

На правах рукописи

ГОРДЕЕВ Игорь Петрович

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ СИЛОВЫХ
ЦЕПЕЙ ЛОКОМОТИВОВ**

Специальность 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Самара - 2006

Работа выполнена в Самарской государственной академии путей сообщения

Научный консультант:

Доктор технических наук, профессор Тарасов Евгений Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Серебряков Александр Сергеевич,

доктор технических наук, профессор Глущенко Михаил Дмитриевич,

доктор технических наук, профессор Рогинская Любовь Эммануиловна

Ведущая организация:

Закрытое Акционерное общество Научно-производственный центр информационных и транспортных систем (ЗАО НПЦ ИНФОТРАНС)

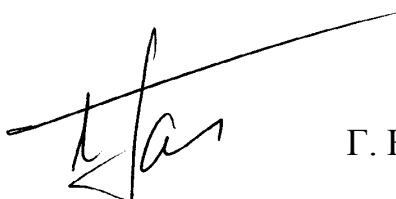
Защита диссертации состоится « 27 » декабря 2006 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 при Уфимском государственном техническом университете по адресу: 450000, Уфа, -центр, ул К. Маркса, 12, УГАТУ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного технического университета

Автореферат разослан « 26 » октября 2006 г.

Учёный секретарь

Диссертационного совета Д 212.288.02
доктор технических наук, профессор



Г. Н. Утляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблеме улучшения тяговых энергетических характеристик локомотивов в системе эксплуатации железнодорожного транспорта придаётся первостепенное значение. В соответствии с «Энергетической стратегией ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2020 года», стратегической задачей является оздоровление локомотивного парка через заводские ремонты и модернизацию энергопотребляющих систем. При этом планируется проведение модернизации 35÷38 % парка электровозов и 45÷48 % тепловозов. Энергопотребляющими системами локомотивов, в первую очередь, являются тяговые силовые цепи и вспомогательное оборудование, обеспечивающее их работу. Анализы технического состояния локомотивного парка страны, проводимые ежегодно департаментом локомотивного хозяйства, показывают, что наименее надёжными узлами силовых цепей локомотивов являются электрическая аппаратура (28,7 % от всех видов неплановых ремонтов) и изоляционные конструкции тяговых электродвигателей (ТЭД). Количество повреждений изоляции обмоток на 1 млн. км пробега современных ТЭД НБ-514 электровозов переменного тока в 2002 г. составило 2,35 случая. Для ТЭД ЭД118А тепловозов типа ТЭ 10 этот показатель составляет в среднем 4,2 случая. Поэтому проблеме повышения надёжности изоляции тяговых силовых цепей уделяется повышенное внимание.

Экспериментальные и теоретические данные показывают, что основными причинами, приводящими к отказам изоляции силовых цепей в эксплуатации являются: температурные воздействия на изоляцию обмоток ТЭД при поездной работе, электрические перенапряжения, возникающие в силовых цепях локомотивов при некоторых переходных режимах и постепенное старение изоляции под действием термомеханических и электрических нагрузок. При этом выход из строя изоляционных конструкций силовых цепей происходит тем быстрее, чем ниже их начальная электрическая прочность, определяемая качеством изоляционных материалов и уровнем технологических процессов изготовления этих конструкций, и менее совершенна конструкция устройств охлаждения и защиты.

Начальная электрическая прочность изоляционных конструкций закладывается на первых позициях технологического процесса их изготовления и определяется уровнем согласованных между «поставщиком» и «заказчиком» испытательных напряжений, регламентированных ГОСТ 2581-81 для уже готовой продукции. Отсутствие надёжных методов дефектировки изоляционных конструкций при их ремонтах приводит к появлению на эксплуатирующихся локомотивах силовых цепей с заниженным ресурсом. Отсутствие на локомотивах автоматических систем регулирования расхода охлаждающего воздуха с обратной связью по температуре изоляции обмоток электрических машин приводит к снижению их надёжности и перерасходу энергии на охлаждение. Защита изоляционных конструкций силовых цепей от их перегрева свыше допустимых пределов на локомотивах не предусмотрена, и

существующие системы защиты от протекания по силовым цепям повышенных токов и токов короткого замыкания на корпус являются по сути не защищающими, а регистрирующими, причём наличие в принципиальных схемах силовой цепи тепловозов контактной точки с корпусом локомотива обуславливает появление в переходных режимах напряжений, значительно больших номинальных. Неравномерное токораспределение в силовых цепях тепловозов приводит к сужению предельно-допустимых зон длительной работы ТЭД и неустойчивой работе противобуксовочных схем. Поэтому, создание технологии испытаний на диэлектрическую прочность изоляционных конструкций ТЭД, учитывающей прочностные свойства, показатели надёжности в эксплуатации и экономические риски поставщиков и заказчиков, разработка метода многопараметрической оценки диэлектрической прочности изоляционных конструкций, позволяющего определять текущее состояние корпусной изоляции якорей ТЭД с целью идентификации вида и объёма ремонта, новых принципов построения автоматизированных систем охлаждения и их защиты, с учётом состояния изоляции обмоток электрических машин и обратной связью по температуре, контроль токораспределения в параллельных силовых цепях ТЭД, являются актуальными проблемами, имеющими важное народно-хозяйственное значение.

Диссертационная работа выполнялась в рамках хоздоговорных и госбюджетных НИР согласно: «Программе реализации основных направлений развития и социально – экономической политики железнодорожного транспорта на период до 2005 года» (утверждена указанием МПС от 04.03. 1997 г. № А – 276 у); «Перечню актуальных проблем научно-технического развития железнодорожного транспорта для разработки их докторантами, аспирантами и сотрудниками ВУЗ-ов отрасли в 2001 – 2002 г.г.» (Утвержден указанием МПС от 17.11.2000 г. № М–2775 у); «Перечню основных проблем железнодорожного транспорта для первоочередного финансирования научных исследований» (утверждён указанием МПС от 26.12.2002 г. № Я – 1272 у); «Концепции многоуровневой системы управления и обеспечения безопасности движения поездов (разработана в соответствии с указанием МПС от 29.11.2002 г. № 191).»

Цель работы и основные задачи исследования. Целью работы является научное обоснование и создание новых методов, способов, технических решений и технологических процессов, повышающих надёжность изоляционных конструкций тяговых силовых цепей локомотивов и снижающих расходы на их эксплуатацию и ремонт.

Для достижения данной цели был поставлен комплекс задач:

-проведение анализа современного состояния научно-технической проблемы повышения надёжности изоляционных конструкций тяговых силовых цепей локомотивов и снижения расходов на их эксплуатацию и ремонт для выявления основных факторов, влияющих на их ресурс и повышенный расход энергии;

-разработка ряда математических моделей, описывающих процессы, теплового и электрического нагружения, приводящих к старению, изменению

надёжности и сроков восстановления изоляционных конструкций ТЭД, позволяющих определить направления разработок и разработать методы, уменьшения температурных и электрических нагрузок, повышающих надёжность изоляции силовых цепей в эксплуатации;

-проведение серий экспериментальных исследований прочностных диэлектрических характеристик и изоляционных конструкций ТЭД в условиях изготовления и ремонта и исследование их надёжности в эксплуатации, позволяющих разработать и подтвердить предложенные научно обоснованные методы, повышения надёжности силовой цепи локомотивов;

-разработка научно обоснованных методов, способов, технических решений и технологических процессов, обеспечивающих повышение надёжности силовых цепей локомотивов на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований;

-выполнение технико-экономических исследований повышения надёжности тяговых силовых цепей и экономичности их систем охлаждения, позволяющих экономически обосновать предложенные технические решения.

Методы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования базируются на применении основных положений теорий: вероятностей, математической статистики, надёжности и восстановления, автоматического регулирования, планирования экспериментов. Методология исследования, на теоретическом, и эмпирическом уровнях работы характеризуются системным подходом к изучаемым изменениям надёжности изоляции тяговых силовых цепей локомотивов под воздействием факторов изготовления и эксплуатации, базирующемся на вышеупомянутых теориях и индуктивным и дедуктивным методах.

Научная новизна диссертации заключается в разработке научно-обоснованных:

-обобщённых математических моделей процессов теплового и электрического старения изоляции, дополнительно учитывающих несоответствие тепловыделения, теплосъёма и перенапряжений в изоляционных конструкциях силовых цепей, что позволило получить аналитические зависимости, характеризующие температурные и электрические нагрузки на изоляционные конструкции силовых цепей в эксплуатации.

-метода расчёта межремонтных сроков эксплуатации ТЭД, и их запаса, позволяющего устанавливать периодичность восстановления прочностных свойств их изоляционных конструкций, с учётом видов ремонтов и изменения показателей их надёжности в эксплуатации;

-метода определения величин испытательных напряжений на промежуточных и конечных позициях технологического процесса изготовления изоляционных конструкций, позволяющего объективно учитывать модернизацию изоляционных конструкций и технологию их изготовления, вероятности выхода их из строя в процессах изготовления, эксплуатации и экономические потери поставщика и заказчика электротехнической продукции;

-метода многопараметрической оценки диэлектрической прочности изоляционных конструкций, позволяющего определять текущее состояние

корпусной изоляции якорей ТЭД с целью идентификации вида и объёма ремонта;

-метода синтеза автоматизированных систем защиты и охлаждения, позволяющих повысить надёжность изоляционных конструкций и экономичность вспомогательного оборудования, основанного на косвенном определении температуры изоляции обмоток ТЭД, посредством измерения величины конструктивной электрической ёмкости силовой цепи и использования её в схемах управления этих систем.

Основные положения работы, выносимые на защиту:

-обобщённые математические модели процессов теплового и электрического старения изоляции, показывающие, что: при отклонениях параметров системы охлаждения тепловозов от номинальных ресурс изоляции ТЭД может снижаться на порядок; наличие в силовых цепях тепловозов контактной точки с корпусом локомотива приводит к образованию в них импульсов высокого напряжения величиной 1200-1700В при сбросе нагрузки на ослабленном поле; частичные разряды в пустотах изоляции вызывают её термоэлектрическое старение за счет ионизационных процессов, происходящих в её пустотах, причём их интенсивность возрастает в моменты вышеуказанных перенапряжений; надёжность изоляции силовых цепей может быть повышена путём снижения эксплуатационных напряжений и повышения уровня её диэлектрической прочности;

-метод расчёта межремонтных сроков эксплуатации ТЭД, и их запаса, основанный на рассмотрении их изоляционных конструкций, как восстанавливаемых систем с коротким (в условиях депо) и длительным (в условиях заводов) сроком восстановления, позволяющий прогнозировать сроки их безотказной работы и заблаговременно обеспечивать их неснижаемый запас на эксплуатационных предприятиях;

-метод определения величин испытательных напряжений на промежуточных и конечных позициях технологического процесса изготовления изоляционных конструкций, позволяющий увеличивать минимальные уровни электрической прочности изоляционных конструкций силовых цепей и объективно учитывать вероятности выхода их из строя в процессах изготовления и эксплуатации;

-метод многопараметрической оценки диэлектрической прочности изоляционных конструкций, позволяющий на основании замеров электрической ёмкости, тангенса угла диэлектрических потерь и уровня испытательного напряжения, прикладываемого к ней на последней позиции технологического процесса изготовления или ремонта, определять текущее состояние корпусной изоляции якорей ТЭД и определять уровень напряжения дефектировки для назначения объёма ремонта;

-метод синтеза автоматизированных систем защиты и охлаждения, силовых цепей локомотивов, основанный на использовании функциональной зависимости конструктивной электрической ёмкости силовой цепи от

температуры, которая, в частности, для тепловозов типа ТЭ10 в диапазоне рабочих напряжений и температур ТЭД практически линейна.

Практическую ценность работы составляют:

-метод определения величин испытательных напряжений на промежуточных и конечных позициях технологического процесса изготовления изоляционных конструкций, позволяющий повысить минимальную величину электрической прочности корпусной изоляции якорей ТЭД и в целом силовой цепи с $U=2,9$ кВ до $U=5,1$ кВ;

-метод расчёта межремонтных сроков эксплуатации ТЭД, и их запаса, позволяющий прогнозировать сроки их безотказной работы и заблаговременно обеспечивать их неснижаемый запас на эксплуатационных предприятиях;

-разработанная технология определения текущего состояния корпусной изоляции якорей ТЭД, позволяющая определять уровень испытательного напряжения при её входном контроле способом разрушающих испытаний, после приложения которого становится очевидным объёма ремонта (средний или капитальный);

-разработанная схема защиты силовых электрических цепей локомотивов от коротких замыканий и перегревов, позволяющая исключить образование в них импульсов высокого напряжения;

-разработанная система охлаждения ТЭД локомотивов, позволяющая плавно регулировать подачу охлаждающего воздуха в зависимости от температуры изоляции их якорных обмоток в диапазоне от 40 до 140⁰С;

-разработанное диагностическое устройство для контроля токораспределения, позволяющая методом сравнения бесконтактно определять разность токов в параллельных цепях ТЭД локомотивов.

Реализация результатов работы осуществлена внедрением разработанной технологии испытаний диэлектрической прочности корпусной изоляции обмоток ТЭД, повышающей её начальную электрическую прочность, на Харьковском заводе «Электротяжмаш» и Производственном Объединении «Ворошиловградтепловоз». «Способ испытания изоляции» (А. С. СССР № 546830 /3/) внедрен в Бориспольском объединенном авиаотряде. Установка для диагностирования качества изготовления изоляционных конструкций ТЭД внедрена на Ташкентском тепловозоремонтном заводе. Устройство контроля токораспределения в параллельных цепях ТЭД на локомотивах, защищено А. С. (Россия) № 1713510 от 28. 02. 90 г. Системы защиты корпусной изоляции силовых цепей тепловозов, защищёны авторскими свидетельствами АС СССР №712887 от 19.01.77г. и АС СССР № 1358030 от 29.10. 84 г. Первое из них внедрено на Северном горно-обогатительном комбинате Днепропетровской области. Разработанная система охлаждения ТЭД, планируемая к внедрению, защищена патентами РФ на полезную модель № 45057, № 45574 и патентом РФ на изобретение № 2273832 «Способ измерения температуры изоляции обмоток электрических машин». Пакет программ расчёта токов нагрузки ТЭД электровозов типа ВЛ10 и результатов анализа наличной пропускной

способности главного хода, технология интенсивной сушки изоляции ТЭД электровозов ВЛ10 и прибор для определения межвитковых замыканий электрических машин внедрены на Куйбышевской железной дороге – филиале ОАО «РЖД».

Результаты работы используются также в учебном процессе СамГАПС при выполнении курсового, дипломного проектирования и чтения лекций по курсам «Основы технологии производства электрического транспорта», «Надёжность электроподвижного состава», «Электрооборудование электроподвижного состава».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены, обсуждены и одобрены на совместном заседании кафедр «Электрический железнодорожный транспорт», «Вагоны» и «Строительные дорожные машины» СамГАПС и кафедре «Локомотивы» РГОТУПС в 2005 г., а также на 20 научно – технических конференциях, в том числе: «Зональной научно-технической конференции Уральского отделения Академии Наук СССР», Курган, 1990 г.; «Межвузовской научно-практической конференции, посвященной 25-летию института (СамИИТа)», Самара, 1998 г.; «Первой международной научно-практической конференция по безопасности транспортных систем», Самара, 1998 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта», Екатеринбург, 2003 г.; региональной научно-практической конференции «Новейшие достижения науки и техники на железнодорожном транспорте», Челябинск, 2004 г.; второй международной научно-практической конференции «Безопасность и логистика транспортных систем», Самара, 2004 г.; региональных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта», Самара, 2004 – 2006 г.г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 60 печатных работах (из них 10 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ), в том числе 1 монография, 30 статей, 6 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях, 5 авторских свидетельств и 4 патента РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объём работы 305 страниц, в том числе 241 страница основного текста 49 рисунков, 15 таблиц, 206 наименований источников и 20 приложений на 42 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность повышения надёжности изоляции тяговых силовых цепей локомотивов, дана общая характеристика работы, определены цели, задачи и методология исследования, отражена научная новизна, приведены причины неисправности тяговых силовых цепей локомотивов, имеющих место в эксплуатации, практическая ценность, апробация и внедрение результатов по теме диссертации.

В главе 1 выполнен обзор научных литературных данных по проблеме повышения надёжности тяговых силовых цепей, дан анализ надёжности тяговых силовых цепей электровозов и тепловозов, эксплуатирующихся на дорогах РФ в настоящее время. Показано, что наименее надёжным узлом силовых цепей локомотивов являются изоляционные конструкции обмоток якорей ТЭД. Выход из строя изоляции обмоток якорей тепловозов и электровозов от всех видов неисправностей соответственно составляет 20,8 % и 20,3 %. Отмечено, что решение проблемы надёжности силового электрооборудования является актуальной задачей не только для железнодорожного транспорта. Вопросам повышения надёжности этого вида оборудования общепромышленного применения посвящены труды таких видных учёных, как Разевига Д. В., Бажанова С. А., Воскресенского В. Ф., Шагалова С. Б., Оржаховского М. Л., Каганова З.Г., Рогинской Л. Э., Хвальковского А. В., Галушко А. И., Максимовой И. С., Оснач Р. Г., Хазановского П. М. и др. В нашей стране большой вклад в решение проблемы повышения надёжности электрооборудования локомотивов внесли такие учёные, как Кузьмич В. Д., Феоктистов В. П., Ротанов Н. А., Находкин М. Д., Винокуров В. А., Исаев И. П., Гольдберг О. Д., Глущенко М. Д., Идиятуллин Р. Г., Космодамианский А. С., Логинова Е. Ю., Немухин В. Яковлев В. Н., Горбатюк В. А., Пойлов Л. К., П., Виноградов Ю. Н., Соболев В. С., Сонин В. С., Дудырев А. К., Дурандин Г. М., Серебряков А. С. и др.

В условиях эксплуатации на изоляционные конструкции тяговых силовых цепей воздействует сложный комплекс внешних факторов, приводящих с течением времени к постепенному изменению их структуры и ухудшению диэлектрических свойств. К таким факторам в первую очередь необходимо отнести: температурные и механические воздействия, влияние увлажнения изоляции, запылённость, воздействие внутренних перенапряжений. Действие перечисленных факторов вызывает объективное старение изоляционных конструкций. Экспериментальным путём установлено, что зависимость срока службы изоляционных конструкций от величины приложенного напряжения выражается следующими зависимостями :в диапазоне работы конструкции от 0 до 10^4 часов

$$T = A \cdot U^{-n} \quad (1)$$

и для больших сроков работы

$$T = A_1 \cdot (U - U_{cp})^{-n_1}, \quad (2)$$

где A, A_1 - коэффициенты, характеризующие свойства изоляционных материалов; n, n_1 - коэффициенты, значения которых зависят от конструктивных особенностей изоляции и рода воздействующего напряжения; U_{cp} - напряжение, при котором в изоляционных материалах возникают частичные разряды.

Электрическое старение изоляционных конструкций происходит неравномерно. В начальный момент их эксплуатации, когда изоляция конструкции плотная и монолитная процесс старения идёт медленно. По мере

старения изоляции она расслаивается, разрыхляется, в ней образуются поры, трещины, воздушные прослойки, газовые включения. С появлением неоднородностей в изоляции развиваются ионизационные процессы, сопровождающиеся появлением частичных разрядов и прогрессирующим разрушением даже таких стойких материалов, как слюда.

Как отмечено в работах В. Д. Кузьмича, Е. Ю. Логиновой, А. С. Космодамианского, Р. Г. Идиятуллина, из внешних факторов, воздействующих на изоляцию силового электрооборудования, температура является доминирующим. Скорость старения изоляционных материалов и конструкций определяется их нагревостойкостью. Первые работы по определению срока службы изоляции при воздействии температуры относились, в основном, к изоляции класса А. В процессе исследований термостойкости изоляции этого класса было сформулировано «правило восьми градусов» (Монтзингера), согласно которому превышение температуры на каждые восемь градусов сверх предельно допустимой сокращает срок службы изоляции (конструкции) вдвое. Аналитически это правило записывается в следующем виде:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-0,0866t}, \quad (3)$$

где τ - срок службы изоляции при температуре t , год; τ_0 - условный срок службы изоляции при температуре $t=0$; t - температура нагрева изоляции, $^{\circ}\text{C}$.

Дальнейшие исследования показали, что чем выше класс изоляции, тем медленнее происходит её старение при данной температуре. Показано, что для изоляции класса В правило «восьми градусов» трансформируется в «правило 10°C », а для класса Н в «правило 12°C »

Полученные эмпирическим путём зависимости вида (3) используются для определения срока службы изоляционных конструкций только для ориентировочных расчётов. Для более точных расчётов времени, в течении которого изоляция достигает своего предельного состояния, используется выражение для постоянной скорости протекания химической реакции, полученное Вант Гоффом и Аррениусом на основании общих законов кинетики:

$$K = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (4)$$

где K - постоянная реакции; A - коэффициент, зависящий от материала; E_a - энергия активации молекул материала; R - универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура.

На основании выражения (4) была получена следующая зависимость для определения срока службы изоляции.

$$\ln \tau = \frac{E_a}{RT}. \quad (5)$$

Величины отношений E_a / R для изоляции различных классов определены экспериментальным путём и приведены в справочниках. Так для класса изоляции В отношение $E_a / R = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ С}$, для классов изоляции F и H соответственно: $1,27 \cdot 10^{-4} \text{ С}$ и $1,55 \cdot 10^{-4} \text{ С}$.

Помимо электрических нагрузок и тепловых нагрузок на изоляционные конструкции тяговых электрических машин и их цепей в эксплуатации воздействуют механические и термомеханические нагрузки. Механические нагрузки на изоляцию тяговых силовых цепей являются следствием электродинамических сил, возникающих в электрических машинах, неуравновешенности вращающихся частей, центробежных усилий, ударов и толчков со стороны привода и в результате взаимодействия колёс подвижного состава с рельсами. Эти усилия обычно имеют знакопеременный циклический характер. При переходных процессах в силовой цепи локомотивов, имеющих место при наборе и сбросе скорости локомотива, амплитуды вибраций увеличиваются в десятки раз вследствие квадратичной зависимости электродинамических сил от тока. Термомеханические нагрузки возникают в результате периодического нагревания и остывания обмоток и связаны с различием коэффициентов теплового расширения изоляции и материала проводников тока. Термомеханические процессы активизируются при форсированных режимах и частых переходных процессах, характерных для условий эксплуатации. Смещение обмоток тяговых электрических машин, определяемое разницей температур и коэффициентов теплового расширения меди обмоток и стали магнитопроводов, тем больше разрушают изоляцию, чем чаще оно происходит в процессе эксплуатации и чем больше его значение. Применение неразрушающего метода предопределения пробивного напряжения при испытаниях изоляции якорей ТЭД НБ-418 К6, НБ-508А дало возможность М. Д. Глуценко получить расчётную формулу, характеризующую одновременное влияние нагрева и вибрации на снижение электрической прочности изоляции этих ТЭД:

$$U_{np} = U_{np0} \cdot \left[1 - \sqrt{c\tau \exp(\alpha_t \cdot t + \beta_a \cdot a)} \right] \quad (6)$$

где U_{np} - конечное значение пробивного напряжения изоляции ТЭД, кВ; U_{np0} - начальное значение электрической прочности изоляции ТЭД, кВ; c - константа; α_t и β_a - коэффициенты пропорциональности: первый из них характеризует снижение электрической прочности изоляции при повышении её температуры на 1° С , а второй – то же при повышении ускорения на 1 м/с^2 ; τ - время воздействия на изоляцию температуры и вибрации, с; t - температура нагрева изоляции, $^\circ \text{ С}$.

Снижение электрических прочностных характеристик изоляционных конструкций под действием комплексных факторов эксплуатации, описываемое формулой (6) ориентируется на средние значения температур обмоток. В

действительности, обмотки электрических машин нагреваются неравномерно по объёму. Отдельные (локальные) участки обмоток имеют значения температуры, превышающие средние значения для обмоток в целом. Именно локальные перегревы обмоток электрических машин, по мнению Е. Ю. Логиновой, являются причиной столь существенного снижения ресурса изоляции. В частности, отмечается, что при высоких токовых нагрузках и недостаточных уровнях расхода охлаждающего воздуха, разница между максимальной температурой локальных участков и средней температурой обмоток может быть настолько значительной, что скорость необратимых процессов разрушения изоляции может резко возрастать. Защиту от локальных перегревов и поддержание как средних, так и локальных температур обмоток электрических машин в установленных пределах, как показано, могут обеспечить автоматические системы регулирования охлаждения (СО).

Проблеме модернизации СО тягового электрооборудования локомотивов в настоящее время уделяется большое внимание. При этом основным направлением работ в этой области необходимо считать автоматизацию управления СО с минимизацией зависимости режимов её работы от человеческого фактора и плавной регулировкой количества охлаждающего воздуха в зависимости от температурного режима изоляционных конструкций тягового электрооборудования. По данным Б. Н. Ребрика и А. М. Нестерова эффект от внедрения систем, автоматически изменяющих подачу охлаждающего воздуха в зависимости от температуры нагреваемых частей электрических машин и аппаратов, может составить для тепловозов, эксплуатирующихся в РФ 3÷4 % от расхода топлива на тягу. Для электровозов экономия электроэнергии, отнесённая к расходу её на тягу, выше и может достичь 18 % и более.

Далее в работе рассмотрены системы защиты силовых цепей локомотивов от корпусных замыканий и диагностические методы и устройства, применяемые при изготовлении и ремонте подвижного состава. Отмечено, что системы защиты силовых цепей от корпусных замыканий имеют важное значение не только для защиты силового электрооборудования локомотивов, но и для безопасной работы обслуживающего его персонала. Рассмотрена конструкция как тепловозных, так и электровозных систем защиты. При анализе вопросов диагностирования рассмотрены вопросы диагностирования электрооборудования тяговых силовых цепей. Показано, что выбор напряжения диагностирования изоляции электрооборудования остаётся открытым.

В главе 2 выполнено моделирование основных факторов старения изоляции. В частности, рассмотрены тепловые процессы в обмотках ТЭД локомотивов и установлено, что в реальных условиях эксплуатации температура обмоток ТЭД может достигать 150 ÷ 180⁰С.

Показано, что для тепловозных двигателей такие температуры характерны при заниженных расходах воздуха. Влияние уменьшения расхода охлаждающего воздуха, проходящего через ТЭД, на изменение температурного режима изоляции обмоток якорей для различных токов нагрузки исследовалось на математической модели, выражающейся следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
-\lambda_m \frac{d\tau_1}{dx_1} f_m + q_m f_m dx_1 &= -\lambda_m \frac{d}{dx_1} (\tau_1 + \frac{\partial \tau_1}{dx_1} dx_1) f_m + 2k_1 (\tau_1 - \tau_6) e_n dx_1; \\
-\lambda_m \frac{d\tau_2}{dx_2} f_m + q_m f_m dx_2 &= -\lambda_m \frac{d}{dx_2} (\tau_2 + \frac{\partial \tau_2}{dx_2} dx_2) f_m + \frac{\lambda_u \cdot n}{\delta_{u2}} (\tau_2 - \tau_c) dx_2; \\
q_c f_c dx_2 + \frac{\lambda_u n}{\delta_{u2}} (\tau_2 - \tau_c) dx_2 &= \alpha_2 t (\tau_c - \tau_6) dx_2 + \alpha_k \frac{\pi \cdot d_k m_k}{z} (\tau_c - \tau_6) dx_2; \\
-\lambda_m \frac{d\tau_3}{dx_3} f_m + q_m f_m dx_3 &= -\lambda_m \frac{d}{dx_3} (\tau_3 + \frac{\partial \tau_3}{dx_3} dx_3) f_m + 2k_3 (\tau_3 - \tau_6) e_n dx_3; \\
\alpha_{кл} \cdot F_{кл} (\tau_1 - \tau_6) &= P_{кл} + \lambda_m f_m z \frac{d\tau_1}{dx_1},
\end{aligned} \tag{7}$$

где λ_m - теплопроводность меди, Вт/м⁰С, τ - температура обмотки на участке, ⁰С; q_m - тепловыделения в меди, Вт; f_m - площадь сечения меди обмотки, м², x - скользящая координата длины якоря, м; k - коэффициент теплопередачи, Вт/м² ⁰С; τ_6 - температура охлаждающего воздуха, ⁰ С; e_n - половина ширины зубцового деления якоря, м; τ_c - температура стали сердечника, ⁰С; δ_{u2} - толщина изоляции, м; λ_u - коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/м ⁰С; n - число проводников по высоте паза; α_2 - коэффициент теплоотдачи якоря на втором участке, Вт/м² ⁰С; t - ширина зубцового деления якоря, м; α_k - коэффициент теплоотдачи стенок аксиального канала, Вт/м² ⁰ С; d_k - диаметр аксиальных каналов, м; m_k - число аксиальных каналов; z - число пазов якоря; $\alpha_{кл}$ - коэффициент теплоотдачи поверхности коллектора, Вт/м² ⁰С; $F_{кл}$ - площадь поверхности охлаждения коллектора, м²; $P_{кл}$ - потери на коллекторе, Вт.

Коэффициенты теплоотдачи в приведенных уравнениях рассчитывались по известным критериальным зависимостям вида

$$\alpha = \frac{N_n \cdot \lambda_6}{d_g}, \tag{8}$$

где N_n - критерий Нуссельта; λ_6 - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м ⁰С; d_g - гидравлический диаметр, м.

Критерий Нуссельта вычислялся по формуле

$$N_n = k^1 Re^{0,8}, \tag{9}$$

где k^1 - коэффициент, зависящий от характера обтекания теплоотдающей поверхности воздухом; Re - критерий Рейнольдса, равный

$$Re = \frac{V \cdot d_g}{\nu}, \tag{10}$$

где V - скорость движения воздуха, м/с; ν - вязкость воздуха М²/с.

Система уравнений (7) решалась для случаев эксплуатации ТЭД типа ЭД118 в режимах тепловозов типа ТЭ10 при всех имеющих место в поездной работе расходах воздуха и различных токах нагрузки, обусловленных наиболее типичным профилем пути и весом поездов. Результаты расчётов показывают, что в некоторых эксплуатационных режимах при исправной системе охлаждения ресурс изоляции обмоток ТЭД, за одну поездку, может уменьшаться почти до гарантийного. Наиболее резко он падает при

пониженных расходах охлаждающего воздуха. Ресурс изоляции якорных обмоток ТЭД тепловозов типа ТЭ10 с расходом воздуха $60 \text{ м}^3/\text{мин}$ в режиме нагрузки, составляющей 820 А , на порядок меньше, чем при эксплуатации их при том же расходе воздуха в режиме тока нагрузки 600 А . Для тяговых электродвигателей типа ЭД118А, используемых на тепловозах 2ТЭ10В, при эксплуатации их с различными количествами охлаждающего воздуха в диапазоне токов от 575 А до 820 А изменение ресурса их изоляции якорей представлено на рис. 1.

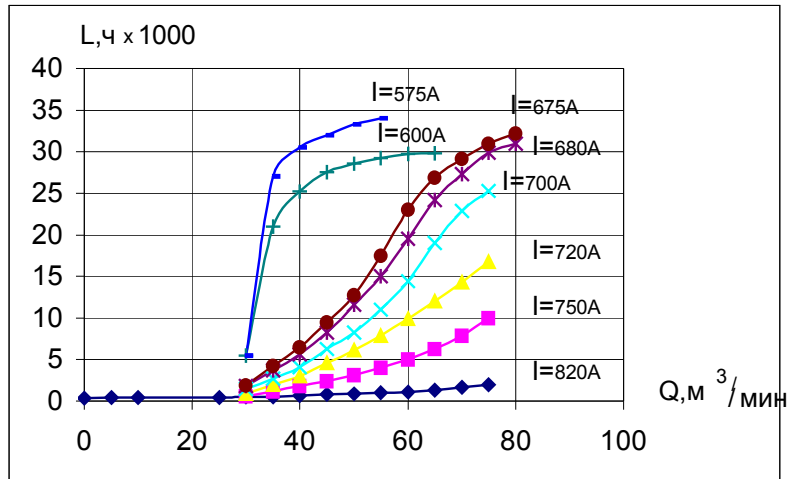


Рис. 1. Изменение ресурса изоляции якорных обмоток ТЭД ЭД118А в зависимости от расхода охлаждающего воздуха и токов нагрузки

Проведенные исследования позволили определить зоны предельно – допустимой работы тепловозов типа ТЭ10, исходя из величины перегрева наиболее нагретой части ТЭД – корпусной изоляции якоря в зоне заднего бандажа. В работе показано, что эти зоны сужаются при неравномерном токораспределении между тяговыми двигателями. Предложена формула для расчёта пробега ТЭД до момента конца ресурса его корпусной изоляции:

$$L = \frac{L_p \cdot L_0}{t \cdot n}, \quad (11)$$

где L – пробег ТЭД до момента конца ресурса его корпусной изоляции; L_p – ресурс изоляции обмоток ТЭД при данной температуре, $ч \cdot 10^3$; L_0 – длина участка обращения локомотива, км; t – длительность воздействия температуры на изоляцию, ч; n – количество воздействий.

Следующим за тепловым фактором старения изоляционных конструкций силовых цепей локомотивов был рассмотрен фактор воздействия на них импульсов высокого напряжения. Перенапряжения в силовой цепи локомотивов исследовались также на тепловозах типа ТЭ10. Было установлено, что при срабатывании любого вида защиты дизеля и электрической схемы (температурного реле масла ТРМ, реле давления воздуха РДВ, реле давления масла второй ступени РДМ2, реле заземления РЗ) на ослабленном поле в электрической схеме силовой цепи возникают перенапряжения амплитудой $1\ 200 - 1\ 700 \text{ В}$, длительностью $0,01$ секунды.

Аналитические исследования этого явления позволили установить, что возникновение импульсов высокого напряжения закономерно для всех локомотивов, имеющих контактную точку токоведущей части силовой цепи с корпусом. Такой точкой, в частности для тепловозов серий ТЭЗ и ТЭ10, является точка подключения реле заземления со стороны корпуса локомотива. Наличие контактной точки с корпусом локомотива в силовой цепи обуславливает образование в ней нескольких колебательных контуров R, L, C, напряжение в которых $U(t) = U_0 \cos pt$ периодически изменяется под действием силовых и параметрических факторов. Колебания в системе будут состоять из собственных колебаний с частотами ω_1 и ω_2 и вынужденных колебаний с частотой p , обусловленных отключением поездных контакторов $\Pi_1 - \Pi_6$. В случае совпадения этих частот возможно явление резонанса. Токи в колебательных контурах, связанных с силовыми цепями ТЭД и тягового генератора будут изменяться в соответствии со следующей системой уравнений:

$$I_1 = -\frac{U_0 \cdot p \cdot (v_2^2 - p)}{L_1 \cdot [(v_1^2 - p^2)(v_2^2 - p) - \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot p^4]};$$

$$I_2 = -\frac{U_0 \cdot p^3 \cdot \alpha_2}{[(v_1^2 - p^2)(v_2^2 - p^2) - \alpha_1 \cdot \alpha_2 p^4]}, \quad (12)$$

где v_1 и v_2 - соответственно, собственные частоты контуров, связанных с силовыми цепями ТЭД и главного генератора, Гц; α_1 и α_2 - коэффициенты, равные соответственно, отношениям коэффициента взаимной индукции M и индуктивностей первого и второго контуров.

В работе показано, что резонанс наступает на частоте $p = v$, соответствующей моменту отключения третьего поездного контактора.

Осциллограмма такого нелинейного колебательного процесса приведена на рис. 2.

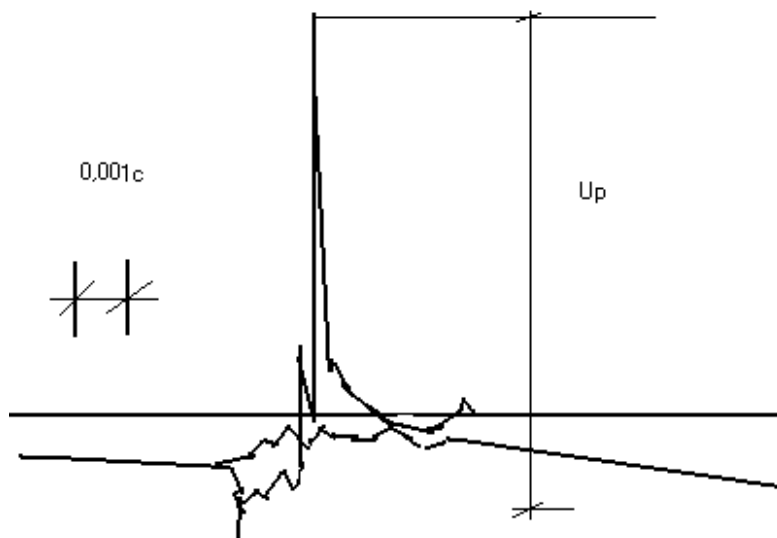


Рис. 2. Осциллограмма нелинейного колебательного процесса в силовой цепи тепловоза 2ТЭ10Л

Одной из причин старения внутренней изоляции, при воздействии сильных электрических полей являются внутренние или частичные разряды (ЧР). Частичные разряды в изоляции возникают в газовых включениях или прослойках диэлектриков, из которых она состоит.

Газовые включения появляются в изоляции в процессе изготовления вследствие усадки пропиточных масс, из-за неплотного прилегания обмоточного провода к неровной поверхности диэлектрика или при несовершенной пропитке многослойной изоляции. В эксплуатации они могут возникнуть вследствие растрескивания и расслоения изоляции от механических нагрузок или при разложении диэлектриков с выделением газов, например, при сильном нагреве. В работе рассмотрены случаи возникновения частичных разрядов в изоляции на постоянном и переменном напряжении.

Представлены результаты математического моделирования надёжности изоляционных конструкций ТЭД локомотивов, с рассмотрением математических моделей отказа изоляции ТЭД на различных этапах их эксплуатации. Показано, что наработки до отказа всех элементов силовой цепи – независимые случайные величины, распределённые по одному и тому же закону, и распределение вероятностей отказов конструкции в целом определяется законом распределения наименьшей порядковой статистики, т. е. распределением вероятностей отказов элементов, отказавших первыми. Показано, что многообразие видов распределений, получаемых различными авторами при рассмотрении надёжности работы изоляции ТЭД локомотивов неслучайно. Такое многообразие обусловлено тем, что интенсивность отказов $\lambda(t)$, в эксплуатации не остаётся постоянной. Это приводит в соответствии с общей формулой надёжности

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (13)$$

к изменениям вида распределений в зависимости от периода их эксплуатации.

Так, например, в период приработки и в период катастрофического износа изоляции, когда интенсивность отказов является монотонно возрастающей функцией, распределение вероятностей времени безотказной работы изоляции ТЭД может быть описано законом Вейбулла. В период же нормального износа, когда интенсивность отказов стабилизируется и становится равной какой-то постоянной величине, вероятность отказа изоляционной конструкции ТЭД может быть рассчитана по законам гамма распределения, экспоненциальному, Пуассона, либо, в наиболее общем виде, нормальному.

Большое внимание в работе уделено моделированию процессов восстановления ТЭД подвижного состава. Предложены математически модели процесса восстановления ТЭД подвижного состава. Показано, что при восстановлении ТЭД в условиях депо ведущая функция восстановления $H(t)$, равная среднему числу отказов (восстановлений) до некоторого момента времени t , равна:

$$H(t) = \sum_{n=1}^{\infty} n[F_n(t) - F_{n+1}(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} nF_n(t) - \sum_{n=1}^{\infty} (n-1)F_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t), \quad (14)$$

где n - число отказов (восстановлений); $F(t)$ - функция распределения наработки ТЭД до отказа. При восстановлении же ТЭД в условиях заводов ведущая функция восстановления приобретает следующий вид:

$$H_{\epsilon}(t) \approx \frac{t}{T_0 + T_{\epsilon}} + \frac{(\sigma_0^2 + \sigma_{\epsilon}^2) - (T_0 + T_{\epsilon})}{2(T_0 + T_{\epsilon})^2}, \quad (15)$$

где T_0 и σ_0 - соответственно средняя наработка и дисперсия времени до отказа, а T_{ϵ} и σ_{ϵ} - соответственно, среднее время и дисперсия восстановления. Применение предложенных моделей восстановления для расчета количества запасных ТЭД на линейных предприятиях и количества их восстановлений для различных пробегов локомотивов при заданном среднесуточном пробеге, показало высокую сходимость результатов расчётов с фактическими средними значениями этих данных в реальных условиях эксплуатации.

Анализ предложенных моделей позволил разработать научные основы методов повышения надёжности изоляционных конструкций тяговых силовых цепей локомотивов в эксплуатации и предопределить направление экспериментальных исследований. Так, анализ модели надёжности изоляции, связывающей распределения прочностных свойств изоляционных конструкций и воздействующих на них электрических нагрузок, показал, что эта связь может быть выражена следующей формулой:

$$Q(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}[\sigma^2(U_{\text{эксн}}) + \sigma^2(U_{\text{пр}})]} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(\Delta u - \overline{\Delta u})^2}{2[\sigma^2(U_{\text{эксн}}) + \sigma^2(U_{\text{пр}})]}\right] d(\Delta u), \quad (16)$$

где - $Q(u) = P(U_{\text{эксн}} > U_{\text{пр}})$ - вероятность отказа изоляции ТЭД в эксплуатации; $\sigma(U_{\text{эксн}})$ - дисперсия эксплуатационных напряжений; $\sigma(U_{\text{пр}})$ - дисперсия

пробивных напряжений изоляции ТЭД; Δu - разность между воздействующими на изоляцию эксплуатационными напряжениями $U_{\text{эксн}}$ и величиной её электрической прочности $U_{\text{пр}}$; $\overline{\Delta u}$ - среднее значение электрической нагрузки в эксплуатации, воздействующее на силовые цепи локомотивов. Из вышеприведенной формулы (16) видно, что повысить надёжность силовых цепей локомотивов можно путём увеличения начальных прочностных электрических свойств изоляционных конструкций в процессе их изготовления и ремонта на заводах, и снижения электрических нагрузок в эксплуатационных режимах.

В главе 3 приведены данные экспериментальных исследований прочностных диэлектрических характеристик изоляционных конструкций и надёжности ТЭД. В частности, экспериментальное определение электрической прочности корпусной изоляции отдельных взятых катушек секций якорей различных модификаций показало, что их распределение пробивных напряжений подчиняется нормальному закону. Значения верхнего и нижнего пределов среднего пробивного напряжения корпусной изоляции катушек якоря ЭД118А соответственно составляют: $U_{np\ min} = 10,068$ кВ; $U_{np\ max} = 10,726$ кВ. Исследования электрической прочности корпусной изоляции коллекторов ТЭД показали, что границы доверительных интервалов (нижних и верхних) вероятностей того, что пробивное напряжение корпусной изоляции коллекторов ТЭД ЭД118А составляет выше восьми киловольт, при доверительной вероятности $\gamma = 0,9$, соответственно равны: $\underline{P} = 0,906$; $\overline{P} = 0,993$. Исследования диэлектрической прочности корпусной изоляции обмоток якорей на начальных позициях технологического процесса их изготовления показали, что величина этой прочности зависит от многих факторов (порядка складирования и транспортировки катушек якоря до места укладки, квалификации обмотчика, уровня технологического процесса осадки катушек в пазах, заклиновки, бандажировки, сушки и пропитки). Распределения вероятностей пробоев корпусной изоляции якорей ТЭД ЭД118А от величины приложенного напряжения показаны на рис. 3.

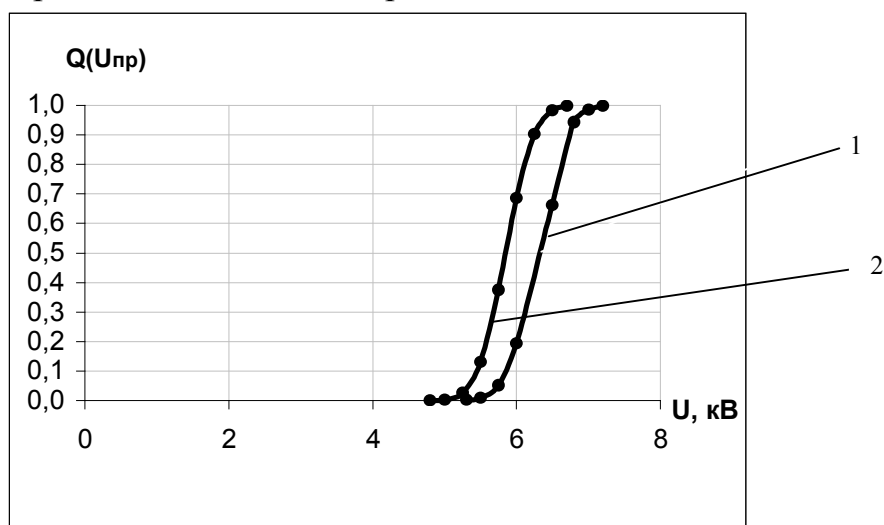


Рис. 3. Кривые вероятностей пробоя корпусной изоляции обмоток якорей типа ЭД118А (1 – нижний слой; 2 – якорь в сборе)

Исследования зависимости диэлектрических характеристик корпусной изоляции якорей ТЭД от температуры и напряжения проводились на двух типах ТЭД. Исследования ставили целью сравнить качество корпусной изоляции якорей, изготовленных с выстилкой (модернизированных) и без выстилки (не модернизированных) пазов плёнкостеклотканью ГТП-2ПЛ-0,17, изучить влияние технологических операций на основные диэлектрические показатели изоляции, а также определить её диэлектрические характеристики в условиях одновременного действия высоких напряжений и температур.

Исследования проводились при помощи установки, принципиальная схема которой приведена на рис. 4.

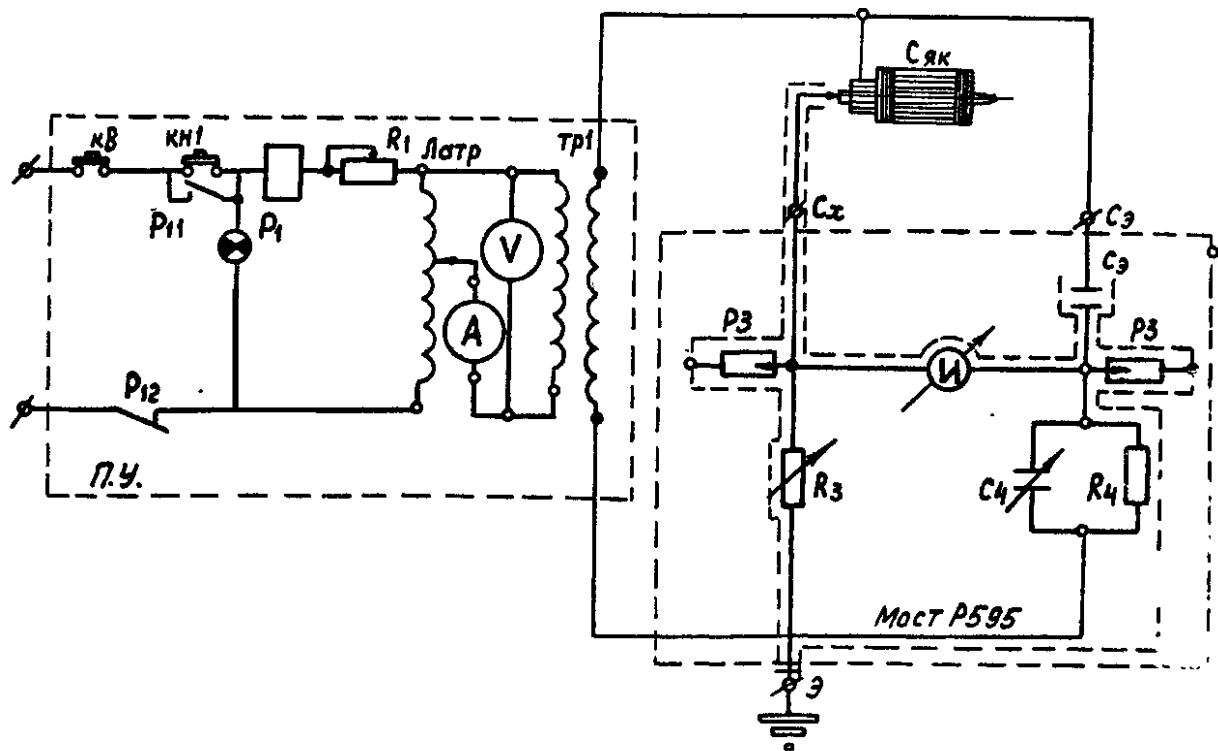


Рис. 4. Блочно-принципиальная схема установки для замера диэлектрических характеристик изоляции на высоком напряжении

Блоком ПУ на рисунке обозначена схема для проверки диэлектрической прочности корпусной изоляции электроизоляционных конструкций ТЭД. Блоком «Мост Р 595» обозначен типовой переносной мост Шеринга, включённый в положение для замера диэлектрических характеристик изоляции на высоком напряжении. Установка позволяет измерять диэлектрические характеристики корпусной изоляции узлов электрических машин (тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ и ёмкость C) в широком интервале испытательных напряжений как при «нормальной», так и при «перевёрнутой» схемах измерений. На блочно-принципиальной схеме установки испытываемый якорь включён в измерительное плечо моста по «нормальной схеме». $C_{\text{эт}}$ на этой схеме – эталонный конденсатор с очень малыми диэлектрическими потерями (с газовой изоляцией); И – индикатор равновесия моста; P_3 – защитные разрядники, предохраняющие измерительные плечи моста в случае пробоя корпусной изоляции испытуемого якоря.

На рис. 5 и 6 показаны графики изменения тангенса угла диэлектрических потерь и ёмкости корпусной изоляции якорей ТЭД ЭД107А, в зависимости от температуры и напряжения.

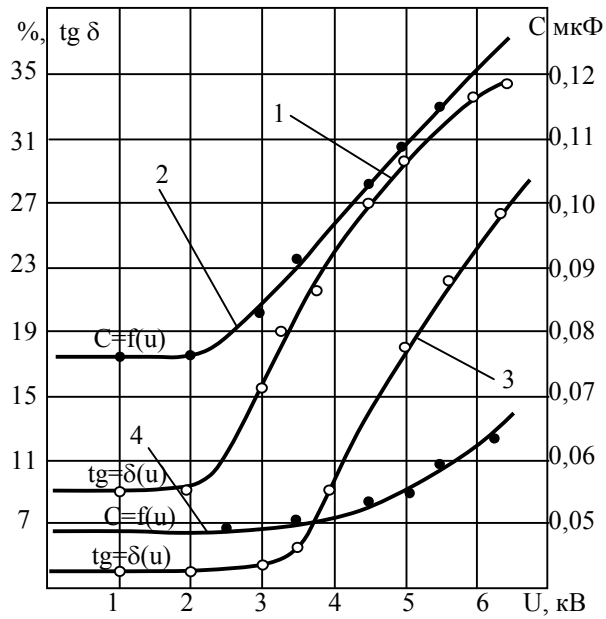


Рис. 5. Зависимость $\text{tg } \delta$ изоляции и электрической ёмкости корпусной изоляции якорей ЭД107А от напряжения при температуре 26°C . (1, 2 – без выстилки паза плёнкостеклотканью ГТП-2ПЛ-0,17; 3, 4 – с выстилкой паза)

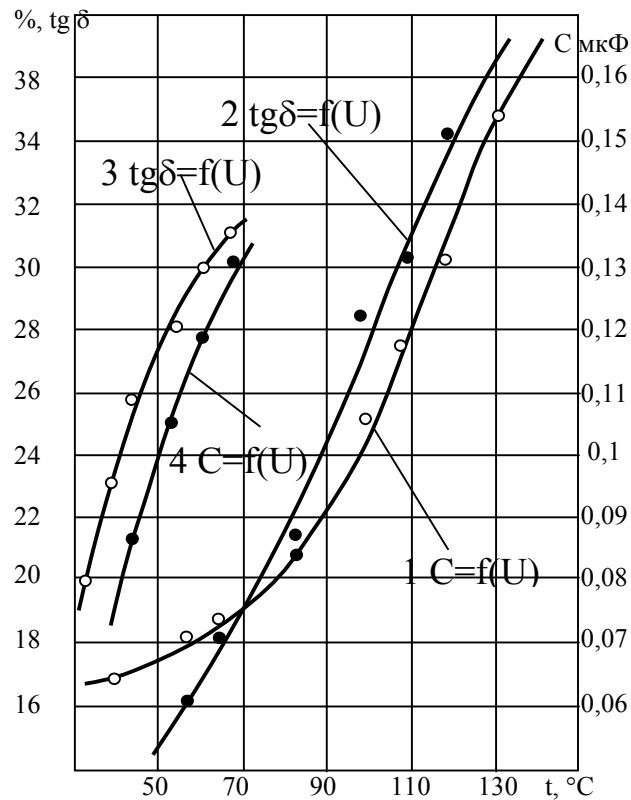


Рис. 6. Зависимость $\text{tg } \delta$ изоляции и электрической ёмкости корпусной изоляции якорей ЭД107А от температуры при напряжении 0,5 кВ (1, 2 - с выстилкой паза, 3, 4 - без выстилки паза плёнкостеклотканью ГТП-2ПЛ-0,17)

Из приведенных графиков видно: диэлектрические характеристики изоляции модернизированных якорей ($\text{tg}\delta$ и C) при одних и тех же внешних условиях имеют значительно меньшие величины, чем не модернизированные, что означает, что мощность диэлектрических потерь, которая может быть выделена без повреждения, в изоляции модернизированных якорей значительно выше, чем аналогичная мощность в якорях не модернизированных. Этот факт свидетельствует о том, что диапазон безопасной работы изоляции, обусловленный в эксплуатации действующими напряжениями и температурами расширен. В работе показано, что если пробой корпусной изоляции якоря не наступил при большей величине диэлектрических потерь, то при меньшей их величине он произойти не может. В общем виде соотношение диэлектрических характеристик, учитывающих внутреннее состояние изоляции при изменении внешних условий её работы, выражается уравнением

$$U_1^2 \text{tg}\delta_1 C_1 \omega_1 = \varphi U_i^2 \text{tg}\delta_i C_i \omega_i, \quad (17)$$

где U_1 - напряжение пробоя изоляции в момент, характеризуемый значением тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции $\text{tg}\delta_1$ и ёмкости C_1, Φ ; U_i - напряжение пробоя при изменившихся условиях, кВ. Состояние изоляции характеризуется в этот момент тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_i$ и электрической ёмкостью C_i ; φ - коэффициент пропорциональности.

Так как величины пробивных напряжений изоляции изоляционных конструкций в общем случае распределены случайно, то и диэлектрические потери, характеризующие состояние изоляции в предпробивной момент так же являются случайными величинами. Это означает, что при выпуске с завода-изготовителя изоляция каждой конструкции имеет свой определённый уровень диэлектрических потерь, который она может рассеять без пробоя. При этом корпусная изоляция тем качественней, чем больше уровень её электрической прочности и меньше величина диэлектрических характеристик ($\text{tg}\delta$ и C). Такое сочетание этих важнейших характеристик изоляции приводит к наиболее надёжным условиям работы изоляции в эксплуатации. Высокий уровень пробивного напряжения, означающий отсутствие сосредоточенных дефектов, обуславливает безопасную работу изоляции под воздействием импульсов высокого напряжения в холодном состоянии, а малая величина диэлектрических характеристик, свидетельствующая об отсутствии распределённых дефектов, создаёт условия надёжной работы изоляции в нагретом состоянии, когда первоначальное пробивное напряжение может быть значительно снижено за счёт роста мощности диэлектрических потерь.

Предложено формулу (17) использовать для диагностики и прогнозирования остаточного ресурса изоляции в виде его пробивного напряжения. Значение величины диэлектрической прочности изоляции U_{np} , при которой можно ожидать наступление её пробоя в эксплуатации или при ремонте, можно вычислить по формуле

$$U_{np} = \sqrt{\frac{U_{ucn}^2 \cdot tg\delta_{ucn} \cdot C_{ucn}}{\varphi \cdot tg\delta_p \cdot C_p}}, \quad (18)$$

где U_{ucn} - испытательное напряжение на последней позиции технологического процесса изготовления якоря (на участке отделки), кВ; $tg\delta_{ucn}$ - тангенс угла диэлектрических потерь изоляции, зафиксированный на этой же позиции; C_{ucn} - электрическая ёмкость изоляции, Ф, зафиксированная там же; $tg\delta_p$ - тангенс угла диэлектрических потерь изоляции, зафиксированный, на участке ремонта или в эксплуатации;

Практическое применение формулы (18) эффективно, если в технические условия на изготовление и ремонт ТЭД внести требования о фиксации, в момент испытаний диэлектрической прочности на последних позициях изготовления изоляционных конструкций, значений тангенса угла диэлектрических потерь и электрической ёмкости корпусной изоляции этих конструкций. Для этого вышеуказанные технологические позиции должны быть оборудованы установками, блочно- принципиальная схема которых приведена на рис. 4.

Приведенный способ диагностирования и дефектировки фактически является развитием и уточнением «Способа испытания изоляции» по авторскому свидетельству автора №546830.

Дополнительно были проведены исследования диэлектрических характеристик корпусной изоляции якорей ТЭД при одновременном действии температуры и напряжения. Зависимости $tg\delta$ и электрической ёмкости корпусной изоляции якорей ЭД118А от температуры и напряжения представлены на рис. 7, 8.

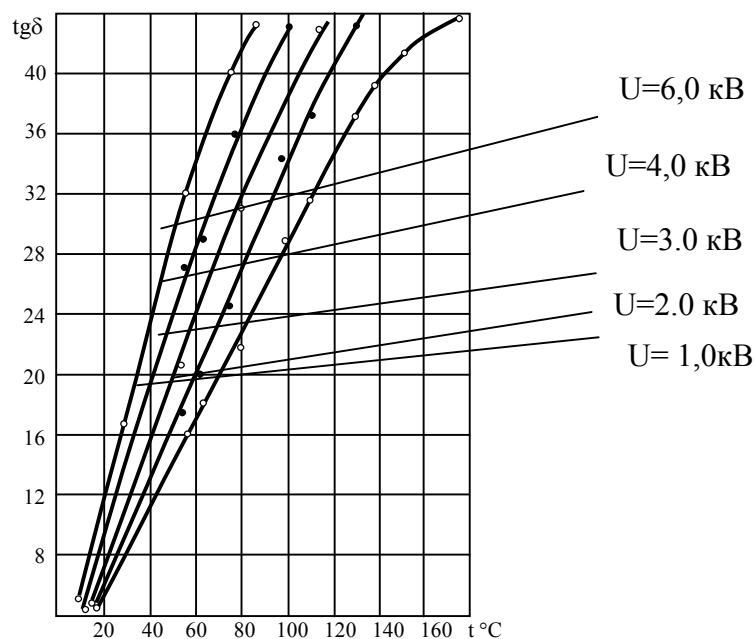


Рис. 7. Зависимость $tg\delta$ от температуры и напряжения корпусной изоляции якорей ТЭД типа ЭД118А

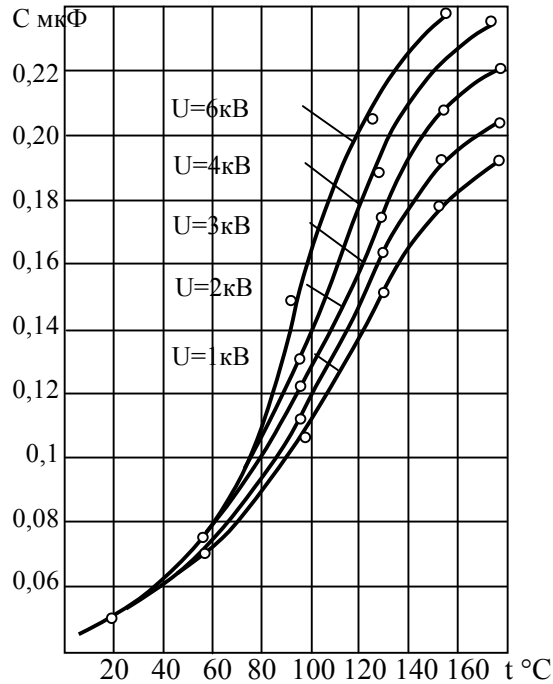


Рис. 8. Зависимость электрической ёмкости корпусной изоляции модернизированных якорей ТЭД ЭД118А от температуры и напряжения

Исследования надёжности корпусной изоляции не модернизированных якорей ТЭД ЭД107А производились в процессе наблюдения за эксплуатацией 1461 ТЭД. Интервалы наработок корпусной изоляции якорей ТЭД до момента её пробоя в эксплуатации изучались в течение пробега от нуля до 1300 тыс. км. Проверка параметров полученного распределения показала, что изменение надёжности корпусной изоляции не модернизированных якорей ТЭД подчиняется нормальному закону. Проверки производились путём нанесения накопленных частот эмпирического распределения на вероятностную бумагу нормального распределения и по критерию Фишера. Распределение вероятностей отказа корпусной изоляции не модернизированных якорей ТЭД ЭД107А приведено на рис. 9.

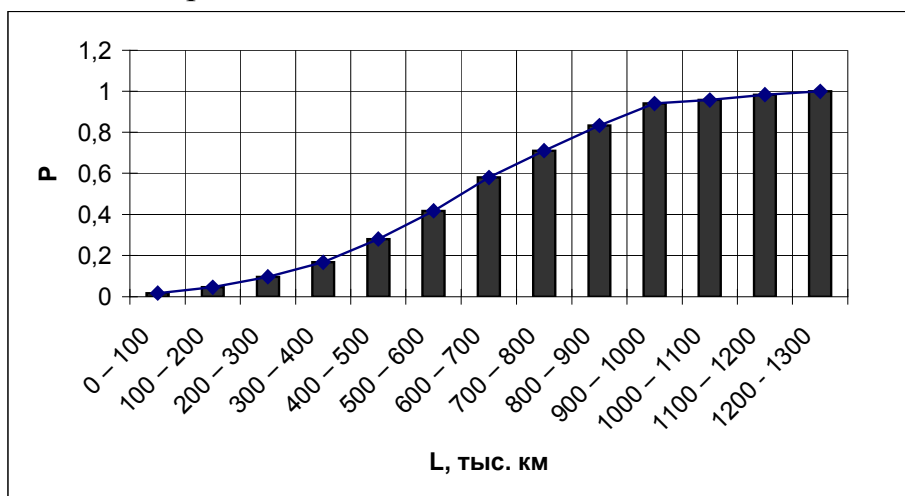


Рис. 9. Вероятность пробоев корпусной изоляции не модернизированных якорей ТЭД ЭД107А в зависимости от пробега

В главе 4 представлены разработанные мероприятия и предложения по повышению надёжности ТЭД и в целом силовой цепи локомотивов. В частности, разработана универсальная система охлаждения тяговых электрических машин локомотивов.

Общим недостатком существующих систем охлаждения локомотивов является то, что их производительность напрямую не связана с температурой изоляционных конструкций ТЭД. Скорости вращения вентиляторов задаются либо в зависимости от режима работы дизель-генераторной установки, либо от субъективной оценки нагрева изоляции обмоток ТЭД машинистом, либо предусматривается автоматическое переключение ступеней скорости вентиляторов в зависимости от токовой нагрузки ТЭД, моделирующей температуру изоляции якорных обмоток.

В работе предложена универсальная система охлаждения тяговых электрических машин локомотивов, защищённая тремя патентами РФ. Блочно-принципиальная схема «Устройства для регулирования охлаждения тяговых двигателей локомотивов» по патенту № 45574, применительно к системе охлаждения ТЭД электровозов типа ВЛ10 приведена на рис. 10.

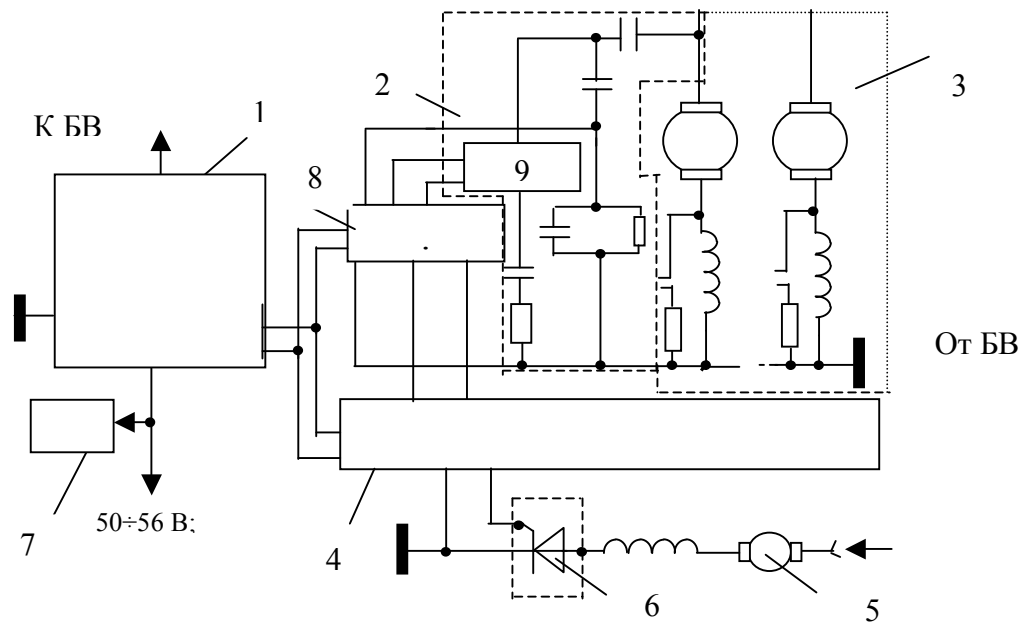


Рис. 10. Устройство для регулирования охлаждения тяговых двигателей локомотивов. 1- статический преобразователь; 2-блок выделения сигнала температуры изоляции якорей ТЭД; 3-силовая цепь локомотива; 4-широтно-импульсный регулятор (ШИР); 5-мотор-вентилятор охлаждения ТЭД; 6-блок тиристоров управления скоростью мотор-вентилятора; 7-аккумуляторная батарея; 8-блок управления ШИМ; 9-генератор переменного тока

Отличительной особенностью предложенной системы охлаждения является плавное регулирование скорости вращения мотор-вентиляторов, в зависимости от температуры изоляции якорных обмоток ТЭД локомотивов. Это достигается введением в систему управления охлаждением блока выделения сигнала температуры изоляции якорей ТЭД по вышеупомянутому патенту РФ №45057. Его принцип действия основан на том, что конструктивная ёмкость силовой цепи локомотивов состоит из параллельно включённых ёмкостей

якорей ТЭД, главного генератора (на тепловозах), катушек магнитной цепи и монтажа (силовых кабелей и аппаратов). Как показали измерения, основную величину электрической ёмкости силовых цепей локомотивов (95÷98 %) составляют якорные цепи электрических машин. И конструктивная электрическая ёмкость этих цепей используется в вышеприведенных патентах как датчик температуры. Зависимость электрической ёмкости корпусной изоляции якорей тепловозов типа ТЭ10 от температуры для различных напряжений изображена на рис. 8. Как видно из приведенных графиков при относительно малой зависимости от напряжения ёмкость корпусной изоляции якорей в диапазоне от 20 до 140⁰ С практически линейна, и находится в прямой пропорциональной зависимости от температуры. В работе приводятся блочно-принципиальные схемы систем охлаждения и их описания для электровозов типа ВЛ10 и тепловоза 2ТЭ116.

Безопасная и безаварийная работа силовых цепей электроустановок невозможна без надёжных систем их защиты от корпусных замыканий и перегревов. В работе разработаны схемы защиты силовых цепей локомотивов, использующих в качестве датчика корпусных замыканий и перегревов корпусной изоляции также конструктивную ёмкость. Экспериментальные исследования показали, что в момент пробоя корпусной изоляции её электрическая ёмкость стремится к бесконечности и её зависимости от температуры и напряжения приобретают релейный характер. Предложенные схемы защищены двумя авторскими свидетельствами. На рис. 11 показана схема, реализованная в АС СССР №712887.

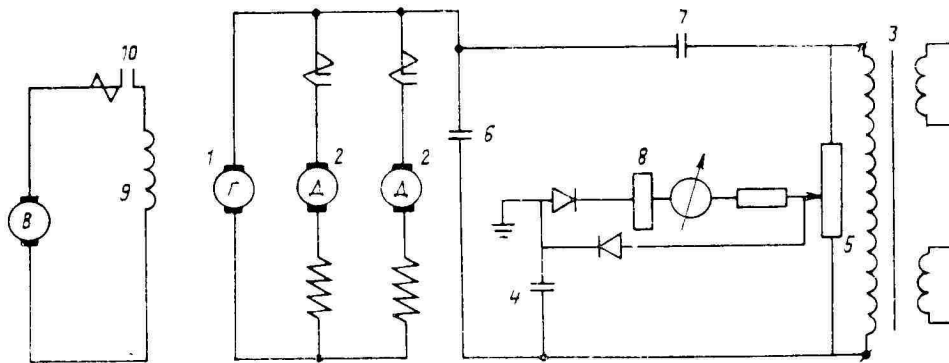


Рис. 11. Устройство для защиты электрической цепи от короткого замыкания на корпус

Она содержит основной источник питания 1- генератор постоянного тока, нагрузку- 2 – тяговые двигатели, схему защиты, состоящую из источника питания переменного тока 3, эквивалентной емкости 4 защищаемой цепи относительно корпуса, сопротивление 5 баланса моста, развязывающих конденсаторов 6 и 7, реагирующего и исполнительного элемента – реле 8. Обмотка возбуждения генератора запитывается через контактор 10, включающая катушка которого в свою очередь запитывается через размыкающие контакты реле 8.

Разработка внедрена на Северном горно-обогатительном комбинате Днепропетровской области. Предложенные схемы защиты от корпусных замыканий позволяют отдельно контролировать целостность корпусной изоляции как в плюсовой, так и в минусовой частях цепи, а отсутствие в схеме защиты заземленной точки разрывает конструктивный колебательный контур, объективно препятствуя возникновению импульсов перенапряжения в силовой цепи в ее переходных режимах.

Проведенные исследования надёжности работы и прочностных диэлектрических свойств корпусной изоляции якорей позволили предложить схему расчёта испытательных пробивных напряжений на основных позициях технологического процесса их изготовления. Схема учитывает прочностные диэлектрические свойства изоляции, вероятности её пробоя при изготовлении и в эксплуатации и позволяет упорядочить согласование норм испытательных пробивных напряжений между поставщиком электротехнической продукции и её заказчиком (между заводами-изготовителями ТЭД и железными дорогами).

Как и при любых испытаниях, при контроле электрической прочности изоляции необходимо опасаться ошибок первого и второго родов. Т. е. либо отбраковки изоляции, которая могла бы работать в течение гарантированного времени в эксплуатации, либо ложного заключения о годности изоляции, имеющей дефекты, в результате которых последует отказ ТЭД по причине пробоя изоляции, до выработки заложенного ресурса. Опасность совершить ошибку первого рода называется риском поставщика, и вероятность её появления обозначается α . Ошибку противоположного характера называется риском заказчика и вероятность её появления обозначается β .

Выбор величин α и β при установлении браковочных норм при испытаниях, обычно, определяется соображениями экономического характера и производится таким образом, чтобы денежные потери поставщика и заказчика при отбраковке изделий в процесс испытаний и отказах их в эксплуатации были минимальными и одинаковыми.

Уравнение, связывающее риски поставщика, заказчика и вероятности пробоя при изготовлении обмоток якорей и в эксплуатации имеет вид

$$\frac{1}{k} \Phi \left[\frac{\tau - \bar{\tau}}{S(\tau)} \right] = \Phi \left[\frac{U_1 - \bar{U}_1}{S(U_1)} \right] = \Phi \left[\frac{U_2 - \bar{U}_2}{S(U_2)} \right] = \dots = \Phi \left[\frac{U_k - \bar{U}_k}{S(U_k)} \right], \quad (19)$$

где k - количество технологических позиций, испытания диэлектрической прочности на которых, принято в расчёт; Φ - функция Лапласа; τ - время безотказной работы изоляции ТЭД; $\bar{\tau}$, $S(\tau)$ - соответственно, средняя величина и дисперсия времени безотказной работы; U_1, U_2, \dots, U_k - искомые испытательные напряжения на 1 ой, 2-ой, ..., k-ой позиции; $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \dots, \bar{U}_k$, $S(U_1), S(U_2), \dots, S(U_k)$ - соответственно, средние величины и дисперсии пробивных напряжений на этих позициях.

Наиболее просто такое уравнение решается графически, если в одних координатах построить кривые вероятности пробоя изоляции в зависимости от величины прикладываемого напряжения для тех позиций технологического

процесса, для которых определяются испытательные напряжения. В этом случае горизонтальная прямая, проведенная на уровне, равном $\frac{1}{k}$ вероятностей пробоя изоляции якорей в эксплуатации при пробеге, равном расчётному, пересечёт кривые распределений в точках, абсциссы которых будут равны искомым испытательным напряжениям на каждой позиции. На рис. 12 приведено решение уравнения (20) для определения норм испытательных напряжений корпусной изоляции якорей ТЭД типа ЭД118А на позициях укладки нижнего и верхнего слоёв обмотки для условий безотказной работы в период гарантийного пробега.

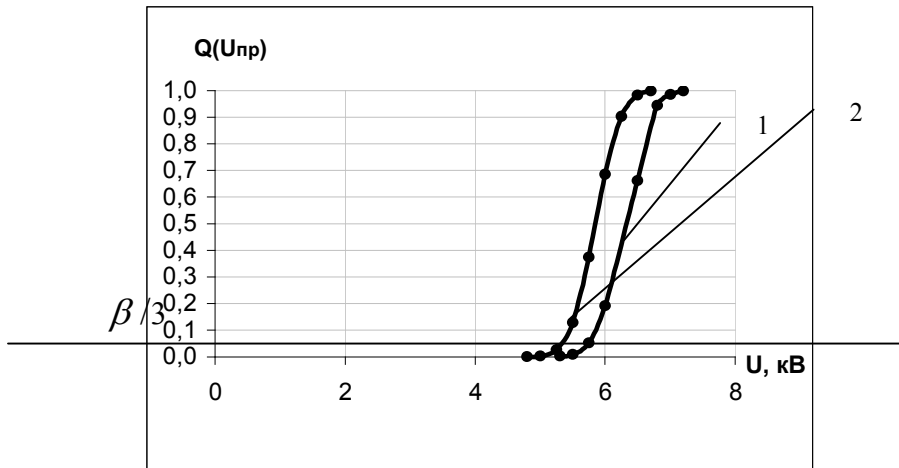


Рис. 12. Определение пробивных испытательных напряжений на позициях укладки нижнего слоя и якоря в сборе (1 – нижний слой; 2 – якорь в сборе)

Разработанная схема была апробирована в условиях Харьковского завода «Электротяжмаш», где по предложенной технологии испытаний корпусной изоляции было изготовлено два комплекта ТЭД ЭД118А. На Ворошиловградском производственном объединении «Ворошиловградтепловоз» ТЭД были установлены на тепловозы 2ТЭ10В №4890 «Б», депо приписки Арысь, Алма-Атинской ж. д. и №4895 «А», депо приписки Палласовка, Приволжской ж. д. Проведенные наблюдения за эксплуатацией локомотивов показали, что в период гарантийного пробега отказов ТЭД, изготовленных по новой технологии испытаний изоляции на диэлектрическую прочность, не было.

Проведенные исследования теплового состояния обмоток якорей тепловозов в условиях эксплуатации (см. гл. 2) показали, что зоны безопасной работы их изоляции сужаются при неравномерном токораспределении в параллельных цепях ТЭД. Кроме этого неравномерное токораспределение снижает устойчивость работы реле буксования. Для контроля токораспределения на локомотивах в работе разработано диагностическое устройство определения токораспределения по ТЭД. Принципиальная схема устройства представлена на рис. 13.

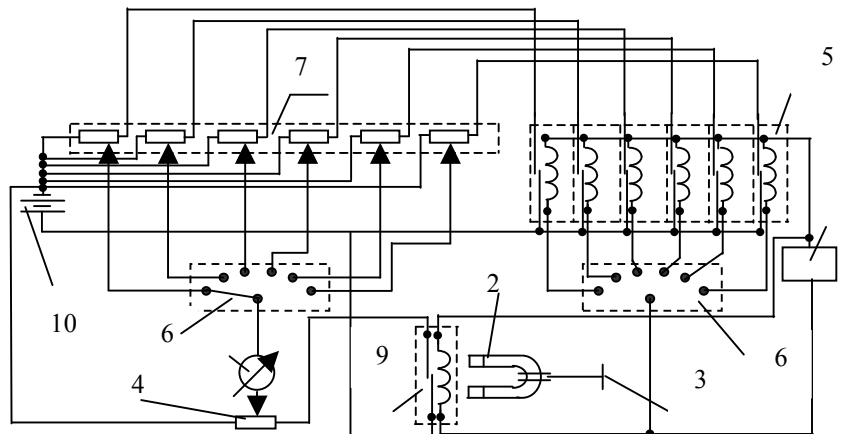


Рис. 13. Диагностическое устройство для определения разности токов по ТЭД. 1 –генератор треугольных импульсов; 2 –генератор эталонного магнитного поля; 3 –регулятор эталонного магнитного поля; 4 –резистор схемы сравнения со стороны эталонного МУК; 5 –обмотки МУК в цепи ТЭД; 6 –платы коммутатора; 7 –резисторы схемы сравнения со стороны ТЭД; 8 –индикатор разности токов; 9 - обмотка МУК в цепи генератора эталонного магнитного поля; 10 –источник стабилизированного напряжения

Схема позволяет измерять разницу токов в цепях ТЭД локомотивов бесконтактным способом без разрыва силовых цепей и получать результат измерения, независимый от толщины изоляции. Это достигается тем, что в разработанном устройстве создаётся дополнительное (имитированное) эталонное магнитное поле и при помощи мостовой коммутационной схемы измеряется разность падений напряжений, пропорциональных токам нагрузки, протекающим в цепях ТЭД локомотивов и падения напряжения, возникающего в цепи генератора эталонного магнитного поля. Падение напряжения, пропорциональное току ТЭД возникает в схеме, состоящей из стабилизированного источника тока, магнитоуправляемого контакта (МУК), устанавливаемого на кабеле ТЭД и переменного резистора. Падение напряжения в цепи генератора эталонного магнитного поля (имитатора) возникает на другом переменном резисторе, подключённом к эталонному МУК и зажимам стабилизированного источника питания. При этом обмотки обоих МУК получают питание от одного и того же генератора треугольных импульсов, изменяющего магнитное поле по линейному закону. Схема, выделяющая разность токов по ТЭД, представляет собой мостовую схему, составленную из переменных резисторов, магнитоуправляемых контактов эталонного магнитного поля и магнитного поля кабеля исследуемого ТЭД и стабилизированного источника питания. В диагональ этого моста включён измерительный прибор, например, магнитоэлектрический, шкала которого отградуирована в единицах тока. По показаниям этого прибора и определяется разность токов по ТЭД.

Устройство, защищено авторским свидетельством на изобретение № 1713510 (Россия) от 28. 02. 90 г.

Помимо приведенного устройства в работе разработаны диагностические устройства, необходимые при изготовлении и ремонте ТЭС. В частности, на рис. 14 приведена принципиальная схема универсальной установки для диагностики корпусной и витковой изоляции якорей ТЭС.

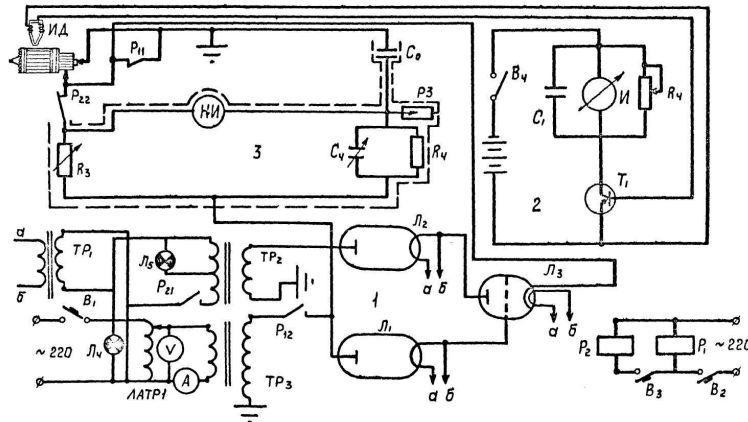


Рис. 14. Универсальная установка для диагностики корпусной и витковой изоляции якорей ТЭС

Установка смонтирована на базе серийной установки с дополнением схемы генератора импульсных напряжений 1 (см. рис. 14) блоком индикации корпусных и витковых замыканий 2, изготовленного с использованием авторского свидетельства Бессуднова Е. П. № 297008 и заменой высоковольтного трансформатора более мощным (НОМ-10) для возможности проверки диэлектрической прочности изоляции якорей и съёма её диэлектрических характеристик на высоком напряжении промышленной частоты при помощи моста Шеринга 3. Установка внедрена на Таш ТРЗ.

В главе 5 рассмотрена экономическая эффективность от использования предложенных разработок. Экономический эффект от внедрения оптимальных норм испытательных напряжений корпусной изоляции и систем защиты силовых цепей от коротких замыканий на корпус позволяет повысить надёжность ТЭС в период гарантийного пробега в 1,35 раза. Для Куйбышевской ж. д. - филиала ОАО «РЖД» годовой экономический эффект от внедрения указанных мероприятий составляет 446,8 тыс. руб. Экономический эффект от внедрения системы охлаждения ТЭС с плавным регулированием скорости вращения вентиляторных колёс на электровозах ВЛ 10, (ВЛ 10У), позволяющей сократить расход электрической энергии на привод вспомогательных устройств, для условий работы депо Кинель того же филиала, в пересчёте на один локомотив, составит 657,02 тыс руб. Экономический эффект от внедрения способа и устройства для диагностирования состояния качества изоляции ТЭС локомотивов, подсчитанный для годовой программы электромашинного цеха завода в 1200 ТЭС составляет 66,24 тыс. руб. Внедрение контроля токораспределения по ТЭС локомотивов и подбор их по характеристикам позволяет повысить надёжность их работы на локомотивах на 25 %. Экономический эффект от внедрения данного мероприятия в депо с парком 100 тепловозов типа ТЭ10 составляет 1395 тыс. руб. Общий

ориентировочный годовой экономический эффект от внедрения предложенных разработок составляет более 53 млн. руб.

В **Заключении** приведены полученные результаты и сформулированы выводы по работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная народно-хозяйственная проблема – разработка научно обоснованных методов, способов, устройств, технических решений и технологических процессов, повышающих надёжность изоляционных конструкций тяговых силовых цепей локомотивов и снижающих расходы на их эксплуатацию и ремонт. Разработанные модели, методы, способы, устройства и технологические процессы внедрены в практику линейных и ремонтных предприятий, заводов-изготовителей.

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие основные результаты и выводы:

1. Проведенный анализ современного состояния научно-технической проблемы повышения надёжности изоляционных конструкций силовых цепей локомотивов показал, что наименее надёжными узлами силовых цепей локомотивов являются электрическая аппаратура (28,7 % от всех видов неплановых ремонтов) и изоляционные конструкции тяговых электродвигателей (ТЭД). Отказы изоляции обмоток якорей ТЭД тепловозов составляют, в среднем, 20,8 %, электровозов 22,2 %. Основными факторами, снижающими надёжность обмоток якорей ТЭД при изготовлении и в эксплуатации, являются термомеханические и электрические нагрузки. Цикл нагрева изоляции до температуры $105\div 120^{\circ}\text{C}$ и охлаждения до 20°C при укладке в пазы, вызывает снижение её импульсной прочности, аналогичное эксплуатации электрической машины в течение 3÷4 лет. Изменения класса изоляции обмоток ТЭД с кл. В на кл. F увеличивает их ресурс лишь в 1,2 раза. Поэтому наиболее перспективным направлением повышения надёжности изоляционных конструкций силовых цепей необходимо считать комплекс технических мер, снижающих уровень воздействующих на них термических и электрических нагрузок в эксплуатации и повышающих уровень их электрической прочности при изготовлении.

2. Предложены обобщённые математические модели, описывающие процессы теплового, электрического старения, и их связь с показателями надёжности и процессами восстановления изоляционных конструкций силовых цепей. Показано, что ресурс изоляционных конструкций силовых цепей в значительной мере зависит от температуры. При следовании локомотива с поездом по перегону с тремя остановками и разгоне поезда до длительного режима с подогретого состояния, ресурс ТЭД, с изоляцией обмоток кл F, уменьшается почти до гарантийного (479 700 км). Наиболее резко ресурс падает при повышенных токах нагрузки и пониженных расходах охлаждающего воздуха. Ресурс изоляции якорных обмоток ТЭД тепловозов типа ТЭ10 с расходом воздуха $60\text{ м}^3/\text{мин}$ в режиме нагрузки 820 А составляет $3\cdot 10^3$ ч., что на порядок меньше, его значения при эксплуатации ТЭД при том

же расходе воздуха в режиме тока нагрузки 600 А ($30 \cdot 10^3$ ч.). Показано также, что причиной постепенного старения изоляции обмоток ТЭД являются частичные разряды в её пустотах при напряжениях, близких к напряжениям ионизации. В силовых цепях локомотивов такие перенапряжения наблюдаются при переходных режимах. Величины перенапряжений в силовых цепях тепловозов колеблются в пределах $1,2 \div 1,7$ кВ. Проведенный математический анализ переходных процессов, показал, что причиной перенапряжений, является наличие контактной точки в силовых цепях, гальванически связанной с корпусом локомотива. Показано, что чем больше математическое ожидание эксплуатационных напряжений, меньше математическое ожидание распределения пробивных напряжений изоляции и выше её температура, тем менее надёжно работает изоляция обмоток ТЭД в эксплуатации. Предложены математические модели и методы, позволяющие определять межремонтные сроки эксплуатации ТЭД, и рассчитывать ресурс, вероятность безотказной работы, остаточное время жизни, коэффициент готовности, среднюю суммарную наработку за определённый пробег, среднее время эксплуатации, до межремонтной нормы пробега, число восстановлений и запасных ТЭД при заданном среднесуточном пробеге локомотива.

3. В результате проведенной серии экспериментальных исследований прочностных диэлектрических характеристик и изоляционных конструкций силовых цепей в условиях изготовления и ремонта показано, что распределение пробивных напряжений корпусной изоляции якорей ТЭД тепловозов типа ТЭ10 подчиняется нормальному закону, с параметрами для отдельно взятых катушек - $\overline{U_{np}} = 10,897$ кВ; $S(U_{np}) = 2,37$ кВ; для изоляционных конструкций якорей в сборе - $\overline{U_{np}} \geq 5,85$ кВ; $S(U_{np}) \geq 1,95$ кВ. Исследованиями надёжности в эксплуатации показано, что распределение вероятностей отказов корпусной изоляции якорей ТЭД тепловозов типа ТЭ10 от пробега также подчиняется нормальному закону с параметрами: математическое ожидание пробега $\overline{L} = 649,316$ тыс. км, дисперсия $S(L) = 257,86$ тыс. км. Проведенные исследования диэлектрических характеристик корпусной изоляции кл В и F позволили получить математические зависимости, отражающие соотношение диэлектрических характеристик при изменении внешних условий её электрических и термических нагрузок, и предложить метод многопараметрического определения пробивных испытательных напряжений при дефектировке изоляционных конструкций силовых цепей в процессе изготовления, эксплуатации и ремонтов. Полученные зависимости конструктивной электрической ёмкости изоляционных конструкций силовых цепей локомотивов от рабочих температур и напряжений, показали, что она может быть использована в качестве датчика её теплового состояния, и предложить метод синтеза автоматических систем охлаждения и защиты силовых цепей от коротких замыканий и перегревов с использованием этих зависимостей.

4. На базе проведенных исследований предложена схема универсальной автоматической системы охлаждения тяговых электрических машин локомотивов с плавным регулированием подачи охлаждающего воздуха и обратной связью по температуре изоляции обмоток якорей, исключая её перегревы выше допустимых пределов. Система позволяет повысить надёжность, сократить количество вращающихся электрических машин и получить автономные системы электропитания вспомогательных цепей и охлаждения ТЭД локомотивов. Разработана система защиты от коротких замыканий на корпус с использованием релейного эффекта конструктивной ёмкости силовых цепей при пробое корпусной изоляции, позволяющая гальванически развязать их токоведущие части с корпусом локомотива и ликвидировать потенциальные условия образования в них импульсов высокого напряжения в переходных режимах. Разработана расчётная схема для определения норм испытательных напряжений корпусной изоляции обмоток электрических машин на заданный пробег, позволяющая учитывать электрические прочностные характеристики изоляции обмоток, их надёжность в эксплуатации и экономические интересы поставщика и заказчика, рассчитаны и опытно внедрены оптимальные нормы испытательных напряжений для ТЭД ЭД118А в условиях заводов – изготовителей. Разработаны способы и диагностическое устройства для входного контроля якорей электрических машин, поступающих в ремонт, учитывающие состояние их изоляции через её диэлектрические характеристики. Разработаны методика и диагностическое устройство для контроля токораспределения в силовых цепях локомотивов, позволяющее определять разницу токов в их параллельных ветвях как в стационарных условиях ремонта, так и в процессе эксплуатации локомотивов. Разработана методика и приведен алгоритм расчёта всех основных показателей надёжности, числа восстановлений и запасных ТЭД при заданных среднесуточном пробеге и параметрах распределения их вероятностей отказов в эксплуатации.

5. Выполненные технико-экономические исследования повышения надёжности тяговых силовых цепей и экономичности их систем охлаждения показали, что суммарный ориентировочный годовой экономический эффект от внедрения предложенных разработок составляет более 53 млн. руб.

По материалам диссертации опубликовано 60 работ, в том числе:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Гордеев И. П., Дудченко Н. В., Волков А. Б. Настройка мощности дизель-генератора тепловоза тепловоза 2ТЭ10Л// Электрическая и тепловозная тяга. – М.: Транспорт. – 1978. - №2. – С. 23 – 26.
2. Гордеев И.П. Повышение надёжности изоляции силовых цепей локомотивов // Наука и техника транспорта. – 2005. - №3. С. 37 – 41.
3. Гордеев И.П. Повышение надёжности изоляции тяговых силовых цепей локомотивов на этапах изготовления и эксплуатации. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2005. – Специальный выпуск «Транспортно- технологические системы». С. 134 – 139.

4. Гордеев И.П., Андрончев И.К., Космодамианский А.С. Универсальная система охлаждения электродвигателей локомотивов. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2005. – Специальный выпуск «Транспортно- технологические системы». С. 139 – 145.

5. Гордеев И.П. Модель надёжности силовых цепей локомотивов в зависимости от температуры изоляции ТЭД // Наука и техника транспорта. – 2006. - №1. С. 70 – 77.

6. Гордеев И.П., Тарасов Е.М. К вопросу дефектировки якорей тяговых электродвигателей. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, №2. – Новочеркасск, 2006. – С. 50 – 51.

7. Гордеев И.П., Тарасов Е.М. Моделирование процессов восстановления тяговых электродвигателей. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, №2. – Новочеркасск, 2006. – С. 48 – 49.

8. Гордеев И.П., Тарасов Е.М. Моделирование тепловых процессов в изоляции обмоток тяговых электродвигателей. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2006. – Специальный выпуск «Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития». С. 152 – 157.

9. Гордеев И.П., Тарасов Е.М., Гордеев А.И. К вопросу нормирования расхода электроэнергии на прогрев локомотива. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2006. – Специальный выпуск «Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития». С. 150 – 152.

10. Гордеев И.П., Тарасов Е.М. Приближённая оценка характеристик надёжности тяговых электродвигателей. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2006. – Специальный выпуск «Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития». С. 155 – 156.

Монографии

11. Гордеев И. П. Моделирование отказов изоляции обмоток тяговых электродвигателей локомотивов в эксплуатации. Монография. – Самара: СамГАПС, 2004. – 172 с.

Авторские свидетельства, патенты

12. А. с. 546830 (СССР). Способ испытания изоляции / И. П. Гордеев. – Оpubл. в Б. И., 1977, № 6.

13. А. с. 712887 (СССР). Устройство для защиты электрической цепи от короткого замыканий на корпус./ И. П. Гордеев, В. Н. Жидков. – Оpubл. в БИ, 1980, № 4.

14. А. с. 1358030 (СССР). Устройство для защиты электрических цепей от коротких замыканий на корпус двигателя./ И. П. Гордеев, Г. М. Зоммерфрайнд. – Оpubл. в БИ, 1987, № 45.

15. А. с. 1703510 (СССР). Устройство определения тока в тяговом двигателе локомотива / И. П. Гордеев, Ф. А. Муракаев, В. Н. Жидков, Т. Т. Бейсакулов. - Оpubл. в Б. И., 1992, №1.

16. Патент на полезную модель RU № 45057. Устройство непрерывного контроля температуры изоляции обмоток электрических машин / Гордеев И. П., Мельников С. А. – Оpubл. в Б. И., 2005, № 10.

17. Патент на полезную модель RU № 45574. Устройство для регулирования охлаждения тяговых двигателей локомотивов / Гордеев И. П., Мельников С. А., Андрончев И. К., Космодамианский А. С.– Оpubл. в Б. И., 2005, № 13.

18. Патент на изобретение № 2273832. Способ измерения температуры изоляции обмоток электрических машин / Гордеев И. П., Мельников С. А. – Оpubл. в Б. И., 2006, № 10.

Статьи

19. Гордеев И.П., Жидков В. Н. О некоторых закономерностях пробоя корпусной изоляции якорей тяговых электродвигателей локомотивов в процессе эксплуатации // Вопросы повышения надёжности тяговых двигателей тепловозов// Межвузовск. сб. научн. тр. Ташк. ин-та инж. ж.-д. трансп. (ТашИИТ). – Ташкент, 1978. – Вып. 146.- С. 70 – 79.

20. Гордеев И. П. Исследование и разработка методов повышения надёжности корпусной изоляции якорей тяговых электродвигателей тепловозов: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. – М.:1980. – 25 с.

21. Гордеев И. П., Катанов М. М. Расчётная схема для определения норм испытательных напряжений корпусной изоляции/ Ташк. Ин – т инж. ж. – д. Транспорта (ТашИИТ). – 1980. – 14 с. – Деп. в ЦНИИТЭИМПС 26. 11 80., № 1155.

22. Гордеев И. П., Аширов С., Тарасов Н. Г. К вопросу надёжности охлаждающих устройств тяговых двигателей тепловозов в эксплуатации// Вопросы динамики, диагностики и надёжности тепловозов; Межвузовск. сб. научн. тр. ТашИИТ. Вып. 184/31. – Ташкент, 1983. – С. 12 – 17.

23. Аширов С., Гордеев И. П. Исследования теплового состояния изоляции якорных обмоток тяговых электродвигателей в режимах эксплуатации при отклонениях параметров их системы охлаждения от нормальных/ Ташк. Ин – т инж. ж. – д. Транспорта (ТашИИТ). – 1986. – 19 с. – Деп. в ЦНИИТЭИМПС 30. 05 86., № 3221.

24. Кузьмич В. Д., Логинова Е. Ю., Гордеев И. П. Исследование неравномерности нагрева обмоток тяговых электродвигателей тепловозов с учётом режимов эксплуатации// Материалы межвузовской научно – технической конференции, посвящённой 25 – летию института. – Самара, 1998. – С. 109 – 113.

25. Гордеев И. П. К вопросу организации выборочного контроля при производстве электрических машин. // Вестник инженеров электромехаников железнодорожного транспорта. Вып. №1. – Самара, 2003. – С. 333 – 338.

26. Тарасов Е.М., Гордеев И.П. Совершенствование устройств безопасности силовых электрических цепей локомотивов // Вестник СамГАПС. – 2005. - №5. С. 23 – 27.

Гордеев Игорь Петрович

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ
ЛОКОМОТИВОВ

05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать 24.10.2006 г. Формат 60×90 1/16. Бумага писчая.

Печать оперативная. Усл. печ. л. 2,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 201.

Отпечатано в Самарской государственной академии путей сообщения
443022, г. Самара, Заводское шоссе, 18.

