока на предприятии ООО «РМЗ «Газпромнефть-ОНПЗ».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на IX международной научно-технической конференции «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии» (Омск, 2013); на научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, посвященной Дню Российской науки «Инновационные проекты и

технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2013); на всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием (Омск, 2014); на XII международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: инновации и опыт» (Екатеринбург, 2015); на X международной научно-практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени» (Екатеринбург, 2015); на всероссийской научной конференции «Наука, творчество и образование в области электроснабжения, электропривода – достижения и перспективы» (Хабаровск, 2015); на международной научно-практической конференции «Иновационные подходы к решению технико-экономических проблем» (Москва, 2015); на заседании постоянно действующего научно-технического семинара Омского государственного университета путей сообщения «Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта, объектов промышленной теплоэнергетики, телекоммуникационно-информационных систем, автоматики и телемеханики».

Личный вклад автора. Автор принимал участие в планировании, проведении экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных результатов, разработке оригинальных программных продуктов. Основные научные положения и результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 17 научных работах, в том числе в четырех статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, одном свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Харламов, В. В. Совершенствование процесса диагностирования профиля коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М / В. В. Харламов, А. С. Хлопцов и др. // Известия Транссиба. – 2013. – Вып. 1(13). – С. 42 – 48.

2. Харламов, В. В. Термографические исследования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава / В. В. Харламов, А. С. Хлопцов и др. // Известия Транссиба. – 2014. – Вып. 3(19). – С. 44 – 50.

3. Харламов, В. В. Применение тепловизионного метода для исследования тепловых процессов в зоне коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя подвижного состава / В. В. Харламов, А. С. Хлопцов и др. // Известия Транссиба. – 2015. – Вып. 2(22). – С. 45 – 51.

4. Харламов, В. В. Оценка интенсивности износа электрических щеток машин постоянного тока методом гранулометрического анализа / В. В. Харламов, М. Ф. Байсадыков, А. С. Хлопцов // Омский научный вестник. – 2015. – №3 (143) – С. 226 – 230.

В прочих изданиях:

5. Харламов, В. В. Формирование граф-модели диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с учетом тепловых факторов / В. В. Харламов, А. С. Хлопцов и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2016. – Т.327 № 1. – С. 84–91.

6. Харламов, В. В. Микропроцессорный регистратор диагностических параметров коллекторно-щеточного узла машины постоянного тока / В. В. Харламов, А. С. Хлопцов // Материалы IX международной научно-технической конференции «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии» / ОмГУПС. – Омск, 2013. – С. 265 – 271.

7. Ахунов, Д. А. Разработка программного обеспечения для диагностирования профиля коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М / Д. А. Ахунов, А. С. Хлопцов и др. // Материалы научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, посвященной Дню Российской науки «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» / ОмГУПС. – Омск, 2013. – С. 184 – 190.

8. Харламов, В. В. Информационно-измерительная технология контроля профиля коллектора тяговых электродвигателей / В. В. Харламов, А. С. Хлопцов

и др.// Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – №1 – С. 389 – 392.

9. Харламов, В. В. Графоаналитическая модель коллекторно-щеточного узла машины постоянного тока с учетом условий эксплуатации / В. В. Харламов, А. П. Афонин, А. С. Хлопцов // Материалы всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием «Информационные и управляющие системы на транспорте и в промышленности» / ОмГУПС. – Омск, 2014. – С. 184 – 190.

10. Хлопцов, А. С. 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.

11. Байсадыков, М. Ф. Исследование влияния механических и электрических факторов на износ электрических щеток машин постоянного тока / М. Ф. Байсадыков, А. С. Хлопцов // Материалы X международной научно-практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени». – Екатеринбург, 2015. – С. 21 – 23.

12. Хлопцов, А. С. Тепловые процессы в машинах постоянного тока / А. С. Хлопцов, Ю. С. Сугралимов // Молодой ученый. – 2014. – № 7 (66) – С. 179 – 182.

13. Долгова, А. В. Совершенствование технологии диагностирования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава / А. В. Долгова, А. С. Хлопцов, Р. В. Сергеев // Межвузовский тематический сборник научных трудов «Электромеханические преобразователи энергии» / ОмГУПС. – Омск, 2014. – С. 16 – 21.

14. Харламов, В. В. Анализ тепловых процессов в КЩУ МПТ / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. С. Хлопцов // Материалы научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте». – Омск, 2015. – С. 172 – 178.

15. Хлопцов, А. С. Математическая модель для анализа тепловых процессов

коллекторно-щеточного узла машины постоянного тока в стационарном режиме работы / А. С. Хлопцов // Сборник трудов научно-практической конференции «Наука, творчество и образование в области электроснабжения, электропривода – достижения и перспективы» / ДВГУПС. – Хабаровск, 2015. – С. 109 – 113.

16. Харламов, В. В. Математическая модель для анализа тепловых процессов коллекторно-щеточного узла машины постоянного тока при наличии искрения / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. С. Хлопцов, А. В. Долгова // Материалы международной научно-практической конференции «Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем». – Москва, 2015. – С. 67 – 71.

Патенты и свидетельства о регистрации:

17. Программа для фильтрации и обработки сигнала прибора контроля профиля коллектора машины постоянного тока ПКП-4М / П. К. Шкодун, А. С. Хлопцов и др. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614815 от 22.05.2013.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 109 наименований и одного приложения. Общий объем диссертации составляет 154 страницы, включая 28 таблиц и 60 рисунков.

Список использованных сокращений:

ЭДС – электродвижущая сила,

МДС – магнитодвижущая сила,

СКО – среднее квадратическое отклонение,

КО – круговой огонь,

МПТ – машина постоянного тока,

КЩУ – коллекторно-щеточный узел,

ТСЗ – тепловая схема замещения,

ТС – тепловое сопротивление,

ТЭД – тяговый электродвигатель,

КО ТЭД – компенсационная обмотка тягового электродвигателя,

ДП – дополнительные полюса,

МЯП – моторно-якорный подшипник,

ЭВМ – электронная вычислительная машина,

ГВС – генератор высокочастотного сигнала,

ИП – измерительный преобразователь,

КП – компенсационный преобразователь,

ДУ – дифференциальный усилитель,

УПТ – усилитель постоянного тока,

ФИС – формирователь импульсов считывания,

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь,

ЦН – цифровой накопитель.

1 АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

С увеличением мощности электрических машин, таких, как тяговые электродвигатели, вопрос контроля и ограничения нагрева элементов машины становится актуальным [16]. В электрических машинах преобразование энергии связано с потерями, связанными с перемагничиванием сердечников, протеканием тока в проводниках, трением в подшипниках и скользящих контактах. Особое внимание в данном вопросе уделяется обмоткам якоря, так как высокие температуры неизбежно приводят к старению и преждевременному выходу из строя материала изоляции. В элементах якоря ключевую роль в нагреве играет протекание тока в обмотках [68]. Исследования в области нагрева якоря МПТ проводятся для применения новых конструкторских решений, разработки более эффективной системы охлаждения машины. Меньшее внимание в научных работах уделяется нагреву в зоне КЩУ. В существующих научных работах при комплексном подходе к изучению тепловых процессов в электрической машине, тепло выделяющееся в зоне КЩУ учитывается только как потери при протекании тока через контакт щетка-коллектор. Для комплексной оценки тепловых процессов, возможно, рационально пренебречь количеством теплоты, выделяющейся в щетке и контакте щетка-коллектор. Эти потери не сопоставимы с общими потерями машины. Но, если рассматривать систему щетка-коллектор, тепловые процессы, во-первых, влияют на работу скользящего контакта, во-вторых, позволяют оценивать параметры работы машины, а, следовательно, ее техническое состояние [93].

1.1 Анализ отказов электровозов по сети железных дорог за 2013-2015 годы

Используя статистику по рекламационной работе по электровозам серии 2ЭС6 приписки эксплуатационного депо Омск, покажем, какие элементы электровозов с наибольшей вероятностью подвержены отказам и появлением неисправностей.

На гарантийные электровозы серии 2ЭС6 за 2013 год составлено 748 акта-рекламации. В таблице 1.1 приведено статистика распределения актов-рекламаций по видам оборудования:

Таблица 1.1 – Количество неисправностей по видам оборудования в 2013 году

Вид оборудования	Количество неисправностей
колёсные пары	50
тяговые электродвигатели	123
вспомогательные машины	36
механическое оборудование	89
электрооборудование	134
электронное оборудование	125
автотормозное оборудование	99
приборы безопасности	92
Итого	748

Графически данные по видам неисправностей приведены на рисунке 1.1.

Отказы электродвигателей составляют значительную долю всех отказов.

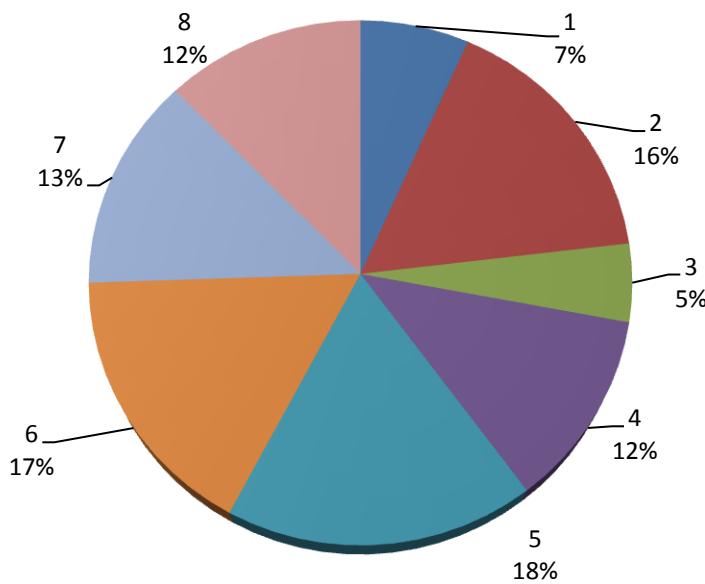


Рисунок 1.1 – Виды неисправностей в 2013 году: 1 – колесные пары, 2 – тяговые электродвигатели, 3 – вспомогательные машины, 4 – механическое оборудование, 5 – электрооборудование, 6 – электронное оборудование, 7 - автотормозное оборудование, 8 – приборы безопасности

Неисправности ТЭД электровозов серии 2ЭС6 связаны в том числе и с работой КЩУ, во многих случаях возникает переброс дуги по коллектору или обнаруживаются следы переброса электрической дуги. В таблице 1.2 приведено количество случаев неисправностей ТЭД по их видам для двигателей СТК810У1, ЭДП810У1, ЭК810Ч.

Таблица 1.2 – Случаи неисправностей в 2013 году по их видам

Вид неисправности	Электродвигатель			Всего за 2013 год
	СТК 810У1	ЭДП 810У1	ЭК810Ч	
Разность активных сопротивлений	3	1	2	6
Пробой КО и ДП	3	0	9	12
Пробой обмотки якоря	6	12	16	34
Пробой обмотки возбуждения	3	14	1	18
Неисправность моторно-якорного подшипника	1	3	1	5
Переброс электрической дуги по коллектору	14	8	11	33
Смотровой люк на ТЭД	0	0	0	0
Элементы МЯП	8	1	0	9
Наличие редукторной смазки в ТЭД	1	0	2	3
Болт крепление сердечника главного полюса	0	1	0	1
Крепление кабеля к траверсе	0	1	0	1
Прогар изоляторов	0	1	0	1

Как видно из приведенной статистики, большинство неисправностей ТЭД за 2013 год связано с пробоем обмотки якоря и перебросом дуги по коллектору. Электродуговое искрение в зоне КЩУ не приводит к немедленному выводу из строя машины, но при продолжительном действии остается нагар на коллекторных пластинах, который обнаруживается при осмотре ТЭД. [16] На рисунке 1.2 графически отображено распределение по видам неисправности ТЭД в 2013 году.

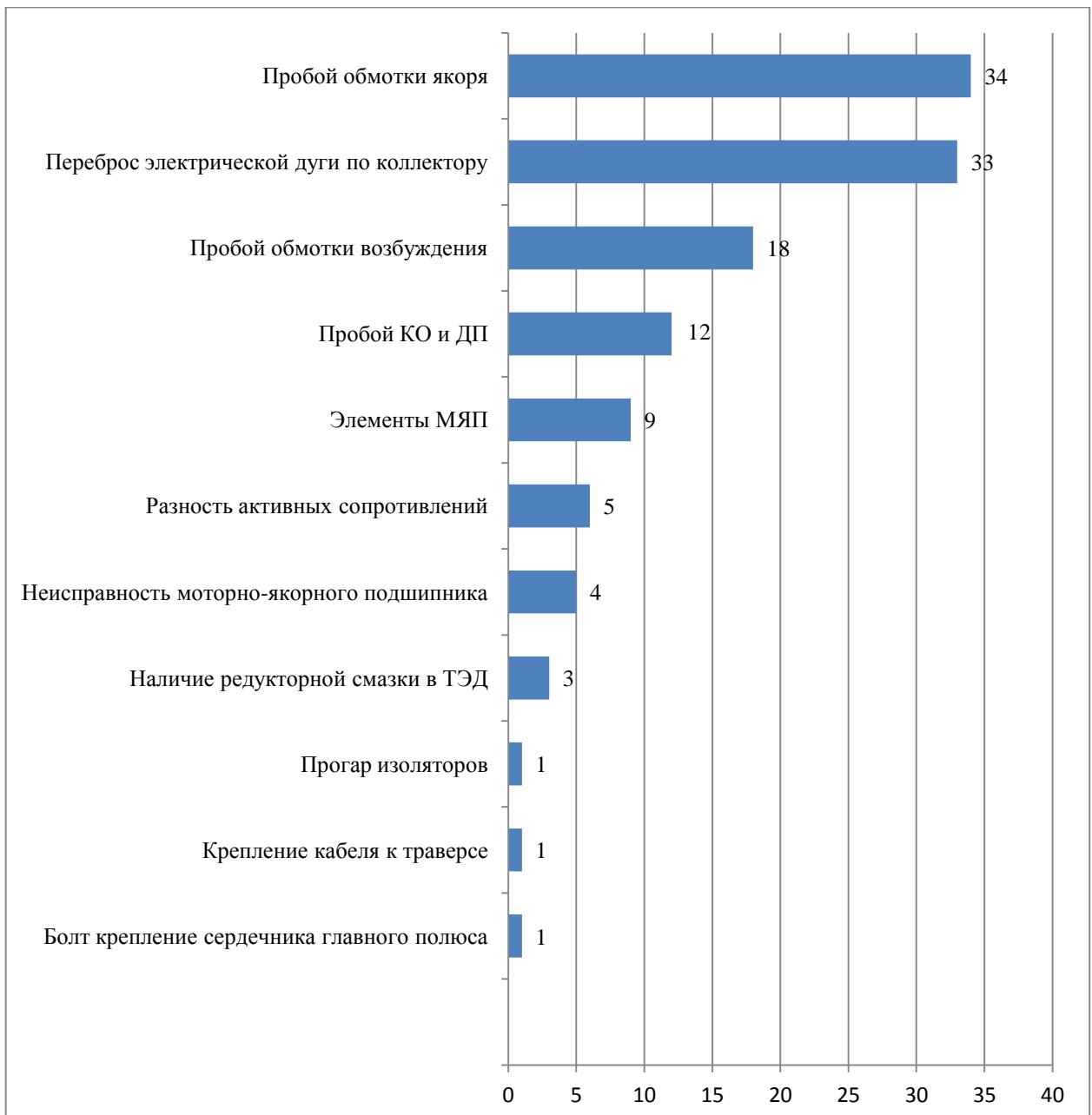


Рисунок 1.2 – Случаи неисправности ТЭД и их виды в 2013 году

Также имеется в распоряжении статистика по написанным актам-рекламациям за 2014 год по электровозам серии 2ЭС6 приписки эксплуатационного депо Омск. Всего за 2014 год составлен 707 актов-рекламаций на гарантийные электровозы. Неисправности по видам оборудования распределились так, как показано в таблице:

Таблица 1.3 – Количество рекламаций по видам оборудования в 2014 году

Вид оборудования	Количество неисправностей
колёсные пары	34
тяговые электродвигатели	178
вспомогательные машины	56
механическое оборудование	130
электрооборудование	96
электронное оборудование	124
автотормозное оборудование	40
приборы безопасности	49
Итого	707

Графически распределение количества неисправностей по видам оборудования приведено на рисунке

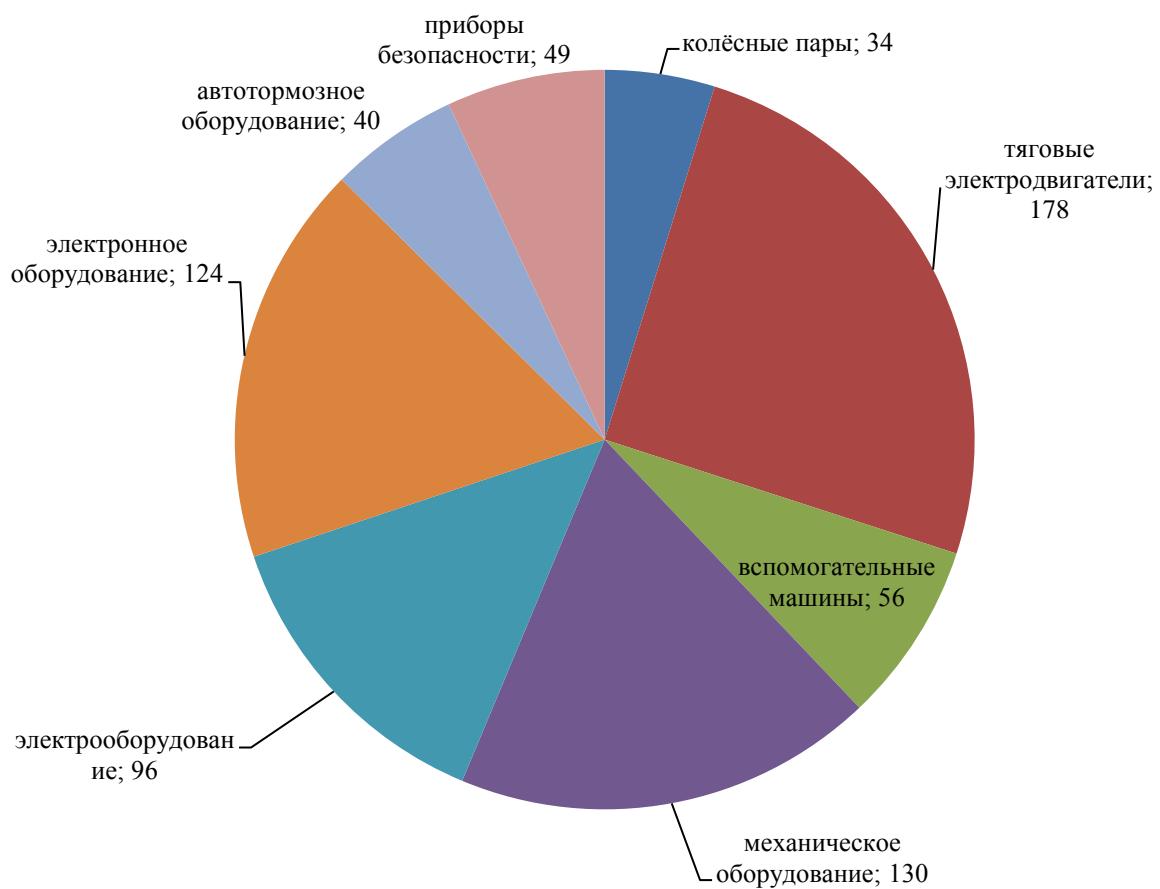


Рисунок 1.3 – Количество неисправностей по видам оборудования в 2014 году

Неисправности электродвигателей в 2014 в большинстве случаев связаны с пробоями изоляции якоря и наличием переброса дуги по коллектору. Отмечаются также нарушения работы механизмов КЩУ. В таблице приведены статистические данные по количеству различного вида неисправностей для электродвигателей СТК 810У1, ЭДП 810У1 и ЭК810Ч.

Таблица 1.4 – Неисправности электродвигателей в 2014 году

Вид неисправности	Электродвигатель			Всего за 2014 год
	СТК 810У1	ЭДП 810У1	ЭК810Ч	
Разность активных сопротивлений	0	5	1	6
Пробой КО ТЭД и ДП	9	5	14	28
Пробой обмотки якоря	7	20	29	56
Пробой обмотки возбуждения	4	17	4	25
Неисправность моторно-якорного подшипника	4	3	3	10
Переброс электрической дуги по коллектору	4	5	0	9
Смотровой люк на ТЭД	0	0	0	0
Элементы МЯП	0	0	0	0
Наличие редукторной смазки в ТЭД	0	0	27	27
Болт крепление сердечника главного полюса	0	0	0	0
Крепление кабеля к траверсе	0	0	0	0
Неисправность коллекторно-щеточного аппарата	0	7	4	11
Низкая изоляция ТЭД (сушка)	0	3	2	5
Прогар изоляторов	0	0	0	1
Посторонние предметы	0	0	1	1

Приведенные данные графически отражены на рисунке 1.4.

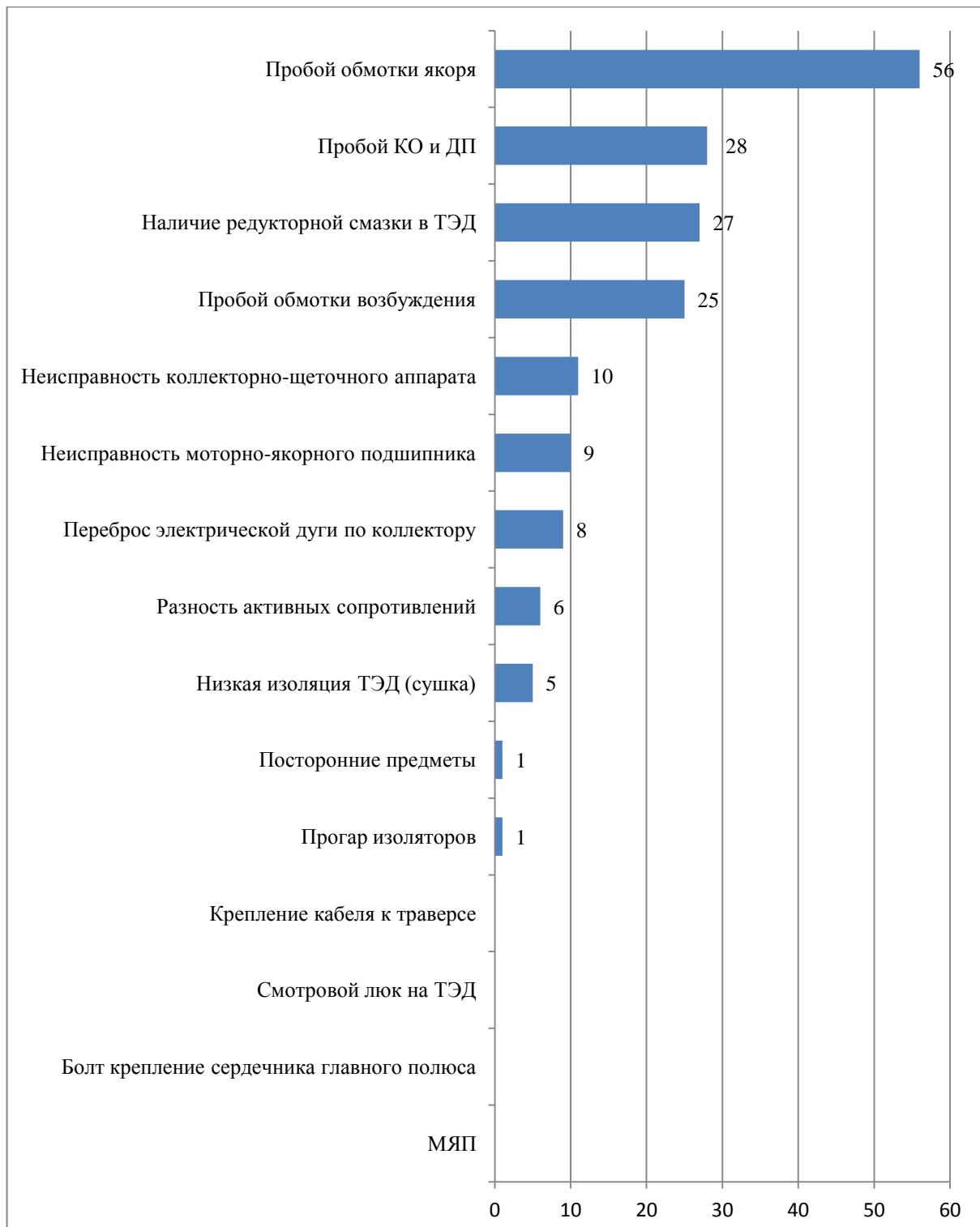


Рисунок 1.4 – Виды неисправностей ТЭД в 2014 году

Используя отчет по рекламациям за январь 2015 года, можем привести данные по количеству неисправностей электровозов:

Таблица 1.5 – Неисправности электровозов в январе 2015 года

Вид оборудования	Количество неисправностей
колёсные пары	1
тяговые электродвигатели	18
вспомогательные машины	5
механическое оборудование	1
электрооборудование	6
электронное оборудование	8
автотормозное оборудование	4
приборы безопасности	5
Итого	48

Приведенные данные графически отражены на диаграмме рисунке.



Рисунок 1.5 – Неисправности электровозов в январе 2015 года

По приведенным данным видно, что большинство неисправностей электровозов в январе 2015 года было связано с ТЭД.

Из анализа данных по рекламационной работе локомотивного депо видно, что существенная доля неисправностей связана с перебросом дуги по коллектору или обнаружением следов переброса электрической дуги по коллектору. Это свидетельствует о частом нарушении коммутационной устойчивости и появлении искрения в щеточном контакте эксплуатируемых тяговых электродвигателей.

Такие дефекты, как искрение и круговой огонь, тесно связаны с термическими дефектами в узле: чрезмерным нагревом и нарушением условий нормального теплообмена между активными элементами.

1.2 Факторы, влияющие на процесс коммутации МПТ

Скользящий контакт вносит существенное влияние на процесс коммутации, особенно на самом ответственном завершающем этапе коммутации [81].

Важную роль в процессе коммутации играет сопротивление в зоне контакта «щетка-коллектор» $\Delta U_{щ}$. Эта величина описывается вольт-амперной характеристикой контактного слоя: зависимость падения напряжения от плотности тока $\Delta U_{щ} = f(J_{щ})$. Характер изменения этой величины может быть весьма разнообразным.

Для различных марок щеток величина падения напряжения колеблется от долей вольта до нескольких вольт. Соответственно, изменения вольт-амперных характеристик, т.е. свойства щеточного контакта, оказывают существенное влияние на процесс коммутации.

Существенно изменяются вольт-амперные характеристики и при изменении температуры щеточного контакта. Причем характер изменения зависит от материалов и свойств самого контакта. К примеру, у щеток ЭГ-74 с ростом температуры существенно падает величина $\Delta U_{щ}$. В то время, как у щеток ЭГ-2А с ростом температуры эта величина изменяется несущественно.

Согласно детальным исследованиям с позиции теории оптимальной коммутации, при низкой температуре наблюдается недокоммутация, затем высокая пе-

рекоммутация, с последующим нагревом переходящая в недокоммутацию. На рисунке 1.6 графически отражена зависимость оптимального значения коммутирующий ЭДС $e_{k \text{ опт}}$ от температуры в зоне контакта для щетки ЭГ-2А.

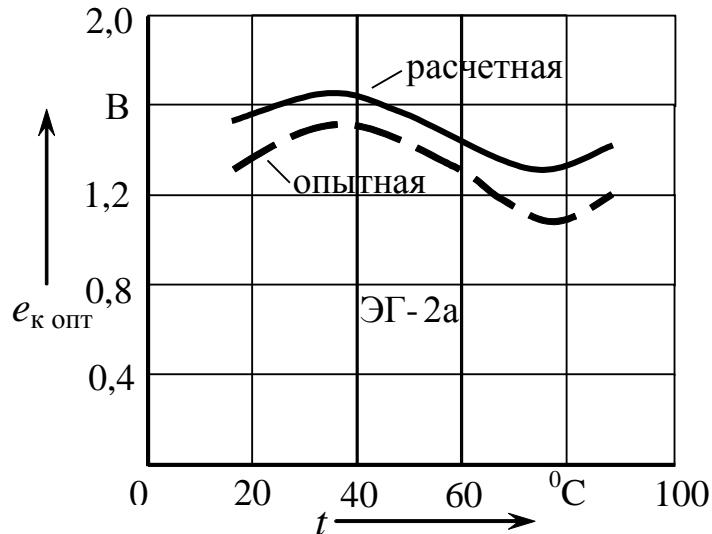


Рисунок 1.6 – Зависимость $e_{k \text{ опт}}$ от температуры зоны контакта

Коммутационные свойства меди коллектора и щеток оцениваются по ширине и положению зон безыскровой работы в рабочем диапазоне МПТ. Чем шире зона безыскровой коммутации, тем легче происходит токосъем в скользящем контакте. Воздействие межламельных напряжений на коллекторной дуге и между разнополярными щетками затруднено при отсутствии коммутационных дуг между сбегающими краями щетки и уходящим из-под них коллектором. Это приводит к снижению вероятности образования круговых огней и уменьшению износа коллектора и щеток.

Характер коммутации изменяется также с изменением нагрузки. Известно, что с увеличением нагрузки наблюдается ускорение коммутации, а при снижении – замедление. Это объясняется с позиций теории оптимальной коммутации. Баланс ЭДС коммутируемой секции определяет оптимальный характер изменения тока коммутируемого контура ($i_2 \approx 0$ и $di_2 / dt \approx 0$ на завершающем этапе) [81].

$$e_{k \text{ опт}} = e_{r \text{ опт}} + \frac{1}{T} \int_0^t (\Delta U_2 - \Delta U_1) dt \quad (1.2.1)$$

Можно сделать вывод, что оптимальная коммутации обеспечивается существующей коммутирующей ЭДС e_k лишь в случае определенного тока нагрузки.

Реальная и коммутирующая ЭДС изменяются пропорционально изменению тока нагрузки ($2i_a$). Это возможно лишь при $\Delta U_1 = \text{const}$ и при увеличении или уменьшении падения напряжения.

$$\Delta U_2 = i_2 r_2 = (i_a + i) r_2 \quad (1.2.2)$$

Таким образом, падение напряжения под сбегающим краем варьируется в при изменении нагрузки. При увеличении тока нагрузки секция уходит в область перекоммутации и при снижении тока нагрузки – в область недокоммутации.

Анализируя многолетнюю практику настройки и эксплуатации электрических машин, можно сделать вывод о том, что при широком регулировании частоты вращения на низких ступенях имеет место недокоммутации, на высоких – перекоммутация. Коммутирующая ЭДС, необходимая для оптимальной коммутации, изменяется непропорционально регулированию частоты вращения. Реальная коммутирующая ЭДС e_k изменяется пропорционально частоте вращения.

При малых частотах вращения реальная коммутирующая ЭДС меньше необходимой для оптимального завершения коммутации. Машина уходит в область недокоммутации. Существенное влияние в уравнении баланса ЭДС оказывает щеточный контакт [81].

$$e_{щ \text{ ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T (\Delta U_2 - \Delta U_1) dt \quad (1.2.3)$$

Основной влияющий фактор при высоких скоростях вращения – реактивная ЭДС. С возрастанием частоты вращения влияние щетки снижается.

В машинах с последовательным возбуждением, к которым относится ТЭД, частота вращения влияет своеобразно: ток якоря уменьшается с увеличением частоты вращения и наоборот. Здесь на коммутацию влияют два фактора и разнонаправленно. Однако, различные исследования показывают, что расстройство коммутации при варьировании тока нагрузки не столь существенно, как при варьировании частоты вращения.

1.3 Связь между техническим состоянием и нагревом элементов КЩУ

Одним из основных эффектов, возникающих при нарушении коммутации МПТ или технических неисправностей, является искрение щеток [2]. При искрении наблюдается кратковременное повышение температуры в контакте щетка-коллектор [98]. При продолжительном искрении коллекторные пластины и щетка значительно нагреваются.

Чрезмерный нагрев коллектора может быть вызван повышенной плотностью тока, проходящего через щеточный контакт. Такое случается, к примеру, когда обмотка высокого напряжения была изменена на обмотку низкого напряжения. Также увеличение электрических потерь может быть связано с использованием щеток неправильной марки, что приводит к повышению переходного падения напряжения [16].

Неисправности подшипников могут также приводить к повышению температуры в зоне КЩУ. К примеру, при заедании подшипников возникает короткое замыкание, когда статор подключен к сети, а ротор не вращается. При этом по обмотке якоря протекают недопустимо высокие токи. Это приводит не только к повышению температуры якорных обмоток, но и чрезмерному нагреву в зоне КЩУ [39].

Важным параметром работы КЩУ является падение напряжения на щеточном контакте $\Delta U_{u\ell}$. Эта величина определяет мощность одного из источников потерь в зоне КЩУ. В свою очередь изменение температуры зоны контакта приводит к изменению величины $\Delta U_{u\ell}$ [84].

Факторы, влияющие на нагрев элементов КЩУ МПТ, можно разделить на три группы: факторы электрической природы без учета искрения, факторы механической природы, а также факторы, обусловленные электродуговым искрением.

Исходя из закона Джоуля-Ленца, количество теплоты, выделяемое в проводнике зависит от двух величин: силы тока и сопротивления проводника. Таким образом, рассматривая щетку и коллектор, как проводники, нагрев элементов КЩУ будет зависеть от тока якоря, марки меди коллектора и марки графитовых щеток [43].

Скользящий контакт нагревается также по причине механического трения [3]. Во-первых, фактором, влияющим на интенсивность нагрева, является коэффициент трения. Это зависит, конечно же, от выбранных щеток и поверхности коллектора. Коэффициент трения будет зависеть от того, насколько качественно притерты щетки.

Нагрев при механическом трении возрастает при увеличении усилия, то есть, применительно к МПТ – величины нажатия щетки. В КЩУ МПТ нажатие изменяется путем замены пружин на щеткодержателе [2]. При увеличении нажатия возрастает сила трения, что приводит к увеличению интенсивности нагрева.

Скорость скольжения также прямо пропорциональна интенсивности нагрева.

Электродуговое искрение в контакте щетка-коллектор представляет собой сложный процесс [65]. Здесь нельзя выделить какой-то определенный источник потерь. Можно выделить три крупных составляющих процесса: горение электрической дуги, электрическое искрение и горение частиц износа в электрической дуге. В отдельных точках области электродугового искрения температура может достигать нескольких тысяч градусов.

Повышенная температура в зоне контакта «щетка-коллектор» приводит к изменению величины падения напряжения в щеточном контакте ΔU_u , которая, безусловно, оказывает влияние на процесс коммутации – с ростом температуры возрастает переходное сопротивление скользящего контакта. Чрезмерный нагрев

таких активных элементов узла, как коллектор и щетки, приводит к изменению токопроводящих свойств материала, что также оказывает влияние на процесс коммутации.

1.4 Методы контроля температуры в машинах постоянного тока

В машинах постоянного тока, как правило, контролируют температуру основных элементов машины (коллектора, щеток, обмоток якоря, стали якоря, главных и добавочных полюсов) и температуру воздушного потока [105]. Сложность контроля температуры эксплуатируемой машины заключается в труднодоступности необходимых точек контроля, поэтому развиваются методики контроля температуры по косвенным признакам, к примеру, контроль температуры выходящего воздушного потока.

С развитием техники методы измерения температуры совершенствуются. Общая классификация методов приведена на рисунке 1.7.

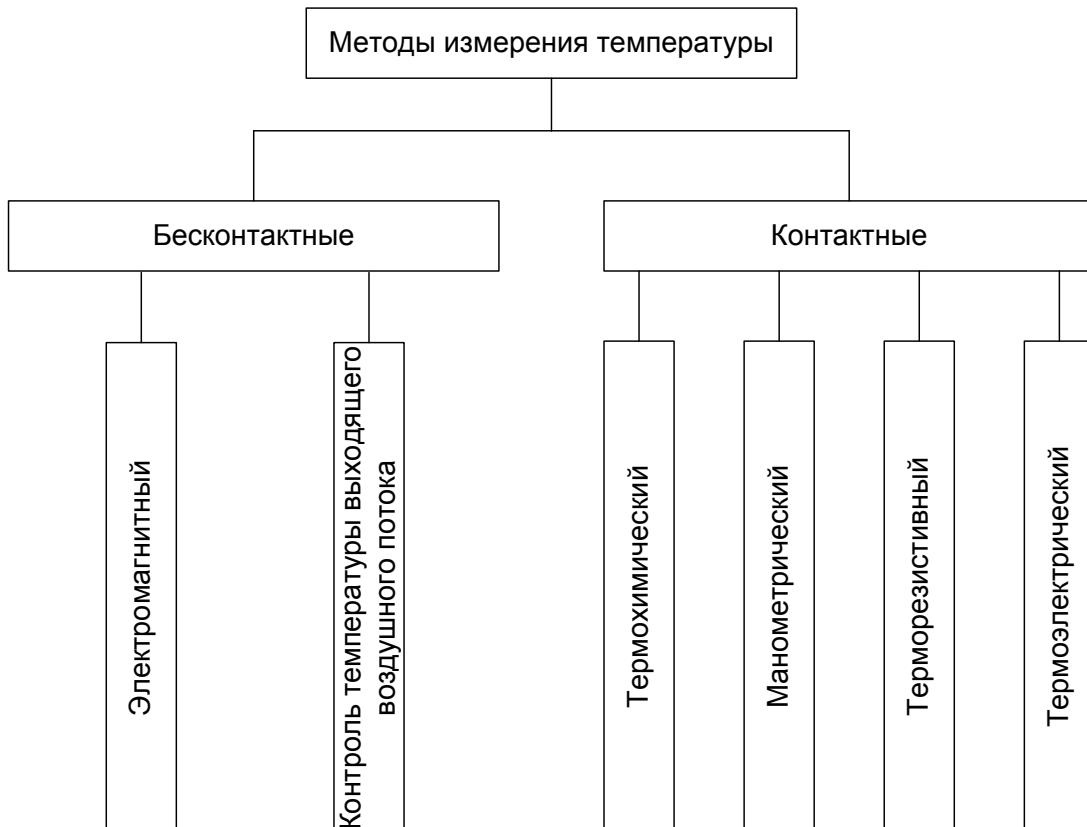


Рисунок 1.7 – Общая классификация методов измерения температуры

Термохимический метод измерения температуры основан на свойстве некоторых веществ изменять свой цвет при нагревании до определенной температуры. После охлаждения исследуемой поверхности цвет сохраняется. Такой метод применяется для измерения температуры поверхности металлов. Существуют специальные термохимические карандаши для нанесения индикационного слоя на поверхность. Недостаток такого метода контроля заключается в низкой точности определения температуры – погрешность составляет около 10 °C [41].

Манометрический метод измерения температуры основан на свойстве расширения газов при нагревании. Существуют специальные термосигнализаторы, позволяющие выносить измерительный прибор на несколько метров от точки измерения температуры. Такой метод контроля температуры электрооборудования часто применяется во взрывоопасных условиях, к примеру, в шахтах. Его достоинство заключается в вибрационной устойчивости и отсутствие электрического сигнала. К недостаткам можно отнести низкую точность.

Терморезистивный метод измерения температуры основан на свойстве изменения сопротивления проводника при изменении температуры. Конструкции измерительных комплексов, применяющих данный метод, разнообразны. В большинстве случаев сам терморезистивный элемент выполнен в виде тонкой медной проволоки, намотанной на изоляционный каркас. При температуре 0 °C входное сопротивление такого элемента 53 Ом. Терморезистивные термометры оснащают системой электронной обработки сигнала и применяют для измерения температуры обмотки и стали статоров МПТ, синхронных компенсаторов, охлаждающего воздуха.

Термоэлектрический метод измерения температуры подразумевает использование термопары – соединения двух разнородных проводников, изменяющего ЭДС в цепи в зависимости от температуры точки соединения. Существует ограничение: измеряемая температура не должна превышать 100 – 120 °C. Термоэлектрический метод применяют для измерения температуры конструктивных элементов турбогенераторов, стали статора, охлаждающего газа. Достоинством тер-

моэлектрического метода контроля является возможность автоматизации процесса измерения с помощью электронных средств.

К электромагнитным методам измерения температуры относятся, в основном, методы, основанные на регистрации инфракрасного излучения нагретого тела. Этот метод получил широкое распространение и развитие в последнее десятилетие. Принцип регистрации инфракрасного излученияложен в основу радиационных пирометров и тепловизоров, называемых также термовизорами. Тепловизоры обеспечивают возможность регистрации теплового поля нагретого тела, то есть температуру во множестве точек одновременно. Этот метод получил широкое распространение для выявления точек перегрева на работающем оборудовании.

1.5 Выводы

1. Анализ отказов тяговых электродвигателей подвижного состава по сети железных дорог показал, что существенная доля отказов происходит по причине неисправностей, связанных с техническим состоянием КЩУ, таких как переброс электрической дуги по коллектору или обнаружение следов переброса электрической дуги по коллектору.

2. Различные неисправности КЩУ МПТ приводят к чрезмерному нагреву в зоне контакта «щетка-коллектор», существуют различные методы и средства контроля температуры зона контакта КЩУ.

3. Чрезмерный нагрев в зоне контакта «щетка-коллектор» приводит к изменению токопроводящих свойств материалов активных элементов КЩУ, а также к изменению величины падения напряжения $\Delta U_{u\mu}$, что оказывает влияние на условия коммутации.

1.6 Постановка задач исследования

На основе проведенного анализа сформулированы задачи диссертационного исследования:

1. На основе анализа влияющих факторов на интенсивность искрения щеточного контакта уточнить граф-модель модель диагностирования КЩУ МПТ;
2. Определить эффективное множество диагностических параметров КЩУ с учетом параметров профиля коллектора и тепловых процессов в зоне контакта;
3. Составить тепловую схему замещения КЩУ для уточнения тепловой схемы замещения МПТ;
4. Сформулировать математическую модель нагрева в зоне контакта при стационарном и переходном режиме работы;
5. Провести экспериментальные исследования нагрева в зоне контакта с целью определения влияния параметров работы на интенсивность нагрева, сформулировать регрессионные зависимости;
6. Разработать методику диагностирования технического состояния КЩУ с учетом параметров профиля коллектора и теплового параметра и на ее основе предложить аппаратно-программный комплекс диагностирования технического состояния КЩУ МПТ; рассчитать экономическую эффективность внедрения комплекса.

2 ДИАГНОСТИРОВАНИЕ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Диагностирование сложных технических систем, одной из которых является коллекторно-щеточный узел (КЩУ) ТЭД, предполагает комплекс мероприятий по контролю и прогнозированию технического состояния. Техническое диагностирование деталей и узлов ТЭД определяется рядом операций, изложенных в утвержденной технологической документации: контроль механических и электрических параметров. Контроль перечисленных параметров в ряде случаев не позволяет получать достоверных результатов о техническом состоянии КЩУ ТЭД. Отсюда возникает задача создания комплексной методики технического диагностирования, позволяющей получать достоверные сведения о техническом состоянии КЩУ ТЭД [81].

2.1 Граф-модель диагностирования технического состояния КЩУ МПТ

В основу методики диагностирования положены методы математического анализа и моделирования. Большинство систем технического диагностирования используют информацию о состоянии узла в виде набора диагностических признаков, наиболее полно и достоверно определяющих его технические свойства. Применение графо-аналитического метода отображения объекта в пространстве признаков с построением граф-модели позволит повысить достоверность распознавания дефектов КЩУ ТЭД.

Решение поставленной задачи основывается на граф-модели диагностирования КЩУ ТЭД в процессе приемо-сдаточных испытаний, параметры которой являются компонентами нелинейного дифференциального уравнения первого порядка, описывающего процесс коммутации в электродвигателе [3]:

$$L \frac{di}{dt} + \sum_{k=1} M_k \frac{di_k}{dt} = \Delta u_1(J) - \Delta u_2(J) - iR_s - e_k(t), \quad (2.1.1)$$

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

$e_M = -\sum_{k=1} M_k \frac{di_k}{dt}$ – ЭДС взаимоиндукции;

$\Delta u_1(J)$ и $\Delta u_2(J)$ – переходные падения напряжения под набегающей и сбегающей коллекторной пластиной;

R_S – сопротивление коммутируемой секции;

$e_k(t)$ – коммутирующая ЭДС, наводимая в секции при ее взаимодействии с магнитными полями в зоне коммутации.

Исходная граф-модель, приведенная на рисунке 2.1, дополнена рядом диагностических параметров [89], учет которых позволяет полно отразить сложные процессы, протекающие в узлах ТЭД [82,111,98].

Воздействие электродугового искрения на поверхность ламели разупрочняет ее поверхностный слой, изменяя структуру и механические свойства коллекторной меди [46].

В уточненной граф-модели [89] учитываются диагностические параметры, отражающие влияние профиля коллектора на качество функционирования КЩУ ТЭД ($A_1, A_2, \sigma_h, \sigma_{\ddot{\eta}}, \ddot{\eta}_{min}, \ddot{\eta}_{deyst.}$) [81], возможность возникновения кругового огня по коллектору при неблагоприятных потенциальных условиях, а также отражены причинно-следственные связи возникновения электромеханического износа коллектора без учета (γ_M) и с учетом (γ_h, S_h) электродугового искрения, а также тепловые процессы, происходящие в КЩУ ТЭД (γ_T) [78,83,108,109]. В граф-модели КЩУ ТЭД используются следующие обозначения:

γ_T – тепловой износ коллектора;

S – фактическая площадь контакта «коллектор – щетка»;

γ_h – электромеханический износ коллектора по высоте пластины с учетом электродугового искрения;

S_h – электромеханический износ коллектора по ширине пластины с учетом электродугового искрения;

γ_M – электромеханический износ коллектора без учета электродугового ис-
крения;

$\gamma_{h\ щ}$ – электромеханический износ щетки;

$\gamma_{M\ щ}$ – механический износ щетки;

d_{13} – отклонение величины первой гармонической составляющей профиля коллектора от нормы;

d_{14} – отклонение величины второй гармонической составляющей профиля коллектора от нормы;

d_{15} – изменение среднего квадратического отклонения высоты профиля коллектора от нормы;

d_{16} – изменение среднего квадратического отклонения второй производной профиля коллектора от нормы;

d_{17} – отклонение минимального значения второй производной профиля коллектора от нормы;

d_{18} – отклонение действующего значения второй производной профиля коллектора от нормы.

Выявление соответствия дефектов, образующихся в результате эксплуатации КЩУ ТЭД, и диагностических параметров, характеризующих техническое состояния контактной пары «коллектор-щетка», основывается на применении двудольных графов. Одним из основных этапов формирования двудольного графа соответствия дефектов и диагностических параметров является построение рабочей граф-модели.

Первоначально производится упорядочение вершин граф-моделей методом экспертных оценок [10]. Затем каждому ребру граф-модели ставится в соответствие некоторая величина – вес ребра, характеризующая тесноту связи между соответствующими параметрами. На основании весов ребер формируется исходная матрица смежности [57].

Все параметры и вершины граф-модели приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Соответствие вершин и параметров рабочей граф-модели

Обозначение вершины	Параметр	Обозначение вершины	Параметр
I_a	Ток якоря	U_n	Установка нейтрали
R_{md}	Магнитное сопротивление по продольной оси	L_c	Индуктивность секции якорной обмотки
R_{mq}	Магнитное сопротивление по поперечной оси	M_c	Взаимная индуктивность секции якорной обмотки
E_L	ЭДС самоиндукции	δ_{gp}	Зазор под главными полюсами
E_M	ЭДС взаимоиндукции	Δ_{da}	Биение сердечника якоря
Φ_k	Магнитный поток в зоне коммутации	δ_{dp}	Зазор под дополнительными полюсами
E_p	Реактивная ЭДС	a	Вибрация испытуемой машины
F_{ad}	МДС якоря по продольной оси	$H_{щ}$ и H_{gp}	Несимметрия расположения щеток и главных полюсов
F_{aq}	МДС якоря по поперечной оси	$M_{щ}$	Марка щетки
U_a	Напряжение на якоре	P_n	Нажатие на щетку
C_b	Влажность	$b_{щ}$	Ширина щеток и их раздвижка
E_k	ЭДС вращения	A_1	Эксцентризитет коллектора
A_2	Эллиптичность коллектора	σ_h	СКО относительных высот
$\sigma_{\ddot{\eta}}$	СКО второй производной	$\ddot{\eta}_{min}$	Минимальное значение второй производной
Φ	Магнитный поток	$\ddot{\eta}_{действ.}$	Действующее значение высших гармонических составляющих
n	Частота вращения	$d1$	Отклонение положения траверсы от геометрической нейтрали
$j_{щ}$	Плотность тока под щеткой	$d2$	Отклонение индуктивности секции якорной обмотки от нормы
$S_{щ}$	Притирка щетки	$d3$	Отклонение взаимной индуктивности секции якорной обмотки от нормы
t_k^o	Температура контакта «щетка-коллектор»	$d4$	Отклонение зазора под главными полюсами от нормы
$\Delta U_{щ}$	Падение напряжения в щеточном контакте	$d5$	Отклонение биения сердечника якоря от нормы
P_k	Контактное давление	$d6$	Отклонение зазора под дополнительными полюсами от нормы
i_p	Ток разрыва	$d7$	Уровень вибрации испытуемой машины превышает допустимое значение
T_k	Период коммутации	$d8$	Отклонение параметра профиля коллектора от нормы
$I_{щ}$	Искрение щеток	$d9$	Марка щетки не соответствует паспортным данным
U_k	Потенциальные условия на коллекторе	$d10$	Отклонение силы нажатия на щетку от нормы
K_O	Круговой огонь	$d11$	Отклонение ширины щеток или их раздвижки от нормы
γ_t	Тепловой износ коллектора	$d12$	Несимметричное расположение щеток на геометрической нейтрали
γ_h	Электромеханический износ коллектора по высоте пластины с учетом электродугового искрения	$d13$	Несимметричное расположение главных полюсов
γ_m	Электромеханический износ коллектора без учета электродугового искрения	$\gamma_{M_{щ}}$	Механический износ щетки

На основании исходной матрицы смежности строится матрица частных расстояний, с использованием которой определяются синдромы $D(e_i)$ и строится соответствующая таблица синдромов, фрагмент которой приведен в таблице 2.2. В случае, если какая-либо строка матрицы частных расстояний имеет несколько ненулевых элементов, что означает разветвление маршрутов, то строятся подсиндромы $D^{(j)}(e_i)$ для каждого нулевого элемента, приравнивая поочередно остальные ненулевые элементы нулю. Результирующий синдром определялся следующим образом:

$$D(e_i) = \bigcup_j D^{(j)}(e_i). \quad (2.1.2)$$

Следующим шагом является построение компонентов достижимости $P(e)$ (на рисунке 2.2 приведен компонент достижимости для параметра t_k^0). Для каждого $D(e_i)$ или $D^{(j)}(e_i)$ формировался маршрут, в котором последовательно отмечались все ненулевые элементы в порядке возрастания значений весов ребер ρ согласно методике, представленной в [57].

Таблица 2.2 – Фрагмент таблицы синдромов

Параметр граф-модели	Параметр граф-модели								
	t_k^0	i_p	$\Delta U_{\text{щ}}$	$P_{\text{к}}$	$I_{\text{щ}}$	КО	S_h	$\gamma_{\text{м}}$	$\gamma_{\text{м щ}}$
ΣC_{tk1}		5	3		6	8			
ΣC_{tk4}		5	3		6		8		
ΣC_{tk7}		5	3		6				9
ΣC_{Ph8}				1				3	
ΣC_{Ph9}				1					3

Критическое значение расстояния $\rho_{\text{кр}} = 8$ определялось как медиана значений по гистограмме расстояний всех длин маршрутов.

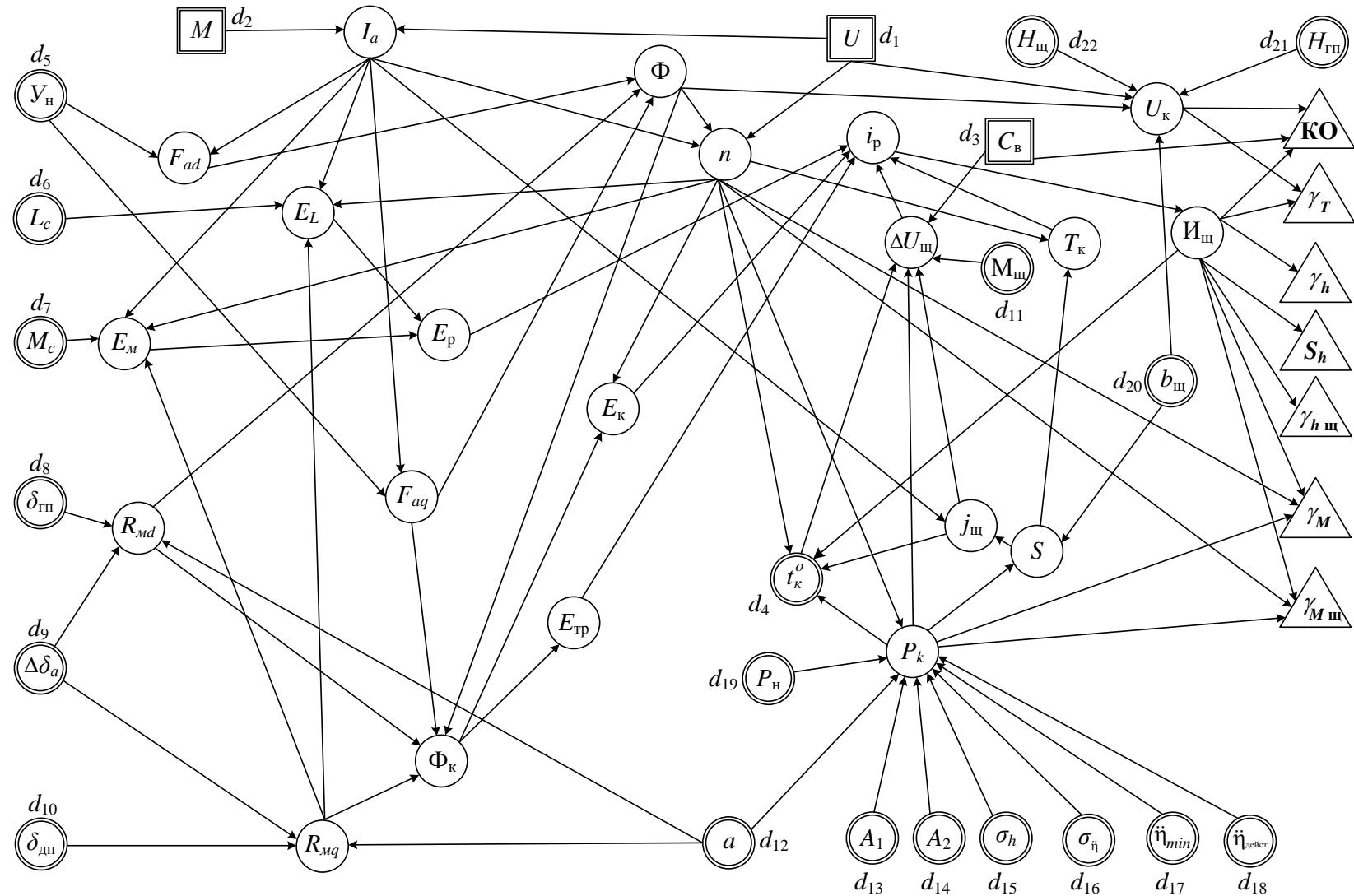


Рисунок 2.1 – Исходная граф-модель диагностирования технического состояния КЦУ МПТ

Учитывая полученное значение ρ_{kp} , определены усеченные синдромы $\overline{D(e)}$ путем вычеркивания ненулевых элементов, значения которых превышают критическое значение. По полученным усеченным синдромам $\overline{D(e)}$ произведена коррекция состава синдромов $D(e_i)$. На рисунке 2.2 усеченные компоненты достижимости отмечались волнистой линией [57].

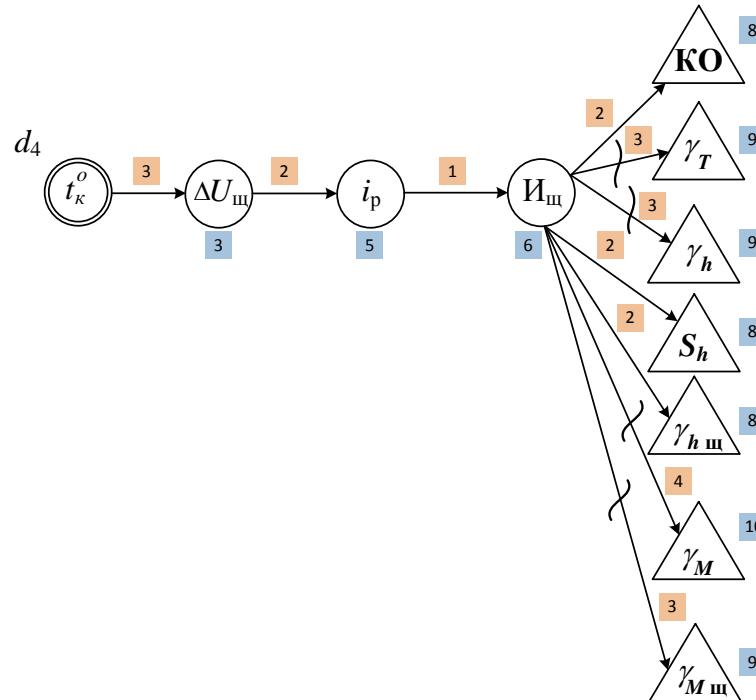


Рисунок 2.2 – Компонент достижимости параметра t_k^0

Анализ усеченных компонентов достижимости $\overline{P(e)}$ показал, что одним из параметров, оказывающих значительное влияние на внутренние параметры КЩУ ТЭД (KO , S_h , $\gamma_{h III}$), является температура коллектора t_k^0 .

Повышение температуры коллектора t_k^0 объясняется как механическими, так и электрическими причинами (рисунок 2.3). Рост температурной нагрузки обусловливается трением в контактной паре «коллектор-щетка», протеканием электрического тока через нее, а также электродуговым искрением.

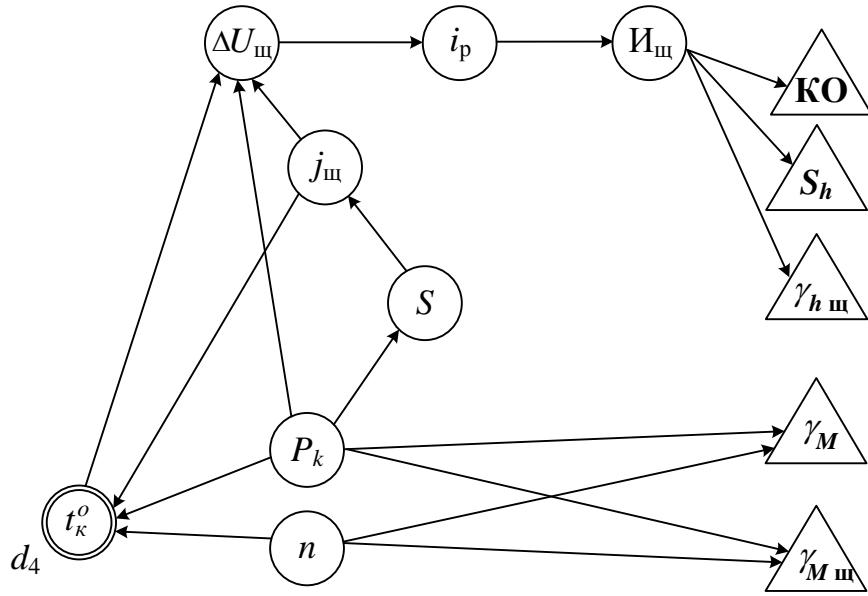


Рисунок 2.3 – Влияние температуры на внутренние параметры

При увеличении контактного давления P_k , возрастает сила трения в контактной паре «коллектор-щетка», и поверхностные слои коллекторной меди нагреваются значительнее. В случае уменьшения контактного давления P_k повышается вероятность отрыва щетки от коллектора и возникновения искрения, в связи с чем температура в контакте может повышаться. Изменение давления в контакте также влияет на реальную площадь взаимодействия контактной пары, изменяя плотность тока $j_{\text{щ}}$ в щеточном контакте.

Изменение температуры коллектора – один из факторов, определяющих падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{\text{щ}}$, и, как следствие, величину тока разрыва i_p . Величина тока разрыва непосредственно влияет на уровень искрения под щетками, таким образом, определяя вероятность возникновения кругового огня по коллектору, при выгорании одной или нескольких ламелей ($S_h \rightarrow \text{max}$), а также рост электромеханической составляющей износа щетки $\gamma_{h\text{ щ}}$.

В результате объединения усеченных компонентов достижимости $\overline{P(e)}$, построена рабочая граф-модель (рисунок 2.4), отличающаяся от исходной отсутствием ребер $\langle E_{\text{тр}}, i_p \rangle$, $\langle \text{И}_{\text{щ}}, \gamma_{\text{т}} \rangle$, $\langle \text{И}_{\text{щ}}, \gamma_h \rangle$, $\langle \text{И}_{\text{щ}}, \gamma_m \rangle$, $\langle \text{И}_{\text{щ}}, \gamma_{m\text{ щ}} \rangle$, $\langle \text{И}_{\text{щ}}, t_k^0 \rangle$, разорванных во всех рассматриваемых маршрутах.

$$O = \overline{D(e_1)} \cup \overline{D(e_2)} \cup \dots \cup \overline{D(e_n)},$$

где $\overline{D(e_1)}$, $\overline{D(e_2)}$, $\overline{D(e_n)}$ – усеченные синдромы вершин e .

Рабочая граф-модель не содержит параметра γ_h , определяющего электромеханический износ коллектора по высоте пластины с учетом электродугового искрения.

Анализ полученной граф-модели, показывает, что разрыв ребер $\langle I_{ш}, \gamma_m \rangle$, $\langle I_{ш}, \gamma_{м ш} \rangle$ обусловлен превалирующим влиянием параметров на механический износ щеток $\gamma_{м ш}$ и коллектора γ_m – частоты вращения электродвигателя n и давления в щеточном контакте P_k , над искрением под набегающим краем щетки.

Физический смысл исключенного параметра γ_h – выгорание поверхности ламели по высоте под действием электродугового искрения под набегающим краем щетки. Необходимо отметить, что параметр γ_h учитывается в факторах γ_m и S_h следующим образом: параметр γ_m характеризует электромеханический износ ламели без учета электродугового искрения, т.е. только от механического трения, параметр S_h – площадь поверхности ламели, подверженной электромеханическому износу от воздействия электродугового искрения. При износе поверхности ламели по ширине от воздействия электродугового искрения, шероховатость пластины повышается, что увеличивает возможность возникновения искрения под набегающим краем щетки и процесс повторится. Ввиду того, что γ_h носит локальный характер, и не является определяющим для возникновения аварийных режимов работы двигателя, то приоритет в оценке износа следует отдавать параметру S_h . Величина γ_h , как правило, не превышает величины износа коллектора γ_m , поэтому может быть учтена в этих двух факторах.

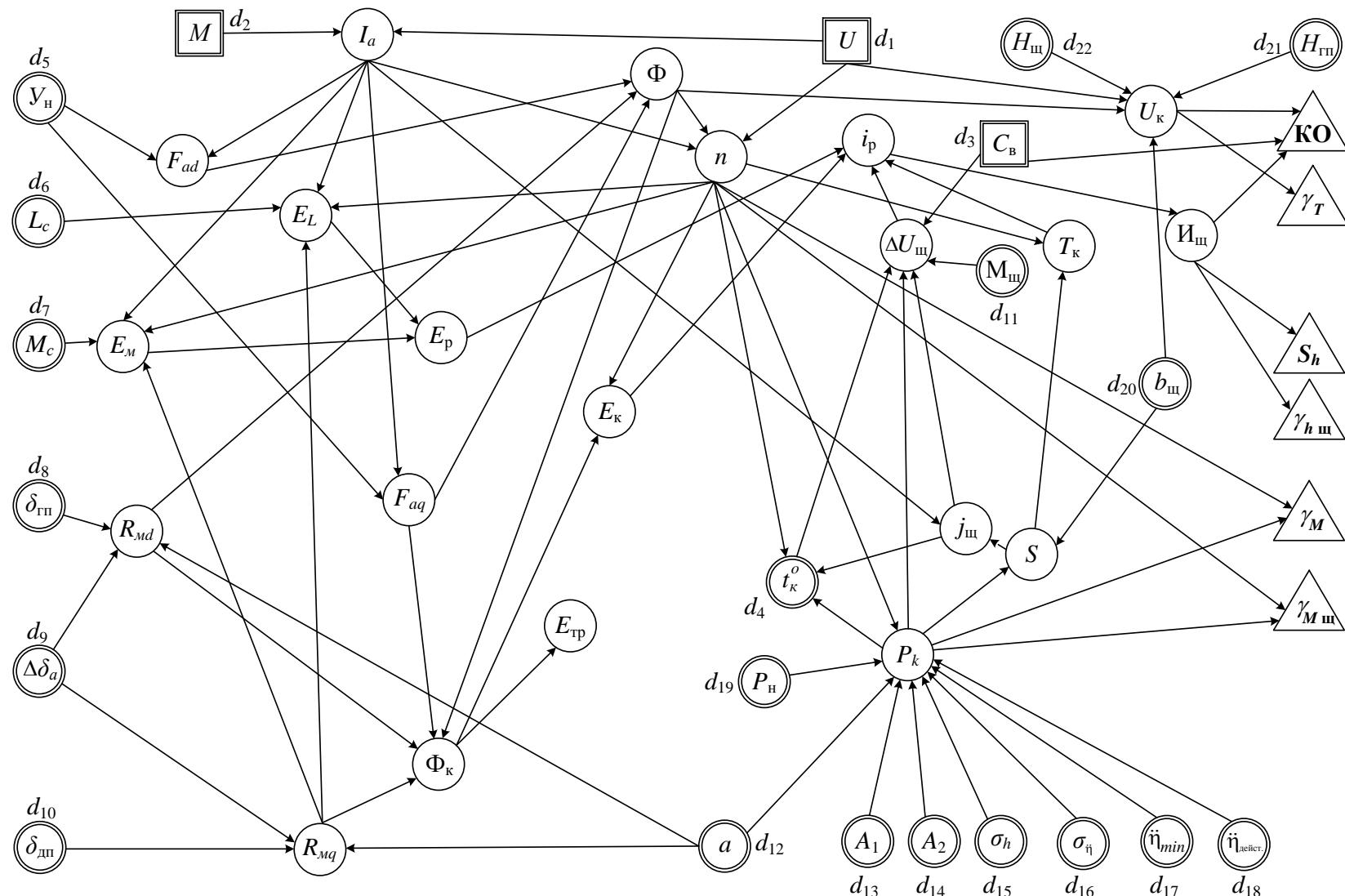


Рисунок 2.4 – Рабочая граф-модель КШУ ТЭД

Воздействие искрения на поверхность ламели увеличивает износ S_h , тем самым увеличивая шероховатость поверхности. Изменение шероховатости поверхности оказывает непосредственное влияние на механический износ ламели γ_m . Необходимо отметить, что значительные величины износов S_h и γ_h приводят к аварийному режиму работы ТЭД. Поскольку значительный износ γ_h возможно выявлять по другим параметрам до наступления аварийного режима работы, то необходимость в его оценке на этапе контроля работоспособности ТЭД отсутствует.

2.2 Декомпозиция рабочей граф-модели

Для реализации процесса диагностирования необходимо определять каждый возможный дефект. Чтобы произвести декомпозицию рабочей граф-модели, необходимо выделить характерные симптомы некоторых параметров.

У параметра U – симптомы $U_{cp.}$ – среднее значение напряжения питания и ΔU_a – изменение напряжения в результате нарушения контакта между щеткой и коллекторными пластинами. Для симптома ΔU введем дефект d'_1 (кратковременное исчезновение напряжения).

У параметра I_a – симптомы $I_{a cp.}$ – среднее значение тока якоря и ΔI_a – резкие изменения тока якоря.

У параметра $I_{\text{щ}}$ – симптомы $I_{\text{щ} cp.}$ – средний уровень искрения; σ_b – среднеквадратического отклонение интенсивности искрения во времени и σ_k – среднеквадратического отклонение интенсивности искрения по коллектору.

У параметра M – симптомы $M_{cp.}$ – среднее значение момента нагрузки на валу ТЭД и ΔM – резкие изменения момента нагрузки на валу ТЭД.

У параметра Φ – симптом $\Phi_{cp.}$ – среднее значение магнитного потока и $\Delta\Phi$ – изменения (пульсации) магнитного потока.

Объединим в множество τ_1 параметры $U_{cp.}, M, C_b, t_{\text{окр.} cp.}^0, Y_h, \delta_{\text{пп}}, \delta_{\text{дп}}, M_{\text{щ}}, P_h, b_{\text{щ}}, H_{\text{пп}} \text{ и } H_{\text{щ}}, \gamma_{h \text{ щ}}, S, S_h, t_k^0$, которые определяют средний уровень искрения щеток.

В множество τ_2 сгруппируем параметры $\Delta U_a, \Delta M$, и a , определяющие СКО интенсивности искрения во времени.

В множество τ_3 сгруппируем параметры $L_c, M_c, \Delta\delta_a, A_1, A_2, \sigma_h, \sigma_{\ddot{\eta}}, \ddot{\eta}_{\min}, \ddot{\eta}$ действ, определяющие СКО интенсивности искрения по коллектору.

Нормированные оценки параметров определяются следующим образом:

$$\lambda_i^* = \frac{\lambda_i}{\lambda_{\max}}; \quad \Omega_i^* = \frac{\Omega_i}{\Omega_{\max}}; \quad \Psi_i^* = \frac{\Psi_i}{\Psi_{\max}}. \quad (2.2.1)$$

Осуществим замену ненулевых элементов (значения ρ) из табл. 6, 7 и 8 значениями расстояний близости $\bar{\rho}$, рассчитанными по формуле:

$$\bar{\rho}(d_j, x_i) = \rho_{\text{kp}} + \rho_{\min} - \rho(d_j, x_i). \quad (2.2.2)$$

Полученные матрицы близости $\bar{\rho}$ приведены в таблицах 2.6, 2.7 и 2.8.

Каждой вершине графов поставлено в соответствие определенное число – вес вершины λ , характеризующее доступность параметра для контроля. Это число определялось по экспертно установленной шкале, которая включает в себя ряд ситуаций, определяющих измеримость (наблюдаемость параметра). Принят следующий набор ситуаций, вес которых устанавливается экспертурно в диапазоне значений от 0 до 1 [4]:

1,0 – параметр измеряется штатными измерительными устройствами;

0,8 – параметр может быть замерен при подключении специальной контрольной аппаратуры;

0,6 – параметр может быть определен при остановке испытуемой машины;

0,4 – параметр может быть замерен при остановке и разборке испытуемой машины;

0,2 – параметр может быть определен, но не существует аппаратуры для контроля;

0 – параметр не может быть замерен при существующем уровне средств и методов контроля.

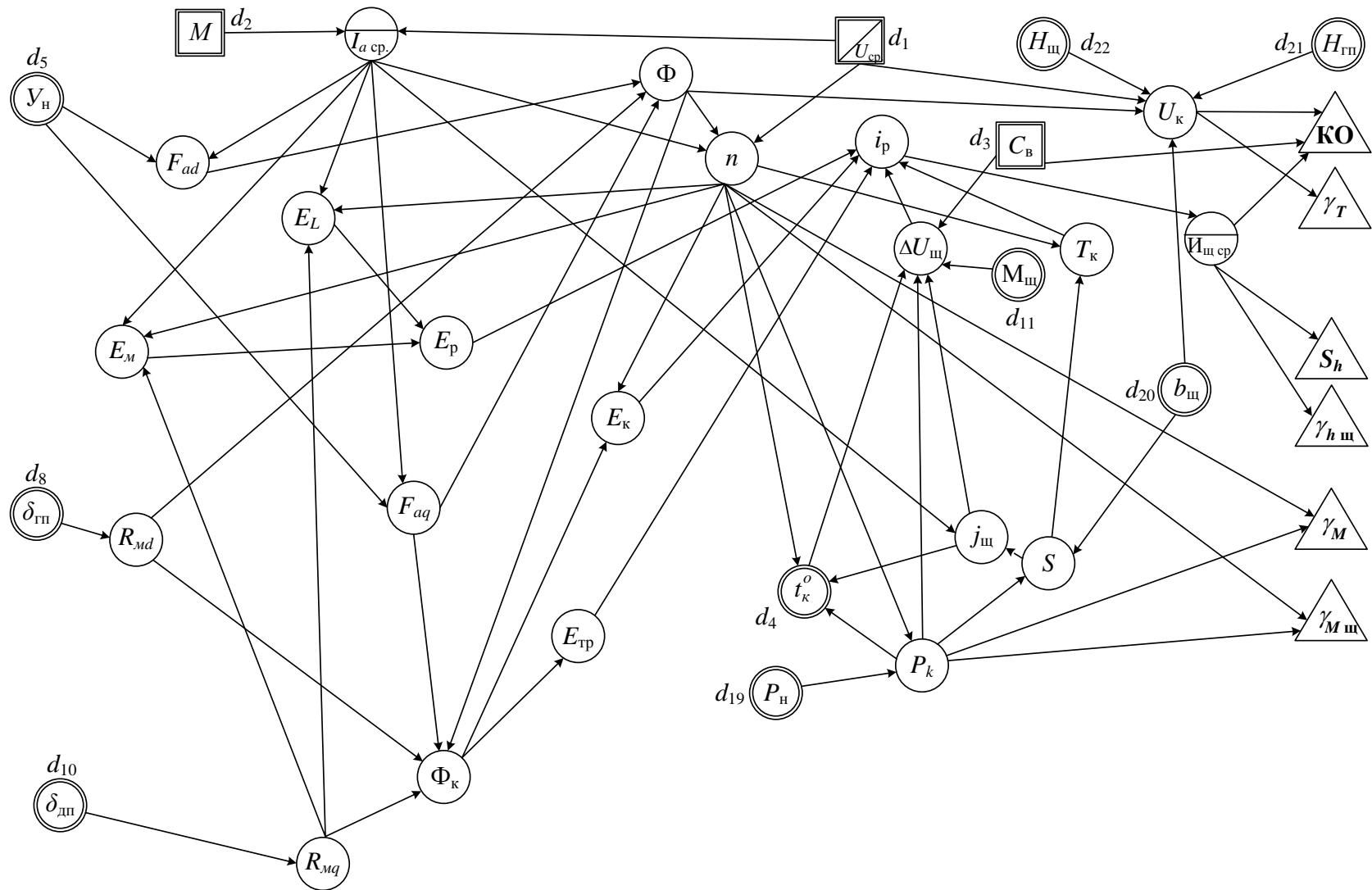


Рисунок 2.5 – Граф-модель КЩУ ТЭД в пространстве параметров, определяющих средний уровень искрения

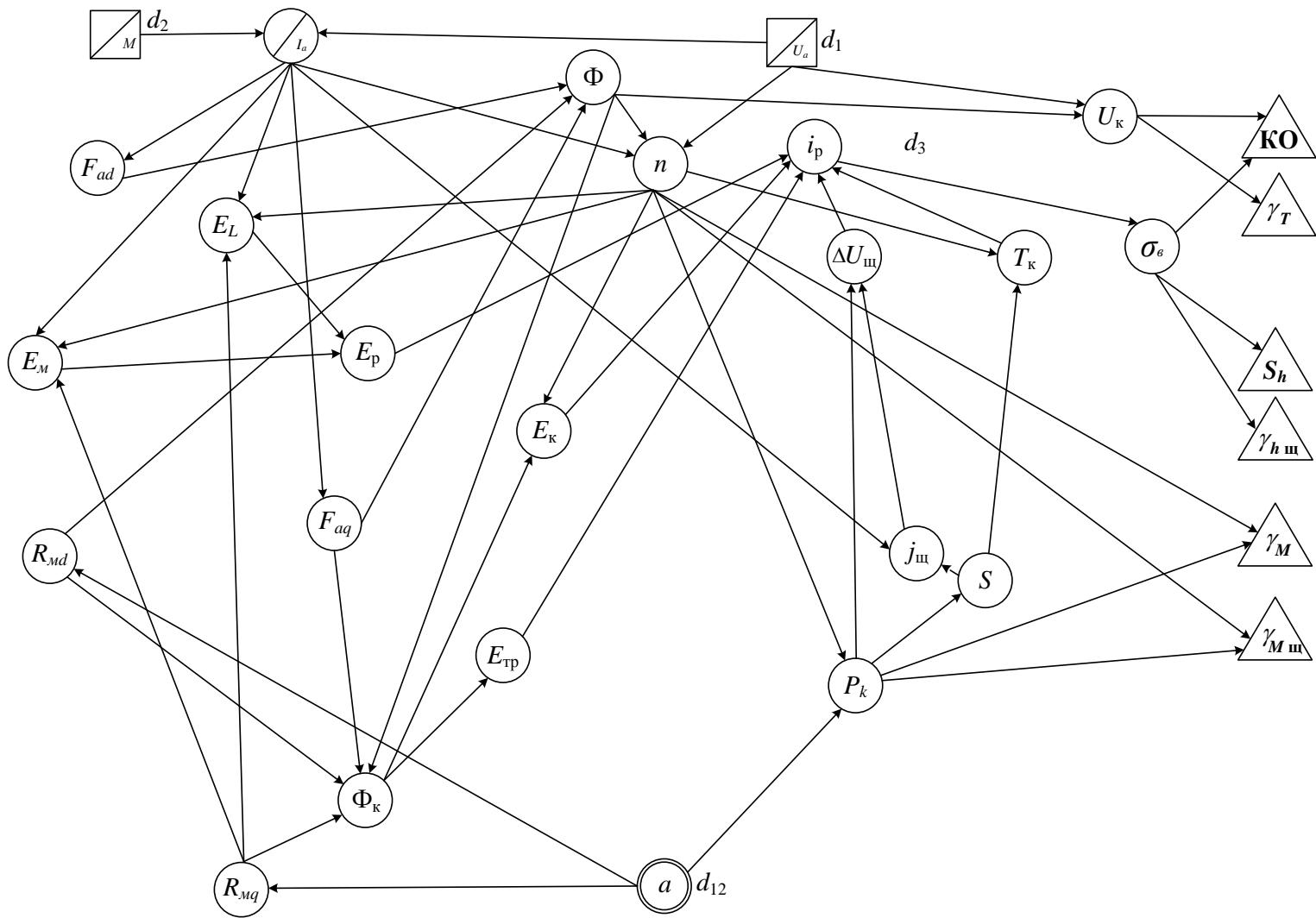


Рисунок 2.6 – Граф-модель КЦУ ТЭД в пространстве параметров, определяющих среднеквадратическое отклонение интенсивности искрения во времени

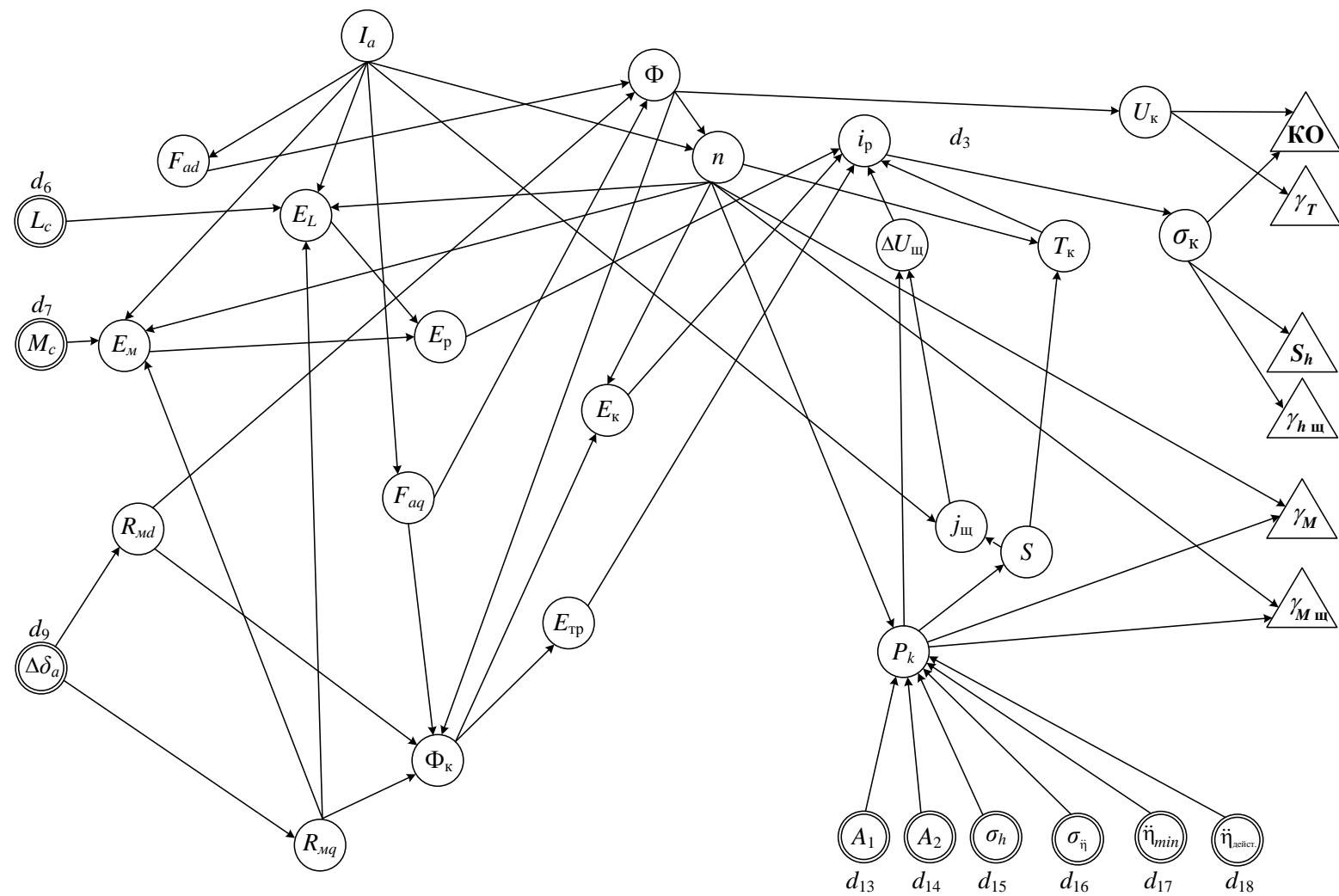


Рисунок 2.7 – Граф-модель КЩУ ТЭД в пространстве параметров, определяющих среднеквадратическое отклонение интенсивности искрения по коллектору

Таблица 2.3 – Расстояния ρ граф-модели КЩУ в пространстве параметров, определяющих средний уровень искрения

Таблица 2.4 – Расстояния ρ граф-модели КЦУ в пространстве параметров, определяющих среднеквадратическое отклонение интенсивности искрения во времени

$\bar{D}(d_i)$	Параметры и градации																								
	ΔU_a	ΔM	a	$I_{a \text{ cp.}}$	F_{ad}	R_{md}	E_L	R_{mq}	E_p	F_{aq}	Φ	n	I_p	$\Delta U_{\text{ш}}$	$J_{\text{ш}}$	$\sigma_{\text{в.}}$	U_k	T_k	$S_{\text{ш}}$	КО	S_h	γ_T	$\gamma_{\text{ш}}$	γ_M	$\gamma_{M_{\text{ш}}}$
$\bar{D}_{(\Delta U_a)}$	1			1			2		3	2	3	1	3	3		4	1	2		2	5	2	5	2	2
$\bar{D}_{(\Delta M)}$		1		1	2		2		3	2	3	2	4	4	2	5	7	5	4	6	6	5	5	3	3
$\bar{D}_{(a)}$			1			1	2	1	3		2	3	4	2	3	4	3	3	2	4	5	4	5	2	2

Таблица 2.5 – Расстояния ρ граф-модели КЦУ в пространстве параметров, определяющих среднеквадратическое отклонение интенсивности искрения по коллектору

$\bar{D}(d_i)$	Параметры и градации																														
	L_c	M_c	$\Delta\delta_a$	A_1	A_2	σ_h	$\sigma \ddot{\eta}$	$\ddot{\eta}_{\min}$	$\ddot{\eta}$	$\ddot{\eta}_{\text{действ}}$	$I_{a \text{ср.}}$	F_{ad}	R_{ud}	E_L	R_{mq}	E_p	F_{aq}	Φ	n	I_p	ΔU_{III}	J_{III}	$\mathcal{V}_{\text{III.}}$	U_{κ}	T_{κ}	S_{III}	KO	S_h	γ_{Γ}	$\gamma_{h \text{ III}}$	γ_M
$\bar{D}(L_c)$	1													1	2				3			4				5	5		5		
$\bar{D}(M_c)$		1													2				3			4				6	6		6		
$\bar{D}(\Delta\delta_a)$			1											1	2	1	3		2	3	4	5		5	3	4	6	4	6	4	4
$\bar{D}(A_1)$				1															3	2	3	5		3	2	5	5		5	2	2
$\bar{D}(A_2)$					1														3	2	3	5		3	2	5	5		5	2	2
$\bar{D}(\sigma_h)$						1													3	2	3	5		3	2	5	5		5	2	2
$\bar{D}(\sigma \ddot{\eta})$							1												3	2	3	5		3	2	5	5		5	2	2
$\bar{D}(\ddot{\eta}_{\min})$								1											3	2	3	5		3	2	5	5		5	2	2
$\bar{D}(\ddot{\eta}_{\text{действ}})$									1										3	2	3	5		3	2	5	5		5	2	2

Оценки параметров граф-моделей по фактору доступности λ_i^* , определенные эксперты путем, приведены в таблицах 2.6, 2.7 и 2.8. Степень согласованности мнений экспертов определялась вычислением коэффициента конкордации W , значимость которого проверялась по критерию χ^2 .

Параметр считается тем информативнее, чем от большего количества значений структурных и входных параметров зависят его значения, и тем чувствительнее к появлению дефектов, чем теснее связь между ним и структурными и входными параметрами. Это означает, что показатель Ω имеет большее значение для вершин, достижимых из большего числа вершин при меньших значениях расстояний ρ [5].

Оценка Ω вершины x_i по информативности определяется из выражения:

$$\Omega_i = \sum_{j=1}^t \bar{\rho}_j(d_j, x_i), \quad (2.2.3)$$

где t – количество дефектов d , $d \in D$, от изображения которых достижима вершина x_i по графу с расстоянием маршрута $\rho \leq \rho_{kp}$.

Таким образом, сумма элементов каждого столбца таблиц 2.6, 2.7 и 2.8 определяет значение Ω для соответствующего элемента. Оценка Ω находится отдельно для каждого симптома S и дефекта d . Обычно $\Omega(d) = \rho_{max}$, поскольку собственное замыкающее ребро параметра x имеет вес $I(x) = I_{max}$.

Разделительная способность параметра x при распознавании дефектов оценивается по числу t_i дефектов D , от изображения которых достижима по графу соответствующая вершина x_i . То есть, значение t_i равно числу ненулевых элементов каждого столбца таблиц 2.6, 2.7 и 2.8.

Таблица 2.6 – Таблица близости граф-модели КЩУ в пространстве параметров, определяющих средний уровень искрения

Показатель	Параметры и градации																		
	$U_{\text{ср.}}$	M	$C_{\text{в}}$	$t_{\text{к}}^0$	$Y_{\text{н}}$	$\delta_{\text{гп}}$	$\delta_{\text{дп}}$	$M_{\text{ш}}$	$P_{\text{н}}$	$b_{\text{ш}}$	$H_{\text{гп}}$	$H_{\text{ш}}$	$I_{a \text{ср.}}$	F_{ad}	R_{md}	E_L	R_{mq}	E_p	F_{aq}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\bar{D}(U_{\text{ср.}})$	14																		
$\bar{D}(M)$		14											14	12		12		11	12
$\bar{D}(C_{\text{в}})$			14																
$\bar{D}(t_{\text{к}}^0)$				14															
$\bar{D}(Y_{\text{н}})$					14								13					13	
$\bar{D}(\delta_{\text{гп}})$						14								14					
$\bar{D}(\delta_{\text{дп}})$							14								10	13	9		
$\bar{D}(M_{\text{ш}})$								14											
$\bar{D}(P_{\text{н}})$									14										
$\bar{D}(b_{\text{ш}})$										14									
$\bar{D}(H_{\text{гп}})$											14								
$\bar{D}(H_{\text{ш}})$												14							
Ω_i	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	25	14	22	13	20	25
Ω_i^*	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,287	0,161	0,253	0,149	0,230	0,287
t_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2
ψ_i	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,89	1,00	0,89	1,00	0,89	0,89
ψ_i^*	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,889	1,000	0,889	1,000	0,889	0,889
λ_i^*	1,0	0,2	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4	1,0	0,6	0,6	0,4	0,4	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Φ	0,748	0,428	0,668	0,668	0,508	0,508	0,508	0,748	0,588	0,588	0,508	0,508	0,748	0,433	0,428	0,423	0,425	0,416	0,433
N	2	23	5	6	12	13	14	3	8	9	15	16	4	21	24	28	26	29	22

Окончание таблицы 2.5.

Показатель	Параметры и градации															
	Φ	n	I_p	$\Delta U_{\text{щ}}$	$J_{\text{щ}}$	$I_{\text{щ ср.}}$	$U_{\text{к}}$	$T_{\text{к}}$	$S_{\text{щ}}$	КО	$\Delta_{\text{из.щ}}$	γ_{T}	$\gamma_{h \text{ щ}}$	γ_{M}	$\gamma_{\text{M щ}}$	S_h
1	21	22	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
$\bar{D}(U_{\text{ср.}})$		14	11			10	13	13		11	8	9	11	10	10	7
$\bar{D}(M)$	10	12	9	11	13	8	8	11		6	6		12	10	10	9
$\bar{D}(C_{\text{в}})$			10	12		9	11			9	7		11			8
$\bar{D}(t_{\text{к}}^0)$			7	9		6					4	11	12	11	11	11
$\bar{D}(Y_{\text{в}})$	11	10	7			6	9	9		7	4	11	12	11	11	10
$\bar{D}(\delta_{\text{гп}})$	12	11	8			7	10	10		8	5		12		11	11
$\bar{D}(\delta_{\text{дп}})$			7			6					4		11			7
$\bar{D}(M_{\text{щ}})$			11	13		10					8		12	9	9	9
$\bar{D}(P_{\text{в}})$			9			8		11			6	9	12			10
$\bar{D}(b_{\text{щ}})$			8			7	12	10	13	10	5	9				
$\bar{D}(H_{\text{гп}})$							12			10		9				
$\bar{D}(H_{\text{щ}})$							12			10			11			
Ω_i	33	47	87	45	13	77	87	64	13	71	57	57	57	57	57	
Ω_i^*	0,379	0,540	1,000	0,517	0,149	0,885	1,000	0,736	0,149	0,816	0,655	0,570	0,630	0,610	0,630	0,649
t_i	3	4	10	4	1	10	8	6	1	8	10	10	10	10	10	10
ψ_i	0,78	0,67	0,00	0,67	1,00	0,00	0,22	0,44	1,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ψ_i^*	0,778	0,667	0,000	0,667	1,000	0,000	0,222	0,444	1,000	0,222	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
λ_i^*	0,2	1,0	0,2	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Φ	0,427	0,762	0,380	0,435	0,425	0,586	0,447	0,434	0,505	0,551	0,357	0,357	0,357	0,357	0,357	
N	25	1	30	19	27	10	18	20	17	11	31	31	31	31	31	31

Таблица 2.7 – Таблица близости граф-модели КЩУ в пространстве параметров, определяющих СКО интенсивности искрения во времени

Таблица 2.8 – Таблица близости граф-модели КЩУ в пространстве параметров, определяющих СКО интенсивности искрения по коллектору

Параметр обладает наилучшей разделительной способностью ($\psi = 1$), если соответствующая ему вершина достижима из одного дефекта. Наихудшей из возможных для данной задачи разделительной способностью ($\psi = 0$) обладает параметр, достижимый от наибольшего числа (или от всех) дефектов, подлежащих распознаванию.

Оценка параметра ψ определяется в соответствии с выражением:

$$\psi_i = \frac{t_{max} - t}{t_{max} - 1}, \quad (2.2.4)$$

где t_{max} – максимальное число дефектов, от изображения которых достижима какая-либо вершина графа.

Оценки ψ рассчитывается для каждой вершины, а при выделении симптомов и дефектов – для каждого симптома S_i и дефекта d_j . Разделительная способность $\psi(d_j)$ параметра, соответствующего дефекту, принимается равной единице.

Значения показателя эффективности Φ согласно выражению (2.2.4) определяются для каждой вершины рабочих подграфов, а также для S и d . Значения коэффициентов значимости факторов $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,3$ и $\gamma = 0,3$ получены экспериментальным методом. Каждой вершине подграфа присвоен свой номер N в соответствии с убыванием значений Φ .

Определение множества диагностических параметров B сводится к нахождению такого минимального подмножества множества X , в элементах которого нашли бы отражение все дефекты. Эту задачу возможно решить методом покрытия таблицы расстояний $\bar{\rho}$. Данный метод базируется на оценке элементов модели – определении весов вершин и ребер, упорядочении вершин в соответствии со значениями показателя эффективности Φ и в нахождении маршрутов отображения дефектов в графе.

На основании таблиц близости строятся таблицы покрытия (таблицы 2.9, 2.10 и 2.11), строки и столбцы которых по сравнению с табл. 2.6, 2.7 и 2.8 представлены местами. Кроме того, элементы множества X располагаются по вертика-

ли в соответствии с убыванием значений показателя эффективности Φ . Элементы множества $D = (d_1, \dots, d_g)$ располагаются по горизонтали в соответствии с возрастанием значений показателя Φ .

Таблица 2.9 – Таблица покрытия граф-модели КЩУ в пространстве параметров, определяющих средний уровень искрения

Окончание таблицы 2.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$J_{\text{щ}}$	13												0,425
E_L	12			10									0,423
E_p	11			9									0,416
I_p	9			7	8	7	8	9	7	10	11	11	0,380
$\Delta_{\text{из.щ}}$	6			4	5	4	5	6	4	7	8	8	0,357
l_i	16	3	3	7	10	11	8	5	6	7	5	8	
Порядок рас- смотрения	12	1	2	6	10	11	8	3	5	7	4	9	

Таблица 2.10 – Таблица покрытия граф-модели КЩУ в пространстве параметров, определяющих среднеквадратическое отклонение интенсивности искрения во времени

Параметр	Дефекты			Φ
	ΔM	a	ΔU_a	
1	2	3	4	5
ΔU_a			14	0,824
I_a	14		14	0,797
a		14		0,744
n	12	8	12	0,682
J_{uq}	13		13	0,539
σ_B	8	8	8	0,532
ΔU_{uq}	11	10	11	0,522
P_κ	9	13	9	0,514
M	14			0,504
R_{md}		11		0,477
R_{mq}		11		0,477
KO	6	6	11	0,443
F_{ad}	12		12	0,442
F_{aq}	12		12	0,442
T_κ	11	11	11	0,371
E_M	12	8	12	0,362
E_L	12	8	12	0,362
E_p	11	7	11	0,336
Φ	10	9	10	0,336
U_κ	8	7	13	0,327
$\Delta_{uz,k}$	6	6	6	0,319

Окончание таблицы 2.9

1	2	3	4	5
$\Delta_{uz.uz}$	6	6	6	0,319
I_p	9	9	9	0,318
Φ_k	9	7	9	0,301
E_k	10	5	10	0,301
E_{mp}	6	4	6	0,221
l_i	23	21	23	
Порядок рассмотр-	2	1	3	

Таблица 2.11 – Таблица покрытия граф-модели КЩУ в пространстве параметров, определяющих среднеквадратическое отклонение интенсивности искрения по коллектору

	Дефекты				Φ
	M_c	L_c	$\Delta\delta_a$	η	
1	2	3	4	5	6
n			8		0,769
η				14	0,740
σ_k	9	10	3	9	0,586
Δd_a			14		0,580
L_c		14			0,500
M_c	14				0,500
R_{mq}			12		0,483
E_m	14		9		0,477
E_L		14	9		0,477
R_{md}			11		0,474
KO	7	8	5	7	0,471
ΔU_{uz}				10	0,466
E_p	12	13	8		0,463
Φ			9		0,457
Φ_k			8		0,449
T_k			7	12	0,443
U_k			7		0,440
P_k			5	13	0,434

Окончание таблицы 2.10

1	2	3	4	5	6
E_k			6		0,431
E_{mp}			5		0,423
I_p	10	11	4	10	0,380
$\Delta_{uz.k}$	7	8	1	7	0,357
l_i	7	7	18	9	
Порядок рассмотрения	1	2	4	3	

2.3 Формирование множества диагностических параметров технического состояния КЩУ МПТ

Определяется количество ненулевых элементов l_j каждого столбца. Если какой-то столбец таблиц 2.9, 2.10 и 2.11 не содержит ни одного ненулевого элемента, т.е. $\exists d_j [d_j \in D], l_j = 0$, то покрытия не существует.

Если $\forall d_j [d_j \in D], l_j \neq 0$, рассматривают столбец d_j , у которого l_j имеет минимальное значение ($l_j = l_{min}$). В состав множества диагностических параметров B включается элемент $x_i \in X$, строка которого содержит ненулевой элемент на пересечении со столбцом d_j .

Из таблиц 2.9, 2.10 и 2.11 вычеркиваются строка x_i , столбец d_j и столбцы, соответствующие дефекты которых $d_v, v \neq j$ также покрываются контролем включенного в множество B параметра x_i , т. е. столбцы имеющие ненулевые элементы на пересечении со строкой x_i . При этом дефект d_v считается покрытым только тогда, когда в столбце d_v выше строки x_i нет ненулевого элемента, значение $\bar{\rho}$ которого больше аналогичного значения для элемента столбца на пересечении со строкой x_i . В противном случае дефект d_v считается непокрытым и столбец не вычеркивается.

Так, к примеру, в таблице 2.9 первыми рассматриваются столбцы $H_{\text{щ}}$ и $H_{\text{пп}}$, при этом в состав множества B включается параметр КО.

Для оставшихся элементов x_{σ} множества X , строки которых имеют элементы на пересечении с вычеркнутыми столбцами, причем $\bar{\rho}(d_j, x_{\sigma}) \leq \bar{\rho}(d_j, x_i)$, показатель Φ пересчитывается. Далее процедура повторяется для столбцов с $l_j > l_{\min}$ до тех пор, пока не будут выбраны параметры, покрывающие все дефекты.

Найденные таким образом покрытия таблиц 2.9, 2.10 и 2.11 представляют искомые множества диагностических параметров $B_1 = \{ \text{КО}, I_{\text{щ сп.}}, M_{\text{щ}}, t_{\text{к}}^o, C_{\text{в}}, U_{\text{сп.}}, n, I_{a \text{ сп.}} \}$ – для оценки работы КЩУ в целом по машине, $B_2 = \{ \sigma_{\text{в}}, a, I_a, \Delta U \}$ – для оценки среднеквадратического отклонения интенсивности искрения во времени и $B_3 = \{ \sigma_{\text{к}}, A_1, A_2, \sigma_h, \sigma \ddot{\eta}, \ddot{\eta}_{\min}, \ddot{\eta}_{\text{действ.}}, n \}$ – для оценки среднеквадратического отклонения интенсивности искрения по коллектору. Выбранные параметры обладают наибольшими значениями показателя эффективности Φ . Сформированные множества B_1, B_2 и B_3 минимальны по составу и охватывают все рассматриваемые в граф-моделях дефекты и, следовательно, могут быть приняты для решения задачи диагностирования.

На основе выбранных множеств B_1, B_2 и B_3 составлены схемы покрытия в виде двудольных графов соответствия между множеством дефектов и множеством диагностических параметров (рисунок 2.8). Ребра графов представляют маршруты, числа на ребрах – значения расстояний $\bar{\rho}$ (близости). Полученные графы могут быть использованы для формирования задания по сбору статистических данных и организации процесса распознавания и диагностирования.

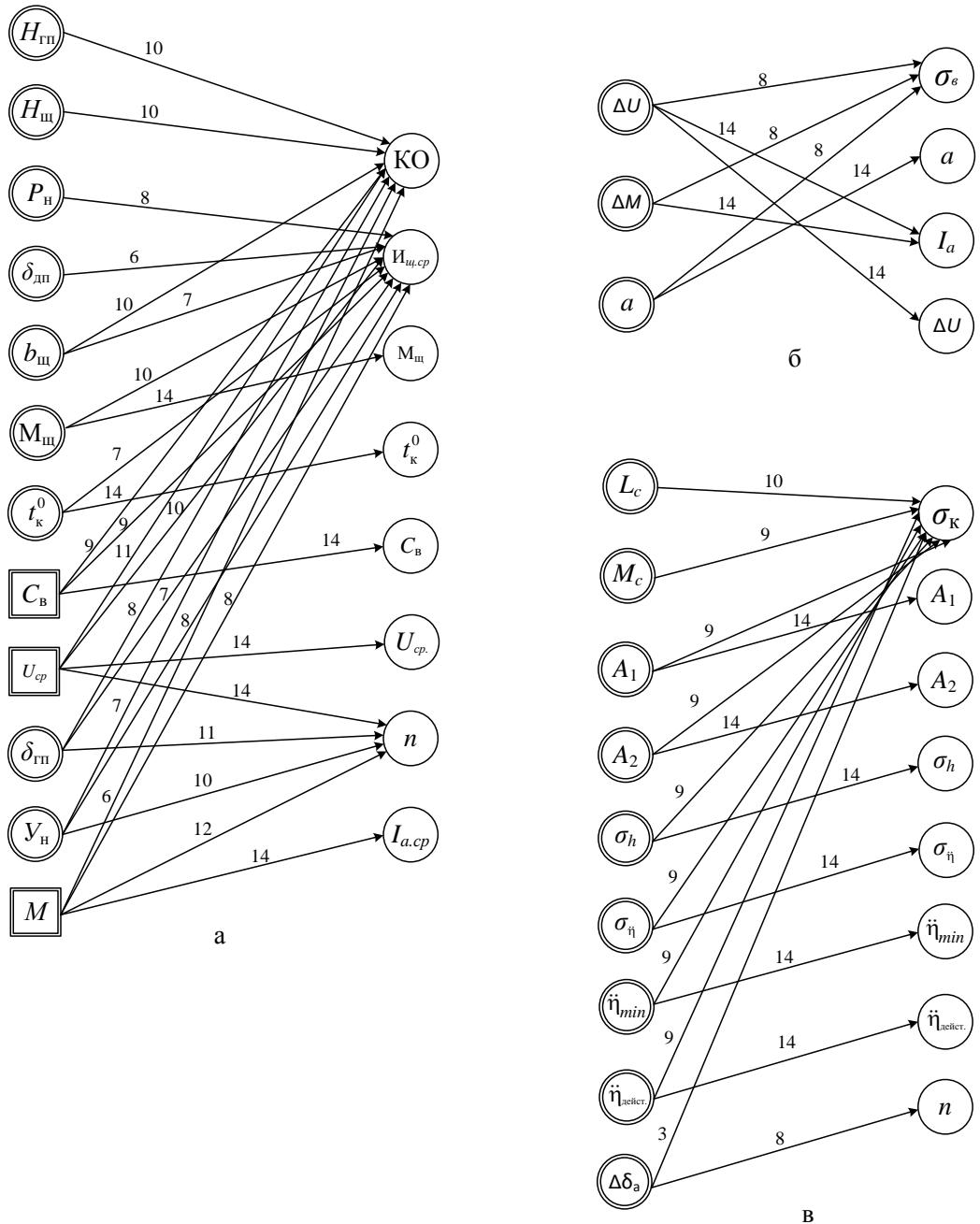


Рисунок 2.8 – Двудольные графы соответствия дефектов и диагностических параметров

2.4 Выводы

1. В известную граф-модель диагностирования технического состояния КЩУ МПТ введены параметры: температура зоны контакта «щетка-коллектор», а также параметры профиля коллектора.
2. В результате декомпозиции рабочей граф-модели получены три подграфа диагностических параметров, определяющих: средний уровень искрения, среднеквадратичное отклонение интенсивности искрения во времени, а также среднеквадратичное отклонение интенсивности искрения по коллектору.
3. Получены двудольные графы соответствия диагностических параметров и дефектов КЩУ, которые могут быть использованы для диагностирования технического состояния КЩУ МПТ. Двудольные графы включают также введённые параметры профиля коллектора и температуру контакта «щетка-коллектор».
4. Сформировано эффективное множество диагностических параметров удовлетворяющих критериям: доступность для контроля, информативность, а также разделительная способность параметра.

3 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КЩУ МПТ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ И ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Тепловые процессы в коллекторно-щеточном узле (КЩУ) машины постоянного тока являются весьма сложными для анализа, так как имеют множество составляющих. В целом, значимое влияние на нагрев машины оказывают факторы электрической природы, так как их действие проявляется на наиболее крупных элементах машины: якоре, сердечнике якоря, главных и добавочных полюсах. Тепловые процессы в этих элементах в значительной степени изучены. Существуют специальные методики для расчета температур на основных элементах машины. Это используется для предотвращения перегрева элементов машины, наиболее чувствительным в термическом воздействиям [27]. К таким элементам относится, к примеру, изоляция обмотки якоря.

Сложнее обстоят дела при определении факторов, действующих на тепловые процессы в зоне КЩУ. Скользящий контакт – сложная электромеханическая система. Можно выделить основные процессы, имеющие отношение к температуре в зоне скользящего контакта: механическое трение щетки по коллектору, протекание тока через коллектор и щетку, различной степени искрение в зависимости от условий коммутации [11].

Причем каждый процесс имеет связи с другим процессом. К примеру, повышенный уровень искрения приводит к повышенной интенсивности нагрева в зоне контакта щетка-коллектор, что влияет на величину падения напряжения $\Delta U_{u\zeta}$. Величина нажатия на щетку и качество притирки щеток имеют отношение к уровню или наличию/отсутствию искрения [6]. Такие связи между процессами существуют, некоторые из них изучены, некоторые остаются лишь гипотезами. При тепловых расчетах электрических машин вводится большое количество допущений ввиду сложности точного учета всех действующих факторов и наличия связей между ними.

3.1 Электромагнитная и механическая природа нагрева в зоне контакта «щетка-коллектор»

Несмотря на то, что щетка и коллектор, участвующие в скольжении, обладают достаточно высокой теплопроводностью, температура в точке контакта может повышаться до 100 – 1000 °С. Это обусловлено тем, что контактная область невелика по площади и представляет собой значительное тепловое сопротивление. Причем температура в скользящем контакте повышается до некоторого предела, выше которого, даже при увеличении скорости вращения, она не поднимается. Считается, что этот предел определяется температурой плавления более легкоплавкого материала (медь/графит) в контактной паре. Доказано, что температура на самом деле повышается, но кратковременно [98]. Кратковременные повышения температуры были получены при высокой скорости вращения коллектора.

Контактная поверхность щетки и коллектора состоит из дискретных точек или пятен, беспорядочно возникающих в процессе проводимости.

Электрические контакты ведут себя по-разному при скольжении и при неподвижном контакте [9]. Контактная поверхность обычно увеличивается в начале скольжения при чистых металлических поверхностях. Основное отличие в поведении таких контактов – в различном характере повышения температуры, так как нагревание в а-пятнах за счет джоулевых потерь не настолько влияет на удельное электрическое сопротивление насколько при неподвижном контакте, потому что нагревание контактного пятна кратковременно. Но контакт нагревается не только током, но и трением.

В работе [112] приводится случай, когда удалось снять тонкий слой пленки с поверхности коллектора. При исследовании состава было выяснено, что нижний слой является оксидом меди Cu_2O , а верхний слой, который в 2 раза толще, состоит из угля. Известно, что пленка является изолирующей при малых напряжениях, но можно обнаружить дискретные проводящие полосы, расположенные в направлении скольжения. Эти полосы образованы механическим взаимодействием щетки с коллектором, так как при полировке коллектора с удалением полос они вновь

возникали после испытаний по механическому трению без протекания тока. Расстояние между соседними полосами составляет около 0,5 мм.

Под катодной щёткой поле направлено таким образом, что способствует перемещению ионов меди в слой окисной пленки. А под анодной щёткой поле имеет противоположное направление, что противодействует перемещению ионов меди. Поэтому напряжение у катодной щётки выше, чем у анодной. Также оно менее стабильно у катодной щётки.

Даже в случае, когда щётки скользят по одному пути, разница в поведение сохраняется. Можно сделать вывод, что щётка контактируют только с теми пятнами проводимости, с которыми не соприкасается другая щётка.

Кратковременные повышения температуры наблюдаются при плохой коммутации [100]. Точечные значения повышения температуры α - пятен определить весьма сложно, так как площадь контактного пятна очень мала.

В подвижных контактах, чтобы характеризовать изменение температуры, приходится описывать тепловые процессы в контактных пятнах, изменяющихся во времени, в которых температура не принимает какое-либо установившееся значение. При нестационарных режимах нагрева в подвижных контактах необходимо выяснить, каково распределение температуры в областях стягивания на разных этапах нагрева. При расчете температуры будет присутствовать существенная доля неопределенности, обусловленная сложностью измерений, поэтому значения контактной поверхности и время нагревания будут иметь значительную погрешность.

Если тепло выделяется только в какой-то граничной области, уравнение, описывающее процесс внутри контакта примет вид:

$$k\Delta\vartheta = c \frac{\partial\vartheta}{\partial t}, \text{ где} \quad (3.1.1)$$

k – теплопроводность, ϑ – температура, c – теплоемкость единицы объема.

Существует частное решение уравнения (3.1.1), дающее температуру $d\vartheta(r, t)$ в момент времени t в точке тела на расстоянии r от другой точки, для ко-

торой на расстоянии $r = 0$ в момент времени $t = 0$ возникло количество теплоты, равное dq :

$$a\vartheta(r, t) = \frac{dq}{c(4\pi \frac{k}{c} t)^{3/4}} e^{-cr^2/4kt} \quad (3.1.2)$$

Для того, чтобы это решение соответствовало случаю полубесконечного тела, необходимо ввести воображаемые источники тепла, расположенные симметрично к граничной плоскости. Для получения полного решения необходимо суммировать величины $d\vartheta(r, t)$, равные теплу, выделяющемуся на данной поверхности или в данном объеме. Для получения полного решения необходимо произвести интегрирование.

Вследствие сферической симметрии можно произвести замену переменных, в результате которой дифференциальное уравнение примет вид:

$$K \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial v}{\partial t}, \text{ где} \quad (3.1.3)$$

где $K = \text{const}$, v – линейная функция температуры, а x находится из уравнения:

$$r = b(1 + x), \text{ где} \quad (3.1.4)$$

где b – радиус воображаемой сферы, которая представляет собой контактную поверхность, а r – расстояние от ее центра.

Для расчета тепловых полей сложных тел существует обобщенное дифференциальное уравнение (3.1.5):

$$cp \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + p_v(\tau) \quad (3.1.5)$$

Уравнение (3.1.5) может быть использовано для расчета тепловых полей в КЦУ МПТ при нестационарных режимах работы.

В свою очередь механическое взаимодействие в скользящем контакте состоит из нескольких сложных процессов. Для анализа данных процессов необходимо определить силы, действующие в скользящем контакте при механическом трении.

Сила трения F включает в себя четыре составляющие: F_a – силу, которая идет на преодоление сцепления за счет молекулярных связей между контактными поверхностями; F_b – силу, которая идет на срез взаимно внедренных шероховатостей; F_p – силу, вызывающую пластическую деформацию; F_e – силу, вызывающую упругую деформацию, энергия которой не возвращается к подвижному контакту [40].

Увеличение контактной поверхности в процессе скольжения происходит вследствие сильного сцепления контактов, вызывающего тангенциальную пластическую деформацию.

3.2 Термическая схема замещения КЩУ МПТ

Термические схемы составляются по аналогии с электрическими [68]. Вместо тока I здесь используется тепловой поток P . Электрическое сопротивление R аналогично тепловому сопротивлению Rt . Аналогия электрических и тепловых величин представлена в таблице 3.1:

Таблица 3.1 – Параметры тепловых полей

Электрическая цепь			Термическая цепь		
Наименование	Обозначение, формула	Ед. измерения	Наименование	Обозначение, формула	Ед. измерения
Удельное сопротивление	ρ	$(\Omega \cdot m^2)/m$ или $\Omega \cdot m$	Удельная теплопроводность	λ $1/\lambda \cdot m^2 \cdot K/Bt$	$(W \cdot m^2 \cdot K)/Bt$ или $W/(m \cdot K)$
Электрическое сопротивление	$R = \frac{\rho \cdot l}{s}$	(Ом)	Тепловое сопротивление	$R = \frac{h}{\lambda \cdot S}$	$(^{\circ}C \cdot Bt)$
Ток	I	(Ампер)	Тепловой поток, потери	P	(Дж/сек, Вт)
Напряжение	V	(Вольт)	Перегрев	θ	(K , $^{\circ}C$)
Потенциал	ϕ	Вольт	Температура	T	(K , $^{\circ}C$)

Тепловое сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{h}{\lambda * S} \quad (3.2.1)$$

где h – толщина термоинтерфейса (м),

S – площадь эффективной теплопередачи, м^2

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}^* \text{К})$.

Перепад температуры на тепловом сопротивлении пропорционален его величине (R_t) и проходящему через него тепловому потоку P . Падение температуры на тепловом сопротивлении определяется по формуле:

$$\Delta t = R_t * P \quad (3.2.2)$$

Часто рассчитанные значения тепловых сопротивлений не соответствуют значениям, полученным при измерениях. Результат в первую очередь зависит от того, насколько используемые величины равны реальным значениям. Разница в значениях возникает из-за того, что для расчетов требуется площадь непосредственно тепловыделяющего элемента, исключая структуры, окружающие элемент [42].

В существующих работах по исследованию тепловых процессов в машинах постоянного тока в электромеханической системе выделяют следующие источники тепла: 1) потери в подшипнике, 2) потери на коллекторе, 3) потери на петушках, 3) потери в меди главных полюсов, 4) потери в меди дополнительных полюсов, 5) потери в меди компенсационной обмотки, 6) потери в меди якоря, 7) потери в стали полюсного наконечника, 8) потери в стали якоря [73]. Полная тепловая схема замещения МПТ приведена рисунке 3.1.

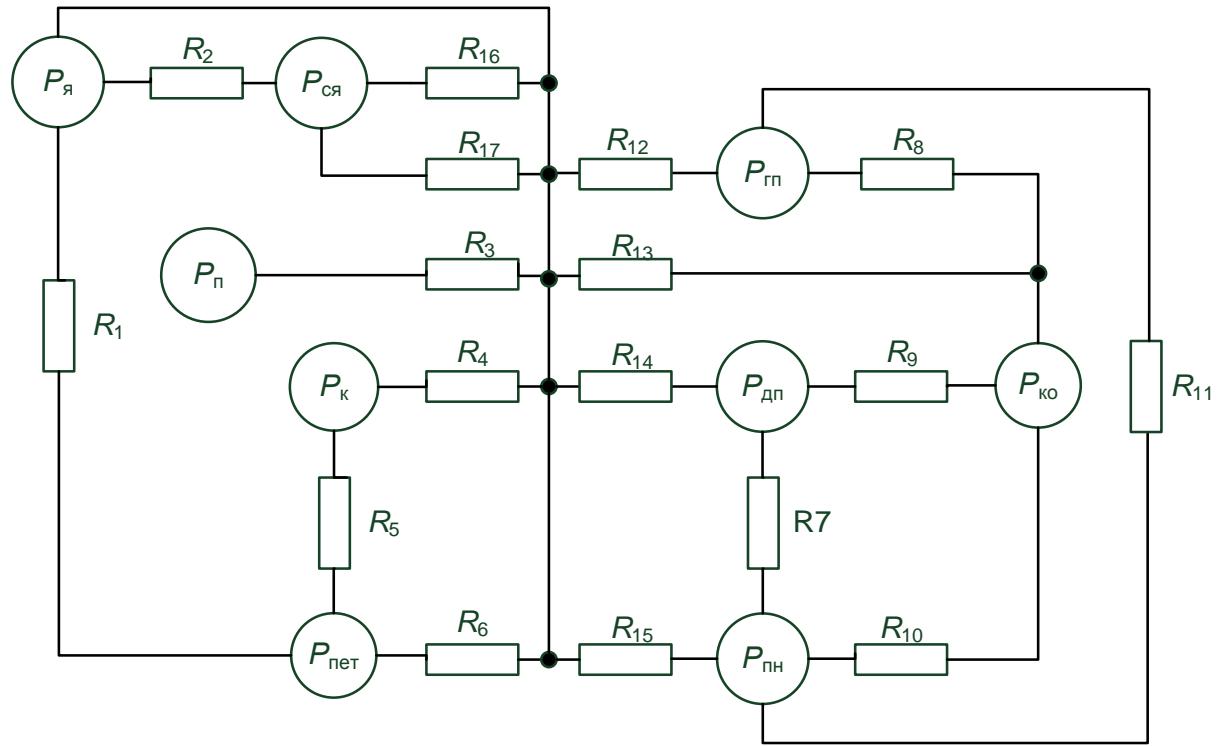


Рисунок 3.1– Полная тепловая схема замещения МПТ

В МПТ выделяют следующие тепловые сопротивления: R_1 – от петушков к обмотке якоря, R_2 – от обмотки якоря к сердечнику якоря, R_3 – от подшипника к воздуху, R_4 – от коллекторно-щеточного узла к воздуху, R_5 – от коллектора к петушкам, R_6 – от петушков к воздуху, R_7 – от дополнительных полюсов к полюсному наконечнику, R_8 – от компенсационной обмотки к главному полюсу, R_9 – от компенсационной обмотки к дополнительному полюсу, R_{10} – от компенсационной обмотки к полюсному наконечнику, R_{11} – от главного полюса к полюсному наконечнику, R_{12} – от меди главного полюса к воздуху, R_{13} – от компенсационной обмотки к полюсу, R_{14} – от меди дополнительных полюсов к воздуху, R_{15} – от полюсного наконечника к воздуху, R_{16} – от сердечника якоря к воздуху через вентиляционные каналы, R_{17} – от наружной поверхности зубцов якоря.

Источниками потерь в системе можно назвать: $P_п$ – потери в подшипнике, $P_к$ – потери на коллекторе, $P_{пет}$ – потери на петушках, $P_{гп}$ – потери в меди главных полюсов, $P_{дп}$ – потери в меди дополнительных полюсов, $P_{ко}$ – потери в меди компенсационной обмотки, $P_я$ – потери в меди якоря, $P_{нн}$ – потери в стали полюсного наконечника, $P_{ся}$ – потери в стали якоря.

Коллектор рассматривается как единый источник потерь, в том числе сюда входит и вся электромеханическая система КЩУ [17]. В данной работе подробно рассматривается КЩУ с точки зрения тепловых процессов. Требуется определить источники потерь и тепловые сопротивления в КЩУ для составления тепловой схемы замещения КЩУ.

В КЩУ МПТ можно выделить следующие источники тепла: $P_{щ}$ – потери на щетке, представляющие собой Джоулево тепло при протекании тока; $P_{конт}$ – потери в зоне контакта, обусловленные механическим трением в контакте, при протекании тока через контакт, а также электродуговым искрением на сбегающем крае щетки; P_k – потери в меди пластин коллектора. В представленной схеме на рисунке 3.3 приняты обозначения тепловых сопротивлений: R_1 – от графита щетки к воздуху, R_2 – от графита щетки к зоне контакта «щетка-коллектор», R_3 – от щеточного контакта к воздуху, R_4 – от зоны контакта к пластине коллектора, R_5 – от пластины коллектора к воздуху. Можно использовать 2-Д модель КЩУ для расположения источников потерь и тепловых сопротивлений (рисунок 3.2).

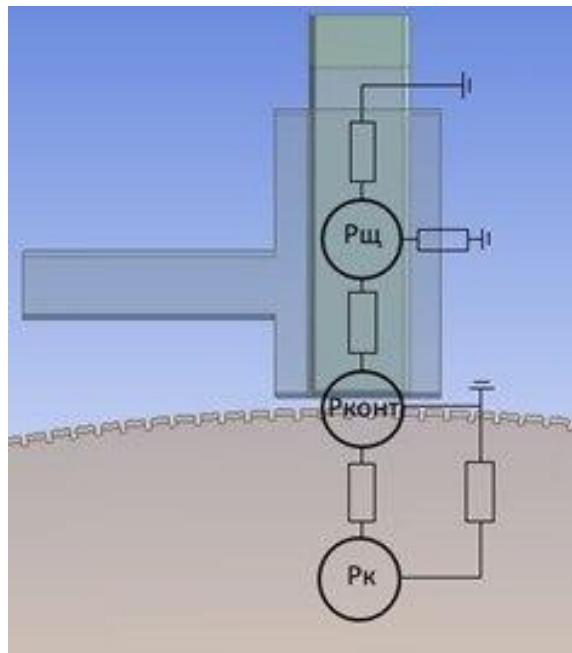


Рисунок 3.2 – Тепловая схема замещения КЩУ на 2-Д модели

Тепловое сопротивление, обозначенное на схеме, обозначает суммарное тепловое сопротивление, действующее на нескольких участках пространства. К

примеру, тепловое сопротивление R_1 от графита щетки к воздуху является суммарным тепловым сопротивлением, действующим как в ширину, так и в длину сечения. Представленную схему можно упорядочить, как показано на рисунке 3.3.

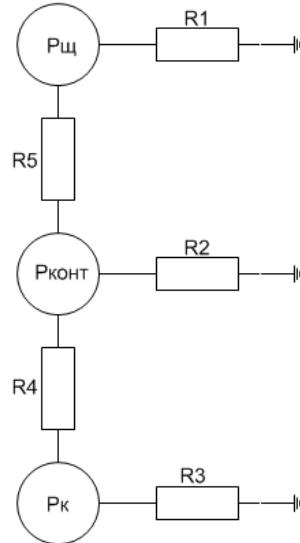


Рисунок 3.3 – Термическая схема замещения КЩУ МПТ

Необходимо определить тепловые сопротивления элементов КЩУ.

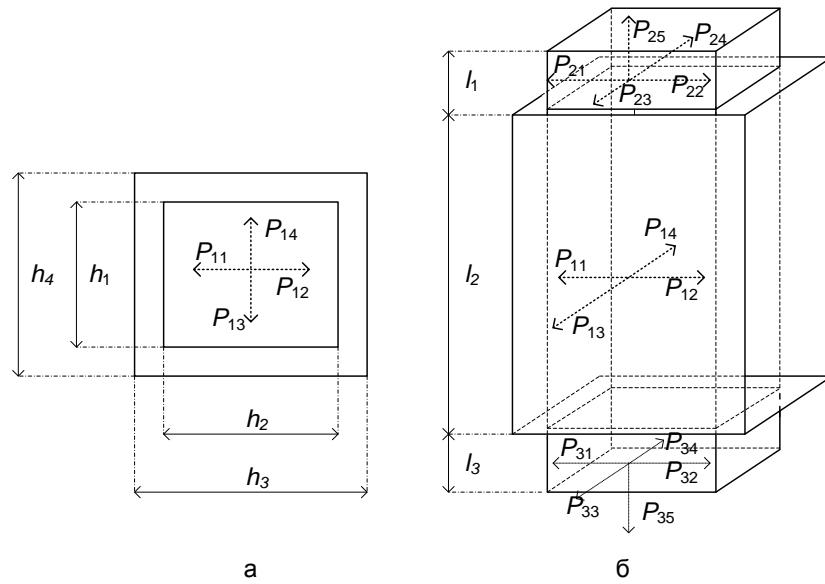


Рисунок 3.4 – Термопроводящая площадь щетки и щеткодержателя: а – вид сверху, б – вид сбоку

Для расчета теплового сопротивления щеток учитывается как площадь открытой поверхности щеток, непосредственно контактирующая с воздухом, так и площадь поверхности, закрытой щеткодержателем.

Тепловые потоки $P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}$, проходящие от графита щетки к воздуху через щеткодержатель, встречают на своем пути тепловое сопротивление графита и тепловое сопротивление щеткодержателя. По принципу последовательного соединения электрических сопротивлений, тепловые сопротивления суммируются. Так, например, для теплового потока q_{11} , полное тепловое сопротивление на пути от источника потерь к воздуху будет суммироваться из теплового сопротивления графита и теплового сопротивления материала щеткодержателя.

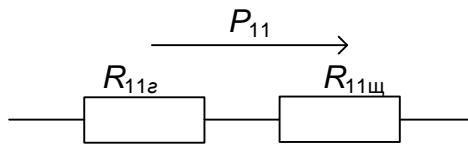


Рисунок 3.5 - Последовательное соединение тепловых сопротивлений на пути теплового потока от графита к воздуху через щеткодержатель

$$R_{11} = R_{11e} + R_{11u},$$

где R_{11e} – тепловое сопротивление графитовой щетки,

R_{11u} – тепловое сопротивление материала щеткодержателя.

R_{11e} рассчитывается, учитывая толщину теплопроводящего слоя и площадь области теплообмена графитовой щетки:

$$R_{11e} = \frac{h_2}{2\lambda_e(l_2 * h_1)};$$

R_{11u} рассчитывается, учитывая толщину теплопроводящего слоя и площадь области теплообмена стенки щеткодержателя:

$$R_{11u} = \frac{h_3 - h_2}{2\lambda_u(l_2 * h_4)};$$

$$R_{11} = \frac{h_2}{2\lambda_e(l_2 * h_1)} + \frac{h_3 - h_2}{2\lambda_u(l_2 * h_4)}.$$

По аналогии сопротивления R_{12}, R_{13}, R_{14} :

$$R_{12} = R_{12e} + R_{12u},$$

$$R_{13} = R_{13e} + R_{13u},$$

$$R_{14} = R_{14e} + R_{14u},$$

Причем $R_{11} = R_{12}$ и $R_{13} = R_{14}$ вследствие симметрии щетки и щеткодержателя.

$$R_{13e} = \frac{h_1}{2\lambda_e(l_2 * h_2)}$$

$$R_e = \frac{h - h_1}{2\lambda(l * h)}$$

$$R_{13} = \frac{h_1}{2\lambda_e(l_2 * h_2)} + \frac{h_4 - h_1}{2\lambda_u(l_2 * h_3)}$$

Тепловые потоки P_{11} , P_{12} , P_{13} , P_{14} разнонаправленны, вследствие чего сопротивления, встречающиеся на их пути составляют цепь с параллельным соединением.

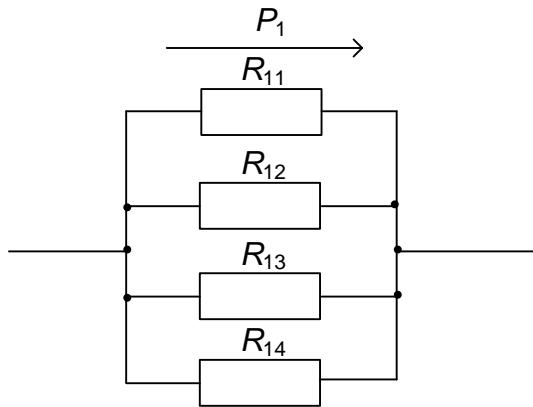


Рисунок 3.6 – Параллельное соединение тепловых сопротивлений на пути теплового потока от графита к воздуху через щеткодержатель

Общее сопротивление для площади щетки, находящейся под щеткодержателем и самого тела щеткодержателя:

$$\frac{1}{R_{общ1}} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{14}} = \frac{2}{2\lambda_e(l_2 * h_1)} + \frac{h_3 - h_2}{2\lambda_u(l_2 * h_4)} + \frac{2}{2\lambda_e(l_2 * h_2)} + \frac{h_4 - h_1}{2\lambda_u(l_2 * h_3)}$$

$$R_{общ1} = \frac{1}{\frac{2}{2\lambda_e(l_2 * h_1)} + \frac{h_3 - h_2}{2\lambda_u(l_2 * h_4)} + \frac{2}{2\lambda_e(l_2 * h_2)} + \frac{h_4 - h_1}{2\lambda_u(l_2 * h_3)}}$$

Тепловое сопротивление щетки на пути тепловых потоков $P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{24}, P_{25}$ с верхнего торца щетки, не контактирующего с коллектором, рассчитывается по формуле:

$$R_{2\text{общ}} = \frac{l_1}{\lambda_{u\mu}(2l_1h_1 + 2l_1h_2 + h_1h_2)}$$

Тепловое сопротивление щетки на пути тепловых потоков $P_{31}, P_{32}, P_{33}, P_{34}$ со стороны щетки, контактирующей с коллектором, рассчитывается по формуле:

$$R_{3\text{общ}} = \frac{l_3}{\lambda_{u\mu}(2l_3h_1 + 2l_3h_2 + h_1h_2)}$$

Тепловое сопротивление на пути потока P_{35} не учитывается, так как поток направлен в пластину коллектора.

Для расчета общего теплового сопротивления, необходимо найти общее сопротивление при параллельном соединении $R_{1\text{общ}}, R_{2\text{общ}}, R_{3\text{общ}}$, как показано на рисунке 3.7.

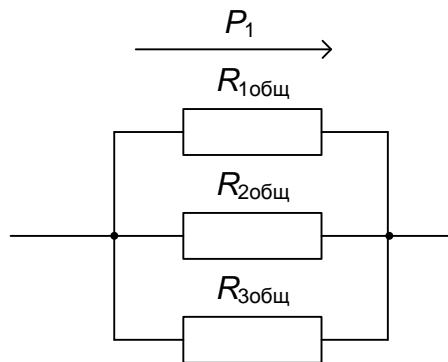


Рисунок 3.7 - Параллельное соединение тепловых сопротивлений на пути теплового потока от графита к воздуху через щеткодержатель

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_{1\text{общ}}} + \frac{1}{R_{2\text{общ}}} + \frac{1}{R_{3\text{общ}}} \quad (3.2.3)$$

Из уравнения (3.2.3) найдем сопротивление R_1 .

Тепловое сопротивление R_3 учитывает грань щетки со стороны зоны контакта. Его можно рассчитать по формуле:

$$R_3 = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{\lambda_{u_4} 2(h_1 h_2)} \quad (3.2.4)$$

Тепловое сопротивление коллектора рассчитывать сложно ввиду вращения коллектора. В определенный момент времени под щеткой находится постоянная площадь, включающая в себя несколько коллекторных пластин и мikanитовые вставки, которые являются теплоизолятором. В расчетах коллектор принято считать медным цилиндром.

3.3 Расчет превышения температуры в узлах тепловой схемы замещения КЩУ МПТ

Определены тепловые сопротивления, входящие в развернутую тепловую схему замещения КЩУ МПТ. Составлена математическая модель, позволяющая рассчитывать превышения температуры на источниках потерь в установившемся режиме работы машины. Превышение ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 соответствуют превышениям температуры на трех источниках потерь: щетке ($P_{щ}$), коллекторных пластинах (P_k) и в зоне контакта ($P_{конт}$). Тепловая схема замещения КЩУ с указанием точек расчета температуры представлена на рисунке 3.8.

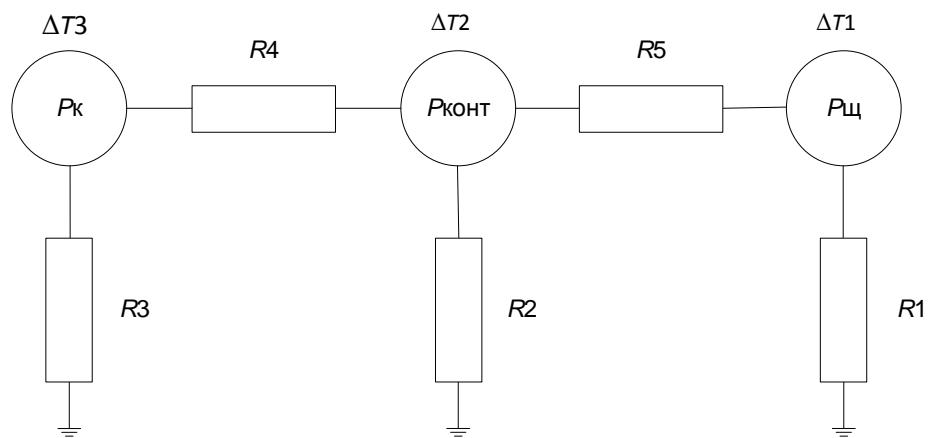


Рисунок 3.8 – Тепловая схема замещения КЩУ с указанием точек расчета температуры

По полученной тепловой схеме замещения можно составить систему уравнений для определения превышений температуры на каждом источнике потерь. Для этого необходимо рассчитать каждый источник потерь и каждое тепловое сопротивление [42].

Используя закон теплопроводности Фурье, из уравнений теплового баланса для каждого источника теплоты и каждого узла можно составить систему, число уравнений в которой равно числу искомых превышений температуры.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta T_1}{R_1} + \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{R_5} = P_{u_1} \\ \frac{\Delta T_2}{R_2} + \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{R_5} + \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_3)}{R_4} = P_{\text{конм}} \\ \frac{\Delta T_3}{R_3} + \frac{(\Delta T_3 - \Delta T_2)}{R_4} = P_{\kappa} \end{array} \right. \quad (3.3.1)$$

Для расчета необходимо установить мощность источников тепловых потерь.

Во-первых, тепло в КЩУ выделяется по причине механического трения. Интенсивность нагрева зависит от материала щетки, поверхности коллектора, от того, насколько щетки «притерты». Нажатие на щетку также является влияющим на процесс нагрева параметром [44,45]. Количество тепла, выделяющегося в контакте за счет трения, определяется по формуле :

$$W_1 = \mu P \vartheta * 10^{-4}, \quad (3.3.2)$$

где μ - коэффициент трения,

P – усилие, г,

ϑ – скорость вращения, см/сек.

Методы расчета температуры в контакте между угольной щеткой и медным коллектором подробно рассматривается в работе Хольма [98]. Расчет подробный, но существуют допущения: принимается, что щетка нагревается больше коллектора и температурный градиент направлен в медь; половина тепла, выде-

ляющегося в щетке, течет через контакт в поверхность коллектора. Количество тепла, выделяющегося в щетке можно рассчитать по формуле:

$$Q_{u\mu} = I^2 R_{u\mu}, \quad (3.3.3)$$

где I – ток,

$R_{u\mu}$ – сопротивление щетки.

По Хольму тепло, выделяющееся при прохождении через сопротивление стягивания меди, незначительно, но в своих расчетах мы его учтем:

$$Q_m = I^2 R_m, \quad (3.3.4)$$

, где I – ток,

R_m – сопротивление медной пластины коллектора.

Другой причиной нагрева в зоне контакта является прохождение тока через переходное сопротивление контакта при падении напряжения $\Delta U_{u\mu}$.

$$Q_k = I^2 R_k, \quad (3.3.5)$$

, где I – ток,

R_k – переходное сопротивление контакта.

Рассчитаем тепловые сопротивления и мощность источников потерь для машины П31М.

Искрение щеток также приводит к нагреву в зоне контакта. С другой стороны установлено, что при повышенном нагреве коллектора повышается уровень искрения. Нагрев и искрение тесно взаимосвязаны друг с другом. Чрезмерное искрение щеток может быть вызвано чрезмерно большой плотностью тока под щетками. Это происходит, в основном, когда после перемотки якоря с более высокого напряжения на более низкое, щетки и коллектор не меняют, что вызывает повышение плотности тока. [100]

Полученную математическую модель просчитаем для машины П-31М в номинальном режиме работы при токе якоря $I_a = 30$ А, скорости вращения $n = 3000$ об/мин, нажатие на щетку $p = 200$ г.

Сопротивление щетки можно определить, зная удельное сопротивление. Для щетки ЭГ-74 удельное сопротивление $\rho_{u\mu} = 35 - 75$ мкОм/м. Щетка в машине

2П, используемой при экспериментальном исследовании, имеет размеры 12Х10Х30 мм. Площадь сечения $S = 120 \text{ мм}^2$. Длина щетки $l = 30 \text{ мм}$. Сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R_{u\mu} = \frac{\rho_{u\mu} * l}{S} = \frac{70 * 0,03}{120 * 10^{-6}} = 17500 \text{ мкОм.}$$

Зная сопротивление, можем рассчитать количество теплоты, выделяющееся в щетке при протекании тока.

$$Q_{u\mu} = I^2 R_{u\mu} = 30^2 * 17500 * 10^{-6} = 15,75 \text{ Вт}$$

Рассчитаем потери от механического трения по формуле (3.3.2). Усилие, с которым щетка в машине 2П давит на коллектор $P = 200 \text{ г}$. Коэффициент трения $\mu = 0,22$. Скорость вращения $\vartheta = 1000 \text{ см/сек.}$

$$W_1 = \mu P \vartheta * 10^{-4} = 0,22 * 200 * 1000 * 10^{-4} = 4,4 \text{ Вт}$$

Джоулево тепло, выделяемое в коллекторных пластинах, можно найти по формуле (3.3.5).

$$Q_{\kappa} = I^2 R_{\kappa} = 30^2 * 1 * 10^{-6} = 0,9 \text{ Вт}$$

Тепловое сопротивление R_1 рассчитаем по формуле (3.2.3).

$$R_1 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт.}$$

Тепловое сопротивление R_2 рассчитаем по формуле (3.2.4).

$$R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт.}$$

Систему (3.3.1) рассчитаем в программе MathCAD [58]. Получили значения трех превышений температуры: $\Delta T_1 = 27,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_2 = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_3 = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полученные данные можно проверить с помощью экспериментального исследования для машины 2П в номинальном режиме при отсутствии искрения. Термограммы КЩУ регистрировались с помощью тепловизора в установившемся температурном режиме, после работы машины в течение 20 минут. Термограмма приведена на рисунке 3.9.

Исходя из экспериментальных данных, превышение температуры щетки составило $\Delta T_1 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, превышение температуры зоны контакта составило $\Delta T_2 = 29,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, превышение температуры коллекторных пластин составило $\Delta T_3 = 12,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

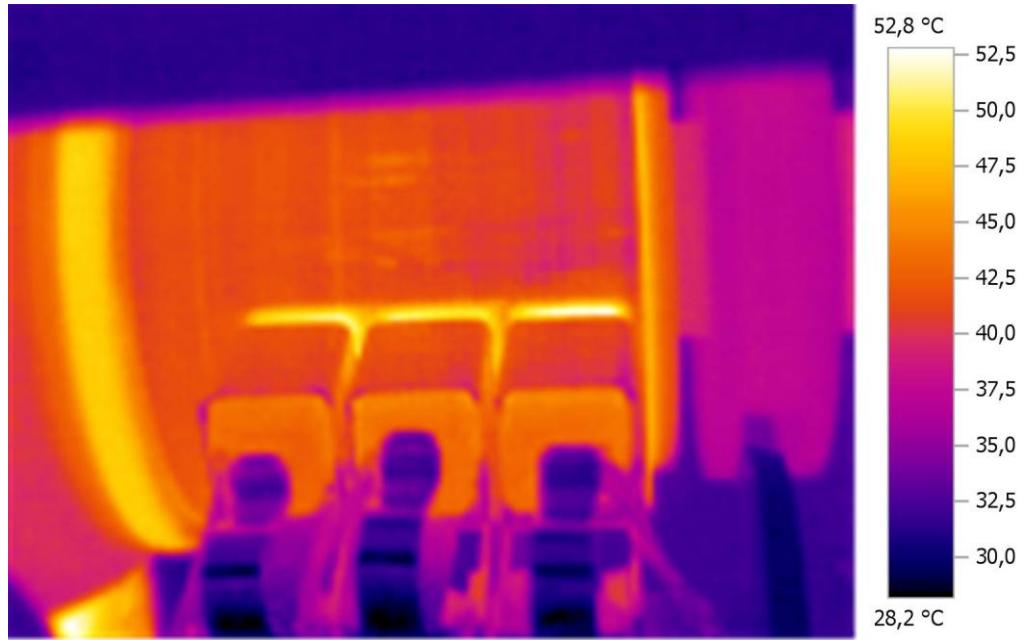


Рисунок 3.9 – Термограмма КЩУ в номинальном режиме при отсутствии искрения

3.4 Математическая модель нагрева элементов МПТ при переходном режиме работы

Сложнее определять тепловое состояние машины в переходных режимах работы. Электромеханическая система, в нашем случае МПТ, рассматривается, как набор твердых тел, связанных между собой и обладающих определенными тепловыми характеристиками: теплоемкостью и теплопроводностью [101]. В процессе теплообмена участвуют как активные тела – выделяющие тепловую энергию, так и пассивные – не выделяющие.

Рассмотрим баланс энергии на примере отдельного активного элемента, участвующего в процессе теплообмена [17].

Для произвольного активного объема закон сохранения энергии может быть записан следующим образом:

$$dp = dp_1 + dp_2, \quad (3.4.1)$$

Теплота dp_1 , подведенная к элементу объема dV в результате теплопроводности и теплота dp_2 , выделившаяся в элементе, расходуются на повышение эн-

тальпии dp элемента. Графическое представление элемента температурного поля приведено на рисунке 3.10.

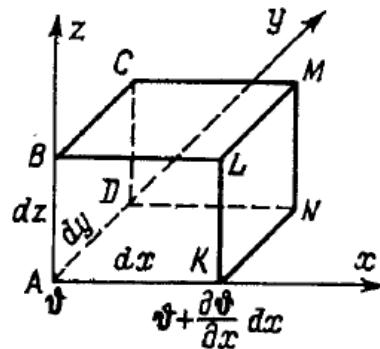


Рисунок 3.10 – Элемент поля температуры

Теплота dp_{1x} , подведенная к элементу в направлении оси x складывается из теплового потока dp'_{1x} через грань $ABCD$ за вычетом потока dp''_{1x} через грань $KLMN$.

Исходя из основного закона теплопроводности, можно определить:

$$dp_{1x} = dp'_{1x} + dp''_{1x} = \lambda_x \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} dx dy dz, \quad (3.4.2)$$

Удельная мощность источника теплоты определяется как теплота, выделившаяся в объеме $dV = dx dy dz$ если известна теплопроизводительность единицы объема p_0 :

$$dp_2 = p_0 dV = p_0 dx dy dz, \quad (3.4.3)$$

Величина p_0 зависит от расположения элемента и времени:

$$p_0 = f(x, y, z, t), \quad (3.4.4)$$

Изменение энталпии dp элемента объема равно массе элемента pdV , умноженной на теплоемкость c и на изменение температуры элемента $d\vartheta / dt$:

$$dp = cp \frac{\partial \vartheta}{\partial t} dx dy dz, \quad (3.4.5)$$

Таким образом, уравнение теплопроводности примет вид:

$$cp \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} + p_0, \quad (3.4.6)$$

3.5 Переходные тепловые процессы для основных элементов МПТ

Тепловое состояние описывается системой дифференциальных уравнений Пуассона в частных производных. Такой подход подразумевает некоторые упрощения: температурные поля внутри отдельных элементов не рассматриваются, что позволяет описать тепловой процесс с помощью системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений первого порядка [64].

Для n -го тела уравнение теплового баланса выглядит следующим образом:

$$C_n \frac{d\Theta_n}{dt} = \sum_{i=1}^{q(i \neq n)} \lambda_{in} \Theta_i - \Theta_n (\lambda_n + \lambda_{in}) + P_n,$$

где C_n – теплоемкость n -го элемента,

λ_n – коэффициент теплопроводности от n -го элемента к воздуху,

λ_{in} – коэффициент теплопроводности от i -го к n -му элементу,

Θ_i – температура i -го элемента,

Θ_n – температура n -го элемента,

q – количество элементов, участвующих в теплообмене с данным телом,

P_n – потери в n -ом элементе,

t – текущее время.

Для определения температуры элементов машины, работающей в нестационарном режиме работы, требуется составить систему дифференциальных уравнений теплового баланса.

Для машины постоянного тока П31-М определен следующий набор элементов, оказывающих влияние на тепловые процессы машины: коллектор, обмотка якоря, сердечник якоря, обмотка возбуждения, ярмо полюса, наконечник полюса.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_b \frac{d\Theta_b}{dt} = -(\lambda_b + \lambda_{bc})\Theta_b + \Theta_c \lambda_{bc} + P_b \\ C_c \frac{d\Theta_c}{dt} = -(\lambda_{bc} + \lambda_c + \lambda_{kc})\Theta_c + \Theta_k \lambda_{kc} + \Theta_b \lambda_{bc} + P_c \\ C_k \frac{d\Theta_k}{dt} = -(\lambda_{kj} + \lambda_k)\Theta_k + \Theta_j \lambda_{kj} + P_k \\ C_j \frac{d\Theta_j}{dt} = -(\lambda_{kj} + \lambda_j + \lambda_{js})\Theta_j + \Theta_k \lambda_{kj} + \Theta_s \lambda_{js} + P_j \\ C_s \frac{d\Theta_s}{dt} = -(\lambda_s + \lambda_{js})\Theta_s + \Theta_j \lambda_{js} + P_s \\ C_v \frac{d\Theta_v}{dt} = -(\lambda_v + \lambda_{vg})\Theta_v + \Theta_g \lambda_{vg} + P_v \\ C_g \frac{d\Theta_g}{dt} = -(\lambda_g + \lambda_{vg} + \lambda_{gn})\Theta_g + \Theta_v \lambda_{vg} + \Theta_n \lambda_{gn} + P_g \\ C_n \frac{d\Theta_n}{dt} = -(\lambda_n + \lambda_{ng})\Theta_n + \Theta_g \lambda_{gn} + P_n \\ C_w \frac{d\Theta_w}{dt} = -(\lambda_w + \lambda_{wd})\Theta_w + \Theta_d \lambda_{wd} + P_w \\ C_d \frac{d\Theta_d}{dt} = -(\lambda_d + \lambda_{wd} + \lambda_{dm})\Theta_d + \Theta_w \lambda_{wd} + \Theta_m \lambda_{dm} + P_d \\ C_m \frac{d\Theta_m}{dt} = -(\lambda_m + \lambda_{dm})\Theta_m + \Theta_d \lambda_{dm} + P_m \end{array} \right.$$

C_b – теплоемкость щетки, C_c – теплоемкость зоны контакта щетка-коллектор, C_k – теплоемкость коллектора, C_j – теплоемкость обмотки якоря, C_s – теплоемкость сердечника якоря, C_v – теплоемкость обмотки главного полюса, C_g – теплоемкость сердечника главного полюса, C_n – теплоемкость наконечника главного полюса, C_w – теплоемкость обмотки добавочного полюса, C_d – теплоемкость сердечника добавочного полюса, C_m – теплоемкость наконечника добавочного полюса, Θ_k – средняя температура коллектора, Θ_j – средняя температура обмотки якоря, Θ_s – средняя температура сердечника якоря, Θ_v – средняя температура обмотки главного полюса, Θ_g – средняя температура сердечника главного полюса, Θ_n – средняя температура наконечника главного полюса, Θ_w – средняя температура обмотки добавочного полюса, Θ_d – средняя температура сердечника добавочного полюса, Θ_m – средняя температура наконечника добавочного полюса.

вочного полюса, λ_k – коэффициент теплопроводности с коллектора к внутреннему воздуху, λ_{kj} – коэффициент теплопроводности с коллектора к обмотке якоря, λ_{js} – коэффициент теплопроводности с обмотки якоря к сердечнику якоря, λ_j – коэффициент теплопроводности с обмотки якоря к воздуху, λ_v – коэффициент теплопроводности обмотки главного полюса к воздуху, λ_{vg} – коэффициент теплопроводности между обмоткой и сердечником главного полюса, λ_g – коэффициент теплопроводности сердечника главного полюса на половину высоты ярма, λ_n – коэффициент теплопроводности наконечника главного полюса к воздуху, λ_{gn} – коэффициент теплопроводности со стали главного полюса к наконечнику главного полюса, λ_{wd} – коэффициент теплопроводности между обмоткой и сердечником добавочного полюса, λ_d – коэффициент теплопроводности сердечника добавочного полюса на половину высоты ярма, λ_{dm} – коэффициент теплопроводности сердечника добавочного полюса к наконечнику добавочного полюса, λ_w – коэффициент теплопроводности обмотки добавочного полюса к воздуху, λ_m – коэффициент теплопроводности наконечника добавочного полюса к воздуху.

Значения теплоемкостей определим, используя удельную теплоемкость материала и вес элемента [99]. Для машины П-31М определены следующие значения теплоемкостей.

Таблица 3.2 – Значения теплоемкости для элементов МПТ

Параметр	Значение, кДж/К	Параметр	Значение, кДж/К
C_k	1,155	C_w	0,116
C_j	1,925	C_d	0,162
C_s	3,234	C_m	0,162
C_v	0,693	C_c	0,010
C_g	0,462	C_b	0,070
C_n	0,462		

Коэффициент теплопроводности – величина, обратная ТС. Для расчета этого параметра требуется знать геометрию рассчитываемого элемента и удельную теплопроводность материала.

Таблица 3.3 – Значения коэффициентов теплопроводности элементов МПТ

Параметр	Значение, Вт/м ² К	Параметр	Значение, Вт/м ² К
λ_k	38,4	λ_d	0,1
λ_{kj}	4	λ_{dm}	0,1
λ_{js}	65,7	λ_w	9,3
λ_j	90,8	λ_m	0,1
λ_s	30,1	λ_{kc}	11,3
λ_{vg}	15,6	λ_c	2
λ_g	0,3	λ_b	10
λ_{gn}	0,2	λ_{bc}	3
λ_v	18,8		
λ_n	0,2		
λ_{wd}	11,1		

Таблица 3.4 – Мощности источников потерь элементов машины.

Параметр	Значение, Вт	Параметр	Значение, Вт
P_k	7	P_w	9
P_j	40	P_d	2
P_s	23	P_m	1
P_v	17	P_c	14,3
P_g	4	P_b	3
P_n	3		

Подставим численные значения в систему уравнений теплового баланса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Theta_b}{dt} = -(0,18)\Theta_b + \Theta_c 0,04 + 0,04 \\ \frac{d\Theta_c}{dt} = -(1,63)\Theta_c + \Theta_k 1,13 + \Theta_b 0,3 + 1,43 \\ \frac{d\Theta_k}{dt} = -(0,036)\Theta_k + \Theta_j 0,003 + 0,006 \\ \frac{d\Theta_j}{dt} = -(0,083)\Theta_j + \Theta_k 0,002 + \Theta_s 0,034 + 0,02 \\ \frac{d\Theta_s}{dt} = -(0,029)\Theta_s + \Theta_j 0,02 + 0,007 \\ \frac{d\Theta_v}{dt} = -(0,049)\Theta_v + \Theta_g 0,022 + 0,024 \\ \frac{d\Theta_g}{dt} = -(0,035)\Theta_g + \Theta_v 0,033 + \Theta_n 0,0004 + 0,008 \\ \frac{d\Theta_n}{dt} = -(0,0008)\Theta_n + \Theta_g 0,0004 + 0,006 \\ \frac{d\Theta_w}{dt} = -(0,175)\Theta_w + \Theta_d 0,095 + 0,077 \\ \frac{d\Theta_d}{dt} = -(0,069)\Theta_d + \Theta_w 0,068 + \Theta_m 0,0006 + 0,012 \\ \frac{d\Theta_m}{dt} = -(0,001)\Theta_m + \Theta_d 0,0006 + 0,006 \end{array} \right.$$

Рассчитаем систему в программе MathCad 15.0 с помощью функции rkfixed(v,a,b,N,D) – реализует численное решение задачи Коши по методу Рунге – Кутта с фиксированным шагом, где v – вектор начальных условий, a – начальное время, b – конечное время, N – число шагов, на которых производится расчет, D – векторная функция [58].

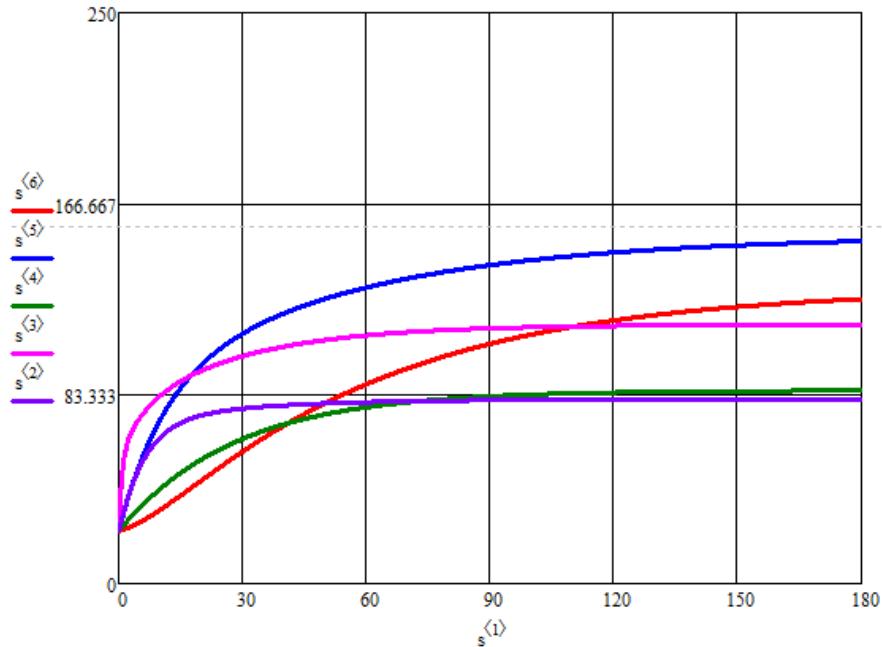
Вектор начальных условий – начальная температура элементов. За начальную температуру примем 23 °C.

$$v := \begin{pmatrix} 23 \\ 23 \\ 23 \\ 23 \\ 23 \\ 23 \\ 23 \\ 23 \\ 23 \\ 23 \end{pmatrix}$$

Векторная функция примет вид:

$$D(t, v) := \begin{bmatrix} -0.18 \cdot (v_1) + 0.04 \cdot (v_2) + 10 \\ -1.23 \cdot (v_2) + 0.7 \cdot (v_3) + 0.4 \cdot (v_1) + 48 \\ -0.036 \cdot (v_3) + 0.0003 \cdot (v_4) + 3 \\ -0.083 \cdot (v_4) + 0.003 \cdot (v_3) + 0.034 \cdot (v_5) + 8 \\ -0.029 \cdot (v_5) + 0.02 \cdot (v_4) + 0.7 \\ -0.049 \cdot (v_6) + 0.022 \cdot (v_7) + 2.4 \\ -0.035 \cdot (v_7) + 0.0338 \cdot (v_6) + 0.00043 \cdot (v_8) + 0.8 \\ -0.0008 \cdot (v_8) + 0.0004 \cdot (v_7) + 0.6 \\ -0.175 \cdot (v_9) + 0.095 \cdot (v_{10}) + 0.7 \\ -0.0698 \cdot (v_{10}) + 0.0038 \cdot (v_9) + 0.000662 \cdot (v_{11}) + 0.001 \\ -0.0001 \cdot (v_{11}) + 0.29 \cdot (v_{10}) + 5 \end{bmatrix}$$

Получим кривые нагрева для элементов МПТ:



$S^{<2>}$ - щетка, $S^{<3>}$ - зона контакта, $S^{<4>}$ - коллектор, $S^{<5>}$ - обмотка якоря, $S^{<6>}$ - сердечник якоря

3.6 Расчет переходных тепловых процессов для локальной системы КЩУ

Рассмотрим подробно КЩУ для расчета нагрева при нестационарных режимах работы машины. В узле выделим следующие элементы, участвующие в теплообмене: коллекторная пластина, зона контакта, щетка [91,92,93].

$$\begin{cases} C_k \frac{d\Theta_k}{dt} = -(\lambda_{kc} + \lambda_k) \Theta_k + \Theta_c \lambda_c + P_k \\ C_c \frac{d\Theta_c}{dt} = -(\lambda_{bc} + \lambda_c + \lambda_{kc}) \Theta_c + \Theta_k \lambda_k + \Theta_b \lambda_b + P_c \\ C_b \frac{d\Theta_b}{dt} = -(\lambda_b + \lambda_{bc}) \Theta_b + \Theta_c \lambda_{bc} + P_b \end{cases}$$

C_k – теплоемкость коллектора, C_c – теплоемкость контактного пространства, C_b – теплоемкость щетки, Θ_k – средняя температура коллектора, Θ_c – средняя температура контактного пространства, Θ_b – средняя температура щетки, λ_k – теплопроводность с коллектора к воздуху, λ_{kc} – теплопроводность с коллектора к контактному пространству, λ_c – теплопроводность с контактного пространства к воздуху, λ_b – теплопроводность с щетки к воздуху, λ_{bc} – теплопроводность с щетки к контактному пространству;

Значения теплоемкостей определим, используя удельную теплоемкость материала и вес элемента. Для КЩУ машины П-31 определены следующие значения теплоемкостей [99].

Таблица 3.5 – Значения теплопроводностей элементов КЩУ

Параметр	Значение, кДж/К
C_k	1,155
C_c	0,010
C_b	0,070

Коэффициент теплопроводность – величина, обратная ТС. Для расчета этого параметра требуется знать геометрию рассчитываемого элемента и удельную теплопроводность материала.

Таблица 3.6 – Значения коэффициентов теплопроводности элементов КЩУ

Параметр	Значение, Вт/м ² К
λ_k	38,4
λ_{kc}	11,3
λ_c	2
λ_b	10
λ_{bc}	3

Таблица 3.7 – Мощности источников потерь элементов КЩУ

Параметр	Значение, Вт
P_k	0,7
P_c	14,3
P_b	15,75

$$\begin{cases} \frac{d\Theta_k}{dt} = -(0,043)\Theta_k + \Theta_c 0,0017 + 0,0006 \\ \frac{d\Theta_c}{dt} = -(1,63)\Theta_c + \Theta_k 3,84 + \Theta_b 1 + 1,43 \\ \frac{d\Theta_b}{dt} = -(0,185)\Theta_b + \Theta_c 0,028 + 0,225 \end{cases}$$

Рассчитаем систему в программе MathCad 15.0 с помощью функции rkfixed(v,a,b,N,D) – реализует численное решение задачи Коши по методу Рунге – Кутта с фиксированным шагом, где v – вектор начальных условий, a – начальное время, b – конечное время, N – число шагов, на которых производится расчет, D – векторная функция.

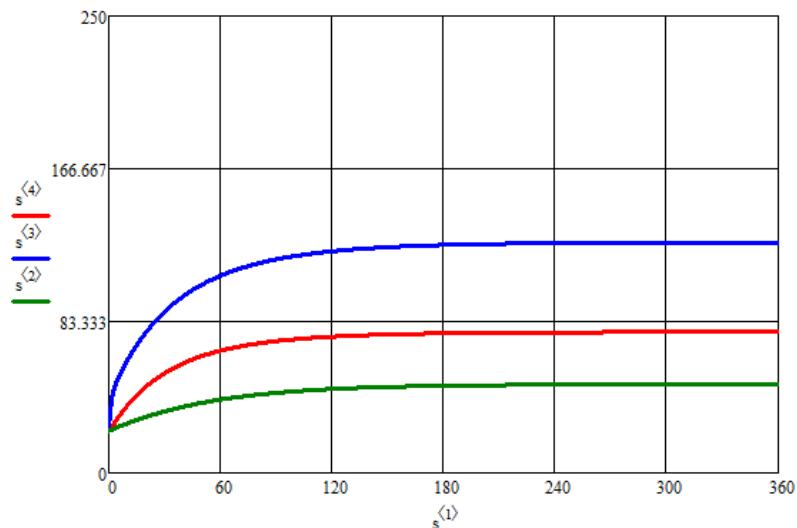
Вектор начальных условий – начальная температура элементов КЩУ.

$$v := \begin{pmatrix} 23 \\ 23 \\ 23 \end{pmatrix}$$

Векторная функция примет вид:

$$D(t, v) := \begin{bmatrix} -0.023 \cdot (v_1) + 0.0017 \cdot (v_2) + 0.9 \\ -0.83 \cdot (v_2) + 0.54 \cdot (v_1) + 1 \cdot (v_3) + 1.43 \\ -0.075 \cdot (v_3) + 0.028 \cdot (v_2) + 2.25 \end{bmatrix}$$

Получим кривые нагрева для элементов МПТ:



$S^{<2>}$ - коллектор, $S^{<3>}$ - зона контакта щетка-коллектор, $S^{<4>}$ - щетка

3.7 Имитационное моделирование в ANSYS

Нагрев трением моделировался в программном пакете ANSYS Mechanical [37,45,44].

В ANSYS используется модель трения Кулона (рисунок 3.11). Трение здесь возникает в том случае, если сдвиговая сила, которая движет тело, превышает силу трения, которая зависит от коэффициента трения μ и силы реакции опоры F_n .

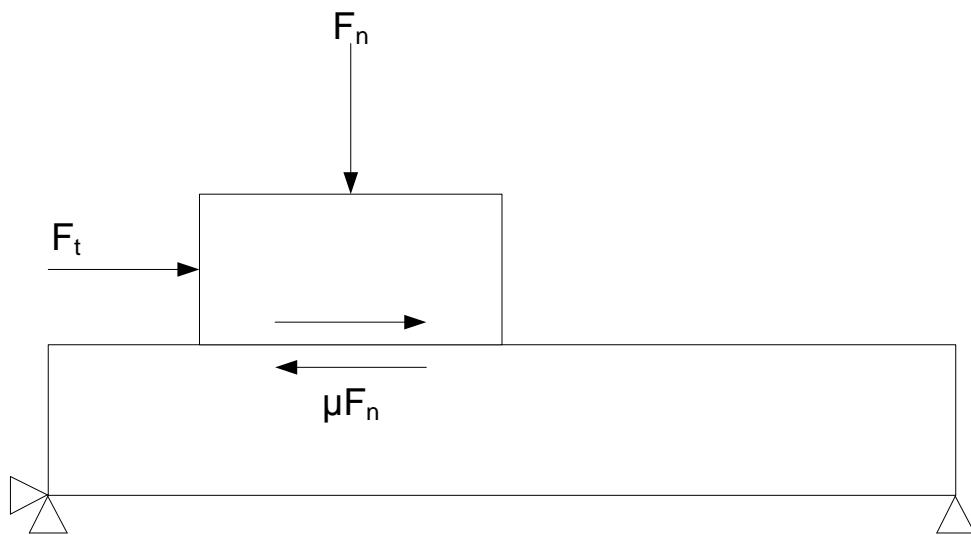


Рисунок 3.11 – Модель трения Кулона

Между контактами, испытывающими трение, возникает тепловой поток, плотность которого вычисляется по формуле:

$$q = FHTG * TAU * V, \quad (3.7.1)$$

, где $FHTG$ – коэффициент рассеивания энергии

TAU – напряжение трения, $\text{Па} = \text{Дж/м}^3$

V – скорость трения, м/с

$$q = \text{Дж/м}^2\text{с} = \text{Вт/м}^2$$

Распределение тепла, образующегося вследствие трения между контактной и целевой поверхностью, зависит от весового коэффициента распределения тепла $FWTG$. Этот коэффициент изменяется от 0 до 1 и показывает, какая доля тепла уйдет в контактную поверхность, а какая – в целевую. Доля тепла, поступающая в контактную поверхность, определяется по формуле:

$$q_c = FWTG \cdot q, \quad (3.7.2)$$

Доля тепла, поступающая в целевую поверхность, определяется по формуле:

$$q_c = (1 - FWTG) \cdot q, \quad (3.7.3)$$

где $FWTG$ – весовой коэффициент распределения тепла.

Решение задачи нагрева трением в пакете ANSYS решается путем решения задачи связанных полей – решение тепловой и прочностной задачи одновременно.

С помощью редактора геометрии созданы 3-D модели элементов КЩУ, участвующих в процессе трения: коллектора и щетки – размеры элементов двигателя ТЛ-2К.

Расчет проводился в модуле Transient Structural, так как данный процесс протекает во времени. Для расчета связанных полей необходимо, чтобы для материалов нашей системы были определены как прочностные, так и тепловые свойства. Из тепловых свойств материалов определяем два: теплопроводность и удельная теплоемкость.

Решение задачи нагрева трением в пакете ANSYS решается путем решения задачи связанных полей. Для этого используется линейный элемент связанных полей SOLID5.

После определения необходимых тепловых и прочностных свойств материала переходим к работе с моделью в модуле Mechanical.

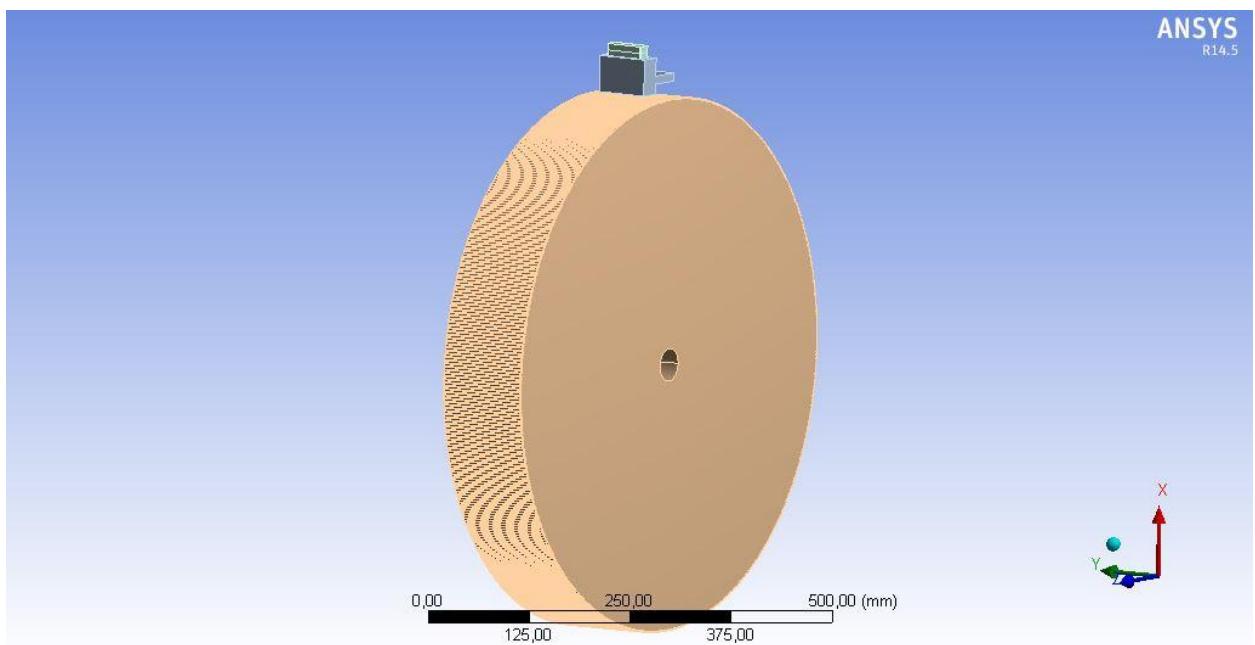


Рисунок 3.12 – 3D-модель системы коллектор-щетка

Для двух тел, участвующий в процессе трения, необходимо изменить тип конечного элемента. В редакторе геометрии присваиваем необходимые значения элементов для каждого тела с помощью командной вставки на языке APDL:

et,matid,solid5

В контактную пару между щеткой и коллектором вводим несимметричный контакт Frictional, где присутствует одна контактная и одна целевая поверхность. В нашем случае скользящим объектом будет щетка, а поверхностью скольжения – коллектор. В контактной поверхности устанавливаем коэффициент трения 0,2. Формулировку устанавливаем Augmented Lagrange. Коэффициент нормальной жесткости необходимо уменьшить меньше 1 для того, чтобы контакт соприкасался всей площадью.

В контактную поверхность необходимо добавить командную вставку:

```
keyopt,cid,1,1
!коэффициент рассеяния энергии
rmodif,cid,15,1
!коэффициент распределения тепла
rmodif,cid,18,0.5
```

Здесь изменяем две константы: коэффициент рассеяния энергии и коэффициент распределения тепла. Устанавливаем значения 1 и 0,5 соответственно для того, чтобы тепловая энергия использовалась полностью.

Для тел необходимо построить сетку с размером одного элемента 20 мм. Нам потребуется моделировать как нелинейные, так и линейные элементы, требуется отключить построение нелинейных элементов на ребрах сетки, для чего в параметрах построения сетки у параметра Element Midside Nodes выбираем значение Dropped.

Для поверхности пластин коллектора создаем параллельную именованную поверхность temp.

В блоке Transient определяем параметры процесса. Шаг времени определяем 10 миллисекунд. Выбран такой шаг для того, чтобы фрикционный контакт успевал нагревать контактную и целевую поверхность.

Для коллектора устанавливаем жесткую заделку по оси вращения. Для щетки ограничиваем перемещение телом щеткодержателя. Устанавливаем необходимую величину нажатия. Коллектору задаем необходимое количество оборотов.

В блоке расчета используем следующую командную вставку:

```

tref,22
cmsel,s,temp
d,all,temp,22
allsel,all

```

Параметр tref – температура, при которой тело не испытывает пластической деформации.

В результатах расчета представлены перемещения, деформации, напряжения. Для просмотра распределения тепловых полей необходимо в блоке User Defined Results активировать результаты расчета переменной TEMP. Программа позволяет получить графическое отображения распределения температурного поля в теле. На рисунке 3.13 приведено распределение температуры в теле щетки.

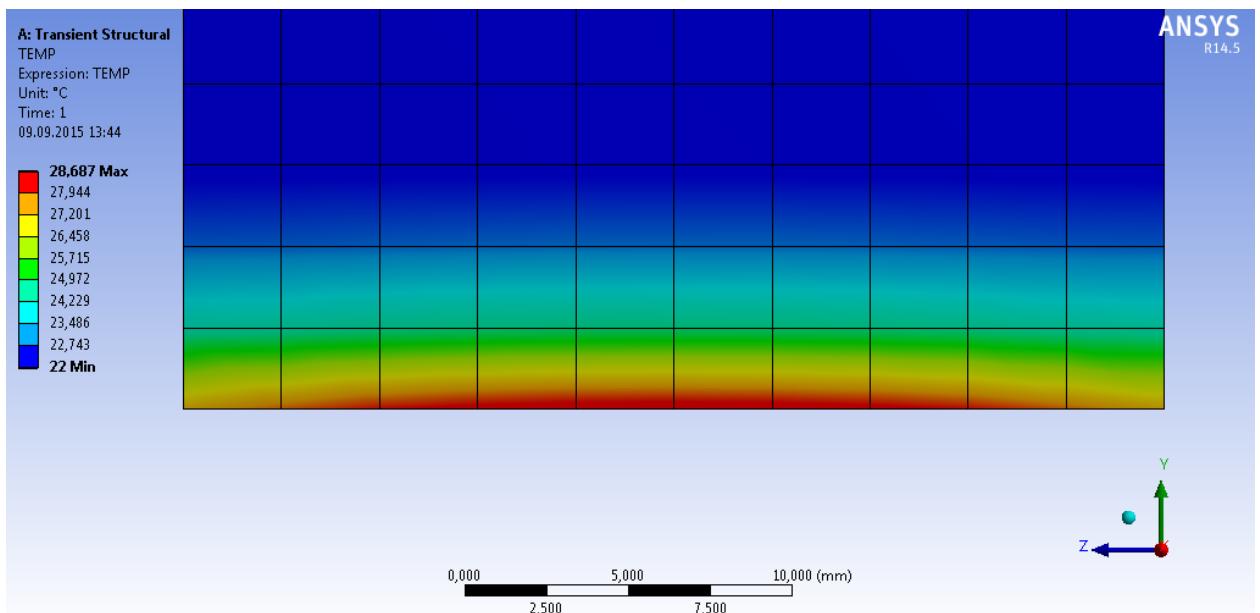


Рисунок 3.13 – Распределение температуры в теле щетки

Смоделируем вращения коллектора в течение 2 минут со скоростью 10 об/сек. При таких же условиях провели экспериментальное исследование: обесточенную машину ПЗ1 вращали через муфту приводом в течение 2 минут со скоростью 10 оборотов в минуту. Температуру в зоне контакта щетка-коллектор со стороны сбегающего края щетки регистрировали тепловизором. Кривые нагрева при экспериментальном исследовании и при имитационном моделировании в среде ANSYS приведены на рисунке 3.14.

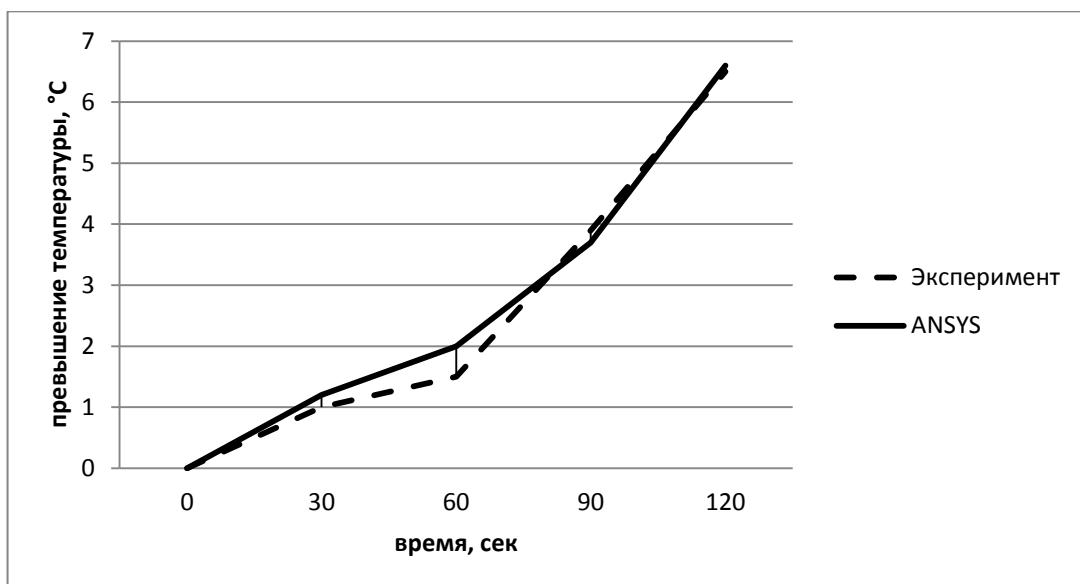


Рисунок 3.14 – Кривые нагрева при экспериментальном исследовании и имитационном моделировании в ANSYS

3.8 Выводы

1. Уточнена тепловая схема замещения КЩУ МПТ – выделены источники потерь в узле. Уточненная схема включена в общую тепловую схему замещения МПТ.
2. Применена методика расчета тепловых сопротивлений составных однородных объектов простых геометрических форм на примере щетки в щеткодержателе для машины П-31М.
3. Составлена математическая модель для расчета превышения средней температуры активных элементов КЩУ при установившемся тепловом режиме.
4. Уточнена математическая модель для расчета превышения средней температуры активных элементов МПТ при переходном тепловом режиме: ранее известная модель дополнена уравнения теплового баланса для элементов КЩУ: коллектора, щетки и зоны контакта «щетка-коллектор».
5. Проведено имитационное моделирование методом конечных элементов в среде ANSYS по нагреву трением фрикционной пары щетка-коллектор. Полученная модель позволяет изменять теплофизические свойства материалов щетки и коллектора, что может быть использовано для будущих исследований.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ НАГРЕВА ЗОНЫ КОНТАКТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ РАБОТЫ МАШИ- НЫ НА ЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

4.1 Применение тепловизионного обследования для исследования тепловых процессов в КЦУ

Собрана экспериментальная установка в лаборатории кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС для исследования тепловых процессов в КЦУ из двух машин постоянного тока П-ЗМ, соединенных гибкой муфтой. Один из них подключен в режиме двигателя, другой – генератора. Электрическая схема установки приведена на рисунке.

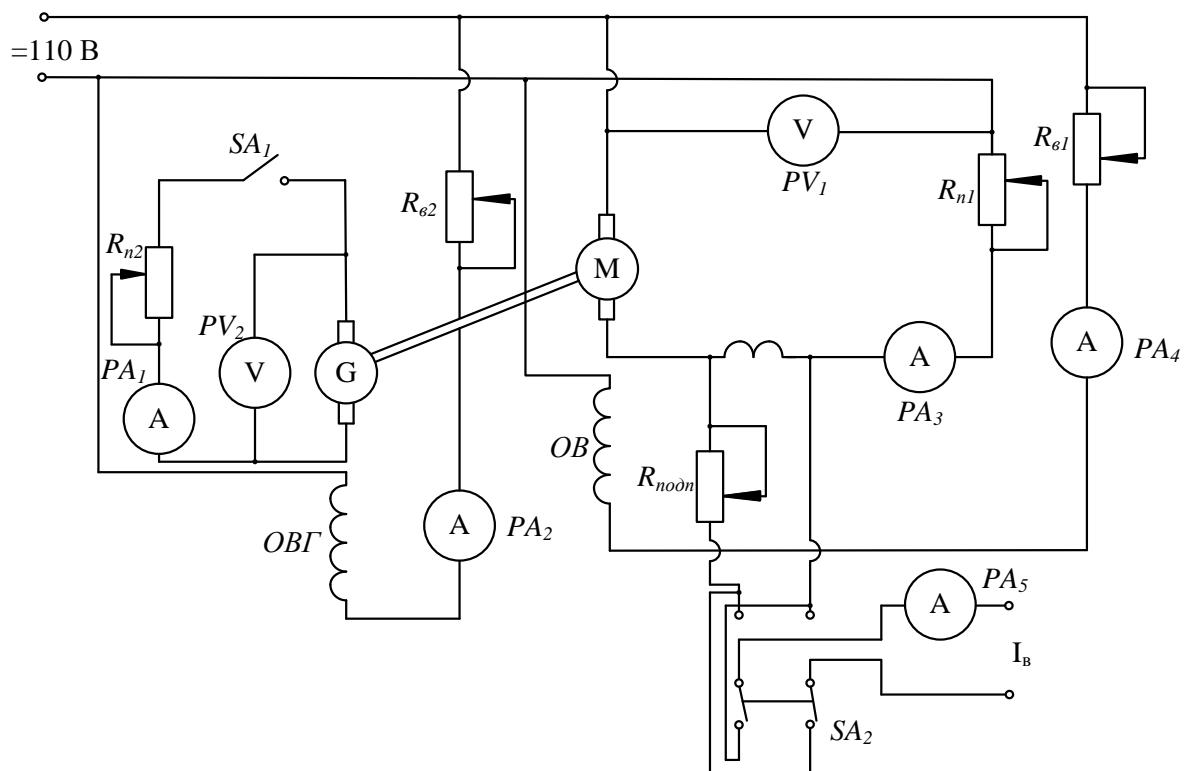


Рисунок 4.1 – Электрическая схема экспериментальной установки: G – МПТ в режиме генератора, M – МПТ в режиме двигателя, A – амперметр, V – вольтметр, R – реостат, ОВ – обмотка возбуждения, ОВ – обмотка возбуждения генератора, SA – переключатель



Рисунок 4.2 – Экспериментальная установка для исследования тепловых процессов в КЩУ МПТ

Независимо друг от друга варьировались следующие факторы: ток якоря, уровень искрения, частота вращения и величина нажатия на щетку. Ток якоря регулировался с помощью реостата. Частота вращения регулировалась изменением входного напряжения. Заменой пружины на щеткодержателе регулировалась величина нажатия на щетку. Искрение вводилось смещением геометрической нейтрали, уровень искрения регулировался изменением тока подпитки и отпитки добавочных полюсов.

С помощью тепловизора TESTO-875-1 регистрировались термограммы КЦУ. Термограммы регистрировались с частотой, допустимой для прибора – 30 секунд в течение 30 минут. На каждой термограмме регистрировалась температура зоны контакта «щетка-коллектор». Полученный набор термограмм позволяет построить кривую нагрева зоны контакта.

Термограммы регистрировались для двигателя П-31М при различных режимах работы машины. В первом случае использовались щетки ЭГ-74. Термограммы регистрировались в течение 20-30 минут с момента запуска машины. По каждой термограмме определялось превышение температуры в зоне контакта щетка-коллектор.

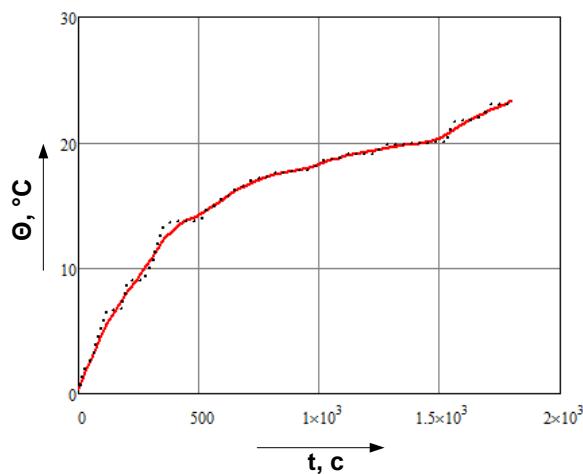


Рисунок 4.3 – Кривая нагрева при номинальном режиме для щетки ЭГ-74

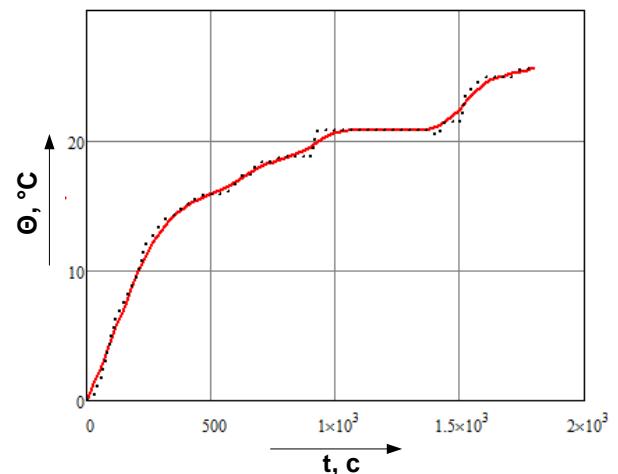


Рисунок 4.4 – Кривая нагрева при исключении 1 балл для щетки ЭГ-74

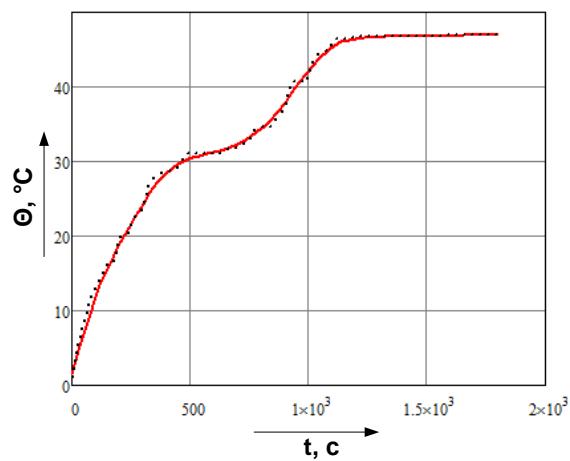


Рисунок 4.5 – Кривая нагрева при искрении 1 балл для щетки ЭГ-74

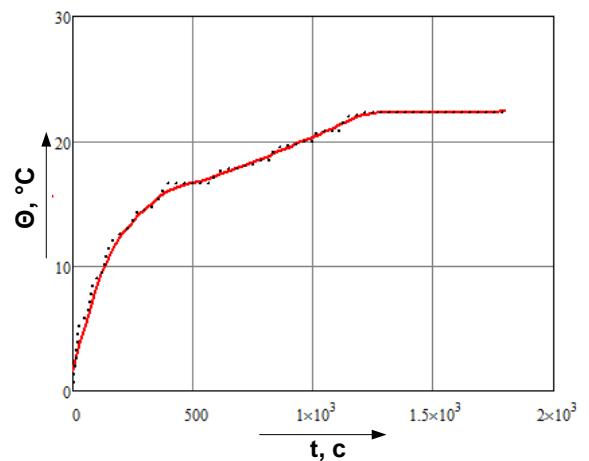


Рисунок 4.6 – Кривая нагрева при повышенной плотности тока для щетки
ЭГ-74

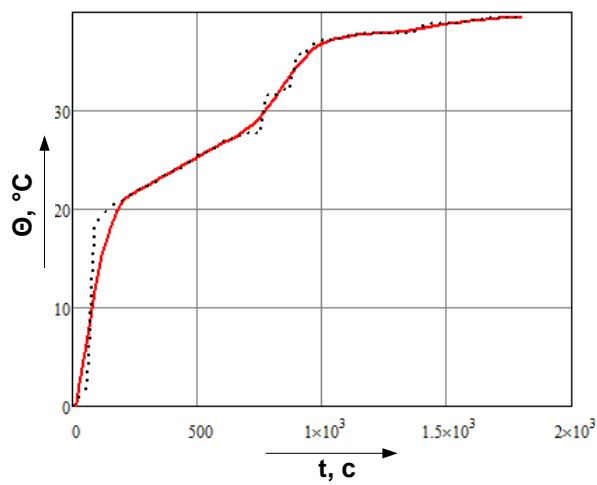


Рисунок 4.7 – Кривая нагрева при токе якоря 20 А и искрении 1 $\frac{1}{2}$ для щетки
ЭГ-74

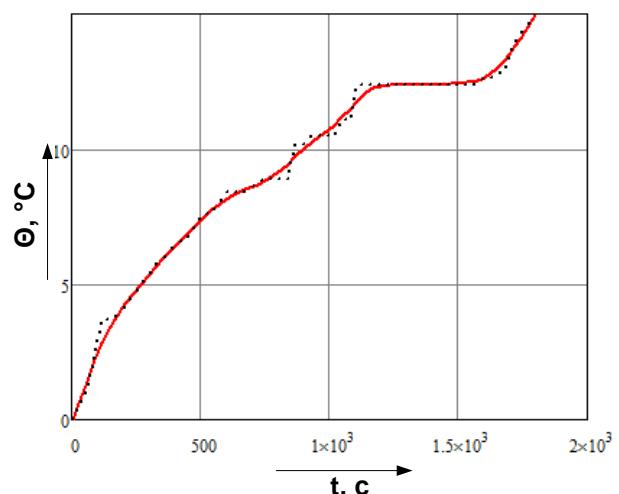


Рисунок 4.8 – Кривая нагрева при токе якоря 30 А в отсутствии искрения

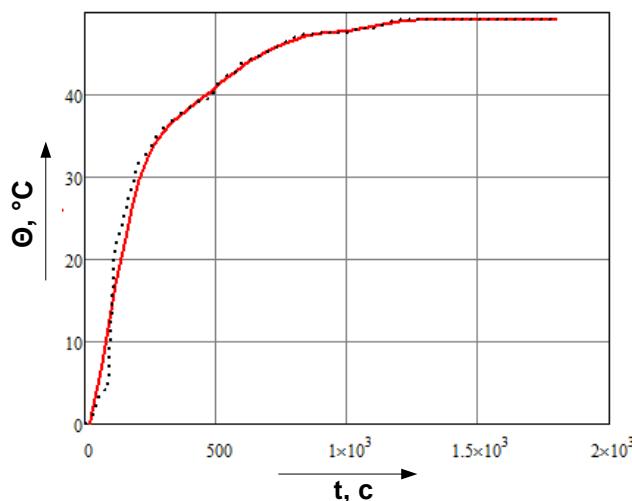


Рисунок 4.9 – Кривая нагрева при токе якоря 33 А с искрением 2 балла

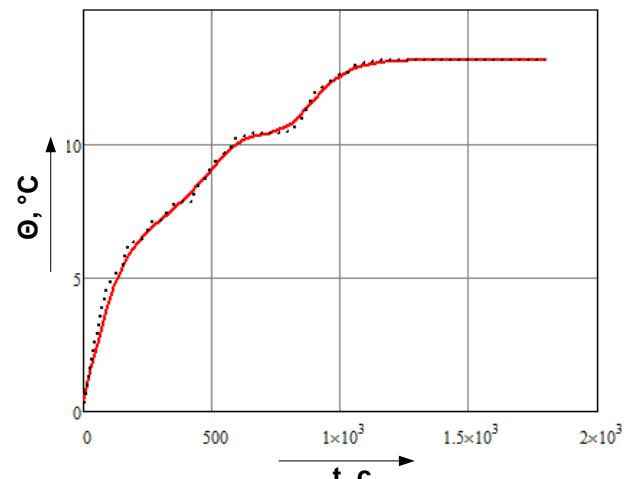


Рисунок 4.10 – Кривая нагрева при увеличенном нажатии для щетки ЭГ-74

По кривым видно, что минимальный нагрев происходит при повышенном токе якоря и при увеличенном нажатии при отсутствии искрения. Максимальный нагрев происходит при повышенном уровне искрения.

Далее термограммы регистрировались для щеток 61АК.

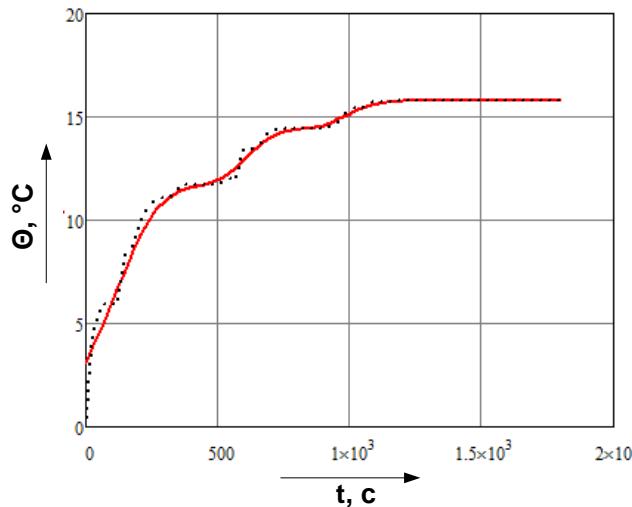


Рисунок 4.11 – Кривая нагрева при номинальном режиме для щетки 61АК

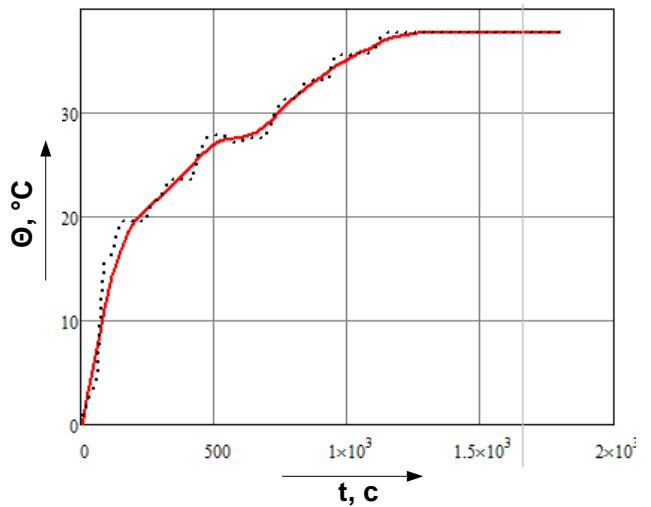


Рисунок 4.12 – Кривая нагрева при токе якоря 20 А и искрении $1\frac{1}{2}$ для щетки 61АК

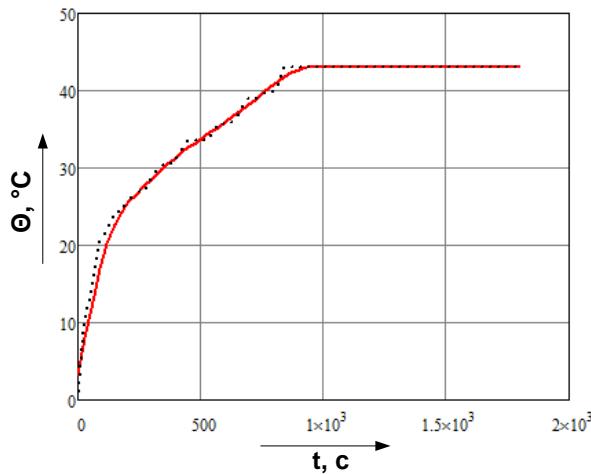


Рисунок 4.13 – Кривая нагрева при токе якоря 30 А для щетки 61АК

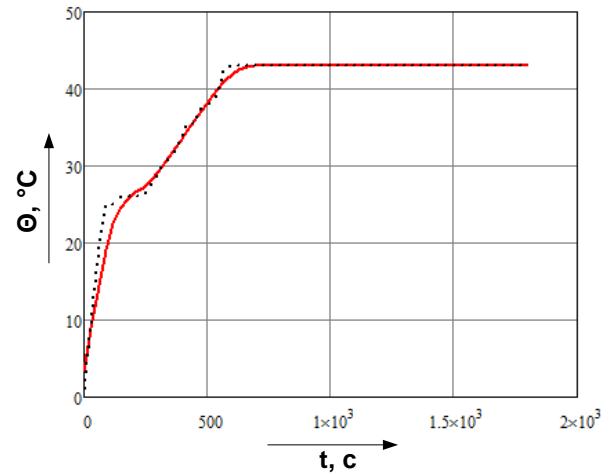


Рисунок 4.14 – Кривая нагрева при токе якоря 30 А и искрении 2 балла для щетки 61АК

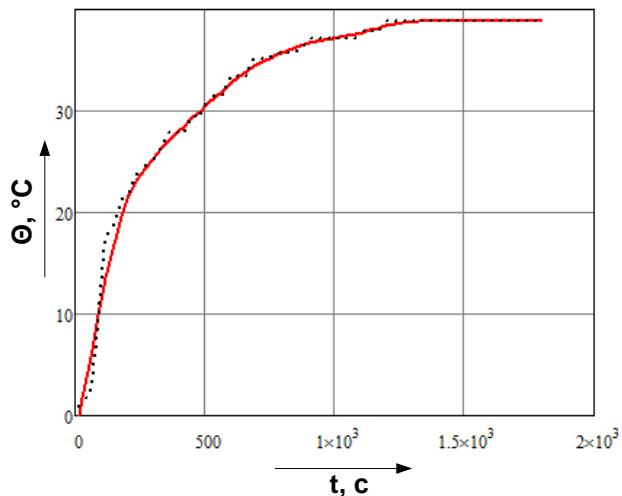


Рисунок 4.15 – Кривая нагрева при токе якоря 10 А и искрении 2 балла для щетки 61АК

На первых минутах работы машины нагрев в зоне КЩУ происходит под действием факторов как механической, так и электрической природы. Уровень искрения имеет значительное влияние на интенсивность нагрева в первые минуты работы машины, в последующем влияние данного фактора ослабевает. Влияние

тока якоря на интенсивность нагрева зоны контакта щетка-коллектор с увеличением временного интервала измерения также уменьшается. Нажатие на щетку имеет значительное влияние на интенсивность нагрева на первых минутах работы МПТ, с приближением к 10-минутному интервалу данный фактор перестает влиять полностью.

4.2 Исследование влияния факторов работы машины на интенсивность нагрева контакта «щетка-коллектор»

Проведен полный факторный эксперимент, целью которого является получение регрессионных зависимостей, позволяющих рассчитывать отклик по значению факторов.

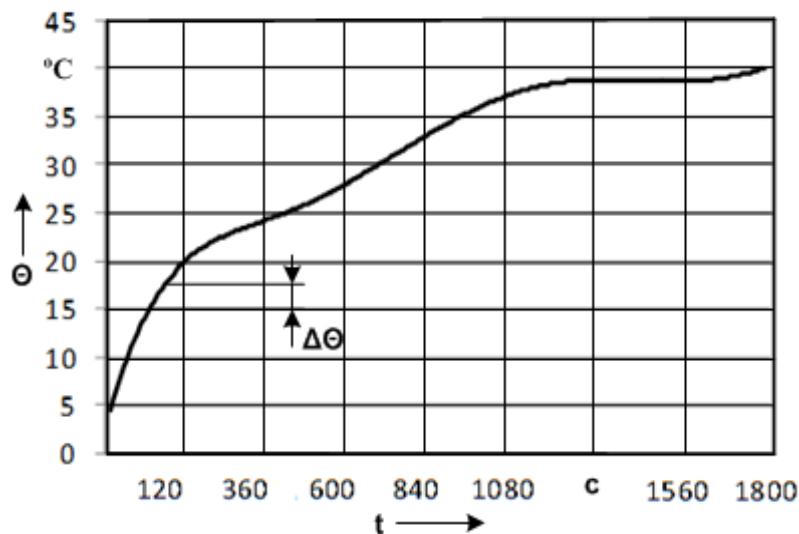


Рисунок 4.16 – Диаграмма нагрева зоны контакта щетка-коллектор

Для расчета интенсивности нагрева интенсивности нагрева КЩУ предложено использовать среднее приращение температуры ΔT_{cp} на интервале с шагом регистрации температуры – 30 секунд, определяемой по кривой нагрева (рисунок 4.16):

$$\Theta_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \Theta_i \quad (4.2.1)$$

где $\Delta\Theta_i$ – приращение температуры в i -той точке,

n – количество точек на интервале.

Таблица 4.1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Параметр	Кодовое обозна-чение	Натуральные значения уровней факторов, соответствующие кодированным				
		+2	+	0	-	-2
Ток якоря I_a , А	x_1	33	27	21	15	9
Уровень искрения А, баллы по ГОСТ-183-74	x_2	3	2	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{4}$	1
Частота вращения n , об/мин	x_3	3300	3150	3000	2850	2700
Давление на щетку $P_{ш}$, кг/см ²	x_4	0,36	0,3	0,24	0,18	0,12

Термограммы КЩУ регистрировались тепловизором марки TESTO 875-2 [110] при запуске испытуемой машины с продолжительностью работы 20 – 30 минут и шагом измерения 30 секунд.

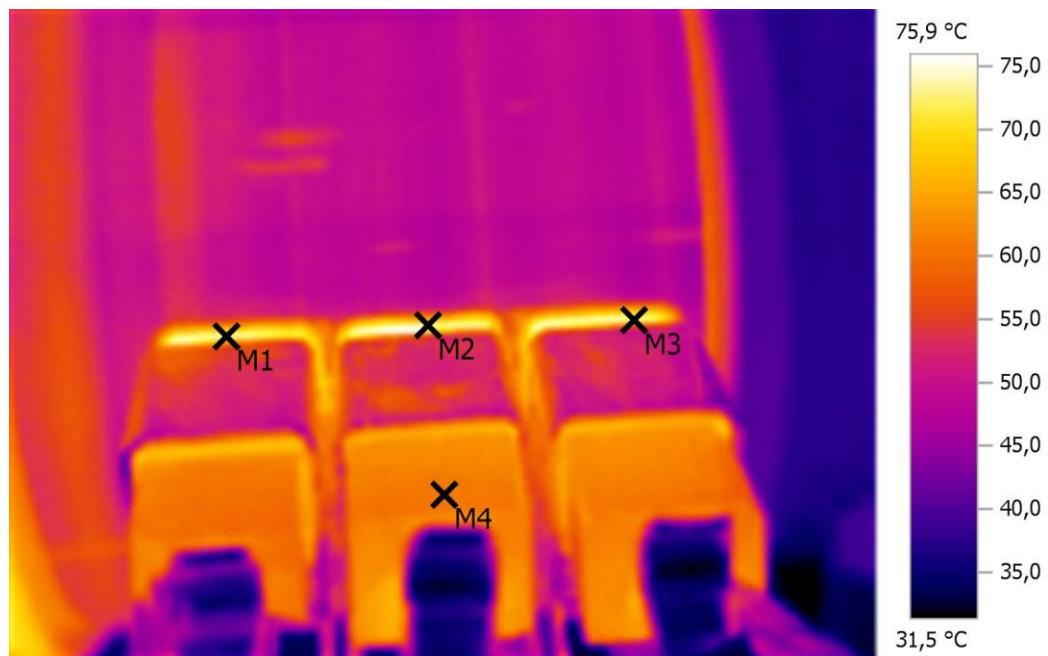


Рисунок 4.17 – Термограмма КЩУ, зафиксированная при длительности контроля 15 минут работы машины и $I_a=30$ А

Термограмма КЩУ после 15 минут работы машины приведена на рисунке 4.17, из которого видно, что максимальная температура достигается в зоне контакта щетка-коллектор M1, M2, M3. В точке на поверхности щетки с неконтактирующей стороны температура составляет $56,3^{\circ}\text{C}$, что ниже максимальной температуры.

Как установлено ранее, щетки нагреваются неравномерно вследствие влияния различных факторов: не все щетки притерты одинаково; нажатие на щетках различное, также возможно воздействие профиля коллектора [81].

Термограмма, приведенная на рисунке 4.18, фиксировалась при длительности контроля 20 минут. Температура на поверхности обмоток якоря и стали якоря постепенно возрастает, как и температура на поверхности «петушков». В точке M6, расположенной непосредственно на краю контакта щетка-коллектор, температура составляет $49,3^{\circ}\text{C}$, а в точке M5, расположенной на поверхности «петушков», температура составляет $48,3^{\circ}\text{C}$.

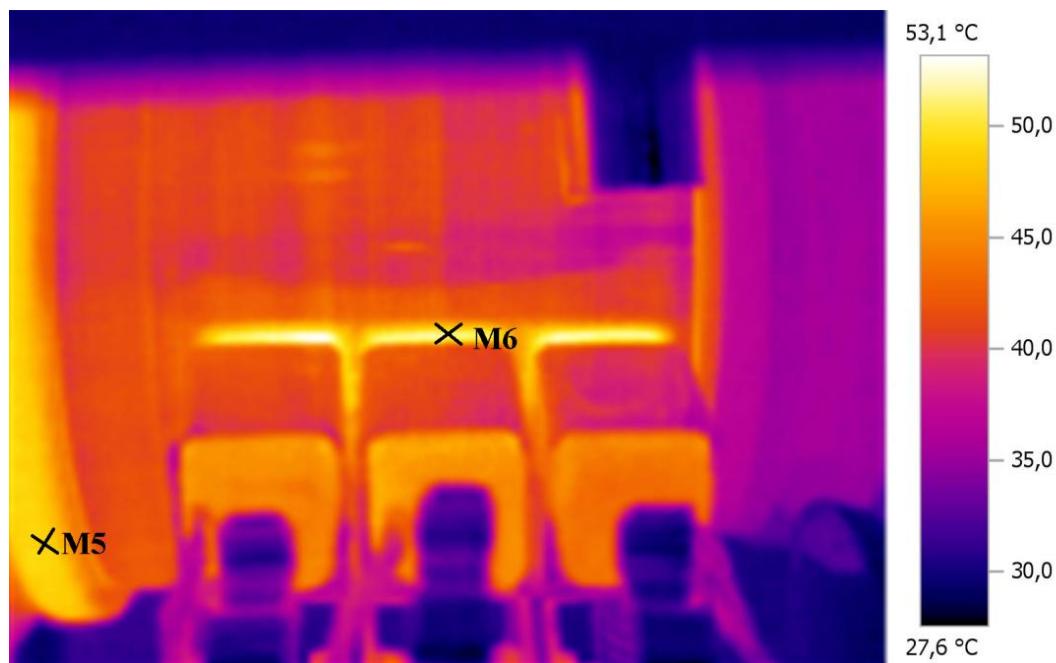


Рисунок 4.18 – Термограмма КЩУ, зафиксированная после 20 минут работы МПТ в номинальном режиме

Таблица 4.2 – Матрица ротатабельного uniform-планирования эксперимента типа 2k

Номер опыта	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	θ_{cp}			
						$\theta_{cp}^{<2>}$	$\theta_{cp}^{<3>}$	$\theta_{cp}^{<4>}$	$\theta_{cp}^{<10>}$
1	+	+	+	+	+	20,52	5	5,48	1,98
2	+	-	+	+	+	17,94	3,33	3,68	1,39
3	+	+	-	+	+	18,16	2,62	2,75	1,36
4	+	-	-	+	+	17,08	2,06	2,13	1,06
5	+	+	+	-	+	19,36	3,42	3,63	1,56
6	+	-	+	-	+	15,92	3,3	3,82	1,46
7	+	+	-	-	+	15,64	1,5	1,87	0,8
8	+	-	-	-	+	10,48	2,72	3,4	1,31
9	+	+	+	+	-	18,95	2,47	2,67	1,06
10	+	-	+	+	-	15,52	2,95	3,37	1,12
11	+	+	-	+	-	14,64	4,77	5,5	2,2
12	+	-	-	+	-	12,98	0,89	1,08	0,47
13	+	+	+	-	-	11,14	4,77	5,5	2,2
14	+	-	+	-	-	10,98	3,63	3,83	1,34
15	+	+	-	-	-	10,06	1,5	1,87	0,8
16	+	-	-	-	-	10,21	2,72	3,4	1,31
17	+2	+2	0	0	0	17,94	5,68	5,68	1,9
18	+2	-2	0	0	0	18,16	1,5	1,5	0,78
19	+2	0	+2	0	0	17,08	4	2,04	2,04
20	+	0	-2	0	0	19,36	3,3	3,5	1,31
21	+	0	0	+2	0	15,92	1,72	1,97	0,78
22	+	0	0	-2	0	15,64	3,2	3,5	1,31
23	+	0	0	0	+2	10,48	2,68	2,8	1,39
24	+	0	0	0	-2	18,95	7,68	8,17	2,72
25	+	0	0	0	0	15,52	4	4,48	1,34
26	+	0	0	0	0	14,64	4,4	4,18	1,7
27	+	0	0	0	0	12,98	4,1	2	1,4
28	+	0	0	0	0	11,14	2,4	3	2,4
29	+	0	0	0	0	10,98	3,6	5	1,8
30	+	0	0	0	0	10,06	2,1	2,5	1,24
31	+	0	0	0	0	10,21	2	3	1,18

Определение коэффициентов уравнения регрессии осуществлялось с помощью математического аппарата метода планирования эксперимента [30]. Для четырех входных факторов формировалась матрица ротатабельного униформ-планирования полного факторного эксперимента с четырьмя откликами: среднее приращение температуры θ_{cp} для длительности контроля 2, 30000, 4 и 10 минут.

Для аппроксимации функции отклика $\theta_{cp} = f(I_a, A, n, p_u)$ применен полином второй степени вида (4.2.2):

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 \quad (4.2.2)$$

С использованием программы центрального ротатабельного планирования второго порядка проведен эксперимент. Это позволяет получить модель, которая предсказывает значение параметра оптимизации с одинаковой точностью в любом от направлении и на равных расстояниях от центра плана. 0

Центральный композиционный ротатабельный план второго порядка состоит из плана полного факторного эксперимента типа 2^4 , шести опытов в «звездных точках» и семи опытов в центре плана.

4.3 Оценка адекватности уравнения регрессии

Чтобы оценить воспроизводимость результатов эксперимента, выполнены семь параллельных опытов в нулевой точке [69]. В центре плана четыре влияющих фактора находились в пределах нулевых уровней (таблица 2). Вычислена дисперсия воспроизводимости эксперимента по результатам этих опытов:

$$s_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \left[\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2 \right] \quad (4.3.1)$$

где n_0 – число параллельных опытов в нулевой точке,

y_u – значение отклика в u -ом опыте,

\bar{y} – среднее арифметическое значение отклика в n_0 параллельных опытах.

Дисперсия воспроизводимости эксперимента равна:

$$s_y^2 = 1,055.$$

По результатам эксперимента, выполненного в соответствии с принятым планом, получена оценка коэффициентов уравнения регрессии (4.3.2) – (4.3.5):

$$b_0 = \frac{A}{N} \left[2\lambda^2 (k+2) \sum_{j=1}^N y_j - 2\lambda c \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j \right]; \quad (4.3.2)$$

$$b_i = \frac{c}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \quad (4.3.3)$$

$$b_{il} = \frac{c^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j; \quad (4.3.4)$$

$$b_{ii} = \frac{A}{N} \left\{ c^2 [(k+2)\lambda - k] \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + c^2 (1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda c \sum_{j=1}^N y_j \right\}, \quad (4.3.5)$$

где j – номер опыта, $j = 0, 1, \dots, N$;

N – общее число опытов;

i, l – номер фактора, $i, l = 0, 1, \dots, k$;

k – число факторов;

x_{ij} – элементы X -матрицы условий эксперимента;

y_j – элементы Y -матрицы наблюдений.

Коэффициенты λ , A_1 и c уравнений (4.3.2) – (4.3.5) определяются по выражениям:

$$\lambda = \frac{k(n_c + n_0)}{(k+2)n_c}; \quad (4.3.6)$$

$$A_1 = \frac{1}{2\lambda[(k+2)\lambda - k]}; \quad (4.3.7)$$

$$c = \frac{N}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}, \quad (4.3.8)$$

где n_0 – число опытов в центре плана (число нулевых точек);

$$n_c = N - n_0; \quad (4.3.9)$$

Используя приведённые выше формулы, найдены коэффициенты уравнения регрессии (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Значения коэффициентов уравнений регрессии

Длительность	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{13}
2 мин	2,843	0,433	0,435	-0,144	-0,555	0,213
3 мин	3,229	0,534	0,479	-0,101	-0,406	0,426
4 мин	3,451	0,538	0,294	-0,155	-0,467	0,483
10 мин	1,580	0,198	0,178	-0,05	-0,093	0,164

Дисперсии коэффициентов регрессии определены по формуле:

$$s^2 \{b_i\} = \frac{1}{N} s_y^2; \quad (4.3.10)$$

Для проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии использовался t -критерий Стьюдента.

$$t_{p il} = \frac{|b_{il}|}{s\{b_i\}}; \quad (4.3.11)$$

Заданное значение критерия Стьюдента при 5% уровне значимости и числе степеней свободы $f = 16$ составляет 2,12.

Результаты расчета коэффициентов t -критерия Стьюдента приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчета коэффициентов t -критерия Стьюдента

Длительность	t_{p0}	t_{p1}	t_{p2}	t_{p3}	t_{p4}
2 мин	15,912	2,42	2,43	0,8	3,1
3 мин	17,5	2,89	2,59	0,55	2,2
4 мин	17,296	2,7	1,47	0,77	2,34
10 мин	20,54	2,56	2,3	0,65	1,21

Графически можно отразить значимость коэффициентов уравнения, соответствующих влияющим факторам: сила тока, уровень искрения, частота вращения, нажатие на щетку, в зависимости от длительности работы машины.

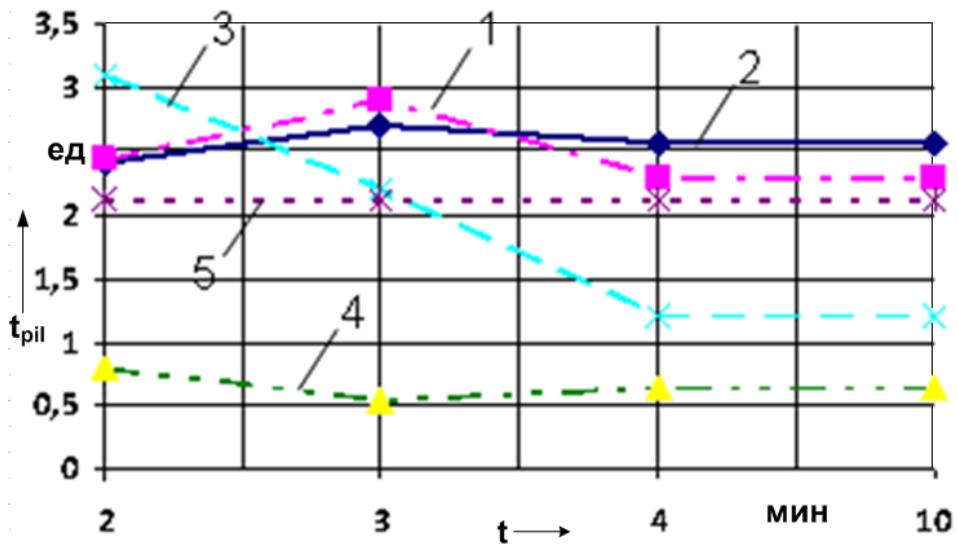


Рисунок 4.19 – Графическое отражение расчетных значений критерия Стьюдента

Адекватность полученной модели была проверена с помощью расчетного критерия Фишера:

$$F_p = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_y^2}, \quad (4.3.12)$$

где $s_{\text{ад}}^2$ – дисперсия адекватности.

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{s_R - s_E}{f}, \quad (4.3.13)$$

где f – число степеней свободы, $f = N - k' - (n_0 - 1)$;

k' – число статистически значимых коэффициентов регрессии.

$$s_R = \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad \text{и} \quad s_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2 \quad (4.3.14)$$

где y_j – экспериментальные значения функции отклика;

\hat{y}_j – расчетные значения функции отклика.

Расчетное значение F -критерия Фишера $F_p = 3,397$ меньше табличного $F_m = 4,74$ при 5%-ном уровне значимости. Следовательно, полученную математическую модель можно считать адекватной.

В результате получены уравнения регрессии для длительности контроля:

$$2 \text{ минуты} - \Delta\Theta_{\text{cp}}^{<2>} = 2,403 + 0,433 \cdot I_a + 0,435 \cdot A - 0,555 \cdot P_{u\mu};$$

$$3 \text{ минуты} - \Delta\Theta_{\text{cp}}^{<3>} \Delta T_{\text{cp}} = 3,229 + 0,534 \cdot I_a + 0,479 \cdot A - 0,406 \cdot P_{u\mu} + 0,292 \cdot I_a \cdot n;$$

$$4 \text{ минуты} - \Delta\Theta_{\text{cp}}^{<4>} \Delta T_{\text{cp}} = 3,451 + 0,538 \cdot I_a + 0,294 \cdot A - 0,467 \cdot P_{u\mu} + 0,483 \cdot I_a \cdot n;$$

$$10 \text{ минут} - \Delta\Theta_{\text{cp}}^{<10>} \Delta T_{\text{cp}} = 1,58 + 0,198 \cdot I_a + 0,178 \cdot A + 0,164 \cdot I_a \cdot n.$$

Коэффициенты уравнения приведены в относительных единицах, их необходимо пересчитать в абсолютные значения.

Для 2-минутного интервала:

$$f_1 = 2,403 + 0,433 * \frac{I_a - 21}{6} + 0,435 * \frac{A - 1,5}{0,25} - 0,555 * \frac{P_{u\mu} - 0,24}{0,06}$$

$$f_1 = 1,74A + 0,072I_a - 9,25P_{u\mu} + 0,5 \quad (4.3.15)$$

Для 3-минутного интервала:

$$f_2 = 3,229 + 0,531 * \frac{I_a - 21}{6} + 0,479 * \frac{A - 1,5}{0,25} - 0,406 * \frac{P_{u\mu} - 0,24}{0,06} + 0,292 * \frac{I_a - 21}{6} * \frac{n - 3000}{150}$$

$$f_2 = 1,916A - 0,885I_a - 0,007n - 6,77P_{u\mu} + 0,0003I_a n + 20,56 \quad (4.3.16)$$

Для 4-минутного интервала:

$$f_3 = 3,451 + 0,538 * \frac{I_a - 21}{6} + 0,294 * \frac{A - 1,5}{0,25} - 0,467 * \frac{P_{u\mu} - 0,24}{0,06} + 0,483 * \frac{I_a - 21}{6} * \frac{n - 3000}{150}$$

$$f_3 = 1,176A - 1,52I_a - 0,01n - 7,78P_{u\mu} + 0,00054I_a n + 35,482 \quad (4.3.17)$$

Для 10-минутного интервала:

$$f_4 = 1,58 + 0,198 * \frac{I_a - 21}{6} + 0,178 * \frac{A - 1,5}{0,25} + 0,164 * \frac{I_a - 21}{6} * \frac{n - 3000}{150}$$

$$f_4 = 0,712A - 0,513I_a - 0,004n + 0,0002I_a n + 11,299 \quad (4.3.18)$$

4.4 Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что нагрев в зоне коллекторно-щеточного узла происходит в два этапа: интенсивное повышение температуры зоны контакта в течение 2...4 минут в результате воздействия потерь непосредственно в зоне контакта $P_{конт}$, обусловленных механическим трением в контакте, протеканием тока через контакт, а также электродуговым искрением на сбегающем крае щетки. Дальнейшее повышение температуры зоны контакта вплоть до установившейся через 10 – 15 минут происходит в результате нагрева при протекании тока в меди коллектора и обмотке якоря.

2. На первых минутах работы машины нагрев в зоне КЩУ происходит под действием факторов как механической, так и электрической природы. Уровень искрения имеет значительное влияние на интенсивность нагрева в первые минуты работы машины, в последующем влияние данного фактора ослабевает. Влияние тока якоря на интенсивность нагрева зоны контакта щетка-коллектор с увеличением временного интервала измерения также уменьшается. Нажатие на щетку имеет значительное влияние на интенсивность нагрева на первых минутах работы МПТ, с приближением к 10-минутному интервалу данный фактор перестает влиять полностью.

3. Проведен полный факторный эксперимент с использованием экспериментальной установки на базе МПТ П-31М. Получены регрессионные уравнения интенсивности нагрева зоны контакта «щетка-коллектор», позволяющие оценивать влияние факторов электрической и механической природы на интенсивности нагрева. Уравнения могут быть использованы для анализа тепловых процессов в КЩУ и в процессе диагностирования его технического состояния.

5 МОДЕРНИЗАЦИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КЩУ МПТ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОГО ПАРАМЕТРА

Согласно анализу параметров, позволяющих диагностировать техническое состояние КЩУ, проведенному в главе 2, установлено, что в их число входят интенсивность нагрева в зоне контакта «щетка-коллектор», а также параметры профиля коллектора. Для реализации автоматизации процесса диагностирования, анализ данных параметров необходимо проводить с помощью специальных устройств и программного обеспечения, объединенного в единый комплекс.

Интенсивность искрения определяется с помощью тепловизора с последующей обработкой термограмм на ЭВМ. Исследована возможность использования для данных целей тепловизора TESTO 875-1 со съемным накопителем данных. Для автоматизированного расчета интенсивности нагрева необходимо разработать программное обеспечение, позволяющее обрабатывать единовременно набор термограмм.

Параметры профиля коллектора возможно рассчитывать, обрабатывая профилограммы. Это реализовано в программе для ЭВМ «PKP Median Soft», разработанном на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС. Программа фильтрует и обрабатывает сигнал прибора контроля профиля коллектора ПКП-4М. Разработка предложенного аппаратно-программного комплекса подразумевает объединение тепловизора, прибора ПКП-4М, а также программного обеспечения для расчета диагностических параметров в едином комплексе.

5.1 Способ определения температуры зоны контакта щетка-коллектор при обработке термограмм

Регистрация термограмм КЩУ может проводится в двух режимах: видеозаписи и фото, в зависимости от возможностей тепловизора. Как правило, стой-

мость приборов для видео-регистрации термограмм значительно выше, чем стоимость тепловизоров только с возможностью фото-регистрации.

Для тепловизионного обследования КЩУ требуется регистрировать термограммы в течение времени не менее 3 минут. Целью регистрации термограмм является определение интенсивности нагрева зоны контакта щетка-коллектор. Для этого требуется определять температуру точки зоны контакта щетка-коллектор на протяжении времени контроля.

При использовании фото-тепловизора после рабочего сеанса регистрации термограмм пользователь получает набор из нескольких десятков файлов. Каждый из файлов содержит термограмму, зарегистрированную в определенный момент времени. Для автоматизации процесса диагностирования необходимо применить программную обработку термограмм – данных, полученных с тепловизора.

Программный обработчик должен выполнять 2 основные функции для определения интенсивности нагрева: 1) на термограмме определять температуру видимой зоны контакта щетка-коллектор; 2) обрабатывать набор из нескольких десятков термограмм с привязкой каждой термограммы к времени.

Как показали ранее проведенные расчеты и экспериментальные исследования, в зоне КЩУ максимальная температура нагрева наблюдается в зоне контакта щетка-коллектор. Для определения температуры контакта достаточно определять на термограмме максимально нагретую точку.

При термографическом обследовании КЩУ (рисунок 5.1) машины ПЗ1М, работающей в номинальном режиме при отсутствии искрения, видно, что максимальная температура (52,6 °C и 51 °C) в точках зоны контакта М2 и М3 соответственно. На поверхности петушков в точке М1 температура составила 48,2 °C. Тело щетки с противоположной точки зоны контакта нагрелось менее всего (точка М4, 43,6 °C).

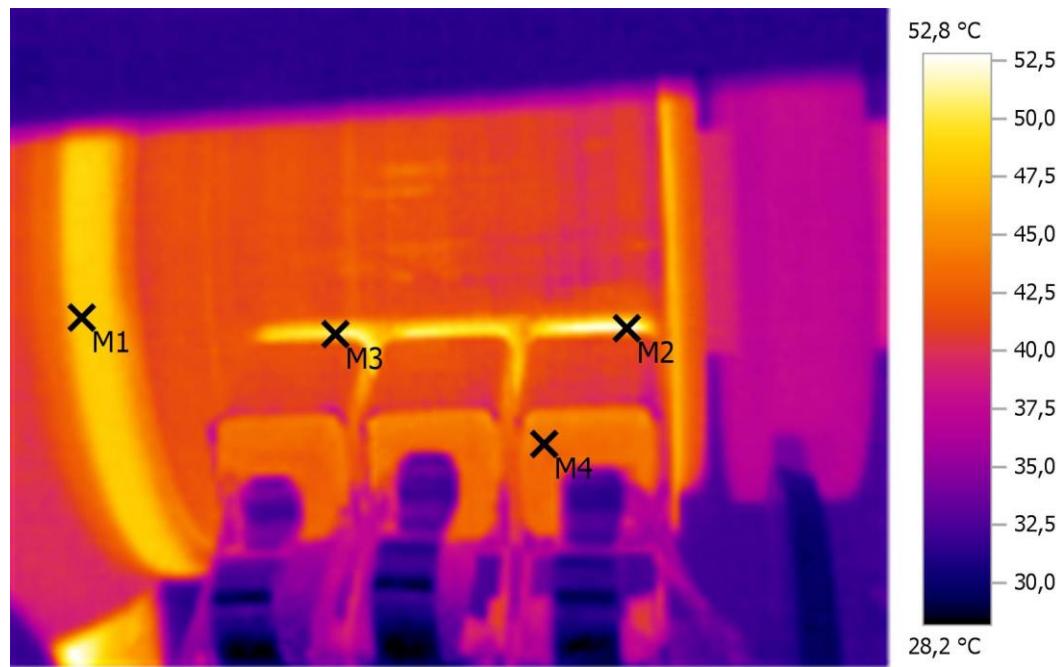


Рисунок 5.1 – Термограмма КЩУ в номинальном режиме работы

В режиме работы машины при искрении температура зоны контакта щетка-коллектор значительно превышает температуру «петушков» и щетки. На рисунке 5.2 приведена термограмма, зарегистрированная для машины П-31М при искрении в 1 балл.

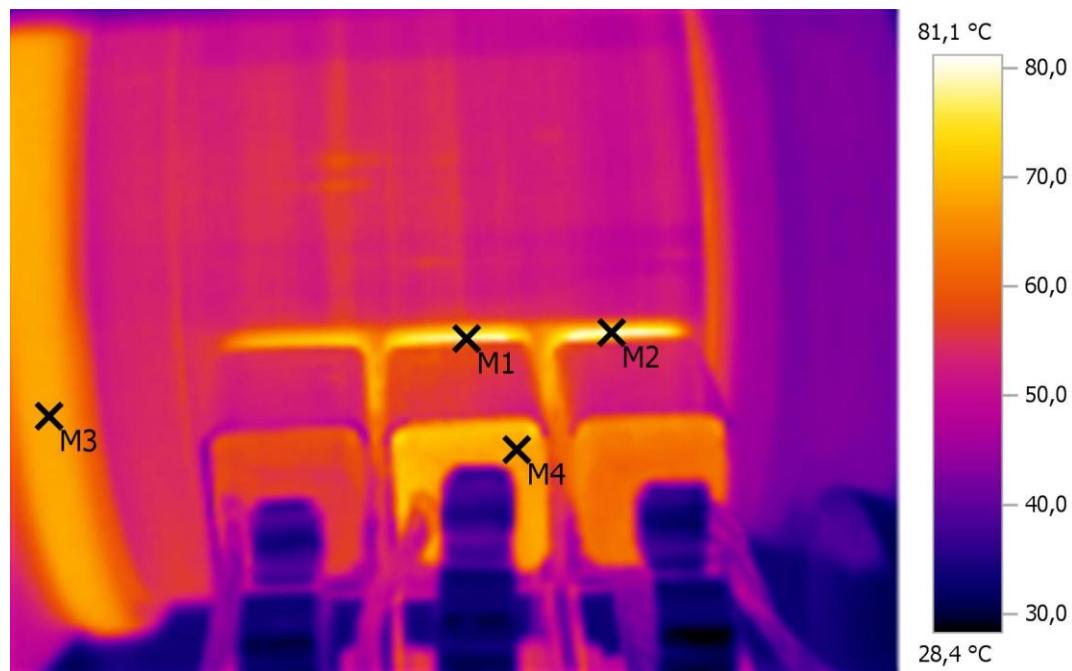


Рисунок 5.2 – Термограмма КЩУ при искрении в 1 балл

M1 и M2 – точки максимального нагрева на термограмме с температурой 80,6 °C и 81 °C соответственно. На поверхности «петушков» в точке M3 температура 66 °C. В точке M4 на поверхности одной из щеток 73 °C.

5.2 Обработка кривых нагрева зоны контакта щетка-коллектор

Термограммы регистрируются не менее 10 минут с шагом регистрации 30 секунд. Данный интервал позволяет определить интенсивность нагрева. По полученным температурам в зоне контакта щетка-коллектор строится кривая нагрева. Интенсивность нагрева определяется по формуле (4.2.1) по первым 6 точкам на кривой, так как интервал в 3 минуты является наиболее информативным.

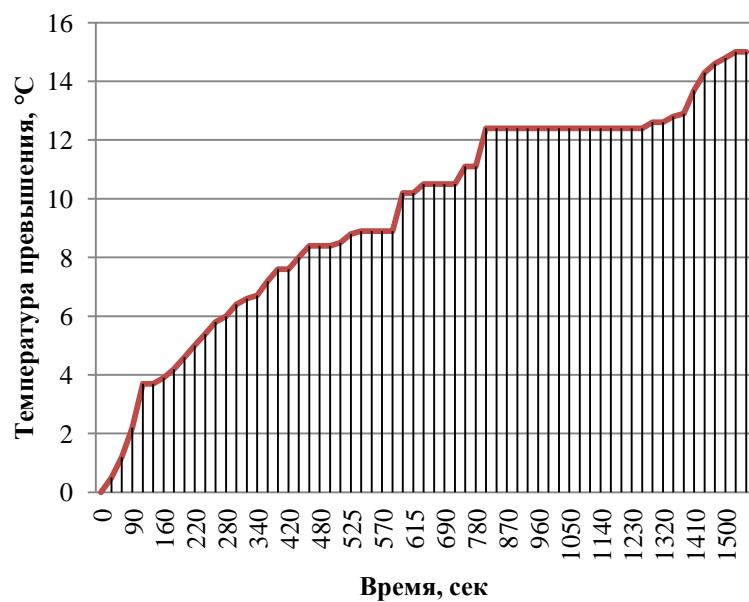


Рисунок 5.3 – Диаграмма нагрева зоны контакта «щетка-коллектор» при токе якоря 30 А машины П-31М в номинальном режиме работы

На рисунке 5.3 приведена кривая нагрева для двигателя П-31М в режиме повышенного тока якоря. Линии проекции указывают точки регистрации температуры для расчета интенсивности нагрева.

Процесс обработки кривых нагрева для расчета интенсивности следует автоматизировать. Тепловизор имеет съемное запоминающее устройство – карту памяти. Термограммы регистрируются и сохраняются на носителе. После рабоче-

го сеанса данные доступны для программной обработки. Алгоритм обработки кривых приведен на рисунке.

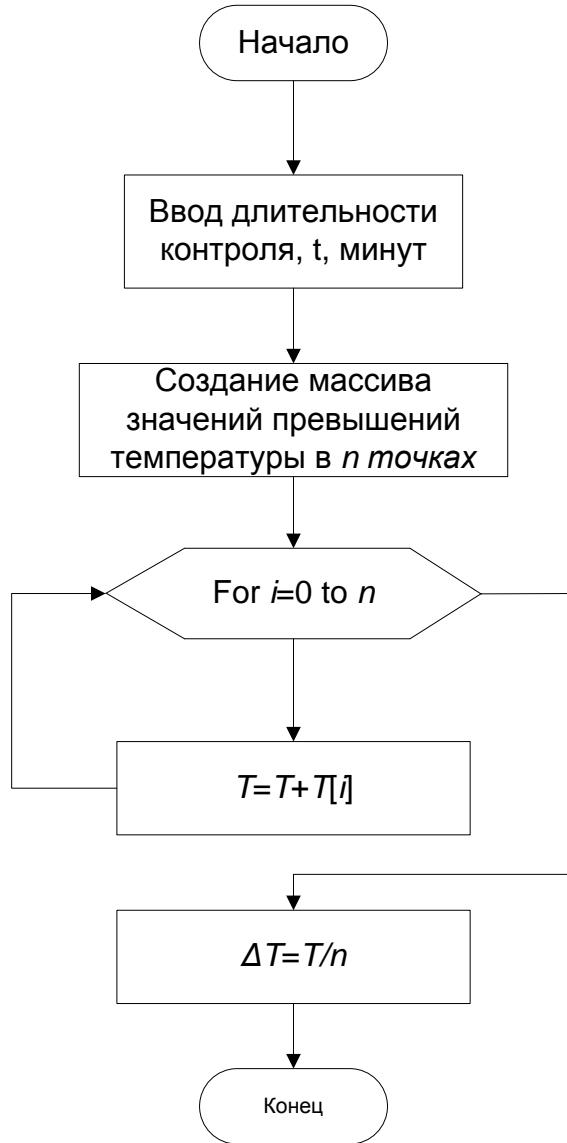


Рисунок 5.4 – Блок-схема алгоритма расчета средней интенсивности нагрева зоны контакта «щетка-коллектор»

5.3 Программная реализация расчета интенсивности нагрева

Разработана программа для ЭВМ «Collector-Brush Heat» [97], позволяющая обработать термограммы, полученные в процессе рабочего сеанса. Выходные данные программы – кривая нагрева зоны контакта щетка-коллектор и значение интенсивности нагрева на временном промежутке 3 минуты.

Отдельно взятая термограмма представляет собой массив данных, содержащий информацию о расположении точки на снимке и ее температуру. Файл термограммы также содержит данные о дате и времени фиксации, что позволяет вводить переменную времени. Это позволяет выстраивать термограммы в хронологическом порядке.

Рабочее окно программы «Collector-Brush Heat» представлено на рисунке 5.5.

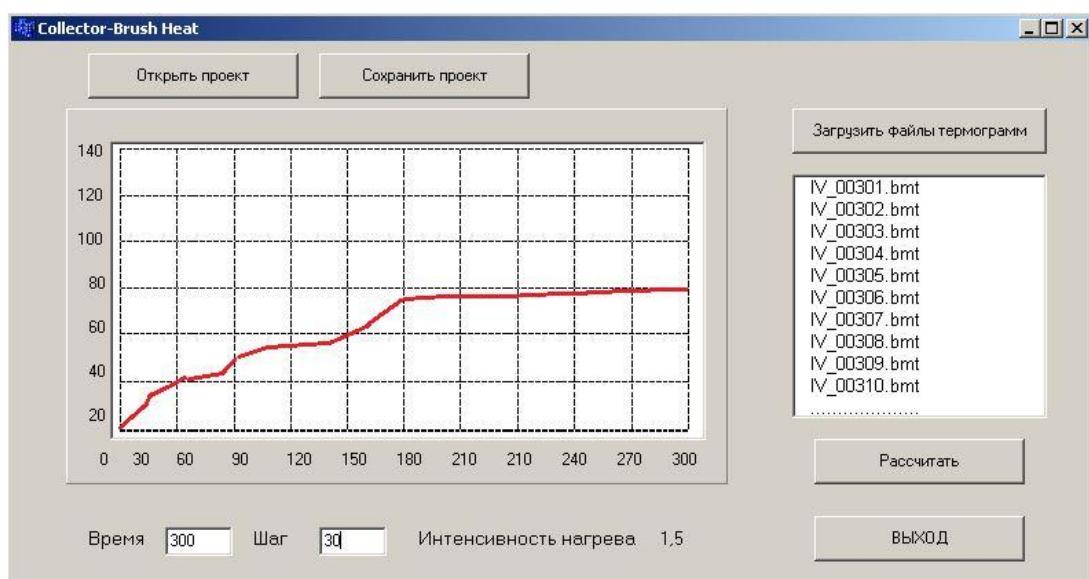


Рисунок 5.5 – Окно программы "Collector-Brush Heat"

При начале работы с программой пользователю требуется загрузить файлы термограмм рабочего сеанса, полученные с помощью тепловизора в формате «ВМТ» при нажатии на кнопку «Загрузить файлы термограмм». В текстовом поле под кнопкой отображается список загруженных термограмм.

Далее требуется определить временной интервал для расчета интенсивности нагрева в поле «Время». По умолчанию значение временного интервала составляет 300 секунд. Также необходимо задать значение временного шага в поле «Шаг». По умолчанию значение шага составляет 30 секунд.

При нажатии на кнопку «Рассчитать» программа рассчитывает интенсивность нагрева зоны контакта щетка-коллектор для заданного временного интервала с заданным шагом по алгоритму, представленному на рисунке 5.5.

После расчета в поле «Интенсивность нагрева» отображается значение интенсивности нагрева для данной кривой нагрева. В графическом поле отображается масштабированная кривая нагрева для заданного временного интервала.

Возможности программы подразумевают формирование проекта – набора термограмм для обработки с рассчитанной по ним кривой нагрева. С помощью кнопки «Сохранить проект» создается файл проекта в формате «DAT», что позволяет обратиться повторно к набору термограмм и кривой нагрева при повторном запуске программы и нажатии кнопки «Открыть проект».

Интерфейс программного обеспечения содержит следующие функции:

- загрузка файлов термограмм в формате «ВМТ»;
- графическое построение кривой нагрева;
- отображение рассчитанной интенсивности нагрева.

5.4 Функциональная схема аппаратно-программного комплекса

Аппаратно-программный комплекс применяется для комплексной оценки технического состояния КЩУ коллекторной машины. Функциональная схема комплекса приведена на рисунке. Один из блоков комплекса – прибор ПКП-4М, с которого аналоговый сигнал вихревокового датчика поступает на АЦП микроконтроллера для последующей передачи на ЭВМ. Данные о профиле коллектора накапливаются в блоке памяти микроконтроллера и передаются после измерения. На ЭВМ осуществляется фильтрация и обработка сигнала. По полученным данным строится профилограмма. По ней рассчитываются диагностические параметры для оценки состояния поверхности коллектора.

Параметры профиля коллектора, характеризующие его воздействие на процесс коммутации, а именно: средний уровень искрения, СКО интенсивности искрения по коллектору, СКО интенсивности искрения во времени - регистрируются с помощью прибора контроля коммутации ПКК-5М.

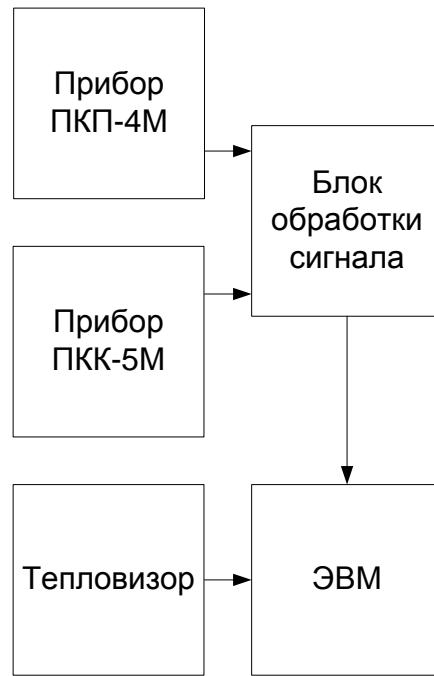


Рисунок 5.6 – Функциональная схема диагностического комплекса

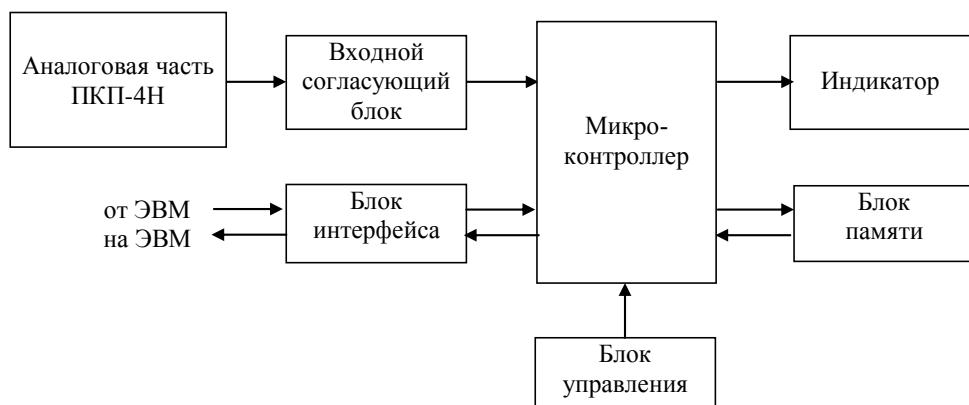


Рисунок 5.7 – Структурная схема цифрового регистратора прибора ПКП-4М

Существует множество способов контроля профиля коллектора как в статических, так и в динамических режимах работы машины постоянного тока на основе использования вихретокового метода контроля профиля коллектора. На основе на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа разработан прибор ПКП-4М [85,79]. Функциональная схема данного прибора приведена на рисунке 5.8.

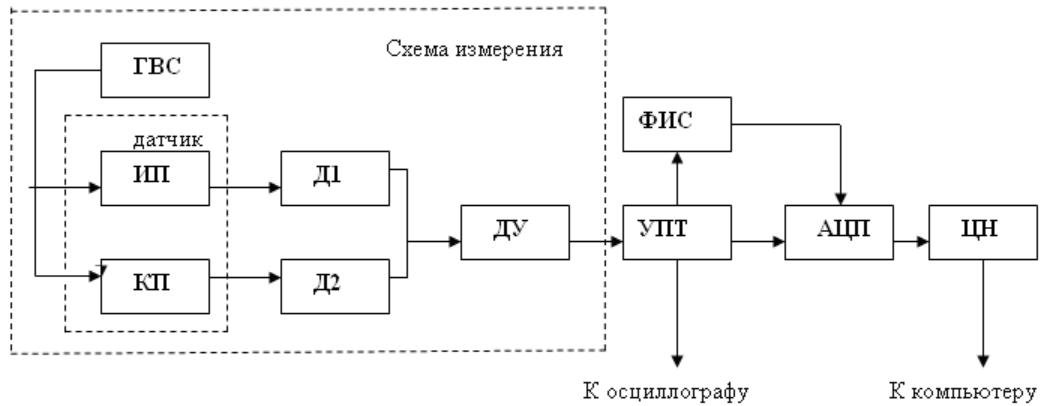


Рисунок 5.8 – Функциональная схема прибора ПКП-4М

ГВС – генератор высокочастотного сигнала; ИП – измерительный преобразователь; КП – компенсационный преобразователь; Д1, Д2 – детекторы; ДУ – дифференциальный усилитель; УПТ – усилитель постоянного тока; ФИС – формирователь импульсов считывания; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЦН – цифровой накопитель

В данном приборе используется дифференциальный вихревоковый параметрический преобразователь перемещений контролируемой поверхности, осуществляющий амплитудную модуляцию высокочастотного сигнала в функции расстояния между преобразователем и поверхностью. Осциллограмма сигнала с выхода схемы измерения приведена на рисунке 5.9.



Рисунок 5.9 – Осциллограмма профиля коллектора

О состоянии рабочей поверхности коллектора можно судить по следующим диагностическим параметрам: среднее квадратическое отклонение высот коллекторных пластин, биение коллектора, минимальное значение и среднее квадрати-

ческое отклонение второй производной функции профиля коллектора [87]. Чтобы рассчитать данные параметры, необходимо знать высоту пластин по всей окружности коллектора.

Вследствие наличия краевого эффекта вихретокового датчика, сигнал от каждой коллекторной пластины имеет колоколообразную форму (рис. 5.10). Однако при определении профиля коллектора и соответствующих диагностических параметров интерес представляет не форма этого сигнала, а его амплитудное значение. Для выделения максимальных значений в приборе ПКП-4М предусмотрены блок формирователя импульсов считывания ФИС и АЦП [4].

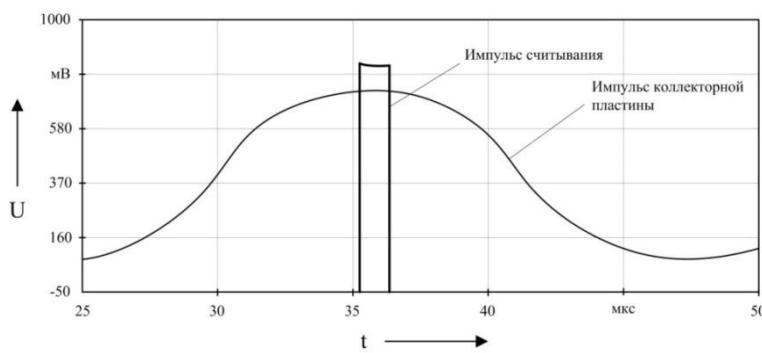


Рисунок 5.10 – Форма сигнала от коллекторной пластины

При современном уровне микропроцессорной техники сигнал, поступающий с дифференциального усилителя, может непрерывно оцифровываться с помощью микроконтроллера, способного заместить блоки АЦП, ФИС и ЦН. Непрерывное оцифровывание сигнала позволяет более точно обрабатывать информацию перед построением профиля коллектора.

Для этого необходимо выбрать микроконтроллер, обладающий АЦП с частотой дискретизации не менее 200 КГц и достаточной памятью для использования в качестве цифрового накопителя. Также следует учитывать частоту процессора, так как при непрерывном оцифровывании осуществляются операции с большим количеством точек.

Используя данные теста микроконтроллеров Drystone [88], можно сделать вывод, что в данном применении целесообразно использовать контроллер Stellaris Cortex-M3. Производительность данных микроконтроллеров примерно на 25 %

выше микроконтроллеров с процессорами, выполненных по классической ARM технологии. Сравнительные графики производительности и объема кода в различных областях применения приведены соответственно на рисунке 5.11.

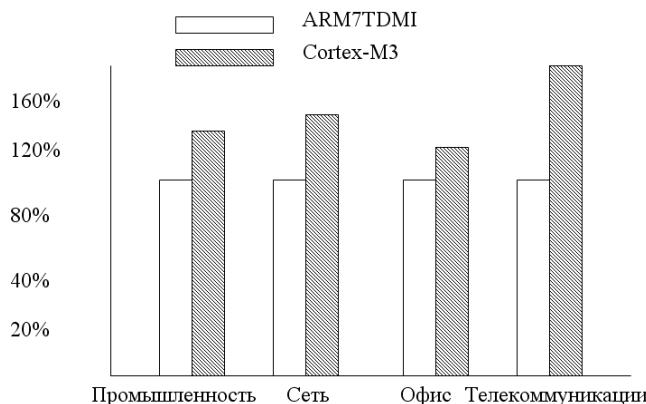


Рисунок 5.11 – Сравнение производительности процессоров ARM7TDMI и Cortex-M3 в различных приложениях

В процессорах Cortex-M3 реализован новый набор команд, что позволяет достигнуть на 70 % большей производительности на единицу тактовой частоты, чем классические ARM процессоры на базе ARM7TDMI-S, использующие классический набор команд Thumb, и на 35 % более производительности, чем те же процессоры, выполняющие базовый набор команд ARM (по данным теста Drystone).

Процессоры на базе архитектуры Cortex-M3 разрабатывались с целью обеспечения как можно более быстрого и простого создания эффективного программного кода без использования ассемблерных вставок. Данные процессоры используют упрощенную стековую модель программирования, в которой удалось совместить стандартные команды ARM с несколько переработанными и адаптированными к ядру ARM идеями, применявшимися в 8- и 16-разрядных микроконтроллерах, доказавшими свою высокую эффективность.

Переферийные устройства микроконтроллера Stellaris Cortex-M3 позволяют без труда адаптировать его для использования с прибором ПКП-4М в качестве АЦП, а также накопителя информации. Структура интерфейсов и переферийных устройств микроконтроллеров семейства Stellaris приведена на рисунке 5.12.

Встроенные аналоговые компараторы и АЦП обеспечивают возможность аппаратной и программной оптимизации параметров системы, при этом в микроконтроллере реализован 10-битный четырехканальный АЦП производительностью 1000 KSPS.

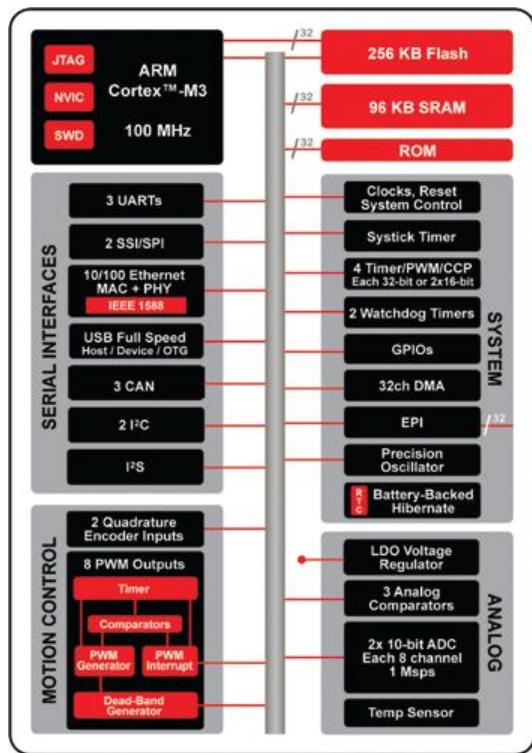


Рисунок 5.12 – Обобщенная структура микроконтроллеров семейства Stellaris

Данный контроллер позволяет производить как одноконтактное измерение, так и определять разность потенциалов на двух контактах. Также с помощью данного модуля возможно измерение температуры на контактах. Максимальная измеряемая величина напряжения составляет 3 В.

С применением микроконтроллера Stellaris Cortex-M3, собран образец устройства контроля профиля коллектора. Микроконтроллер обладает возможностью подключения карты памяти microSD, что позволяет расширить внутреннюю память устройства и значительно увеличить количество измерений, проводимых за один сеанс работы устройства ПКП-4М и сохраняемых в памяти. Также появилась возможность применять фильтрацию сигнала, получаемого с АЦП, непосредственно на микроконтроллере.

В основу обработки аналогового сигнала профиля коллектора положен алгоритм медианной фильтрации [81]. Алгоритм позволяет устраниить импульсные помехи [85]. При использовании Stelaris Cortex-M3 медианную фильтрацию можно программно интегрировать непосредственно в микроконтроллер, что позволяет передавать уже «чистые» данные о профиле коллектора на персональный компьютер для последующего анализа.

5.5 Достоверность диагностирования на основе принятой модели

При разработке любого средства диагностирования одним из основных пунктов является определение параметров качества выполняемого диагностического процесса. Это обстоятельство обусловлено тем, что при любом, методологически верном построении диагностического процесса, имеют место ошибки, причем измеряемые величины и возникающие погрешности измерений являются случайными величинами.

Любое средство диагностирования подразумевает возникновение ошибки с некоторой вероятностью. Ошибка может быть обусловлена как недостоверным определением работоспособного состояния, так и недостоверным определением дефекта диагностируемой системы. Возникающие погрешности и измеряемые величины являются случайными величинами.

ГОСТ определяет параметры диагностирования по точности как численное значение вероятности ошибки P_{ij} , причем $i \neq j$ [18]. Помимо этих параметров, также рассматривается достоверность D , называемая вероятностью верного диагностирования, являющаяся обобщенной величиной [67].

Когда имеет место дифференциальное диагностирование состояния, которое имеет два возможных значения, вероятность ошибки по ГОСТу, характеризуется величинами вида технического состояния. Величина $P_{1,2}$, является вероятностью совместного наступления следующих событий: объект признан неработоспособным, но находится в технически исправном состоянии. И наоборот, величина $P_{2,1}$ описывает вероятность совместного наступления двух событий: объект

признан работоспособным, но находится в неработоспособном состоянии. В случае, когда диагноз формируется на основании нескольких диагностических признаков, $P_{1.2}$ рассчитывают по выражению (5.5.1):

$$P_{1.2} = \prod_{i=1}^n P_i - \prod_{i=1}^n (P_i - P_{i\alpha}), \quad (5.5.1)$$

где P_j – априорная вероятность нахождения признака в допустимом интервале;

$P_{i\alpha}$ – вероятность ложного отказа;

n – количество диагностических параметров.

Величина $P_{2.1}$ находится по формуле (5.5.2):

$$P_{2.1} = \prod_{i=1}^n (P_i - P_{i\alpha} + P_{i\beta}) - \prod_{i=1}^n (P_i - P_{i\alpha}), \quad (5.5.2)$$

$P_{i\beta}$ – вероятность наличия необнаруженного отказа.

Степень соответствие фактического состояния объекта результатам диагностирования характеризуется достоверностью. Она зависит от стабильности параметров, точности измерения, выбранных допустимых значений параметров и полученного интервала и состояния средств диагностирования. В численном выражении достоверность D определяется:

$$D = \prod_{i=1}^n (1 - P_{i\alpha} - P_{i\beta}). \quad (5.5.3)$$

Найдем величины, входящие в вышеприведенные формулы (5.5.1) – (5.5.3).

Любой диагностический параметр x_i является случайной величиной, которая имеет некоторую функцию плотности вероятности распределения $f_{i1}(x)$. Чтобы отыскать априорную вероятность попадания диагностического параметра в рабочий интервал, применяется интегральная оценка:

$$P_i = \int_{x_{i\min}}^{x_{i\max}} f_{i1}(x) dx, \quad (5.5.4)$$

где $x_{i\min}$ – нижняя граница интервала допуска;

$x_{i\max}$ – верхняя граница интервала допуска.

Существует вероятность наличия ошибок $P_{i\alpha}$ и $P_{i\beta}$ проектируемых средств диагностирования, обусловленная наличием погрешности измерения Δ_{ix} . Если функция плотности распределения диагностического параметра непрерывна и монотонно изменяется, рассматривается вероятность в окрестности допускаемого значения. Если параметр имеет интервальный допуск, то значения меньше $x_{i\min} - \varepsilon_i$ и больше $x_{i\max} + \varepsilon_i$ свидетельствуют о неработоспособности объекта, а значения в пределах интервала от $x_{i\min} - \varepsilon_i$ до $x_{i\max} + \varepsilon_i$ об исправном состоянии. Интервал неопределенности $2\varepsilon_i$ от следующих факторов: значения погрешности измерения, среднего квадратического отклонения функции погрешности измерений. Таким образом, вероятность ложного отказа $P_{i\alpha}$ определяется из выражения:

$$P_{i\alpha} = \int_{x_{i\min} - \varepsilon_i}^{x_{i\max}} f_{i1}(x) \left[\int_{x_{i\min} - \varepsilon_i}^{+\infty} f_{i2}(\Delta) d\Delta \right] dx, \quad (5.5.5)$$

$f_{i1}(x)$ – плотность распределения параметра x_i ;

$f_{i2}(\Delta)$ – плотность распределения погрешности измерения параметра x_i .

Поскольку в нашем аппаратно-программном комплексе используются два средства измерения: тепловизор и прибор контроля профиля коллектора, погрешности измерения диагностических параметров будут зависеть от погрешностей измерения этих приборов. В литературе [54] рассмотрены законы распределения наиболее распространенных средств измерения.

В состав аппаратно-программного комплекса входят тепловизор и прибор контроля профиля коллектора ПКП-4М. Термограммы регистрируются и сохраняются в память съемного носителя данных. С прибора ПКП-4М данные переда-

ются на ЭВМ посредством порта RS-232 для последующей обработки. В измерениях и расчетах погрешность возникает на этапе регистрации профилограмм и термограмм. При расчетах параметров по кривым нагрева и термограммам используется программное обеспечение «*PKP Median Soft*» и «*Collector-Brush Heat*». Диагностирование проводится в деповских условиях, в закрытом цехе, поэтому влияние температуры окружающей среды не учитывается. Кривые нагрева строятся по превышениям температуры на элементах КЩУ.

Для информационного канала, измеряющего тепловой параметр КЩУ существует погрешность, определенная для тепловизора паспортом, $\gamma_t = 2\%$. При измерении формируется набор термограмм, подразумевающий 10 измерений.

Погрешность прибора контроля профиля коллектора определяется чувствительностью измерительного канала, $\gamma_n = 5\%$. Количество измерений определяется количеством коллекторных пластин.

Возникновение ошибки при регистрации профилограмм и термограмм представляют собой независимые события, следовательно, вероятность наличия ошибки хотя бы на одном измерительном устройстве определяется суммой вероятностей этих событий:

$$P_{1.2} = P_1 + P_2. \quad (5.5.6)$$

Выражения для ложного и необнаруженного отказов в общем виде имеют вид:

$$P_{P\alpha} = \int_{x_{P\alpha} - \varepsilon_P}^{x_{P\alpha}} f_P(x) \left[\int_{x_{P\alpha} - x}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\Delta)} e^{-\frac{\Delta^2}{2(\sigma(\Delta))^2}} d\Delta \right] dx. \quad (5.5.7)$$

Рассчитанные вероятности измерения сведены в таблице 5.5.1.

Таблица 5.5.1 – Точностные параметры диагностирования

Параметр	P	P _{1.2}	P _{2.2}	D
Тепловизор и ПКП-4М				
η	0,05		0,07	0,0023
$\Delta\Theta_{cp}$	0,02			0,9277

Данные в таблице 5.5.1 свидетельствуют о том, что достоверность диагностирования с использованием аппаратно-программного комплекса составляет 0,9277.

5.6 Оценка технико-экономической эффективности использования предложенного аппаратно-программного комплекса

Для предложенного аппаратно-программного комплекса проведена оценка экономической эффективности в соответствии с «Методикой расчета эффективности инноваций на железнодорожном транспорте» [14] и «Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиций на железнодорожном транспорте» [48].

5.6.1 Методика оценки экономической эффективности

Оценка экономической эффективности инвестиционных проектов позволяет сделать выводы о качестве удовлетворения потребностей субъектов хозяйственной деятельности в различных сферах услуг, промышленности и перевозок, а также удовлетворения потребностей населения.

Существует определенный набор основных принципов, которые могут быть применены к любым типам инвестиционных проектов [104]:

- рассмотрение проекта на протяжении всего его жизненного цикла (расчетного периода), от проведения прединвестиционных исследований до прекращения проекта;

- сопоставимость условий сравнения различных вариантов проекта;
- принцип положительности и максимума эффекта;

- учет фактора времени;
- учет инфляции;
- учет только предстоящих затрат и поступлений;
- учет наиболее существенных последствий проекта.

Существует расчетный период, в пределах которого осуществляется на протяжении расчетного периода, его длительность зависит от некоторых факторов: достижения запланированной прибыли, срока службы оборудования, требований инвесторов и других.

Запланированный расчетный период обычно состоит из определенного количества шагов. Один шаг – один год. Прогнозные и базовые цены используются для стоимостной оценки результатов.

Разновременные показатели могут быть соизмерены путем приведения к расчетному году t_p или к начальному периоду. Разновременные затраты, результаты и эффекты могут быть соизмерены через норму дисконта E_m , которая равна приемлемой для инвесторов норме дохода на капитал.

Минимальное значение дисконта E_m составляет банковскую процентную ставку по депозитным вкладам. Для крупных инвестиционных проектов норма дисконта E_m учитывает также интересы государства по социальным, экономическим и экологическим результатам.

Для приведения результатов и затрат к базисному моменту времени необходимо умножить их на модифицированный коэффициент дисконтирования (учитывающий инфляцию) α_t^m , он определяется по формуле [14]:

$$\alpha_t^m = \frac{1}{(1 + E_m)^t}, \quad (5.6.1)$$

где t – номер шага расчета.

E_m – модифицированная норма дисконта:

$$E_m = \left(\frac{1+E}{1+\frac{P}{100}} \right) - 1 \quad (5.6.2)$$

где E – норма дисконта без учета инфляции, $E = 0,1$;

P – уровень инфляции (в расчетах принято $P = 9\%$)

Общая эффективность включает в себя:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- индекс доходности (ИД);
- срок окупаемости инвестиций (T_{ok}).

Чистый дисконтированный доход (интегральный эффект) является суммой всех текущих эффектов за расчетный период, или превышением интегральных доходов над интегральным затратами.

При постоянной норме дисконта величина ЧДД, приведенная к базисному моменту времени, определяется по формуле:

Величина ЧДД при постоянной норме дисконта, приведенный к базисному моменту времени, определяется по формуле [104]:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \frac{1}{(1+E_m)^t} \quad (5.6.3)$$

где R_t – стоимостная оценка результатов на t -ом шаге расчета;

Z_t – затраты (текущие издержки и инвестиции), осуществляемые на том же шаге;

T – горизонт расчета.

При ЧДД большем нуля инвестиционный проект является эффективным и рассматривается уже вопрос о его принятии. Чем выше ЧДД, тем привлекательнее проект для инвесторов.

Отношение ЧДД к величине капиталовложения называется индексом доходности [48]:

$$ИД = \frac{\sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \frac{1}{(1+E_m)^t}}{\sum_{t=0}^T K_t \frac{1}{(1+E_m)^t}} \quad (5.6.4)$$

Когда величина ИД > 0 , проект можно считать экономически эффективным, при ИД < 0 проект неэффективен.

Период окупаемости инвестиций $T_{ок}$ показывает, через какое время окупаются вложенные инвестиции от начала реализации проекта. Сверх этого периода интегральный эффект становится неотрицательным. Для расчета окупаемости используется равенство [14]

$$\sum_{t=0}^{T_{ок}} \frac{(R_t - Z_t)}{(1+E_m)^t} = \sum_{t=0}^{T_{ок}} K_t \frac{1}{(1+E_m)^t} \quad (5.6.5)$$

Чем короче период окупаемости, тем привлекательнее проект для инвесторов. Этот показатель отражает скорость, с которой инвестиции будут возвращены и доступны для дальнейших вложений.

5.6.2 Определение экономического эффекта от улучшения коммутации

Данный аппаратно-программный комплекс позволяет выявить различные неисправности в работе, приводящие к чрезмерному нагреву в зоне КЩУ. Большинство неисправностей приводят к нарушению коммутации, а, следовательно, и к качеству функционирования.

Существенное нарушение коммутации может быть вызвано действием различных факторов, но, что важно для процесса эксплуатации, это приводит к выходу машины из строя и внеплановому ремонту.

Наиболее разрушительным эффектом нарушения коммутации является появление искрения в щеточном контакте. Умеренное искрение приводит к повышенному уровню износа. При интенсивном искрении могут возникать серьезные неисправности, такие, как, к примеру, выгорание коллекторных пластин. При правильном и своевременном диагностировании, устранении неполадок и точной

настройке значительно снижается искрение. Эффективность настройки коммутации оценивается с помощью критерия K_s [81]:

$$K_s = \frac{V_s^0 + V_m}{V_s' + V_m}, \quad (5.6.6)$$

где V_s^0 и V_s' – эрозионный износ щеточного контакта при наличии искрения до и после настройки коммутации;

V_m – износ щеточного контакта при механическом трении, при прохождении тока без электродугового искрения [81].

Известно, что эрозионный износ V_s на порядок выше V_m . Эрозионный износ обусловлен не только переносом материала при горении дуги, но и повышенным износом контактной пары при повышении шероховатости коллекторных пластин из-за выгорания меди.

Учитывая, что $\frac{V_s}{V_m} \gg 1$, выражение можно преобразовать:

$$K_s \approx \frac{V_s^0}{V_s'} \quad (5.6.7)$$

Допустим, что без использования предложенного аппаратно-программного комплекса в программе испытаний выход электродвигателей в процентном отношении ко всему объему оборудования на выходе по классам коммутации имел следующие значения: [81]:

$$2 - 3\%; 1\frac{1}{2} - 37\%; 1\frac{1}{4} - 45\%; 1 - 15\%.$$

В таком случае усредненный класс коммутации для выпускаемого из ремонта оборудования $\bar{I}_0 = 1,328$ балла.

При улучшении среднего класса коммутации на 3% интенсивность искрения составляет $\bar{I}_1 = 1,328 \cdot 0,97 = 1,288$ балла.

Для ТЭД ТЛ-2К1 с классом искрения $\bar{I}_0 = 1,328$ балла произведение средней и среднеинтегральной длительности искрения $(\bar{\tau}_T \bar{\tau})_0 = 0,012$ мкс, а с классом $\bar{I}_1 = 1,288$ балла $(\bar{\tau}_T \bar{\tau})_1 = 0,009$ мкс.

Чтобы оценить степень влияния класса коммутации на износ контактной пары «щетка-коллектор», воспользуемся выражением:

$$K_s \approx \frac{V_s^0}{V_s'} = \frac{(\bar{\tau}_T \bar{\tau})_0}{(\bar{\tau}_T \bar{\tau})_1} = \frac{0,012}{0,009} = 1,333.$$

Для долговечности двигателя определяющий параметр – срок службы коллектора ТЭД. При неизменном количестве ремонтов и одном и том же сроке службы двигателя, улучшение состояния коммутации приводит к сокращению затрат на содержание КЩУ в K_s раз.

До проведения работ по улучшению коммутационной устойчивости эксплуатационные расходы в год определяются по формуле:

$$E_{\text{год}0} = \frac{n_p \cdot E_p}{T_{\text{мр.у.}}}, \quad (5.6.8)$$

где n_p – количество деповских ремонтов без выкатки за год;

E_p – затраты на проведение ремонтных работ по КЩУ;

$T_{\text{мр.у.}}$ – межремонтный цикл.

При улучшении коммутационной устойчивости годовая экономия эксплуатационных расходов на содержание КЩУ выпускаемых двигателей определяется из выражения:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = \frac{(K_s - 1)}{K_s} \cdot E_{\text{год}0}. \quad (5.6.9)$$

При деповском ремонте стоимость ремонтных работ КЩУ составляет $E_p = 234$ рубля, в год проводится 12 ремонтов КЩУ без выкатки ТЭД из-под локомотива:

$$E_{\text{год}0} = 234 \cdot 12 \cdot 500 = 1404000 \text{ руб.}$$

Таким образом, годовая экономия эксплуатационных расходов на ремонт КЦУ составляет:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = \frac{(1,333 - 1)}{1,333} \cdot 1404000 = 350736 \text{ руб.}$$

5.6.3 Дополнительные эксплуатационные затраты на диагностирование

Должностной оклад составляет 5000 рублей. Для работников железнодорожного транспорта Сибири и Урала в оплате труда учитывается 20% надбавки, премии, 15% надбавки по районному коэффициенту [61]:

$$\Phi OT = 5000 \cdot (1,3 \cdot 1,15 + 0,2) \cdot 12 = 101700 \text{ руб.}$$

Согласно федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ (ред. от 28.11.2011) отчисления во внебюджетные фонды составляют 30% от общего фонда заработной платы: $101700 \cdot 0,3 = 30510 \text{ руб.}$

Затраты на техническое обслуживание и ремонт предложенного аппаратно-программного комплекса в первый год эксплуатации составят 10% от первоначальной стоимости $K_{\text{апл.ж}} = 150000 \text{ руб.}$, во второй – 11%, в третий – 12%, в четвертый – 13% и т. д.

Текущие затраты за жизненный цикл аппаратно-программного комплекса приведены в таблице 5.1.

Годовой экономический эффект от внедрения аппаратно-программного комплекса определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{год}} - \bar{Z}_t - E_m \cdot K_{\text{апл.ж}}, \quad (5.6.10)$$

где $\bar{Z}_t = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T Z_t$ – средние годовые затраты за жизненный цикл аппаратно-программного комплекса.

При подстановке числовых значений в формулу (5.6.10) получим:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 350736 - 153960 - 0,032 \cdot 150000 = 196776 \text{ руб.}$$

Таблица 5.1 – Текущие затраты на внедрение аппаратно-программного комплекса

Год расчетного периода	Z_t (при стабильности затрат), руб.	α_t^m	$Z_t \cdot \alpha_t^m$, руб.
2014	147210	1,000	147210.00
2015	148710	0,969	144086.47
2016	150210	0,939	141014.87
2017	151710	0,910	137994.98
2018	153210	0,881	135026.57
2019	154710	0,854	132109.35
2020	156210	0,827	129243.00
2021	157710	0,802	126427.18
2022	159210	0,777	123661.52
2023	160710	0,753	120945.63
Итого			1337719.57

5.6.4 Определение показателей экономической эффективности

При расчете прибыли учитывается экономия затрат на эксплуатационные расходы при улучшении коммутации ТЭД, обусловленной использованием при диагностировании технического состояния предложенного аппаратно-программного комплекса.

В качестве расходов учитываются затраты на изготовление и внедрение аппаратно-программного комплекса, его ремонт и техническое обслуживание.

Чистое дисконтирование дохода приведено в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчета экономического эффекта

Год расчетного периода	$R_t \cdot \alpha_t^m$, руб	Затраты		Эффект за вычетом затрат, руб	ЧДД, руб
		$З_t \cdot \alpha_t^m$, руб.	$K_{влож}$, руб		
2014	196776.00	147210.00	150000	-100434.00	-100434.00
2015	190658.06	144086.47	–	46571.58	-53862.42
2016	184730.32	141014.87	–	43715.45	-10146.96
2017	178986.89	137994.98	–	40991.91	30844.94
2018	173422.02	135026.57	–	38395.45	69240.40
2019	168030.18	132109.35	–	35920.83	105161.23
2020	162805.96	129243.00	–	33562.97	138724.20
2021	157744.18	126427.18	–	31317.00	170041.20
2022	152839.77	123661.52	–	29178.25	199219.45
2023	148087.84	120945.63	–	27142.21	226361.66

Индекс доходности рассчитывается по формуле (5.6.4):

$$ИД = \frac{226361,66}{150000} = 1,5.$$

Эффективность применения предлагаемых усовершенствований подтверждается полученным индексом доходности: 1,5

Определим срок окупаемости из выражения, Согласно таблице (5.2) $T_{ок}$ составляет 3 года, это означает, что инвестиции быстро окупятся.

5.7 Выводы

1. Предложен аппаратно-программный комплекс диагностирования технического состояния КЩУ МПТ с учетом геометрии профиля коллектора и интенсивности нагрева. Аппаратно-программный комплекс выполнен на базе приборов ПКП-4М и ПКК-5М, тепловизора, программного обеспечения «PKP-Median Soft» и «Collector-Brush Heat».

2. Разработана методика определения интенсивности нагрева при различном времени контроля с шагом 30 секунд. Разработана программа для обработки термограмм и построения кривых нагрева.

3. Предложено микропроцессорное устройство, реализующее обработку и фильтрацию сигнала прибора ПКП-4М на основе сигнального процессора Cortex-M3.

4. Определена достоверность диагностирования с использованием предложенного аппаратно-программного комплекса, учитывая погрешности, вносимые используемым оборудованием, она составляет 0,9277.

5. Рассчитана экономическая эффективность внедрения предложенного аппаратно-программного комплекса. Срок окупаемости инвестиций составляет 3 года. Внедрение аппаратно-программного комплекса позволит сэкономить 226 тысяч рублей за 10 лет. Индекс доходности составляет 1,5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования позволяют проработать основные принципы повышения диагностирования технического состояния МПТ с применением анализа тепловых процессов в КЩУ.

Основные научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. В результате анализа влияния факторов электромагнитной и механической природы на интенсивность искрения щеток уточнена графоаналитическая модель диагностирования КЩУ МПТ, дополнительно учитывающая воздействие на процесс коммутации параметров профиля коллектора и температуры скользящего контакта.
2. Определено эффективное множество параметров диагностирования технического состояния КЩУ МПТ, обладающих наибольшей информативностью и различительной способностью, дополненное параметром, характеризующим интенсивность нагрева элементов КЩУ.
3. Составлена уточненная тепловая схема замещения МПТ с учетом тепловых процессов в КЩУ, отражающая условия теплообмена в элементах машины постоянного тока.
4. Сформирована математическая модель нагрева элементов КЩУ МПТ в стационарном и переходном режимах, позволяющая оценить влияние факторов электрической и механической природы на нагрев элементов КЩУ. Экспериментально полученные значения температуры имеют отклонение от расчетных не более 8%.
5. В результате экспериментальных исследований процесса нагрева МПТ получены регрессионные зависимости, отражающие влияние параметров работы машины на интенсивность нагрева элементов КЩУ МПТ. Определена наиболее информативная длительность контроля 3-5 минут.
6. Разработана методика диагностирования технического состояния КЩУ с учетом параметров профиля коллектора и интенсивности нагрева КЩУ и на ее

основе предложен аппаратно-программный комплекс. Оценена технико-экономическая эффективность использования предложенного аппаратно-программного комплекса и установлено, что ожидаемый экономический эффект составляет 220 тыс. рублей за 10 лет. Срок окупаемости инвестиций составляет три года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абезгауз, Г. Г. Справочник по вероятностным расчетам [Текст] / Г. Г. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина. – М.: Воениздат, 1970. – 536 с.
2. Авилов, В. Д. Исследование работы скользящего контакта в электрических машинах [Текст] / В. Д. Авилов, В. В. Харламов, П. К. Шкодун // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 11. – С. 69.
3. Авилов, В. Д. Особенности механических условий контактирования щетки на коллекторе в крупных машинах постоянного тока [Текст] / В. Д. Авилов, В. В. Бублик // Коммутация в тяговых двигателях и других коллекторных машинах: Сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1985. – С. 47 – 53.
4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
5. Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности: учеб. для строит. спец. вузов [Текст] / А. В. Александров, В. Д. Потапов. – М.: Высш. шк., 1990. – 400 с.
6. Байсадыков, М. Ф. Исследование влияния механических и электрических факторов на износ электрических щеток машин постоянного тока [Текст] / М. Ф. Байсадыков, А. С. Хлопцов // Материалы X международной научно-практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: поступаты прошлого и теории нового времени», Екатеринбург, 2015.
7. Беспалов, В. Я. Электрические машины: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования [Текст] / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 320 с.
8. Биргер, И. А. Техническая диагностика [Текст] / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
9. Боуден, Ф. П. Трение и смазка [Текст] / Ф. П. Боуден, Д. Тейдор. – Машгиз, 1960, 256 с.

10. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семеняев. – М.: Наука, 1980. – 976 с.
11. Вегнер, О. Г. Теория и практика коммутации машин постоянного тока [Текст] / О. Г. Вегнер. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 156 с.
12. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. [Текст] / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – Киев.: Техніка, 1975. – 168 с.
13. Власов, А. Б. Факторный анализ диагностической модели тепловизионного контроля электрической машины. [Текст] / Е. А. Мухин, Б. Д. Царев // Вестник МГТУ. – 2013. – №1. – С. 46 – 51.
14. Волков, Б. А. Экономическая эффективность инвестиций на железнодорожном транспорте в условиях рынка [Текст] / Б. А. Волков. – М.: Транспорт, 1996. – 191 с.
15. Волков, В. К. Повышение эксплуатационной надежности тяговых двигателей [Текст] / В. К. Волков, А. Г. Суворов. – М.: Транспорт, 1987. – 127 с.
16. Гемке, Р. Г. Неисправности электрических машин [Текст] / Р. Г. Гемке. – Л.: Энергия, 1969 – 272 с.
17. Готтер, Г. Нагрев и охлаждение электрических машин [Текст] / Г. Готтер. – Москва.: Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.
18. ГОСТ 27518 – 87. Диагностирование изделий. Общие требования. Гр. Т51. М., 1988. – 6 с.
19. ГОСТ 20911 – 89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Госстандарт, 1989.
20. ГОСТ 2582 – 81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 36 с.
21. ГОСТ 4134 – 75. Профили из медных сплавов для коллекторов электрических машин [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 6 с.
22. ГОСТ 10159 – 79. Машины электрические вращающиеся коллекторные. Методы испытаний [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 14 с.
23. ГОСТ 11828 – 86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 31 с.

24. ГОСТ 27.410 – 87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 77 с.
25. ГОСТ 28295 – 89. Коллекторы электрических вращающихся машин. Общие технические условия. [Текст] – М.: Издательство стандартов, 1990. – 9 с.
26. Грищенко, М. А. Экспериментальные исследования тепловых процессов в якоре тягового электродвигателя тепловоза [Текст] // Известия Петербургского университета путей сообщения . 2010. №3.
27. Гуревич, Э. И. Переходные тепловые процессы в электрических машинах [Текст] / Э. И. Гуревич, Ю. Л. Рыбин. – Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 216 с.
28. Деятельность РЖД // ОАО «РЖД». – Режим доступа : URL: http://rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=660, свободный. – (Дата обращения 27.11.2015).
29. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента [Текст] / Н. Джонсон, Ф. Лион. Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 520 с.
30. Дмитриев, М. М. Планирование эксперимента при решении задач электромеханики [Текст] // Конспект лекций. М.: из-во МЭИ. 1981. – 48 с.
31. Дридзо, М. Л. Конструирование и расчет моделей узла токосъема электрических машин и аппаратов [Текст] / М. Л. Дридзо. – М.: Информэлектро, 1977. – 60 с.
32. Дроздов, Ю. Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) под ред. Ю.Н. Дроздова. [Текст] / Ю. Н. Дроздов, Е. Г. Юдин, А. И. Белов. – М.: «Эко-Пресс», 2010. – 604 с.
33. Ермаков, С. М. Математическая теория планирования эксперимента [Текст] / Под редакцией С. М. Ермакова. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
34. Заковряшин, А. И. Интеллектуальные системы диагностирования [Текст] / А. И. Заковряшин // Труды МАИ // №49, 2011. – С. 47 – 53.

35. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация [Текст] / О. Зенкевич, К. Морган // Пер. с англ. – М.: Мир. 1986. – 318 с.
36. Зюзин, А. Ф. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок [Текст] / А.Ф. Зюзин – М. 1980 – 287 с.
37. Журнал «ANSYS Advantage». Русская редакция. – <http://www.ansys.com>.
38. Ивоботенко, А. И. Планирование эксперимента в электромеханике [Текст] / А. И. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
39. Исмаилов, Ш. К. Термическое состояние тяговых и вспомогательных электрических машин электровозов постоянного и переменного тока: монография [Текст] / Ш. К. Исмаилов. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2001. – 75 с.
40. Кильчевский, Н. А. Курс теоретической механики [Текст] / Н. А. Кильчевский. – М.: Наука, 1977. – 480 с.
41. Крамахулин, Ю. Е. Приборы измерения температуры [Текст] / Ю. Е. Крамахулин. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
42. Крейт, Ф. Основы теплопередачи [Текст] / Ф. Крейт, У. Блэк // Пер. с англ. М.: Физмат-тгиз. 1959. 356 с.
43. Курбасов, А. С. и др. Проектирование тяговых электродвигателей [Текст] / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987. – 535 с.
44. Лепеш, Г. В. Имитационное моделирование процесса высокоскоростного трения и изнашивания [Текст] / Г. В. Лепеш // ТТПС . 2013. №3 (25) – С.35 – 42.
45. Лепеш Г. В. Исследование математической модели процесса высокоскоростного трения и изнашивания [Текст] / Г. В. Лепеш, А. Г. Лепеш // ТТПС, 2015. – №2 (32). – С.60 – 66.
46. Ли, В. Н. Механизмы разупрочнения и разрушения контактного провода [Текст] / В. Н. Ли, А. И. Кондратьев, Е. В. Муромцева, С. Н. Химусин // Дефектоскопия. – 2003. – № 12. – С. 32 – 38.
47. Лившиц, П.С. Скользящий контакт электрических машин [Текст] / П. С. Лившиц // - М. Энергия, 1974. – 321 с.

48. Методические рекомендации по определению экономической эффективности мероприятий научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте [Текст] / Разраб. ВНИИЖТ. – М.: 1990. – 120с.
49. Мусин, И. А. Планирование эксперимента при моделировании погрешности средств измерений [Текст] / И. А. Мусин. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 136 с.
50. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов [Текст] / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
51. Налимов, В. В. Теория эксперимента. Физико-математическая библиотека инженера [Текст]. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
52. Находкин, М. Д. Проектирование тяговых электрических машин [Текст] / Под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
53. Находкин, В. М. Ремонт электроподвижного состава: Учебник для техникумов железнодорожного транспорта [Текст] / В. М. Находкин, Д. В. Яковлев, Р. Г. Черепашенец. – М.: Транспорт, 1989. – 295 с.
54. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.
55. Носков, В. И. Тепловая модель тягового двигателя тепловоза [Текст] / В. И. Носков // Вестник НТУ ХПИ. – 2012. – № 62 (968). – С. 142 – 147.
56. Осадченко А. А. Мониторинг щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя при эксплуатации [Текст] / А.А. Осадченко, А.Б. Цукублин, О.Л. Рапопорт // Известия ТПУ . 2005. №7. – С. 107 – 109.
57. Осис, Я. Я. Диагностирование на граф-моделях: На примерах авиационной и автомобильной техники [Текст] / Я. Я. Осис, Я. А. Гельфандбейн, З. П. Маркович, Н. В. Новожилова. – М.: Транспорт, 1991. – 244 с.
58. Очков, В. Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов [Текст] / В. Ф. Очков – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 368 с.
59. Петров, М. Н. Повреждения коллекторного узла тяговых двигателей электровозов на Красноярской дороге [Текст] / М.Н. Петров [и др.] // Успехи современ-

- ного естествознания: научно-теоретический журнал. – 2013. – № 5. – С. 114 – 116.
60. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования // Гольдберг О.Д. и др. – М.: Высш. школа, 2001 – 512 с.
 61. Положение о корпоративной системе оплаты труда работников ОАО «РЖД». 2007.
 62. Программа для оценки величины износа коллекторных пластин машин постоянного тока от механической и электроэрозионной составляющих / П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов и др. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613653 от 11.04.2013.
 63. Программа для фильтрации и обработки сигнала прибора контроля профиля коллектора машины постоянного тока ПКП-4М / П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов и др. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614815 от 22.05.2013.
 64. Пуйло, Г. В. Тепловой расчет однофазных коллекторных двигателей при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы [Текст] / Г. В. Пуйло, С. Н. Пирковский. // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2000. – № 54. – С. 99 – 103.
 65. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда [Текст] – 2-е изд. ISBN 5-02014615-3. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
 66. Румшиский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] / Л. З. Румшиский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
 67. Сергеев, А. Г. Точность и достоверность диагностики автомобилей [Текст] / М.: Транспорт – 1980. – 124 с.
 68. Сипайлов, Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах [Текст] / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
 69. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

70. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Утверждена Правительством Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.
71. Сучков, Д. И. Медь и ее сплавы [Текст] / Д. И. Сучков. – М.: Металлургия, 1966. – 249 с.
72. Съемка, А. А. Компьютеризированный диагностический комплекс для испытаний электрических машин на надежность [Текст] / А. А. Съемка, В. В. Прус Прус // EiE . – 2015. – №3. – С. 27 – 30.
73. Таранов, Д.М. Тепловые модели электропривода [Текст] / Д.М. Таранов, А.Е. Чуркин, А.В. Лыткин // Эпоха науки. – 2015. – №1. С. 54 – 57.
74. Технологическая инструкция на деповский ремонт тяговых двигателей типа ТЛ-2К, ТЛ-3К – 92 с.
75. Тутубалин, В. Н. Теория вероятностей и случайных процессов : Учеб. пособие [Текст] / В. Н. Тутубалин. – М.: Издательство МГУ, 1992. – 400 с.
76. Филлипов, И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах [Текст] / И. Ф. Филлипов – Л.: Энергия, 1974. – 312 с.
77. Филлипов, И. Ф. Теплообмен в электрических машинах [Текст] / И. Ф. Филлипов – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 260 с.
78. Харламов, В. В. Анализ тепловых процессов в КЩУ МПТ [Текст] / В.В. Харламов, П.К. Шкодун // Материалы научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте», Омск, 2015 г., С. 172 – 178.
79. Харламов, В.В. Выбор диагностических параметров для оценки влияния профиля коллектора на процесс коммутации в тяговых электродвигателях [Текст] / В. В. Харламов, Д. А. Ахунов и др.// Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы всерос. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 51 – 57.
80. Харламов, В. В. Комплексная оценка состояния профиля коллектора тягового электродвигателя [Текст] / В. В. Харламов, Д. А. Ахунов и др. // Трансвуз-

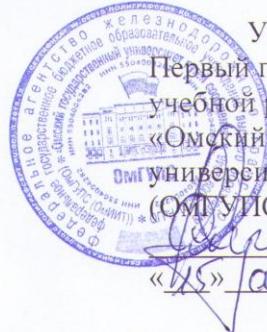
2010. Инновации для транспорта: Сб. науч. ст. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – Ч. 2. – С. 27-32.
81. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография [Текст] / В. В. Харламов. – Омск: ОмГУПС, 2002. – 233 с.
82. Харламов, В. В., Шкодун П. К., Афонин А. П. Формирование эффективного множества диагностических параметров для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов [Текст] / Известия Транссиба. – 2012. – № 4 (12). – С. 69 – 75.
83. Харламов, В. В. Термографические исследования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова, А. С. Хлопцов // Известия Транссиба. – 2014. – №3 (19). – С. 44 – 50.
84. Харламов, В. В. Графоаналитическая модель коллекторно-щеточного узла машины постоянного тока с учетом условий эксплуатации [Текст] / В.В. Харламов, А.П. Афонин, А.С. Хлопцов // Материалы всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием, ОмГУПС, Омск. – 2014. – С. 184 – 190.
85. Харламов, В. В. Информационно-измерительная технология контроля профиля коллектора тяговых электродвигателей [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов, А. С. Хлопцов // Динамика систем, механизмов и машин, Омск. – 2014. – №1– С. 389 – 392.
86. Харламов, В. В. Математическая модель для анализа тепловых процессов коллекторно-щеточного узла машины постоянного тока при наличии искрения [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова, А. С. Хлопцов // Материалы международной научно-практической конференции «Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем». – Москва, 2015. – С. 67 – 71.

87. Харламов, В. В. Совершенствование процесса диагностирования коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов, А. С. Хлопцов // Известия Транссиба, 2013 – №1 (13) – С. 42 – 48.
88. Харламов, В. В. Микропроцессорный регистратор диагностических параметров коллектор-но-щеточного узла машины постоянного тока [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов, А. С. Хлопцов // Материалы IX международной научно-технической конференции «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии», ОмГУПС, – Омск, 2013. – С. 265 – 271.
89. Харламов, В. В. Формирование граф-модели диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с учетом тепловых факторов [Текст] / В.В. Харламов, А.С. Хлопцов и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2016. – Т327. №1 – С. 84 – 91.
90. Хикс, Ч. Основные принципы планирования эксперимента [Текст] / Под ред. В. В. Налимова / Ч. Хикс. – М.: Мир, 1967. – 406 с.
91. Хлопцов, А. С. Исследование интенсивности нагрева контакта щетка-коллектор машины постоянного тока [Текст] / 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.
92. Хлопцов, А. С. Математическая модель для анализа тепловых процессов коллекторно-щеточного узла машины постоянного тока в стационарном режиме работы [Текст] // Материалы всероссийской научной конференции «Наука, творчество и образование в области электроснабжения, электропривода – достижения и перспективы», ДВГУПС. – Хабаровск, 2015. – С. 109 – 113.
93. Хлопцов, А. С. Применение тепловизионного метода для исследования тепловых процессов в зоне коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя подвижного состава [Текст] / А. С. Хлопцов, А. В. Долгова, П. К. Щкодун // Известия Транссиба, 2015 – №2 (22) – С. 45 – 51.

94. Хлопцов, А. С. Разработка программного обеспечения для диагностирования профиля коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М [Текст] / А. С. Хлопцов, Д. А. Ахунов // Материалы научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, посвященной Дню Российской науки «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте», ОмГУПС. – Омск, 2013. – С. 184 – 190.
95. Хлопцов, А. С. Совершенствование технологии диагностирования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / А.С. Хлопцов, А. В. Долгова, Р. В. Сергеев // Межвузовский тематический сборник научных трудов «Электромеханические преобразователи энергии», ОмГУПС – Омск, 2014. – С. 16 – 21.
96. Хлопцов, А. С. Тепловые процессы в машинах постоянного тока [Текст] / А.С. Хлопцов, Ю.С. Сугралимов // Молодой ученый. – 2014. – № 7 (66) – С. 179 – 182.
97. Холингворт, Д. Borland C++ Builder. Руководство разработчика [Текст] / Д. Холингворт // М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 965 с.
98. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература, 1961. – 464 с.
99. Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов [Текст] / В. С. Чиркин – Справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ., 1959. – 356 с.
100. Чуйко, А. Д. Анализ влияния распределения плотности тока в коллекторной пластине на нагрев коллектора [Текст] / А.Д. Чуйко, С.А. Христосенков, В.И. Петуров // Фундаментальные исследования. – 2015. – №4 – С. 163 – 168.
101. Шахова, С. Н. О методах расчета средних превышений температур электрических двигателей [Текст] / С.Н. Шахова, В.В. Тарасова // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – №9 (115) – С. 61 – 68.
102. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента [Текст] / Перевод с английского Е. Г. Коваленко. Под ред. чл.-корр. АН РФ Н. П. Бусленко / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 381 с.

103. Шкодун, П. К. Выбор диагностических параметров для оценки влияния профиля коллектора на процесс коммутации коллекторных электрических машин [Текст] / П. К. Шкодун, Р. В. Сергеев, Д. А. Ахунов // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе: Материалы науч.-практ. конф. / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2012. – С. 373 – 375.
104. Шкурина, Л. В. Экономическая оценка эффективности инвестиций на железнодорожном транспорте [Текст] / Л. В. Шкурина, С. С. Козлова. – М.: РГО-ТУПС, 2000. – 74 с.
105. Щербатов, В. В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса [Текст] / В.В. Щербатов, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин // Известия ТПУ. – 2005. – №7 – С. 156 – 159.
106. Ямилева, А. М. Факторный анализ 3D модели упругой стадии процесса линейной сварки трением [Текст] // Вестник УГАТУ. – 2012. – №7 (52). – С.122 – 127.
107. Henao H., Capolino G.A., Fernandez-Cabanas M., Filippetti F., Bruzzese C., Strangas E., Pucsa R., Riera-Guasp M., Hedayati-Kia S. Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A review of Diagnostic Techniques, IEEE industrial electronics magazine, vol. 8, No.2, June 2014. pp. 31 – 42.
108. Sebok M., Gutten M., Kucera M. Diagnostics of electric equipments by means of thermovision. Przeglad Elektrotechniczny, vol. 87 (10), 2011, pp. 313 – 317.
109. Glowacz A., Glowacz A., Glowacz Z. Recognition of Thermal Images of Direct Current Motor with Application of Area Perimeter Vector and Bayes Classifier. Measurement Science Review, vol. 15, No. 3, 2015, pp. 119 – 126.
110. Testo 875-2 / Руководство по эксплуатации – 87 с.
111. Toliyat, A., Nandi S., Choi S., Meshgin-Kelm H. Electric machines. Modeling, condition monitoring and fault diagnosis, CRC Press and Taylor & Francis Group, edition 2012. 272 p.
112. Van Brunt, C. Gen. Elektr. Rev. [Текст] / Van Brunt C., Savage R.H.

Документы, подтверждающие внедрение результатов
диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор, проректор по
учебной работе ФГБОУ ВО
«Омский государственный
университет путей сообщения
(ОГУПС (ОГУПТ))»

С. А. Лунев
2016 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Хлопцова Андрея Сергеевича
«Совершенствование методики и средств диагностирования технического
состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока» 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, декана электромеханического факультета,
Харламова В. В. – д. т. н., профессора, заведующего кафедрой
«Электрические машины и общая электротехника»,

составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы
Хлопцова А. С., а именно: методика оценки интенсивности нагрева зоны
контакта «щетка-коллектор» электрических машин постоянного тока,
аппаратно- программный комплекс, реализующий предложенную методику, и
алгоритм обработки термограмм внедрены в учебный процесс на основании
решения заседания кафедры «Электрические машины и общая электротехника»
от 18 февраля 2016 г., протокол № 8.

Указанные результаты используются при выполнении научно-
исследовательской работы и дипломных проектов 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

Декан электромеханического факультета

Р. В. Сергеев

Заведующий кафедрой «Электрические машины
и общая электротехника»

В. В. Харламов

Общество с ограниченной ответственностью "Ремонтно-механический завод "Газпромнефть-ОНПЗ"

AKT

от «__» февраля 2016 г.
г. Омск

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора

А. В. Ильин

Об использовании результатов научных исследований и разработок на производстве

Основание: разработка Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), выполненная под руководством профессора, д.т.н. Харламова Виктора Васильевича и при личном участии доцента, к. т. н. Шкодуна Павла Константиновича, аспиранта Хлопцова Андрея Сергеевича.

Технология тепловизионного контроля технического состояния электрических машин постоянного тока.

Разработка выполнена в соответствии с программой поисковых и прикладных научных исследований Омского государственного университета путей сообщения № г.р. 01.96.0000796.

Составлен комиссией в составе:

Представители предприятия:

начальник цеха № 51 Жасакбаев К. М.

начальник участка ПНЭО цеха № 51 Проненко А. В.

профессор, д. т. н. Харлам

доцент, к. т. н. Шкодун П. К.,
аспирант Хлопцов А. С.

Разработки ОмГУПСа, характеризуемые основными особенностями (признаками):

разработанная технология тепловизионного контроля технического состояния машин постоянного тока позволяет осуществлять фиксирование распределения теплового поля объекта испытаний с последующей обработкой результатов и формированием диагноза;

предлагаемая технология тепловизионного контроля технического состояния машин постоянного тока позволяет упростить процесс диагностирования объекта испытаний и повысить достоверность диагноза.

Технология может быть внедрена к использованию в технологическом процессе технического обслуживания и ремонта машин постоянного тока на предприятии ООО «РМЗ «Газпромнефть-ОНПЗ».

Предложения о дальнейшем использовании и другие замечания:

Рекомендуется широкое использование указанных в акте разработок ОмГУПСа на предприятиях, занимающихся ремонтом и техническим обслуживанием электрических машин постоянного тока, в том числе электродвигателей большой мощности.

Составлен в трех экземплярах:

- 1-й экземпляр – ОмГУПС, НИЧ;
- 2-й экземпляр – ООО «РМЗ «Газпромнефть-ОНПЗ»;
- 3-й экземпляр – ОмГУПС, руководителю работ.

Председатель комиссии

 Жасакбаев К. М.

Члены комиссии

 Проненко А. В.
 Харламов В. В.
 Шкодун П. К.
 Хлопцов А. С.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013614815

Программа для фильтрации и обработки сигнала
прибора контроля профиля коллектора машины
постоянного тока ПКП-4М

Правообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования "Омский государственный университет
путей сообщения" (ОмГУПС(ОмИИТ)) (RU)*

Автор(ы): *Шкодун Павел Константинович (RU), Харламов
Виктор Васильевич (RU), Сергеев Роман Владимирович (RU),
Долгова Анна Владимировна (RU), Ахунов Данил Асгатович (RU),
Хлопцов Андрей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2013612552

Дата поступления 26 марта 2013 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
22 мая 2013 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

