

На правах рукописи



Попов Юрий Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
ЭЛЕКТРОВЗОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ
ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» МГУПС (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Смирнов Валентин Петрович

Официальные оппоненты: Беспалов Виктор Яковлевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра «Электромеханики, электрических и электронных аппаратов», профессор;

Степаненко Валерий Павлович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра «Энергетики и энергоэффективности горной промышленности», доцент.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»;

Защита состоится «25» октября 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miit.ru

Автореферат разослан «__» сентября 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Гречишников Виктор
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Направление развития локомотивного комплекса задано Стратегией развития холдинга ОАО РЖД до 2030 года, основной задачей которой является переход на качественно новый уровень оказания услуг при железнодорожных перевозках грузов и пассажиров. Характерно, что на Урало-Сибирском и Восточном полигонах наиболее часто отмечаются нарушения ритмичности движения поездов. Это во многом объясняется сложными природно-климатическими условиями (СПКУ) в данных регионах страны.

Тяговые электрические машины (ТЭМ) локомотивов, эксплуатируемых на полигонах железных с СПКУ, имеют недостаточную надежность. На изоляцию приходится от половины до двух третьих отказов ТЭМ. Ежегодно, более чем в 4 000 ТЭМ локомотивов ОАО «РЖД» наблюдаются пробой изоляции из-за переувлажнения. Значительная часть этих отказов приходится на ТЭМ электровозов, работающих на направлениях железных дорог с СПКУ. ТЭМ электровозов с СПКУ имеют повышенную токовую нагрузку из-за превышения допустимой разницы диаметров бандажей колесных пар и уменьшенных магнитных потоков главных полюсов, что в наибольшей степени отражается на безотказности их изоляции. Неэффективная система вентиляции ТЭМ приводит к локальным перегревам изоляции. Интенсивный тепловой износ дополняется термомеханическим, который вызван увеличенными колебаниями температуры обмоток при вождении поездов повышенной массы и эксплуатацией электровозов при низкой температуре окружающей среды, когда из-за уменьшения влаги в воздухе снижается упругость изоляции. Тепловой и термомеханический износ изоляции якорей дополняется механическим, который обусловлен повышенными колебаниями лобовых соединений якорных обмоток в местах их выхода из сердечников, вызванными интенсивным и продолжительным боксованием колесных пар. Механический износ изоляции обмоток остова вызван перемещениями катушек полюсов по сердечникам при ослабления клинового крепления из-за повышения вибраций ТЭМ от пути в зимний период эксплуатации.

Интенсивный комплексный износ способствует ускоренному старению изоляции с появлением в ней многочисленных пор и капилляров. Интенсивное переувлажнение состарившейся изоляции наиболее перегруженных ТЭМ при продолжительном нахождении электровозов в отстое, характерном для полигонов железных дорог с СПКУ, приводит к ее пробоям. Отсутствие объективных средств и тех-

нологий контроля переувлажнения изоляции не позволяет своевременно выявить предаварийные ТЭМ и восстановить их работоспособность.

Степень разработанности проблемы. Исследованию безотказности ТЭМ тягового подвижного состава железных дорог, совершенствованию систем технического диагностирования и ремонта постоянно уделялось значительное внимание. Большой вклад в изучение этих проблем внесли: А.Е. Алексеев, И.Н. Богаенко, В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, И.И. Галиев, З.Г. Гиоев, М.Д. Глущенко, А.А. Зарифьян, Д.Д. Захарченко, А.Б. Иоффе, И.П. Исаев, В.И. Киселев, А.С. Курбасов, А.Л. Курочка, В.А. Кучумов, М.Д. Находкин, Н.А. Ротанов, А.Н. Савоськин, И.В. Скогорев, В.П. Феоктистов, В.А. Четвергов, В.Г. Щербаков, В.П. Янов и другие исследователи.

Значительный вклад в решение вопросов безотказности изоляционных конструкций наиболее «слабого» узла ТЭМ внесли: В.Д. Авилов, В.Г. Галкин, И.П. Гордеев, Г.Б. Дурандин, Ш.К. Исмаилов, М.Ф. Карасев, В.И. Карташев, А.С. Космодамианский, Е.Ю. Логинова, А.Т. Осяев, А.С. Серебряков, В.П. Смирнов, Н.Д. Сухопрудский, В.В. Харламов, А.М. Худоногов и многие другие.

Целью диссертационной работы является повышение ресурса тяговых электрических машин электровозов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях за счет реализации систем управления температурно-влажностным режимом работы изоляции.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведен анализ безотказности ТЭМ электровозов, работающих в сложных природно-климатических условиях Транссибирской магистрали;
- определено влияние эксплуатационных и природно-климатических факторов на безотказность изоляционных конструкции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах железных дорог с СПКУ;
- уточнен механизм старения изоляции ТЭМ электровозов, полигонов железных дорог с СПКУ;
- обоснован процесс снижения электрической прочности изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в СПКУ;
- разработаны методики и средства обеспечения необходимого температурно-влажностного режима эксплуатации изоляции ТЭМ электровозов полигонов железных дорог с СПКУ;

– определена экономическая эффективность от внедрения методик и средств обеспечения необходимого температурно-влажностного режима работы изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на железных дорогах с СПКУ.

Объектом исследования является ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на направлениях железных дорог с СПКУ, а также методы и средства, обеспечивающие необходимый температурно-влажностный режим работы их изоляции.

Методы исследования. Для теоретических исследований применялись теория нагревания и охлаждения твердого тела, методы и теории тепло-массообмена. Экспериментальные исследования проводились в локомотивных депо Иланская и Абакан Красноярской железной дороги, Нижнеудинск, Иркутск-Сортировочный, Улан-Удэ, Вихоревка Восточно-Сибирской железной дороги, Северобайкальск Байкало-Амурской железной дороги, Чита Забайкальской железной дороги, в депо и ремонтном предприятии Михайловского горно-обогатительного комбината (ГОК), на Улан-Удэнском электровозовагоноремонтном заводе (УЛВРЗ) в период с 2000 по 2010 год и заключались в измерении параметров, характеризующих состояние и режим работы ТЭМ. Данные об отказах были использованы из ежемесячных, ежеквартальных и годовых отчетов локомотивных депо, данные о пробегах электровозов взяты в группах учета пробега локомотивов. При текущих ремонтах и технических обслуживаниях в локомотивных депо, а также средних и капитальных ремонтах на УЛВРЗ определялась увлажненность изоляционных конструкций ТЭМ. Обработка и анализ полученных данных велись с использованием теорий и методов математической статистики: теории оценивания, корреляционного и регрессионного анализов. Часть данных о режимах и параметрах работы ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в СПКУ, получены с использованием программного обеспечения «КОРТЭС», а также программы автоматизированной системы управления локомотивами АСУТ-Т. Расчет параметров потоков отказов выполнялся с использованием программы расчета «однофакторный корреляционный анализ», приведенной в комплекте программ Microsoft Excel.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– разработан комплекс мероприятий повышения ресурса ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на направлениях железных дорог с СПКУ, путем непрерывного контроля температуры и периодического контроля влажности изоляции обмоток с поддержанием необходимой температуры, исключающей переувлажнение изоляции при длительном нахождении электровоза в ожидании работы;

– выявлено, что в условиях эксплуатации электровозов на полигонах с СПКУ основным диагностическим параметром, характеризующим тепловой процесс ТЭМ, является температура, а процесс изменения электрической прочности изоляции ТЭМ - величина ее увлажненности;

– получены корреляционные связи влияния эксплуатационных и природно-климатических факторов на безотказность ТЭМ электровозов, полигонов железных дорог с СПКУ, которые позволяют установить степень и характер влияния факторов на безотказность ТЭМ и их изоляции;

– уточнен механизм и установлены причины ухудшения электрических и механических характеристик (ЭМХ) изоляции ТЭМ, электровозов, работающих на направлениях железных дорог с СПКУ, который обусловлен ускоренным тепловым износом;

– установлен механизм и причины ухудшения ЭМХ изоляции ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ, вследствие термомеханического износа;

– уточнен механизм снижения электрической прочности изоляции ТЭМ из-за переувлажнения при продолжительном нахождении электровоза в отстое;

– разработаны методики и средства контроля температуры, увлажненности изоляции ТЭМ, поддержания температуры ТЭМ электровозов при длительном нахождении в отстое на уровне, исключающем переувлажнение изоляции.

Практическая значимость работы:

– получены зависимости интенсивности износа изоляционных конструкций ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в СПКУ, от: величины токовой нагрузки; напряжения на зажимах ТЭМ; колебаний температуры обмоток; вертикальных вибраций от пути; изменения упругости изоляции, обусловленного содержанием влаги в воздухе при изменении температуры окружающей среды; продолжительности отстоя электровозов, что позволяет прогнозировать и планировать срок их службы, разрабатывать эффективные мероприятия по предупреждению отказов, определять оптимальные массу составов и скорость движения на участках и направлениях с СПКУ, устанавливать эффективные нормы расходов материалов;

– предложен уточненный механизм процесса ухудшения ЭМХ изоляции ТЭМ, позволивший совершенствовать систему вентиляции тяговых машин электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, конструкцию соединений лобовых обмоток, систему контроля температуры элементов ТЭМ, разработать более работоспособные элементы крепления остовных обмоток, а также своевременно

выявлять ТЭМ с переувлажненной изоляцией и восстанавливать их работоспособность;

– полученные при выполнении исследования ежегодные зависимости от метеорологических факторов среднемесячных параметров потоков отказов изоляции ТЭМ, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, позволяют определять состояние изоляции тяговых электрических машин электровозов разных видов движения (грузовое, подталкивающее, вывозное) приписного парка отдельно взятого депо. Это дает возможность проводить мероприятия, обеспечивающие требуемые параметры потоков отказов ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ;

– использование предлагаемого устройства для измерения увлажненности изоляции тяговых электрических машин позволяет выполнять объективный контроль качества сушки (степени увлажненности изоляции ТЭМ) перед и после пропиток компаундами или пропиточными лаками при ТР-3, СР и КР, что существенно повышает качество пропиток и, соответственно, ресурс ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ;

– выявлена идентичность зависимостей от метеорологических факторов среднемесячных показателей безотказности изоляции классов нагревостойкости «В», «F», «Н» ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, что позволяет при знании рассматриваемых зависимостей для одного класса нагревостойкости изоляции использовать их для определения состояния изоляции ТЭМ других классов нагревостойкости;

– разработаны методики управления температурно-влажностным режимом работы ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в СПКУ:

а) непрерывного контроля температуры, позволяющего снизить токовую нагрузку или отключить ТЭМ при повышении температуры выше допустимого значения из-за повышенной токовой нагрузки, снижения интенсивности вентиляции, ухудшения теплопроводности изоляции вследствие потери пропиточным компаундом (лаком) диэлектрических свойств при некачественной пропитке, недостаточной теплоотдаче с поверхности загрязненных обмоток;

б) комплексного контроля увлажненности ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ, определяющего степень увлажненности изоляции ТЭМ с представлением результатов измерения увлажненности изоляции и рекомендаций о режиме сушки на мониторе и принтере;

в) подогрева обмоток ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ, от выпрямительных установок возбуждения во время длительного отстоя, позволяющего избежать переувлажнение изоляции и последующий ее пробой.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

– комплекс мероприятий, направленных на повышение ресурса ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, путем непрерывного контроля температуры, периодического контроля влажности изоляции обмоток и поддержания необходимой температуры, исключающей переувлажнение изоляции обмоток ТЭМ при длительном отстое электровозов;

– корреляционные связи влияния природно-климатических и эксплуатационных факторов на безотказность ТЭМ и изоляционных конструкций тяговых электрических машин электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, позволяющие установить степень и характер влияния факторов на безотказность тяговых электрических машин и их изоляции;

– механизм старения изоляционных конструкций ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ;

– механизм снижения электрической прочности изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ из-за переувлажнения во время длительного ожидания работы;

– методики и средства обеспечения необходимого температурно-влажностного режима изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ.

Обоснованность и достоверность результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируется на корректно использованных методах теорий нагревания и охлаждения твердого тела и тепло – массообмена, расчетных соотношениях, характеризующихся удовлетворительными совпадениями с результатами экспериментальных исследований ОмГУПСа, ИрГУПСа, Уральского филиала АО ВНИИЖТ.

Реализация результатов работы. Результаты исследований рекомендованы к внедрению в эксплуатационных и сервисных локомотивных депо, эксплуатирующих электровозы в сложных природно-климатических условиях. Материалы используются в учебном процессе на кафедре «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта при изучении дисциплин «Тяговые электрические машины» и «Эксплуатация и ремонт ТПС».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Российской открытой академии транспорта Московского государственного университета путей сообщения (Москва, 2011); XXII международной конференции «Актуальные проблемы естествознания и образования в условиях современного мира» (Нижний Новгород, 2013); республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (Ташкент, 2013); заседаниях кафедры «Тяговый подвижной состав» МГУПС (МИИТ) (Москва, 2010-2017), IX международной конференции «Системы безопасности на транспорте» (Будва, Черногория, 2016).

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 20 научных трудов, в том числе четыре статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; получен патент на полезную модель (№148398 опубликовано 10.12.14 г.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений, списка литературы из 116 наименований и содержит 164 страницы основного текста, 158 рисунков и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, отражена структура диссертации, характеризуется научная новизна и практическая значимость результатов исследований.

Первая глава посвящена рассмотрению результатов анализа безотказности ТЭМ электровозов, как одному из свойств надежности, которое позволяет непрерывно выявлять работоспособность изделия как в период его использования, так и в период хранения и транспортировки. Для определения работоспособности ТЭМ использован показатель безотказности ремонтируемых узлов и деталей – параметр потока отказов, который в нашем случае представляет отношение числа отказов ТЭМ электровозов депо за определенный промежуток времени к пробегу. В анализе использованы статистические материалы Восточного и Урало-Сибирского полигонов железных дорог ОАО «РЖД», а также Михайловского ГОК. На долю отказов ТЭМ этих полигонов приходится от 25 до 50 процентов и более повреждений электровозов. Неисправности изоляционных конструкций вызывают большую часть

отказов ТЭМ (рисунок 1). Параметры потока отказов ТЭМ и изоляции в десятки раз превышают допустимые значения. На отказы изоляции якорных обмоток

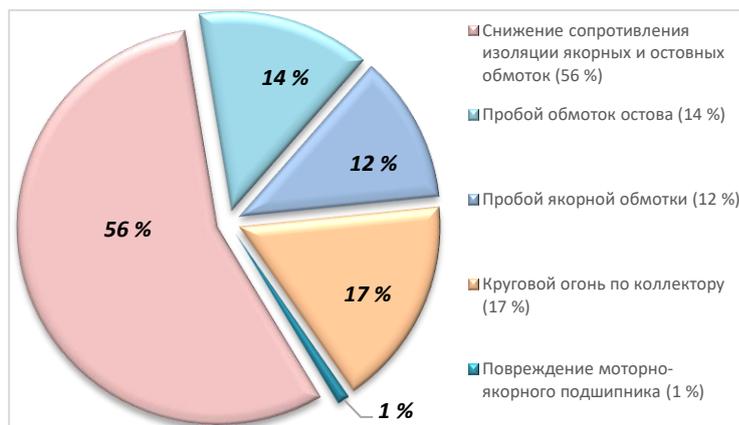


Рисунок 1 – Распределение отказов ТЭМ электровозов 2ЭС6 по видам неисправностей

ТЭМ электровозов Восточного полигона приходится около половины повреждений, остальные отказы вызваны повреждениями главных, дополнительных полюсов, компенсационных обмоток и подшипников, а также круговыми огнями на коллекторе. Недостаточная безотказность ТЭМ обусловлена как слож-

ными климатическими (рисунок 2), так и тяжелейшими эксплуатационными условиями – протяженными расчетными подъемами до 18 ‰, смещением средних тележек секций до предельного значения в многочисленных кривых малого радиуса (до 200 м), а также переоборудованием двухсекционных электровозов ВЛ85 в трех секционные для сокращения количества локомотивных бригад. Это привело к повышенному износу бандажей колесных пар. Из-за нехватки устройств перекачки колесно-моторных блоков в депо Северобайкальск в эксплуатации находились электровозы с чрезмерной разницей по диаметру бандажей (рисунок 3), приводящей к повышенной токовой нагрузке ТЭМ и интенсивному боксованию колесных пар с увеличенным диаметром бандажей.

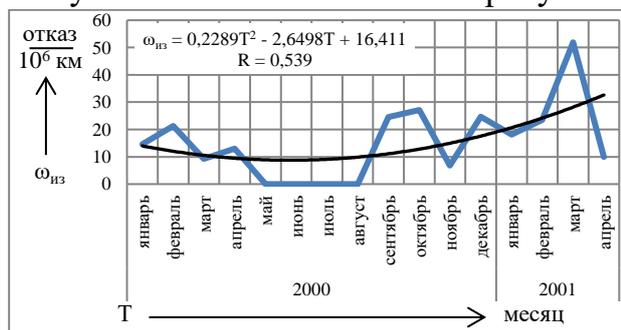


Рисунок 2 - Динамика изменения показателя безотказности изоляции ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Северобайкальск во времени

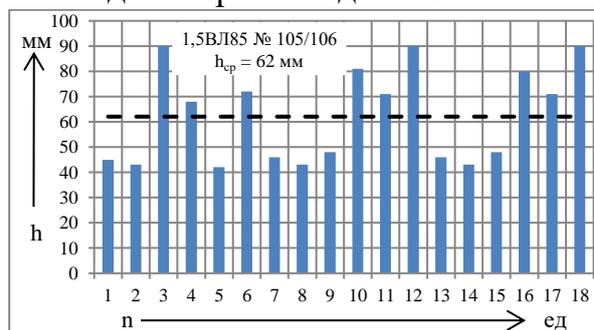


Рисунок 3 - Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза ВЛ85

Отмечено, что на частоту возникновения отказов изоляции ТЭМ на полигонах с СПКУ влияет время нахождения электровозов в отстое.

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в СПКУ. Выявлена корреляционная связь между метеорологическими факторами окружающей среды и безотказностью ТЭМ и их изоляционных конструкций. Так, для изоляции ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Северобайкальск наблюдалась корреляционная связь между безотказностью изоляции ТЭМ $\omega_{из}$ и: температурой ϑ_B , абсолютной влажностью окружающей среды e_B , уровнем вертикальных вибраций от пути a_B

$$\omega_{из} = 0,0067\vartheta_B^2 - 0,9333\vartheta_B + 23,012, R = 0,581;$$

$$\omega_{из} = -15,14\ln(e_B) + 42,384, R = 0,597;$$

$$\omega_{из} = 0,0038a_B^2 - 0,2049a_B + 11,86, R = 0,756.$$

При рассмотрении прямой безотказности якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская $\omega_я$ от среднемесячной температуры окружающего воздуха ϑ_B , приведенной на рисунке 4, можно отметить возрастание параметра потока отказов изоляции обмоток якоря с увеличением температуры воздуха. Это указывает на резко ухудшенное состояние изоляции обмоток якорей. Около 90 % ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская эксплуатировались с непропитанной изоляцией якорных обмоток.

В то же время характер изменения зависимости безотказности остовных обмоток тяговых электрических машин $\omega_{ост}$ от среднемесячной температуры воздуха ϑ_B этого же парка электровозов, приведенной на рисунке 5, свидетельствует о том, что изоляция остовных обмоток была пропитана. Однако значительный разброс ежемесячных значений параметра потока отказов $\omega_{ост}$ относительно средней линии тренда зависимости указывает на снижение качества пропитки изоляции обмоток остова.

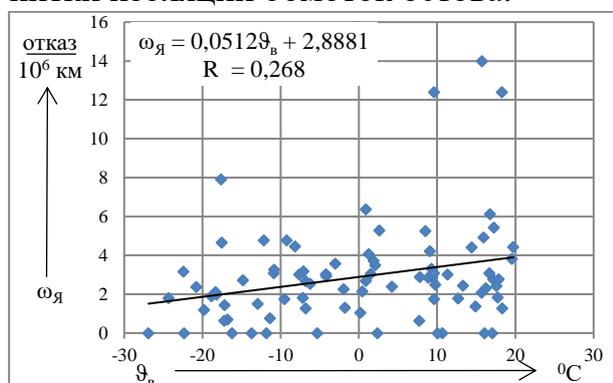


Рисунок 4 - Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ

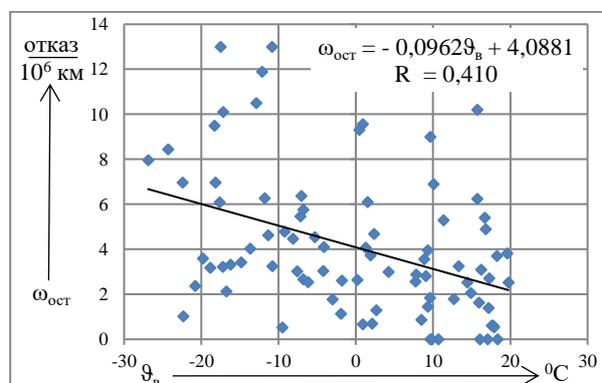


Рисунок 5 - Характер изменения параметра потока отказов остовных обмоток ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

При рассмотрении прямой, описывающей связь показателя безотказности изоляции якорных обмоток ТЭМ $\omega_{я}$ электровозов ВЛ80Р депо Иланская и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 6), видно, что с увеличением вибраций, безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ повышается. Это свидетельствует о проявлении эффекта «гироскопа» якорных обмоток. В то же время, интенсивный рост параметра потока отказов изоляции обмоток остова ТЭМ с увеличением вертикальных вибраций от пути указывает на существенное влияние вибраций на безотказность этих обмоток (рисунок 7) и свидетельствует о необходимости совершенствования конструкции их крепления.

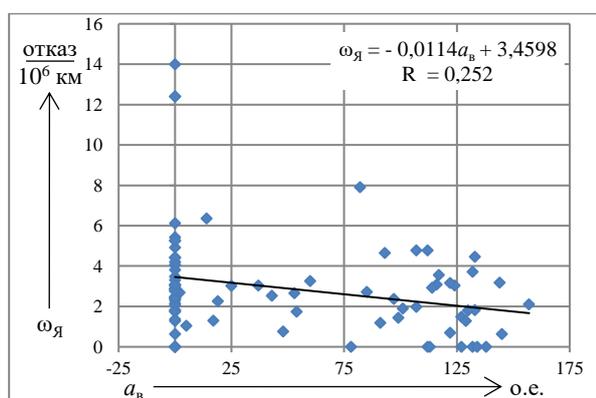


Рисунок 6 - Влияние величины вертикальных вибраций ТЭМ на безотказность изоляции якорных обмоток

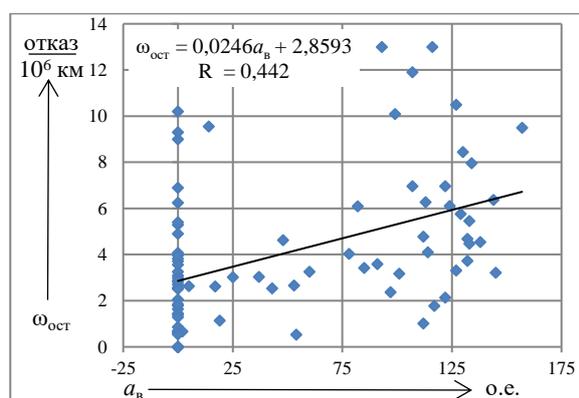


Рисунок 7 – Безотказность изоляции обмоток остова от величины вертикальных вибраций ТЭМ

На рисунке 8 приведены данные о токовой нагрузке и превышении температуры якорной обмотки ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участкам южного направления Транссиба Тайшет-Междуреченск.

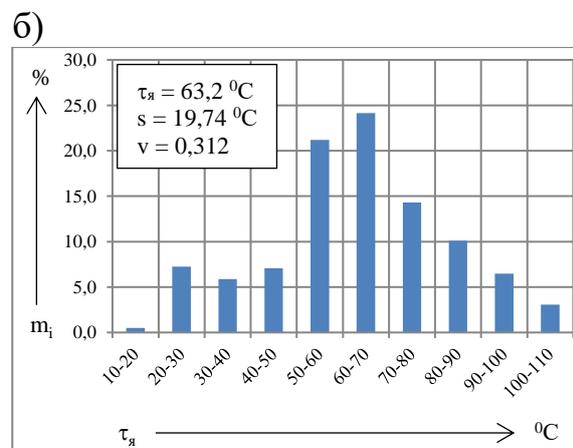
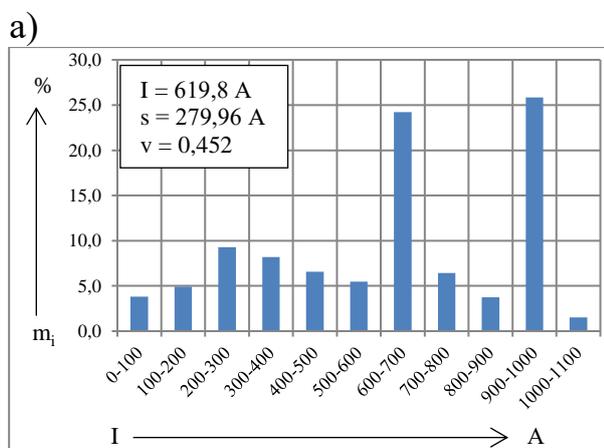


Рисунок 8 - Токовая нагрузка (а) и превышение температуры якорной обмотки ТЭМ (б) электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т

Параметры определены с использованием программного обеспечения «КОРТЭС». Из рассмотрения гистограмм, можно отметить, что токовая нагрузка выше допустимой величины, а температура якорной обмотки ТЭМ, при номинальных значениях конструктивных параметров электровоза, не превышает предельно допустимого значения. При этом необходимо отметить, что в приведенных результатах не учтено влияние различий диаметров бандажей колесных пар электровоза, напряжений ВИП, магнитных потоков главных полюсов, сопротивлений обмоток, снижения расхода охлаждающего воздуха ТЭМ. На рисунке 8: s – средние квадратические отклонения; v – коэффициенты вариации тока и превышения температуры якорной обмотки.

В третьей главе рассмотрены результаты теоретического исследования безотказности ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ. Определено влияние различий в характеристиках ТЭМ, ВИП (ВУК); КМБ на величину силы тока ТЭМ (магнитных потоков главных полюсов, сопротивлений обмоток, величины смещения траверс щеткодержателей относительно нулевого положения, напряжений ВИП (ВУК), диаметров бандажей колесных пар КМБ). При коэффициенте использования ТЭМ по току (K_I) до 0,8 (рисунок 9) тепловой износ изоляции составлял 35 – 40 % общего износа. С увеличением K_I до 1,3 – 1,4 доля теплового износа достигала 70 – 90 % общего износа. С уменьшением количества охлаждающего воздуха тепловое старение изоляции возрастало. При расходе охлаждающего воздуха Q , близком к нулевому значению в схеме вентиляции ТЭМ с разворотом охлаждающего воздуха на 270° и $K_I = 0,47$, температура перегрева

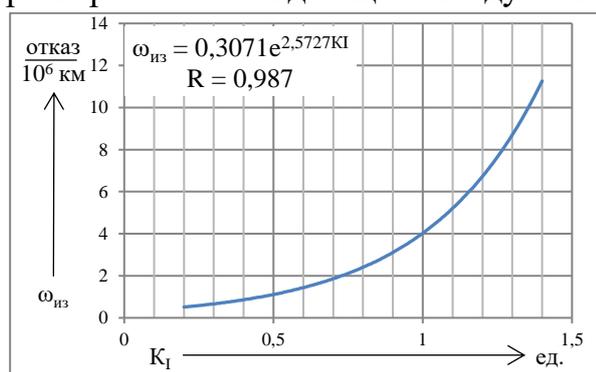


Рисунок 9 - Характер изменения показателя безотказности изоляции ТЭМ электровозов переменного тока от коэффициента использования по току

изоляции якорной обмотки такая же, что и при токе продолжительного режима и номинальной вентиляции. В схеме же вентиляции с разворотом воздуха на 90° и $Q = 0$ это же значение перегрева наблюдалось при $K_I = 0,73$. Колебания температуры обмоток ТЭМ значительно повышали износ изоляции. При этом термомеханический износ изоляции ТЭМ может превысить тепловой (рисунок 10). Анализ гистограмм колебаний температуры якорных обмоток ТЭМ электровоза ВЛ80Р при

ведении грузовых поездов, массой 1600, 4200 и 5700 т по направлению Мариинск-Тайшет центрального направления Транссиба и расчет показали, что колебания температуры обмоток, вызывающие термомеханическое старение изоляции, увеличивали ее износ соответственно на 2,9; 18,1 и 33,8 % по сравнению с тепловым износом при неизменной средней температуре обмотки. Термомеханическое старение изоляции непропитанных якорных обмоток ТЭМ электровазов ВЛ85 Восточно-Сибирской железной дороги значительно возросло из-за пониженной упругости (хрупкости) изоляции как в зимний, так и, в еще большей степени, в летний период эксплуатации.

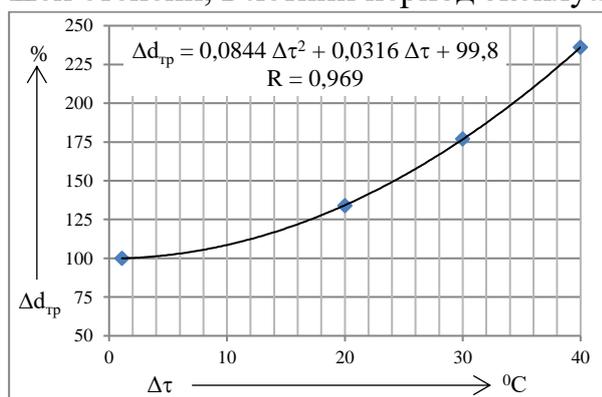


Рисунок 10 - Влияние колебаний превышения температуры на износ изоляции

Механизм пробоя изоляции открытых лобовых соединений ТЭМ, полигонов с СПКУ, обусловлен действием результирующих сил – центробежной, тяготения и силы, создаваемой бандажом задних лобовых соединений. Эти силы при вращении якоря ТЭМ создавали пульсирующий, изменяющийся по величине момент, приложенный в центре тяжести открытых лобовых соединений. Момент вызывал изгибы изоляции вылетов секций, выходящих из пазов сердечника якоря. Как установлено в главе 1, чрезмерное различие диаметров бандажей колесных пар электровазова, приводит к интенсивному

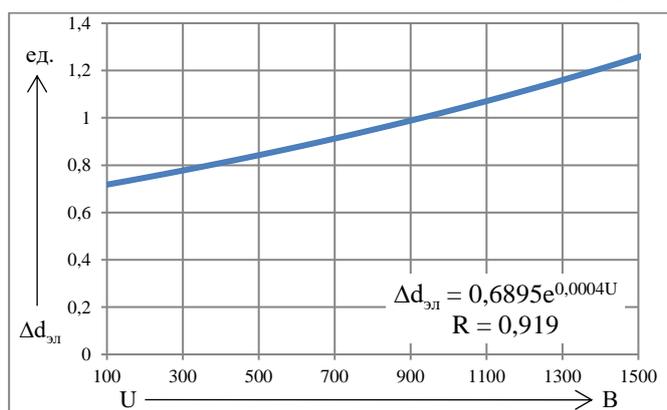


Рисунок 11 - Доля электрического старения в износе изоляции

боксованию колесных пар с бандажами большого диаметра. При боксовании, особенно интенсивном, амплитуда колебаний вылетов секций резко возрастала. Это приводило к накоплению механических повреждений в изоляции и последующему ее пробоя. Необходимо отметить, что согласно исследований д.т.н., профессора ОмГУПСа И.И. Галиева

глубина промерзания грунта в зимний период эксплуатации определяла уровень вертикальных вибраций ТЭМ с опорно-

осевым подвешиванием. Это позволяет определить влияние вертикальных вибраций от пути на безотказность изоляции ТЭМ (рисунок 6, рисунок 7).

На основании анализа результатов эксплуатации ЭПС постоянного тока при неизменном последовательном соединении ТЭМ выявлено влияние величины напряжения на зажимах ТЭМ на увеличение общего износа изоляции ТЭМ, электровозов переменного тока полигонов с СПКУ (рисунок 11).

На основании результатов исследований кинетики химических реакций в изоляции от температуры, проведенных Вант Гоффом и Аррениусом, получена функциональная зависимость, связывающая скорость износа изоляции якорных обмоток ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ, с величинами основных эксплуатационных и природно-климатических факторов

$$\left\{ \begin{array}{l} d = d_T \Delta d_{TM1} \Delta d_{эл} \Delta d_{виб} \Delta d_{TM2} \\ d_T = e^{B \left(\frac{1}{\theta_H} - \frac{1}{\tau_{yi}(1-e^{-ti/T}) + \tau_{i-1} e^{-ti/T} + \Delta\tau_{вя} + \theta_B + 273} \right)} \\ \Delta d_{TM1} = 0,0844\Delta\tau^2 + 0,0316\Delta\tau + 99,8 \\ \Delta d_{эл} = 0,6895e^{0,0004U} \\ \Delta d_{виб} = \frac{-0,0055a_B + 2,16}{2,16} \\ \Delta d_{TM2} = 0,0073e_B^2 - 0,24e_B + 2,815 \end{array} \right. ,$$

где d – скорость износа изоляции ТЭМ; d_T – скорость теплового износа изоляции на i -том элементе профиля пути при среднем превышении температуры; Δd_{TM1} – изменение скорости износа изоляции вследствие вариаций превышения температуры обмоток (термомеханический износ первого вида); $\Delta d_{эл}$ – влияние электрического поля на скорость износа изоляции (электрический износ); $\Delta d_{виб}$ – изменение скорости износа изоляции якорной обмотки из-за вибраций со стороны пути (механический износ); Δd_{TM2} – влияние снижения упругости изоляции на скорость ее износа при уменьшении содержания влаги в воздухе (термомеханический износ второго вида); B – коэффициент, характеризующий способность молекул изоляции к химическому взаимодействию; θ_H – номинальная температура класса нагревостойкости изоляции; τ_{yi} – среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды; ti – время движения по i -тому элементу профиля пути; T – тепловая постоянная ТЭМ; $\Delta\tau_{вя}$ – среднее превышение температуры вентилирующего воздуха над температурой

окружающей среды; $\vartheta_{в}$ – температура окружающей среды; Δt – колебания температуры перегрева якорной обмотки около среднего значения; U – напряжение на зажимах ТЭМ; $a_{в}$ – уровень вертикальных вибраций от пути; $e_{в}$ – абсолютная влажность воздуха.

Установлено, что хорошо пропитанная изоляция ТЭМ содержит около 0,3 % влаги от массы изоляции. При этом изоляция упруга и ее электрическая прочность соответствует нормам. Переувлажнение состарившейся изоляции резко снижает ее электрическую прочность. Выявлено, что на переувлажнение (снижение электрической прочности) изоляции ТЭМ существенно влияет время нахождения электровоза в нерабочем состоянии. Зависимости безотказности тяговых машин и изоляции ТЭМ НБ-418К6 электровозов ВЛ80 депо Абакан, Боготол Красноярской железной дороги, депо Вихоревка, Северобайкальск Восточно-Сибирской железной дороги от времени отстоя приведены на рисунке 12 а. Аналогичные зависимости ТЭМ НБ-514 электровозов депо Абакан Красноярской железной дороги и Нижнеудинск, Вихоревка, Северобайкальск Восточно-Сибирской железной дороги представлены на рисунке 12 б. Из рассмотрения зависимостей, приведенных на рисунках 12 а - 12 б, видно существенное влияние времени отстоя электровозов на безотказность тяговых электрических машин и их изоляции.

Выявлено, что во время отстоя электровоза после сближения температуры обмоток ТЭМ и воздуха, скорость поглощения и масса влаги, поглощаемая из окружающего воздуха изоляцией, увеличивается в десятки раз по сравнению с работой ТЭМ под нагрузкой. Переувлажнение изоляции тяговых электрических

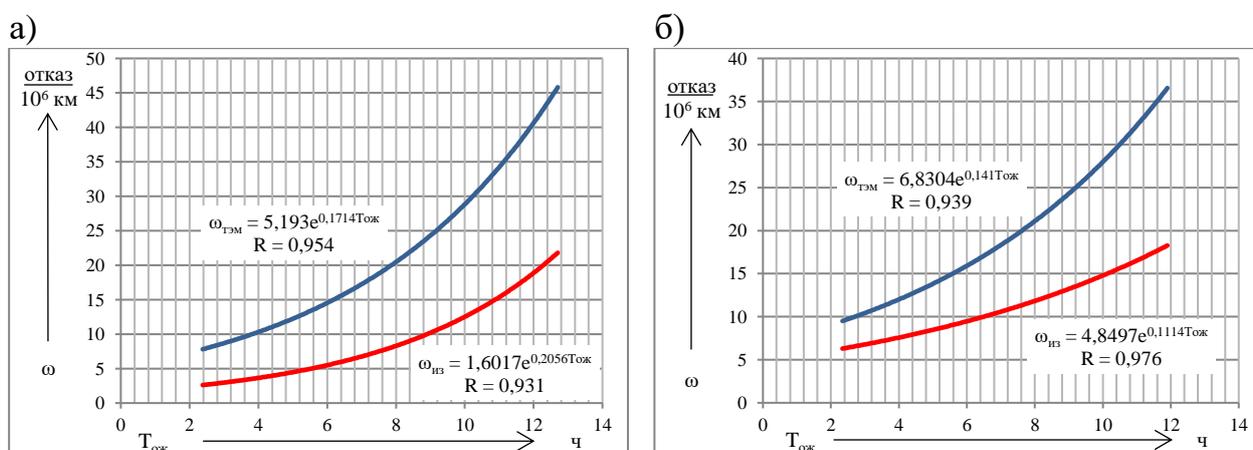


Рисунок 12 - Характер изменения безотказности ТЭМ электровозов ВЛ80 (а) и ВЛ85 (б) от времени отстоя

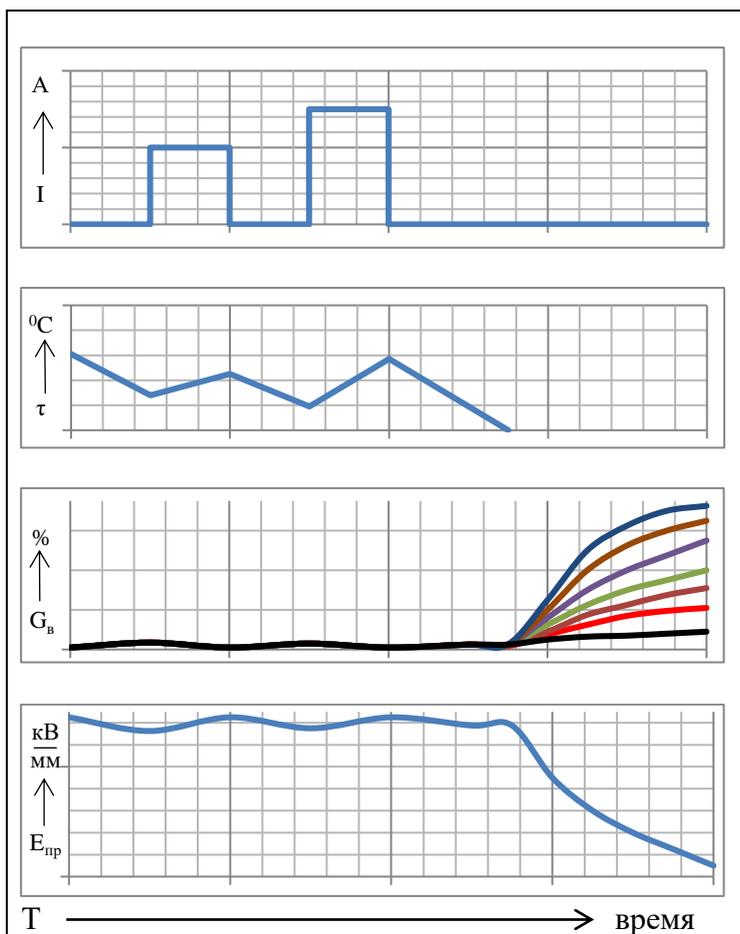


Рисунок 13 - Динамика снижения электрической прочности изоляции ТЭМ при продолжительном нахождении электровоза в отстое

машин может наступить за несколько часов отстоя электровоза (рисунок 13). На рисунке 13: I – сила тока ТЭМ; τ - превышение температуры обмоток ТЭМ; $G_{в}$ - масса воды в изоляции ТЭМ с разной степенью старения; $E_{пр}$ – электрическая прочность наиболее изношенной изоляции ТЭМ.

Основной причиной пробоя изоляции ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ, состарившейся вследствие интенсивного теплового, термомеханического, механического и электрического износа, является резкое снижение ее электрической прочности из-за переувлажнения при длительном отстое электровоза. Установлено, что наибольшая вероятность пробоя изоляции наблюдается в ТЭМ электровозов, отправляющихся на подъемы повышенной крутизны и длины после длительного отстоя. Для обеспечения необходимой безотказности ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ, разработаны мероприятия, представленные на рисунке 14.

Объективное определение степени увлажнения изоляции ТЭМ может быть получено при использовании неразрушающих методов оценки ее состояния – метода контроля изоляции с использованием явления абсорбции и метода контроля изоляции по емкостным характеристикам - определение поверхностного увлажнения изоляции по коэффициенту абсорбции (метод основан на сравнении тока абсорбции на 15 и 60 секундах) и определению объемного увлажнения по методу



Рисунок 14 - Мероприятия по предотвращению выдачи на линию электровозов с переувлажненной изоляцией ТЭМ

Подсистема 1 обеспечивает измерение сопротивления изоляции на 15 и 60 секундах и расчет коэффициента абсорбции с последующим его пересчетом на номинальную температуру 20 °С. Подсистема 2 определяет температуру обмоток ТЭМ с последующей передачей информации на блоки пересчета 1-й и 3-ей подсистем. Подсистема 3 измеряет абсорбционную и геометрическую емкость изоляции с пересчетом их отношения на номинальную температуру 20 °С. Информация со всех трех подсистем передается в постоянное запоминающее устройство и управляющий модуль, с которого поступает на монитор и принтер (патент на полезную модель №148398 от 10 декабря 2014 г.).

Для предотвращения выдачи на линию ТЭМ, электровозов переменного тока полигонов с СПКУ, с переувлажненной изоляцией, предлагается производить подогрев ТЭМ, во время длительного отстоя электровоза, подачей тока на обмотки главных полюсов ТЭМ от выпрямительной установки возбуждения (рисунок 16). Предлагаемый способ подогрева наиболее удобен и безопасен в эксплуатации из-за отсутствия необходимости подключения к электровозу стационарных устройств нагрева воздуха, а также оснащения электровозов дополнительным высоковольтным оборудованием. Кроме того этот способ позволяет обеспечить равномерный подогрев воздуха по всему контуру ТЭМ.

Анализ результатов выполненных исследований безотказности ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ, указывает на необходимость ввода бортовой системы температурного контроля (СТК) изоляции тяговых электрических машин. Разработанная в диссертационной работе СТК основана на измерении температуры ТЭМ датчиками - позисторами, передающими сигнал на

«емкость-время» (по измерению соотношения абсорбционной емкости, отражающей процесс накопления влаги в структуре изоляции, к геометрической емкости).

Разработана комплексная система контроля увлажненности изоляции ТЭМ, состоящая из подсистем (рисунок 15). Подсистема 1 обеспе-

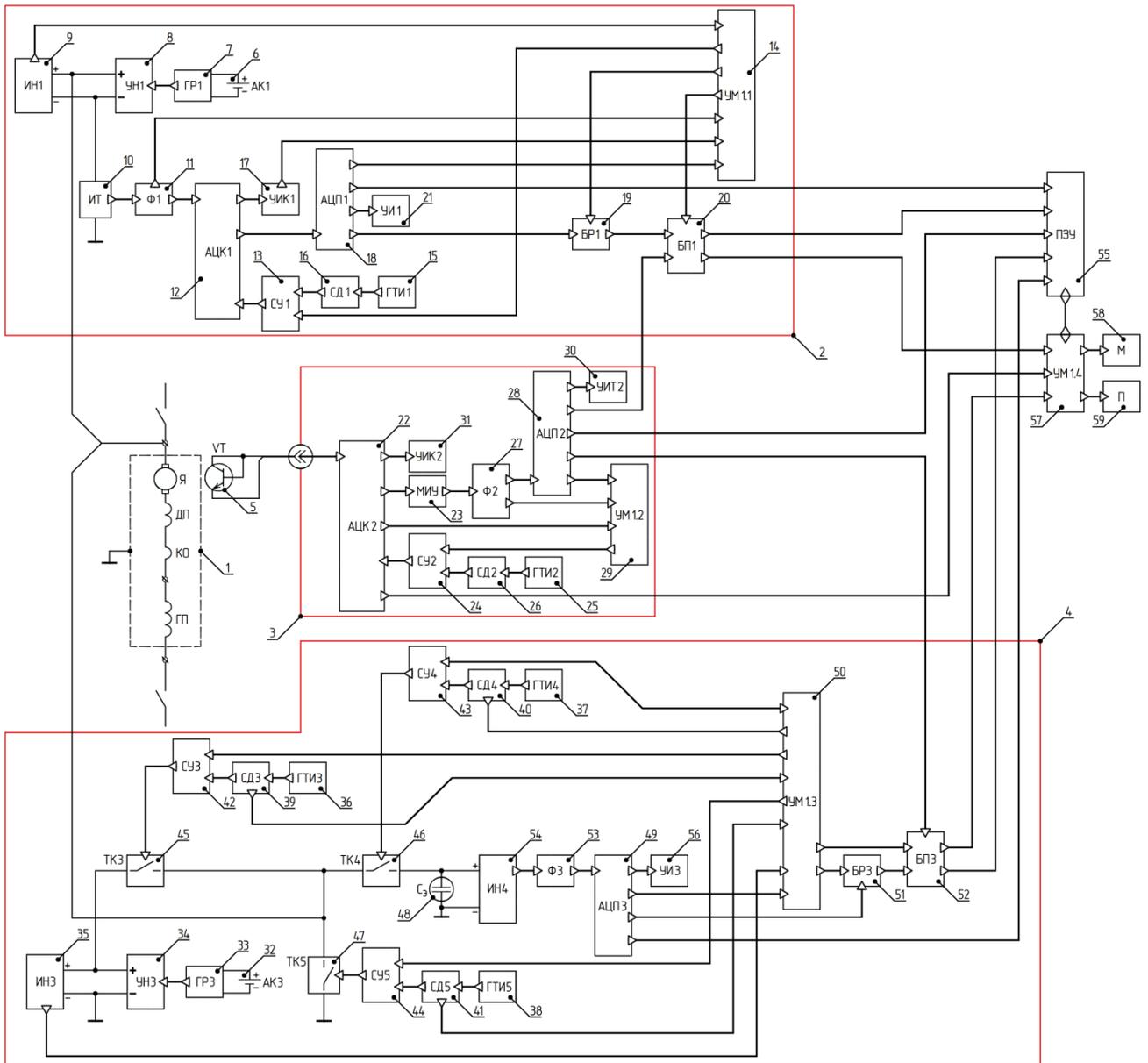


Рисунок 15 - Функциональная схема комплексной системы контроля увлажненности изоляции ТЭМ

исполнительные устройства типа УВТЗ, с последующей световой сигнализацией о тепловом состоянии ТЭМ локомотивной бригаде.

В пятой главе приведен расчет экономического эффекта от внедрения комплексной системы контроля увлажнения изоляции ТЭМ электровозов Восточного полигона ОАО «РЖД». Срок окупаемости при внедрении комплексной системы составит менее года, а чисто дисконтированный доход – 107 423 000 рублей. Результаты исследований безотказности ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ, представленные в диссертационной работе, одобрены Дирекцией тяги ОАО «РЖД» и рекомендованы к внедрению в сервисных и эксплуатационных

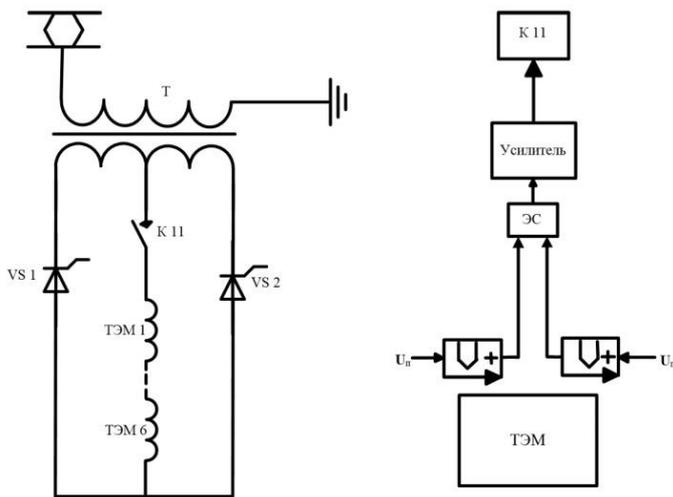


Рисунок 16 – Структурная схема подогрева изоляции ТЭМ при длительном отстое

депо, полигонов с СПКУ страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Безотказность ТЭМ электровозов, полигонов с СПКУ в несколько раз ниже, чем электровозов, работающих на равнинном и равнинно-холмистом профиле пути при их эксплуатации в кривых большого радиуса и непродолжительным

зимним периодом с температурой воздуха не ниже минус 20 – 25 °С. На изоляционные конструкции ТЭМ, электровозов полигонов с СПКУ, приходится от половины до четырех пятых отказов ТЭМ. Это обусловлено ускоренным ухудшением ЭМХ изоляции ТЭМ из-за интенсивного теплового, термомеханического, механического, электрического износа с резким снижением электрической прочности постаревшей изоляции тяговых электрических машин из-за переувлажнения во время продолжительного отстоя.

2. Разработан комплекс мероприятий повышения ресурса ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, путем обеспечения необходимых температурно-влажностных условий работы изоляционных конструкций ТЭМ введением непрерывного контроля температуры, периодического контроля влажности изоляции обмоток и поддержания необходимой температуры, исключающей переувлажнение обмоток при длительном отстое электровозов.

3. Получены корреляционные связи воздействия природно-климатических и эксплуатационных факторов на безотказность тяговых электрических машин полигонов с СПКУ, которые позволяют установить степень и характер влияния факторов на безотказность ТЭМ.

4. Уточнен механизм теплового и термомеханического износа изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, обусловленный повышенной величиной и колебаниями токовой нагрузки вследствие существенного различия диаметров бандажей колесных пар электровозов, магнитных потоков главных полюсов ТЭМ, сопротивлений обмоток тяговых электрических машин,

смещений траверс щеткодержателей ТЭМ относительно нулевого положения, а также вследствие неэффективной системы вентиляции ТЭМ, приводящей к локальным перегревам изоляции, снижения расхода охлаждающего воздуха ТЭМ существенно ниже допустимого значения, различия напряжений питающих преобразователей.

5. Уточнен механизм снижения электрической прочности изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, из-за переувлажнения при продолжительном отстое электровозов.

6. Разработаны методики и средства обеспечения необходимого температурно-влажностного режима работы изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ.

7. Внедрение комплекса мероприятий по обеспечению требуемых температурно-влажностных условий работы изоляции дает возможность иметь необходимый ресурс ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ.

8. Разработка аналогичных комплексов мероприятий по обеспечению требуемых температурно-влажностных условий работы изоляции ТЭМ тепловозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, позволит повысить их безотказность.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

а) в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК

1. Попов, Ю.И. Исследование износа изоляции ТЭМ локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях [Текст] / Ю.И. Попов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 1. – С. 28–32.

2. Попов, Ю.И. Исследование влияния метеорологических факторов на изоляцию ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах железных дорог со сложными природно-климатическими условиями [Текст] / Ю.И. Попов // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 1. – С. 15–25.

3. Попов, Ю.И. Исследование процесса снижения электрической прочности изоляции тяговых электрических машин локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях [Текст] / Ю.И. Попов, О.О. Соколов // Наука и техника транспорта. - 2015. - № 2. – С. 89–97.

4. Попов, Ю.И. Исследование состояния тяговых электрических машин, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях [Текст] / Ю.И. Попов, А.С. Куренков, М.Д. Глущенко, В.П. Смирнов // Наука и техника транспорта. - 2015. - № 1. – С. 45–52.

б) патент

5. Патент на полезную модель №148398 Российской Федерации. Устройство для измерения увлажненности изоляции тяговых электродвигателей [Текст] / Ю.И. Попов, А.С. Куренков, В.А. Мельников, О.О. Соколов, В.П. Смирнов, А.С. Космодамианский, В.В. Лексаков // Заявитель и патентообладатель ОАО «РЖД». - № 2014132720/28; заявл. 08.08.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. - № 34.

в) в других изданиях

6. Попов, Ю.И. Результаты анализа системы контроля состояния изоляции силового электрооборудования [Текст] / Ю.И. Попов, А.С. Куренков, О.О. Соколов, В.П. Смирнов, А.С. Космодамианский, С.И. Баташов // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 105-107.

7. Иванов, В.Н. Уточнение механизма пробоя изоляции открытых лобовых соединений якорных обмоток тяговых электрических машин [Текст] / В.Н. Иванов, Ю.И. Попов, А.С. Куренков, О.О. Соколов // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. - 2014. – С. 96-98.

8. Попов, Ю.И. Расчет теплового старения изоляции тяговых электродвигателей электровозов [Текст] / Ю.И. Попов, А.С. Куренков, О.О. Соколов, В.П. Смирнов, А.С. Космодамианский, С.И. Баташов // Вопросы электротехнологии. – 2014. - №1. – С. 82-85.

9. Соколов, О.О. Надежность тяговых электрических машин электропоездов постоянного тока Московского узла [Текст] / О.О. Соколов, А.С. Космодамианский, Ю.И. Попов, В.П. Смирнов // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. - 2014. – С. 115-119.

10. Попов, Ю.И. Особенности возникновения круговых огней на коллекторах ТЭМ электровозов [Текст] / Ю.И. Попов, О.О. Соколов, А.С. Куренков, Д.Н. Хомченко. // Межвузовский сборник научных трудов «Современные пробле-

мы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 102-104.

11. Куренков, А.С. Определение интенсивности теплового старения изоляции приводного вентилятора электровоза [Текст] / А.С. Куренков, Ю.И. Попов, О.О. Соколов, В.П. Смирнов, А.С. Космодамианский, С.И. Баташов // Вопросы электротехнологии. – 2014. - №1. – С. 78-81.

12. Попов, Ю.И. Вероятность возникновения кругового огня на электровозах ВЛ85 [Текст] / Ю.И. Попов, О.О. Соколов, А.С. Куренков, А.С. Космодамианский // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 107-111.

13. Иванов, В.Н. Восстановление изоляции ТЭД локомотивов с использованием инфракрасного излучения [Текст] / В.Н. Иванов, Ю.И. Попов, А.С. Куренков, О.О. Соколов // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 89-92.

14. Попов, Ю.И. Влияние затягивания меди на надежность ТЭД [Текст] / Ю.И. Попов, О.О. Соколов, А.С. Куренков, С.И. Баташов. // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 111-115.

15. Иванов, В.Н. Математическая модель кинетики нагревания пропитанной изоляции в технологии восстановления ОЛС [Текст] / В.Н. Иванов, Ю.И. Попов, А.С. Куренков, О.О. Соколов // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 92-95.

16. Соколов, О.О. Надежность дополнительных полюсов двигателей электропоездов [Текст] / О.О. Соколов, Ю.И. Попов, А.С. Космодамианский // Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». - 2013. – С. 60-62.

17. Куренков, А.С. Надежность вспомогательных электрических машин переменного тока [Текст] / А.С. Куренков, О.О. Соколов, Ю.И. Попов, С.И. Баташов // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 98-101.

18. Попов, Ю.И. Исследование эксплуатационной надежности изоляции тяговых электродвигателей при максимальной токовой нагрузке [Текст] / Ю.И. Попов, А.Н. Ходакевич, В.В. Лексаков, В.П. Смирнов // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2013. – С. 51-54.

19. Ходакевич, А.Н. Энерго – и ресурсосберегающие режимы работы электровозов переменного тока [Текст] / А.Н. Ходакевич, Ю.И. Попов, А.С. Куренков, С.К. Попов, В.А. Мельников, К.Ю. Никольский. // Сборник молодежных научных проектов «Молодые ученые Москве». - 2012. – С. 33-37.

20. Смирнов, В.П. Модели пробоев изоляции тяговых двигателей электровозов [Текст] / В.П. Смирнов, А.С. Космодамианский, Ю.И. Попов, В.В. Лексаков, Д.В. Шарапов, Е.Г. Кармаданов. // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2011. – С. 36-39.

Попов Юрий Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
ЭЛЕКТРОВОЗОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ
ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать
Объем 1,5 усл. п.л.

Заказ №

Формат 60x90/16
Тираж 80 экз.

УПЦ ГИ РУТ (МИИТ), Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр.9