

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет путей сообщения  
Императора Николая II»  
МГУПС (МИИТ)

На правах рукописи



Попов Юрий Иванович

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

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
доцент  
Смирнов Валентин Петрович

Москва 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. АНАЛИЗ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ .....	15
1.1 Безотказность ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах со сложными природно-климатическими условиями Восточно -Сибирской железной дороги в доперестроечный период.....	15
1.2 Безотказность ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах Транссиба со сложными природно-климатическими условиями в перестроечный период.....	18
1.3 Безотказность ТЭМ электровозов 2ЭС6 .....	36
1.4 Безотказность ТЭМ электровозов ОПЭ Михайловского горно-обогатительного комбината .....	40
1.5 Анализ технологической безотказности ТЭМ после прохождения средних и капитальных ремонтов .....	43
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....	46
2.1. Методика проведения исследования.....	46
2.2. Зависимости безотказности ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Северобайкальск, эксплуатируемых на полигоне Лена-Таксимо северного направления Транссиба, от природно-климатических факторов в период с января 2000 по апрель 2001 года .....	47
2.3. Влияние природно-климатических факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Северобайкальск, эксплуатируемых на полигоне Лена-Таксимо северного направления Транссиба, в период с января 2000 года по декабрь 2002 года .....	51

2.4. Влияние эксплуатационных и природно-климатических факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка, эксплуатируемых на полигоне Тайшет-Таксимо северного направления Транссиба, в период с января 2004 года по апрель 2006 года.....	54
2.5. Зависимости безотказности ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск центрального направления Транссиба от природно-климатических и эксплуатационных факторов в период с января 2000 по декабрь 2002 года .....	57
2.6. Характер влияния эксплуатационных и природно-климатических факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан южного направления Транссиба в период с января 2000 по декабрь 2002 года.....	65
2.7. Влияние природно-климатических и эксплуатационных факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская центрального направления Транссиба в период с января 2000 по декабрь 2006 года.....	69
2.8. Безотказность ТЭМ электровозов ОПЭ Михайловского ГОКа в период с января 2006 по декабрь 2010 года .....	77
2.9. Результаты анализа статистического исследования изоляции ТЭМ, эксплуатируемых в СПКУ .....	78
3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....	80
3.1. Тепловое старение изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ .....	80
3.2. Термомеханическое старение изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ .....	87
3.3. Механический износ изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ .....	93

3.4. Электрическое старение изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ .....	94
3.5. Влагоперенос в изоляции ТЭМ .....	97
3.6. Влияние увлажнения изоляции на безотказность ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ .....	107
4. РЕАЛИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА .....	115
4.1. Задачи, необходимые для обеспечения необходимого уровня безотказности ТЭМ электровозов .....	115
4.2. Методики контроля увлажнения изоляции ТЭМ электровозов	116
4.3. Комплексная система контроля увлажненности изоляции ТЭМ электровозов .....	119
4.4. Функциональная схема комплексной системы контроля увлажненности изоляции ТЭМ.....	124
4.5. Применение систем температурного контроля изоляции ТЭМ	129
4.6. Обеспечение необходимого температурно-влажностного режима изоляции ТЭМ электровоза при длительном нахождении в нерабочем состоянии.....	138
5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА .....	142
5.1. Расчет чисто дисконтированного дохода от внедрения комплексной системы контроля увлажненности ТЭМ электровозов Восточно-Сибирской железной дороги .....	142
5.2. Оптимизация системы планово-предупредительного ремонта локомотивов.....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	150
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	152
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	164
Приложение 1 .....	165
Приложение 2 .....	168

Приложение 3 .....	173
Приложение 4 Характер влияния природно-климатических факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка, эксплуатируемых на полигоне Тайшет-Лена северного направления Транссиба, в период с января 2000 по декабрь 2002 года.....	185
Приложение 5 Анализ влияния природно-климатических факторов на безотказность якорных и остовных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка.....	191
Приложение 6 Анализ влияния природно-климатических факторов на безотказность якорных и остовных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан .....	196

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ ситуации, сложившейся в локомотивном хозяйстве показал, что существующая система планово-предупредительного ремонта локомотивов не обеспечивает требуемую надежность тягового подвижного состава и требует коренного изменения. В настоящий момент внедряется генеральная схема развития сети железных дорог с учетом полигонной технологии управления тяговыми ресурсами, организации тяжеловесного движения, закупки тягового подвижного состава, развития деповской инфраструктуры, пунктов технического обслуживания [1].

Для осуществления поставленной задачи проектируются диагностические комплексы контроля состояния наиболее нагруженных узлов электровозов. Это позволит максимально использовать ресурс электровоза в эксплуатационной работе до достижения им норматива пробега, а также максимально сократить время реагирования на отказ.

Автоматизация основных процессов системы ремонта с одновременным увеличением диагностируемых параметров позволит сократить потери при передислокации электровозов, а также обеспечит специалистам эксплуатации и сервисных компаний доступ к проводимым замерам, испытаниям, информации по отказам и нарушениям в работе электровозов.

**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 пробои 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 ослаблении 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 технологий контроля переувлажнения изоляции не позволяет своевременно выявить предаварийные ТЭМ и восстановить их работоспособность.

**Степень разработанности проблемы.** Исследованию безотказности ТЭМ тягового подвижного состава железнодорожных 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 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 изоляции ТЭМ электровозов полигонов



железных дорог с СПКУ;

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

**Объектом исследования** является ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на направления железных дорог с СПКУ, а также методы и средства, обеспечивающие необходимый температурно-влажностный режим 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, являются 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, обусловленной содержанием массы 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, эксплуатирующийся 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 увлажнения 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 других классов нагревостойкости ТЭМ;

– разработаны методики управления температурно-влажностным режимом 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 увлажнения ТЭМ электровозов полигонов с СПКУ, определяющего степень увлажнения изоляции ТЭМ с представлением результатов измерения увлажнения 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 переувлажнения 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, исключаящей 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, эксплуатирующийся 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, эксплуатирующийся на полигонах с СПКУ;

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

– методики и средства обеспечения необходимого температурно-влажностного режима изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатирующийся 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, характеризующийся удовлетворительными совпадениями с результатами экспериментальных исследований ОмГУПС, ИрГУПС, 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, 2010-2016), 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 таблиц.

# **1. АНАЛИЗ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

## **1.1 Безотказность ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах со сложными природно-климатическими условиями Восточно - Сибирской железной дороги в доперестроечный период**

Надежность локомотива и его узлов обуславливается безотказностью, ремонтпригодностью, долговечностью и сохраняемостью. Безотказность определяется свойством локомотива сохранять свою работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов. При этом под наработкой понимают продолжительность или объем работы локомотива, измеряемые в часах, километрах, циклах и других единицах. Одним из основных показателей безотказности локомотива является параметр потока отказов. В диссертационной работе используется три характеристики параметра потока отказов: отказ деленный на один электровоза-квартал; отказ деленный на один миллион километров; отказ деленный одну ТЭМ месяц. При определении параметров потока отказов использовалась стандартная программа ЭВМ (однофакторный корреляционный анализ), позволяющий определять, как параметр потока отказов, так и тесноту связи между факториальным и результирующим параметрами с использованием корреляционного отношения ( $R$ ). Для определения уровня качества пропитки изоляционных конструкций ТЭМ использовались полученные нами зависимости параметры потоков отказов пропитанных и непропитанных якорных обмоток ТЭМ (рисунки 1.30-1.31).

Изоляция тяговых электрических машин электровозов ОАО «РЖД», эксплуатируемых на полигонах железных дорог со сложными природно-климатическими условиями, имеет недостаточную безотказность. Для

выяснения предполагаемых причин возникновения отказов изоляции ТЭМ электровозов, работавших на полигонах железных дорог с СПКУ, на первом этапе исследования проанализированы результаты эксплуатации электровозов Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) в доперестроечный период. В эти годы на ВСЖД эксплуатировались электровозы переменного тока: ВЛ60 с ТЭМ типа НБ-412М, имеющими изоляцию классов нагревостойкости [2] (далее классов) – «В» обмоток якорных (ОЯ), «Н» обмоток главных полюсов (ОГП) и дополнительных полюсов (ОДП); ВЛ60К, в которых использованы ТЭМ типа НБ-412К, с изоляцией класса «В» - ОЯ, ОДП, обмоток компенсационных (ОК) и класса «Н» - ОГП; Ф - производства французской фирмы «Alsthom» - с ТЭМ типа ТАО-649, имеющими изоляцию всех обмоток класса «Н» (электровозы эксплуатировались в пассажирском движении); ВЛ80, в которых использованы ТЭМ типа НБ-418К, с изоляцией класса «В» - ОЯ, ОК и класса «Н» - ОГП, ОДП. На направлении Зима – Слюдянка ВСЖД эксплуатировались электровозы постоянного тока: ВЛ8, с ТЭМ типа НБ-406, имеющими изоляцию всех обмоток класса «В»; ВЛ10, в которых использованы ТЭМ типа ТЛ-2К, с изоляцией класса «В» - ОЯ, ОДП, ОК и класса «Н» - ОГП [3].

Все электровозы в соответствии с пробегом проходили плановые ремонты, на которых выполнялись следующие технологические операции для обеспечения необходимого уровня безотказности изоляции ТЭМ: сушка – однократная пропитка – сушка при прохождении текущих ремонтов третьего объема (ТРЗ); сушка – первая пропитка - сушка – вторая пропитка – сушка при среднем ремонте (СР); смена изоляции, с троекратными пропитками и сушками перед и после каждой пропитки при капитальном ремонте (КР) [4]. Пропитки изоляции проводились методами окунания и вакуумно-нагнетательным. Сушка ТЭМ осуществлялась в печах конвективного нагрева. Качество сушки контролировалось по степени поверхностного и объемного увлажнения изоляции. Величина поверхностного увлажнения изоляции определялось коэффициентом абсорбции, равным отношению сопротивления



изоляции на 60-й секунде измерения мегомметром к сопротивлению изоляции на 15-й секунде измерения. Величина объемного увлажнения изоляции в зависимости от вида изоляции устанавливалась по отношению емкостей изоляции при частотах 2 Гц и 50 Гц (термопластичная изоляция) или по соотношению абсорбционной емкости изоляции к геометрической емкости изоляции (термореактивная изоляция). Регулярно осуществлялся контроль электрических и механических характеристик изоляции, пропиточных лаков и компаундов, вязкости пропиточных лаков и компаундов, процентное содержание растворителей [5]. После выполнения ремонтов ТРЗ, СР, КР все ТЭМ проходили приемо-сдаточные испытания. Перед испытаниями на «холодной» ТЭМ и после ее нагревания током часового режима выполнялись измерения сопротивления изоляции. По результатам этих измерений определялось качество пропитки каждой ТЭМ по зависимостям сопротивления изоляции от ее температуры для ТЭМ разного типа и вида ремонта.

Как видно из приведенных на рисунке 1.1 зависимостей параметров потоков отказов изоляции ТЭМ от времени длительно эксплуатируемого парка электровозов ВСЖД и депо Улан-Удэ, в котором использовались электровозы, недавно поступившие с завода – изготовителя, наблюдается снижение безотказности изоляции всех ТЭМ.

Меньшие параметр потока отказов изоляции и интенсивность его увеличения во времени наблюдается у ТЭМ электровозов депо Улан-Удэ по сравнению с ТЭМ всего парка электровозов ВСЖД [6, 7, 8]. Это указывает на более высокое качество изготовления изоляции ТЭМ заводом – изготовителем в сравнении с ТЭМ, прошедшими ремонт в депо (ТРЗ) и на ремонтных заводах (СР, КР).

При качественно пропитанной изоляции наблюдались периодические снижения параметра потока отказов изоляции ТЭМ в теплый период (третий квартал) и его повышение в холодный период эксплуатации (первый квартал) каждого года.

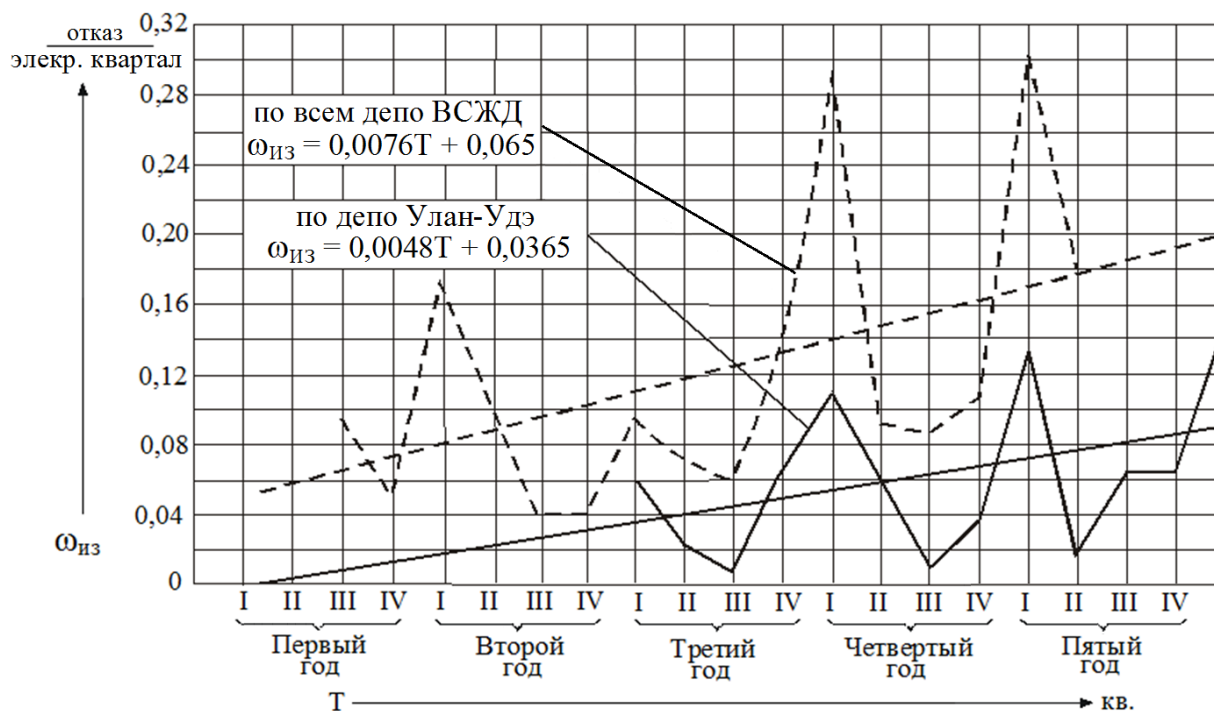


Рисунок 1.1. Характер изменения параметра потоков отказов изоляции ТЭМ электровозов ВСЖД во времени

## 1.2 Безотказность ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах Транссиба со сложными природно-климатическими условиями в перестроечный период

Новочеркасский электровозостроительный завод (ООО «ПК «НЭВЗ») начал выпуск электровозов ВЛ85 в 1983 году и поставлял их на южное направление Транссиба (депо Абакан), а затем северное направление (депо Северобайкальск и Вихоревка). Электровозы ВЛ85 двухсекционные, двенадцатиосные. Все оси обмоторены. Нагрузка от колесной пары на рельсы на электровозах первого выпуска (от № 1 до № 93) составляла 24 т, а на последующих электровозах была снижена до 23 т. Длина электровоза по осям автосцепок составляет 45 м, что в 1,37 раза превышает аналогичный параметр электровозов ВЛ80 всех модификаций. В секции установлены три двухосные

тележки. Для передачи тягового усилия от тележек на кузов использованы наклонные тяги. Наблюдаемое поперечное относительно оси пути смещение средних тележек секций электровоза в многочисленных кривых малого радиуса (до 200 м) временных обходных тоннелей до пуска основного Северомуйского тоннеля в 2004 году, нередко составляло предельное значение – 400 мм. Мощность ТЭМ типа НБ-514 электровоза на валу равна 780 кВт и превышает мощность тяговой электрической машины электровоза ВЛ80 на 40 кВт. Класс нагревостойкости изоляции ТЭМ НБ-514 электровозов ВЛ85 «F», а НБ-418К6 электровозов ВЛ80 также «F» с 1981 года. Из-за нехватки локомотивных бригад часть электровозов ВЛ85 депо Северобайкальск были переоборудованы в трех секционные в 1991 году [9]. Из-за повышенного износа бандажей колесных пар депо Северобайкальск устройства для выкатки колесно-моторных блоков не справлялись с перекаткой КМБ. В связи с этим все электровозы ВЛ85 депо Северобайкальск эксплуатировались при повышенной разнице толщины бандажей колесных пар (рисунок 1.2., рисунок 1.3 и приложение 3). Это вызвало увеличенную токовую нагрузку ТЭМ КМБ с наибольшей толщиной бандажей и, как следствие этого, интенсивное одновременное боксование нескольких колесных пар КМБ перегруженных ТЭМ. Такое «синхронное» боксование нередко приводило к одновременному возникновению круговых огней на коллекторах нескольких ТЭМ. Исследования, выполненные нами показали, что параметр потока отказов круговых огней ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан в 3–5 раз превышал аналогичный параметр ТЭМ электровозов ВЛ80К и ВЛ80Т, эксплуатируемых в грузовом движении на южном направлении Транссиба [10, 11].

В связи с недостаточной безотказностью электровозы ВЛ85 депо Северобайкальск, работавшие на направлении Лена-Таксимо, в мае 2001 года были передислоцированы в депо Нижнеудинск центрального направления и Вихоревка северного направления Транссиба.

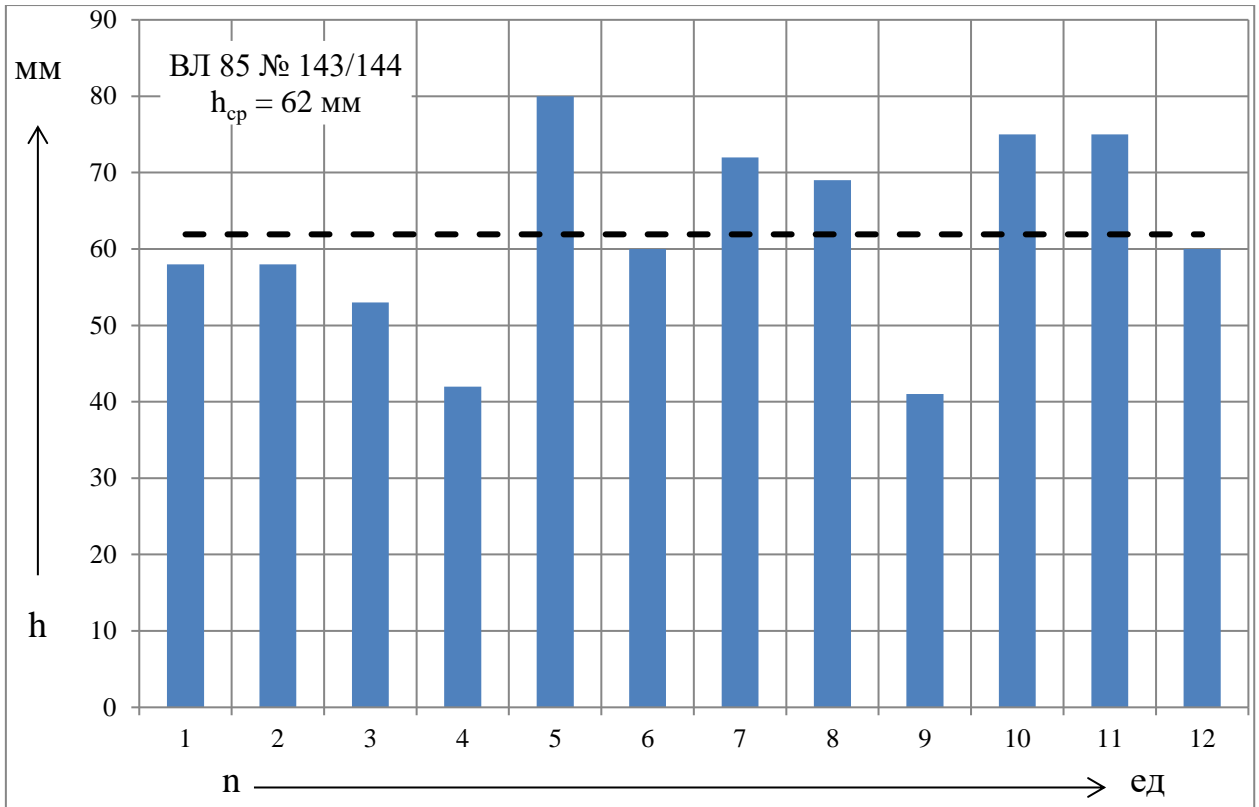


Рисунок 1.2. Толщина бандажей колесных пар двухсекционного электровоза ВЛ85

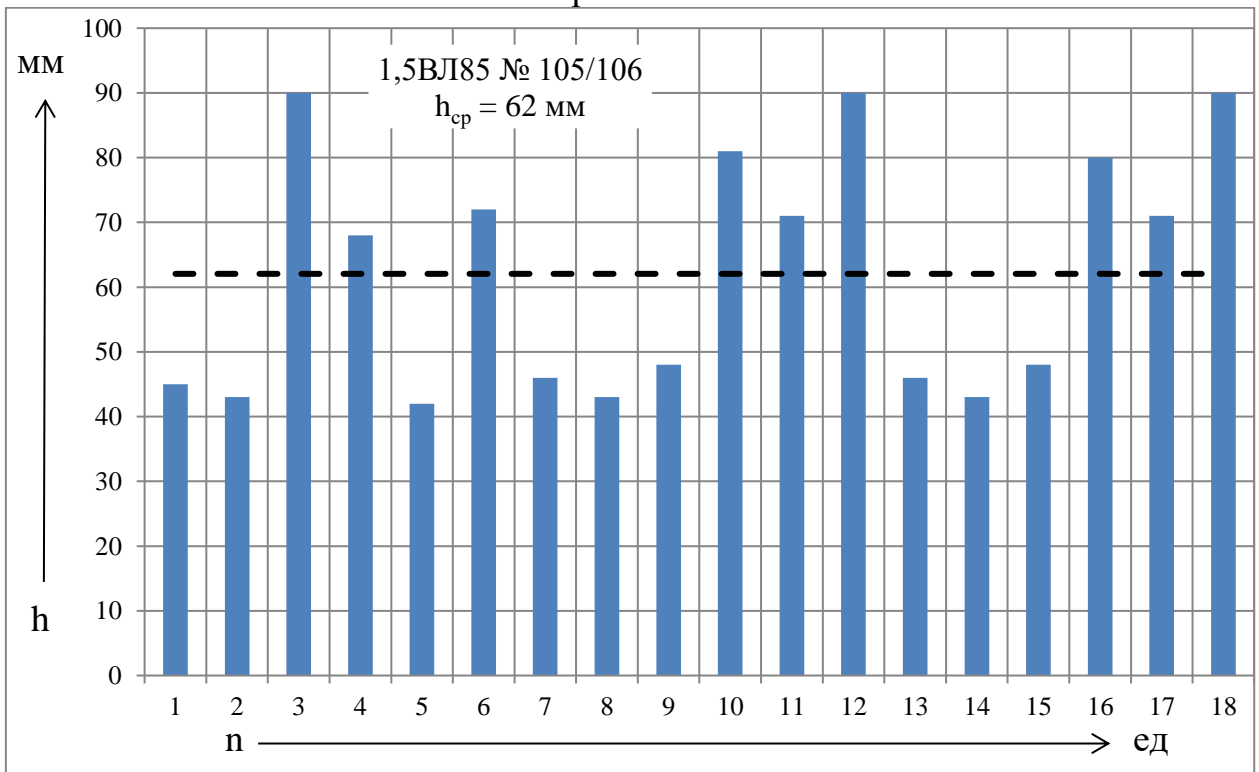


Рисунок 1.3. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза ВЛ85

Как видно из рисунков 1.4 и 1.5, несмотря на сравнительно недавнее поступление электровозов ВЛ85 в депо Северобайкальск безотказность их

была ниже требуемого уровня, указанного в технических условиях на локомотив. Снижение параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов ВЛ85 в летний период эксплуатации 2000 года указывает на то, что их изоляция была качественно пропитана на заводе-изготовителе. Резкое снижение безотказности ТЭМ и их изоляции в значительной степени обусловлено суровыми метеорологическими условиями зимы 2000-2001года. Этому способствовало: продолжительное время нахождения электровозов ВЛ85 в отстое из-за малого числа грузовых поездов на направлении и, соответственно, переувлажнение состарившейся изоляции перегруженных ТЭМ с быстрым и значительным снижением ее электрической прочности; отсутствие средств и технологии контроля увлажненности ТЭМ [12, 13].

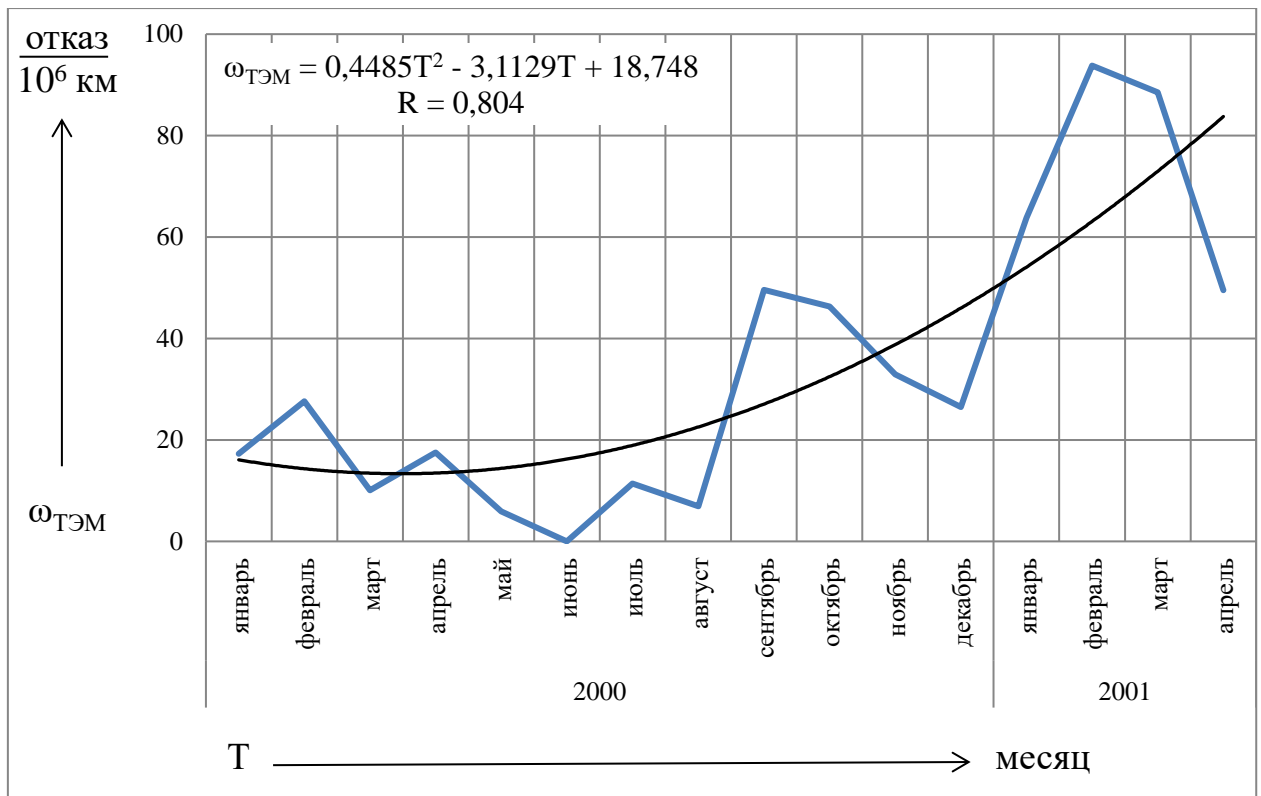


Рисунок 1.4. Изменение параметра потока отказов ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Севербайкальск во времени

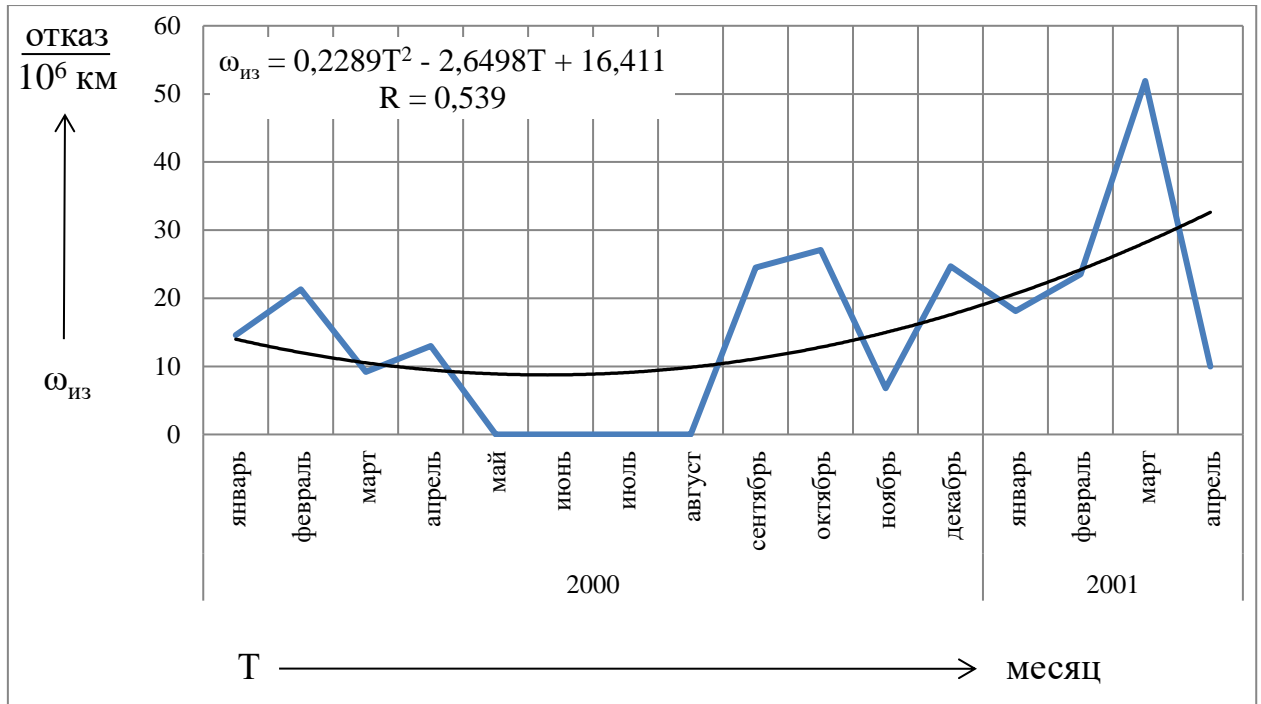


Рисунок 1.5. Динамика изменения показателя безотказности изоляции ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Севербайкальск во времени

Электровозы ВЛ80Р депо Севербайкальск эксплуатировались, как в грузовом, так и пассажирском движении (год начала выпуска электровозов - 1973, год окончания выпуска - 1986). Увеличенные по сравнению с ТЭМ электровозов ВЛ85 этого же депо значения параметров потоков отказа как ТЭМ (рисунок 1.6), так и изоляции тяговых электрических машин (рисунок 1.7) электровозов ВЛ80Р в течение трех лет эксплуатации с 2000 по 2002 год указывают на ухудшение состояния их изоляционных конструкций [14, 15]. Суровые метеорологические условия зимы 2000-2001 года также способствовали резкому снижению безотказности как ТЭМ, так и изоляции. В последующий период наблюдается снижение параметров потоков отказов электрических машин и их изоляции. Однако значения параметров потоков отказов ТЭМ и изоляции в несколько раз превышают аналогичные показатели ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в обычных природно-климатических условиях [16, 17].

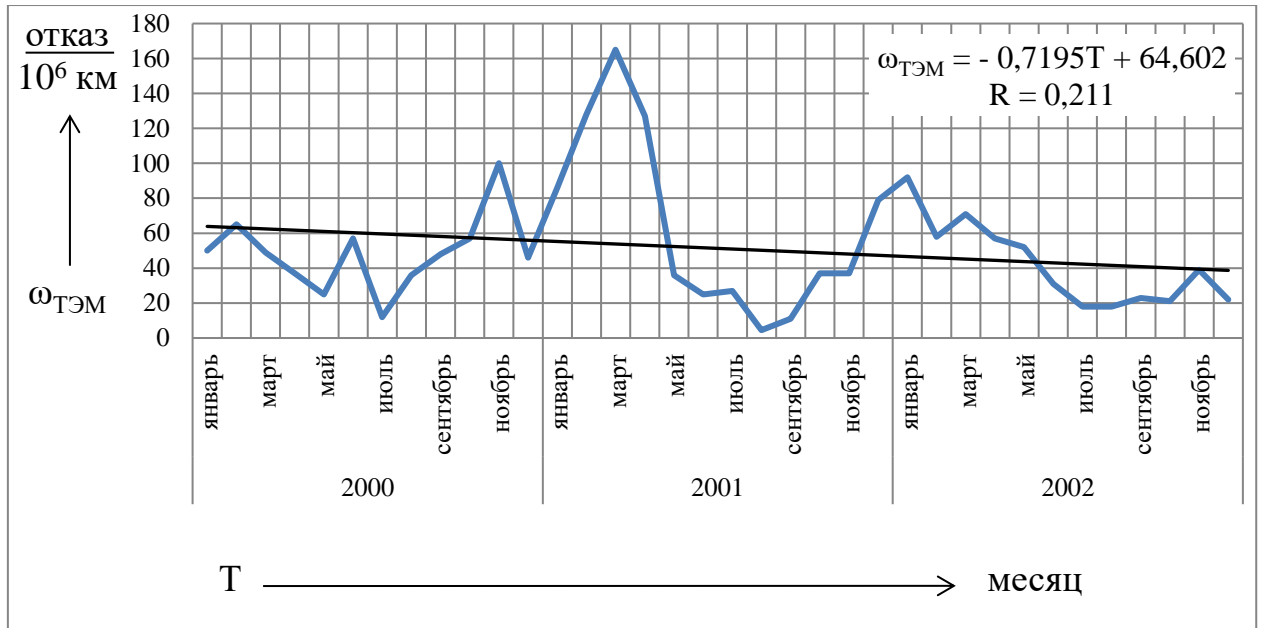


Рисунок 1.6. Характер изменения параметра потока отказов ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Северобайкальск во времени

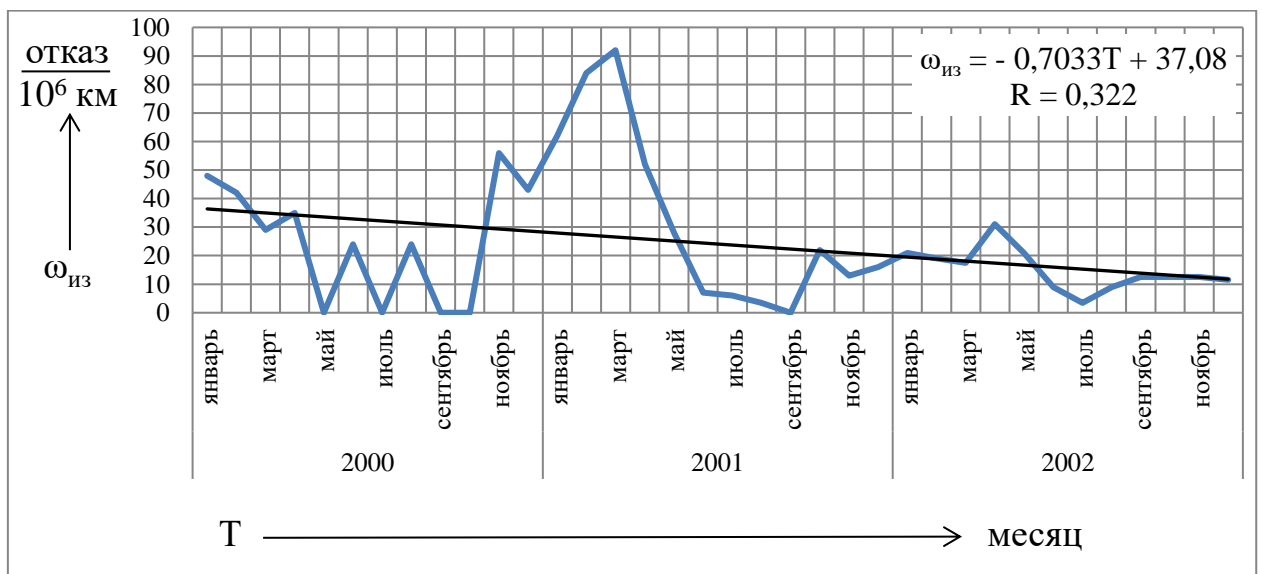


Рисунок 1.7. Изменение параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Северобайкальск во времени

Из графика, приведенного на рисунке 1.8., видно, что в период с января 2000 по декабрь 2002 года параметр потока отказов ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка северного направления Транссиба имел стабильно высокое значение. Среднее значение параметра потока отказов ТЭМ составляло 33,9 отказа /  $10^6$  км.

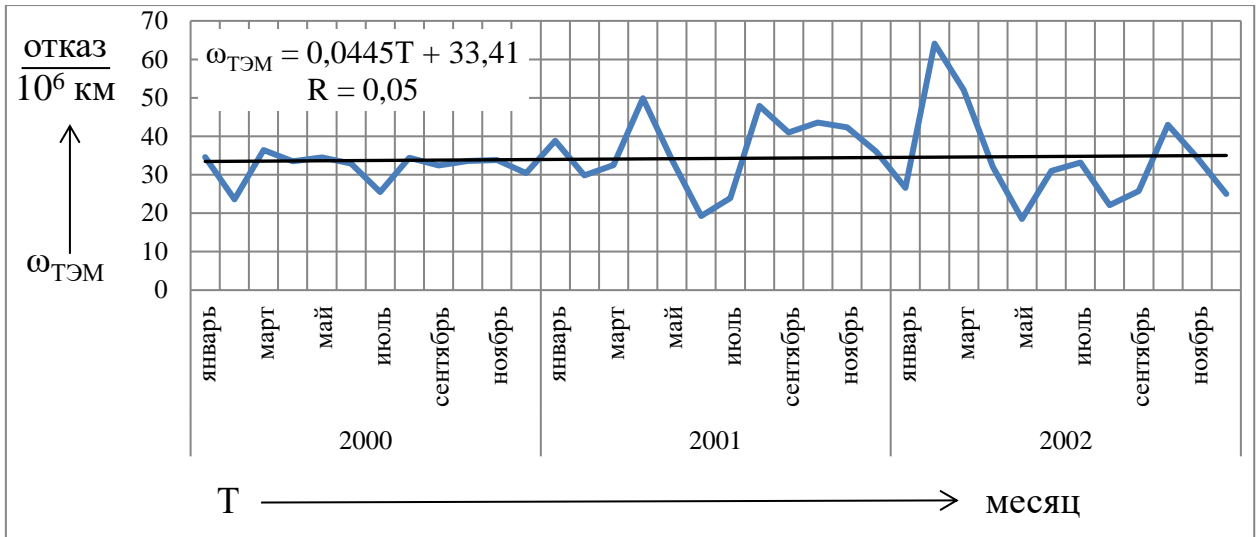


Рисунок 1.8. Динамика изменения параметра потока отказов ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка во времени

При рассмотрении зависимости  $\omega_{я}(T)$ , приведенной на рисунке 1.9, можно отметить, что в 2000 году показатель безотказности якорных обмоток ТЭМ был равен 4,85 отказа /  $10^6$  км. В последующие два года наблюдается повышение безотказности якорных обмоток.

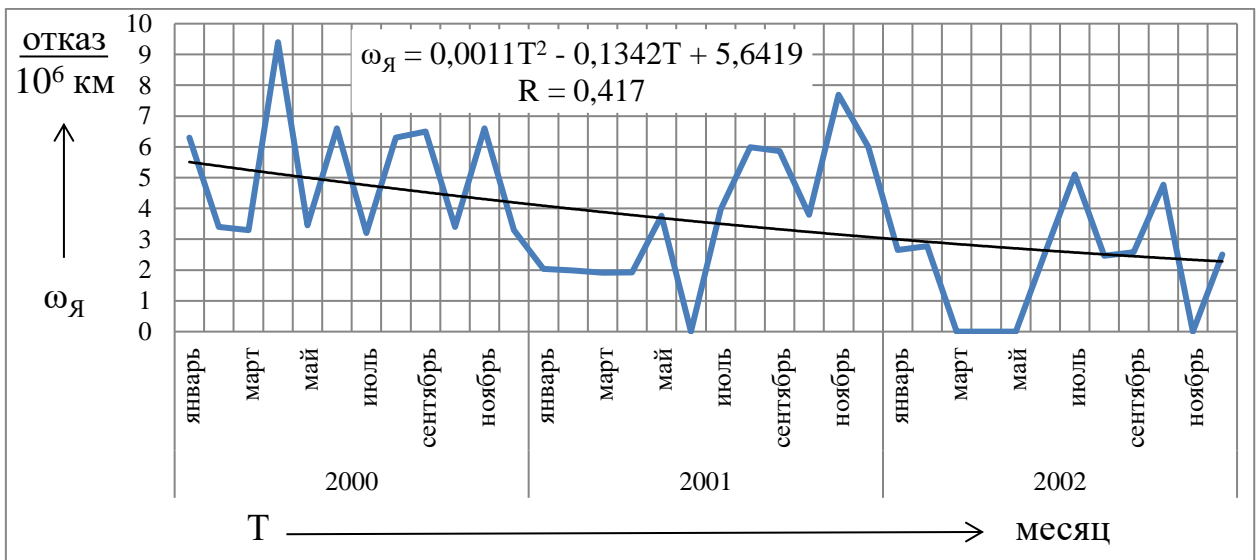


Рис.1.9. Изменение показателя безотказности якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка во времени

Среднее значение параметра потока отказов якорных обмоток за три года эксплуатации – 3,45 отказа /  $10^6$  км.



Из графика, характеризующего изменение безотказности обмоток остовов ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка во времени, приведенного на рисунке 1.10, видно постепенное возрастание параметра потока отказов изоляции обмоток главных, дополнительных и компенсационных по мере увеличения срока эксплуатации с 4,89 в январе 2000 года до 9,95 отказов / $10^6$  км в декабре 2002 года. Наибольший рост параметра потока отказов ГП и ДП наблюдается в осенние и весенние периоды эксплуатации, когда отмечается повышенная вибрация ТЭМ. Это указывает на несовершенство крепления катушек этих полюсов.

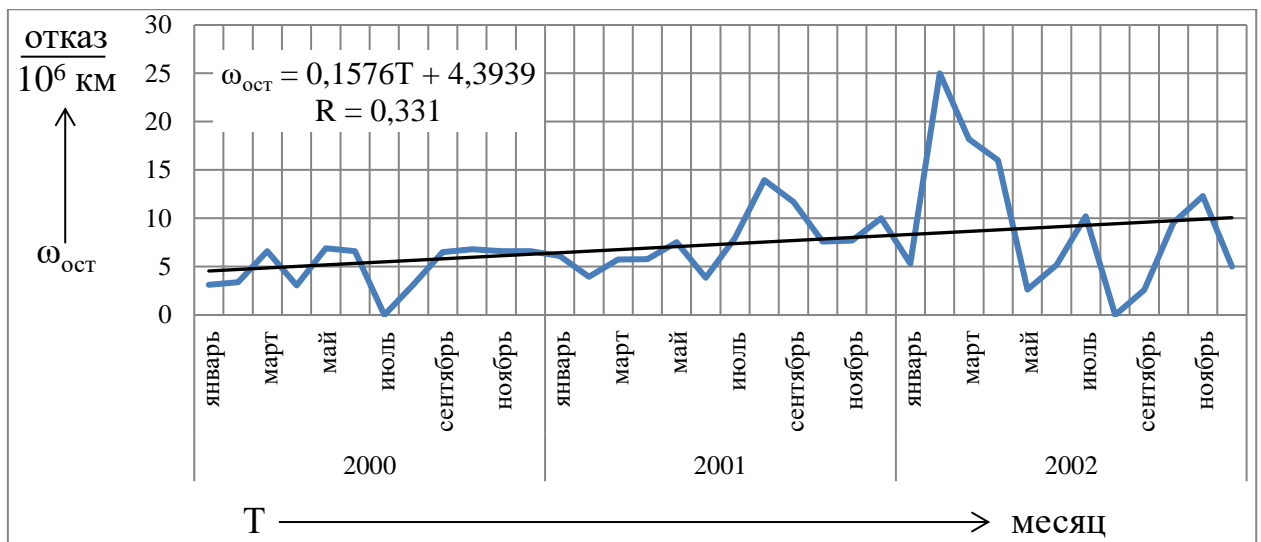


Рисунок 1.10. Характер изменения параметра потока отказов обмоток остова ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка во времени

При рассмотрении зависимости изменения параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка во времени можно отметить рост  $\omega_{из}$  с 14,9 в январе 2000 года до 22,8 отказов / $10^6$  км в декабре 2002 года. Это обусловлено, в первую очередь, увеличением отказов межкатушечных соединений полюсов, перемычек и выводных кабелей, вызванных резко пониженной температурой воздуха суровой зимы 2000 -2001 года. Среднее значение параметра потока отказов изоляции за три года наблюдения составило 17,6 отказов / $10^6$  км.

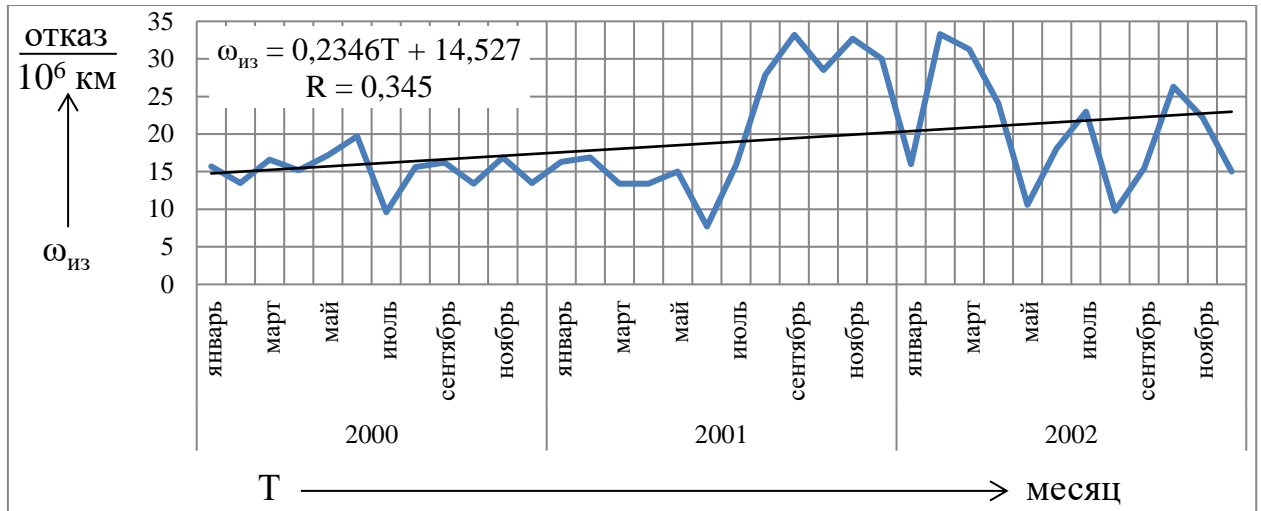


Рисунок 1.11. Динамика изменения параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка во времени

Из зависимости  $\omega_{\text{ТЭМ}}(T)$ , характеризующей изменение параметра потока отказов ТЭМ электровозов 1,5ВЛ80ТК депо Вихоревка во времени, приведенной на рисунке 1.12, видно, что безотказность ТЭМ трех секционных электровозов 1,5ВЛ80ТК повысилась по сравнению с электровозами ВЛ85 этого же депо вследствие: прохождения капитальных ремонтов с продлением срока эксплуатации на Улан–Удэнском локомотиво-вагоноремонтном заводе (УЛВРЗ); вводом в эксплуатацию протяженного Северомуйского тоннеля, исключившего лимитирующее северное направление Транссиба, движения поездов при пониженной скорости через Северомуйский хребет по обводному пути с большим числом кривых малого радиуса и 18 % подъемом временных обходных тоннелей; движения с пониженным током ТЭМ без боксования колесных пар благодаря уменьшенной, по сравнению с электровозами ВЛ85 длине секций и передаче тягового усилия от тележек на кузов через шкворневое соединение электровозов 1,5ВЛ80ТК, а также доведения различия диаметров бандажей колесных пар электровозов 1,5ВЛ80ТК до необходимого значения. За время наблюдения с января 2004 года по апрель 2006 года  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  снизился на одну треть по сравнению с электровозами ВЛ85 этого же депо и составил 21,1 отказ / 10<sup>6</sup> км.

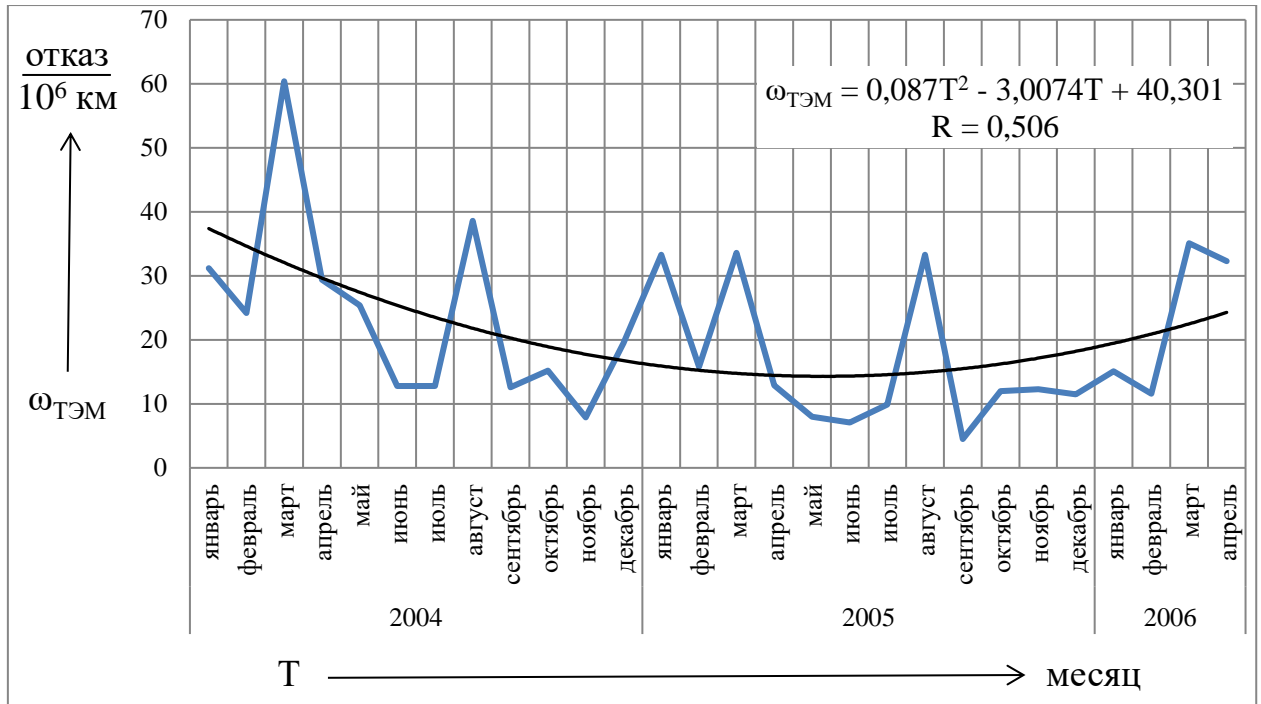


Рисунок 1.12. Характер изменения параметра потока отказов ТЭМ электровозов 1,5ВЛ80ТК депо Вихоревка во времени

При рассмотрении средней линии тренда изменения показателя безотказности якорных обмоток ТЭМ электровозов 1,5ВЛ80ТК депо Вихоревка во времени (рисунок 1.13) необходимо отметить постепенное снижение  $\omega_{я}$  с 11,7 отказов / 10<sup>6</sup> км в январе 2004 года до стабильного значения в январе-апреле 2006 года, равного 4,98 отказов / 10<sup>6</sup> км. Среднее значение параметра потока отказов якорных обмоток ТЭМ электровозов 1,5ВЛ80ТК 7,23 отказов / 10<sup>6</sup> км, что в 1,75 раз превышает аналогичный параметр якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка (рисунок 1.9). Это указывает на пониженное качество ремонта якорных обмоток ТЭМ и, в первую очередь, их изоляционных конструкций на УЛВРЗ, проводившего капитальные ремонты с продлением срока эксплуатации электровозов 1,5ВЛ80ТК депо Вихоревка.

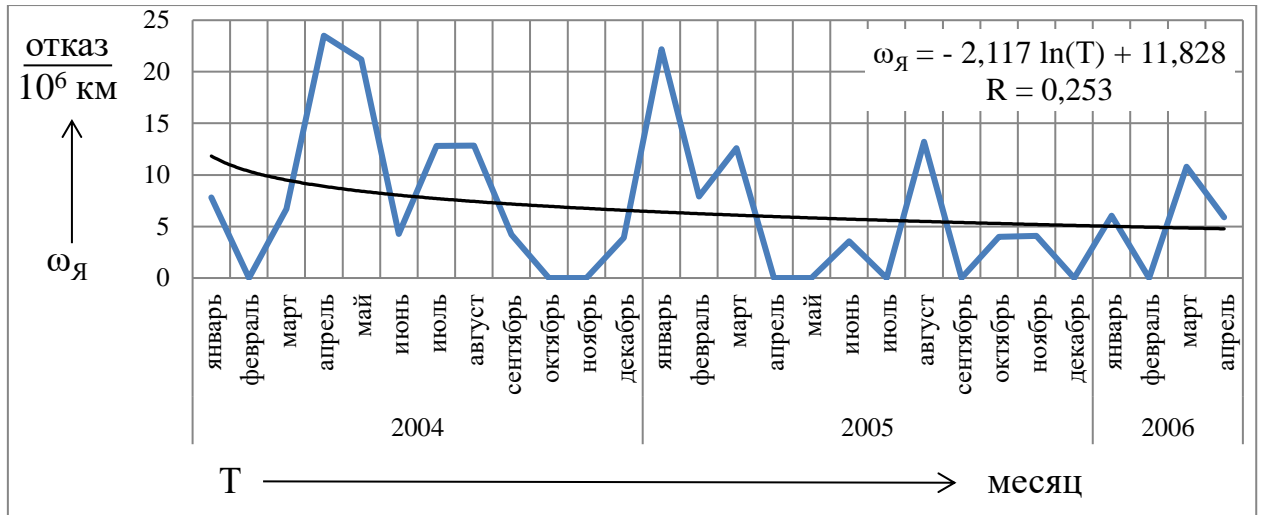


Рисунок 1.13. Изменение показателя безотказности якорных обмоток ТЭМ электровозов 1,5ВЛ80ТК депо Вихоревка во времени

Параметр потока отказов обмоток остова ТЭМ электровозов 1,5ВЛ80ТК депо Вихоревка (рисунок 1.14) также больше аналогичного параметра остовных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка (рисунок 1.9).

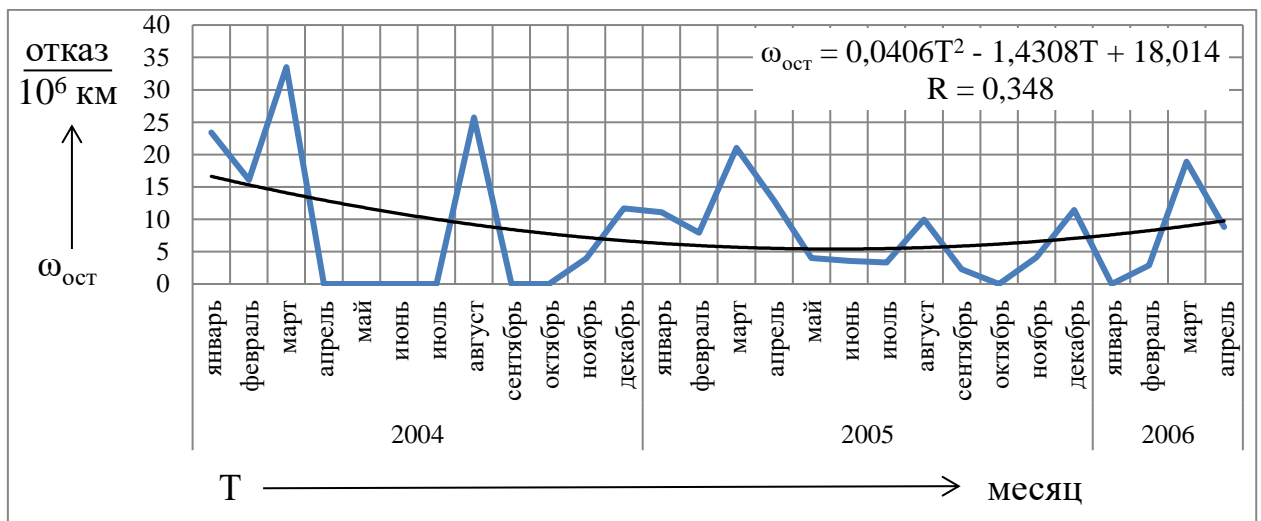


Рисунок 1.14. Характер изменения параметра потока отказов обмоток остова ТЭМ электровозов 3ВЛ80ТК депо Вихоревка во времени

Показатели безотказности изоляции ТЭМ электровозов 1,5ВЛ80ТК (рисунок 1.15) и ВЛ85 (рисунок 1.11) депо Вихоревка приблизительно равны и составляют около 17,5 отказов/10<sup>6</sup>км. Доля отказов изоляции электровозов 1,5ВЛ80ТК депо Вихоревка составляет 83 % повреждений ТЭМ, а изоляции электровозов ВЛ85 этого же депо 53 %. Это свидетельствует о пониженном

качестве ремонта КРП, выполненного УЛВРЗ, по сравнению с качеством изготовления ТЭМ электровозов ВЛ85 заводом-изготовителем.

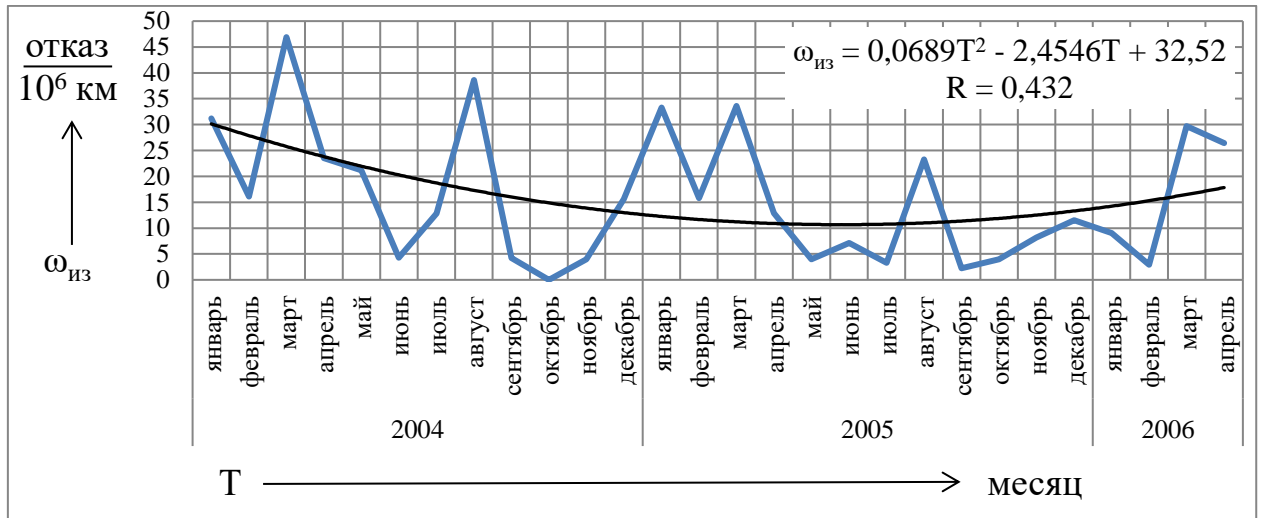


Рисунок 1.15. Динамика изменения параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов 1,5ВЛ80ТК депо Вихоревка во времени

Из графика  $\omega_{ТЭМ}(T)$  ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск, приведенного на рисунке 1.16, видно, что среднее значение показателя безотказности ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск центрального направления Транссиба за три года наблюдения равно 7,6 отказа/ $10^6$ км. Наблюдалось снижение параметра потока отказов ТЭМ в 2000, 2002 годах и его возрастание в 2001 году, вызванное суровыми метеорологическими условиями зимы 2000-2001 года.

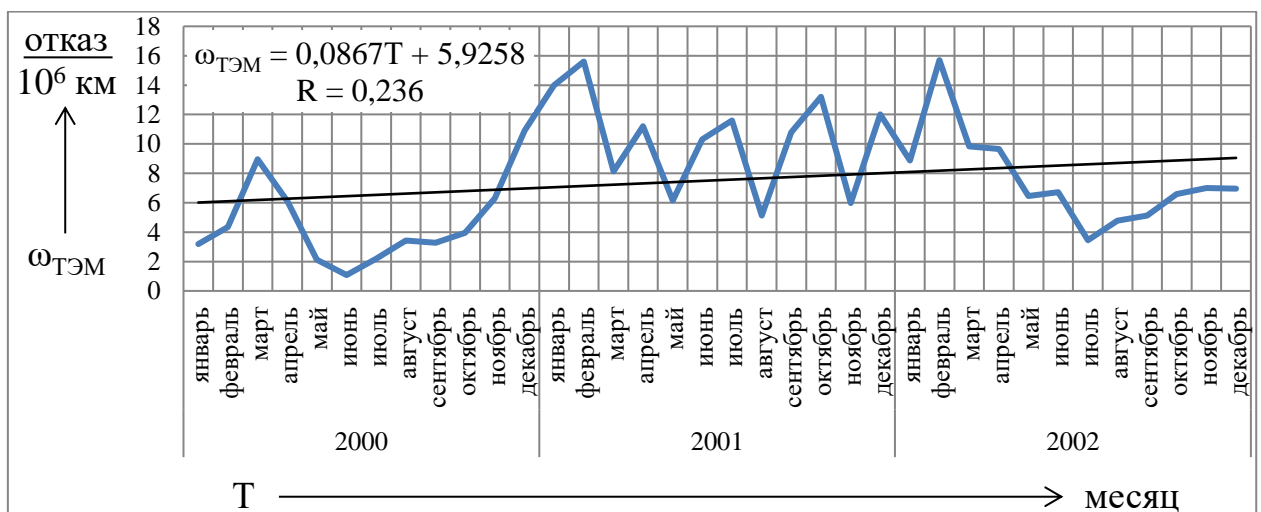


Рисунок 1.16. Динамика изменения параметра потока отказов ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск во времени

Среднее значение параметра потока отказов якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск (рисунок 1.17) в 2000-2002 годах составило 1,94 отказа/10<sup>6</sup>км. Наблюдалось максимальное увеличение  $\omega_{я}$  в июле 2001 года до 6,0 отказов/10<sup>6</sup>км и снижение до минимальной величины в течение 2002 года до 1,0 отказа/10<sup>6</sup>км, характерное для пропитанной изоляции.

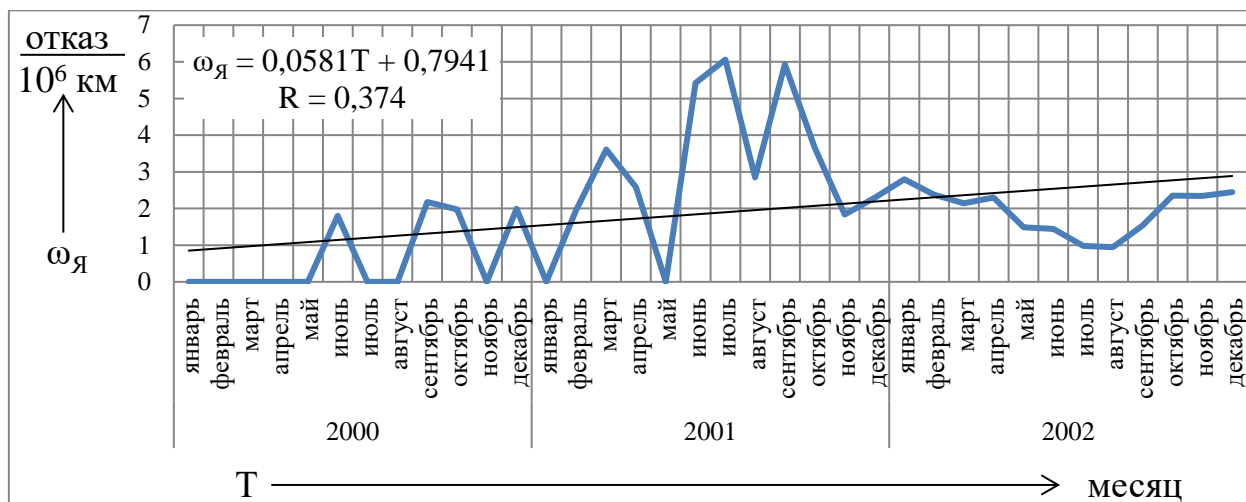


Рисунок 1.17. Изменение показателя безотказности якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск во времени

В период с января 2000 года по декабрь 2002 среднее значение показателя безотказности обмоток остова ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск (рисунок 1.18) имело значение 3,3 отказа/10<sup>6</sup>км.

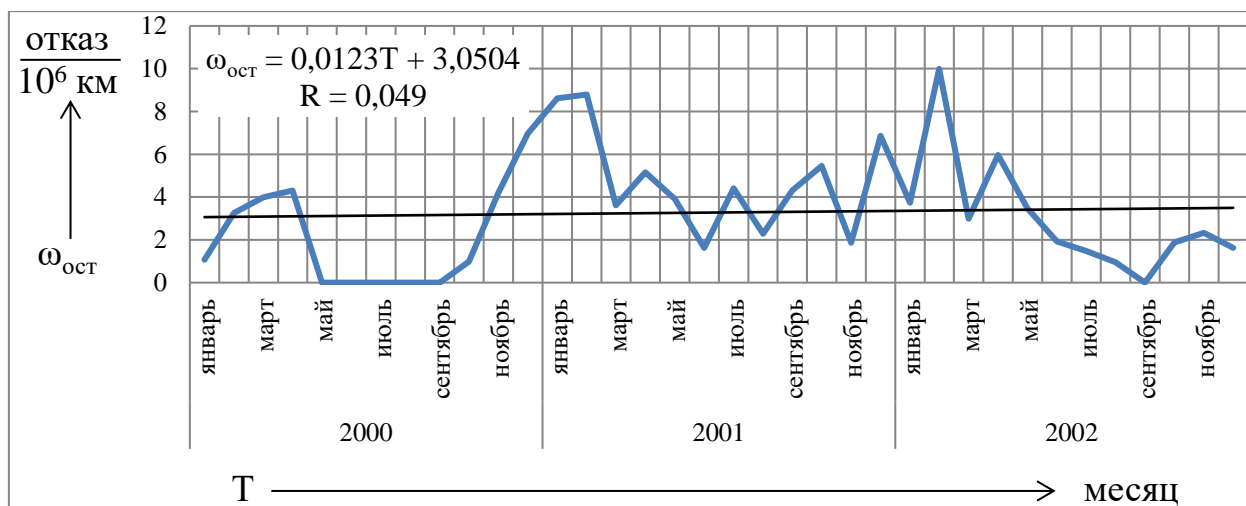


Рисунок 1.18. Характер изменения параметра потока отказов обмоток остова ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Нижнеудинск во времени

Среднее значение параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск (рисунок 1.19) в 2000-2002 годах

составляло 5,71 отказа/10<sup>6</sup>км. Наибольшее значение  $\omega_{из}$  наблюдалось в феврале 2001 года (13,7 отказов/10<sup>6</sup>км). Среднее значение параметра потока отказов изоляции ТЭМ в наиболее теплый квартал года – июль, август, сентябрь – в 2000, 2001, 2002 годах составляло 0,68; 8,67; 2,4 отказа/10<sup>6</sup>км, что соответствует качественно пропитанной, непропитанной, менее качественно пропитанной изоляции.

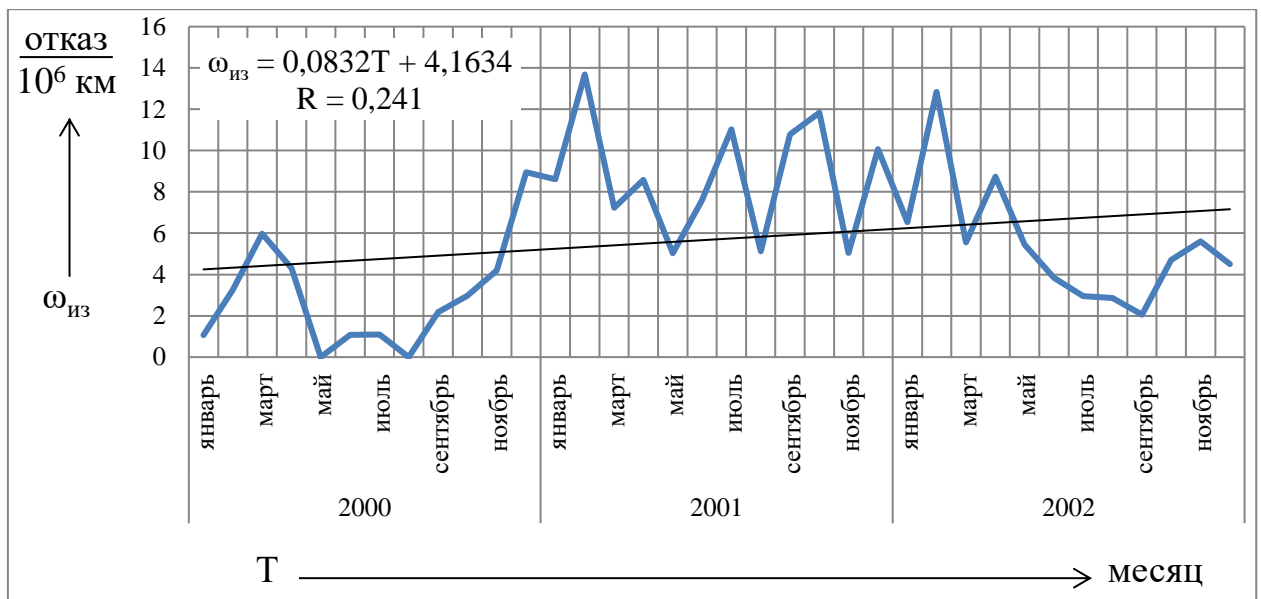


Рисунок 1.19. Динамика изменения параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск во времени

Анализируя графики  $\omega_{ТЭМ}(T)$  электровозов ВЛ85 депо Абакан южного направления Транссиба (рисунок 1.20), можно отметить, что в течение трех лет с января 2000 по декабрь 2002 года наблюдается повышение безотказности ТЭМ. Среднее значение параметра потока отказов ТЭМ составляло 20,9 отказа/10<sup>6</sup>км. Средняя линия тренда зависимости за три года эксплуатации снизилась с 39,1 отказа/10<sup>6</sup>км до стабильного значения в последние шесть месяцев 2002 года 15,3 отказа/10<sup>6</sup>км.

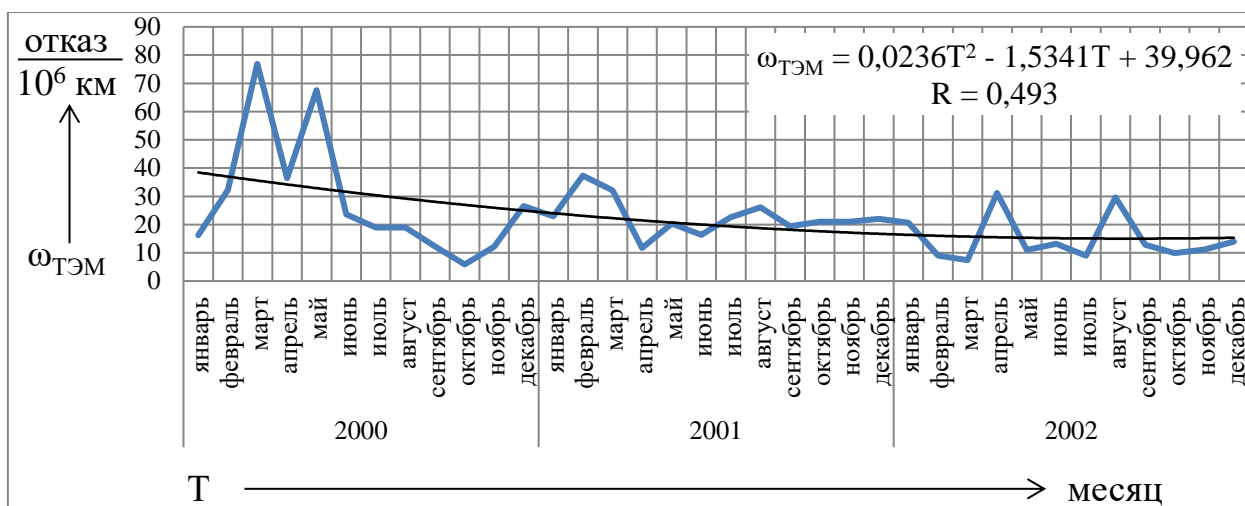


Рисунок 1.20. Характер изменения показателей безотказности ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан во времени

Согласно зависимости  $\omega_{я}(T)$ , приведенной на рисунке 1,21, среднее значение параметра потока отказов якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан за три рассматриваемых года равно 3,95 отказа/ $10^6$ км. Отсутствие характерного повышения безотказности изоляции обмоток в теплые кварталы каждого года и ее снижения в холодные кварталы трех лет указывает на пониженное качество изоляции якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан.

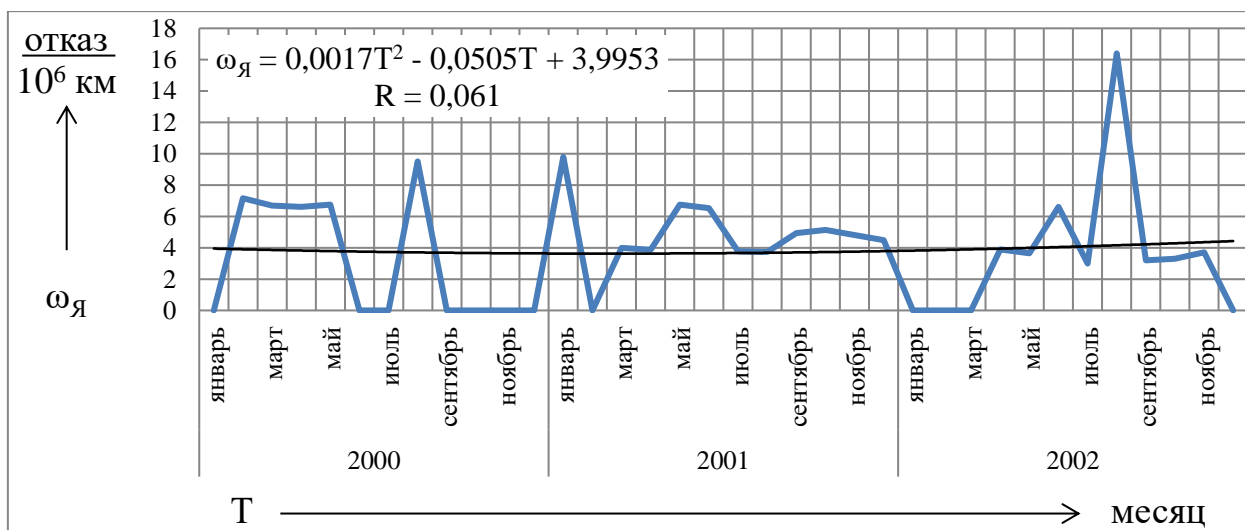


Рисунок 1.21. Изменение показателя безотказности якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан во времени



При анализе графика изменения  $\omega_{\text{ост}}(T)$ , приведенного на рисунке 1.22, можно отметить четырех-пяти кратное возрастание параметра потока отказов обмоток остова в феврале 2001 и марте 2002 годов по сравнению с достаточно стабильной средней линией тренда, что указывает на несовершенство крепления катушек главных и дополнительных полюсов электровозов ВЛ85. Среднее значение параметра потока отказов ТЭМ составляло 20,9 отказа/10<sup>6</sup>км. Среднее значение параметра потока отказов обмоток остова ТЭМ составляло 4,75 отказа/10<sup>6</sup>км.

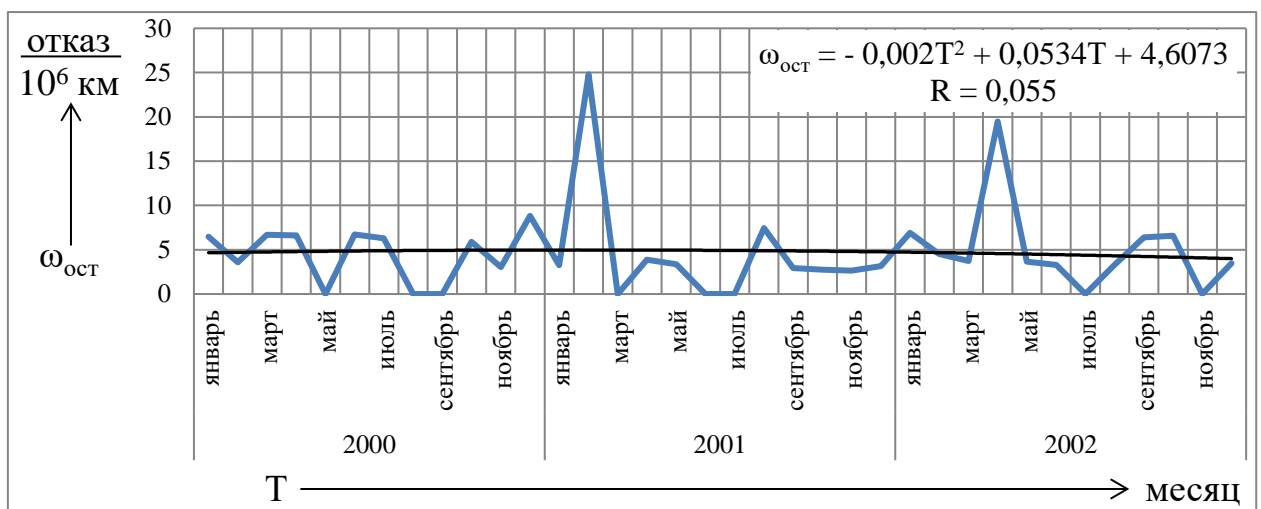


Рисунок 1.22. Характер изменения параметра потока отказов обмоток остова ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Абакан во времени

Из рассмотрения зависимости  $\omega_{\text{из}}(T)$ , приведенной на рисунке 1.23, видно, что в наиболее теплые кварталы 2000 и 2001 годов параметр потока отказов изоляции ТЭМ незначительно ниже средней линии тренда зависимости. В теплом квартале 2002 года  $\omega_{\text{из}}$  выше средней линии тренда. Это указывает на снижение механических и электрических характеристик изоляции ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан. Среднее значение параметра потока отказов изоляции ТЭМ составляло 8,8 отказов/10<sup>6</sup>км.

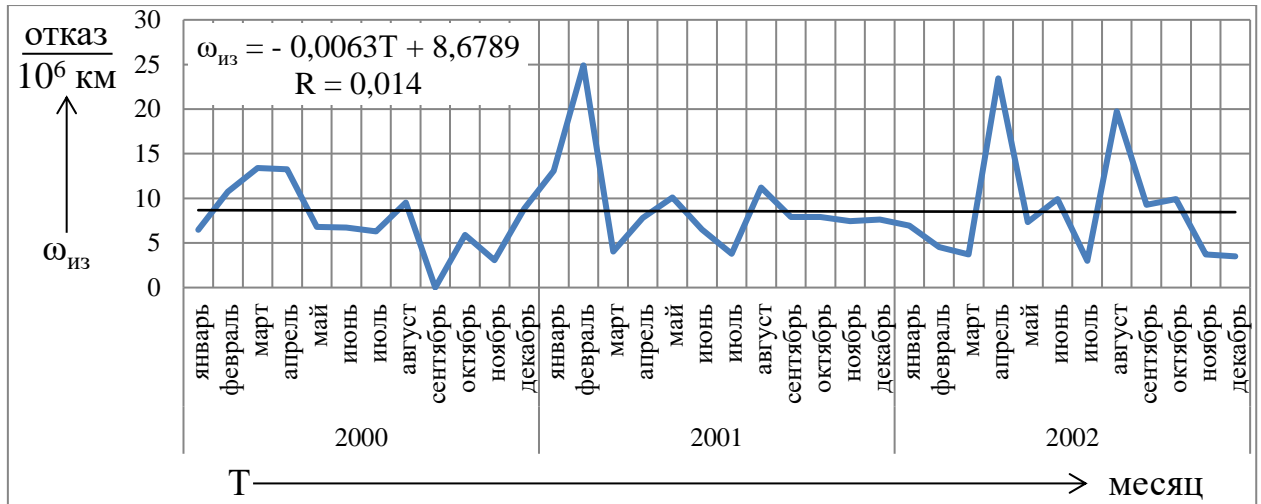


Рисунок 1.23. Динамика изменения параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан во времени

Как указывалось ранее, ООО «ПК «НЭВЗ» выпускал электровозы ВЛ80Р с 1973 по 1986 год. Затем электровозы ВЛ80Р депо Иланская центрального направления Транссиба проходили средние и капитальные ремонты на УЛВРЗ. При анализе зависимостей характеризующих изменение параметров потоков отказов ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская в период с января 2000 по декабрь 2006, необходимо отметить следующее. В 2000 году благодаря качественно пропитанной изоляции параметры потоков отказов как ТЭМ (рисунок 1.24), так и изоляции ТЭМ (рисунки 1.25 - 1.27) электровозов ВЛ80Р депо Иланская имели наименьшие, за семь лет наблюдения, значения. Из-за суровой зимы 2000-2001 года, с чрезмерно низкой температурой воздуха и продолжительным периодом чрезмерно низкой температуры воздуха в 2001 году безотказность как ТЭМ, так и их изоляции понизилась в несколько раз. В течение последующих пяти лет с января 2002 года по декабрь 2006 года параметр потока отказов ТЭМ снизился с 13,7 до 11,5 отказов/10<sup>6</sup>км, якорных обмоток повысился с 2,8 до 3,1 отказа/10<sup>6</sup> км, обмоток остова снизился с 4,5 до 3,3 отказов/10<sup>6</sup> км, изоляции ТЭМ снизился с 9,95 до 6,3 отказов/10<sup>6</sup> км.

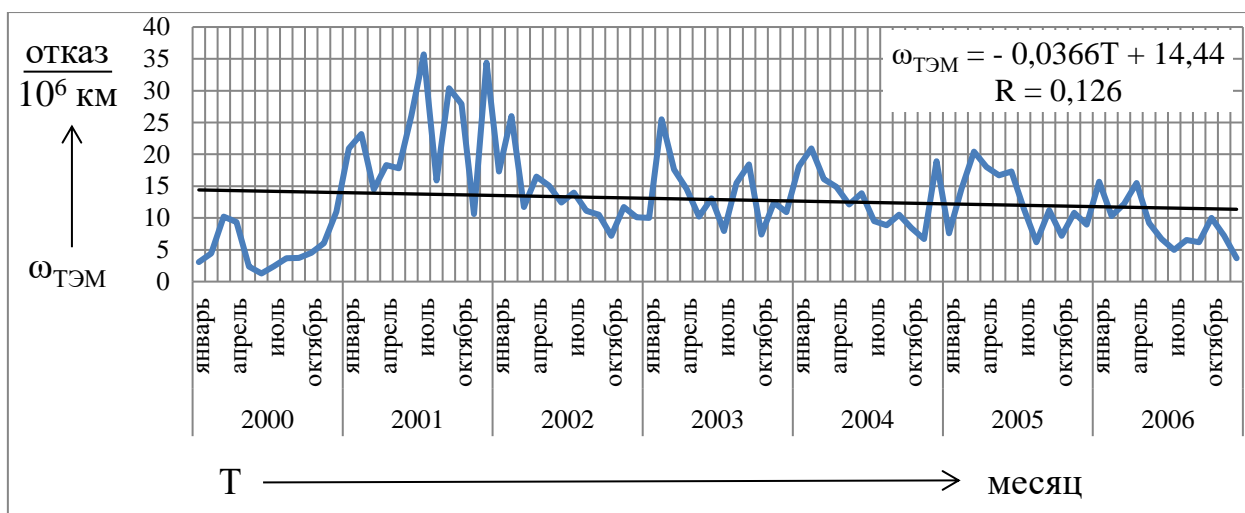


Рисунок 1.24. Характер изменения параметра потока отказов ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская во времени

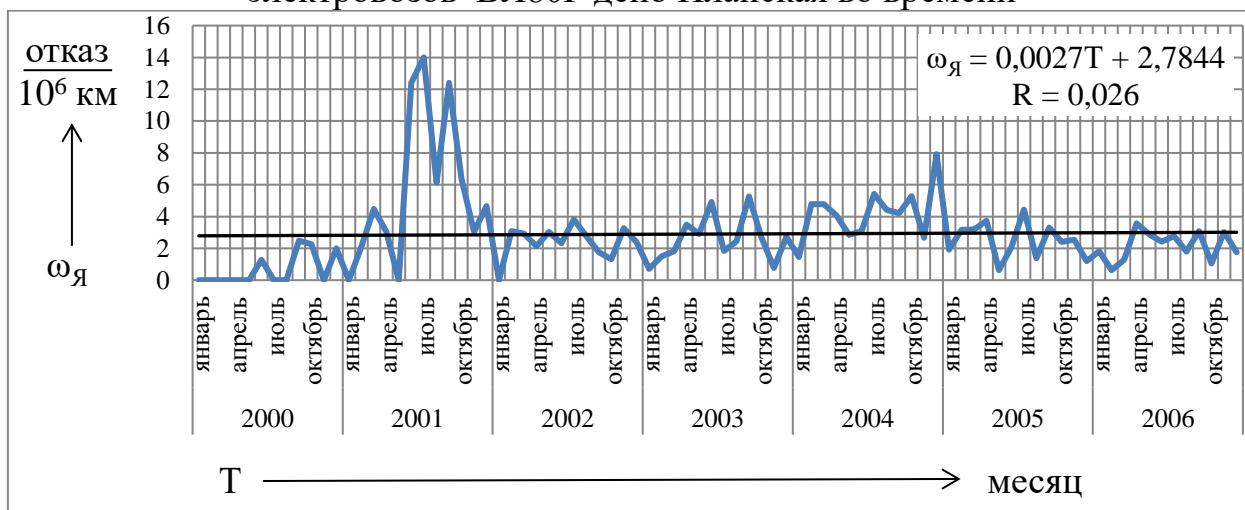


Рисунок 1.25. Изменение показателя безотказности якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская во времени

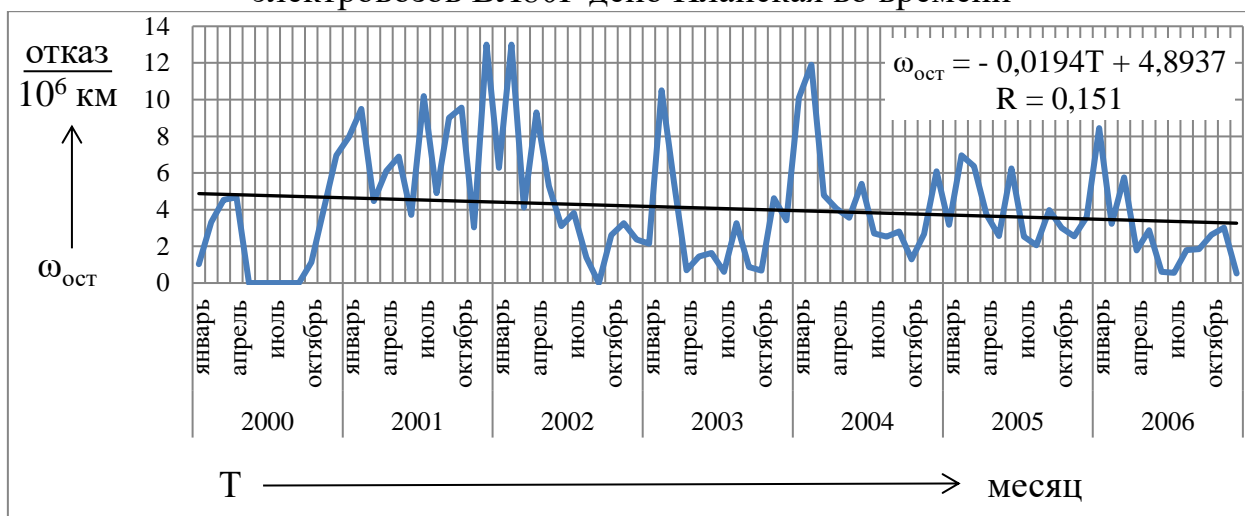


Рисунок 1.26. Характер изменения параметра потока отказов обмоток остова ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская во времени

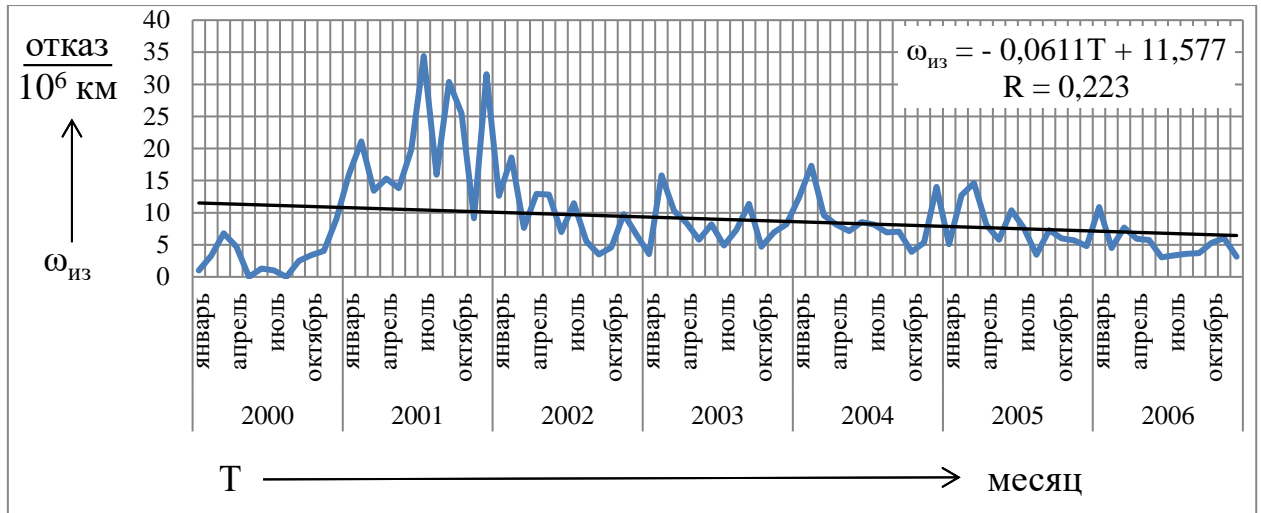


Рисунок 1.27. Динамика изменения параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская во времени

### 1.3 Безотказность ТЭМ электровозов 2ЭС6

В настоящее время в депо Челябинск, Омск, Тайга, Курган эксплуатируются более шестисот двух – и трехсекционных грузовых электровозов 2ЭС6. Мощность коллекторных тяговых электрических машин, установленных на электровозах, составляет 810 кВт, нагрузка на ось колесной пары 25 т. ТЭМ имеют изоляцию класса нагревостойкости «Н». Среднесуточный пробег электровозов составляет около шестисот километров. Анализ безотказности показывает, что на ТЭМ приходится более четверти отказов электровозов. Безотказность ТЭМ электровозов существенно ниже проектируемой. Основными отказами тяговых электрических машин являются снижение сопротивления изоляции якорных и остовных обмоток ниже допустимого значения, пробой изоляции и круговые огни на коллекторе (рисунок 1.28).



Рисунок 1.28. Распределение отказов ТЭМ электровозов 2ЭС6 по видам неисправностей

Установлено, что на электровозах 2ЭС6 отмечается повышенная токовая нагрузка отдельных ТЭМ вследствие: различия диаметров бандажей колесных пар; неравномерного распределения нагрузки между ними из-за недостаточно эффективного регулирования магнитных потоков главных полюсов; использования на одном электровозе тяговых электрических машин разных заводов изготовителей, имеющих различия в конструкции и технологии изготовления элементов магнитных систем. У части ТЭМ наблюдается снижение расхода охлаждающего воздуха значительно ниже номинального значения [18, 19].

Динамика параметра потока отказов ТЭМ электровозов 2ЭС6 во времени, приведенная на рисунке 1.29, свидетельствует о существенном изменении безотказности тяговых электрических машин в теплые и холодные периоды года.

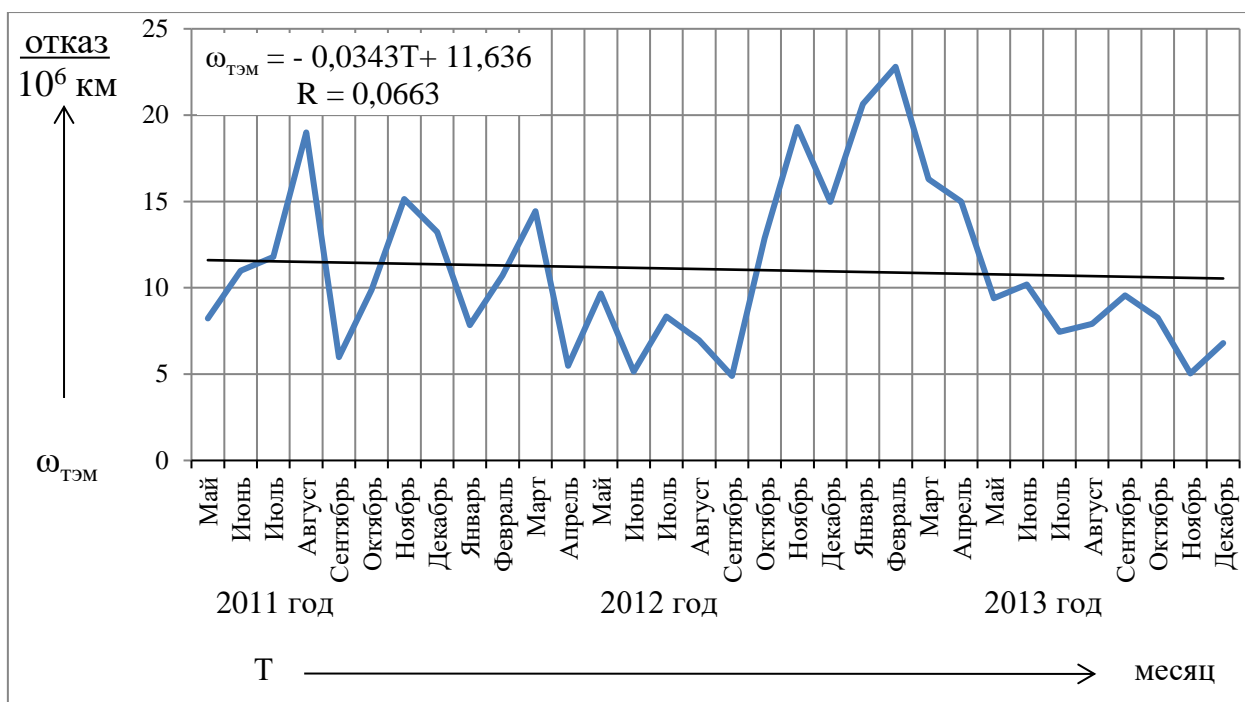


Рисунок 1.29. Характер изменения параметра потока отказов ТЭМ электровозов 2ЭС6 во времени

Ранее полученные при исследовании ТЭМ электровозов переменного тока зависимости параметров потоков отказов изоляции якорных обмоток ТЭМ от среднемесячной температуры (рисунок 1.30 - 1.31), позволяют оценить состояние изоляции парка тяговых электрических машин электровозов 2ЭС6.

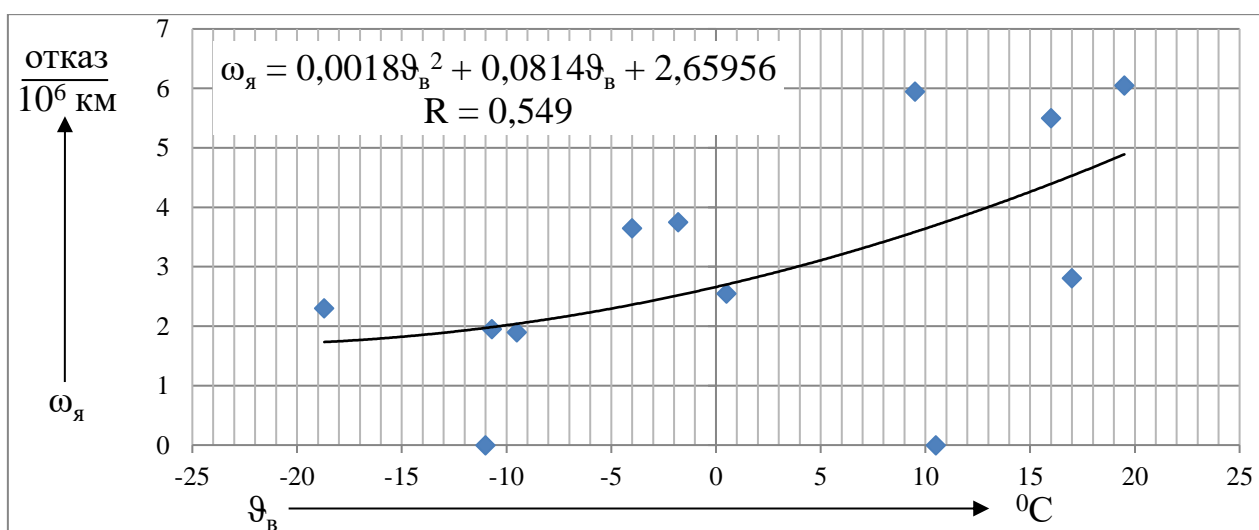


Рисунок 1.30. Зависимость показателя безотказности изоляции якорных обмоток ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха до пропитки

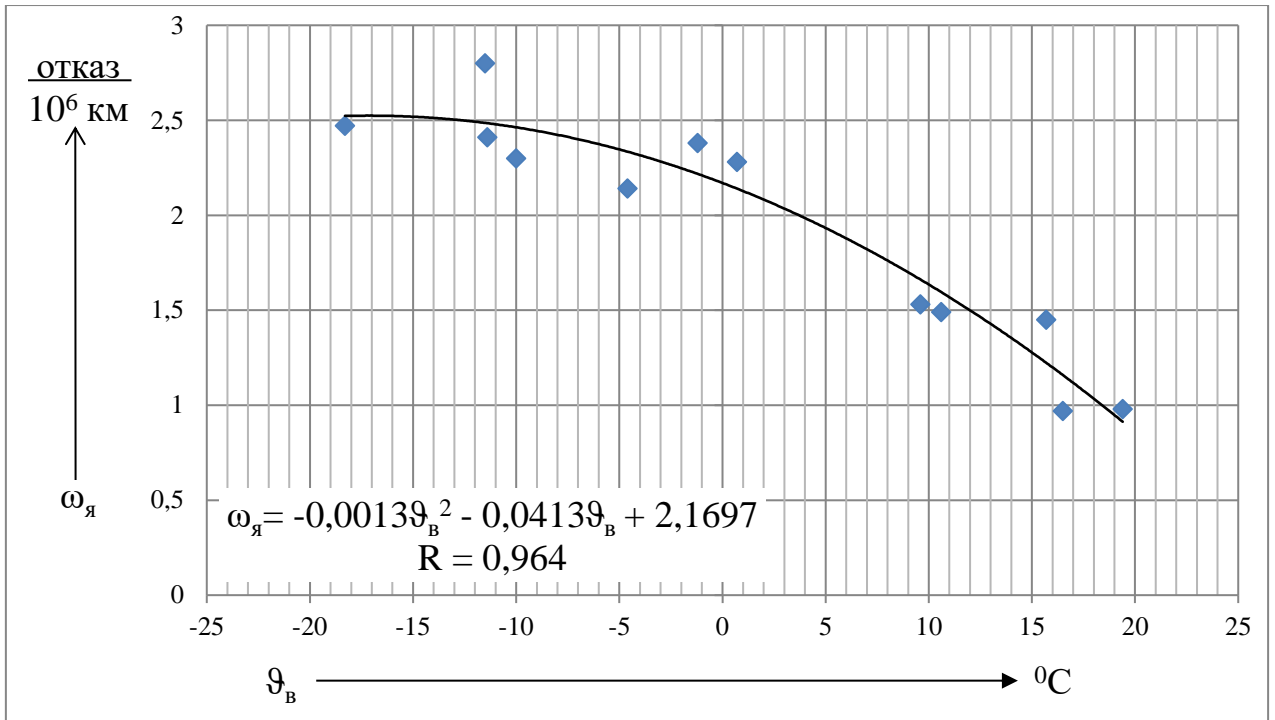


Рисунок 1.31. Изменение показателя безотказности изоляции якорных обмоток ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха после пропитки

Каждая из приведенных зависимостей показателей безотказности изоляции якорных обмоток ТЭМ электровозов одного и того же локомотивного депо от среднемесячной температуры воздуха до пропитки изоляции (рисунок 1.30.) и после пропитки (рисунок 1.31.) соответствует одному году эксплуатации электровозов депо. Из рисунка 1.28 видно, что более восьмидесяти процентов отказов ТЭМ электровозов 2ЭС6 приходится на изоляционные конструкции. Это позволяет использовать зависимости, приведенные на рисунках 1.30 - 1.31, для анализа безотказности изоляции ТЭМ электровозов 2ЭС6 по изменению зависимости параметра потока отказов изоляции ТЭМ электровозов 2ЭС6 от среднемесячной температуры воздуха, приведенной на рисунке 1.32.

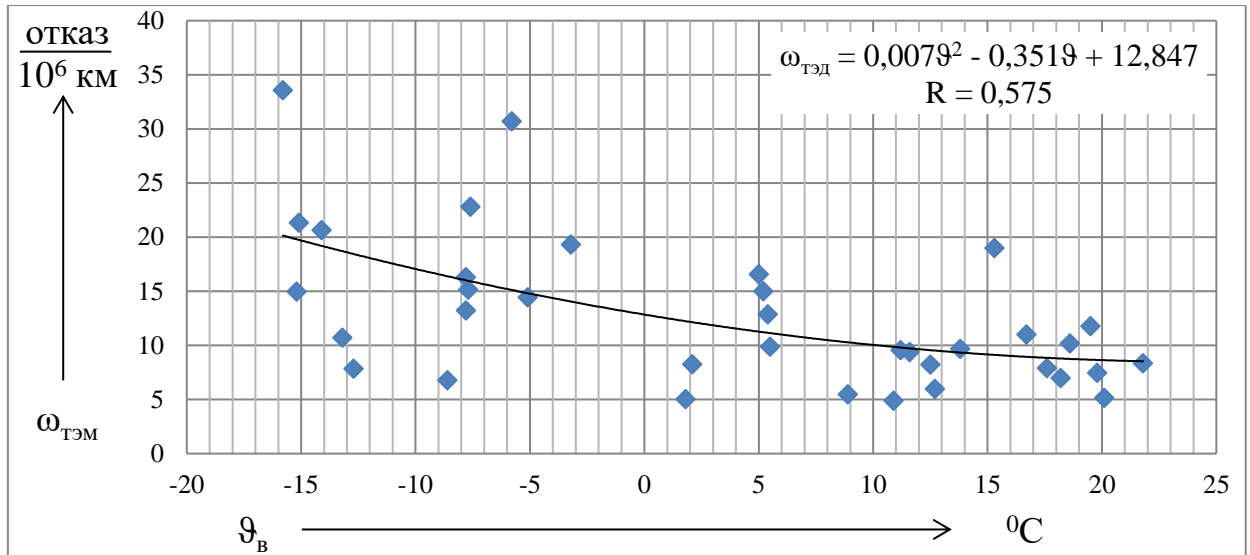


Рисунок 1.32. Изменение параметра потока отказов изоляции электровозов 2ЭС6 от среднемесячной температуры воздуха

При рассмотрении зависимости  $\omega_{\text{ТЭМ}}(\theta_{\text{в}})$ , приведенной на рисунке 1.32, можно отметить уменьшение числа отказов с ростом температуры воздуха, что характерно для пропитанной изоляции. Однако значительный разброс статистических данных о среднемесячной безотказности ТЭМ от кривой, характеризующей теоретическую зависимость  $\omega_{\text{ТЭМ}}(\theta_{\text{в}})$ , а также пониженное корреляционное отношение ( $R = 0,575$ ) между ними указывает на существенное ухудшение механических и электрических свойств изоляции ТЭМ электровозов 2ЭС6 по сравнению с тяговыми электрическими машинами, имеющими качественно пропитанную изоляцию.

#### 1.4 Безотказность ТЭМ электровозов ОПЭ Михайловского горно-обогатительного комбината

Промышленные электровозы (ОПЭ) Михайловского горно-обогатительного комбината (ГОК) производства ООО «ПК «НЭВЗ» применяются при вывозе железной руды из открытых карьеров глубиной более трехсот пятидесяти метров. Электровозы типа ОПЭ рассчитаны на движение по пути с кривыми радиусом до 200 м и менее, по уклонам до 60 %.



В электровозах установлены коллекторные тяговые электрические машины пульсирующего тока типа НБ-511М. Класс нагревостойкости изоляции ТЭМ «Н». На отказы изоляции приходится более половины отказов ТЭМ. Анализ режимов работы электровозов ОПЭ ГОКа показал, что пониженная безотказность изоляции ТЭМ обусловлена: продолжительным превышением номинального тока при следовании с поездами повышенной массы по расчётным подъёмам; недопустимой разницей диаметров бандажей колесных пар электровозов. Это приводит к превышению предельно допустимой температуры изоляции тяговых электрических машин и, как следствие, ее ускоренному тепловому и термомеханическому старению.

Из зависимости, характеризующей изменение параметра потока отказов ТЭМ электровозов ОПЭ в период с января 2006 по декабрь 2010 года (рисунок 1.33) видно, что средняя линия тренда зависимости  $\omega_{\text{ТЭМ}}(T)$  снижается от 45,1 отказа/ $10^6$  км в январе 2006 года до стабильного в течение второй половины 2010 года значения 31,2 отказа/ $10^6$  км. Во времени эксплуатации наблюдаются неперiodические, существенно различные по величине, среднемесячные изменения  $\omega_{\text{ТЭМ}}$ , что указывает на ухудшенное состояние изоляции ТЭМ.

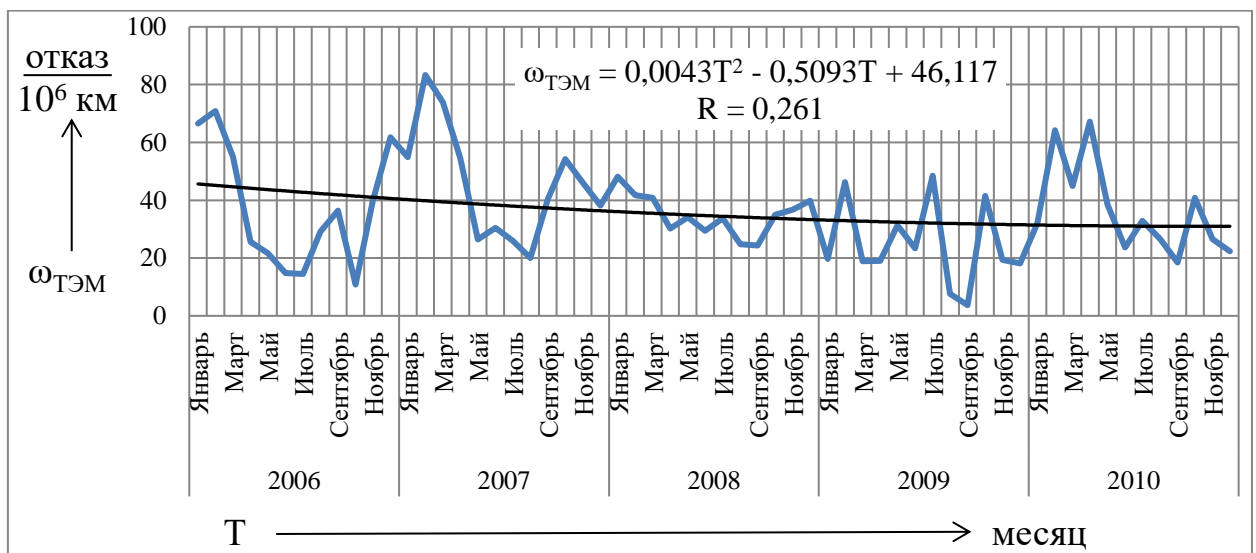


Рисунок 1.33. Характер изменения параметра потока отказов ТЭМ электровозов ОПЭ Михайловского ГОК во времени

При рассмотрении графика  $\omega_{\text{я}}(T)$ , приведенного на рисунке 1.34, можно отметить, что средняя линия тренда снижается в течение наблюдаемых пяти

лет незначительно. Среднее значение показателя безотказности якорных обмоток за пятилетний период равно 8,7 отказов/ $10^6$  км. Наименьшая величина параметра потока отказов якорных обмоток ТЭМ в наиболее теплый квартал года – июль, август, сентябрь – наблюдается в 2006 и 2009 годах, что указывает на достаточно хорошее состояние изоляции якорных обмоток (изоляция пропитана). В 2007 и 2010 годах – качество изоляции якорных обмоток ухудшено по сравнению с 2006 и 2009 годами. В 2008 году качество изоляции якорных обмоток ТЭМ неудовлетворительное.

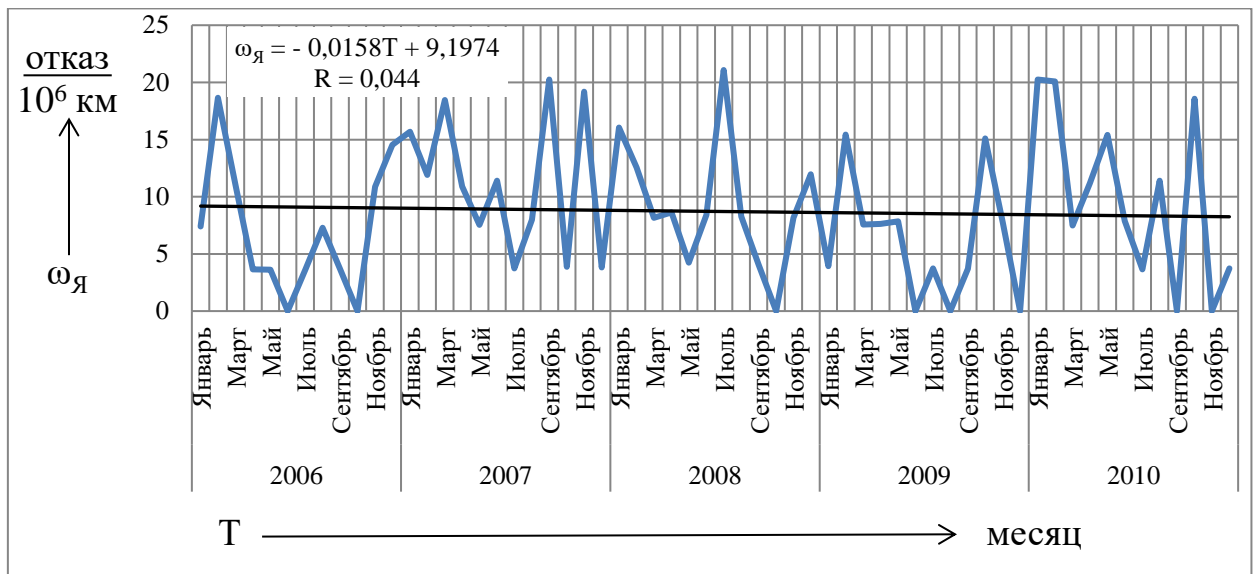


Рисунок 1.34. Изменение показателя безотказности якорных обмоток ТЭМ электровозов ОПЭ Михайловского ГОК во времени

Согласно зависимости  $\omega_{ост}(T)$ , приведенной на рисунке 1.35, среднее значение параметра потока отказов обмоток остова ТЭМ электровозов ОПЭ МГОК за пять рассматриваемых лет составляет 10,0 отказов/ $10^6$  км. Средняя линия тренда зависимости возрастает в течение наблюдаемых пяти лет незначительно. Характерное снижение параметра потока отказов обмоток остова ТЭМ в теплые кварталы каждого года и его повышение в холодные кварталы 2006 – 2008 годов указывает на нормальное состояние изоляции остовных обмоток. В 2009 году в теплом квартале  $\omega_{ост}(T)$  лишь незначительно ниже средней линии тренда зависимости  $\omega_{ост}(T)$ , а в теплом квартале 2010 года параметр потока отказов обмоток остова ТЭМ превышает среднюю линию

тренда. Это указывает на ухудшение состояния изоляции остовных обмоток ТЭМ электровозов ОПЭ ГОК в 2009 и, особенно, в 2010 году.

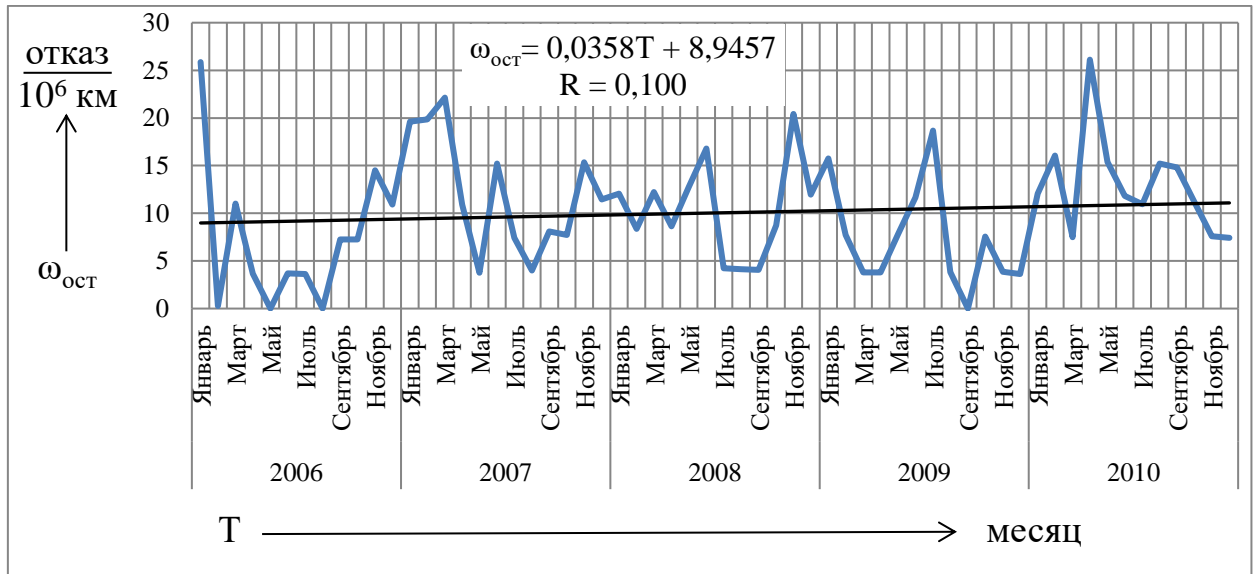


Рисунок 1.35. Характер изменения параметра потока отказов обмоток остова ТЭМ электровозов ОПЭ Михайловского ГОК во времени

### 1.5 Анализ технологической безотказности ТЭМ после прохождения средних и капитальных ремонтов

В связи с пониженной эксплуатационной безотказностью изоляции якорных обмоток ТЭМ проанализирована их технологическая безотказность, прошедших средний и капитальный ремонты в локомотиворемонтном заводе. Анализ проведен с использованием параметра потока отказов

$$\omega(t) = \frac{m}{N * \Delta t}$$

где  $m$  – число отказов;  $N$  – количество тяговых электрических машин, прошедших средний (СР) или капитальный (КР) ремонты за месяц  $\Delta t$ .

В анализе использованы статистические материалы об отказах ТЭМ НБ-418К6 и их узлов, при проведении приемо-сдаточных испытаний на испытательной станции завода после СР и КР [20]. Ежемесячно на заводе выполнялось от тридцати и более средних и капитальных ремонтов и приемо-

сдаточных испытаний тяговых электрических машин, что обеспечивало необходимую достоверность получаемых результатов.

Данные о безотказности изоляции якорных обмоток ТЭМ НБ-418К6, после среднего и капитального ремонтов в заводе, приведены на рисунках 1.36 – 1.37.

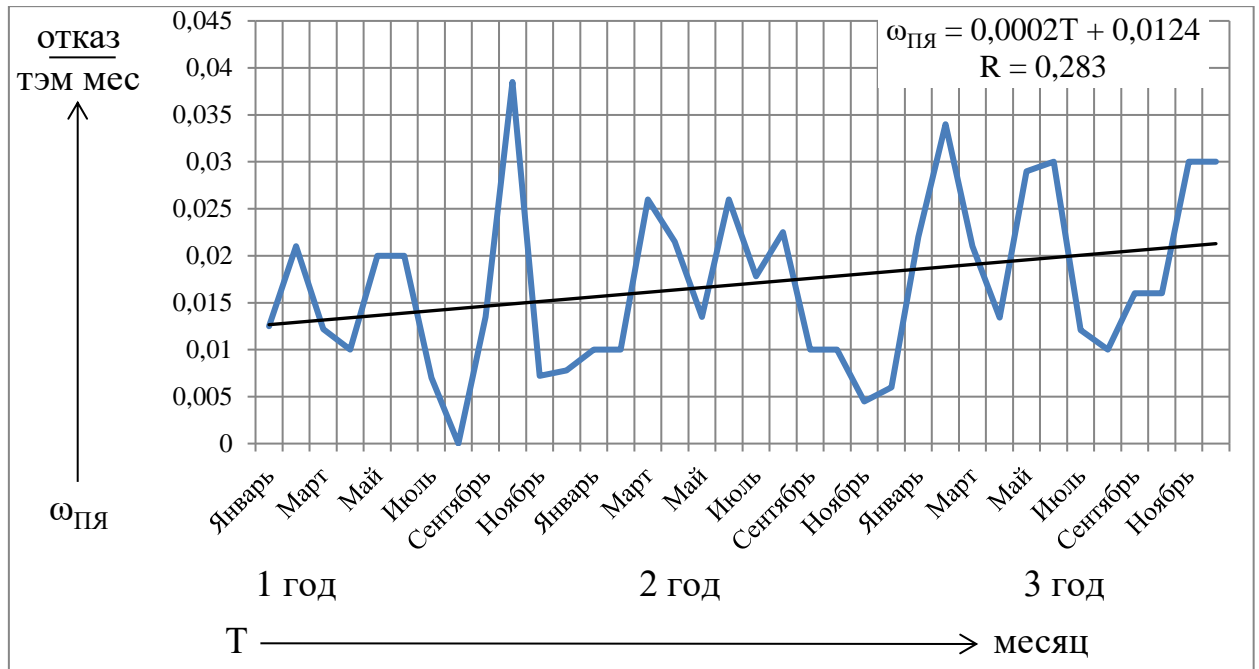


Рисунок 1.36. Изменение среднемесячного параметра потока пробоев изоляции якорных обмоток ТЭМ НБ-418К6 после среднего ремонта во времени

Анализ приведенных данных, технологии средних и капитальных ремонтов показывает, что повышенный разброс статистических данных об отказах изоляции якорных обмоток ТЭМ, а также снижение их безотказности во времени обусловлены нарушениями технологии ремонта, нестабильностью характеристик пропиточных материалов, нарушениями технологии пропитки и сушки ТЭМ, отсутствием контроля увлажненности изоляции перед и после каждой пропитки [21]. На это же указывают зависимости изменения активного сопротивления изоляции ТЭМ НБ-418К6 от температуры, после заводских ремонтов (рисунок 1.38).

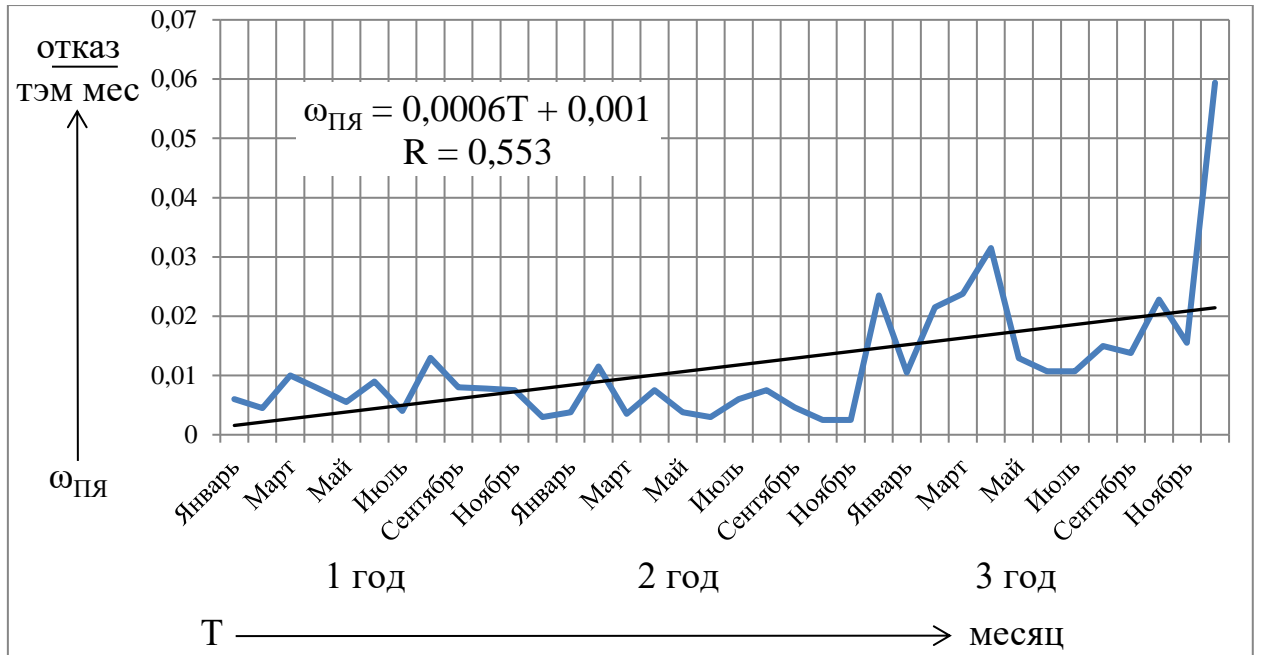


Рисунок 1.37. Зависимость изменения среднемесячного параметра потока пробоев изоляции якорных обмоток ТЭМ НБ-418К6 после капитального ремонта во времени

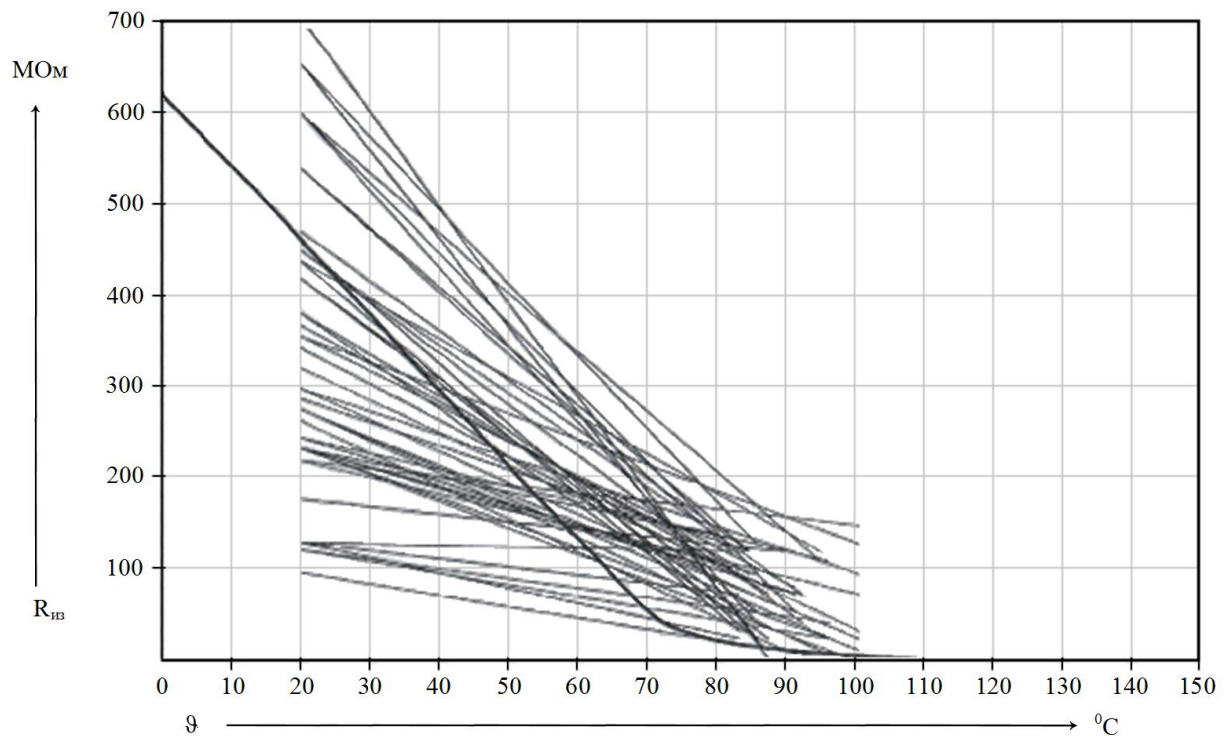


Рисунок 1.38. Зависимости изменения активного сопротивления изоляции ТЭМ НБ-418К6 после заводского ремонта от температуры

## **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО- КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

### **2.1. Методика проведения исследования**

Безотказность ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях (СПКУ) железных дорог Сибири существенно ниже среднесетевой [22]. В связи с этим нами проведено исследование влияния природно-климатических и эксплуатационных факторов на безотказность ТЭМ. На первом этапе работы проанализированы результаты исследований безотказности ТЭМ электровозов учеными научно-исследовательских организаций и вузов железнодорожного транспорта – ВЭлНИИ, ВНИИЖТа, МГУПСа (МИИТ), РГУПСа, ОмГУПСа, ИрГУПСа и других вузах страны [23, 24, 25, 26]. В течение продолжительного времени на ремонтных заводах, проводящих ремонт электровозов, эксплуатируемых в СПКУ, службах локомотивного хозяйства, депо, эксплуатирующих ЭПС на участках и направлениях с СПКУ, проводился сбор статистических данных о безотказности, условиях работы, технологии эксплуатации и ремонта ТЭМ. Одновременно на участках и направлениях с СПКУ выполнялись опытные поездки при ведении электровозами поездов разной массы в зимний и летний периоды эксплуатации с фиксацией основных, воздействующих на работу ТЭМ, параметров. Часть данных о режимах и параметрах работы ТЭМ электровозов при эксплуатации на участках и направлениях с СПКУ получена с использованием программного обеспечения «КОРТЭС». Обработка статистических данных об отказах ТЭМ и результатов опытных поездок проводилась с использованием методов математической статистики. В ПТОЛ и депо Иркутск-Сортировочный, Нижнеудинск, Северобайкальск измерялись

сопротивление изоляции мегаомметрами ЭС0202/2-Г, величина увлажнения изоляции ТЭМ измерителем сопротивления, увлажнения и степени старения изоляции МІС-2500, прибором контроля влажности изоляции ПКВ-7 и температура ТЭМ электровозов инфракрасным термометром «Кельвин». Анализировались результаты экспертных оценок ведущих специалистов ремонтных заводов, депо, а также машинистов-инструкторов и машинистов. Для получения данных о времени нахождения ЭПС в рабочем и нерабочем состояниях использована программа автоматизированной системы управления локомотивами АСУТ-Т. При установлении связи между показателями безотказности ТЭМ, изоляции якорных, остовных обмоток и метеорологическими факторами эксплуатации использованы данные о среднемесячных значениях температуры, относительной и абсолютной влажности воздуха, а также глубине промерзания грунта, определяющей величину вертикальных вибраций ТЭМ с опорно-осевым подвешиванием, полученные на метеостанциях участков и направлений с СПКУ.

Зависимости параметров потоков отказов ТЭМ и изоляции якорных обмоток, главных, дополнительных полюсов и, компенсационных обмоток от абсолютной влажности воздуха приведены на рисунках П4.1 – П4.23 в приложении 4.

## **2.2. Зависимости безотказности ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Северобайкальск, эксплуатируемых на полигоне Лена-Таксимо северного направления Транссиба, от природно-климатических факторов в период с января 2000 по апрель 2001 года**

При анализе зависимостей безотказности тяговых электрических машин  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и изоляции ТЭМ  $\omega_{\text{из}}$  электровозов ВЛ85 депо Северобайкальск от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенных на рисунках 2.1 - 2.2,

можно отметить, что средние значения параметров потоков отказов как ТЭМ, так и изоляции тяговых электрических машин в несколько раз превышают аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в обычных природно-климатических условиях (ОПКУ). Ухудшено состояние изоляционных конструкций, по сравнению с ТЭМ, качественно пропитанными при изготовлении, заводских ремонтах (ЗР) или текущих ремонтах третьего объема (ТР-3). Об этом свидетельствуют значительные разбросы ежемесячных параметров потоков отказов относительно средних линий трендов зависимостей  $\omega_{\text{ТЭМ}}(\vartheta_{\text{в}})$  и  $\omega_{\text{из}}(\vartheta_{\text{в}})$ , а также пониженные корреляционные отношения, между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,496$  и  $R_{\text{из}} = 0,494$ . Снижение качества пропитки изоляционных конструкций ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Северобайкальск при эксплуатации в сложных природно-климатических условиях вызвало ухудшение их механических и электрических характеристик.

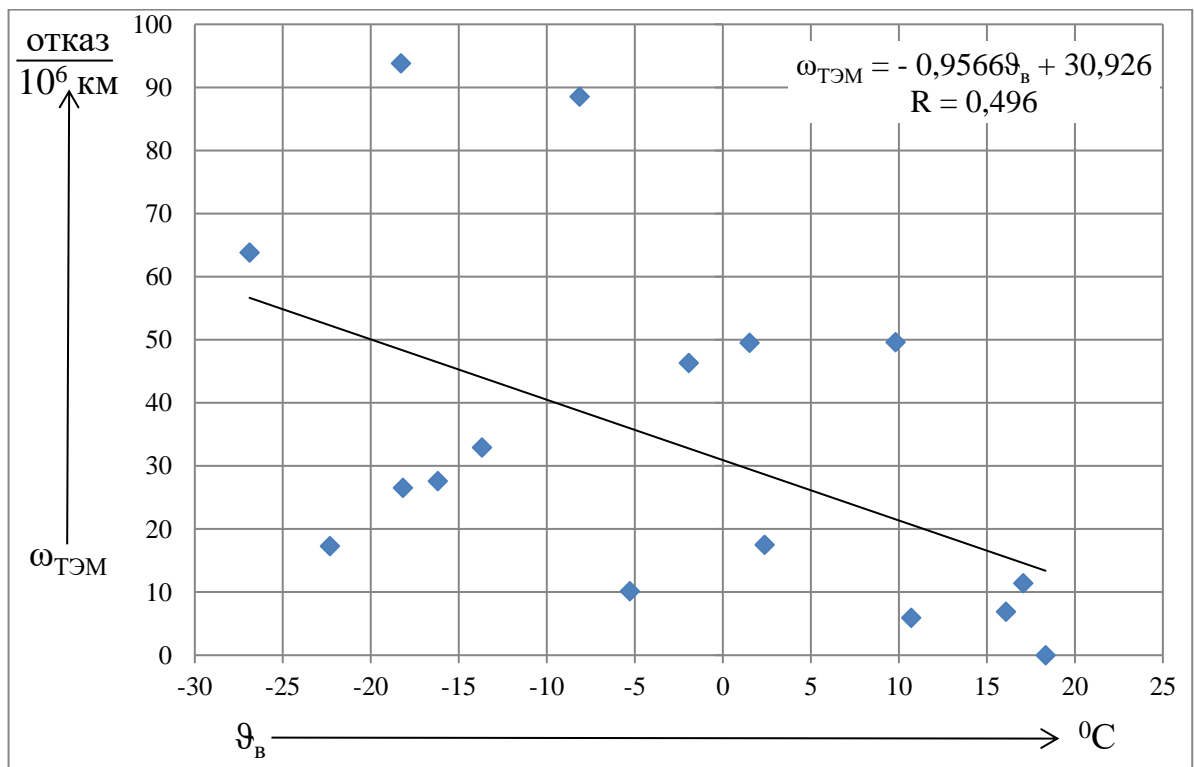


Рисунок 2.1. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность ТЭМ



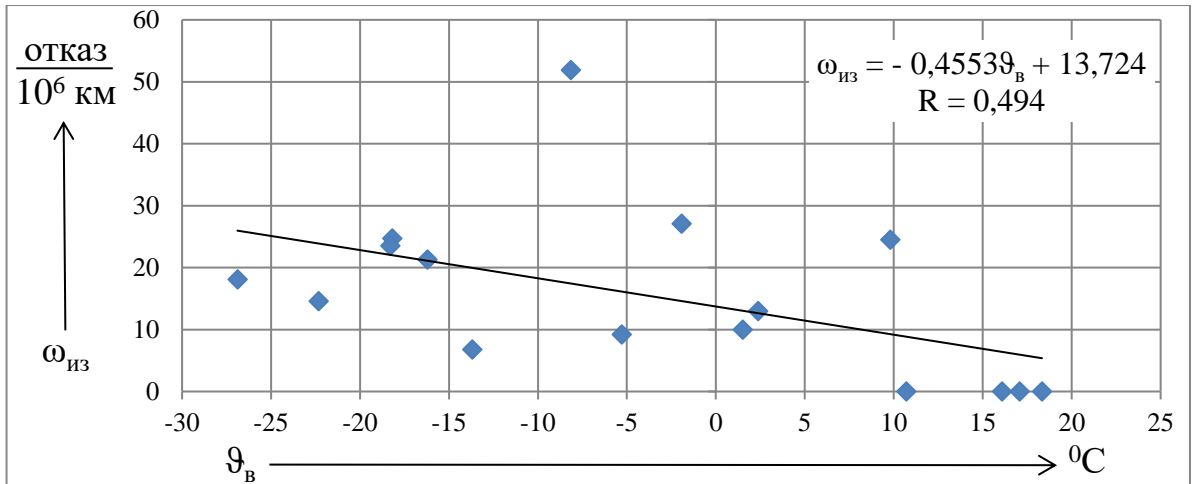


Рисунок 2.2. Характер влияния среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции ТЭМ

Из прямой, описывающей связь показателя безотказности тяговых электрических машин электровозов ВЛ85 депо Северобайкальск и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.3), видно существенное влияние вибраций на безотказность ТЭМ. Параметр потока отказов ТЭМ возростал в 3,1 раза от 17 отказов/ $10^6 \text{ км}$  в летний период эксплуатации до 53 отказов/ $10^6 \text{ км}$  в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ85 имеет максимальное значение. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_B$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,496$  также подтверждает существование связи.

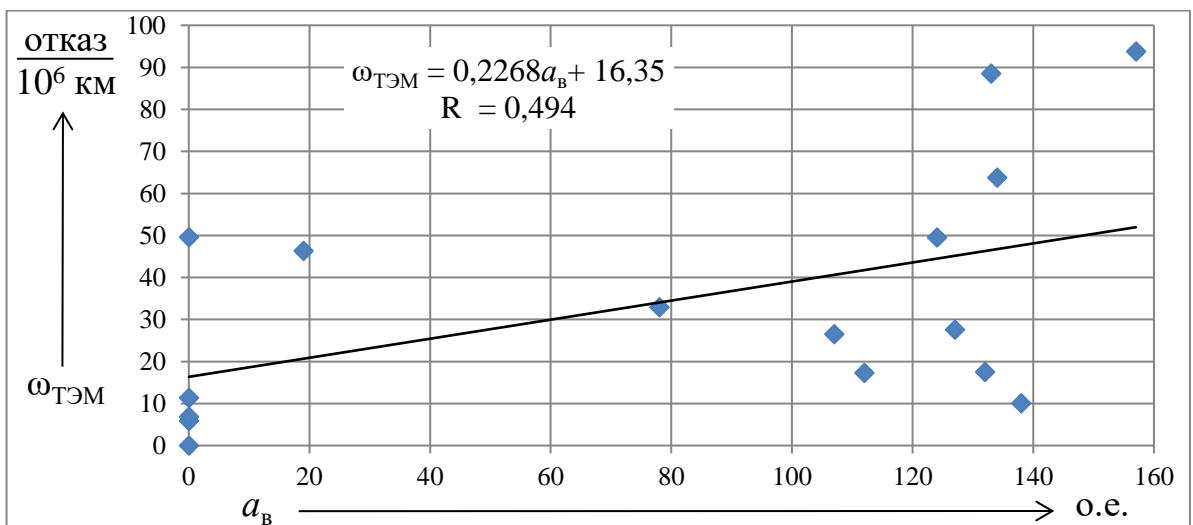


Рисунок 2.3. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от величины вертикальных вибраций от пути

Кривая характеризующая влияние величины вертикальных вибраций на безотказность изоляции ТЭМ  $\omega_{из}(a_v)$  электровозов ВЛ85 депо Северобайкальск, приведенная на рисунке 2.4, показывает, что изоляционные конструкции являются узлом ТЭМ, на который в наибольшей степени воздействуют вибрации от пути [27]. В летний период, когда вибрации минимальны,  $\omega_{из}(a_v)$  составляло 6,5 отказов/ $10^6$  км, при наибольшем же промерзании грунта он увеличивается более чем в три с половиной раза и повышается до 22 отказов/ $10^6$  км. Разброс ежемесячных параметров потоков отказов относительно средней линии тренда кривой  $\omega_{из}(a_v)$ , а также корреляционное отношение между среднемесячными  $\omega_{из}(a_v)$   $R_{из} = 0,462$ , указывает на существенное влияние вибраций на износ изоляционных конструкций ТЭМ и других эксплуатационных факторов.

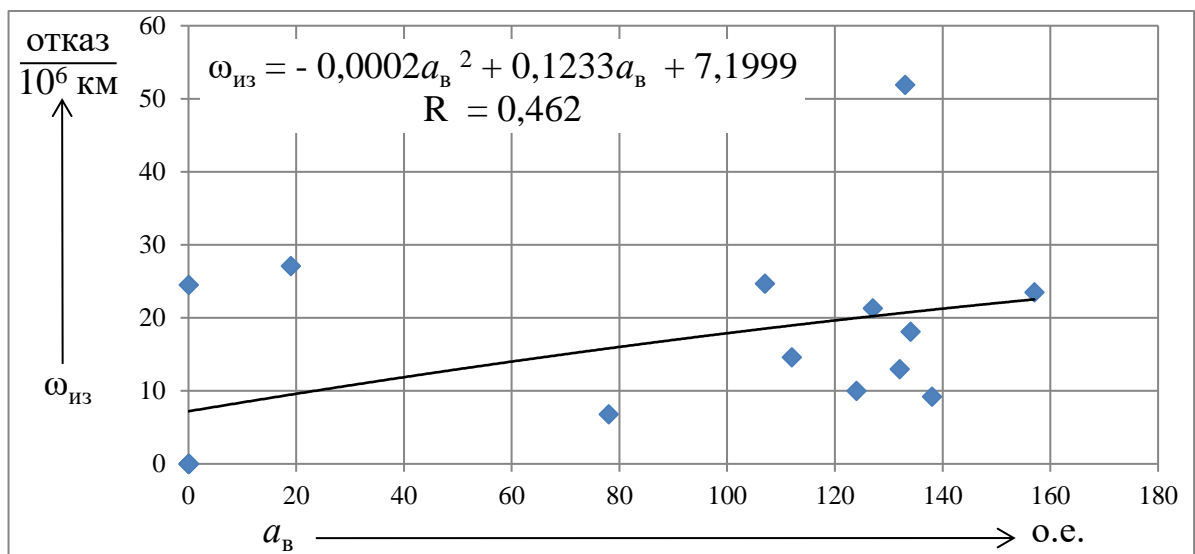


Рисунок 2.4. Влияние величины вертикальных вибраций от пути на безотказность изоляции ТЭМ

Анализ влияния природно-климатических факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка, эксплуатируемых на полигоне Тайшет-Лена северного направления Транссиба и корреляционные связи между ними приведены в приложении 5.

### 2.3. Влияние природно-климатических факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Северобайкальск, эксплуатируемых на полигоне Лена-Таксимо северного направления Транссиба, в период с января 2000 года по декабрь 2002 года

При анализе зависимостей безотказности тяговых электрических машин  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и изоляции ТЭМ  $\omega_{\text{из}}$  электровозов ВЛ80Р депо Северобайкальск от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенных на рисунках 2.5 - 2.6, можно отметить, что средние значения параметров потоков отказов как ТЭМ, так и изоляции ТЭМ в несколько раз превышают аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. По сравнению с безотказностью ТЭМ электровозов ВЛ85 этого же депо, рассмотренной выше, состояние изоляционных конструкций ТЭМ НБ-418К6 еще более ухудшено. Снижение качества пропитки изоляционных конструкций ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Северобайкальск при эксплуатации в сложных природно-климатических условиях вызвало ухудшение их механических и электрических характеристик [28].

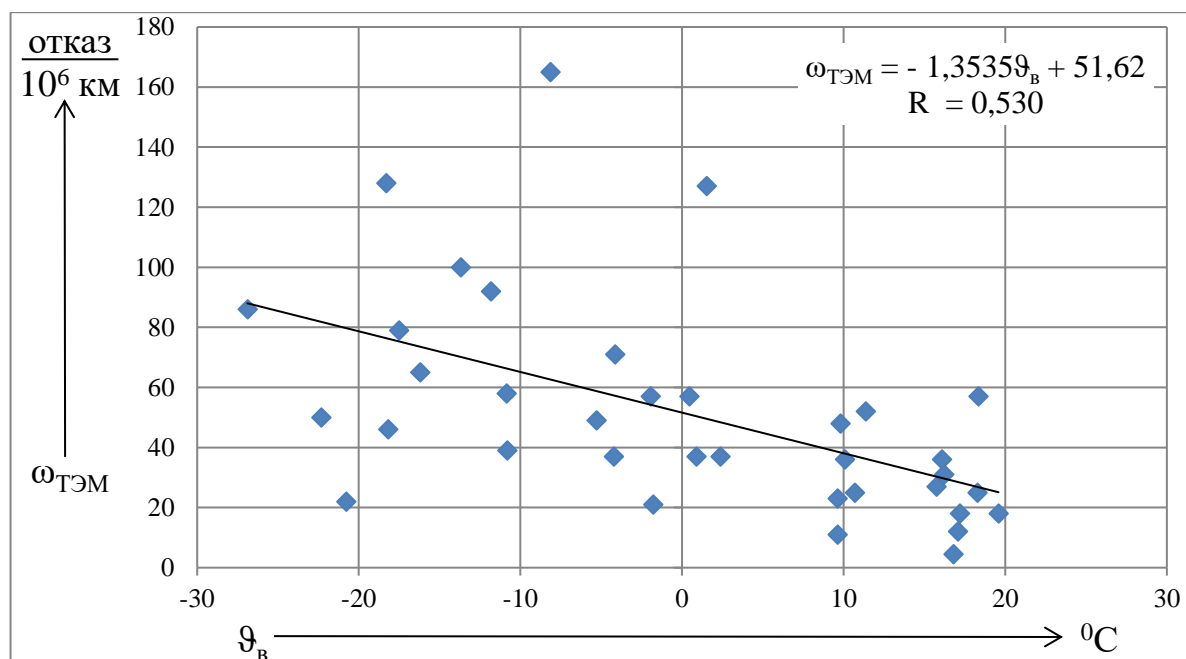


Рисунок 2.5. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

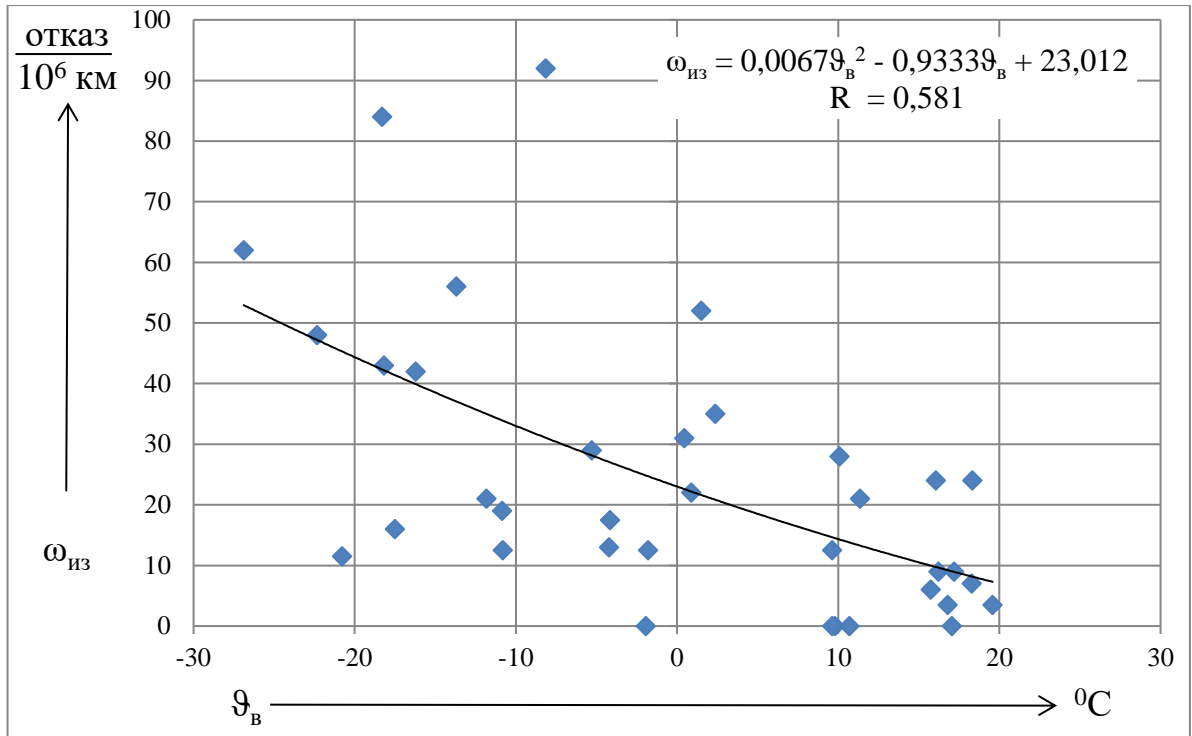


Рисунок 2.6. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции ТЭМ

Из зависимости, описывающей связь показателя безотказности тяговых электрических машин электровозов ВЛ80Р депо Северобайкальск и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.7), видно существенное влияние вибраций на безотказность ТЭМ. В сравнение с электровозами ВЛ85 этого же депо большая часть электровозов ВЛ80Р были задействованы в пассажирском движении, что привело к их эксплуатации с большей скоростью движения и, соответственно, при более высоком уровне вертикальных вибраций. В связи с этим параметр потока отказов тяговых электрических машин электровозов ВЛ80Р возрастал в 3,45 раза от 31 отказа/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 107 отказов/ $10^6$  км в зимний. Корреляционное отношение между  $\omega_{ТЭМ}$  и  $a_{в}$ , равное  $R_{ТЭМ} = 0,686$  также подтверждает существование более тесной связи в сравнении с электровозами ВЛ85.

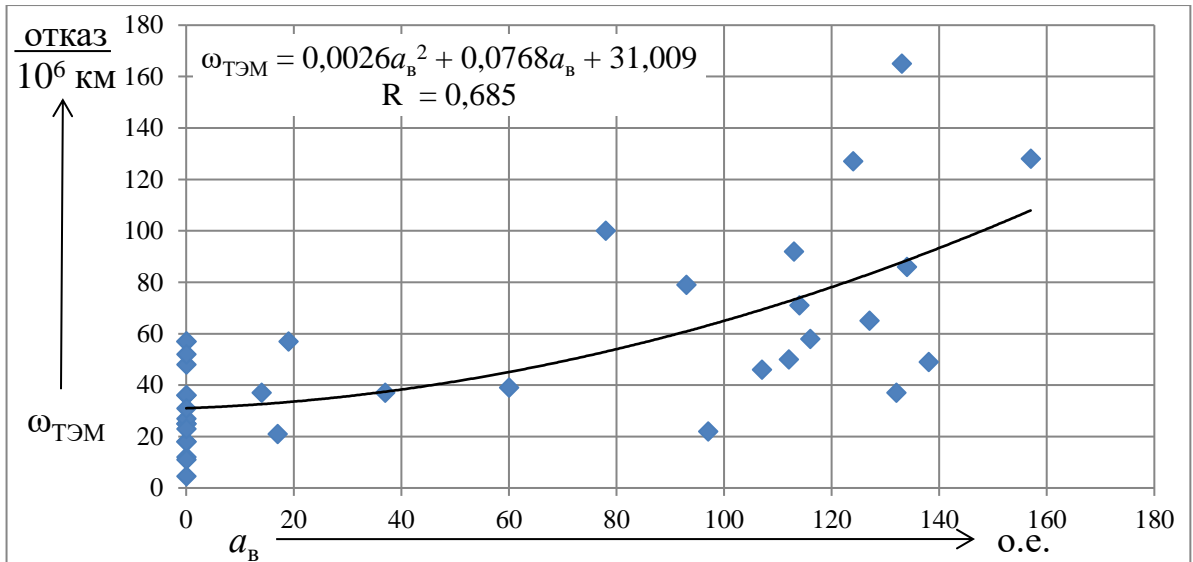


Рисунок 2.7. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от величины вертикальных вибраций ТЭМ от пути

Кривая  $\omega_{\text{из}}(a_B)$ , приведенная на рисунке 2.8, показывает, что изоляционные конструкции являются основным узлом ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Северобайкальск, на который в наибольшей степени воздействуют вертикальные вибрации от пути. В летний период показатель безотказности изоляции составлял 11,9 отказов/10<sup>6</sup> км, при наибольшем же промерзании грунта он увеличивался более чем в шесть раз, и повышался до 72,5 отказов/10<sup>6</sup> км. Тесная связь между  $\omega_{\text{из}}(a_B)$  подтверждается повышенным корреляционным отношением  $R_{\text{из}} = 0,756$ .

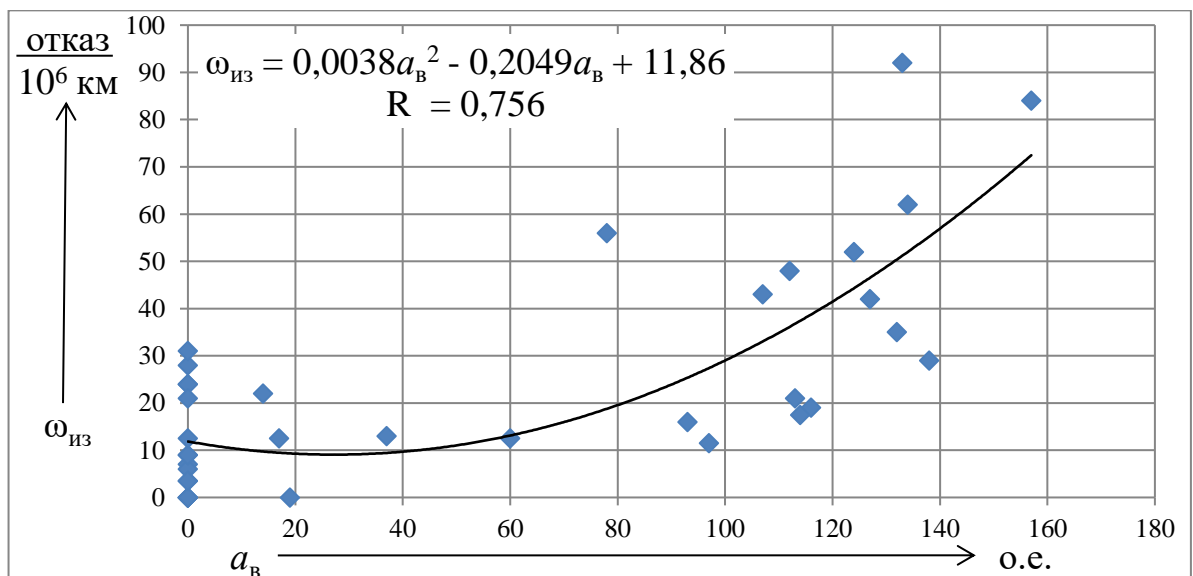


Рисунок.2.8. Влияние величины вертикальных вибраций ТЭМ от пути на безотказность их изоляции

**2.4. Влияние эксплуатационных и природно-климатических факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка, эксплуатируемых на полигоне Тайшет-Таксимо северного направления Транссиба, в период с января 2004 года по апрель 2006 года**

При анализе прямой безотказности ТЭМ  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенных на рисунке 2.9, можно отметить, что средние значения параметров потоков отказов ТЭМ в несколько раз превышают аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Наклон зависимости  $\omega_{\text{ТЭМ}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на ухудшение состояния изоляционных конструкций ТЭМ. Об этом свидетельствуют разброс ежемесячных параметров потоков отказов относительно средней линии тренда зависимостей  $\omega_{\text{ТЭМ}}(\vartheta_{\text{в}})$  [29, 30], а также корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,141$ . Отмечено, что на отказы изоляции приходится 83 % повреждений ТЭМ. В сравнении с электровозами ВЛ80Р и ВЛ85 этого же депо за период с января 2000 по декабрь 2002 года безотказность ТЭМ повышена. Это обусловлено уменьшением токовой нагрузки ТЭМ электровозов ВЛ80ТК в связи с вводом Северо-Муйского тоннеля.

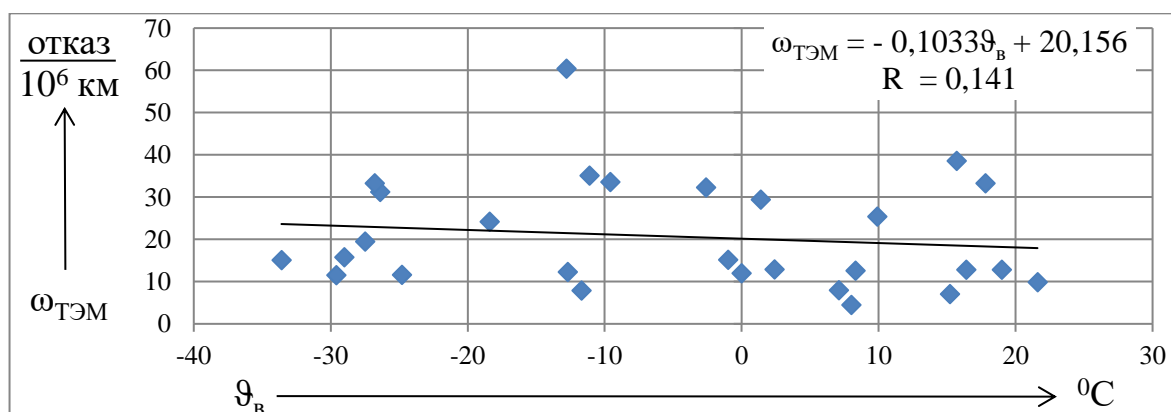


Рисунок 2.9. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

Необходимо отметить, что параметр потока отказов изоляции ТЭМ электровозов ВЛ80ТК (рисунок 2.10) остался на уровне электровозов ВЛ85 (рисунок П.5.7). Характер наклона зависимости  $\omega_{\text{ост}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на ухудшение состояния изоляции обмоток ТЭМ [31, 32]. Около одной пятой ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка эксплуатируются с непропитанными изоляционными конструкциями, [33, 34, 35, 36]. Об этом свидетельствуют пониженное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{из}} = 0,179$ . Снижение качества пропитки изоляции ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка с изменением конструкции тягового машины (открытие лобовых частей якоря и переход на клиновое крепление катушек остова) при выполнении капитальных ремонтов с продлением срока службы электровоза в УЛВРЗ вызвало ухудшение их ЭМХ [37, 38, 39].

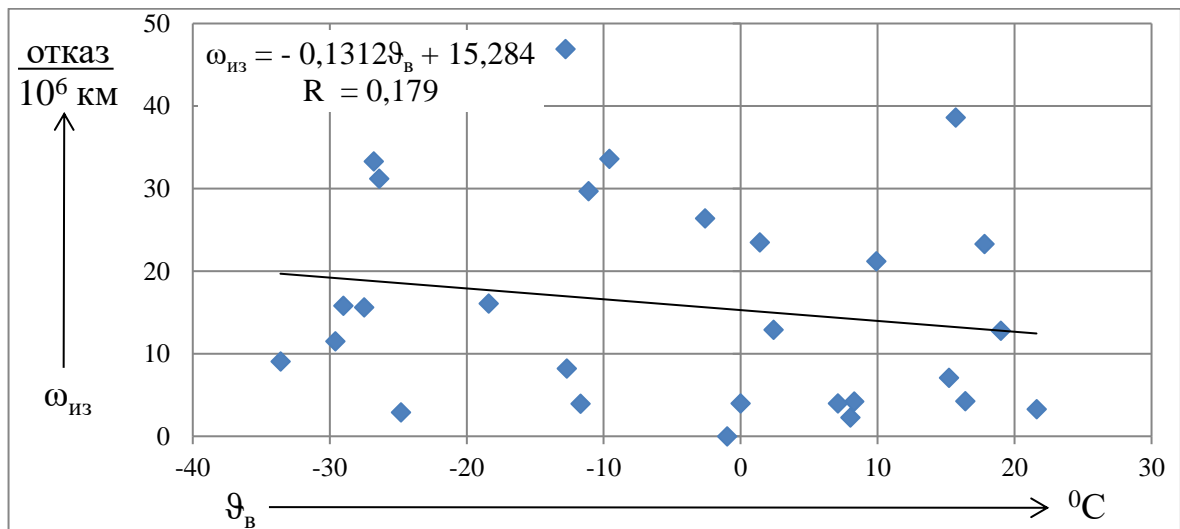


Рисунок 2.10. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции ТЭМ

Анализ влияния природно-климатических факторов на безотказность якорных и остовных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка приведен в приложении 6.

Данные о токовой нагрузке ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80ТК при ведении поезда массой 5700 т [40] по участкам северного направления Транссиба Тайшет-Таксимо, полученные с использованием программного

обеспечения «КОРТЭС», приведены на рисунках 2.11 -2.13. Из рассмотрения гистограмм, приведенных на рисунках, можно отметить, что после ввода наиболее протяженного на направлении Северо-Муйского тоннеля, организации подталкивания на критических подъемах Турма-Торея и Даванском токовая нагрузка ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80ТК существенно понизилась.

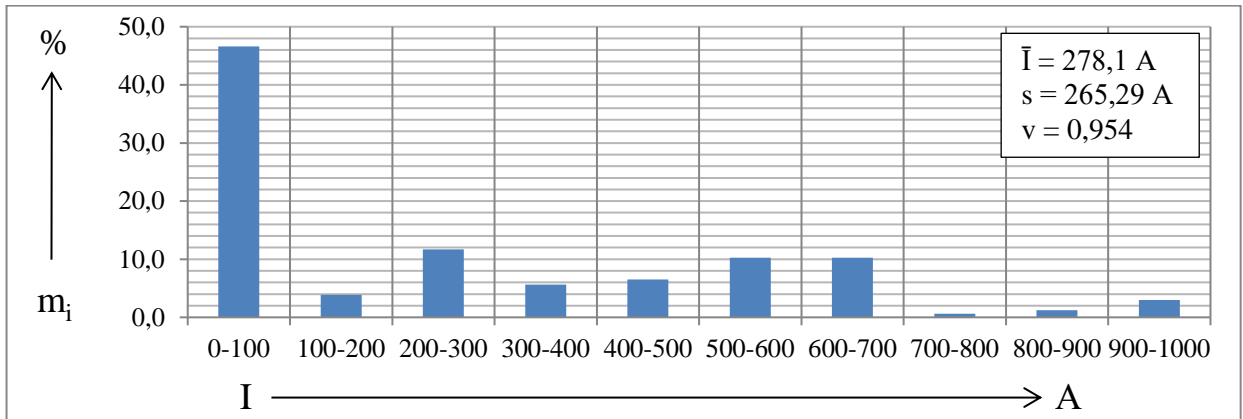


Рисунок 2.11. Токовая нагрузка ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80ТК при ведении поезда массой 5700 т по участку Тайшет - Коршуниха

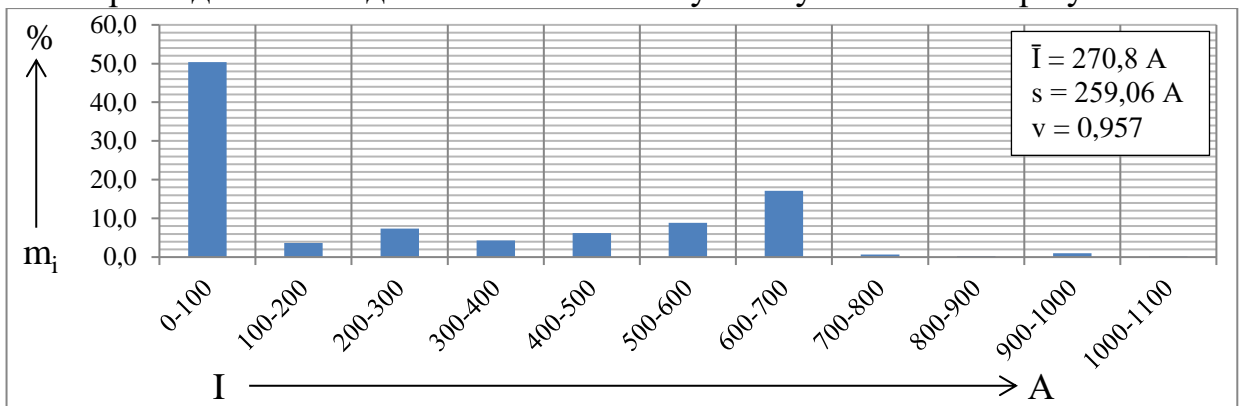


Рисунок 2.12. Токовая нагрузка ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80ТК при ведении поезда массой 5700 т по участку Коршуниха-Северобайкальск

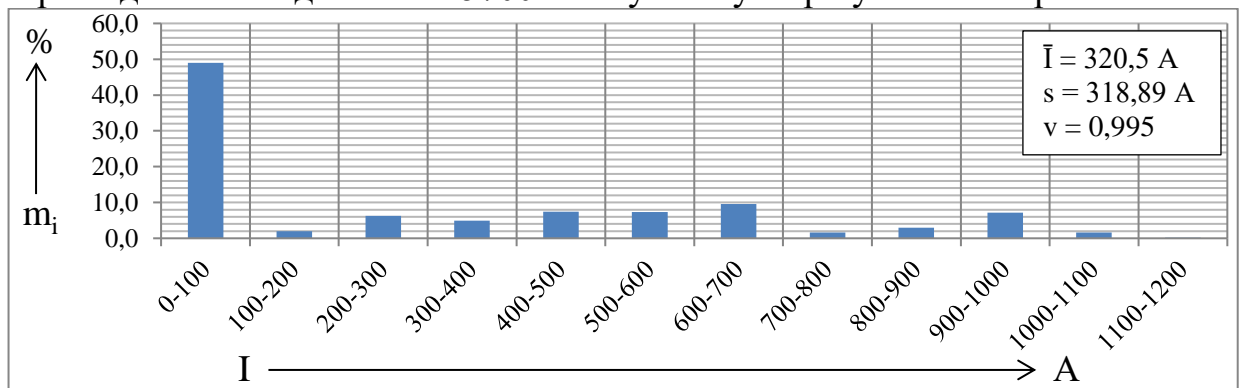


Рисунок 2.13. Токовая нагрузка ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80ТК при ведении поезда массой 5700 т по участку Северобайкальск – Таксимо



На рисунках 2.11-2.13:  $\bar{I}$  – средние значения силы тока;  $s$  – средние квадратические отклонения;  $v$  – коэффициенты вариации тока.

## 2.5. Зависимости безотказности ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск центрального направления Транссиба от природно-климатических и эксплуатационных факторов в период с января 2000 по декабрь 2002 года

При анализе кривой безотказности ТЭМ  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенной на рисунке 2.14, можно отметить ухудшение состояния изоляционных конструкций ТЭМ, по сравнению ТЭМ, качественно пропитанными при изготовлении, заводских ремонтах или текущих ремонтах третьего объема [41]. Об этом свидетельствует пониженное корреляционное отношение между среднемесячным показателем безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,450$ .

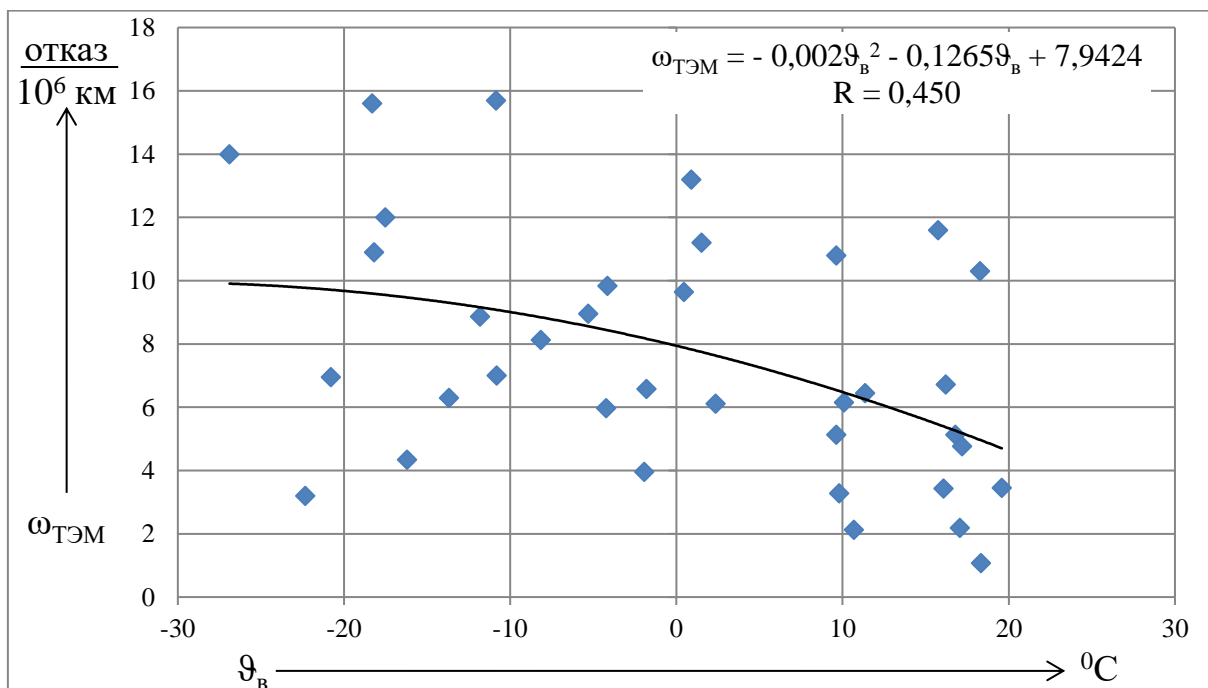


Рисунок 2.14. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

Из рассмотрения прямой безотказности якорных обмоток тяговых электрических машин  $\omega_{\text{я}}$  электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$  приведенной на рисунке 2.15, видно возрастание параметра потока отказов изоляции обмоток при увеличении температуры воздуха. Характер наклона зависимости  $\omega_{\text{я}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на резко ухудшенное состояние изоляции обмоток якорей. Более половины ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск эксплуатировались с непропитанной изоляцией якорных обмоток. Об этом же свидетельствуют значительный разброс ежемесячных параметров потока отказов относительно средней линии тренда зависимостей  $\omega_{\text{я}}(\vartheta_{\text{в}})$ , а также пониженное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{я}} = 0,167$ . Резкое понижение качества пропитки изоляции якорных обмоток ТЭМ электровозов вызвало ухудшение их ЭМХ [42].

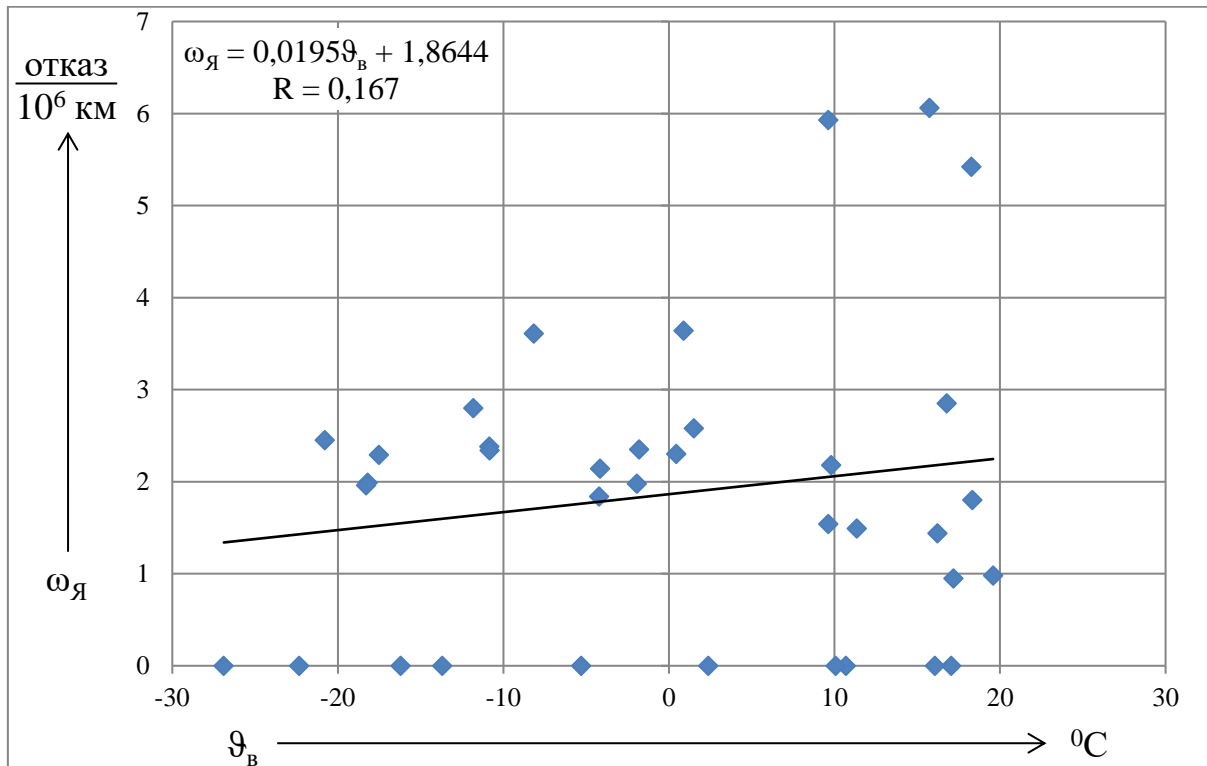


Рисунок 2.15. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции якорных обмоток

При анализе зависимости безотказности остовных обмоток тяговых электрических машин  $\omega_{\text{ост}}$  электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск, приведенной на рисунке 2.16, необходимо отметить, что характер наклона зависимости  $\omega_{\text{ост}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на пропитку изоляции остовных обмоток. В тоже время разбросы ежемесячных параметров потока отказов относительно средней линии тренда зависимости  $\omega_{\text{ост}}(\vartheta_{\text{в}})$ , а также несколько пониженное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{я}} = 0,560$  указывают на ухудшение качества пропитки изоляции остовных обмоток.

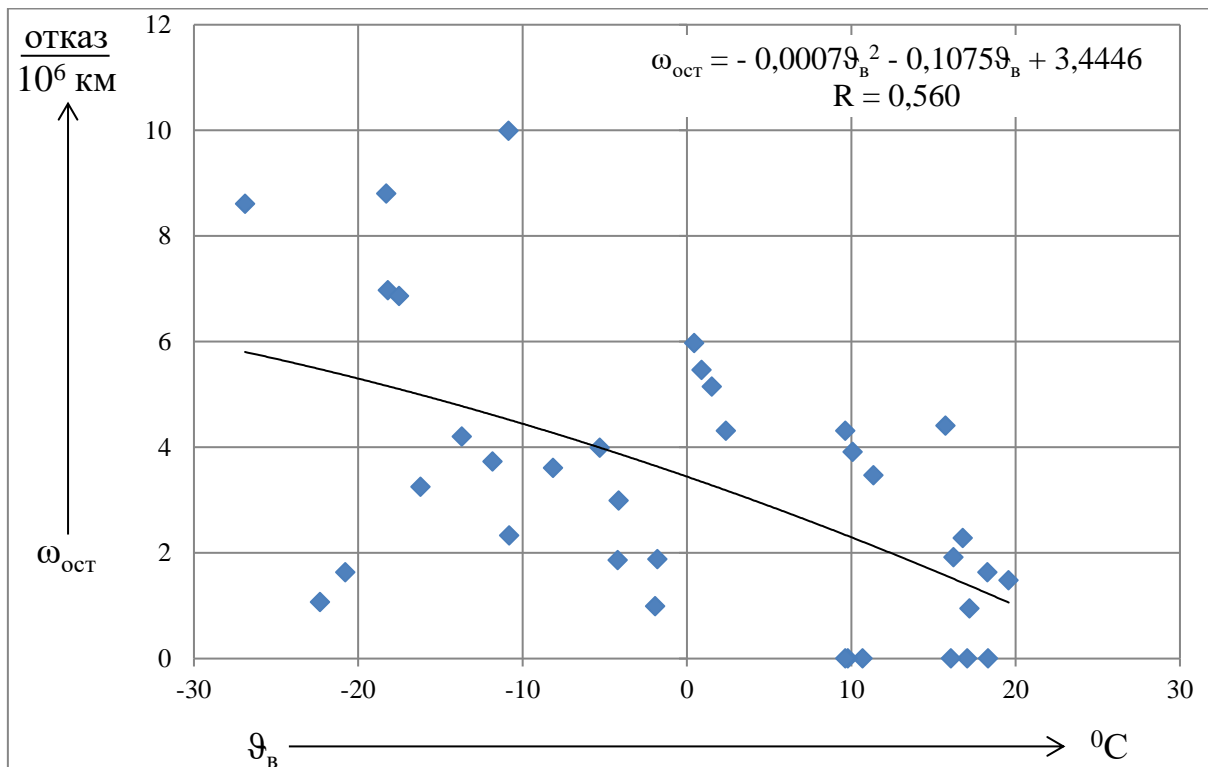


Рисунок 2.16. Характер изменения параметра потока отказов остовных обмоток ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

Из рассмотрения прямой безотказности изоляции ТЭМ  $\omega_{\text{из}}$  электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$  приведенной на рисунке 2.17, необходимо отметить, что состояние изоляционных конструкций ТЭМ ухудшено, по сравнению с тяговыми электрическими машинами, качественно пропитанными при изготовлении, заводских ремонтах или текущих ремонтах третьего объема. Характер наклона

зависимости  $\omega_{из}(\vartheta_B)$  указывает на ухудшение состояния изоляции обмоток ТЭМ. Об этом свидетельствует уменьшенное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности изоляции и температурой воздуха  $R_{из} = 0,348$ .

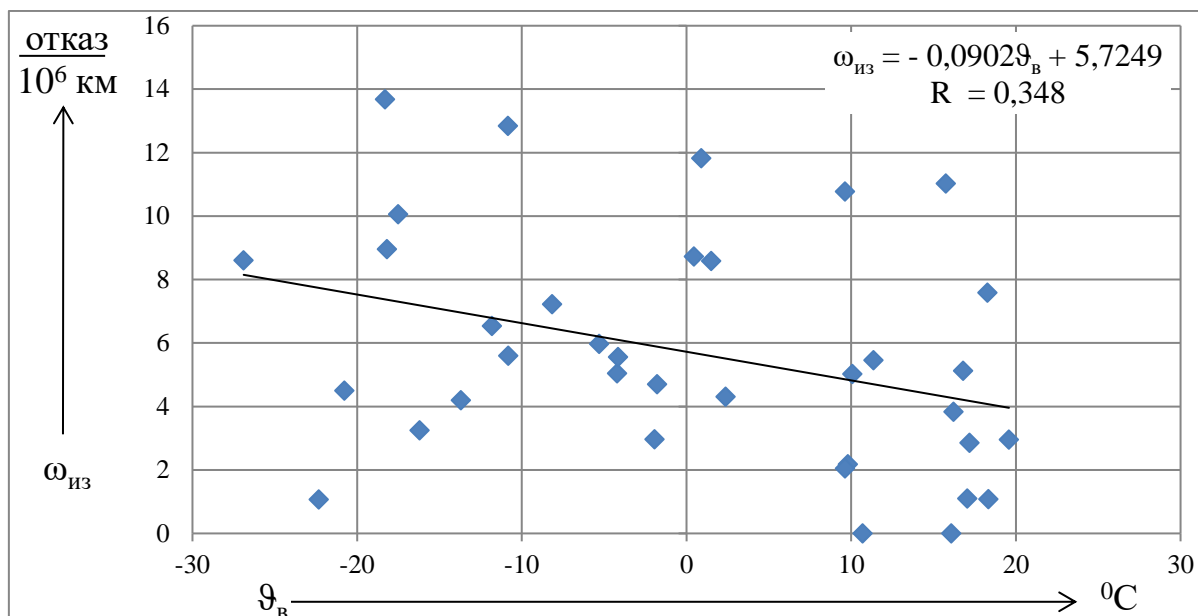


Рисунок 2.17. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции ТЭМ

Из зависимости, описывающей связь показателя безотказности тяговых электрических машин электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.18), видно существенное влияние вибраций на безотказность ТЭМ. Параметр потока отказов тяговых электрических машин возрастал в 2,0 раза от 6 отказов/10<sup>6</sup> км в летний период эксплуатации до 12 отказов/10<sup>6</sup> км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск, имеет максимальное значение. Корреляционное отношение между  $\omega_{ТЭМ}$  и  $a_B$ , равное  $R_{ТЭМ} = 0,478$ , также подтверждает существование тесной связи.

При рассмотрении прямой, описывающей связь показателя безотказности изоляции якорных обмоток тяговых электрических машин электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.19), видно, что с увеличением вибраций безотказность

изоляции якорных обмоток ТЭМ повышалась. Параметр потока отказов ТЭМ уменьшался в 1,64 раза от 2,16 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 1,32 отказов/ $10^6$  км в зимний период. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{в}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,194$  также подтверждает ослабление связи.

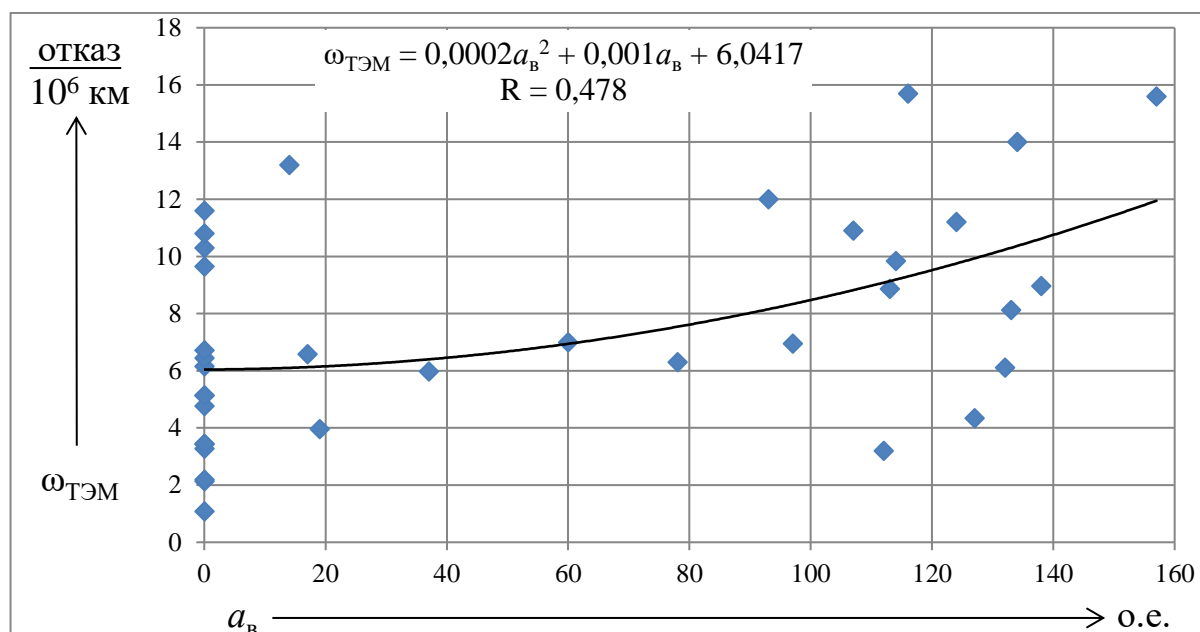


Рисунок 2.18. Характер изменения параметра потока отказов тяговых электрических машин из-за величины вертикальных вибраций от пути

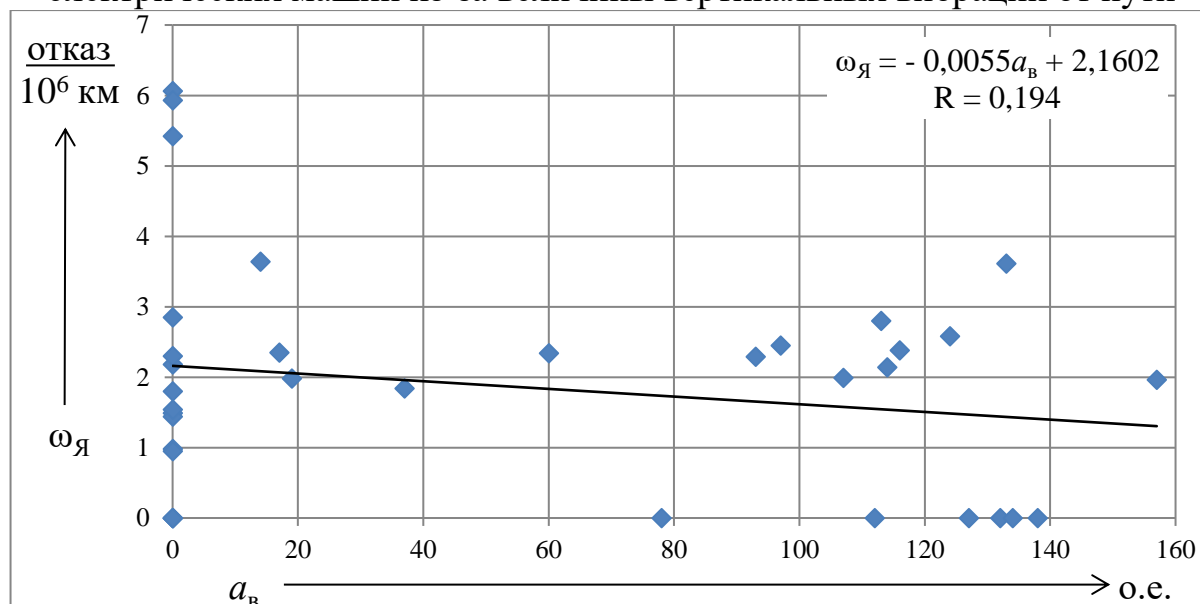


Рисунок 2.19. Влияние величины вертикальных вибраций от пути на безотказность изоляции якорных обмоток

Из кривой, описывающей связь показателя безотказности изоляции остовных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.20), видно существенное влияние

вибраций на безотказность изоляции остовных обмоток ТЭМ. Параметр потока отказов обмоток остова ТЭМ возростал в 3,42 раза от 1,99 отказа/10<sup>6</sup> км в летний период эксплуатации до 6,8 отказов/10<sup>6</sup> км в зимний. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{В}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,587$ , также подтверждает существование тесной связи.

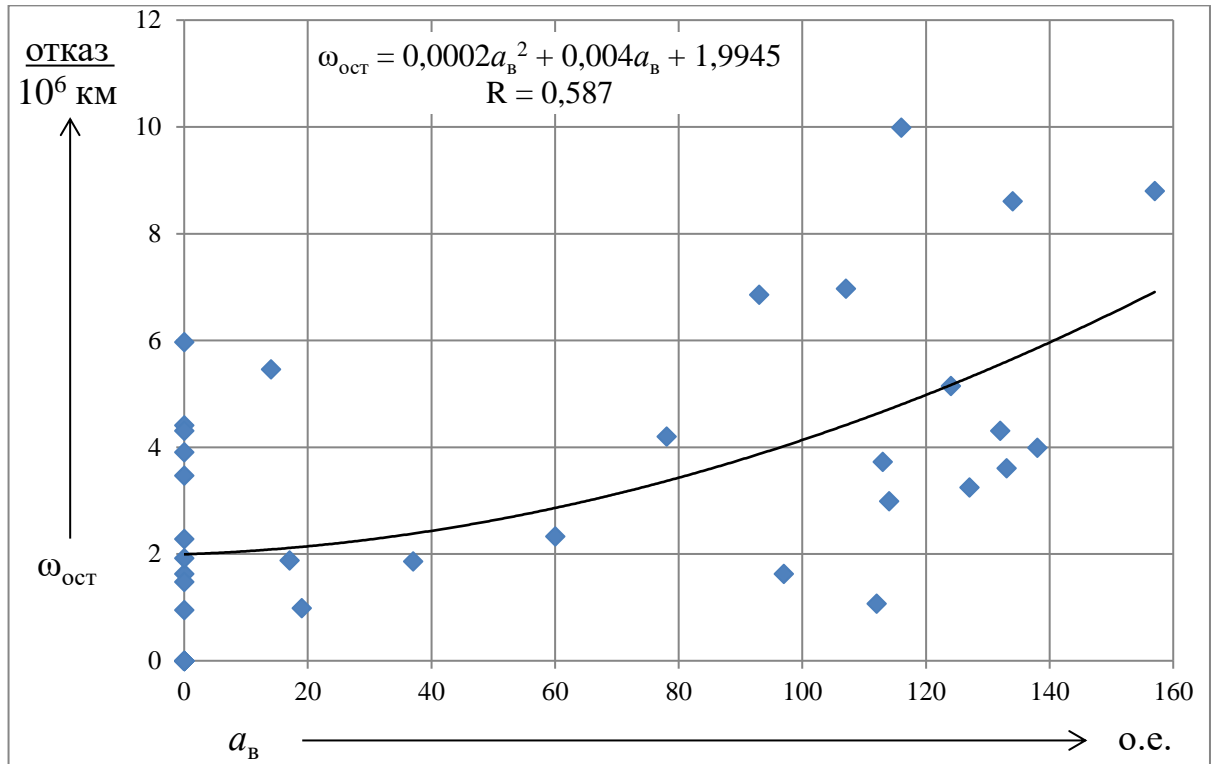


Рисунок 2.20. Зависимость параметра потока отказов изоляции остовных обмоток из-за величины вертикальных вибраций от пути

При рассмотрении кривой, описывающей связь показателя безотказности изоляции ТЭМ ВЛ85 депо Нижнеудинск и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.21), видно существенное влияние вибраций на безотказность изоляции ТЭМ. Параметр потока отказов изоляции тяговых электрических машин возростал в 1,99 раза от 4,68 отказа/10<sup>6</sup> км в летний период эксплуатации до 9,3 отказов/10<sup>6</sup> км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск, имеет максимальное значение. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{В}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,371$  подтверждает существование связи.

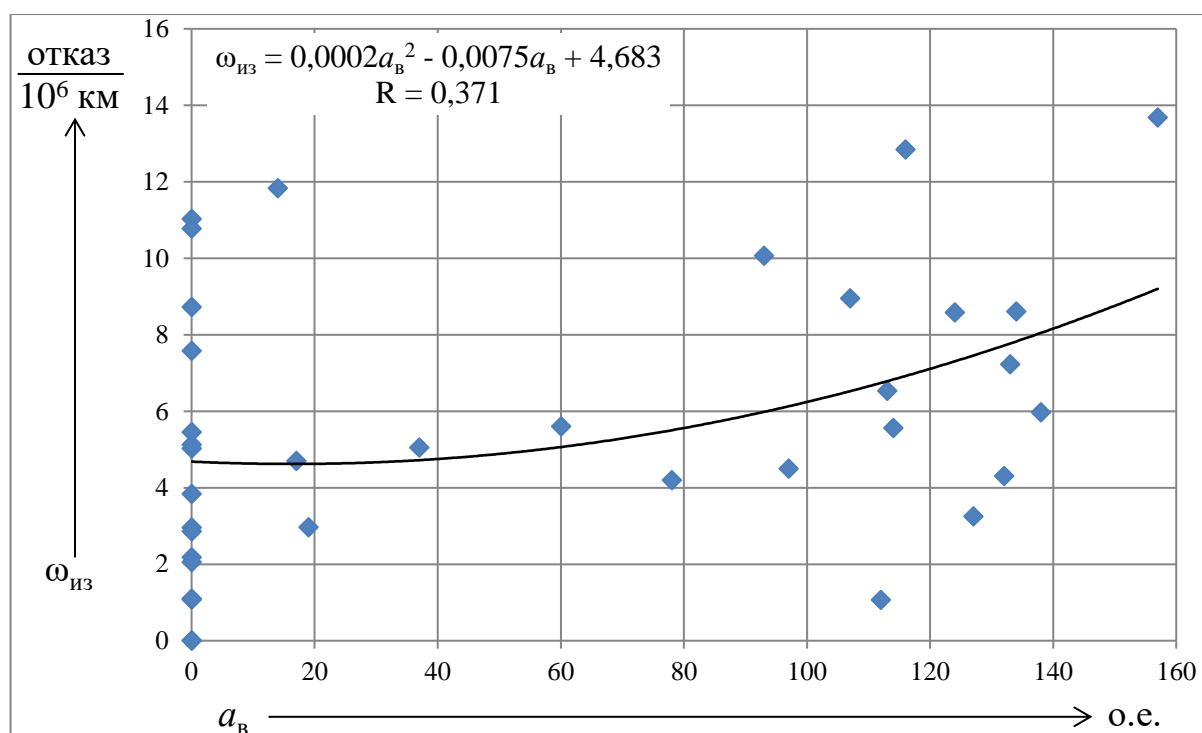


Рисунок 2.21. Характер изменения параметра потока отказов изоляции из-за вертикальных вибраций от пути

Данные о токовой нагрузке ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участкам центрального направления Транссиба Тайшет-Карымская, полученные с использованием программного обеспечения «КОРТЭС», приведены на рисунках 2.22 - 2.26. Из рассмотрения гистограмм, приведенных на рисунках, можно отметить, что токовая нагрузка не превышает номинальную.

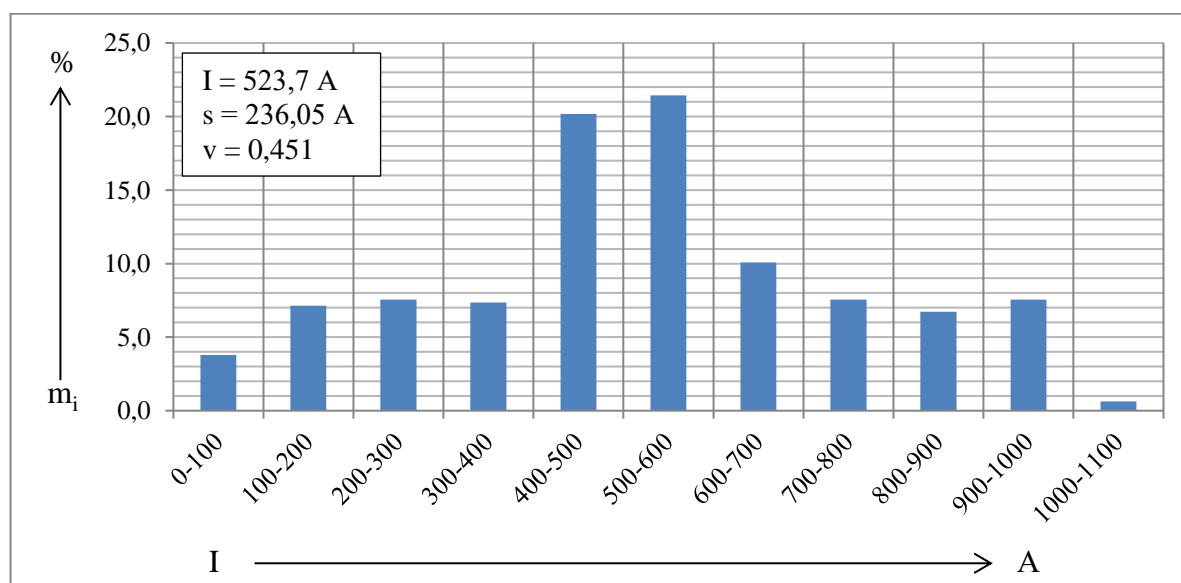


Рисунок 2.22. Токовая нагрузка ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участку Тайшет-Зима

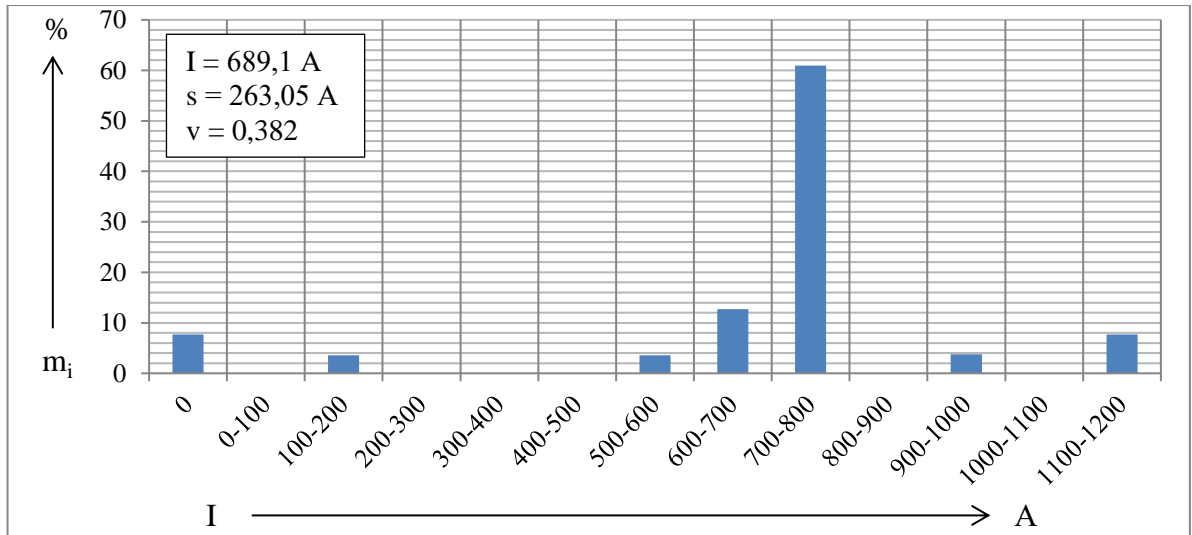


Рисунок 2.23. Токовая нагрузка ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по перегону Горхон-Кижя

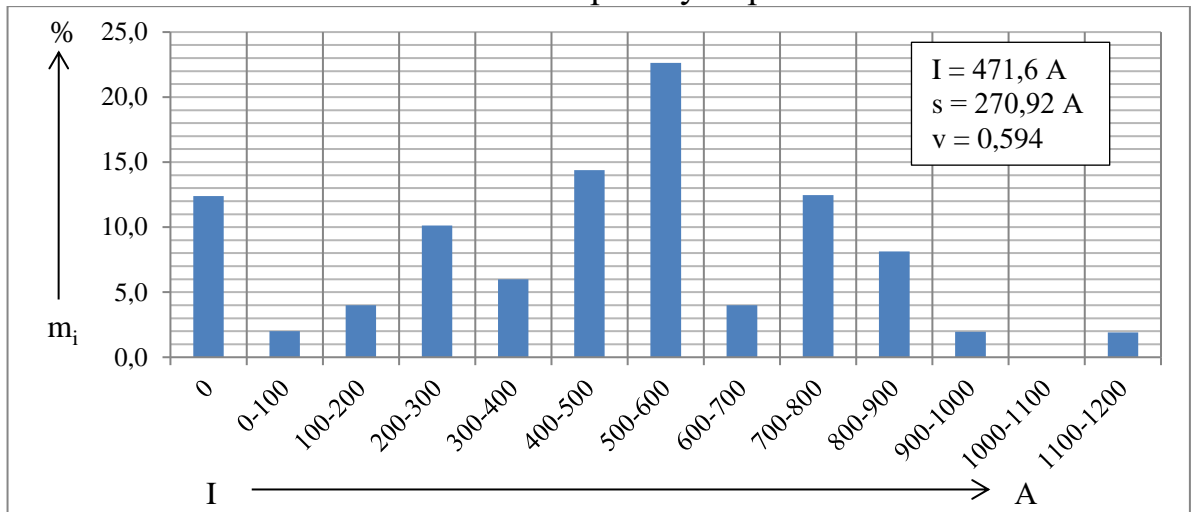


Рисунок 2.24. Токовая нагрузка ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участку Сохондо-Лесная

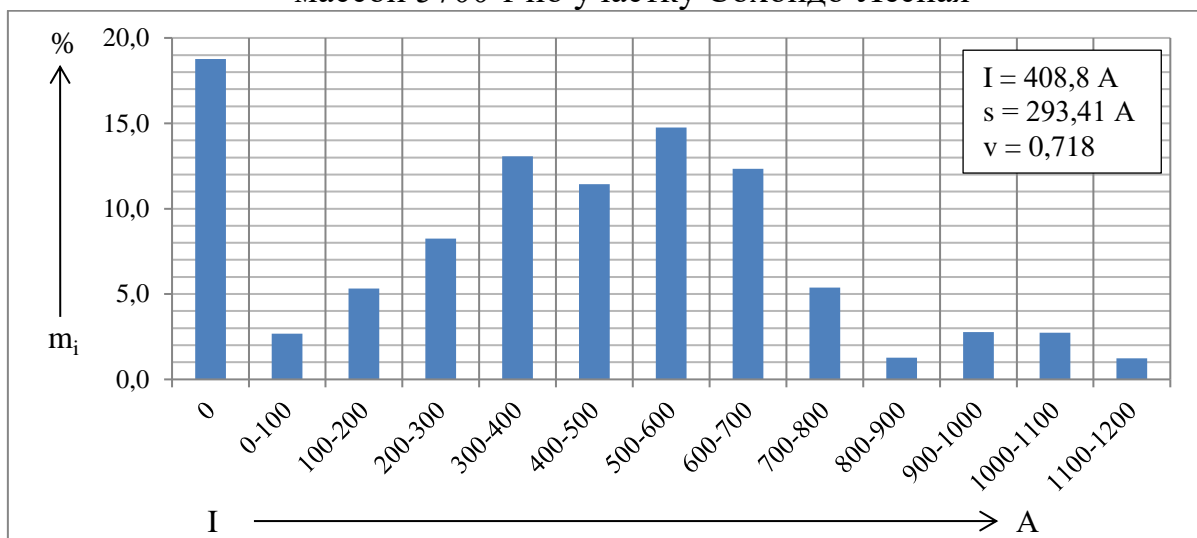


Рисунок 2.25. Токовая нагрузка ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участку Лесная-Чита (с учетом выбега)



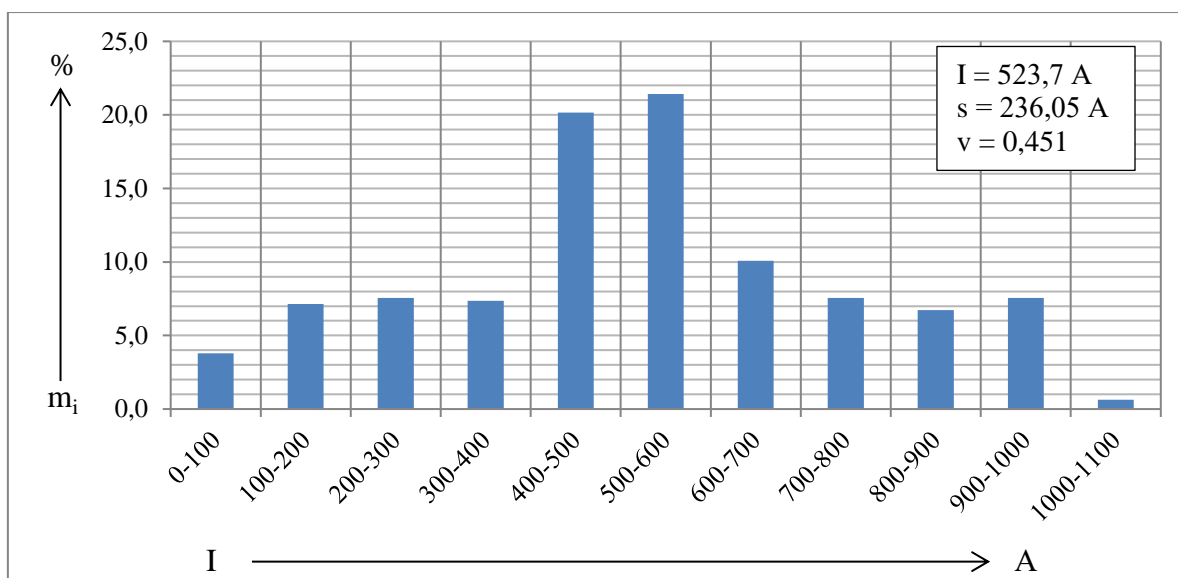


Рисунок 2.26. Токсовая нагрузка ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участку Лесная-Чита (без учета выбега)

## 2.6. Характер влияния эксплуатационных и природно-климатических факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан южного направления Транссиба в период с января 2000 по декабрь 2002 года

При анализе прямой безотказности ТЭМ  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  электровозов ВЛ85 депо Абакан от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенных на рисунке 2.27, можно отметить, что средний параметр потока отказов ТЭМ в несколько раз превышает аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Наклон зависимости  $\omega_{\text{ТЭМ}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на ухудшение состояния изоляционных конструкций ТЭМ. Об этом свидетельствует пониженное значение корреляционного отношения между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,046$ .

При анализе прямой безотказности ТЭМ от температуры окружающей среды  $\vartheta_{\text{в}}$  электровозов ВЛ85 депо Абакан можно отметить, что безотказность ТЭМ этого же типа депо Нижнеудинск несколько выше.

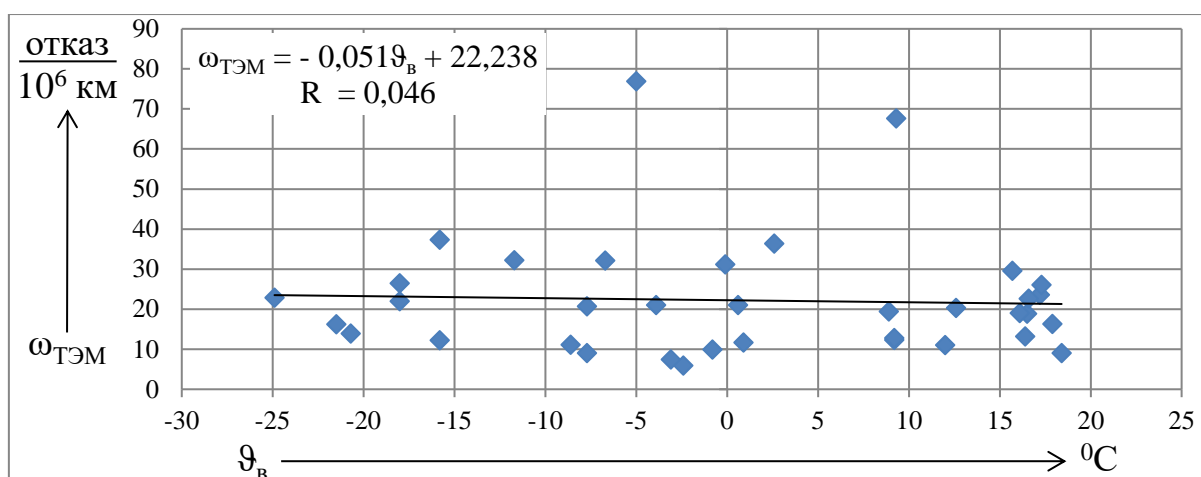


Рисунок 2.27. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

Из рассмотрения зависимости безотказности изоляции ТЭМ  $\omega_{\text{из}}$  электровозов ВЛ85 депо Абакан от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенных на рисунке 2.28, необходимо отметить, что среднее значение параметра потока отказов изоляции ТЭМ в несколько раз превышает аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Характер наклона зависимости  $\omega_{\text{из}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на ухудшенное состояние изоляции как якорных, так и остовных обмоток. Об этом же свидетельствует низкое значение корреляционного отношения между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{из}} = 0,179$ . Понижение качества пропитки изоляционных конструкций ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан вызвало ухудшение их ЭМХ.

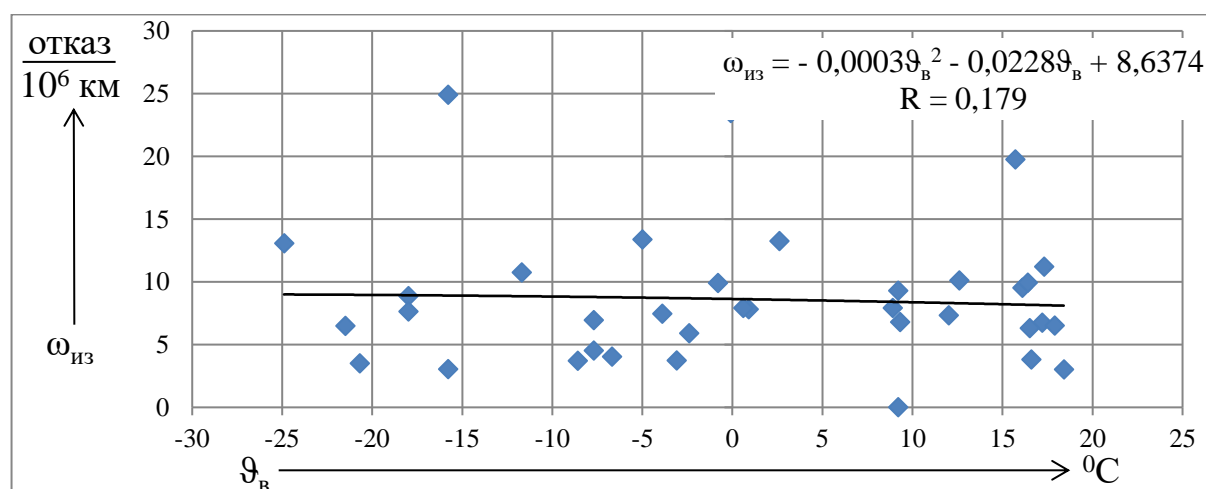


Рисунок 2.28. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции ТЭМ

Анализ влияния природно-климатических факторов на безотказность якорных и остовных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан и корреляционные связи между ними приведены в приложении 7.

Данные о токовой нагрузке ТЭМ и превышении температуры якорных обмоток ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участкам южного направления Транссиба Тайшет-Междуреченск, полученные с использованием программного обеспечения «КОРТЭС», приведены на рисунках 2.29 - 2.33. Из рассмотрения гистограмм, приведенных на рисунках 2.29 – 2.32, можно отметить, что токовая нагрузка не превышает номинальную. Анализ гистограммы, приведенной на рисунке 2.33, показывает, что превышение температуры якорных обмоток ТЭМ электровоза ВЛ85 не больше предельно допустимого значения.

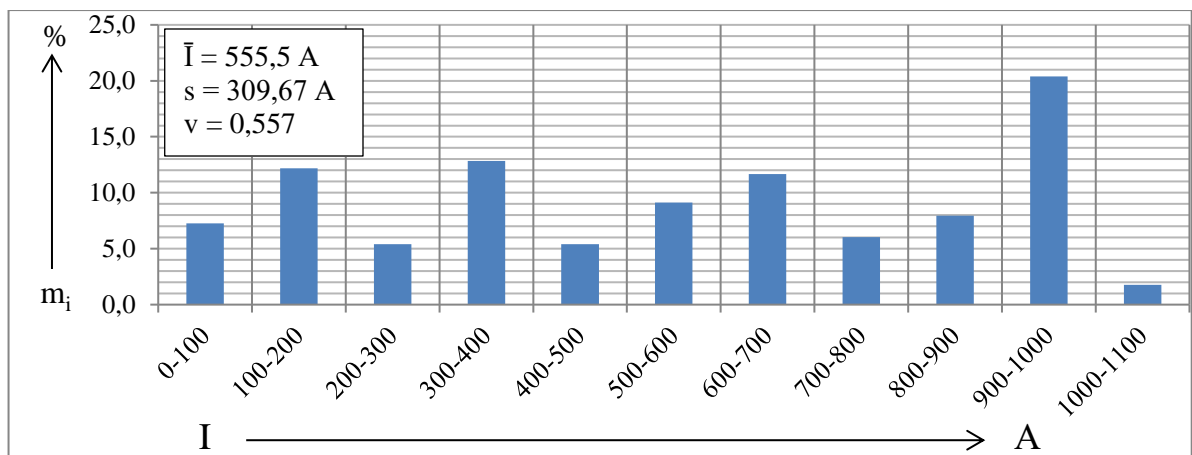


Рисунок 2.29. Токовая нагрузка ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участку Тайшет-Саянская (без учета выбега)

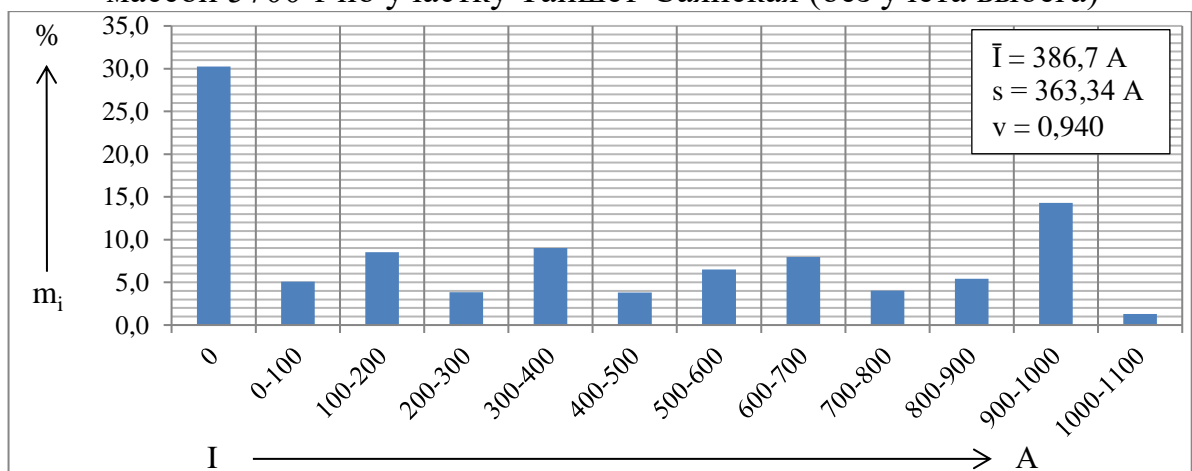


Рисунок 2.30. Токовая нагрузка ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участку Тайшет-Саянская (с учетом выбега)

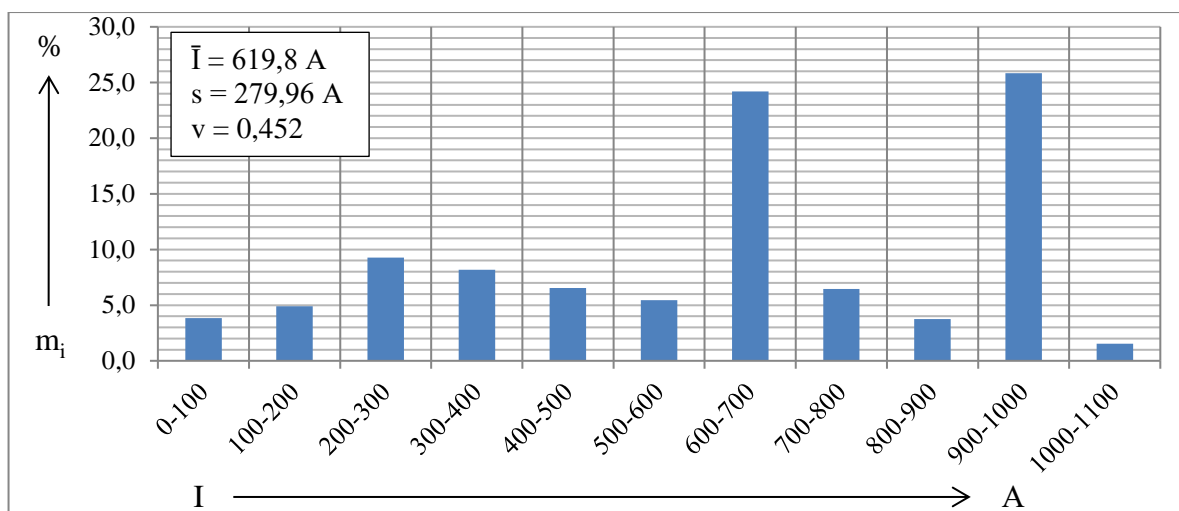


Рисунок 2.31. Токовая нагрузка ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участку Саянская-Кошурниково (без учета выбега)

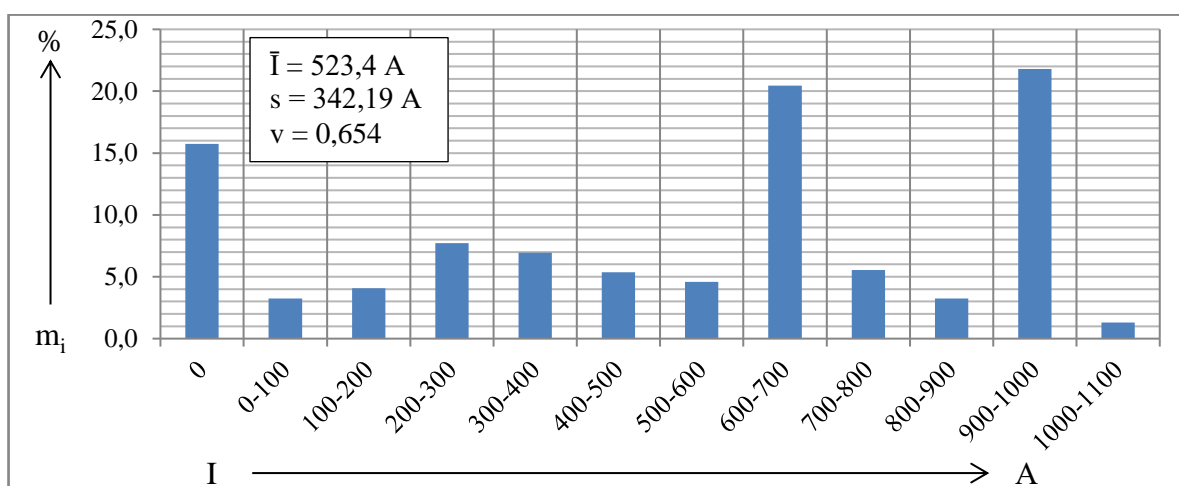


Рисунок 2.32. Токовая нагрузка ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участку Саянская-Кошурниково (с учетом выбега)

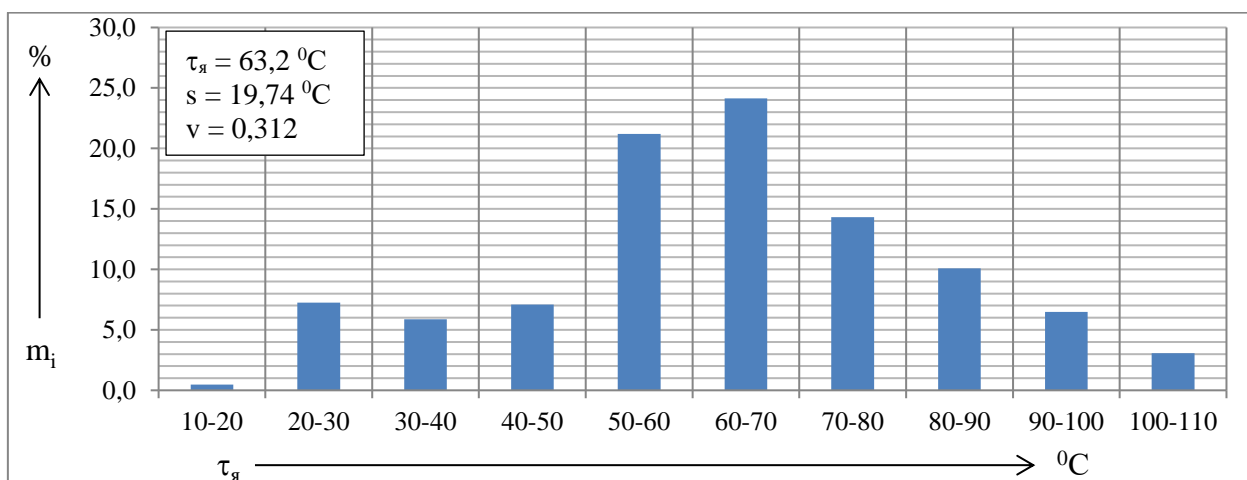


Рисунок 2.33. Превышение температуры якорных обмоток ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поезда массой 5700 т по участку Саянская-Кошурниково

**2.7. Влияние природно-климатических и эксплуатационных факторов на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская центрального направления Транссиба в период с января 2000 по декабрь 2006 года**

При анализе прямой безотказности ТЭМ  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  электровозов ВЛ80Р депо Иланская от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенной на рисунке 2.34, можно отметить, что среднее значение параметра потоков отказов тяговых машин в несколько раз превышает аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Наклон зависимости  $\omega_{\text{ТЭМ}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на ухудшение состояния изоляции ТЭМ. Об этом же свидетельствует корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,139$ .

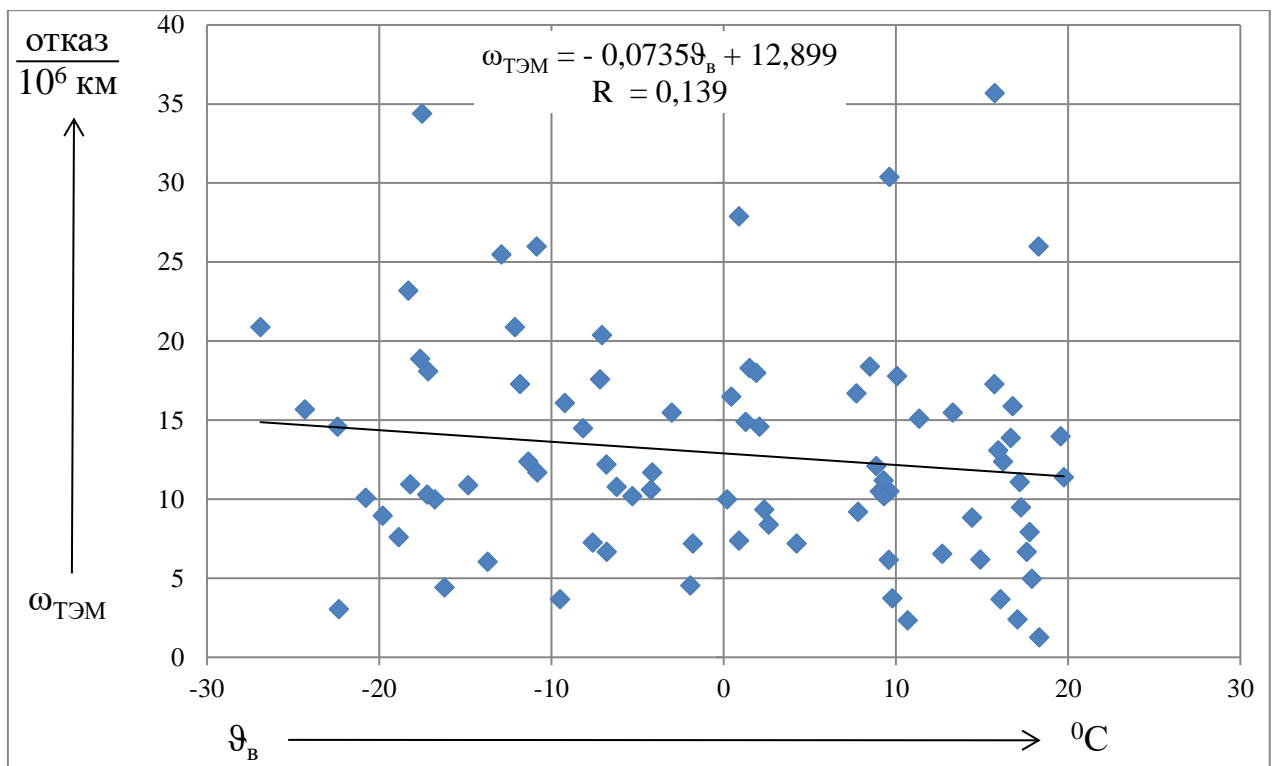


Рисунок 2.34. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

Из рассмотрения кривой безотказности якорных обмоток ТЭМ  $\omega_{я}$  электровозов ВЛ80Р депо Иланская от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{в}$ , приведенной на рисунке 2.35, видно возрастание параметра потока отказов изоляции обмоток при увеличении температуры воздуха. Характер наклона зависимости  $\omega_{я}(\vartheta_{в})$  указывает на резко ухудшенное состояние изоляции обмоток якорей. Более 90 % ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская эксплуатировались с некачественно пропитанной изоляцией якорных обмоток. Об этом же свидетельствуют значительный разброс ежемесячных параметров потока отказов относительно средней линии тренда зависимостей  $\omega_{я}(\vartheta_{в})$ , а также пониженное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{я} = 0,268$ . Резкое понижение качества пропитки изоляции якорных обмоток ТЭМ электровозов вызвало ухудшение их ЭМХ.

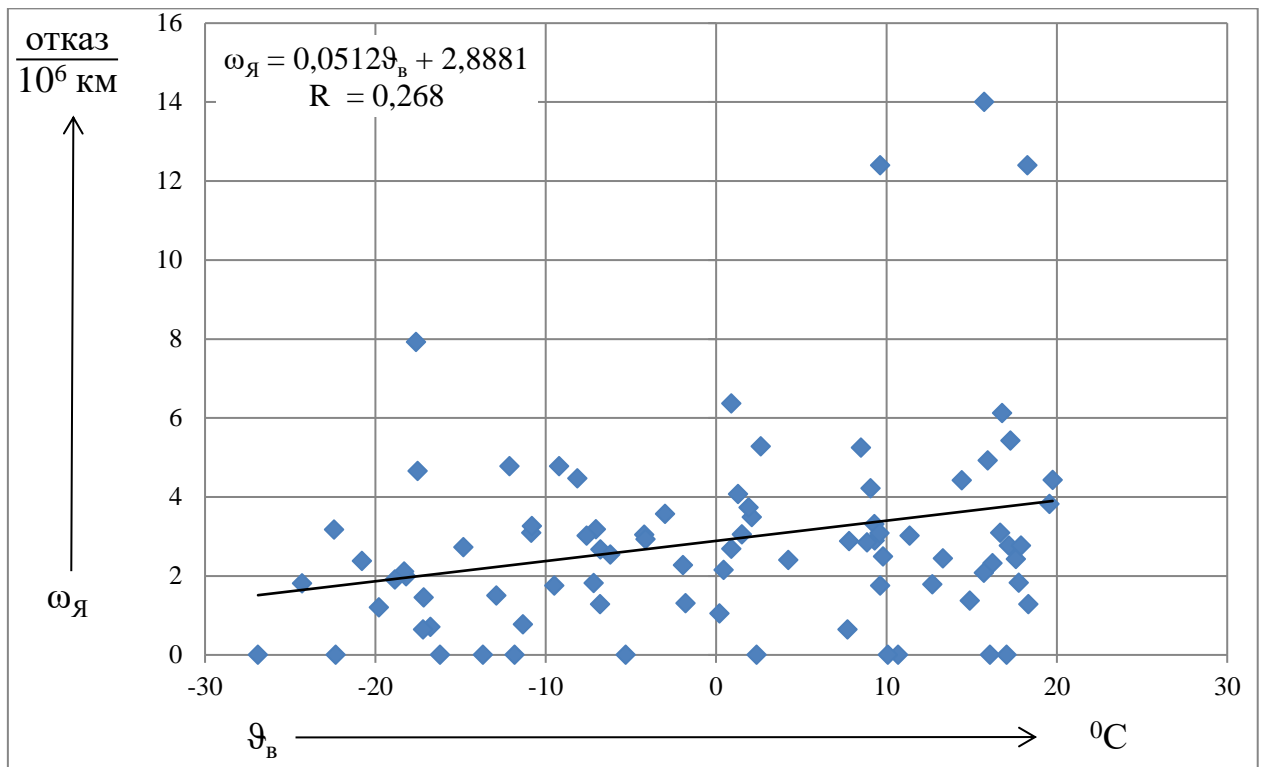


Рисунок 2.35. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ

При анализе зависимости безотказности остовных обмоток ТЭМ  $\omega_{ост}$  электровозов ВЛ80Р депо Иланская от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{в}$ ,

приведенной на рисунке 2.36, необходимо отметить, что характер наклона средней линии тренда зависимости  $\omega_{\text{ост}}(\vartheta_{\text{в}})$  свидетельствует о пропитке изоляции остовных обмоток. В тоже время низкое значение корреляционного отношения между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{ост}} = 0,410$  указывают на пониженное качество пропитки изоляции обмоток остова.

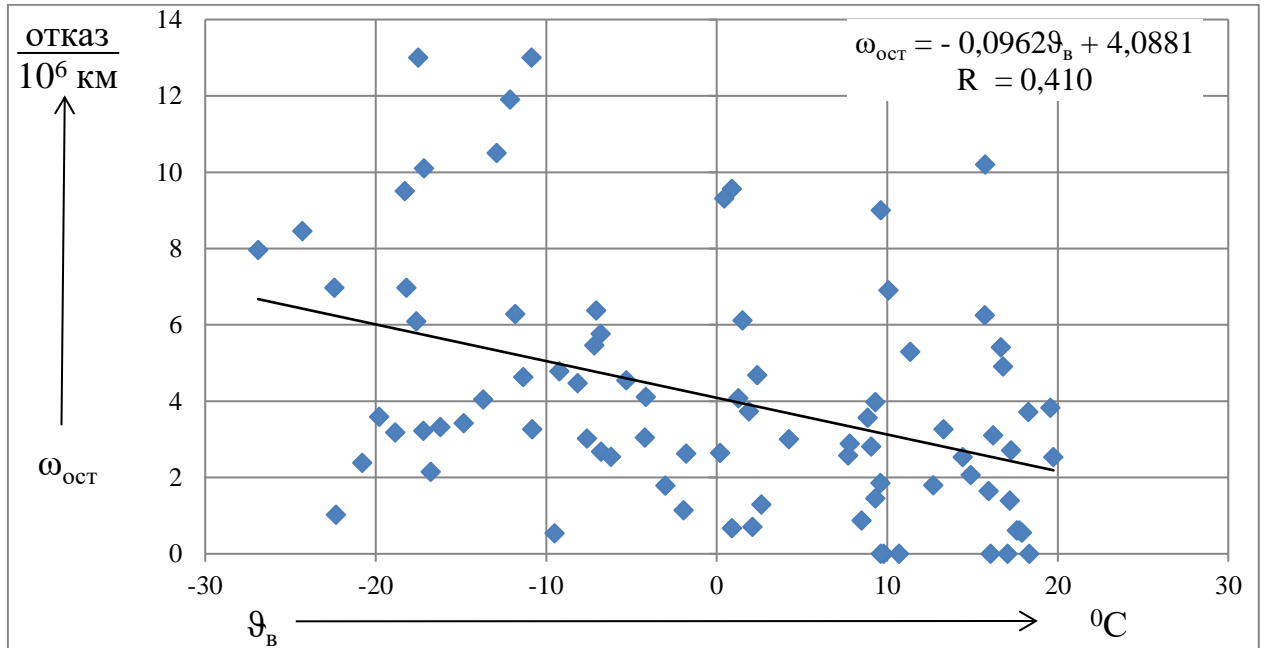


Рисунок 2.36. Характер изменения параметра потока отказов остовных обмоток ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

Из рассмотрения прямой безотказности изоляции ТЭМ  $\omega_{\text{из}}$  электровозов ВЛ80Р депо Иланская от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенной на рисунке 2.37, можно отметить, что среднее значение параметра потока отказов изоляции ТЭМ в несколько раз превышает аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Характер наклона зависимости  $\omega_{\text{из}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на ухудшенное состояние изоляции обмоток ТЭМ. Об этом же свидетельствуют уменьшенное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{из}} = 0,128$ . Понижение качества пропитки изоляционных конструкций ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская вызвало ухудшение их ЭМХ.

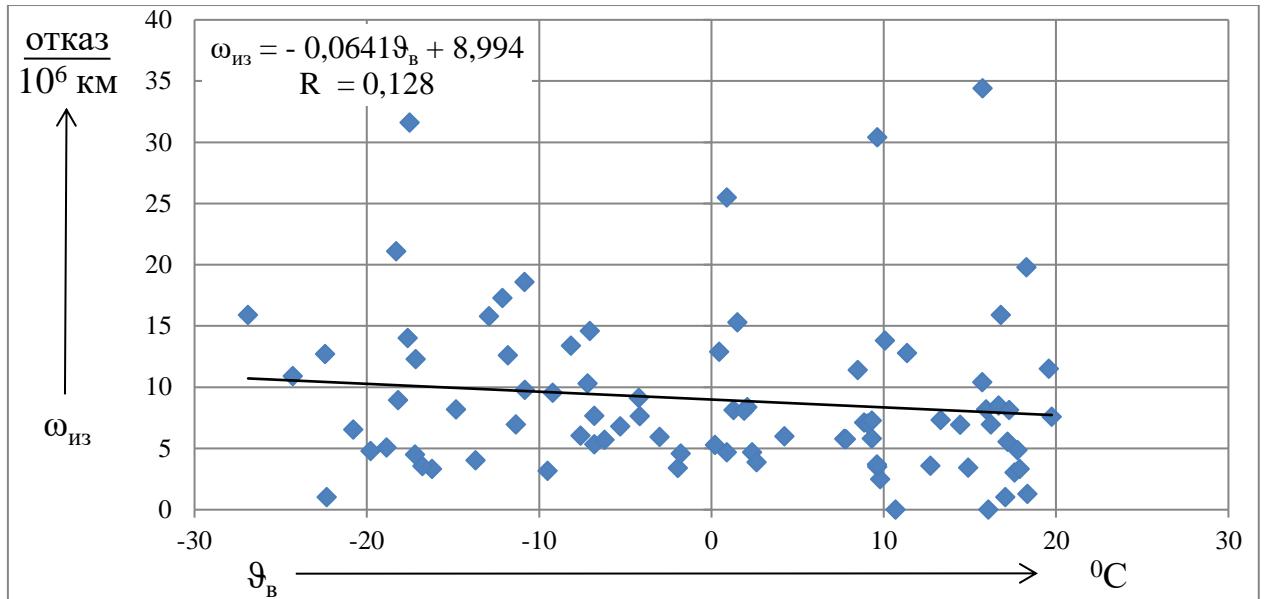


Рисунок 2.37. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции ТЭМ

Из зависимости, описывающей связь показателя безотказности ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.38), видно ослабление влияния вибраций на безотказность ТЭМ. Параметр потока отказов ТЭМ возрастал в 1,48 раза от 11,9 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 17,6 отказов/ $10^6$  км в зимний. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_B$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,252$  также подтверждает ослабление связи.

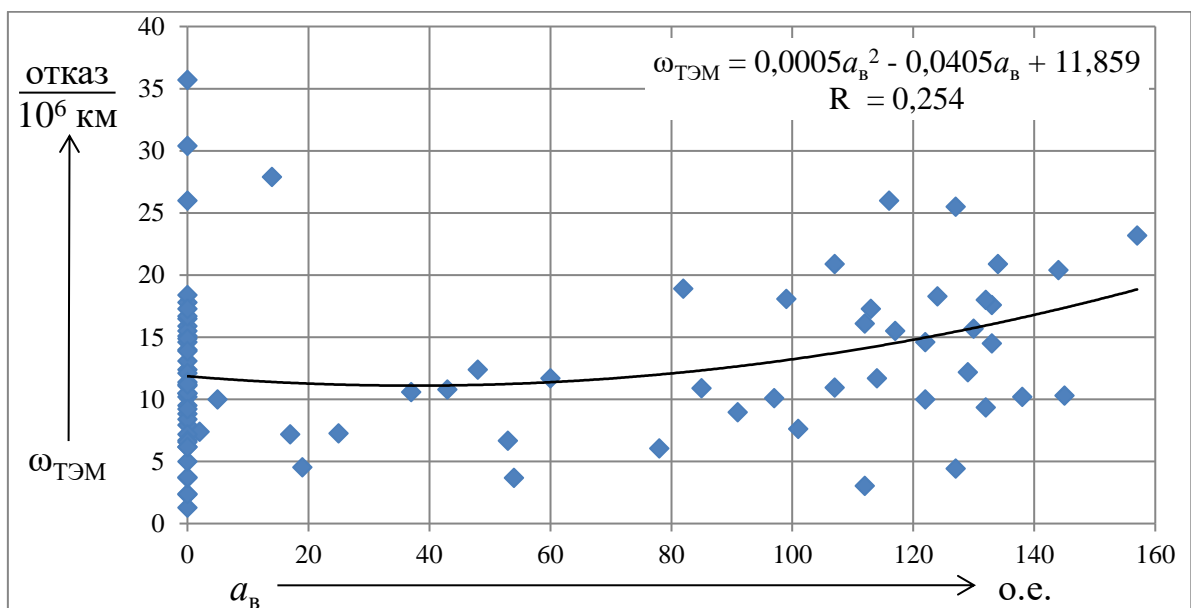


Рисунок 2.38. Характер изменения параметра потока отказов ТЭМ из-за вертикальных вибраций от пути



При рассмотрении прямой, описывающей связь показателя безотказности изоляции якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская с уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.39), видно, что с увеличением вибраций, безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ повышалась. Параметр потока отказов ТЭМ уменьшался в 2,02 раза от 3,46 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 1,71 отказов/ $10^6$  км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ80Р депо Иланская, имело максимальное значение. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{в}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,252$  также подтверждает ослабление связи.

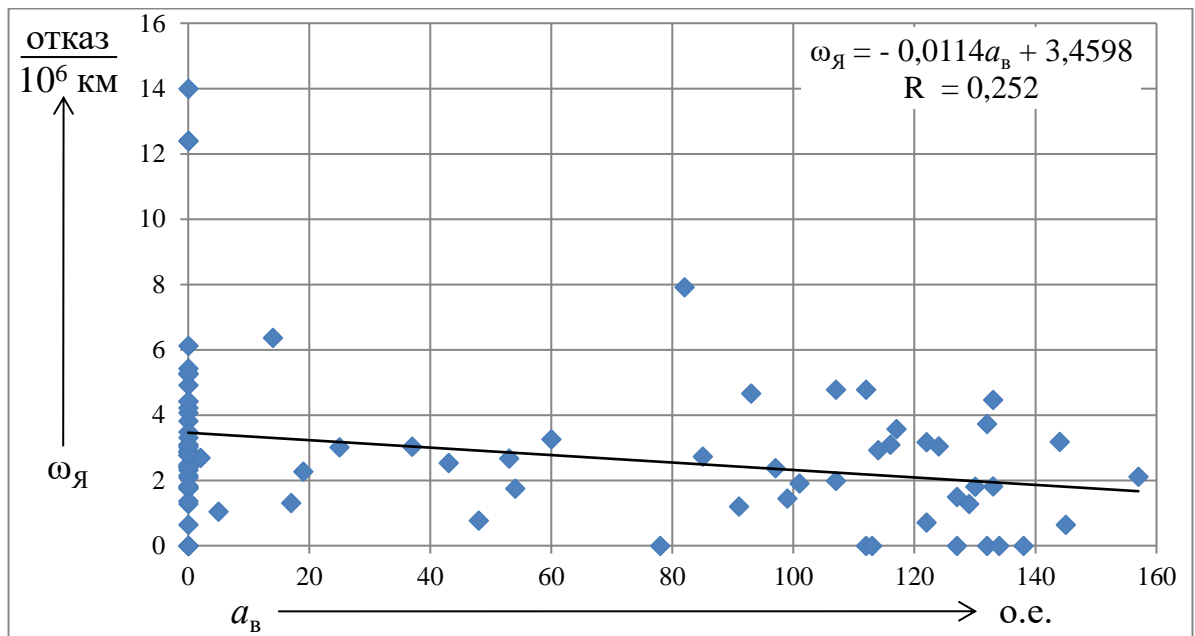


Рисунок 2.39. Влияние величины вертикальных вибраций от пути на безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ

Из кривой, описывающей связь показателя безотказности изоляции остовных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.40), видно существенное влияние вибраций на безотказность изоляции остовных обмоток ТЭМ. Параметр потока отказов тяговых электрических машин возрастал в 2,33 раза от 2,86 отказа/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 6,67 отказов/ $10^6$  км в зимний. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{в}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,442$ , также подтверждает существование связи.

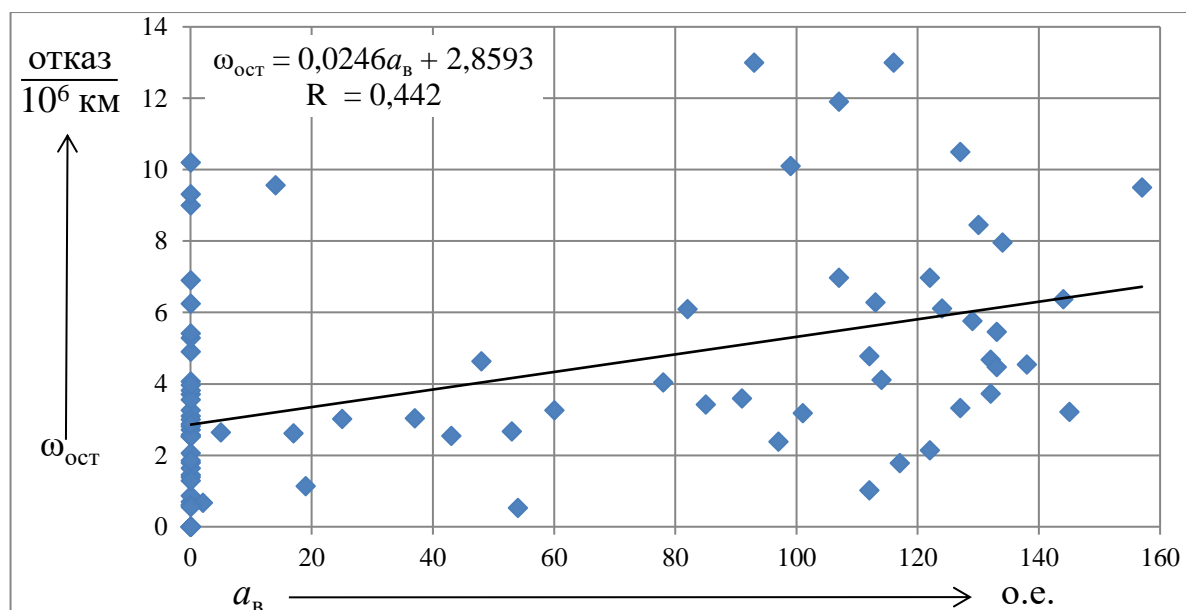


Рисунок 2.40. Зависимость параметра потока отказов изоляции остовных обмоток из-за величины вертикальных вибраций от пути

При рассмотрении кривой, характеризующей связь показателя безотказности изоляции ТЭМ электровозов ВЛ80Р депо Иланская с уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок 2.41), можно отметить слабое влияние вибраций на безотказность изоляции ТЭМ. Параметр потока отказов изоляции ТЭМ возрастал в 1,54 раза от 8,18 отказа/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 12,6 отказов/ $10^6$  км в зимний. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{в}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,182$ , подтверждает ослабление связи.

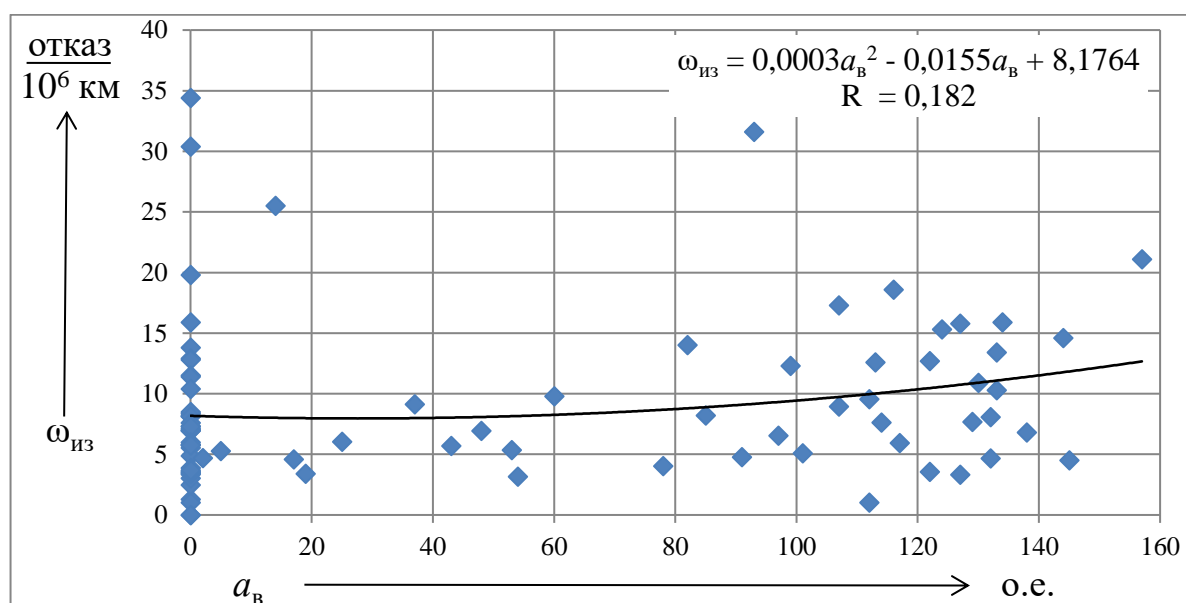


Рисунок 2.41. Характер изменения параметра потока отказов изоляции от величины вертикальных вибраций от пути

Данные о токовой нагрузке ТЭМ и превышении температуры якорных обмоток ТЭМ электровоза ВЛ85 при ведении поездов массой 1600, 4200 и 5700 т по полигону Мариинск-Тайшет центрального направления Транссиба, полученные с использованием программного обеспечения «КОРТЭС», приведены на рисунках 2.42 - 2.47. Анализ гистограмм, приведенных на рисунках 2.45 - 2.47, показывает, что превышение температуры якорных обмоток ТЭМ электровоза ВЛ85 не больше предельно допустимого значения [43, 44, 45].

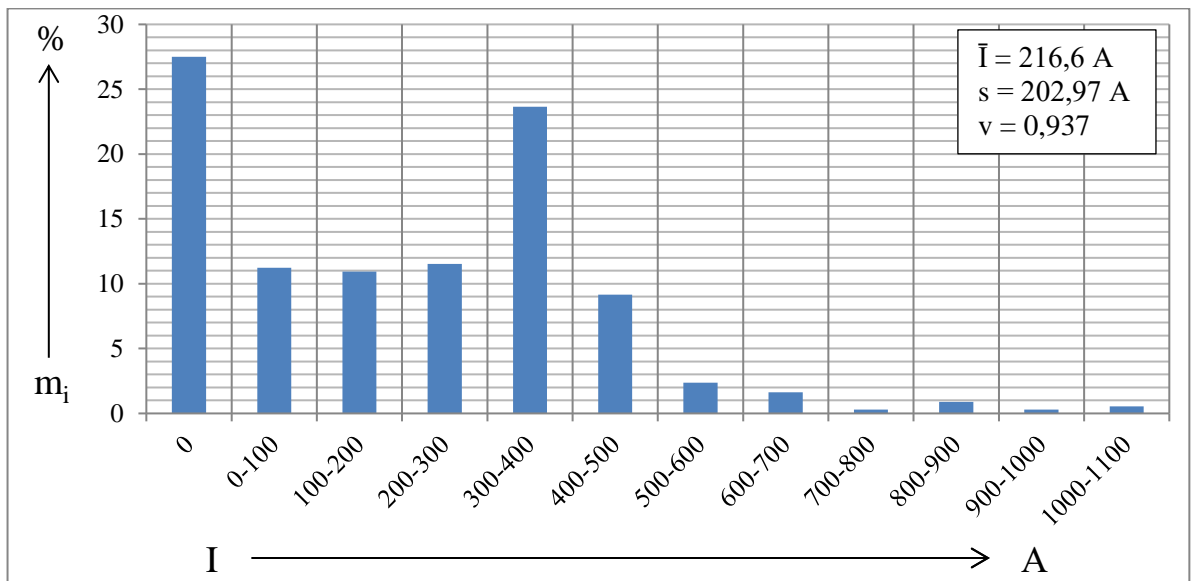


Рисунок 2.42. Токовая нагрузка ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80Р при ведении поезда массой 1600 т по направлению Мариинск-Тайшет (с учетом выбега)

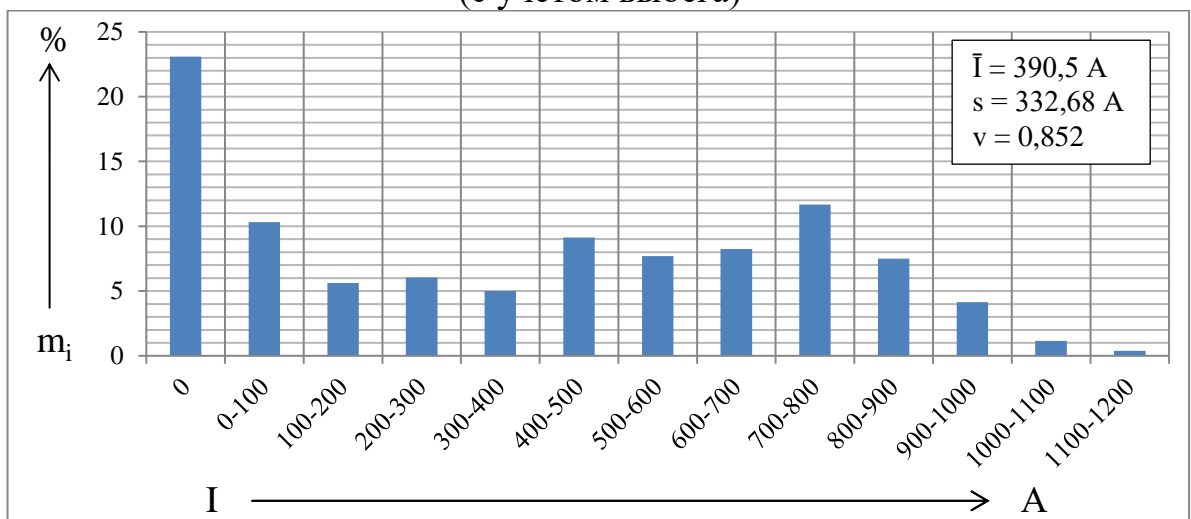


Рисунок 2.43. Токовая нагрузка ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80Р при ведении поезда массой 4200 т по направлению Мариинск-Тайшет (с учетом выбега)

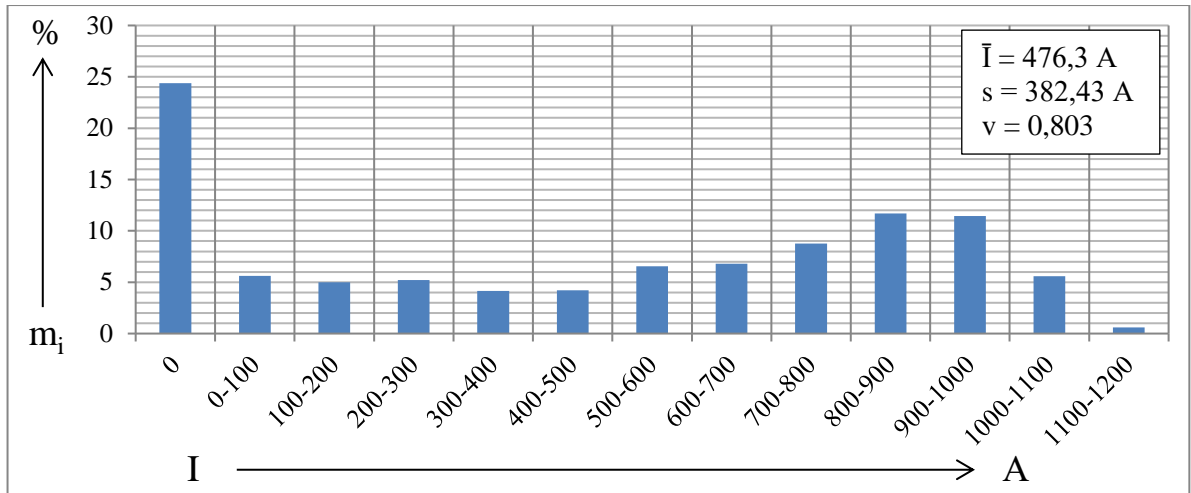


Рисунок 2.44. Токовая нагрузка ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80Р при ведении поезда массой 5700 т по направлению Мариинск-Тайшет (с учетом выбега)

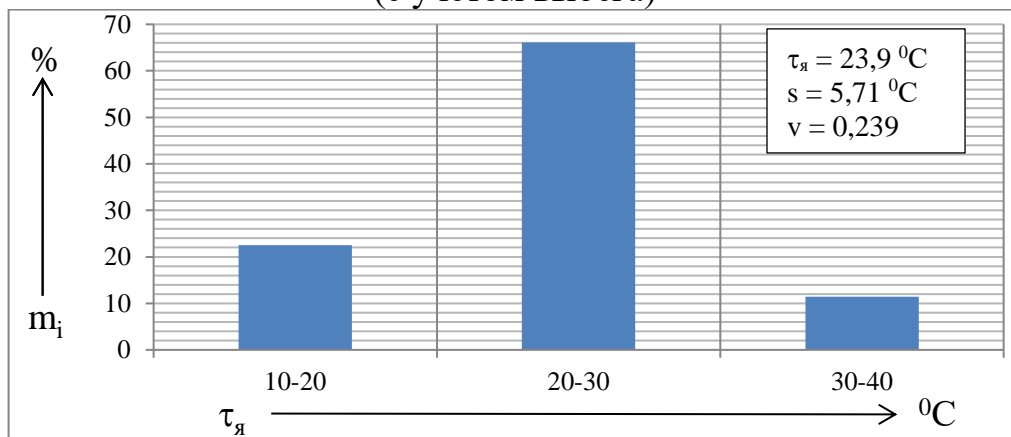


Рисунок 2.45. Превышение температуры якорной обмотки ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80Р при ведении поезда массой 1600 т по направлению Мариинск-Тайшет (с учетом выбега)

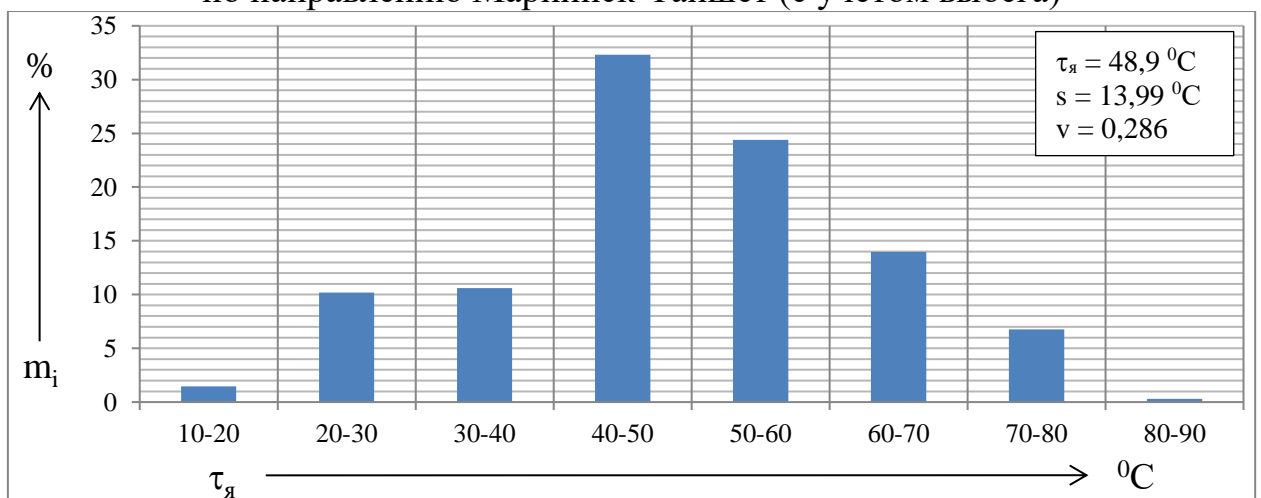


Рисунок 2.46. Превышение температуры якорной обмотки ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80Р при ведении поезда массой 4200 т по направлению Мариинск-Тайшет (с учетом выбега)

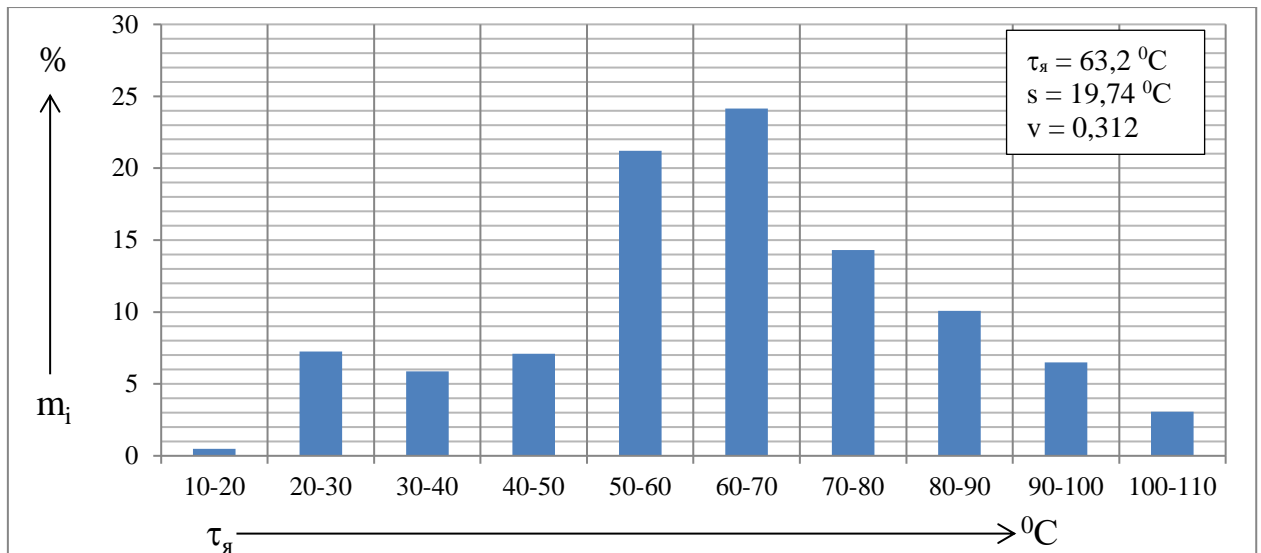


Рисунок 2.47. Превышение температуры якорной обмотки ТЭМ трехсекционного электровоза ВЛ80Р при ведении поезда массой 5700 т по направлению Мариинск-Тайшет (с учетом выбега)

## 2.8. Безотказность ТЭМ электровозов ОПЭ Михайловского ГОКа в период с января 2006 по декабрь 2010 года

При анализе зависимости безотказности изоляции якорных обмоток  $\omega_{я}$  тяговых электрических машин НБ-511М электровозов ОПЭ Михайловского ГОКа [46, 47] от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{в}$ , приведенной на рисунке 2.48, можно отметить, что характер наклона зависимости  $\omega_{я}(\vartheta_{в})$  указывает на хорошее состояние пропитанной изоляции якорных обмоток. В диапазоне температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{в}$  от минус 23 до плюс 20 °C параметр потока отказов изоляции якорных обмоток ТЭМ снижался в 4,94 раза от 16,3 до 3,3 отказов/10<sup>6</sup> км. Корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности изоляции якорных обмоток и температурой воздуха  $R_{я} = 0,728$ . Для качественно пропитанной изоляции (рисунок 1.31) разброс ежемесячных значений параметров потока отказов относительно средней линии тренда зависимости  $\omega_{я}(\vartheta_{в})$  значительно меньше, чем зависимости, приведенной на рисунке 2.48, а корреляционное отношение составляет  $R_{я} = 0,964$ .

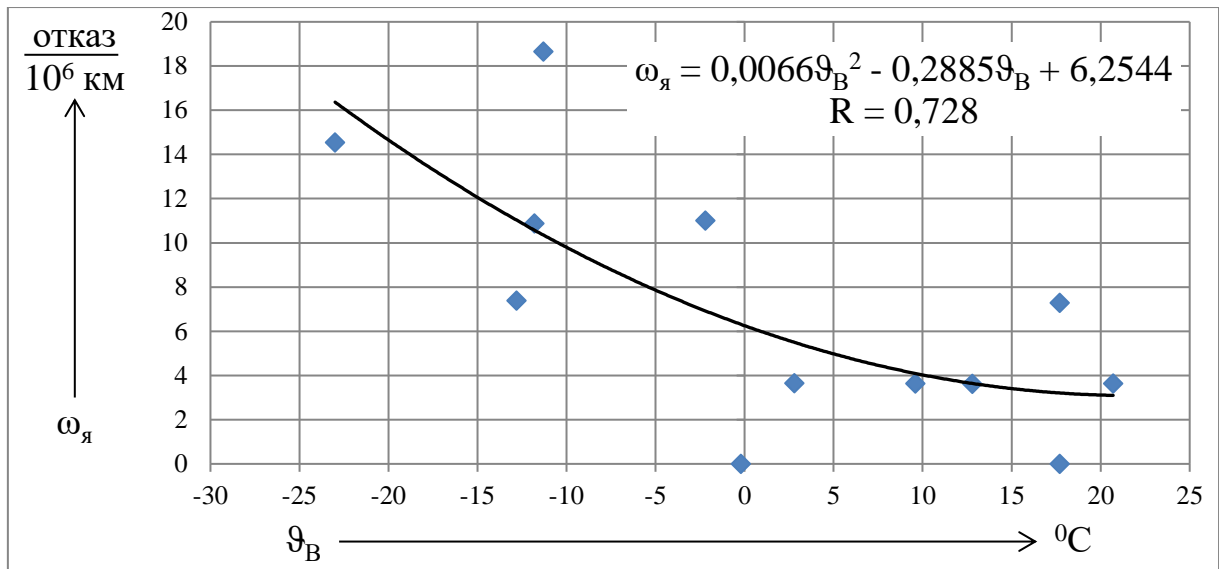


Рисунок 2.48. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ в период с января по декабрь 2006 года

## 2.9. Результаты анализа статистического исследования изоляции ТЭМ, эксплуатируемых в СПКУ

По результатам исследования, выполненного в первой и второй главе диссертационной работы, можно сделать следующие выводы.

1. На ТЭМ электровозов СПКУ приходится более одной пятой отказов. Отказы ТЭМ приводят к сбою ритмичности поездов и к срыву выполнения плана грузоперевозок.
2. Отказы ТЭМ электровозов полигонов с СПКУ в несколько раз превышают значения, указанные в технических условиях.
3. Отказы изоляции электровозов, эксплуатируемых в СПКУ, составляют от 50 до 83 % от всех повреждений ТЭМ.
4. От 30 до 50 % и более ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в СПКУ, работали с недопустимо низким качеством пропитки изоляции при существенно ухудшенных ЭМХ.
5. Изменение ранее существующей системы планово-предупредительных ремонтов - межремонтных пробегов, пропиточных и

изоляционных материалов, технологий пропитки и сушки, а также средств контроля состояния изоляции электровозов эксплуатируемых в СПКУ привело к увеличению отказов изоляционных конструкций ТЭМ.

6. В сервисных локомотивных депо, полигонов с СПКУ, отсутствуют средства и технологии контроля увлажненности изоляции ТЭМ при восстановлении работоспособности переувлажненных обмоток.

7. При выполнении текущих ремонтов ТР-3, СР и КР не контролируется качество сушки и пропитки изоляции. Отсутствуют средства и технологии контроля увлажненности изоляции ТЭМ.

8. Модернизация тяговых электрических машин НБ-418К6 при проведении ремонта с продлением срока службы не привела к повышению безотказности изоляции до необходимого значения.

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭЛЕКТРОВЗОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО- КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

#### 3.1. Тепловое старение изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ

Интенсивное тепловое старение изоляции, электровозов, эксплуатируемых на полигонах СПКУ, в значительной мере определяет безотказность ТЭМ. В связи с этим необходимо установить интенсивность теплового износа изоляции. Для определения теплового старения изоляции ТЭМ СПКУ использованы общие законы кинетики химических реакций от величины нагрева, полученные Вант-Гоффом и Аррениусом [48].

$$\ln K = \frac{B}{\theta}, \quad (3.1)$$

где  $K$  – скорость реакции;  $\theta$  - абсолютная температура;  $B$  и  $A$  - неизменные коэффициенты.

Доказано, что процессы окисления, наблюдаемые в изоляции, являются мономолекулярными реакциями, для них справедливо выражение

$$\frac{dC}{dt} = KC, \quad (3.2)$$

где  $C$  - концентрация молекул, не участвующих в реакции в наблюдаемый момент времени  $t$ .

Тогда, из выражения (3.2)

$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C}. \quad (3.3)$$

где  $C_0$  - концентрация не прореагировавших молекул в начальный момент времени.



Коэффициенты  $A$  и  $B$  связаны с постоянными, определяющими химический состав и структуру изоляции, участвующей в реакции, выражениями

$$A = \ln(P * Z), \quad (3.4)$$

$$P = e * \frac{\Delta S}{R}, \quad (3.5)$$

$$B = -\frac{E_a}{R}, \quad (3.6)$$

где  $Z$  - количество столкновений реагирующих молекул в единицу времени;  $P$  - фактор вероятности соответствующий ориентации молекул в момент столкновения;  $\Delta S$  - величина, характеризующая молекулы ориентированы надлежащим образом от их общего числа при столкновении;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $E_a$  - энергия активации.

Объединяя вышеуказанные выражения, получаем

$$B = A e^{-\frac{E_a}{R\theta}}. \quad (3.7)$$

Из уравнений (3.3) и (3.7) и обозначая срок эксплуатации  $T_g$ , получаем

$$T_g = A e^{-\frac{E_a}{R\theta} - G}, \quad (3.8)$$

где

$$G = \ln A - \ln \ln \frac{C_0}{C}. \quad (3.9)$$

После преобразований, износ изоляции якорной обмотки ТЭМ обусловленный тепловым старением на элементе профиля пути за время  $dt$

$$D_i = \int_0^{t_i} e^{B \left( \frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_{yi}(1-e^{-t/T}) + \tau_{i-1} e^{-t/T} + \Delta\tau_{vi} + \theta_{cp} + 273} \right)} dt, \quad (3.10)$$

где  $B$  - постоянный коэффициент, характеризующий способность молекул изоляции к химическому взаимодействию,  $^0K$ ;  $\theta_n$  - предельно-допустимая температура класса нагревостойкости изоляции,  $^0K$ ;  $\theta_{cp}$  - температура окружающей среды,  $^0C$ ;  $\tau_{yi}$  - установившееся превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды на  $i$ -том участке,  $^0C$ ;  $\Delta\tau_{vi}$  - среднее превышение температуры вентилирующего воздуха над температурой окружающей среды на  $i$ -том участке,  $^0C$  [50].

Суммарное тепловое старение изоляции якорной обмотки ТЭМ на участке

$$D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n D_i. \quad (3.11)$$

Определено влияние различий в характеристиках ТЭМ НБ-514 и колесной пары электровоза ВЛ85 на силу тока электрических машин. Допускаются отклонения магнитного потока главных полюсов  $\Delta\Phi = \pm 3\%$  и сопротивления двигателя  $\Delta r_{\text{д}} = + 6\%$  (после КР  $\Delta r_{\text{д}} = + 8\%$ ) при ремонте и изготовлении ТЭМ. В качестве исходной информации приняты следующие параметры:  $U_{\text{н}} = 980 \text{ В}$ ;  $\Phi_{\text{н}} = 0,0896 \text{ Вб}$ ;  $v_{\text{н}} = 48,93 \text{ км/ч}$ ;  $r_{\text{дн}} = 0,0435 \text{ Ом}$ ;  $I_{\text{дн}} = 905 \text{ А}$ ; диаметры бандажей колесных пар равны 1205 мм [51].

Тогда постоянная ТЭМ

$$C_n = p \cdot N / 60a, \quad (3.12)$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $N$  – число проводников обмотки якорной обмотки;  $a$  – число пар параллельных ветвей якорной обмотки.

Отсюда

$$C_n = \frac{3 \cdot 696}{60 \cdot 3} = 11,6, \quad (3.13)$$

$$C_v = \frac{C_n \cdot \mu}{0,188 \cdot D_{\delta}} = \frac{5,3 \cdot 11,6 \cdot 4,19}{0,188 \cdot 1,205} = 214,5, \quad (3.14)$$

С увеличением магнитного потока главных полюсов  $\Delta\Phi = + 3 \%$  ток тяговой машины

$$I_a = \frac{U_{\text{н}} - C_v \Phi v_{\text{н}}}{r_{\text{дн}}} = \frac{980 - 214,5 \cdot 0,0896 \cdot 1,03 \cdot 48,93}{0,0435} = 261,9 \text{ А}, \quad (3.15)$$

где скорость вращения в номинальном режиме

$$v_{\text{н}} = \frac{0,188 D_{\delta} n_{\text{ян}}}{\mu} = \frac{0,188 \cdot 1,205 \cdot 905}{4,19} = 48,93 \frac{\text{км}}{\text{ч}}. \quad (3.16)$$

где номинальная частота вращения якоря

$$n_{\text{ян}} = \frac{U_{\text{н}} - I_a r_{\text{дн}}}{C_n \Phi} = \frac{980 - 905 \cdot 0,0435}{11,6 \cdot 0,0896} = 905 \frac{\text{об}}{\text{мин}}. \quad (3.17)$$

При снижении магнитного потока главных полюсов  $\Delta\Phi = - 3 \%$  ток тяговой машины

$$I_a = \frac{980 - 214,5 * 0,0896 * 0,97 * 48,93}{0,0435} = 1559 \text{ А.} \quad (3.18)$$

С увеличением сопротивления обмоток ТЭМ на 8 % ток тяговой машины снизится

$$I_a = \frac{980 - 214,5 * 0,0896 * 48,93}{0,0435 * 1,08} = 843 \text{ А.} \quad (3.19)$$

Возрастание напряжения ВИП на 1 % вызывает увеличение тока

$$I_a = \frac{980 * 1,01 - 214,5 * 0,0896 * 48,93}{0,0435} = 1136 \text{ А.} \quad (3.20)$$

При увеличении диаметра бандажа одной колесной пары электровоза на 10 мм относительно средней величины бандажей колесных пар электровоза, равной 1205 мм конструкционная постоянная составит

$$C_v = \frac{11,6 * 4,19}{0,188 * 1,215} = 212,78. \quad (3.21)$$

При этом сила тока ТЭМ составит

$$I_a = \frac{980 - 212,78 * 0,0896 * 48,93}{0,0435} = 1084 \text{ А.} \quad (3.22)$$

При эксплуатации электровозов с большим различием толщины бандажей колесных пар наблюдается повышенная температура изоляции ТЭМ колесно-моторных блоков с увеличенными бандажами колесных пар, что было выявлено при измерениях (см. раздел 1; приложение 1).

Проведенные расчеты показали, что максимальное отклонение тока наблюдаются при изменениях магнитного потока ГП, а наименьшее при увеличении сопротивления ТЭМ более номинального значения [52, 53]. На изменение токовой нагрузки ТЭМ также оказывает значительное влияние смещение траверсы относительно нулевого положения [54]. Выявлена закономерность расхождения характеристик ТЭМ в зависимости от положения траверсы. Смещение траверсы на  $\pm 1$  мм вызывает изменение тока относительно расчётного значения в часовом режиме на 2 %. Изменение направления движения приводит к различию токов ТЭМ электровоза до 230 А.

Для определения доли теплового и термомеханического старения в общем износе изоляции ТЭМ применен коэффициент использования по току [55, 56]

$$K_I = \frac{I_{\text{экв}}}{I_{\infty}}, \quad (3.23)$$

где  $I_{\text{экв}}$  и  $I_{\infty}$  - эквивалентный ток и ток длительного режима.

На рисунке 3.1 приведена зависимость показателя безотказности  $\omega_{\text{из}}$  ТЭМ электровозов переменного тока от коэффициента использования  $K_I$ . Из рассмотрения зависимости  $\omega_{\text{из}}$  от  $K_I$  видно близкое к линейному увеличение  $\omega_{\text{из}}$ , в диапазоне (0,2-0,8)  $K_I$  и интенсивное повышение показателя безотказности изоляции ТЭМ с ростом нагрузки при ведении поездов повышенной массы на расчетном подъеме. Данный показатель был определен по результату анализа статистических данных об эксплуатации электровозов грузового движения и подталкивающих локомотивов при ведении поездов разной массы.

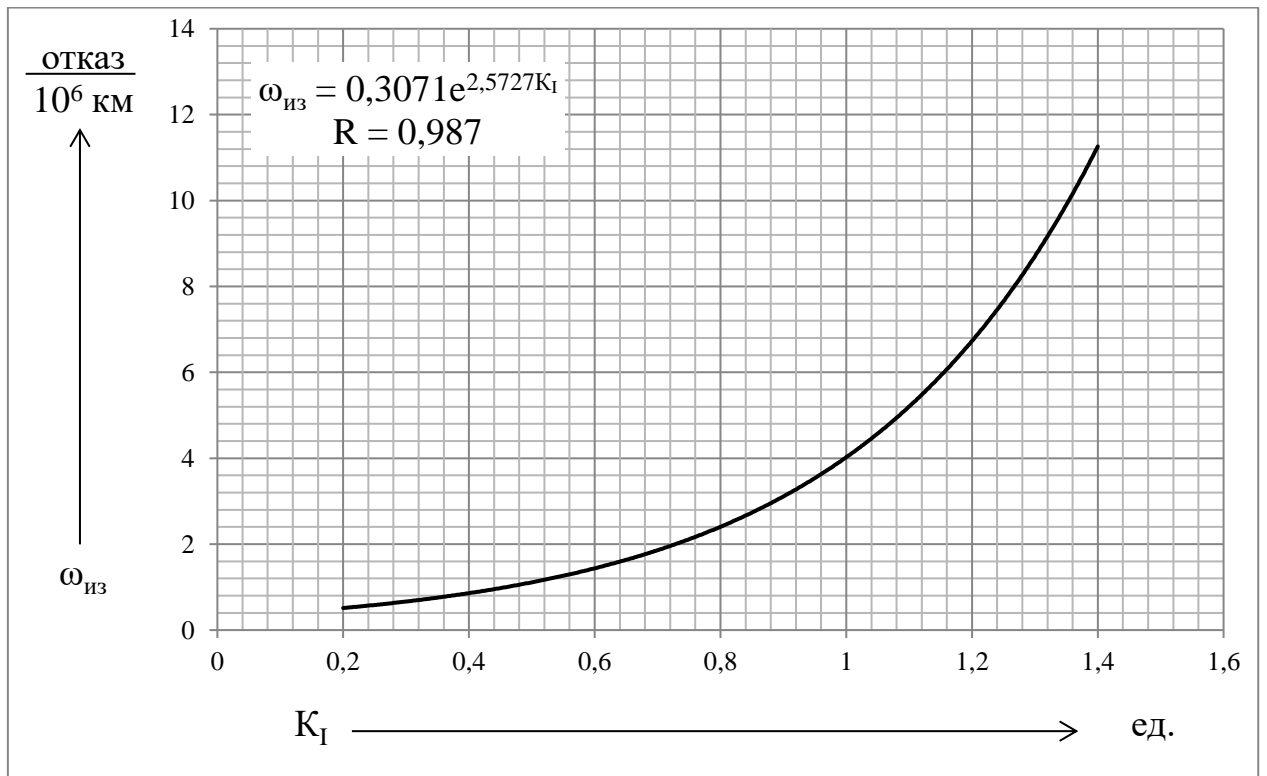


Рисунок 3.1. Характер изменения показателя безотказности ТЭМ электровозов переменного тока от коэффициента использования по току

Известно, что при работе ТЭМ с токами, соответствующими  $(0,2-0,8) K_I$ , тепловой износ изоляции составляет около 35-40 % от общего износа [57, 58]. Из зависимости, приведенной на рисунке 3.1, видно, что при токах ТЭМ, превышающих ток продолжительного режима  $I_\infty$ , интенсивность теплового и термомеханического износа изоляции возрастает до 70-90 % общего износа.

Тепловое старение изоляции повышается при снижении интенсивности вентиляции. Установлено, что на 1 – 2 % эксплуатируемого парка электровозов имеются ТЭМ, расход охлаждающего воздуха которых снижен до нулевого значения. Анализ кривых нагревания и охлаждения ТЭМ НБ-514 показывает, что перегрев якорных обмоток невентилируемого ТЭМ, соответствующий току  $I_\infty = 843\text{А}$  при номинальной вентиляции, наблюдается уже при токе 400 А во время движения электровоза по равнинно-холмистому участку, т.е. при  $K_I = 0,47$ .

Рассмотрены схемы вентиляции ТЭМ типа НБ-412М и НБ-514 с подачей охлаждающего воздуха со стороны коллекторов и разворотом охлаждающего воздуха соответственно на  $90^\circ$  и  $270^\circ$  (рисунок 3.2). При первой схеме вентиляции без охлаждающего воздуха ТЭМ мог работать с током, соответствующим  $K_I = 0,73$  без превышения предельно допустимого перегрева, тогда как НБ-514 обеспечивает при этих же условиях токовую нагрузку не более  $K_I = 0,47$ . Анализ показал, что разворот потока охлаждающего воздуха на  $270^\circ$  вызывает застой охлаждающего воздуха в нижней половине остова. По результатам освидетельствования ТЭМ НБ-514, поступивших на капитальный ремонт, выявлено, что изоляция нижних обмоток главных и дополнительных полюсов, а также компенсационных обмоток пористая, ослабленная, частично разрушенная и интенсивно осыпается. Изоляция же ГП, ДП и КО в верхней части ТЭМ не имеет следов интенсивного старения – достаточно монолитная, соответствующая требованиям, предъявляемым к изоляции после проведения КР. Состояние изоляции верхней части остовных катушек ТЭМ НБ-514, поступающих на

капитальный ремонт в настоящее время соответствует состоянию изоляции ТЭМ НБ-412М и НБ-418К, с разворотом охлаждающего воздуха на  $90^\circ$ , поступающих на КР в предыдущие годы [59, 60].

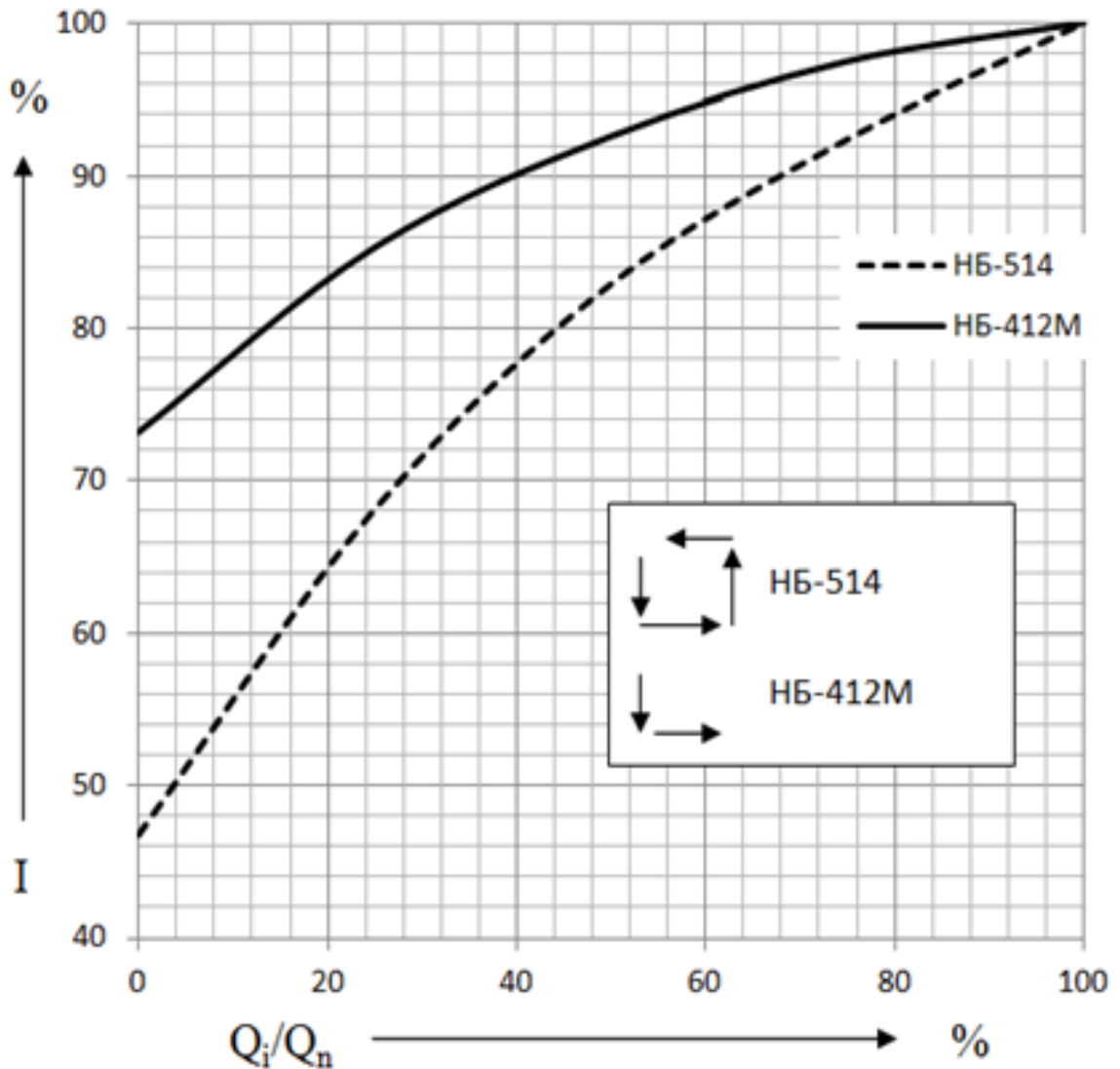


Рисунок 3.2. Ток продолжительного режима ТЭМ в зависимости от интенсивности вентиляции

Проведено сравнение однотипных по конструкции магнитной системы ТЭМ НБ-514 и НБ-418К с разворотом потока охлаждающего воздуха соответственно на  $270^\circ$  и  $90^\circ$ . Из-за изменения схемы вентиляции, несмотря на открытие лобовых соединений обмотки якоря со стороны, противоположной коллектору, наблюдается увеличение температуры перегрева обмотки якоря ТЭМ НБ-514 в сравнении с  $\tau_{я}$  НБ-418К (рисунок 3.3) [61, 62].

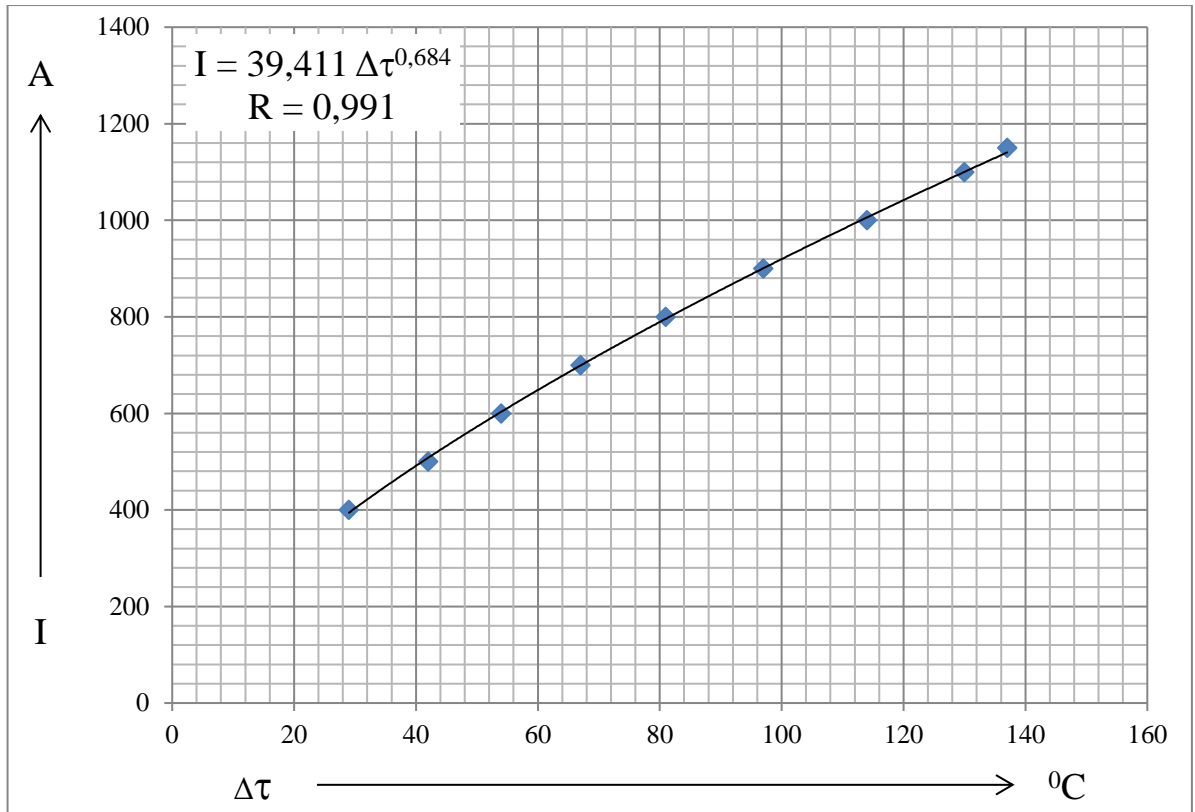


Рисунок 3.3. Возрастание температуры перегрева якорной обмотки ТЭМ НБ-514 над  $\tau_{я}$  ТЭМ НБ-418К при разных токах нагрузки

### 3.2. Термомеханическое старение изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ

В процессе работы температура ТЭМ постоянно изменяется. При анализе влияния изменения температуры на срок службы изоляции введена величина, обратная сроку ее службы – скорость старения изоляции при определенной температуре  $d(\theta)=1/T(\theta)$  [63]. Допустим, что скорость старения изоляции определяется температурой только в данное время.

Средняя скорость старения изоляции  $d_{cp}$  оказывается выше, чем она была бы при неизменной температуре  $\theta = \theta_{cp}$ . Это связано с тем, что при положительном изменении температуры от среднего значения на отдельных участках скорость старения повышается больше, чем снижается при таком же отклонении температуры  $\theta_{cp}$  [64, 65].

Средняя скорость старения изоляции является показателем, характеризующим данный температурный режим. Периоды колебаний температуры намного меньше срока службы изоляции ТЭМ, при этом скорость старения  $d_{\text{cp}}$  изоляции принимает установившееся значение за время  $T \ll T_{\text{сл}}$  [66, 67]. Достаточно точным является выражение, определяющее износ изоляции  $D$  за время эксплуатации  $T_3$

$$D = T_3 d_{\text{cp}} = \sum_i d_i \Delta t_i, \quad (3.24)$$

где  $T_3$  – срок эксплуатации,  $T_3 = \sum_i \Delta t_i$ ;  $d_i \Delta t_i$  – износ изоляции за время;  $\Delta t_i$  работы при температуре  $\theta_i$ .

Это позволяет принять, что при незначительных колебаниях температуры в этой зоне можно принять линейную аппроксимацию кривой  $d(\theta)$  в окрестности средней температуры  $\theta_{\text{cp}}$ , тогда средняя скорость старения изоляции  $d_{\text{cp}}$ , будет зависеть только от средней температуры изоляции.

В связи с тем, что данные условия непостоянны, необходимо рассмотреть влияние колебаний температуры на среднюю скорость старения изоляции ТЭМ с оценкой допустимости теплового режима.

Средняя скорость старения изоляции при конечном числе уровней температуры определяется по формуле

$$d_{\text{cp}} = \sum_i \frac{1}{T(\theta_i)} * \left( \frac{\sum_k \Delta t_{ik}}{T_3} \right), \quad (3.25)$$

где  $k$  – число одинаковых уровней температуры  $\theta_i$ , в одном цикле.

Отношение, записанное в формуле 3.20 ( $p_i = \left( \sum_k \Delta t_{ik} / T_3 \right)$ ), это часть времени в цикле с уровнем температуры  $\theta_i$ . Если изменения температуры непрерывны, то можно использовать функцию плотности значений  $p_i$ . При



этом относительное время пребывания  $\theta(t)$  в интервале  $\theta_i + d\theta$  равно

$$p_i = f(\theta_i)d\theta. \text{ Так как } \sum_i \sum_k \Delta t_{ik} = T_{\text{э}}, \text{ то } \sum_i p_i = 1 \text{ и } \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} f(\theta_i)d\theta = 1.$$

Характеристики процесса  $p_i(\theta_i)$  и  $f(\theta_i)$ , представлены в виде

$$d_{\text{ср}} = \sum_i \frac{1}{T(\theta_i)} p_i(\theta_i); \quad (3.26)$$

для непрерывных: 
$$d_{\text{ср}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{T(\theta)} f(\theta) d(\theta). \quad (3.27)$$

В результате аппроксимация зависимости скорости старения изоляции от температуры с ее разложением по степеням  $(\theta - \theta_{\delta})/\kappa$

$$d_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} d(\theta_{\delta}) * \left( 1 + \frac{\theta - \theta_{\delta}}{\kappa} + \frac{(\theta - \theta_{\delta})^2}{2\kappa^2} + \frac{(\theta - \theta_{\delta})^3}{6\kappa^2} + \dots \right) f(\theta) d(\theta_{\delta}). \quad (3.28)$$

По структуре  $d_{\text{ср}}$ , состоит из произведения скорости старения изоляции, соответствующей базовой температуре  $\theta_{\delta}$  и суммы единицы со средними отклонениями температуры в возрастающих степенях, деленных на коэффициенты [68]. Приняв  $\theta_{\delta} = \theta_{\text{ср}}$  разложение  $d(\theta)$  относительно средней температуры  $\theta_{\text{ср}}$

$$d_{\text{ср}} = (d(\theta_{\text{ср}})) * \left( 1 + \frac{\sigma^2(\theta)}{2\kappa^2} \right), \quad (3.29)$$

где  $\sigma^2(\theta) = \int_0^{\infty} (\theta - \theta_{\text{ср}})^2 f(\theta) d\theta$  – средний квадрат отклонения температуры.

Средний износ изоляции ТЭМ  $d_{\text{ср}}$  для трех различных температурных режимов представлен на рисунке 3.4 [69]. Для первого режима температура в течение всего срока службы постоянна и равна  $\theta = \theta_{\text{ср}}$  (рисунок 3.4 а). Распределение температуры  $f(\theta)$  для такого режима есть  $\delta$ -функция. При

этом средний квадрат отклонения температуры от среднего значения равен нулю:  $\sigma_1^2(\theta) = 0$ .

При колебании температуры около среднего значения  $\theta_{cp} = \theta_{cp2} = \theta_{cp1}$ , распределение температуры в диапазоне  $\theta_{cp2} \pm \Delta\theta_2$  равномерное. В результате  $f(\theta)$  имеет вид, показанный на рисунок 3.4 б, а средний квадрат отклонения такого распределения равен

$$\sigma_2^2(\theta) = \int_{\theta_{cp}-\Delta\theta}^{\theta_{cp}+\Delta\theta} (\theta - \theta_{cp})^2 \frac{1}{2\Delta\theta_2} d\theta = \frac{\Delta\theta_2^2}{3}. \quad (3.30)$$

Для третьего режима  $\theta_{cp3} = \theta_{cp2} = \theta_{cp1}$ , а  $\Delta\theta_2 = \Delta\theta_3$ . При этом время изменения температуры от  $\theta_{cp3} + \Delta\theta_3$  до  $\theta_{cp3} - \Delta\theta_3$  и от  $\theta_{cp3} - \Delta\theta_3$  до  $\theta_{cp3} + \Delta\theta_3$  значительно меньше времени с неизменной температурой, а значения верхнего и нижнего уровней одинаковы, функция имеет вид  $f(\theta)$ .

Тогда  $\sigma_3^2(\theta)$  имеет вид  $\Delta\theta_3^2$ , так как все отклонения одинаковы и равны  $\Delta\theta_3$ .

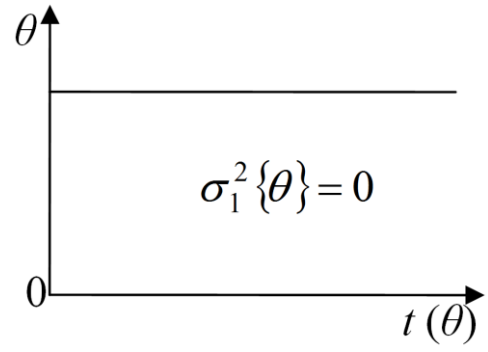
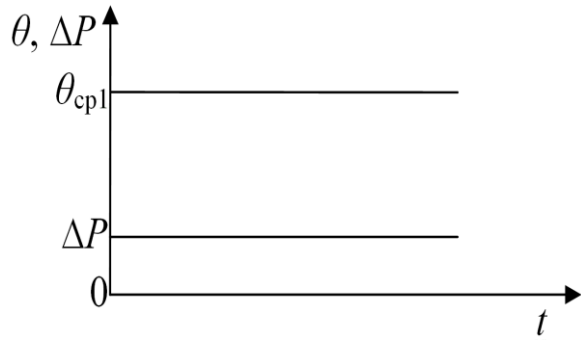
Принимая  $\kappa = 14$  °С и  $\Delta\theta_2 = \Delta\theta_3 = 10$  °С имеем

$$d_{cp1} = d(\theta_{cp}); \quad (3.31)$$

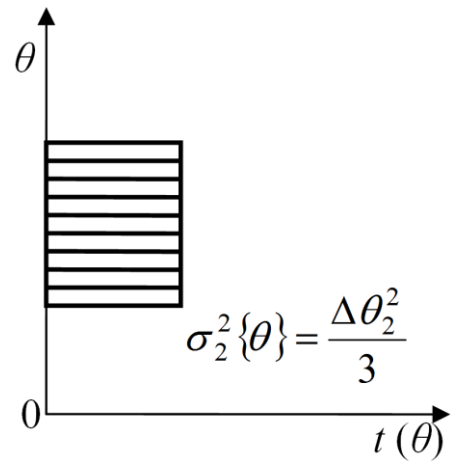
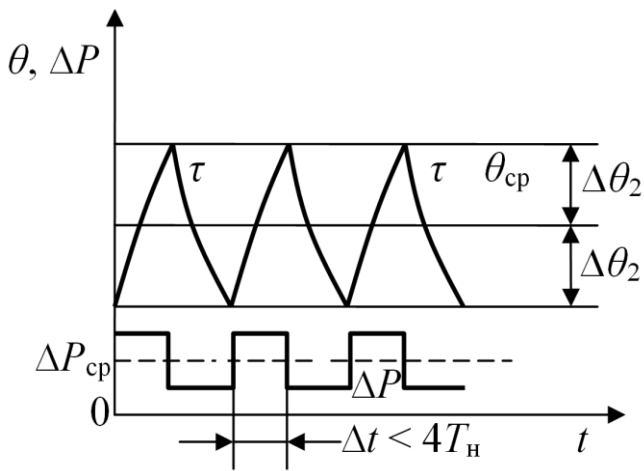
$$d_{cp2} = d(\theta_{cp}) \left( 1 + \frac{100}{3 \cdot 2 \cdot 196} \right) = 1,085 d(\theta_{cp}); \quad (3.32)$$

$$d_{cp3} = d(\theta_{cp}) \left( 1 + \frac{100}{2 \cdot 196} \right) = 1,25 d(\theta_{cp}). \quad (3.33)$$

а



б



в

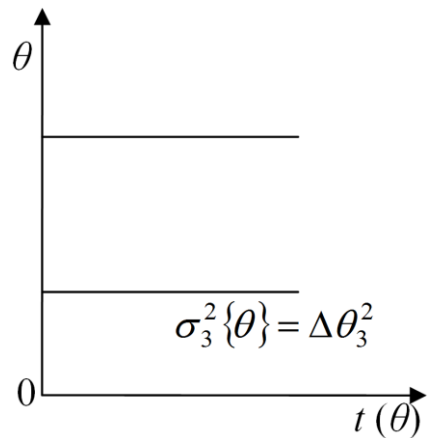
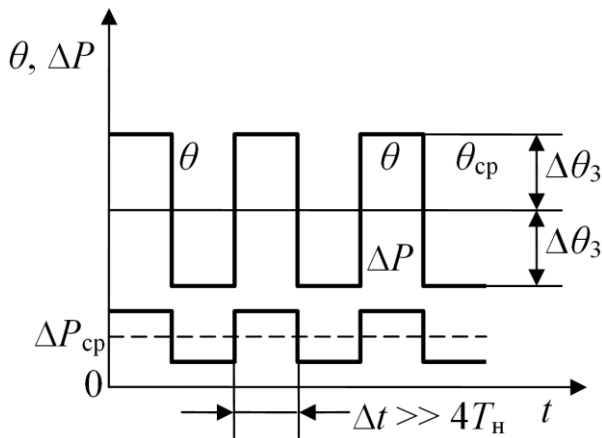


Рисунок 3.4. Распределение температуры при различных температурных режимах

Колебания температуры обмоток ТЭМ значительно повышают износ изоляции (рисунок 3.5). При этом термомеханический износ изоляции ТЭМ существенно повышает общий износ изоляции.

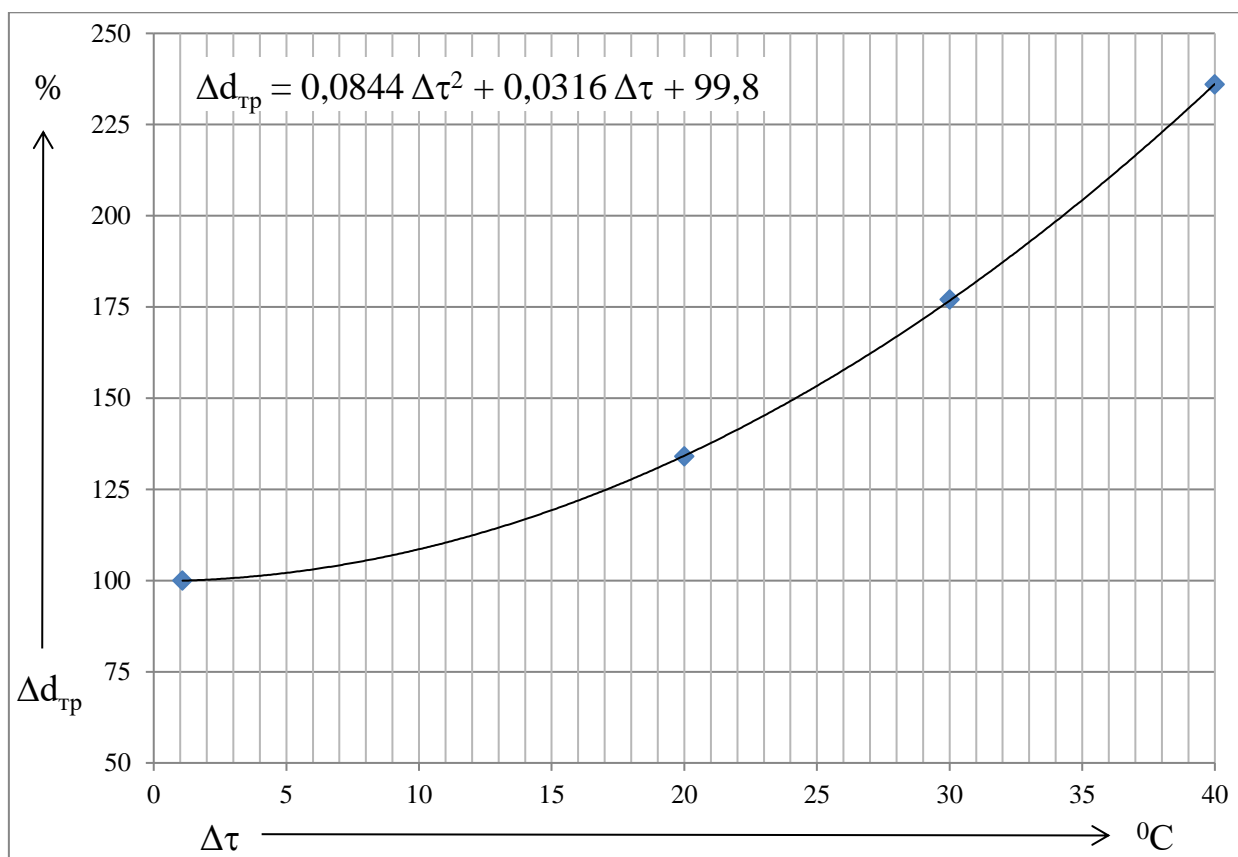


Рисунок 3.5. Влияние колебаний превышения температуры на износ изоляции

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, приведенных во второй главе диссертации (рисунки 2.65-2.67), и расчет показали, что колебания температуры обмоток, вызывающие термомеханическое старение изоляции, увеличивают ее износ соответственно на 2,9; 18,1 и 33,8 % по сравнению с тепловым износом при неизменной средней температуре обмотки [70, 71].

Термомеханическое старение изоляции непропитанных якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 Восточно-Сибирской ж.д. значительно возрастает из-за пониженной упругости (хрупкости) изоляции как в зимний,

так и, в еще большей степени, в летний период эксплуатации, на что указывают зависимости безотказности изоляции непропитанных якорных обмоток ТЭМ от среднемесячных значений температуры воздуха (1 глава рисунок 1.30-1.31).

### **3.3. Механический износ изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ**

Механические нагрузки на изоляцию ТЭМ полигонов с СПКУ обусловлены электродинамическими силами, возникающих в обмотках, неуравновешенностью вращающихся частей, центробежными усилиями, ударами со стороны привода. Эти усилия имеют циклический знакопеременный характер. Неравномерный нагрев отдельных элементов обмоток в переходных режимах также приводит к деформации изоляции [72, 73].

В тяговых электрических машинах изоляция работает в условиях постоянной вибрации, особенно сильной на лобовых соединениях якорных обмоток. Она подвергается периодическим ударным механическим воздействиям, возникающим при прохождении по обмоткам больших токов при наборе и сбросе нагрузки. Наиболее опасные механические напряжения возникает на участках выхода якорной обмотки из пазов [74]. Под действием механических нагрузок в изоляции образуются и постепенно увеличиваются микропоры и микротрещины. Когда их количество и размеры достигают критического значения наступает механическое разрушение изоляции. Наличие микропор и микротрещин существенно снижает электрическую прочность изоляции приводя к ее преждевременному пробояю.

Уточнён механизм пробоя изоляции открытых лобовых соединений (ОЛС) ТЭМ полигонов с СПКУ, который обусловлен действием результирующих сил – центробежной, тяготения и силы, создаваемой

бандажом задних лобовых соединений (рисунок 3.6) [75]. Эти силы при вращении якоря ТЭМ создают пульсирующий, изменяющийся по величине момент, приложенный в центре тяжести ОЛС. Момент вызывает изгибы изоляции вылетов секций, выходящих из пазов сердечника якоря. При боксовании, особенно интенсивном, амплитуда колебаний вылетов секций резко возрастает. Это приводит к накоплению механических повреждений в изоляции и последующему пробое.

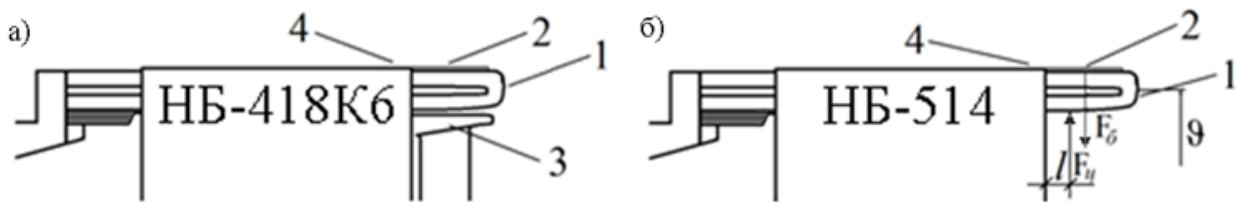


Рисунок 3.6. Фрагменты якорных обмоток ТЭМ НБ-418К6 и НБ-514:  
1 – лобовые соединения; 2 – поверхностный слой изоляции;  
3 – керамический конус; 4 – паз якоря

Согласно исследований д.т.н., профессора ОмГУПСа И.И.Галиева глубина промерзания грунта в зимний период эксплуатации определяет уровень вертикальных вибраций ТЭМ с опорно-осевым подвешиванием. Это позволяет определить влияние вертикальных вибраций от пути на безотказность изоляции ТЭМ. Зависимости, характеризующие влияние вертикальных вибраций от пути на ТЭМ типа НБ-514 электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ, на безотказность изоляции якорных и остовных обмоток, приведены во второй главе, а также приложениях 5- 7.

### 3.4. Электрическое старение изоляции ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ

Для изоляционных конструкций ТЭМ, электрическое старение происходит при напряженности поля в 5—20 раз меньших пробивного

напряжения. Установлено, что срок службы  $T$  изоляции зависит от величины приложенного напряжения  $U$  [80]

$$T = \frac{A}{U^n}, \quad (3.34)$$

где  $A$  – постоянная, зависящая от свойств изоляции;  $n$  – показатель степени, зависящий от конструктивных особенностей изоляции.

Для больших сроков службы

$$T = \frac{A}{(U - U_{\text{чр}})^n}, \quad (3.35)$$

где  $U_{\text{чр}}$  - напряжение, при котором в изоляционных материалах возникают частичные разряды.

Электрическое старение изоляционных конструкций происходит неравномерно. В начале эксплуатации процесс старения замедлен. По мере увеличения срока службы изоляция расслаивается, разрыхляется, с образованием пор, трещин, газовых включений.

На основании анализа результатов эксплуатации электроподвижного состава постоянного тока при постоянном последовательном соединении тяговых электрических машин выявлено влияние величины напряжения на контактах тяговых машин на вероятность износа изоляции тяговой электрической машины с учетом электрического старения [76]. Это позволило получить зависимость, характеризующую степень влияния напряжения ТЭМ на износ изоляции тяговых электрических машин электровозов переменного тока, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях (рисунок 3.7).

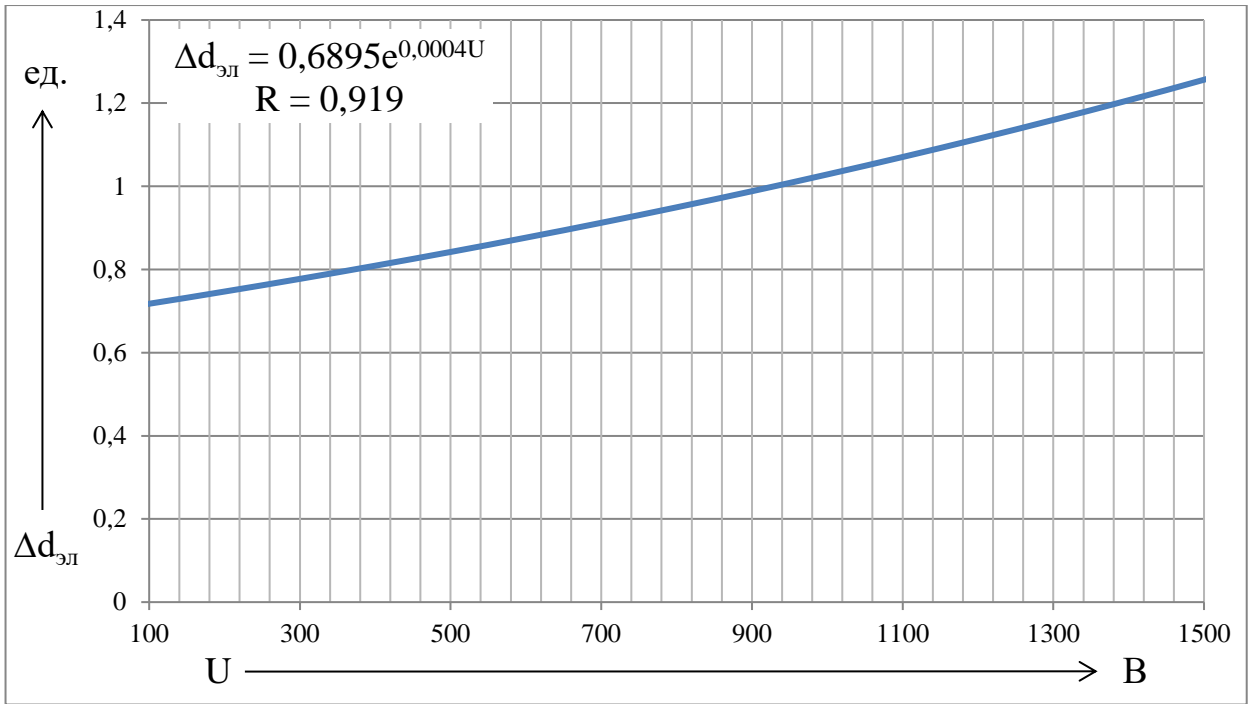


Рисунок 3.7. Доля электрического старения в износе изоляции ТЭМ полигонов с СПКУ при изменении напряжения на зажимах

С учетом 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

$$\left\{ \begin{array}{l} d = d_T \Delta d_{TM1} \Delta d_{эл} \Delta d_{виб} \Delta d_{TM2} \\ d_T = e^{B \left( \frac{1}{\theta_H} \frac{1}{\tau_{yi}(1-e^{-ti/T}) + \tau_{i-1} e^{-ti/T} + \Delta\tau_{вЯ} + \theta_B + 273} \right)} \\ \Delta d_{TM1} = 0,0844\Delta\tau^2 + 0,0316\Delta\tau + 99,8 \\ \Delta d_{эл} = 0,6895e^{0,0004U} \\ \Delta d_{виб} = \frac{-0,0055a_B + 2,16}{2,16} \\ \Delta d_{TM2} = 0,0073e_B^2 - 0,24e_B + 2,815 \end{array} \right. , \quad (3.36)$$

где  $d$  – скорость износа изоляции ТЭМ;  $d_T$  – скорость теплового износа изоляции на  $i$ -том элементе профиля пути при среднем превышении



температуры;  $\Delta d_{\text{ТМ1}}$  – изменение скорости износа изоляции вследствие вариаций превышения температуры обмоток (термомеханический износ первого вида);  $\Delta d_{\text{эл}}$  – влияние электрического поля на скорость износа изоляции (электрический износ);  $\Delta d_{\text{виб}}$  – изменение скорости износа изоляции якорной обмотки из-за вибраций со стороны пути (механический износ);  $\Delta d_{\text{ТМ2}}$  – 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;  $\Theta_n$  – предельно-допустимая температура класса нагревостойкости изоляции;  $\tau_{yi}$  – среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды;  $\tau_i$  – время движения по  $i$ -тому элементу профиля пути;  $T$  – тепловая постоянная ТЭМ;  $\Delta t_{\text{вя}}$  – среднее превышение температуры вентилирующего воздуха над температурой окружающей среды;  $\vartheta_v$  – температура окружающей среды;  $\Delta t$  – колебания температуры перегрева обмотки якоря около среднего значения;  $U$  – напряжение на зажимах ТЭМ;  $a_v$  – уровень вертикальных вибраций от пути;  $e_v$  – абсолютная влажность воздуха.

### 3.5. Влагоперенос в изоляции ТЭМ

В тяговых электрических машинах, ввиду особых эксплуатационных условий, практически постоянного происходит перенос тепла и влаги в изоляции [77, 78]. При изменении режима работы ТЭМ, или параметра окружающей среды, происходит нарушение термодинамического равновесия, что приводит к новому равновесному состоянию. Для обеспечения необходимой безотказности ТЭМ на электровозе необходимо использование наиболее перспективных методов управления температурно-влажностным режимом, таких как контроль за режимом эксплуатации электровоза при

разных токовых нагрузках, а также возможность адаптирования конструкции тяговых машин к разным микроклиматическим условиям.

Необходимо отметить, что до сих пор не существует единых терминологии и обозначений в теории тепло - и массопереноса, включая и классификацию распределения материалов на группы и на формы связи влаги с материалом.

В зависимости от преобладания формы связи могут резко меняться и электрофизические характеристики увлажненного материала. Влага в виде монослоя влияет на диэлектрическую проницаемость только за счет электронной и атомной поляризации [79].

Рассмотрим некоторые группы электроизоляционных материалов с этой точки зрения.

Слоистые пластики и лакоткани — в основном капиллярно-пористые тела, для которых характерна преимущественно физико-механическая связь влаги в макро - и микрокапиллярах. По классификации М. М. Михайлова материалы такого типа можно отнести к материалам, для которых характерна неактивированная сорбция в процессе термовлагодарения.

Эластомеры – в основном коллоидные тела (или квазикапиллярно-пористые), для которых характерна физико-химическая осмотическая связь влаги с материалом. Эластомеры также следует отнести к материалам, для которых характерна осмотическая сорбция, не подчиняющаяся закону Генри.

Знание форм и видов связи влаги с электрической изоляцией помогает объяснять многие явления, связанные с увлажнением электроизоляционных материалов

Изоляционные конструкции ТЭМ представляют собой капиллярно-пористые системы, реагирующие на малейшие изменения влажности и температуры окружающей их среды. Воздействие данных изменений можно оценить в зависимости от уровня и времени приложенной нагрузки.

Исследования тепло – влагопереноса различных тел широко освещены в большом количестве трудов [55, 64, 77, 78, 79, 82, 106 - 116]. По результатам

многочисленных исследований установлено, что в состоянии равновесия температура тела приблизительно равна температуре воздуха, а давление пара воды в материале равно давлению водяного пара в воздухе. Данное явление называют равновесным удельным влагосодержанием или равновесной влажностью. При этом равновесная влажность изоляции зависит от метода достижения равновесия, а также температуры и влажности окружающего воздуха, что достигается путем десорбции или сушки в случаях отдачи влаги из изоляции, и путем сорбции или увлажнения при ее поглощении. Отмечено, что капиллярно-пористая структура обмоток изоляции ТЭМ может собирать в большом количестве водяной пар, находящийся в окружающем воздухе.

В изоляционные конструкции входят различные растворимые в воде вещества, что приводит к снижению парциального давления водяного пара над раствором. Это приводит к изменению сорбционной способности изоляции. В момент применения токовой сушки внутри изоляции возникает градиент давления влажного воздуха. Это вызывает возникновение дополнительного переноса влаги и тепла ввиду гидродинамического движения пара и жидкости. В большинстве случаев при этом резко увеличиваются микротрещины и поры на поверхности изоляции, через систему эффузивного натекания воздуха.

Влагоперенос в изоляции обмоток тяговых электрических машин описывается системой дифференциальных уравнений, представленной ниже:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial \tau} &= K_{11} * \nabla^2 u + K_{12} * \nabla^2 T + K_{13} * \nabla^2 P + K_{14} * \nabla^2 V ; \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} &= K_{21} * \nabla^2 u + K_{22} * \nabla^2 T + K_{23} * \nabla^2 P + K_{24} * \nabla^2 V ; \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} &= K_{31} * \nabla^2 u + K_{32} * \nabla^2 T + K_{33} * \nabla^2 P + K_{34} * \nabla^2 V ; \\ \frac{\partial V}{\partial \tau} &= K_{41} * \nabla^2 u + K_{42} * \nabla^2 T + K_{43} * \nabla^2 P + K_{44} * \nabla^2 V ,\end{aligned}\tag{3.37}$$

где коэффициенты  $K_{ij} * (ij = 1,2,3)$  равны:

$$K_{11} = a_m; \quad K_{12} = (a_{m1}^T + a_{m2}^T); \quad K_{13} = \frac{k_p}{\rho_0};$$

$$K_{21} = \frac{a_m * r * \varepsilon}{c}; \quad K_{22} = a + \frac{a_m * r * \varepsilon * \delta}{c}; \quad K_{23} = \frac{a_m * r * \varepsilon * \delta_p}{c}; \quad (3.38)$$

$$K_{31} = -\frac{a_m * \varepsilon}{c_p}; \quad K_{32} = -\frac{a_m * \varepsilon * \delta}{c_p}; \quad K_{33} = a_p - \frac{a_m * \varepsilon * \delta}{c_p}$$

$$K_{14} = K_{24} = K_{34} = K_{44} = \frac{T}{(V_{\text{разн}}^{\text{кон}} - V_{\text{разн}}^{\text{нач}})}$$

где  $a_m$  - коэффициент диффузии влаги;

$a_m^T$  - коэффициент термодиффузии влаги;

$k_p$  - согласно уравнения:  $j_p = -k_p * \nabla P$  коэффициент фильтрационного переноса влаги;

$\delta_p$  - согласно уравнения  $\delta_p = k_p / a_m * \rho_0$  относительный коэффициент фильтрационного потока влаги;

$a_p$  - согласно уравнения  $a_p = \frac{k_p}{c_p * \rho_0}$  коэффициент конвективной фильтрационной диффузии;

$c_p$  - согласно уравнения  $c_p * dp = d(u_1 + u_4)$  коэффициент емкости влажного воздуха в пористом теле.

Уравнение  $\frac{\partial u}{\partial \tau} = K_{11} * \nabla^2 u + K_{12} * \nabla^2 T + K_{13} * \nabla^2 P$  состоит из следующих

составляющих:  $\frac{\partial u}{\partial \tau}$  - локальное изменение переноса влаги в изоляции обмоток

ТЭМ во времени;  $u$  - степень увлажнения изоляции ТЭМ;  $T$  - температура увлажненной изоляции ТЭМ;  $P$  - давление окружающего воздуха;

$\nabla^2$  - коэффициент, зависящий от геометрических размеров изоляционных конструкции;  $K_{11} = a_m$  - коэффициент диффузии влаги ( $a_m = a_{\text{ткка}} + a_{\text{mk}}$ ;

$a_m^T = a_{\text{ткка}}^T + a_{\text{mk}}^T$ );  $\delta$  - относительный коэффициент термодиффузии

$$\delta = \frac{a_m^T}{a_m} = \frac{\delta_{\text{кап}} * a_{\text{ткка}} + \delta_k * a_{\text{mk}}}{a_{\text{ткка}} + a_{\text{mk}}}$$

Коэффициенты  $a_m$  и  $\delta$  являются определяющими по влагосодержанию и температуре в переувлажненной изоляции электрических машин.

В зависимости от влагопереноса (перенос влаги или жидкости) определяется характер изменения коэффициента  $a_m$ . При повышении класса нагревостойкости изоляции ТЭМ данный коэффициент в значительной степени повышается, а при большом количестве накопленной влаги становится постоянным.

Коэффициент диффузии достаточно точно описывается эмпирической формулой

$$\frac{a_{mo}}{a_m} + A * \rho_o * U = 1, \quad (3.39)$$

где коэффициенты  $a_{mo}$ ,  $A$  - являются постоянными и определяются опытным путем.

Изменение коэффициента  $a_{mo}$  определяется согласно формулы:

$$\frac{a_{mo}}{a_{oo} * B} = \left(\frac{T}{1000}\right)^n \quad (3.40)$$

где  $a_{oo}$  - имеет неизменное значение.

В соответствии с эмпирической формулой диффузии

$$a_m = \frac{a_{mo}}{1 - A * \rho_o * U}. \quad (3.41)$$

Объединив ее с формулой определения коэффициента  $a_{mo}$  получаем

$$a_m = \frac{a_{oo} * B}{1 - A * \rho_o * U} * \left(\frac{T}{1000}\right)^n. \quad (3.42)$$

При условии, что коэффициент  $K_{12} = a_m \cdot \delta$ , то:

$$K_{12} = a_m * \frac{a_m^T}{a_m} = a_m^T. \quad (3.43)$$

Коэффициент термодиффузии влаги определяется уравнением

$$\delta = \frac{a_m^T}{a_m} = \frac{j}{a_m * \rho_o * \nabla t} - \frac{dU}{dt}. \quad (3.44)$$

При гигротермическом равновесии коэффициент термодиффузии влаги равен термоградиентному коэффициенту, что характеризуется отсутствием влагообмена ( $j=0$ ),

$$\delta = -\frac{dU}{dt} = \delta_p. \quad (3.45)$$

Увеличение термоградиентного коэффициента изоляции происходит до достижения определенного максимального значения. Характер изменения коэффициента  $\delta_p$  зависит от структуры изоляции, а также распределения капиллярной влаги. При этом наличие газовых включений в изоляции приводит к ее неоднородному нагреву.

Определение коэффициента  $\delta_p$  производится по формуле, представленной ниже

$$\delta_p = \frac{3T_k * \sigma_o^{-1} * (U_{\max} - U) * d\sigma}{2T_o (1 + U_{\max}) * (1 + U) dT}, \quad (3.46)$$

где  $T_k$  – максимально допустимая температура влаги в структуре изоляции;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного растекания влаги при температуре  $T_o$ ;

$U_{\max}$  – максимальное количество накопленной в изоляции влаги.

Коэффициент  $K_{12}$  определяется по формуле

$$K_{12} = a_m * \delta_p = a_m * C_m * \theta_T, \quad (3.47)$$

где  $C_m$  – удельная влагоемкость изоляции;

$\theta_T$  – изменение влагопереноса в зависимости от температуры изоляции.

В результате нагревания влаги в отдельно взятых слоях переувлажненной изоляции возникает парообразование и как следствие избыточное давление в ее структуре. Ввиду вышесказанного определение коэффициента  $K_{13}$  выводится из формулы

$$K_{13} = \frac{k_p}{\rho_0}, \quad (3.48)$$

где  $k_p$  - коэффициент фильтрационного переноса влаги, определяемый из-за избыточного давления в структуре изоляции по формуле

$$k_p = \frac{j_p}{\nabla \rho}. \quad (3.49)$$

Сушка изоляции нагретым воздухом производится при температуре  $t_c$  не менее  $100^\circ\text{C}$ . При этом коэффициент  $k_p$  характеризуется молярным переносом водяного пара под действием градиента давления в изоляции.

В результате итоговое уравнение для определения тепло- влагопереноса определяется по уравнению

$$\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\rho^2 \nabla^3}{j_p} + a_m \nabla^2 * (U + \delta T). \quad (3.50)$$

При использовании дифференциального оператора Лапласа для геометрических размеров изоляции уравнение принимает вид

$$\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial \tau} = a_m * (U_x'' + U_y'' + U_z'') + a_m * \delta * (T_x'' + T_y'' + T_z'') + \frac{\nabla \rho^2 * (P_x'' + P_y'' + P_z'')}{j_p}. \quad (3.51)$$

При этом потребное количество тепла, необходимое для испарения влаги определяется по формуле

$$r \frac{\partial m_b}{\partial \tau} = r * m_o * \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (3.52)$$

где  $r$  - удельная теплоотдача, необходимая для испарения влаги, равная сумме удельной теплоты испарения жидкости и теплоты процесса увлажнения ( $r = r_{ж} + r_c$ ).

Удельное значение теплоты при парообразовании определяется с помощью критерия Ребиндера, который зависит от удельной теплоты испарения влаги и удельной теплоемкости влажного тела.

Критерий превращения жидкости в пар описывается формулой

$$\varepsilon = \frac{d_i u}{du}. \quad (3.53)$$

Тогда влияние влагосодержания на удельную теплоемкость твердого тела с определенной погрешностью можно описать функцией

$$c = c_0 + c_\varepsilon * u. \quad (3.54)$$

В уравнении

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = K_{31} * \nabla^2 u + K_{32} * \nabla^2 T + K_{33} * \nabla^2 P, \quad (3.55)$$

где  $K_{31} = -\frac{a_m * \varepsilon}{c_p}$ ;  $K_{32} = -\frac{a_m * \varepsilon * \delta}{c_p}$ ;  $K_{33} = a_p - \frac{a_m * \varepsilon * \delta}{c_p}$ , коэффициенты

определяются следующими уравнениями:

$c_p$  - коэффициент теплопроводности влажного пористого тела

$$c_p = \frac{d(u_1 + u_2)}{d_p}; \quad (3.56)$$

$a_p$  - коэффициент конвективной диффузии

$$a_p = \frac{k_p}{c_p \cdot \rho_0}. \quad (3.57)$$

В результате сопряженная система линейных уравнений, основанная на теории диффузионно-фильтрационного влагопереноса в увлажненной изоляции ТЭМ, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial \tau} &= a_m ((U_x'' + U_y'' + U_z'') + \delta (T_x'' + T_y'' + T_z'')) + \frac{\nabla \rho^2 (P_x'' + P_y'' + P_z'')}{j_p} \\ \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial \tau} &= a_m \varepsilon (r \frac{U_x'' + U_y'' + U_z''}{C} + \delta_p Er \frac{P_x'' + P_y'' + P_z''}{C}) + \frac{aC + a_m \varepsilon \delta (T_x'' + T_y'' + T_z'')}{C}; \quad (3.58) \\ \frac{\partial V(x, y, z)}{\partial \tau} &= a_m (U_x'' + U_y'' + U_z'') + \delta * (P_x'' + P_y'' + P_z'') + \frac{a_m * (T_x'' + T_y'' + T_z'')}{C_p}; \\ \frac{\partial P(x, y, z)}{\partial \tau} &= \frac{a_p C_p - a_m \varepsilon \delta_p (P_x'' + P_y'' + P_z'')}{C_p} - a_m \varepsilon (\frac{U_x'' + U_y'' + U_z''}{C_p} + \frac{\delta (T_x'' + T_y'' + T_z'')}{C_p}). \end{aligned}$$

Вышеуказанной системой уравнений можно оценить нагрев и охлаждение изоляции ТЭМ, а также процессы сорбции и десорбции в процессе эксплуатации электрических машин. Изменение объема  $V$  обмоток ТЭМ в течение времени  $\tau$  происходит под действием трех сил: изменения температуры  $t$ ; влагосодержания  $U$ ; давления  $P_m$ . В результате действия этих сил происходит постоянное увеличение или уменьшение объема изоляции



ТЭМ, вследствие которого происходит обильное образование микротрещин и микропустот в изоляции.

Физико-механическая связь, обусловленная увлажнением изоляции, приводит к резкому снижению ее диэлектрических свойств в виду образования на поверхности изоляции микро- и макро-капилляров, которые впоследствии приводят к ее пробоям. При этом электрический пробой обычно происходит при весьма высоких напряженностях электрического поля ( $10^6$  В/см) при появлении в диэлектрике дополнительной электронной электропроводности. При определении предпробивного состояния изоляции механизм электрического пробоя увязывают именно с электронными процессами.

Обычно пробой изоляции можно представить в две стадии – первая это нарушение электрической прочности изоляции, вторая – необратимое разрушение диэлектрика. При этом для второй стадии пробоя, характерно возникновение тепловых процессов, с нагреванием влаги в канале, который образовался в результате воздействия первой стадии. Отмечается, что тепловое разрушение изоляции при ее электрическом пробое обычно является не причиной отказа, а его следствием. Ввиду вышесказанного крайне необходимо уравнение кинетики изменения объема обмоток ТЭМ с минимальным количеством констант, а также возможностью его решения теоретическим и экспериментальным путем [80].

По результатам анализа кривых роста и скорости роста объема изоляции ТЭМ в процессах тепло- влагопереноса отмечено, что кривые роста объема изоляции обмоток ТЭМ, как и кривые сорбции и десорбции имеют схожий S-образный вид. Построение вышеуказанных является наиболее простым и удобным способом анализа кинетики данного процесса. Использование графического метода позволяет увидеть трапецеидальный вид кривых скорости роста объема изоляции ТЭМ, имеющий вид S-образной кривой

$$K_m (V_{\text{разн}}^{\text{кон}} - V) * (V - V_{\text{разн}}^{\text{нач}}) = \pm \frac{dV}{d\tau}. \quad (3.59)$$

Данное уравнение учитывает перенос тепла и влаги в изоляции ТЭМ в зависимости от изменения текущего объема  $V$  от начального  $V_{разн}^{нач}$  или конечного значения  $V_{разн}^{кон}$ . Данное уравнение позволяет оценить увеличение или уменьшение объема изоляции, в зависимости от соотношения объемов между ее сухой и увлажненной частью.

Решение при  $\tau = 0$  и  $V = V_n$  представлено ниже

$$\tau = \frac{1}{K_m (V_{разн}^{кон} - V_{разн}^{нач})} * \ln \frac{(V_n - V_{разн}^{нач}) * (V_{разн}^{кон} - V)}{(V_{разн}^{кон} - V_n) * (V - V_{разн}^{нач})}. \quad (3.60)$$

Для определения параметров  $V_{разн}^{кон}$  и  $K_m$  необходимо решить систему уравнений процесса переноса тепла и влаги, отражающих взаимосвязь между изменением объема изоляции и тепловлагообменом. Согласно уравнения энергетического баланса, с учетом процесса нагрева изоляции ТЭМ

$$\frac{\tau}{T} = \ln \frac{\theta_{max}}{\theta_{min}}, \quad (3.61)$$

где  $T$  – постоянная времени нагревания и остывания обмоток ТЭМ;

$\theta$  - максимально допустимое превышение температуры обмоток ТЭМ над температурой окружающего воздуха.

На основании геометрических и физических характеристик, для расчета постоянной времени нагревания  $T$  можно использовать формулу

$$T = \frac{\sum_1^n C_i \tau_{ин}}{\Delta P_{из}}, \quad (3.62)$$

где  $C_i$  – теплоемкость изоляции ТЭМ, Дж/°С;

$\tau_{ин}$  – максимально допустимое превышение температуры изоляции ТЭМ в номинальном режиме работы, °С;

$\Delta P_{из}$  – потери мощности в изоляции ТЭМ, Вт.

По результатам проведенных исследований, между изменением объема изоляции ТЭМ и тепло- и влагообменом в изоляции справедливо уравнение кинетики процесса переноса тепла и влаги в изоляции

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \frac{1}{K_m (V_{разн}^{кон} - V_{разн}^{нач})} \\ \frac{\theta_{max}}{\theta_{min}} = \frac{(V_n - V_{разн}^{нач}) * (V_{разн}^{кон} - V)}{(V_{разн}^{кон} - V_n) * (V - V_{разн}^{нач})} \end{array} \right. \quad (3.63)$$

### 3.6. Влияние увлажнения изоляции на безотказность ТЭМ электровозов, эксплуатируемых на полигонах с СПКУ

Исследованиями сотрудников ВНИИЖТа В.И. Карташевым и Н.Д. Сухопрудским выявлено, что увеличение массы воды в изоляции зависит от степени ее старения и времени увлажнения (рисунок 3.8) [81]. Нами установлено, что при различии температуры обмоток ТЭМ и окружающего воздуха более 6-8<sup>0</sup> С процесс увлажнения изоляции идет медленно.

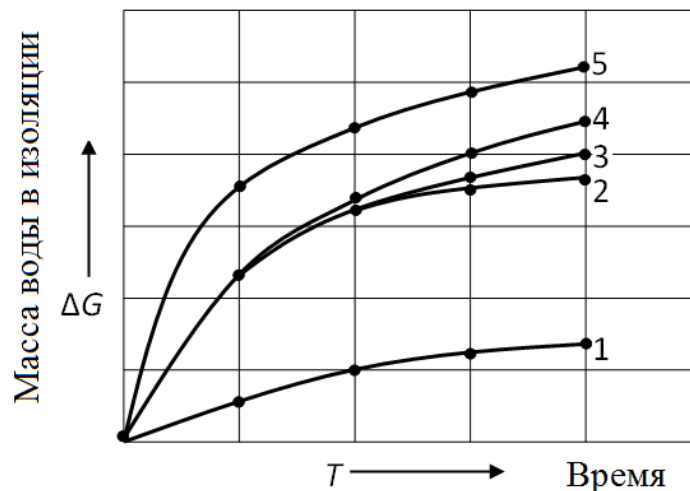


Рисунок 3.8. Характер накопления влаги в изоляции ТЭМ в зависимости от времени увлажнения и степени ее старения

После сближения температуры обмоток и воздуха интенсивность впитывания изоляцией обмоток влаги из окружающего воздуха возрастает в десятки раз. Качественно пропитанная изоляция 1 (рисунок 3.8) увлажняется незначительно. Существенно большее увлажнение наблюдается у постаревшей изоляции 2-5. Чем более пориста изоляция, тем больше влаги она поглощает.

Выявлено, что хорошо пропитанная изоляция имеет содержание влаги около 0,3 % от массы изоляции. При этом изоляция упруга и ее электрическая прочность соответствует нормам. Переувлажнение состарившейся изоляции резко снижает ее электрическую прочность. Установлено, что на переувлажнение (снижение электрической прочности) изоляции ТЭМ существенно влияет время нахождения электровоза в нерабочем состоянии. На рисунке 3.9 и рисунке 3.10 приведены зависимости безотказности ТЭМ и изоляции тяговых машин типа НБ-418К6 электровозов ВЛ80 депо Абакан, Боготол КярЖД, депо Вихоревка, Северобайкальск ВСЖД и НБ-514 электровозов депо Абакан КярЖД и Нижнеудинск, Вихоревка, Северобайкальск ВСЖД, соответственно, от времени нахождения в нерабочем состоянии.

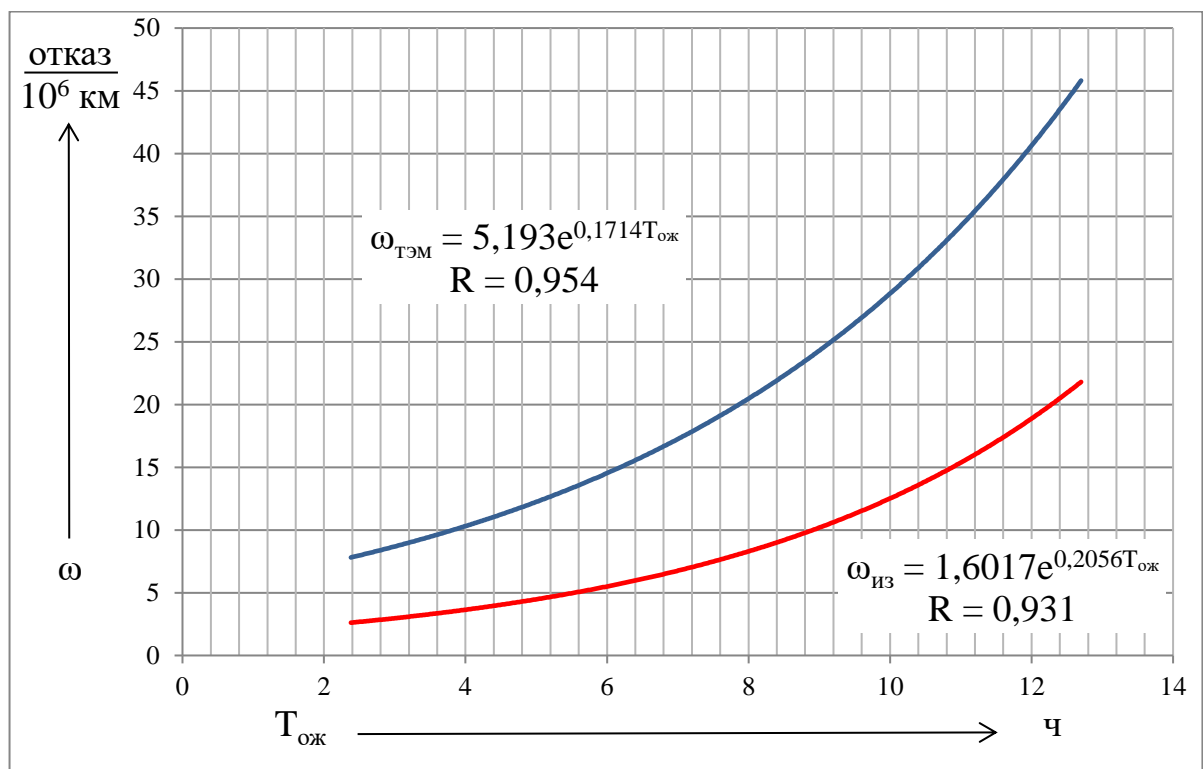


Рисунок 3.9. Зависимости безотказности ТЭМ электровозов ВЛ80 от времени нахождения в нерабочем состоянии

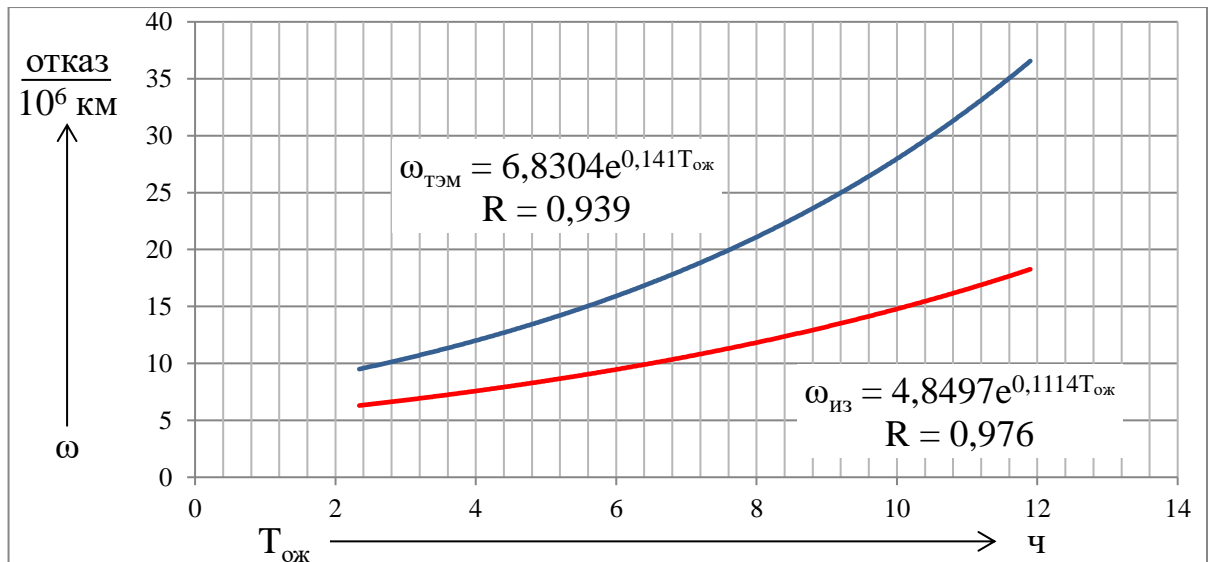


Рисунок 3.10. Характер изменения безотказности ТЭМ электровозов ВЛ85 от времени нахождения в ожидании работы

Приведенные на рисунок 3.9 - 3.10 зависимости указывают на существенное влияние времени ожидания работы электровозами на безотказность ТЭМ и их изоляции.

Безотказность ТЭМ электровозов полигонов с СПКУ Сибири и северного Урала существенно ниже среднесетевой. Математические модели позволяют прогнозировать безотказность изоляции обмоток ТЭМ при известных профиле участка эксплуатации, скорости движения поездов и степени нагрузки электровозов [82]. Определение безотказности изоляции, особенно в зимние периоды эксплуатации, обусловлено тем, что до половины отказов ТЭМ приходится на пробой изоляции якоря и остовных обмоток. Анализ повреждений изоляции ТЭМ одного из основных депо электровозов постоянного тока ОАО РЖД позволил определить параметр потока таких отказов в течение нескольких лет эксплуатации. Установлено, что поток отказов тяговых машин по годам был неравномерный. Безотказность электрических машин снижалась в годы с более суровыми метеорологическими условиями зимних периодов. Эмпирический ряд распределения пробега ТЭМ до пробоя изоляции или до ее смены при заводских ремонтах представлен гистограммой. Вид гистограммы позволил предположить, а расчеты показали, что распределение хорошо

характеризуется композицией законов Пуассона и экспоненциального с параметрами  $\lambda_p = 4,515$  и  $\lambda_{\text{exp}} = 0,2$ , соответственно. Сходимость распределения с композицией законов проверена по критерию Пирсона и оказалась вполне достаточной. Основной задачей построения композиции являлось определение весов  $\alpha$  и  $(1-\alpha)$ , которое выполнено графически. При  $\alpha = 0,195$  и  $(1-\alpha) = 0,805$  эмпирический ряд хорошо описывается композицией распределения рассматриваемых законов.

$$f_k(x) = 0,195(0,2e^{-0,2x}) + 0,805\left(\frac{4,515^m}{m!} \cdot e^{-4,515}\right). \quad (3.64)$$

Теоретическая кривая экспериментального ряда позволяет объяснить характер и причины отказов ТЭМ по пробой изоляции, а также определить пути повышения ее безотказности. Известно, что распределение Пуассона описывает закономерности появления внезапных отказов в сложных системах, а экспоненциальное распределение типично для систем с различными  $\lambda_{\text{exp}}$  характеристиками в случае, когда влиянием износа можно пренебречь. Пробой изоляции ТЭМ обусловлен кинетикой необратимых физических явлений, происходящих за счет ее нагрева и воздействия случайных факторов, особенно увлажнения. Динамика отказов изоляции ТЭМ по временам года показывает, что наиболее часто пробой изоляции наблюдаются в месяцы с низкой температурой окружающей среды, а также в снегопады и метели. В период работы электровозов изоляция ТЭМ не подвергается опасности увлажнения, так как переход влаги от холодного воздуха к нагретой изоляции затруднен. Непосредственное попадание снега в ТЭМ в период метелей при установке с наружной стороны жалюзи снегозащитных фильтров, как показал опыт, почти исключено.

Таким образом, увлажнение изоляции ТЭМ возможно при постановке охлажденного электровоза в отапливаемый цех и оттепелях в период нахождения его в запасе. Причиной увлажнения является то, что на поверхности якоря и катушек полюсов при охлаждении воздуха до точки росы образуются капельки влаги или твердый кристаллический налет (иней). На

рисунке 3.11 приведены данные замеров отношения емкостей изоляции ТЭМ  $C_2/C_{50}$  во время опытных поездок в зимний период. Электровозы отправлялись в поездки после ожидания работы не менее двенадцати часов при температуре воздуха от минус  $10^{\circ}\text{C}$  и ниже. Полученные опытные точки позволили получить область состояний изоляции в процессе работы ТЭМ в указанных условиях. При нагревании изоляции ТЭМ в первые тридцать – сорок минут движения с поездом после продолжительного нахождения электровоза в нерабочем состоянии происходит ее увлажнение. Далее свойства изоляции после прогрева восстанавливаются [83].

Подобные явления объясняются тем, что замерзшая влага в твердом состоянии не вызывает снижения электрической прочности изоляции ТЭМ. При нагревании влага переходит из твердого состояния в жидкое, вызывая увлажнение и снижение электрической прочности изоляции. В дальнейшем влага переходит в газообразное состояние (испаряется) и электрическая прочность изоляции ТЭМ восстанавливается.

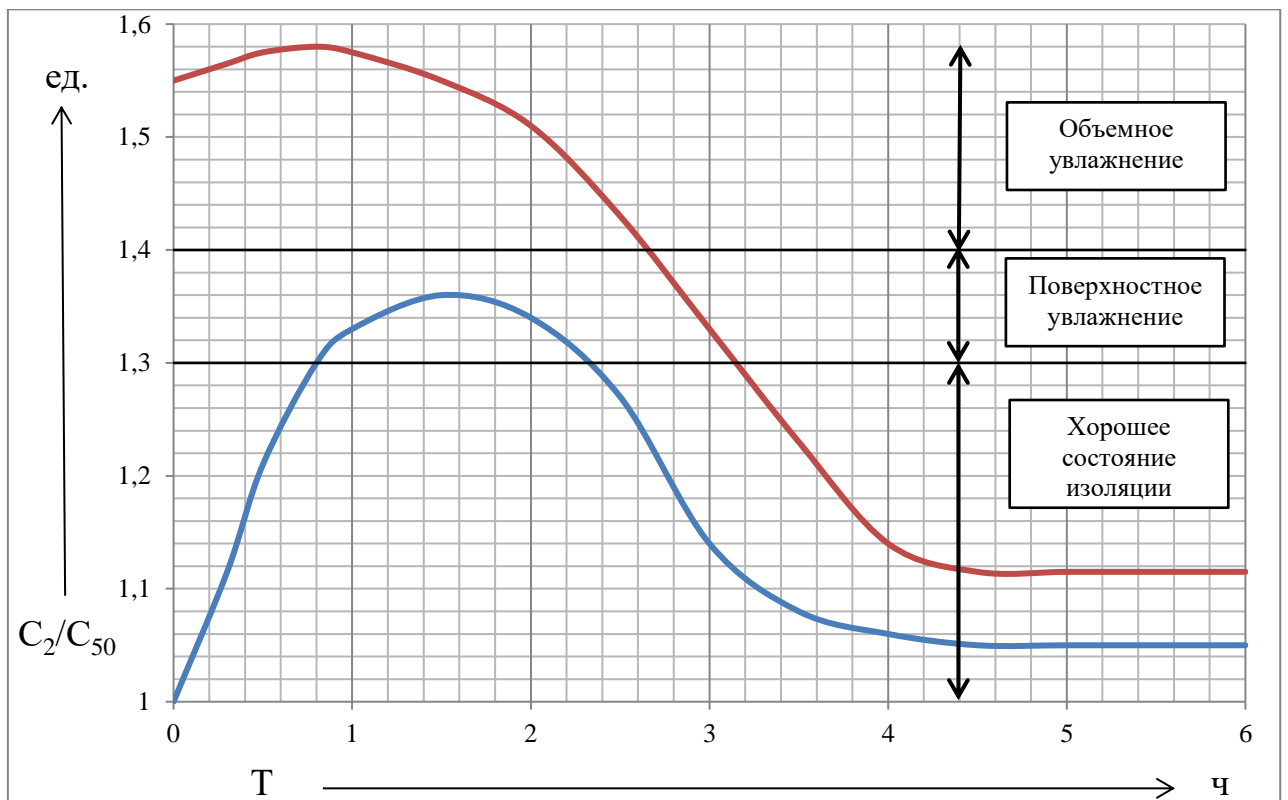


Рисунок 3.11. Характер изменения увлажненности изоляции ТЭМ с разной степенью старения при ее нагревании в процессе движения с поездом после продолжительного нахождения электровоза в нерабочем состоянии

Анализ экспериментальных данных, длительные наблюдения и исследование законов распределения наработки до отказа изоляции ТЭМ позволяют предложить следующую модель отказа. Около одной пятой отказов происходит вследствие повышения и пиков напряжения (рисунок 3.12). Эта модель соответствует экспоненциальному распределению наработки изоляции до отказа, если принять, что уровень ее электрической прочности незначительно изменяется в процессе эксплуатации. Четыре пятых отказов обусловлены кратковременными снижениями электрической прочности изоляции из-за переувлажнения по различным причинам, особенно в зимнее время (рисунок 3.13).

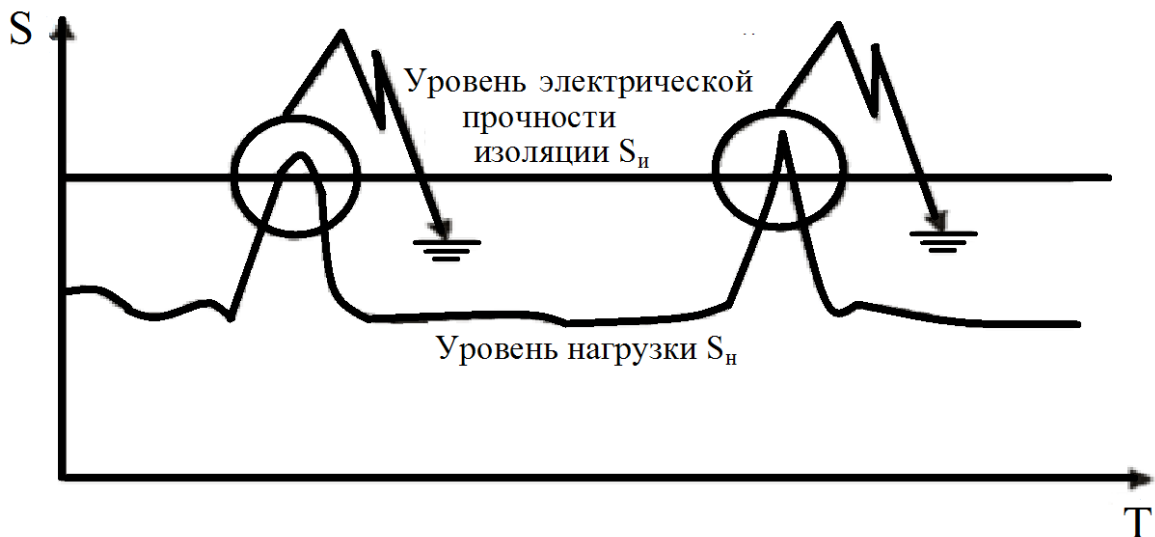


Рисунок 3.12. Пробой изоляции ТЭМ из-за повышения и пиков напряжения



Рисунок 3.13. Пробой изоляции ТЭМ вследствие снижений электрической прочности изоляции из-за переувлажнения



Таким образом, описание общего характера явлений композиционной моделью отказов совместно с анализом причин повреждений изоляции ТЭМ показывают, что пробой изоляции возникает в основном от воздействия случайных факторов и в меньшей степени - от постепенного старения изоляции или до смены ее при заводских ремонтах.

Гистограмма распределения пробега ТЭМ до пробоя электровозов переменного тока ВЛ85 центрального направления Транссиба и расчеты выявили, что около одной трети отказов произошли из-за повышения и пиков напряжения. Две же трети пробоев изоляции ТЭМ обусловлены снижением электрической прочности при переувлажнении.

Аналогичная гистограмма распределения пробега ТЭМ до смены изоляции электровозов ВЛ85 северного направления Транссиба, длительные наблюдения и исследование законов распределения наработки до отказа изоляции ТЭМ показали, что значительная часть пробоев изоляции (до 90%) вызвана переувлажнением (снижением электрической прочности) из-за продолжительного нахождения электровозов в нерабочем состоянии. Установлено, что во время отстоя электровоза после сближения температуры обмоток ТЭМ и воздуха, скорость поглощения и масса влаги, поглощенной из окружающего воздуха изоляцией, увеличивается в десятки раз по сравнению с работой ТЭМ под нагрузкой. Переувлажнение изоляции ТЭМ может наступить за несколько часов ожидания работы электровозом (рисунок 3.14).

На рисунке:  $I$  – сила тока ТЭМ;  $\tau$  - превышение температуры обмотки;  $G_v$  - масса воды в изоляции тяговых машин электровоза с разной степенью старения;  $E_{пр}$  – электрическая прочность ТЭМ, с наиболее поврежденной изоляцией.

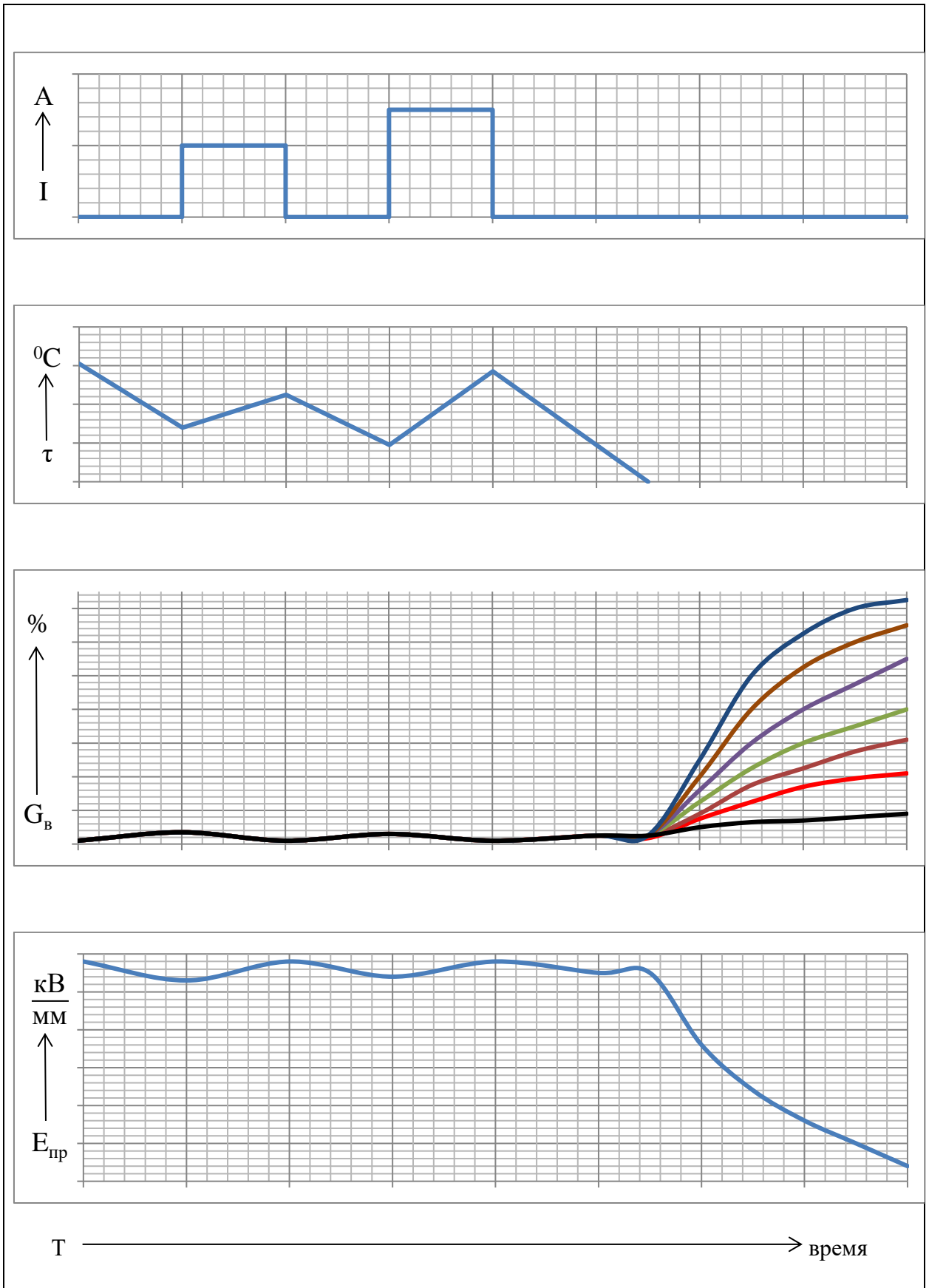


Рисунок 3.14. Динамика снижения электрической прочности изоляции ТЭМ при продолжительном нахождении электровоза в нерабочем состоянии

## **4. РЕАЛИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

### **4.1. Задачи, необходимые для обеспечения необходимого уровня безотказности ТЭМ электровозов**

В предыдущих главах диссертационной работы приведены результаты исследований безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях, которые показывают, что на тяговые электрические машины приходится от 20 до 50 % отказов. Из них не менее половины отказов ТЭМ вызваны повреждениями изоляции (пробоями или снижениями сопротивления).

Выявлено, что основной причиной пробоя изоляции ТЭМ электровозов перегонов с СПКУ, состарившейся вследствие интенсивного теплового, термомеханического, механического и электрического износа, является резкое снижение ее электрической прочности из-за переувлажнения при длительном ожидании поездов.

Установлено, что наибольшее количество отказов ТЭМ наблюдается в осенний – зимний – весенний периоды эксплуатации. Увеличение количества отказов в зимний период эксплуатации вызвано низкой температурой окружающей среды, когда из-за пониженного содержания влаги в воздухе изоляция ТЭМ становится хрупкой [84]. Это приводит к ускоренному образованию микропор и трещин в изоляции.

Отмечено, что наибольшая вероятность пробоя изоляции имеет место у ТЭМ электровозов, отправляющихся на затяжные подъемы после длительного отстоя в ожидании работы.

По результатам исследования влияния эксплуатационно-природных факторов на безотказность изоляции ТЭМ разработаны мероприятия, которые позволяют обеспечить необходимую безотказность ТЭМ электровозов,

эксплуатируемых в СПКУ (рисунок 4.1). Цель предлагаемых мероприятий заключается в выдаче электровозов под поезда с качественной изоляцией ТЭМ.



Рисунок 4.1. Мероприятия по предотвращению выдачи на линию электровозов с переувлажненной изоляцией ТЭМ

#### 4.2. Методики контроля увлажнения изоляции ТЭМ электровозов

В настоящее время на отечественных электровозах отсутствует бортовой контроль влажности и температуры изоляции ТЭМ, что не позволяет обеспечивать требуемый уровень ее электрической прочности в эксплуатации. Контроль температуры обмоток ТЭМ производится лишь на нескольких электровозах с асинхронным приводом. Как показывает опыт эксплуатации, оснащение бортовыми мегаомметрами для контроля сопротивления изоляции ТЭМ электровозов 2ЭС6, 2ЭС5К, 3ЭС5К не предотвращает пробой изоляции тяговых электрических машин.

При обслуживании электровозов в сервисных компаниях во время проведения технических обслуживаний и текущих ремонтов первого и

второго объема используются мегаомметры. Критерием оценки состояния изоляции ТЭМ в этом случае является абсолютное значение ее сопротивления  $R_{из}$  [85].

При подготовке материалов диссертационной работы нами было измерены сопротивление и увлажненности изоляции более четырехсот ТЭМ электровозов: ВЛ85, ВЛ80Р, ВЛ80С, ВЛ60К Красноярской, Восточно-Сибирской и Забайкальской железных дорог. При этом установлено, что несмотря на необходимое значение сопротивления изоляции, согласно Руководств по эксплуатации на тяговые машины, величина увлажненности изоляции ТЭМ, измеренная приборами контроля влажности, указывала на низкую электрическую прочность, при котором возможен пробой изоляции в случае воздействия номинального напряжения.

Таким образом, величина сопротивления изоляции не является объективным критерием ее состояния. При этом, как было отмечено в эксплуатации, наблюдаются многократные случаи, когда ТЭМ с наименьшим сопротивлением на одном и том же электровозе показывает намного более высокую безотказность в сравнении с другими. Контроль состояния изоляции ТЭМ по ее сопротивлению при прохождении электровозами технических обслуживаний через трое суток и более не позволяет своевременно и объективно определить пред отказное состояние изоляции.

Установлено, что во время нахождения электровозов в ожидании работы, скорость и объем влаги в изоляции ТЭМ абсорбированной из окружающего воздуха, в момент сближения температуры воздуха и обмоток ТЭМ, увеличивается в десятки раз в сравнении с ТЭМ, находящимися под токовой нагрузкой [86, 87]. В среднем, в зависимости от состояния изоляции, переувлажнение изоляции наступает через 4 - 6 часов отстоя электровоза, а при включенных вентиляторах тяговых машин это время составляет менее 2 часов.

Объективная оценка увлажнения изоляции ТЭМ может быть получена при использовании неразрушающих методов контроля 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, значение которого стремится к минимально установившемуся значению по экспоненциальному закону) и измерению объемного увлажнения по методу «емкость-время» (по измерению соотношения абсорбционной емкости, отражающей процесс накопления в структуре изоляции заряда абсорбции к геометрической емкости).

Система определения состояния изоляции основана на измерении тангенса угла диэлектрических потерь также позволяет определить состояние изоляции. Метод основан на определении частичного разряда в изоляции, и в случае рассеивания дополнительной энергии от изоляции, ввиду ее переувлажнения или разрушения структуры, возникает резкий рост тангенса угла. В настоящий момент на железнодорожном транспорте определение данным методом увлажненности изоляции производят только при проведении текущих ремонтов в объеме ТР-3 при помощи прибора «Вектор-2000» [87, 88, 89]. При этом на более крупных видах ремонта, где производится частичная или полная замена изоляционных конструкций, применение виброакустических методов контроля состояния изоляции не обязательно и практически на всех отсутствует. Основными недостатками определения увлажненности изоляции методом измерения тангенса угла диэлектрических потерь в эксплуатации являются то, что данный метод требует обязательной выкатки ТЭМ из под электровоза, а также «Вектор-2000» и подобные приборы имеют значительные габариты, массу и высокую стоимость. Кроме того, при измерении тангенса угла, невозможно определить точную причину преждевременного старения изоляции (разрушение или переувлажнение).

Анализ безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях, свидетельствует об отсутствии объективного и своевременного контроля увлажненности изоляции ТЭМ электровозов, отправляющихся с тяжеловесными поездами на участки с

лимитирующими подъемами, где локомотивные бригады вынуждены использовать высшие позиции регулирования и, соответственно, напряжение на зажимах ТЭМ. Как показывает опыт эксплуатации это многократно приводило к пробоям изоляции ТЭМ с пониженной электрической прочностью из-за переувлажнения. Для обеспечения работоспособности ТЭМ необходимо своевременное объективное измерение увлажненности изоляции и, при необходимости, проведение сушки обмоток ТЭМ с пониженной электрической прочностью изоляции импульсно-прерывистым методом, обеспечивающим сохранность изоляции при минимальном времени восстановления ее работоспособности [90, 91, 92].

#### **4.3. Комплексная система контроля увлажненности изоляции ТЭМ электровозов**

В основе работы комплексной системы заложено измерение сопротивления изоляции, с учетом уменьшения тока абсорбции во времени, а также исследование электрофизических свойств изоляции по методу «емкость-время», позволяющего производить измерения степени объемного увлажнения после длительного времени отстоя локомотива в ожидании работы (дает точные значения измерений при температуре обмоток ТЭМ от максимально достигаемых до 0 °С) [93, 94].

Предлагаемая комплексная система контроля увлажнения изоляции ТЭМ необходима для проведения оперативного и объективного контроля увлажненности с целью оценки уровня электрической прочности изоляции ТЭМ электровозов.

Это подтверждается анализом гистограммам измерений объемного увлажнения в депо Иркутск-Сортировочный, проведенными на ТЭМ электровозов, находящихся в ожидании работы (рисунки 4.2 – 4.4). На гистограммах объемного увлажнения ТЭМ черной линией обозначено

допустимое значение увлажнения. Как видно из представленных гистограмм, на каждом электровозе ТЭМ существенно отличаются по отношению абсорбционной емкости к геометрической, которое характеризует накопление влаги изоляцией и, соответственно, уровень ее электрической прочности.

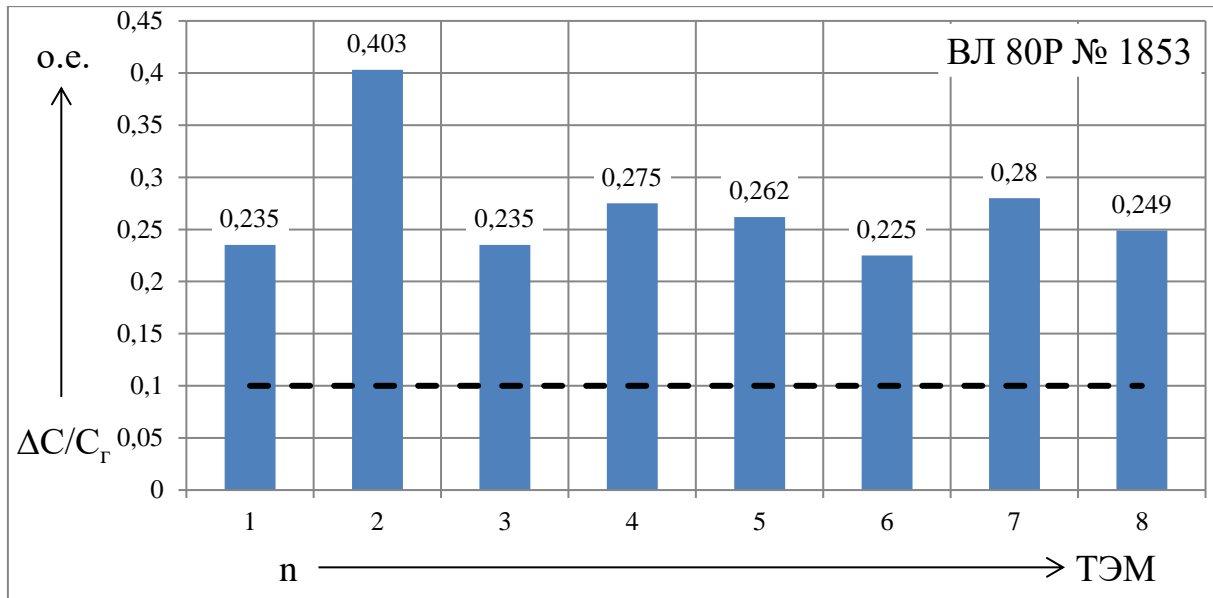


Рисунок 4.2. Гистограмма объемного увлажнения изоляции ТЭМ электровоза ВЛ80Р № 1853

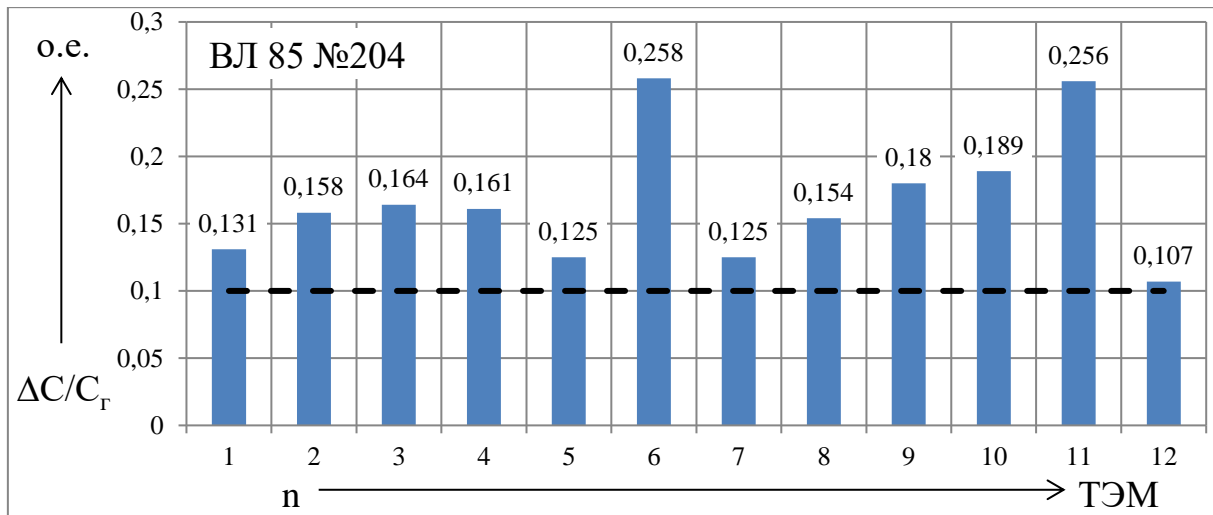


Рисунок 4.3. Гистограмма объемного увлажнения изоляции ТЭМ электровоза ВЛ85 № 204



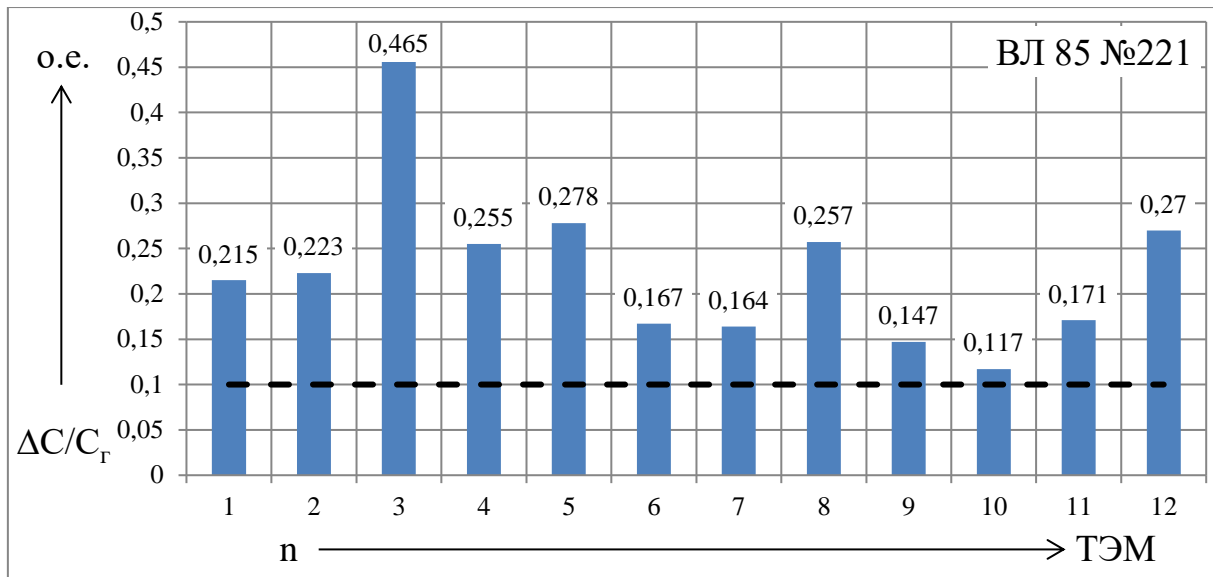


Рисунок 4.4. Гистограмма объемного увлажнения изоляции ТЭМ электровоза ВЛ85 № 221

Комплексная система определения увлажненности изоляции ТЭМ содержит: измеритель сопротивления поверхностной увлажненности МІС-2500; блок контроля объемной влажности изоляции (для определения увлажнения по методу «емкость-время»); инфракрасный термометр «Кельвин» (для измерения температуры передних лобовых частей, которая необходима для приведения температуры изоляции к 20 °С). Затем производится пересчет коэффициента абсорбции и результатов объемного увлажнения, полученных в момент измерения к их значениям при температуре 20 °С.

Для регистрации результатов измерений увлажненности и температуры изоляции используется встроенный интерфейс измерительных приборов, который позволяет фиксировать до 1000 результатов.

Так как вес необходимых измерительных приборов системы контроля увлажненности не превышает 7 кг - система может обслуживаться одним человеком. Время выполнения измерений ТЭМ электровоза после длительного отстоя одним квалифицированным специалистом не превышает 25 - 30 минут

Принцип работы предлагаемой комплексной системы следующий:

приборами «MIS-2500» и «КЕЛЬВИН» производятся поочередные измерения величины поверхностного увлажнения изоляции и, через смотровые люки, температуры обмоток ТЭМ испытуемого электровоза. Результаты измерений вводится во внутренние энергонезависимые ячейки памяти. Затем производятся поочередные измерения величины объемного увлажнения разрабатываемым прибором. Результаты измерений абсорбционной и геометрической емкости также вводятся во внутреннюю энергонезависимую память прибора.

Затем полученные значения считываются на компьютер и приводятся в специально созданной для этого программе к температуре 20 °С. Данные об увлажненности изоляции ТЭМ и времени восстановления изоляции представлены в таблице 4.1 и таблице 4.2.

Таблица 4.1

Результаты измерения увлажненности изоляции ТЭМ  
электровоз ВЛ80С №2056

Дата	№№ ТЭМ	$K_{a_{20^{\circ}C}}$	$\left(\frac{\Delta C}{C_r}\right)_{20^{\circ}C}$	Заключение о состоянии изоляции
	1	$\geq 2$	$< 0,1$	увлажненность в норме
	2	1,3-1,9	$< 0,1$	поверхностное увлажнение
	3	$> 2$	$> 0,1$	объемное увлажнение
	4	$< 1,3$	$> 0,1$	объемное и поверхностное увлажнение
	5	$< 1,3$	$> 0,1$	объемное и поверхностное увлажнение
	6	$\geq 2$	$< 0,1$	увлажненность в норме
	7	$> 2$	$> 0,1$	объемное увлажнение
	8	1,3-1,9	$< 0,1$	поверхностное увлажнение

Как представлено в таблице 4.1 для каждой ТЭМ электровоза выдается заключение о степени ее увлажнённости по результатам которой принимается

решение о сушке изоляции (таблица 4.2).

Таблица 4.2

Время восстановления изоляции ТЭМ электровоза

$K_{a_{20^{\circ}\text{C}}}$	$\left(\frac{\Delta C}{C_T}\right)_{20^{\circ}\text{C}}$	Время выполнения сушки
$\geq 2$	$< 0,1$	Увлажненность изоляции в норме
1,3-1,9	$< 0,1$	1,5-2 часа
$> 2$	$> 0,1$	3,5-4 часа
$< 1,3$	$> 0,1$	не менее 6 часов

Значения времени приведены для электрокалориферной сушки в соответствии с Руководством по эксплуатации на тяговые машины. При использовании другого метода сушки (токовая сушки или сушка импульсно - прерывистыми методами) необходимо изменить исходные данные в программе. При этом вне зависимости от способа сушки изоляции, во избежание ее преждевременного старения, рекомендуется измерять ее температуру первый раз через час работы нагревателя, а далее через каждые полчаса.

Основным отличием предлагаемой комплексной системы определения увлажненности изоляции (рисунок 4.5) от существующих является использование двух методов неразрушающего контроля с возможностью определения времени ее осушения. В то же время существующий метод контроля состояния изоляции мегаомметром по величине активного сопротивления, применяемый в настоящее время, не позволяет определить пред отказное состояние изоляции, степень увлажнения, оптимальный метод и режим ее сушки [95, 96].

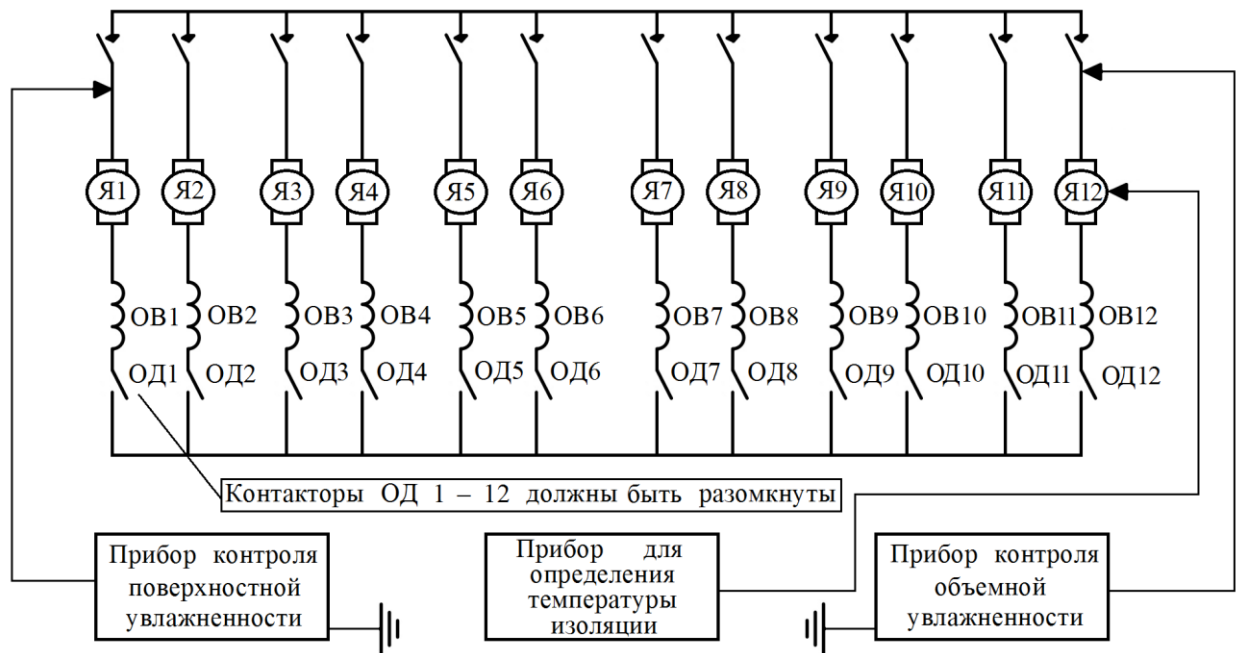


Рисунок 4.5. Структурная схема комплексной системы контроля увлажненности изоляции ТЭМ электровоза ВЛ85

#### 4.4. Функциональная схема комплексной системы контроля увлажненности изоляции ТЭМ

Работа предлагаемой комплексной системы контроля увлажненности изоляции тяговой электрической машины, как было описано ранее, основано на мониторинге изоляции с использованием явления абсорбции, а также контроле изоляции по емкостным характеристикам методом «емкость - время». На данное изделие был получен патент на полезную модель № 148398 «Устройство для измерения увлажнённости изоляции тяговых электродвигателей» от 30 октября 2014 г. Она относится к устройствам для определения электрических свойств силового оборудования, преимущественно для измерения степени увлажненности изоляции электрических машин, и может быть использована как для контроля увлажненности изоляции тяговых, так и вспомогательных машин электроподвижного состава. Ниже представлена функциональная схема комплексной системы контроля увлажненности изоляции ТЭМ (рисунок 4.6),

а также ее описание.

Комплексная система контроля увлажнения изоляции ТЭМ состоит из трех основных блоков.

В блок 1 входит: аккумулятор АК1; генератор ГР1, необходимый для преобразования напряжения аккумулятора АК1 из постоянного в переменное; многокаскадный умножитель напряжения УН1; измерители тока ИТ и напряжения ИН, проходящие через изоляцию тяговой электрической машины; фильтр Ф1, обеспечивающий фильтрацию от электрических помех; аналого-цифровой коммутатор АЦК1; схема управления СУ1; управляющий модуль УМ1.1, обеспечивающий измерение тока проходящего через изоляцию на 15 и 60 секунде после подачи напряжения тяговую электрическую машину, также УМ1.1 задает алгоритмы расчета и пересчета коэффициента абсорбции при текущей и номинальной температуре изоляции ТЭМ; генератор тактовых импульсов ГТИ1 и счётчик делитель СД1, позволяющие формировать импульсы, подаваемые в СУ1 через каждые 15 секунд; устройство индикации канала измерения УИК1; аналого-цифровой преобразователь АЦП1; блок расчета коэффициента абсорбции при температуре изоляции на момент измерения БР1; блок пересчета коэффициента абсорбции на температуру БП1 20 °С; устройство индикации тока УИ1.

При сборке схемы измерения поверхностной влажности изоляции ТЭМ в блоке 1, включается питание элементов схемы, а также высоковольтных стабилизированных источников питания (АК1, ГР1, УН1). В этот момент напряжение ВИП прикладывается на изоляцию ТЭМ, с последующим включением питания ГТИ1 и СД1. Это приводит к формированию

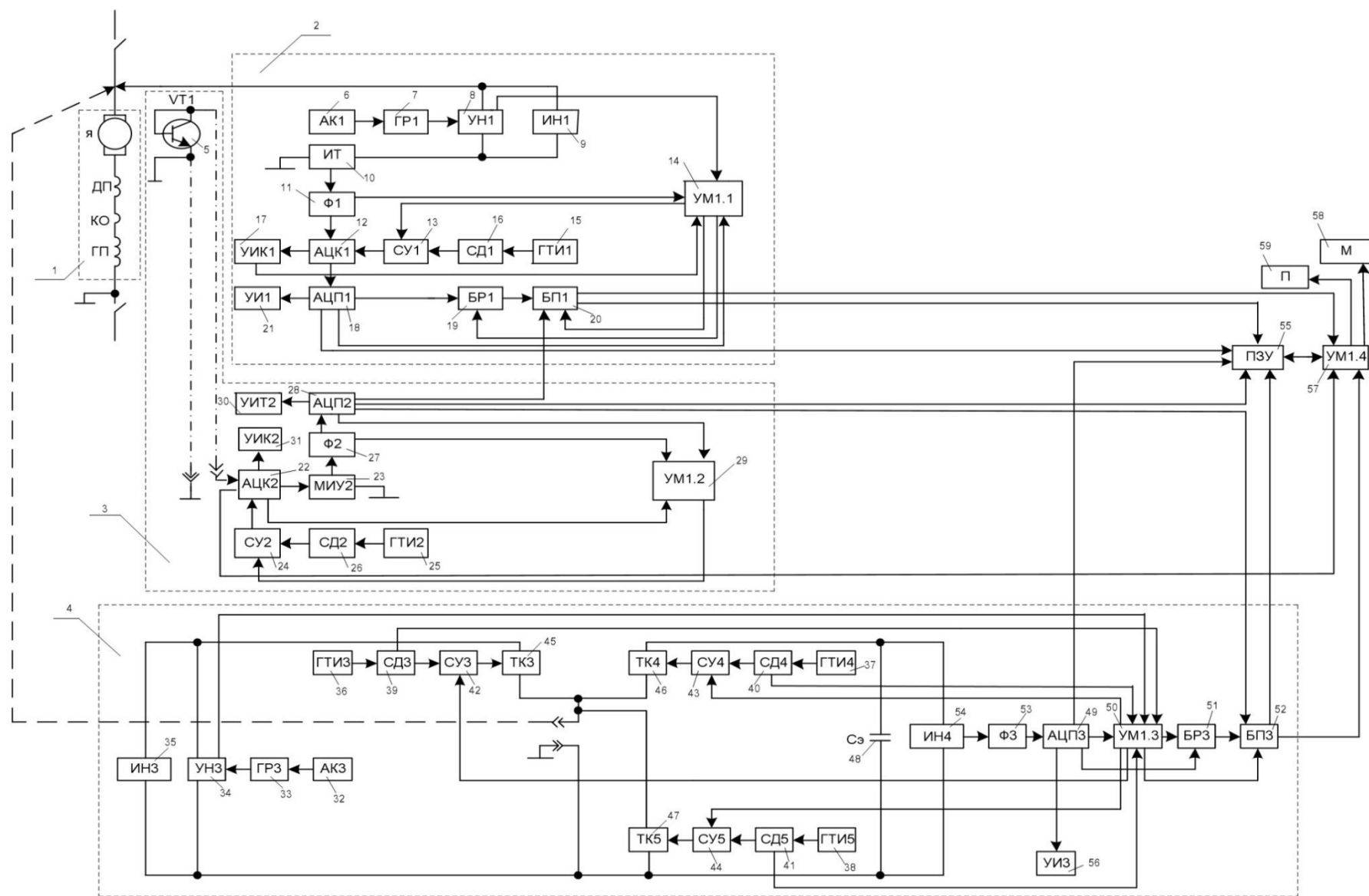


Рисунок 4.6. Функциональная схема комплексной системы контроля увлажненности изоляции ТЭМ

одиночных импульсов с частотой 0,067 Гц (один импульс в 15 секунд) в схему управления СУ1. После этого второй и пятый импульсы подадут на вход сигналы на включение АЦК1. С измерителя ИТ, отфильтрованный фильтром Ф1 аналоговый сигнал с информацией о величине тока проходящего через изоляцию ТЭМ, поступает на вход АЦП1 для преобразования в цифровой сигнал. Далее с выхода АЦП1 данные о токах поступают в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) находящиеся в управляющем модуле УМ1.1, с последующей передачей информации в блок расчета коэффициента абсорбции БР1, а также на устройство индикации тока УИ1. В БР1 в момент определения поверхностной увлажнённости изоляции ТЭМ данные поступают о двух значениях тока, измеренных через 15 и 60 секунде от момента приложения испытательного напряжения. Данные с блока БР1 далее передаются в блок пересчета БП1, где определяется коэффициент абсорбции при температуре приведенной к 20 °С. С блока БП1 данные поступают в ПЗУ и в управляющий модуль УМ1.4 находящийся в блоке 3, описание которого будет представлено ниже.

Блок 2 состоит из датчика температуры VT1; аналого-цифровой коммутатора АЦК2, необходимого для поочередного подключения датчиков температуры обмоток ТЭМ локомотивы к устройству для измерения температуры МИУ2; схему управления коммутатором СУ2; генератора тактовых импульсов ГТИ2; счётчик – делителя СД2, необходимого для формирования импульсов, подаваемых в СУ2; фильтра Ф2; аналого-цифрового преобразователя АЦП2, управляющего модуля УМ1.2; устройства индикации температуры УИТ2; устройства индикации канала измерения УИК2.

Работа блока 2 заключается в следующем. При включении питания схемы температуры обмоток ТЭМ локомотива автоматически происходит ее сбор. С момента включения питания ГТИ2 и СД2 начинают формироваться импульсы, направляемые в схему управления СУ2. Далее, со схемы управления СУ2 импульсы поступают на коммутатор тяговых электрических

машин АЦК2 и измерительному устройству температуры изоляции МИУ2, одновременно с чем на устройстве индикации коммутатора УИК2 высвечивается номер испытуемой ТЭМ локомотива. Аналоговый сигнал с датчика температуры VT1, отфильтрованный от электрических помех фильтром Ф2, поступает в АЦП2 и преобразуется в цифровой сигнал. Далее данные о температуре изоляции обмоток ТЭМ поступают в устройство индикации температуры УИТ2 находящиеся в управляющем модуле УМ1.2, после чего блок пересчета приводит расчетные значения абсорбционной емкости к температуре 20 °С и записывается в запоминающее устройство ПЗУ.

В составные части блока 3 входят: аккумулятор АК3; генератор ГР3 преобразующий напряжение АК3 из постоянного в переменное; умножитель напряжения УН3 обеспечивающий постоянным выходное напряжение; измеритель напряжения ИН3 служащий для подачи на изоляцию ТЭМ испытательного напряжения; генераторы тактовых импульсов ГТИ3, ГТИ4, ГТИ5; счетчики-делители СД3, СД4 и СД5, используемые для формирования одиночных импульсов, с их последующей передачей в схемы управления, СУ4 и СУ5 транзисторных ключей ТК3, ТК4, и соответственно ТК5; эталонный конденсатор Сэ; измеритель напряжения ИН4 с эталонным конденсатором; фильтр Ф3; аналого-цифровой преобразователь АЦП3; управляющий модуль УМ1.3 задающий алгоритмы включения транзисторных ключей ТК3 - ТК5, а также алгоритмы расчёта и пересчёта отношения емкостных характеристик при текущей и номинальной температуре в блоках БР3 и БП3; аналого-цифровой преобразователь АЦП3, преобразующий аналоговый сигнал от измерителя напряжения ИН4 отфильтрованный фильтром Ф3; в цифровой, передаваемый в управляющий модуль УМ1.3 с последующим сохранением его в ПЗУ и выводом на устройство индикации УИ3.

Работа блока 3 заключается в следующем. При включении питания схемы устройства для контроля увлажненности изоляции тяговых электрических машин локомотива происходит ее автоматический пуск.



Включается ключ ТК3, в результате изоляция ТЭМ заряжается от источника напряжения УНЗ в течение одной минуты. Далее транзисторный ключ ТК3 выключается и включается ключ ТК4, измеряя емкость изоляции тяговой электрической машины сопоставляя ее с эталонным конденсатором СЭ. При этом емкостные характеристики эталонного конденсатора СЭ измеряются при помощи измерителя ИН4. Полученный аналоговый сигнал преобразуется в цифровой и поступает в ПЗУ через управляющий модуль УМ1.3, а также на устройство индикации УИЗ. Параллельно данные с АЦПЗ подаются в блок БРЗ для расчёта соотношения абсорбционной и геометрической емкостей. При этом для измерения абсорбционной емкости испытуемая изоляция ТЭМ повторно заряжается в течение одной минуты при включённом транзисторном ключе ТК3, после отключения которого, изоляция ТЭМ замыкается накоротко ключом ТК5 для разрядки геометрической емкости изоляции. После отключения транзисторного ключа ТК4 с помощью измерителя напряжения ИН4 определяется напряжение на эталонном конденсаторе. Результаты пересчета коэффициента абсорбции и емкостных характеристик приведенных к 20 °С поступают в ПЗУ, в управляющий модуль УМ1.4 и выводятся на индикаторный монитор М и принтер П с выдачей заключения о степени увлажнения изоляции, а также рекомендациями о режиме сушки изоляции.

#### **4.5. Применение систем температурного контроля изоляции ТЭМ**

Результаты исследований, проведенных при выполнении диссертационной работы показывают, что на температуру нагрева изоляции ТЭМ влияет множество факторов, связанных с эксплуатацией электровоза. В результате точное определение температуры ТЭМ, по значениям основных характеристик тяговой электрической машины (скорости движения электровоза; тока; напряжения контактной сети), даже при условии непрерывного контроля сопротивления изоляции ТЭМ встроены в схему

электровоза мегомметрами не представляется возможным [97, 98]. Для принятия своевременных мер, по предотвращению интенсивного теплового износа изоляции ТЭМ, необходимо оснастить электровозы системой непрерывного контроля изоляции тяговых электрических машин, позволяющей получать информацию о тепловом состоянии изоляции ТЭМ непосредственно в эксплуатации. Это дает возможность обеспечить наиболее полное и точное представление о состоянии изоляции, которое позволит увеличить межремонтные пробеги электровозов.

С учетом воздействия СПКУ эксплуатации ТЭМ электровозов, на основании анализа средств мониторинга температуры, наиболее предпочтительными датчиками температуры являются металлические термосопротивления с линейной характеристикой изменения сопротивления или полупроводниковые термосопротивления с отрицательным (положительным) температурным коэффициентом. Также в качестве датчиков температуры возможно использование термопар, диодов, транзисторов в режиме диода и биметаллических реле-регуляторов, однако их применение приведет к значительному изменению конструкции обмоток ТЭМ. Ввиду того, что температуру якорных обмоток ТЭМ достаточно сложно контролировать, их температуру предлагается определять косвенным способом по температуре неподвижных полюсов или обмоток, по которым протекает тот же ток, что и по якорю [99]. В связи с этим предлагается оценивать состояния нагрева изоляции якорных обмоток по температуре компенсационных.

Предлагаемые системы непрерывного температурного контроля можно условно разделить на две группы: двухуровневые и трехуровневые (рисунок 4.7).

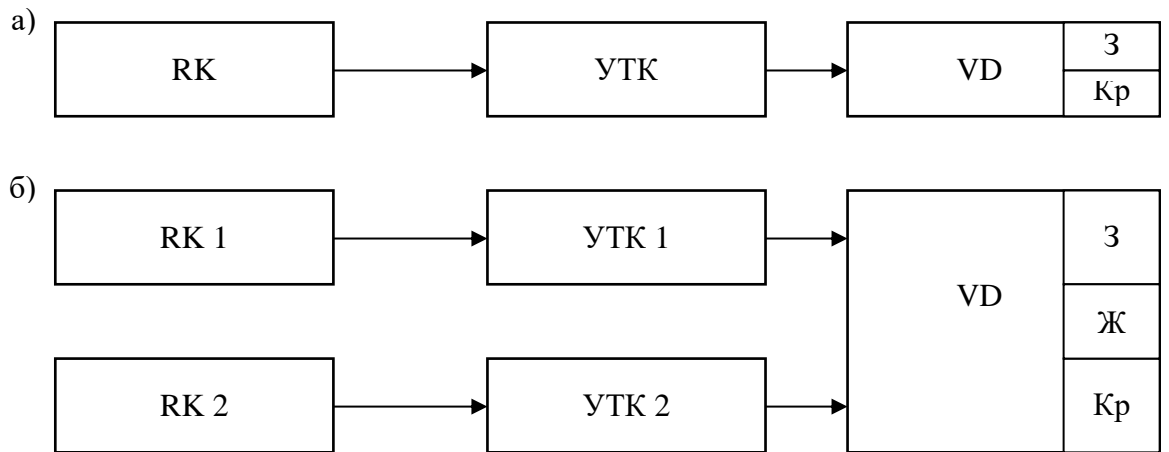


Рисунок 4.7. Двухуровневая (а) и трехуровневая (б) функциональные схемы систем температурного контроля

В схеме: RK, RK 1, RK 2 – датчики температуры ТЭМ, установленные на компенсационной обмотке; УТК – устройства температурного контроля, работа которых заключается в преобразовании сигналов, получаемых от датчиков температуры и последующей выдачи информации на схему визуальной сигнализации; VD – схема визуальной сигнализации о температуре изоляции ТЭМ; З – загорание светодиода зеленого цвета, условно разрешающего эксплуатацию электровоза; Ж – загорание светодиода желтого цвета, предупреждающего о значении температуры изоляции, близкой к предельнодопустимой; Кр – загорание светодиода красного цвета, предупреждающего о превышении допустимого в эксплуатации значения температуры изоляции ТЭМ.

Как видно из рисунка 4.7 основным отличием двухуровневой системы от трехуровневой является информирование локомотивной бригады о значении температуры изоляции, близкой к предельно допустимому значению. При принятии своевременных мер локомотивной бригадой для предотвращения дальнейшего перегрева изоляции, кратковременное превышение допустимого значения не приведет к необратимым последствиям для структуры изоляции. В качестве действий локомотивной бригады, в случаях загорания желтого (красного) сигнализирующего светодиода

предлагается: уменьшение токовой нагрузки на ТЭМ; изменение интенсивности обдува ТЭМ или отключение части ТЭМ.

При применении трехуровневой системы необходимо установка в ТЭМ двух датчиков. Один датчик для определения предельно допустимого значения температуры изоляции, второй на температуру на 15-20 °С менее предельно допустимой.

Современное развитие электронной техники позволяет создавать разнообразные системы мониторинга температуры. Одним из возможных вариантов системы мониторинга является исполнение системы на интегральных микросхемах малой и средней степеней интеграции. Компоненты размещаются на печатных платах. Помимо технических средств, для реализации заданного алгоритма работы и пороговых функций, должны быть разработаны соответствующие алгоритмы для программного обеспечения. В этой системе должны применяться электронные компоненты марок и серий, показавших наиболее высокую надежность при эксплуатации в микропроцессорных системах управления электровозов. Предлагается рассмотреть возможность введения системы температурного контроля в систему микропроцессорного управления электровозами. Ниже представлена микропроцессорная система контроля температуры изоляции ТЭМ, работающая по принципу жесткой логики и опробованная на электровозах в опытной эксплуатации (рисунок 4.8).

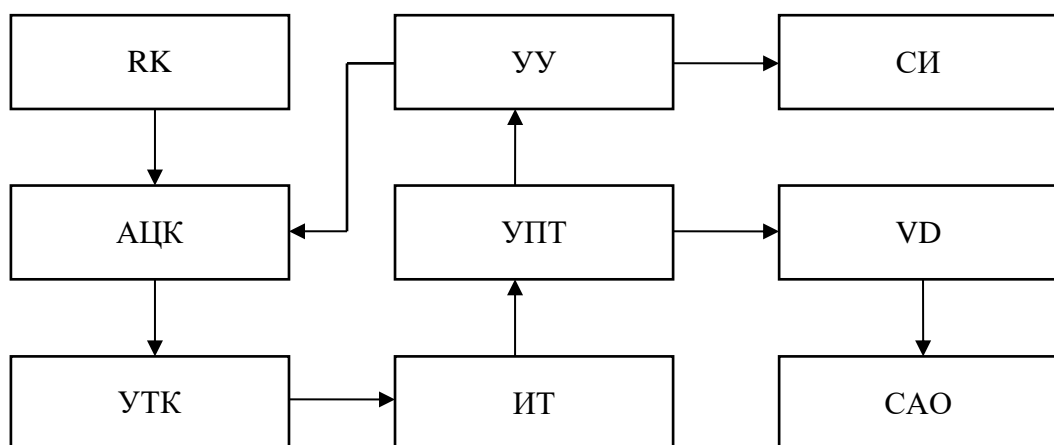


Рисунок 4.8. Функциональная схема температурного контроля ТЭМ

На рисунке 4.8 датчиками температуры РК измеряется температура изоляции ТЭМ. Полученные результаты измерений передаются в аналогово-цифровой коммутатор АЦК, необходимый для проведения опроса датчиков через определенный промежуток времени. Сформированные выходные сигналы с АЦК поступают в устройство теплового контроля УТК с последующей передачей на устройство индикации температуры ИТ и далее в пороговое устройство превышения уровня температуры УПТ. В УПТ происходит циклическая оценка значений выходного сигнала АЦК до тех пор, пока не произойдет превышение заданного в УПТ образцового значения. При увеличении температуры изоляции ТЭМ до предельно допустимого значения УПТ вырабатывает сигнал остановки временного опроса для устройства управления УУ. Устройство управления приостанавливает процесс квантования, соединяя датчик ТЭМ с повышенной температурой через АЦК с УПТ. Одновременно УПТ активизирует визуальную сигнализацию VD и схему аварийного отключения САО ТЭМ, которая начинает отсчет времени до отключения линейного контактора или быстродействующего выключателя ТЭМ с превышением допустимой температуры обмоток изоляции. Из-за остановки АЦК схема индикации СИ информирует локомотивную бригаду о номере перегретого ТЭМ. При снижении температуры отключенного ТЭМ до допустимых значений система разрешает его включение.

Кроме контроля температуры изоляции тяговых электрических машин, необходимо производить контроль температуры и изоляции сглаживающих реакторов СР, так как из-за воздействия высоких токовых нагрузок неоднократно наблюдались случаи их перегрева и пожара. Перегрев изоляции сглаживающего реактора является основной причиной ее преждевременного старения, приводящего к отказу СР и последующей задержке электровоза на линии. Предлагается не разделять цепь контроля одного силового блока, включающего два ТЭМ и сглаживающий реактор.

Ниже приведены предлагаемые схемы непрерывного контроля состояния изоляции ТЭМ и сглаживающих реакторов электровозов,

эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях без микропроцессорных систем управления (рисунки 4.9 - 4.11).

В схемах применены следующие сокращения: СН – источники питания стабилизированного напряжения устройств температурного контроля на 220 В; Т40 (Т41) – понижающие разделительные трансформаторы; УТК – устройства внутренней тепловой защиты ТЭМ и сглаживающих реакторов; VD – световые диоды для информирования локомотивных бригад; РК – датчики температуры, установленные в тяговых электрических машинах.

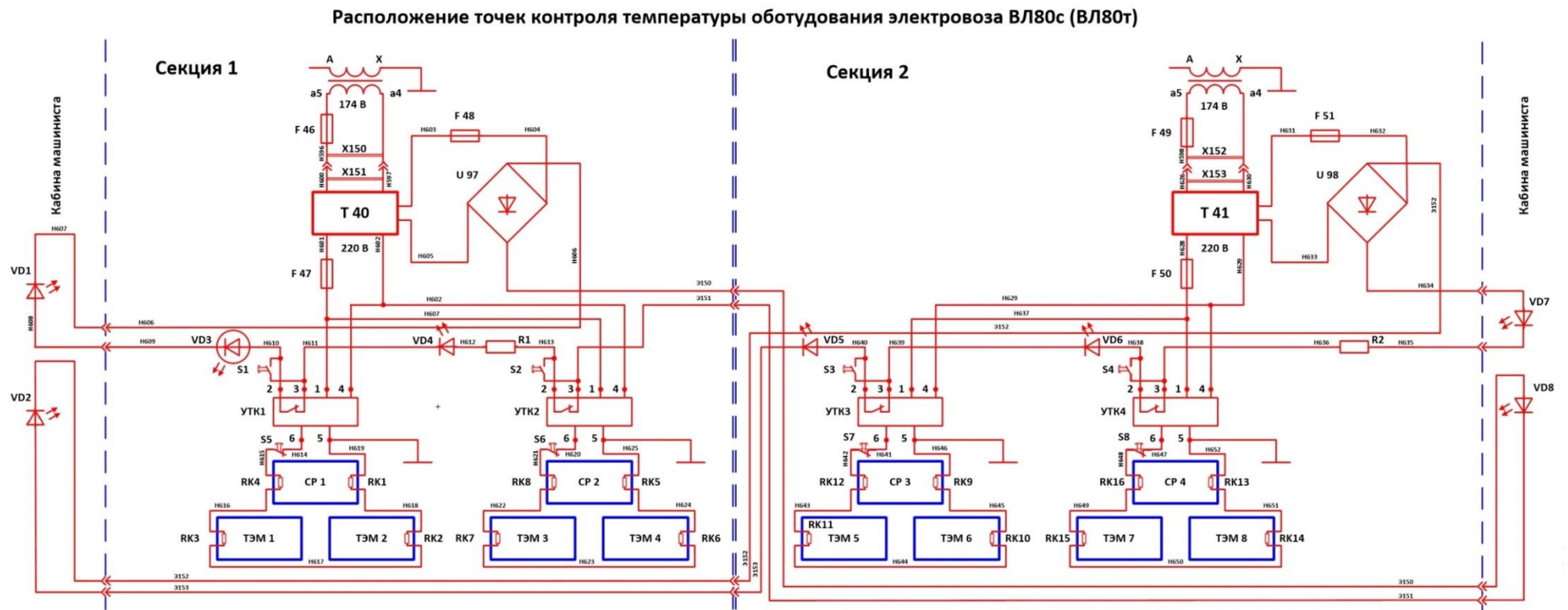


Рисунок 4.9. Схема температурного контроля изоляции ТЭМ и СР электровоза ВЛ80С (Т)

Расположение точек контроля температуры оботудования электровоза ВЛ80Р

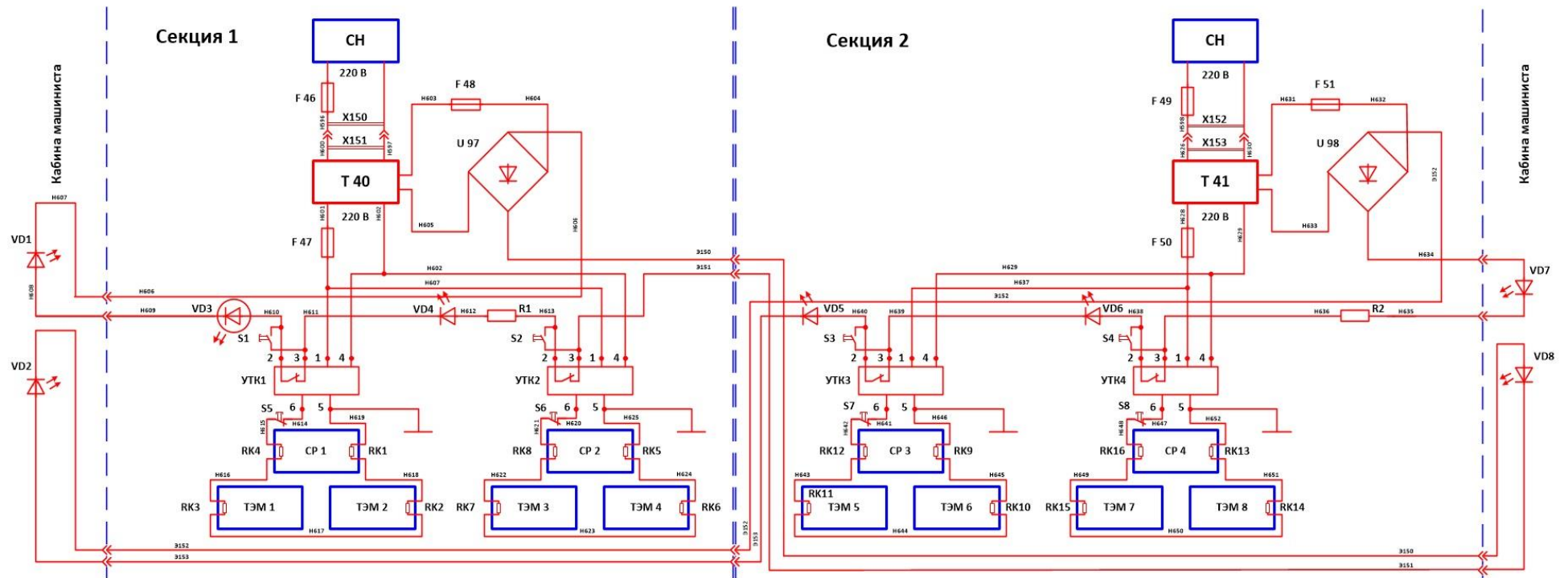


Рисунок 4.10. Схема температурного контроля изоляции ТЭМ и СР электровоза ВЛ80Р



## Расположение точек контроля температуры оботудования электровоза ВЛ85

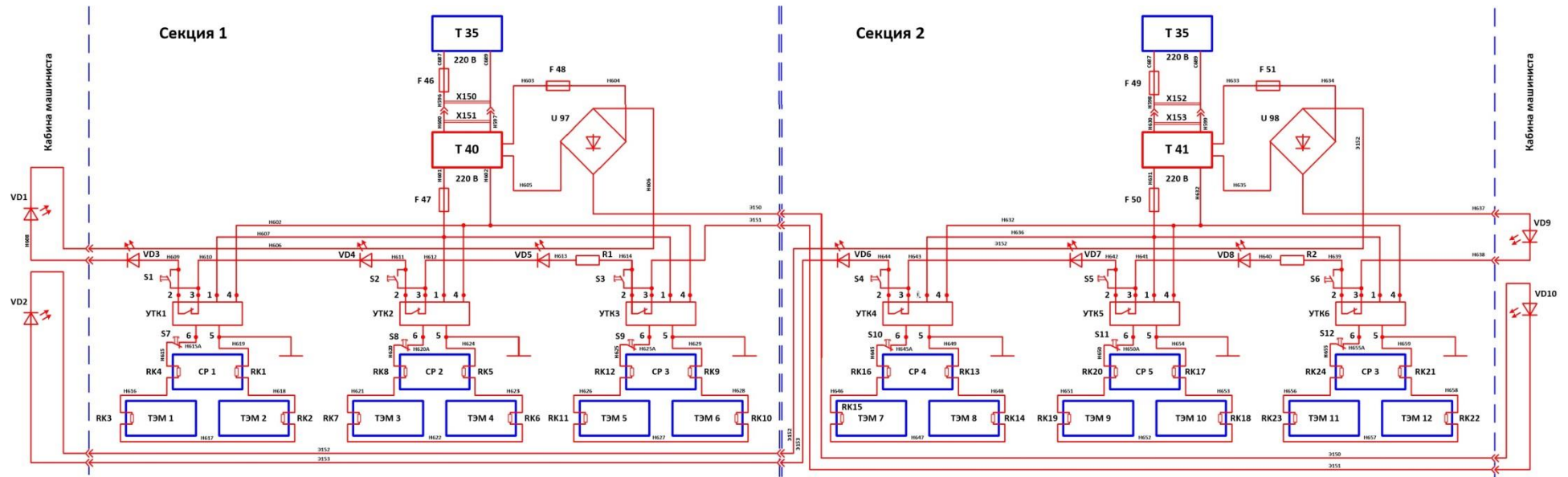


Рисунок 4.11. Схема температурного контроля изоляции ТЭМ и СР электровоза ВЛ85

#### 4.6. Обеспечение необходимого температурно-влажностного режима изоляции ТЭМ электровоза при длительном нахождении в нерабочем состоянии

Анализ данных тепловых испытаний ОАО «ВЭЛНИИ» [100], а также результаты исследований, выполненных при проведении опытных поездок и на тракционных путях депо Иркутск-Сортировочный показали, что при номинальном значении вентилярующего воздуха наиболее интенсивное снижение температуры обмоток ТЭМ наблюдается у якоря (рисунок 4.12). Также выявлено, что сближение температуры окружающего воздуха и температуры изоляции якоря, равное 6 – 8 °С, при котором многократно увеличивается поглощение влаги изоляцией из воздуха, в большинстве случаев наблюдалось за 4–5 часов отстоя электровоза при отключенной вентиляции. При нахождении электровоза в «горячем состоянии» с минимальной токовой нагрузкой во время отцепки от поезда и перемещения на тракционные пути депо возможно обильное переувлажнение изоляции якоря ТЭМ, с резким снижением ее электрической прочности менее чем за 2 часа (рисунок 4.12).

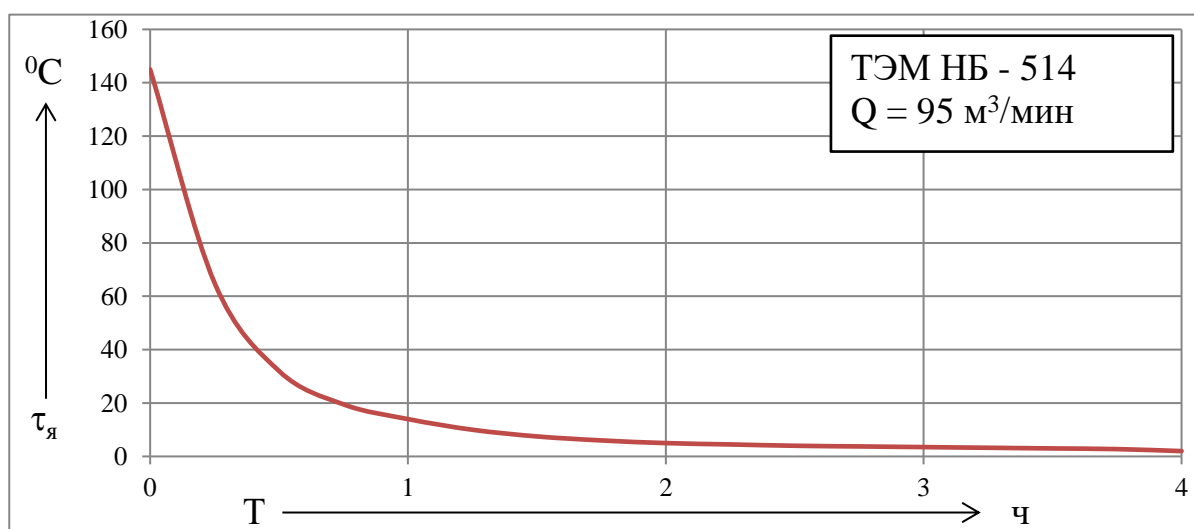


Рисунок 4.12. Остывание якоря ТЭМ при номинальном расходе вентилярующего воздуха

Для предотвращения переувлажнения изоляции тяговых электрических машин во время длительных отстоев электровозов в ожидании работы, а также при колебаниях температуры окружающего воздуха или его большой влажности предлагается производить прогрев ТЭМ. Мощность прогрева должна составлять не менее 1 кВт на 5 т массы тяговой электрической машины. [101, 102, 103]

Для предотвращения выдачи на линию электровозов полигонов с СПКУ, с переувлажненной изоляцией, предлагается производить подогрев ТЭМ электровозов переменного тока, во время ожидания работы, подачей тока на обмотки главных полюсов тяговой электрической машины от выпрямительной установки возбуждения (ВУВ). 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 равномерность подогрева воздуха по всему контуру остова ТЭМ.

В качестве источника энергии, получаемой для подогрева обмоток ТЭМ, предлагается использовать штатную выпрямительную установку возбуждения ВУВ-24, предназначенную для выпрямления и плавного регулирования тока в обмотках возбуждения ТЭМ при электрическом торможении. Выпрямительная установка обеспечивает в длительном режиме работы ток 850 А; ток 20-минутного режима не более 1100 А.

Сопротивление главных полюсов двигателей НБ-514, как основных тяговых электрических машин применяемых в настоящее время на грузовых электровозах переменного тока при температуре плюс 20 °С составляет  $0,0069 \pm 0,000345$  Ом.

Соответственно необходимое значение мощности ТЭМ, в пересчете на один двигатель НБ-514, составляет 1,2 кВт. В результате проведенных расчетов и экспериментов установлено, что при подогреве тяговой машины

ток не должен превышать 390 А, что обеспечивается выпрямительной установкой ВУВ-24 без перегрева ее тиристорov.

На рисунке 4.13 приведены сетки кривых нагревания и остывания главных полюсов тяговой электрической машины НБ-514. Согласно полученных результатов, использование главных полюсов в качестве подогревателей воздуха внутри остова ТЭМ не приведет к их нагреву выше допустимого значения и, как следствие, преждевременному тепловому старению их изоляции.

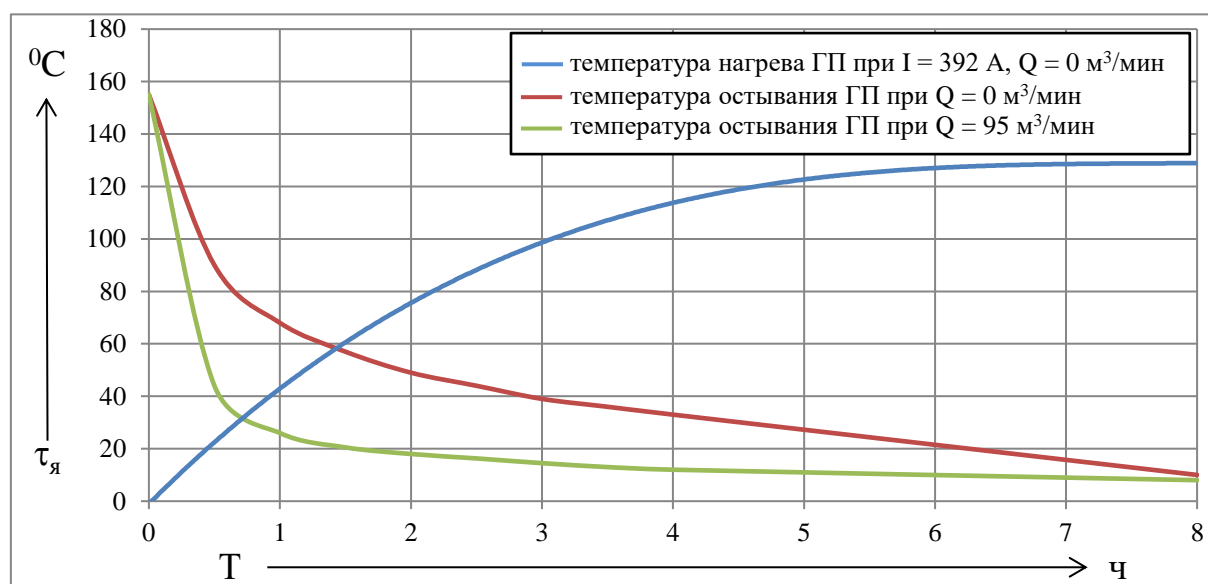


Рисунок 4.13 Сетки кривых нагревания и охлаждения главного полюса ТЭМ

Предполагается установка датчика температуры на остове ТЭМ, срабатывание которого будет происходить при понижении температуры изоляции ниже 40 °С (рисунок 4.14). В случае дальнейшего понижения температуры, это приведет к подаче сигнала на элемент сравнения ЭС. Далее от элемента сравнения сигнал поступает в усилитель, где, после фильтрации и усиления до значения необходимого для включения контактора К 11 сигнал передается на вышеуказанный контактор. За чет включения контактора произойдет запуск заранее отработанного алгоритма, который подаст питание на обмотки возбуждения всех ТЭМ электровоза, позволяющий не допустить превышение температуры обмоток при сушке изоляции ТЭМ.

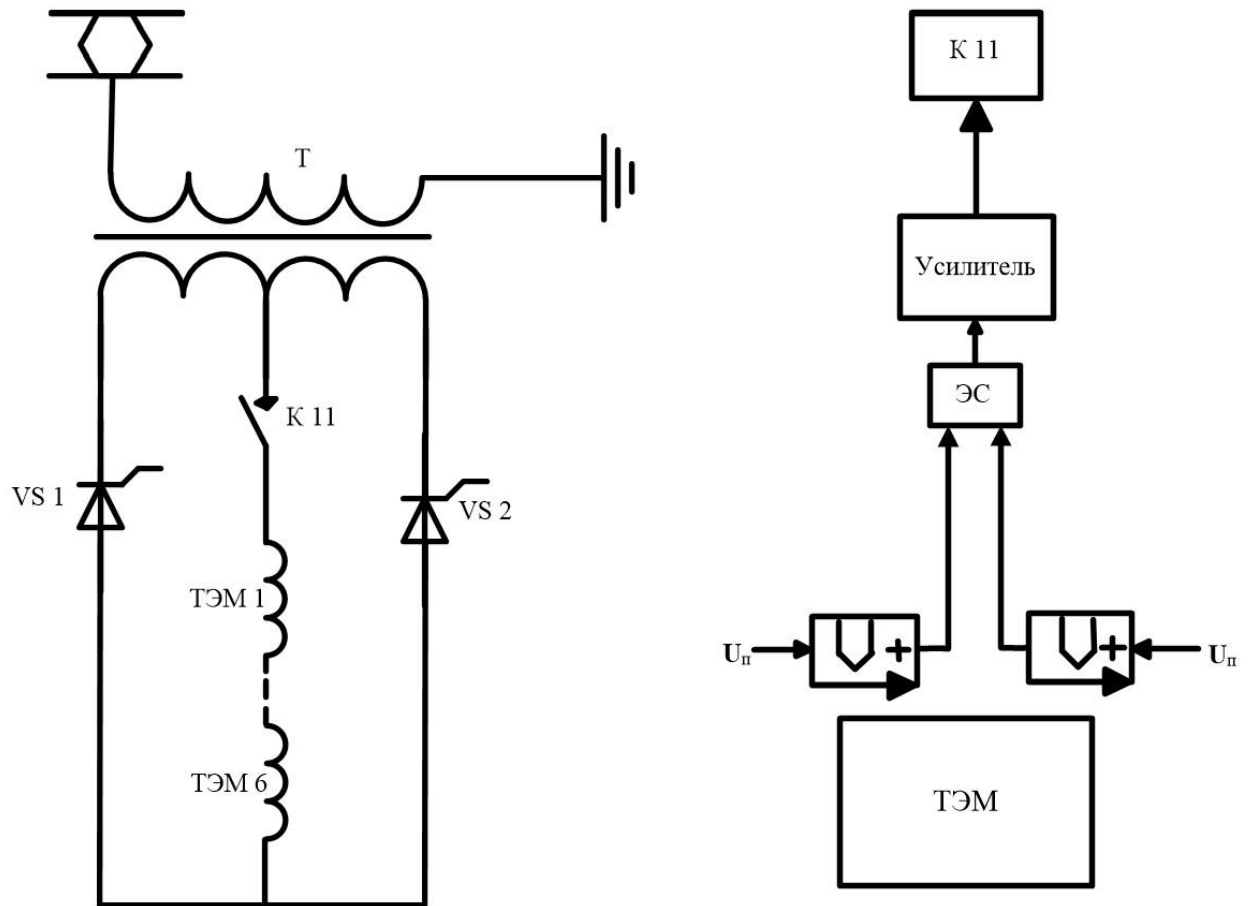


Рисунок 4.14 Упрощенная функциональная схема работы предлагаемого подогрева изоляции ТЭМ

## **5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

### **5.1. Расчет чисто дисконтированного дохода от внедрения комплексной системы контроля увлажнения ТЭМ электровозов Восточно-Сибирской железной дороги**

В работе локомотивного комплекса ОАО «РЖД» приоритетной задачей является улучшение производительности локомотивного парка, на оценку выполнения которой оказывает значительное влияние состояние безотказности локомотивов. Одновременное повышение надежности локомотивов и уменьшение затрат на его эксплуатацию можно добиться за счет улучшения технико-экономических показателей, из-за оптимизации межремонтных пробегов с ужесточением методов контроля при проведении плановых технических обслуживаний и текущих ремонтов.

Разработка метода, технологии и средств контроля увлажнения изоляции ТЭМ электровозов при вводе их после длительного нахождения в ожидании работы позволяет исключить отправку на линию электрических машин с недопустимо низким уровнем ее электрической прочности.

Как сказано ранее, существующий контроль сопротивления изоляции ТЭМ, при проведении технического обслуживания ТО-2 через 96 часов не позволяет своевременно определить величину увлажнения изоляции тяговых машин. Кроме того, одноразовый замер сопротивления изоляции мегомметром, после приложения испытываемого напряжения в течении 60 секунд, не позволяет достоверно определить величину переувлажнения обмоток ТЭМ, что подтверждается данными, представленными в четвертой главе диссертационной работы. Только в 2015 году на Восточно-Сибирской дороге зафиксировано 514 отказов ТЭМ типа НБ-514 электровозов ВЛ85 и 2(3)ЭС5К, из которых на изоляционные конструкции приходится более 50 %

(136 случаев – изоляция якоря, 107 – изоляция дополнительного полюса, 7 – компенсационная обмотка, 30 – изоляция главного полюса).

Своевременный, быстрый и объективный контроль состояния изоляции ТЭМ, с использованием представленной в диссертационной работе системы контроля увлажненности, позволяет своевременно определить как объемное, так и поверхностное переувлажнение, что в значительной мере повысит безотказность тяговых машин электровозов, а также в долгосрочной перспективе перейти к обслуживанию локомотивов по состоянию с увеличением межремонтных пробегов по данному узлу.

Годовой эффект от внедрения системы температурного контроля определяется из формулы представленной ниже

$$П_{ч} = Э_{Г} - Н_{им},$$

где  $Э_{Г}$  - экономия годовых эксплуатационных расходов от сокращения числа пробоев изоляции ТЭД, руб;  $Н_{им}$  - прирост налога на имущество, руб.

По предварительным результатам оценки Восточного полигона, на участке Восточно-Сибирской железной дороги необходимо одновременное применение девяти комплектов системы контроля увлажнения изоляции ТЭМ. Таким образом, для оборудования данными системами контроля состояния изоляции одной из самых наиболее нагруженных, в части профиля пути, метеорологических условий и загрузки железных дорог капитальные вложения ( $K_{влож}$ ) составят 3 120 000 рублей. Капитальные вложения складываются из средств на разработку и изготовление опытного образца СКУ, обеспечением его необходимой конструкторской и технологической документации, в размере 1 500 000 рублей, и, оснащения девяти предполагаемых пунктов контроля увлажненности изоляции ТЭМ серийными моделями СКУ, для контроля состояния изоляции ТЭМ электровозов в эксплуатации, а также после длительного нахождения локомотива в ожидании работы, с ориентировочной стоимостью одного серийного образца в 180 000 рублей.

В результате от внедрения СКУ на Восточно-Сибирской железной дороге затраты на ремонт тяговых электрических машин сократятся

$$З_1 = N_{\text{ТЭД}} * C_{\text{из}} = 180 * 125\,300 = 22\,554\,000 \text{ руб.},$$

где  $N_{\text{ТЭД}}$  - число ТЭМ, на которых из-за внедрения СКУ будет предотвращено повреждение изоляции;  $C_{\text{из}}$  – средняя стоимость устранения отказа ТЭД, вызванного пробоем изоляции.

Зарботная плата специалистам сервисных депо, выполняющим контроль увлажненности величины увлажненности изоляции ТЭМ электровозов предлагаемой комплексной системой в девяти пунктах контроля увлажненности изоляции на рассматриваемой дороге

$$З_{\text{пл}} = C_{\text{мес}} * n_{\text{ску}} * m_{\text{мес}} = 45\,000 * 9 * 12 = 4\,860\,000 \text{ руб.},$$

где  $C_{\text{мес}}$  - среднемесячная заработная плата техников сервисного депо в одном пункте контроля увлажненности изоляции ТЭД;  $n_{\text{ску}}$  - число пунктов контроля увлажненности изоляции на В-Сиб;  $m_{\text{мес}}$  – количество месяцев применения комплексной системы увлажнения ТЭМ в период одного года.

Годовой экономический эффект от внедрения системы контроля увлажненности

$$П_ч = 17\,074 - 60,31 = 17\,013,69 \text{ тыс. руб.},$$

где  $\mathcal{E}_Г = З_1 - З_{\text{пл}} - E_n * K_{\text{влож}} = 22\,554 - 4\,860 - 0,2 * 3\,120 = 17\,074 \text{ тыс. руб.},$

$$H_{\text{им}} = 0,02 (K_{\text{влож}}(1+0,933) / 2) = 60\,310 \text{ руб.},$$

где 0,02 (2%) – ставка налога на имущество.



Определение годового экономического эффекта основано на методических рекомендация по расчету экономической эффективности новой техники и технологии, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений, утверждённых распоряжением ОАО «РЖД» от 28.11.2008 г. № 2538р [104].

Расчет чисто дисконтированного дохода при внедрении комплексной системы контроля увлажнения ТЭМ электровозов Восточно-Сибирской железной дороги представлен в таблице 5.1 и на рисунке 5.1.

Таблица 1

Расчет чисто дисконтированного дохода от внедрения комплексной системы контроля увлажнения ТЭМ электровозов Восточно-Сибирской железной дороги

Годы	Единовременные затраты, тыс. руб.	Снижение эксплуатационных расходов за год, тыс. руб.	Коэффициент дисконтирования	Приведенный экономический эффект, тыс. руб.	ЧДД, тыс. руб.
2017	7980,0	0,0	-	0,0	-7980,0
2018		17074,0	1	17074,0	9094,0
2019		17074,0	0,9091	15522,0	24616,0
2020		17074,0	0,8264	14110,0	38725,9
2021		17074,0	0,7513	12827,7	51553,6
2022		17074,0	0,683	11661,5	63215,2
2023		17074,0	0,6209	10601,2	73816,4
2024		17074,0	0,5645	9638,3	83454,7
2025		17074,0	0,5132	8762,4	92217,1
2026		17074,0	0,4665	7965,0	100182,1
2027		17074,0	0,4241	7241,1	107423,2

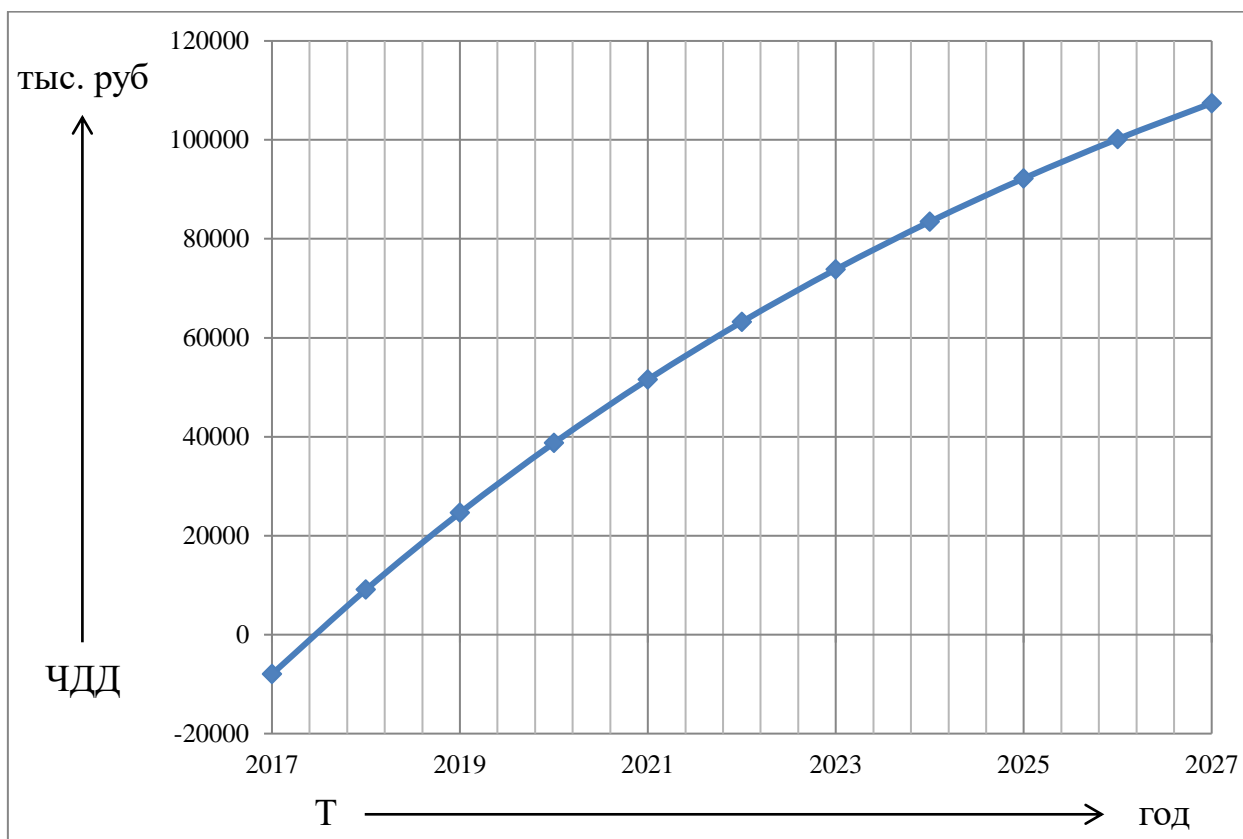


Рисунок 5.1 - Расчет чисто дисконтированного дохода от внедрения комплексной системы контроля увлажненности ТЭМ электровозов Восточно-Сибирской железной дороги

## 5.2. Оптимизация системы планово-предупредительного ремонта ЛОКОМОТИВОВ

Основным положительным эффектом от увеличения межремонтных пробегов является внедрение полигонной схемы эксплуатации локомотивов, при которой увеличивается скорость доставки грузов по сети, а также сокращается количество требуемого парка локомотивов. Это, несмотря на значительные капиталовложения в разработку новых диагностических комплексов для обслуживания локомотивов, позволяет получить значительную экономию средств в локомотивном комплексе.

Существующая система ремонта не учитывает случайного характера изменений условий эксплуатации и не отражает природы процессов износа и выхода из строя узлов и деталей локомотивов. В результате наблюдаются случаи проведения ремонта тяговым электрическим машинам с недоиспользованным ресурсом, а также эксплуатация ТЭМ, выработавших ресурс, без проведения ремонта требуемого уровня (пропитка или замена изоляции ТЭМ). Это приводит к отказам ТЭМ, что влечет за собой задержки поездов на линии, а также проведение длительных неплановых ремонтов локомотивов из-за перемещения локомотивов в депо, выполняющих крупные виды ремонта, на дальние расстояния.

В первой главе диссертационной работы представлены результаты анализа безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в сложных климатических условиях. Во второй и третьей главах рассмотрены основные природно-климатические и эксплуатационные факторы, вызывающие преждевременные отказы ТЭМ. Мероприятия, представленные в четвертой главе диссертации, позволяют не только повысить безотказность электрических машин, но и увеличить их межремонтный пробег.

Усовершенствованная система обслуживания и ремонта электровозов ВЛ80 (рисунок 5.4) в сравнении с существующей (рисунок 5.3.) [105] кроме увеличения межремонтных пробегов, предполагает замену восьмиуровневой системы ремонта на четырехуровневую.

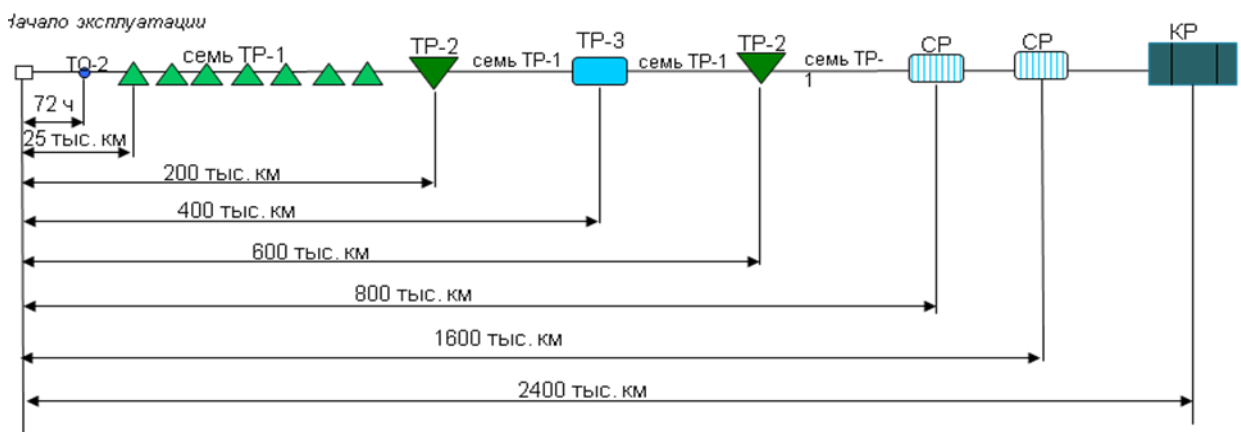


Рисунок 5.3. Существующая система обслуживания электровозов ВЛ80в/и

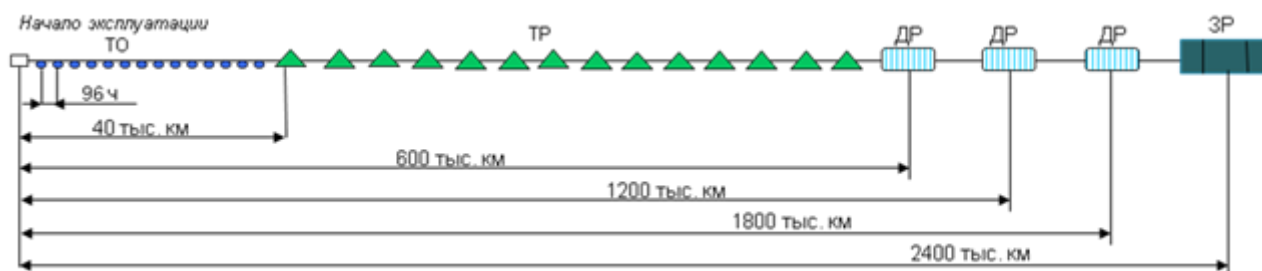


Рисунок 5.4. Усовершенствованная система обслуживания электровозов

При этом предлагается введение следующих условных понятий системы ремонта:

- ТО – техническое обслуживание, необходимое для проведения мероприятий с целью предупреждения возникновения неисправностей и поддержания локомотива в рабочем состоянии (осмотр состояния ТЭМ через смотровые люки, измерение изоляции электрических цепей ТЭМ);

- ТР – текущий ремонт, необходимый для поддержания исправного состояния тяговой машины. Предусматривает к регламентированным работам, выполняемым при проведении текущих ремонтов ТР-1 существующей системы ремонта, замену всех электрических щеток через каждые 80 тысяч пробега (через 1 ТР), а также обязательное измерение объемного и поверхностного увлажнения изоляции ТЭМ на каждом техническом обслуживании;

- ДР – депо́вской ремонт, основанный на крупно-агрегатном методе, при котором оборудование, подлежащее разборке и ремонту, демонтируется и заменяется переходным комплектом, а снятое оборудование в зависимости от состояния и пробега отправляется на обслуживание в электромашинный цех или на локомотиворемонтный завод;

- ЗР - заводской ремонт, на котором производится полное восстановление характеристик ТЭМ.

Необходимость внедрения контроля увлажнения изоляции ТЭМ, на всех видах обслуживания и ремонта, вне зависимости от срока службы и класса изоляции подтверждается опытом эксплуатации электровозов 2ЭС6. Несмотря

на то, что новые локомотивы постоянного тока с коллекторным приводом позволили увеличить массу грузовых поездов на направлении Челябинск – Пенза до 7100 т, количество их отказов существенно превышает допустимую величину. При этом на пробой изоляции приходится около половины от всех отказов ТЭМ.

Представленная в диссертационной работе технология и устройство контроля увлажнения изоляции ТЭМ локомотивов, позволяют совершенствовать систему контроля уровня электрической прочности изоляции и увеличить межремонтных пробег локомотивов при эксплуатации по полигонной системе, а также в значительной степени повысить безотказность электровозов.

## 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 температурами 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 нахождении электровозов в ожидании работы.

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 увеличенной разницы: 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 нахождении электровоза в ожидании работы.

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

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шпакин, П.М. Электрификация железных дорог России (1929-1999 гг.) [Текст] / П.М. Шпакин. М.:Интекст, 1999. – 280 с.
2. ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость [Текст] - М., 1988. – 28 с.
3. Находкин, М.Д. Проектирование тяговых электрических машин [Текст] / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, М.А. Козорезов, Д.М. Лупкин. - М.:, 1967. – 536 с.
4. 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. 42-45.
5. Попов, Ю.И. Исследование износа изоляции ТЭМ локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях [Текст] / Ю.И. Попов // Электроснабжение и электрооборудование. - 2016. - № 1. – С. 28–32.
6. Гук, Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике [Текст] / Ю.Б. Гук.– Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
7. Н.Ш. Кремер Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] Н.Ш. Кремер – М.: ЮНИТИ ДАНА, 2003. – 543 с.
8. ГОСТ Р 53480-2009 Национальный стандарт РФ. Надёжность в технике. Термины и определения [Текст] – М.: Стандартинформ. 2010. – 47 с.
9. Щербаков, В.Г. Тяговые электродвигатели электровозов [Текст] / В.Г. Щербаков. Новочеркасск: Агенство Наутилус, 1998. – 672 с.
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 проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 102-105.

11. 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.

12. Сонин, В.С. Оценка эксплуатационной надежности электровозов [Текст] / В.С. Сонин // Повышение эффективности использования электровозов на дорогах Урала и Сибири. – М.: Транжелдориздат, 1963. – С. 37-64.

13. Сонин, В.С. Результаты опытной эксплуатации тяговых двигателей электровозов без пропитки их изоляции между заводскими ремонтами [Текст] / В.С. Сонин // Повышение надежности и совершенствование ремонта электровозов. – М.: Транспорт, 1974.- С. 45-52.

14. Галкин, В.Г. Надёжность тягового подвижного состава [Текст] / В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.

15. Митропольский, А.К. Техника статических вычислений [Текст] / А.К. Митропольский. – М.: Наука, 1971. – 576 с.

16. 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. 98-102.

17. 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.

18. Грищенко, А.В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава [Текст] / А.В. Грищенко, В.В. Стрекопытов. - М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 320 с.

19. . Котеленец, Н.Ф., Испытания и надежность электрических машин [Текст] / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
20. Гольдберг, О.Д. Испытания электрических машин [Текст] / О.Д. Гольдберг. – М.: Высшая школа, 2000. – 255 с
21. Волков, А.К. Повышение эксплуатационной надёжности тяговых двигателей [Текст] / А.К. Волков, А.Г. Суворов – М.: Транспорт, 1988. – 128 с.
22. Попов, Ю.И. Исследование влияния метеорологических факторов на изоляции 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.
23. Исмаилов, Ш.К. Тепловое состояние тяговых и вспомогательных электрических машин электровозов постоянного и переменного тока [Текст] / Ш.К. Исмаилов. – Омск: ОмГУПС, 2001. – 76 с.
24. Глущенко, М.Д. Проблемы эксплуатационной диагностики тяговых электродвигателей подвижного состава и пути их решения [Текст] / М.Д. Глущенко // автореф. дис. докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 1999. – 39 с.
25. Юренков, М.Г. Анализ влияния условий эксплуатации на надежность тяговых электрических машин [Текст] / М.Г. Юренков // Исследование работы электро-оборудования и вопросы прочности электроподвижного состава. - Омск, 1975. - С. 57-60.
26. Ахцигер, В.В. Исследования влияний условий эксплуатации электровозов на надежность изоляции обмотки якоря тяговых двигателей [Текст] / В.В. Ахцигер // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава: - Омск, 1974. Т. 163. С. 72-74.
27. Галиев, И.И. Влияние переменной жесткости пути на ускорения необрессоренных частей тепловоза ТЭЗ [Текст] / И.И. Галиев, Г.А. Чистяков, В.Ф. Кузнецов// Сб. науч. тр. - Омск, 1974. С. 26-28.
28. Коротаев, Е.Н. Вентиляции и тепловой режим оборудования электровозов переменного тока на ВСЖД [Текст] / Е.Н. Коротаев, В.П. Смирнов, А.С. Шитиков // Материалы межвузовской научно-

технической конференции, посвященной 160-летию отечественных железных дорог и 100-летию железнодорожного образования в Сибири. – Омск: ОмГУПС, 1998. – С. 66-67.

29. 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.

30. Соболев, В.М. Работа электровозов со снегоочистителями [Текст] / В.М. Соболев // Повышение надежности и совершенствование ремонта электровозов. – М.: Транспорт, 1974.- С. 37-40.

31. Руководство по капитальному ремонту 5 ТН.634.119, 5 ТН.635.096 РК. Моноблоки (катушки) полюсные с изоляцией «Монолит» [Текст] / – М.: ПКБ ЦТ, 1988. – 46 с.

32. Технологическая инструкция. 103.252020.60028. Заводской ремонт. Пропитка, компаундировка, окраска обмоток. [Текст] / - М.:ПКБ ЦТ, 1983. – 160 с.

33. ТИ 2351.25200.00077Р Технологическая инструкция на изолировку, пропитку, окраску и сушку обмоток электрических машин электровозов[Текст] – М.: 2014, - 92 с.

34. ТИ 2351.25200.00063Р Технологическая инструкция на изолировку, пропитку, окраску и сушку обмоток электрических машин тепловозов. [Текст] – М.: 2014, - 90 с.

35. ТИ 754. Технологическая инструкция. Техническое обслуживание и ремонт тягового электродвигателя НБ-418 [Текст] - М.: 2004, - 147 с.

36. Технологическая инструкция по пропитке изоляции обмоток тяговых и вспомогательных электрических машин локомотивов электропоездов в деповских условиях КЛ143-2. [Текст] / – М.: ПКБ ЦТ, 1974. – 84 с.

37. Находкин, В.М. Ремонт электроподвижного состава. [Текст] / В.М. Находкин, Д.В. Яковлев, Р.Г. Черепашенец. – М.: Транспорт, 1989. – 295 с.
38. ЦТ-ЦТВР/4782. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава [Текст] / – М.: Транспорт, 1992. – 296 с.
39. ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84) Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация [Текст] – М.: 1995, - 8 с.
40. Долганов, А.Н. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / П.Т. Гребенюк, А.Н. Долганов, О.А. Некрасов, А.Л. Лисицын, Т.С. Чукова, В.Г. Григорьевко, В.М. Первушкина. - М.: Транспорт, 1985. - 287 с.
41. Котеленец, Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин [Текст] Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов – М.: Высш. Шк., 1988. – 232 с.
42. Комолов, В.Г. Ремонт электрических машин [Текст] / В.Г. Комолов, С.И. Файб, А.А. Алексеев. – М.: Транспорт, 1975. – 356 с.
43. ГОСТ 2582-2013 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия [Текст] / – М.: 2013. – 56 с.
44. Алексеев, А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи [Текст] / А.Е. Алексеев. - Л.: Энергия, 1977. – 444 с.
45. Иоффе, А.Б. Тяговые электрические машины [Текст] / А.Б. Иоффе – М.: Энергия. – 1965. – 232 с.
46. Копылов, И.П. Справочник по электрическим машинам [Текст] / И.П. Копылов, Б.К. Клоков. - М.: Энергоатомиздат, 1988, 1989. - 1 том 456 с.; 2 том 688 с.
47. Копылов, И.П. Электрические машины [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Логос, 2000. – 607 с.
48. Вант-Гофф, Я.Г. Избранные труды по химии. Классики науки [Текст] / Я.Г. Вант-Гофф. - М.: Наука, 1984. – 544 с.
49. Овчаров, В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В.В. Овчаров. – Киев: УСХА, 1990. – 168 с.

50. 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. 82-86.

51. Иванов, В.Н. Электротехнологическое продление ресурса электрических машин тепловым излучением [Текст]: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / В.Н. Иванов. - М.: 2014, - 224 с.

52. Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические машины [Текст] / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.

53. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин [Текст] / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин. – М.: Высшая школа, 2005. - 767 с.

54. Бочаров, В.П. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины [Текст] / В.П. Бочаров, Г.В. Василенко, А.П. Курочка и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.

55. Немухин, В.П. Повышение нагревостойкости и влагостойкости изоляции тяговых электрических машин [Текст] / В.П. Немухин. - М.: Транспорт, 1974. С. 20-42.

56. Исмаилов, Ш.К. Тепловое состояние тяговых и вспомогательных электрических машин электровозов постоянного и переменного тока [Текст] / Ш.К. Исмаилов. – Омск: ОмГУПС, 2001. – 76 с.

57. Юренков, М.Г. Анализ надежности изоляции тяговых электрических машин НБ-406 [Текст] / М.Г. Юренков // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава. Омск, 1974. - С. 58-62.

58. Ахцигер, В.В. Построение обобщенной математической модели надежности изоляции обмоток тяговых двигателей электровозов [Текст] / В.В. Ахцигер // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава. Омск, 1975. - С. 50-56.

59. Протокол № ЭМ-11-67. Тепловые испытания тягового двигателя НБ-418К на постоянном токе. [Текст] / - Новочеркасск, 1967. - 23 с.
60. Левитский, В.М. Результаты тяговых испытаний электровозов ВЛ10 [Текст] / В.М. Левитский // Повышение надежности и совершенствование ремонта электровозов. – М.: Транспорт, 1974.- С. 4-6.
61. Винокуров, В.А. Электрические машины железнодорожного транспорта. Учебник для вузов [Текст] / В.А. Винокуров, Д.А. Попов – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.
62. Курбасов, А.С. Проектирование тяговых электродвигателей [Текст] / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин // под ред. А.С. Курбасова. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
63. Исмаилов, Ш.К. Электрическая прочность изоляции электрических машин локомотивов [Текст] / Ш.К. Исмаилов // монография - Омск, 2003. - 272 с.
64. Михайлов, М.М. Влагопроницаемость органических диэлектриков [Текст] / М.М. Михайлов. - Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 163 с.
65. Маслов, В.В. Исследование влияния высокой влажности и воды на свойства некоторых диэлектриков [Текст] / В.В. Маслов // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. - Москва, 1967. – 148 с.
66. ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84) Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация [Текст] – М.: 1995, - 8 с.
67. ГОСТ 1516.2-97 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции [Текст] – М.: 2003, - 51 с.
68. Карташев, В.И. Изоляция машин электроподвижного состава постоянного тока и ее испытания [Текст] / В.И. Карташев, Н.Д. Сухопрудский. // Труды всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта выпуск 128. - М.: Государственное транспортное железнодорожное агентство, 1956. – 67 с.
69. 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.

70. Левитский, В.М. Эксплуатационные испытания измененных узлов электровозов ВЛ10 [Текст] / В.М. Левитский // Повышение надежности и совершенствование ремонта электровозов. – М.: Транспорт, 1974.- С. 9-18.

71. 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.

72. 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.

73. 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. 78-82.

74. Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин. [Текст] / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко. - М.: Высшая школа, 2006. – 430 с.

75. 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.

76. Соколов, О.О. Влияние токовой нагрузки на надежность ТЭМ электропоездов постоянного тока Московского узла [Текст] / О.О. Соколов, Д.Н. Хомченко, А.С. Куренков, А.С. Космодамианский // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 119-123.

77. Лыков, А.В. Тепло- и массоперенос при физико-химических превращениях [Текст] / А.В. Лыков, Б.М. Смольский. - Минск, 1968. – 397 с.
78. Лыков, А.В. Теория переноса энергии и вещества [Текст] / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Минск: Изд. АН БССР, 1959. – 330 с.
79. Маслов, В.В. Влагостойкость электрической изоляции. [Текст] / В.В. Маслов. – М.: Энергия, 1973. – 208 с.
80. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы [Текст] / А.С. Серебряков // Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.
81. Исмаилов, Ш.К. Электрическая прочность изоляции электрических машин локомотивов [Текст] / Ш.К. Исмаилов // Монография. – Омск, 2003. – 272 с.
82. Гамаюнов, И.С. Мониторинг и управление процессами качества эксплуатации ТЭД подталкивающих электровозов [Текст] / И.С. Гамаюнов // дис. канд. техн. наук. – Омск, 2007 – 173 с.
83. Серебряков, А.С. Методы и средства для диагностики изоляции электрических машин и аппаратов ее защиты [Текст] / А.С. Серебряков // автореф. дис. докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 2000. – 48 с.
84. Исмаилов, Ш.К. Диагностирование изоляции тяговых электродвигателей локомотивов и обеспечение оптимального температурно-влажностного режима ее эксплуатации [Текст] / Ш.К. Исмаилов, В.П. Смирнов, А.М. Худоногов. – М.: - ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 253.
85. 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.
86. 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.

87. ГОСТ 10518-88 Системы электрической изоляции и другие полимерные системы. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость [Текст] – М.: 2013. - 40 с.

88. ГОСТ 27905.2-88 (МЭК 791-84, МЭК 610-78) Системы электрической изоляции. Оценка эксплуатационных характеристик, механизма старения и методы диагностики [Текст] – М.: 1989, - 19 с.

89. ГОСТ 27710-88 (СТ СЭВ 4127-83) Материалы электроизоляционные. Общие требования к методу испытания на нагревостойкость [Текст] – М.: 1989. - 83 с.

90. Макаров, В.В. Ресурсосберегающие принципы технологии сушки увлажненной изоляции электрооборудования ЭПС [Текст] / В.В. Макаров, В.П. Смирнов, А.М. Худоногов, Е.В. Ефремов // Сб. науч. тр. – Хабаровск, 2001. – С. 32-37.

91. Смирнов, В.П. Широтно-прерывный метод сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей [Текст] / В.П. Смирнов, А.М. Худоногов А. М. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Иркутск, 2003. – С. 185-192.

92. 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. 92-96.

93. 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.

94. Серебряков, А.С. Диагностика главной изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава Российских железных дорог [Текст] / А.С. Серебряков // Монография. М.:МИИТ, 2014. – 276 с.

95. Космодамианский, А.С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов [Текст] / А.С. Космодамианский // автореф. дис. докт. техн. наук. – М.: РГОТУПС, 2002. – 52 с.

96. Космодамианский, А.С. Измерение и регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов [Текст] / А.С. Космодамианский // Монография. – М.:РГОТУПС, 2002. – 285 с.

97. Смирнов, В.П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электровоза [Текст] / В.П. Смирнов // Монография. – Иркутск, 2003. – 328 с.

98. Богаенко, И.Н. Контроль температуры электрических машин [Текст] / И.Н. Богаенко. – Киев, 1975. – С. 234.

99. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек. - Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

100. ОАО «ВЭЛНИИ». Протокол № ЭМ-18-85. Тепловые испытания тягового двигателя НБ-514. [Текст] / ОАО «ВЭЛНИИ». Новочеркасск, 1985. 21 с.

101. ГОСТ ИЕС 60034-18-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-1. Оценка функциональных показателей систем изоляции. Общие требования [Текст] / – М.: 2015. – 20 с.

102. Барков, А.С. Исследование возможности увеличения долговечности изоляции якорных обмоток тяговых двигателей [Текст] / А.С. Барков, В.В. Лебедев, В.П. Лисицын, В.С. Сонин // Повышение надежности и совершенствование ремонта электровозов. – М.: Транспорт, 1974. - С. 53-58.

103. Стоун, Г.С. Электрическая изоляция для вращающихся машин [Текст] / Г.С. Стоун, Э.А. Боултер, Я. Кулберт, Х. Дхирани. — Wiley: 2004. - 140 с.

104. Методические рекомендации по расчету экономической эффективности новой техники и технологии, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 28.11.2008 г. N 2538р.

105. Распоряжение о системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» №3р [Текст] / - 2005. – 8 с.

106. Ребиндер, П.А. Физико-химические основы пищевых производств [Текст] / П.А. Ребиндер, А.В. Лыков. - М.: Пищепромиздат, 1952. – 296 с.

107. Эккерт, Э.Р. Теория тепло- и массообмена [Текст] / Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 681 с.

108. Лыков, А.В. Тепломассообмен (Справочник) [Текст] / А.В. Лыков. - М.: Энергия, 1972. – 560 с.

109. Михайлов, М.Д. Нестационарный тепло- и массоперенос в одномерных телах [Текст] / М.Д. Михайлов. - Минск: ИТМО, 1969. – 184 с.

110. Валушис, В.Ю. Основы высокотемпературной сушки кормов [Текст] / В.Ю. Валушис. – М.: Колос, 1977. – 307 с.

111. Гемант, А. Электрофизика изолирующих материалов [Текст] / А. Гемант. - Л.: Кубуч, 1932. – 224 с.

112. Яманов, С.А. Гидро-фобизация диэлектриков кремнийорганическими соединениями [Текст] / С.А. Яманов. – М.: Энергия, 1965. – 112 с.

113. Никитина, Л.М. Таблицы равновесного удельного влагосодержания и энергия связи влаги с материалом [Текст] / Л.М. Никитина. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 176 с.

114. Сполдинг, Д.Б. Конвективный массоперенос [Текст] / Д.Б. Сполдинг. – М.: Энергия, 1965. – 384 с.

115. Коловандин, Б.А. Тепло- и массоперенос [Текст] / Б.А. Коловандин, – М.: Энергия, 1968. - 154 с.

116. Лыков, А.В. Тепло- и массоперенос [Текст] / А.В. Лыков, О.Г. Мартыненко, Б.А. Коловандин, В.Е. Аеров. – М.: Энергия, 1968. – 664 с.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

2014/2009

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 148398

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УВЛАЖНЕННОСТИ  
ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Патентообладатель(ли): *Открытое акционерное общество  
"Российские железные дороги" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014132720

Приоритет полезной модели 08 августа 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 30 октября 2014 г.

Срок действия патента истекает 08 августа 2024 г.

Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Автор(ы): *Попов Юрий Иванович (RU), Куренков Алексей Семенович (RU), Мельников Виталий Андреевич (RU), Соколов Олег Олегович (RU), Смирнов Валентин Петрович (RU), Космодамианский Андрей Сергеевич (RU), Лексаков Владимир Владимирович (RU)*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU<sup>(11)</sup>148 398<sup>(13)</sup> U1

(51) МПК

G01N 27/22 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014132720/28, 08.08.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
08.08.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 08.08.2014

(45) Опубликовано: 10.12.2014 Бюл. № 34

Адрес для переписки:

107174, Москва, ул. Новая Басманная, 2, ОАО  
"РЖД", ЦУИС

(72) Автор(ы):

Попов Юрий Иванович (RU),  
Куренков Алексей Семенович (RU),  
Мельников Виталий Андреевич (RU),  
Соколов Олег Олегович (RU),  
Смирнов Валентин Петрович (RU),  
Космодамианский Андрей Сергеевич (RU),  
Лексаков Владимир Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Открытое акционерное общество  
"Российские железные дороги" (RU)(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УВЛАЖНЕННОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

(57) Формула полезной модели

1. Устройство для измерения увлажненности изоляции, содержащее аппаратуру питания, коммутационную аппаратуру, выполненную с возможностью измерения степени увлажненности изоляции по соотношению между абсорбционной и геометрической составляющими электрической ёмкости изоляции методом «емкость - время», вольтметр, электрически соединенные параллельно, отличающееся тем, что аппаратура питания, коммутационная аппаратура, вольтметр выполнены в виде отдельных блоков - блока питания, коммутационного блока, блока вольтметра, размещенных в автономных корпусах, снабженных быстроразъемными соединителями для их соединения, блок вольтметра выполнен с внутренним сопротивлением не менее 300 МОм, введены дополнительные соединители, выполненные из проводов, подсоединенных к коммутационному блоку, снабженных зажимами «Крокодил», которые служат для подсоединения к противоположным концам обмотки якоря и обмотки возбуждения электродвигателя, введена перемычка, которая выполнена из провода, снабженного с двух его концов зажимами «Крокодил», которые служат для подсоединения зажимов «Крокодил» к обращенным концам обмотки якоря и обмотки возбуждения электродвигателя.

2. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что быстроразъемные соединители для параллельного соединения блоков выполнены из проводов, снабженных наконечниками под винт.

RU 148398 U1

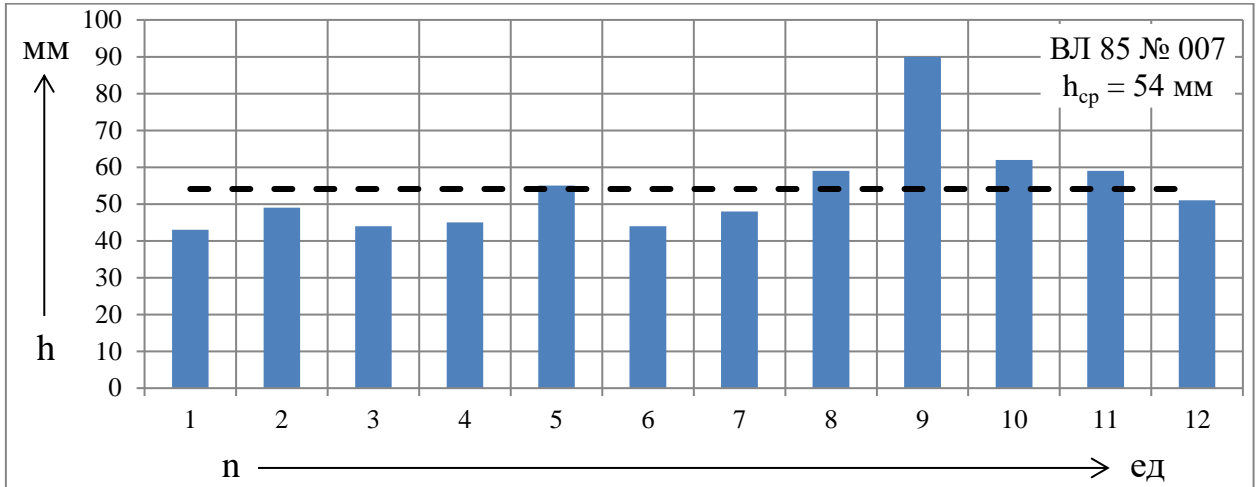


Рисунок П.3.1. Толщина бандажей колесных пар двухсекционного электровоза ВЛ85 №007

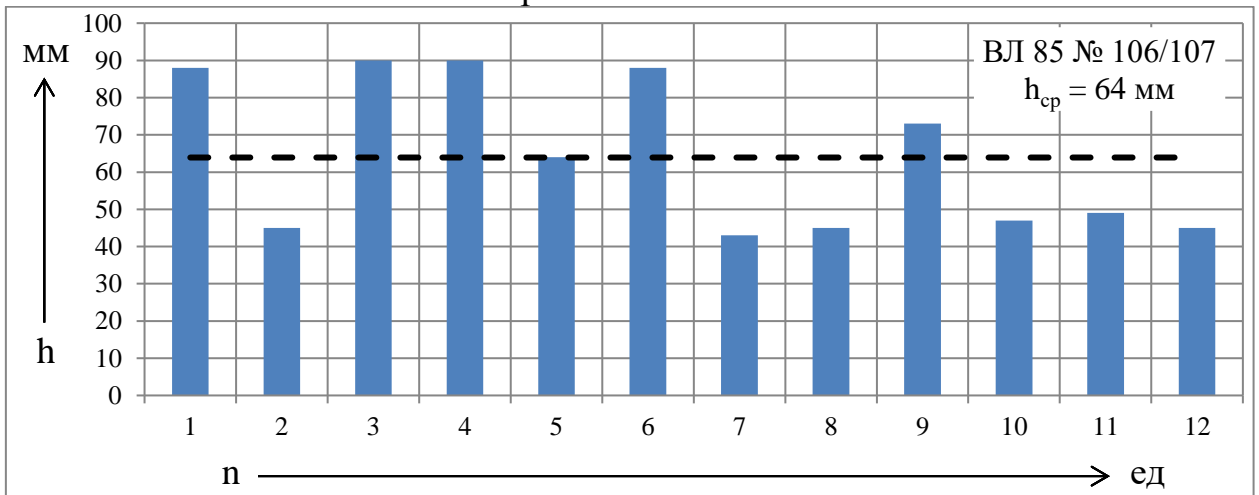


Рисунок П.3.2. Толщина бандажей колесных пар двухсекционного электровоза ВЛ85 106/107

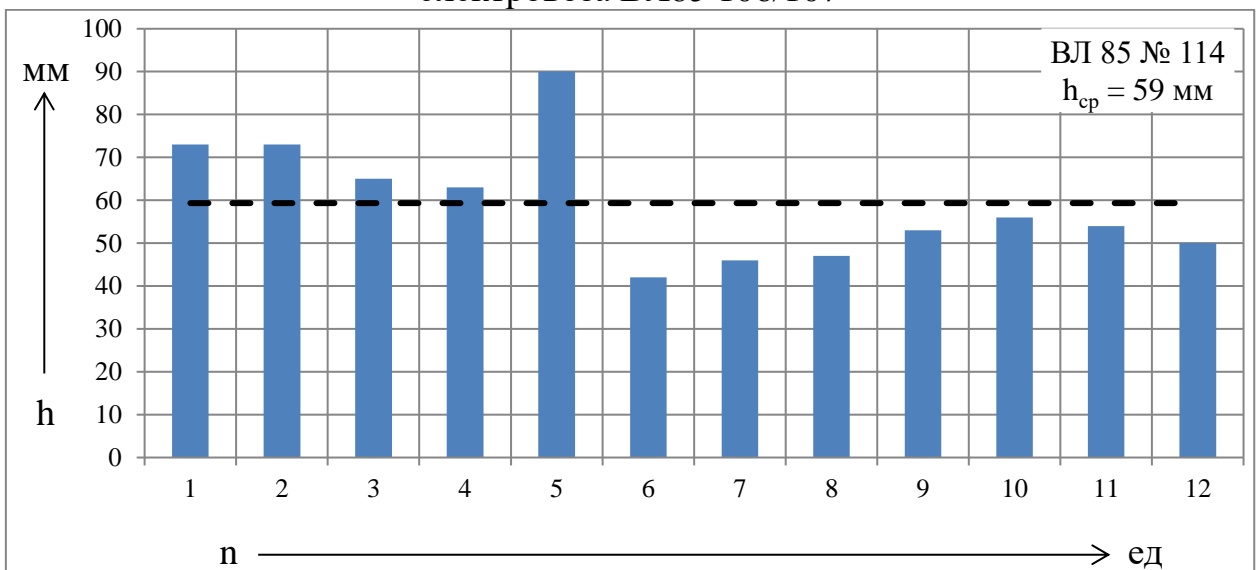


Рисунок П.3.3. Толщина бандажей колесных пар двухсекционного электровоза ВЛ85 №114



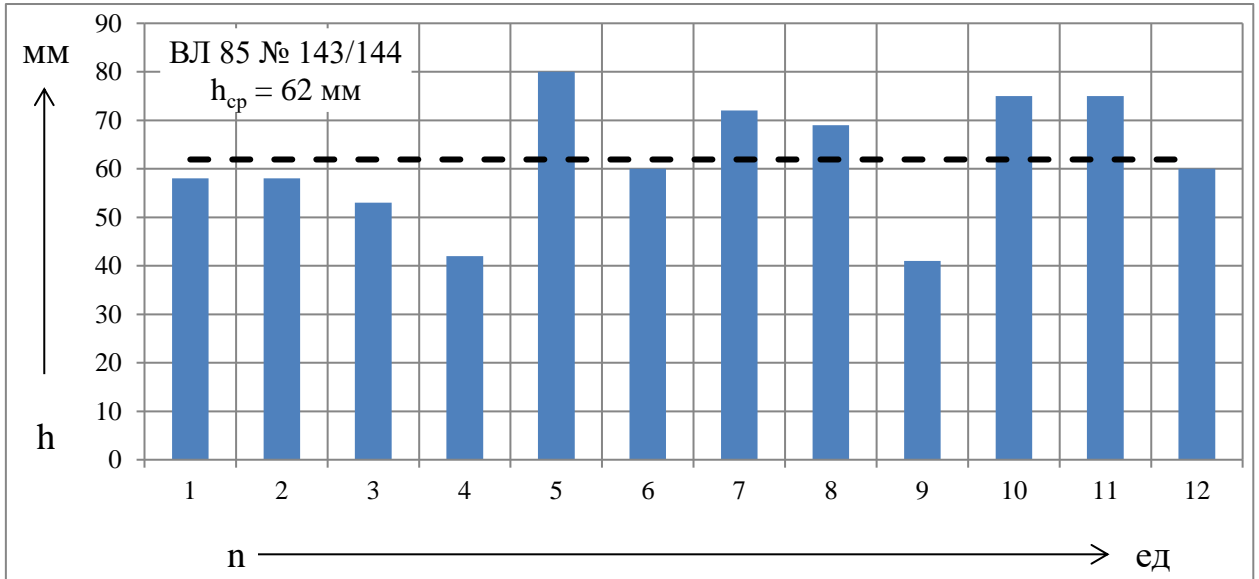


Рисунок П.3.4. Толщина бандажей колесных пар двухсекционного электровоза ВЛ85 №143/144

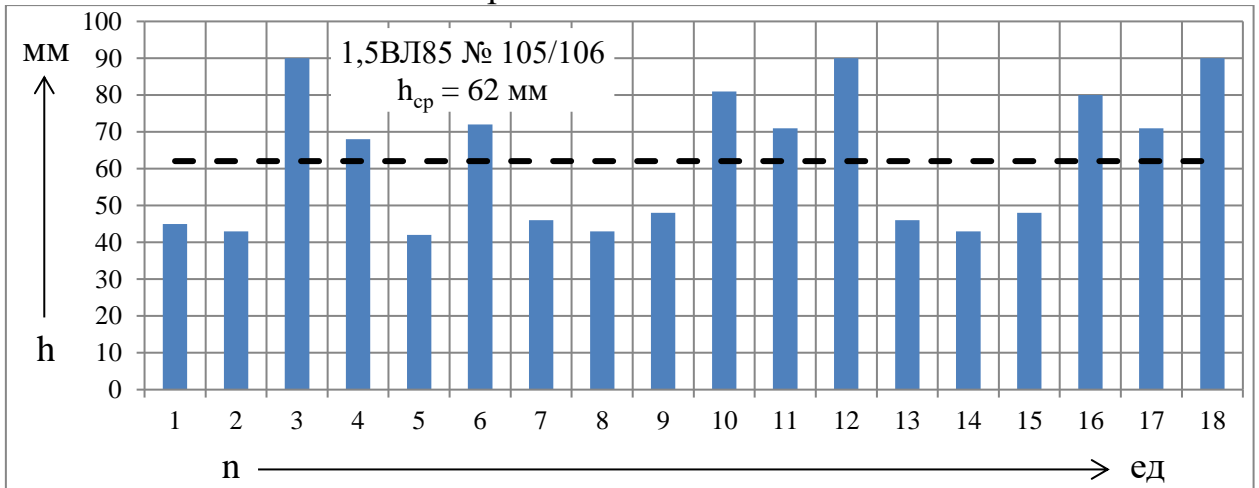


Рисунок П.3.5. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза 1,5ВЛ85 №105/106

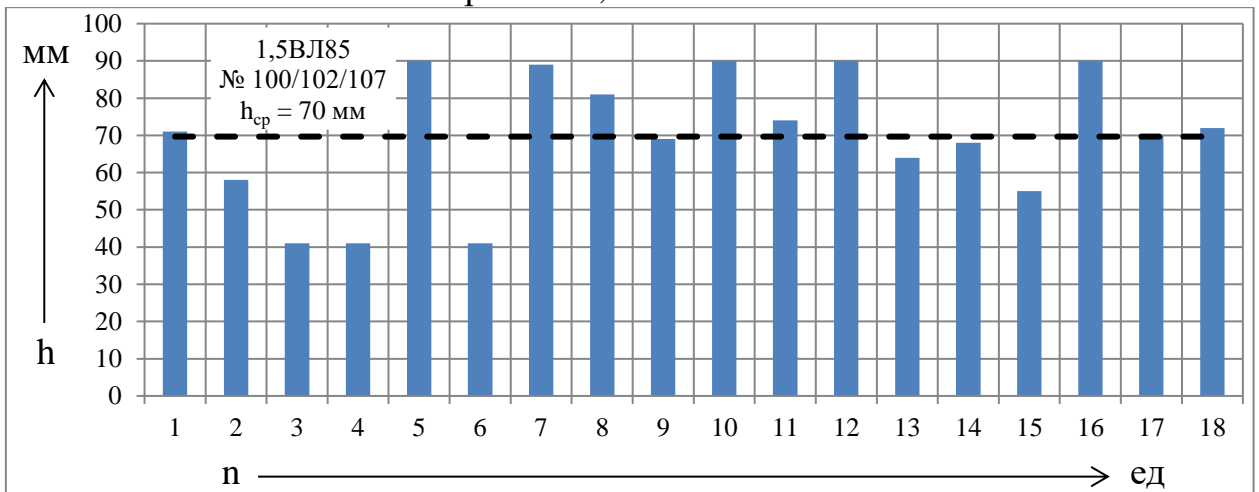


Рисунок П.3.6. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза 1,5ВЛ85 №100/102/107

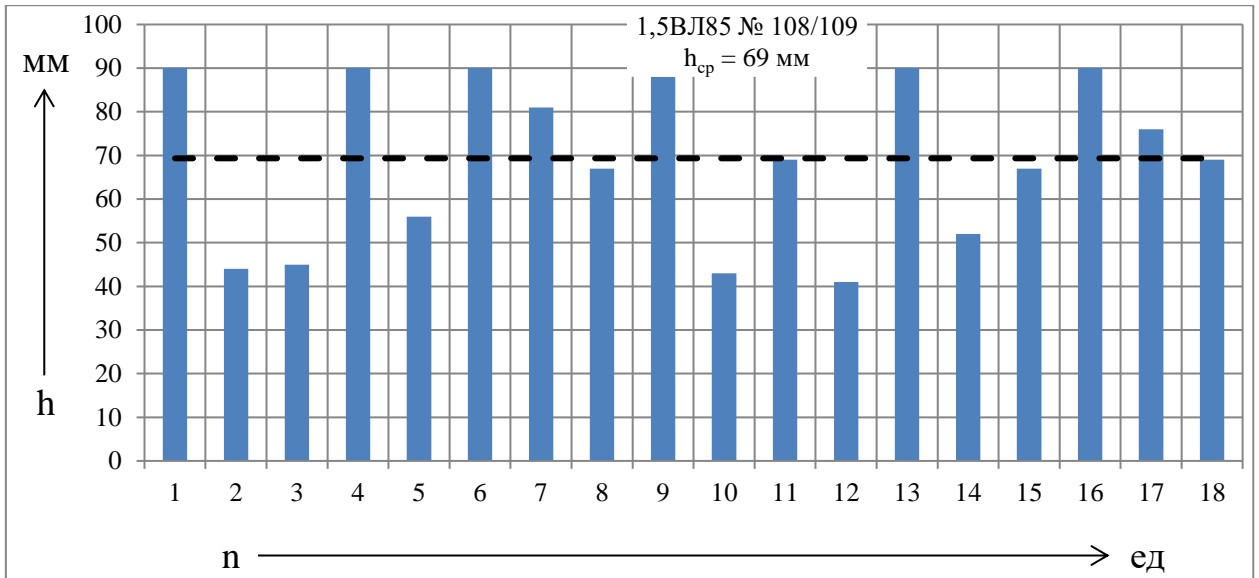


Рисунок П.3.7. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза 1,5ВЛ85 №108/109

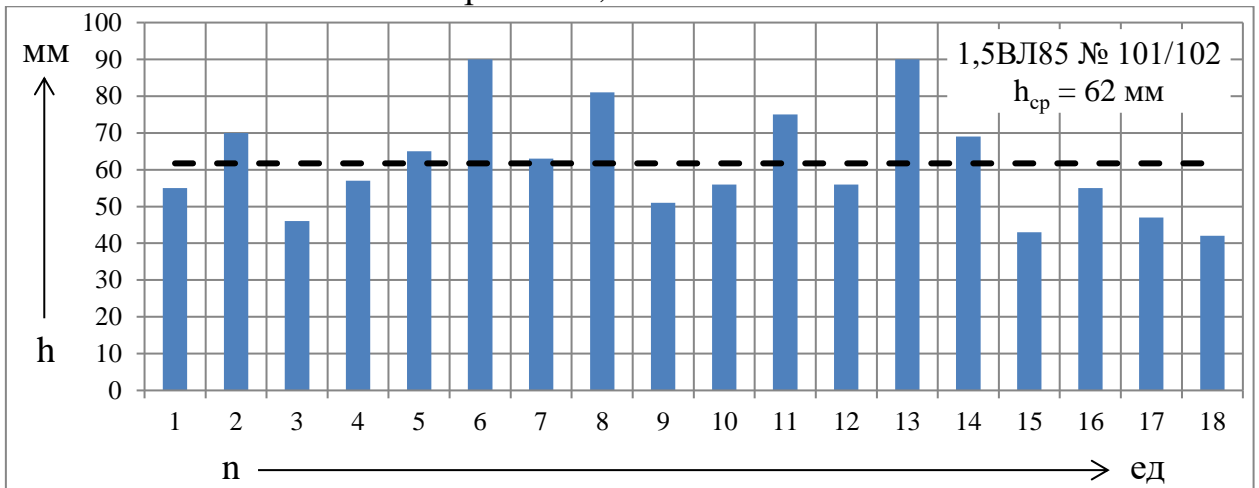


Рисунок П.3.8. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза 1,5ВЛ85 №101/102

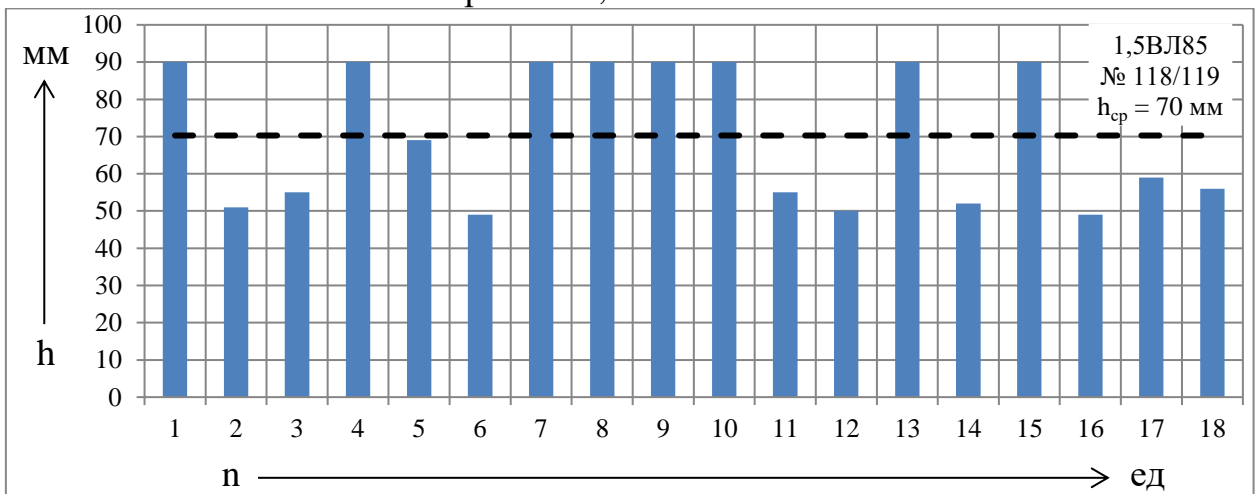


Рисунок П.3.9. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза 1,5ВЛ85 №118/119

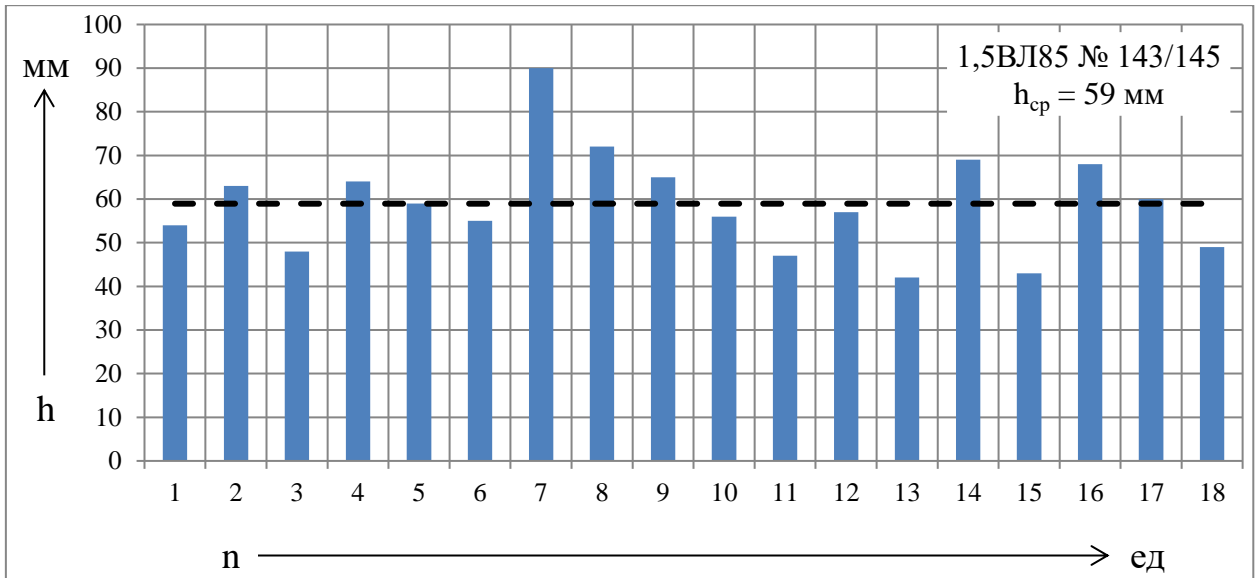


Рисунок П.3.10. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза 1,5ВЛ85 №143/145

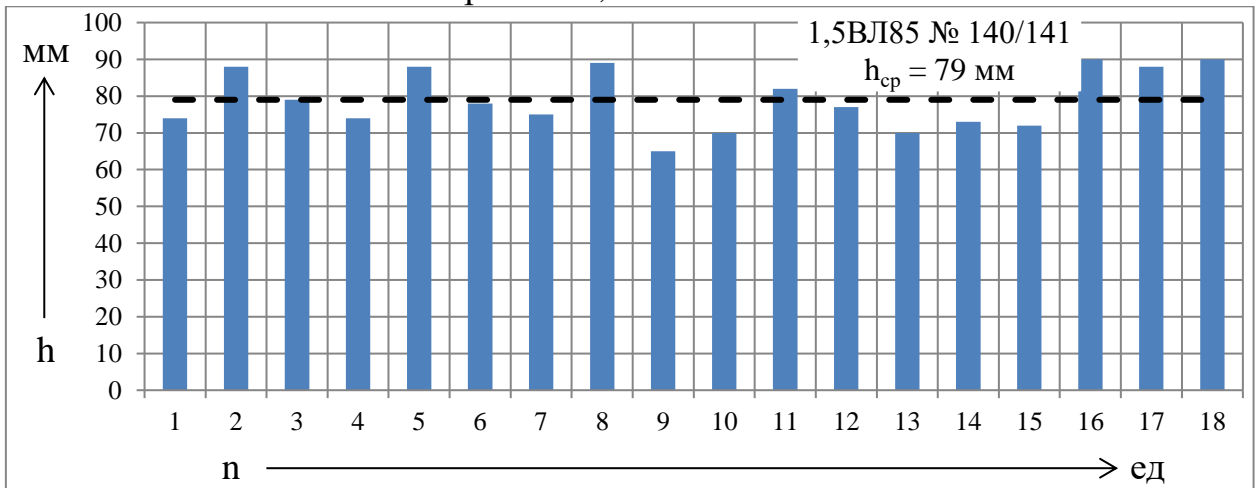


Рисунок П.3.11. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза 1,5ВЛ85 №140/141

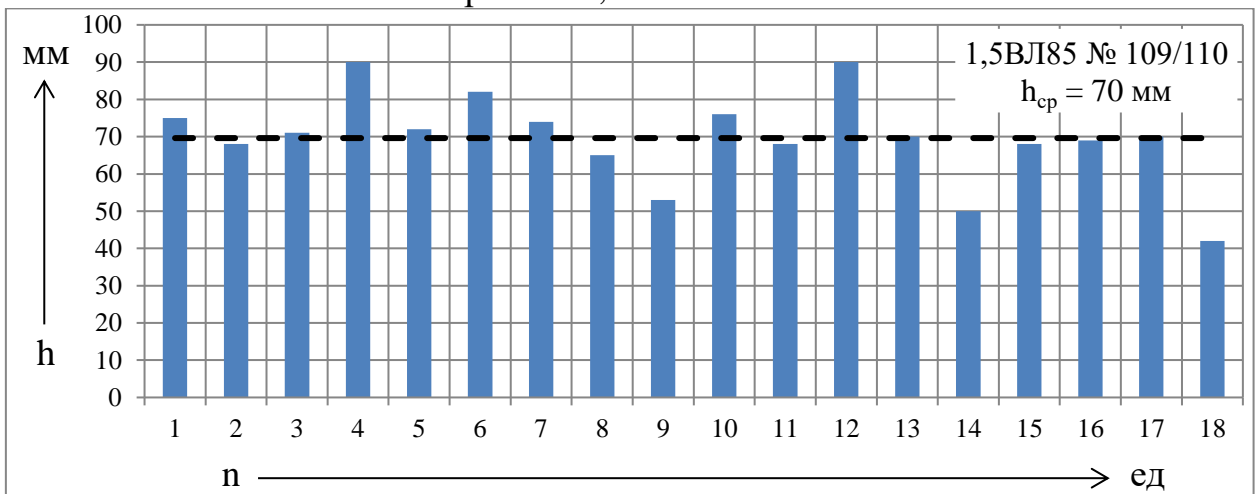


Рисунок П.3.12. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза 1,5ВЛ85 №109/110

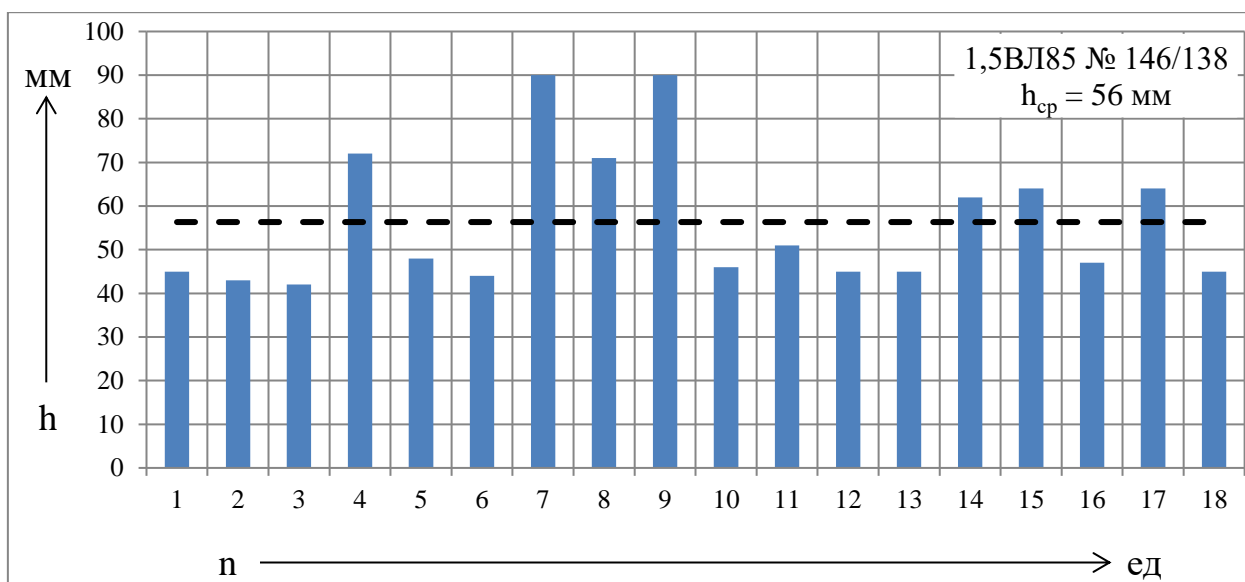


Рисунок П.3.13. Толщина бандажей колесных пар трехсекционного электровоза 1,5ВЛ85 №146/138

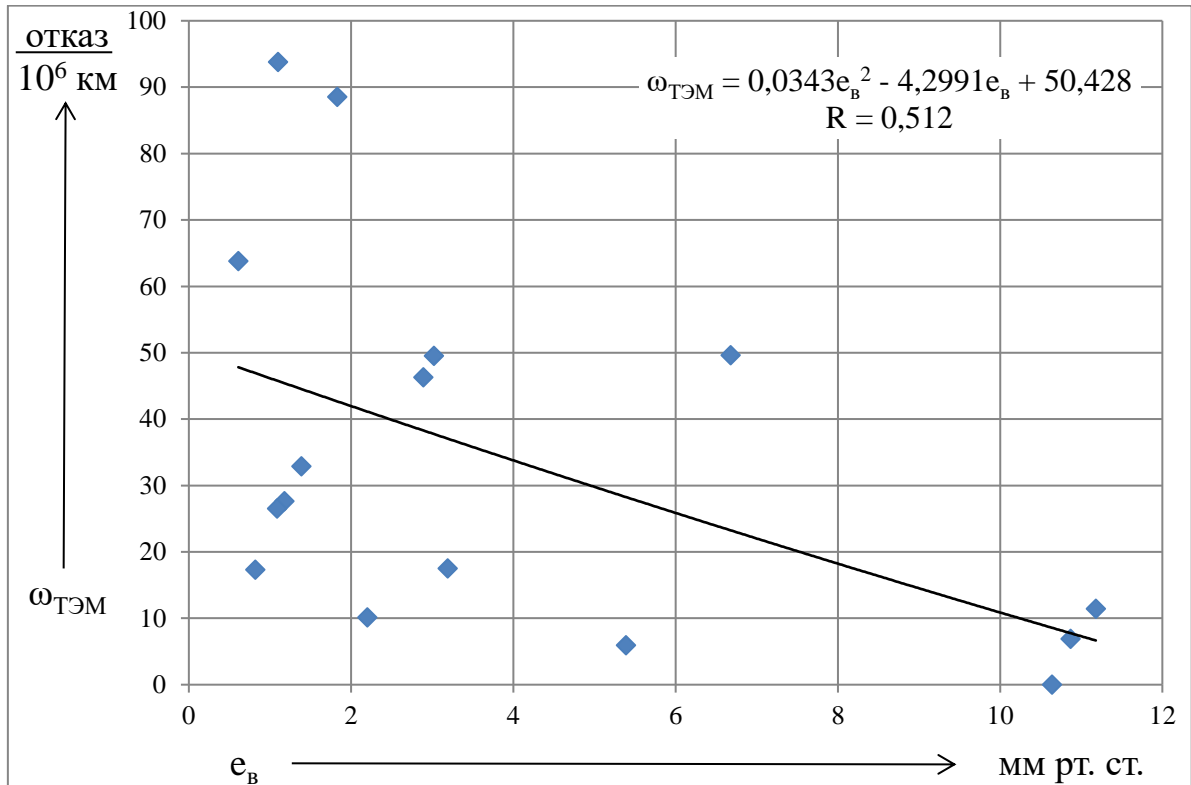


Рисунок П.4.1. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Севербайкальск

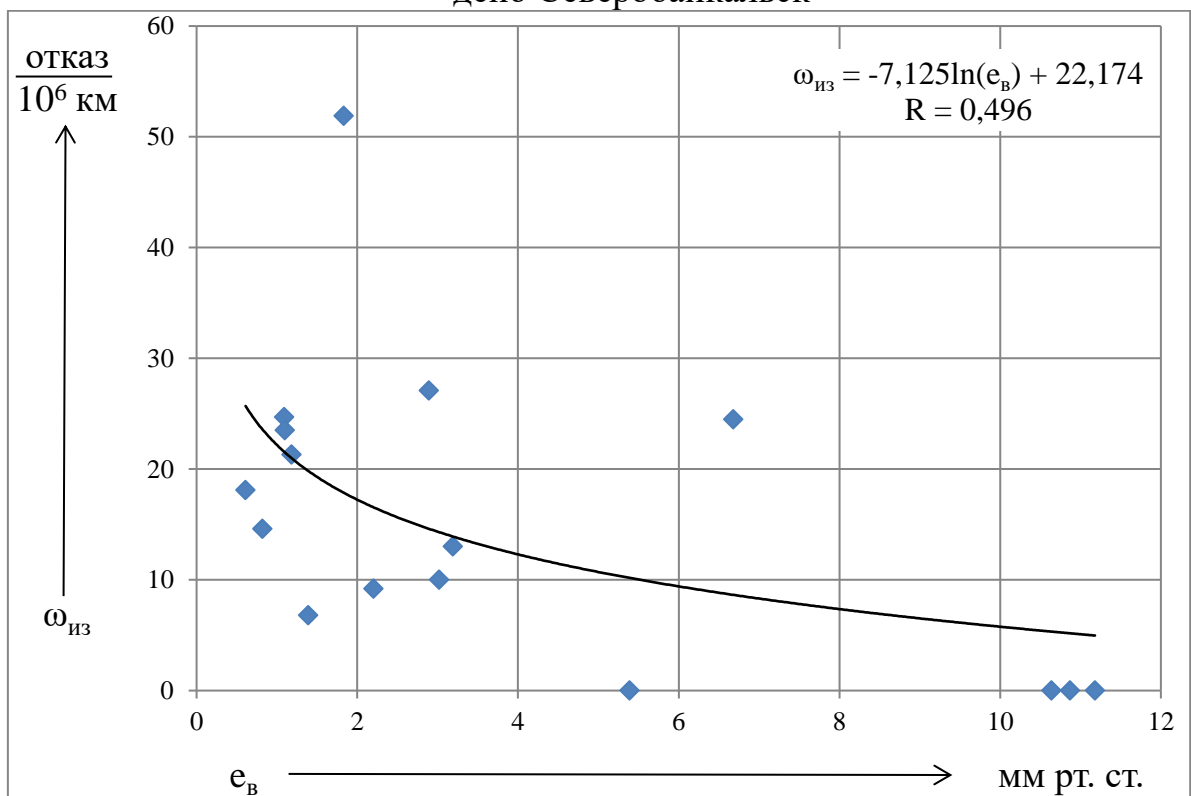


Рисунок П.4.2. Влияние среднемесячной абсолютной влажности воздуха на безотказность изоляции ТЭМ депо Севербайкальск

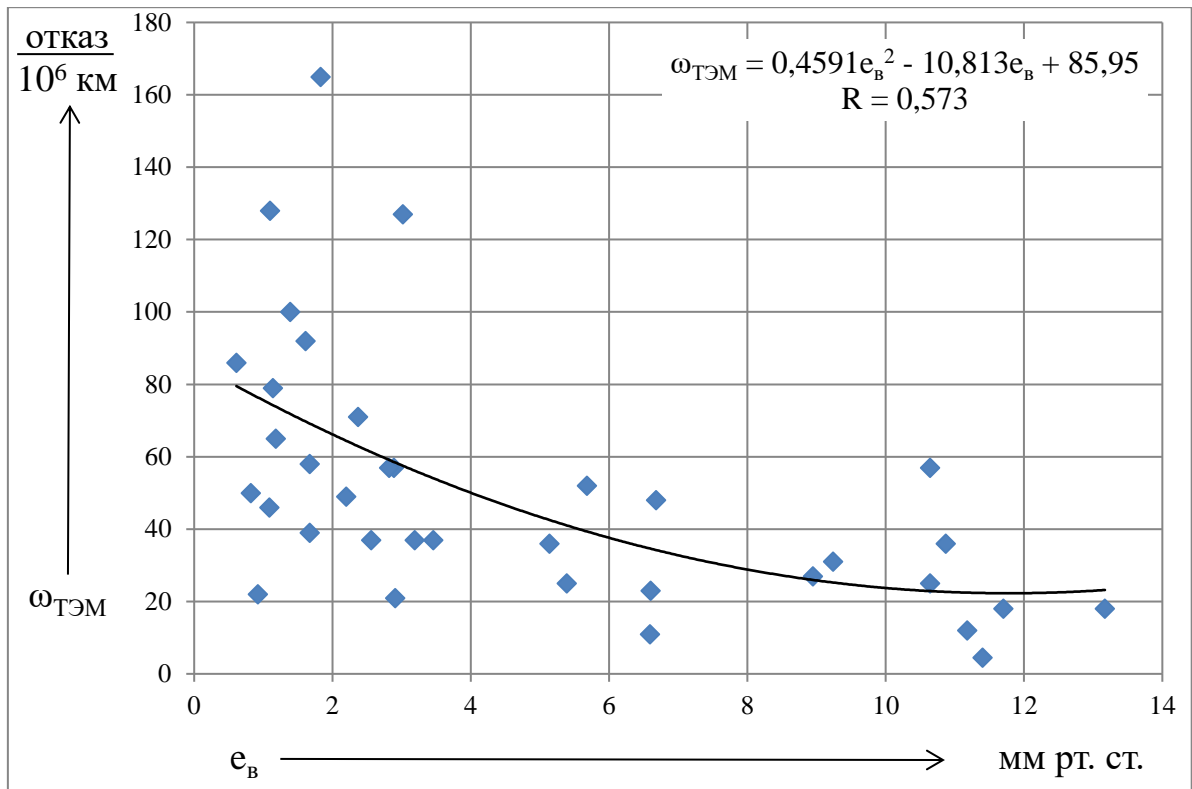


Рисунок П.4.3. Характер изменения параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Северобайкальск

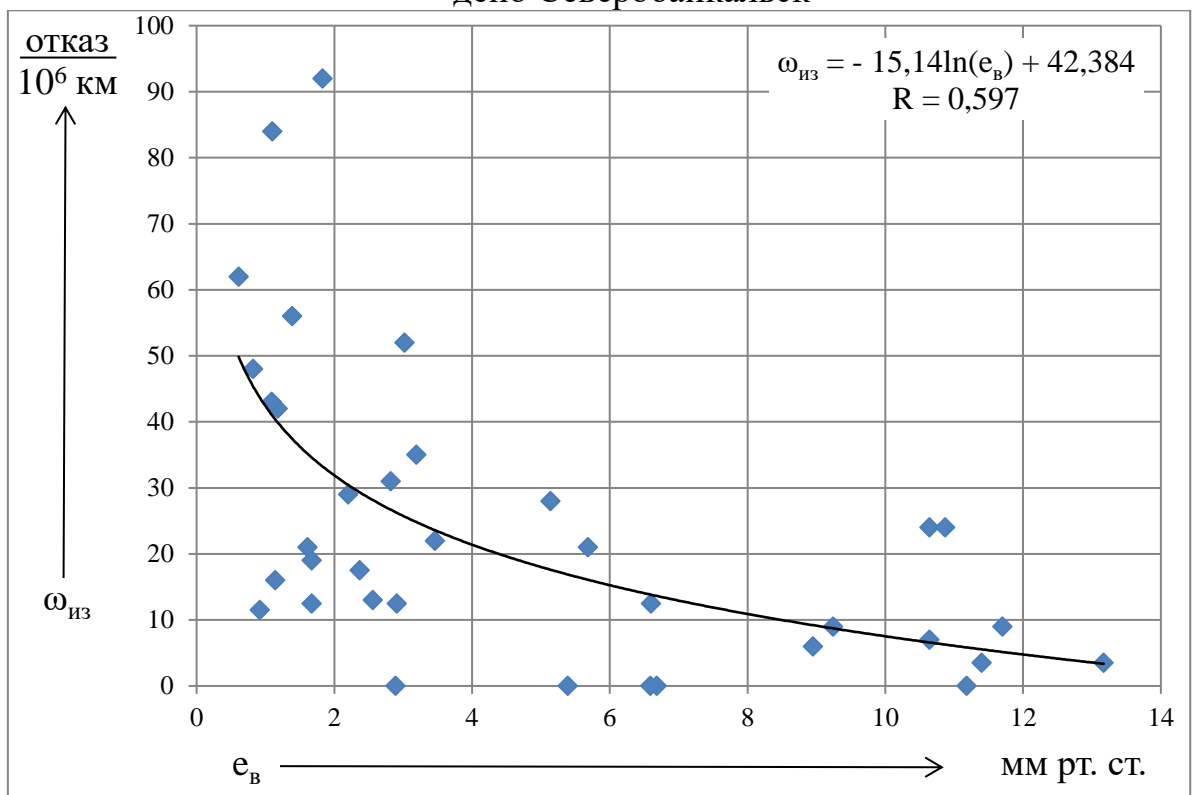


Рисунок П.4.4. Влияние среднемесячной абсолютной влажности воздуха на безотказность изоляции ТЭМ депо Северобайкальск

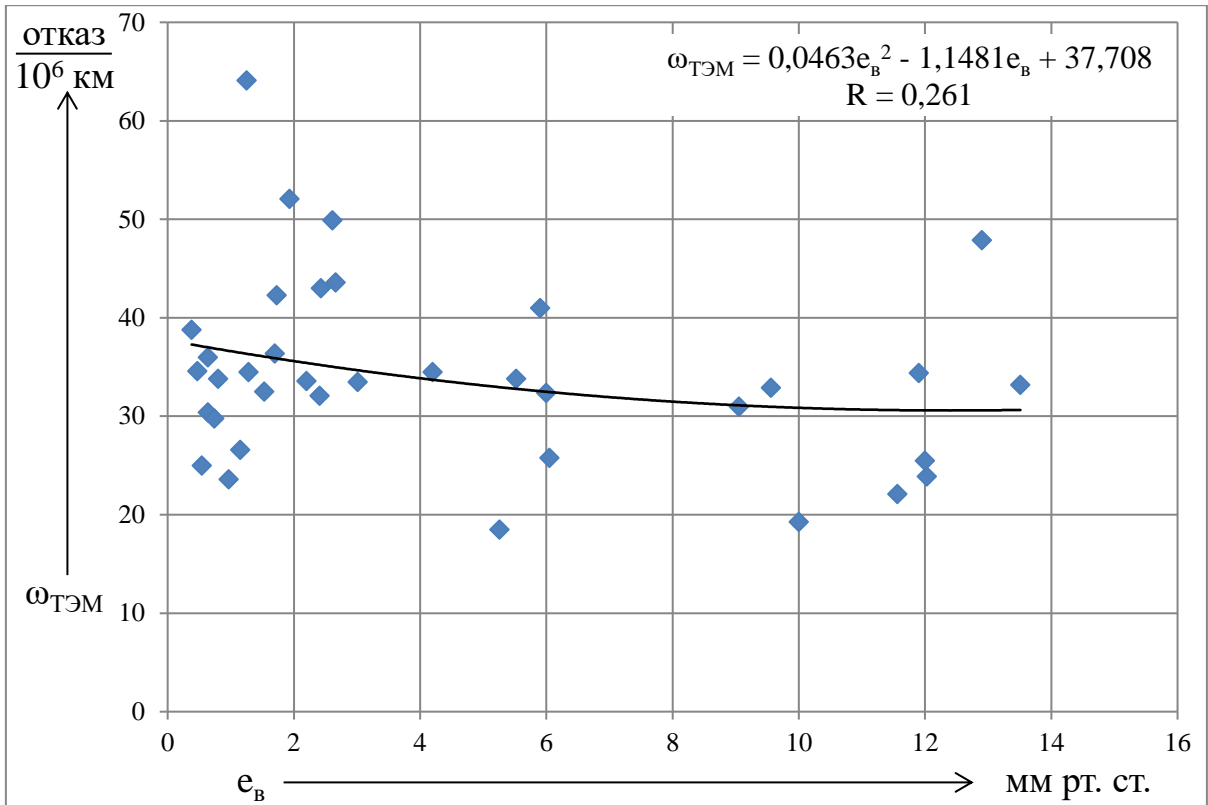


Рисунок П.4.5. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Вихоревка

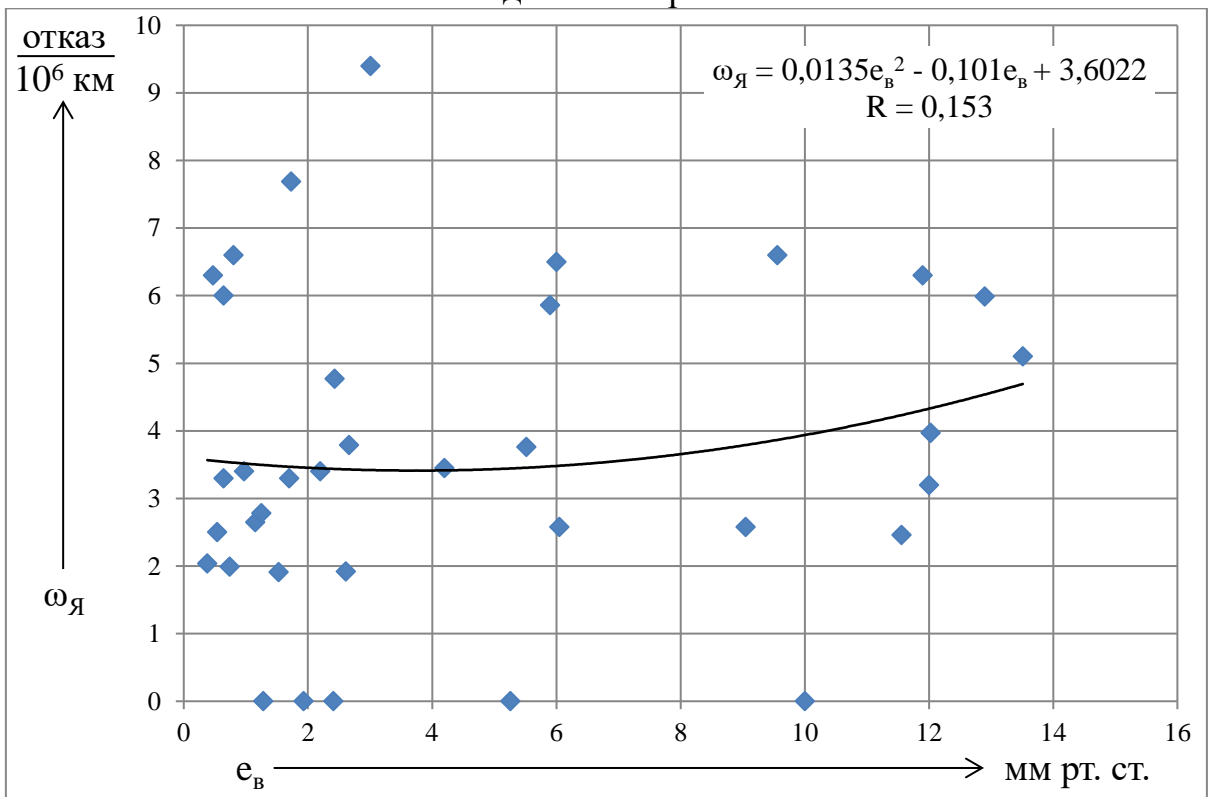


Рисунок П.4.6. Характер изменения параметра потока отказов якорных обмоток ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Вихоревка

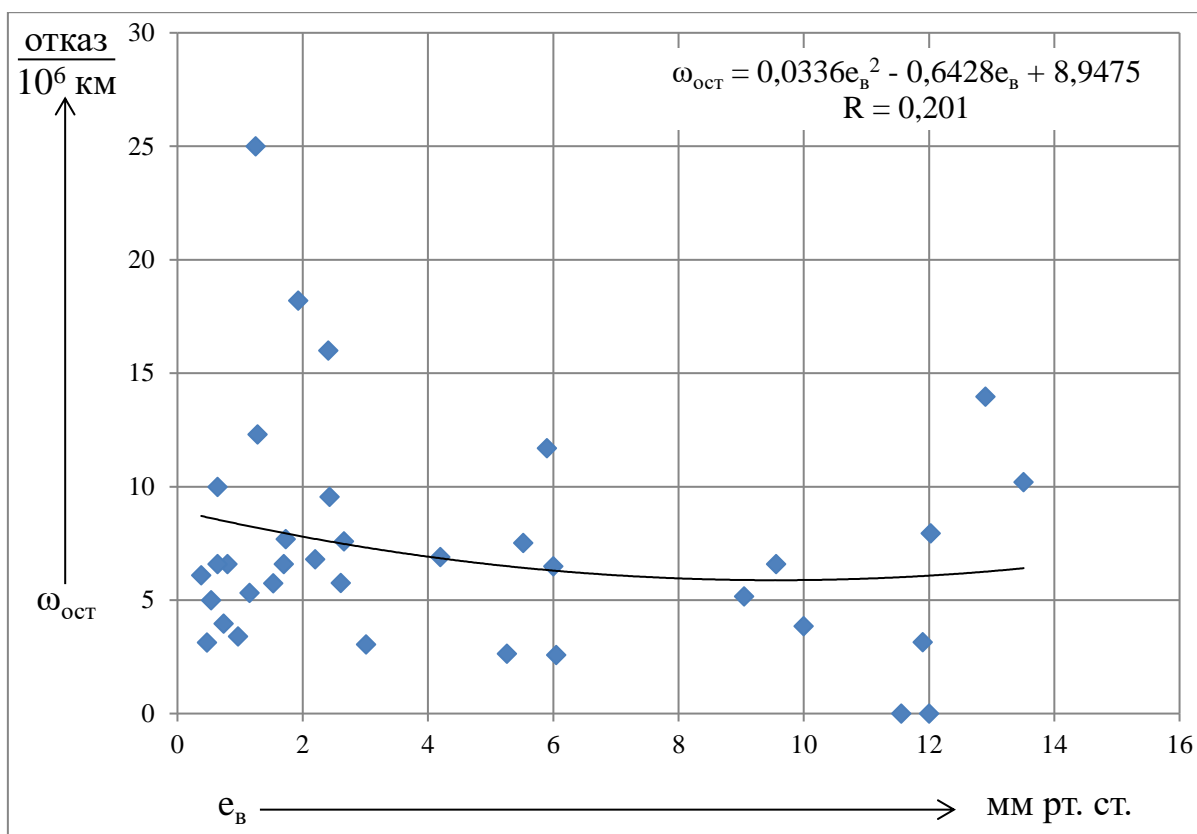


Рисунок П.4.7. Влияние среднемесячной абсолютной влажности воздуха на безотказность изоляции остовных обмоток ТЭМ депо Вихоревка

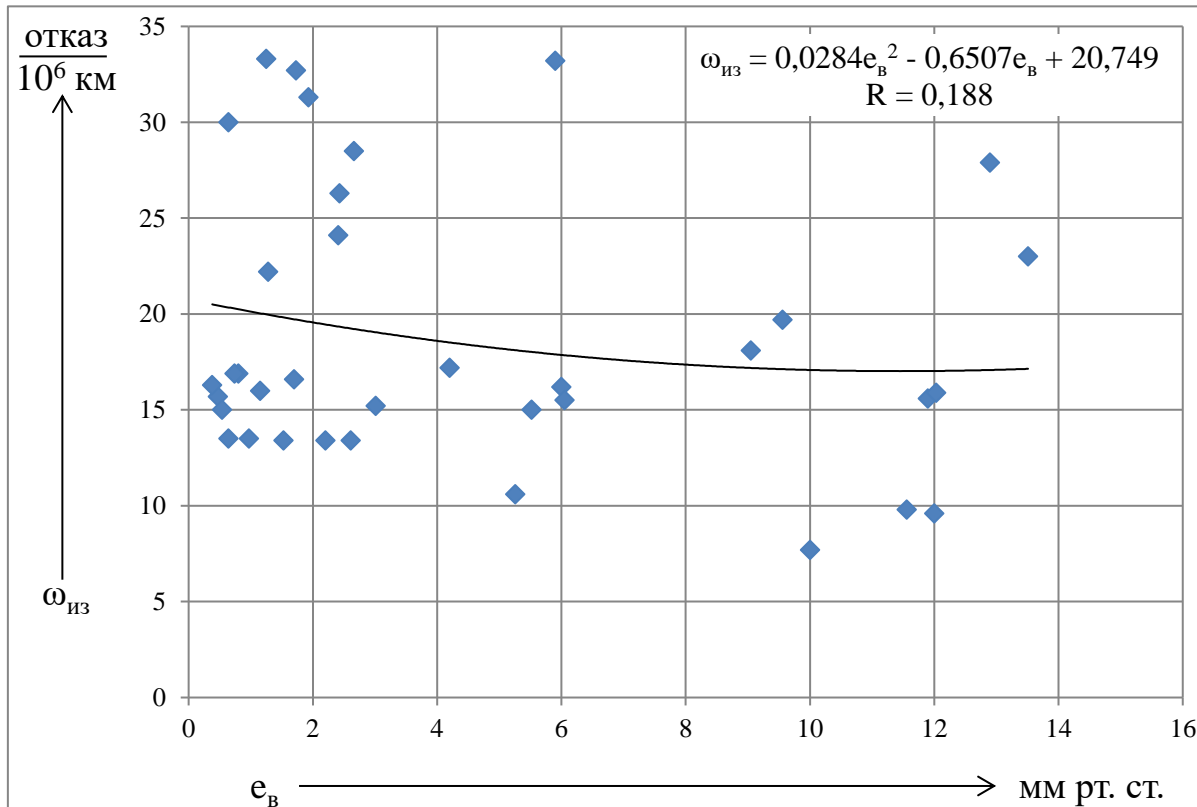


Рисунок П.4.8. Зависимость параметра потока отказов изоляции ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Вихоревка



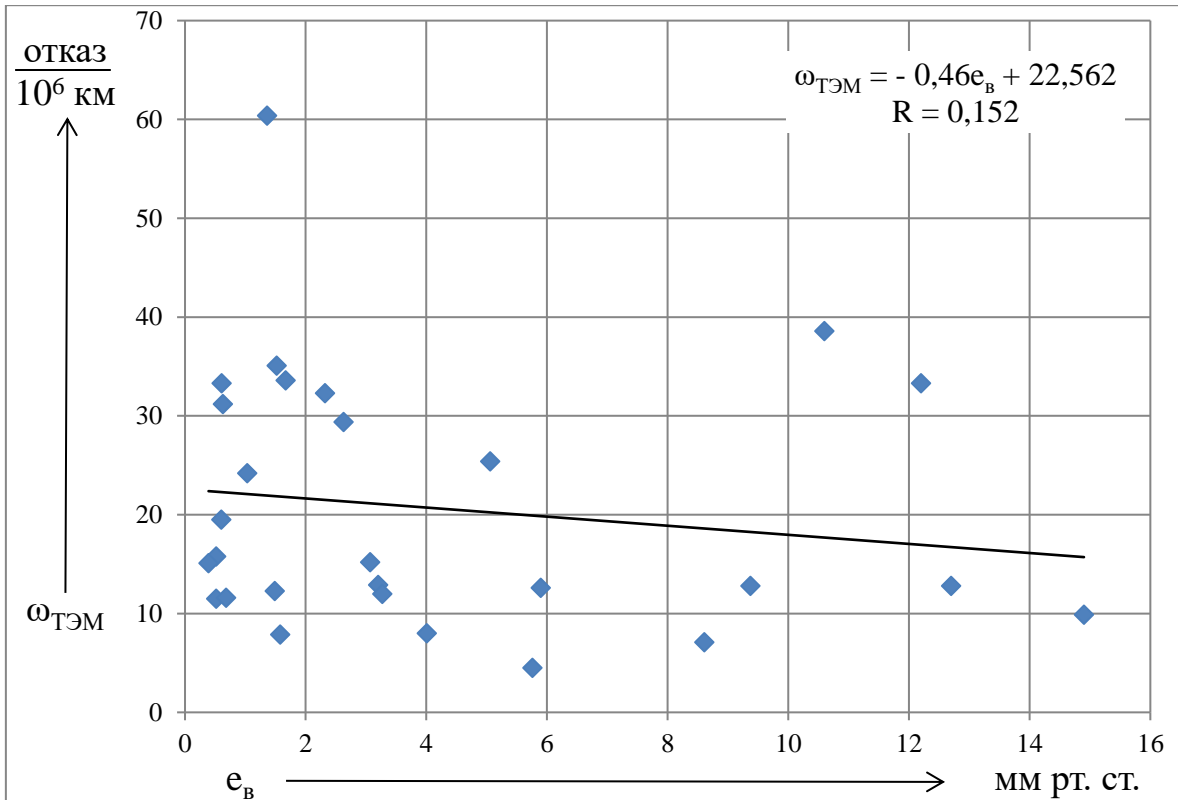


Рисунок П.4.9. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха электровозов ВЛ80ТК северного направления В-Сиб ж.д.

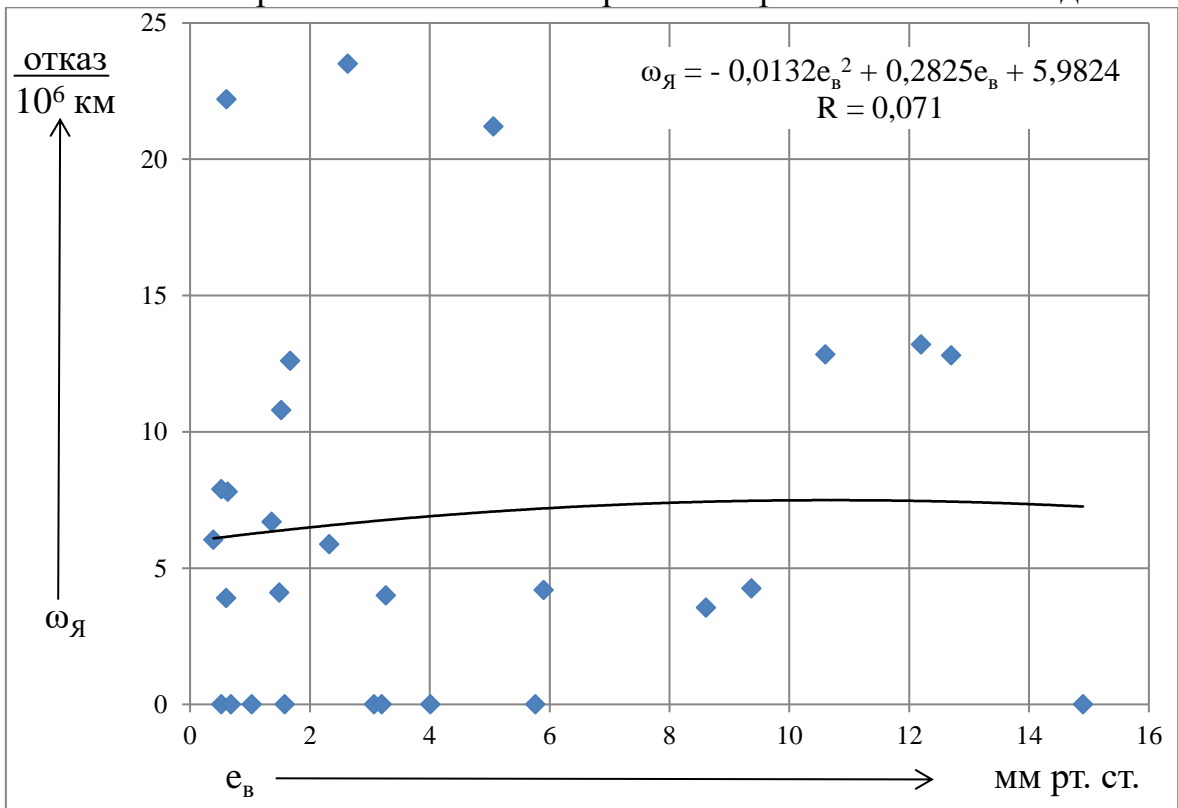


Рисунок П.4.10. Характер изменения параметра потока отказов якорных обмоток ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха электровозов ВЛ80ТК северного направления В-Сиб ж.д.

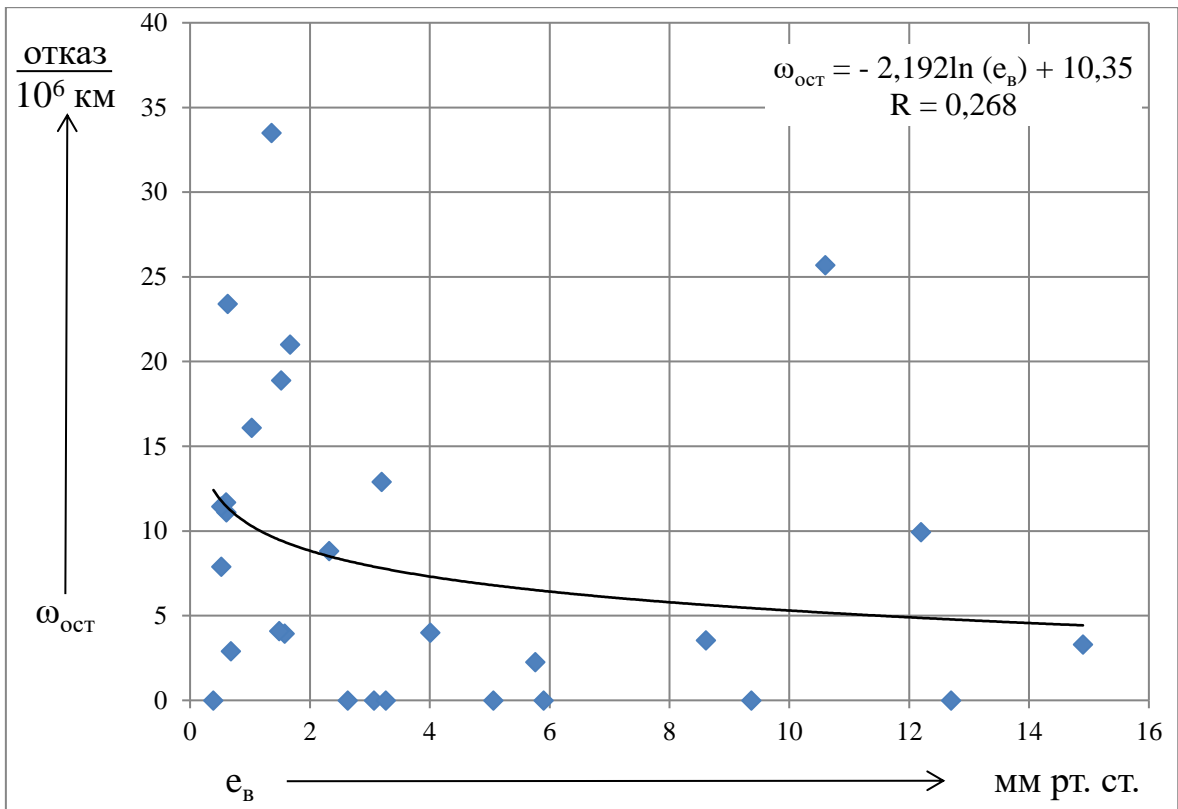


Рисунок П.4.11. Влияние среднемесячной абсолютной влажности воздуха на безотказность изоляции остовных обмоток электровозов ВЛ80ТК северного направления В-Сиб ж.д.

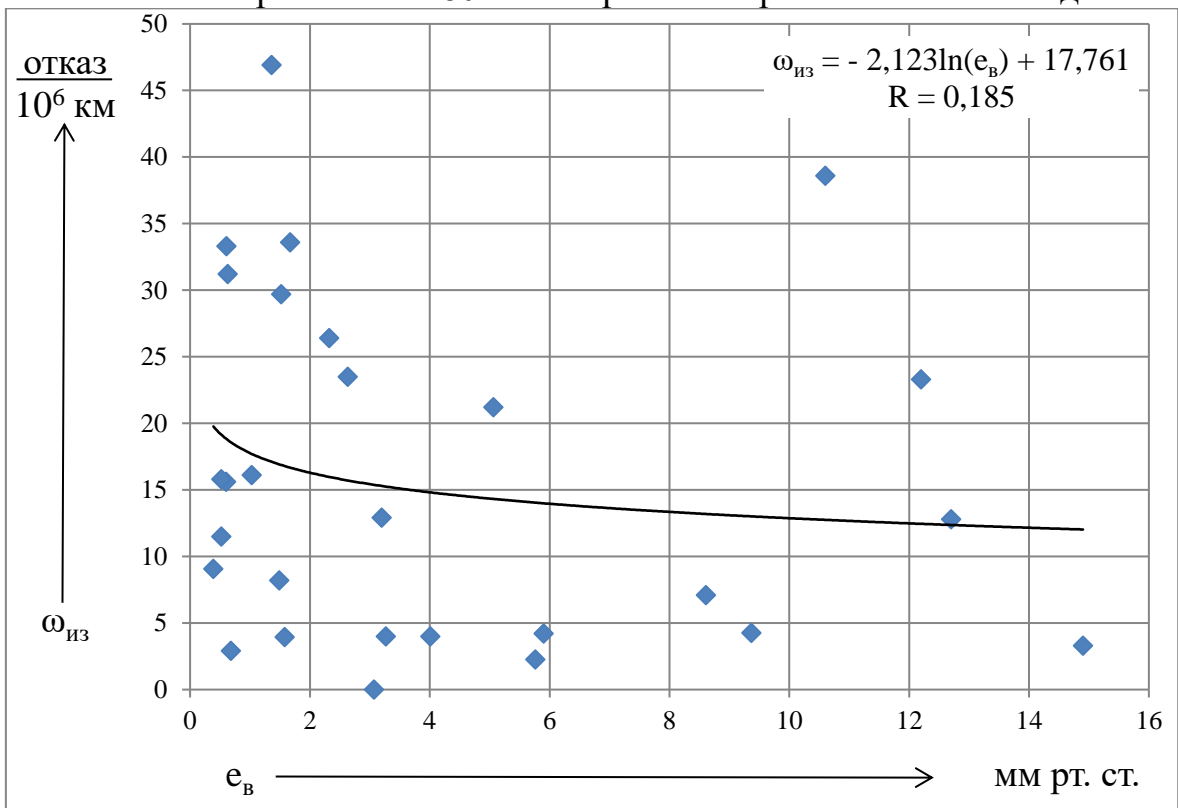


Рисунок П.4.12. Зависимость параметра потока отказов изоляции ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха электровозов ВЛ80ТК северного направления В-Сиб ж.д.

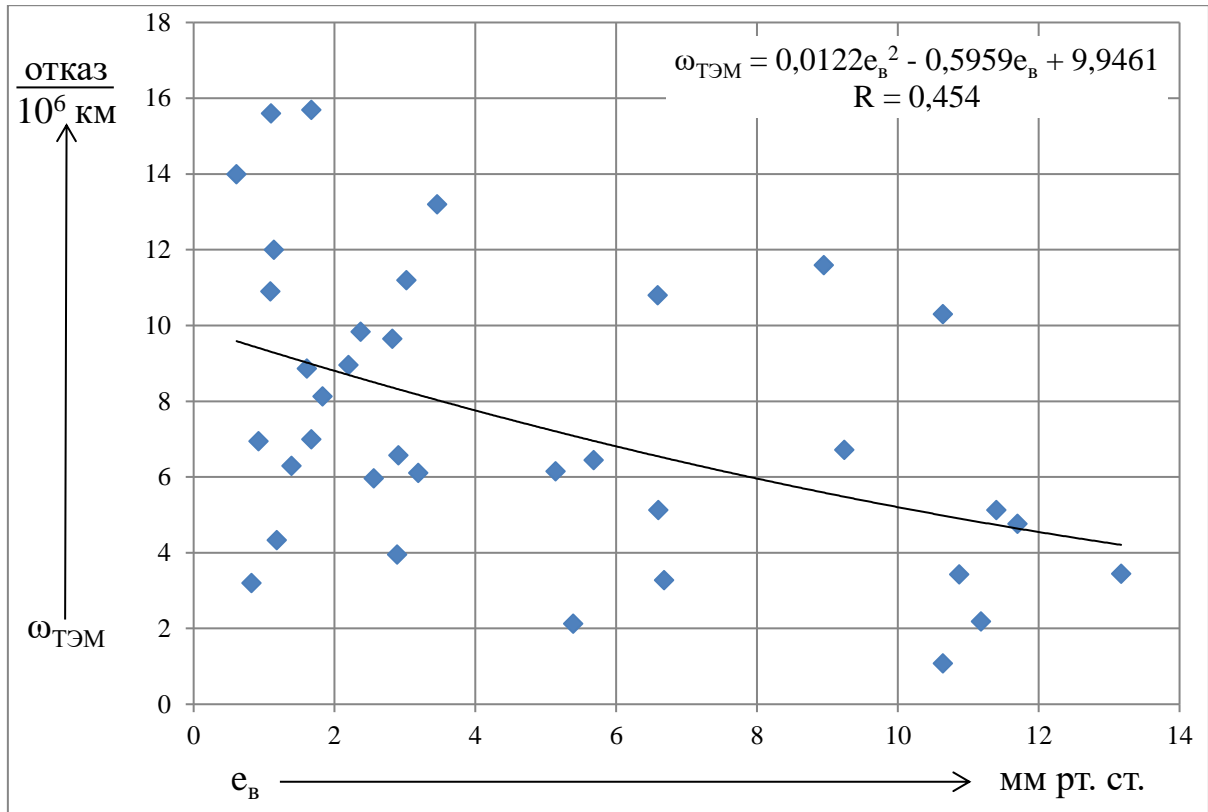


Рисунок П.4.13. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Нижнеудинск

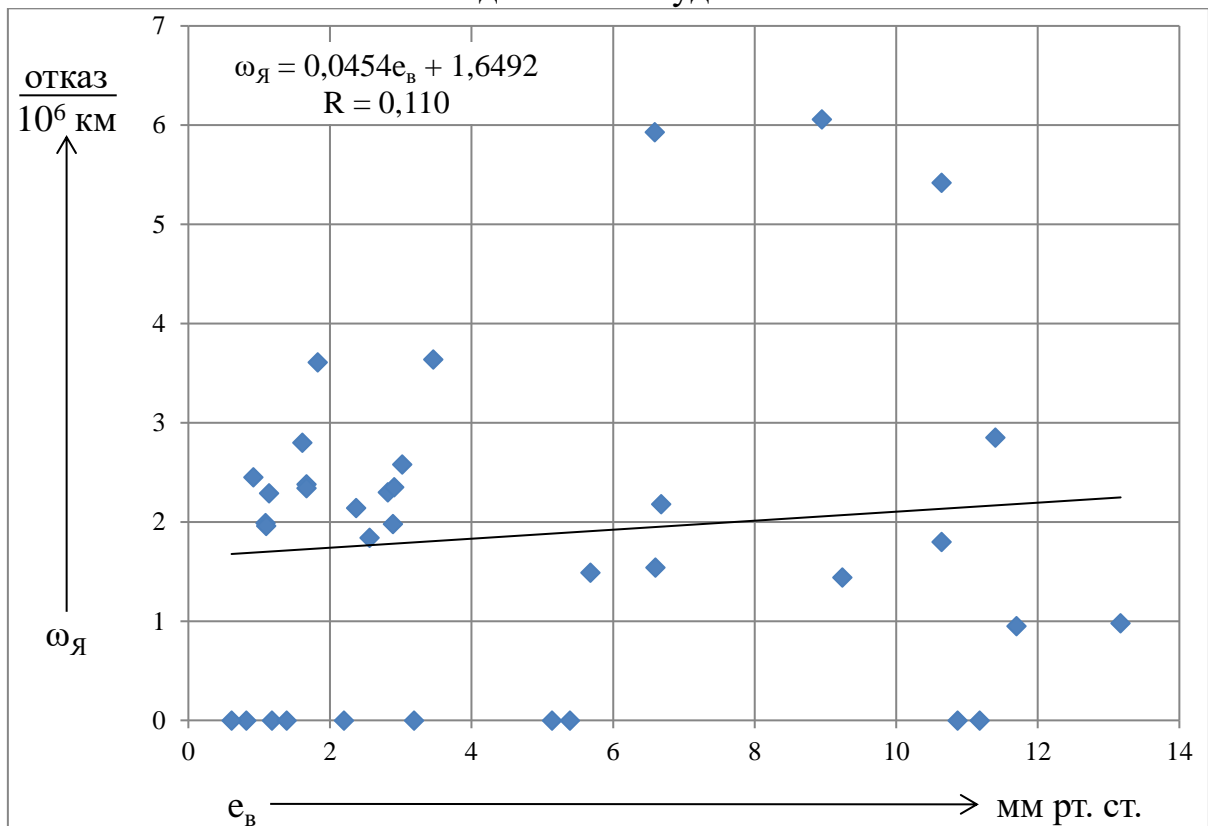


Рисунок П.4.14. Характер изменения параметра потока отказов якорных обмоток ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Нижнеудинск

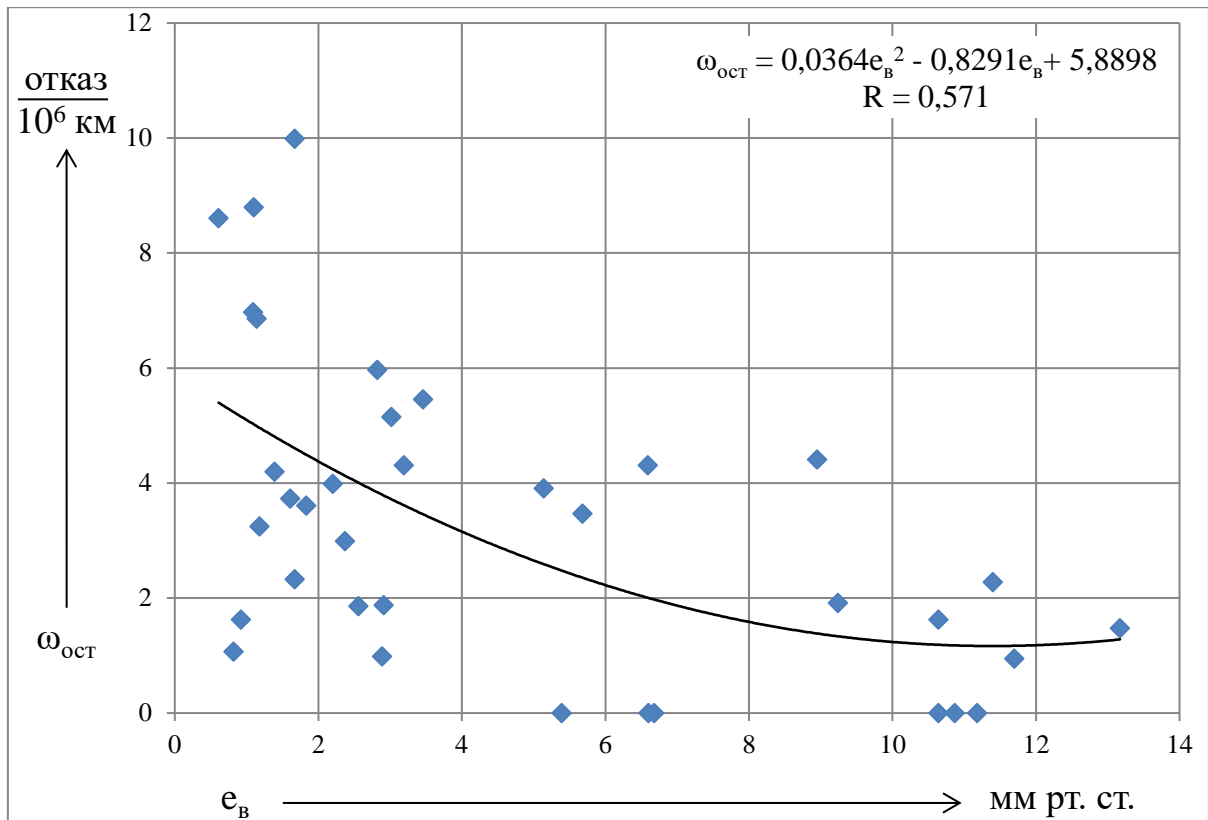


Рисунок П.4.15. Влияние среднемесячной абсолютной влажности воздуха на безотказность изоляции остовных обмоток депо Нижнеудинск

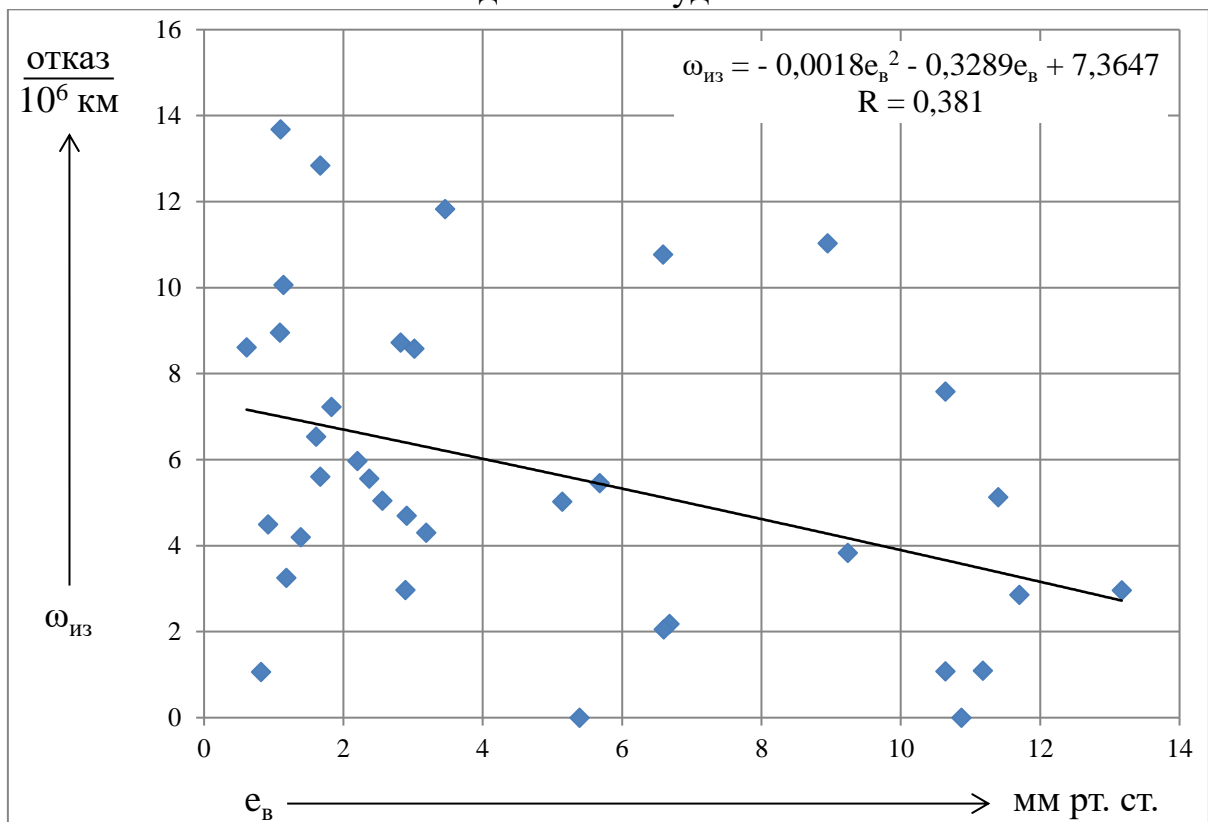


Рисунок П.4.16. Зависимость параметра потока отказов изоляции ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Нижнеудинск

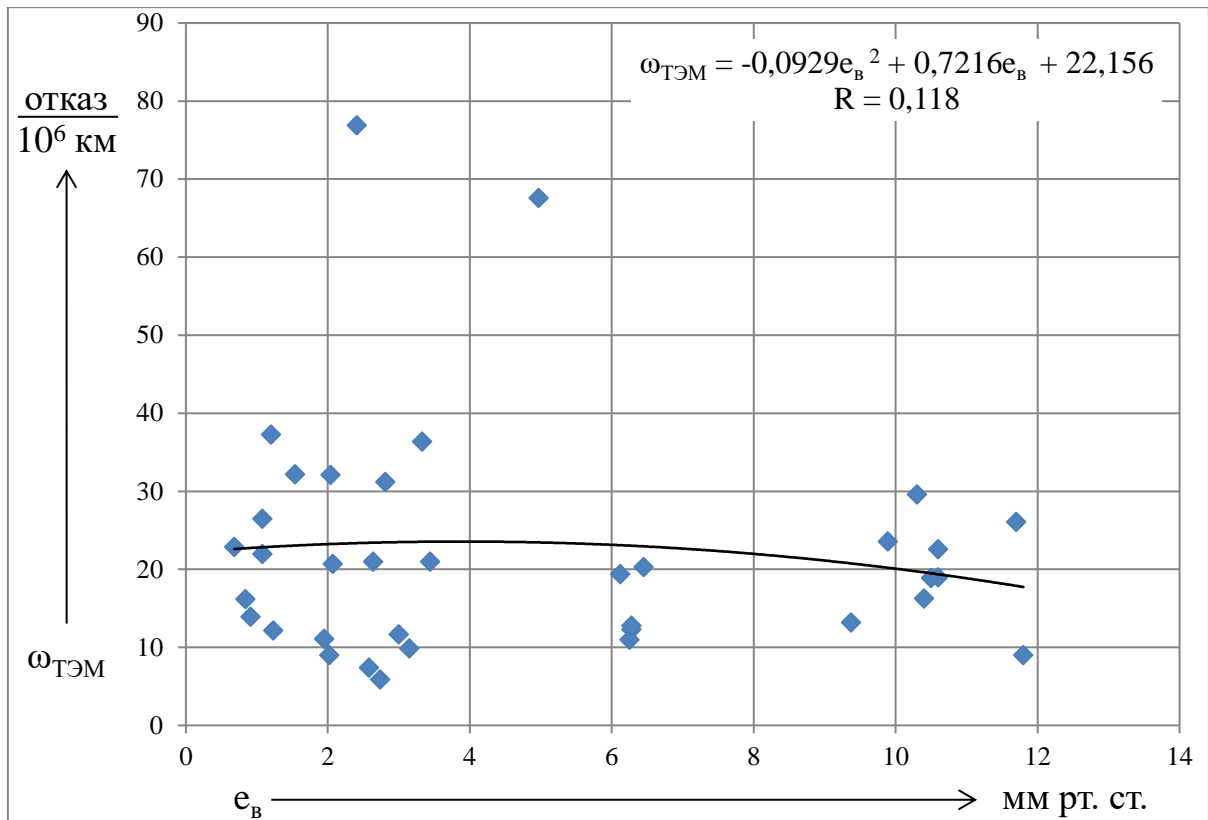


Рисунок П.4.17. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Абакан

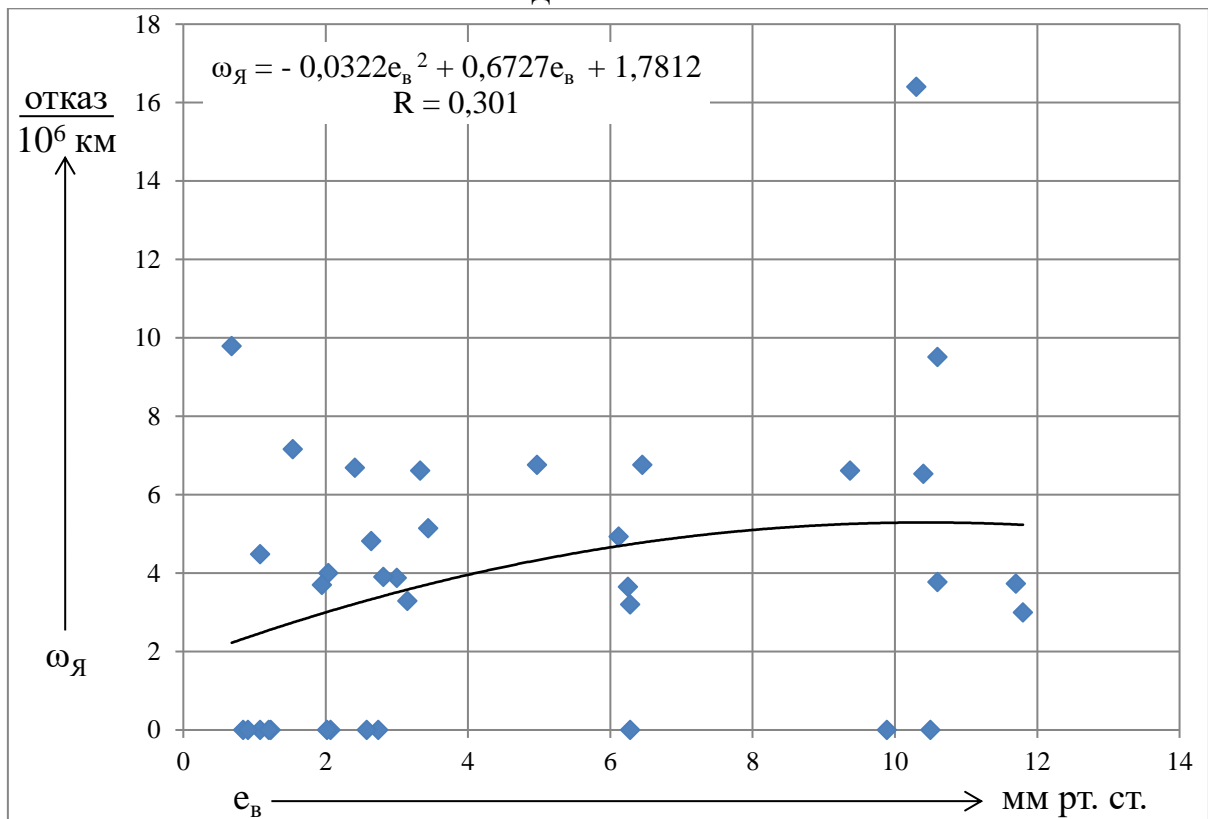


Рисунок П.4.18. Характер изменения параметра потока отказов якорных обмоток ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Абакан

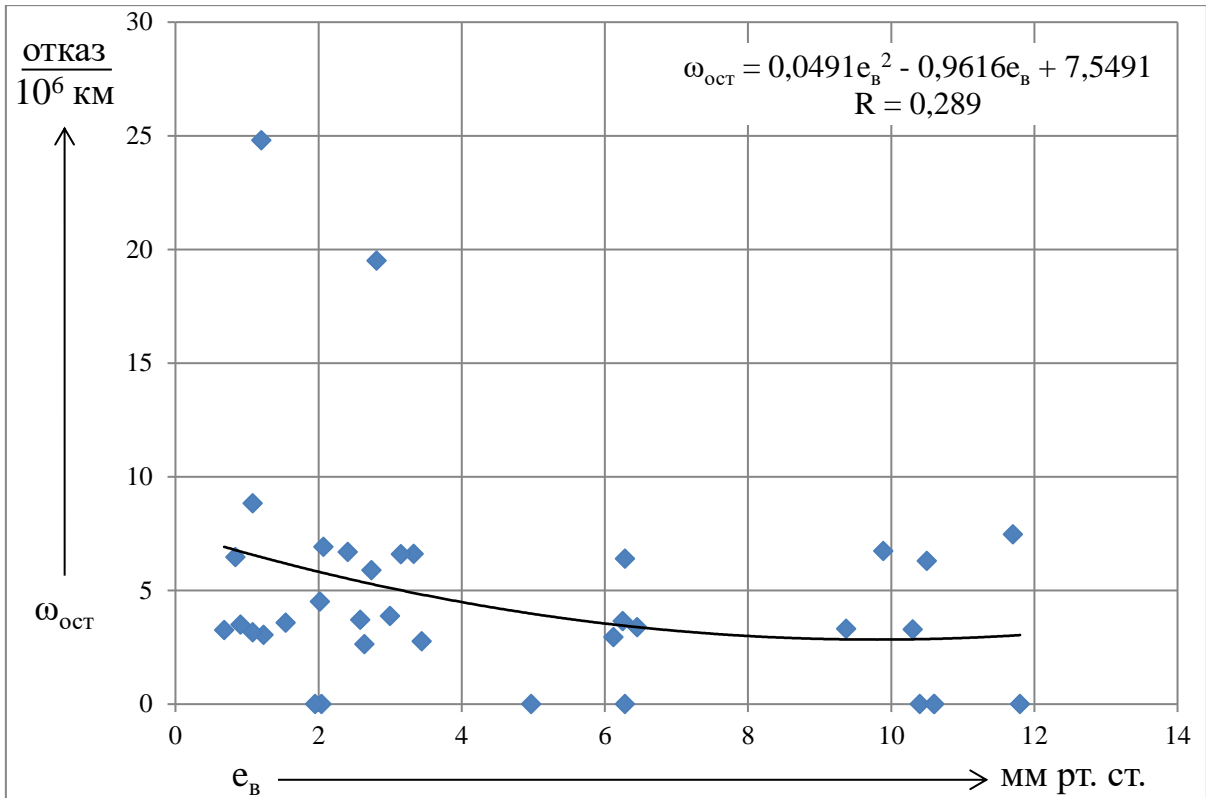


Рисунок П.4.19. Влияние среднемесячной абсолютной влажности воздуха на безотказность изоляции остовных обмоток ТЭМ депо Абакан

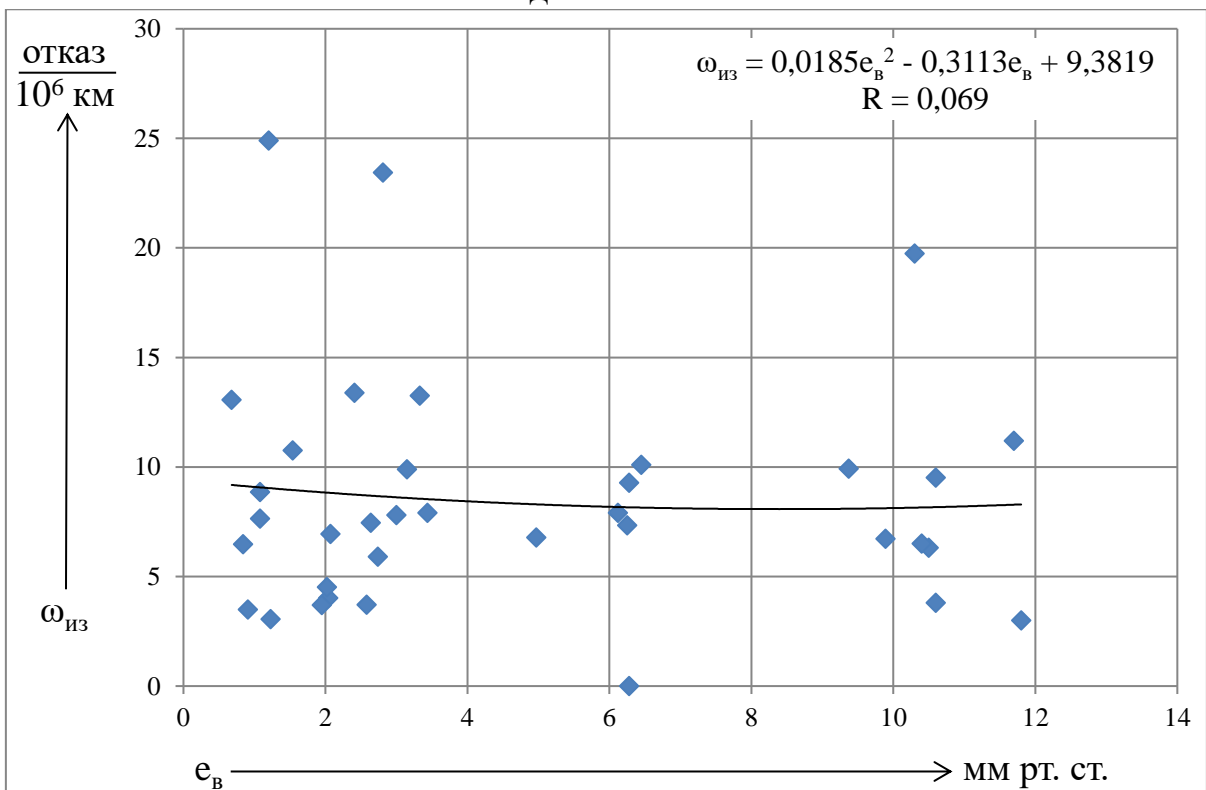


Рисунок П.4.20. Зависимость параметра потока отказов изоляции ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха депо Абакан

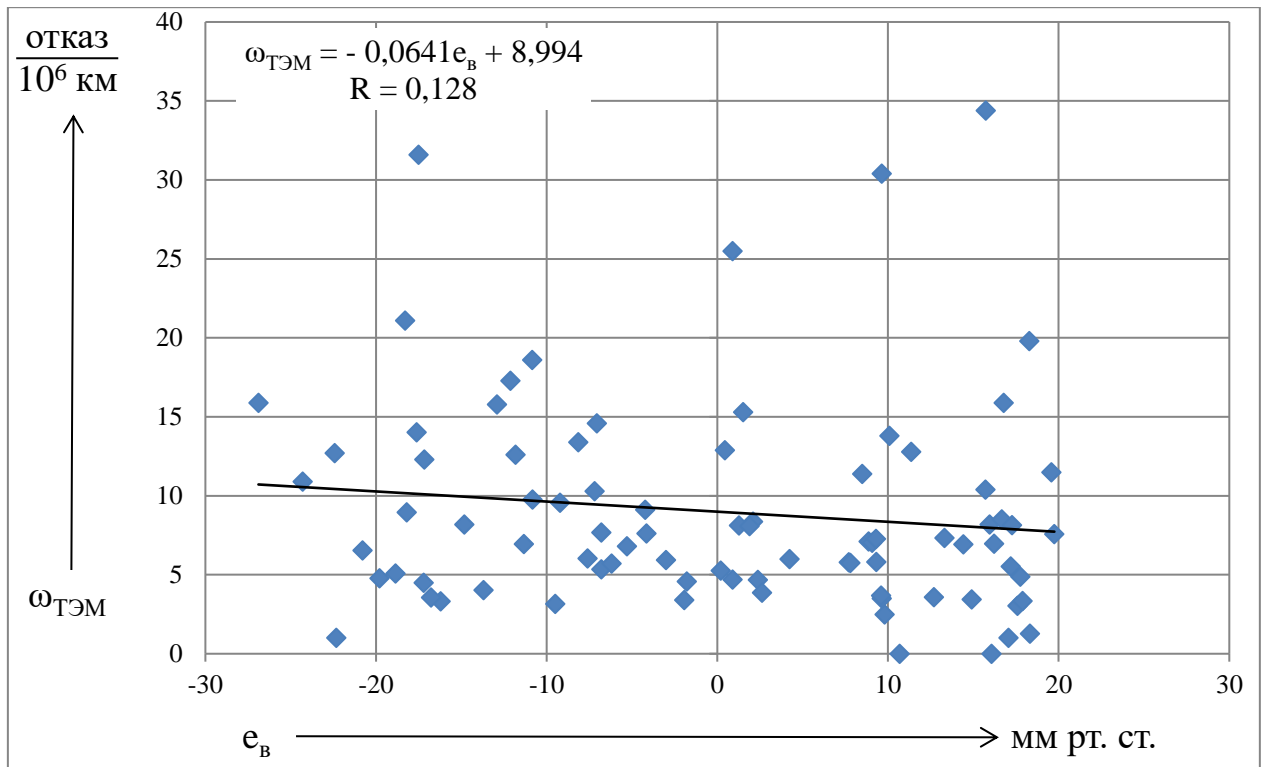


Рисунок П.4.21. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха центрального направления В-Сиб ж.д.

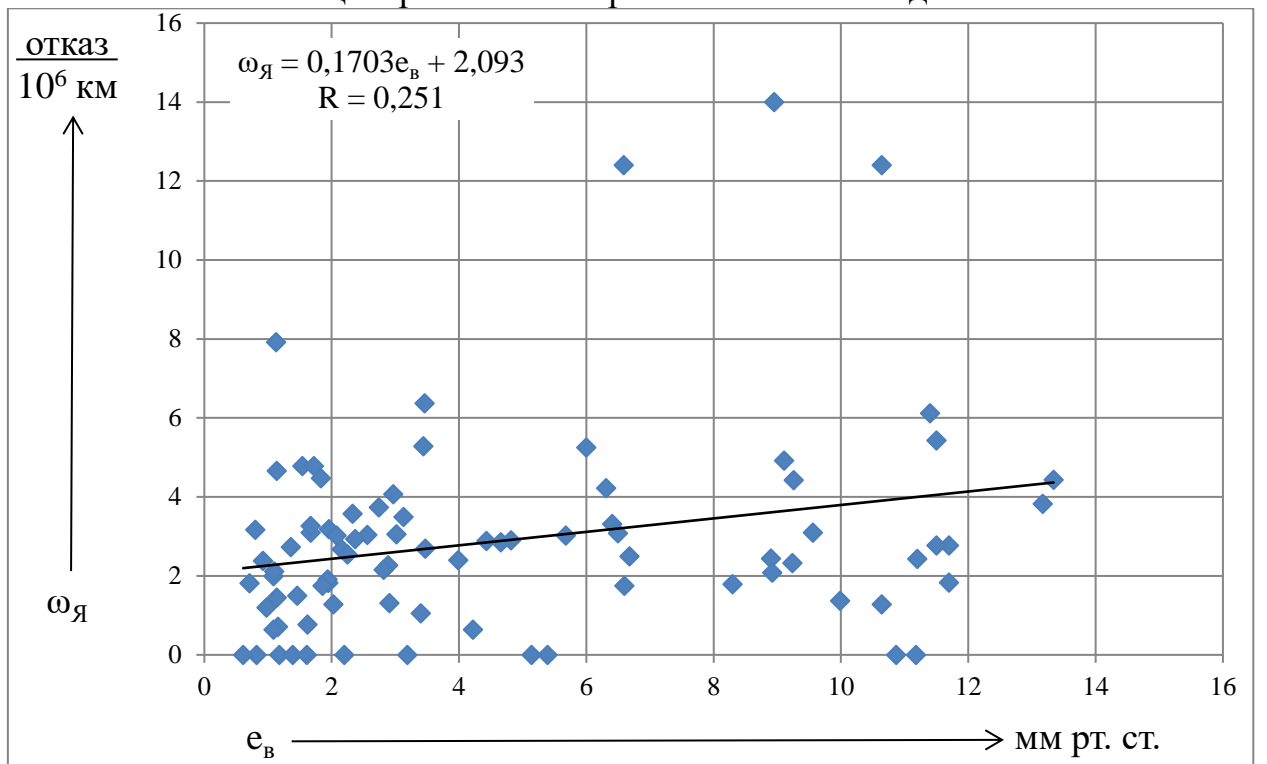


Рисунок П.4.22. Характер изменения параметра потока отказов якорных обмоток ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха центрального направления В-Сиб ж.д.

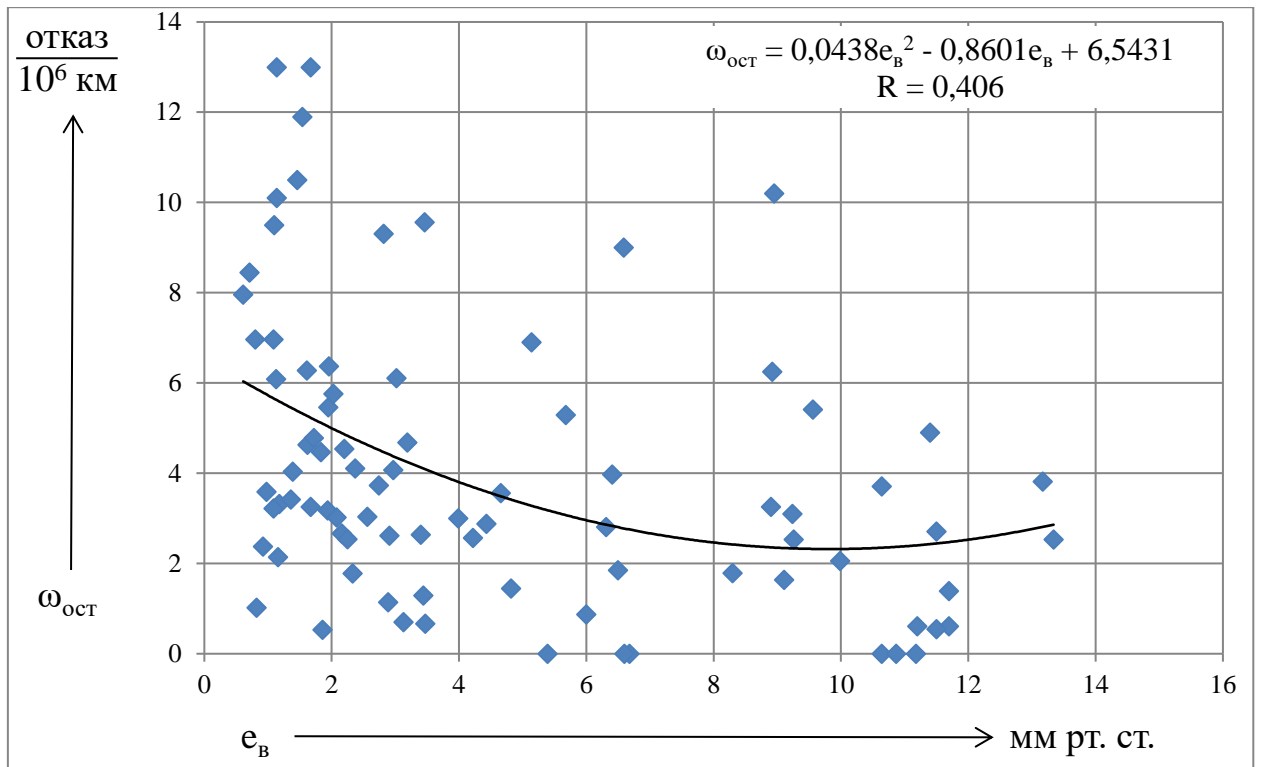


Рисунок П.4.23. Влияние среднемесячной абсолютной влажности воздуха на безотказность изоляции остовных обмоток ТЭМ центрального направления В-Сиб ж.д.

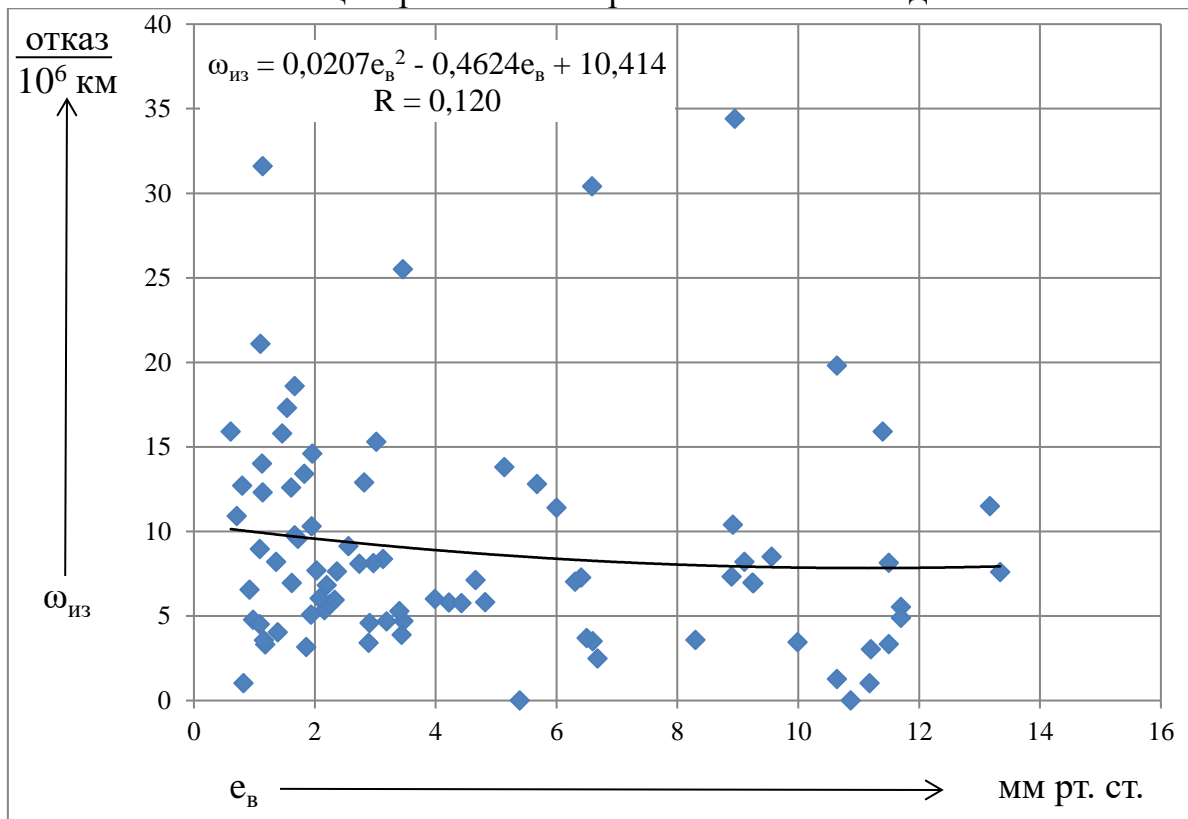


Рисунок П.4.24. Зависимость параметра потока отказов изоляции ТЭМ от среднемесячной абсолютной влажности воздуха центрального направления В-Сиб ж.д.



**Характер влияния природно-климатических факторов  
на безотказность ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка,  
эксплуатируемых на полигоне Тайшет-Лена  
северного направления Транссиба, в период  
с января 2000 по декабрь 2002 года**

При анализе прямой безотказности тяговых электрических машин  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  электровозов ВЛ85 депо Вихоревка от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$  приведенных на рисунке П.5.1, можно отметить, что средние значения параметров потоков отказов как ТЭМ, так изоляции ТЭМ в несколько раз превышают аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Наклон зависимости  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  ( $\vartheta_{\text{в}}$ ) указывает на ухудшение состояния изоляционных конструкций ТЭМ. Об этом свидетельствуют корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,172$ .

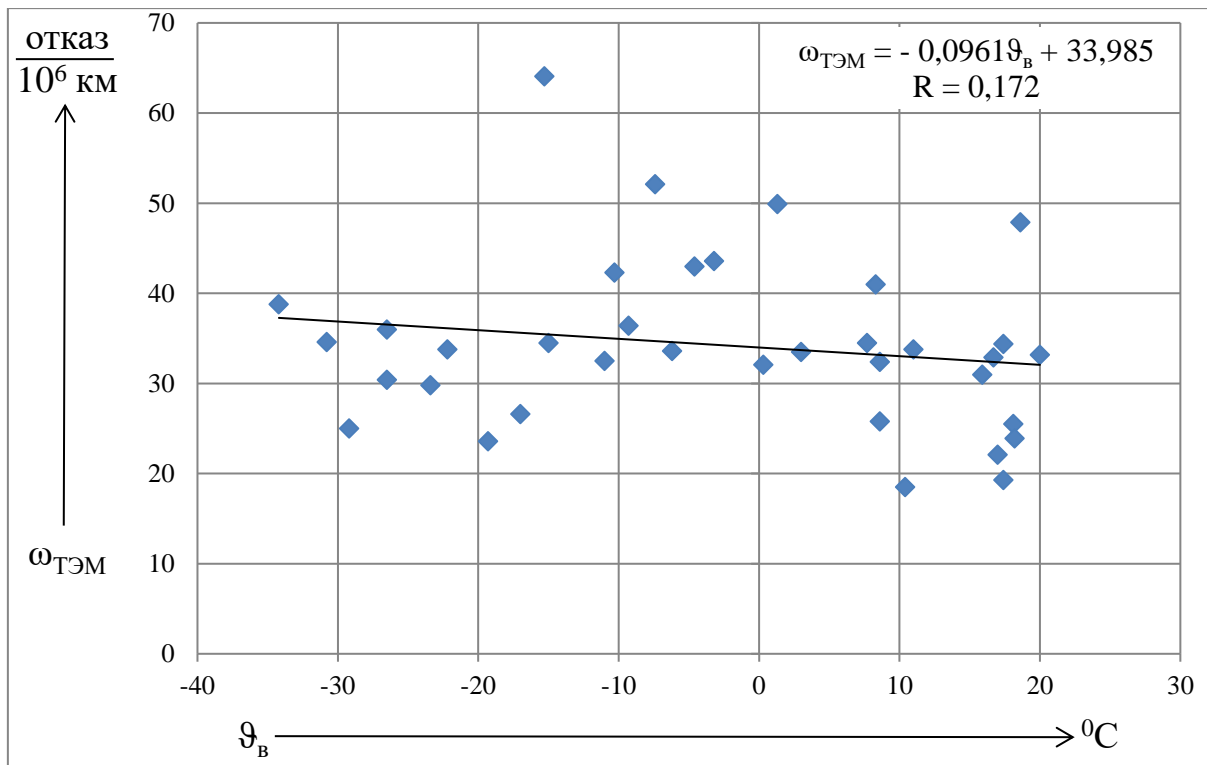


Рисунок П.5.1. Зависимость параметра потока отказов ТЭМ  
от среднемесячной температуры воздуха

При анализе зависимости безотказности якорных обмоток тяговых электрических машин  $\omega_{\text{я}}$  электровозов ВЛ85 депо Вихоревка от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенных на рисунке П.5.2, можно отметить, что среднее значение параметра потока отказов изоляции якорных обмоток ТЭМ в несколько раз превышает аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Характер наклона зависимости  $\omega_{\text{я}}$  ( $\vartheta_{\text{в}}$ ) указывает на резко ухудшенное состояние изоляции якорных обмоток. Более половины парка ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Вихоревка эксплуатируются с непропитанной изоляцией якорных обмоток. Об этом свидетельствуют значительные разбросы ежемесячных параметров потока отказов относительно средней линии тренда зависимостей  $\omega_{\text{я}}(\vartheta_{\text{в}})$ , а, также пониженное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{я}} = 0,069$ .

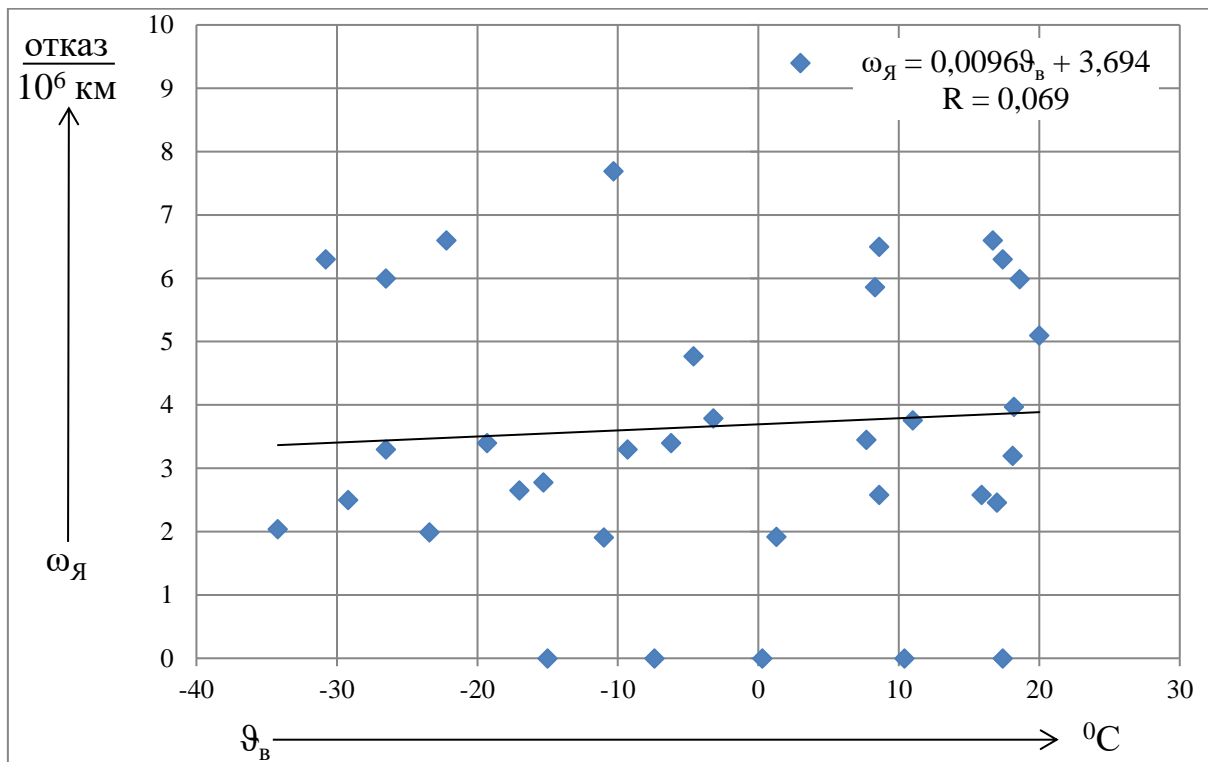


Рисунок П.5.2. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ

При рассмотрении зависимости безотказности остовных обмоток тяговых электрических машин  $\omega_{\text{ост}}$  электровозов ВЛ85 депо Вихоревка от

температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенных на рисунке П.5.3, необходимо отметить, что среднее значение параметра потока отказов изоляции остовных обмоток ТЭМ в несколько раз превышало аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Характер наклона зависимости  $\omega_{\text{ост}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на ухудшенное состояние изоляции остовных обмоток. Об этом свидетельствует пониженное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{я}} = 0,114$ .

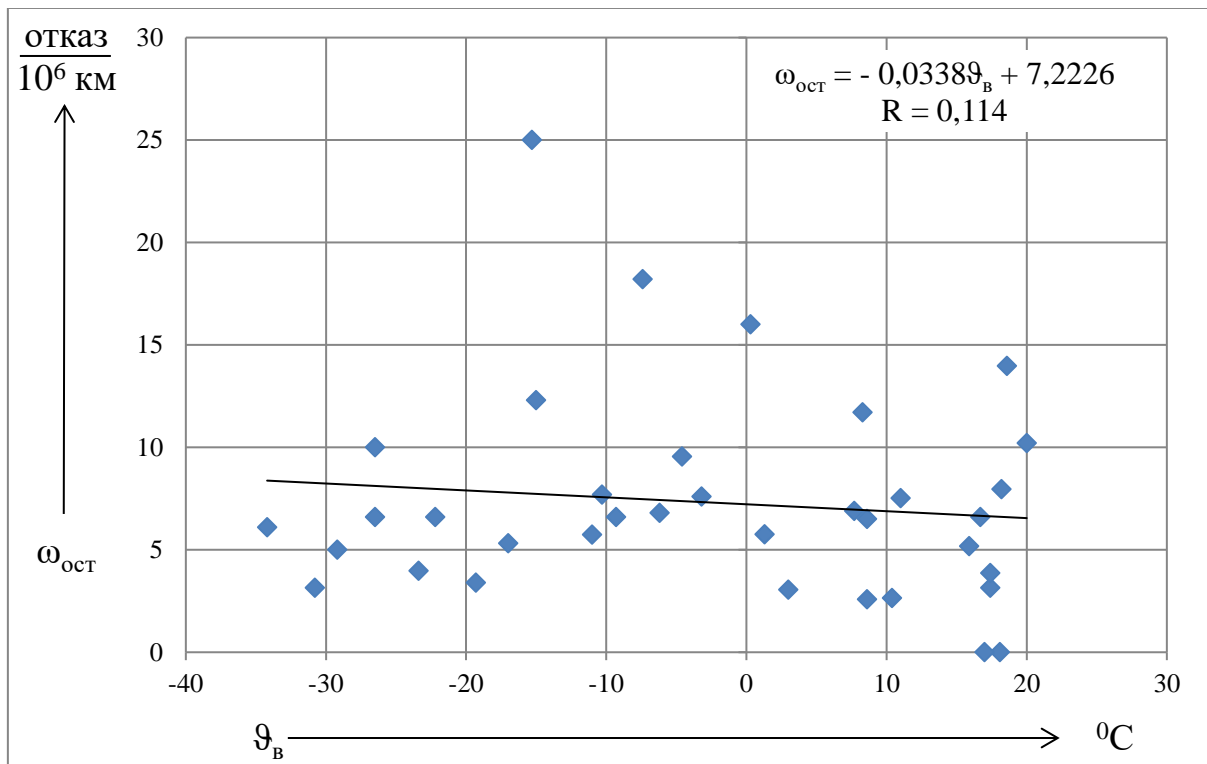


Рисунок П.5.3. Характер изменения параметра потока отказов остовных обмоток ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

Из рассмотрения прямой изоляции ТЭМ  $\omega_{\text{из}}$  электровозов ВЛ85 депо Вихоревка от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенных на рисунке П.5.4, необходимо отметить, что среднее значение параметра потока отказов изоляции ТЭМ в несколько раз превышают аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха составило  $R_{\text{из}} = 0,125$ .

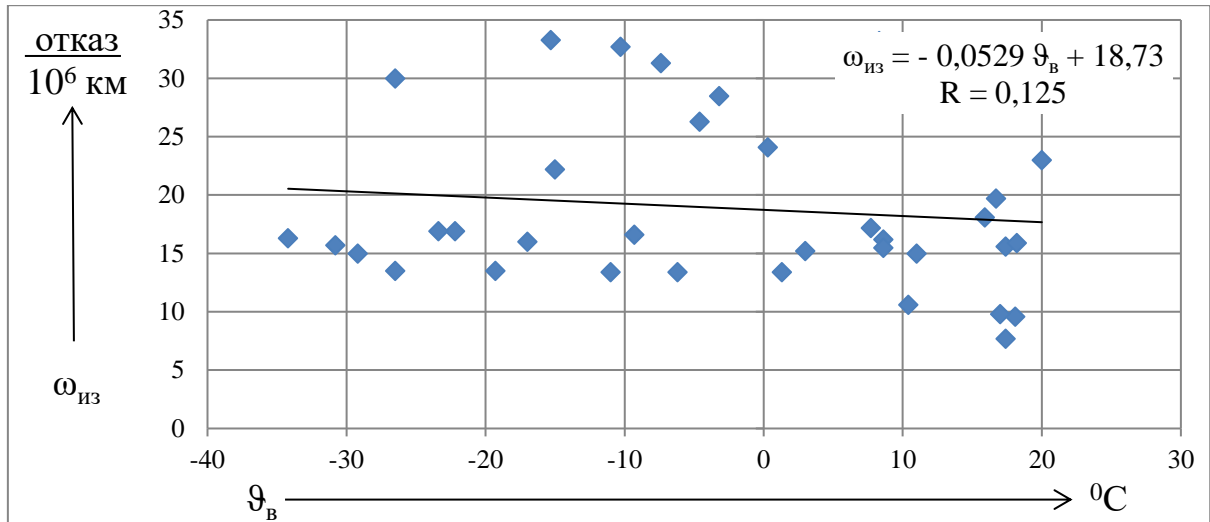


Рисунок П.5.4. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции ТЭМ

Из прямой, описывающей связь показателя безотказности тяговых электрических машин и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок П.5.5), видно ослабленное воздействие вибраций на безотказность ТЭМ. Параметр потока отказов тяговых электрических машин возрастает в 1,5 раза от 32,2 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 48,9 отказов/ $10^6$  км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ85 депо Вихоревка, имеет максимальное значение. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{в}}$ , равно  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,237$  также подтверждает существование ослабление связи.

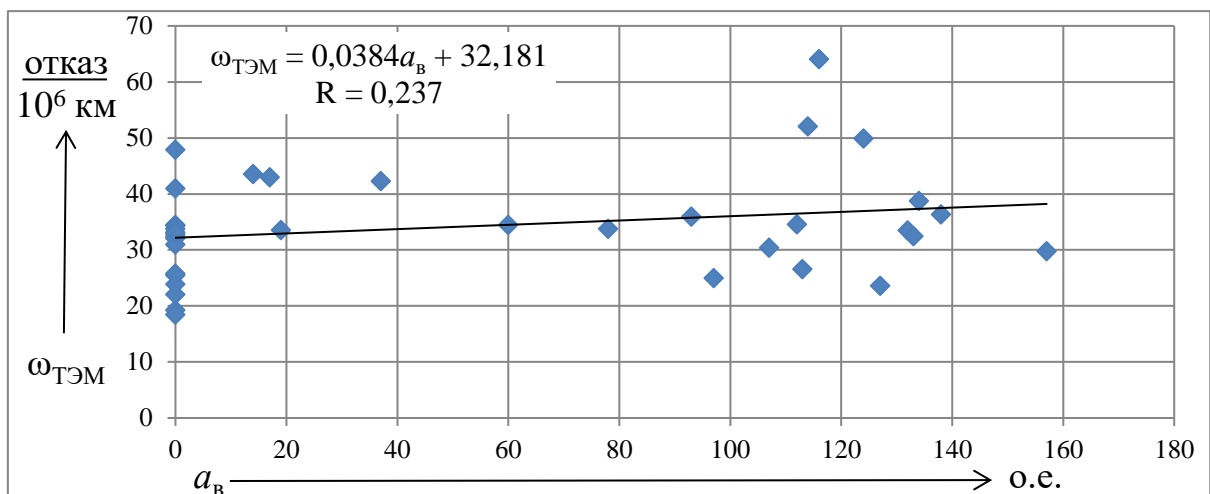


Рисунок П.5.5. Характер изменения параметра потока отказов ТЭМ от величины вертикальных вибраций тяговых электрических машин

При рассмотрении прямой, описывающей связь показателя безотказности изоляции якорных обмоток тяговых электрических машин и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок П.5.6), видно, что с повышением вибраций безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ возрастает. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{в}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,077$  также подтверждает ослабление связи.

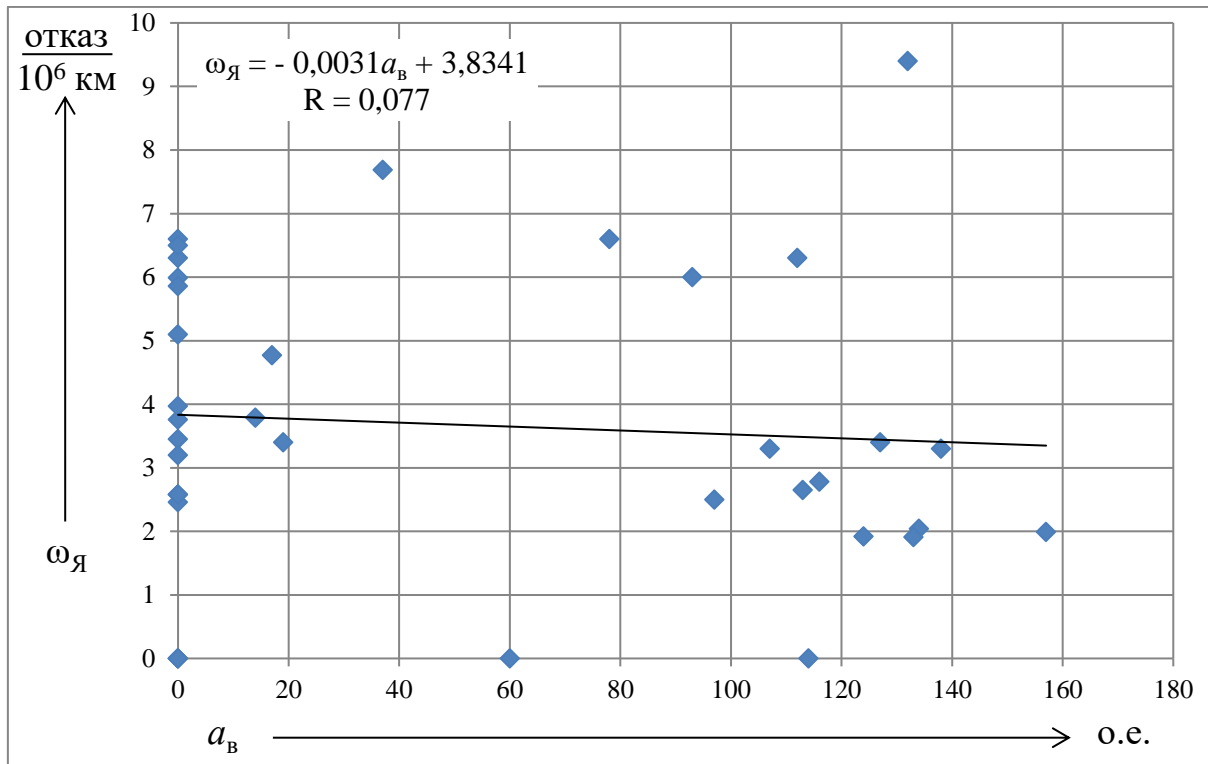


Рисунок П.5.6. Влияние величины вертикальных вибраций ТЭМ на безотказность изоляции якорных обмоток

Из анализа прямой, описывающей связь показателя безотказности изоляции остовных обмоток тяговых электрических машин и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок П.5.7), также видно ослабленное воздействие вибраций на безотказность изоляции остовных обмоток ТЭМ. Параметр потока отказов тяговых электрических машин возрастает в 1,14 раза от 7,04 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 7,99 отказов/ $10^6$  км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ85 депо Вихоревка, имеет максимальное значение. Корреляционное отношение

между  $\omega_{ТЭМ}$  и  $a_B$ , равное  $R_{ТЭМ} = 0,058$  также подтверждает существование ослабление связи.

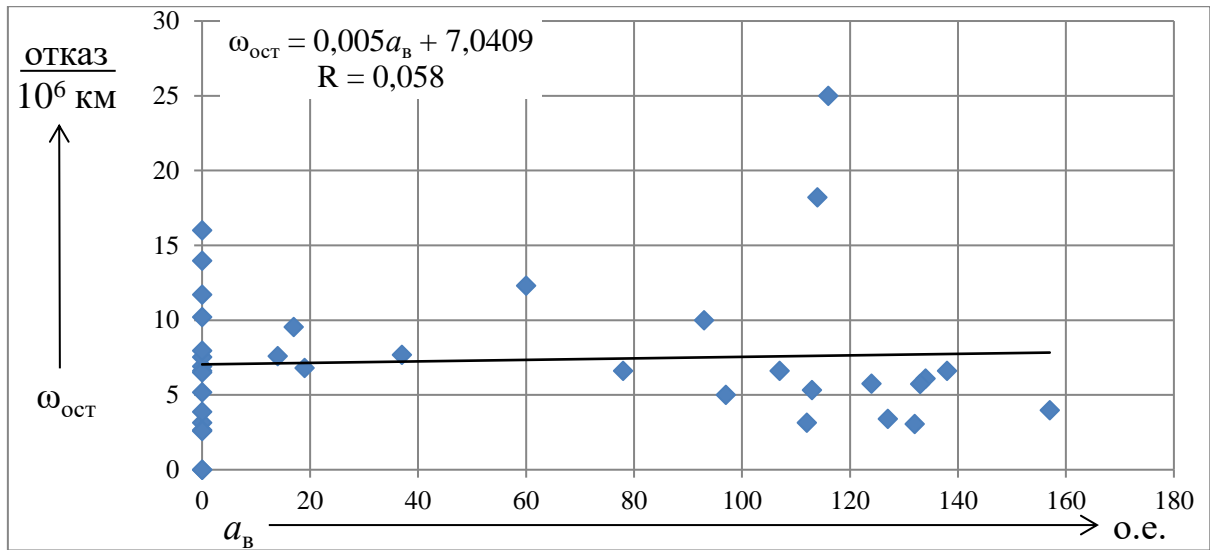


Рисунок П.5.7. Зависимость параметра потока отказов изоляции остовных обмоток от величины вертикальных вибраций тяговых электрических машин

При рассмотрении прямой, описывающей связь показателя безотказности изоляции ТЭМ и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок П.5.8), видно ослабленное воздействие вибраций на безотказность ТЭМ. Параметр потока отказов тяговых электрических машин уменьшается в 1,02 раза от 19,0 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 18,6 отказов/ $10^6$  км в зимний.

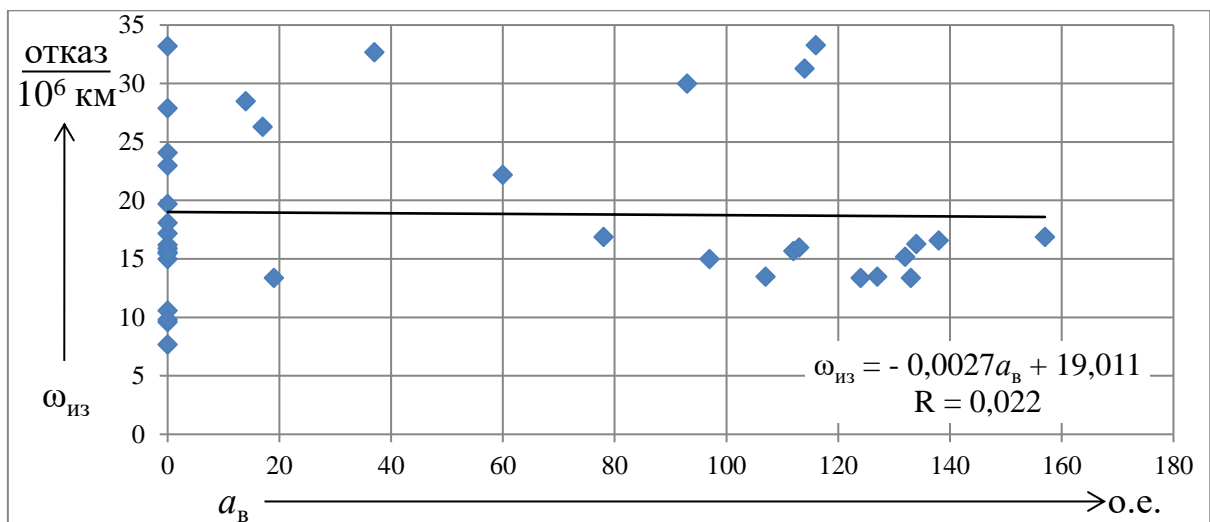


Рисунок П.5.8. Характер изменения параметра потока отказов изоляции ТЭМ от величины вертикальных вибраций тяговых электрических машин

**Анализ влияния природно-климатических факторов на  
безотказность якорных и остовных обмоток ТЭМ  
электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка**

Из рассмотрения прямой безотказности якорных обмоток ТЭМ  $\omega_{я}$  электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{в}$ , приведенной на рисунке П.6.1, видно, что среднее значение параметра потока отказов изоляции якорных обмоток ТЭМ в несколько раз превышает аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в ОПКУ. Характер наклона зависимости  $\omega_{я}(\vartheta_{в})$  указывает на резко ухудшенное состояние изоляции якорных обмоток, прошедших КРП в УЛВРЗ. Более половины ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка эксплуатируются с непропитанной изоляцией якорных обмоток. Резкое понижение качества пропитки изоляции якорных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка вызвало снижение их механических и электрических характеристик.

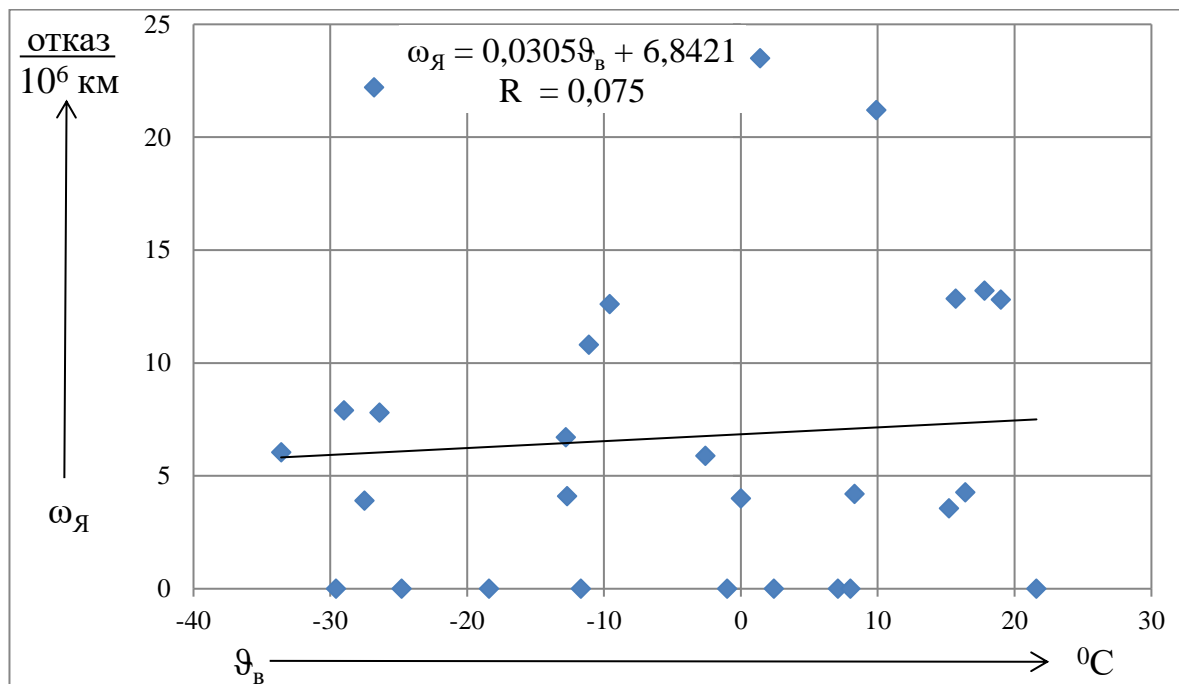


Рисунок П.6.1. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ

При анализе зависимости безотказности остовных обмоток тяговых электрических машин  $\omega_{\text{ост}}$  электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{\text{в}}$ , приведенной на рисунке П.6.2, необходимо отметить, что среднее значение параметра потока отказов изоляции остовных обмоток ТЭМ в несколько раз превышают аналогичные показатели безотказности ТЭМ электровозов, эксплуатируемых в обычных природно-климатических условиях. Характер наклона зависимости  $\omega_{\text{ост}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на пропитку изоляции остовных обмоток при прохождении КРП в УЛВРЗ. В тоже время разбросы ежемесячных параметров потока отказов относительно средней линии тренда зависимости  $\omega_{\text{ост}}(\vartheta_{\text{в}})$  а, также пониженное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{\text{я}} = 0,281$  указывают на понижение качества пропитки изоляции остовных обмоток.

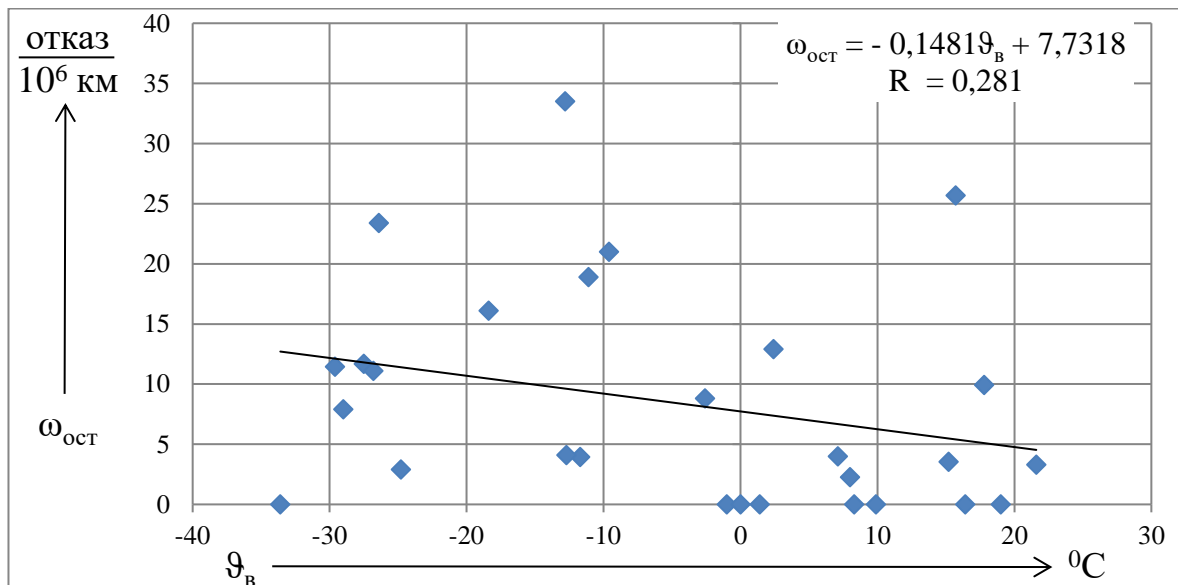


Рисунок П.6.2. Характер изменения параметра потока отказов остовных обмоток ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

Из зависимости, описывающей связь показателя безотказности ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок П.6.3), видно существенное влияние вибраций на безотказность ТЭМ. Параметр потока отказов тяговых электрических машин возрастает в 1,81 раза от 16,6 отказа/10<sup>6</sup> км в летний период эксплуатации до 30,3



отказов/ $10^6$  км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка, имеет максимальное значение. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{В}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,366$  также подтверждает существование тесной связи.

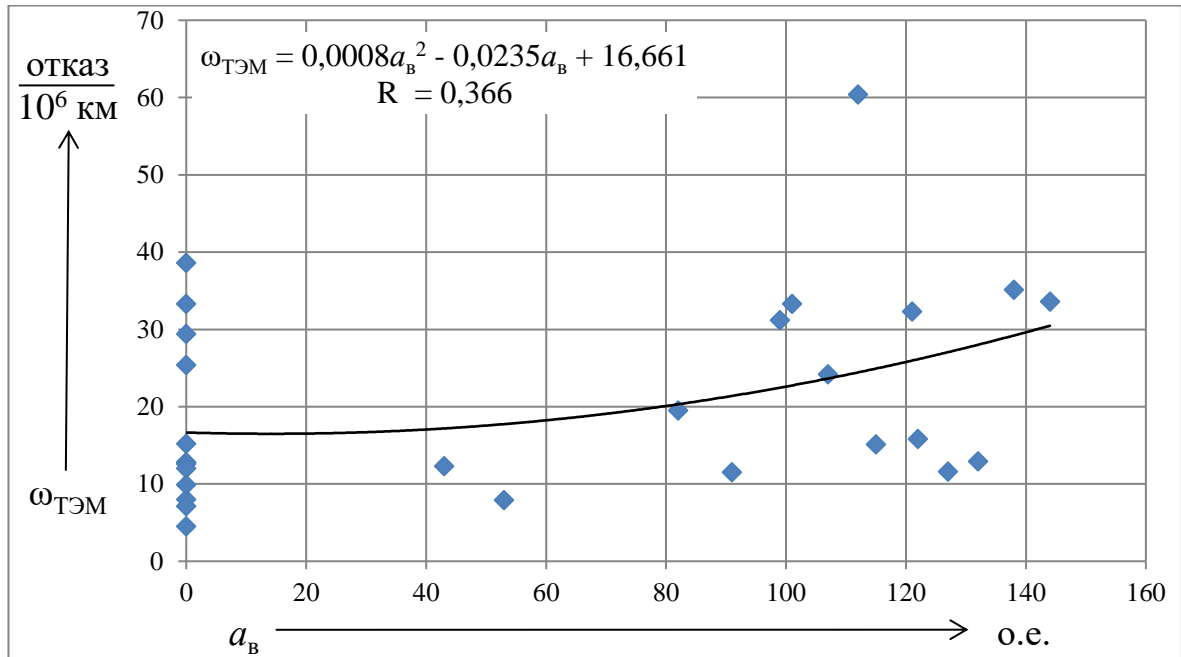


Рисунок П.6.3. Характер изменения параметра потока отказов тяговых электрических машин от величины вертикальных вибраций ТЭМ

При рассмотрении прямой, описывающей связь показателя безотказности изоляции якорных обмоток тяговых электрических машин и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок П.6.4), видно, что с увеличением вибраций безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ повышается. Параметр потока отказов тяговых электрических машин уменьшается в 1,13 раза от 7,13 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 6,2 отказов/ $10^6$  км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка, имеет максимальное значение. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{В}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,062$  также подтверждает ослабление связи.

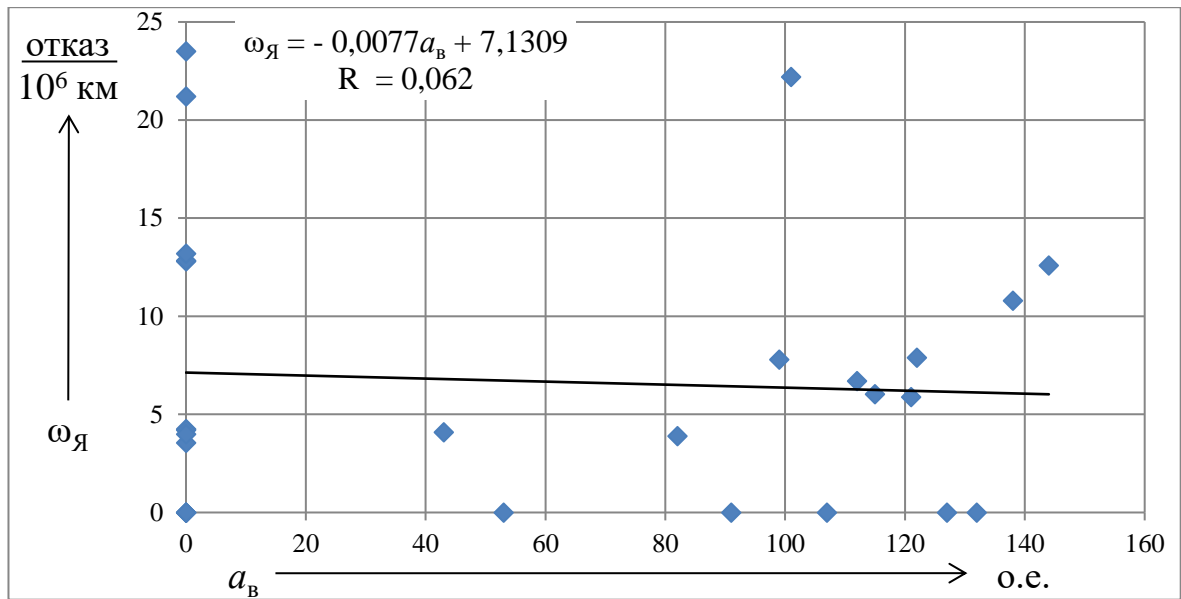


Рисунок П.6.4. Влияние величины вертикальных вибраций тяговых электрических машин на безотказность изоляции якорных обмоток

Из прямой, описывающей связь показателя безотказности ТЭМ электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок П.6.5), видно существенное влияние вибраций на безотказность ТЭМ. Параметр потока отказов тяговых электрических машин возрастает в 4,33 раза от 3,63 отказа/10<sup>6</sup> км в летний период эксплуатации до 15,7 отказов/10<sup>6</sup> км в зимний. Корреляционное отношение между ω<sub>ТЭМ</sub> и a<sub>в</sub>, равное R<sub>ТЭМ</sub> = 0,534, также подтверждает существование тесной связи.

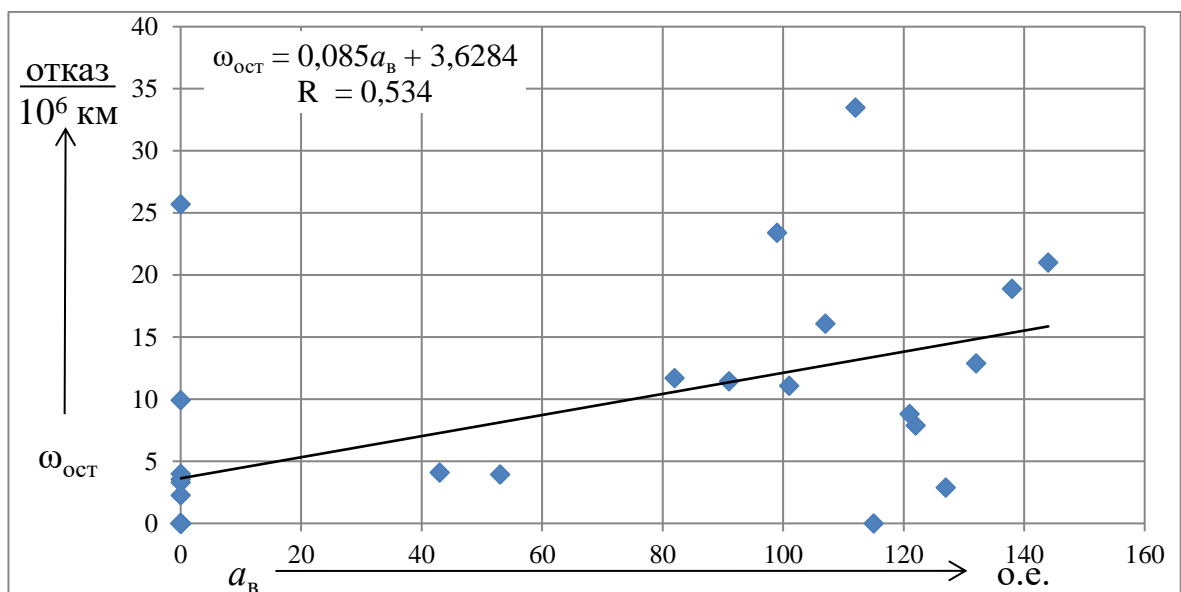


Рисунок П.6.5. Зависимость параметра потока отказов изоляции остовных обмоток от величины вертикальных вибраций тяговых электрических машин

При рассмотрении кривой, описывающей связь показателя безотказности изоляции тяговых электрических машин электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок П.6.6), видно существенное влияние вибраций на безотказность изоляции ТЭМ. Параметр потока отказов изоляции тяговых электрических машин возрастает в 2,36 раза от 11,1 отказа/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 26,2 отказов/ $10^6$  км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ80ТК депо Вихоревка, имеет максимальное значение. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{В}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,421$ , также подтверждает существование связи.

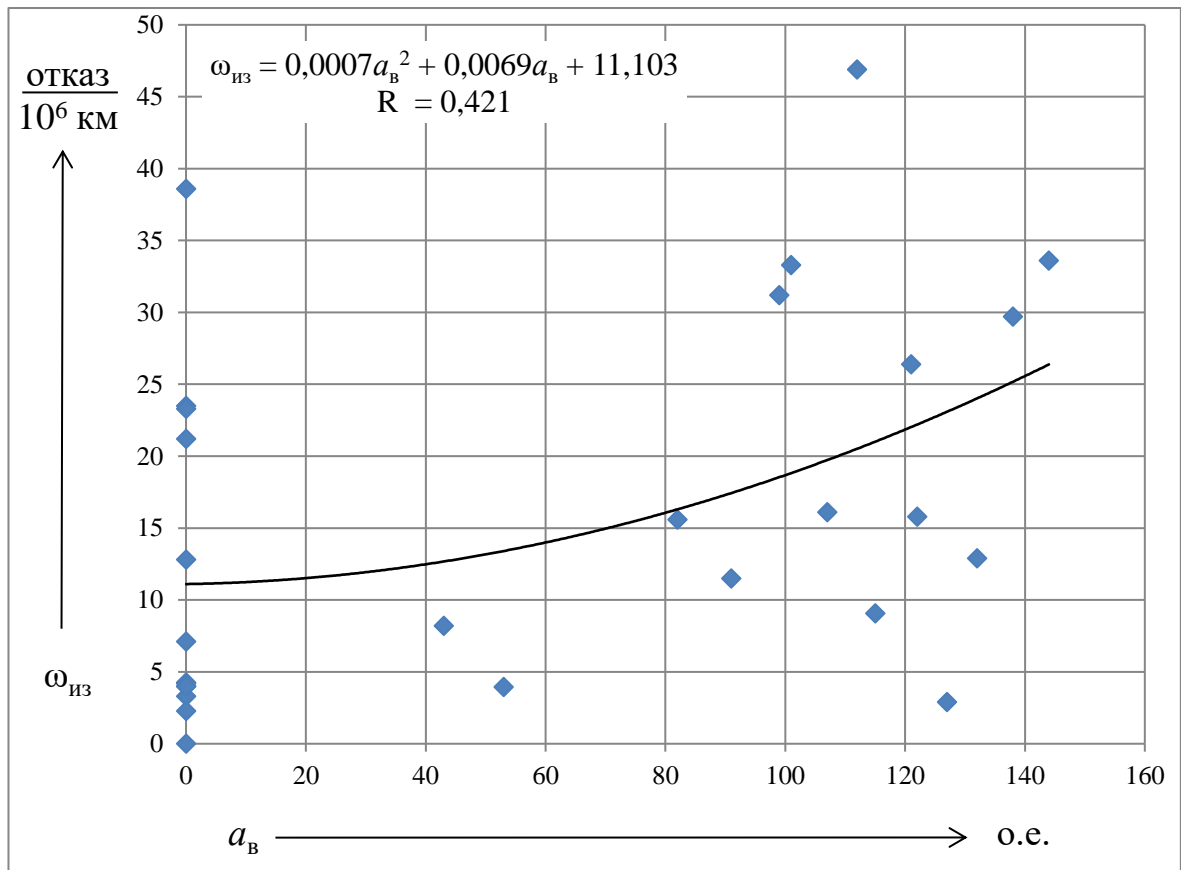


Рисунок П.6.6. Характер изменения параметра потока отказов изоляции от величины вертикальных вибраций тяговых электрических машин

**Анализ влияния природно-климатических факторов на  
безотказность якорных и остовных обмоток ТЭМ  
электровозов ВЛ85 депо Абакан**

Из рассмотрения кривой безотказности якорных обмоток ТЭМ  $\omega_{я}$  электровозов ВЛ85 депо Абакан от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{в}$ , приведенной на рисунке П.7.1, видно возрастание параметра потока отказов изоляции обмоток при увеличении температуры воздуха. Характер наклона зависимости  $\omega_{я}(\vartheta_{в})$  указывает на резко ухудшенное состояние изоляции обмоток якорей. Более четырех пятых ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан эксплуатируются с некачественно пропитанной изоляцией якорных обмоток. Об этом же пониженное корреляционное отношение между среднемесячными показателями безотказности и температурой воздуха  $R_{я} = 0,307$ .

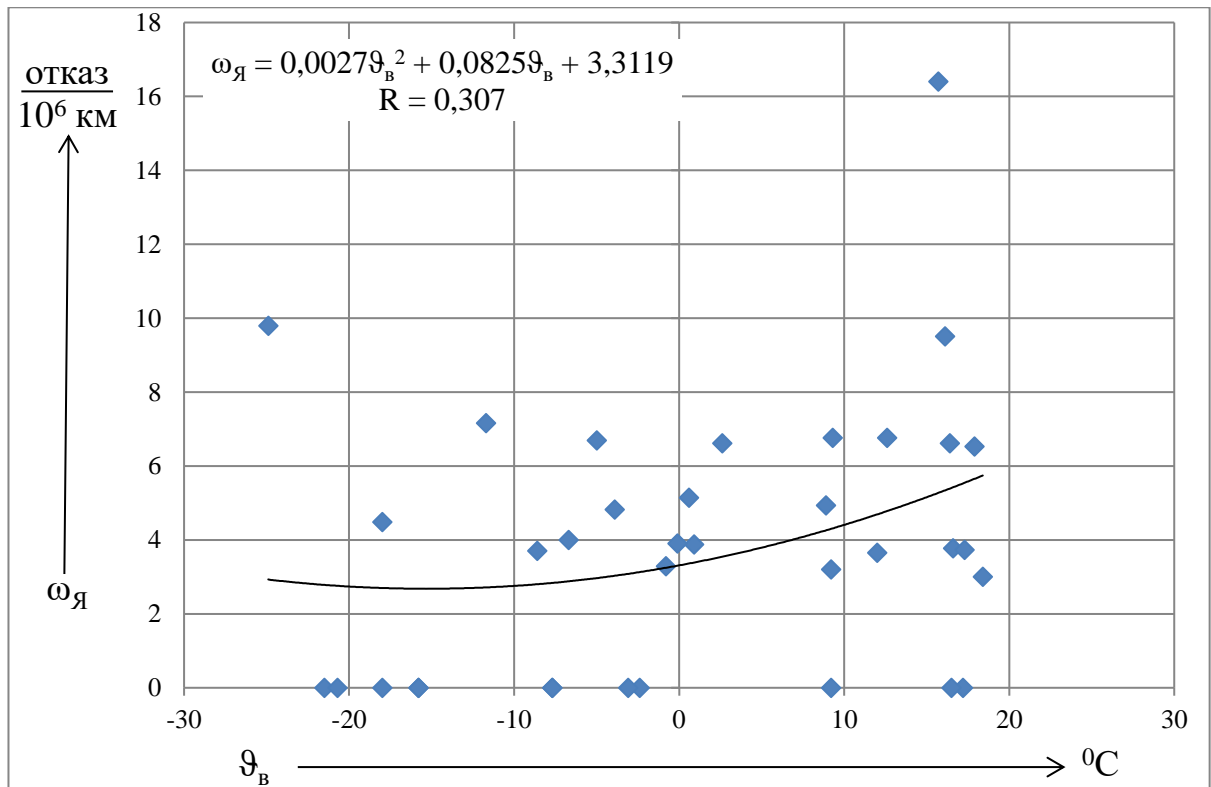


Рисунок П.7.1. Влияние среднемесячной температуры воздуха на безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ

При анализе зависимости безотказности остовных ТЭМ  $\omega_{ост}$  электровозов ВЛ85 депо Абакан от температуры окружающего воздуха  $\vartheta_{в}$ ,

приведенной на рисунке П.7.2, необходимо отметить, что характер наклона зависимости  $\omega_{\text{ост}}(\vartheta_{\text{в}})$  указывает на ухудшение состояния изоляции остовных обмоток из-за снижения качества пропитки. Об этом же свидетельствуют разброс ежемесячных параметров потока отказов относительно средней линии тренда зависимости  $\omega_{\text{ост}}(\vartheta_{\text{в}})$ .

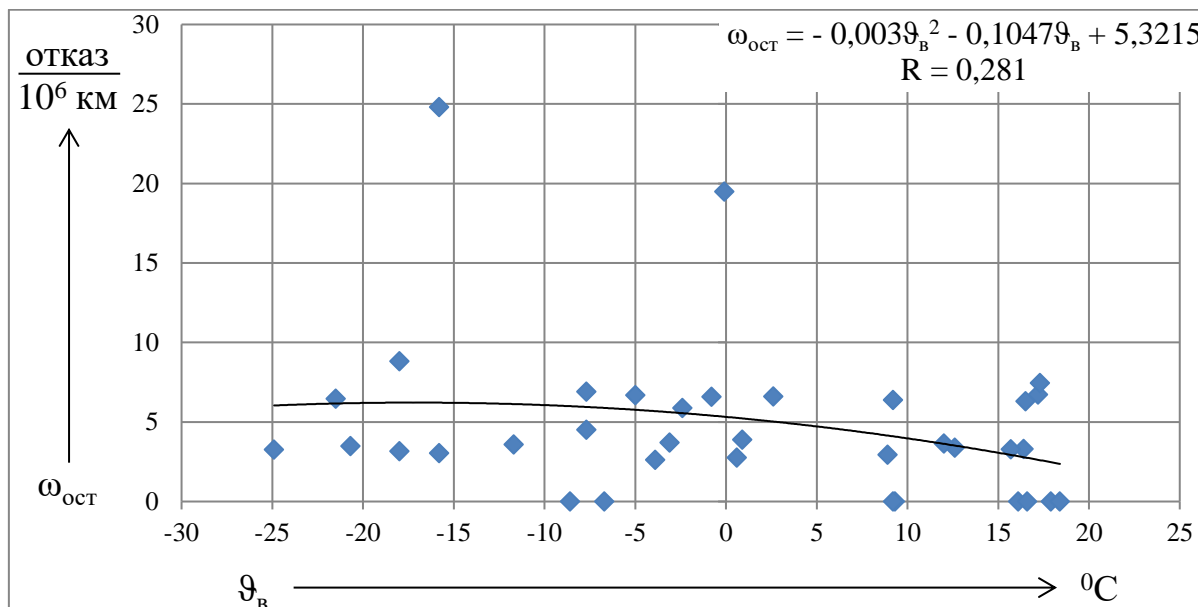


Рисунок П.7.2. Характер изменения параметра потока отказов остовных обмоток ТЭМ от среднемесячной температуры воздуха

Из прямой, описывающей связь показателя безотказности тяговых электрических машин и уровнем вертикальных вибраций от пути электровозов ВЛ85 депо Абакан в период с января 2000 по декабрь 2002 года (рисунок П.7.3), видно ослабленное воздействие вибраций на безотказность ТЭМ. Параметр потока отказов тяговых электрических машин возрастает в 1,44 раза от 19,4 отказов/10<sup>6</sup> км в летний период эксплуатации до 28,0 отказов/10<sup>6</sup> км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ85 депо Абакан, имеет максимальное значение. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{в}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,217$  также подтверждает существенное ослабление связи.

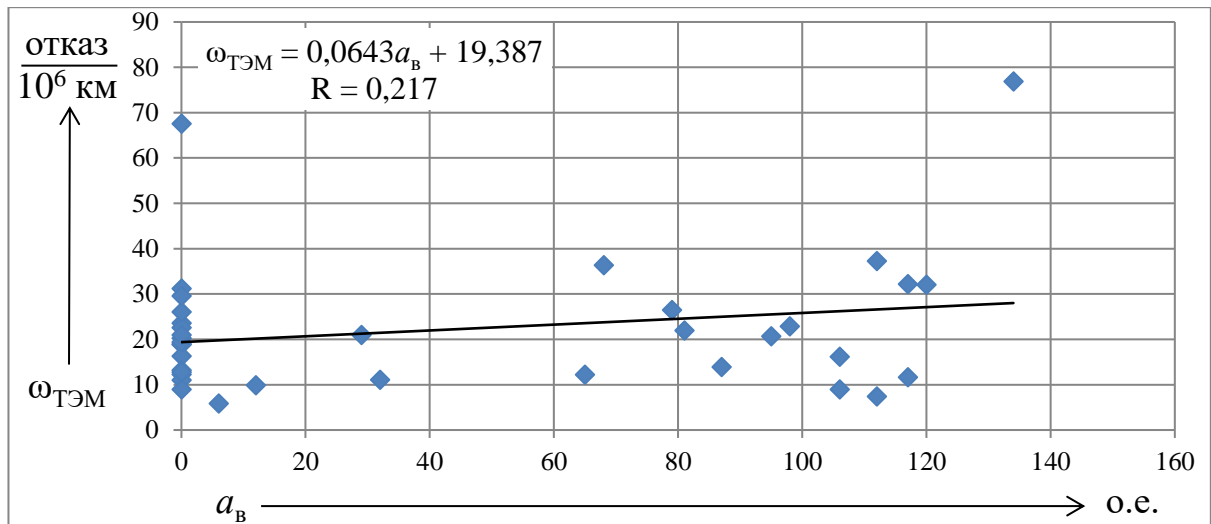


Рисунок П.7.3. Характер изменения параметра потока отказов ТЭМ от величины их вертикальных вибраций

При рассмотрении прямой, описывающей связь показателя безотказности изоляции якорных обмоток тяговых электрических машин электровозов ВЛ85 депо Абакан и уровнем вертикальных вибраций от пути (рисунок П.7.4), видно, что с увеличением вибраций безотказность изоляции якорных обмоток ТЭМ повышается. Параметр потока отказов ТЭМ уменьшается в 1,87 раза от 4,5 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 2,41 отказов/ $10^6$  км в зимний. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_B$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,205$  также подтверждает ослабление связи.

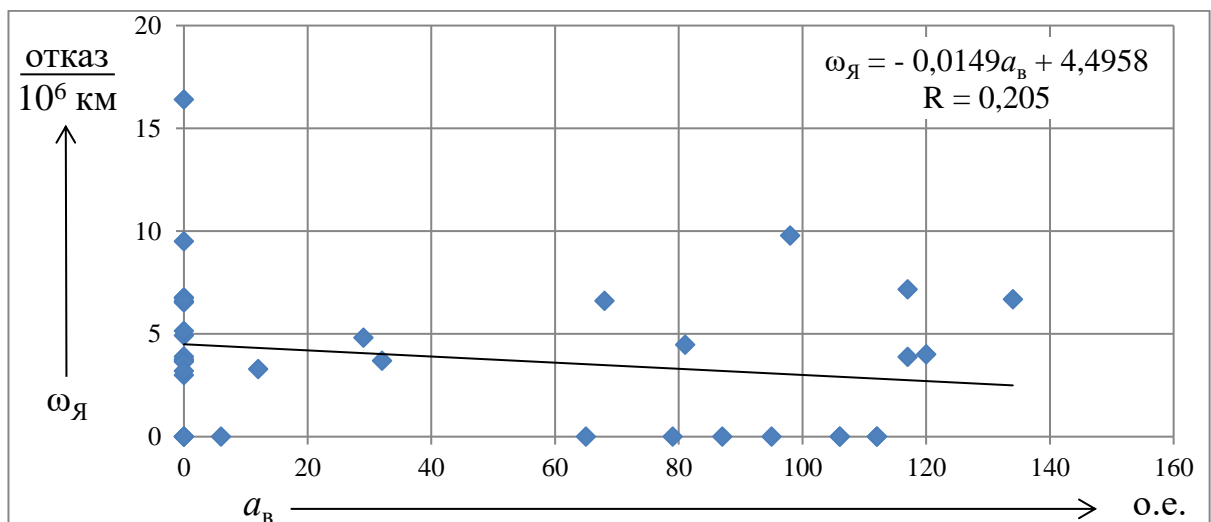


Рисунок П.7.4. Влияние величины вертикальных вибраций ТЭМ на безотказность изоляции якорных обмоток

Из анализа кривой, описывающей связь показателя безотказности изоляции остовных обмоток ТЭМ электровозов ВЛ85 депо Абакан и уровнем

вертикальных вибраций от пути за период (рисунок П.7.5), видно ослабленное воздействие вибраций на безотказность изоляции остовных обмоток ТЭМ. Параметр потока отказов изоляции остовных обмоток ТЭМ возрастает в 1,79 раза от 3,92 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 7,03 отказов/ $10^6$  км в зимний. Корреляционное отношение между  $\omega_{\text{ост}}$  и  $a_{\text{в}}$ , равное  $R_{\text{ост}} = 0,204$  также подтверждает существенное ослабление связи.

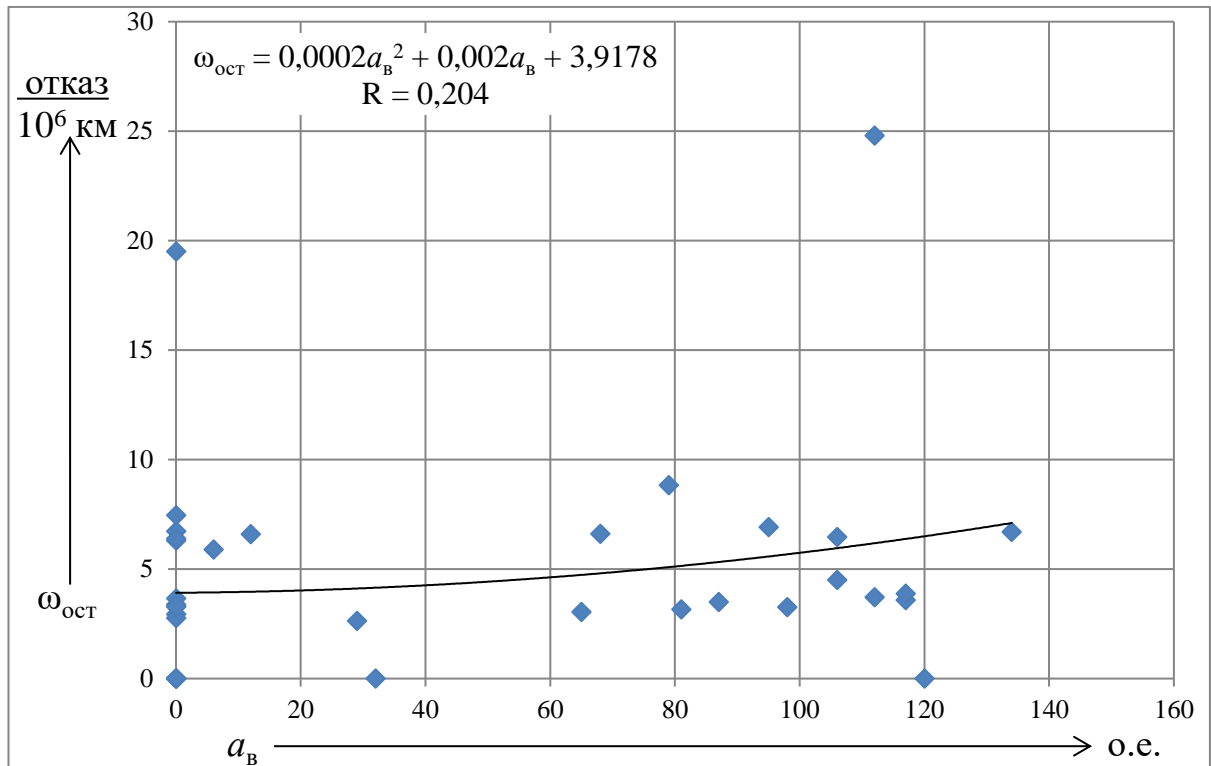


Рисунок П.7.5. Зависимость параметра потока отказов изоляции остовных обмоток от величины вертикальных вибраций тяговых электрических машин

При рассмотрении прямой, описывающей связь показателя безотказности изоляции тяговых электрических машин электровозов ВЛ85 депо Абакан и уровнем вертикальных вибраций от пути за период (рисунок П.7.6), видно ослабленное воздействие вибраций на безотказность изоляции ТЭМ. Параметр потока отказов ТЭМ повышается в 1,09 раза от 8,33 отказов/ $10^6$  км в летний период эксплуатации до 9,05 отказов/ $10^6$  км в зимний, когда глубина промерзания грунта, определяющая величину вертикальных вибраций ТЭМ на полигоне эксплуатации электровозов ВЛ85 депо Абакан, имеет максимальное значение. Корреляционное отношение

между  $\omega_{\text{ТЭМ}}$  и  $a_{\text{В}}$ , равное  $R_{\text{ТЭМ}} = 0,050$  также подтверждает существенное ослабление связи.

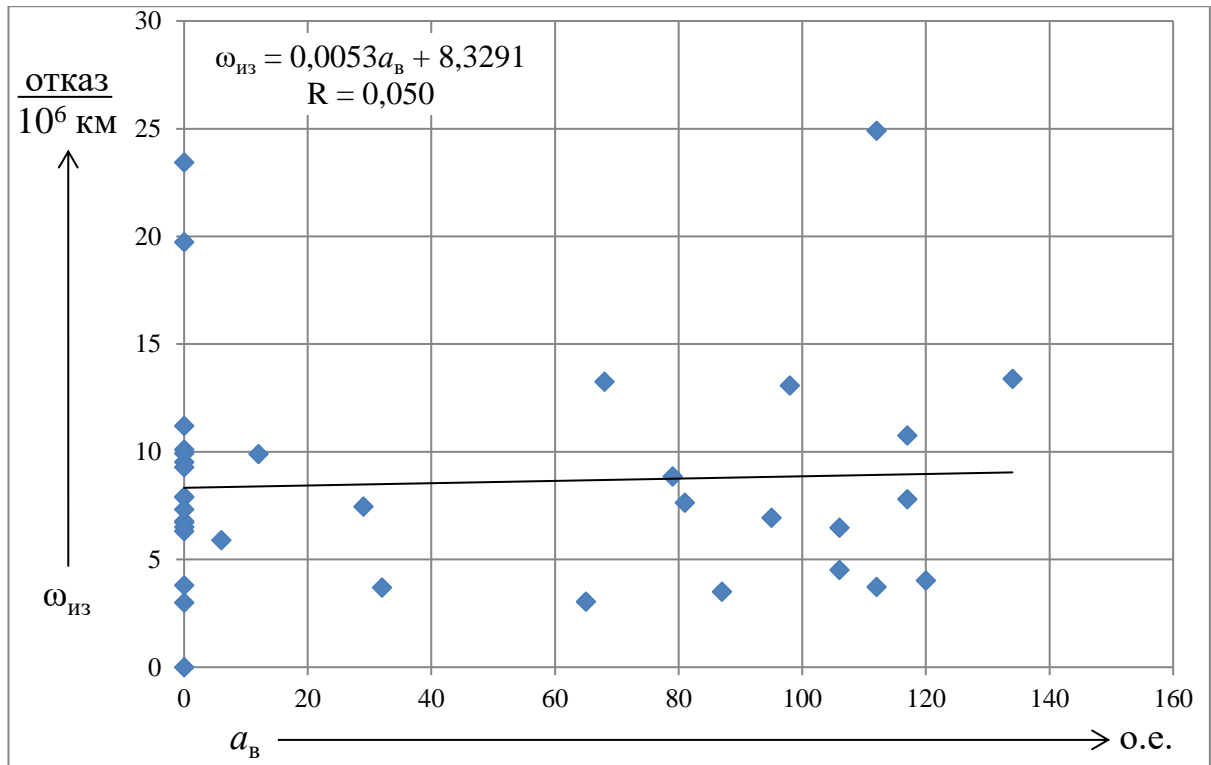


Рисунок П.7.6. Характер изменения параметра потока отказов изоляции от величины вертикальных вибраций тяговых электрических машин