

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Российский университет транспорта»  
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Куренков Алексей Семенович

КОМПЛЕКСНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ  
АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ТЯГОВЫХ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация  
Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Смирнов Валентин Петрович

Москва 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ БЕЗОТКАЗНОСТИ АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА.....	12
1.1 Особенности условий эксплуатации и конструкции асинхронных вспомогательных машин электровозов переменного тока.....	12
1.2 Безотказность асинхронных вспомогательных машин электровозов переменного тока.....	18
1.3 Выводы по разделу 1.....	34
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	36
2.1 Расчет радиальной вентиляции асинхронной вспомогательной машины АНЭ225 .....	36
2.2 Расчет радиальной вентиляции усовершенствованной асинхронной вспомогательной машины АНЭ225 .....	41
2.3 Определение температуры подшипниковых узлов асинхронной вспомогательной машины АНЭ 225 .....	43
2.4 Анализ электромеханических переходных процессов, протекающих при пуске асинхронных вспомогательных машин.....	45
2.5 Анализ тепловых переходных процессов, протекающих при пуске асинхронных вспомогательных машин .....	49
2.6 Расчёт нагревания обмоток асинхронной вспомогательной машины мотор-компрессора .....	53
2.7 Расчёт напряжения питания асинхронных вспомогательных машин в зависимости от напряжения в контактной сети.....	58

2.8	Расчет разницы температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды для асинхронных вспомогательных машин привода вентилятора при различной мощности на валу .....	61
2.9	Выводы по разделу 2.....	65
3	СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	67
3.1	Использование Марковских цепей в модели функционирования асинхронной вспомогательной машины.....	67
3.2	Модель функционирования асинхронной вспомогательной машины .....	75
3.3	Исследование влияния температуры воздуха на безотказность асинхронных вспомогательных машин .....	79
3.4	Безотказность асинхронных вспомогательных машин грузовых электровозов переменного тока Восточного полигона.....	89
3.5	Выводы по разделу 3.....	92
4	РЕКОМЕНДУЕМАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	94
4.1	Изменения конструкции и системы обслуживания асинхронных вспомогательных машин грузовых электровозов переменного тока .....	94
4.2	Подсистема контроля увлаженности и степени износа изоляции статорных обмоток асинхронных вспомогательных машин.....	97
4.3	Подсистемы температурного контроля асинхронных вспомогательных машин .....	100
4.4	Схема подсистемы контроля температуры асинхронных вспомогательных машин электровозов переменного тока 2ЭС5К.....	103
4.5	Работа исполнительного устройства (УВТЗ-1М) .....	105
4.6	Принцип работы подсистемы температурного контроля асинхронных вспомогательных машин электровозов.....	106
4.7	Микроконтроллерные подсистемы температурного контроля асинхронных вспомогательных машин электровозов, работающие по неизменной программе .....	107

4.8 Подсистема температурного контроля, исключая перегрев статорных обмоток приводных электрических машин компрессоров электровозов ВЛ85 при сваривании силовых контактов электромагнитного контактора.....	114
4.9 Изменение алгоритма включения разгрузочных клапанов для обеспечения безотказности асинхронных вспомогательных машин НВА55С приводов высокоскоростных компрессоров электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К.....	117
4.10 Методика определения мощности асинхронных вспомогательных машин и интенсивности вентиляции оборудования электровозов.....	119
4.11 Способ подогрева масла в картерах мотор-компрессоров электровозов.....	125
4.12 Выводы по разделу 4.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	133
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	172

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время общее количество электровозов переменного тока ВЛ85 железных дорог России составляет более половины парка грузовых электровозов переменного тока.

На асинхронные вспомогательные машины (АВМ) с короткозамкнутым ротором типа АНЭ225 (А – асинхронный, Н – защищенного исполнения, Э – электровозный, 225 – высота оси вращения, в мм) и НВА55 (Н – Новочеркасский, В – вспомогательный, А – асинхронный, 55 – номинальная мощность, кВт) электроприводов компрессоров и вентиляторов, которые получают питание от системы преобразования однофазного напряжения в трехфазное с использованием вращающихся и конденсаторных расщепителей фаз, приходится более двенадцати процентов отказов электровозов. Наблюдается рост отказов во времени. Опыт эксплуатации показывает, что снижение безотказности АВМ вызвано перегревом статорных обмоток, роторов и подшипников. Безотказность АВМ типа АНЭ225 и НВА55 ниже, чем ранее выпущенных АВМ типа АЭ92-4 (А – асинхронный, Э – для электровозов, 9 – номер габарита, 2 – длина, 4 – число полюсов) электровозов ВЛ80. Таким образом, определение состояния АВМ АНЭ225 и НВА55 с разработкой рекомендаций по изменению их конструкции и обслуживания для обеспечения необходимого уровня безотказности является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросы разработки, структуры, проектирования, изготовления и эксплуатации систем вспомогательных машин исследованы в работах ученых: Р.И. Аликина, Л.А. Астраханцева, Н.Н. Горина, И.П. Исаева, А.Ю. Конашенского, В.В. Литовченко, О.А. Некрасова, О.Л. Рапопорта, Н.А. Ротанова, А.М. Рутштейна, Л.Н. Сорина, А.А. Суровикова, А.М. Худоногова, В.Е. Чернохлебова, Г.Н. Шестопёрова В.П. Янова. Вместе с тем, в известных исследованиях недостаточное внимание уделено влиянию на безотказность АВМ конструкции, (определяющей аэродинамическое сопротивление воздухопроводов,

определяющей появление обратных потоков вентилирующего воздуха), размерам вентиляционных лопаток роторов, обуславливающих производительность вентиляции. Не рассмотрена система обслуживания АВМ с определением конструкции и размеров подшипниковых узлов и их температуры в зависимости от реализуемой мощности, а также с выбором как типа консистентной смазки, так и рациональной системы смазки, с учетом испаряемости и температурных свойств, вязкости при температуре воздуха в диапазоне от  $-30$  до  $-50$  °С и ниже, периодичности смены и пополнений смазки, количества смазки при увеличенном пробеге электровозов между заправками в летний и зимний периоды эксплуатации, обеспечивающего непрерывную работу подшипников в режиме качения. Кроме того, не в полной мере проанализированы способы уменьшения времени пуска двигателей, определяющего в значительной мере безотказность АВМ.

**Цель и задачи.** Целью работы является определение состояния АВМ тяговых электроприводов современных электровозов переменного тока с разработкой рекомендаций по комплексному изменению конструкции и обслуживания АВМ, обеспечивающих их необходимую безотказность.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1 проведен анализ безотказности АВМ электровозов переменного тока в различных географических и макроклиматических зонах Восточного полигона Российских железных дорог (РЖД);

2 создана модель функционирования асинхронной вспомогательной машины, определены ее характеристики, разработана методика оценки уровня надежности основных узлов АВМ тяговых электроприводов электровозов переменного тока;

3 проведено сравнительное исследование безотказности статора, ротора, подшипников АВМ АЭ92-4, находящихся в эксплуатации продолжительное время, и АНЭ225, НВА55 современных электровозов переменного тока;

4 определена производительность вентиляции и температура узлов АВМ современных электровозов;

5 проведен сравнительный анализ обслуживания АВМ, используемых с начала эксплуатации электроподвижного состава переменного тока, и современных электровозов;

6 уточнен процесс частых отказов АВМ тяговых электроприводов современных электровозов переменного тока;

7 сформулированы рекомендации по комплексным изменениям конструкции и обслуживания АВМ современных электровозов.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1 разработана математическая модель функционирования АВМ электровоза переменного тока, которая позволяет установить взаимосвязи между элементами системы «асинхронная вспомогательная машина», влияние каждого элемента на надежность системы, определить наиболее «слабые» элементы;

2 установлено, что отказы статора, ротора, подшипников АВМ АНЭ225, НВА55 современных электровозов переменного тока многократно превышают отказы аналогичных узлов АВМ АЭ92-4 электровозов ВЛ80;

3 выявлено, что из-за образования обратного потока воздуха, снижающего производительность вентиляции на  $1/3$ , вследствие двухкратного различия аэродинамических сопротивлений воздухопроводов левой и правой сторон электрических машин АНЭ225 и НВА55 температура подшипников, статора и ротора нередко превышает расчетную. Температура этих же узлов АВМ АЭ92-4 при включенных расщепителях фаз ниже расчетной во всех режимах работы;

4 установлено, что фактическое количество консистентной смазки в подшипниках АВМ АНЭ225 и НВА55 современных электровозов многократно уменьшено по сравнению с количеством смазки, используемой в АВМ АС81-6 (А – асинхронный, С – с повышенным скольжением, 8 – номер габарита, 1 – длина, 6 – число полюсов), АП81-4 (А – асинхронный, П – с повышенным пусковым моментом, 8 – номер габарита, 1 – длина, 4 – число полюсов), АС82-4 (А – асинхронный, С – с повышенным скольжением, 8 – номер габарита, 2 – длина, 4 – число полюсов), АП82-4 (А – асинхронный, П – с повышенным пусковым моментом, 8 – номер габарита, 2 – длина, 4 – число полюсов), АЭ92-4

электровозов ВЛ60, ВЛ60К, ВЛ80К, ВЛ80Т, ВЛ80С, ВЛ80Р (60 – 6-осный однофазный, К – с кремниевыми выпрямителями, 80 – 8-осный однофазный, Т – с реостатным торможением, С – с возможностью работы по системе многих единиц (СМЕ), Р – с рекуперативным торможением);

5 уточнен процесс частых отказов подшипников, приводящих к выплавлению алюминиевых обмоток роторов и интенсивному тепловому старению изоляции статорных обмоток АВМ АНЭ225 и НВА55 электровозов ВЛ85 и 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К из-за перехода контактов ролики (шарики) – кольца подшипников из режима качения в режим «сухого» скольжения, вследствие увеличенной мощности потерь в подшипниках АВМ из-за недостаточного количества смазки в подшипниках;

6 сформулированы рекомендации по комплексным изменениям конструкции и обслуживания АВМ АНЭ225 с несимметричной радиальной вентиляцией, включающие: выравнивание и снижение аэродинамического сопротивления воздухопроводов увеличением длины корпуса и площади сечения выхода воздуха из двигателя, размеров вентиляционных лопаток, повышающих теплоотдачу роторов и производительность вентиляции; применение конструкции подшипникового узла, обеспечивающую заправку и выход смазки без разборки АВМ, позволяющую контролировать наличие смазки в эксплуатации и ее поступление при сменах и пополнениях; рациональное использование смазки подшипников: увеличением количества смазки в связи с недостаточным количеством ранее заправляемой смазки, не обеспечивающим непрерывную работу подшипников в режиме качения, а также повышением пробега между заправками (сменами), пополнениями в летний период эксплуатации и снижением в зимний период вследствие меньшей испаряемости смазки при уменьшении температуры подшипников зимой; увеличение объемов подшипниковых камер для размещения смазки; использование смазки с повышенной вязкостью при низкой температуре воздуха (от -30 до -50 °С и ниже); непрерывный контроль температуры подшипников, ротора и статорных обмоток; регулярный контроль влажности и износа изоляции статорных обмоток; периодический контроль



мощности АВМ и интенсивности вентиляции электровоза; подогрев масла в картере компрессора в зимний период эксплуатации электроподогревателями на основе ленточного нагревательного кабеля КНФНФЭ; снижение сопротивления пуску приводных двигателей компрессоров рациональным выбором времени срабатывания разгрузочных клапанов.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в том, что в ней обоснованы необходимые характеристики конструкции и обслуживания асинхронных вспомогательных машин, позволяющие обеспечить необходимую безотказность перспективных электроприводов электровозов переменного тока. Результаты диссертации используются в учебном процессе в Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)) при изучении дисциплин «Подвижной состав железных дорог», «Тяговые электрические машины», «Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава», а также в эксплуатации АВМ НВА55С (со сварной медной беличьей клеткой ротора), используемых в качестве приводов компрессоров электровозов переменного тока 2, 3, 4ЭС5К.

**Методология и методы исследования.** Для выполнения задач использованы методы теорий нагревания и охлаждения твердого тела, марковских цепей. Часть исследований проводилось на оборудовании электровозов переменного тока и заключались в определении параметров, характеризующих режим работы АВМ при эксплуатационных испытаниях, заводских, деповских ремонтах и техническом обслуживании. Обработка и анализ опытных и статистических данных об отказах АВМ, полученных из отчетов депо, осуществлялись с использованием теорий и методов математической статистики: теории проверки гипотез; корреляционного и регрессионного анализов. При обработке данных об отказах АВМ использован программный продукт Microsoft Excel.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1 Методика определения надежности асинхронные вспомогательные машины с использованием математической модели, полученной на основании

марковских процессов, происходящих в системе «Асинхронная вспомогательная машина»;

2 Результаты сравнительного анализа частоты отказов узлов четырех типов трехфазных асинхронных машин: общепромышленных; тяговых с питанием от вращающихся расщепителей фаз двух типов и статических конденсаторных расщепителей фаз от величины несимметрии напряжения питания;

3 Итоги сравнительного исследования влияния конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов на параметры потоков отказов АВМ АЭ92-4 и АВМ АНЭ225, НВА55;

4 Уточненные процессы частых отказов подшипников, выплавления алюминиевых обмоток роторов, ускоренного старения изоляции статорных обмоток АВМ;

5 Рекомендации по комплексным изменениям конструкции и обслуживания АВМ, исключающие частые отказы подшипников с последующим выплавлением алюминиевых обмоток роторов и перегревом статорных обмоток.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность результатов работы обоснована экспериментально, теоретически и подтверждается удовлетворительным совпадением полученных в работе результатов по определению расхода охлаждающего воздуха и температуры асинхронных вспомогательных машин, с полученными Всероссийским научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом (ОАО «ВЭЛНИИ»), «Национальным исследовательским Томским политехническим университетом» (НИ «ТПУ») и опубликованными в работах других авторов, занимающихся исследованием асинхронных вспомогательных машин тяговых электроприводов электровозов переменного тока.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на XXII международной конференции «Актуальные проблемы естествознания и образования в условиях современного мира» (Нижний Новгород, 2013 г.); на республиканской научно-технической

конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (Ташкент, 2013 г.); международной интернет-конференции РУТ (МИИТ) (Москва, 2019 г.); международной интернет-конференции РОАТ РУТ (МИИТ) (Москва, 2020 г.); интернет-конференции РОАТ РУТ (МИИТ) с международным участием (Москва, 2021 г.); заседаниях кафедры «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ) (Москва 2011 – 2023 гг.).

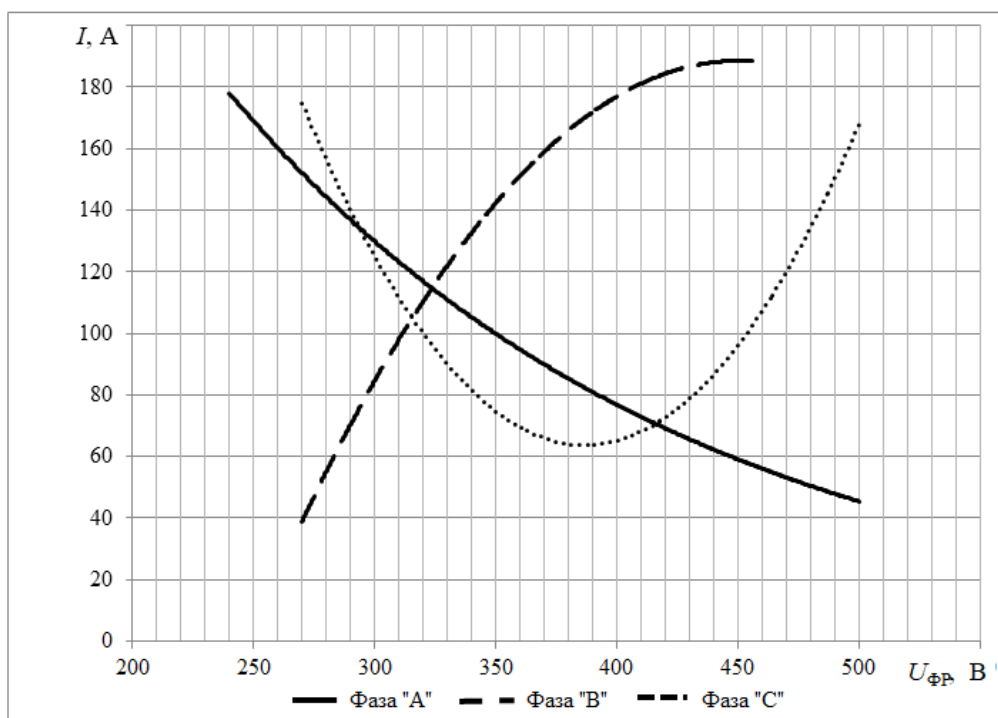
**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов по разделам, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Работа содержит 173 страницы основного текста, включая 67 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 86 наименований.

# 1 АНАЛИЗ БЕЗОТКАЗНОСТИ АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА

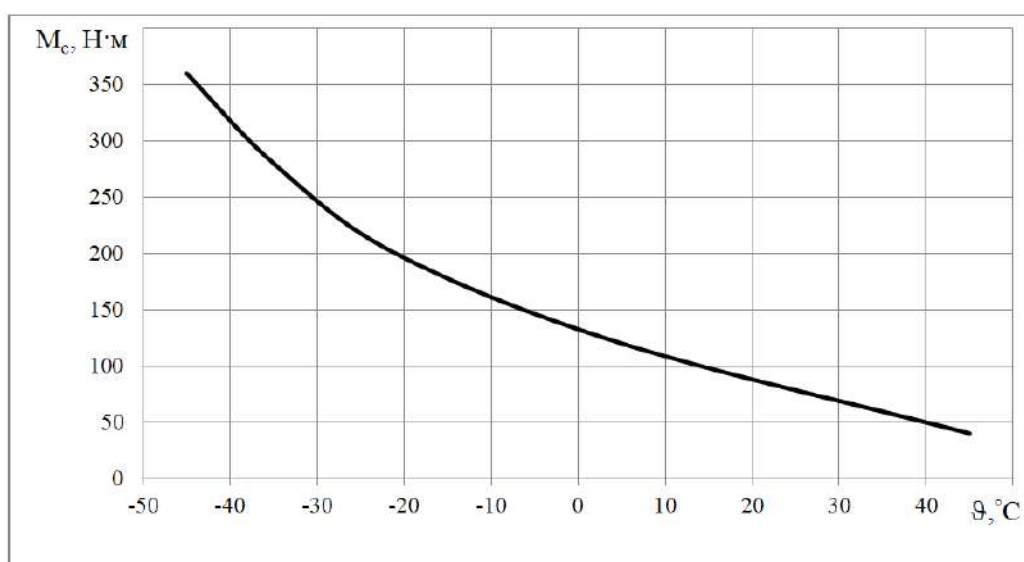
## 1.1 Особенности условий эксплуатации и конструкции асинхронных вспомогательных машин электровозов переменного тока

Исследованию работы асинхронных вспомогательных машин отечественных электровозов переменного тока посвящены труды Бочарова В.И., Гольдберга О.Д., Горина Н.Н., Грищенко А.В., Дубровского З.М., Захарченко Д.Д., Иоффе А.Б., Козорезова М.А., Копылова И.П., Котеленца Н.Ф., Маханькова Л.В., Находкина М.Д., Некрасова О.А., Пустоветова М.Ю., Сергеева П.С., Смирнова В.П., Худоногова А.М., Шевченко В.В., Щербакова В.Г. и других исследователей [1–18]. Ими установлено, что АВМ электроподвижного состава (ЭПС) переменного тока работают при следующих условиях:

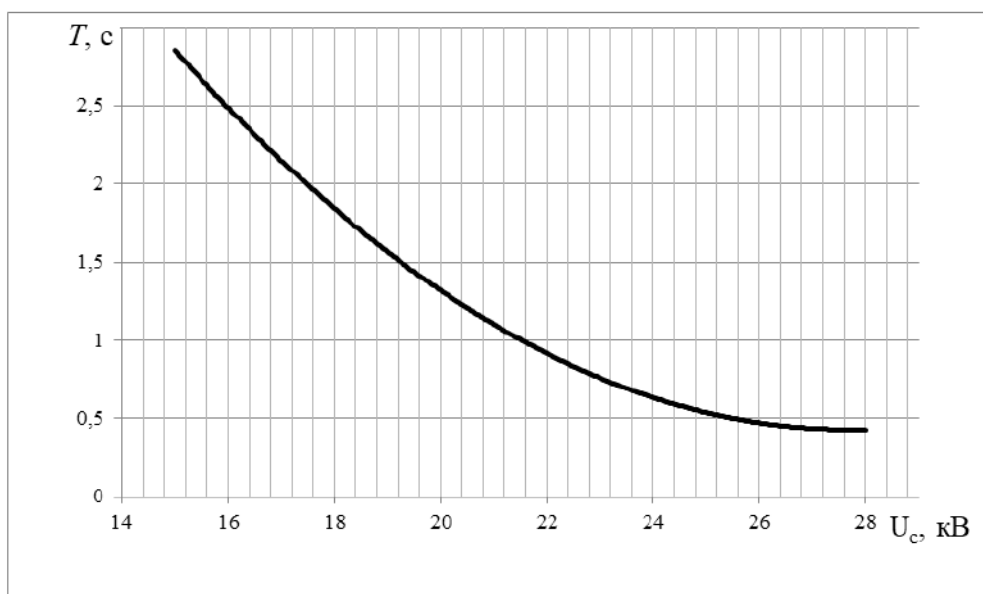
- 1 изменении напряжения питания от +25 до -39 % номинального значения;
- 2 коэффициенте несимметрии напряжения  $K_u = U_o/U_n$  от 0,02 до 0,10 ( $U_o$  и  $U_n$  – соответственно напряжение обратной и прямой последовательности);
- 3 коэффициенте несимметрии фазных токов  $K_i = I_o/I_n$  от 0,10 до 0,70. ( $I_o$  и  $I_n$  – токи прямой и обратной последовательности), когда токи в фазах при крайних значениях напряжения в контактной сети отличаются более, чем в два раза (рисунок 1.1);
- 4 снижении вращающего момента до 0,372 номинального;
- 5 значительном возрастании момента сопротивления компрессоров при низкой температуре воздуха (рисунок 1.2);
- 6 увеличенной продолжительности пуска мотор-компрессоров (МК) из-за существенного уменьшения вращающего момента при понижении питающего напряжения (рисунок 1.3).



**Рисунок 1.1 – Зависимости токов в фазах асинхронной вспомогательной машины АНЭ225 от величины однофазного напряжения, приложенного на зажимах расщепителя фаз**



**Рисунок 1.2 – Изменение момента сопротивления компрессора в зависимости от температуры воздуха**



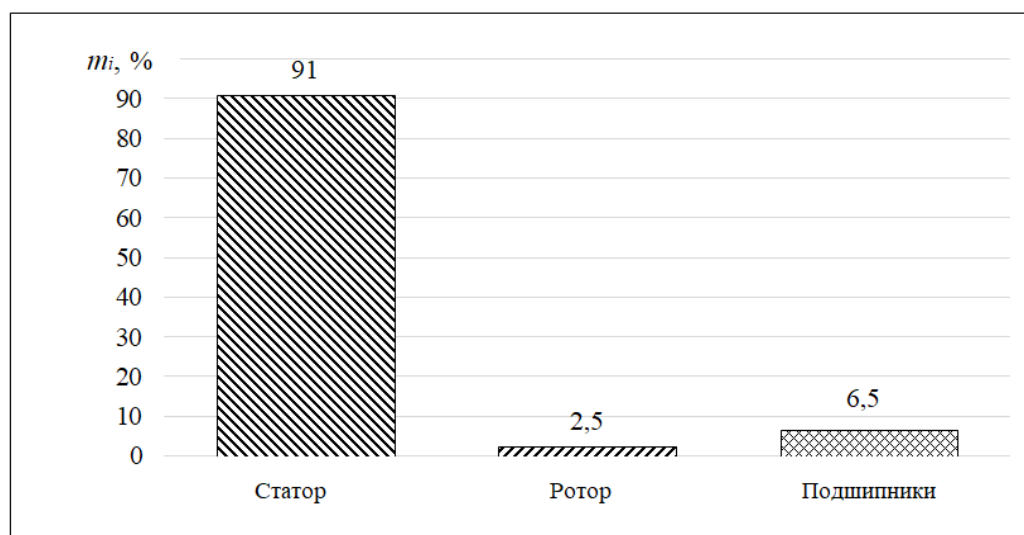
**Рисунок 1.3 – Продолжительность пуска асинхронной машины привода компрессора в зависимости от напряжения контактной сети**

В качестве средств защиты АВМ электровозов используют реле с термобиметаллическими пластинами. Опыт их эксплуатации в реальных условиях показывает, что характеристики таких реле не отличаются стабильностью. Среди причин нестабильности следует отметить явления случайного характера (различие сил трения в местах сочленения, различие упругих свойств термобиметаллических пластин и т. д.) [12, 13]. Нестабильность свойств таких средств защиты от перегрузок АВМ в цепях насосов, тормозных компрессоров, вентиляторов, расщепителей фаз отмечается при перегрузках менее 20 %, что не обеспечивает требуемый уровень безотказности. Избавиться от этого существенного недостатка путём конструкционной доработки реле не удаётся [12, 13, 16].

Важно отметить, что свойства средств защиты часто не соответствуют свойствам асинхронных электродвигателей привода вспомогательных агрегатов как тепловых объектов, особенно при нагрузках, характерных для условий эксплуатации этих электродвигателей. Реле с термобиметаллическими пластинами служат для защиты трёхфазных асинхронных двигателей только от токовых перегрузок недопустимой продолжительности. Они не реагируют на другие факторы, приводящие к нарушениям нормальных тепловых режимов

работы АВМ. К тому же они не могут защитить АВМ при нештатных ситуациях, таких, например, как заклинивание вала или обрыв фазы. В этих случаях скорость увеличения температуры обмоток АВМ существенно превосходит интенсивность повышения температуры средств защиты. Кроме того, при несимметричных изменениях воздействий, приводящих к отклонению от нормальных тепловых режимов работы асинхронных электродвигателей привода вспомогательных агрегатов, чувствительность тепловых реле крайне низка [19-21].

В процентном отношении подавляющее количество повреждений трёхфазных электродвигателей (5 кВт и большей мощности) приходится на обмотки. В основном, это межвитковые замыкания (93 %), а также повреждения межфазной и пазовой изоляции (соответственно 5 и 2 %) [9]. Как видно из рисунка 1.4, небольшой процент повреждений приходится на подшипники. Суммарно, вместе с прочими отказами (выплавление ротора, обрыв фаз, повреждения валов и т. д.) повреждения подшипников составляют 5-8 %.



**Рисунок 1.4 – Отказы промышленных асинхронных электрических машин**  
( $m_i$  – частота, % [9])

По характеру отказы различают технологические, эксплуатационные и конструкционные. В процентном отношении это 35, 50 и 15 % соответственно. По имеющимся сведениям, в среднем ежегодно попадает в капитальный ремонт больше всего электрических машин, используемых в строительстве, далее следует

горнодобывающая отрасль, затем - машиностроительная, после этого - чёрная металлургия и завершает ряд - химическая промышленность. В процентном отношении это 50, 30, 20, 13 и 9 % соответственно [9].

На первых серийных электровозах переменного тока для привода вспомогательных агрегатов применялись электрические машины общепромышленного и специального назначения. Это электрические машины типа А, АО, АС и АП (О – обдуваемые, С – с повышенным скольжением, П – с повышенным пусковым моментом) [21]. Обмотки асинхронных двигателей типа А и АО (первая единая серия электрических машин) мощностью от 0,6 до 100 кВт, имели класс нагревостойкости А – 105 °С. Асинхронные двигатели типа АС и АП обладали повышенным пусковым моментом. Электродвигатели АС в составе мотор-компрессоров и АП в составе мотор-вентиляторов охлаждающих устройств электровозов ВЛ60 имели неплохие показатели безотказности. Асинхронный электродвигатель АЭ92-402 был сконструирован непосредственно для привода вспомогательных агрегатов электровозов ВЛ80. При этом принимались во внимание особенности работы вспомогательных агрегатов (тормозных компрессоров и вентиляторов охлаждающих устройств) на электровозе. Вместе с тем, кратность пускового тока асинхронного электродвигателя АЭ92-402 была повышена в 1,4 раза. У АВМ типа АС и АП этот показатель был 5,5. На это пошли для увеличения крутящего момента на валу электродвигателя. Такой показатель, как кратность пускового момента возрос в 2,2 раза. Возросла также в 1,8 раза кратность максимального момента. У АВМ типа АС и АП эти показатели были соответственно 1,8 и 2,2.

В 1980-х гг. непосредственно для электровозов был сконструирован асинхронный двигатель АНЭ225L4УХЛ2. Конструкторы руководствовались более жёстким регламентом по сравнению с асинхронным двигателем АЭ92-402. Например, ужесточилось требование по температуре наружного воздуха. Допустимая граница была снижена на 10 °С. До этого было минус 50 °С. Была увеличена мощность асинхронного двигателя, отнесённая к единице массы, с 0,10 кВт / кг, до 0,14 кВт / кг.



В 1990-х гг. начался выпуск асинхронных двигателей АНЭ225L4. У этих двигателей кратность пускового тока была несколько снижена. А кратности пускового и максимального моментов повышены. Эти показатели были доведены до значений 7,6, 4,2 и 4,0 соответственно. Впоследствии конструкция асинхронных двигателей типа АНЭ225 неоднократно модернизировалась с учётом рекомендаций эксплуатационников.

Однако, работу асинхронных электродвигателей привода вспомогательных агрегатов электроподвижного состава существенно усложняет такой фактор, как изменение в широких пределах напряжения контактной сети. На электроподвижном составе переменного тока ситуацию дополнительно усложняют процессы, происходящие в силовых и вспомогательных цепях. Поэтому диапазон изменения напряжения на вспомогательных асинхронных электродвигателях превосходит диапазон изменения напряжения в контактной сети. Так, напряжение на вспомогательных асинхронных электродвигателях в силу указанных причин может в реальности отклоняться от установленного уровня до 39 % в меньшую сторону и до 25 % в большую. В соответствии с требованиями, отклонения напряжения в сети не должны превышать 24 % в меньшую сторону и 16 % в большую. В связи с этим, условия работы асинхронных электродвигателей привода вспомогательных агрегатов могут существенно отличаться от проектных. Требование по напряжению в системе «источник питания – привод с асинхронным электродвигателем – вспомогательный агрегат» регламентирует диапазон его изменения от минус 27 % до плюс 13 %. А несимметрия фазных напряжений может достигать 5 % у верхней зоны этого диапазона и в два раза больше – у нижней зоны. Величины кратности пускового и максимального моментов пропорциональны напряжению контактной сети во второй степени, а кратность пускового тока и напряжение находятся в пропорциональной зависимости. Для электровозов переменного тока в реальности уровни напряжения могут существенно отклоняться от установленных требованиями, что приводит к нарушению баланса в системе

«источник питания – привод с асинхронным электродвигателем – вспомогательный агрегат». Это зачастую служит причиной отказа АВМ.

## **1.2 Безотказность асинхронных вспомогательных машин электровозов переменного тока**

Результаты анализа сведений по отказам оборудования электровозов переменного тока локомотивного парка Восточных регионов России позволили установить следующее. От 16,5 до 21,3 % отказов – это отказы асинхронных электродвигателей привода вспомогательных агрегатов [21-29]. Если рассматривать распределение отказов асинхронных электродвигателей по видам привода вспомогательных агрегатов, то для электровозов ВЛ85 по мере убывания – это отказы асинхронных электродвигателей в составе мотор-компрессоров, далее - неисправности электродвигателей в составе мотор-вентиляторов охлаждающих устройств и завершают ряд отказы расщепителей фаз. В процентном отношении – эти доли составляют 55,6 % для мотор-компрессоров, почти в два раза меньше – для мотор-вентиляторов и в 3,3 раза меньше – для расщепителей фаз соответственно. Во всех этих видах привода используются асинхронные электродвигатели АНЭ225.

По виду отказов асинхронных электродвигателей АНЭ225 – больше половины (56,9 %) – это повреждения обмоток статоров и отказы роторов. Из них чуть большая часть - отказы роторов (28,7 %). Оставшиеся 43,1 % относят к отказам, связанным, главным образом, с подшипниками [12, 13, 16].

Для выяснения причин неудовлетворительных показателей безотказности асинхронных электродвигателей привода вспомогательных агрегатов электровозов ВЛ85 ВСЖД, особенно асинхронных электродвигателей АНЭ225 привода тормозных компрессоров КТ6-Эл (К – компрессор, Т – тормозной, 6 – модификация, Эл – электровозный), проведены специальные экспериментальные

исследования. Для эксплуатационных наблюдений был выбран электровоз ВЛ85 №151, а в качестве полигона исследований - тракционные пути ПТОЛ «Запад» депо Иркутск-Сортировочный и перегоны Выдрино – Кедровая – Переёмная. Были дополнительно проведены исследования в стендовых условиях и выполнена экспертная оценка состояния подконтрольных асинхронных электродвигателей [12, 13, 16].

Условия работы АВМ на электровозах ВЛ85 усложнились. Были повышены частота вращения компрессора КТ6-Эл с 440 до 560 об/мин, производительность - с 2,75 до 3,5 м<sup>3</sup>/мин. Это привело к увеличению выходной мощности электрических машин привода тормозных компрессоров КТ6-Эл с 22,8 у электровозов ВЛ80 и до 30 кВт на ВЛ85.

В 70-75 % случаев движения поездов на перегонах с консольным питанием Выдрино – Кедровая – Переёмная отмечалось снижение напряжения сети менее 21 кВ. В отдельных случаях напряжение уменьшалось до 14 кВ. Установлено, что при таком снижении напряжения наблюдаются: чрезмерная неравномерность фазных напряжений и токов АВМ, вызывающая перегревы двух фаз статорной обмотки и преждевременное старение их изоляции; повышенное скольжение, приводящее к резкому увеличению температуры роторов и подшипников, а также излому валов, которое вызывает интенсивное изменение свойств смазки, повреждение поверхности качения подшипников, сепараторов, заедание и заклинивание подшипников и выплавление роторов; продолжительные до 20 с включения компрессоров, также являющиеся причинами отказов электродвигателей привода.

Отсутствует контроль давления масла, подводимого к подшипникам компрессоров. Отмечены случаи, когда из-за повреждения масляного насоса или вращения электрической машины в обратном направлении (смена фаз приводного АНЭ225) компрессор КТ6-Эл работает при сухом трении в баббитовых подшипниках. При этом существенно увеличивается момент сопротивления вращению, повышается температура статора и ротора, а также резко возрастает износ трущихся элементов.

Нередко в зимний период эксплуатации компрессоры включались и работали при температуре компрессорного масла существенно меньше допустимой  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  из-за неисправности или пониженной мощности нагревателей, а также использования масла в редукторах КТ6-Эл с температурой замерзания – минус  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже вместо  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  по стандарту. В обоих случаях наблюдается резкое увеличение момента сопротивления вращению вала [12, 13, 16].

Наблюдались также отклонения от нормальной работы тормозных компрессоров по причине обрывов питания или отказов разгрузочных клапанов, что также приводило к увеличению момента сопротивления вращению роторов асинхронных электродвигателей при их включении.

По причинам неравномерного распределения воздушных потоков в системах охлаждения оборудования и отсутствия смазки в подшипниках возросла мощность привода вентиляторов систем охлаждения оборудования. Реальная мощность асинхронного двигателя ( $32,5\text{ кВт}$ ) привода вентилятора может быть завышена почти в 1,5 раза. При снижении напряжения контактной сети ниже  $21\text{ кВ}$  асинхронные двигатели привода вентиляторов могут нагреваться выше допустимых пределов.

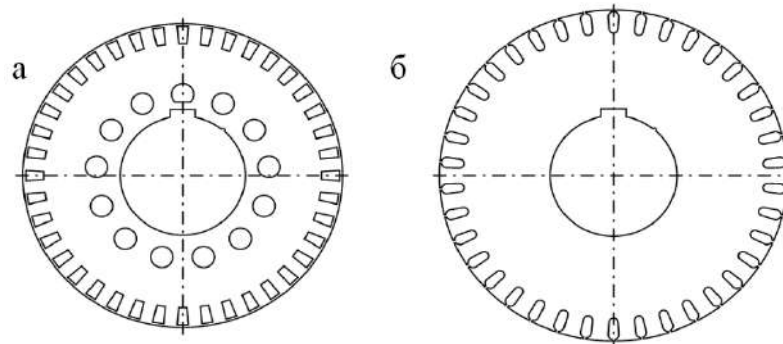
Несовершенна защита асинхронных вспомогательных электрических машин: низкая чувствительность тепловых реле и чрезмерно большое время срабатывания. Среднее время срабатывания тепловых реле при токах  $600\text{ А}$  составляет  $10\text{ с}$  и более; на части электровозов ВЛ85 установлены тепловые реле только в двух фазах вместо необходимого по условиям работы ввода реле во всех трех фазах; разрыв электромагнитным контактором по сигналу теплового реле только двух фаз. Установлены многочисленные случаи сварки контактов электромагнитных контакторов в одной из фаз. Наиболее часто это наблюдается у электромагнитных контакторов электрических машин привода компрессоров. В этих случаях, несмотря на срабатывание тепловых реле и обесточивание катушек контакторов в приводах МК, трехфазные АВМ начинают работать как однофазные со значительной перегрузкой двух фаз. В большинстве подобных случаев это приводит к нагреванию роторов и статорных обмоток АВМ выше

установленных пределов и отказам вспомогательных электрических машин. Разрыв трех фаз при срабатывании тепловой защиты в случае применения трехполюсных контакторов обеспечит более надежную защиту электрических машин. Далее, разрывная мощность электромагнитных контакторов оказывается недостаточной. Как показывает опыт эксплуатации, использование электромагнитных контакторов, рассчитанных на наибольшую мощность электрических машин до 40 кВт при достаточно равномерной нагрузке фаз (изменение напряжения сети в пределах стандарта 21-29 кВ), не обеспечивает надежного отключения электрических машин с входной мощностью 50 кВт и выше при чрезмерной (в два раза и более) неравномерности фазных токов из-за снижения напряжения сети значительно ниже стандартных значений. Однако, это не обеспечивает надежного отключения электрических машин с входной мощностью 50 кВт и выше при чрезмерной (в два раза и более) неравномерности фазных токов из-за значительного снижения напряжения контактной сети [12, 13, 16].

К выше изложенному следует добавить, что отсутствуют системы адаптивного симметрирования по напряжению и устройства для измерения температуры обмоток и элементов конструкции вспомогательных асинхронных машин. Необходимо проведение мероприятий по согласованию технических характеристик и параметров в системе «источник питания – привод с асинхронным электродвигателем вспомогательных агрегатов» по результатам обработки сведений об отказах различных асинхронных электрических машин, используемых для привода вспомогательных агрегатов. По оценке специалистов показатели безотказности асинхронных электродвигателей типа АНЭ225 электровозов ВЛ85 оказались ниже в сравнении с электрическими машинами АЭ92-4 электровозов ВЛ80. По сведениям об отказах асинхронных вспомогательных машин типа АНЭ225 локомотивного депо Нижнеудинск за последние годы более 50 % отказов происходит по причине выплавления ротора. Это свидетельствует о конструктивных просчетах при их проектировании [12, 13,

16]. На рисунке 1.5 приведена форма пластин сердечника ротора машин типа АЭ92-4 и АНЭ225.

Как видно из рисунка 1.6 (данные Владимирского электромоторного завода), при снижении напряжения до значения  $U = 280$  В (сплошная линия) вращающий момент на валу электродвигателя АНЭ225 существенно снижается. Здесь  $M$  и  $M_H$  – текущее и номинальное значение вращающего момента;  $n$  – частота вращения ротора; симметрирующих устройств нет.



а – шихтовочный лист с отверстиями; б шихтовочный лист без отверстий

Рисунок 1.5 – Форма листов роторов электрических машин АЭ92-4 (а) и АНЭ225 (б)

При проектировании двигателей привода вспомогательных агрегатов с повышенными требованиями к пусковым моментам следует учитывать влияние токов прямой и обратной последовательности при несимметрии приложенных напряжений на параметры вторичной цепи.

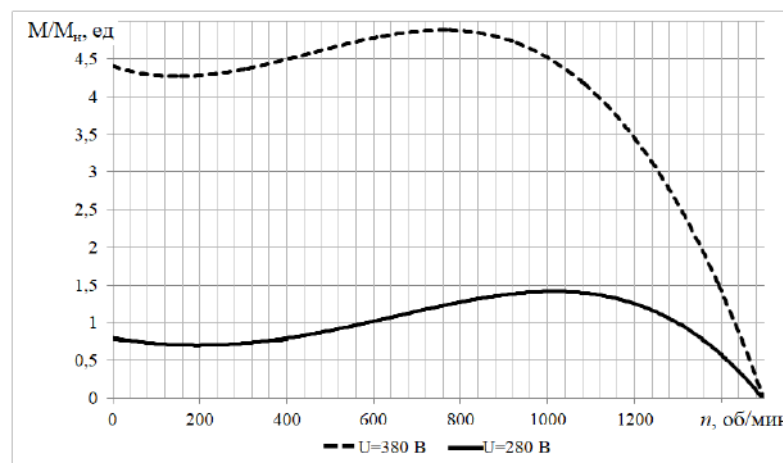


Рисунок 1.6 – Механические характеристики электрической машины АНЭ225

Известно, что активное и индуктивное сопротивление ротора для токов прямой и обратной последовательности различны, так как частоты этих токов неодинаковы и влияние вытеснения тока будет сказываться в различной степени.

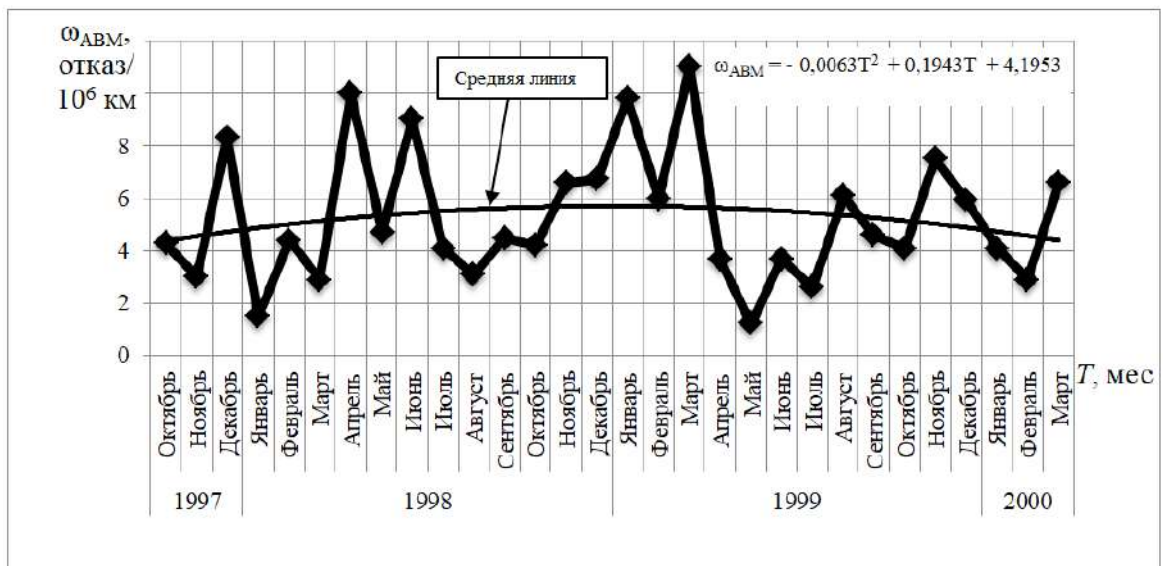
В этой связи можно полагать, что при значительной несимметрии приложенного напряжения степень влияния токов во вторичной цепи существенно выше, чем в первичной, что приводит к расплавлению поверхностных слоев обмотки ротора и отказу АВМ.

Повышение безотказности асинхронных вспомогательных электрических машин путем внедрения системы адаптивного симметрирования по напряжению и системы непрерывного контроля температуры позволит получить значительный технико-экономический эффект. Подходы к решению этой задачи могут быть различными, цель одна – максимально обеспечить устойчивую работу асинхронных электродвигателей привода вспомогательных агрегатов электровозов переменного тока при изменении в широких пределах напряжения контактной сети.

При проведении исследований использовались статистические данные технических отделов, отделов главного технолога, а также данные из журналов «Отказы асинхронных вспомогательных машин», электромашинных цехов сервисных локомотивных депо следующих железных дорог ОАО «РЖД»: Восточно-Сибирской, Красноярской, Горьковской, Забайкальской и Дальневосточной, представленные отделом «Новых локомотивов и эксплуатационных испытаний» ПКБ ЦТ ОАО «РЖД». В качестве показателя безотказности использован параметр потока отказов –  $\omega$ , представляющий собой отношение количества отказов АВМ и их узлов, группы электровозов в месяц, год и т.п. к пробегу контролируемых электровозов за этот же период времени [21, 28, 30-34].

В каждой группе учитывалось не менее 20 электровозов, чем обеспечивалась необходимая достоверность результатов. Анализ выполнен по

пяти типам электровозов: ВЛ85 – два МК, десять мотор-вентиляторов (МВ), два фазовых расщепителя (ФР) – все асинхронные электрические машины типа АНЭ225; ВЛ80Р – два МК, десять МВ – асинхронные электрические машины АЭ92-4 и два ФР типа НБ-455А; ВЛ80Т, ВЛ80С – два МК, восемь МВ – асинхронные электрические машины АЭ92-4 и два ФР типа НБ-455А; 2ЭС5К – два МК, шесть МВ – асинхронные электрические машины НВА55; 3ЭС5К – три МК, девять МВ – все типа НВА55. Данные о параметрах потоков отказов и распределению  $\omega_{\text{АВМ}}$  по узлам асинхронных вспомогательных машин АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р грузового движения депо Боготол приведены на рисунках 1.7 и 1.8 соответственно.

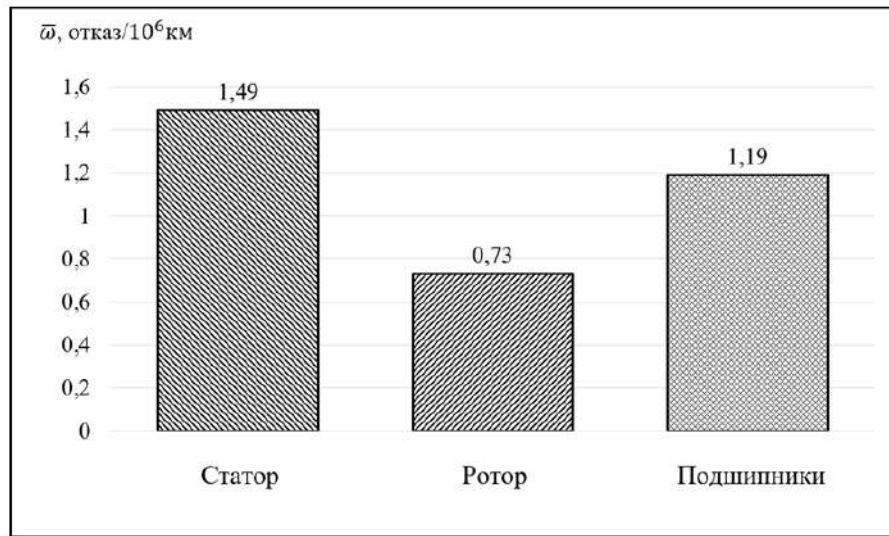


**Рисунок 1.7 – Параметр потока отказов асинхронных электрических машин АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Боготол в 1997-2000 годах**

При анализе имеющихся статистических данных по отказам была отмечена стабильность характера изменения параметра потока отказов АВМ –  $\omega_{\text{АВМ}}$  во времени  $T$ . Средняя величина параметра потока отказов  $\bar{\omega}_{\text{АВМ}}$  за анализируемый период – октябрь 1997 – март 2000 года – составила 5,26 отказов/10<sup>6</sup> км. Средние значения параметров потоков отказов статорных обмоток –  $\bar{\omega}_{\text{С}}$ , роторов –  $\bar{\omega}_{\text{Р}}$  и подшипников –  $\bar{\omega}_{\text{П}}$  за период наблюдения составили, соответственно, 1,49; 0,73 и



1,19 отказов/ $10^6$  км. Средние значения параметров потоков отказов одной асинхронной вспомогательной машины составили: АВМ – 0,376; МВ – 0,342; МК – 0,570; ФР – 0,352 отказов/ $10^6$  км.



**Рисунок 1.8 – Гистограмма распределения параметров потоков отказов узлов электрических машин АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Боготол в 1997-2000 годах**

Рассмотрены также статистические данные по отказам асинхронных электродвигателей АЭ92-4 грузовых электровозов ВЛ80С локомотивного депо Горький в 2004 – 2008 годах, приведенные на рисунках 1.9 и 1.10. И в этом случае наблюдалась стабильность изменения параметра потока отказов АВМ –  $\omega_{\text{АВМ}}$  во времени  $T$ . Средняя величина параметра потока отказов  $\bar{\omega}_{\text{АВМ}}$  за анализируемый период составляет 3,18 отказов/ $10^6$  км. Средние значения параметров потоков отказов статорных обмоток –  $\bar{\omega}_{\text{С}}$ , роторов –  $\bar{\omega}_{\text{Р}}$  и подшипников –  $\bar{\omega}_{\text{П}}$  за период наблюдения соответственно равны: 1,58; 0,06 и 0,65 отказов/ $10^6$  км. Среднее значение параметра потока отказов одной АВМ электровоза - 0,265 отказов/ $10^6$  км.

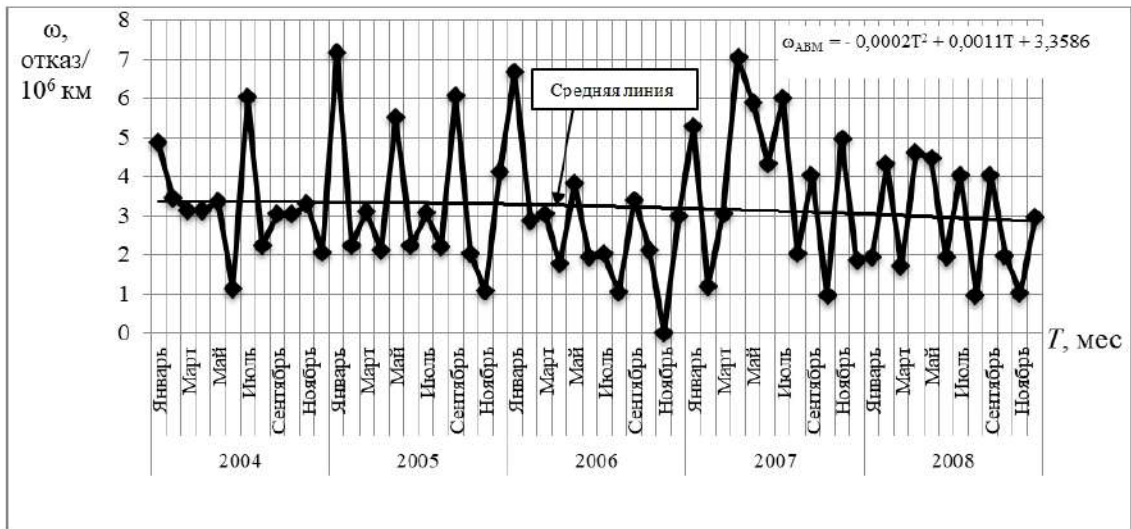


Рисунок 1.9 – Параметр потока отказов асинхронных электрических машин АЭ92-4 электровазов ВЛ80С депо Горький в 2004 – 2008 годах

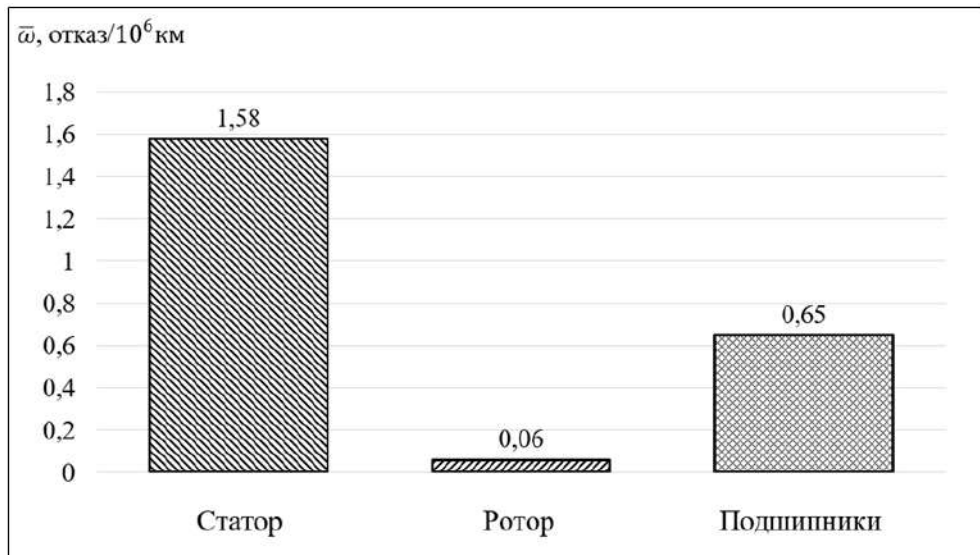
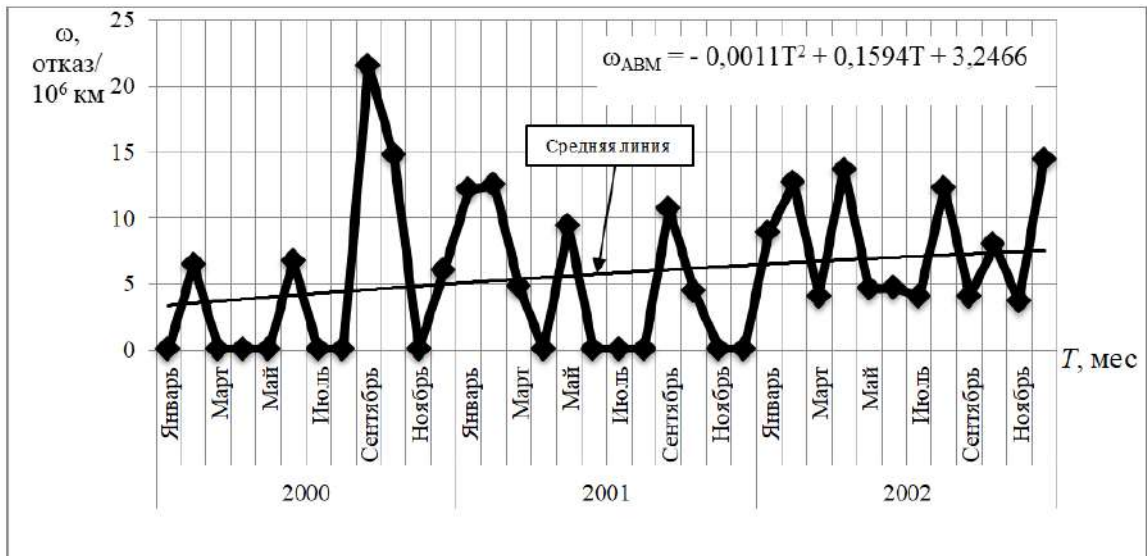


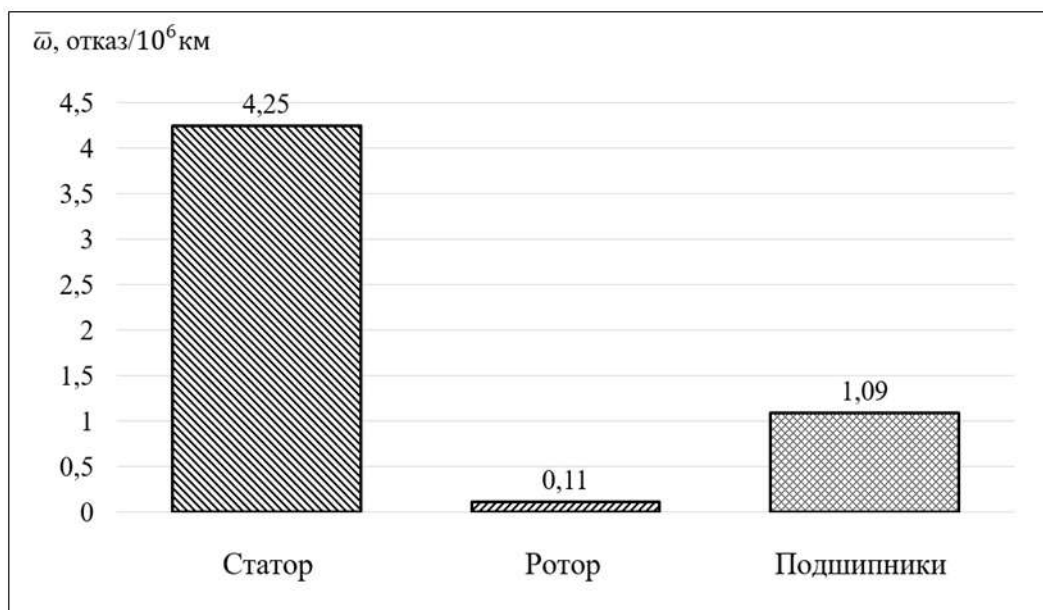
Рисунок 1.10 – Распределение параметров потоков отказов узлов электрических машин АЭ92-4 электровазов ВЛ80С депо Горький в 2004 – 2008 годах

Средняя величина параметра потока отказов асинхронных электрических машин АЭ92-4  $\bar{\omega}_{ABM}$  электровазов ВЛ80Р подталкивающего движения депо Иркутск в течение трех лет наблюдения с января 2000 по декабрь 2002 года составляет 5,43 отказов/ $10^6$  км (рисунок 1.11).



**Рисунок 1.11 – Параметр потока отказов асинхронных электрических машин АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Иркутск в 2000 – 2002 годах**

Средние значения параметров потоков отказов статорных обмоток –  $\bar{\omega}_С$ , роторов –  $\bar{\omega}_Р$  и подшипников –  $\bar{\omega}_П$  за анализируемый период соответственно равны: 4,25; 0,11 и 1,09 отказов/10<sup>6</sup> км (рисунок 1.12). Средние значения параметров потоков отказов одной асинхронной вспомогательной машины составили: АВМ – 0,388; МВ – 0,278; МК – 0,340; ФР – 0,985 отказов/10<sup>6</sup> км.



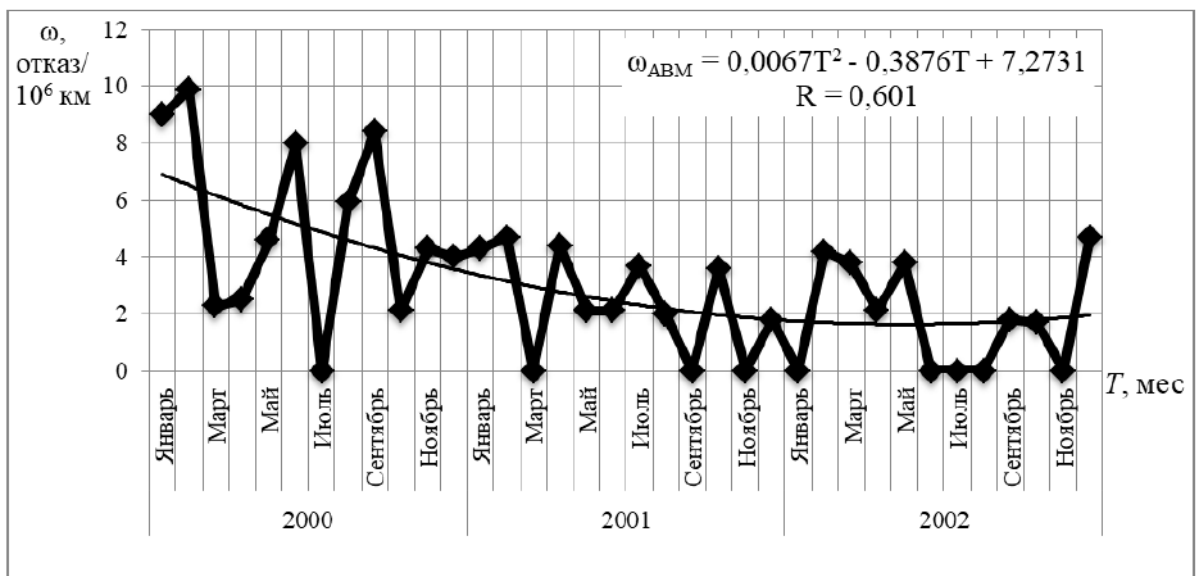
**Рисунок 1.12 – Распределение параметров потоков отказов узлов электрических машин АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Иркутск в 2000 – 2002 годах**

Сведения по отказам асинхронных электродвигателей АЭ92-4 электровозов ВЛ80Т, ВЛ80С грузового и вспомогательного движения депо Иркутск в 2000 – 2002 годах приведены на рисунках 1.13 и 1.14.

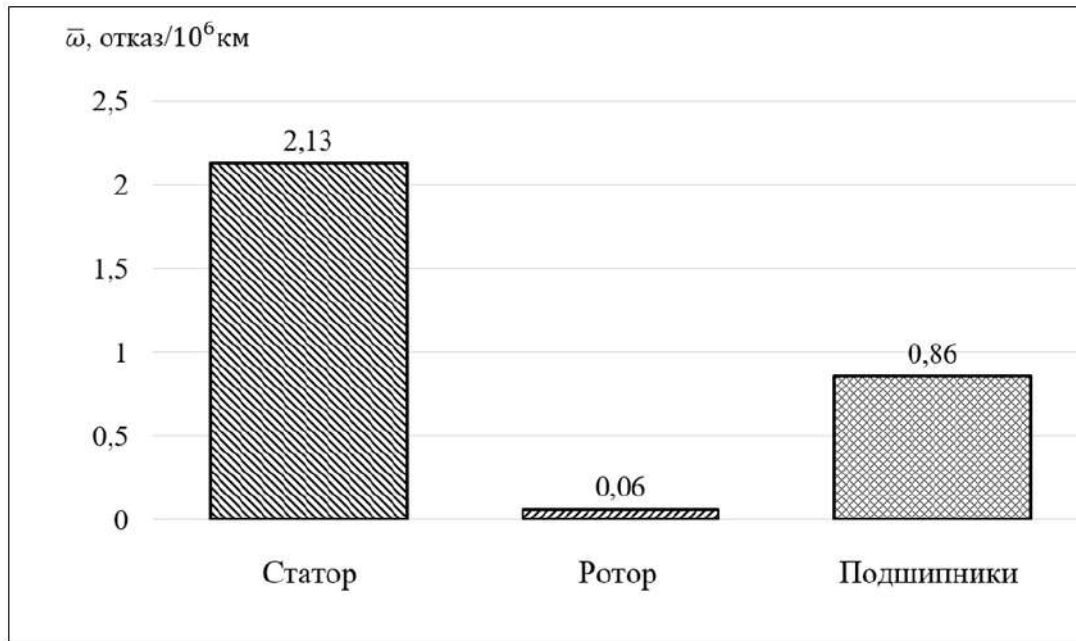
При анализе изменения во времени  $T$  параметра потока отказов этих асинхронных вспомогательных машин было отмечено снижение  $\omega_{\text{АВМ}}$  в 2000 и 2001 годах и стабильно низкое значение параметра потока отказов в 2002 году.

Значения параметров потоков отказов статорных обмоток –  $\bar{\omega}_С$ , роторов –  $\bar{\omega}_Р$  и подшипников –  $\bar{\omega}_П$  за период наблюдения соответственно равны: 2,13; 0,06 и 0,86 отказов/ $10^6$  км.

Средние значения параметра потока отказов одной асинхронной вспомогательной машины составили: АВМ – 0,259; МВ – 0,209; МК – 0,275; ФР – 0,380 отказов/ $10^6$  км.

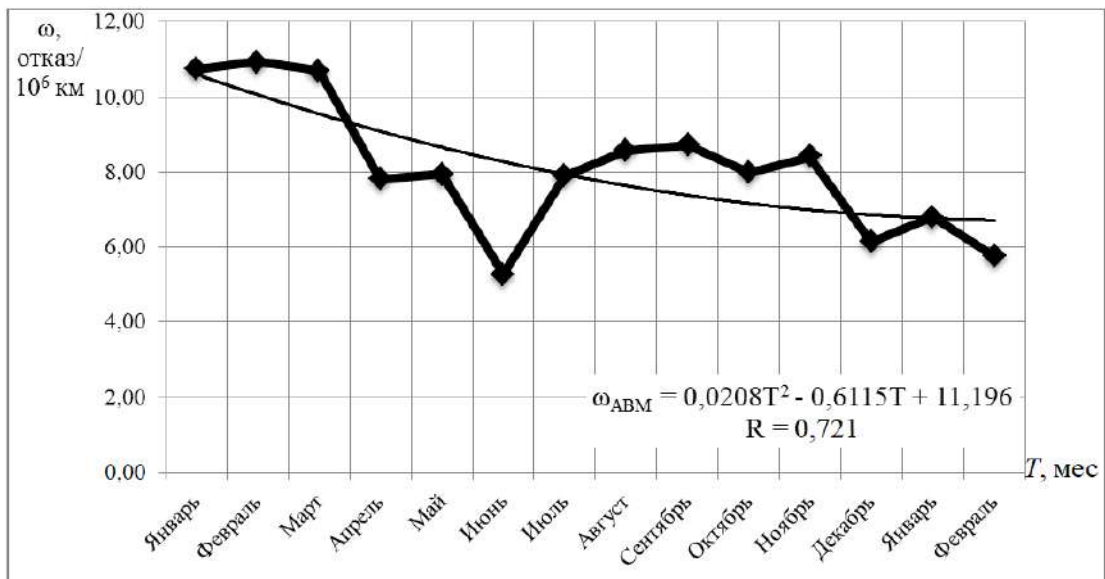


**Рисунок 1.13 – Параметр потока отказов асинхронных электрических машин АЭ92-4 электровозов ВЛ80Т и ВЛ80С депо Иркутск в 2000 – 2002 годах**

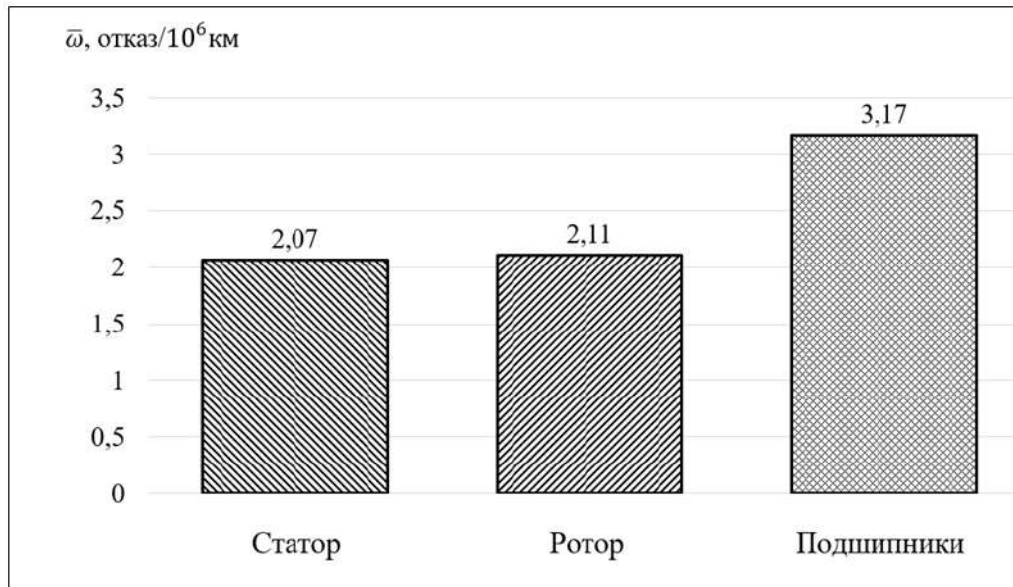


**Рисунок 1.14 – Гистограмма распределения параметров потоков отказов узлов электрических машин АЭ92-4 электровозов ВЛ80Т и ВЛ80С депо Иркутск в 2000 - 2002 годах**

Рассмотрены также статистические данные об отказах асинхронных вспомогательных машин отказов АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск в 2002-2003 годах, приведенные на рисунках 1.15 – 1.16.



**Рисунок 1.15 – Параметр потока отказов асинхронных электрических машин АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск в 2002 – 2003 годах**



**Рисунок 1.16 – Распределение параметров потоков отказов узлов электрических машин АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск в 2002 - 2003 годах**

При анализе изменения во времени  $T$  параметра потока отказов асинхронных вспомогательных машин было отмечено его снижение в течение анализируемого периода. Средняя величина параметра потока отказов  $\bar{\omega}_{\text{АВМ}}$  за анализируемый период составляет 8,31 отказов/10<sup>6</sup> км. Средние значения параметров потоков отказов статорных обмоток –  $\bar{\omega}_{\text{С}}$ , роторов –  $\bar{\omega}_{\text{Р}}$  и подшипников –  $\bar{\omega}_{\text{П}}$  за период наблюдения равны: 2,07; 2,11 и 3,17 отказов/10<sup>6</sup> км. Среднее значение параметра потока отказов одной асинхронной вспомогательной машины электровоза составило 0,594 отказов/10<sup>6</sup> км.

Рассмотрены также статистические данные об отказах асинхронных вспомогательных машин АНЭ225 электровозов ВЛ85 грузового движения депо Нижнеудинск в 2012 году, приведенные на рисунках 1.17 и 1.18. При анализе изменения во времени  $T$  параметра потока отказов этих асинхронных вспомогательных машин наблюдалось его возрастание в зимний период и снижение в летний. Средняя величина параметра потока отказов  $\bar{\omega}_{\text{АВМ}}$  за обозначенный период составила 24,5 отказов/10<sup>6</sup> км. То есть, параметр потока отказов электрических машин увеличился в течение десяти лет в 2,95 раза. Средние значения параметров потоков отказов статорных обмоток –  $\bar{\omega}_{\text{С}}$ , роторов –  $\bar{\omega}_{\text{Р}}$  и подшипников –  $\bar{\omega}_{\text{П}}$  за период наблюдения составили: 6,24; 4,44 и 11,4

отказов/ $10^6$  км. Среднее значение параметра потока отказов одной АВМ электровоза составило 1,75 отказов/ $10^6$  км.

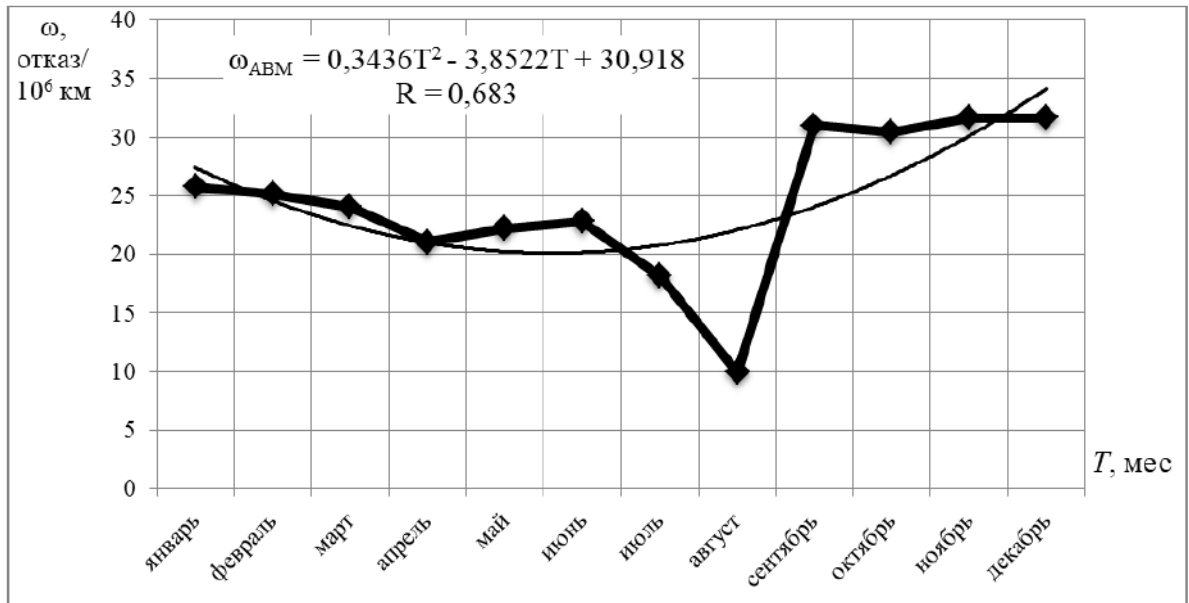


Рисунок 1.17 – Параметр потока отказов электрических машин АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск в 2012 году

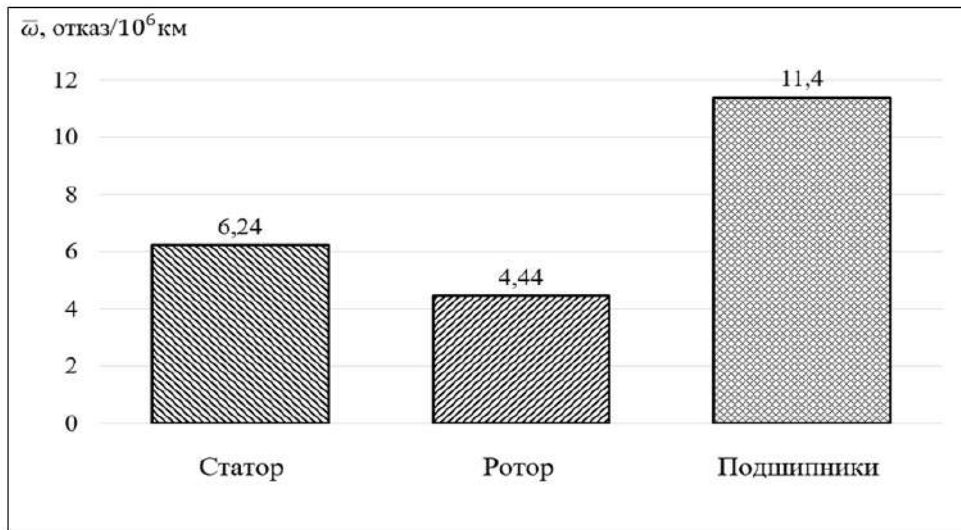
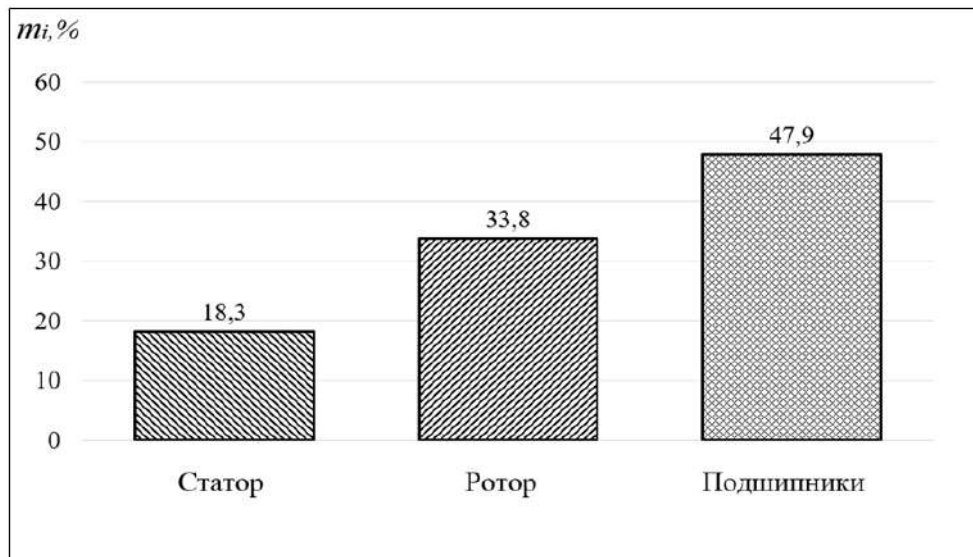


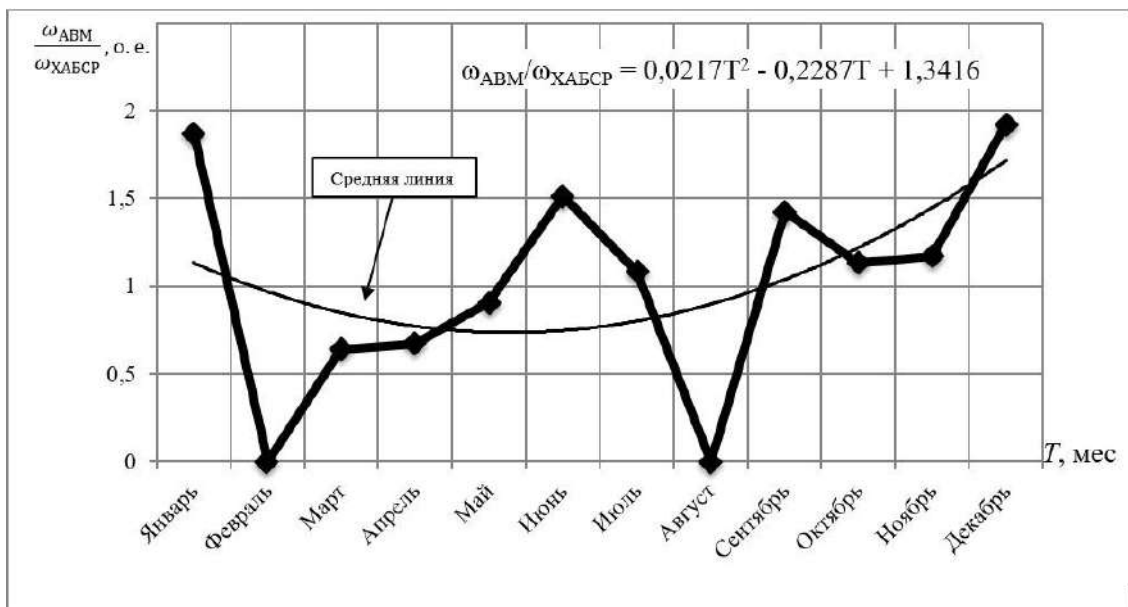
Рисунок 1.18 – Распределение параметров потоков отказов узлов электрических машин АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск в 2012 году

Также проанализированы данные об отказах АВМ НВА55 электровозов 2ЭС5К и 3ЭС5К грузового движения депо Вихоревка в 2012 году (рисунок 1.19). Соотношение отказов основных узлов АВМ составило: статор – 18,3 %; ротор – 33,8 %; подшипники – 47,9 %.



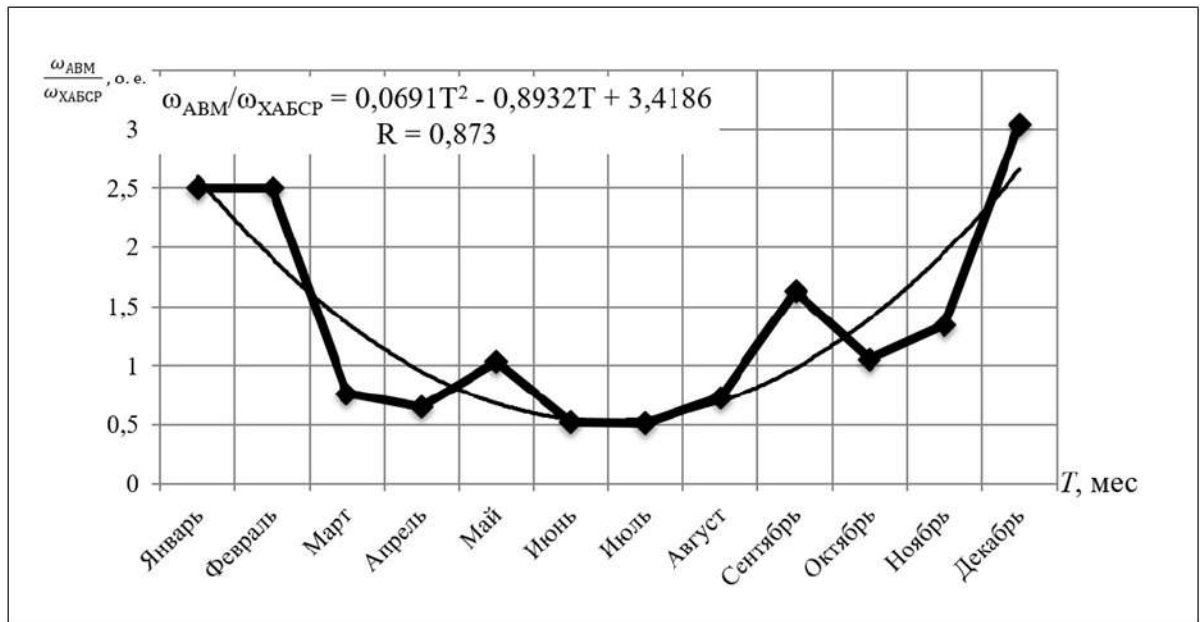
**Рисунок 1.19 – Распределение отказов электрических машин НВА55 электровозов 2ЭС5К и 3ЭС5К депо Вихоревка в 2012 году (на рисунке  $m_i$  – частота отказов)**

Ежемесячные зависимости изменения относительных параметров потоков отказов асинхронных электрических машин НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К Восточного полигона РЖД в 2016 году во времени эксплуатации  $T$  приведены на рисунках 1.20 – 1.22.



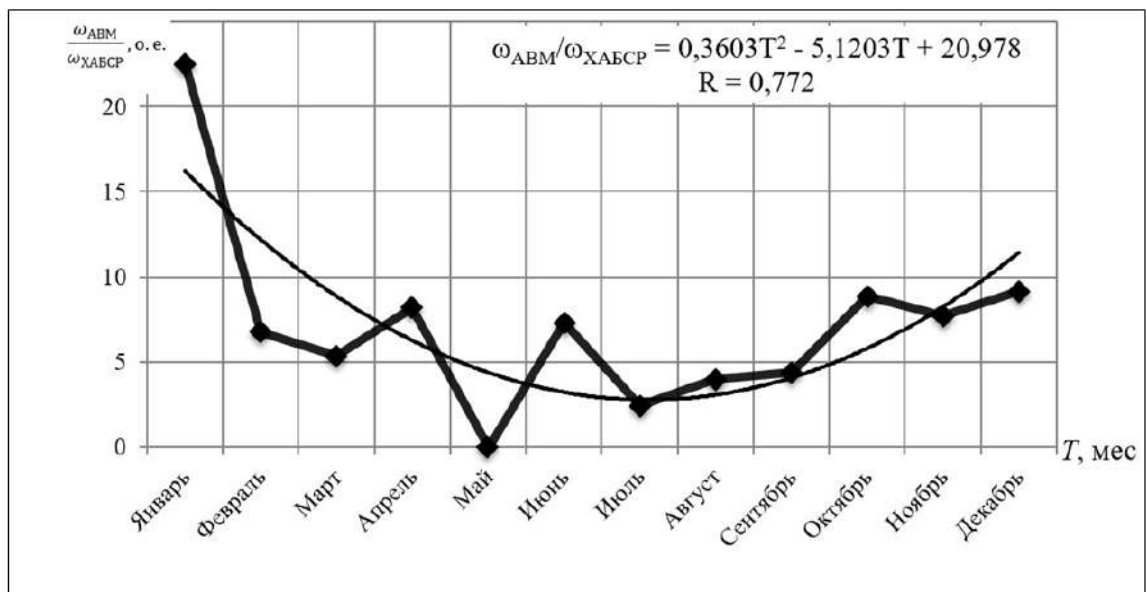
**Рисунок 1.20 – Характер изменения относительного параметра потока отказов асинхронных электрических машин НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К депо Хабаровск в 2016 году**





**Рисунок 1.21 – Динамика относительного параметра потока отказов асинхронных электрических машин НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К депо Чита в 2016 году**

За установочное значение принималось среднемесячная величина относительного параметра потока отказов асинхронных вспомогательных машин НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К депо Хабаровск, АВМ электровозов которого имели наименьшее число отказов.



**Рисунок 1.22 – Изменение относительного параметра потока отказов асинхронных электрических машин НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К депо Вихоревка в 2016 году**

При рассмотрении зависимостей можно отметить, что наименьший относительный параметр потока отказов наблюдается у АВМ электровозов депо Хабаровск и возрастает в депо Чита, а в наибольшей степени в депо Вихоревка. Отмечаются характерные снижения относительных параметров потоков АВМ в летний период эксплуатации и возрастания в зимний.

### 1.3 Выводы по разделу 1

1 Асинхронные вспомогательные машины современных электровозов переменного тока ВЛ85, 2, 3, 4ЭС5К Восточного полигона имеют пониженную безотказность по сравнению с АВМ электровозов ВЛ80. Это обусловлено повышением выходной мощности приводов, увеличением мощности АВМ на единицу массы, выход напряжения контактной сети за нижнюю установленную границу, нерациональной системой вентиляции вспомогательных электрических машин, повышенной несимметрией напряжения питания и тока, несовершенством защиты АВМ.

2 Наибольшее число отказов приходится на АВМ привода главных компрессоров. Это вызвано замерзанием масла в картерах и редукторах поршневых компрессоров зимой из-за повреждения подогревателей, разгрузочных клапанов, использования масла в картерах и редукторах низкого качества.

3 Нередко на перегонах с консольным питанием отмечается снижение напряжения контактной сети до значений ниже 21 кВ. Зафиксированы случаи снижения напряжения до 14 кВ. При этом отмечалась существенная неравномерность фазных напряжений и токов АВМ, приводящая к повышенному скольжению роторов, затяжным пускам МК и нагреванию роторов и статорных обмоток АВМ выше установленных пределов, и последующему отказу АВМ.

4 Установлено завышение мощности асинхронных двигателей приводов мотор-вентиляторов из-за нерационального распределения воздушных потоков в системах охлаждения. Реальная мощность асинхронного электродвигателя привода вентилятора может превосходить проектную (32,5 кВт) в 1,5 раза.

5 Выявлена низкая чувствительность тепловых реле в системах защиты АВМ и существенное запаздывание их срабатывания. Установлены массовые отказы по причине сварки контактов электромагнитных контакторов питания АВМ в приводах МК. При этом, при срабатывании тепловых реле и обесточивании катушек контакторов в приводах МК, трехфазные АВМ начинают работать как однофазные. В большинстве таких случаев на электровозах ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К это приводит к нагреванию роторов и статорных обмоток АВМ выше установленных пределов и отказам вспомогательных электрических машин.

6 За 10 лет эксплуатации безотказность АВМ АНЭ225 снизилась почти в 3 раза вследствие недостаточного количества смазки в подшипниках, не обеспечивающего постоянную работу их в режиме качения.

7 Климатические условия эксплуатации, интенсивность грузопотока, определяющая время отстоя электровозов, существенно влияют на безотказность АВМ из-за пониженной вязкости смазки Буксол. В связи с этим работа подшипников АВМ в режиме качения при низкой температуре, характерной для зимнего периода эксплуатации на северном направлении Восточного полигона, невозможна.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 2.1 Расчет радиальной вентиляции асинхронной вспомогательной машины АНЭ225

Из-за пониженной безотказности АВМ АНЭ225 мощностью 55 кВт с радиальной вентиляцией и его аналога НВА55 рассмотрена конструкция электрических машин. Выявлена несимметричность конструкции радиальной вентиляции двигателя АНЭ225 относительно вертикальной оси. Установлено, что пространство для прохода охлаждающего воздуха левого вентилятора со стороны роликового подшипника увеличено за счет уменьшения пространства для прохода воздуха правого вентилятора со стороны шарикового подшипника.

Для установления влияния несимметричности конструкции радиальной вентиляции на производительность вентилятора асинхронной вспомогательной машины, выполнен расчет вентиляции АВМ мощностью 55 кВт с симметричной и несимметричной конструкцией радиальной вентиляции двигателя. Расчет АВМ с симметричной конструкцией радиальной вентиляции приведен ниже.

Необходимое количество воздуха для охлаждения машины с самовентиляцией определяется из выражения [35-39].

$$Q = \frac{\Delta P_{\infty}}{C_B \cdot \gamma_B \cdot \Delta \theta_B}, \quad (2.1)$$

где:  $\Delta P_{\infty} = 7147$  Вт потери АВМ АНЭ225 в длительном режиме работы;

$C_B = 1000$  Дж/(°С×кг) – удельная теплоемкость воздуха;

$\gamma_B = 1,1$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха при нормальном атмосферном давлении и температуре 50 °С;

$\Delta \theta_B = 30$  °С – средний подогрев охлаждающего воздуха электрических машин, при самовентиляции с изоляцией классов нагревостойкости F и H.

Таким образом, количество воздуха для охлаждения машины

$$Q = \frac{7147}{1000 \cdot 1,1 \cdot 30} = 0,217 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.2)$$

Количество охлаждающего воздуха, обеспечиваемое вентиляционным устройством ротора [36].

$$Q' = q_0(n_B \cdot b_B + m) \cdot \frac{n_H}{100} \cdot \left(\frac{D}{100}\right)^2, \quad (2.3)$$

где:  $q_0 = 26 \times 10^{-3}$  – опытный коэффициент для асинхронных машин;

$n_B = 0$  – число радиальных вентиляционных каналов;

$b_B = 0$  – ширина радиальных вентиляционных каналов;

$m = 10$  – опытный коэффициент для асинхронных машин;

$n_H = 1433$  об/мин – номинальная скорость вращения ротора АВМ АНЭ225 [21];

$D = 25$  см – диаметр ротора по расточке статора [21].

Таким образом количество воздуха, обеспечиваемое вентиляционным устройством, составляет

$$Q' = 0,026 \cdot 10 \cdot \frac{1433}{100} \cdot \left(\frac{25}{100}\right)^2 = 0,233 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.4)$$

Давление, создаваемое вентиляционным устройством ротора [36]:

$$P_P = 0,8 \cdot \left(\frac{n_H}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{100}\right)^2 \cdot 9,81 = 0,8 \cdot \left(\frac{1433}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{25}{100}\right)^2 \cdot 9,81 = 100,6 \text{ Па}. \quad (2.5)$$

Потери мощности на вентиляцию [9]:

$$N_B = 0,175 \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2 \cdot Q' = 0,175 \cdot \left(\frac{18,55}{10}\right)^2 \cdot 0,233 = 0,145 \text{ кВт}, \quad (2.6)$$

где:  $V = 18,55$  м/с – окружная скорость вращения вентиляционных лопаток.

Расчет АВМ АНЭ225 с несимметричной радиальной вентиляцией приведен ниже.

Расчет встроенного центробежного вентилятора асинхронной вспомогательной машины АНЭ225 с несимметричной конструкцией радиальной вентиляции относительно вертикальной оси.

Расчет выполнен при выходной мощности двигателя 38,7 кВт, близкой мощности 39 кВт, превышение которой, приводит к недопустимому перегреву АВМ АНЭ225 [16].

Согласно результатам выполненного расчета с использованием чертежей продольного и поперечного разрезов АВМ АНЭ225 аэродинамическое сопротивление воздухопровода левого вентилятора составляет 1014, правого вентилятора - 2094. Тогда полное аэродинамическое сопротивление двигателя

$$Z_{\Sigma} = \frac{Z_{л} \cdot Z_{пр}}{(\sqrt{Z_{л}} + \sqrt{Z_{пр}})^2} = \frac{1014 \cdot 2094}{(\sqrt{1014} + \sqrt{2094})^2} = 353. \quad (2.7)$$

Таким образом, расчетное давление

$$P_p = 9,81 \cdot Z_{\Sigma} \cdot Q_1^2 = 9,81 \cdot 353 \cdot 0,164^2 = 93,1 \text{ Па}, \quad (2.8)$$

где:  $Q_1 = 0,164 \text{ м}^3/\text{с}$  – производительность вентиляции АВМ АНЭ225 при выходной мощности 38,7 кВт.

Относительная длина вентиляционной лопатки

$$l = \frac{L}{D} = \frac{0,0385}{0,25} = 0,154, \quad (2.9)$$

где:  $L = 0,0385 \text{ м}$  – длина лопатки АВМ АНЭ225;

$D = 0,25 \text{ м}$  – диаметр ротора по расточке статора [36].

По зависимости коэффициента  $\lambda(l)$  для вентиляторов с радиальными лопатками, в соответствии с приведенными данными в работе [40], значение  $\lambda = 1,1$ , а расчетный коэффициент давления определяется по зависимости

$$h_p = \frac{306 \cdot P_p \cdot \lambda}{D^2 \cdot n^2} = \frac{306 \cdot 93,1 \cdot 1,1}{0,25^2 \cdot 1433^2} = 0,244. \quad (2.10)$$

По характеристике давления вентилятора с 18 радиальными лопатками, согласно работы [40], при  $h_p = 0,244$ , получается  $q_1 = 0,142$  [40].

Расчетная ширина лопаток

$$B_p = \frac{3,6 \cdot Q \cdot \sqrt{\lambda}}{D^2 \cdot n \cdot q_1} = \frac{3,6 \cdot 0,164 \cdot \sqrt{1,1}}{0,25^2 \cdot 1433^2 \cdot 0,142} = 0,0487 \text{ м}. \quad (2.11)$$

Поэтому были выбраны лопатки длиной 38,5 мм и шириной 50 мм. Число лопаток – 18, как в АВМ АНЭ225.

Расчетный коэффициент производительности

$$q_p = \frac{q_1 \cdot B_p}{B} = \frac{0,142 \cdot 0,0487}{0,050} = 0,138 \text{ м.} \quad (2.12)$$

Согласно работы [40] через точку с координатами  $q_p = 0,138$  и  $h_p = 0,244$ , проводится парабола до пересечения с характеристикой вентилятора, имеющего восемнадцать радиальных лопаток и определяются значения  $h = 0,251$  и  $q = 0,141$ .

Развиваемое вентилятором давление

$$P = \frac{P_p \cdot h}{h_p} = \frac{93,1 \cdot 0,251}{0,244} = 95,8 \text{ Па.} \quad (2.12)$$

Производительность вентилятора

$$Q = Q_p \cdot \sqrt{\frac{h}{h_p}} = 0,164 \cdot \sqrt{\frac{0,251}{0,244}} = 0,166 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (2.13)$$

По характеристике КПД вентилятора с радиальными лопатками при  $\frac{q}{\sqrt{\lambda}} = \frac{0,141}{\sqrt{1,1}} = 0,134$ , КПД  $\eta_p = 0,242$  [40].

$$\text{Действительный КПД } \eta = \frac{\eta_p}{\lambda} = \frac{0,242}{1,1} = 0,220.$$

Мощность вентилятора

$$N_B = 10^{-3} \cdot Q \cdot \frac{P}{\eta} = 10^{-3} \cdot 0,166 \cdot \frac{95,8}{0,220} = 0,0723 \text{ кВт.} \quad (2.14)$$

Повышение температуры от потерь на вентиляцию

$$\Delta t_B = \frac{N_B}{1,21 \cdot Q} = \frac{0,0723}{1,21 \cdot 0,166} = 0,36 \text{ }^\circ\text{C.} \quad (2.15)$$

Повышение температуры от потерь в АВМ без учета вентиляционных потерь

$$\Delta t_{п1} = \frac{0,712 \cdot \Delta P_H - n_B}{1,21 \cdot Q} = \frac{7,147 \cdot 0,712 - 0,0723}{1,21 \cdot 0,166} = 24,97 \text{ }^\circ\text{C.} \quad (2.16)$$

Общее повышение температуры охлаждающего воздуха в АВМ

$$t_{п2} = \Delta t_B + \Delta t_{п1} = 0,36 + 24,97 = 25,33 \text{ }^\circ\text{C.} \quad (2.17)$$

Выполненные расчеты выявили недостатки вентиляторов с несимметричной системой радиальной вентиляции. В связи с этим проанализированы конструкции АВМ АЭ92-4 электровоза ВЛ80 и АВМ АНЭ225, НВА55 электровозов ВЛ85 и 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К. Установлено, что для обеспечения необходимой производительности вентиляции АНЭ225 и НВА55 во всех режимах работы нужно провести следующие усовершенствования их конструкции и обслуживания [14, 35, 38, 39, 41]:

- 1 симметризовать конструкцию двигателя относительно вертикальной оси;
- 2 увеличить длину корпуса АВМ при сохранении электромагнитной системы двигателя и расстояния между подшипниковыми узлами:
  - а) увеличить длину корпуса на 60 мм (30 мм вправо и влево от вертикальной оси двигателя);
  - б) без смещения подшипниковых узлов установить на указанные расстояния подшипниковые щиты;
  - в) сместить патрубки воздухопроводов на 30 мм вправо и влево;
  - г) сместить на 30 мм вправо и влево камеры для входа охлаждающего воздуха;
  - д) увеличить длину продольных ребер корпуса на 30 мм вправо и влево;
- 3 использовать прямоугольные радиальные вентиляционные лопатки для исключения обратного направления воздушного потока;
- 4 увеличить длину и ширину вентиляционных лопаток;
- 5 увеличить сечение выхода вентилирующего воздуха из АВМ на 38–40 %. При этом выходное сечение воздухопровода будет больше входного, уменьшается аэродинамическое сопротивление выхода, что снижает образование обратных потоков охлаждающего воздуха.

Изменить конструкцию подшипникового узла:

- 1 увеличить объем подшипниковых камер для размещения не менее 300 г. смазки в каждом подшипниковом узле в летний период эксплуатации;
- 2 перенести маслопроводы для подачи смазки и выхода отработанной смазки на наружные части корпусов подшипников;
- 3 ввести непрерывный контроль температуры подшипников с использованием датчиков температуры, установленных на наружных крышках подшипников со световой и звуковой сигнализацией о перегреве в кабине машиниста;
- 4 применить смазку подшипников с испаряемостью не выше 1,5 % при температуре 100 °С, с температурой деградации не менее 120 °С;



5 разработать конструкцию подшипникового узла, обеспечивающую заправку и выход смазки без разборки АВМ, позволяющую контролировать наличие смазки в эксплуатации и ее поступление при смене и пополнениях;

6 рационально использовать смазку, увеличивая её количество в летний период, когда расход между пополнениями и заправками возрастает, и уменьшая её количество в зимний период, когда температура подшипников снижается по сравнению с летним периодом эксплуатации.

Уточненный расчет встроенного центробежного вентилятора асинхронной вспомогательной машины с предложенной симметричной конструкцией радиальной вентиляции, а также с усовершенствованными конструкцией и обслуживанием.

## **2.2 Расчет радиальной вентиляции усовершенствованной асинхронной вспомогательной машины АНЭ225**

Расчет выполнен при выходной мощности двигателя 55 кВт, давлении  $P_p = 100$  Па, длине вентиляционных лопаток  $L = 0,055$  м, номинальной скорости вращения ротора  $n = 1433$  об/мин, диаметре ротора по расточке статора  $D = 0,25$  м, производительности вентилятора, равной производительности вентиляторов АВМ АНЭ2225  $Q = 0,233$  м<sup>3</sup>/с при симметричной конструкции радиальной вентиляции (подраздел 2.1).

Тогда, значение коэффициента давления [40]

$$h_0 = \frac{306 \cdot P_p}{D^2 \cdot n^2} = \frac{306 \cdot 100}{0,25^2 \cdot 1433^2} = 0,238. \quad (2.18)$$

Относительная длина вентиляционной лопатки

$$l = \frac{L}{D} = \frac{0,055}{0,25} = 0,220. \quad (2.19)$$

По зависимости коэффициента  $\lambda(l)$  для вентиляторов с радиальными лопатками, приведенной в работе [40], определяется значение  $\lambda = 1,05$ .

Расчетный коэффициент давления

$$h_p = h_0 \cdot \lambda = 0,238 \cdot 1,05 = 0,250. \quad (2.20)$$

По характеристике давления вентилятора с 18 радиальными лопатками [40] при  $h_p = 0,250$  значение коэффициента производительности составляет  $q_1 = 0,138$ .

Расчетная ширина лопаток

$$B_p = \frac{3,6 \cdot Q \cdot \sqrt{\lambda}}{D^2 \cdot n \cdot q_1} = \frac{3,6 \cdot 0,233 \cdot \sqrt{1,05}}{0,25^2 \cdot 1433^2 \cdot 0,138} = 0,0695 \text{ м}. \quad (2.21)$$

Поэтому были выбраны вентиляционные лопатки длиной 0,055 м и шириной 0,070 м. Расчетный коэффициент производительности

$$q_p = \frac{q_1 \cdot B_p}{B} = \frac{0,138 \cdot 0,0695}{0,070} = 0,137 \text{ м}. \quad (2.22)$$

Согласно работы [40] через точку с координатами  $q_p = 0,137$  и  $h_p = 0,250$ , проводится парабола до пересечения ее характеристикой вентилятора с восемнадцатью радиальными лопатками и находятся значения  $h = 0,254$  и  $q = 0,1383$ .

Развиваемое вентилятором давление

$$P = \frac{P_p \cdot h}{h_p} = \frac{100 \cdot 0,254}{0,250} = 101,6 \text{ Па}. \quad (2.23)$$

Производительность вентилятора

$$Q = Q_p \cdot \sqrt{\frac{h}{h_p}} = 0,233 \cdot \sqrt{\frac{0,254}{0,250}} = 0,235 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.24)$$

По характеристике КПД вентилятора с радиальными лопатками согласно работы [40] при  $\frac{q}{\sqrt{\lambda}} = \frac{0,1383}{\sqrt{1,05}} = 0,135$ , тогда расчетный КПД  $\eta_p = 0,244$ .

Действительный КПД

$$\eta = \frac{\eta_p}{\lambda} = \frac{0,244}{1,05} = 0,232. \quad (2.25)$$

Мощность вентилятора

$$N_B = 10^{-3} \cdot Q \cdot \frac{P}{\eta} = 10^{-3} \cdot 0,235 \cdot \frac{101,6}{0,232} = 0,103 \text{ кВт}. \quad (2.26)$$

Повышение температуры от потерь на вентиляцию

$$\Delta t_B = \frac{N_B}{1,21 \cdot Q} = \frac{0,103}{1,21 \cdot 0,235} = 0,36 \text{ }^\circ\text{С}. \quad (2.27)$$

Мощность потерь АВМ без вентиляционных потерь

$$N_{\Pi} = 7,147 - 0,103 = 7,044 \text{ кВт.} \quad (2.28)$$

Повышение температуры от потерь в АВМ без учета вентиляционных потерь

$$\Delta t_{\Pi 1} = \frac{N_{\Pi}}{1,1 \cdot Q} = \frac{7,044}{1,1 \cdot 0,235} = 27,25 \text{ }^{\circ}\text{C.} \quad (2.29)$$

Общее повышение температуры охлаждающего воздуха в АВМ составит

$$\Delta t_{\Pi 2} = \Delta t_{\text{в}} + \Delta t_{\Pi 1} = 0,36 + 27,25 = 27,61 \text{ }^{\circ}\text{C.} \quad (2.30)$$

### 2.3 Определение температуры подшипниковых узлов асинхронной вспомогательной машины АНЭ225

Определена температура подшипников АВМ АНЭ225 в номинальном режиме работы. Согласно конструкторской документации мощность потерь трения в подшипниках  $P_{\text{под}} = 183 \text{ Вт}$ . В расчете принята равная мощность потерь в каждом подшипнике  $P_{\text{лев}} = P_{\text{пр}} = 91,5 \text{ Вт}$ . Средние площади сечений частей вала от середины подшипников до середины ротора: левой части  $S_{\text{лев}} = 48,4 \text{ см}^2$ ; правой части  $S_{\text{пр}} = 44,2 \text{ см}^2$ . Плотность теплового потока при нагреве: от левого подшипника  $A_{\text{лев}} = P_{\text{лев}} / S_{\text{лев}} = 91,5 / 48,4 = 1,89 \text{ Вт / см}^2$ ; от правого подшипника  $A_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} / S_{\text{пр}} = 91,5 / 44,2 = 2,07 \text{ Вт / см}^2$ . Температура вала под серединой ротора при нагреве: от левого подшипника  $t_{\text{лев}} = A_{\text{лев}} \cdot \beta_{\text{лев}} / \lambda = 1,89 \cdot 29,5 / 0,63 = 88,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; от правого подшипника  $t_{\text{пр}} = A_{\text{пр}} \cdot \beta_{\text{пр}} / \lambda = 2,07 \cdot 27,6 / 0,63 = 90,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , где:  $\beta_{\text{лев}} = 29,5 \text{ см}$  – длина вала от середины левого подшипника до середины ротора;

$\lambda = 0,63 \text{ Вт см / см}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  – теплопроводность стали ротора;

$\beta_{\text{пр}} = 27,6 \text{ см}$  – длина вала от середины правого подшипника до середины ротора.

Температура вала под серединой ротора при нагреве от обоих подшипников

$$t_{\text{вал}} = (t_{\text{лев}} + t_{\text{пр}}) / 2 = (88,5 + 90,7) / 2 = 89,6 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.31)$$

Отсюда средняя температура вала ротора

$$t_{\text{ср в}} = t_{\text{вал}} / 2 = 89,6 / 2 = 44,8 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.32)$$

Тогда при температуре воздуха в секции электровоза температура подшипников составит

$$t_{\text{под}} = t_{\text{сек}} + \Delta t_{\text{п2}} + t_{\text{ср в}},$$

где:  $t_{\text{сек}}$  – температура воздуха в секции,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{\text{п2}} = 27,6 \text{ } ^\circ\text{C}$  – подогрев вентилирующего воздуха при номинальном режиме работы АВМ,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{\text{ср в}} = 44,8 \text{ } ^\circ\text{C}$  – средняя температура вала ротора при работе подшипников в номинальном режиме.

Получены следующие значения температуры подшипников при разных значениях температуры воздуха в секции:

$$t_{\text{сек}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{\text{под}} = + 72,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{сек}} = + 20 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{\text{под}} = + 92,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{сек}} = + 40 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{\text{под}} = + 112,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Анализ многолетних данных о максимальной температуре воздуха центрального и северного направлений Восточного полигона РЖД показал, что в наиболее теплый период года температура воздуха не превышает 40 – 42  $^\circ\text{C}$ . То есть температура подшипников АВМ не превысит допустимую при используемой смазке Буксол.

Определение температуры в подшипниках АВМ дает возможность уточнить количество заправляемой в АВМ НВА55 смазки Буксол [42-44]. Это возможно на основании результатов анализа эксплуатации АВМ АЭ92-4, в которых использовали смазку Циатим 221, имеющую испаряемость при температуре 100  $^\circ\text{C}$ , равную испаряемости смазки Буксол.

Установлено, что для эксплуатации подшипников постоянно в режиме качения при пробеге электровоза  $600 \cdot 10^3$  км (смена смазки на текущем ремонте ТРЗ, пять пополнений через  $100 \cdot 10^3$  км пробега) необходимо количество смазки Буксол, заправляемой в одну АВМ: в летний период эксплуатации на всех

направлениях Восточного полигона – 3,7 кг; в зимний период: на центральном направлении – 2,03 кг; на северном - 1,38 кг.

## **2.4 Анализ электромеханических переходных процессов, протекающих при пуске асинхронных вспомогательных машин**

Асинхронные двигатели работают совместно с различными рабочими органами, механические характеристики которых отличаются. В тоже время, можно воспользоваться эмпирической формулой и сделать некоторые обобщающие выводы о рабочем органе и его механической характеристике [45].

$$M_c = M_0 + (M_{с.н.} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^X, \quad (2.33)$$

где:  $M_c$  – момент сопротивления рабочего органа при угловой скорости, Нм;

$\omega$  – угловая скорость, рад/с;

$\omega_n$  – номинальная угловая скорость, рад/с;

$M_{с.н.}$  – момент сопротивления трения в подвижных узлах рабочего органа, Нм;

$M_0$  – момент сопротивления механизма рабочего органа при номинальной угловой скорости, Нм;

$X$  – коэффициент изменения сопротивления в зависимости от угловой скорости.

Применительно для рабочих органов можно выделить четыре разновидности их механических характеристик:

- независящая от скорости ( $x = 0$ );
- линейно возрастающая ( $x = 1$ );
- нелинейно возрастающая ( $x = 2$ );
- нелинейно спадающая ( $x = -1$ ).

Теперь, основываясь на электромеханическом переходном процессе, рассмотрим тепловой переходной процесс, протекающий при пуске АВМ.

Электромеханический переходной процесс основан на уравнении движения системы, состоящей из АВМ и рабочего органа, предполагая, что момент инерции системы является постоянной величиной.

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + M_c, \quad (2.34)$$

где:  $M$  – развиваемый АВМ двигателем момент, Нм;

$M_c$  – момент на валу АВМ, обусловленный сопротивлением рабочего органа и механической части АВМ, Нм;

$J$  – момент инерции системы, кг·м<sup>2</sup>;

$t$  – время, с;

$\omega$  – угловая скорость АВМ, рад/с.

Для системы, состоящей из двигателя и рабочего органа, при постоянном независимом от скорости моменте ( $x = 0$ ), электромеханический переходный процесс описывается следующими формулами.

$$M_c = M_H. \quad (2.35)$$

На начальном участке механической характеристики момент двигателя:

$$M = M_{\Pi} - \frac{M_{\Pi} - M_M}{\omega_M} \cdot \omega, \quad (2.36)$$

где:  $M_{\Pi}$  – момент при пуске двигателя, Нм;

$M_M$  – наименьший момент двигателя;

$\omega$  – мгновенная угловая скорость двигателя;

$\omega_M$  – угловая скорость двигателя при наименьшем моменте.

Движение системы на начальном участке разгона двигателя описывается уравнением:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_{\Pi} - M_M}{\omega_M} \cdot \omega + M_H - M_{\Pi} = 0. \quad (2.37)$$

Используя данное выражение можно определить зависимость мгновенной угловой скорости на начальном участке разгона двигателя

$$\omega = \frac{M_{\Pi} - M_H}{M_H - M_M} \cdot \omega_M \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right), \quad (2.38)$$

где:

$$T_1 = \frac{J \cdot \omega_M}{M_{\Pi} - M_M}. \quad (2.39)$$

Используя выражение (2.38) можно определить время запуска, за которое двигатель достигает угловой скорости при наименьшем моменте

$$t_{\Pi 1} = T_1 \ln \left| \frac{M_{\Pi} - M_H}{M_M - M_H} \right|. \quad (2.40)$$

Момент двигателя на промежуточном участке механической характеристики

$$M = M_M + \frac{M_K - M_M}{\omega_K - \omega_M} \cdot \omega - \frac{M_K - M_M}{\omega_K - \omega_M} \cdot \omega_M. \quad (2.41)$$

где:  $M_M$  – критический момент двигателя;

$\omega_K$  – критическая угловая скорость при  $M_M$  двигателя.

Уравнение движения двигателя и рабочего органа на промежуточном участке разгона двигателя

$$J \frac{d\omega}{dt} - \frac{M_K - M_M}{\omega_K - \omega_M} \cdot \omega + \frac{M_K - M_M}{\omega_K - \omega_M} \cdot \omega_M + M_H - M_M = 0. \quad (2.42)$$

Используя выражение (2.42) определяется мгновенная угловая скорость на промежуточном участке разгона двигателя

$$\omega = \omega_M + \frac{M_M - M_H}{M_K - M_M} \cdot (\omega_K - \omega_M) \cdot \left( e^{-\frac{t}{T_2}} - 1 \right), \quad (2.43)$$

где:

$$T_2 = \frac{J \cdot (\omega_K - \omega_M)}{M_K - M_M}. \quad (2.44)$$

Используя выражение (2.43) определяется время пуска, за которое двигатель разгонится от скорости с наименьшим моментом до критической скорости

$$t_{\Pi 2} = T_2 \ln \left| \frac{M_K - M_H}{M_M - M_H} \right|. \quad (2.45)$$

Момент двигателя на конечном участке механической характеристики

$$M = M_K - \frac{M_K - M_H}{\omega_H - \omega_K} \cdot \omega + \frac{M_K - M_H}{\omega_H - \omega_K} \cdot \omega_K, \quad (2.46)$$

где:  $M_H$  – номинальный момент двигателя;

$\omega_H$  – номинальная угловая скорость при  $M_H$  двигателя.

Уравнение движения двигателя и рабочего органа на конечном участке разгона двигателя

$$J \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_K - M_H}{\omega_H - \omega_K} \cdot \omega - \frac{M_K - M_H}{\omega_H - \omega_K} \cdot \omega_K + M_H - M_K = 0. \quad (2.47)$$

Используя данное выражение, можно определить мгновенную угловую скорость на конечном участке разгона двигателя

$$\omega = \omega_H \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}}\right) + \omega_K \cdot e^{-\frac{t}{T_3}}, \quad (2.48)$$

$$\text{где:} \quad T_3 = \frac{J \cdot (\omega_H - \omega_K)}{M_K - M_H}. \quad (2.49)$$

Используя выражение (2.48), определяется время пуска, за которое двигатель разгонится от критической скорости до  $k \cdot \omega_K$  ( $k=0-1$ )

$$t_{ПЗ} = T_3 \ln \left| \frac{M_K - M_H}{(M_K - M_H) \frac{(1-k) \cdot \omega_H}{(\omega_H - \omega_K)}} \right|. \quad (2.50)$$

Время пуска двигателя привода рабочего органа, механическая характеристика которого под нагрузкой постоянна и не зависит от угловой скорости и определяется как сумма времён:  $t_{П1} + t_{П2} + t_{ПЗ}$ . Воспользуемся дополнительными относительными величинами.

$$t_{П1} = \beta \frac{\delta_M}{m_{П} - m_M} \ln \left| \frac{m_{П} - 1}{m_M - 1} \right|; \quad (2.51)$$

$$t_{П2} = \beta \frac{\delta_K - \delta_M}{m_K - m_M} \ln \left| \frac{m_K - 1}{m_M - 1} \right|; \quad (2.52)$$

$$t_{ПЗ} = \beta \frac{1 - \delta_K}{m_K - 1} \ln \left| \frac{1 - \delta_K}{1 - k} \right|, \quad (2.53)$$

где:

$$\beta = \frac{J \cdot \omega_H^2}{P_{2H}}; \quad (2.54)$$

$$\delta_M = \frac{\omega_M}{\omega_H}; \quad (2.55)$$

$$\delta_K = \frac{\omega_K}{\omega_H}; \quad (2.56)$$



$$m_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{H}}; \quad (2.57)$$

$$m_{M} = \frac{M_{M}}{M_{H}}; \quad (2.58)$$

$$m_{K} = \frac{M_{K}}{M_{H}}. \quad (2.59)$$

## 2.5 Анализ тепловых переходных процессов, протекающих при пуске асинхронных вспомогательных машин

При исследовании тепловых переходных процессов запуска допускается, что запуск осуществляется из горячего состояния. С учётом того, что переходные процессы при пуске происходят достаточно быстро, можно считать, что происходят адиабатические тепловые процессы [45]. Тогда для обмотки можно получить следующее уравнение теплового баланса.

$$Cd\tau = P_0(1 + \alpha\tau)dt, \quad (2.60)$$

где:  $C$  – теплоемкость обмотки двигателя, Дж/°С;

$\tau$  – разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды, °С;

$P_0$  – потери мощности в обмотке двигателя при заданной температуре окружающей среды, Вт;

$t$  – время, с;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления обмотки двигателя.

$$T_H \frac{d\tau}{dt} - \tau - \frac{1}{\alpha} = 0, \quad (2.61)$$

$$T_H = \frac{c}{\alpha \cdot P_{10}}. \quad (2.62)$$

Решение этих уравнений даёт выражение для мгновенного нагрева температуры обмотки и её скорости нарастания в зависимости от времени на первом этапе пуска двигателя [1 - 4, 6]:

$$\tau = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_H \right) e^{\frac{t}{T_{H1}}} - \frac{1}{\alpha}; \quad (2.63)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T_{H1}} \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_H \right) e^{\frac{t}{T_{H1}}}; \quad (2.64)$$

$$T_{H1} = \frac{C}{\alpha P_{10}}, \quad (2.65)$$

где:  $\tau_H$  – номинальная разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды при  $M_H$  двигателя, °С.

Потери мощности в обмотке двигателя

$$P_{10} = 3r_0 I_{п1}^2, \quad (2.66)$$

где:  $I_{п1}$  – средний ток обмотки двигателя на начальном участке запуска, А;

$r_0$  – сопротивление фазы обмотки двигателя в зависимости от температуры, Ом.

При окончании разгона двигателя и рабочего органа на начальном участке пуска за время  $t_{п1}$  разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды составит:

$$\tau_{п1} = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_H \right) e^{\frac{t_{п1}}{T_{H1}}} - \frac{1}{\alpha}. \quad (2.67)$$

Используя (2.61), можно определить мгновенную разницу температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды и скорости нарастания температуры обмотки двигателя от времени на промежуточном участке пуска:

$$\tau = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{п1} \right) e^{\frac{t}{T_{H2}}} - \frac{1}{\alpha}; \quad (2.68)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T_{H2}} \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{п1} \right) e^{\frac{t}{T_{H2}}}; \quad (2.69)$$

$$T_{H2} = \frac{C}{\alpha P_{20}}; \quad (2.70)$$

$$P_{20} = 3r_0 I_{п2}^2, \quad (2.71)$$

где:  $I_{п2}$  – среднее значение тока обмотки двигателя на промежуточном участке пуска.

При окончании разгона двигателя и рабочего органа на промежуточном участке пуска за время  $t_{п2}$  разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды составит:

$$\tau_{п2} = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{п1} \right) e^{\frac{t_{п2}}{T_{н2}}} - \frac{1}{\alpha} . \quad (2.72)$$

Используя (2.61) можно определить мгновенную разницу температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды и скорости нарастания температуры обмотки двигателя от времени на конечном участке пуска:

$$\tau = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{п2} \right) e^{\frac{t}{T_{н3}}} - \frac{1}{\alpha} ; \quad (2.73)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T_{н3}} \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{п2} \right) e^{\frac{t}{T_{н3}}} ; \quad (2.74)$$

$$T_{н3} = \frac{c}{\alpha P_{30}} ; \quad (2.75)$$

$$P_{30} = 3r_0 I_{п3}^2 \quad (2.76)$$

где:  $I_{п3}$  – среднее значение тока обмотки двигателя на конечном участке пуска.

При окончании разгона двигателя и рабочего органа на конечном участке пуска за время  $t_{п3}$  максимальная разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды составит:

$$\tau_m = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{п2} \right) e^{\frac{t_{п3}}{T_{н3}}} - \frac{1}{\alpha} . \quad (2.77)$$

Расписав в данном выражении разницу температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды  $\tau_{п2}$  и постоянные времени нагрева, можно получить более развёрнутую форму:

$$\tau_m = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_H \right) e^{\frac{t_{п1}}{T_{н1}}} e^{\frac{t_{п2}}{T_{н2}}} e^{\frac{t_{п3}}{T_{н3}}} - \frac{1}{\alpha} . \quad (2.78)$$

$$\tau_m = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_H \right) e^{\frac{3\alpha r_0}{c} (t_{п1} I_{п1}^2 + t_{п2} I_{п2}^2 + t_{п3} I_{п3}^2)} - \frac{1}{\alpha} . \quad (2.79)$$

В показателе степени значение в скобках называется импульсом пускового тока  $\Pi_1$ . Импульс пускового тока соответствует площади, ограниченной функцией  $I_{\text{п}}^2 = f(t)$  и полного времени пуска двигателя привода рабочего органа  $t_{\text{П1}}+t_{\text{П2}}+t_{\text{П3}}$ . Аналитически импульс пускового тока может быть найден как определённый интеграл от квадрата пускового тока на участке полного временем пуска:

$$\int_0^{t_{\text{п}}} I_{\text{п}}^2 dt, \quad (2.80)$$

$$\Pi_1 = \int_0^{t_{\text{п}}} I_{\text{п}}^2 dt. \quad (2.81)$$

Выражение (2.79) для максимальной разницы температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды примет вид:

$$\tau_m = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{\text{н}} \right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_1}{c}} - \frac{1}{\alpha}. \quad (2.82)$$

В показателе степени дробь  $\frac{3\alpha r_0 \Pi_1}{c}$  является безразмерным коэффициентом и называется критерием нагревания обмотки двигателя при пуске:

$$K_{\text{н}} = \frac{3\alpha r_0 \Pi_1}{c}. \quad (2.83)$$

Выражение (2.82) для максимальной разницы температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды примет вид:

$$\tau_m = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{\text{н}} \right) e^{K_{\text{н}}} - \frac{1}{\alpha}. \quad (2.84)$$

Максимальная разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды зависит от критерия нагревания обмотки при пуске:

$$k_{\text{н}} = \frac{3\alpha r_0 I_{\text{н}}^2}{c} \Pi_{\text{к}}, \quad (2.85)$$

где:  $\Pi_{\text{к}}$  – импульс квадрата кратности тока при пуске.

$$\Pi_{\text{к}} = \int_0^{t_{\text{п}}} k_{\text{п}}^2 dt$$

где:  $k_{\text{п}} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}}$  – кратность тока при запуске.

Коэффициент конструктивных особенностей двигателя  $\gamma$  представлен дробью  $\frac{3 \cdot \alpha \cdot r_0 \cdot I_H^2}{c}$ .

$$k_H = \gamma \cdot I_K. \quad (2.87)$$

Импульс квадрата кратности тока при пуске ещё может быть найден как произведение среднеквадратичного значения кратности тока на время пуска  $t_{\text{п}}$ .

$$I_K = t_{\text{п}} k_{\text{пз}}^2. \quad (2.88)$$

## 2.6 Расчёт нагревания обмоток асинхронной вспомогательной машины мотор-компрессора

Данные о показателях работы компрессоров электровозов, приписанных к локомотивному депо Чита, приведены в таблице 2.1. Была определена средняя длительность работы компрессора (43 с) и длительность нахождения компрессора в выключенном состоянии (173 с).

Для расчета показателей нагрева обмотки мотор-компрессора типа АНЭ225 используются следующие исходные данные. Опытные поездки с электровозами и оценки времени пуска мотор-компрессора специалистами эксплуатационных локомотивных депо Чита и Вихоревка показали, что на участках Восточного полигона при температурах ниже  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , пониженном напряжении в контактной сети и поврежденных пусковых конденсаторах, от 3 до 5 секунд возникает перегрев обмоток.

После продолжительного отстоя начальный перегрев достиг значения  $\tau_p = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после кратковременного отстоя –  $\tau_p = 89\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расчётная постоянная времени нагревания составляет  $T_1 = 1895\text{ с}$ , расчётная постоянная времени остывания –  $T_2 = 1318\text{ с}$ . Максимальная разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды после разгона при первом запуске

$$\tau_m = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_p \right) e^{k_n} - \frac{1}{\alpha}, \quad (2.89)$$

где:  $e \approx 2,718282$  – основание натурального логарифма;

$K_n$  – критерий нагревания обмотки статора;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления обмотки.

**Таблица 2.1 – Показатели работы компрессора**

Параметры поезда	Значение показателя				
	2213	2462	2713	2468	2809
Поезд №	2213	2462	2713	2468	2809
Локомотив №	206	183	242	141	197
Компрессор	КТ-6Эл	КТ-6Эл	КТ-6Эл	КТ-6Эл	КТ-6Эл
Число осей	332	268	288	276	284
Число вагонов	83	68	72	70	71
Длина состава, условных вагонов	72	68	72	72	72
Род груза	порожний	металл	порожний	разнородный	порожний
Вагоны	цистерны	Полувагоны	цистерны полувагоны	цистерны, полувагоны	цистерны
Масса поезда, т	1949	5728	1599	4079	1959
Длительность работы компрессора, с	36	47	35	33	41
Длительность нахождения компрессора в выключенном состоянии, с	244	173	215	205	165

Критерий нагревания обмотки при пуске

$$k_n = \gamma \cdot P_k \quad (2.90)$$

Коэффициент конструктивных особенностей двигателя представлен дробью

$$\gamma = \frac{3 \sigma_{\theta} I_n^2}{C_{G_n}}, \quad (2.91)$$

где:  $I_n$  – ток номинального режима, А;

$r_0$  – сопротивление, Ом;

$G_M$  – масса медной обмотки, кг;

$C$  – удельная теплоемкость медной обмотки, Дж/(кг×°С).

Импульс квадрата кратности тока при пуске

$$I_k = t_n K_{пз}^2, \quad (2.92)$$

где:  $K_{пз}^2$  – среднеквадратичная кратность тока при пуске.

Для времени пуска  $t_n$  длительностью 3 с импульс квадрата кратности тока при запуске составит  $I_k = 3 \times 33,1 = 99,3$ .

Тогда коэффициент конструктивных особенностей двигателя

$$\gamma = \frac{3 \cdot 0,004 \cdot 0,0346 \cdot 119^2}{410 \cdot 28,8} = 0,498 \cdot 10^{-3} \frac{1}{с}. \quad (2.93)$$

Для  $t_n = 3$  с критерий нагревания составит

$$K_H = 0,498 \cdot 10^{-3} \cdot 99,3 = 0,049. \quad (2.94)$$

После разгона мотор-компрессора на начальном участке пуска разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды, °С

$$\tau_{M1} = \left( \frac{1}{0,004} + 24 \right) e^{0,049} - \frac{1}{0,004} = 37,9. \quad (2.95)$$

Мгновенную разницу температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды на промежуточном участке пуска можно определить

$$\begin{aligned} \tau_{12} &= \tau_p \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}} \right) + \tau_{M1} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} = 24(1 - e^{-0,0227}) + 37,9 \cdot e^{-0,0326} = \\ &= 37,2^\circ\text{С}. \end{aligned} \quad (2.96)$$

Тогда мгновенная разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды после первого запуска, °С

$$\tau_{13} = \tau_{12} e^{-\frac{t_2}{T_2}} = 37,2 e^{-0,1312} = 32,6 \quad (2.97)$$

Максимальная разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды после разгона мотор-компрессора на начальном участке при втором пуске, °С

$$\tau_{M2} = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{13} \right) e^{K_H} - \frac{1}{\alpha} = \left( \frac{1}{0,004} + 32,6 \right) e^{0,049} - \frac{1}{0,004} = 46,9. \quad (2.98)$$

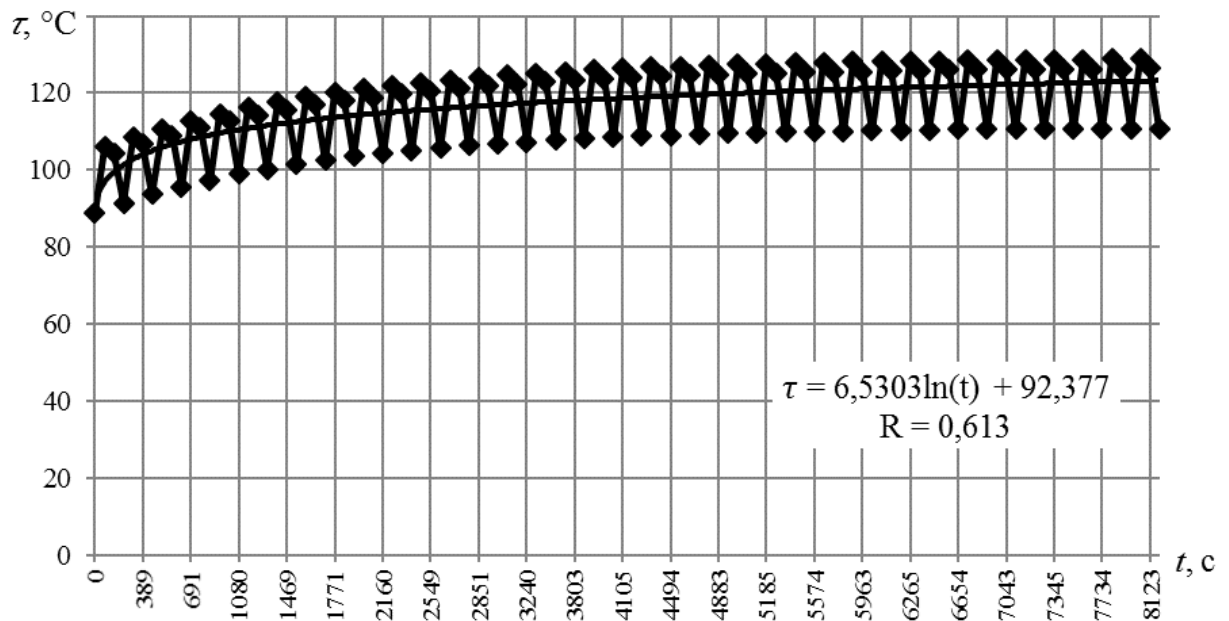
На промежуточном участке пуска, °С

$$\tau_{22} = 24(1 - e^{-0,02227}) + 46,9e^{-0,0326} = 46,0 \quad (2.99)$$

После второго пуска, °С

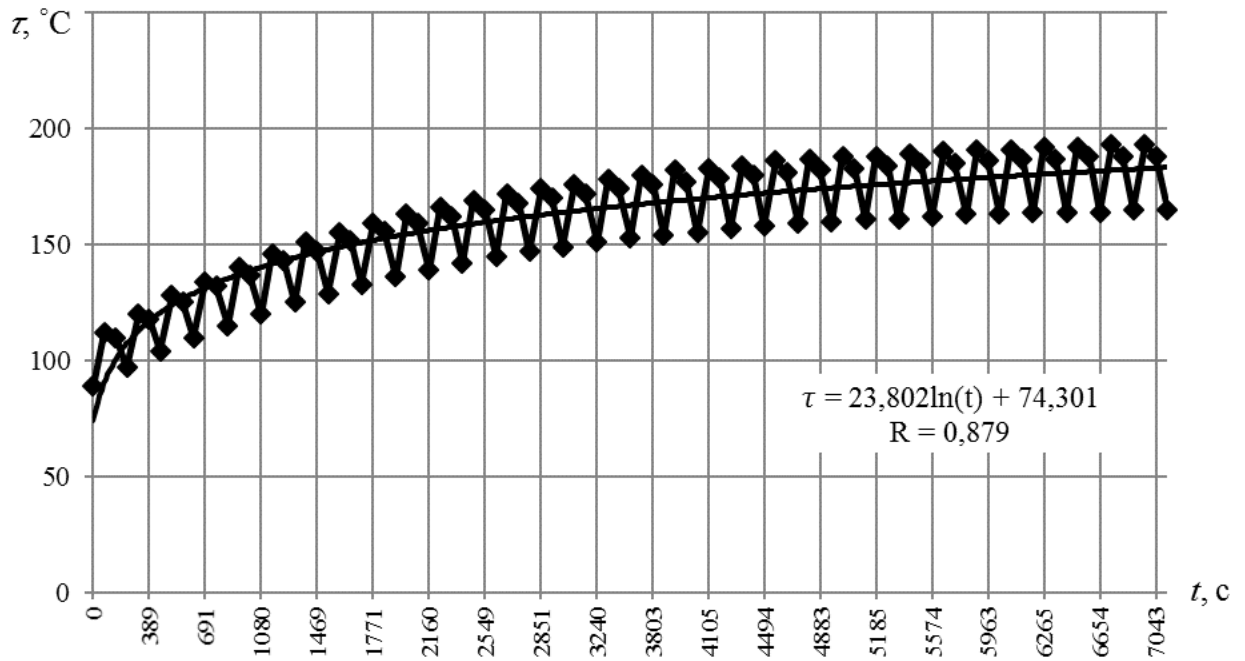
$$\tau_{23} = 46,0 e^{-0,1312} = 40,3 \quad (2.100)$$

Результаты нагрева обмотки мотор-компрессора АНЭ225 при начальном перегреве  $\tau_p=89^\circ\text{C}$  для различной длительности пуска от 3 до 5 секунд представлены на рисунках 2.1, 2.2, 2.3. Обнаружено, что с увеличением времени пуска мотор-компрессора значительно возрастает температура всех элементов обмотки. Следует отметить, что время пуска мотор-компрессора после длительного простоя электровоза в зимний период увеличивается. Это часто приводит к перегреву алюминиевых обмоток роторов и их последующему выплавлению, что подтверждается анализом отказов мотор-компрессоров в локомотивном депо Вихоревка.

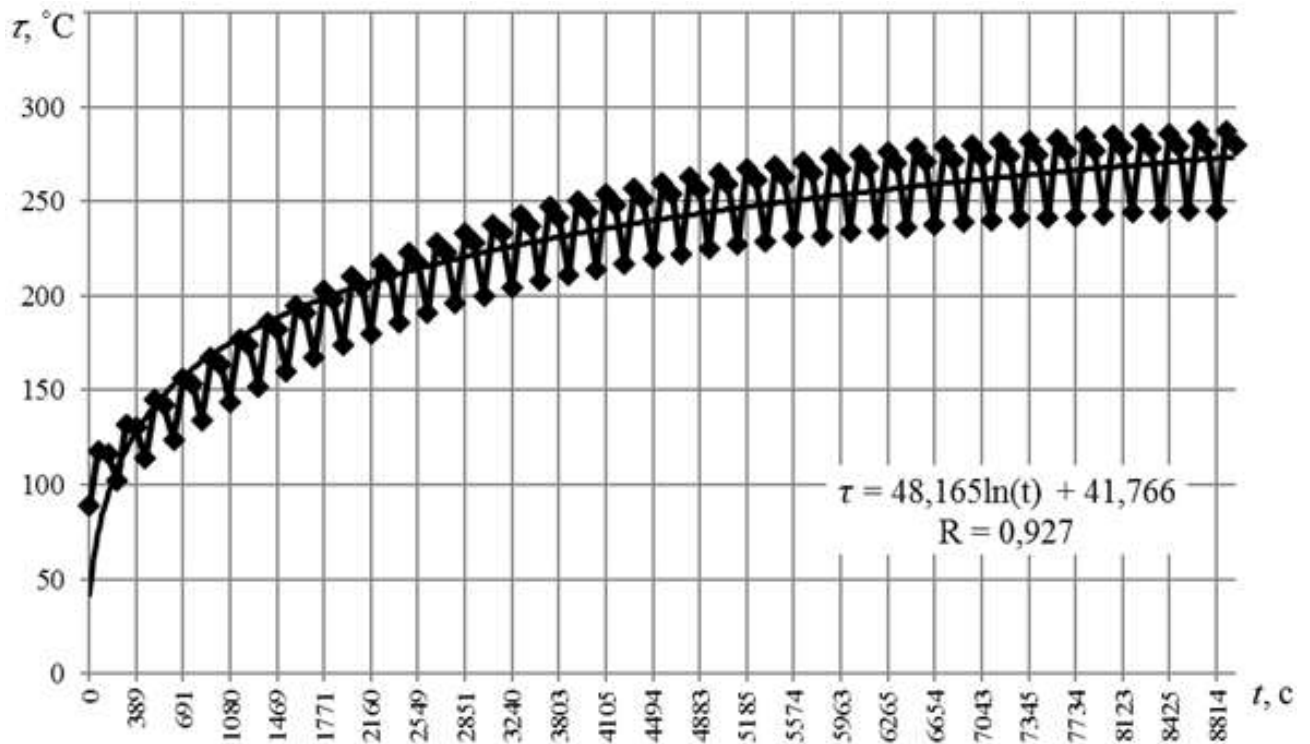


**Рисунок 2.1 – Перегрев обмотки мотор-компрессора  
(длительность пуска – 3 с)**





**Рисунок 2.2 – Перегрев обмотки мотор-компрессора  
(длительность пуска – 4 с)**



**Рисунок 2.3 – Перегрев обмотки мотор-компрессора  
(длительность пуска – 5 с)**

## 2.7 Расчёт напряжения питания асинхронных вспомогательных машин в зависимости от напряжения в контактной сети

При расчёте напряжения питания АВМ учитываются различные факторы, такие как: напряжение на первичной обмотке тягового трансформатора, нагрузки на тяговые и вспомогательные двигатели, тип тяговых двигателей (коллекторные или асинхронные), а также условия эксплуатации. В первую очередь рассчитывается номинальное эффективное напряжение на вспомогательной обмотке собственных нужд, которое является его значением при номинальном напряжении на токоприемнике и без нагрузки на трансформаторе (в режиме холостого хода) [8].

Напряжение питания АВМ электровозов переменного тока обычно принимается несколько выше номинального значения. Например, в относительных единицах на ВЛ80Т – 1,043, на ВЛ85 – 1,05. На перегоне Выдрино – Переемная участка Слюдянка – Мысовая при движении электровоза ВЛ85 с грузовым составом напряжение в контактной сети снижается до 15 – 14 кВ. Это приводит к снижению эффективного напряжения питания вспомогательных машин.

$$\sigma = \sigma_{\text{ном}} \cdot \frac{U_{\text{Э}}}{U_{\text{ЭН}}} - \Delta\sigma_0 - \Delta\sigma, \quad (2.101)$$

где:  $\Delta\sigma_0 = 0,01$  – падение напряжения от тяговой нагрузки в режиме холостого хода при движении по равнинному продольному профилю пути на перегоне Выдрино – Переемная;

$\Delta\sigma = 0,04$  – падение напряжения от нагрузки вспомогательных цепей собственных нужд;

$U_{\text{Э}}$  и  $U_{\text{ЭН}}$  – мгновенное и номинальное действующие напряжение в контактной сети, кВ.

При мгновенном напряжении в контактной сети 19 кВ эффективное напряжение питания вспомогательных машин составляет:

$$\sigma = 1,05 \cdot \frac{19}{25} - 0,01 - 0,04 = 0,75. \quad (2.102)$$

Согласно таблице 2.2 первая гармоника напряжения питания вспомогательных машин составляет:

$$\sigma_1 = \sigma \cdot K_{U1} = 0,75 \cdot 0,94 = 0,7. \quad (2.103)$$

При номинальном напряжении питания вспомогательных машин 380 В первая гармоника составляет:

$$U_1 = 380 \cdot 0,7 = 266 \text{ В}. \quad (2.104)$$

Результаты расчёта напряжения питания АВМ в зависимости от напряжения в контактной сети сведены в таблицу 2.2.

**Таблица 2.2 – Расчёт напряжения питания АВМ в зависимости от напряжения в контактной сети**

$U_3$ , кВ	$K_{U1}$	$\sigma$	$\sigma_1$	$U_1$ , В
1	2	3	4	5
14,0	0,8770	0,560	0,490	187,0
14,5	0,8835	0,580	0,510	195,0
15,0	0,8900	0,600	0,530	203,0
15,5	0,8950	0,620	0,555	211,0
16,0	0,9000	0,640	0,580	219,0
16,5	0,9055	0,660	0,600	226,5
17,0	0,9110	0,680	0,620	234,0
17,5	0,9165	0,695	0,640	242,0
18,0	0,9220	0,710	0,660	250,0
18,5	0,9290	0,730	0,680	258,0
19,0	0,9360	0,750	0,700	266,0
19,5	0,9420	0,765	0,720	274,0
20,0	0,9480	0,780	0,740	282,0
20,5	0,9535	0,800	0,760	289,5
21,0	0,9590	0,820	0,780	297,0
21,5	0,9630	0,835	0,800	305,0
22,0	0,9670	0,850	0,820	313,0
22,5	0,9710	0,870	0,845	321,0
23,0	0,9750	0,890	0,870	329,0
23,5	0,9785	0,905	0,885	336,0

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5
24,0	0,9820	0,920	0,900	343,0
24,5	0,9860	0,940	0,925	351,5
25,0	0,9900	0,960	0,950	360,0
25,5	0,9925	0,975	0,970	367,5
26,0	0,9950	0,990	0,990	375,0
26,5	0,9960	1,010	1,005	382,0
27,0	0,9970	1,030	1,020	389,0
27,5	0,9985	1,050	1,045	397,0
28,0	1	1,070	1,070	405,0
28,5	1	1,090	1,090	413,0
29,0	1	1,110	1,110	421,0

В эксплуатации в системах вспомогательных машин асинхронные машины получают питание от источника с несинусоидальным несимметричным напряжением, изменяющимся в широких пределах. При этом токи обмоток фаз статора АВМ могут отличаться в несколько раз; в асинхронной вспомогательной машине существуют магнитные поля, вращающиеся по часовой и против часовой стрелки; в роторе протекают соизмеримые по величине токи частот от единиц до 100 Гц. Потери энергии и их распределение в АВМ при этом коренным образом отличается от того, что свойственно номинальному режиму при симметричном питании.

Если асинхронные вспомогательные машины выбраны с запасом мощности по условию пуска при пониженном напряжении, то обычно разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды не превосходит допустимых значений для наибольшей несимметрии токов. Однако проверка теплового состояния АВМ во всех несимметричных режимах работы необходима.

## 2.8 Расчет разницы температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды для асинхронных вспомогательных машин привода вентилятора при различной мощности на валу

Эквивалентная постоянная времени нагревания асинхронной вспомогательной машины определяется по формуле

$$T = \frac{C_M \cdot G_M \cdot \tau_M + C_{ст} \cdot G_{ст} \cdot \tau_{ст}}{\Delta P_H}, \quad (2.105)$$

где:  $\tau_M = 140$  °С – разница температуры медной обмотки двигателя и температуры окружающей среды в номинальном режиме работы;

$G_M = 28,8$  кг – масса медной обмотки;

$G_{ст} = 229$  кг – масса стали;

$C_M = 410 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$  – удельная теплоемкость медной обмотки;

$\tau_{ст} = 110$  °С – разницу температуры стали и температуры окружающей среды в номинальном режиме работы;

$C_{ст} = 470 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$  – удельная теплоемкость стали;

$\Delta P_H$  – потери мощности при номинальном режиме работы двигателя, Вт.

$$\Delta P_H = \frac{P_{2н}}{\eta_H} - P_{2н}, \quad (2.106)$$

где:  $P_{2н} = 55$  кВт – мощность на валу при номинальном режиме работы двигателя;

$\eta_H = 0,885$  – КПД при номинальном режиме работы двигателя.

$$\Delta P_H = \frac{55000}{0,885} - 55000 = 7147 \text{ Вт} \quad (2.107)$$

Постоянная времени нагревания в номинальном режиме работы двигателя составляет:

$$T = \frac{410 \cdot 28,8 \cdot 140 + 470 \cdot 229 \cdot 110}{7147} = 1895 \text{ с.} \quad (2.108)$$

Установившаяся разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды составляет:

$$\tau_y = \tau_n \frac{a+k^2}{a+1-\alpha \cdot \tau_n \cdot (k^2-1)}, \quad (2.109)$$

где:  $\alpha = 0,004$  – температурный коэффициент сопротивления материала проводника;

$\tau_n = 140 \text{ }^\circ\text{C}$  – разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды в номинальном режиме работы двигателя;

$k$  – кратность тока;

$a = 0,62$  – коэффициент потерь.

Квадратичное значение кратности тока:

$$k^2 = \frac{(R_1 + \frac{R_2}{S})^2 + (x_1 + x_2)^2}{(R_1 + \frac{R_2}{S})^2 + (x_1 + x_2)^2}, \quad (2.110)$$

где:  $R_1, R_2, x_1, x_2$  – параметры схемы замещения двигателя;

$S$  – скольжение двигателя.

$$S = \frac{S_n}{K_U^2}, \quad (2.111)$$

где:  $S_n$  – скольжение в номинальном режиме работы двигателя;

$K_U = \frac{U_i}{U_n}$  – кратность напряжения на зажимах двигателя.

Разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды

$$\tau = \tau_y \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.112)$$

где:  $\tau_0$  – начальная разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды.

Определить кратность напряжения на зажимах, скольжение и квадратичное значение кратности тока можно при напряжении в контактной сети  $U_3 = 18 \text{ кВ}$ , при величине первой гармоники  $U_1$  и напряжении питания вспомогательных машин 250 В.

Кратность напряжения на зажимах двигателя составляет:

$$K_U = \frac{250}{380} = 0,66. \quad (2.113)$$

Скольжение двигателя составляет:

$$S = \frac{4,5}{0,66^2} = 10,33 \%. \quad (2.114)$$

Квадратичное значение кратности тока составляет:

$$k^2 = \frac{(0,046 + \frac{0,044}{0,045})^2 + (0,117 + 0,326)^2}{(0,046 + \frac{0,044}{0,103})^2 + (0,117 + 0,326)^2} = 2,96. \quad (2.115)$$

Квадратичное значение кратности тока при выходной мощности двигателя  $P_{\text{вых}} = 45$  кВт составляет:

$$k_2^2 = k_1^2 \left( \frac{I_i}{I_n} \right)^2 = 2,96 \left( \frac{97,4}{119} \right)^2 = 1,98, \quad (2.116)$$

где:  $I_i$  – мгновенное значение тока,

$I_n$  – номинальный ток.

Установившаяся разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды, °С

$$\tau_y = 140 \cdot \frac{0,62 + 1,98^2}{0,62 + 1 - 0,004 \cdot 140 \cdot (1,98^2 - 1)} = 340 \text{ °С}. \quad (2.117)$$

Максимальная разница температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды за 947 с

$$\tau = 340 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{947,5}{1895}} \right) + 100 \cdot e^{-\frac{947,5}{1895}} = 194,4 \text{ °С}. \quad (2.118)$$

Аналогично производится расчет перегрева обмотки статора двигателя в течение 1895 с. Проведен расчет износа изоляции статорной обмотки при тепловом нагреве статорной обмотки АВМ из-за отклонения напряжения в контактной сети. Один из основных факторов, влияющих на долговечность изоляции, заключается в её тепловом старении. Для определения ожидаемого срока службы изоляции важно установить скорость теплового старения и оценить

условия эксплуатации [46-58]. По величине разницы между температурой обмотки двигателя  $\tau$  и температуры окружающей среды  $\vartheta_{\text{в}}$  можно определить срок службы изоляции  $D$  [базисные часы], (рисунки 2.4 и 2.5).

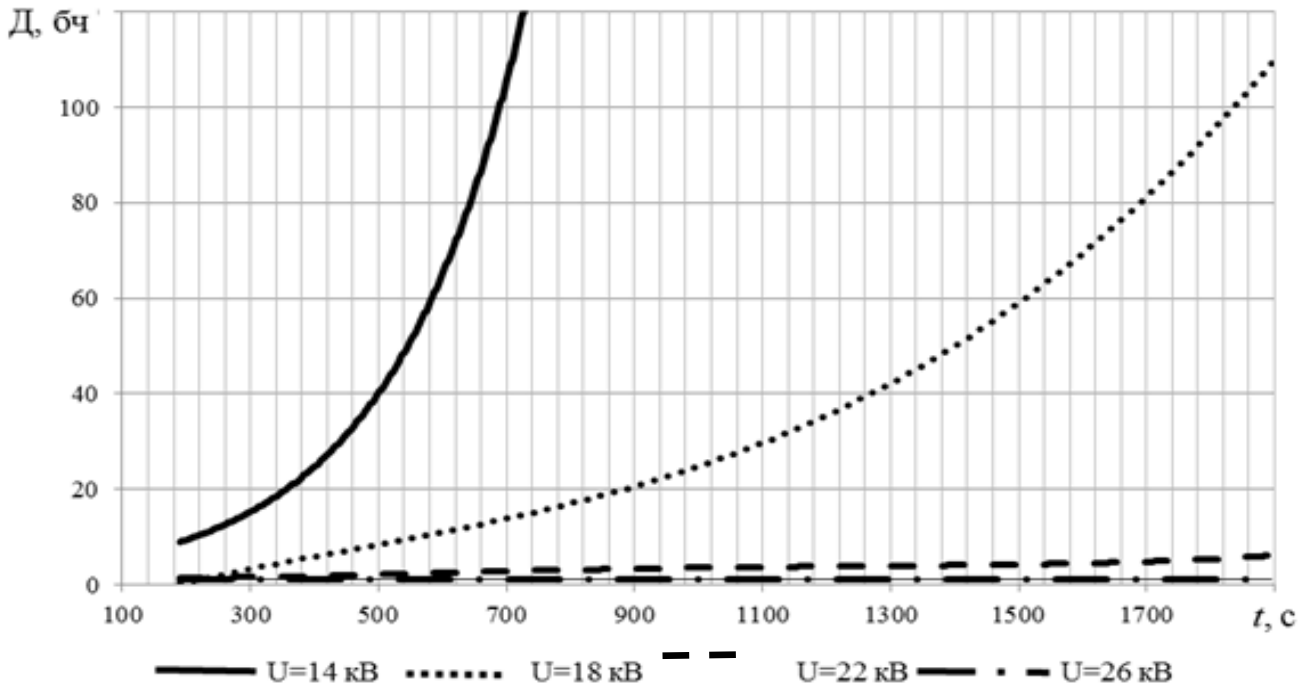


Рисунок 2.4 – Интенсивность износа обмотки статора двигателя АВМ АНЭ225 мотор-вентилятора при выходной мощности 45 кВт (81,8 % от номинальной мощности)

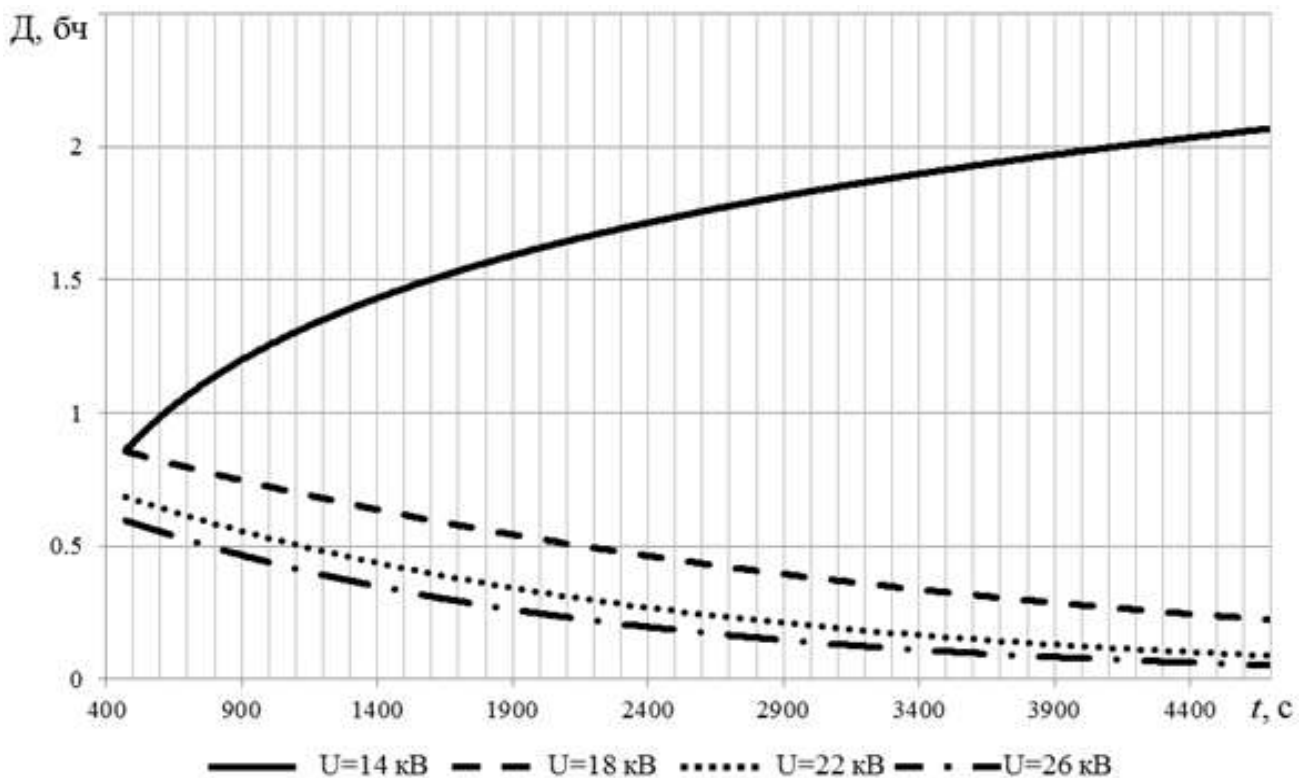


Рисунок 2.5 – Интенсивность износа обмотки статора двигателя АВМ АНЭ225 мотор-вентилятора при выходной мощности 18 кВт (32,7 % от номинальной мощности)



Номинальный срок службы изоляции  $D_n$  составляет 20 000 часов при номинальном значении разницы температур  $\tau_n = 140$  °С. Отношение  $\varepsilon = D/D_n$  определяет скорость износа изоляции.

## 2.9 Выводы по разделу 2

1 При несимметричной системе вентиляции АВМ АНЭ225 и НВА55 левый вентилятор (со стороны роликового подшипника) имеет большую производительность, в связи с меньшим аэродинамическим сопротивлением, чем правый вентилятор. При работе на общую вентиляционную сеть в «слабом» правом вентиляторе воздух идет в обратном направлении. Это вызывает уменьшение общего количества вентилирующего воздуха.

2 При использовании АВМ с несимметричной вентиляцией и повышенной мощностью, которая превышает 39 кВт (предельно допустимое значение для нагревания), наблюдается увеличение температуры основных элементов. Это происходит из-за наличия тепловых потерь, которые не могут быть эффективно удалены вентиляцией. В результате, температура подшипников превышает предельное значение для используемой смазки, и смазка деградирует. Это приводит к переходу контакта между роликами (или шариками) подшипников и кольцами из режима качения в режим скольжения с большими в десятки раз коэффициентами трения. Это в свою очередь приводит к неоптимальному увеличению мощности АВМ.

3 Для обеспечения необходимой безотказности АВМ нужно перейти на симметричную систему вентиляции с аэродинамическим сопротивлением воздухопроводов АВМ, давлением воздуха и производительностью вентилятора, при которых во всех режимах работы температура узлов не превысит допустимую.

4 Выявлено, что время пуска мотор-компрессоров после отстоя электровозов северного направления в зимний период эксплуатации существенно возрастает. Это нередко приводит к выплавлению алюминиевых обмоток роторов.

5 Установлено, что интенсивность теплового износа изоляции статорной обмотки АВМ привода вентилятора, с мощностью близкой к номинальной, существенно возрастает при уменьшении напряжения в контактной сети. При мощности АВМ привода вентилятора, меньшей  $1/3$  номинальной с уменьшением напряжения контактной сети, тепловой износ возрастает незначительно.

6 Переход на симметричную систему вентиляции, и рациональную систему смазки, учитывающую как сезонные, так и климатические условия работы контакта подшипников при необходимом количестве смазки, обеспечивающим их постоянную эксплуатацию в режиме качения, позволяет существенно повысить уровень безотказности АВМ электровозов Восточного полигона.

### **3 СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

#### **3.1 Использование Марковских цепей в модели функционирования асинхронной вспомогательной машины**

Технологический процесс, осуществляемый системой «Асинхронная вспомогательная машина», с позиции теории вероятностей можно представить, как последовательность событий, наступающих одно за другим в случайные моменты времени, то есть потоком событий. Например, в рассматриваемом процессе событиями являются – пуск АВМ после отстоя электровоза, выключение или включение АВМ при проследовании нейтральной вставки, снижение напряжения контактной сети ниже допустимых значений, повреждение пусковых или симметрирующих конденсаторов, сварка контактов электромагнитного контактора из-за перегрузок АВМ с последующей работой при однофазном напряжении, повреждение разгрузочного устройства главного компрессора, переключение АВМ привода вентилятора (МВ) с частоты 50 Гц вращения на пониженную –  $16\frac{2}{3}$  Гц и наоборот, затяжной пуск МК после длительного нахождения электровоза в нерабочем состоянии, повышенной температуре подшипников, приводящей к потере смазкой основных свойств и последующем переходе контактов ролики (шарики) – внутренние и наружные кольца из режима качения в режим «сухого» скольжения, пробой изоляции обмотки статора, выплавление роторной обмотки, излом (изгиб) вала ротора, несимметрия напряжений и токов фаз АВМ при снижении (повышении) напряжения ниже (выше) номинального значения и другие случаи, которые следуют в пространстве и времени дискретно одно за другим [59-70].

По статистическим данным за 2012 год об отказах асинхронных вспомогательных машин типа АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск Восточно-Сибирской железной дороги вычислены частоты  $P_i^* = \Delta n_i / N$  попадания случайной величины времени  $T$  между отказами в  $i$ -й интервал ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) статистического ряда. При этом  $\Delta n_i$  – число попаданий случайной величины в  $i$ -й интервал,  $N = \sum_{i=1}^k \Delta n_i$  – общее число наблюдений случайной величины. Определено среднее время до отказа АВМ типа АНЭ225 электровоза ВЛ85 в сутках

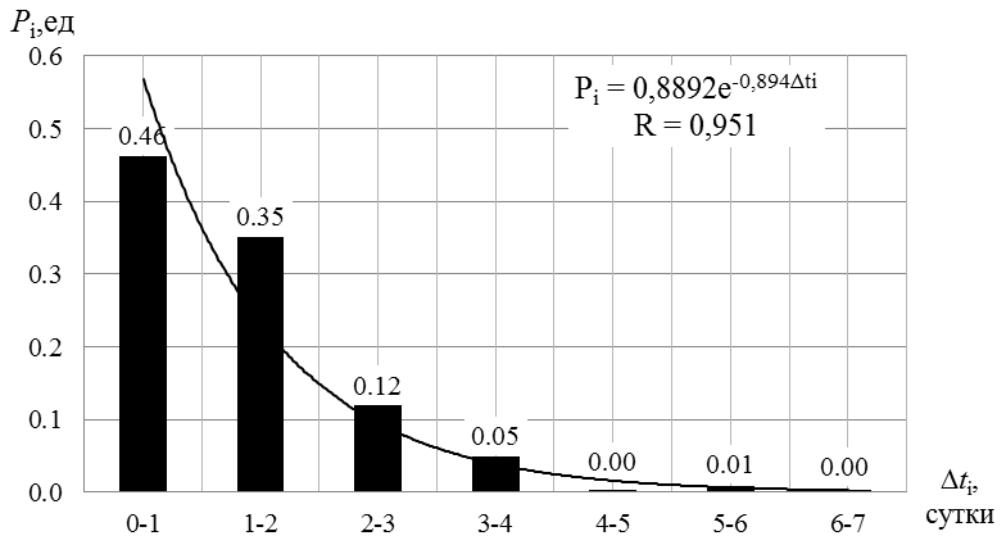
$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^k t_i * \Delta n_i}{\sum_{i=1}^k \Delta n_i} = \frac{0,5 * 112 + 1,5 * 85 + 2,5 * 29 + 3,5 * 12 + 4,5 * 1 + 55,5 * 2 + 6,5 * 1}{242} = 1,32$$

где  $t_i$  – середина  $i$ -го интервала.

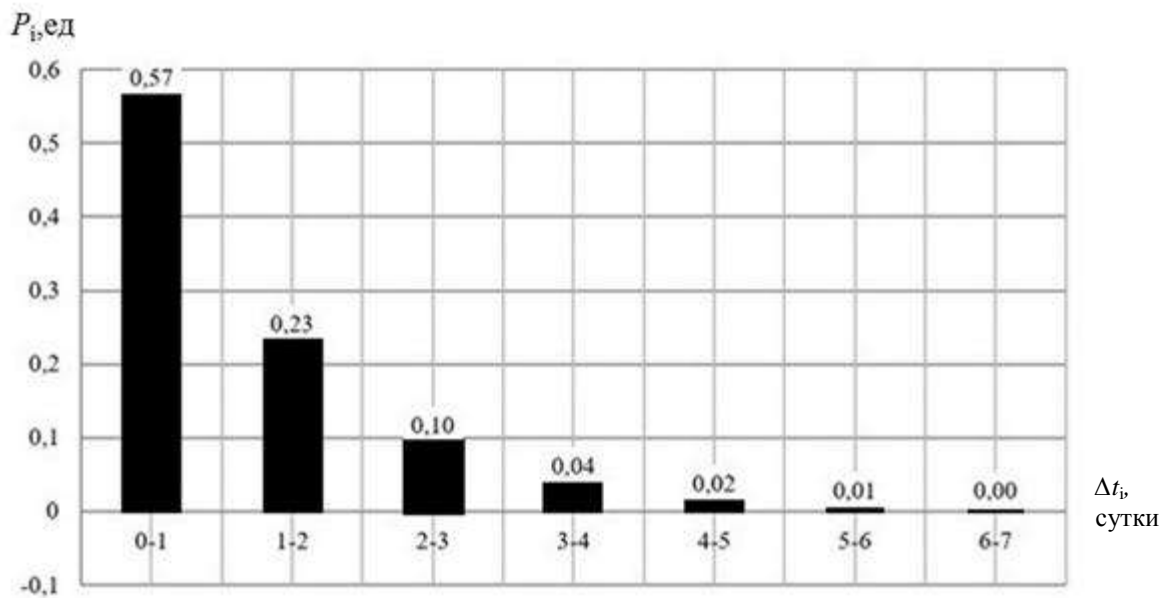
В таблице 3.1 и на рисунках 3.1 и 3.2, представлены результаты расчетов. По виду гистограммы была выдвинута гипотеза об экспоненциальном законе распределения времени наработки на отказ и выполнена проверка гипотезы с использованием критерия Пирсона  $\chi^2$ .

**Таблица 3.1 – Проверка экспоненциальности в законе распределения времени наработки на отказ АВМ**

Параметры	Интервалы времени, сутки						
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
$\Delta n_i$	112	85	29	12	1	2	1
$P_i^*$	0,46	0,35	0,12	0,05	0,00	0,01	0,00
$F(t)$	0,57	0,80	0,90	0,9	1,0	1,0	1,0
$P_i$	0,57	0,23	0,10	0,04	0,02	0,01	0,00
$Np_i$	138	56	23	9	4	2	1
$(\Delta n_i - Np_i)^2$	656,4	824,3	35,7	6,7	8,1	0,2	0,1
$\frac{(\Delta n_i - Np_i)^2}{Np_i}$	2,71	3,41	0,15	0,03	0,03	0,00	0,00



**Рисунок 3.1 – Статистическое распределение отказов АВМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск в 2012 году**



**Рисунок 3.2 – Теоретическое распределение отказов АВМ электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск в 2012 году**

Проведенный анализ статистических данных об отказах системы «Асинхронная вспомогательная машина» и результаты расчетов указывают на то, что поток отказов системы является простейшим случайным потоком, обладающим свойствами: стационарностью, отсутствием последействия и ординарностью. Это дает возможность использовать для описания модели

функционирования системы «Асинхронная вспомогательная машина» математический аппарат теории марковских цепей [59-70].

Среди рассматриваемых событий можно выделить поток отказов АВМ, возникающих по причинам элементов системы «электропитание – электрические цепи – статор – ротор – вал – подшипниковый узел – среда». Такой поток событий в общем случае можно изобразить на временной оси как последовательность точек  $t_1, t_2, t_k$ . Наибольшее распространение в практике получили простейшие потоки событий. Для этого необходимо подробнее рассмотреть эти свойства.

Стационарность – при любом  $t > 0$  и целом  $k > 0$  вероятность наступления того или другого числа событий за промежуток времени  $t$  зависит только от длины этого промежутка (а не от начала отсчета) и не зависит от того, где именно на временной оси расположен этот промежуток. Это позволяет обозначить через  $P_k(t)$  вероятность того, что за любой промежуток времени  $t$  наступит ровно  $K$  событий рассматриваемого потока ( $K = 0, 1, 2, \dots$ ). Для потока, обладающего стационарным свойством, характерна постоянная плотность (среднее число событий, произошедших в единицу времени). Технологический процесс АВМ можно рассматривать как систему с потоком отказов, возникающих по причинам «электропитание – электрические цепи – статор – ротор – вал – подшипниковый узел – среда». Свойство стационарности для потока событий процесса АВМ с определенной долей приближения можно считать приемлемым. Плотность потока отказов принимается постоянной.

Отсутствие последствия – вероятность наступления того или другого числа событий на любом промежутке времени не зависит от того, какое число событий наступило до начала этого промежутка и как они поступали на другие, не пересекающиеся с данным, промежутки. Так при возникновении «отказа» - пробоя изоляции статора, мы можем утверждать, что появление этого события не зависит от того, какие отказы возникали раньше или возникнут в будущем, а также от их количества.

Ординарность – вероятность наступления двух или более событий за бесконечно малый промежуток времени  $\Delta t$  есть бесконечно малая величина более высокого порядка, чем  $\Delta t$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_k(\Delta t)}{\Delta t} = 0; \quad (3.1)$$

где  $k = 2, 3, \dots$  – количество событий;

$P_k(\Delta t)$  – вероятность наступления не менее двух событий за промежуток времени  $\Delta t$ . Практически невозможно одновременное появление двух, трех и более событий (отказов).

Рассматриваемый поток отказов АВМ в полной мере обладает этим свойством.

Поток событий можно отнести к простейшему и в том случае, когда суммарный поток состоит из большого числа независимых между собой стационарных потоков, каждый из которых мало влияет на действия суммарного потока. Этот случай можно применить к данному примеру. Так, в качестве отдельно взятых потоков событий могут служить потоки отказов, классифицированные по признаку их принадлежности к «электропитанию», «электрическим цепям», «статору», «ротору», «валу», «подшипниковому узлу», «среде», появляющиеся независимо друг от друга. Введены следующие обозначения:  $P_1$  – поток отказов, возникающих по причине «электропитание» (снижение напряжения в цепи питания вспомогательных машин при напряжении в контактной сети менее 21 кВ);  $P_2$  – поток отказов, возникающих по причине «электрические цепи» (сваривание контактов контакторов при отключении компрессора с последующей работой при однофазном напряжении);  $P_3$  – поток отказов, возникающих по причине «статор» (межвитковое замыкание обмотки);  $P_4$  – поток отказов, возникающих по причине «ротор» (выплавление обмотки ротора);  $P_5$  – поток отказов по причине «вал» (излом вала);  $P_6$  – поток отказов по причине «подшипниковый узел» (разрушение сепаратора подшипника);  $P_7$  – поток отказов по причине «среда» (повышенная вязкость масла в картере

компрессора и редукторе при низкой температуре окружающей среды) (рисунок 3.3).

Введенные потоки отказов системы технологического процесса можно представить наглядно в виде проекций точек на временную ось  $t$ .

Суммарный поток запишется в виде

$$\Pi = \sum_{\kappa=1}^{\Pi} \Pi_{\kappa} . \quad (3.2)$$

Сделав допущение о том, что влияние отдельного потока на суммарный невелико, можно получить поток, приближающийся к простейшему. Благодаря графической иллюстрации данного потока легко убедиться в выполнении свойств, характеризующих его как простейший. Так, если взять два неперекрывающихся временных интервала  $(t_1, t_2)$  и  $(t_k, t_{k+1})$  то можно увидеть, что точки, характеризующие отказы того или иного потока, появляются независимо друг от друга и их частота не зависит от расположения интервала на временной оси.

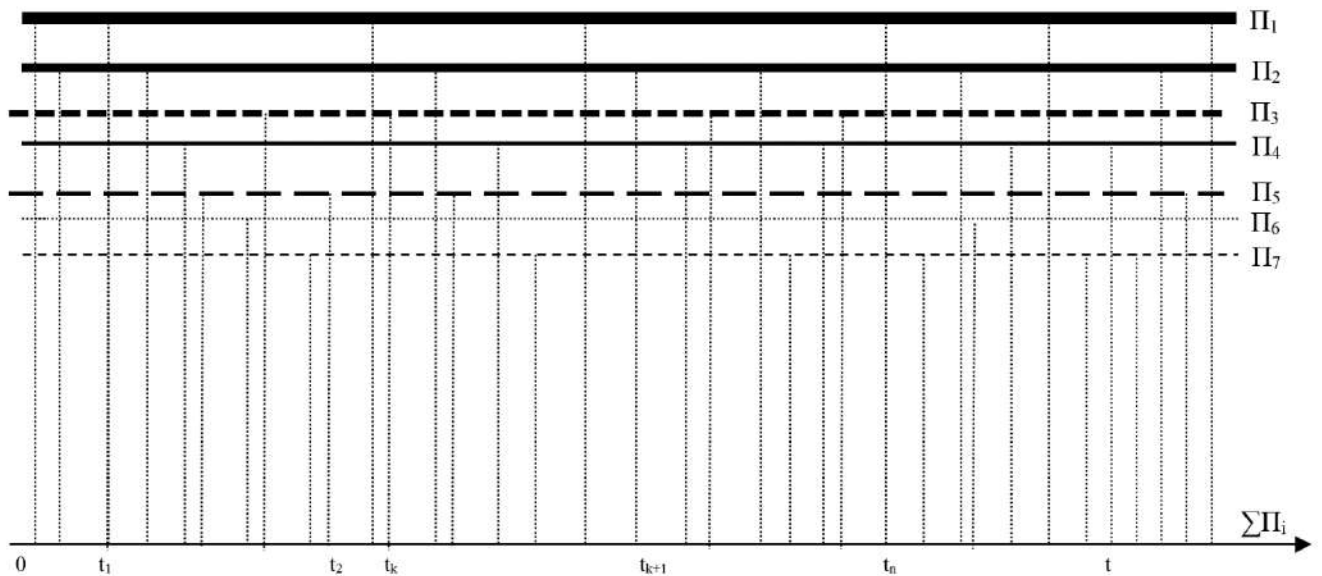


Рисунок 3.3 – Схема потоков отказов системы АВМ

Известно, что, если события образуют простейший поток, то распределение вероятностей  $P_{\kappa}(t)$  описывается формулой Пуассона



$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (3.3)$$

где  $P_k(t)$  – вероятность появления ровно  $K$  событий рассматриваемого потока за любой промежуток времени  $t$ ;

$\lambda$  – интенсивность поступления событий, то есть среднее число событий за единицу времени.

Зафиксировав промежуток  $t$  и рассматривая случайную величину  $X$  – получено число событий простейшего потока, наступающих за промежуток времени. Если обозначить  $\lambda t = a$ , то закон распределения вероятностей величины  $X$  можно записать:

$$P(X = k) = \frac{a^k}{k!} e^{-a}, \quad (3.4)$$

где  $a$  – среднее число отказов (событий), наступающих за время  $t$  в простейшем потоке.

Характерным свойством показательного распределения является то, что при наступлении события  $x \geq T$  случайная величина  $Y = X - T$  имеет такой же закон распределения, как и величина  $X$ . Тогда при показательном распределении возможны любые положительные значения  $T$ , но большие значения маловероятны.

Представляя технологический процесс АВМ как функционирование системы «электропитание – электрические цепи – статор – ротор – вал – подшипниковый узел – среда», состояния которой изменяются под воздействием простейшего потока событий, можно считать, что это является Марковскими процессами. Налицо Марковское свойство: для любого момента времени  $t_0$  вероятности всех состояний системы в будущем ( $t > t_0$ ) зависят от состояния системы в настоящем ( $t = t_0$ ) и не зависят от ее поведения до этого момента ( $t < t_0$ ) (отсутствие последствия). Практически это свойство означает, что при попадании в то или иное состояние дальнейшее поведение процесса не зависит от его поведения в прошлом, потому что события, под влиянием которых система меняет свои состояния, появляются в случайные моменты времени независимо

друг от друга. Чаше сталкиваются с Марковскими процессами с дискретными состояниями (число состояний системы конечно, переход из одного состояния в другое осуществляется скачком) и непрерывным временем (переходы системы в различные состояния происходят не в фиксированные и заранее известные моменты времени  $t_0, t_1, t_2 \dots t_m$ , а в любые случайные моменты времени).

Для наглядной иллюстрации таких процессов используют теорию графов, согласно которой прямоугольниками или кружками обозначают состояние системы ( $S$ ), а стрелками (или ориентированными ребрами) с указанием плотности потока событий – возможные переходы из состояния в состояние.

Марковские процессы, протекающие в системе с дискретными состояниями и непрерывным временем, характеризуются вероятностями состояний  $P(t)$  в любой момент времени  $t$ , которые определяются системой дифференциальных уравнений Колмогорова. Последняя составляется по мнемоническому правилу с использованием графа состояний

$$\frac{dP(t)}{dt} = -P(t) \sum_{i=1}^n \lambda_i + \sum_{i=1}^n \mu_i q_i(t), \quad (3.5)$$

$$\frac{dq_i}{dt} = \lambda_i P(t) - \mu_i q_i(t). \quad (3.6)$$

Эту систему решают при условиях, задающих вероятности состояний в начальный момент времени  $t = 0$ , и выполнении нормировочного условия

$$P + \sum_{i=1}^n q_i(t) = 1. \quad (3.7)$$

Если эти потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние стационарны ( $\lambda_i, \mu_i = \text{const}$ ), общее число состояний конечно и состояний без выхода нет, то существует предельный режим функционирования системы, характеризуемый предельными (финальными) вероятностями

$$q_i = \lim_{t \rightarrow \infty} q_i(t), \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.8)$$

Эти вероятности определяют из системы линейных алгебраических уравнений, получаемой из системы дифференциальных уравнений приравнивая

к нулю левых частей уравнений Колмогорова, с учетом нормировочного условия. Далее можно рассмотреть формирование модели функционирования АВМ.

### 3.2 Модель функционирования асинхронной вспомогательной машины

Схема и граф состояний функционирования системы «Асинхронная вспомогательная машина» приведены на рисунке 3.4.

Составим систему уравнений, описывающую надежность функционирования асинхронной вспомогательной машины электровоза переменного тока

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} = & -\lambda_{\text{ЭП}}P + \mu_{\text{ЭП}}q_{\text{ЭП}} - \lambda_{\text{ЭЛЦ}}P + \mu_{\text{ЭЛЦ}}q_{\text{ЭЛЦ}} - \lambda_{\text{СТ}}P + \mu_{\text{СТ}}q_{\text{СТ}} - \lambda_{\text{Р}}P + \mu_{\text{Р}}q_{\text{Р}} - \\ & -\lambda_{\text{ВАЛ}}P + \mu_{\text{ВАЛ}}q_{\text{ВАЛ}} - \lambda_{\text{ПОДШ}}P + \mu_{\text{ПОДШ}}q_{\text{ПОДШ}} - \lambda_{\text{СР}}P + \mu_{\text{СР}}q_{\text{СР}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\frac{dq_{\text{ЭП}}}{dt} = \lambda_{\text{ЭП}}P - \mu_{\text{ЭП}}q_{\text{ЭП}} \quad (3.10)$$

$$\frac{dq_{\text{ЭЛЦ}}}{dt} = \lambda_{\text{ЭЛЦ}}P - \mu_{\text{ЭЛЦ}}q_{\text{ЭЛЦ}}, \quad (3.11)$$

$$\frac{dq_{\text{СТ}}}{dt} = \lambda_{\text{СТ}}P - \mu_{\text{СТ}}q_{\text{СТ}}, \quad (3.12)$$

$$\frac{dq_{\text{Р}}}{dt} = \lambda_{\text{Р}}P - \mu_{\text{Р}}q_{\text{Р}}, \quad (3.13)$$

$$\frac{dq_{\text{ВАЛ}}}{dt} = \lambda_{\text{ВАЛ}}P - \mu_{\text{ВАЛ}}q_{\text{ВАЛ}}, \quad (3.14)$$

$$\frac{dq_{\text{ПОДШ}}}{dt} = \lambda_{\text{ПОДШ}}P - \mu_{\text{ПОДШ}}q_{\text{ПОДШ}}, \quad (3.15)$$

$$\frac{dq_{\text{СР}}}{dt} = \lambda_{\text{СР}}P - \mu_{\text{СР}}q_{\text{СР}}, \quad (3.16)$$

где  $P$  – надежность функционирования системы асинхронной вспомогательной машины (вероятность безотказной работы);

$q_{\text{ЭП}}, q_{\text{ЭЛЦ}}, q_{\text{СТ}}, q_{\text{Р}}, q_{\text{ВАЛ}}, q_{\text{ПОДШ}}, q_{\text{СР}}$  – вероятности неработоспособного состояния системы по причинам «электропитание», «электрические цепи», «статор», «ротор», «вал», «подшипниковый узел», «среда» соответственно;

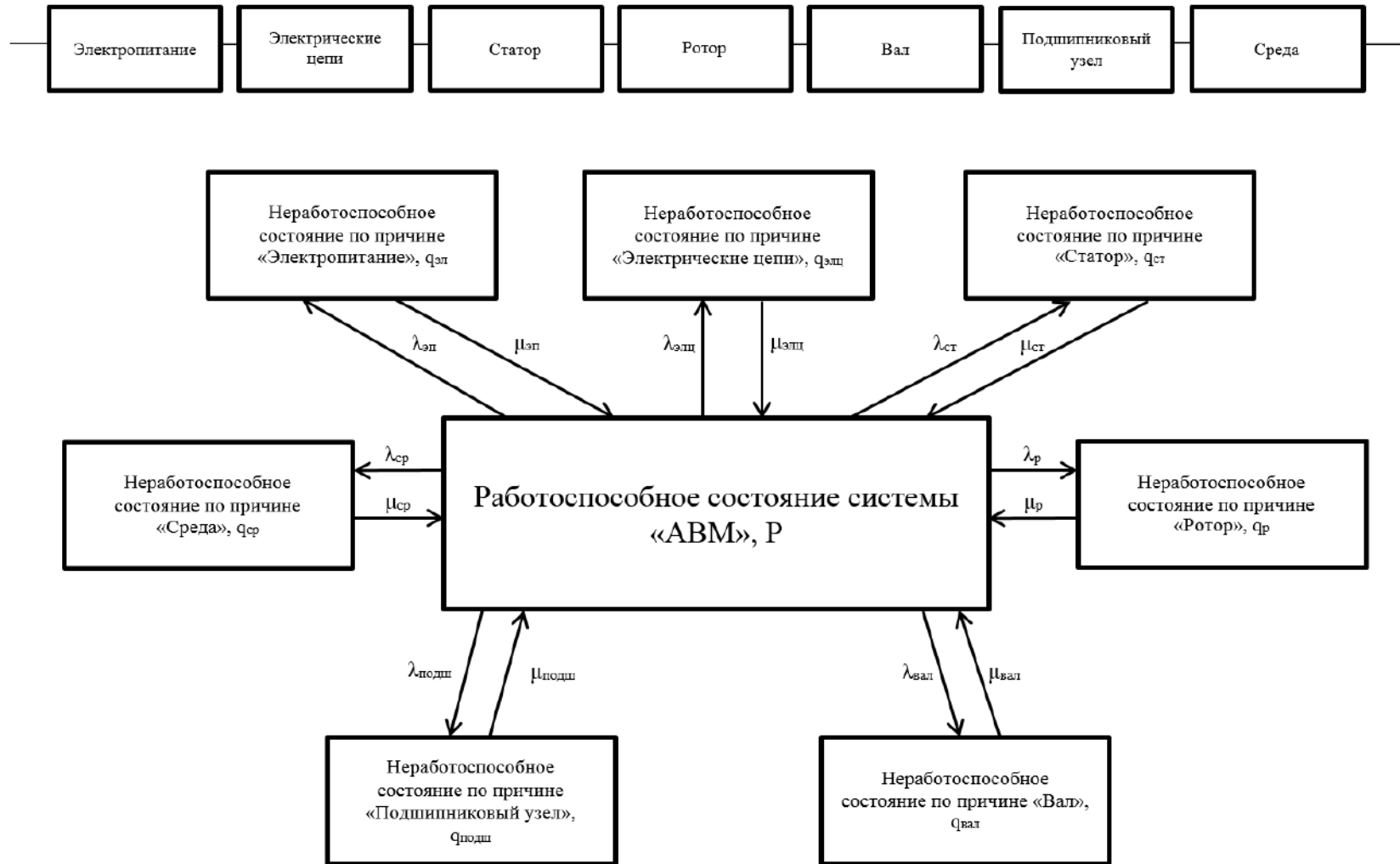


Рисунок 3.4 – Схема (а) и граф (б) состояний функционирования семиэлементной системы «Асинхронная вспомогательная машина»

$\lambda_{\text{эп}}, \lambda_{\text{элц}}, \lambda_{\text{ст}}, \lambda_{\text{р}}, \lambda_{\text{вал}}, \lambda_{\text{подш}}, \lambda_{\text{ср}}$  – интенсивности отказов по «электропитание», «электрические цепи», «статор», «ротор», «вал», «подшипниковый узел», «среда» соответственно;

$\mu_{\text{эп}}, \mu_{\text{элц}}, \mu_{\text{ст}}, \mu_{\text{р}}, \mu_{\text{вал}}, \mu_{\text{подш}}, \mu_{\text{ср}}$  – интенсивности восстановления элементов системы.

Принимая условия решений уравнений (3.9-3.16) и учитывая, что

$$P + q_{\text{эп}} + q_{\text{элц}} + q_{\text{ст}} + q_{\text{р}} + q_{\text{вал}} + q_{\text{подш}} + q_{\text{ср}} = 1, \quad (3.17)$$

Получено выражение

$$P = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{\text{эп}}}{\mu_{\text{эп}}} + \frac{\lambda_{\text{элц}}}{\mu_{\text{элц}}} + \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\mu_{\text{ст}}} + \frac{\lambda_{\text{р}}}{\mu_{\text{р}}} + \frac{\lambda_{\text{вал}}}{\mu_{\text{вал}}} + \frac{\lambda_{\text{подш}}}{\mu_{\text{подш}}} + \frac{\lambda_{\text{ср}}}{\mu_{\text{ср}}}}, \quad (3.18)$$

$$q_{\text{эп}} = \frac{\lambda_{\text{эп}}}{\mu_{\text{эп}}} \cdot P, \quad (3.19)$$

$$q_{\text{элц}} = \frac{\lambda_{\text{элц}}}{\mu_{\text{элц}}} \cdot P, \quad (3.20)$$

$$q_{\text{ст}} = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\mu_{\text{ст}}} \cdot P, \quad (3.21)$$

$$q_{\text{р}} = \frac{\lambda_{\text{р}}}{\mu_{\text{р}}} \cdot P, \quad (3.22)$$

$$q_{\text{вал}} = \frac{\lambda_{\text{вал}}}{\mu_{\text{вал}}} \cdot P, \quad (3.23)$$

$$q_{\text{подш}} = \frac{\lambda_{\text{подш}}}{\mu_{\text{подш}}} \cdot P, \quad (3.24)$$

$$q_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{\mu_{\text{ср}}} \cdot P, \quad (3.25)$$

обозначив  $\frac{\lambda_i}{\mu_i} = \alpha_i$  можно записать

$$q_{\text{эп}} = \alpha_{\text{эп}} \cdot P, \quad (3.25)$$

$$q_{\text{элц}} = \alpha_{\text{элц}} \cdot P, \quad (3.26)$$

$$q_{\text{ст}} = \alpha_{\text{ст}} \cdot P, \quad (3.27)$$

$$q_{\text{р}} = \alpha_{\text{р}} \cdot P, \quad (3.28)$$

$$q_{\text{вал}} = \alpha_{\text{вал}} \cdot P, \quad (3.29)$$

$$q_{\text{подш}} = \alpha_{\text{подш}} \cdot P, \quad (3.30)$$

$$q_{\text{ср}} = \alpha_{\text{ср}} \cdot P. \quad (3.31)$$

Тогда

$$P = \frac{1}{1 + \alpha_{\text{эп}} + \alpha_{\text{элц}} + \alpha_{\text{ст}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{вал}} + \alpha_{\text{подш}} + \alpha_{\text{ср}}} = \frac{1}{1 + \sum \alpha_i} = \frac{1}{1 + \psi}, \quad (3.32)$$

где  $\alpha_{\text{эп}}$ ,  $\alpha_{\text{элц}}$ ,  $\alpha_{\text{ст}}$ ,  $\alpha_{\text{р}}$ ,  $\alpha_{\text{вал}}$ ,  $\alpha_{\text{подш}}$ ,  $\alpha_{\text{ср}}$  – приведенные плотности потока отказов АВМ по причинам «электропитание – электрические цепи – статор – ротор – вал – подшипниковый узел – среда» соответственно;

$\psi$  – суммарная приведенная плотность отказов системы.

$$\psi = \alpha_{\text{эп}} + \alpha_{\text{элц}} + \alpha_{\text{ст}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{вал}} + \alpha_{\text{подш}} + \alpha_{\text{ср}}. \quad (3.33)$$

Выполнен расчет характеристик надежности функционирования семиэлементной системы «Асинхронная вспомогательная машина», полученные результаты приведены в таблице 3.2.

**Таблица 3.2 – Характеристики надежности системы «Асинхронная вспомогательная машина»**

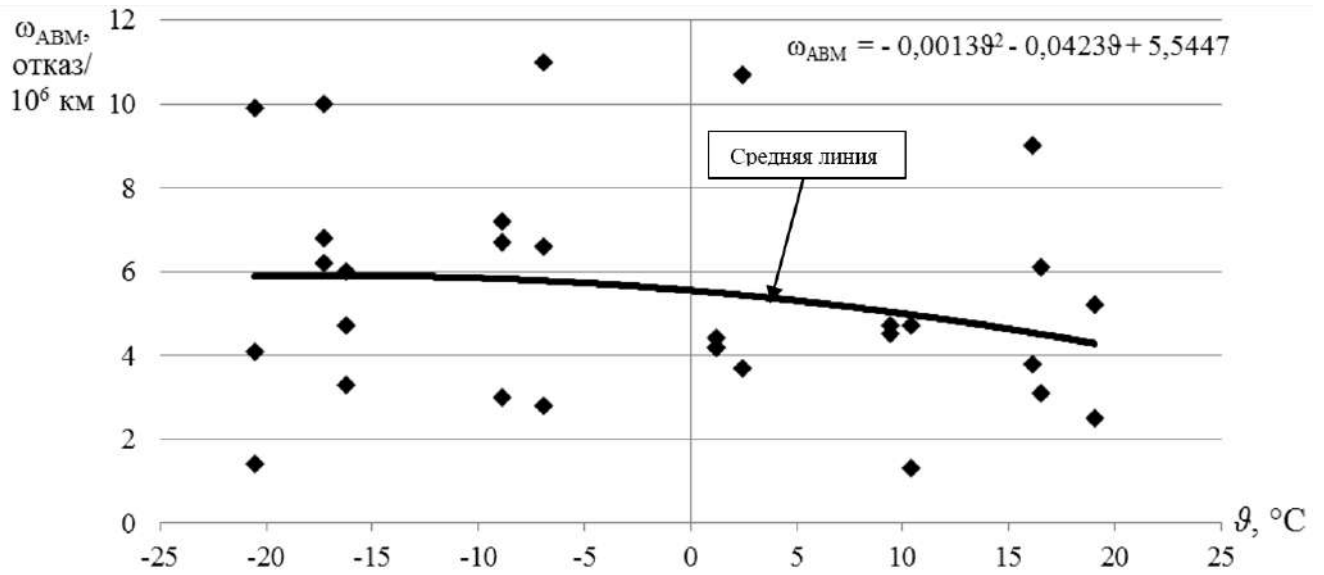
Элементы системы	Интенсивность отказов $\lambda, \text{ч}^{-1}$	Интенсивность восстановления $\mu, \text{ч}^{-1}$	Приведенная плотность потоков отказов $\alpha = \lambda / \mu$
Среда	0,0000445	0,01266	0,003515008
Вал	0,0000342	0,01429	0,002393282
Подшипниковый узел	0,0002671	0,01786	0,014955207
Статор	0,0001461	0,01515	0,009643564
Ротор	0,0001039	0,01316	0,007895137
Электропитание	0,0000468	0,01370	0,003416058
Электрические цепи	0,0000400	0,01695	0,002359882

Анализ данных, приведенных в таблице 3.2, показывает, что определяющее влияние на надежность системы оказывают следующие элементы: «подшипниковый узел» – 33,9 % отказов системы, «статор» – 21,8 %, «ротор» – 10,3 %, «среда» – 3,5 %, «электрические цепи» – 2,4 %, «электропитание» – 0,3 %.

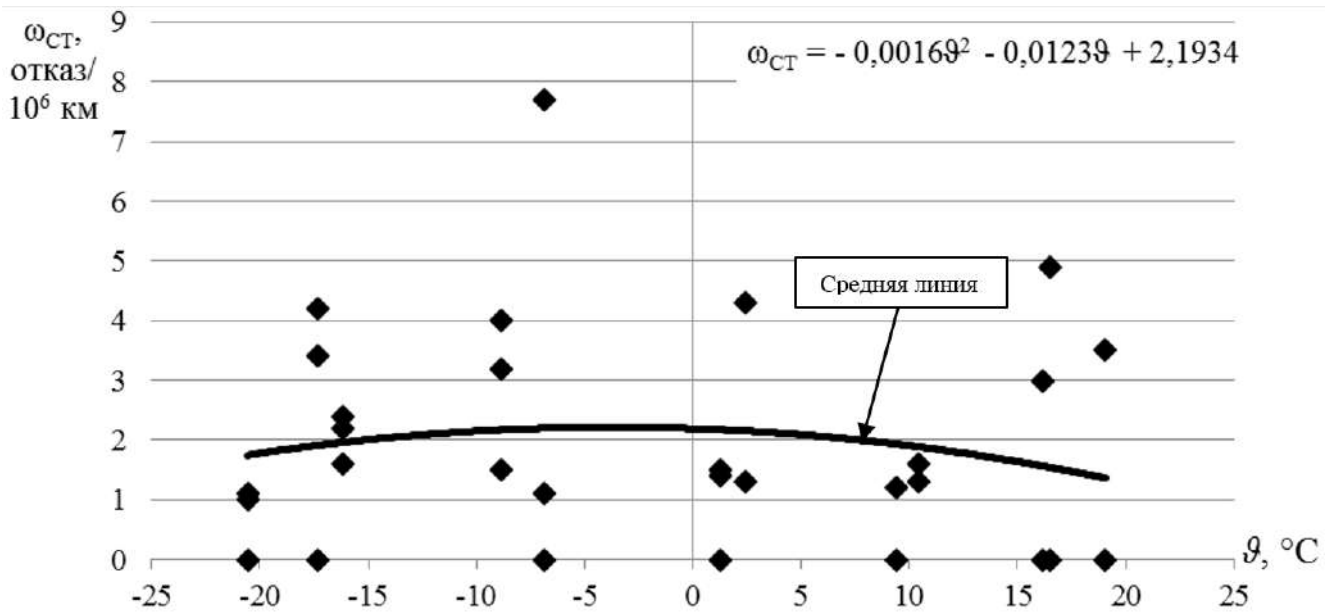
«ротор» – 17,9 %. Это определило необходимость разработки мероприятий для обеспечения безотказности наиболее «слабых» элементов системы.

### **3.3 Исследование влияния температуры воздуха на безотказность асинхронных вспомогательных машин**

Зависимости параметров потоков отказов АВМ АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Боготол от температуры воздуха в период с октября 1997 года по март 2000 года, приведены на рисунках 3.5 - 3.8 [25, 62]. При изменении температуры воздуха ( $\vartheta$ ) от  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  параметр потока отказов АВМ изменяется в 1,43 раза от 5,95 до 4,15 отказов/ $10^6$  км (рисунок 3.5). Наибольшее и наименьшее значения параметра потока отказов статоров 2,16 и 1,35 отказов/ $10^6$  км наблюдаются соответственно при температуре воздуха  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $+19\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 3.6). Изменение параметра потока отказов статоров от температуры воздуха показывает, что качество пропитки изоляции статоров не превышает четверти от состояния изоляции качественно пропитанного статора [71]. Наибольшее и наименьшее значения параметра потока отказов роторов 1,09 и 0,23 отказов/ $10^6$  км наблюдаются соответственно при температуре воздуха  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 3.7). Параметр потока отказов подшипниковых узлов имеет наибольшее и наименьшее значения показателя безотказности 1,77 и 0,82 отказов/ $10^6$  км при температуре воздуха  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $+2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 3.8).

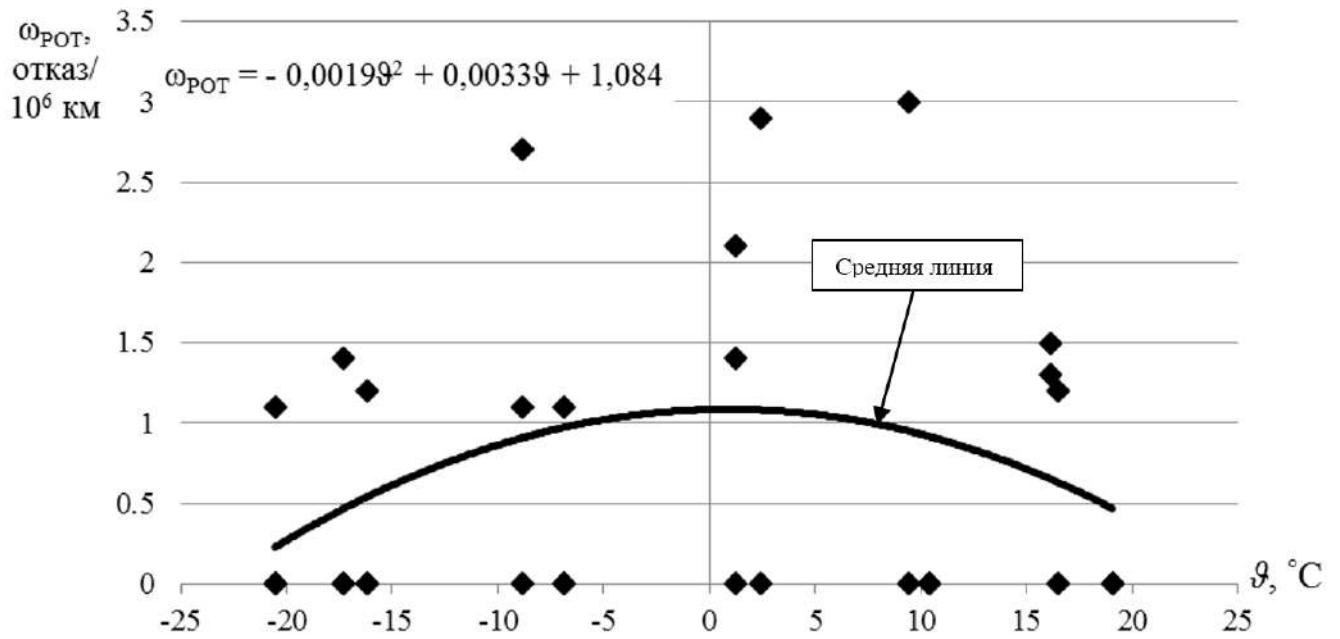


**Рисунок 3.5 – Зависимость параметра потока отказов АВМ АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Боготол от температуры воздуха ( $\theta$ )**

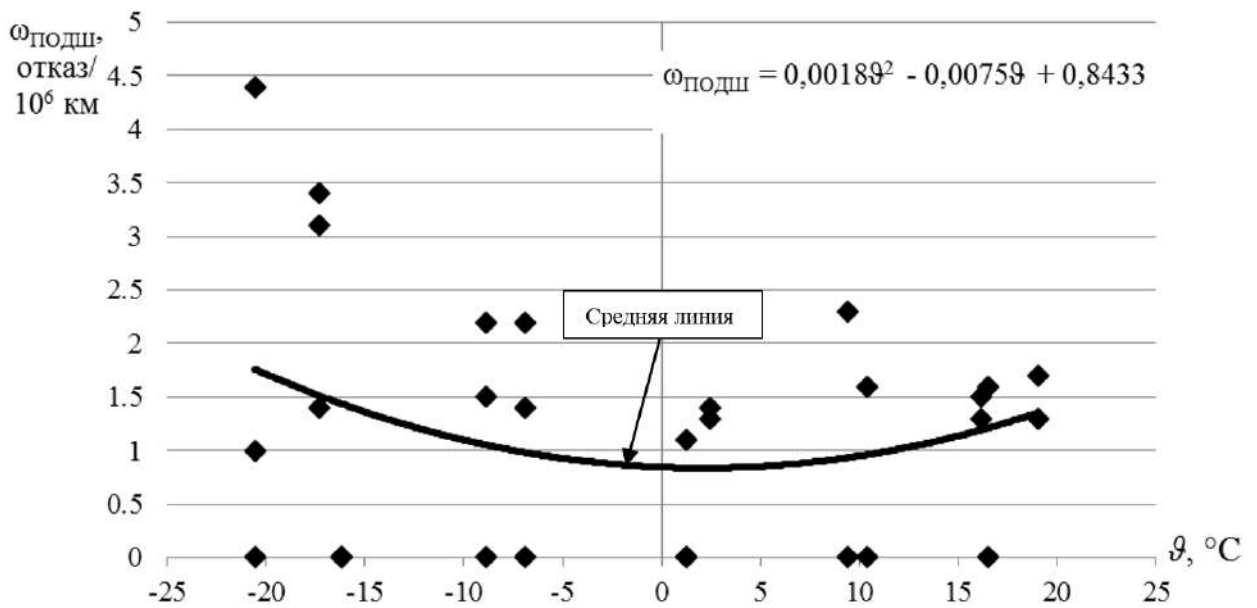


**Рисунок 3.6 – Динамика параметра потока отказов статоров АВМ АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р от температуры воздуха депо Боготол от температуры воздуха**





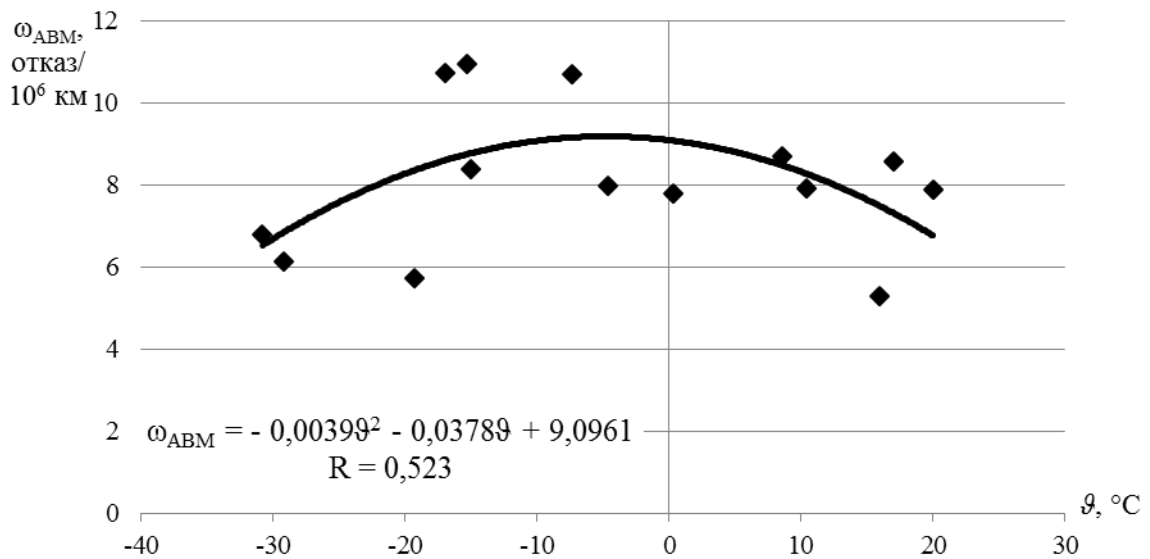
**Рисунок 3.7 – Изменение параметра потока отказов роторов АВМ АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Боготол от температуры воздуха**



**Рисунок 3.8 – Зависимость параметра безотказности подшипниковых узлов АВМ АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Боготол от температуры воздуха**

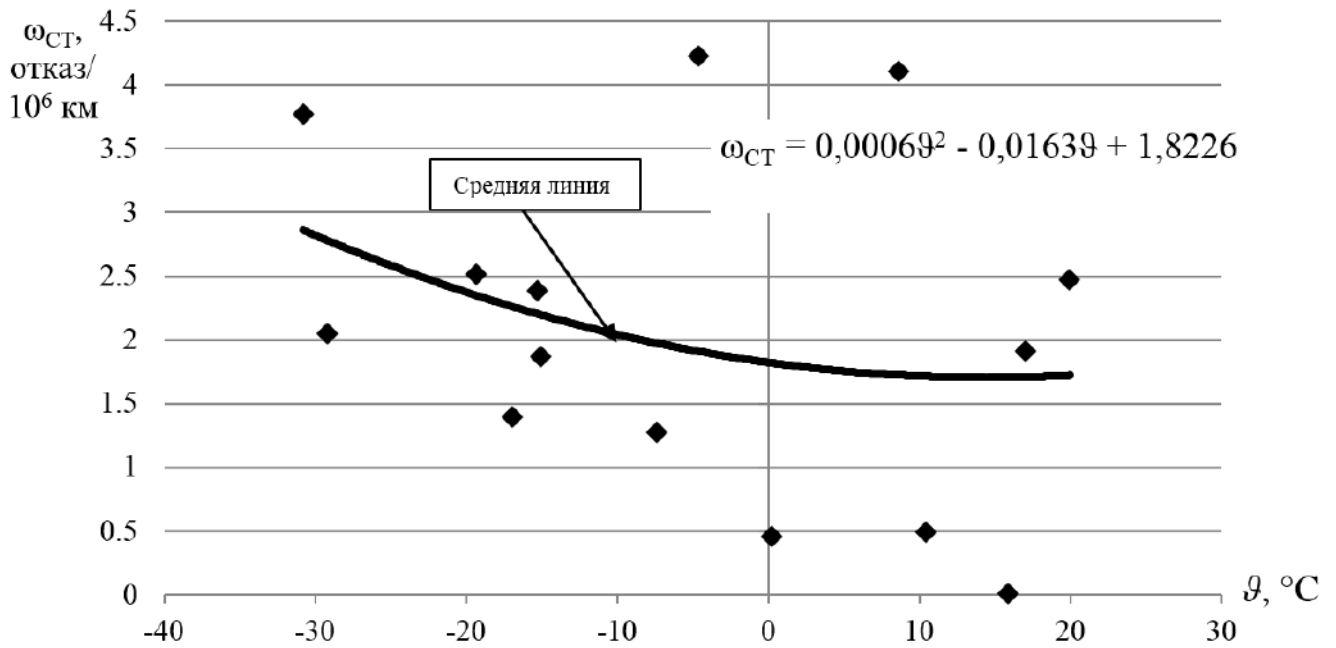
Из рассмотрения зависимостей параметров потоков отказов АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха в период с января 2002 года по февраль 2003 года, приведенных на рисунках 3.9 – 3.12 отмечается следующее. При изменении температуры воздуха от  $-31\text{ }^\circ\text{C}$

до  $-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  параметр потока отказов АВМ увеличивается в 1,4 раза от 6,59 до 9,21 отказов/ $10^6$  км (рисунок 3.9).



**Рисунок 3.9 – Зависимость параметра потока отказов АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха**

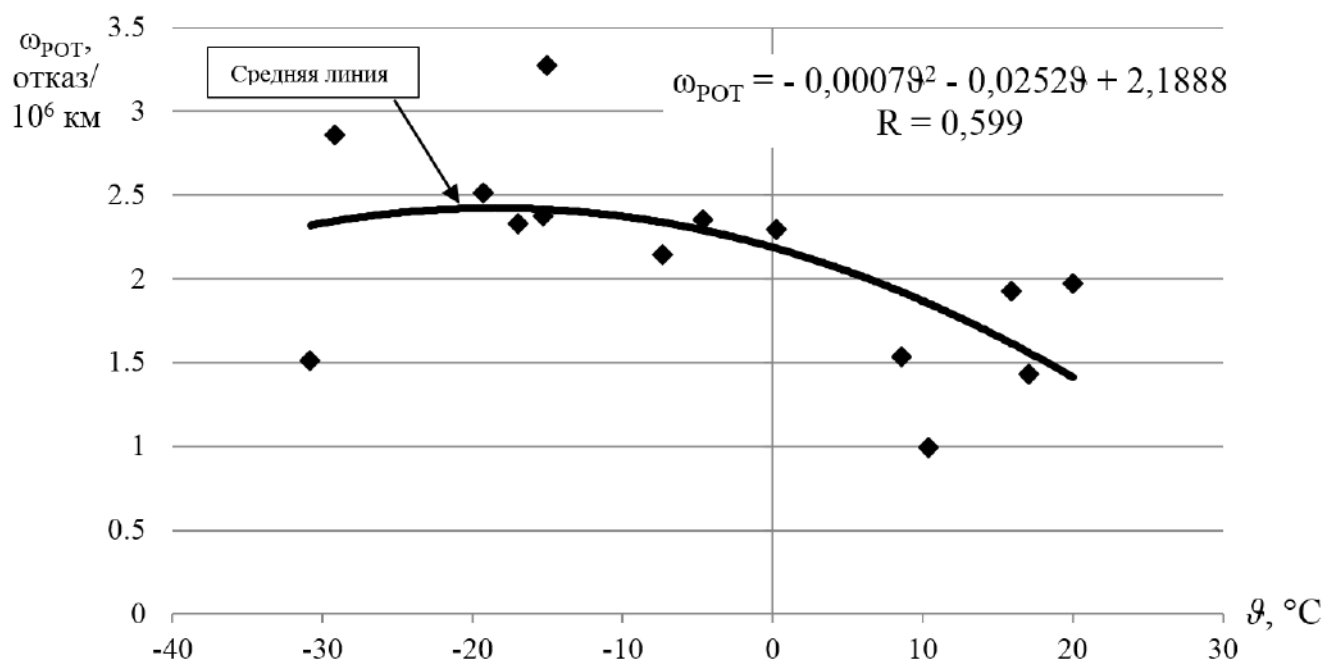
Наибольшее и наименьшее значения параметра потока отказов статоров 2,85 и 1,65 отказов/ $10^6$  км наблюдаются соответственно при температуре воздуха - 31  $^{\circ}\text{C}$  и +13  $^{\circ}\text{C}$  (рисунок 3.10). Изменение параметра потока отказов статоров от температуры воздуха показывает, что качество пропитки изоляции статоров около 60 % от состояния изоляции качественно пропитанного статора [71].



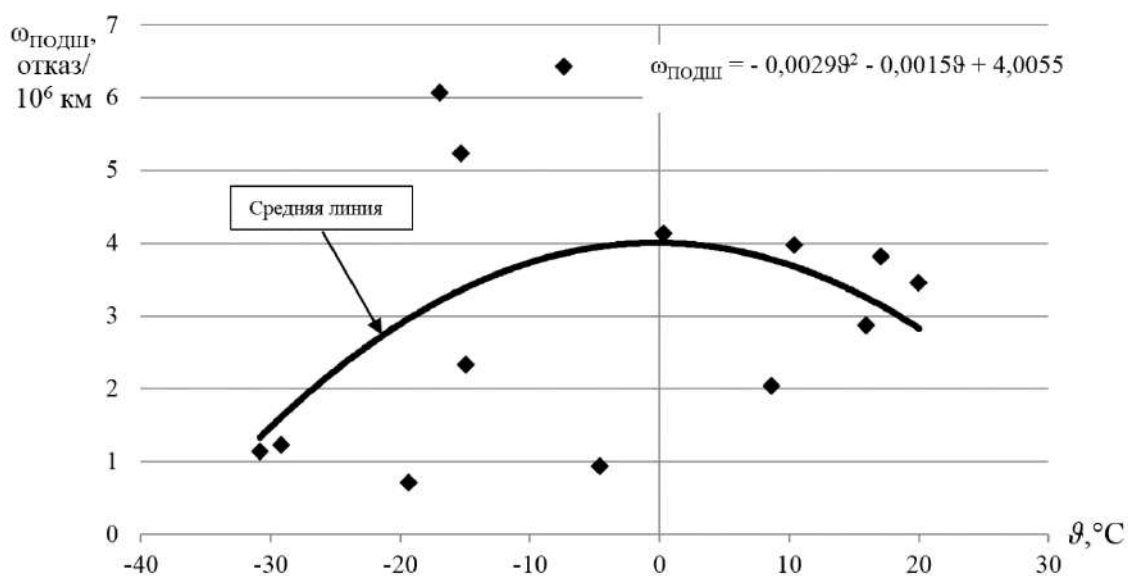
**Рисунок 3.10 – Динамика параметра потока отказов статоров АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха**

Наибольшее и наименьшее значения параметра потока отказов роторов 2,42 и 1,43 отказов/10<sup>6</sup> км наблюдаются при температуре воздуха -18 °С и +20 °С (рисунок 3.11). Параметр потока отказов подшипниковых узлов имеет наибольшее и наименьшее значения 4,01 и 1,29 отказов/10<sup>6</sup> км при температуре воздуха 0 °С и - 31 °С (рисунок 3.12).

Анализ зависимостей параметров потоков отказов АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха в 2012 году, приведенных на рисунках 3.13 – 3.16, показывает следующее. При изменении температуры воздуха от -20 °С до +18 °С параметр потока отказов АВМ снижается в 1,56 раза от 27,8 до 17,8 отказов/10<sup>6</sup> км (рисунок 3.13). Наибольшее и наименьшее значения параметра потока отказов статоров 9,21 и 4,39 отказов/10<sup>6</sup> км наблюдаются при температуре воздуха -24 °С и +3 °С (рисунок 3.14). Изменение параметра потока отказов статоров от температуры воздуха показывает, что качество пропитки изоляции статоров около 70 % от состояния изоляции качественно пропитанного статора [71].

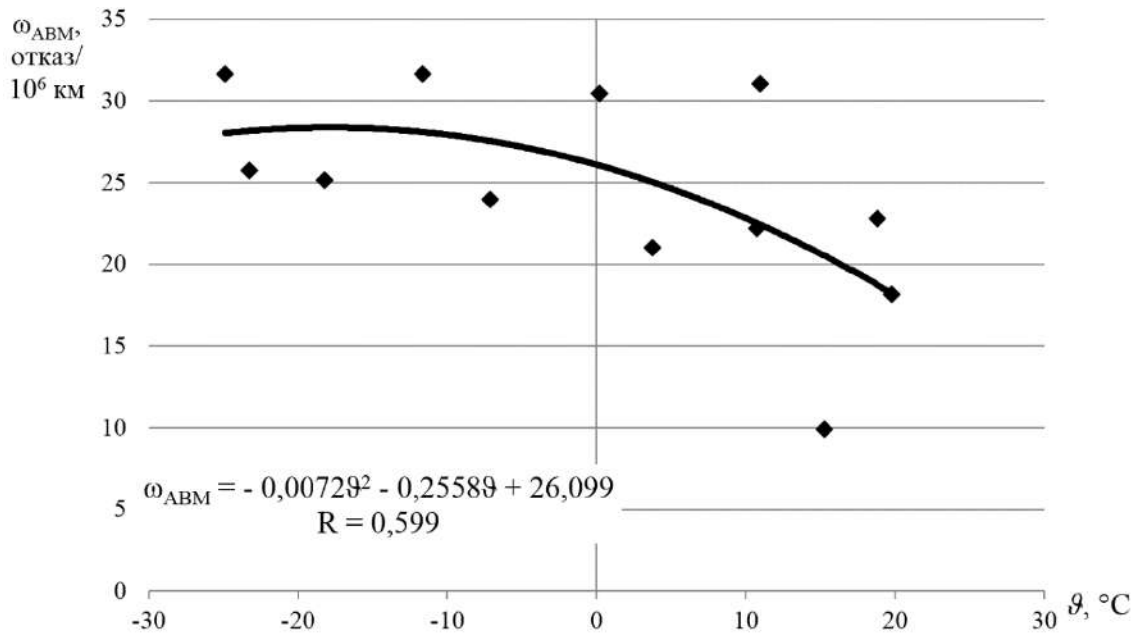


**Рисунок 3.11 – Изменение параметра потока отказов роторов АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха**

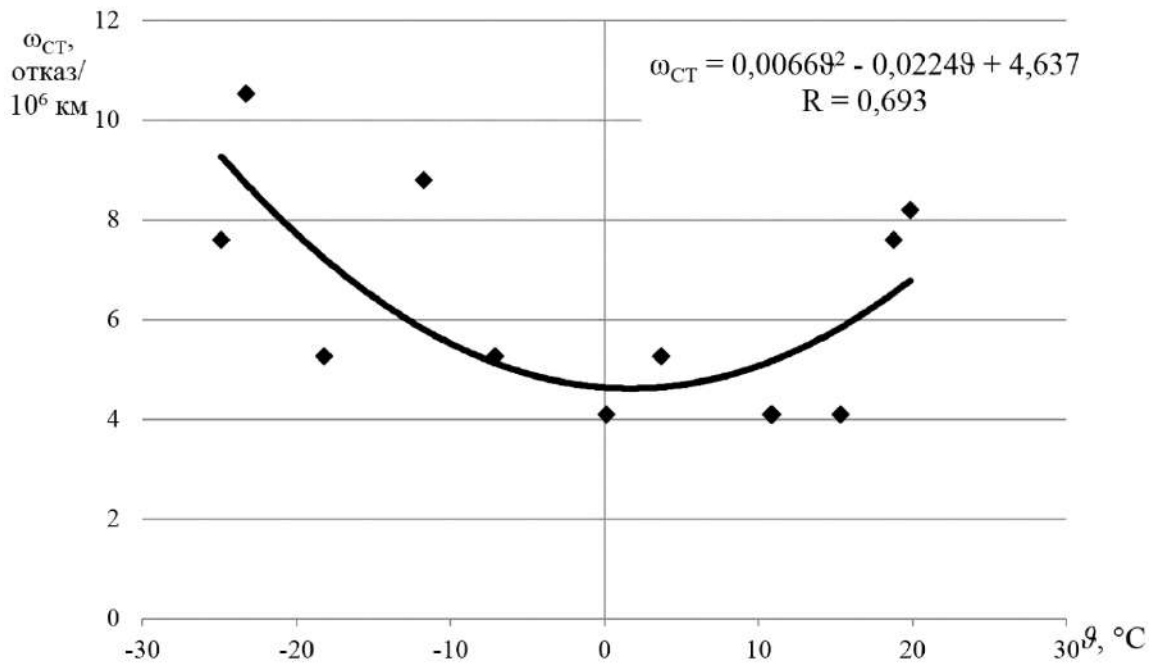


**Рисунок 3.12 – Зависимость параметра безотказности подшипниковых узлов АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха**

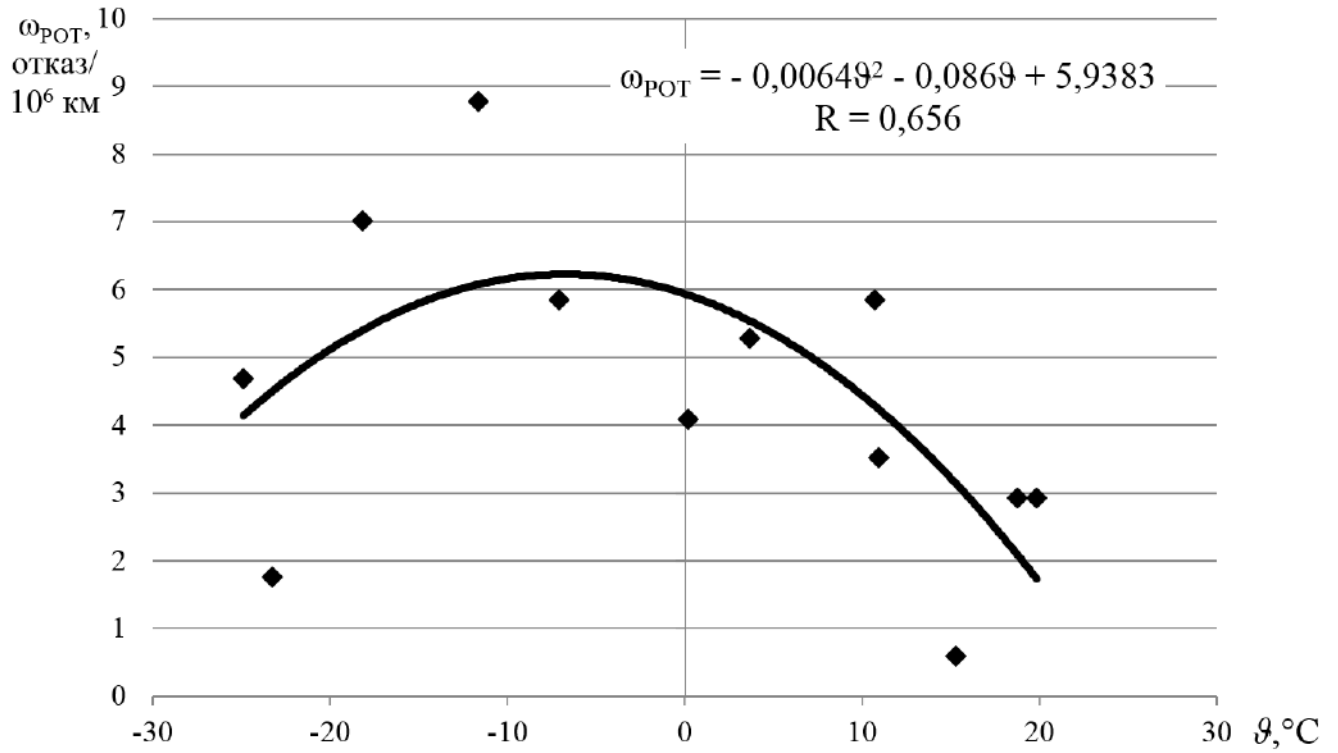
Наибольшее и наименьшее значения параметра потока отказов роторов 6,19 и 1,65 отказов/10<sup>6</sup> км наблюдаются при температуре воздуха -7,5 °С и +19 °С (рисунок 3.15). Параметр потока отказов подшипниковых узлов имеет наибольшее и наименьшее значения 13,4 и 8,4 отказов/10<sup>6</sup> км при температуре воздуха -7,5 °С и +19 °С (рисунок 3.16).



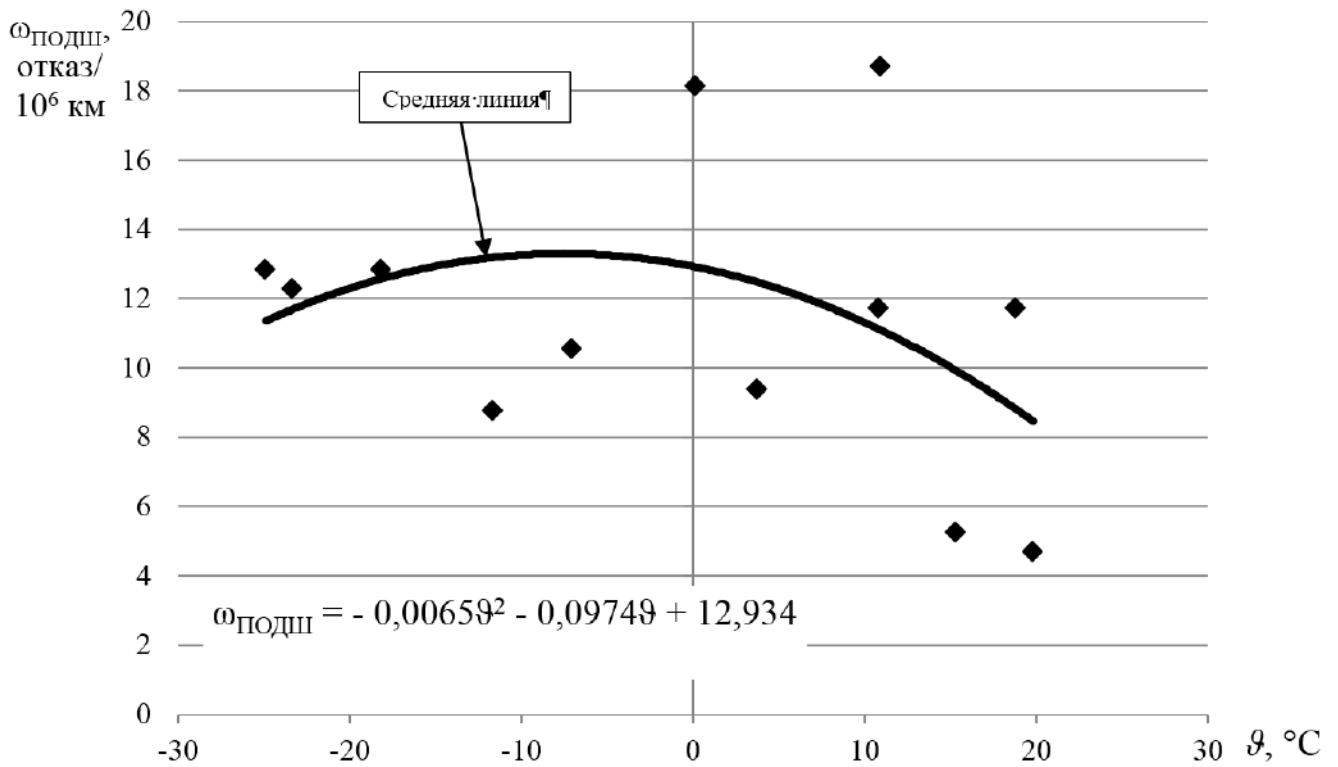
**Рисунок 3.13 – Зависимость параметра потока отказов АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха**



**Рисунок 3.14 – Динамика параметра потока отказов статоров АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха**

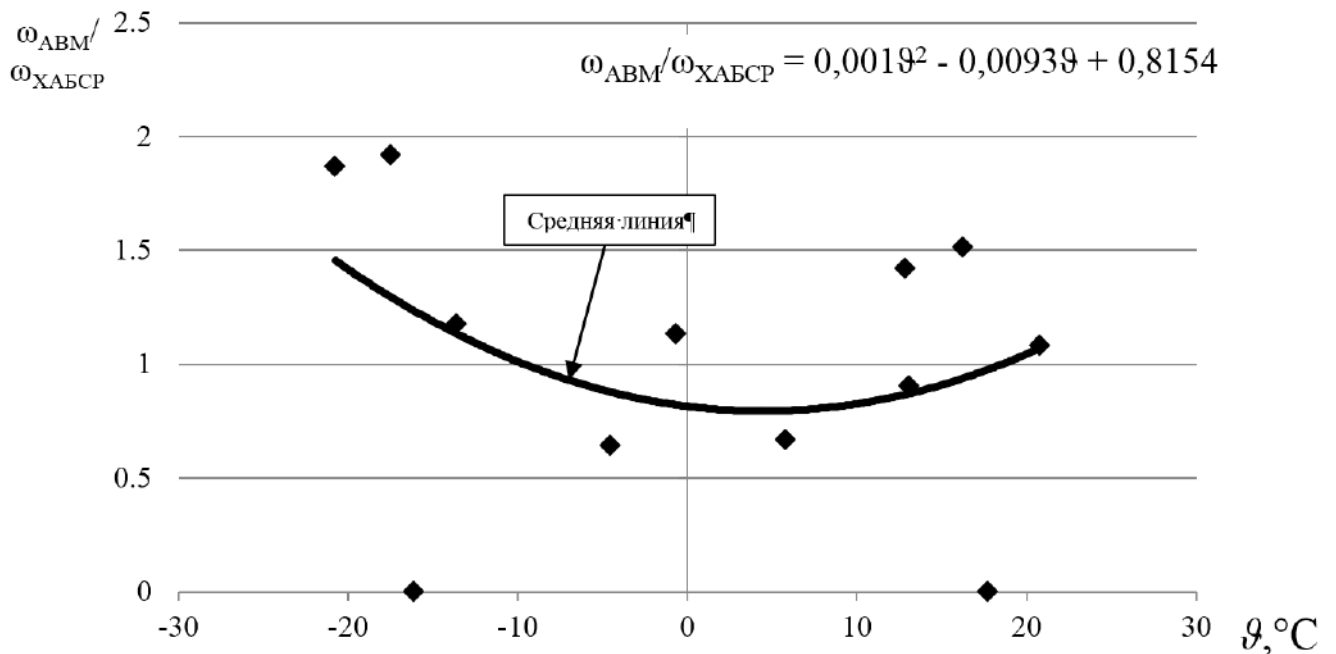


**Рисунок 3.15 – Изменение параметра потока отказов роторов АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха**

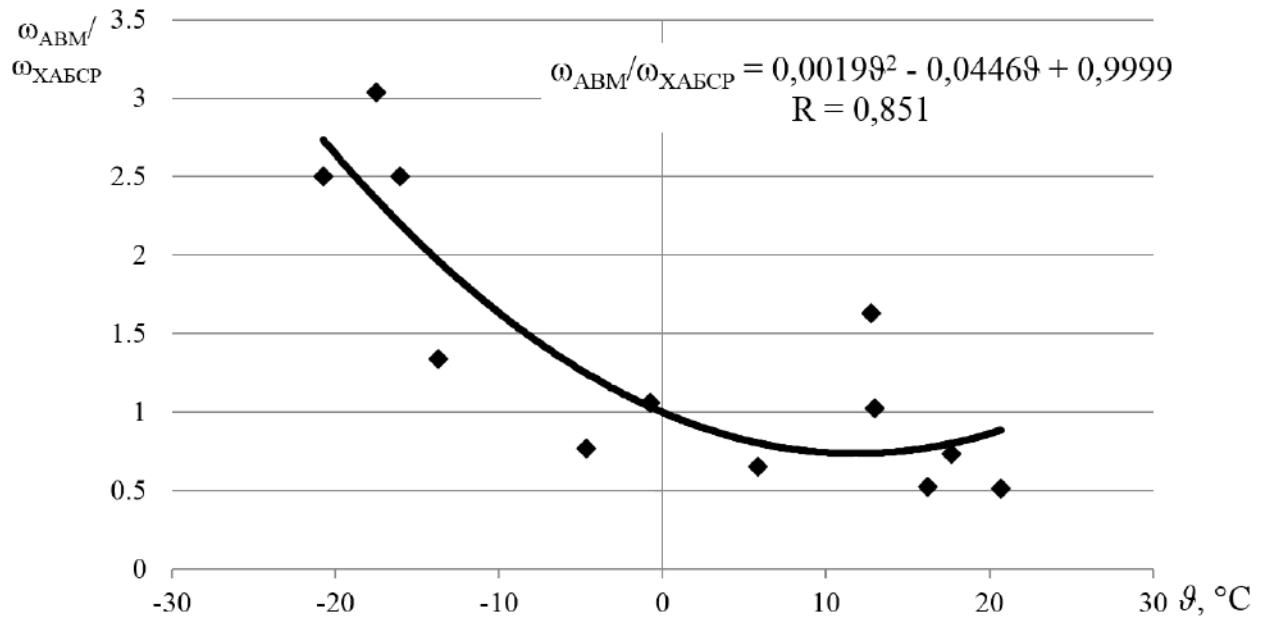


**Рисунок 3.16 – Зависимость параметра потока отказов подшипниковых узлов АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск от температуры воздуха**

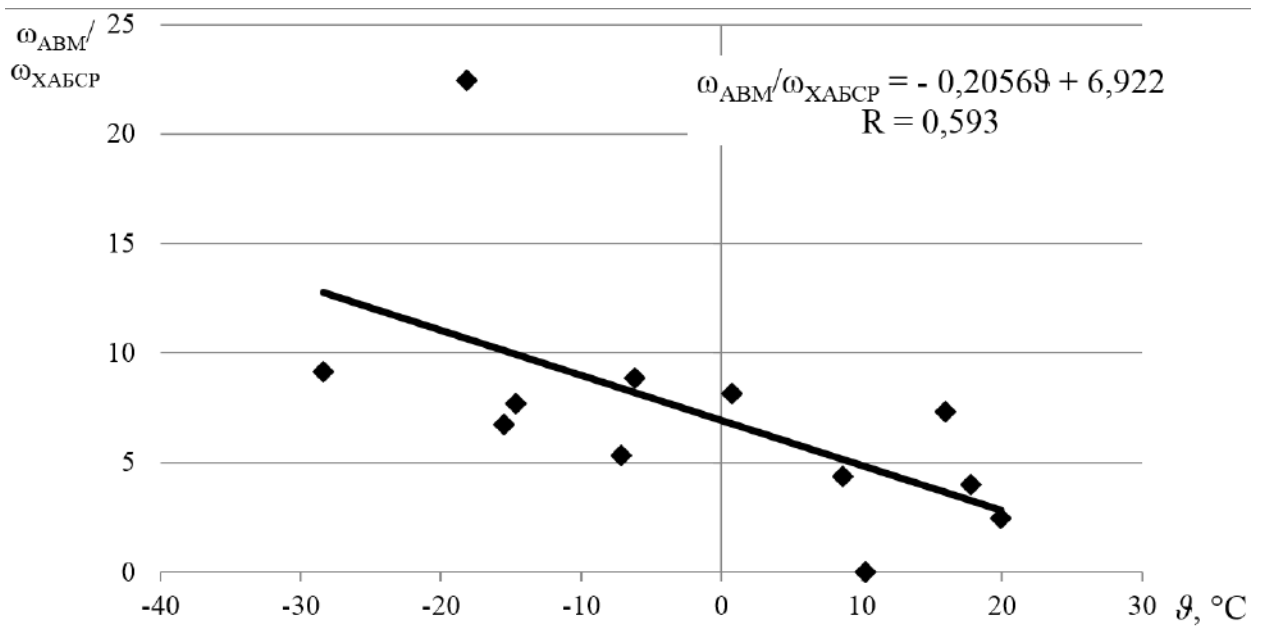
Ежемесячные зависимости изменения относительных параметров потоков отказов АВМ НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К Восточного полигона РЖД во время эксплуатации в депо Хабаровск, Чита, Вихоревка приведены на рисунках 3.17 – 3.19. За установочное значение принималось среднемесячная величина относительного параметра потока отказов АВМ НВА 55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К депо Хабаровск. Рассмотрение зависимостей показало, что при изменении температуры воздуха от  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительный параметр потока отказов АВМ электровозов депо Хабаровск снижается в 1,86 раза с 1,47 до 0,79 отказов/ $10^6$  км (рисунок 3.17). С повышением температуры воздуха от  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительный параметр потока отказов асинхронных вспомогательных машин электровозов депо Чита уменьшается в 3,53 раза с 2,75 до 0,78 отказов/ $10^6$  км (рисунок 3.18). С увеличением температуры воздуха от  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительный параметр потока отказов АВМ электровозов депо Вихоревка понижается в 5,02 раз с 12,8 до 2,55 отказов/ $10^6$  км (рисунок 3.19).



**Рисунок 3.17 – Зависимость относительного параметра потока отказов АВМ НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К депо Хабаровск от температуры воздуха**



**Рисунок 3.18 – Динамика относительного параметра потока отказов АВМ НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К депо Чита от температуры воздуха**



**Рисунок 3.19 – Изменение относительного параметра потока отказов АВМ НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К депо Вихоревка от температуры воздуха**



### **3.4 Безотказность асинхронных вспомогательных машин грузовых электровозов переменного тока Восточного полигона**

Выполнен анализ отказов промышленных асинхронных электрических машин (ПАЭМ) и асинхронных вспомогательных машин современных грузовых электровозов переменного тока Восточного полигона. Установлено следующее различие между отказами основных узлов ПАЭМ и АВМ. Отказы ПАЭМ, эксплуатируемых с коэффициентом несимметрии питающего напряжения  $K_u$  не более 2 %, распределяются следующим образом: статор – 91 %; подшипниковый узел – 6,5 %; ротор – 2,5 %.

С увеличением  $K_u$  до 9 % при питании от вращающегося ФР типа НБ 455 электровозов ВЛ80, преобразующего однофазное напряжение в трехфазное и работающего с вибрацией до 3g в кузовах электровозов, в которых размещены АВМ типа АЭ92-4, наблюдается следующее распределение отказов в процентах: статор – 69; подшипниковый узел – 28,4; ротор – 2,6.

С повышением  $K_u$  до 10 % и более при использовании в качестве ФР АВМ типа АНЭ225 на электровозах ВЛ85, наблюдается следующее распределение отказов двигателей: подшипниковый узел – 51,6 %; статор – 28,3 %; ротор – 20,1 %.

С ростом несимметрии напряжения питающего двигателя до 16 %, при эксплуатации лишь с использованием конденсаторного пуска, наблюдается следующее распределение отказов: подшипниковый узел – 47,9 %; ротор – 23,8 %; статор – 18,3 %. Статистические данные о параметрах потоков отказов основных узлов АВМ грузовых электровозов Восточного полигона РЖД приведены в таблице 3.3.

**Таблица 3.3 – Статистические данные о параметрах потоков отказов основных узлов АВМ грузовых электровозов Восточного полигона**

Название локомотивного депо	Год постройки электро-воза	Серия электро-воза	Период наблюдения	Тип АВМ	Параметр потока отказов, отказов/ 10 <sup>6</sup> км		
					статор	ротор	подшипники
Боготол	начало 1973 г. окончание 1986 г.	ВЛ80Р	1997 - 2000	АЭ92-4	1,49	0,73	1,19
Нижнеудинск	начало 1983 г. окончание 2000 г.	ВЛ85	2002 - 2003	АНЭ225	2,07	2,11	3,17
Нижнеудинск	начало 1983 г. окончание 2000 г.	ВЛ85	2012	АНЭ225	6,24	4,44	11,4

При рассмотрении данных, приведенных в таблице 3.3, можно отметить, что параметры потоков отказов АВМ типа АЭ92-4, мощностью 40 кВт, имеющих аксиальную вентиляцию, обеспечивающую необходимый отвод тепла во всех режимах работы, значительно меньше, чем АВМ типа АНЭ225, мощностью 55 кВт, с радиальной вентиляцией.

Из таблицы 3.3 видно, что за десять лет эксплуатации параметры потоков отказов АВМ типа АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск увеличились, соответственно, статора, ротора и подшипникового узла в 3,01; 2,12 и 3,35 раза.

Сравнение параметров потоков отказов основных узлов АВМ типа АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Боготол за 1997-2000 годы и АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск за 2012 год (оба парка электровозов эксплуатировались более десяти лет после поступления с завода-изготовителя) показывает, что параметры потоков отказов статоров, роторов и подшипниковых узлов АВМ типа АНЭ225 электровозов ВЛ85, соответственно, в 4,2; 6,1 и 9,6 раз превышают аналогичные показатели АВМ типа АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р [72].

В связи с пониженной безотказностью АВМ типа АНЭ225 рассмотрены условия эксплуатации АВМ как АЭ92-4, так и АНЭ225. Как отмечено выше, аксиальная вентиляция АЭ92-4 обеспечивает необходимый отвод тепла от статора, ротора, подшипниковых узлов. Температура подшипников не превышает

значения  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , допустимого для смазки «Буксол», применяемой в АЭ92-4. Скорость ее испарения составляет 1,5 % от массы смазки в подшипниковом узле за 1 час работы при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Перед началом эксплуатации в каждый подшипниковый узел АВМ типа АЭ92-4 заправляется 120 г. в шариковые подшипники и 70 г. смазки в роликовые. Регулярно, через  $(15-22) \cdot 10^3$  км пробега электровоза при текущих ремонтах ТР-1, ТР-2 шприцем добавляется 30-50 г. смазки. После пробега электровоза  $450 \times 10^3$  км на текущем ремонте ТР-3 смазка полностью заменяется на свежую.

При нагревании АВМ типа АНЭ225 электровозов ВЛ85 из-за неполного удаления радиальной вентиляцией тепла от потерь, в несимметричных режимах работы, температура статора и ротора существенно повышается. Согласно конструкторской документации при работе в наиболее тяжелых несимметричных режимах, при снижении напряжения на зажимах АВМ АНЭ225, для исключения разницы температуры обмотки двигателя и температуры окружающей среды выше допустимого значения ее мощность должна быть ограничена величиной до 39 кВт. Установлено, что входная мощность приводных АВМ АНЭ225 вентиляторов МВ1, МВ2, МВ3 электровозов ВЛ85 нередко близка к номинальной. Это вызвано как повышенной нагрузкой этих вентиляторов, так и полным отсутствием смазки у трети отказавших АВМ АНЭ225 депо Нижнеудинск. Установлено, что при этом, из-за потерь на трение в подшипниках, мощность одной АВМ достигает величины более 18 кВт. Возрастание температуры подшипников при этом до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше вызывает интенсивное испарение смазки. Увеличивается тепловой поток через вал от подшипников к ротору. Ускоренному удалению смазки из подшипникового узла способствует также уменьшенное количество смазки, заправляемой в подшипниковый узел, в начале эксплуатации, при ТР-3, среднем (СР) и капитальном (КР) ремонтах. Количество заправляемой смазки Буксол в подшипниковые узлы АНЭ225 составляет 120 г. в подшипниковую камеру с шариковым подшипником и 70 г. с роликовым подшипником.

Смазка Буксол, аналогично смазке в подшипниках двигателя АЭ92-4, испаряется 1,5 % при температуре 100 °С за час работы. Перегрев подшипникового узла приводит к нехватке смазки в АВМ АНЭ225. Количество смазки в подшипниках АВМ электровозов ВЛ85 уменьшено по сравнению с АВМ АЭ92-4 электровозов ВЛ80, в которых количество смазки, заправляемой при сменах и пополнениях в 4-5 раз больше чем в АВМ АНЭ225 [42].

Нехватка смазки в подшипниковых узлах АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 приводит к переходу контактов подшипников из режима качения в режим «сухого» скольжения с увеличением коэффициента трения в контакте, способствующему росту температуры подшипников, роторов и статорных обмоток. Повышение температуры роликов (шариков), сепараторов и колец подшипников приводит к увеличению их объема. Ролики (шарики) заклиниваются, разрушаются сепараторы и кольца подшипников. В одном из двух-трех случаев заклинивания подшипников температура ротора повышается до температуры плавления алюминия. При этом обмотки ротора выплавляются. Рост температуры статорных обмоток при увеличении коэффициента трения в контактах подшипников вызывает интенсивное тепловое старение изоляции статорной обмотки, ее разрушение и пробой.

### **3.5 Выводы по разделу 3**

1 Разработана математическая модель, которая описывает работу АВМ переменного тока, модель позволила исследовать взаимосвязь между различными узлами (статором, ротором, подшипниковым узлом) и выявить их наибольшее влияние на надежность работы всей системы.

2 Установлено существенное влияние температуры воздуха и длительности отстоя электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К на безотказность АВМ НВА55. Если в летний период эксплуатации параметр потока отказов АВМ депо

Вихоревка северного направления Восточного полигона превышает аналогичный показатель безотказности АВМ депо Хабаровск центрального направления в 2,45 раза, то в зимний период это отношение составляет 9,1 раза. Это обусловлено эксплуатацией АВМ депо Вихоревка при низкой температуре до минус 45–55 °С и увеличенным временем отстоя электровозов от 12 часов и более. Температура АВМ депо Хабаровск, как правило, не снижется ниже минус 20 °С, а время отстоя электровозов не превышает 2–2,5 часа.

3 Величина несимметрии напряжения питания существенно влияет на распределение отказов основных узлов АВМ. При несимметрии напряжения 2 % наибольшую долю отказов имеет статор. С увеличением несимметрии напряжения до наибольшей 16 % возрастает доля отказов ротора и подшипников при снижении доли отказов статора.

4 Установлено, при анализе безотказности основных узлов АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 депо Нижнеудинск за 2012 год и АВМ АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р депо Боготол за 1997 - 2000 годы (оба парка электровозов эксплуатировались более 10 лет после поступления с завода-изготовителя), что параметры потоков отказов статора, ротора и подшипников АВМ АНЭ225 электровозов ВЛ85 в 4,2; 6,1; 9,6 раза, соответственно, превышают аналогичные показатели АВМ АЭ92-4 электровозов ВЛ80Р. Это вызвано как повышенной температурой подшипников, ротора и статоров АВМ АНЭ225 из-за недостаточной интенсивности вентиляции, так и, в большей степени, нехваткой смазки в подшипниках, приводящей их к переходу из режима качения в режим скольжения.

5 Уточнен процесс заклинивания подшипников, приводящий к выправлению алюминиевых обмоток роторов и ускоренному старению изоляции статорных обмоток АВМ АНЭ225 современных электровозов из-за перехода контактов подшипников из режима качения в режим «сухого» скольжения, вследствие низкой интенсивности вентиляции АВМ и недостаточного количества смазки в подшипниках.

## 4 РЕКОМЕНДУЕМАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1 Изменения конструкции и системы обслуживания асинхронных вспомогательных машин грузовых электровозов переменного тока

На электровозах грузового движения, эксплуатируемых на Восточном полигоне, ежедневно наблюдается два и более отказов АВМ. Для предотвращения отказов АВМ АНЭ225 и НВА55 на грузовых электровозах ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К и 4ЭС5К Восточного полигона, предусмотрен ряд изменений в их конструкции и системе обслуживания. Одним из предложенных усовершенствований является модификация системы радиальной вентиляции, чтобы обеспечить эффективное удаление тепла во всех режимах работы двигателей АНЭ225 и НВА55.

Симметрирование конструкции АВМ относительно вертикальной оси машины. Это обеспечит равные аэродинамические сопротивления воздухопроводов левой и правой сторон машины.

Для предотвращения разворота струи слабого вентилятора воздушного потока в обратном направлении предлагается использовать вентиляцию симметрично-радиального исполнения с одинаковой производительностью вентиляторов. Этому способствуют пропускание охлаждающего воздуха через сечения с обеих сторон АВМ равной величины, имеющих одинаковое аэродинамическое сопротивление.

Рациональным выполнением воздухопроводов уменьшить полное аэродинамическое сопротивление АВМ с  $Z_{\Sigma} = 353$  до 189. Для этого необходимо:

1. увеличить длину корпуса АВМ:

– увеличить размеры корпуса на 60 мм (30 мм вправо и влево от вертикальной оси двигателя);

- без смещения подшипниковых узлов установить на указанные расстояния подшипниковые щиты;
- сместить патрубки воздухопроводов на 30 мм вправо и влево;
- сместить на 30 мм вправо и влево камеры для входа охлаждающего воздуха;
- увеличить длину продольных ребер корпуса на 30 мм вправо и влево.

2 увеличить сечение выхода вентилирующего воздуха из АВМ на 38 %. При этом выходное сечение воздухопровода будет больше входного, уменьшается аэродинамическое сопротивление выхода, исключается обратный поток воздуха;

3 ширину радиальных вентиляционных лопаток увеличить с 50 до 70 мм, а длину с 38,5 до 55мм.

При этом обеспечивается производительность АВМ  $0,235 \text{ м}^3/\text{с}$ , что позволяет удалять тепло от потерь во всех режимах работы, включая несимметричные, повысить теплоотдачу ротора и, соответственно, уменьшить температуру ротора и подшипников, компенсировав в тепловом отношении отсутствие вентиляционных каналов в роторе и статоре.

Для исключения обратных потоков воздуха следует использовать вентиляцию радиального типа с прямоугольными вентиляционными лопатками ротора. Это будет способствовать выравниванию давления вентилирующего воздуха на всей ширине лопаток. Рекомендуется использовать 18 вентиляционных лопаток ротора для достижения максимальной производительности вентилятора.

Для обеспечения безотказной работы контактов роликов (шариков) – кольца подшипников двигателей АНЭ225 и НВА55 в режиме качения, рекомендуется использовать пластичную смазку Буксол. Эта смазка должна иметь испаряемость 1,5 % при температуре  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  и нагревостойкость до  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Увеличить количество смазки Буксол в подшипниках, обеспечивающее их постоянную работу в режиме качения в летний период эксплуатации из расчета  $3,7 \text{ кг} / 600 \times 10^3 \text{ км}$  на всех направлениях Восточного полигона, так и в зимний период эксплуатации  $2,03 \text{ кг} / 600 \cdot 10^3 \text{ км}$  на центральном направлении Мариинск-Ванино (Партизанск) и  $1,38 \text{ кг} / 600 \cdot 10^3$  на северном направлении Таксимо –

Тайшет (350 г. – при смене, 300 г. – при пополнении). Всего  $350 + 300 \times 5 = 1850$  г. на 1 подшипник. Тогда на 2 подшипника 3700 г.

Увеличить вместимость подшипниковых камер двигателей АНЭ225 и НВА55, с тем чтобы можно было заправить  $2/3$  объема обеих камер как с правой, так и с левой стороны, с заправкой не менее 350 граммов смазки в каждую камеру. Это замена используемых подшипниковых камер, которые заполняются смазкой в количестве 120 граммов для шариковых подшипников и 70 граммов для роликовых.

Перенести маслопроводы для подачи смазки и выхода отработанной смазки в корпус подшипникового узла.

Пробить забитые маслопроводы с использованием пресс-дозаторов, при невозможности очистки маслопроводов – заменить на новые.

Конструкция подшипниковых узлов должна допускать замену (смену) и пополнения смазки без разборки двигателя.

Замену (смену) смазки производить при ТРЗ, СР, КР, заправляя по 350 г. смазки в каждый подшипниковый узел как с правой, так и левой стороны АВМ.

Пополнение смазки в подшипниковых камерах должно выполняться каждые 100 000 километров пробега электровоза, при каждом втором ТР1. В каждый подшипниковый узел следует заправлять по 300 граммов смазки как с правой, так и с левой стороны АВМ. Для точного дозирования количества смазки по количеству перемещений рукоятки шприца следует использовать специальный шприц. Как смену так и пополнения смазки производить до выхода свежей смазки из нижнего отверстия, для отработанной смазки.



## **4.2 Подсистема контроля увлажнения и степени износа изоляции статорных обмоток асинхронных вспомогательных машин**

Результаты проведенного исследования безотказности АВМ показали, что на отказы статорных обмоток приходится значительная часть повреждений. Установлено, что нередко пробой изоляции вызван резким снижением уровня электрической прочности изоляции при её переувлажнении. Максимальное число пробоев изоляции АВМ наблюдается на направлениях с длительным временем нахождения ЭПС в отстое, особенно в продолжительный зимний период, при температуре воздуха минус 48 – 50 °С и ниже.

АВМ с состарившейся (изношенной) изоляцией имеют наибольшую степень увлажнения изоляции, как по скорости увлажнения изоляции, так и по массе накопленной влаги [16, 27, 30].

Максимальный параметр потока отказов наблюдается на северном направлении Таксимо – Тайшет у АВМ АНЭ225, НВА55 электровозов ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К локомотивного депо Вихоревка. Параметр потока отказов АВМ в зимний период в 9,1 раза превышает аналогичный показатель для электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К депо Хабаровск, эксплуатируемых на направлении Карымская – Находка (Владивосток) Восточного полигона.

Для обеспечения необходимого уровня безотказности ТЭД и АВМ предлагается комплексная подсистема, предназначенная для контроля увлажнения изоляции двигателей. Состояние изоляции отслеживается за счёт контроля абсорбции и емкостных характеристик изоляции по методу «ёмкость – время». Эта подсистема защищена патентом [52] (Приложение В), она специализирована на определение электрических свойств силового оборудования, особенно – на контроле степени увлажнения изоляции, не только тяговых, но и вспомогательных электродвигателей.

На современных электровозах переменного тока ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К отсутствует контроль влажности изоляции АВМ, что не позволяет



Подсистема контроля увлажненности и степени износа (ПСКУ) изоляции обмоток АВМ электровоза 2ЭС5К включает пять блоков.

– Блок 1 представляет собой прибор контроля поверхностной влажности изоляции МІС-500. Оператор с помощью этого прибора измеряет коэффициент абсорбции  $K_a$ , который указывает на величину поверхностного увлажнения изоляции статорных обмоток. Результаты измерений, включая дату, номер электровоза, АВМ и значения  $K_a$ , сохраняются во внутренней энергонезависимой памяти объемом 990 результатов.

– В блоке 2 электротехнический оператор использует прибор контроля влажности [52] для измерения объемного увлажнения изоляции статорных обмоток. Результаты измерений, включая дату, номер электровоза и значение объемного увлажнения в виде отношения абсорбционной и геометрической ёмкости  $(\Delta C/C_T)_i$ , записываются в память прибора.

– В блоке 3 оператор использует термометр «Кельвин» с инфракрасным способом измерения температуры изоляции обмоток  $T^\circ$  асинхронных вспомогательных машин электровоза, полученные значения:  $K_{a_i^\circ C}$ ,  $(\Delta C/C_T)_{i^\circ C}$  и  $T^\circ$  с из блоков 1-3 сохраняются во внутренней энергонезависимой памяти объемом 1000 результатов, а также подаются на следующие блоки.

– Блок 4 пересчета коэффициента абсорбции  $K_{a_i^\circ C}$  при температуре в момент измерения, соответствующей температуре  $20^\circ C$ .

– Блок 5 пересчета отношения абсорбционной и геометрической ёмкости при температуре в момент измерения на  $(\Delta C/C_T)_{20^\circ C}$ , соответствующей температуре  $20^\circ C$ .

Результаты, полученные при пересчёте коэффициентов абсорбции  $K_{a_{20^\circ C}}$  изоляции электровоза и отношений абсорбционной и геометрической ёмкости,  $(\Delta C/C_T)_{20^\circ C}$ , отправляются на компьютер.

Как показали результаты исследования величина объемного увлажнения, определяемая устройством, с достаточной достоверностью характеризует степень износа изоляции статорных обмоток АВМ. Предложена классификация величины

объемного увлажнения  $\Delta C/C_T$  (степени износа изоляции) с разделением на пять классов:

- |  |  |
|--|--|
| 1 класс $\Delta C/ C_T$ от 0 до 0,099;   | 4 класс $\Delta C/ C_T$ от 0,3 до 0,399;         |
| 2 класс $\Delta C/ C_T$ от 0,1 до 0,199; | 5 класс $\Delta C/ C_T$ от 0,4 до 0,499 и более. |
| 3 класс $\Delta C/ C_T$ от 0,2 до 0,299; |  |

При выполнении диссертации установлено, что использование АВМ со статорными обмотками 4 и 5 классов износа изоляции в зимний период на северном направлении Таксимо – Тайшет Восточного полигона, приводит к их пробую. Поэтому все АВМ с изоляцией этих классов износа должны проходить пропитку изоляции статорных обмоток в объеме среднего ремонта или капитального ремонта перед зимним периодом эксплуатации.

#### **4.3 Подсистемы температурного контроля асинхронных вспомогательных машин**

Как установлено в 1-3 разделах существенное число отказов электровозов переменного тока Восточного полигона обусловлено повреждениями асинхронных вспомогательных машин. Анализ результатов испытаний асинхронных вспомогательных машин на стендах и в эксплуатации свидетельствуют о том, что нередко эти повреждения вызваны интенсивным старением изоляции обмоток из-за чрезмерных перегревов вследствие существенной несимметрии напряжения и тока по фазам и неполным удалением тепловой энергии от потерь вентиляцией. У электровозов переменного тока наибольшее число отказов АВМ приходится на электрические машины привода компрессоров и вентиляторов, охлаждающих ВИП, тяговые электрические машины (ТЭМ) и сглаживающие реакторы (СР). Для повышения безотказности АВМ и предотвращения пожаров из-за перегрева элементов АВМ используется подсистема контроля температуры. Данная подсистема основана и построена на

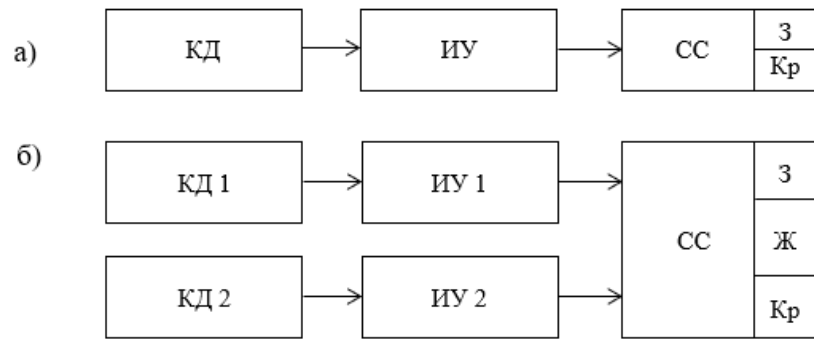
принципах непрерывности, многокоординатности, многоуровневости [13, 16]. Принцип непрерывности предполагает постоянный или периодический контроль температуры ключевых элементов оборудования, чтобы своевременно обнаруживать перегрев. Многокоординатность направлена на контроль температуры наиболее важных узлов АВМ, включая обмотки ротора, статора и подшипниковые узлы. Это позволяет оперативно реагировать на угрозы и предотвращать повреждения или преждевременный износ АВМ. Многоуровневость направлена на прогнозирование изменения температуры с течением времени, а также на меры по избежанию сбоев в работе и сохранения работоспособности элементов АВМ.

Изучение различных методов и средств контроля температуры в эксплуатации электровозов переменного тока показало, что для контроля температура в наибольшей степени подходят следующие элементы [73-77]:

- биметаллические регуляторы и тепловые реле;
- диоды и транзисторы;
- термосопротивления из полупроводника, имеющие отрицательный температурный коэффициент;
- термосопротивления из металла, которые имеют линейную зависимость сопротивления от температуры;
- позисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления.

Нагрев обмотки ротора АВМ эффективно контролировать методом косвенного измерения по величине температуры подшипникового узла. Температуру статорной обмотки АВМ рационально контролировать методом прямого непосредственного измерения.

На рисунке 4.2 а, б представлены элементы непрерывной системы контроля температуры, которые включают комплекс датчиков-позисторов (КД), изменяющих сопротивление в зависимости от температуры объекта.



**Рисунок 4.2 – Схемы подсистем температурного контроля АВМ двухуровневая (а) трехуровневая (б)**

В системе контроля температуры есть несколько элементов, в двухуровневой подсистеме используются датчики-позисторы, которые подают сигналы, зависящие от величины температуры объекта. Зелёный светодиод загорается в световой сигнализации, если температура контролируемой АВМ находится в пределах допустимого уровня и общее сопротивление позисторов не превышает заданное значение. Эти условия проверяются с помощью сигналов измерительного устройства (ИУ), входящего во встроенную тепловую защиту (УВТЗ).

При превышении температуры узла АВМ допустимого уровня  $\vartheta_{\text{доп}}$ , сопротивление позисторов увеличивается, что приводит к срабатыванию световой сигнализации – на табло гаснет зелёный и начинает светиться красный (Кр) светодиод. При этом локомотивная бригада, получившая информацию о превышении температуры узла, принимает меры для устранения причин перегрева или отключения предаварийной АВМ.

Трехуровневая подсистема (рисунок 4.2 б) использует дополнительный комплекс датчиков и соответствующие схемы сигнализации КД1, ИУ1, СС (З, Ж), которые контролируют предварительный перегрев. Температурная уставка предварительного перегрева  $\vartheta_{\text{пр}}$  на 15 °С меньше допустимого уровня  $\vartheta_{\text{доп}}$ . Когда температура АВМ приближается к уровню предварительного перегрева, сопротивление позисторов первого комплекса (КД1) увеличивается и срабатывает световая сигнализация – на табло гаснет зелёный и начинает светиться жёлтый

(Ж) светодиод. После приближения температуры АВМ к предельно допустимому значению сопротивление позисторов второго комплекса (КД2) увеличивается, срабатывает измерительное устройство (УИ2), воздействуя на схему световой сигнализации – на табло гаснет жёлтый и начинает светиться красный светодиод. Локомотивная бригада, получившая информацию о превышении температуры узла, принимает меры для устранения причин перегрева или отключения предаварийной АВМ.

#### **4.4 Схема подсистемы контроля температуры асинхронных вспомогательных машин электровозов переменного тока 2ЭС5К**

На рисунке 4.3 приведена схема подсистемы контроля температуры для электровоза 2ЭС5К, которая получает питание с выводов С17 – С6 обмотки собственных нужд тяговых трансформаторов через разделительные трансформаторы Т40, Т41 типа ОСО-0,25, подающих напряжение 220 В для устройств контроля температуры (УТК1, УТК2, УТК3, УТК4, УТК5, УТК6, УТК7, УТК8). Затем переменное напряжение 33 В выпрямляется с помощью мостовых однофазных выпрямителей U97 и U98. После цепь световой сигнализации перегрева (VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6, VD7, VD8, VD9, VD10, VD11, VD12) со светодиодами АЛ307БМ. Для ограничения тока и увеличения долговечности светодиодов, в цепь световой сигнализации введены сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ . Каждое устройство контроля температуры отслеживает температуру статорной обмотки, роторной обмотки и подшипников одной АВМ. Температуру контролируют терморезисторы (позисторы) RK1-RK40 типа MZ73-20 и MZ73-18RM270 с температурой срабатывания, соответственно, 160 и 80 °С.

ПН37– предохранители (плавкие вставки)  $U = 220$  В,  $I_n = 0,5$  А;

Т40, Т41– трансформаторы разделительные типа ОСО-0,25 220/220/36 – 60 ВА;

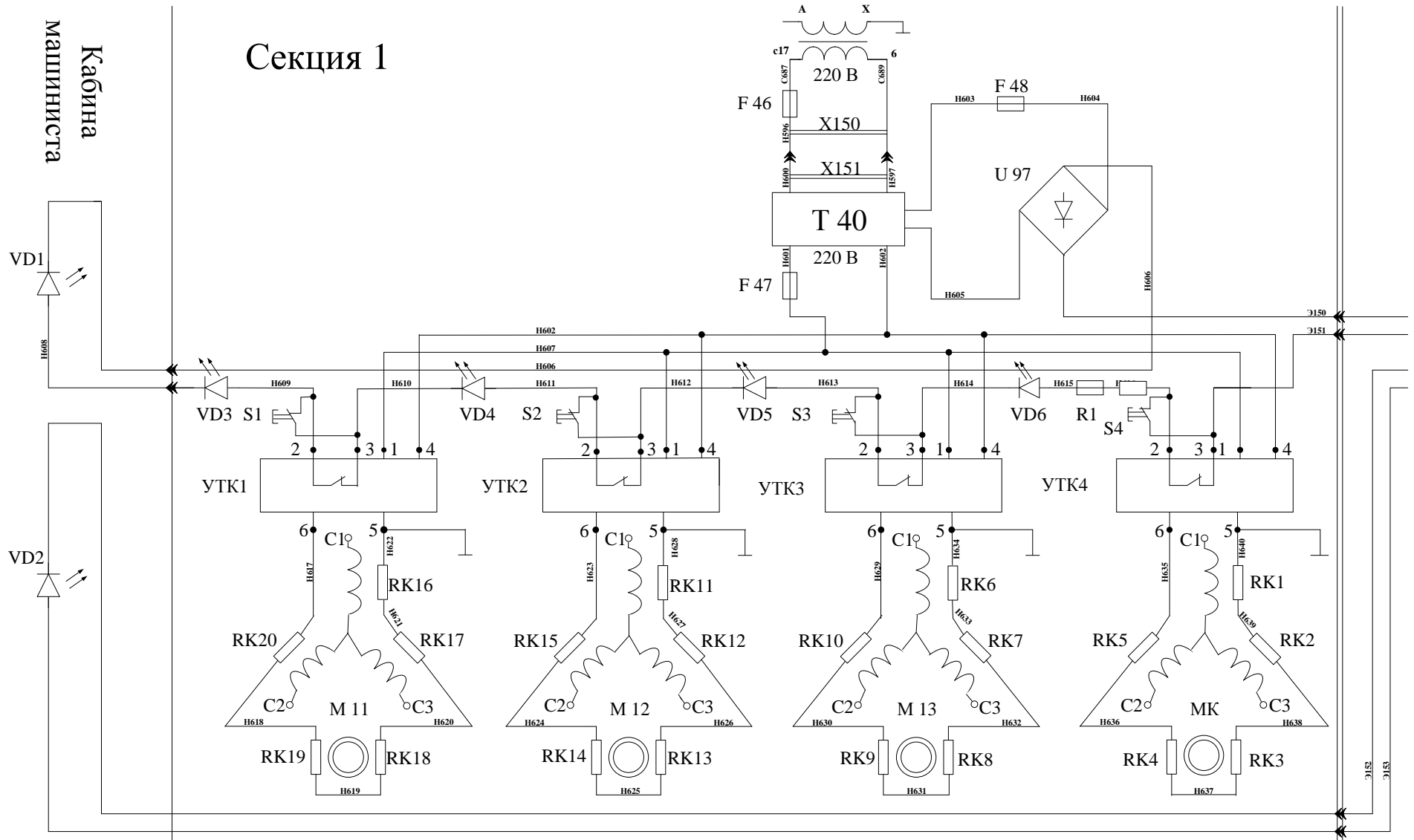


Рисунок 4.3 – Схема подсистемы контроля температуры АВМ секции электровоза 2ЭС5К



U97, U98 – диодные мосты типа 2W10M;

VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6, VD7, VD8, VD9, VD10, VD11, VD12 – светодиоды АЛ307БМ:  $I_n = 0,01 \text{ А}$ ;  $R_n = 300 \text{ Ом}$ ;

RK1, RK2, RK5, RK6, RK7, RK10, RK11, RK12, RK15, RK16, RK17, RK20 (секция 1) – терморезисторы MZ73-20 – 160 (температура срабатывания 160 °С) – для контроля нагрева статорной обмотки;

RK3, RK4, RK8, RK9, RK13, RK14, RK18, RK19 (секция 1) терморезисторы типа MZ73-18RM270 (температура срабатывания 80 °С) – для контроля нагрева ротора и подшипникового узла;

R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – балластное сопротивление МО-200 (С2-23):  $R_n = 1,5 \text{ кОм}$ ,  $P = 2 \text{ Вт}$ ;

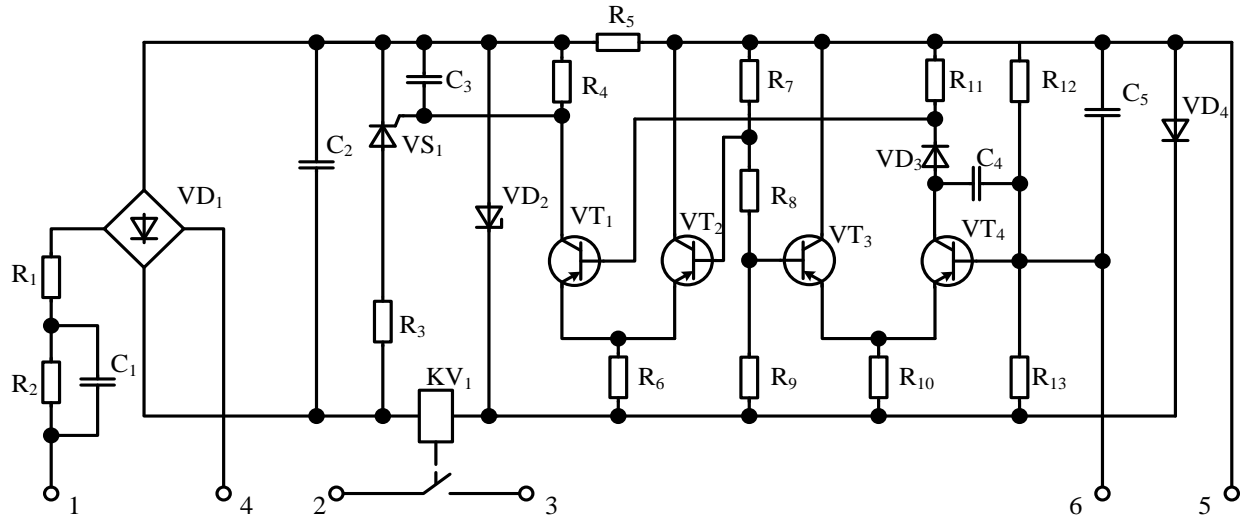
S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8 – нажимные кнопочные выключатели с контактом 36-3053 PBS-33В замыкающего типа;

M11, M12, M13, МК (секция 1 и 2) – АВМ НВА55;

УТК1, УТК2, УТК3, УТК4, УТК5, УТК6, УТК7, УТК8 – устройство УВТЗ-1М контроля температуры.

#### 4.5 Работа исполнительного устройства (УВТЗ-1М)

УВТЗ-1М имеет три основных компонента (рисунок 4.4): узел питания, усилитель и выходной исполнительный элемент. Узел питания включает в себя компоненты, такие как: конденсатор (C<sub>1</sub>), выпрямительный мост (VD<sub>1</sub>), фильтр (C<sub>2</sub>), активные сопротивления (R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>5</sub>). Они используются для ограничения тока и разряда конденсатора при отключении устройства от источника питания (выводы 1-4). Усилитель сигнала датчиков осуществляется транзисторами (VT<sub>1</sub>, VT<sub>2</sub>, VT<sub>3</sub>, VT<sub>4</sub>) – выводы 5-6. С коллектора транзистора сигнал передается на управляющий электрод тиристора VS<sub>1</sub>, контролирующей работу выходного исполнительного элемента KV<sub>1</sub>.



**Рисунок 4.4 – Схема УВТЗ-1М**

При обрыве цепи датчика сигнал не поступает на транзистор  $VT_4$ , поэтому он закрывается. Транзистор  $VT_1$  и тиристор  $VS_1$  также закрываются, что приводит к размыканию контакта  $KV_1$ . При коротком замыкании цепи датчика сигнал с датчика поступает напрямую на транзистор  $VT_4$ , открывая его. Транзистор  $VT_1$  и тиристор  $VS_1$  остаются закрытыми, контакт  $KV_1$  остается замкнутым. Таким образом, схема УВТЗ-1М обеспечивает контроль и защиту объекта от неблагоприятных условий, таких как низкая или высокая температура, обрыв или короткое замыкание цепи датчиков.

#### **4.6 Принцип работы подсистемы температурного контроля асинхронных вспомогательных машин электровозов**

Перед поездкой локомотивная бригада проверяет работу системы температурного контроля асинхронных вспомогательных машин. Если система работает нормально, светодиоды в кабинах машиниста и торцевых коридорах секции горят зеленым светом. Во время движения машинист и помощник машиниста следят за состоянием системы по цветовому показанию световых табло кабины управления.

УТК активируется, если температура элементов АВМ достигает предельного значения по какой-либо причине. При срабатывании УТК происходит отключение светодиодов VD1, VD2 в кабине управления первой секции и VD7, VD8 в кабине управления второй секции, а также VD3, VD4, VD5, VD6, VD9, VD10, VD11, VD12 в торцевых коридорах.

Помощник машиниста может определить, какая АВМ перегрелась, с помощью кнопок с самовозвратом S1, S2, S3, S4, расположенных в торцевой части секции. Он может последовательно включать и выключать кнопки, чтобы определить, какая из АВМ вызвала перегрев. Если же причиной срабатывания УТК явились неисправность подсистемы температурного контроля, дальнейшую эксплуатацию электровоза необходимо продолжить в штатном режиме (без контроля температуры). При отказе в работе подсистемы температурного контроля машинист должен сделать запись в журнале ТУ-152 с указанием даты, времени, места и причины повреждения.

#### **4.7 Микроконтроллерные подсистемы температурного контроля асинхронных вспомогательных машин электровозов, работающие по неизменной программе**

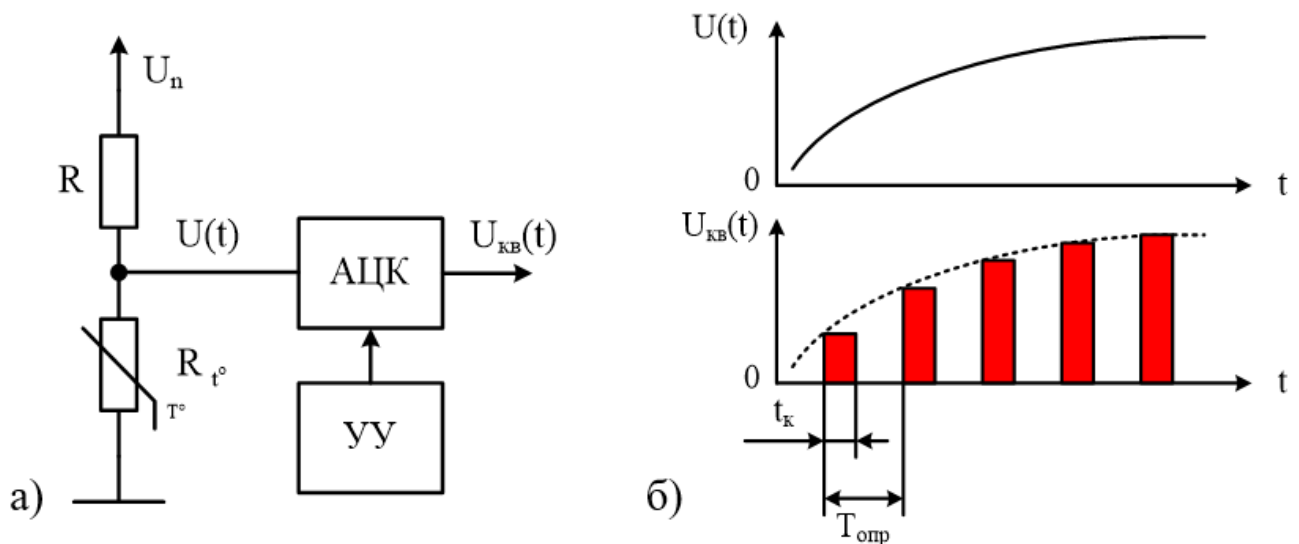
Предлагается использовать систему непрерывно-дискретного контроля температуры, которая основана на динамическом опросе температурных датчиков, встроенных в узлы АВМ. Эта система создает комплексный дискретный сигнал, который содержит информацию о температурном состоянии датчиков (сигнал модулируется по амплитуде и уровню) путем квантования по времени. Необходимо рассмотреть принцип работы этой системы более подробно.

Если принять, что на вход аналого-цифрового коммутатора (АЦК), который осуществляет квантование, поступает непрерывный сигнал  $U(t)$  от температурного датчика (рисунок 4.5 а). Квантование АЦК с помощью сигнала

устройства управления (УУ) в моменты времени, кратные периоду опроса датчика  $t=T_{\text{опр}}$ , формируются импульсы  $U_{\text{кв}}(t)$  на выходе, амплитуда которых соответствует значению входного сигнала  $U(t)$  в этот момент времени. Зависимость выходного импульсного сигнала квантователя от времени показано на рисунке 4.5 б. Операции квантователя с постоянным шагом представляют собой работу контактов, замыкающихся с периодом опроса в течение времени  $t$ . Входное напряжение описывается выражением.

$$U(t) = I \cdot R_{t^{\circ}\text{C}}, \quad (4.1)$$

где:  $R_{t^{\circ}\text{C}} = f(t^{\circ})$  – сопротивление датчика АВМ полупроводникового типа при изменении температуры корпуса, Ом.



а – поступление непрерывного сигнала от датчика температуры;  
б - выходной импульсный сигнал квантователя по времени

**Рисунок 4.5 – Работа подсистемы контроля температуры**

Работа всей системы зависит от формы импульса на выходе. Однако для оценки используется амплитуда импульса, поэтому можно уменьшить площадь импульса или  $t_k$  таким образом, чтобы выполнялось заданное неравенство.

$$T_{\text{min}} < t_k, \quad (4.2)$$

где:  $T_{\min}$  – минимальная постоянная времени передаточной функции непрерывной части устройства для сравнения амплитуды напряжения  $U_m$  импульса  $t_k$  с заданным образцовым значением напряжения  $U_{\text{обр}}$ .

$$U_{\text{кв}}(t) < U_{\text{обр}} \quad U_{\text{вых}} = 0, \quad U_{\text{кв}}(t) > U_{\text{обр}} \quad U_{\text{вых}} = 1. \quad (4.3)$$

$$W(s) = f(t, t^\circ, n), \quad (4.4)$$

где:  $W(s)$  – передаточная функция;

$n$  – число каналов, осуществляющих квантование.

Комплексный сигнал, подаваемый на вход передаточной функции:

$$U_{\text{кв}} = U(t)_1 + U(t)_2 + \dots + U(t)_n, \quad (4.5)$$

$$U(t) = \sum_{n=1}^n U(t)_n. \quad (4.6)$$

Квантование осуществляет передачу непрерывного сигнала АЦК от температурного датчика на основе сигнала управления УУ. В результате формируются импульсы  $U_{\text{кв}}(t)$  с амплитудой, соответствующей величине входного сигнала в моменты времени, кратные периоду опроса датчика  $T_{\text{опр}}$ . Контроль порогового значения температуры  $U_{\text{обр}}$  можно рассматривать как специальный способ квантования по уровню.  $U_{\text{обр}}$  является комплексным сигналом, для осуществления достаточного контроля температуры элементов АВМ. При использовании системы температурного контроля для различных приводов АВМ, в зависимости от температуры пороговое значение  $U_{\text{обр}}$  устанавливается в соответствии с номером контролируемого датчика. Таким образом, передаточная функция непрерывной части устройства сравнения определяется как.

$$W(s) = f(t, t^\circ, n, m), \quad (4.7)$$

где:  $m$  – число уровней контроля узлов АВМ (обмоток).

Переменная  $E(t)_k$  представляет совокупность управляющих сигналов АЦК. Текущий выходной импульс, сформированный устройством, содержит информацию, которая отличается от исходящего сигнала  $U_{\text{кв}}(t)$  и представлена в виде решетчатой функции  $E(t)$  с дискретными значениями сигнала  $E$  в моменты времени, кратные  $t_k$ . Это достигается благодаря использованию цифрового кода,

который отличается от кода, используемого для представления информации в выходном сигнале  $U_{\text{кв}}(t)$ .

$$E(t) = E(n, t_k), \quad (4.8)$$

$$t_k = \frac{T_{\text{опр}}}{n} \quad (4.9)$$

Данное импульсное устройство позволяет компарировать импульсные сигналы и формировать следующий выходной импульс:

$$Y = U_{\text{вых}} = E_1(n, t_k) d(t - n \cdot t_k) \quad (4.10)$$

где:  $t = T_{\text{опр}}$ .

Комплексный сигнал, квантованный по времени и уровню  $U_{\text{обр}}(t)_n$ , имеет вид:

$$\sum_{m=1}^m U(t)_m = U_{\text{кв}}(t, m), \quad (4.11)$$

где:  $m$  – число квантования по амплитуде (уровню) сигнала.

Комплексные синхронизированные по времени сигналы, которые подаются на входы схемы компарирования, приведены на рисунке 4.6.

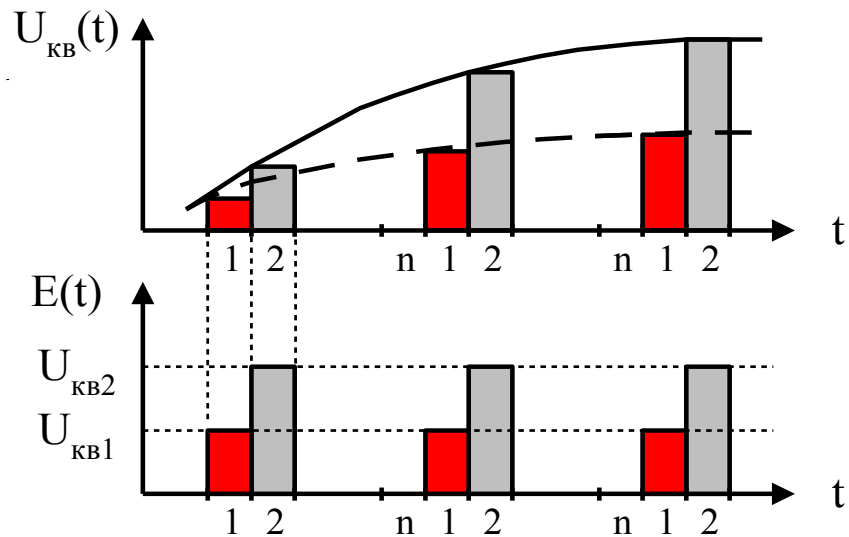
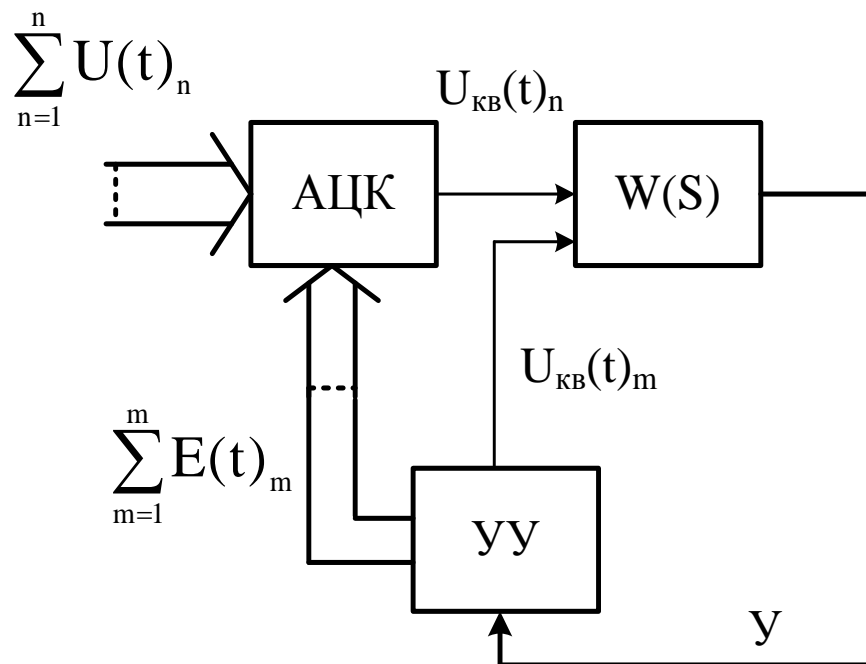


Рисунок 4.6 – Принцип работы схемы температурного контроля

Одним из преимуществ предлагаемого метода дискретного контроля датчиков температуры узлов АВМ является то, что опрос и сравнение текущих

параметров с заданными образцовыми значениями осуществляются независимо друг от друга. Это исключает возможное взаимовлияние одного из параметров. В реальности процесс аналогового сравнения циклический и имеет высокую периодичность, необходимую для надёжного контроля узлов АВМ и учёта инерции нагревательного процесса. В процессе конструирования, испытаний, изготовления и эксплуатации данный метод температурного контроля способен продлить жизненный цикл АВМ при использовании современной микроэлектроники. Подсистема обладает высокой безотказностью и её внедрение способствует существенному приросту жизненного цикла АВМ. Функциональная схема контроля температуры АВМ электровозов приведена на рисунке рисунок 4.7

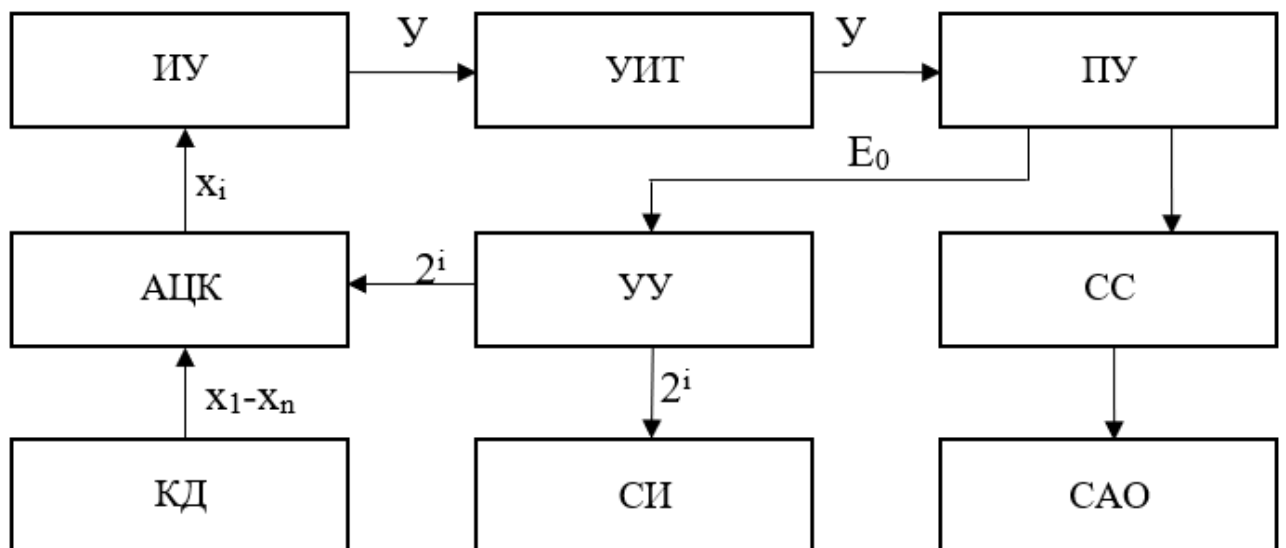


**Рисунок 4.7 – Функциональная схема контроля температуры АВМ электровозов**

Существуют различные варианты подсистем контроля температуры, которые могут быть созданы с использованием современной электроники. Одна из возможностей – это использование интегральных микросхем (ИМС) с жесткой логикой, которые могут быть малой или средней степени интеграции.

На печатных платах устанавливаются компоненты, которые соединяются согласно нужным функциональным характеристикам. Если требуется создать

подсистему температурного контроля на основе микропроцессорных комплектов или ЭВМ однокристалльного типа, следует задействовать специализированный программный софт. Чтобы достичь наилучшего результата, можно создать подсистему контроля температуры на основе автоматической жесткой логики, используя микросхемы с низкой и средней степенью интеграции. Важно выбирать электронные компоненты, которые обладают высокой безотказностью и совместимостью в условиях работы железнодорожного транспорта. Для блоков контроля температуры (рисунок 4.8) следует использовать элементы микроконтроллерной системы на основе жесткой логики.



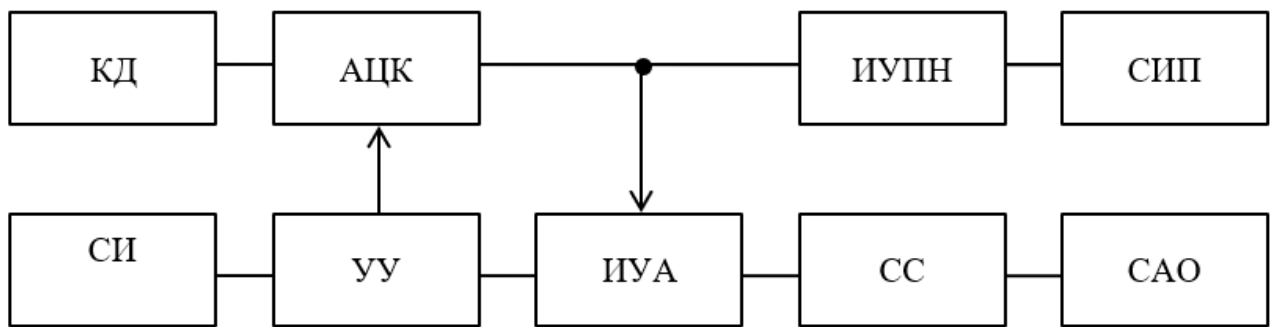
**Рисунок 4.8 – Функциональная схема подсистемы контроля температуры АВМ электровозов**

Система контроля температуры включает комплекс датчиков (транзисторов, диодов) КД, которые генерируют сигналы, отражающие температуру объекта. Эти сигналы передаются в аналого-цифровой коммутатор (АЦК), который последовательно опрашивает датчики. Выходной сигнал коммутатора, содержащий информацию о температуре, поступает на вход измерительного устройства (ИУ). Затем сигналы усиливаются и отображаются на устройстве-микроамперметре для индикации температуры (УИТ). Если температура АВМ достигает предельно допустимого значения, сработает элемент И - НЕ –



пороговое устройство (ПУ). Пороговое устройство производит амплитудную (уровневую) оценку значений выходного сигнала (составляющих АЦК). Это происходит циклически до превышения заданного эталонного значения в ПУ (при достижении предельно допустимой температуры АВМ).

При достижении предельной температуры, ПУ сигналом  $E_0$  прекращает мониторинг датчиков и активирует аварийное отключение и сигнализацию (САО и СС). САО запускает таймер, который отсчитывает время до обесточивания контактора и отключения АВМ. Если АЦК останавливается, схема индикации (СИ) сообщает локомотивной бригаде о превышении температуры элементов АВМ и необходимости принятия мер для устранения причины перегрева. Если проблема не решается в течение определенного времени, перегретый узел отключается. При снижении температуры узла до допустимого значения, его можно снова включить. Рекомендуется использовать элементы микроконтроллерной системы с термосопротивлениями для контроля температуры на электровозе 3ЭС5К (рисунок 4.9).



**Рисунок 4.9 – Функциональная схема подсистемы контроля температуры АВМ электровозов переменного тока 3ЭС5К**

Сигнал измерения напряжения  $U_{кв}$  поступает на вход компаратора предварительного нагрева (ИУПН) с температурой  $\vartheta_{пр}$ , которая равна допустимой температуре  $\vartheta_{доп}$ , уменьшенной на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Затем  $U_{кв}$  сравнивается с образцовым напряжением  $U_{прмк}$  и  $U_{прмв}$ . Сравнение повторяется до момента достижения температуры мотор-вентилятора или мотор-компрессора значения

$\vartheta_{\text{пр}}$ . Когда это происходит, выполняется неравенство  $U_{\text{кв}} < U_{\text{прмк}}$ , что приводит к загоранию светодиода МВ или МК на световом табло, подключённом к схеме информации о предварительном нагреве (СИП). Если температура мотор-вентилятора или мотор-компрессора продолжает расти до величины  $\vartheta_{\text{доп}}$ , включается измерительное устройство аварийного нагрева (ИУА), которое отправляет сигнал на АЦК.

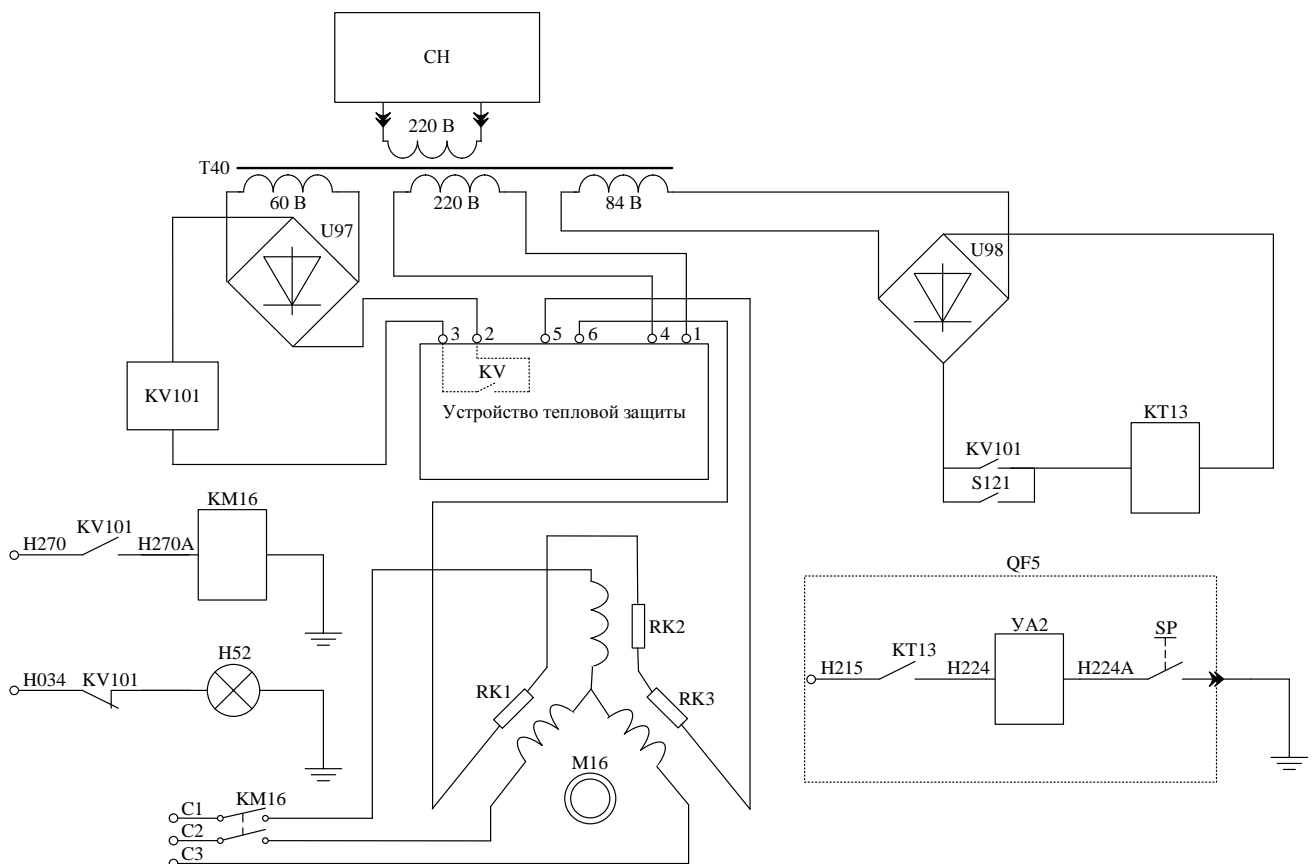
Подсистемы для контроля температуры непрерывно следят за состоянием АВМ, таких как приводные компрессоры и вентиляторы, на электровозе. Если температура приводных двигателей превышает допустимые значения, подсистема контроля температуры предупреждает локомотивную бригаду. Использование подсистем температурного контроля позволяет существенно снизить тепловое старение изоляции статоров, исключить выплавление обмоток роторов, заклинивание подшипников АВМ. При разработке подсистемы использовались источники [78-86]. Схемы и алгоритм работы микроконтроллерной подсистемы температурного контроля, функционирующей по неизменной программе, приведены в Приложении А.

#### **4.8 Подсистема температурного контроля, исключающая перегрев статорных обмоток приводных электрических машин компрессоров электровозов ВЛ85 при сваривании силовых контактов электромагнитного контактора**

В разделе 1 было отмечено, что часто возникают многочисленные случаи сварки контактов электромагнитных контакторов в одной из фаз. Наиболее часто это имеет место у электромагнитных контакторов электрических машин привода поршневых компрессоров. При этом несмотря на срабатывание тепловых реле и потерю питания электромагнитным контактором, включающим и выключающим

электрическую машину, трехфазная асинхронная машина работает как однофазная с значительной перегрузкой двух фаз. В большинстве подобных случаев отмечается перегрев и возгорание статорной обмотки АВМ [13, 14, 16, 32]. Предлагается ПСТК, которая при сварке контактов электромагнитного контактора АВМ привода компрессора отключает главный выключатель (ГВ) секции (рисунок 4.10).

Схема ПСТК, в которой датчиками температуры являются позисторы MZ73-20, питается через разделительный трансформатор Т40. Питающее напряжение 220 В подается к устройству тепловой защиты (зажимы 1 и 2).



*CH* – источник стабилизированного напряжения 220 В; *T40* – трансформатор 220/220/60/84-75; *U98, U97* – диодный мост; *KV101* – контактор, включающий питание двигателя компрессора *M16*; *H52* – электролампа *PH-55-15*; *RK1, RK2, RK3* – позисторы; *KT13* – реле времени *ВЛ-50У3*; *S121* – тумблер *ПТ26-1*; *QF5* – главный выключатель *ВОВ-25А-10/400*

**Рисунок 4.10 – Схема ПСТК ускоренного отключения главного выключателя секции электровоза с предаварийным АВМ привода компрессора**

Позисторы с помощью теплопроводящей пасты КПТ введены в обмотки статора двигателя – по одному в каждой фазе. Соединенные последовательно проводами типа ПС-1000 (сечение 1,5 кв. мм) позисторы подключаются к клеммам 6 и 5 устройства. При нормальной рабочей температуре обмоток АНЭ225 контакт реле KV устройства замкнут. При увеличении температуры одной из фаз обмотки до предельно допустимого значения в несколько раз возрастает сопротивление введенного в обмотку позистора. Устройство тепловой защиты срабатывает и размыкается контакт реле KV. Прерывается цепь питания KV101 от выпрямителя U97. Контакт KV устройства введён в цепь питания реле KV101 с помощью зажимов 3 и 2. Выпрямитель U97 подсоединён к вторичной обмотке напряжением 60 В трансформатора Т40. При этом контакт KV101 прерывает питание катушки контактора KM16. Двигатель АНЭ225 отключается от питающей сети, чем исключается перегрев и возгорание его обмоток (Приложение А).

Одновременно замыкается контакт реле KV101 в цепи питания сигнальной электролампы Н52 «Перегрев МК», установленной в кабине машиниста, и размыкается контакт этого же реле в цепи питания реле времени КТ13 от выпрямителя U98. При загорании электролампы «Перегрев МК» помощник машиниста из коридора секции осматривает отключивший контактор МК16 и, убедившись в его исправности, включает тумблер S121, шунтирующий блокировку реле KV101 в цепи питания реле времени КТ13. Если тумблер S121 не будет включён, то по истечении 60 с (время задержки реле КТ13) контакт реле времени прервёт цепь питания удерживающей катушки УА2 главного выключателя и вызовет его отключение. Снятие напряжения цепи вспомогательных машин при этом исключит чрезмерный перегрев обмоток двигателя компрессора вследствие работы в однофазном режиме при неполном выключении контактора KM16 из-за сварки контактов в одной из фаз.

#### **4.9 Изменение алгоритма включения разгрузочных клапанов для обеспечения безотказности асинхронных вспомогательных машин НВА55С приводов высокоскоростных компрессоров электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К**

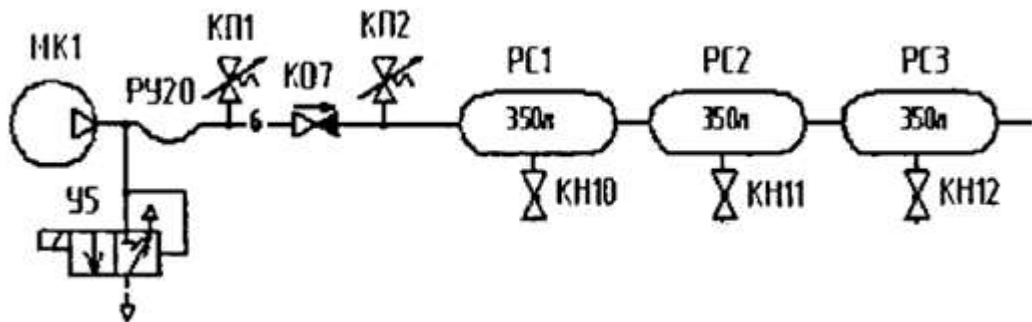
В разделах 1 и 2 установлена недостаточная безотказность АВМ НВА55 электровозов переменного тока 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К. Наибольшее количество отказов приходится на приводные двигатели главных высокоскоростных компрессоров типа ВУ 3,5/10 (В – высокоскоростной, У – усовершенствованный, 3,5 – производительность компрессора, м<sup>3</sup>/мин, 10 – максимальное рабочее давление компрессора, кгс/см<sup>2</sup>). В связи с этим рассмотрены конструктивные особенности и условия эксплуатации АВМ. Асинхронные вспомогательные машины НВА55С с медной обмоткой ротора имеют уменьшенные пусковые моменты на 22,1 % и максимальные моменты на 22,5 %, по сравнению с АВМ НВА55, имеющими алюминиевые роторы. Снижение пускового момента приводит к затягиванию пуска и, как следствие этого, к увеличению тепловыделения во время пуска. На рисунке 4.11 представлен фрагмент пневматической схемы головной секции электровоза 2ЭС5К.

По действующему алгоритму разгрузочный клапан У5 открывался и выпускал сжатый воздух в атмосферу с участка напорной магистрали между компрессором МК и обратным клапаном КО7 в течение короткого времени: в течение 1,5 с после пуска МК и в течение 3 с после отключения МК. В остальное время У5 был закрыт. При неисправности обратного клапана КО7 сжатый воздух через неплотности обратного клапана поступал из главных резервуаров к компрессору и заполнял участок напорной магистрали между компрессором и обратным клапаном КО7. Последующий пуск с противодействием при существенно повышенном сопротивлении разгону вала электродвигателя приводил к затягиванию пуска. Это повышало нагрузку на валу электродвигателя с

увеличенным временем воздействия многократно повышенного пускового тока на узлы приводного двигателя НВА55С компрессора. Многократные затяжные пуски МК приводили к частым отказам двигателей НВА55С с повреждениями изоляции статорных обмоток, а также со следами перегрева роторов.

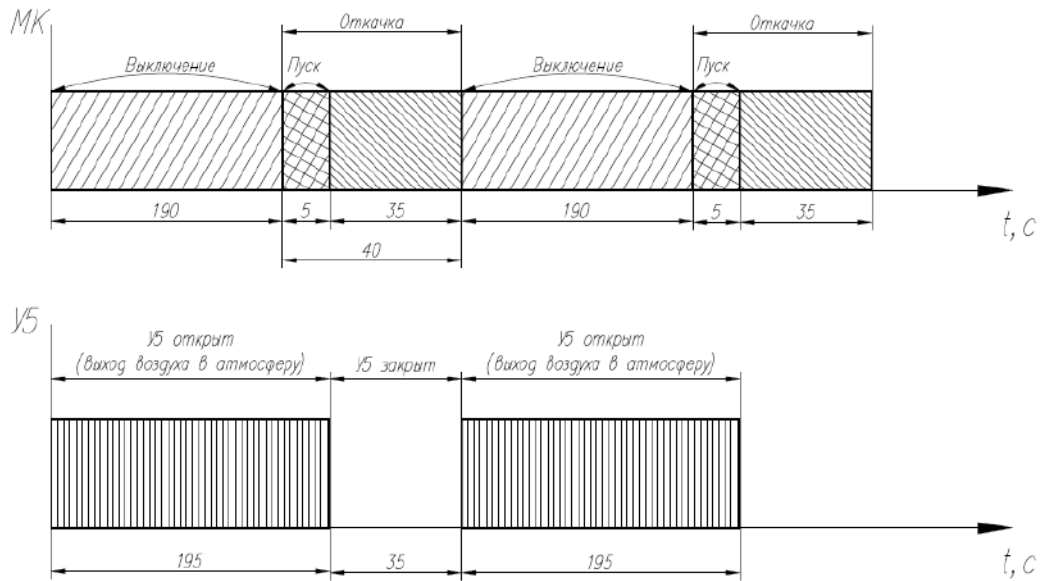
Для облегчения пуска МК предложен следующий алгоритм включения разгрузочного клапана У5, приведенный на рисунке 4.12.

Когда давление сжатого воздуха в главных резервуарах (питательной магистрали) падает до значения  $0,75 \text{ Мпа} \pm 0,02 \text{ МПа}$  ( $7,5 \text{ кгс/см}^2 \pm 0,02 \text{ кгс/см}^2$ ) срабатывает датчик-реле давления SP6, который своими замыкающими контактами создаёт цепь на вход блока А2, разъем Х10, блок А3 и включает контакторы КМ14. В результате компрессоры запускаются, а разгрузочные клапаны У5, подключенные проводом Н272 к выходу блока А3 через разъем Х14:9, закрываются. Это прекращает связь цилиндров компрессора с атмосферой через 5 секунд после включения контактора КМ14.



МК-1 – компрессор ВУ 3,5/10; У5 – разгрузочный клапан; РУ20 – рукав гибкий;  
 КП1, КП2 – клапаны предохранительные; КО7 – клапан обратный;  
 РС1, РС2, РС3 – главные резервуары сжатого воздуха;  
 КН10, КН11, КН12 – разобщительные краны

**Рисунок 4.11 – Фрагмент пневматической схемы  
 головных секций электровозов 2ЭС5К**



**Рисунок 4.12 – Усовершенствованный алгоритм включения разгрузочного клапана У5**

По результатам апробации данное изменение алгоритма включения разгрузочного клапана У5 после подконтрольной эксплуатации, показавшей эффективность изменения алгоритма работы У5, существенно уменьшившей число отказов АВМ НВА55С, внедрена на электровозах 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К депо: Карталы, Лянгасово, Иланская, Чита, Хабаровск, Смоляниново РЖД. Соответствующие изменения алгоритма работы разгрузочного клапана У5 внесены в конструкторскую документацию на электровозы 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К производства ООО «ПК НЭВЗ».

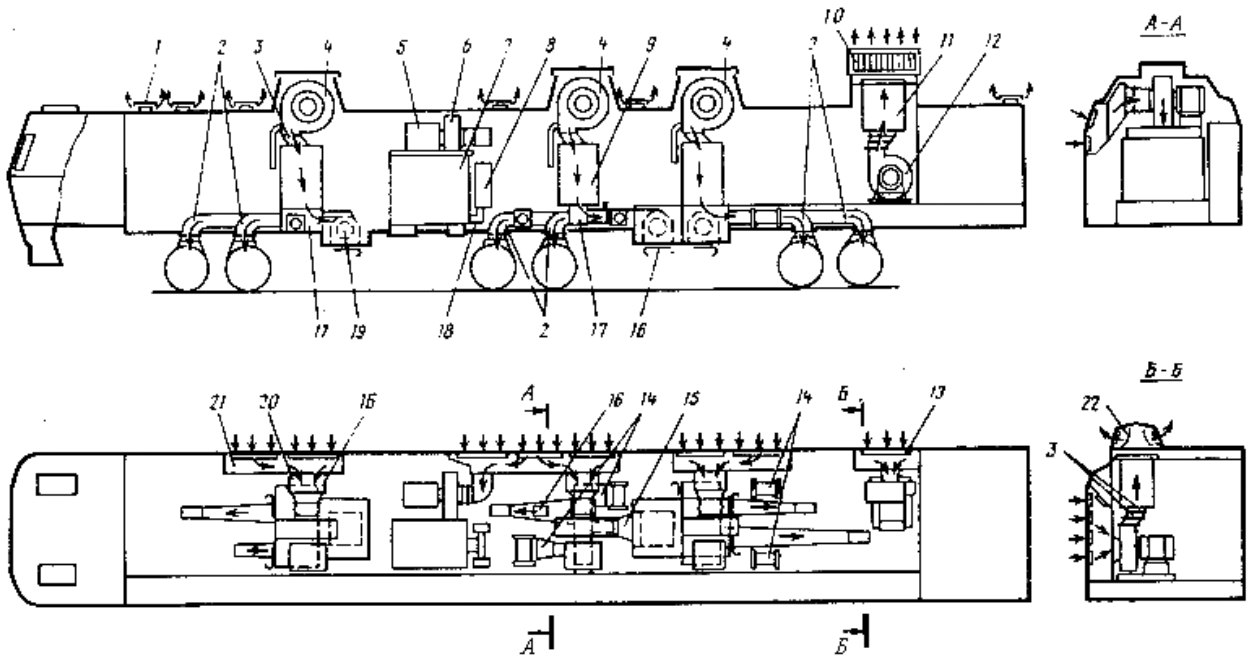
#### **4.10 Методика определения мощности асинхронных вспомогательных машин и интенсивности вентиляции оборудования электровозов**

Определение мощности АВМ и интенсивности вентиляции электровоза по методике, разработанной при исследовании, необходимо выполнять два раза в году при переводе электровоза с летних условий эксплуатации на зимние и

наоборот. Цель испытания – выявление причин чрезмерного увеличения мощности МВ, вследствие нарушений в регулировке вентиляции и (или) эксплуатации подшипников в режиме «сухого» скольжения из-за отсутствия смазки в контакте ролики (шарики) – кольца подшипников, а также МК. Причины возникновения указанных проблем включают повреждения масляных насосов, обратное вращение двигателей из-за смены фаз приводных двигателей НВА55 и АНЭ225, обрывы питания и повреждения разгрузочных клапанов, а также эксплуатацию баббитовых подшипников компрессоров без смазки.

Перед тестированием электровоза ВЛ85 вентиляционную систему переводят в летний режим: демонтируют снегозащитные шторы, закрывают рециркуляционные отверстия и переключают заслонки в летнее положение (рисунок 4.13) [5]. Измерение характеристик вспомогательных машин грузового электровоза переменного тока ВЛ85 проводится в соответствии с рисунком 4.14. Для измерения фазного тока АВМ используется трансформатор тока Т40 (УТТ-5) (рисунок 4.15) [5]. Вторичная обмотка Т40 подключается к измерительному комплексу К-506 с помощью проводов ПС-1000 (сечение 1,5 кв. мм). Шины С8 и С9, которые обеспечивают питание АВМ, соединяются с комплексом К-506 с помощью проводов ПС-1000 (сечение 1,5 кв. мм). На секции отключаются мотор-насос, мотор-вентиляторы и мотор-компрессор. После подъёма токоприемника и включения главного выключателя производится запуск фазоразщепителя и компрессора, с измерением мощности, потребляемой фазоразщепителем, после отключения компрессора.





- 1 – дефлектор; 2 – воздуховоды к тяговым двигателям; 3 – патрубок переходный; 4 – вентилятор ЦВВ89-15 №8,2 (МВ1, МВ2, МВ3); 5 – двигатель вентилятора; 6 – вентилятор Ц8 - 19 №6,5 (МВ4); 7 – тяговый трансформатор; 8 – выпрямительная установка возбуждения (ВУВ); 9 – преобразователь ВИП-4000; 10 – колпак ББР; 11 – блок стабилизирующих резисторов; 12 – вентилятор Ц8-19 №7,6 (МВ5); 13 – жалюзи; 14 – воздуховоды к индуктивным шунтам; 15 – воздуховод к сглаживающему реактору; 16 – регулировочная заслонка; 17 – воздухораспределительная камера; 18 – воздуховод к ВУВ; 19 – реактор сглаживающий; 20 – малая форкамера; 21 – большая форкамера; 22 – снегоотбойный лист

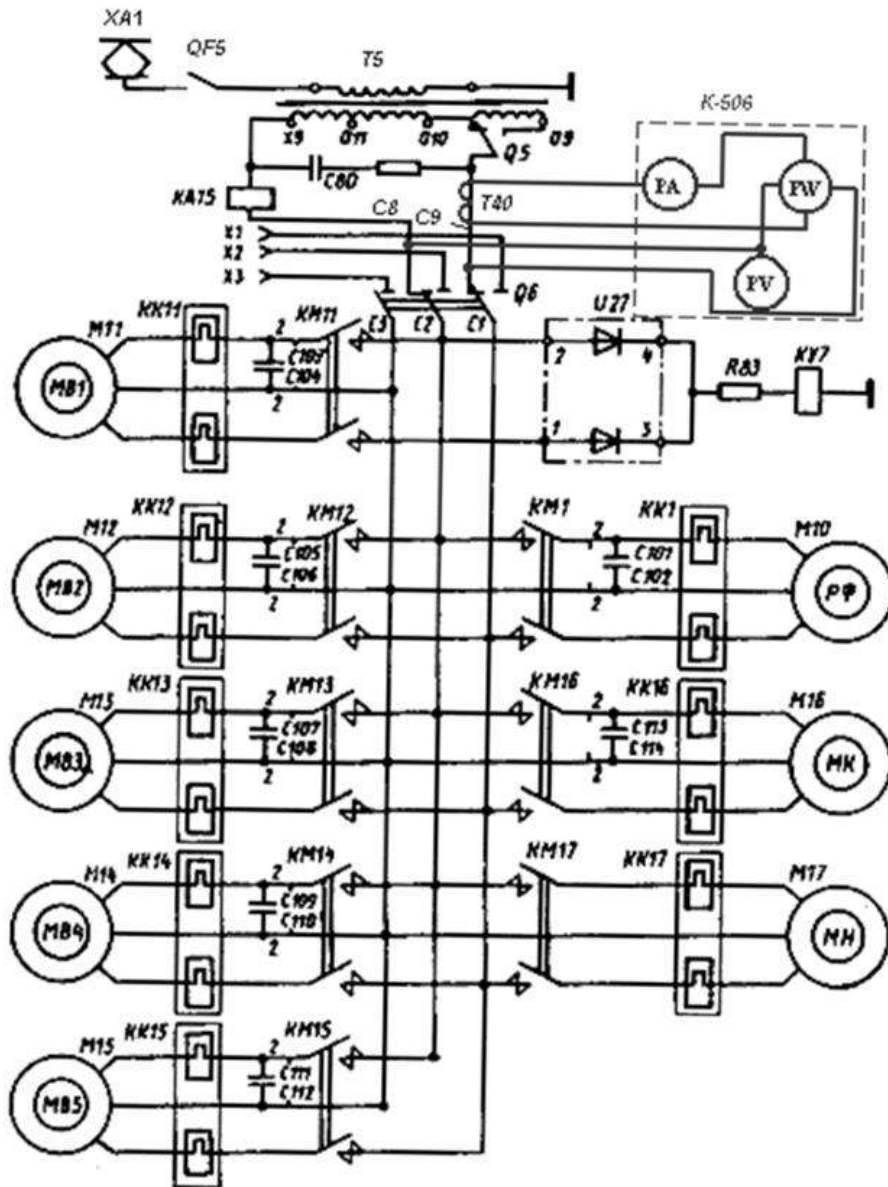
**Рисунок 4.13 – Схема вентиляции электровоза ВЛ85**

АВМ	Этап измерения	Приводной двигатель								Измеряемые параметры			
		ФР	МВ 1	МВ 2	МВ 3	МВ 4	МВ 5	МК	МН	U <sub>АВМ</sub> , В	Р <sub>ЭЛ</sub> , кВт	В, мм. рт. ст.	u <sub>в</sub> , °С
		Состояние двигателя											
МВ1	П	■								U <sub>ФР1</sub>	Р <sub>ФР1</sub>	В <sub>1</sub>	u <sub>в1</sub>
	И		■							U <sub>МВ1</sub>	Р <sub>ФР+МВ1</sub>	В <sub>1</sub>	u <sub>в1</sub>
МВ2	П	■								U <sub>ФР2</sub>	Р <sub>ФР2</sub>	В <sub>2</sub>	u <sub>в2</sub>
	И		■							U <sub>МВ2</sub>	Р <sub>ФР+МВ2</sub>	В <sub>2</sub>	u <sub>в2</sub>
МВ3	П	■								U <sub>ФР3</sub>	Р <sub>ФР3</sub>	В <sub>3</sub>	u <sub>в3</sub>
	И			■						U <sub>МВ3</sub>	Р <sub>ФР+МВ3</sub>	В <sub>3</sub>	u <sub>в3</sub>
МВ4	П	■								U <sub>ФР4</sub>	Р <sub>ФР4</sub>	В <sub>4</sub>	u <sub>в4</sub>
	И					■				U <sub>МВ4</sub>	Р <sub>ФР+МВ4</sub>	В <sub>4</sub>	u <sub>в4</sub>
МВ5	П	■								U <sub>ФР5</sub>	Р <sub>ФР5</sub>	В <sub>5</sub>	u <sub>в5</sub>
	И						■			U <sub>МВ5</sub>	Р <sub>ФР+МВ5</sub>	В <sub>5</sub>	u <sub>в5</sub>
МК	П	■								U <sub>ФР6</sub>	Р <sub>ФР6</sub>	В <sub>6</sub>	u <sub>в6</sub>
	И							■		U <sub>МК</sub>	Р <sub>ФР+МК</sub>	В <sub>6</sub>	u <sub>в6</sub>
МН	П	■								U <sub>ФР7</sub>	Р <sub>ФР7</sub>	В <sub>7</sub>	u <sub>в7</sub>
	И								■	U <sub>МН</sub>	Р <sub>ФР+МН</sub>	В <sub>7</sub>	u <sub>в7</sub>

П – подготовка к измерению  
И – измерение

■ – двигатель включен  
□ – двигатель отключен

**Рисунок 4.14 – Измерение характеристик вспомогательных машин грузового электровоза переменного тока ВЛ85**



MB1, MB2, MB3 – мотор-вентиляторы ВИП, СР, ТЭД, индуктивных шунтов;  
 MB4 – тягового трансформатора; MB5 – ББР ФР – фазовый расщепитель;  
 МК – мотор-компрессор; МН – маслонасос

**Рисунок 4.15 – Схема измерения напряжения  $U_{вм}$  и входной мощности  $P_{эл}$  АВМ электровоза ВЛ85**

После окончания работ на первой секции переходят ко второй секции электровоза. В процессе каждого цикла измерений, когда работа ФР, МК, MB1, MB2, MB3, MB4, MB5 и МН стабильна, производятся измерения различных параметров – давление и температура воздуха ( $B$ ,  $v_в$ ), напряжение питания ( $U$ ), активная мощность ( $P_{эл}$ ) приводов вентиляторов и компрессора АНЭ225. На

каждом цикле определяется входная (активная) мощность  $P_{mv}$  ( $P_{mk}$ ) как разность суммарных мощностей, потребляемых фазорасщепителем и мотор-вентилятором или мотор-компрессором и фазорасщепителем.

Зная изменение входной (активной) мощности двигателя в зависимости от выходной (механической) мощности при различных значениях напряжения источника питания (рисунок 4.16), определяется мощность на валу двигателя  $P_{mexi}^{B_i, \theta_{vi}}$  при заданных значениях давления  $B_i$  и температуры воздуха  $\theta_{vi}$  во время измерения входной мощности приводного двигателя вентилятора или компрессора  $P_{эли}$ .

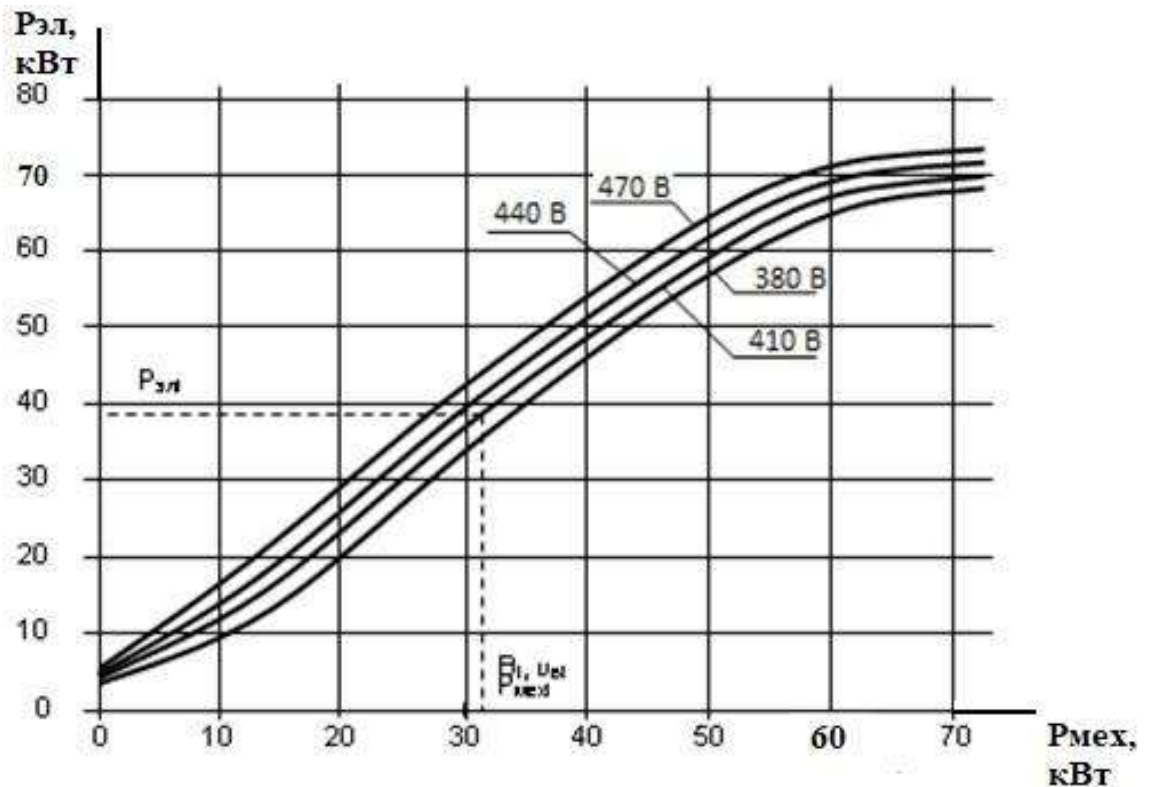


Рисунок 4.16 – Изменение входной мощности  $P_{эл}$  двигателя от выходной  $P_{мех}$  АНЭ225 при различных значениях напряжения источника питания

Дополнительно определяется величина плотности воздуха при измерении производительности вентиляционной системы.

$$\gamma_{\vartheta_{вi}, B_i} = \frac{0,463 \cdot B_i}{273 + \vartheta_{вi}}. \quad (4.12)$$

Величина плотности воздуха при нормальных условиях (н.у.)

$$\gamma_{\vartheta_{вH}, B_H} = \frac{0,463 \cdot B_H}{273 + \vartheta_{вH}} = \frac{0,463 \cdot 760}{273 + 20} = 1,201 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (4.13)$$

где:  $\vartheta_{вH} = 20^\circ\text{C}$  – температура охлаждающего воздуха при н.у.,

$B_H = 760$  мм.рт.ст. – давление охлаждающего воздуха при н.у.

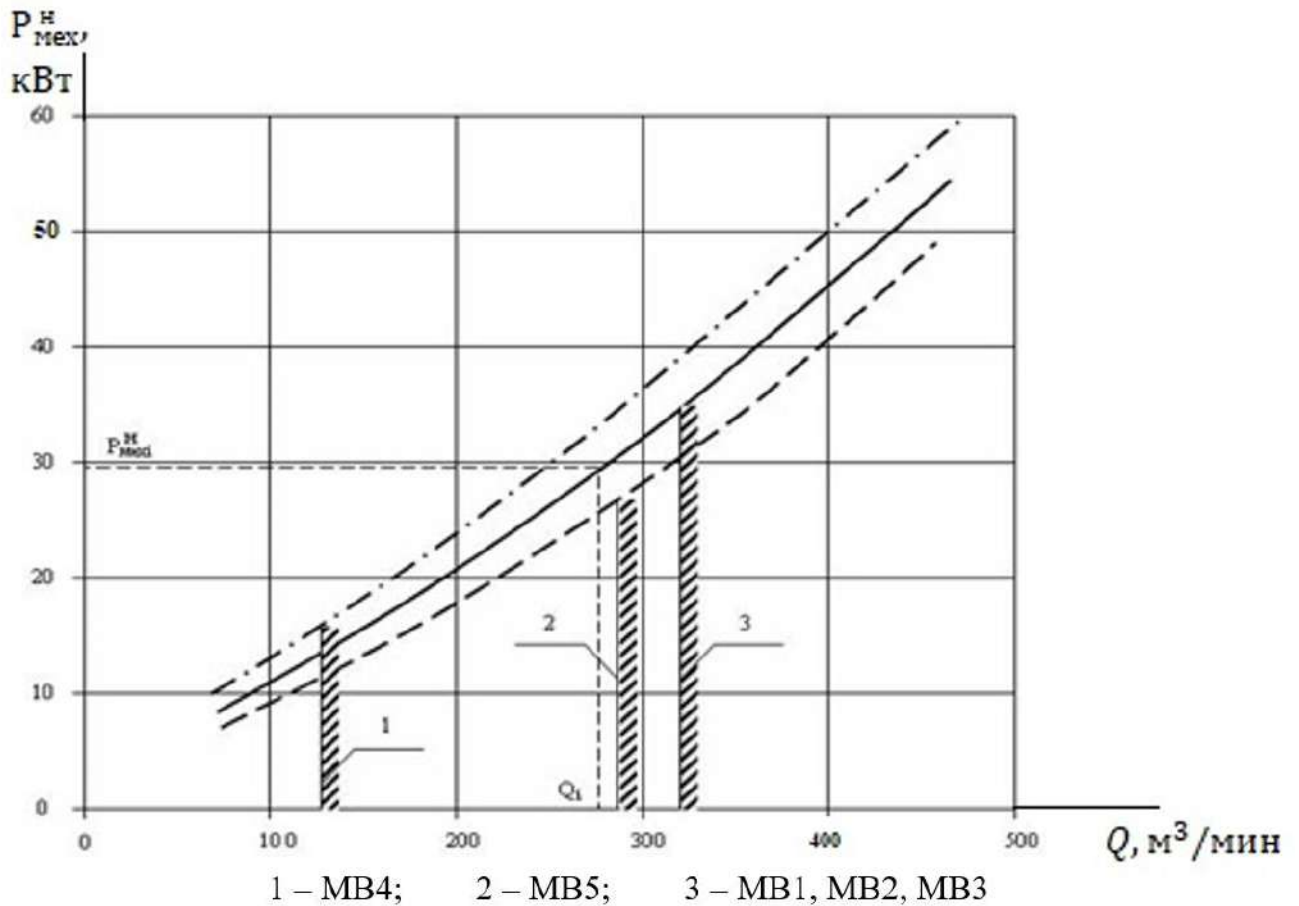
Соотношение плотности воздуха при н.у. в момент измерения находится по формуле

$$\kappa_i = \frac{\gamma_{\vartheta_{вH}, B_H}}{\gamma_{\vartheta_{вi}, B_i}}. \quad (4.14)$$

Мощность при н.у. от мощности  $P_{\text{мех}i}^{B_i, \vartheta_{вi}}$  на валу двигателя определяется по формуле

$$P_{\text{мех}i}^H = P_{\text{мех}i}^{B_i, \vartheta_{вi}} \cdot \kappa_i. \quad (4.15)$$

На основе графиков зависимости мощности приводного двигателя от подачи воздуха (рисунок 4.17), определяется расход воздуха ( $Q$ ) в вентиляционной системе при н.у.



**Рисунок 4.17 – Изменение мощности мотор-вентиляторов от расхода воздуха**

Если выходная мощность приводного двигателя превышает номинальное значение на величину более 5 %, проверяется подача воздуха с помощью микроманометра (ММН) МКВК-250. Если подача воздуха близка к номинальной, проверяется состояние подшипниковых узлов контролируемого вентилятора. При превышении механической мощности привода компрессора на 5 % и более, равной 30 кВт, также проводится проверка состояния подшипниковых узлов АВМ.

#### **4.11 Способ подогрева масла в картерах мотор-компрессоров электровозов**

Рассмотрены зависимости относительных параметров потоков отказов АВМ НВА55 электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К депо Хабаровск, эксплуатируемых

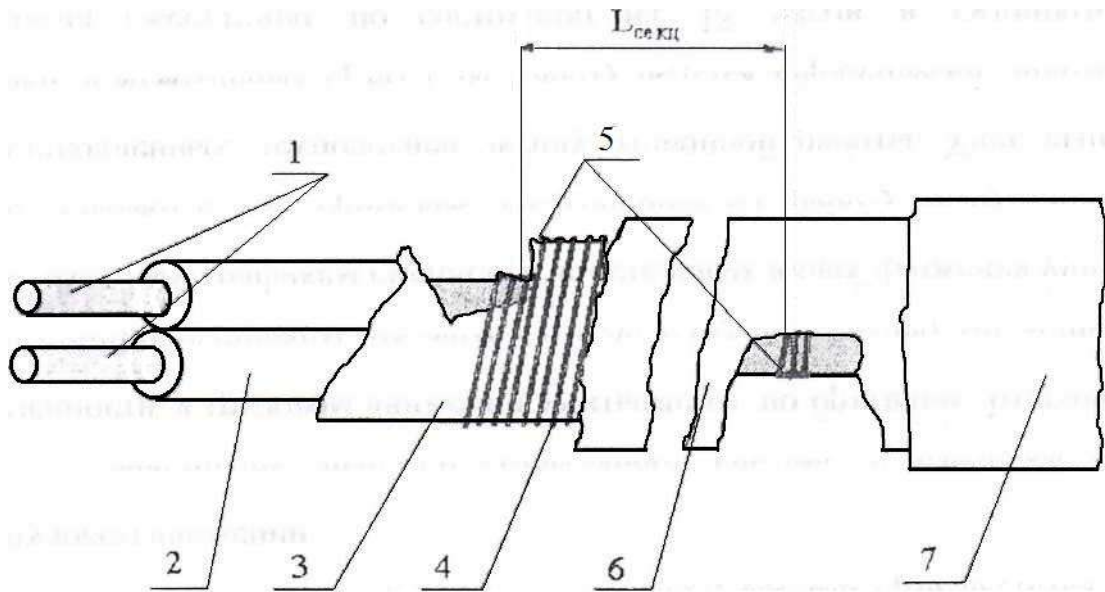
на направлении Карымская – Находка (Владивосток) и депо Вихоревка, обслуживающих направление Таксимо – Тайшет от среднемесячной температуры наружного воздуха в 2016 году. Минимальный уровень отказов наблюдается у АВМ электровозов депо Хабаровск в течение года. Анализ показал следующее: в летний период относительный уровень отказов АВМ электровозов локомотивного депо Вихоревка превышает уровень безотказности АВМ электровозов депо Хабаровск в 2,45 раза, а в зимний период это превышение увеличивается в 9,1 раза. Это в основном связано с ростом отказов приводных двигателей компрессоров вследствие увеличения сопротивления вращению МК зимой, из-за низкой температуры масла в картере компрессора менее  $-25^{\circ}\text{C}$  вместо стандартных  $-40^{\circ}\text{C}$ . Масло в картере компрессора замерзает из-за сниженной мощности нагревательных элементов или их повреждения. Замерзание масла в картерах происходит при длительном отстое электровозов из-за уменьшенного грузопотока. Снижению безотказности АВМ способствует также продолжительный зимний период с температурой воздуха до  $-50^{\circ}\text{C}$  и ниже.

Для обеспечения необходимой безотказности электровозов северного направления Восточного полигона предлагаются подогревать масло ленточным нагревательным кабелем марки КНФНФЭ (кабель нагревательный, с двумя жилами из луженых медных проволок с фторопластовой изоляцией, со спиральным нагревательным элементом, во фторопластовой оболочке, с экраном в виде оплетки из луженых медных проволок).

Конструкция кабеля приведена на рисунке 4.18.

Токопроводящая жила изолирована фторопластом, стойким к воздействию повышенной температуры среды до  $200^{\circ}\text{C}$ . Характеристики токопроводящих жил приведены в таблице 4.2.

Сверху двух параллельно уложенных изолированных токопроводящих жил наложена поясная изоляция из фторопласта.



1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция токопроводящей жилы; 3 – поясная изоляция; 4 – нагревательный элемент; 5 – контакт; 6 – оболочка; 7 – экран

**Рисунок 4.18 – Конструкция кабеля**

**Таблица 4.2 – Характеристики токопроводящих жил**

Число и номинальное сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	Максимальные наружные размеры кабеля, мм	Расчетная масса 1 км кабеля, кг	Разрывное усилие, Н не менее
2×1,0	7,1×4,6	83	250
2×1,5	7,6×4,8	97	400
2×2,0	8,8×5,5	132	650
2×3,0	9,3×5,7	150	800
2×4,0	9,9×6,0	171	1100

На поясной изоляции наложен в виде спирали нагревательный элемент из проволоки сплавов с высоким электрическим сопротивлением и положительным температурным коэффициентом. Шаг наложения спирали - не менее 0,90 мм. Номинальная длина нагревательной секции в зависимости от марки кабеля - 0,5; 1,0 или 2,0 м.

Электрический контакт между нагревательным элементом и токопроводящими жилами обеспечивается сваркой или пайкой оловянно-свинцовым припоем.

На спирали нагревательного элемента наложена оболочка из фторопласта.

Для защиты кабеля от механических повреждений предусмотрен экран в виде оплетки из медных луженых проволок.

Основные электрические параметры кабеля приведены в таблице 4.3.

**Таблица 4.3 – Основные электрические параметры кабеля разного сечения**

Номинальная удельная мощность тепловыделения, Вт/м	Электрическое сопротивление нагревательной секции, Ом, при длине нагревательной секции $L_{секц}$ , м		
	0,5	1	2
20	4840	2420	1210
25	3872	1936	968
30	3227	1613	807
35	2766	1383	691
40	2420	1210	605

Мощность, необходимая для разогрева масла в зимний период при помощи трубчатого маслоподогревателя, установленного непосредственно в картере компрессора КТ6-Эл электровоза ВЛ85, составляет 250 Вт. Учитывая, что электроподогреватель на основе кабеля будет располагаться под картером компрессора, мощность его повышена до 360 Вт. Основным преимуществом ленточных нагревательных кабелей марки КНФНФЭ, по сравнению с одножильными нагревательными проводами и кабелями, является то, что они позволяют изготавливать нагревательные секции длиной от 0,5 м и более. Это дает возможность конструировать электроподогреватели с широким диапазоном ступеней мощности.

Исходя из проведенных исследований по проектированию и испытанию кабельных нагревательных секций на основе дюралюминиевых труб Ø55 мм и кабеля марки КНФНФ (без экрана), предлагается следующий вариант

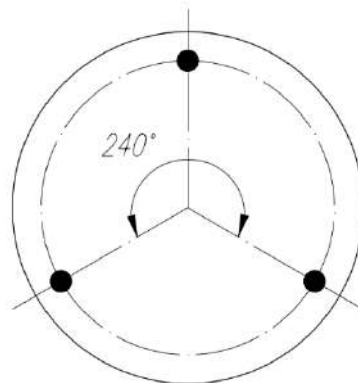


электроподогревателя. Для изготовления секций требуется кабель марки КНФНФ 2,5-0,5-40 (кабель с жилой сечением  $2.5 \text{ мм}^2$ , длиной нагревательной секции 0,5 м и удельной мощностью тепловыделения 40 Вт/м). Эскиз секции трубчатого электроподогревателя приведен на рисунке 4.19.



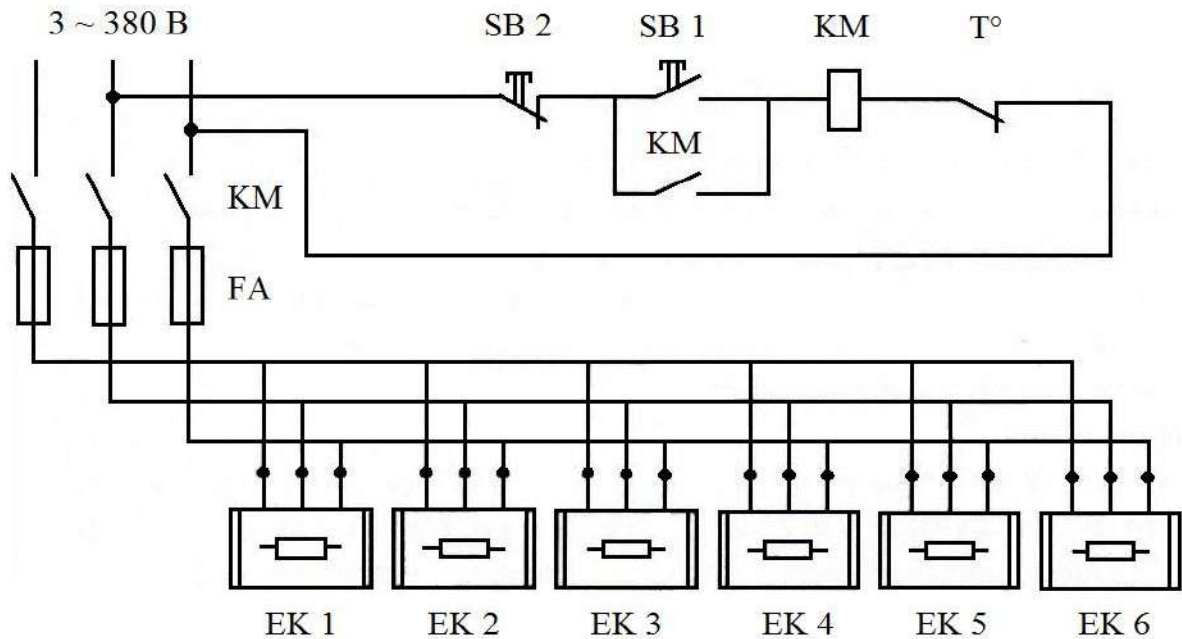
**Рисунок 4.19 – Эскиз секции трубчатого электроподогревателя**

Конструкция секции электроподогревателя, выполненная на основе дюралюминиевой трубы с наружным диаметром 55 мм, внутренним диаметром 48 мм и длиной 560 мм, внутри которой находятся кварцевый песок и три секции кабеля, во многом аналогична трубчатым электрическим нагревателям (ТЭН). В условиях депо изготовление секций не вызовет затруднений. Мощность одной секции – 60 Вт, трехфазное напряжение – 380 В. Секция электроподогревателя подключается к трехфазной сети 380 В по схеме «звезда». Недействующие концы кабельных секций, выходящие с противоположной стороны из заглушки трубы (рисунок 4.20), изолируются при помощи изолирующих колпачков.



**Рисунок 4.20 – Недействующие концы кабельных секций, выходящие из заглушки трубы**

Принципиальная электрическая схема управления шестью секциями трубчатых электроподогревателей масла в картере компрессора приведена на рисунке 4.21.



KM – линейный контактор; SB1, SB2 – кнопочные выключатели; T° – датчик температуры; FA – быстродействующий предохранитель; EK1-EK6 – нагревательные элементы

**Рисунок 4.21 – Принципиальная электрическая схема управления**

Датчик температуры типа ДРТ устанавливается в центре электроподогревателя и настраивается на температуру 45-50 °С.

#### 4.12 Выводы по разделу 4

1 Установлено, что для обеспечения необходимой производительности вентиляции АВМ АНЭ225 и НВА55 во всех режимах работы нужно провести следующие изменения их конструкции и обслуживания: симметрировать

конструкцию двигателя относительной вертикальной оси; увеличить длину корпуса АВМ при сохранении электромагнитной системы двигателя и расстояния между подшипниковыми узлами, увеличить сечение выхода воздуха из АВМ, размеры вентиляционных лопаток ротора. Изменить конструкцию подшипникового узла: увеличить объем подшипниковых камер для заправки не менее 350 г смазки; перенести маслопроводы для подачи смазки и выхода отработанной смазки на наружные части корпусов подшипников; применить малоиспаряемую смазку подшипников с температурой деградации не менее 120 °С; Увеличить количество заправляемой смазки Буксол: при заправке (смене) – 350 г.; при пополнениях - 300 г. В конструкцию подшипникового узла должны входить элементы, обеспечивающие заправку (смену) смазки, пополнение смазкой и удаление отработанной смазки без разборки двигателя. Ввести непрерывный контроль температуры подшипников.

2 Контроль увлажненности и степени износа изоляции статорных обмоток АВМ электровозов необходимо выполнять при переводе электровоза с летних условий эксплуатации на зимние. Использование АВМ с обмотками 4 и 5 класса износа изоляции в зимний период на северном направлении Восточного полигона приводит к пробое изоляции обмоток. Поэтому все АВМ с изоляцией этих классов износа должны проходить пропитку изоляции в объеме среднего или капитального ремонтов перед зимним периодом эксплуатации.

3 Для непрерывного контроля температуры узлов АВМ приемлемыми являются подсистемы температурного контроля (ПСТК) с датчиками-позисторами, исполнительным устройством с световой (звуковой) сигнализацией и системы с микроконтроллерами, имеющими постоянные алгоритмы. ПСТК должны обеспечивать непрерывный контроль температуры с световой и звуковой сигнализацией в кабине машиниста о перегреве подшипников, ротора и статорных обмоток.

4 Периодическое определение мощности АВМ и интенсивности вентиляции оборудования электровоза переменного тока позволяет выявлять электрические машины с повышенной мощностью из-за отсутствия смазки в

подшипниках и (или) нарушений регулировки вентиляции. Это дает возможность исключить нерациональный перерасход электроэнергии и обеспечить необходимую безотказность АВМ.

5 Ввод электроподогревателей на основе кабеля КНФНФЭ, обеспечивающих допустимую температуру масла компрессора и редуктора, позволяет выполнить пуск МК после отстоя электровозов в зимний период без превышения допускаемой температуры двигателя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Установлено, что на асинхронные вспомогательные машины электровозов Восточного полигона РЖД приходится более 12 % от общего количества отказов. Безотказность АВМ современных электровозов переменного тока ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К значительно ниже, чем электровозов ВЛ80, эксплуатируемых в Восточном полигоне продолжительное время. Это вызвано несимметричностью конструкции радиальной вентиляции АВМ, не обеспечивающей необходимое охлаждение двигателей и, как следствие этого, приводящей к превышению допустимой температуры подшипников, ротора и статорных обмоток. В свою очередь, недостаточное количество смазки в подшипниках, не обеспечивает постоянную работу их в режиме качения. На подшипники приходится 1/3 отказов АВМ, причем 2/3 из них работают без смазки в режиме «сухого» скольжения. При этом выплавляются обмотки роторов и перегреваются статорные обмотки.

2 Разработана математическая модель функционирования системы «Асинхронная вспомогательная машина» электровоза переменного тока Восточного полигона РЖД, которая позволяет установить взаимосвязи между элементами системы и выявить определяющее влияние элементов «подшипниковые узлы», «ротор», «статор» на безотказность системы. Наибольшее количество отказов подшипникового узла указывает на то, что он является первопричиной основных отказов АВМ.

3 Выявлено, что с увеличением коэффициента несимметрии напряжения питания от двух до шестнадцати процентов, доля отказов основных узлов АВМ изменяется: статоров снижается в 4,95 раза; роторов и подшипниковых узлов увеличивается, соответственно, в 9,52 и 7,37 раза. Это обусловлено как ростом токов обратной последовательности, так и в, большей степени, недостаточным количеством смазки в подшипниках АВМ. Увеличение токов обратной последовательности вызывает уменьшение КПД двигателя и повышение времени пуска.

4 Уточнен процесс частых отказов подшипников, приводящих к выплавлению алюминиевых обмоток роторов и повышению теплового износа

изоляции статорных обмоток АВМ современных электровозов, из-за перехода контактов ролики (шарики) – кольца подшипников из режима качения в режим «сухого» скольжения вследствие недостаточного количества смазки в подшипниках, не обеспечивающего непрерывную эксплуатацию подшипников в режиме качения.

5 Внедрен в микропроцессорную систему управления и диагностики (МСУД-015) 477 секций электровозов переменного тока 2,3,4ЭС5К локомотивных депо Карталы, Лянгасово, Иланская, Чита, Хабаровск, Смолениново извещениями ДИНЮ.И.1391-20 об изменении конструкторской документации на электровозы серии 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К производства ООО «ПК НЭВЗ» и АРКИ.002-2020 об изменении ПО МСУД-015 производства АО «ЛЭС» разработанный в рамках диссертационного исследования откорректированный алгоритм включения разгрузочного клапана У5.

6 Рекомендуется для обеспечения необходимой безотказности АВМ проведение следующих мероприятий:

а) изменить конструкцию: выровнять и снизить аэродинамические сопротивления воздухопроводов левой и правой сторон АВМ увеличением длины корпуса и площади сечения выхода вентилирующего воздуха из двигателя, размеров вентиляционных лопаток, объемов подшипниковых камер под повышенное количества смазки; ввести в корпуса подшипников АВМ маслопроводы для заправки и выхода отработанной смазки, что позволяет, без разборки двигателя, контролировать наличие смазки в эксплуатации и ее поступление при сменах и пополнениях.

б) изменить обслуживание: рационально использовать заправляемую смазку при сменах и пополнениях в подшипниковые узлы АВМ - увеличить количество смазки в связи с недостаточным количеством ранее заправляемой смазки, не обеспечивающим непрерывную работу подшипников в режиме качения а также повышением межремонтного пробега между заправками (сменами) и пополнениями в летний период эксплуатации и снизить в зимний вследствие существенного уменьшения температуры подшипников по сравнению с летним; очистить или заменить «забитые» маслопроводы для подачи смазки к подшипникам; использовать

смазки подшипников с повышенной вязкостью при низкой температуре воздуха (от - 30 °С до -50 °С и ниже);

в) ввести непрерывный контроль температуры статорных обмоток, роторов и подшипниковых узлов с использованием подсистемы, состоящей из датчиков температуры-позисторов, устройства мониторинга температуры, блока световой (звуковой) сигнализации и микроконтроллерной подсистемы температурного контроля, работающей по неизменной программе;

г) обеспечить контроль увлажненности и степени износа изоляции статорных обмоток АВМ подсистемой ПСКУ по отношению абсорбционной емкости изоляции к геометрической;

д) ввести методику определения мощности АВМ и интенсивности вентиляции оборудования электровоза переменного тока, позволяющую выявлять электрические машины с повышенной мощностью из-за отсутствия смазки в подшипниках и (или) нарушений в регулировке вентиляции;

е) использовать внедренный рациональный алгоритм включения разгрузочных клапанов для обеспечения безотказности АВМ НВА55С (С – с медным ротором) приводов высокоскоростных компрессоров электровозов 2,3,4ЭС5К;

ж) обеспечить необходимую температуру масла в картере высокоскоростного компрессора в зимний период эксплуатации вводом электроподогревателей на основе кабеля марки КНФНФЭ для надежного пуска приводного двигателя НВА55С после продолжительного отстоя электровоза.

7 Перспективой дальнейшей разработки темы является: усовершенствование конструкции подшипникового узла - увеличение объема подшипниковой камеры для размещения повышенного количества смазки, размещение маслопроводов для заправки и удаления отработанной смазки на корпусе подшипника; усовершенствование конструкции вентиляции, что обеспечит снижение температуры узлов АВМ во всех режимах работы; статистический анализ безотказности тяговых двигателей электровозов железных дорог Восточного полигона и разработка системы обеспечения безотказности тяговых двигателей путём прогрева их подачей тока на

главные полюсы от выпрямительных установок возбуждения при длительном отстое электровозов в зимний период эксплуатации.



**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- АВМ – асинхронная вспомогательная машина;
- РЖД – Российские железные дороги;
- СМЕ – система многих единиц;
- РУТ – Российский университет транспорта;
- ОАО «ВЭЛНИИ» – Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт;
- НИ «ТПУ» – Национальный исследовательский Томский политехнический университет;
- ЭПС – электроподвижной состав;
- ПТОЛ – пункт технического обслуживания локомотивов;
- ПКБ ЦТ – Проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства;
- МК – мотор-компрессор;
- МВ – мотор-вентилятор;
- РФ – фазовый расщепитель;
- ПАЭМ – промышленная асинхронная электрическая машина;
- СР – средний ремонт;
- КР – капитальный ремонт;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- ЭДС – электродвижущая сила;
- ПСКУ – подсистема контроля увлаженности и степени износа изоляции;
- ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь;
- ТЭМ – тяговые электрические машины;
- ТКС – температурный коэффициент сопротивления;
- КД – комплекс датчиков;
- ИУ – измерительное устройство;
- УВТЗ – устройство встроенной температурной защиты;
- СС – схема сигнализации;

УТК – устройство температурного контроля;  
АЦК – аналого-цифровой коммутатор;  
ПСТК – подсистема температурного контроля;  
ИМС – интегральная микросхема;  
ПУ – пороговое устройство;  
УУ – устройство управления;  
САО – схема аварийного отключения;  
СИП – схема информации о предварительном нагреве;  
ИУА – измерительное устройство аварийного нагрева;  
ИУПН – измерительное устройство предварительного нагрева;  
КО – клапан обратный;  
ТЭД – тяговый электродвигатель;  
МН – маслонасос;  
ММН – микроманометр.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Некрасов, О.А. Нагревание асинхронных машин при стационарном тепловом режиме [Текст] / О.А. Некрасов, В.В. Шевченко // Тр. МЭИ, – 1956. – 222. – С. 136-148.
- 2 Шевченко, В.В. Исследование асинхронной машины, как тепловой системы / В.В. Шевченко // Тр. МЭИ. – 1958. – Вып. 300. – С. 294-312.
- 3 Горин, Н.Н. Режимы работы вспомогательных асинхронных машин. / Н.Н. Горин – Тр. ВНИИЖТ, 1965, вып.286, С. 93-107.
- 4 Некрасов, О.А. Условия работы вспомогательных машин по напряжению / О.А. Некрасов, Р.И. Мирошниченко./ Тр. ВНИИЖТ. – 1966. – Вып. 312. – С. 76-97.
- 5 Тушканов, Б.А. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднякова и др. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
- 6 Козорезов, М.А. Применение метода эквивалентных тепловых схем для определения нагрева несимметричной асинхронной машины / М.А. Козорезов // Электровозостроение. – 1971. – Т. 13. – С. 330-341.
- 7 Маханьков, Л.В. Тепловые исследования асинхронного двигателя осевого вентилятора электровозов переменного тока / Л.В. Маханьков // Электровозостроение. – 1971. – Т. 13. – С. 354-365.
- 8 Некрасов, О.А. Вспомогательные машины электроподвижного состава переменного тока / О.А. Некрасов, А.М. Рутштейн – Москва, Транспорт, 1988. – 223 с.
- 9 Котеленец, Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – Москва, Высш. шк., 1988. – 232 с.
- 10 Домбровский, В.В. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования / В.В. Домбровский, В.М. Зайчик. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.

11 Худоногов, А.М. Асинхронный электропривод технологических установок железнодорожного транспорта / А.М. Худоногов, В.П. Смирнов, И.А. Худоногов // Учебное пособие. – Иркутск: ИрИИТ, 2001. – 94 с.

12 Худоногов, А.М. Повысить надежность асинхронных двигателей / А.М. Худоногов, В.П. Смирнов, В.В. Макаров // Локомотив. – 2003. № 3. – С. 39-40.

13 Смирнов, В.П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электровоза: монография. / В.П. Смирнов. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2003. – 328 с.

14 Гирник, А.С. Модернизация конструкции асинхронных вспомогательных двигателей электровозов / А.С. Гирник // дис. ... канд. техн. наук. – Томск, ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2011. – 176 с.

15 Пустоветов, М.Ю. Развитие научной базы по проектированию и анализу вспомогательных асинхронных электроприводов электровозов / М.Ю. Пустоветов // дис. ... докт. техн. наук. – Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВПО РГУПС, 2015. – 310 с.

16 Смирнов, В.П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электровоза / В.П.Смирнов // дис. ... докт. техн. наук. – Омск, ОмГУПС, 2005. – 355 с.

17 Куренков, А.С. Надежность вспомогательных электрических машин переменного тока [Текст] / А.С. Куренков, О.О. Соколов, Ю.И. Попов, С.И. Баташов // Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта». - 2014. – С. 98-102.

18 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.

19 Грундулис, А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве / А.О. Грундулис // – Москва, Колос, 1982. – 104 с.

20 Тубис, Я.Б. Температурная защита асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве / Я.Б. Тубис, Г.К. Белов // – Москва, Энергия, 1977. – 66 с.

21 Худоногов А.М. Проектирование привода вспомогательных механизмов ЭПС с асинхронным двигателем / А.М. Худоногов, В.В. Макаров, В.П. Смирнов и др.; Учеб. пособие. – ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – 2011. – 311 с.

22 Бородин, А.П. Надежность и диагностика локомотивов / А.П. Бородин. – Москва, РГОТУПС, – 2002. – 65 с.

23 Галкин, В.Г. Надёжность тягового подвижного состава / В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов. – Москва, Транспорт, – 1981. – 184 с.

24 Гук, Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю.Б. Гук.– Л.: Энергоатомиздат, – 1990. – 208 с.

25 Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика Н.Ш. Кремер – Москва, ЮНИТИ ДАНА, – 2003. – 543 с.

26 ГОСТ Р 53480-2009. Национальный стандарт РФ. Надёжность в технике. Термины и определения – Москва, Стандартинформ. – 2010. – 47 с.

27 Ахцигер, В.В. Исследования влияний условий эксплуатации электровозов на надежность изоляции обмотки якоря тяговых двигателей / В.В. Ахцигер // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава: – Омск, 1974. – Т. 163. – С. 72-74.

28 Митропольский, А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – Москва, Наука, – 1971. – 576 с.

29 Сонин, В.С. Оценка эксплуатационной надежности электровозов / В.С. Сонин // Повышение эффективности использования электровозов на дорогах Урала и Сибири. – Москва, Транжелдориздат, – 1963. – С. 37-64.

30 Попов, Ю.И. Исследование эксплуатационной надежности изоляции тяговых электродвигателей при максимальной токовой нагрузке / 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.

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

32 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.

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

34 Исмаилов, Ш.К. Диагностирование изоляции тяговых электродвигателей локомотивов и обеспечение оптимального температурно-влажностного режима ее эксплуатации / Исмаилов Ш.К., Смирнов В.П., Худоногов А.М. Учеб. пособие. – ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – 2012. – 270 с.

35 Курбасов, А.С. Проектирование тяговых электродвигателей / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин // под ред. А.С. Курбасова. – Москва, Транспорт, – 1987. – 536 с.

36 Сергеев, П.С. Проектирование электрических машин / Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов, П.С. Сергеев, - Москва, Государственное энергетическое издательство, – 1956. – 504 с.

37 Находкин, М.Д. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, М.А. Козорезов, Д.М. Лупкин. – Москва, – 1967. – 536 с.

38 Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин. – Москва, Высшая школа, – 2005. – 767 с.

39 Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин. / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко. – Москва, Высшая школа, – 2006. – 430 с.

40 Виноградов, В.И. Вентиляторы электрических машин / В.И. Виноградов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд - ние, – 1980. – 200 с.

41 Смирнов, В.П. Совершенствование конструкции и технологии эксплуатации асинхронных вспомогательных машин современных электровозов переменного тока / В.П. Смирнов, А.С. Куренков, Д.И. Бодриков, Т.Н. Фадейкин // Сборник трудов по результатам международной интернет конференции (21 – 22 марта 2019 года) « Современные проблемы железнодорожного транспорта ». Под общей редакцией д.т.н., проф. К.А. Сергеева. – 2019. – С. 166-172.

42 Куренков, А.С. Режимы эксплуатации подшипников асинхронных вспомогательных машин электровозов [Текст] / А.С. Куренков, Д.И. Бодриков, А.С. Космодамианский, В.П. Смирнов // Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. (20-21 октября 2021 года) «Иновационные технологии на железнодорожном транспорте» – 2022. – С. 206-209.

43 Куренков, А.С. Уточнение механизма отказов асинхронных вспомогательных машин современных электровозов переменного тока / А.С. Куренков // Наука и техника транспорта. – 2017. – №3. – 23-33 с.

44 Куренков, А.С. Особенности работы асинхронных вспомогательных машин электровозов переменного тока [Текст] / А.С. Куренков, Д.И. Бодриков, А.С. Космодамианский, В.П. Смирнов // Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. (20-21 октября 2021 года) «Иновационные технологии на железнодорожном транспорте» – 2022. – С. 201-205.

45 Овчаров, В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров. – Киев: УСХА, – 1990. – 168 с.

46 Попов Ю.И. Расчет теплового старения изоляции тяговых электродвигателей электровозов / Ю.И. Попов, А.С. Куренков, О.О. Соколов [и др.] // Вопросы электротехнологии. – 2014. – №1. – С. 82-86.

47 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.

48 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.

49 Смирнов, В.П. Состояние изоляции тяговых электрических машин электровозов переменного тока [Текст] / В.П. Смирнов, А.С. Куренков, Д.И. Бодриков, Т.Н. Фадейкин // Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции (21-22 марта 2019 года) «Современные проблемы железнодорожного транспорта» Том 1. под общей редакцией д.т.н. проф. К.А. Сергеева. Москва ФГАОУ ВО РУТ(МИИТ), РУТ(МИИТ) – 2019. – С.172-177.

50 Смирнов, В.П. Способы определения состояния изоляции тяговых электрических машин [Текст] / В.П. Смирнов, А.С. Куренков, Д.И. Бодриков, Т.Н. Фадейкин // Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции (21-22 марта 2019 года) «Современные проблемы железнодорожного транспорта» Том 1. под общей редакцией д.т.н. проф. К.А. Сергеева. Москва ФГАОУ ВО РУТ(МИИТ), РУТ(МИИТ) – 2019. – С.178-184.

51 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.



52 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.

53 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.

54 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.

55 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.

56 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.

57 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.

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

59 Куренков, А.С. Обоснование и разработка модели функционирования асинхронной вспомогательной машины электровоза переменного тока восточного региона РЖД [Текст] / А.С. Куренков, В.П. Смирнов // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 2. – С. 24-31.

60 Вентцель, Е.С. Исследование операций. / Вентцель Е.С. – Москва, Советское радио, – 1972. – 552 с.

61 Казаков, В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. / В.А. Казаков – Москва, Советское радио, – 1973. – 232 с.

62 Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. / Г. Корн, Т. Корн– Москва, Наука, – 1984. – 832 с.

63 Терских, И.П. Надежность функционирования зерноуборочного технологического процесса. / И.П. Терских, Н.И. Овчинникова, В.М. Вильчинский / Под общей редакцией академика ААО Терских И.П. – Иркутск: ИСХА, – 1998. – 344 с.

64 Смирнов, В.П. Основы повышения функциональной надежности электровоза / В.П. Смирнов. – Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2003. – № 3. – С. 179-184.

65 Смирнов, В.П. Применимость теории марковских цепей для разработки модели технологического процесса железной дороги. / В.П. Смирнов, С.И. Баташов, Р.С. Чубов. В сборнике: Современные проблемы железнодорожного транспорта. Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции. Под общей редакцией К.А. Сергеева. – 2020. – С. 449-453.

66 Исмаилов, Ш.К. Модель перегона железной дороги с расчетным подъемом/ Ш.К. Исмаилов, А.М. Худоногов, В.П. Смирнов. / Модель перегона

железной дороги с расчетным подъемом. В сборнике: Актуальные аспекты организации работы железнодорожного транспорта. Сборник научных статей. Иркутск, – 2006. – С. 69-75.

67 Исмаилов, Ш.К. Пути повышения функциональной надежности электровоза / Ш.К. Исмаилов, В.П. Смирнов, А.М. Худоногов / Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2006. – № 4. – С. 28-34.

68 Исмаилов, Ш.К. Применимость теории марковских цепей для формирования модели функционирования железной дороги / Ш.К. Исмаилов, В.П. Смирнов / Депонированная рукопись № 6467-жд.2005 15.06.2005.

69 Исмаилов, Ш.К. Теоретические основы повышения функциональной надежности электровоза введением многомерной системы температурного контроля предельно нагруженного оборудования. / Ш.К. Исмаилов, В.П. Смирнов. Депонированная рукопись № 6450-жд. 2004 02.11.2004.

70 Исмаилов, Ш.К. Повышение функциональной надежности электровоза введением многомерной системы контроля и регулирования температуры предельно нагруженного оборудования. / Ш.К. Исмаилов, В.П. Смирнов. Депонированная рукопись № 6442-жд2004 06.10.2004.

71 Попов, Ю.И. Повышение ресурса тяговых электрических машин электровозов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях / Ю.И. Попов // дис. ... канд. техн. наук. – Москва : ФГАОУ ВПО Российский университет транспорта РУТ «МИИТ», – 2018. – 197 с.

72 Куренков, А.С. Результаты сравнительного исследования безотказности асинхронных вспомогательных машин АЭ92-4 и АНЭ225 электровозов переменного тока. [Текст] / А.С. Куренков, Д.И. Бодриков, Е.М. Лыткина, В.П. Смирнов // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 4. – С. 59-63.

73 Богаенко, И.Н. Контроль температуры электрических машин / И.Н. Богаенко. – Киев, 1975. – С. 234.

74 Космодамианский, А.С. Измерение и регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов / А.С. Космодамианский // Монография. – Москва, РГОТУПС, – 2002. – 285 с.

75 Космодамианский, А.С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов / А.С. Космодамианский // дис. ... докт. техн. наук. – Москва, РГОТУПС, – 2002. – 306 с.

76 Космодамианский, А.С. Автоматическое регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов: Монография. – Маршрут, М., – 2005. – 256 с.

77 Некрасов, О.А. Контроль нагревания тяговых двигателей в эксплуатации / О.А. Некрасов, В.И. Рахманинов / Вестник ВНИИЖТ, – №1, – 1975. – С. 11-16.

78 Технологическая инструкция. 103.252020.60028. Заводской ремонт. Пропитка, компаундировка, окраска обмоток. / – Москва, ПКБ ЦТ , – 1983. – 160 с.

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

80 ГОСТ 27710-88 (СТ СЭВ 4127-83) Материалы электроизоляционные. Общие требования к методу испытания на нагревостойкость – Москва, – 1989. – 83 с.

81 Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы / А.С. Серебряков // Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – Москва, Маршрут, – 2005. – 280 с.

82 Исмаилов, Ш.К. Электрическая прочность изоляции электрических машин локомотивов / Ш.К. Исмаилов // Монография. – Омск, – 2003. – 272 с.

83 ГОСТ 10518-88 Системы электрической изоляции и другие полимерные системы. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость – Москва, – 2013. – 40 с.

84 Технологическая инструкция. 2351.25200.00077Р Технологическая инструкция на изолировку, пропитку, окраску и сушку обмоток электрических машин электровозов – Москва, – 2014, – 92 с.

85    Протокол ЭМ-14-2015. Периодические испытания электродвигателя асинхронного НВА-55 – Новочеркасск: – 2015. – 30 с.

86    Протокол ЭМА-254-2015. Периодические испытания электродвигателя асинхронного НВА-55С – Новочеркасск: – 2015, – 30 с.

## А.1 СХЕМА ПОДСИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВЗОВ ЗЭС5К

### А.1.1 Работа подсистемы в режиме автоматического опроса

Бортовая подсистема температурного контроля (ПСТК) предназначена для непрерывного контроля теплового состояния асинхронных вспомогательных машин привода компрессоров и вентиляторов трех секционных электровозов переменного тока ЗЭС5К. При повышении температуры приводного электродвигателя вентилятора или компрессора из-за длительной перегрузки или уменьшения расхода охлаждающего воздуха ПСТК сигнализирует об этом локомотивной бригаде предварительной световой индикацией. В случае отсутствия необходимой реакции локомотивной бригады, выражающейся в дальнейшем возрастании температуры вспомогательного оборудования, ПСТК сигнализирует об аварийном состоянии и через выдержку времени  $T_{отк}$ , необходимого для снятия нагрузки, автоматически осуществит выключение соответствующего вентилятора или компрессора. Применение ПСТК позволяет существенно уменьшить тепловое старение изоляции асинхронных вспомогательных машин и исключить их воспламенение.

Схема ПСТК первой секции электровоза ЗЭС5К (рисунки А.1–А.5) получает питание от собственного источника питания через трансформатор ТР1, который подключен к цепям собственных нужд через двухполюсный выключатель SA и предохранитель FT1. К вторичным обмоткам трансформатора ТР1 подключены мостовые выпрямители на диодах VD38–VD41 и VD42–VD45, с выходов которых пульсирующее выпрямленное напряжение +12 и ±18 вольт подается на фильтры и стабилизаторы напряжения.

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

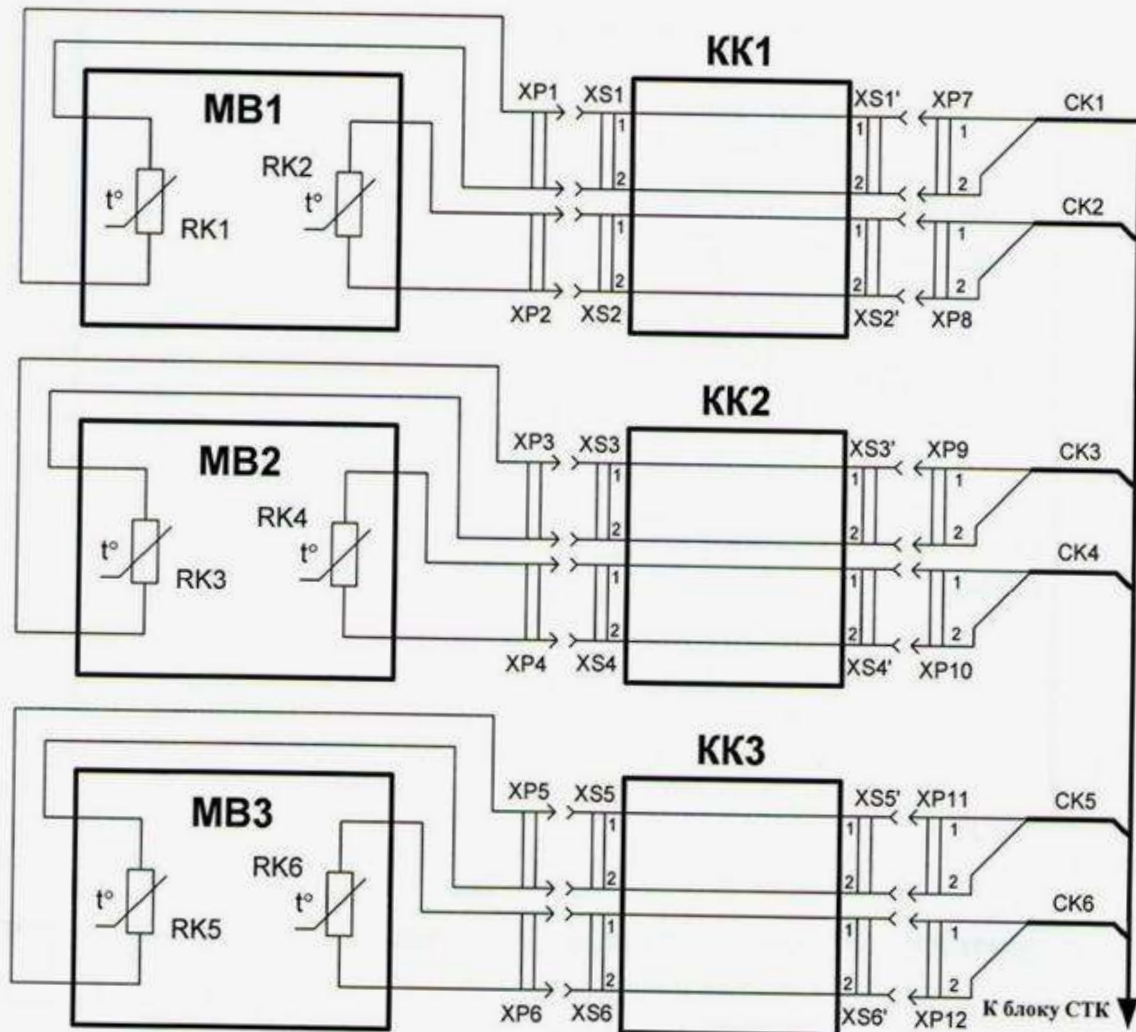


Рисунок А.1 – Принципиальная электрическая схема подключения температурных датчиков RK1-RK6 к контактным коробкам KK1-KK3

Блок ПСТК контролирует 1–3 вентиляторы и компрессор секции электровоза ЗЭС5К. Температуру оборудования измеряют встроенные датчики-терморезисторы типа КМТ или ММТ–1 RK1–RK6 вентиляторы MB1–MB3 (рисунок А.1), RK7–RK9 компрессор МК (рисунок А.2).

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Датчики подключены к контактным коробкам КК1–КК3 (рисунок А.1), КК4–КК6 (рисунок А.2) через штекерные разъемные пары ХР1–ХS1–ХР6–ХS6 и ХР13–ХS7–ХР15–ХS9.

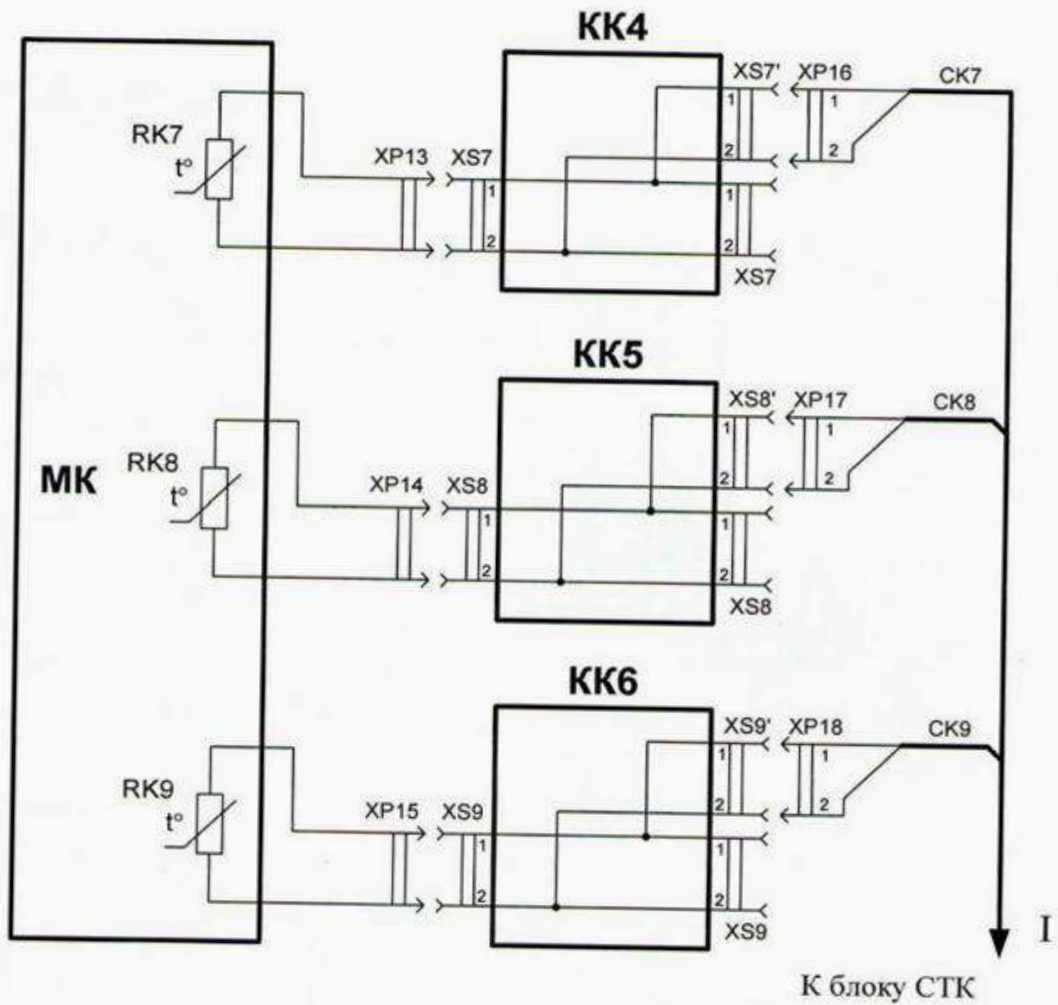


Рисунок А.2 – Принципиальная электрическая схема подключения температурных датчиков RK7-RK9 к контактным коробкам КК4-КК6

Разъемы на контактных коробках XS7, XS8, XS9 – вспомогательные и служат для проверки линий температурных каналов (контроль на замыкание).



## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Сигналы температурных датчиков RK1–RK6 и RK7–RK9 по сигнальным линиям СК1–СК9 подаются через нормально замкнутые контакты промежуточных реле К1–К9 на входы температурных каналов XS16–XS24 блока ПСТК (рисунок А.3). Кнопки КН1–КН9 осуществляют функцию проверки работоспособности аналого-цифрового коммутатора – АЦК. Стабилитроны VD1–VD9 типа Д814Д на рабочее напряжение стабилизации  $U_{ст} = 11,5–14$  В защищают входные цепи АЦК от наведенных бросков напряжения (в том числе и от постороннего питания на входах XS16–XS24).

АЦК – восьмивходовой коммутатор типа КР590КН6 с внутренним встроенным интегральным дешифратором цифрового адресного кода, подаваемого на выходы 1, 16, 15 (код С:  $2^0–2^2$ ). Код С на восемь сочетаний осуществляет работу АЦК по восьми температурным каналам (1–6 МВ; 7, 8 МК). Для опроса температурного датчика RK9 введен дополнительный АЦК на два входа: комплексный (квантованный) сигнал RK1–RK8: выв. 1 DD2.1 и сигнал RK9 – выв. 4 DD2.1. Для работы АЦК DD2.1. используется дополнительный старший разряд  $2^3$ , подаваемый на базу транзистора VT<sub>1</sub> через токоограничивающий резистор R<sub>2</sub>. Здесь и далее в случаях применения АЦК типа К176КТ1 транзисторные ключи необходимы для увеличения напряжения управляющих сигналов ТТЛ – уровня (+ 4,5 В) до напряжения КМОП – уровня (+ 8,5 – 9 В).

С объединенных выходов 1, 2 комплексный квантованный сигнал  $U_{кв}$ , несущий информацию о тепловом состоянии датчиков 1–3 вентиляторов и компрессора, поступает на схему сравнения, выполненную на интегральном компараторе типа К554СА3 (DA1 рисунок А.3).

Схема сравнения (далее СС) производит компарирование  $U_{кв}$  с образцовыми значениями напряжения  $U_{оп}$ , подаваемыми на прямой вход DA1.

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Для компрессора значение критической температуры больше, чем для вентиляторов, следовательно, и  $U_{\text{от}}$  будет различно. На временных диаграммах (рисунок А.6) показаны (произвольные) значения составляющих  $U_{\text{кв}}$  и  $U_{\text{от}}$  (МВ и МК). Как видно из диаграммы 9, составляющим 1–6  $U_{\text{кв}}$  соответствует  $U_{\text{от МВ}}$ , а 7–9  $U_{\text{кв}} - U_{\text{от МК}}$  (диаграмма 14). Таким образом, контроль силового оборудования осуществляется по двум критериям:  $U_{\text{от МВ}}$ ,  $U_{\text{от МК}}$ , которые выставляются потенциометрами  $R_{19}$  « $U_{\text{от МК}}$ » и  $R_{20}$  « $U_{\text{от МВ}}$ ». Эти опорные напряжения подаются с помощью АЦК DD2.2 на прямой вход компаратора DA1 (диаграмма 14). На инвертируемый вход (выв. 4) DA1 подается  $U_{\text{кв}}$ . Алгоритм работы АЦК DD2.2. по переключению  $U_{\text{от}}$  формируется логикой DD5.1, DD5.2 и диодно-резистивной схемой ИЛИ (VD10, VD11, R21). Микросхемы DD5.3, DD5.4 и транзисторы VT3, VT4 осуществляют необходимое формирование и преобразование сигналов управления АЦК DD2.2.

На выходе СС (вывод 9 DA1) находятся два каскада транзисторных ключей на VT5, VT6. (VT5 – ключ для сигнальной лампы ПЛ1 – «авария»; VT6 – преобразование уровня КМОП в ТТЛ).

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

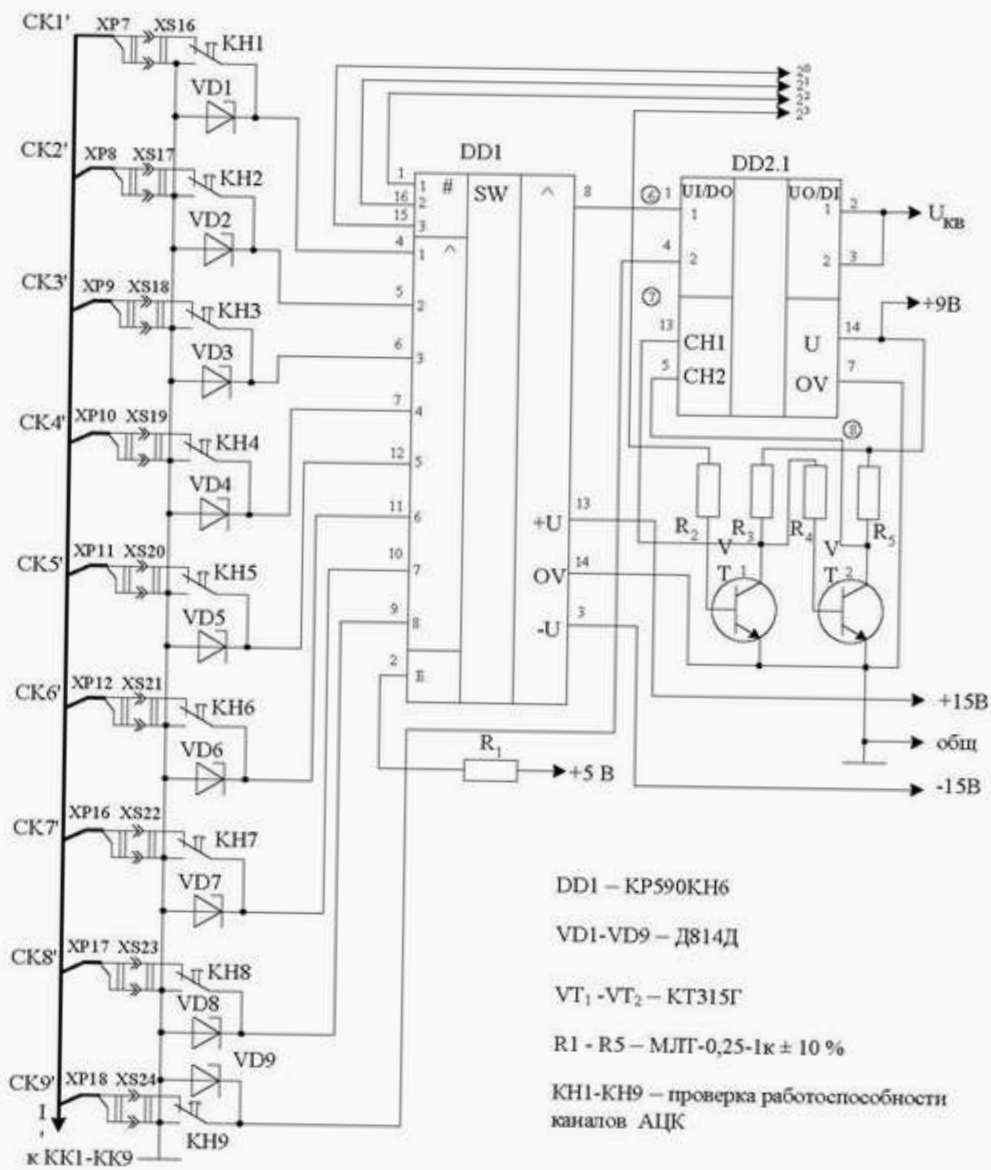
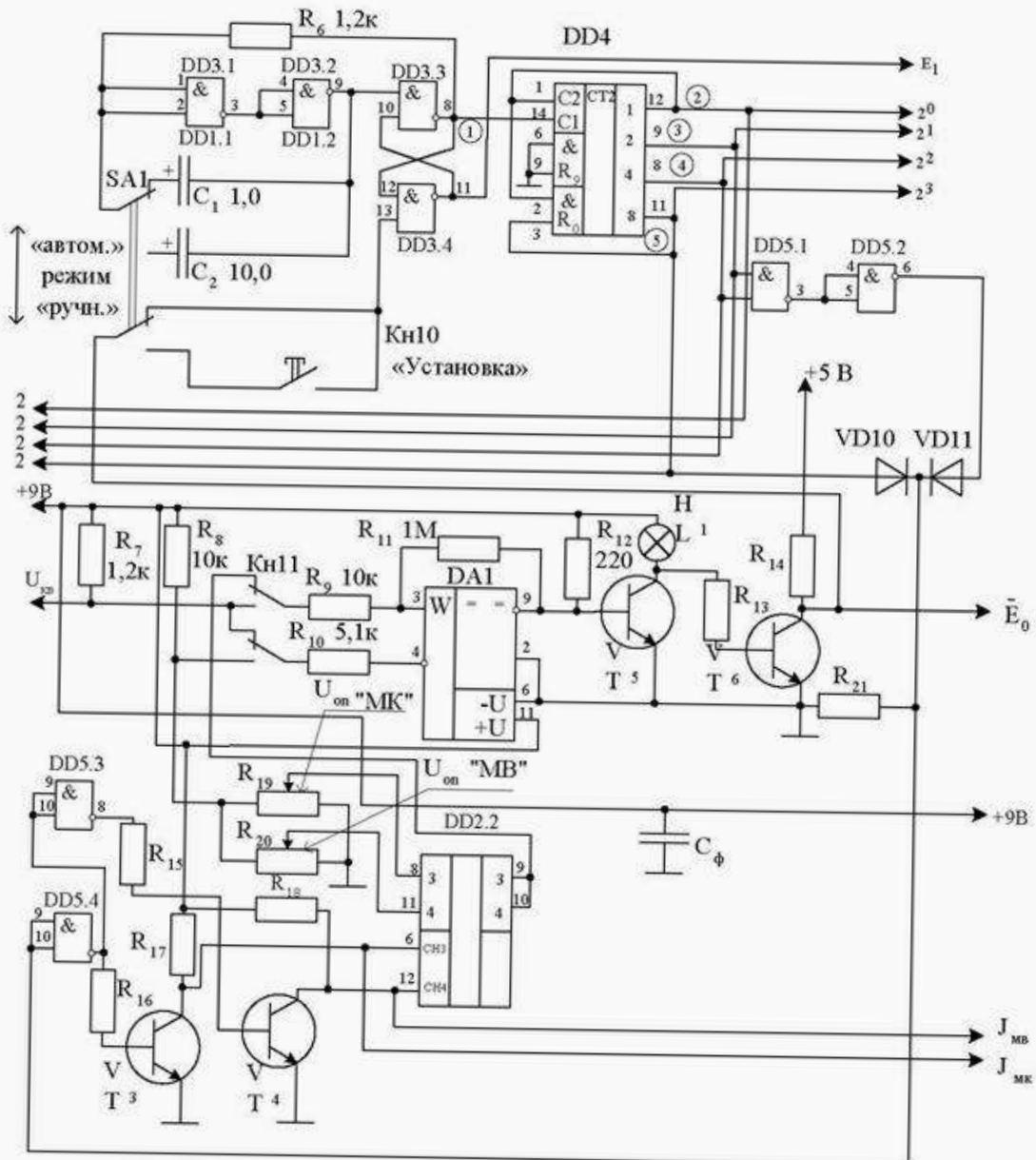
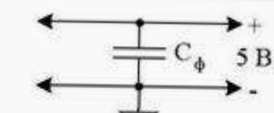


Рисунок А.3 – Принципиальная электрическая схема подсистемы температурного контроля асинхронных вспомогательных машин электровозов ЗЭСК (начало)

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А



к выв. 14 DD3, DD5  
10 DD4  
к выв. 7 DD3, DD5  
5 DD4



DA1 – K554CA3  
VT<sub>3</sub>, VT<sub>4</sub>, VT<sub>6</sub> – КТ315Г  
VT<sub>5</sub> – КТ815Б  
R<sub>19</sub>, R<sub>20</sub> – 4,7к

DD3, DD5 – К155ЛА3  
DD4 – К155ИЕ2  
DD2 – К176КТ1  
R<sub>13</sub>–R<sub>18</sub> – 1к  
R<sub>21</sub> – 270 Ом

Рисунок А.3 – Принципиальная электрическая схема подсистемы температурного контроля асинхронных вспомогательных машин электровозов 3ЭС5К (окончание)

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

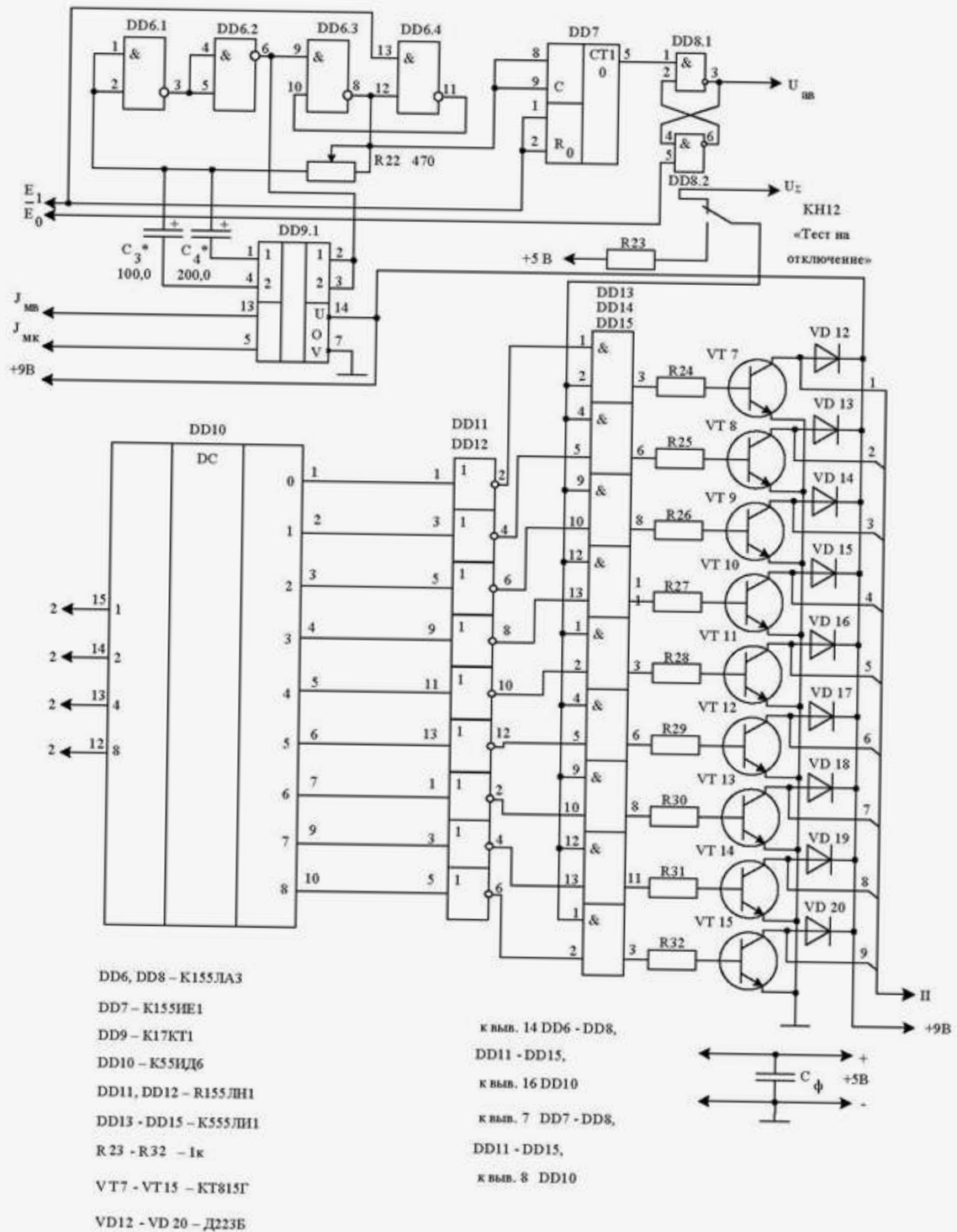


Рисунок А.4 – Принципиальная электрическая схема подсистемы аварийного отключения

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

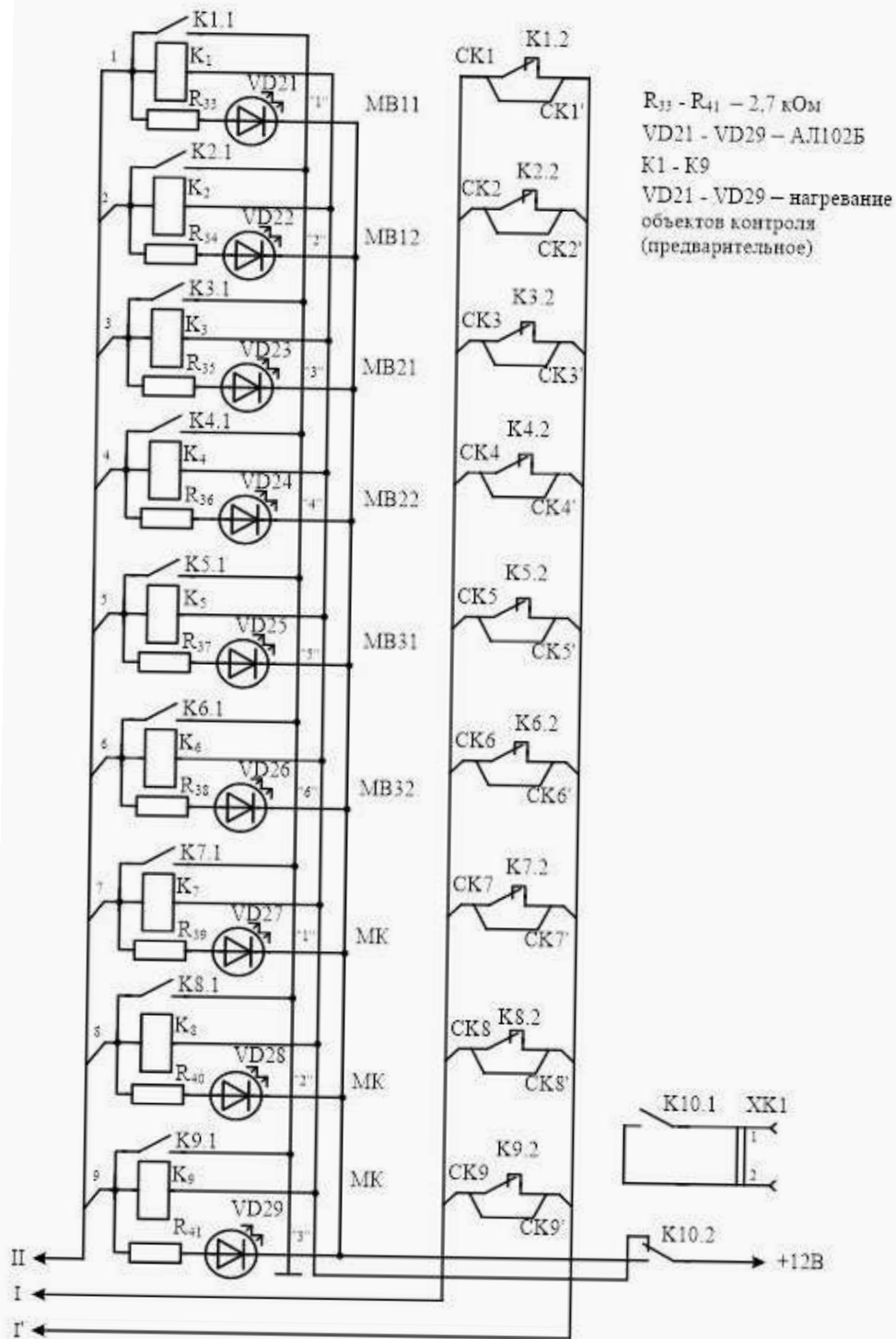


Рисунок А.5 – Принципиальная электрическая схема цепей промежуточных реле блокировки – отключения

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

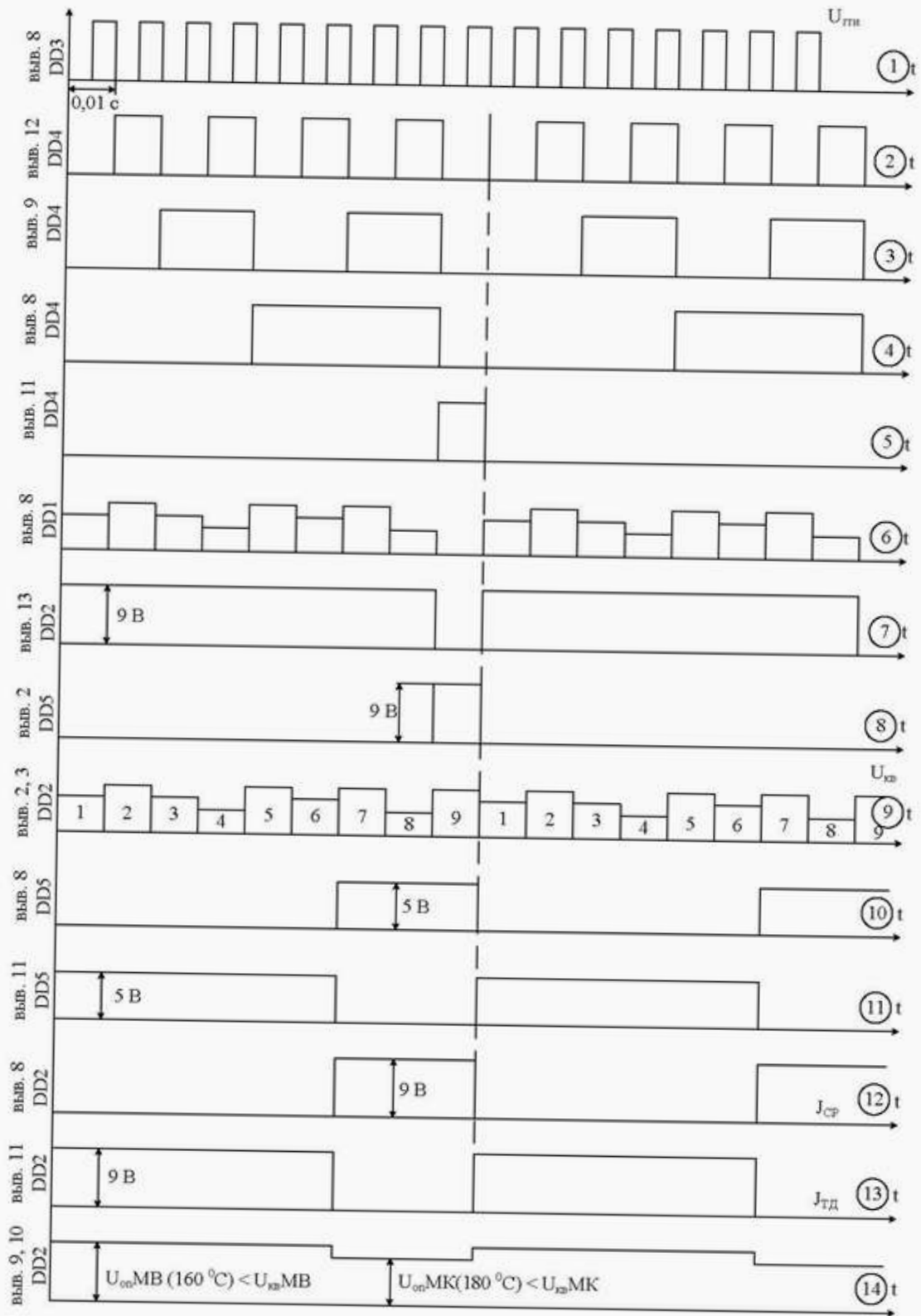


Рисунок А.6 – Временные диаграммы ПСТК  
(режим автоматического опроса)

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

На ИМС DD3 (рисунок А.3. (продолжение) выполнен генератор тактовых импульсов ГТИ1 с запретом работы по выходу  $\bar{E}_0$  от СС в аварийном режиме. ГТИ1 работает в двух режимах: автоматическом и ручном, переключаемых с помощью тумблера SA1 на блоке ПСТК.

В ручном режиме ГТИ1 вырабатывает одиночные импульсы при нажатии КН10 «Установка».

Импульсы с ГТИ1 (в обоих режимах) подаются на двоичный счетчик DD4, который обратными связями введен в режим счета «до девяти». Код счета двоичного счетчика DD4  $2^0$ - $2^2$  и бит переноса  $2^3$  используются для работы АЦК DD1, АЦК DD2.1 и АЦК 009 дешифратора идентификации канала DD16 (рисунок А.8), реализованного на ППЗУ типа K155PE3 и дешифратора состояний ПСТК DD10 (рисунок А.4) для преобразования двоичного кода адреса канала в сигнал соответствия отключения по превышению температуры.

В номинальном режиме работы силового оборудования секции электровоза ВЛ85 значения напряжения составляющих  $U_{кв}$  больше  $U_{оп}$ . СС выключена, и ГТИ1 работает в режиме генерации (основной автоматический режим – SA1 выключена). Происходит циклический временной опрос датчиков температуры (квадрование по t) и сравнение  $U_{кв}$  с  $U_{оп}$  (МК, МВ). При повышении температуры контролируемого объекта сопротивление терморезистора (например, RK1 первого МВ) уменьшится до величины, при которой напряжение на нем (первая составляющая  $U_{кв}$ ) станет меньше  $U_{опМВ}$ .

$$U_{кв} < U_{опМВ} \Rightarrow СС - 1, \quad (11.1.1)$$

В этот момент по сигналу  $\bar{E}_0 = 1$  ГТИ1 мгновенно останавливается, а счетчик DD4 остается в состоянии кода соответствия сработавшему каналу.



## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

**А.2 Работа подсистемы при предварительном прогреве оборудования**

В процессе эксплуатации электровоза локомотивной бригаде необходима постоянная информация о тепловом состоянии МВ и МК. Для этого в блоке ПСТК предусмотрена схема индикации предварительного нагрева оборудования ( $\vartheta_{\text{предв}} = \vartheta_{\text{авар}} - 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Она состоит из СС на ИМС DA2, АЦК 9.2 и линейки светодиодов VD21–VD29 (рисунок А.5), включенных последовательно с токоограничивающими резисторами R<sub>33</sub>–R<sub>41</sub>. Запитывание линейки производится контактами включенного реле К10.2.

Работа схемы предварительной индикации происходит следующим образом. На инвертируемый вход компаратора DA2 (выв. 4) (рисунок А.8.) подается  $U_{\text{кв}}$ , а на прямой вход DA2 (выв. 3) переключаемые по приведенному на диаграмме 15 (рисунок А.7а) уровни напряжения  $U_{\text{пр МВ}}$  и  $U_{\text{пр МК}}$ . Пусть температура приводного двигателя второго вентилятора (датчик RK4) повысилась до  $\vartheta_{\text{пр}} < \vartheta_{\text{авар}}$  на 20 °С. Напряжение первой составляющей  $U_{\text{кв}}$  станет меньше  $U_{\text{пр МВ}}$ , при этом сработает СС и на вход элемента И DD15.2 (выв. 4) (рисунок А.8) поступит напряжение логической единицы, сформированной преобразователем уровня на транзисторе VT18. Для того чтобы включить реле К10 (питание индикационной линейки), необходимо на втором входе элемента И DD15.2 присутствие также логической единицы. Она подается с RS – защелки ГТИ1 элемента DD3.4 (вывод 11) (рисунок А.3 (окончание)) Это значит, что питание предварительной индикации возможно лишь при работающем ГТИ1. С вывода 6 DD15.2 импульсы, совпадающие по времени с соответствующим температурным каналом, сработавшим при предварительном превышении (диаграмма 16 на рисунок А.7а) поступают на вход одновибратора DD18. Он необходим для удлинения импульсов  $U_{\text{вх ОВ}}$  (диаграмма 16) для устойчивого включения реле К10 – подачи питания на светодиодную линейку.

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

На диаграмме видно, что первый импульс с выхода DD15.2 запускает одновибратор, который вырабатывает импульс продолжительностью  $t_{ов}$ .

Время  $t_{ов}$  должно быть таким, чтобы выполнялось условие

$$[\sum t_{и}] \leq t_{ов}, \quad (\text{П.1.2})$$

где  $t_{и} = t_{к}$  – время открытого температурного канала.

Таким образом, одновибратор DD18 открыт все время для прохождения импульсов разрешения индикации предварительного нагрева.

Для примера на диаграммах (рисунок А.7а) показано прохождение импульсов 4 (МВ2, датчик RK4) и 8 (МК, датчик RK8). Они запускают одновибратор DD18, ключ на транзисторе VT19 включает реле К10, которое подает питание на светодиодную линейку (рисунок А.5). Далее импульсы с вывода 6 DD15.2 (диаграмма 16) через элемент ИЛИ DD17.1 (рисунок А.8) поступают на верхний по схеме ( $U_{\Sigma}$ ) контакт кнопки КН12 (тест на отключение), необходимой для проверки ПСТК. С КН12 (рисунок А.4) импульсы подаются на один из входов (выв.12 DD13 и DD14) элементов сравнения и DD13-DD15. На вторые входы элементов логического умножения подается последовательность логической единицы, соответствующая логическому входному коду  $2^0$ - $2^3$ . При совпадении на обоих входах элементов И логических единиц на выходе элементов подаются импульсы напряжения (диаграммы 18 и 19), открывающие транзисторные ключи (VT10, VT14). Открывшись, они зажигают светодиоды VD24 «МВ2, датчик RK4» и VD28 «МК, датчик RK8», питание на которые подается контактами реле К10.

Процесс открывания ключей и зажигания VD24 и VD28 импульсный, но так как происходит циклически с частотой опроса каналов, то светодиоды воспринимаются светящимися постоянно.

Локомотивная бригада получает информацию о том, что произошел предварительный нагрев второго МВ или МК.

**ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А**

Аналогичным образом происходит индикация всех остальных каналов. Загорание всех светодиодов свидетельствует о тяжелом тепловом режиме работы секции электровоза.

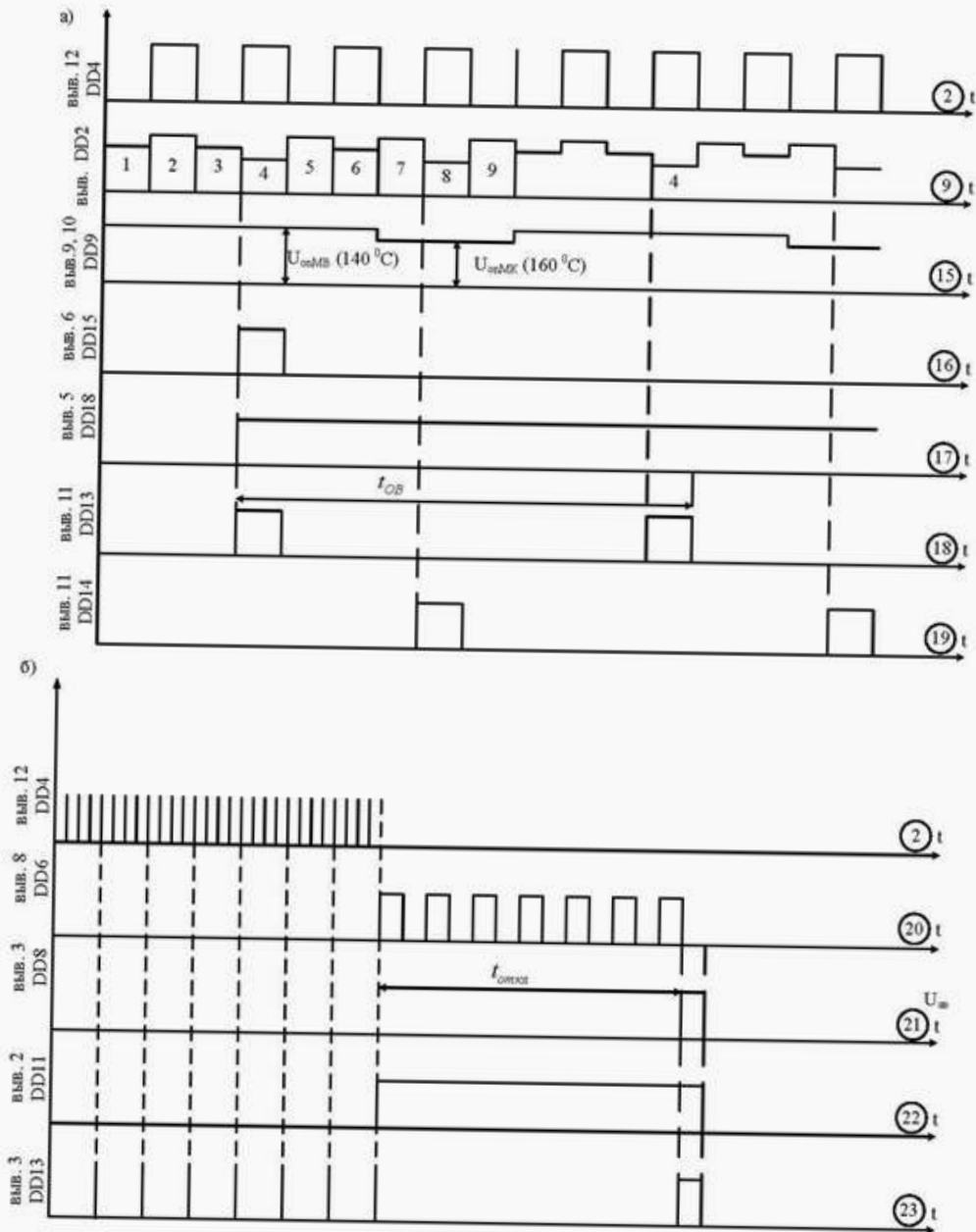
**А.3 Работа подсистемы при превышении допустимой температуры**

Как отмечено ранее, при увеличении температуры МВ или МК до предельно допустимого значения по сигналу  $\bar{E}_0 = 1$  схемы сравнения DA1 останавливается ГТИ1. Одновременно сигнал  $\bar{E}_0 = 1$  разрешает работу RS-триггеру на элементах DD8.1 и D8.2, установленному в нулевое состояние  $E_0 = 0$  до остановки ГТИ1. На выходе RS (выв. 3 DD8.1) установлен нулевой уровень. Второй вход триггера подключен к выходу декадного асинхронного счетчика импульсов DD7, который осуществляет задержку выключения электромагнитного контактора МК-82. На момент остановки ГТИ1 DD7 установлен в нулевое состояние высоким потенциалом, приходящим с выв.11 DD3.4 RS-защелки ГТИ1. После остановки генератора сигнал E1 меняется на логическую единицу, разрешая счет импульсов, которые начинает вырабатывать ГТИ2 подсистемы автоматического отключения, так как E1 переключает RS-триггер ГТИ2 и последний входит в режим генерации. Для МВ и МК время задержки предусмотрено различным и регулируется частотой повторения импульсов ГТИ2 (DD6 рисунок А.4).

Для изменения частоты используется две емкости время задающей цепочки. Коммутацию емкостей осуществляет АЦК DD9.1, работающий по алгоритму, указанному выше для  $U_{оп} (J_{мв}, J_{мк})$ . Емкости С3 и С4 подбираются при настройке ПСТК. Задержка времени отключения может изменяться в пределах от 30 с до 15 мин.

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

По истечении задержки времени отключения счетчик DD7 переключает RS-триггер DD8.1, DD8.2 в единичное состояние и логическая единица с выхода RS (выв. 3 DD8.1) –  $U_{ав}$  поступает на вход элемента ИЛИ DD17.1 (выв. 2) – диаграмма 21 (рисунок А.7.б).



а – режим предварительного нагрева МВ22 и МК; б – режим аварийного срабатывания ПСТК по превышению температуры  $\vartheta = \vartheta_{уст}$  (выключение МВ12)

Рисунок А.7 – Временные диаграммы ПСТК

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

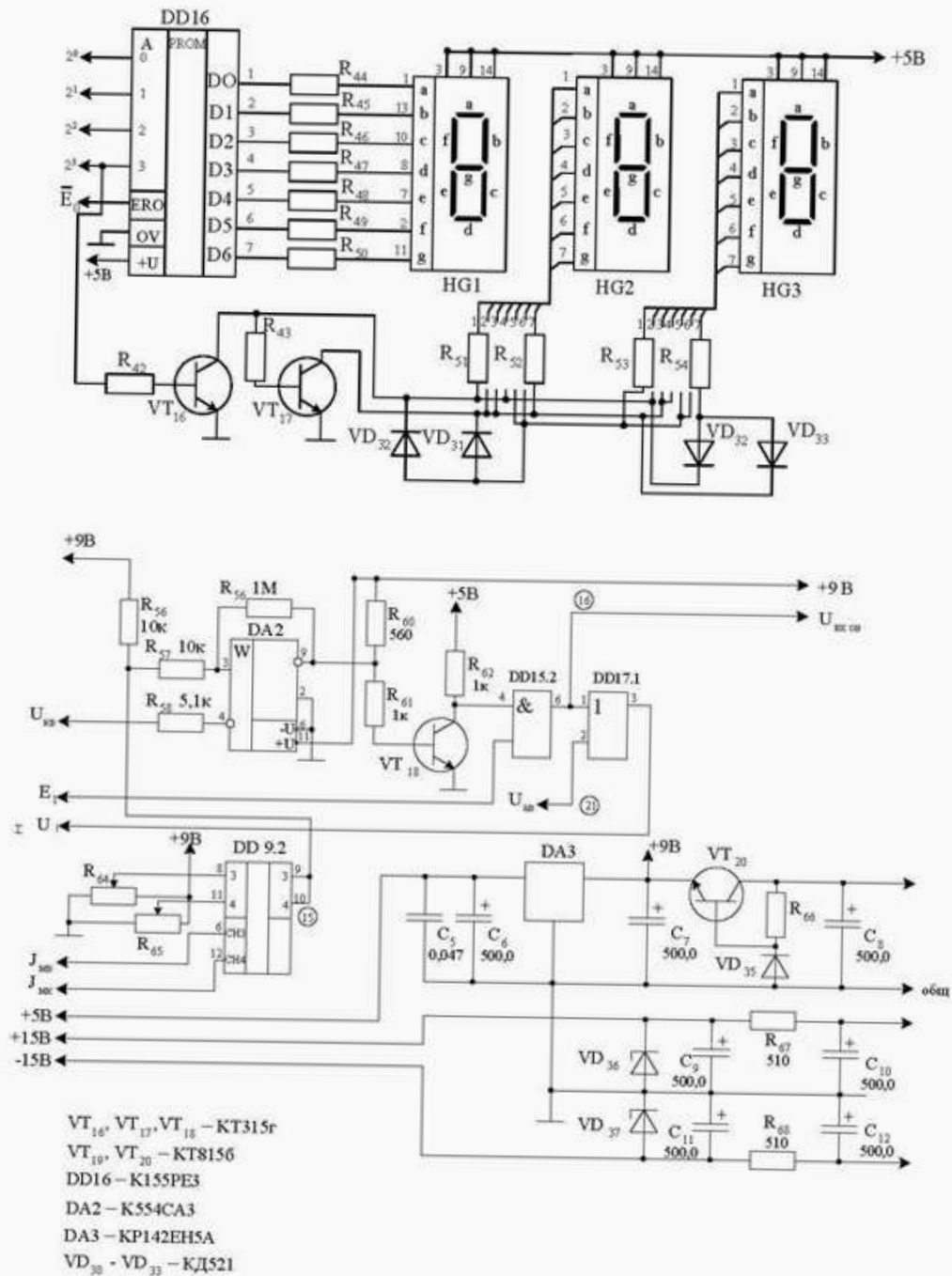


Рисунок А.8 – Принципиальная электрическая схема элементов ПСТК

**ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А**

Реле К10 отключено, так как на одновибратор DD18 ОБ не поступают импульсы с DD15.2 из-за логического нуля на входе (выв. 5) E1. С выхода DD17.1 (выв. 3) логическая единица поступает ( $U_{\Sigma}$ ) через КН12 на общий провод входов разрешения И ИМС DD13-DD15. На втором входе какого-либо (пусть первого) И зафиксирован высокий уровень с дешифратора состояний адресной шины DD10 и инвертора DD11.

На выходе первого элемента умножения (выв. 3. DD13) появляется логическая единица, которая через токоограничивающий резистор R24 открывает транзисторный ключ VT7. Открывшись, VT7 включает реле К1, которое получает питание через нормально замкнутые контакты К10.2 реле К10 (рисунок А.5). Диоды VD12–VD20 защищают коллекторные переходы транзисторов VT7-VT15 в момент включения реле.

Включившись К1 своими контактами К1.1 встает на самоблокировку. Вторыми контактами К1.2 разрывается цепь подключения датчиков RK1 и RK2. Третьими контактами снимается напряжение питания с катушек электромагнитных контакторов КМ7 и КМ11. Первый вентилятор отключается от силовой цепи. СТК вновь переходит в режим непрерывного контроля температуры МВ и МК, но без первого МВ, так как отключены датчики RK1, RK2. Вновь включить МВ1 можно лишь после снижения его температуры.

В нормальном режиме работы ПСТК, когда включены все выключатели секции, индикаторы блока сигнализации не светятся – идет процесс непрерывного контроля температуры МВ и МК. При увеличении температуры контролируемого оборудования до значения предварительного нагрева загорается светодиод желтого цвета, соответствующий номеру объекта контроля. Причем индикация осуществляется в динамическом режиме, а это значит, что предварительный нагрев может индицироваться по всем объектам одновременно.

**ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А**


Таким образом, локомотивная бригада имеет возможность оценить тепловое состояние МВ и МК по первому критерию порогового уровня.

В случае превышения температуры  $\vartheta_{\text{МВ}}$  ( $\vartheta_{\text{МК}}$ ) предельно допустимого значения ПСТК останавливает опрос температурных датчиков, загорается лампа НЛ1 – «аварийное превышение» и начинается отсчет времени задержки аварийного отключения перегретого оборудования. Одновременно на индикаторах НГ1-НГ3 (рисунок А.8) загорается вид и номер оборудования (например, МВ–датчик РК1 или МК–датчик РК8). Индикаторы VD21–VD29 в это время погасшие. В кабине машиниста № 2 загорается лампа НЛ2, сигнализирующая об аварийном состоянии АВМ секции № 1. После выдержки времени для плавного уменьшения силы тяги (тормозной силы в рекуперации) отключается перегретый МВ (МК) (или несколько предаварийных АВМ). Затем ПСТК выводится в нормальный режим работы.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**АКТЫ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ**  
**ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер  
Дирекции тяги ОАО «РЖД»


 О.В. Чикиркин

УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор  
ООО «ПК «НЭВЗ»

 В.В. Кинжигазиев

Директор  
ПКБ ЦТ ОАО «РЖД»

 Ю.И. Попов

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

**результатов исследования по комплексным изменениям конструкции и  
обслуживания асинхронных вспомогательных машин тяговых  
электроприводов электровозов переменного тока**

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ) д.т.н., профессор А.С. Космодамианский, профессор кафедры «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ) В.П. Смирнов, начальник отдела ПКБ ЦТ Д.И. Бодриков рассмотрели следующие результаты исследований, касающиеся изменений конструкторской документации и обслуживания асинхронных вспомогательных машин (далее – АВМ), выполненных аспирантом РУТ (МИИТ) А.С. Куренковым в диссертационной работе «Комплексные изменения конструкции и обслуживания асинхронных вспомогательных машин тяговых электроприводов электровозов переменного тока»:

1. Изменение конструкции корпуса подшипников АВМ введением маслоканалов и винт-заглушек для смены и пополнения смазки без разборки двигателя;
2. Изменение технологии обслуживания АВМ при смене и пополнении смазки в летний и зимний периоды;
3. Изменение технологии непрерывного контроля температуры статорных обмоток, роторов и подшипниковых узлов АВМ;



**ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б**


2

4. Изменение технологии обслуживания АВМ при повышении межремонтных пробегов;
5. Изменение технологии контроля увлажнённости и степени износа изоляции статорных обмоток АВМ по отношению абсорбционной емкости изоляции к геометрической;
6. Введение усовершенствованной методики определения мощности АВМ и интенсивности вентиляции оборудования электровоза переменного тока;

Представленные результаты исследований позволят повысить безотказность асинхронных вспомогательных машин тяговых электроприводов электровоз переменного тока и рекомендованы к внедрению.

Представители РУТ (МИИТ)

Заведующий кафедрой  
«Тяговый подвижной состав», д.т.н.,  
профессор

  
А.С. Космодамианский

Представители ОАО «РЖД»

Начальник отдела ПКБ ЦТ

  
Д.И. Бодриков

Профессор кафедры  
«Тяговый подвижной состав», д.т.н.

  
В.П. Смирнов


Начальник Центра  
организации подготовки  
и развития рабочих

  
А.С. Куренков

**ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б**  
**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер  
Дирекции тяги ОАО «РЖД»


 О.В. Чикиркин  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022г.

УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор  
ООО «ПК «НЭВЗ»

 В.В. Кинжигазиев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022г.

Директор  
ПКБ ЦТ ОАО «РЖД»

 Ю.И. Попов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

**результатов исследования по комплексным изменениям конструкции и  
обслуживания асинхронных вспомогательных машин тяговых  
электроприводов электровозов переменного тока**

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ) д.т.н., профессор А.С. Космодамианский, д.т.н., профессор кафедры «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ) В.П. Смирнов составили акт о том, что результаты исследования изменений, вносимых в конструкцию асинхронных вспомогательных машин, а также их обслуживания, выполненных аспирантом кафедры «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ) А.С. Куренковым в диссертационной работе «Комплексные изменения конструкции и обслуживания асинхронных вспомогательных машин тяговых электроприводов электровозов переменного тока», внедрены в конструкторскую документацию электровозов 2,3,4 ЭС5К.

Разработанный в рамках диссертационного исследования откорректированный алгоритм включения разгрузочного клапана У5 успешно внедрен в микропроцессорную систему управления и диагностики (МСУД-015) 477 секций электровозов переменного тока 2,3,4ЭС5К локомотивных депо Карталы, Лянгасово, Иланская, Чита, Хабаровск,

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Смоляниново извещениями ДИНЮ.И.1391-20 об изменении конструкторской документации на электровозы серии 2,3,4ЭС5К производства ООО «ПК НЭВЗ» и АРКИ.002-2020 об изменении ПО МСУД-015 производства АО «ЛЭС».

Внедрение измененного алгоритма работы разгрузочных клапанов позволило многократно уменьшить отказы приводных электродвигателей главных компрессоров электровозов и рекомендуется к применению на электровозах 2,3,4 ЭС5К.

Представители РУТ (МИИТ)

Заведующий кафедрой  
«Тяговый подвижной состав», д.т.н.,  
профессор



А.С. Космодамианский

Профессор кафедры  
«Тяговый подвижной состав», д.т.н.



В.П. Смирнов

Представители ОАО «РЖД»

Начальник отдела ПКБ ЦТ



Д.И. Бодриков

Начальник Центра  
организации подготовки и  
развития рабочих



А.С. Куренков

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**КОПИЯ ПАТЕНТА НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ**

26/1/2009

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): *с.м. 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*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** (11) **148 398** (13) **U1**(51) МПК  
G01N 27/22 (2006.01)

## (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)RU  
1  
4  
8  
3  
9  
8  
U  
1(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 «ёмкость - 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.