

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Дорохина Екатерина Сергеевна

**МОНИТОРИНГ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ  
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научные руководители:

кандидат технических наук, доцент

Рапопорт О.Л.

доктор технических наук, профессор

Гарганеев А.Г.

Томск – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
<b>1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ И В ЭКСПЛУАТАЦИИ.....</b>	<b>14</b>
1.1 Особенности конструкции тяговых электрических машин электроподвижного состава, требования предъявляемые к ним.....	14
1.2 Обзор тяговых электрических машин, применяемых в электроподвижном составе, и их характеристик .....	16
1.3 Техническое обслуживание и диагностика тяговых электродвигателей при эксплуатации .....	22
1.3.1 Надежность электроподвижного состава .....	22
1.3.2 Характеристика отказов эксплуатируемых тяговых электродвигателей ...	25
1.3.3 Анализ теплового состояния ТЭД .....	28
1.3.4 Оценка и контроль теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей в период эксплуатации электровозов.....	29
1.3.5 Обзор существующих систем мониторинга тяговых электродвигателей ..	32
1.4 Постановка задачи.....	34
<b>2 ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ..</b>	<b>36</b>
2.1 Обзор методов, применяемых для расчета температурного поля электрических машин .....	36
2.2 Математический аппарат для создания тепловой математической модели АТЭД.....	43
2.3 Математическая модель установившегося теплового состояния АТЭД (на примере двигателя НТА-1200).....	44
2.4 Расчет нагревания асинхронного тягового электродвигателя.....	53
2.4.1 Вентиляционный расчет АТЭД.....	53
2.4.2 Расчет тепловыделений в узлах двигателя.....	61
2.4.3 Расчет проводимостей тепловой схемы .....	64

2.5 Сравнительный анализ результатов разработанной тепловой математической модели.....	65
2.6 Выводы.....	69
3 ТЕПЛОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ .....	70
3.1 Расчет нестационарных температур узлов тягового асинхронного электродвигателя через коэффициенты влияния.....	71
3.1.1 Планирование эксперимента для определения коэффициентов корреляции.....	72
3.1.2 Выбор плана эксперимента .....	74
3.1.3 Реализация плана эксперимента.....	77
3.1.4 Оценка адекватности полученной выборки.....	81
3.1.4.1 Расчет функции отклика тепловой математической модели .....	82
3.1.4.2 Проверка адекватности регрессионной модели.....	84
3.1.4.3 Расчет коэффициентов корреляции Пирсона.....	86
3.1.5 Расчет нагревания АТЭД с помощью коэффициентов влияния.....	89
3.2 Расчет температур узлов ТЭД через постоянные нагрева .....	89
3.2.1 Определение постоянных нагрева элементов двигателя .....	91
3.2.2 Расчет нагревания ТЭД с использованием постоянных нагрева узлов электродвигателя.....	92
3.3 Сопоставление методов, оценка точности .....	93
3.4 Выводы.....	95
4 СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ....	96
4.1 Назначение системы мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей.....	96
4.2 Принцип работы системы мониторинга асинхронных тяговых электродвигателей.....	97
4.2.1 Регулирование частоты вращения тягового электродвигателя .....	98

4.2.2 Расчет частоты вращения тягового двигателя для системы теплового мониторинга тяговых электродвигателей .....	100
4.2.3 Алгоритм работы системы мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей переменного тока.....	101
4.3 Апробация работы системы мониторинга теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей.....	104
4.3.1 Апробация работы тепловой математической модели в установившемся режиме работы.....	106
4.3.2 Апробация тепловой математической модели для неустановившихся режимов работы АТЭД.....	112
4.4 Анализ полученных результатов испытаний .....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	116
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	118
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 .....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 .....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 .....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 .....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 .....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 .....	153

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Развитие экономики страны напрямую зависит от ее транспортной системы. Российские железные дороги (РЖД) являются второй по величине транспортной системой мира [1]. По общей длине эксплуатационных путей они уступают только США. Однако по протяженности электрифицированных магистралей российские железные дороги занимают первое место в мире. В настоящее время более 20 % грузооборота и 10 % пассажирооборота всех железных дорог мира осуществляет Российская Федерация [1].

В России железнодорожный транспорт остается ведущим элементом транспортной системы. Значительная часть пригородных и дальних перевозок как пассажирских, так и грузовых производится с помощью железной дороги. По данным на 01.01.2012 года 43,3 % от общего грузооборота, осуществляемого всеми видами транспорта (с учетом трубопроводного) производится РЖД [2]. Актуальность использования железнодорожного транспорта обоснована возможностью круглогодичного регулярного движения, перевозок грузов на большие расстояния, а также в районы со слабым развитием коммуникаций других видов транспорта, в частности в регионы Сибири и Дальнего Востока. Развитие железнодорожного комплекса позволяет поддерживать высокий уровень конкурентоспособности национальной экономики страны, увеличивать мобильность населения, производить оптимизацию товародвижения и снижать совокупные транспортные издержки грузоперевозок [1].

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, утвержденная Правительством РФ от 17 июня 2008 года № 877-р [1], включает в себя много аспектов. Одним из них является совершенствование локомотивного парка. Локомотивы являются основными техническими средствами системы железнодорожного транспорта,

обеспечивающими его надежное функционирование. Для поддержания конкурентоспособности системы РЖД в области электроподвижного состава (ЭПС) необходимо выполнение следующих важных задач [3]:

- повышение скорости пассажирских поездов для увеличения дальности перевозок и веса грузовых поездов с целью увеличения провозной способности электрифицированных железных дорог;

- снижение себестоимости перевозок, в основном за счет уменьшения затрат на обслуживание и ремонт.

В настоящее время пассажирский и грузовой электровозный парк в основном оснащен электровозами с тяговым электроприводом постоянного или пульсирующего тока. Использование данных видов электродвигателей обусловлено их высокой перегрузочной способностью и хорошими регулировочными свойствами, обеспечивающими возможность управления скоростью электропоезда в широком диапазоне. Однако необходимо отметить, что применение данного типа электропривода не позволяет полностью решить задачу повышения скорости поездов, поскольку резерв увеличения мощности коллекторных машин, применяемых в качестве тяговых, еще к концу 70-х годов XX века был практически исчерпан.

Снижение затрат на обслуживание и ремонт является возможным с применением в подвижном составе бесколлекторных машин. Начало внедрения этих типов электродвигателей, в частности асинхронных, в качестве тяговых стало возможным только в 80-е годы XX века в связи с развитием управляемых силовых полупроводниковых приборов (ППП). Появление мощных запираемых силовых ППП GTO-тиристоров, а в дальнейшем и IGBT-транзисторов дало возможность эффективного использования асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД) на локомотивах. С этого времени началось теоретическое и практическое освоение асинхронного тягового электропривода в электроподвижном составе. Большой вклад в развитие теории проектирования и эксплуатации тяговых машин внесли отечественные ученые:

В.Д. Авилов, В.А. Винокуров, Ш.К. Исмаилов, М.Ф. Карасев, В.А. Кучумов, М.Д. Находкин, В.С. Хвостов и многие другие.

К настоящему моменту существует тенденция оснащения локомотивного парка РЖД грузовыми электровозами, оснащенными асинхронными тяговыми приводами. Согласно программам модернизации Российских железных дорог предусматривается внедрение локомотивов с улучшенными техническими характеристиками и локомотивов нового поколения, оснащенных тяговым приводом как постоянного, так и переменного тока. По плану закупки техники ОАО «РЖД» до 2015 года предполагается приобретение большого количества электровозов с асинхронным электроприводом [4, 5]. Таким образом, удельный вес локомотивов, оснащенных АТЭД, в системе РЖД будет постоянно увеличиваться.

Статистика эксплуатации тяговых электродвигателей постоянного тока локомотивов показывает сниженное значение сроков эксплуатации и межсервисного интервала тяговых электродвигателей (ТЭД) по сравнению с установленными регламентом [6]. Это является следствием того, что эксплуатация тягового электропривода происходит в постоянно тяжелых условиях работы, которые способствуют более частому выходу их из строя. Главными причинами выхода являются: пробой изоляции обмоток; межвитковые замыкания в обмотках машины [6]. Основной причиной приведенных неисправностей является ускоренное старение изоляции из-за частого перегрева обмоток электродвигателя при работе его в режимах, отличных от номинального.

К настоящему времени накопилось большое количество исследований, посвященных проблемам, связанным с тепловым состоянием тяговых машин постоянного тока. Сюда можно отнести работы И.Н. Богаенко, А.И. Борисенко, Э.И. Гуревича, Ш.К. Исмаилова, Д.И. Санникова, Г.А. Сипайлова, В.П. Смирнова, Н.А. Платова, И.Ф. Филиппова, А.И. Яковлева и другие. Однако исследования теплового состояния тяговых электродвигателей переменного тока в эксплуатации только начинаются. Данные исследования отображены в работах Е.Ю. Логиновой, Ф.В. Тихонова, В.В. Чащина. Объяснением

этому является то, что сейчас основное применение АТЭД имеют на пассажирском подвижном составе. Как известно, эксплуатация тягового электропривода пассажирских локомотивов осуществляется в более щадящих режимах по сравнению с грузовыми (при не высоких нагрузках и высокой интенсивности охлаждения), поэтому вероятность их отказа по причине предельного теплового состояния является маловероятной. Эксплуатация грузовых локомотивов с асинхронным приводом происходит в тяжелых аналогичных условиях, что и у локомотивов, оснащенных ТЭД постоянного тока, поэтому вероятность перегрева элементов конструкции электродвигателя является достаточно высокой.

Нужно отметить, что выпускаемые в настоящее время электровозы с АТЭД оснащаются тепловыми системами защиты оборудования. Так, для тяговых электродвигателей локомотива предусмотрена установка блока защиты, представляющая собой термодатчик, установленный в сердечник статора, с блоком управления, который при превышении допустимого значения температуры данного узла выводит сообщение на рабочий монитор машиниста поезда. В свою очередь, машинист может принять решение и изменить параметры работы электровоза и электродвигателя в частности. Необходимо отметить, что данная система контролирует значение температуры только одного элемента конструкции тягового двигателя, который не всегда является наиболее нагретым. То есть получаемая информация не всегда позволяет корректно оценить тепловую нагрузку всей машины. Для получения же достоверной информации о тепловом состоянии всего объекта необходимо использование большего количества контрольных узлов, а соответственно установка большего количества термодатчиков. Это не всегда является возможным по причине загромождения пространства внутри машины и усложнения системы защиты. Таким образом, исследования асинхронных тяговых электродвигателей как тепловых объектов и создание для них систем оптимального мониторинга теплового состояния становятся актуальными. Применение таких систем необходимо как при испытаниях, так и в период эксплуатации, чтобы не допустить предельного температурного состояния АТЭД.

**Целью диссертационной работы** является разработка системы мониторинга теплового состояния тяговых асинхронных электродвигателей локомотивов при различных режимах работы, которая позволит непрерывно контролировать тепловое состояние АТЭД и своевременно предотвращать возможные аварийные ситуации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить обзор существующих систем теплового мониторинга тяговых электродвигателей электровозов.

2. Определить минимальное количество необходимых входных данных для работы тепловой математической модели.

3. Разработать математическую модель теплового состояния АТЭД для определения установившихся температур узлов тягового электродвигателя.

4. Разработать тепловую математическую модель для определения температур элементов конструкции электродвигателя, работающего в нестационарных режимах.

5. Разработать систему мониторинга теплового состояния АТЭД на основе предлагаемых математических моделей с использованием минимального количества оборудования для ее реализации.

При решении поставленных задач по исследованию теплового состояния тяговых асинхронных электродвигателей в диссертационной работе использовались методы теории расчета электрических машин и расчета, тепловых полей электродвигателей, численного моделирования и экспериментальных натурных испытаний.

В проведенных исследованиях использованы следующие программные продукты: Matlab 7, Mathcad 14, Elcut 5.8.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Разработан алгоритм работы системы мониторинга теплового состояния асинхронного тягового электродвигателя для всех режимов эксплуатации электровоза.

2. Разработана математическая модель теплового состояния асинхронного тягового электродвигателя для неустановившихся режимов работы.

3. Разработана математическая модель установившегося теплового поля тягового асинхронного электродвигателя, отличающаяся от известных ранее вариантов подробным рассмотрением элементов статора и ротора электродвигателя, учитывающая влияние температуры и расхода охлаждающего воздуха на параметры температурного поля машины.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Созданная система мониторинга теплового состояния может быть использована для оценки и контроля теплового состояния тяговых асинхронных электродвигателей электровозов при эксплуатации, а также при проведении технического обслуживания электродвигателей.

2. Создана компьютерная программа для расчета температур узлов асинхронного тягового двигателя с определением наиболее нагретого узла для установившегося режима.

3. Разработаны методики определения температурного поля тягового электродвигателя в неустановившихся режимах работы с определением наиболее нагретого узла.

4. Смоделированы установившиеся температурные поля АТЭД в режиме перегрузки электродвигателя, с помощью которых выявлены места локального перегрева обмоток статора электродвигателя.

**Результаты диссертационной работы** использованы при выполнении ряда научно-исследовательских тем, а также при создании автоматической испытательной станции тяговых электродвигателей электровозов компанией ООО «Салют-М» г. Новосибирск. Разработанные в диссертационной работе математические модели асинхронных тяговых электродвигателей и рекомендации по расчетам температурных полей электрических машин используются в учебном процессе Национального исследовательского Томского политехнического университета при подготовке бакалавров по направлению

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», магистров (13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника») и специалистов по направлению 140601.65 «Электромеханика» по дисциплинам: «Проектирование электрических машин и аппаратов», «Учебно-исследовательская работа студентов», а также в выпускных квалификационных работах студентов. Подтверждением реализации результатов диссертационной работы является наличие актов о внедрении. Акты внедрения представлены в Приложении 9.

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель установившегося теплового состояния асинхронного тягового электродвигателя.
2. Математическая модель теплового состояния для неустановившихся режимов работы.
3. Система мониторинга теплового состояния асинхронного тягового электродвигателя, предназначенная для использования при эксплуатации на электровозе.
4. Экспериментальные исследования для оценки адекватности математических моделей.

**Апробация работы и публикации.** Материалы исследования докладывались и получили одобрение на следующих конференциях.

- IV Международная научно-техническая конференция «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы» (EECCES-2011), Екатеринбург – 2011 г.
- XVII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ 2011, Томск – 2011 г.
- XVIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Москва – 2012 г.
- IX международная научно-техническая конференция «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии», Омск – 2013 г.

- VII Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика», Новосибирск, – 2015.

По результатам проведенных исследований опубликовано 9 печатных работ, 4 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Содержание работы.** Диссертационная работа изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 18 иллюстраций и 8 таблиц, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 102 наименований и 9 приложений.

Во введении обоснована актуальность создания системы теплового мониторинга асинхронных тяговых электродвигателей и, в частности, необходимость контроля теплового состояния АТЭД на электровозах при эксплуатации.

В первой главе приведены особенности конструкции тяговых электрических машин и требования, предъявляемые к ним. Выполнен анализ отказов ТЭД. Представлены методы контроля теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей. Проведен критический обзор существующих систем теплового мониторинга тяговых электродвигателей. Сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке тепловой математической модели асинхронного тягового электродвигателя. Приведен обзор методов, с помощью которых можно проводить расчет температурных полей электрических машин. Описан необходимый математический аппарат, позволяющий моделирование температурных нагрузок машины. Представлена математическая модель установившегося теплового состояния АТЭД (на примере двигателя НТА-1200). Проведено сравнение результатов расчета по математической модели с моделированием в программном комплексе Elcut.

В третьей главе предложена математическая модель расчета температур узлов тягового асинхронного электродвигателя при работе в нестационарных режимах, включающая в себя два способа расчета. С помощью экспериментальных данных проведено сопоставление разработанных способов и оценка их точности. По результатам оценки представлены рекомендации, показывающие области

применения и возможности использования того или иного способа расчета неустановившегося температурного поля АТЭД.

В четвертой главе приведен принцип действия и алгоритм работы разработанной системы мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей переменного тока. Представлена апробация работы тепловой математической модели как основы системы мониторинга в установившемся и неустановившемся режимах работы. Проведен анализ полученных результатов.

В заключении приведены основные выводы по проделанной работе.

В приложениях представлены иллюстративные материалы, таблицы с результатами расчетов, акты внедрения результатов работы в производственный и учебный процессы.

Автор выражает благодарность научному консультанту Цукублину Анатолию Борисовичу за неоценимую помощь при работе с диссертацией.

# 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ И В ЭКСПЛУАТАЦИИ

## 1.1 Особенности конструкции тяговых электрических машин электроподвижного состава, требования предъявляемые к ним

Тяговые электродвигатели предназначены для приведения в движение транспортных средств, таких как электропоезда, городской электротранспорт, большегрузные электромобили, подъемно-транспортные машины и т.д. Отличительной конструктивной особенностью ТЭД от обычных электродвигателей большой мощности является компактность их конструкции в связи с ограниченным местом их размещения и условиями монтажа.

Для тяговых электродвигателей железнодорожного транспорта это также является актуальным. Установка ТЭД на электровозы осуществляется на рамах тележек, в связи с чем проектируемый электродвигатель локомотива должен иметь соответствующие размеры, чтобы уложиться в габариты тележки электровоза и обеспечивать требуемую нагрузку на ось. В Приложении 1 представлено размещение АТЭД на раму тележки электровоза 2ЭС10 «Гранит».

Ограниченные габариты ТЭД диктуют необходимость максимального использования внутреннего объема машины, что в свою очередь приводит к более высокой рабочей температуре ее узлов по сравнению с электрическими машинами общепромышленного производства [7].

Необходимо добавить, что условия эксплуатации таких электродвигателей происходят в более тяжелых условиях, чем электрических машин, расположенных в стационарных установках.

Под тяжелыми условиями работы здесь и далее будем принимать специфические условия эксплуатации тяговых электродвигателей электроподвижного состава [8, 9]:

- большие колебания температуры и влажности окружающей среды;
- разнообразные режимы работы ТЭД на локомотиве (кратковременный, повторно-кратковременный с частыми пусками);
- наличие механических воздействий на электродвигатель при разгоне или остановке поезда.

Электровоз и все его оборудование, в том числе и ТЭД, предназначены для эксплуатации в различных климатических зонах страны. При этом температурные пределы окружающей среды варьируются от (-50 °С) до (+50 °С) при относительно большой влажности воздуха в разное время года. Работа ТЭД при низких температурах способствует снижению механической прочности его отдельных элементов конструкции, а также является причиной появления трещин в изоляционных материалах. В свою очередь и высокие положительные температуры сказываются на электродвигателях отрицательно. Эксплуатация в сухом и теплом климате способствует ухудшению условий охлаждения электрической машины и ее запыленности, что приводит к пересыханию применяемых изоляционных материалов и, как следствие, ускоренному их старению. Повышенная влажность воздуха (во время снега или дождя) ухудшает объемное и поверхностное сопротивление изоляции, способствует ускоренной коррозии деталей выполненных из металла.

Необходимо отметить, что работа ТЭД электровозов связана с часто возникающими механическими нагрузками. Нагрузки, возникающие в двигателе, можно разделить на три группы [10]:

- нагрузки, вызванные статическим весовым нагружением и кратковременными переходными режимами (трогание, торможение, изменение режима работы электродвигателя и так далее);
- нагрузки, вызванные взаимодействием железнодорожного полотна и электровоза, прохождение стыков рельс и неровностей пути;
- нагрузки, вызванные собственной вибрацией ТЭД и другого оборудования электровоза.

Работа электродвигателей при таких нагрузках также способствует повреждению проводов обмоток машины в местах пайки, появлению трещин и разрушению электрической изоляции [7].

Таким образом, все вышеперечисленное накладывает повышенные требования на тяговые электрические двигатели при их проектировании для железнодорожного транспорта. Принимая во внимание, что работа ТЭД сопровождается частыми механическими, тепловыми и электрическими перегрузками, толчками и тряской, в конструкцию машины должны быть заложены повышенная электрическая и механическая прочность ее узлов.

Нужно отметить, что тяговые электродвигатели, применяемые на электровозах, имеют повышенную защиту узлов для защиты от агрессивных внешних воздействий среды [11]. Для обеспечения необходимого охлаждения элементов конструкции электродвигателя применяется независимая система вентиляции.

## 1.2 Обзор тяговых электрических машин, применяемых в электроподвижном составе, и их характеристик

Исторически развитие тягового привода в области железнодорожного транспорта началось с освоения ТЭД постоянного тока. Традиционно как в России, так и за рубежом основное применение имеют машины постоянного и пульсирующего тока. В настоящее время в российском локомотивном парке основными типами тяговых электродвигателей являются ТЛ-2К, ЭДП-810, ЭК-810, НБ-418, НБ-514 и другие. Широкое применение данных двигателей обусловлено их высокой перегрузочной способностью и хорошими регулировочными свойствами [8, 9], позволяющими достаточно просто производить изменение скорости движения ЭПС.

По оценке специалистов потребность в грузовых и пассажирских железнодорожных перевозках в Российской Федерации к 2015 году по

сравнению с 2000 годом возросла в 2–4 раза в зависимости от региона. Обеспечение такого спроса на транспортные услуги производится за счет увеличения массы и скорости движения поездов. На начало 2013 года в инвентарном парке компании ОАО «РЖД» насчитывалось около 20 тыс. локомотивов [12, 13]. При этом необходимо отметить, что возраст большинства тепловозов и электровозов составлял около 25–30 лет (при сроке службы электровоза - 33 года, тепловоза – 26 лет), ежегодно выводятся из эксплуатации более одной тысячи единиц [12].

Сложившаяся ситуация способствовала тому, что одним из направлений реформирования железнодорожного транспорта согласно «Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года» является оснащение электровозного парка электровозами нового поколения [1, 5], которые должны отвечать следующим основным требованиям [5, 14]:

- улучшение тяговых свойств на 15–20 %;
- экономия энергоресурсов на 10–15 %;
- увеличение межремонтных пробегов в 2 раза;
- повышение коэффициента готовности машин за счет обеспечения их высокой надежности и ремонтпригодности;
- обеспечение КПД электровозов постоянного тока до 90 %, КПД электровозов переменного тока до 88 %;
- срок службы магистральных локомотивов — 40–45 лет;
- срок службы маневровых тепловозов — 50 лет.

Достичь многих из представленных необходимых показателей, применяя только тяговый электропривод постоянного тока, не представляется возможным, поскольку ТЭД постоянного и пульсирующего тока дополнительно к достоинствам имеют ряд серьезных недостатков. К основным из них можно отнести следующие [11]:

- сравнительно невысокая надежность коллекторного узла и щеточного аппарата;

- ограничение по условиям коммутации и механической прочности;
- высокие расходы на техническое обслуживание в условиях эксплуатации и ремонт;
- повышенная масса двигателя при сравнительно низких значениях вращающего момента;
- повышенный расход цветного металла и активных материалов.

Важно отметить, что к настоящему моменту в области проектирования и производства тяговых электрических машин постоянного тока промышленность практически подошла к предельным мощностям по условиям коммутации электромеханическим коммутатором.

Выходом из данной ситуации согласно стратегии ОАО «РЖД» является оснащение железнодорожного парка страны электровозами нового поколения с асинхронными тяговыми электродвигателями, которые лишены вышеуказанных недостатков и позволяют снять ограничения по мощности.

Бесколлекторные электрические машины переменного тока имеют широкое применение во всех отраслях техники. Широта использования данных двигателей обусловлена их повышенной надежностью и простотой в обслуживании. Важным фактором применения асинхронных двигателей в качестве тяговых является то, что они имеют жесткую механическую характеристику, такую же, как и двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, вследствие чего повышается коэффициент сцепления колес с рельсами [15, 16].

Представленный в таблице 1.1 сравнительный анализ удельных показателей конструкций тяговых электродвигателей разного типа и назначения [7, 11, 15, 17, 18, 19] показывает, что наименьшие удельные показатели имеют ТЭД электровозов коллекторного типа. Как уже отмечалось, это обусловлено имеющимися в электродвигателях постоянного и пульсирующего тока жесткими ограничениями роста электромагнитных нагрузок и частоты вращения. Так, например, для шестиполусного ТЭД по условиям потенциальной и коммутационной напряженности на коллекторе

допустимой окружной скорости коллектора и тепловой напряженности обмотки якоря максимальная частота вращения не может превышать 1700 об/мин [11].

Таблица 1.1. Удельные показатели тяговых электродвигателей

Марка двигателя	Тип двигателя	Мощность, Р, кВт	Крутящий момент на валу, М, Н·м	Масса, м, кг	Удельная мощность, $P/(m \cdot n) \cdot 10^{-4}$ , кВт/(кг·об/мин)	Удельный момент, М/м, Н·м/кг
ТЛ-2К1	Коллекторный	575	6953	5050	1.455	1.38
НБ-508А	Коллекторный	560	6684	4383	1.652	1.52
НБ-514	Коллекторный	795	8210	4077	2.108	2.02
НБ-418К	Коллекторный	740	9549	4350	1.910	2.20
ЭК-810Ч	Коллекторный	775	9355	5000	2.013	1.87
ДАТ-510	Асинхронный	510	7500	2950	2.660	2.54
БФНА7067	Асинхронный	1600	8984	2370	3.971	3.79
НТА-1200	Асинхронный	1170	8630	2453	3.707	3.52

Сравнение тяговых электродвигателей постоянного и переменного тока [7, 15, 18, 19, 20, 21] позволяет сделать вывод о том, что эксплуатируемые в настоящее время ТЭД постоянного и пульсирующего тока обладают в 1,5-2 раза меньшими значениями удельных показателей мощности и момента по сравнению с асинхронными тяговыми двигателями.

Первыми отечественными макетными образцами ЭПС с асинхронными тяговыми двигателями стали: в 1970 году электропоезд ЭР9А и в 1971 году электровоз ВЛ80<sup>а</sup> с питанием от контактной сети переменного тока напряжением 25 кВ [11]. Несмотря на улучшенные удельные показатели АТЭД по сравнению с тяговыми двигателями постоянного тока, их широкое применение на локомотивах стало возможным только с появлением силовой

полупроводниковой техники и средств автоматики, рассчитанных на большие токи. Развитие ППП и появление IGBT-транзисторов позволило создать надежные и экономичные статические преобразователи частоты, имеющие приемлемые размеры и массы для установки их в локомотивах. Это дало возможность создать техническую базу для освоения и внедрения асинхронного тягового привода в ЭПС.

Активная работа в направлении создания электроподвижного состава с тяговым электроприводом началась с приходом XXI века. В это время были созданы ряд опытных образцов.

Так в 2004 году создан образец четырехосного маневрового тепловоза ТЭМ21 мощностью 1500 л.с. [22]. С 2005 по 2007 годы производился выпуск серии электровозов двойного питания ЭП10 [14]. В это же время был введен в эксплуатацию магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25А «Витязь» [22]. В 2010 году был выпущен и введен в экспериментальную эксплуатацию грузовой электровоз постоянного тока 2ЭС10 с асинхронным приводом, созданным совместно с предприятием немецкого концерна «Siemens AG» и ЗАО «Группа Синара» на базе Уральского завода железнодорожного машиностроения ООО «Уральские локомотивы», получивший название «Гранит».

Сравнение технико-экономических показателей первой опытной эксплуатации электровоза 2ЭС10 с показателями эксплуатируемых в настоящее время грузовых электровозов, оснащенных тяговым электроприводом постоянного тока, показало [16, 23, 24]:

- снижение затрат на обслуживание и ремонт АТЭД;
- повышение надежности за счет применения микропроцессорной системы управления, использования управляемых статических преобразователей и асинхронных тяговых двигателей.

Подобные показатели были также получены для пассажирского поезда ЭТ4А, оснащенного асинхронным тяговым электродвигателем. Его подконтрольная эксплуатация с июня 2012 и по июнь 2013 года в режиме

ускоренного пригородного поезда проходила на маршруте Санкт-Петербург – Балтийский – Луга Октябрьской железной дороги. Заявленные параметры и характеристики данного электропоезда также были подтверждены [5]. Как отмечает Гапанович В.А., расходы, связанные с проведением регламентных работ поезда ЭТ4А, в сравнении с электропоездом ЭТ2М уменьшены примерно на 15 % [5].

Таким образом, применение асинхронных двигателей в качестве тяговых на подвижном составе позволяет достигнуть предъявляемых к ним высоких энергетических показателей за счет:

- отсутствия в конструкции двигателя коллектора, повышая его надежность;
- меньшего расхода меди двигателями переменного тока по сравнению с двигателями постоянного тока при одинаковом моменте и частоте;
- меньшей массы и габаритов тяговых двигателей;
- формирования сигнала системы управления АТЭД.

Представленный план закупок тягового подвижного состава «Российскими железными дорогами» подтверждает увеличение уровня оснащения российских депо электровозами постоянного тока с асинхронным тяговым приводом. Так, в планах закупки техники доля локомотивов новых серий оснащенных АТЭД в 2013 году составило более 16 %, а в 2015 году – 25 % [5].

### 1.3 Техническое обслуживание и диагностика тяговых электродвигателей при эксплуатации

#### 1.3.1 Надежность электроподвижного состава

Новые экономические условия, в которых работает железнодорожный транспорт, ставят в числе первоочередных задач эффективное использование локомотивного парка и обеспечение приемлемого уровня его эксплуатационной надежности [25]. Экономические показатели железной дороги, сохранность грузов и жизни людей зависит напрямую от надежности используемого оборудования, в частности эксплуатируемых локомотивов [6]. В свою очередь надежность электровоза определяется надежностью отдельных его элементов, узлов и механизмов. Поэтому достичь требуемого уровня надежности можно путем сохранения надежности работы узлов ЭПС.

Анализ основных показателей технического состояния локомотивного парка, эксплуатируемого в настоящее время в сети магистральных железных дорог РФ, показывает, что общее число неисправных локомотивов сохраняется на уровне 10–12 % в год. Также высокими являются показатели простоев на всех видах ремонта, количество отказов и случаев непланового ремонта локомотивов. При этом нужно отметить, что по данным на 2009 год наиболее часто выходят из строя электрическая аппаратура – (44–55) % и тяговые электродвигатели – (17–21) % [26].

Такой высокий уровень выхода из строя тяговых электродвигателей обусловлен вышеуказанными тяжелыми условиями их эксплуатации. ТЭД электровоза являются наиболее нагруженным оборудованием с точки зрения комплексного воздействия на них тепловых, электрических, механических и климатических факторов.

Другим фактором, объясняющим выход тяговых электродвигателей из строя, является их работа в электроподвижном составе, вес которого часто превышает критические возможности локомотивов. По данным обследования

технического состояния приписного парка локомотивного депо «Тайга» Западно-Сибирской железной дороги, средний вес поездов увеличен на 20–25 % от нормы, что приводит к росту числа случаев выхода из строя электрических машин [27]. Такие меры позволяют обеспечить необходимую экономическую эффективность в практике эксплуатации, но результатом этого является сокращение срока службы узлов электровоза, в первую очередь тяговых электродвигателей, колесных пар, электроаппаратуры. Тяговый подвижной состав, обладая определенным запасом надежности, накапливает неисправности, которые в дальнейшем приводят к массовым повреждениям. В среднем 50 % тяговых электродвигателей требуют ремонта не по пробегу, а по состоянию, по причинам повреждений, связанных с межвитковыми замыканиями якоря и катушек полюсов, пробоем изоляции якоря и катушек полюсов, трещинам валов якорей, износу моторно-осевых горловин и другие [28, 29].

Для снижения уровня повреждаемости электродвигателей проводятся мероприятия конструктивно-технологического характера при изготовлении и ремонте локомотивов [28, 30], однако данные о повреждениях тяговых двигателей за 1 полугодие 2011 года указывают, что удельная повреждаемость продолжает увеличиваться [5, 17]. При этом наибольшее количество отказов в работе приходится на тяговые электрические двигатели грузовых электровозов постоянного тока.

В период эксплуатации для адекватной оценки эксплуатационной пригодности таких электродвигателей необходим контроль их технического состояния, в связи с чем приобретают актуальность вопросы оценки и обеспечения надежности на самых ранних стадиях эксплуатации. Одним из путей повышения надежности и снижения эксплуатационных расходов является внедрение диагностики и переход от регламентированной системы технического обслуживания (ТО) и технического ремонта (ТР) к системе обслуживания по фактическому состоянию [23].

Отсюда вытекает высокая актуальность эффективного планирования сроков ТО и ТР на основе прогнозирования ресурса ТЭД по фактическому техническому состоянию в процессе эксплуатации.

В соответствии с ГОСТ Р 27.002-2009 [31] «ресурс» трактуется как суммарная наработка ТЭД от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Предельное состояние электродвигателя соответствует состоянию, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима. Критерий предельного состояния определяется совокупностью признаков, устанавливаемых нормативной и технической документацией. Выход за допустимые значения любого из признаков характеризует предельное состояние, потерю работоспособности, истощение ресурса и создает угрозу безопасности.

Вся совокупность признаков, характеризующих предельное состояние ТЭД, может быть представлена следующими группами:

- геометрические размеры отдельных изнашиваемых элементов и деталей машины, изменяющиеся в процессе эксплуатации, выход за допустимые пределы которых приводит к потере работоспособности;
- параметры электрической изоляции ТЭД, значения которых должны находиться в допустимых пределах;
- электрические параметры, включая характеристики коммутации, предшествующие круговому огню, электромагнитные и электромеханические переходные характеристики и т.д.;
- вибромеханические параметры, связанные с возникновением и развитием дефектов подшипников качения, зубозацепления и др.

Ресурс двигателя может быть определен лишь после того, как наступил отказ или достигнуто предельное состояние. Пока эти события не наступили, можно говорить только о прогнозировании этих величин с большей или меньшей достоверностью. ТР или ТО позволяют частично или полностью восстанавливать ресурс, возвращать ТЭД в работоспособное состояние. Таким

образом, для прогнозирования ресурса необходимо иметь значения во времени определяющих предельное состояние параметров тягового электродвигателя.

### 1.3.2 Характеристика отказов эксплуатируемых тяговых электродвигателей

Учитывая значительное количество выходов из строя электровозов по причине повреждения тяговых электродвигателей, необходимо проанализировать характерные отказы эксплуатируемых в настоящее время ТЭД.

Надежная и безотказная работа электрической машины как сложного устройства зависит от надежности работы его составных частей – магнитной системы, обмоток, для двигателей постоянного тока – коллектора и щеточного устройства. Выход из строя любой из этих частей приводит к отказу в работе всей машины.

В целом по сети российских железных дорог на сегодняшний день наиболее массовыми типами применяемых тяговых электродвигателей являются типы НБ-418К6 и ТЛ-2К1 (36 % и 38 % от общего количества ТЭД). Анализ статистических данных отказов тяговых электродвигателей показал примерно 50 % уровень порч и неисправностей данных типов электродвигателей от общего их количества. Так, для двигателя типа ТЛ-2К1 в 2004 году составило 46,9 %, а в 2005 году – 53,4 % [6].

В Приложении 2 представлены диаграммы распределения характера повреждений ТЭД по отдельным узлам и деталям двигателя ТЛ-2К1 за 2006–2010 года в случае планового и внепланового ремонта. По приписному парку локомотивного депо «Тайга» Западно-Сибирской железной дороги данные по распределению повреждений тяговых электродвигателей марки ТЛ-2К1 приведены в таблице 1.2 [27].

Данные показывают, что наибольшая часть отказов тяговых двигателей электровозов приходится на пробой и низкую изоляцию обмоток машины, а также на повреждения соединений между полюсами и компенсационной обмоткой. Это обстоятельство свидетельствует о наличии факторов, отрицательно влияющих на электрическую прочность изоляции обмоток. Проведенный анализ по другим типам тяговых двигателей показывает сохранение процентного соотношения повреждений на том же уровне [6, 26, 27, 29, 32].

Таблица 1.2.

Вид повреждения электродвигателя	Процент повреждений от общего количества, %
Пробой изоляции и межвитковые замыкания обмотки якоря	16 – 25
Пробой изоляции и межвитковые замыкания главных и дополнительных полюсов и компенсационной обмотки	12 – 16
Нарушение коммутации (круговой огонь)	8 – 16
Повреждение якорных подшипников	14 – 16
Нарушение распайки соединений обмотки якоря в петушках коллектора	5 – 6

Активная эксплуатация электроподвижного состава с асинхронным тяговым электроприводом только начинается, в связи с чем еще не имеется достаточного количества статистических данных о видах повреждений асинхронных тяговых машин.

Статистика отказов по асинхронным двигателям общепромышленного назначения показывает, что основные повреждения приходятся на обмотки двигателя – (85–95) %, и (2–5) % электродвигателей отказывают из-за повреждений подшипников [33, 34]. При этом основные отказы обмоток

обусловлены междувитковыми замыканиями обмотки статора (ОС) – 93 %, вызванные снижением электрической прочности электрической изоляции, а также повреждения целостности обмотки ротора (ОР) [33]. При этом можно предположить, что для АТЭД эти процентные соотношения будут сохраняться. Однако для полного анализа требуется статистика.

Наибольший процент отказов электродвигателей связан с выходом из строя изоляции по причинам превышения допустимых норм теплового состояния, воздействия механических усилий (давление, вибрация и удары), влияние влаги, агрессивных сред и других факторов. При этом одной из главных причин указанных повреждений как для машин постоянного, так и переменного тока является нарушение их теплового состояния (работа с недостаточным охлаждением или вообще без него). Учитывая то, что тяговые электродвигатели ЭПС как постоянного, так и переменного тока работают при одинаковых тяжелых условиях эксплуатации и нагрузках, а также, что системы охлаждения двигателей являются аналогичными, можно сделать вывод о том, что применяемая изоляция в АТЭД будет подвержена преждевременному старению. Имеется большая вероятность того, что основными видами повреждений асинхронных тяговых двигателей локомотивов будут также межвитковые и межфазные замыкания обмотки статора.

Постепенное разрушение изоляции в эксплуатационных условиях или во время профилактических испытаний обычно завершается пробоем – явлением, свидетельствующим о значительном снижении электрической прочности изоляции.

Необратимое изменение структуры и химического состава изоляции, происходящее под действием перечисленных факторов, в совокупности называется ее старением. Процесс ухудшения свойств изоляции в результате старения называется износом. Таким образом, термин «старение» относится к материалу; термин «износ» относится к изоляционной конструкции. В отдельных случаях износ может и не быть следствием старения. Кроме того, возможны повреждения изоляции, не связанные с износом: продавливание,

прорезание ее острыми кромками металлических деталей, образование трещин из-за значительных напряжений при изгибе и т.п. Такие местные дефекты часто развиваются сравнительно быстро и приводят к пробое изоляции задолго до существенного ухудшения ее свойств во всем объеме вследствие электрического или термоокислительного разрушения [35].

Скорость старения изоляции определяется в основном эксплуатационными условиями и свойствами применяемых материалов.

Среди различных факторов, определяющих ресурс изоляции электрических машин, одним из основных является тепловое старение.

### 1.3.3 Анализ теплового состояния ТЭД

Срок службы любого электромеханического устройства определяется в первую очередь его рабочей температурой и нагревостойкостью применяемых электроизоляционных материалов, а также электрической прочностью, влагостойкостью и механической прочностью применяемой изоляции.

Температура электродвигателя влияет на изоляцию обмоток, на работу подшипников, и другие активные элементы машины. Предельно допустимые температуры активных частей относятся к числу важнейших факторов, ограничивающих мощность ТЭД и, таким образом, оказывают определяющее влияние на повышение надежности и ресурса, а также на величину предельной единичной мощности.

Применяемая в электродвигателях изоляция должна соответствовать двум свойствам: теплоустойчивости и нагревостойкости. Теплоустойчивостью называется способность электроизоляционного материала сохранять свои свойства на определенном уровне при относительно кратковременном нагреве. Материал не должен при этом разрушаться и расслаиваться, изменять свой химический состав, не должно возникать значительных пластических деформаций материала и тому подобное [36].

Нагревостойкость характеризует способность материала без существенного ухудшения характеристик выдерживать воздействие предельной допустимой для данного класса изоляции температуры в течение периода времени, соответствующего ресурсу ТЭД и при обусловленных величинах других эксплуатационных воздействий.

Нагревание различных элементов ТЭД, особенно изоляции, допустимо до определенной температуры, выше которой происходит необратимое изменение физических свойств этих элементов (например, электрической пробой изоляции). При этом, как уже отмечалось, эксплуатация ЭПС происходит в тяжелых условиях, приводящих к регулярному нарушению теплового режима. Результатом чего, в свою очередь, является ускоренное старение изоляции, и, как следствие, происходит отказ тягового электродвигателя [35].

Таким образом, одним из основных факторов, наряду с электрическим, влияющим на срок службы изоляции обмоток ТЭД, является тепловой фактор. В связи с этим необходимым является постоянный контроль температуры узлов двигателя в процессе эксплуатации.

#### 1.3.4 Оценка и контроль теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей в период эксплуатации электровозов

В выпускаемых в настоящее время тяговых асинхронных двигателях для контроля теплового состояния машины встраиваются датчики температуры, в частности, в электродвигателях марки НТА-1200, в пакет статора вмонтированы терморезисторы типа РТ-100 [37].

Используемый датчик температуры (рис. 1.1) представляет собой два терморезистора в виде капсул 1, которые установлены в специальные гнезда в сердечнике статора 2. Соединение датчика со схемой управления электровоза осуществляется специальным кабелем 3 и штепсельным разъемом 4.

Терморезисторы соединены с выводным кабелем пайкой; место присоединения закрыто специальной уплотнительной крышкой 5 [7].

Основные технические характеристики рассматриваемого тягового электродвигателя представлены в Приложении 3.

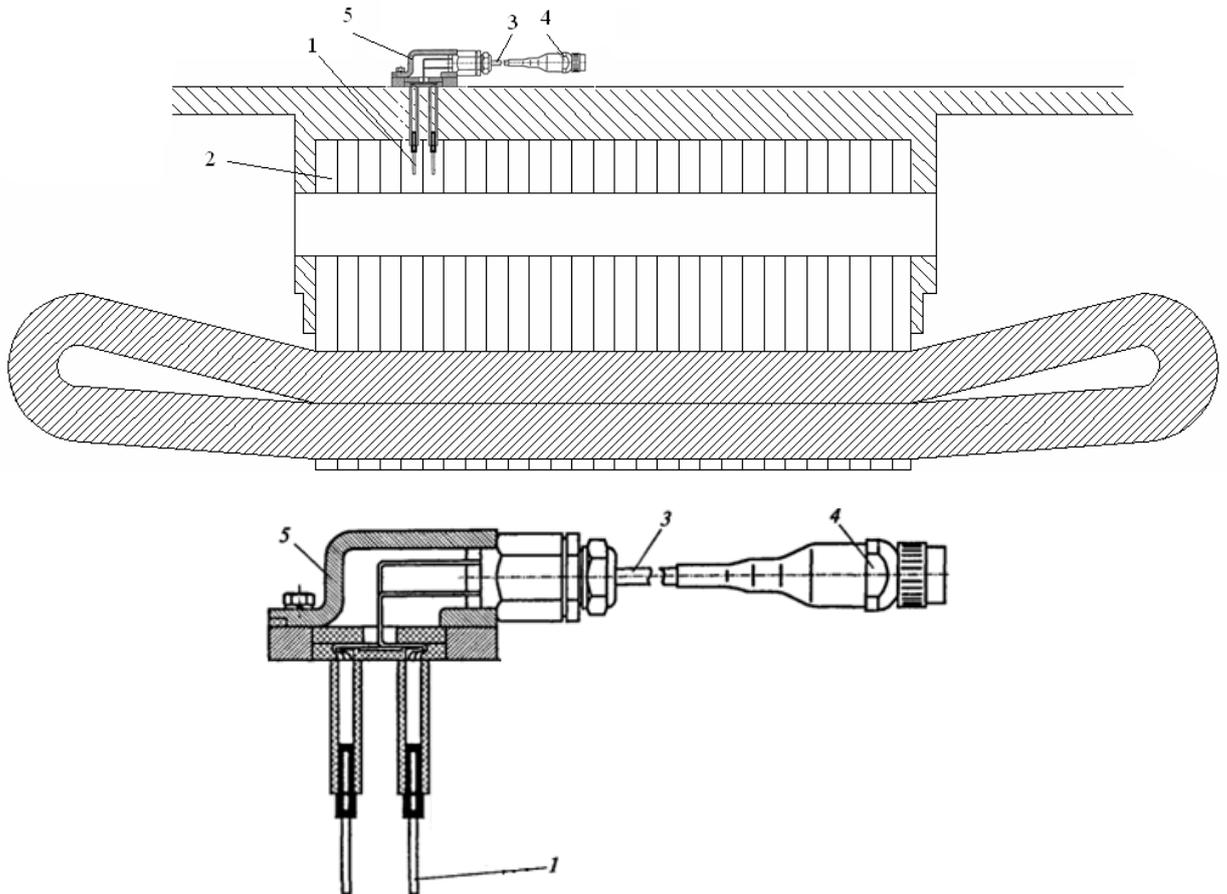


Рис. 1.1. Установка термодатчиков тягового электродвигателя НТА-1200:

- 1 – капсула с терморезисторами; 2 – сердечник статора; 3 – кабель;  
4 – штепсельный разъем; 5 – уплотнительная крышка

В свою очередь электровозы с данными типами электродвигателей, в частности электровоз ЭП10, оснащен блоком управления, контролирующим температуру каждого двигателя, установленного на электровозе [37]. Любое превышение температуры сердечника статора какого-либо электродвигателя выше допустимой сопровождается появлением соответствующего сообщения на дисплее пульта машиниста. При этом также происходит диагностическая

запись в энергонезависимую память системы управления. В последующем это дает возможность анализа и является основой для определения остаточного ресурса электродвигателя.

Опыт эксплуатации тяговых электрических машин показывает, что нагревание узлов конструкции происходит неравномерно, при разных режимах работы и условиях их охлаждения. Результаты исследований по распределению температуры вдоль оси электродвигателя, представленные в работах Борисенко А.И., Жадана В.А., Сипайлова Г.А., Тихонова Ф.В. и других показывают, что в крупных машинах с аксиальной системой охлаждения недостаточно учитывать только среднюю температуру охлаждающего потока внутри машины. Разница между температурами лобовых частей обмоток машины со сторон подачи и выхода охлаждающего воздуха из электродвигателя может достигать 15-35 % [38, 39, 40, 41]. Такой градиент температуры узлов ТЭД обусловлен достаточно большими его размерами, герметизацией его узлов от внешней среды для защиты от агрессивных воздействий и применением принудительной вентиляции. Необходимо отметить, что это характерно как для машин постоянного, так и для машин переменного тока. Работы Логиновой Е.Ф., Смирнова В.П., Тихонова Ф.В. и других, посвященные температурным исследованиям АТЭД, также подтверждают подобное распределение температур обмоток вдоль оси машины [39, 42, 43, 44]. Так, распределения температур по длине статора тягового электродвигателя ДАТ-470, приведенные в работах Ф.В. Тихонова [44, 45, 46], показывают, что разница между температурами передней и задней лобовыми частями обмотки статора может достигать 12-32 % при разных условиях охлаждения электродвигателя [38].

Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что информация о температуре сердечника статора в одной точке не может быть использована для корректной оценки теплового состояния всей машины в период эксплуатации, так как этот узел может не быть наиболее теплонапряженным при отдельных условиях эксплуатации электродвигателя. Определение остаточного ресурса

изоляции электродвигателя по температуре одного узла не является корректным.

Для получения достоверной информации технического состояния и оценки остаточного ресурса электродвигателя в период эксплуатации необходимо иметь информацию о полной картине температурного поля машины. Разработка для железнодорожного транспорта системы, позволяющей отслеживать значения температур всех узлов тягового электродвигателя локомотива во время его работы, становится актуальной задачей. Такой мониторинг позволит снизить затраты, связанные с устранением внезапных отказов и постановкой на внеплановые ремонтно-восстановительные работы. Определение наиболее нагретых частей АТЭД при различных режимах работы даст необходимую информацию для оценки остаточного ресурса АТЭД по тепловому старению изоляции.

### 1.3.5 Обзор существующих систем мониторинга тяговых электродвигателей

В настоящее время испытания электрических тяговых машин производится согласно Инструкции Министерства путей сообщения департаментов вагонного хозяйства и локомотивов ЦТВР №4099 «Испытание электрических машин подвижного состава на железнодорожном транспорте» [47], в соответствии с ГОСТами [48, 49, 50]:

- ГОСТ 25000-81. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. Методы испытаний на нагревание.

- ГОСТ 25941-83. Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия.

- ГОСТ 11929-87. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. Определение уровня шума.

Указанная инструкция предусматривает испытания электрической машины на надежность изоляции по методам определения сопротивления обмоток без отключения ее от сети. Данные испытания предполагают: измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины; измерение активного и реактивного сопротивления обмоток; проверку электрической прочности межвитковой изоляции обмоток. Нужно отметить, что при выполнении данных испытаний предполагается съём с подвижного состава электрической тяговой машины для оценки ее технического состояния. Таким образом, данные методы испытаний можно использовать только в качестве межсервисных.

Известны ряд российских и зарубежных патентных разработок в области диагностики асинхронных электродвигателей [30, 51, 52, 53]. В данных патентных исследованиях представлены способы определения исправности двигателей. Здесь используются встроенные датчики температуры обмоток для определения состояния изоляции обмотки статора. Так, например, в случае патента «Способ бесконтактного определения температуры обмотки короткозамкнутого ротора частотно-регулируемого асинхронного двигателя» [53] исследования производятся только для ротора электродвигателя. Нужно отметить, что все рассмотренные патентные разработки направлены на диагностирование одного из элементов конструкции – или статора и его обмотки, или ротора. Каждое из представленных решений не дает полного представления о текущем тепловом состоянии электродвигателя.

Следовательно, необходима такая система мониторинга, которая позволит получать полную информацию о температурном состоянии всех узлов электродвигателя, в том числе, недоступных в период эксплуатации для непосредственного измерения.

Проведенные патентные исследования позволяют сделать вывод о том, что предлагаемая в работе система не является первой в области мониторинга и контроля теплового состояния электродвигателей. Существует ряд патентных исследований, которые используют расчет температур косвенным путем [54,

55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63]. Температура определяется по аналоговой тепловой модели. Однако большинство моделей рассчитывают температуру обмоток электродвигателя в стационарных режимах работы. С учетом того, что температура данных узлов электродвигателя в неустановившихся режимах может значительно отличаться от температуры ее тепловой модели, применение предложенных патентных решений не позволяет получить картину теплового состояния тягового электродвигателя для всех элементов конструкции. Также важным является то, что, все они направлены на контроль теплового состояния тяговых электродвигателей постоянного тока.

С учетом современного развития электроподвижного транспорта в России и принятой стратегией оснащения локомотивов тяговыми электродвигателями переменного тока, возникает потребность непрерывного контроля и оценки тепловых нагрузок, эксплуатируемых АТЭД, с целью своевременного обнаружения неисправностей, связанных с нарушением теплового состояния. Для достижения указанной цели требуется решение задач, связанных с созданием системы мониторинга теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей в условиях их реальной эксплуатации.

#### 1.4 Постановка задачи

На основании изложенного задачи исследования в данной работе сводятся к следующему.

1.4.1 Разработать математическую модель теплового состояния асинхронного тягового двигателя для установившегося режима работы.

1.4.2 Разработать математическую модель теплового состояния асинхронного тягового двигателя для неустановившихся режимов работы.

1.4.3 Определить минимальное количество исходных данных, которые позволяют производить оценку теплового состояния асинхронного тягового электродвигателя, необходимые для работы тепловой математической модели.

1.4.4 Исследовать влияние входных данных на тепловое состояние асинхронного двигателя.

1.4.5 Разработать систему мониторинга теплового состояния асинхронного тягового двигателя, обеспечивающую непрерывный контроль температур узлов электродвигателя при эксплуатации.

## 2 ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Тепловые процессы имеют определяющее значение при эксплуатации тяговых электродвигателей. Нагрев лежит в основе различных термохимических, термofизических и термомеханических явлений, которые могут угрожать жизнеспособности конструкции. Текущие измерения температуры в эксплуатационных режимах выполняются с целью предупреждения аварийных ситуаций, при этом осуществляется сопоставление достигнутых температур узлов при работе машины с предельно допустимыми. Важно иметь информацию не только о величине достигнутой температуры, но и о длительности и частоте температурных воздействий, скорости нагревания или охлаждения и т.п. [10]. Получение такой информации требует присутствия в машине средств измерения температуры. Как уже отмечалось, установка большого числа термодатчиков является затруднительной. В связи с этим, оптимальным является получение информации о температурном поле машины расчетным путем.

Основным узлом системы прогнозирования и контроля теплового состояния электрической машины является ее тепловая математическая модель, позволяющая получить картину температурного поля.

### 2.1 Обзор методов, применяемых для расчета температурного поля электрических машин

Вопросы тепловых расчетов электрических машин в разное время были освещены в работах ученых: А.И. Борисенко, Ю.Г. Бухгольц, В.А. Жадана, О.Н. Костикова, Д.И. Санникова, Г.А. Сипайлова, В.А. Тюкова, И.Ф. Филиппова, Т.В. Честюнина, А.И. Яковлева и других [39, 40, 41, 64, 65].

В настоящее время многочисленные теоретические разработки, применяемый математический аппарат позволяют производить тепловой расчет электрических машин с большой точностью. Задачей теплового расчета является определение температуры активных частей машины, точки с максимальной температурой, вычисление тепловых потоков между смежными элементами конструкции, то есть расчет температуры в машине для установившегося режима работы.

Среди аналитических методов расчета теплового поля электродвигателей наиболее широкое применение имеют следующие методы [39, 40, 64, 65]:

- тепловых параметров;
- эквивалентных тепловых схем;
- температурного поля.

Метод тепловых параметров (МТП) использует принцип наложения, согласно которому установившееся превышение температуры меди обмотки, так же как и любой другой части машины, представляют в виде суммы частичных превышений  $\Delta T_M$ , обусловленных соответствующими частичными потерями, выделяющимися в других частях машин.

Положения МТП стали основой метода теплового расчета с использованием эквивалентных тепловых схем применительно к машинам постоянного тока.

Вторым методом является метод эквивалентных тепловых схем (метод ЭТС). Разработка этого метода связана со стремлением обойти трудности расчета двухмерных и трехмерных температурных полей в активных частях электрических машин. Решение уравнения Пуассона для таких полей является довольно затруднительным. Теоретическое обоснование упрощения решений двухмерных процессов теплопроводности в электрических машинах дал в 1931 году Зодерберг, предложивший рассматривать двухмерное течение тепла в пластине как результат взаимодействия двух одномерных потоков, каждый из которых испытывает сопротивление в рассматриваемом направлении [40]. Результирующий тепловой поток в этом случае определяется как сумма двух

параллельных сопротивлений по осям  $x$  и  $y$ . Суммирование сопротивлений осуществляется в соответствии с правилами сложения сопротивлений в электрических цепях. При этом предполагается аналогия тепловых и электрических потоков, основанная на единой форме уравнений теплообмена (закон Фурье):

$$P = \frac{\lambda S_{cp} \Delta T}{\delta} = \frac{\Delta T}{R_{\lambda}},$$

и электрического тока (закон Ома):

$$I = \frac{k S_{cp} \Delta U}{l} = \frac{\Delta U}{R_{\rho}},$$

где  $S_{cp}$  – средняя площадь теплопередающей поверхности;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$k$  – удельная электрическая проводимость;

$\Delta T$  – падение температуры на длине  $\delta$ ;

$\Delta U$  – разность потенциалов на длине  $l$  проводника с сечением  $S$ ;

$R_{\lambda}$  – тепловое сопротивление данного участка пути теплового потока;

$R_{\rho}$  – электрическое сопротивление.

В эквивалентных тепловых схемах разность температур соответствует разности потенциалов  $\Delta U$ , тепловые потоки – электрическим токам, а тепловые сопротивления – электрическим сопротивлениям.

Второе уравнение метода эквивалентных тепловых схем аналогично уравнению первого закона Кирхгофа и выражает факт, что при стационарных режимах в узлах цепи не может происходить накопления тепловой энергии

$$P = \sum_{i=1}^n q_i,$$

где  $P$  – мощность теплового источника;

$q_i$  – тепловой поток в  $i$ -й ветви, отходящей от теплового источника.

Необходимо отметить, что данный метод предполагает ряд допущений. При составлении схемы замещения действительные распределенные источники тепла и распределенные тепловые сопротивления заменяются небольшим

количеством сосредоточенных источников и сосредоточенных эквивалентных тепловых сопротивлений, причем последние предполагаются не зависящими от величины теплового потока [40]. Это позволяет применить в расчетах хорошо разработанную теорию электрических цепей, свести метод ЭТС к линейным тепловым цепям и пользоваться обычными алгебраическими методами. С учетом того, что тепловые сопротивления, определяемые через параметры среды (коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи, кинематическую вязкость, теплоемкость и т. п.), зависят от температуры, при расчете по методу ЭТС задаются заранее ориентировочные температуры, по которым определяют все теплотехнические параметры охлаждающей среды и материалов.

Особенностью метода является то, что в электрических цепях обычно определяют ток, считая напряжение известным. В методе ЭТС ставится обратная задача – по известным величинам тепловых источников необходимо определить их температуру. В отличие от электрических цепей тепловые цепи всегда изображаются разомкнутыми.

При составлении эквивалентных тепловых схем производится учет всех основных факторов, влияющих на температуру машины, но при этом не должно быть ее чрезмерного усложнения. Схема составляется на основании анализа опытных данных о распределении тепловых потоков и предварительных оценок величин отдельных тепловых сопротивлений. При составлении сложных ЭТС, состоящих из нескольких параллельных ветвей, возможно считать одну или несколько из ветвей разорванными и теплоотдачу в этом направлении можно не учитывать, если тепловое сопротивление одной из ветвей значительно больше остальных [40, 41].

Данный метод позволяет рассчитывать системы теплоотдачи любой сложности с достаточно малыми погрешностями. Повышения точности расчета можно достичь за счет увеличения числа рассматриваемых элементов, на которые разбивается электрическая машина. При этом имеется возможность найти распределение температуры в элементах машины и определить узел,

имеющий наибольшую температуру. Точность тепловых расчетов зависит от следующих факторов:

- точности определения потерь источников теплоты;
- точности определения коэффициента теплопередачи, который подвержен значительному разбросу, особенно по технологическим причинам, под влиянием появления воздушных промежутков, изменения качества пропитки и так далее;
- точности расчета коэффициента теплоотдачи, так как имеющиеся эмпирические формулы не могут учитывать влияние всех факторов и условий.

Применение дифференциальных уравнений теплопроводности для ЭТС активных частей электрической машины на основании общих законов теплообмена стало основой метода температурного поля. Дифференциальные уравнения позволяют учитывать [40]:

- граничные условия тепловых связей установленных с помощью ЭТС;
- подогрев охлаждающей среды;
- асимметрию по длине активных частей;
- конструктивные особенности в местах перехода пазовой части обмотки в лобовые.

Дифференциальный подход является хорошей основой для проведения анализа влияния параметров на нагрев активных частей и позволяет сделать ряд ценных практических выводов. Использование данного метода дает возможность определять температурные поля в элементах машины.

Стоит отметить, что расчет крупных электрических машин по методу температурного поля имеет особенность, связанную с практическим отсутствием тепловых потоков из одной активной части в другую. Это обстоятельство дает возможность разделить активные части крупной электрической машины на элементы более простой геометрической формы, независимые в тепловом отношении друг от друга. В малых и средних машинах, особенно в асинхронных двигателях, взаимное тепловое влияние, например, ротора на статор, сердечника на обмотку и так далее, более заметно.

Поэтому в этих случаях сначала рассматривают ЭТС машины в целом и определяют тепловые потоки, а затем применяют метод температурного поля для отдельных элементов.

Другим подходом расчета температурных полей электрических машин является применение численных методов. К наиболее распространенным среди них можно отнести метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ).

В последнее время наибольшее распространение получили два численных метода расчета: МКЭ и МГЭ. Применительно к задачам электромеханики МКЭ позволяет рассчитывать электрические, магнитные, температурные и другие поля [66, 67]. Суть метода конечных элементов состоит в представлении любой непрерывной функции, такой как векторный или скалярный магнитный потенциал, индукция, температура и т.п., аппроксимированной дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Решение уравнений поля в МКЭ определяется исходя из условия минимума энергетического функционала или ортогональности невязки уравнений поля и интерполяционных функций конечных элементов [68, 69, 70].

В настоящее время численные методы имеют широкое применение. Признание данных методов обусловлено значительным прогрессом быстродействующих цифровых вычислительных машин, которые позволили исследователям решать с высокой степенью точности задачи по определению различных физических полей [66, 67, 70]. Без использования электронных вычислительных машин (ЭВМ) такие расчеты были бы чрезвычайно трудоемки или вообще невозможны.

Сегодня на рынке САЕ-систем существует ряд программных пакетов, позволяющих производить расчеты температурных полей. Так, например, можно привести программный пакет, предложенный фирмой Integrated Engineering Software по расчету плоских и объемных электромагнитных и электростатических полей. Другим примером программного обеспечения с

подобными возможностями является программный пакет ELCUT отечественного производства, разработанный Санкт-Петербургской фирмой «ТОР», для расчета двумерных полей с помощью МКЭ [71, 72, 73]. Необходимо отметить, что данный продукт отличается простотой использования и сравнительно невысокой ресурсоемкостью электронно-вычислительной машины. Существенным ограничением указанных программных продуктов остается возможность реализации расчета моделирования температурных полей только в установившемся режиме, что является недостаточным для поставленных задач в данной работе.

Сегодня реализация расчетов нестационарных тепловых процессов стала возможной с помощью приложения Ansys Icerak, программного комплекса ANSYS. Ansys Icerak является специализированным программным средством для разработки электромеханических и электронных устройств и элементов их корпусов с целью оценки тепловых нагрузок [74]. Однако для полноценного применения указанного программного продукта требуется наличие высокопроизводительной и дорогостоящей компьютерной техники, а также временных ресурсов. Последние требования вводят существенные ограничения и/или делают невозможным реализацию мониторинга теплового состояния АТЭД с помощью данного приложения.

Сравнение аналитических и численных методов расчета можно сделать вывод о том, что все приведенные методы имеют как достоинства, так и недостатки. Так, при использовании численных методов, используемых в вышеуказанных программных комплексах, необходимо выполнять расчет для каждой совокупности значений параметров. Таким образом, общая картина температурного поля часто может быть получена только за счет большого количества расчетов.

В свою очередь, аналитические методы расчета температурных полей дают возможность получения общего решения, которое позволяет составить полное представление о влиянии различных параметров на поле машины без

помощи сложной и достаточно дорогостоящей вычислительной техники и программного обеспечения, а также большого количества времени.

В соответствии с поставленной задачей создания системы непрерывного контроля теплового состояния тяговых асинхронных двигателей во время их эксплуатации оптимальным является применение аналитических методов расчета температурного поля. Использование методов МТП и ЭТС позволит создать полное математическое описание тепловых процессов, происходящих в электрической машине, и производить его расчет в реальном времени работы электродвигателя на электровозе.

## 2.2 Математический аппарат для создания тепловой математической модели АТЭД

Использование метода эквивалентных тепловых схем и метода температурного поля в совокупности позволяет создать тепловую математическую модель (ТММ) тягового асинхронного электродвигателя и учесть особенности его работы на электровозе [9, 10, 11, 75], такие как:

- изменения нагрузки на валу;
- колебания напряжения питающей сети;
- изменения частоты вращения ротора;
- параметры охлаждающего воздушного потока принудительного осевого охлаждения;
- условия охлаждения частей обмоток, связанных с применяемыми системами изоляции;
- особенности конструкции и т.д.

Поскольку потери энергии происходят внутри элементов конструкции электрической машины, ее температурное поле является полем с внутренними источниками теплоты, которое можно описать уравнением теплопроводности.

Для решения уравнения теплопроводности необходимо знать закон движения охлаждающих сред в системе охлаждения машины. Типовая система любой электрической машины представляет собой сложную совокупность каналов, притом не только неподвижных, но и вращающихся. При этом для определения скоростей движения охлаждающих сред и расходов теплоносителей необходимо воспользоваться методами теоретической и прикладной гидродинамики.

Большое значение имеет оценка энергетических характеристик процесса охлаждения, или, термодинамический анализ систем охлаждения. При этом в случае естественного охлаждения электрических машин, то есть с использованием природной окружающей среды, для анализа достаточно учитывать лишь первое начало термодинамики.

Исследование систем охлаждения предполагает глубокое изучение конструкций электрических машин и основных законов электромеханики, определяющих формирование поля потерь энергии в объеме машины [75].

Для создания корректной ТММ, обеспечивающей полную картину поля, необходимо иметь надежные сведения о распределении потерь, свойствах материалов, скорости и направлении перемещения охлаждающего воздуха через двигатель. Получить необходимые данные можно из результатов вентиляционного и электромагнитного расчетов АТЭД.

### 2.3 Математическая модель установившегося теплового состояния АТЭД (на примере двигателя НТА-1200)

Тяговые двигатели электровозов согласно ГОСТ 2582-2013 [76] рассчитывают на два номинальных режима работы: часовой и продолжительный. При этом в обоих режимах температура лимитирующих по нагреву обмоток ТЭД может достигать допустимого предела, но не превышать его. Тепловая математическая модель должна производить расчет температур

всех узлов электродвигателя в режиме реального времени для любого режима работы электродвигателя.

Суть предлагаемой модели состоит в следующем: ТММ производит расчет установившихся температур всех узлов двигателя  $v_1 \dots v_N$  по входным параметрам. При работе двигателя в неустановившихся режимах, таких как пуск двигателя, торможение, изменение нагрузки и частоты вращения машин, математическая модель должна производить корректировку температур элементов конструкции по значениям температур «опорных узлов», снятых с электродвигателя с помощью термодатчиков. В качестве таких узлов могут быть приняты температура сердечника статора  $v_{CC}$  и/или температура вентилирующего воздуха на выходе электродвигателя  $v_{ВЫХ}$ . Выбор данных узлов для расчета температур элементов конструкции электродвигателя в неустановившихся режимах основан на конструктивной особенности двигателя.

Схема тепловой модели асинхронного тягового двигателя представлена на рисунке 2.1.

Представленная схема включает следующие обозначения:

$v_B$  – температура вентилирующего воздуха на входе в двигатель;

$v_{ВЫХ}$  – температура вентилирующего воздуха на выходе;

$v_1 \dots v_N$  – температуры узлов двигателя, рассчитанные по ТММ АТЭД;

$v_{CC}$  – температура сердечника статора, снимаемая с встроенного датчика температуры.

Для создания тепловой математической модели необходимо произвести достоверное и полное описание электродвигателя как теплового объекта.

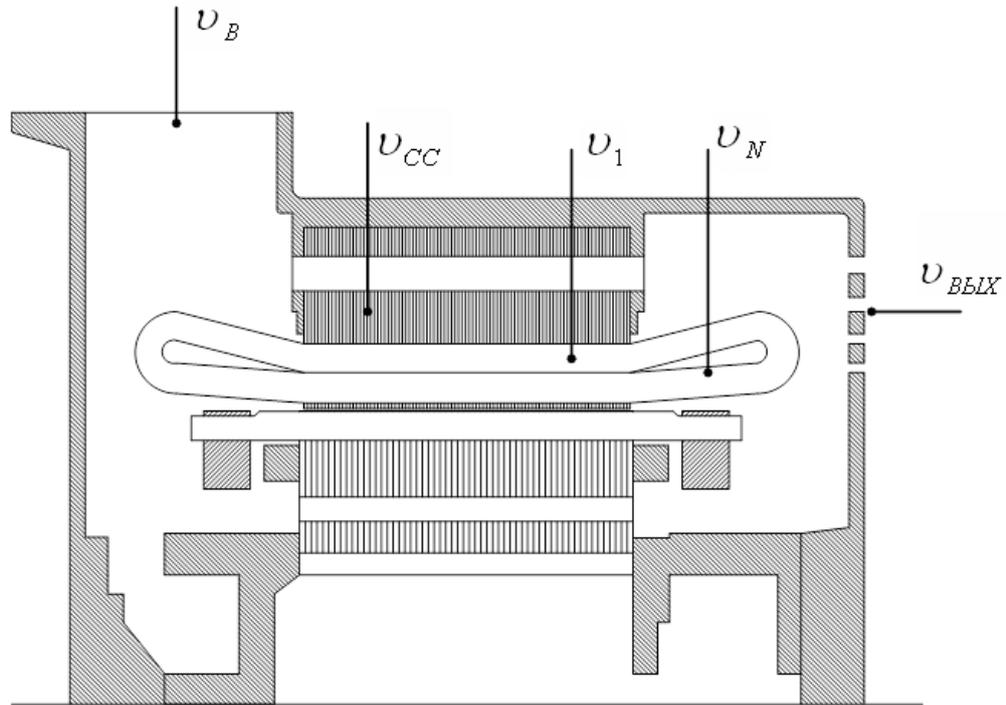


Рис. 2.1. Структурная схема тепловой модели АТЭД

Экспериментальные исследования показали, что в крупных электрических машинах нагрев ротора не влияет на температуру статора [40]. Это обусловлено тем, что в машинах с аксиальной системой вентиляции охлаждающий воздух движется вдоль ее оси по трем параллельным ветвям: через вентиляционные каналы статора и ротора и через воздушный зазор. Тепло, выделяемое в обмотке статора и сердечнике статора, отводится, главным образом, воздухом, движущимся в вентиляционных каналах статора, и поэтому не оказывает заметного влияния на тепловой режим ротора. Отвод большей части тепла с ротора также осуществляется через его вентиляционные каналы.

Согласно предложенным схемам [39, 40, 64] для расчета температур активных частей АТЭД типа НТА-1200 была составлена тепловая схема замещения, отображающая физическую картину тепловых процессов, протекающих между отдельными теплореагирующими элементами (рис. 2.2). При этом электродвигатель рассматривался как схема соединения источников тепла, тепловых сопротивлений и приемников, объединенных в единую сеть (схему) с общими узлами (точками) по внутреннему воздуху двигателя.

В состав схемы входят основные нагреваемые части АТЭД: статор и ротор с обмотками. Для определения локального места перегрева в тепловой схеме предусмотрена следующая детализация: обмотки статора и ротора представлены тремя частями: активные части, расположенные в пазах статора и ротора машины, и две лобовые части обмоток со стороны подачи охлаждающего воздуха и противоположной стороны – выхода подогретого охлаждающего воздуха из электродвигателя. Такая детализация обмоток связана с различными условиями ее охлаждения. Отдельно выделены сердечник статора, ротора и короткозамыкающие кольца (КЗ).

Постепенное повышение температуры охлаждающего потока воздуха при прохождении различных участков машины учтено в тепловой схеме с помощью линии, которую можно рассматривать как ряд базовых точек с температурой, возрастающей в направлении движения потока воздуха [39]. При этом поток охлаждающей среды был разбит на элементы (области), совпадающие по длине с соответствующими охлаждаемыми частями машины. Для каждого элемента потока прирост температуры рассчитывается исходя из теплового баланса.

На представленной схеме приняты следующие обозначения:  $P_{cc}$  – потери в сердечнике статора;  $P_{c1}$  – потери в лобовой части обмотки статора со стороны подачи воздуха;  $P_{cp}$  – потери в пазовой части обмотки статора;  $P_{c2}$  – потери в лобовой части обмотки статора со стороны противоположной подачи воздуха;  $P_{cp}$  – потери в сердечнике ротора;  $P_{p1}$  – потери в лобовой части обмотки ротора со стороны подачи воздуха;  $P_{pp}$  – потери в пазовой части обмотки ротора;  $P_{p2}$  – потери в лобовой части обмотки ротора со стороны противоположной подачи воздуха;  $P_{k1}$  – потери в короткозамкнутом кольце со стороны подачи воздуха;  $P_{k2}$  – потери в короткозамкнутом кольце со стороны противоположной подачи воздуха.

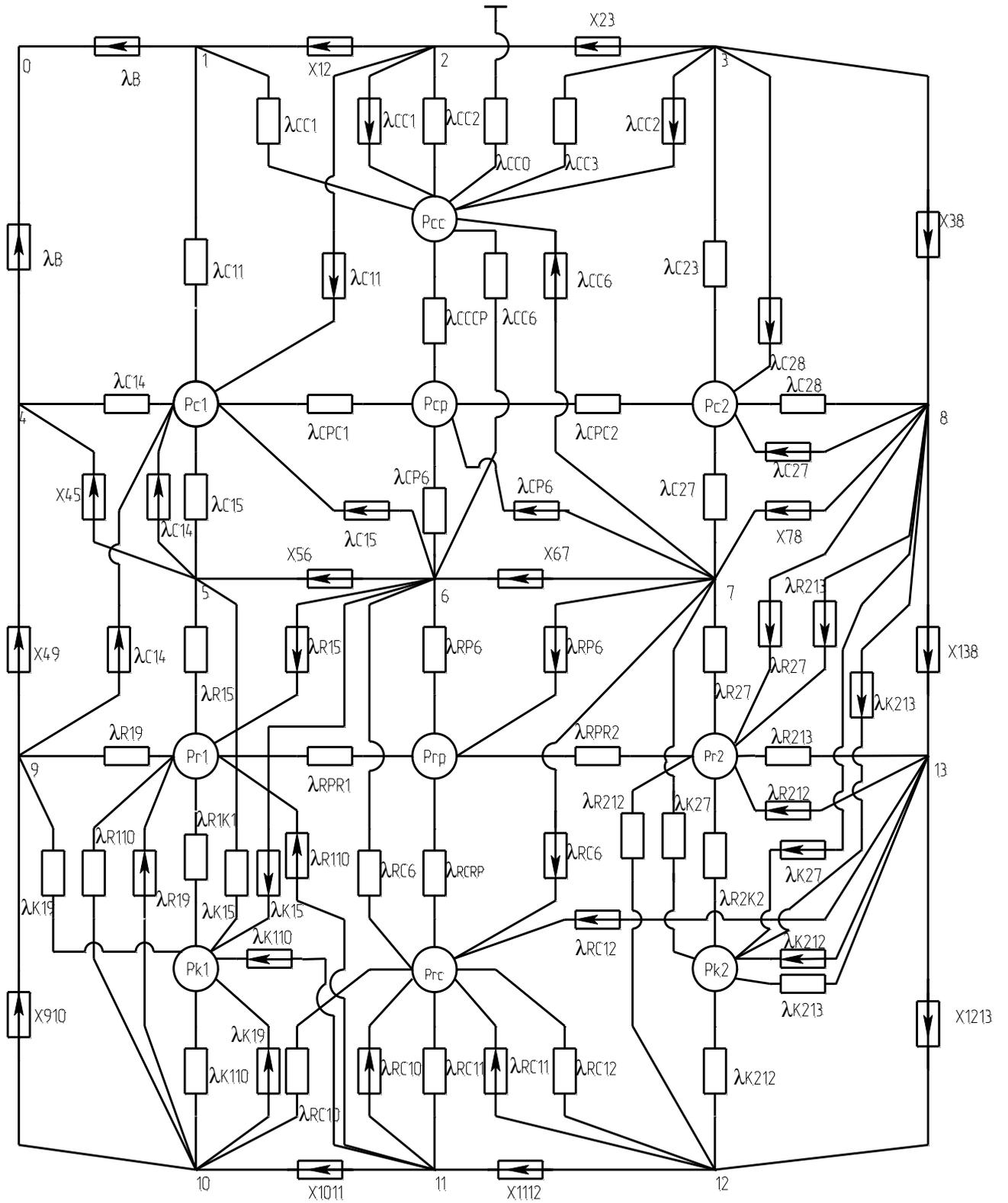


Рис. 2.2. Тепловая схема замещения АТЭД типа НТА-1200

На развернутой схеме рассмотрены следующие пути теплопередачи, представленные тепловыми проводимостями  $\lambda$  (ТП):

1. Для статора:  $\lambda_{CP1}$  – ТП между лобовой со стороны подачи воздуха и средней частями обмотки статора;  $\lambda_{CP2}$  – ТП между лобовой со стороны противоположной подаче воздуха и средней частями обмотки статора;  $\lambda_{CCP}$  – ТП между пазовой частью обмотки статора и сердечником статора;  $\lambda_{CC0}$  – ТП от стали статора в окружающий воздух через станину;  $\lambda_{C11}$  – ТП от лобовой части обмотки статора со стороны подачи воздуха в область над катушкой (1);  $\lambda_{C14}$  – ТП от лобовой части обмотки статора со стороны подачи воздуха в область переднего подшипникового щита (4);  $\lambda_{C15}$  – ТП от лобовой части обмотки статора со стороны подачи воздуха в область между катушкой и КЗ кольцом (5);  $\lambda_{C23}$  – ТП от лобовой части обмотки статора со стороны противоположной подаче воздуха в область над катушкой (3);  $\lambda_{C27}$  – ТП от лобовой части обмотки статора со стороны противоположной подаче воздуха в область между катушкой и КЗ кольцом (7);  $\lambda_{C28}$  – ТП от лобовой части обмотки статора со стороны противоположной подаче воздуха в область заднего подшипникового щита (8);  $\lambda_{CP6}$  – ТП от пазовой части обмотки статора в воздушный зазор (6);  $\lambda_{CC1}$  – ТП от стали сердечника статора в область над катушкой обмотки статора со стороны подачи воздуха (1);  $\lambda_{CC2}$  – ТП от сердечника статора в вентиляционные каналы статора (2);  $\lambda_{CC3}$  – ТП от сердечника статора в область над катушкой обмотки статора со стороны противоположной подаче воздуха (3);  $\lambda_{CC6}$  – ТП от сердечника статора в воздушный зазор (6).

2. Для ротора:  $\lambda_{RPR1}$  – ТП между лобовой со стороны подачи воздуха и средней частями обмотки ротора;  $\lambda_{RPR2}$  – ТП между лобовой со стороны противоположной подаче воздуха и средней частями обмотки ротора;  $\lambda_{RCRP}$  – ТП между пазовой частью обмотки ротора и сталью ротора;  $\lambda_{R15}$  – ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны подачи воздуха в область между

катушкой и КЗ кольцом (5);  $\lambda_{R19}$  – ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны подачи воздуха в область переднего подшипникового щита (9);  $\lambda_{R10}$  – ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны подачи воздуха в область под КЗ кольцом (10);  $\lambda_{R27}$  – ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны противоположной подаче воздуха в область над между катушкой и КЗ кольцом (7);  $\lambda_{R213}$  – ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны противоположной подаче воздуха в область заднего подшипникового щита (13);  $\lambda_{R112}$  – ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны противоположной подаче воздуха в область под КЗ кольцом (12);  $\lambda_{RP6}$  – ТП от пазовой части обмотки ротора в воздушный зазор (6);  $\lambda_{RC10}$  – ТП от стали сердечника ротора в область под КЗ кольцом со стороны подачи воздуха (10);  $\lambda_{RC11}$  – ТП от стали сердечника ротора в вентиляционные каналы ротора (11);  $\lambda_{RC12}$  – ТП от стали сердечника ротора в область под КЗ кольцом со стороны противоположной подаче воздуха (12);  $\lambda_{RC6}$  – ТП от стали сердечника ротора в воздушный зазор (6).

3. Для короткозамыкающих колец:  $\lambda_{R1K1}$  – ТП между лобовой частью обмотки ротора и короткозамкнутым кольцом со стороны подачи воздуха;  $\lambda_{R2K2}$  – ТП между лобовой частью обмотки ротора и короткозамкнутым кольцом со стороны противоположной подаче воздуха;  $\lambda_{K15}$  – ТП от КЗ кольца со стороны подачи воздуха в область между катушкой и КЗ кольцом (5);  $\lambda_{K19}$  – ТП от КЗ кольца со стороны подачи воздуха в область переднего подшипникового щита (9);  $\lambda_{K110}$  – ТП от КЗ кольца со стороны подачи воздуха в область под КЗ кольцом (10);  $\lambda_{K27}$  – ТП от КЗ кольца со стороны противоположной подаче воздуха в область между катушкой и КЗ кольцом (7);  $\lambda_{K213}$  – ТП от КЗ кольца со стороны противоположной подаче воздуха в область заднего подшипникового щита (13);  $\lambda_{K212}$  – ТП от КЗ кольца со стороны против подачи воздуха в область под КЗ кольцом (12).

Система уравнений, описывающих процесс передачи тепла в двигателе согласно эквивалентной тепловой схеме, имеет вид:

$$P_{CC} = \nu_{CC}(\lambda_{CC1} + \lambda_{CC2} + \lambda_{CC0} + \lambda_{CC3} + \lambda_{CC6} + \lambda_{CCCP}) - \nu_1 \cdot \lambda_{CC1} - \nu_2 \cdot \lambda_{CC2} - \nu_{OCT} \cdot \lambda_{CC0} - \nu_3 \cdot \lambda_{CC3} - \nu_6 \cdot \lambda_{CC6} - \nu_{CP} \cdot \lambda_{CCCP};$$

$$P_{C1} = \nu_{C1} \cdot (\lambda_{C14} + \lambda_{C11} + \lambda_{CPC1} + \lambda_{C15}) - \nu_1 \cdot \lambda_{C11} - \nu_{CP} \cdot \lambda_{CPC1} - \nu_5 \cdot \lambda_{C15} - \nu_4 \cdot \lambda_{C14};$$

$$P_{CP} = \nu_{CP} \cdot (\lambda_{CCCP} + \lambda_{CPC2} + \lambda_{CPC1} + \lambda_{CP6}) - \nu_{C1} \cdot \lambda_{CPC1} - \nu_{CC} \cdot \lambda_{CCCP} - \nu_{C2} \cdot \lambda_{CPC2} - \nu_6 \cdot \lambda_{CP6};$$

$$P_{C2} = \nu_{C2} \cdot (\lambda_{C23} + \lambda_{C28} + \lambda_{CPC2} + \lambda_{C27}) - \nu_3 \cdot \lambda_{C23} - \nu_{CP} \cdot \lambda_{CPC2} - \nu_8 \cdot \lambda_{C28} - \nu_7 \cdot \lambda_{C27};$$

$$P_{RC} = \nu_{RC} \cdot (\lambda_{RC6} + \lambda_{RCRP} + \lambda_{RC12} + \lambda_{RC11} + \lambda_{RC10}) - \nu_6 \cdot \lambda_{RC6} - \nu_{RP} \cdot \lambda_{RCRP} - \nu_{12} \cdot \lambda_{RC12} - \nu_{11} \cdot \lambda_{RC11} - \nu_{10} \cdot \lambda_{RC10};$$

$$P_{R1} = \nu_{R1}(\lambda_{R19} + \lambda_{R15} + \lambda_{RPR1} + \lambda_{R110} + \lambda_{R1K1}) - \nu_9 \cdot \lambda_{R19} - \nu_5 \cdot \lambda_{R15} - \nu_{RP} \cdot \lambda_{RPR1} - \nu_{10} \cdot \lambda_{R110} - \nu_{K1} \cdot \lambda_{R1K1};$$

$$P_{RP} = \nu_{RP}(\lambda_{RPR1} + \lambda_{RP6} + \lambda_{RPR2} + \lambda_{RCRP}) - \nu_{R1} \cdot \lambda_{RPR1} - \nu_6 \cdot \lambda_{RP6} - \nu_{R2} \cdot \lambda_{RPR2} - \nu_{RC} \cdot \lambda_{RCRP};$$

$$P_{R2} = \nu_{R2}(\lambda_{R27} + \lambda_{R213} + \lambda_{RPR2} + \lambda_{R212} + \lambda_{R2K2}) - \nu_7 \cdot \lambda_{R27} - \nu_{13} \cdot \lambda_{R213} - \nu_{RP} \cdot \lambda_{RPR2} - \nu_{12} \cdot \lambda_{R212} - \nu_{K2} \cdot \lambda_{R2K2};$$

$$P_{K1} = \nu_{K1}(\lambda_{K19} + \lambda_{K15} + \lambda_{R1K1} + \lambda_{K110}) - \nu_9 \cdot \lambda_{K19} - \nu_5 \cdot \lambda_{K15} - \nu_{R1} \cdot \lambda_{R1K1} - \nu_{10} \cdot \lambda_{K110};$$

$$P_{K2} = \nu_{K2}(\lambda_{K27} + \lambda_{K213} + \lambda_{R2K2} + \lambda_{K212}) - \nu_7 \cdot \lambda_{K27} - \nu_{13} \cdot \lambda_{K213} - \nu_{R2} \cdot \lambda_{R2K2} - \nu_{12} \cdot \lambda_{K212};$$

где  $X_{ij}$  – проводимости, учитывающие подогрев воздуха. Эти проводимости показывают ухудшение тепловой проводимости воздуха каждой воздушной области внутри машины. Применительно к составленной схеме электродвигателя НТА-1200 проводимости  $X_{ij}$  для каждого узла определяются по выражениям:

$$X_{12} = \lambda_B - \lambda_{C11} - \lambda_{CC1};$$

$$X_{910} = \lambda_B - \lambda_{K19} - \lambda_{R19};$$

$$X_{23} = \lambda_B - \lambda_{CC2};$$

$$X_{1011} = \lambda_B - \lambda_{K110} - \lambda_{RC10} - \lambda_{R110};$$

$$X_{45} = \lambda_B - \lambda_{C14};$$

$$X_{1112} = \lambda_B - \lambda_{RC11};$$

$$X_{49} = \lambda_B - \lambda_{C14};$$

$$X_{1213} = \lambda_B - \lambda_{RC12} - \lambda_{K212} - \lambda_{R212};$$

$$X_{56} = \lambda_B - \lambda_{C15} - \lambda_{K15} - \lambda_{R15};$$

$$X_{138} = \lambda_B - \lambda_{K213} - \lambda_{R213};$$

$$X_{67} = \lambda_B - \lambda_{RP6} - \lambda_{CP6} - \lambda_{CC6} - \lambda_{RC6};$$

$$X_{38} = \lambda_B - \lambda_{C28};$$

$$X_{78} = \lambda_B - \lambda_{K27} - \lambda_{C27} - \lambda_{R27}.$$

Система содержит также уравнения, определяющие подогрев воздуха в разных частях электродвигателя при его движении вдоль оси машины:

$$P_1 = v_1 \cdot (\lambda_B + \lambda_{C11} + \lambda_{CC1}) - v_{C1} \cdot \lambda_{C11} - v_{CC} \cdot \lambda_{CC1} = v_B \cdot \lambda_B;$$

$$P_2 = v_2 \cdot (\lambda_B + \lambda_{CC2}) - v_{C1} \cdot \lambda_{C11} - v_1 \cdot X12 - v_{CC} \cdot (\lambda_{CC1} + \lambda_{CC2});$$

$$P_3 = v_3 \cdot (2 \cdot \lambda_B + \lambda_{CC3} + \lambda_{C23}) - v_2 \cdot X23 - v_{CC} (\lambda_{CC3} + \lambda_{CC2}) - v_{C2} (\lambda_{C23} + \lambda_{C28}) - v_8 \cdot X38;$$

$$P_4 = v_4 \cdot (\lambda_B + \lambda_{C14}) - v_{C1} \lambda_{C14} = v_B \lambda_B;$$

$$P_5 = v_5 \cdot (\lambda_B + \lambda_{C15} + \lambda_{K15} + \lambda_{R15}) - v_4 \cdot X45 - v_{C1} \cdot (\lambda_{C14} + \lambda_{C15}) - v_{K1} \cdot \lambda_{K15} - v_{R1} \cdot \lambda_{R15};$$

$$P_6 = v_6 \cdot (\lambda_B + \lambda_{CP6} + \lambda_{RP6} + \lambda_{RC6} + \lambda_{CC6}) - v_{RP} \cdot \lambda_{RP6} - v_{RC} \cdot \lambda_{RC6} - v_{K1} \cdot \lambda_{K15} - v_5 \cdot X56 - \\ - v_{C1} \cdot \lambda_{C15} - v_{CP} \cdot \lambda_{CP6} - v_{CC} \cdot \lambda_{CC6} - v_{R1} \cdot \lambda_{R15};$$

$$P_7 = v_7 \cdot (\lambda_B + \lambda_{K27} + \lambda_{C27} + \lambda_{R27}) - v_{K2} \cdot \lambda_{K27} - v_{RC} \cdot \lambda_{RC6} - v_{RP} \cdot \lambda_{RP6} - v_6 \cdot X67 - v_{CP} \cdot \lambda_{CP6} - \\ - v_{CC} \cdot \lambda_{CC6} - v_{C2} \cdot \lambda_{C27} - v_{R2} \cdot \lambda_{R27};$$

$$P_8 = v_8 \cdot (2 \cdot \lambda_B + \lambda_{C28}) - v_7 \cdot X78 - v_{C2} \cdot (\lambda_{C28} + \lambda_{C27}) - v_{K2} \cdot (\lambda_{K27} + \lambda_{K213}) - v_{13} \cdot X138 - \\ - v_{R2} \cdot (\lambda_{R27} + \lambda_{R213});$$

$$P_9 = v_9 \cdot (\lambda_B + \lambda_{K19} + \lambda_{R19}) - v_4 \cdot X49 - v_{C1} \cdot \lambda_{C14} - v_{K1} \cdot \lambda_{K19} - v_{R1} \cdot \lambda_{R19};$$

$$P_{10} = v_{10} \cdot (\lambda_B + \lambda_{K110} + \lambda_{RC10} + \lambda_{R110}) - v_9 \cdot X910 - v_{K1} \cdot (\lambda_{K19} + \lambda_{K110}) - v_{RC} \cdot \lambda_{RC10} - \\ - v_{R1} \cdot (\lambda_{R19} + \lambda_{R110});$$

$$P_{11} = v_{11} \cdot (\lambda_B + \lambda_{RC11}) - v_{10} \cdot X1011 - v_{K1} \cdot \lambda_{K110} - v_{RC} \cdot (\lambda_{RC10} + \lambda_{RC11}) - v_{R1} \cdot \lambda_{R110};$$

$$P_{12} = v_{12} \cdot (\lambda_B + \lambda_{RC12} + \lambda_{K212} + \lambda_{R212}) - v_{11} \cdot X1112 - v_{RC} \cdot (\lambda_{RC11} + \lambda_{RC12}) - v_{K2} \cdot \lambda_{K212} - v_{R2} \cdot \lambda_{R212};$$

$$P_{13} = v_{13} \cdot (\lambda_B + \lambda_{K213} + \lambda_{R213}) - v_{12} \cdot X1213 - v_{RC} \cdot \lambda_{RC12} - v_{K2} \cdot (\lambda_{K212} + \lambda_{K213}) - v_{R2} \cdot (\lambda_{R212} + \lambda_{R213}).$$

Для удобства расчета температур система уравнения тепловой схемы замещения представляется в матричной форме вида:

$$\langle \Lambda \rangle \times \langle v \rangle + \langle P \rangle = 0,$$

где:  $\langle \Lambda \rangle$  – квадратная симметричная матрица взаимных собственных проводимостей схемы размерностью 23x23, представлена в Приложении 4;

$\langle v \rangle$  – матрица-столбец неизвестных температур размерностью 23x1;

$\langle P \rangle$  – вектор приведенных источников теплоты размерностью (23x1).

Реализация данной модели осуществляется в среде MATLAB в матричной форме. Решение данного уравнения имеет вид:

$$\langle v \rangle = -\langle \Lambda \rangle^{-1} \times \langle P \rangle,$$

где:  $\langle \Lambda \rangle^{-1}$  – обращенная матрица проводимостей.

Реализованная тепловая математическая модель в среде MATLAB позволяет производить вычисление установившихся температур различных узлов ТЭД переменного тока, учитывая температуру окружающей среды и производительность вентилятора воздушного принудительного охлаждения.

Разработанная тепловая модель может применяться для других типов АТЭД и позволяет в реальном времени рассчитать установившееся тепловое поле любой машины при введении соответствующих параметров.

## 2.4 Расчет нагревания асинхронного тягового электродвигателя

Для корректного определения величин теплопроводностей тепловой математической модели необходимо иметь картину распределения скоростей движения воздуха через элементы машины в каждом конкретном режиме ее работы, поскольку тепловое состояние электродвигателя существенно зависит от количества охлаждающего воздуха. С учетом того, что двигатель представляет собой сложную совокупность неподвижных и вращающихся каналов, для определения скоростей и расходов теплоносителей необходимо воспользоваться методами теоретической и прикладной гидродинамики.

### 2.4.1 Вентиляционный расчет АТЭД

Согласно классическим методам вентиляционный расчет электрической машины [39, 40, 41, 77, 78] сводится к определению гидравлического сопротивления системы охлаждения  $z$ , потерь давления  $\Delta p$  по тракту от входа охладителя в машину при давлении  $p_1$  до выхода из нее при давлении  $p_2$  и скоростей движения охладителя в каналах  $v$ .

Как известно, любой участок вентиляционного тракта, равно как и любой участок отдельного вентиляционного канала, обладает сопротивлением, в связи

с чем полное давление воздуха в конце участка всегда меньше, чем в его начале на количество необратимых потерь давления. Независимо от формы движения воздуха (и для ламинарного, и для турбулентного движений) потери давления вычисляются по формуле

$$\Delta p = zQ^2,$$

называемой законом Адкинсона [65, 78]. Данная зависимость устанавливает связь между падением давления  $\Delta p$  на гидравлическом сопротивлении  $z$  и расходом  $Q$  в эквивалентной гидравлической схеме аналогично закону Ома в электрической цепи. Эквивалентную гидравлическую схему можно рассматривать как нелинейную электрическую цепь и применять для ее расчета методы, разработанные для электрических цепей, в частности законы Кирхгофа [39].

В тех случаях, когда потери давления пропорциональны второй степени расхода, коэффициент пропорциональности  $z$  есть величина постоянная. Если же указанная пропорциональность в действительности не соблюдается, коэффициент необходимо брать таким, чтобы формула оставалась справедливой.

Коэффициент пропорциональности  $z$ , который называют аэродинамическим сопротивлением, определяют по выражению [40]:

$$z = \xi \frac{\rho}{2S^2},$$

где  $\xi$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления;

$\rho$  – плотность газа;

$S$  – площадь меньшего из сечений каналов.

Коэффициент  $z$  для каждого вида аэродинамического сопротивления определяется не только размерами канала и свойствами среды, но и коэффициентом местного сопротивления  $\xi$ . Определение большинства коэффициентов местного сопротивления возможно только по результатам

обработки экспериментальных исследований, и их значения приведены в специальной и справочной литературе [40, 41, 65, 79].

Вентиляционный тракт электрической машины представляет собой в основном сужение, расширение и поворот воздушного потока. Однако необходимо также учитывать при проведении вентиляционных расчетов, что для машин с охлаждающими вентиляционными каналами существует потеря давления при движении охлаждающих веществ через них [39, 40]. Этот факт учитывается введением дополнительного сопротивления трения в каналах.

Величины, наиболее часто используемые при расчете аэродинамической характеристики электрической машины представлены далее.

Так, коэффициент сопротивления трения на участке канала с неизменным сечением  $S$  пропорционален длине участка  $l$  и обратно пропорционален гидравлическому диаметру канала  $d$ :

$$\xi = \lambda \frac{l}{d}.$$

Коэффициент местного сопротивления поворота зависит от угла поворота струи воздуха и определяется по графическим зависимостям, представленным в [39, 64].

Коэффициенты местного сопротивления сужения и расширения струи охлаждающего потока определяется по зависимостям, представленным в [65] соответственно:

$$\xi_{суж} = 0.5 \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right); \quad \xi_{рас} = \left( \frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2,$$

при этом в скобках всегда берется отношение меньшей площади к большей, то есть при определении коэффициента местного сопротивления расширения берется отношение площади, из которой выходит поток к величине площади, в которую охлаждающий поток попадает. Для коэффициента местного сопротивления сужения берется обратная зависимость – отношение величины площади, в которую попадает поток к величине площади, из которой поток выходит.

Расчет аэродинамических сопротивлений электрической машины  $Z$  и уравнения равновесия позволяет определить распределение расходов по отдельным ветвям схемы. Таким образом, имея информацию о значении величины расходов на каждом из участков, величин гидравлических сопротивлений каждого участка и его геометрические размеры, можно произвести расчет скорости движения газа в канале, равное частному от деления расхода на живое сечение канала [41]

$$v = \frac{Q}{S},$$

где  $Q$  – расход охлаждающего газа;

$S$  – площадь сечения канала.

Величины скоростей движения охлаждающего воздуха в каналах электрической машины являются вспомогательной величиной для расчета теплопроводностей тепловой схемы замещения.

Тяговые асинхронные электродвигатели имеют независимую систему вентиляции. Такая система вентиляции характеризуется интенсивностью подачи охлаждающего газа или объемным расходом вентилятора. Объемный расход охлаждающего газа – это необходимое количество подаваемого газа, при котором не происходит перегрев элементов конструкции электродвигателя [80].

Системы охлаждения и вентиляции в электрических машинах состоят из охлаждающих трактов и теплообменников, по которым движется охладитель (воздух), и напорных элементов – компрессоров, обеспечивающих движение охлаждающего воздуха. В рассматриваемом типе асинхронных тяговых электродвигателей охлаждающий воздух нагнетается через вентиляционное отверстие в верхней части корпуса статора, затем обдувает сердечник статора и ротора, проходит через зазор между ротором и статором и выходит через воздуховыпускные отверстия в торце подшипникового щита наружу [81].

Сама же система вентиляции тяговых двигателей электровоза работает следующим образом: воздух, засасываемый осевым вентилятором системы

охлаждения тяговых электродвигателей, проходит через механические центробежные отделители осадений, где происходит очистка воздуха от влаги и пыли. Очищенный воздух поступает в форкамеры вентиляторов охлаждения АТЭД. Из форкамеры воздух засасывается вентилятором охлаждения тяговых электродвигателей и выбрасывается в основание, где разделяется на два потока. Оба потока направляются по разным каналам к тяговым электродвигателям. В каждой секции установлено два осевых вентилятора охлаждения АТЭД. Вентилятор обдувает два тяговых двигателя, установленных на одной тележке электровоза. В свою очередь осевые вентиляторы АТЭД производят перемещение воздуха не содержащих пыли и других твердых примесей при температуре окружающего воздуха от  $(-50)^{\circ}\text{C}$  до  $(+60)^{\circ}\text{C}$ .

Необходимо отметить, что в современных электровозах количество подаваемого воздуха для охлаждения АТЭД можно регулировать. На выходах из каналов установлены механизмы регулирования подачи воздуха к тяговым двигателям [82]. Принцип их работы заключается в частичном перекрытии сечения канала воздухопровода, изменяя положение заслонок на входе в тяговый двигатель. При вращении муфты происходит перемещение рычага, который перемещает тягу, что производит изменение положения заслонок в канале воздухопровода к электродвигателю. В зависимости от угла заслонок изменяется проходное сечение канала. Максимальный угол наклона заслонок составляет 60 градусов. Производить регулирование расхода охлаждающего воздуха можно в каждом канале подачи воздуха в отдельности. Регулирование заслонки производится в автоматическом режиме по заложенному алгоритму в зависимости от измеряемых температур.

Применительно для рассматриваемого типа тягового асинхронного электродвигателя марки НТА-1200, который также имеет независимую аксиальную систему вентиляции с подачей вентилирующего воздуха сверху со стороны противоположной редуктору электродвигателя и выбросом через подшипниковый щит со стороны редуктора (рис. 2.3), была разработана вентиляционная схема замещения.

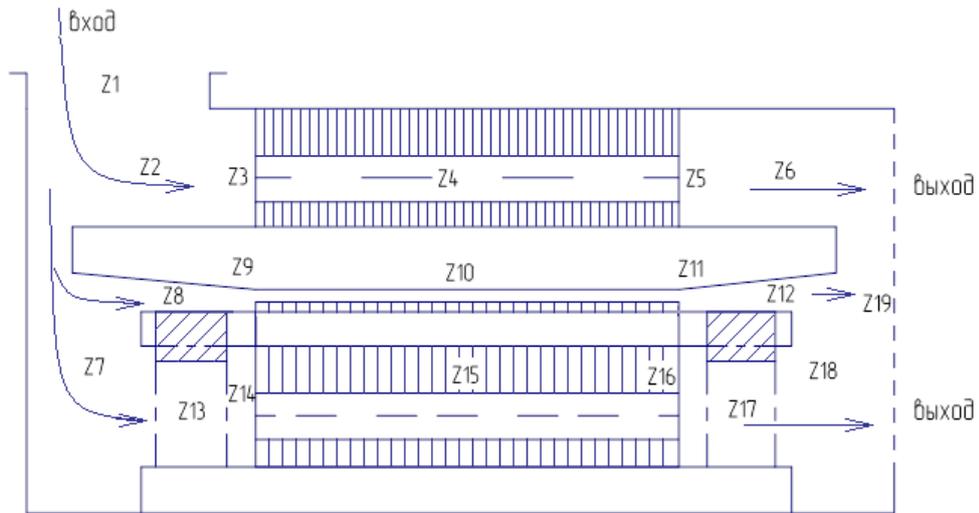


Рис. 2.3. Направление движения вентилярующего воздуха в электродвигателе НТА-1200

Схема замещения (рис. 2.4) включает в себя все пути и изменения сечений или направления движения охлаждающего воздуха внутри электродвигателя. Также на рисунке 2.5 приведены упрощенная и преобразованная гидравлические схемы замещения электродвигателя в соответствии с последовательностью вентиляционного расчета.

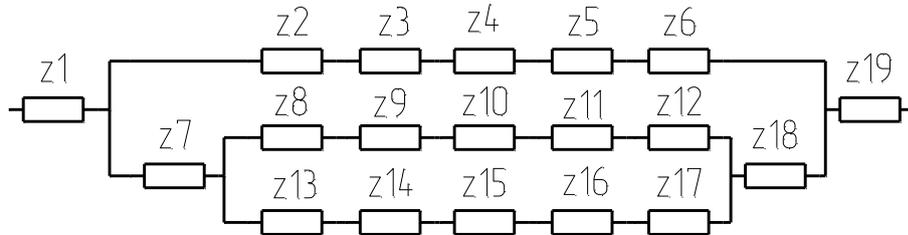


Рис.2.4. Эквивалентная гидравлическая схема АТЭД НТА-1200

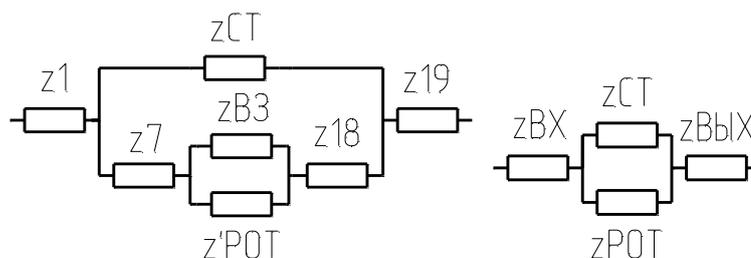


Рис. 2.5. Преобразованная эквивалентная гидравлическая схема

На представленных схемах используются следующие обозначения гидравлических сопротивлений,  $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$ :

$z_1$  – вход воздуха через вентиляционный люк;

$z_2$  – вход в область над лобовыми частями обмотки статора;

$z_3$  – вход воздуха в вентиляционные каналы статора;

$z_4$  – трение воздуха в вентиляционных каналах статора;

$z_5$  – выход из вентиляционных каналов статора в область над лобовыми частями обмотки статора;

$z_6$  – выход воздуха из области над обмотками статора;

$z_7$  – вход воздуха в область под лобовыми частями обмотки статора;

$z_8$  – вход в область между лобовой частью обмотки статора и КЗ кольцом;

$z_9$  – вход воздуха в область воздушного зазора;

$z_{10}$  – трение воздуха в воздушном зазоре;

$z_{11}$  – выход воздуха из воздушного зазора в область между КЗ кольцом и обмоткой статора;

$z_{12}$  – выход воздуха в область за КЗ кольцом;

$z_{13}$  – вход в область под КЗ кольцом ротора;

$z_{14}$  – вход воздуха в вентиляционные каналы ротора;

$z_{15}$  – трение в вентиляционных каналах ротора;

$z_{16}$  – выход воздуха из вентиляционных каналов ротора;

$z_{17}$  – выход воздуха в область под лобовыми частями обмотки статора;

$z_{18}$  – выход из каналов воздуха в область подшипникового щита из области под обмоткой статора;

$z_{19}$  – выход воздуха из подшипникового щита;

$z_{СТ}$  – сопротивление статора;

$z_{ВЗ}$  – сопротивление воздушного зазора;

$z_{РОТ}$  – сопротивление в каналах ротора;

$z_{РОТ}$  – сопротивление ротора;

$z_{ВХ}=z_1$  – сопротивление входа;

$z_{ВЫХ}=z_{19}$  – сопротивление выхода.

Расчет эквивалентной гидравлической схемы позволил рассчитать скорости охлаждающего воздуха в различных ветвях схемы. Результаты расчета для номинального режима работы двигателя НТА-1200 представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Результаты вентиляционного расчета АТЭД типа НТА-1200 для номинального режима работы

Канал движения воздуха	Скорость воздуха, м/сек
Вентиляционные каналы статора	26.73
Относительно лобовых частей обмотки статора	3.63
Между лобовыми частями обмотки статора и КЗ кольцами	1.38
Воздушный зазор	15.66
Под КЗ кольцом со стороны подачи воздуха	6.88
Под КЗ кольцом со стороны противоположной подачи воздуха	9.53
Вентиляционные каналы ротора	25.00

Результаты показывают, что наиболее тяжелые условия вентиляции имеют области лобовых частей обмотки статора и короткозамыкающие кольца расположенные в области воздушного зазора. Увеличения отвода тепла с данных поверхностей можно достичь, увеличив расход охлаждающего воздуха, что в свою очередь увеличит скорость воздуха в данных областях, либо путем повышения частоты вращения ротора самого двигателя, что создаст лучшую теплоотдачу за счет большего перемешивания охлаждающего потока.

#### 2.4.2 Расчет тепловыделений в узлах двигателя

При работе АТЭД выделяющаяся теплота представляет собой потери энергии, которые возникают при взаимном превращении механической и электрической энергии.

Обычно эти потери разбивают на четыре группы [40]:

1. Механические потери: трение в подшипниках и вентиляционные (на перемещение охлаждающей среды).
2. Электрические потери в обмотках ротора и статора.
3. Магнитные потери: гистерезисные и вихревые в стали сердечника статора, связанные с основным магнитным потоком.
4. Добавочные потери: в стали и в обмотках.

Потери первых трех групп принято называть основными.

Добавочные потери связаны с высшими гармониками магнитного потока, с вытеснением его в пазы и рассеиванием в области концевых частей. Распределение этих потерь неравномерно, что в некоторых случаях может привести к локальным перегревам. Как отмечается в разных источниках литературы, большая часть добавочных потерь сосредоточена в поверхностном слое толщиной несколько миллиметров, их удельное значение может превосходить удельное значение основных потерь. Однако в процентном соотношении добавочные потери электродвигателя переменного тока, питаемого от преобразователя, согласно ГОСТ 25941-83. «Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия», принимают равными 1 % от подводимой к двигателю мощности [49].

В общем случае потери являются функцией координат, времени и тока нагрузки. Однако в большинстве практических задач достаточно знать суммарные распределенные потери в отдельных элементах машины при тепловом режиме. Расчет тепловыделений в узлах электродвигателя производился в соответствии с методиками проектирования двигателей,

представленными в работах Балагурова В.А., Гольберга О.Д., Гурина Я.С., Копылова И.П., Находкина М.Д. [83, 84, 85, 86, 87, 88], а также методикой, представленной в работе Тихонова Ф.В. [45].

В соответствии с произведенным условным делением обмоток статора и ротора на элементарные узлы и с учетом постоянного сечения витков обмотки по ее длине, электрические потери в них определялись в пропорциональном соотношении от полного сопротивления катушки.

Электрические потери в узлах обмотки статора

$$P_{Ci} = I_c^2 \cdot m_c \cdot \frac{L_i}{L_{oc}} \cdot R^{(20)} \cdot (1 + \alpha(v_{yi} - 20)),$$

где  $P_{Ci}$  – электрические потери в  $i$ -ом узле обмотки статора;

$I_c$  – фазный ток статора;

$m_c$  – число фаз;

$L_i$  – длина обмотки  $i$ -ого узла;

$L_{oc}$  – длина обмотки статора;

$R^{(20)}$  – сопротивление проводника в пределах  $i$ -ого узла при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала обмотки;

$v_{yi}$  – установившаяся температура  $i$ -ого узла.

Электрические потери в обмотке ротора и короткозамыкающих кольцах рассчитаны через приведенные значения токов к току статора. Так электрические потери для узлов обмотки ротора рассчитывали по зависимости

$$P_{Pi} = I_p^2 \cdot m_p \cdot \frac{L_i}{L_p} \cdot R^{(20)} \cdot (1 + \alpha(v_{yi} - 20)),$$

где  $P_{Pi}$  – электрические потери в  $i$ -ом узле стержня ротора;

$I_p$  – ток в стержне ротора;

$m_p$  – число фаз ротора (число стержней);

$L_p$  – длина стержня статора.

Электрические потери в короткозамыкающем кольце определялись по аналогичной функции:

$$P_{Ki} = I_p^2 \cdot m_p \cdot R^{(20)} \cdot (1 + \alpha(v_{yi} - 20)).$$

Основные потери в сердечнике статора рассчитывались на основании [10,11, 88] как сумма потерь в ярме и зубцовом слое:

$$P_{\Pi} = C_{\Pi} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1.5} \cdot p_{10/50} \cdot (m_{зс} \cdot B_{зс}^2 + m_{яс} \cdot B_{яс}^2),$$

где  $c_{\Pi}$  – коэффициент пульсаций, учитывающий добавочные потери от зубцовых гармонических индукций, т.е. добавочные потери холостого хода [8];

$p_{10/50}$  – удельные потери в сердечнике статора при частоте перемагничивания 50 Гц;

$m_{зс}$  – масса стали зубцового слоя сердечника статора;

$m_{яс}$  – масса стали ярма сердечника статора;

$B_{зс}$  – индукция в зубцовом слое сердечника статора;

$B_{яс}$  – индукция в ярме сердечника статора.

При этом расчет индукций в статоре осуществлялся через вычисление магнитного потока в воздушном зазоре по методике [86]:

$$\Phi_1 = \frac{E_{\phi 1}}{1,11 \cdot k_{\phi} \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об}},$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент формы поля;

$w_1, k_{об}$  – число витков в фазе обмотки статора и обмоточный коэффициент обмотки, определяющиеся конструкцией электродвигателя.

Имея величину потока и зная геометрию электрической машины, значение индукции в зубцовом слое и ярме сердечника статора определяются по выражениям:

$$B_{яс} = \frac{\Phi_1}{2S_{a1}}, \quad B_{зс} = \frac{\Phi_1}{S_{z1}}$$

где  $S_{a1}$  – расчетное значение сечения спинки статора;

$S_{z1}$  – расчетное значение сечения зубцового слоя статора.

### 2.4.3 Расчет проводимостей тепловой схемы

Возникающие в машине потери выделяются в виде теплоты и передаются охлаждающей среде через поверхность отдельных частей непосредственно или через другие граничащие с ними части машины. При этом источники потерь, контактирующие между собой или с неактивными деталями конструкции, рассматриваются при граничных условиях 4-го рода. Все нагретые элементы машин, соприкасаясь с охлаждающей средой, отдают теплоту с поверхности при граничных условиях 3-го рода [39].

С учетом рассмотрения тепловых потоков в элементах двигателя как взаимодействия двух одномерных потоков, проводимости в каждом направлении рассматриваются как сумма последовательных сопротивлений от источника теплоты к окружающей среде или другому контактирующему узлу машины.

Тепловые проводимости тепловой схемы замещения рассчитывались с учетом длины пути теплового потока, площади сечения и удельного сопротивления теплопроводности  $\lambda$  материала (коэффициент теплопроводности) и сопротивления теплоотдачи  $\alpha$  (коэффициент теплоотдачи) с каждой поверхности тепловыделяющего узла электродвигателя (в каждом направлении теплового потока):

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{l}{\lambda S} + \frac{1}{\alpha S}}.$$

В случае сложной изоляции, состоящей из нескольких материалов, расчет производился с учетом всех слоев, их толщин, наличия воздушных промежутков.

Расчет проводимостей проходил согласно рекомендациям, представленным [12, 15, 23] по определению коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности. Приложение 5 содержит значения тепловых проводимостей. Для удобства теплового расчета при различных начальных условиях тепловые

проводимости были представлены как функции от скорости вращения двигателя и производительности вентилятора воздушного принудительного охлаждения  $\lambda_i = f(n, Q)$ . В скобках представлены значения проводимостей при номинальном режиме работы АТЭД.

## 2.5 Сравнительный анализ результатов разработанной тепловой математической модели

Сравнение результатов расчета температурного поля асинхронного тягового электродвигателя по разработанной математической модели было выполнено с помощью моделирования в приложении по расчету установившихся температурных полей программного продукта ELCUT. Данное приложение позволяет смоделировать двумерное установившееся температурное поле электродвигателя методом конечных элементов.

В таблице 2.2 приведены значения температур, полученные с помощью разработанной тепловой математической модели для параметров эксплуатации электродвигателя близких к номинальным по значению тока статора  $I_f=336$  А и при увеличении тока статора ( $I_f=600$  А) при сохранении остальных параметров. Результаты моделирования в случае номинального тока статора показывают классическое распределение температуры в электродвигателе [39, 45]. Установившееся температурное поле при тех же исходных данных было получено в среде ELCUT (рис. 2.6).

Таблица 2.2. Результаты моделирования установившегося теплового состояния асинхронного тягового двигателя с помощью ТММ

Наименование узла электродвигателя	Температура узлов электродвигателя, °С	
	U=3320 В If=336 А t=20 °С n=796 об/мин	U=3000 В If=600 А t=20 °С n=1306 об/мин
Лобовая часть ОС со стороны подачи воздуха	91.4	121.7
Пазовая часть обмотки статора	106.0	121.3
Лобовая часть ОС со стороны противоположной подачи воздуха	97.3	128.8
Сердечник статора	104.8	104.8
Лобовая часть ОР со стороны подачи воздуха	84.5	105.2
Пазовая часть обмотки ротора	88.0	90.1
Лобовая часть ОР со стороны противоположной подачи воздуха	88.8	113.7
Сердечник ротора	84.0	87.7
Короткозамкнутое кольцо со стороны подачи воздуха	84.5	105.1
КЗ кольцо со стороны противоположной подачи воздуха	88.8	113.6
Подогрев воздуха в области 3, выходная температура воздуха	41.2	56.4

Расхождения между результатами, полученными с помощью тепловой математической модели, и моделированием в среде ELCUT не превышает 10 %. Наибольшее отклонение между результатами моделирований получено для узлов электродвигателя, расположенных с противоположной стороны от подачи охлаждающего воздуха. Это можно объяснить тем, что моделирование в программном комплексе ELCUT не позволяет произвести учет системы вентиляции. Аксиальная независимая вентиляция, применяемая в таких электродвигателях, способствует лучшей теплоотдаче с лобовых частей машины со стороны подачи охлаждающего потока. В то время как, большие габариты АТЭД, способствуют подогреву охлаждающего воздуха проходящего вдоль оси машины, за счет теплоотдачи узлов расположенных по направлению его движения и ухудшению теплоотдачи от лобовых частей обмоток электродвигателя со стороны выхода охлаждающего воздуха.

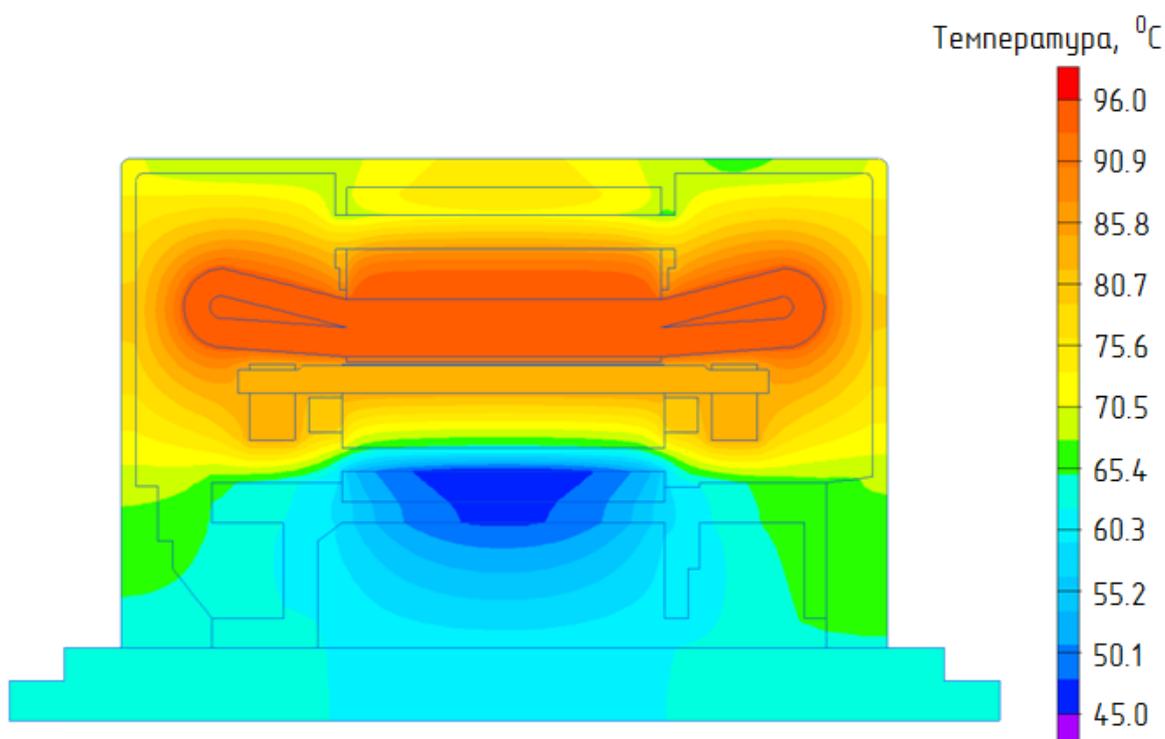


Рис. 2.6. Моделирование теплового состояния АТЭД  
при  $U=3320$  В,  $I_f=336$  А,  $t=20$  °С,  $n=796$  об/мин

Моделирование температурного поля при увеличенном значении тока статора ( $I_f=600$  А) при сохранении остальных параметров с помощью тепловой математической модели (табл. 2.2) и программирование в среде ELCUT (рис. 2.7), также дает расхождение не более 10 %. Также как и при моделировании теплового поля машины при номинальных параметрах наибольшая погрешность получена для узлов электродвигателя, расположенных с противоположной стороны от подачи охлаждающего воздуха.

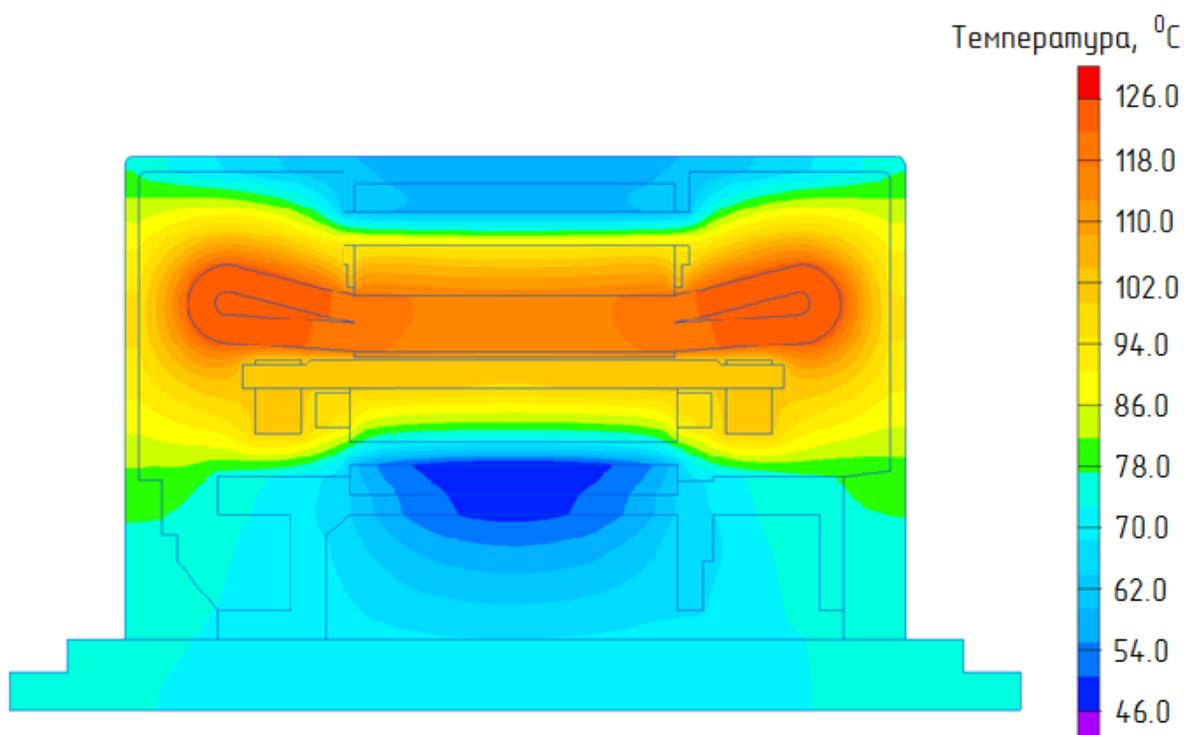


Рис. 2.7. Моделирование теплового состояния АТЭД при  $U=3000$  В,  $I_f=600$  А,  $t=20$  °С,  $n=1306$  об/мин

Моделирование данного режима работы электродвигателя показывает, что режимы перегрузки способствуют перегреву лобовых обмоток частей электродвигателя относительно пазовых частей. Это является следствием того, что теплоотвод с лобовых частей при сохранении всех остальных входных параметрах электродвигателя остается практически таким же, при увеличении электрических потерь в обмотке примерно в 4 раза.

## 2.6 Выводы

Анализируя результаты моделирования разработанной тепловой математической модели асинхронного тягового двигателя, можно сделать следующие выводы.

1. Вентиляционный расчет показал, что наименьшая скорость охлаждающего потока воздуха имеется в области лобовых частей обмотки статора и КЗ колец электродвигателя. Поскольку теплоотдача с элементов конструкции АТЭД имеет прямую зависимость от скорости охлаждающего воздуха, то можно сделать вывод о том, что перегрев данных узлов машины в режимах перегрузки наиболее вероятен.

2. Результаты моделирования установившегося теплового поля асинхронного тягового электродвигателя были подтверждены моделированием в среде ELCUT. Расхождения между данными не превышают 10 %. Как видно из представленных данных, большая погрешность данных получена для узлов электродвигателя, расположенных со стороны выхода охлаждающего воздуха из электродвигателя. Данная погрешность между расчетами объясняется тем, что разработанная ТММ определяет температуры узлов электродвигателя с учетом подогрева охлаждающего воздуха вдоль машины. Программирование в среде ELCUT не позволяет учитывать подогрев воздуха при его движения вдоль машины.

3. Моделирование установившегося температурного поля машины в режимах перегрузки подтвердило перегрев лобовых частей обмоток статора. Моделирование данного режима работы в среде ELCUT подтверждает полученное распределение температур в двигателе с помощью ТММ.

4. Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о необходимости информации значений температур в лобовых частях обмотки статора для корректной оценки теплового состояния тягового электродвигателя. Это является особенно актуальным в режимах работы электродвигателя, отличных от номинального.

### 3 ТЕПЛОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Практика эксплуатации тяговых электрических машин показывает, что значительное время они работают в нестационарных режимах [89]. Условия эксплуатации тяговых электродвигателей связаны с постоянными изменениями нагрузки и, как следствие, изменениями частоты вращения. Данные режимы возникают при пуске, отключении, торможении электродвигателей. Они сопровождаются быстрым и опасным повышением температуры отдельных узлов двигателей [39]. В связи с этим контроль температуры ТЭД при нестационарных режимах является весьма актуальным.

Рассмотренная в предыдущей главе тепловая математическая модель применима для определения установившихся температур узлов АТЭД. Для определения температур отдельных узлов электродвигателя при изменяющихся условиях работы в этой модели необходимо учитывать динамику изменения температур. С этой целью, необходимо создать математическую модель, которая производила расчет температур при нестационарных режимах АТЭД. При этом предлагается использовать две методики:

- расчет температур узлов АТЭД через коэффициенты влияния;
- расчет нагревания АТЭД с использованием постоянных нагрева элементов конструкции.

Необходимо отметить, что представленные методики имеют разный характер учета динамики изменения температуры. В первом случае применяется линеаризация кривой изменения температуры, во втором учитывается постоянная времени нагрева.

Каждая из предложенных методик предполагает наличие узла электродвигателя – «опорного узла», температура которого является известной, и по которой будет производиться перерасчет температур остальных узлов. В качестве такого узла может выступать любой элемент АТЭД, непосредственное

измерение температуры которого является наиболее удобным в процессе эксплуатации электродвигателя. В данном случае для исследуемого асинхронного тягового электродвигателя в качестве опорного узла могут выступать [90]:

- выходная температура воздуха электродвигателя или разница температур на выходе и входе в электродвигатель – подогрев воздуха в двигателе;

- температура сердечника статора, корпуса электродвигателя или температура пазовой части обмотки статора АТЭД.

С учетом того, что электродвигатели типа НТА-1200 оборудованы датчиком температуры [7], оптимальным является использование температуры сердечника статора тягового электродвигателя в качестве опорного узла.

### 3.1 Расчет нестационарных температур узлов тягового асинхронного электродвигателя через коэффициенты влияния

Расчет нестационарного температурного поля асинхронного тягового электродвигателя с помощью коэффициентов влияния основан на использовании коэффициентов корреляции Пирсона [91, 92]. Как известно, говорить о корреляционной взаимосвязи между отдельными величинами можно в том случае, если каждому значению одной из них соответствует определенное распределение другой величины [91]. Коэффициенты корреляции позволяют установить взаимосвязь между температурой опорного узла и остальными расчетными температурами узлов электродвигателя.

Таким образом, для расчета температур элементов конструкции АТЭД по рассматриваемому методу необходимо определить коэффициенты корреляции температур элементов конструкции машины от температуры сердечника статора. Расчет корреляционных зависимостей температур возможно произвести по случайной выборке с использованием тепловой математической

модели. Целесообразным является проводить данную выборку с помощью планирования эксперимента.

### 3.1.1 Планирование эксперимента для определения коэффициентов корреляции

Классическая концепция планирования экспериментов плодотворно используется для решения многих прикладных задач. Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью в выбранной области [89].

Использование метода планирования эксперимента возможно для решения разнообразных задач, таких как поиск оптимальных условий, построение интерполяционных формул, выбор существенных факторов, оценка и уточнение констант теоретических моделей (например, кинетических), выбор наиболее приемлемых из некоторого множества гипотез о механизме явлений, исследование диаграмм состав – свойство [89].

Применение планирования эксперимента повышает эффективность использования эксперимента в научных исследованиях.

Для создания случайной выборки тепловой математической модели, эффективным является ее представление как системы «черный ящик» [89], представленной на рисунке 3.1.

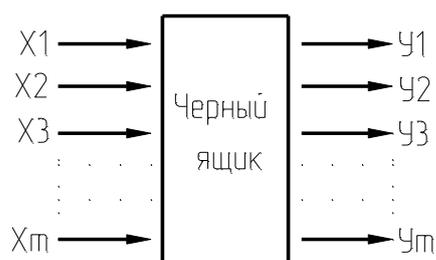


Рис. 3.1. Схема «черного ящика»

Здесь обозначения буквами  $X_1$ - $X_m$  являются все способы возможного воздействия на поведение «черного ящика», и называются факторами эксперимента [89]. При этом при проведении расчетного эксперимента каждый из факторов может принимать несколько значений. Такие значения принято называть уровнями [89].

Стрелки справа, обозначенные буквами  $У_1$ - $У_m$ , показывают выходные характеристики данной системы. Представляют собой отклик «черного ящика» на изменение входных воздействий и называются параметрами или функциями отклика [93].

Фиксированный набор уровней факторов (то есть установление каждого фактора на некоторый уровень) определяет одно из возможных состояний «черного ящика». Перебор всех возможных состояний, позволяет получить множество различных состояний данного «черного ящика», то есть необходимую выборку искомых температур.

Для получения выборки значений выходных данных тепловой математической модели необходимо определиться с числом независимых входных параметров (факторов эксперимента).

Как отмечалось ранее, фактор эксперимента – это параметр, который способен воздействовать на объект исследования, то есть математическую тепловую модель. При этом выделенные факторы должны отвечать предъявляемым к ним требованиям [93, 94]:

- управляемыми (величина значений зафиксирована на заданном уровне в течение всего эксперимента);
- однозначными;
- совместимыми (возможность осуществимости всех комбинаций факторов).

В качестве факторов эксперимента для разработанной ТММ асинхронного тягового электродвигателя можно выделить 4 независимых входных параметра ( $n=4$ ), которые влияют на значения потерь и тепловых проводимостей электродвигателя:

- $I_c$  – ток статора;
- $f$  – частота питающей сети;
- $v_{ex}$  – температура входного воздуха;
- $Q$  – расход охлаждающего воздуха.

### 3.1.2 Выбор плана эксперимента

Для создания необходимой выборки нужно произвести перебор всех возможных состояний ТММ. При этом важным аспектом является выбор плана эксперимента. В настоящее время наибольшее применение в практических исследованиях имеют полиномиальные регрессионные модели [95]. Задача подбора адекватной модели сводится к выбору порядка полинома. Основными полиномами являются полиномы первой и второй степени от  $n$  независимых переменных. Соответственно такие планы называются планами первого и второго порядка.

Планы первого порядка используются в экспериментах, определяющих оптимальные условия протекания процесса и локального отклика [89]. С помощью планов первого порядка можно получить достаточно точную аппроксимацию механизма явлений. Существует несколько разновидностей планов первого порядка: однофакторный (классический) эксперимент; полный факторный эксперимент; дробный факторный эксперимент; насыщенный план (симплекс-план) [95].

Необходимо отметить, что планы первого порядка являются достаточно простыми в реализации, однако они имеют свои недостатки и не всегда позволяют получить адекватную регрессионную модель. Например, однофакторный эксперимент, который сводится к поочередному варьированию каждого из факторов, в то время как все остальные факторы стабилизированы на некотором уровне, обладает свойством ротатабельности. Однако свойствам

критериев оптимальности, связанных с точностными характеристиками регрессионной модели, такой эксперимент явно неудовлетворителен. Именно поэтому он и не находит в настоящее время широкого применения.

В свою очередь, полный факторный эксперимент типа  $2^n$ , который удовлетворяет критерию ротатабельности планирования, а также обладает весьма хорошими свойствами, отвечая сразу нескольким различным критериям оптимальности, с практической точки зрения имеет существенный недостаток, связанный с быстрым ростом количества опытов при увеличении числа факторов.

Дробный факторный эксперимент (ДФЭ)  $2^{n-p}$  позволяет получать линейные регрессионные модели, а также модели, содержащие дополнительно некоторые взаимодействия факторов при меньшем числе наблюдений по сравнению с ПФЭ. Данный эффект достигается за счет определенной дополнительной априорной информации о свойствах изучаемого объекта. Эта информация должна быть сформулирована в виде списка переменных – факторов и их взаимодействий, представляющих собой интерес для дальнейшего исследования, в виде списка существенных переменных [95]. Список существенных переменных, или вид первоначальной регрессионной модели, может быть получен в результате качественного изучения физической сути исследуемого явления, путем опроса специалистов, анализа литературных данных, когда из рассмотрения исключаются различного рода взаимодействия, заведомо не влияющие на выходную величину  $Y$  [89].

В настоящее время наибольшее распространение имеют регулярные планы ДФЭ типа  $2^{n-p}$ . Такой тип эксперимента позволяет создавать достаточно экономный план, обеспечивающий оценку влияния существенных переменных, и не учитывать возможное воздействие прочих переменных.

Еще одним типом планов первого порядка являются симплекс-планы. Они используются, как правило, на стадии предварительного исследования объекта, когда желательно применять наиболее экономные насыщенные планы,

а также при построении процедур поиска экстремальных значений целевой функции.

В случаях, когда имеется необходимость усложнения и увеличения точности модели, либо если заранее известно, что объект исследования обладает существенно нелинейными свойствами наиболее оптимальным является использование план второго порядка. Они позволяют получать регрессионные модели в виде полного квадратичного полинома (полинома второй степени).

По сравнению с планами первого порядка планы второго порядка являются более сложными по структуре, имеют большее число точек в спектре плана и уровней варьирования для каждого фактора, требуют при своей реализации увеличенного количества опытов. Для получения квадратичной зависимости каждый из факторов должен изменяться, по крайней мере, на трех уровнях.

В настоящее время известно много разновидностей планов второго порядка [95], отличающихся свойствами критериев оптимальности регрессионных экспериментов, а также простоты и наглядности их получения. Существует две большие группы планов второго порядка: симметричные и несимметричные.

С практической точки зрения симметричные планы отличаются большей упорядоченностью в расположении точек, чем несимметричные. Для них характерно подобие в программе изменения каждого из факторов, а в некоторых случаях и полная симметрия. Для симметричных планов справедливы достаточно простые соотношения для оценок коэффициентов регрессии, их выборочных дисперсий.

Основной разновидностью симметричных планов второго порядка, указанных в классификационной схеме [89], являются центрально-композиционные планы (ЦКП). Они исторически наиболее ранние и имеют широкое практическое применение и в настоящее время.

Центрально-композиционные планы любой модификации состоят из трех частей. Первая часть — основа или ядро плана — это ПФЭ  $2^n$  илиДФЭ  $2^{n-p}$ . Вторая часть ЦКП — так называемые «звездные» точки, расположенные на координатных осях на расстоянии  $\pm\alpha$  от центра эксперимента. Общее число таких точек равно  $2n$ . Третья часть ЦКП — опыты в центре плана; число таких опытов  $N_0 \geq 1$ . Существуют ортогональные (ОЦКП) и ротатабельные (РЦКП) центрально-композиционные планы [89].

Ортогональность позволяет двигаться по градиенту пропорционально коэффициентам линейной модели и независимо интерпретировать эффекты. Ротатабельность обеспечивает гарантированное равенство дисперсий предсказания при движении в любом направлении от центра эксперимента.

Представленный обзор планов экспериментов первого и второго порядка показал, что для создания более полной выборки температур наиболее приемлемым является применение ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка. С учетом того, что, как уже отмечалось, объект исследования обладает существенно нелинейными свойствами, применение данного типа эксперимента позволит увеличить точность определения коэффициентов корреляции температур.

### 3.1.3 Реализация плана эксперимента

С учетом выбранных факторов эксперимента для осуществления планирования эксперимента и получения выборки значений выходных данных тепловой математической модели необходимо произвести выбор локальной области факторного пространства [89], то есть определиться с центром плана, областью планирования, количеством параллельных опытов в каждой точке плана и порядком реализации опытов. При этом должны быть учтены следующие ограничения:

- принципиальные ограничения для значений факторов, которые не могут быть нарушены ни при каких обстоятельствах;
- ограничения, связанные с технико-экономическими показателями;
- ограничения, связанные с конкретными условиями проведения процесса.

Выбор основного уровня. Основным уровнем плана эксперимента можно назвать совокупность значений факторов, дающих наилучшие условия прохождения эксперимента. Значения факторов основного уровня являются исходной точкой для построения плана эксперимента.

В разных случаях располагают различными сведениями об области наилучших условий. При выборе основного уровня опираемся на рекомендации, предложенные в [89]. При известных сведениях о координатах одной наилучшей точки фактора необходимо рассматривать ее в качестве основного уровня. Таким образом, для факторов ток статора, частота питающего напряжения в качестве основного уровня принимаем номинальные значения данных параметров:  $I_C = 375$  А;  $f = 65$  Гц. Для фактора температура входного воздуха координаты наилучшей точки не определены. Данный фактор может принимать значения в достаточно большой области. Принимаем в качестве основного уровня рекомендованное значение температуры для большинства тепловых расчетов  $v_{ex} = 25$  °С. Координаты наилучшей точки для фактора расход воздуха лежит на границе области фактора. Оптимальным значением величины расхода охлаждающего воздуха является  $95$  м<sup>3</sup>/мин. Изменение данного фактора в большую сторону невозможно по технологическим причинам. В этом случае основной уровень выбирается с некоторым сдвигом от наилучших условий. Принимаем  $Q = 70$  м<sup>3</sup>/мин.

Определение интервалов варьирования. Интервалом варьирования факторов называется некоторое число (свое для каждого фактора), прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание – нижний уровни фактора [89].

На выбор интервалов варьирования накладываются естественные ограничения сверху и снизу. В случае натуральных испытаний интервал варьирования не должен быть меньше той ошибки, с которой экспериментатор фиксирует уровень фактора, иначе верхний и нижний уровни окажутся неразличимыми. С другой стороны, интервал не может быть настолько большим, чтобы верхний или нижний уровни оказались за пределами области определения.

Для интервалов также имеется градация. Рассматривается широкий, средний и узкий интервалы варьирования [89]. Размер интервала варьирования составляет некоторую долю от области определения фактора. При условии, что интервал составляет не более 10% от области определения, считают его узким, не более 30% — средним и в остальных случаях — широким. Нужно отметить, что это деление является условным. В каждой конкретной задаче необходимо специально определять эти понятия, которые зависят не только от размера области определения, но и от характера поверхности отклика и от точности фиксирования факторов.

При выборе решений учитываются информация о кривизне поверхности отклика и о диапазоне изменения параметра оптимизации. Согласно блок-схемам, приведенным в [89], типичным решением является средний интервал варьирования факторов. Выбранный интервал варьирования для факторов приведен в таблице 3.1.

«Звездные точки». Для выбранного ортогонального центрально-композиционного плана конкретные числовые значения «звездных точек»  $\pm\alpha$  при  $n=2\div 8$  представлены в [93]. Для количества факторов  $n=4$  для ОЦКП, построенного на ядре полного факторного эксперимента ПФЭ  $2^4$ , значение  $\alpha=1,414$ . Значения факторов в «звездных точках» приведены в таблице 3.1.

Кодирование факторов эксперимента. С учетом того, что все факторы эксперимента являются размерными величинами, причем размерности факторов различные и числа, выражающие величины факторов, имеют разные порядки, при реализации плана эксперимента принято работать не с истинными

значениями факторов, а производить предварительно операцию кодирования факторов, представляющую собой линейное преобразование факторного пространства [89, 93, 94]. Кодирование факторов в эксперименте позволяет упростить запись условий эксперимента и обработку экспериментальных данных.

Таблица 3.1.

Факторы	$\tilde{x}_j$	Ток статора, $I_c$ , А	Частота питающей сети, $f$ , Гц	Температура входного воздуха, $\nu_{вх}$ , $^{\circ}\text{C}$	Расход воздуха, $Q$ , $\text{м}^3/\text{сек}$
Условное обозначение	$x_j$	X1	X2	X3	X4
Основной уровень	$\tilde{x}_{j0}$	375	65	25	70
Интервал	$I_j$	100	15	10	20
Верхний уровень	+1	475	80	35	90
Нижний уровень	-1	275	50	15	50
«Звездные точки»	$+\alpha$	530	92	37	100
	$-\alpha$	265	46	12	40

Операции кодирования производится с учетом выбранных ранее интервалов варьирования факторов по формуле [89]:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{I_j},$$

где  $x_j$  – кодированное значение фактора;

$\tilde{x}_j$  – натуральное значение фактора;

$\tilde{x}_{j0}$  – натуральное значение основного уровня;

$I_j$  – интервал варьирования;

$j$  – номер фактора.

Количество опытов при реализации экспериментов на персональном компьютере можно определить по уже представленной ранее формуле:  $N=2^n+2n+1=2^4+2\cdot4+1=25$ .

Составление матрицы планирования. Матрица планирования представлена в Приложении 6. Матрица составлена по правилам полнофакторного эксперимента и содержит сочетание факторов X1-X4, их квадраты значений, а также парные взаимодействия этих факторов.

Проведение плана эксперимента осуществляется для 23 узлов тепловой схемы замещения. В результате получена выборка значений температур узлов двигателя при разных входных параметрах и их сочетаний, по которой возможно произвести расчеты для определения коэффициента корреляции Пирсона.

#### 3.1.4 Оценка адекватности полученной выборки

В результате проведения выбранного плана эксперимента имеется необходимые данные (получен массив значений температур узлов), которые позволяют произвести преобразование тепловой модели матричного вида к функции нескольких переменных вида [94]

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_n \cdot X_n + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_{(n-1)} X_{(n-1)} X_n + b_{11} X_1^2 + \dots + b_{nn} X_n^2.$$

Говорить о пригодности полученного массива температур для расчета коэффициентов корреляции можно в том случае, если полученные функции температур узлов электродвигателя описывают математическую модель матричного вида в вышеприведенном интервале с допустимой погрешностью.

### 3.1.4.1 Расчет функции отклика тепловой математической модели

Расчет коэффициентов регрессии  $b_i$  можно осуществить методом наименьших квадратов [95]. В силу ортогональности планирования все коэффициенты регрессии определяются независимо друг от друга [95]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u}{\sum_{u=1}^N X_{iu}^2},$$

здесь  $i$  обозначает порядковый номер столбца в матрице планирования,  $X_{iu}$  – элементы соответствующего столбца.

Результаты расчета коэффициентов регрессии  $b_i$  для всех узлов тепловой схемы позволяют составить уравнения регрессии. Коэффициенты уравнений регрессии для каждого узла представлены в Приложении 7.

Однако необходимо отметить, что значимости рассчитанных коэффициентов не являются одинаковыми. Вычленение незначимых коэффициентов регрессии можно осуществлять двумя равноценными способами: проверкой по  $t$ -критерию Стьюдента или построением доверительного интервала. Проверка значимости каждого коэффициента проводится также независимо. При использовании полного факторного эксперимента или регулярных дробных реплик доверительные интервалы для всех коэффициентов (в том числе и эффектов взаимодействия) равны друг другу [89].

Производим проверку значимости коэффициентов регрессии по  $t$ -критерию Стьюдента. Суть данной проверки заключается в расчете величины  $t$ -критерия каждого коэффициента регрессии по выражению [95]:

$$t = \frac{|b_i|}{s(b_i)}$$

где  $s(b_i)$  – квадратичная ошибка коэффициента регрессии:

$$s(b_i) = +\sqrt{s^2(b_i)}.$$

После вычисленные значения t-критерия сравниваются с табличными. Согласно плану эксперимента значение t-критерия при 5 % уровне значимости, при 20 степенях свободы  $t=2,0860$  [95]. При этом коэффициенты, имеющие менее 5 % уровень значимости, можно отбросить (в Приложении 7 значимые коэффициенты выделены полужирным начертанием).

С учетом отброшенных коэффициентов уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$v_{C1} = 93,69 + 14,83 \cdot X1 + 18,41 \cdot X3 - 8,61 \cdot X4 + 12,01 \cdot X1^2 + 8,29 \cdot X2^2 + 7,73 \cdot X3^2 + 9,72 \cdot X4^2;$$

$$v_{CP} = 102,41 + 12,12 \cdot X1 + 18,22 \cdot X3 - 12,82 \cdot X4 + 12,32 \cdot X1^2 + 9,38 \cdot X2^2 + 8,80 \cdot X3^2 + 1,76 \cdot X4^2;$$

$$v_{C2} = 96,74 + 15,75 \cdot X1 + 18,37 \cdot X3 - 9,82 \cdot X4 + 12,38 \cdot X1^2 + 8,53 \cdot X2^2 + 7,89 \cdot X3^2 + 10,30 \cdot X4^2;$$

$$v_{CC} = 97,83 + 7,90 \cdot X1 + 18,35 \cdot X3 - 13,55 \cdot X4 + 11,15 \cdot X1^2 + 9,31 \cdot X2^2 + 8,75 \cdot X3^2 + 11,93 \cdot X4^2;$$

$$v_{P1} = 62,81 + 7,24 \cdot X1 + 7,24 \cdot X2 + 19,48 \cdot X3 + 7,51 \cdot X1^2 + 7,26 \cdot X2^2 + 5,29 \cdot X3^2 + 6,00 \cdot X4^2;$$

$$v_{PP} = 61,87 + 6,70 \cdot X1 + 6,59 \cdot X2 + 19,50 \cdot X3 + 7,33 \cdot X1^2 + 7,09 \cdot X2^2 + 5,25 \cdot X3^2 + 6,14 \cdot X4^2;$$

$$v_{P2} = 66,22 + 8,63 \cdot X1 + 8,41 \cdot X2 + 19,47 \cdot X3 + 7,96 \cdot X1^2 + 7,61 \cdot X2^2 + 5,43 \cdot X3^2 + 6,60 \cdot X4^2 + 4,43 \cdot X1 \cdot X2;$$

$$v_{CP} = 61,35 + 6,44 \cdot X1 + 6,34 \cdot X2 + 19,50 \cdot X3 + 7,23 \cdot X1^2 + 7,01 \cdot X2^2 + 5,23 \cdot X3^2 + 6,12 \cdot X4^2;$$

$$v_{K1} = 62,77 + 7,23 \cdot X1 + 7,22 \cdot X2 + 19,48 \cdot X3 + 7,50 \cdot X1^2 + 7,26 \cdot X2^2 + 5,29 \cdot X3^2 + 6,00 \cdot X4^2;$$

$$v_{K2} = 66,20 + 8,62 \cdot X1 + 8,40 \cdot X2 + 19,47 \cdot X3 + 7,95 \cdot X1^2 + 7,61 \cdot X2^2 + 5,42 \cdot X3^2 + 6,60 \cdot X4^2 + 4,43 \cdot X1 \cdot X2;$$

$$v_1 = 49,68 + 19,49 \cdot X3 + 5,42 \cdot X1^2 + 5,34 \cdot X2^2 + 4,84 \cdot X3^2 + 5,41 \cdot X4^2;$$

$$v_2 = 55,66 + 19,35 \cdot X3 + 6,12 \cdot X1^2 + 5,81 \cdot X2^2 + 5,30 \cdot X3^2 + 6,29 \cdot X4^2;$$

$$v_3 = 58,17 + 19,35 \cdot X3 - 3,16 \cdot X4 + 6,45 \cdot X1^2 + 6,05 \cdot X2^2 + 5,38 \cdot X3^2 + 6,82 \cdot X4^2;$$

$$v_4 = 48,01 + 19,53 \cdot X3 + 5,21 \cdot X1^2 + 5,21 \cdot X2^2 + 4,71 \cdot X3^2 + 5,21 \cdot X4^2;$$

$$v_5 = 49,62 + 19,51 \cdot X_3 + 5,42 \cdot X_1^2 + 5,31 \cdot X_2^2 + 4,78 \cdot X_3^2 + 5,54 \cdot X_4^2;$$

$$v_6 = 52,52 + 19,48 \cdot X_3 + 5,77 \cdot X_1^2 + 5,23 \cdot X_2^2 + 4,93 \cdot X_3^2 + 6,17 \cdot X_4^2;$$

$$v_7 = 55,29 + 19,45 \cdot X_3 + 6,11 \cdot X_1^2 + 5,74 \cdot X_2^2 + 5,07 \cdot X_3^2 + 6,74 \cdot X_4^2$$

$$v_8 = 54,92 + 19,49 \cdot X_3 + 6,11 \cdot X_1^2 + 5,84 \cdot X_2^2 + 5,01 \cdot X_3^2 + 6,49 \cdot X_4^2; ,$$

$$v_9 = 48,45 + 19,53 \cdot X_3 + 5,28 \cdot X_1^2 + 5,26 \cdot X_2^2 + 4,72 \cdot X_3^2 + 5,27 \cdot X_4^2;$$

$$v_{10} = 48,94 + 19,53 \cdot X_3 + 5,34 \cdot X_1^2 + 5,32 \cdot X_2^2 + 4,74 \cdot X_3^2 + 5,35 \cdot X_4^2;$$

$$v_{11} = 50,62 + 19,54 \cdot X_3 + 5,58 \cdot X_1^2 + 5,53 \cdot X_2^2 + 4,80 \cdot X_3^2 + 5,60 \cdot X_4^2;$$

$$v_{12} = 52,30 + 19,55 \cdot X_3 + 5,81 \cdot X_1^2 + 5,73 \cdot X_2^2 + 4,85 \cdot X_3^2 + 5,85 \cdot X_4^2;$$

$$v_{13} = 52,76 + 19,55 \cdot X_3 + 5,88 \cdot X_1^2 + 5,79 \cdot X_2^2 + 4,87 \cdot X_3^2 + 5,92 \cdot X_4^2;$$

где:

$$X_1 = \frac{I_c - 375}{100}, \quad X_2 = \frac{f - 65}{15}, \quad X_3 = \frac{v_{ex} - 25}{10}, \quad X_4 = \frac{Q - 70}{20}.$$

Использование критерия Стьюдента позволило сократить количество коэффициентов  $b_i$ , имеющих менее 5 % уровень значимости.

### 3.1.4.2 Проверка адекватности регрессионной модели

Проверка адекватности регрессионной модели осуществляется с целью выяснение вопросов о правильности выбора вида уравнения регрессии. Проверке подвергается регрессионная модель с отобранными (значимыми) коэффициентами регрессии.

Для выяснения адекватности полученной функции отклика необходимо сопоставить два параметра: остаточную дисперсию или дисперсию адекватности и дисперсию воспроизводимости эксперимента. При адекватной регрессионной модели различие между параметрами должно быть числом

случайным, остаточная дисперсия неадекватной модели будет значимо больше дисперсии воспроизводимости эксперимента [95]. Сопоставление двух оценок дисперсий производится с помощью F-критерия [95]:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s^2(y)},$$

где  $s_{ad}^2$  – остаточная дисперсия, которая определяется по формуле [96]:

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (Y_u - \hat{Y}_u)^2}{f_{ad}},$$

где  $\hat{Y}_u$  – значения  $Y$  в  $u$ -ом опыте определенное по уравнению регрессии;

$f_{ad}$  – число степеней свободы для определения остаточной дисперсии,

$$f_{ad} = N - (n + 1) = 25 - (4 - 1) = 20 \text{ [15]}.$$

Удобство использования критерия Фишера состоит в том, что проверку гипотезы можно свести к сравнению с табличным значением. Фрагмент соответствующей таблицы представлен в [95]. В таблице используется уровень значимости 0,05. При этом с соответствующей доверительной вероятностью модель можно считать адекватной, если рассчитанное значение F-критерия не превышает табличного значения. Значение критерия Фишера для проводимых расчетов составляет  $f=1,6$ .

Проведенная оценка адекватности уравнений, осуществленная при помощи критерия Фишера, показала, что замена тепловой модели матричной формы на уравнения регрессии с доверительной вероятностью 0,95 адекватно отражают расчет температур в матричной форме. Таким образом, можно говорить о возможности применения полученной выборки значений температур элементов конструкции АТЭД для расчета коэффициентов корреляции Пирсона.

### 3.1.4 Расчет коэффициентов корреляции Пирсона

Применение статических методов представленных в работах Гмурман В.Е., Горлач Б.А., Константиновой Л.И., Кремер Н.Ш. [91, 92, 97, 98], позволяют провести расчет коэффициентов корреляции Пирсона.

С учетом того, что корреляционная зависимость возможна между двумя случайными величинами в том случае, если каждому значению одной из них соответствует определенное распределение другой величины, взаимосвязь между этими случайными величинами можно проанализировать с использованием диаграммы рассеивания. Эта диаграмма позволяет установить, есть ли связь между переменными, и какого она вида. На рисунке 3.2 приведена диаграмма рассеивания некоторых температур узлов электродвигателя от температуры сердечника статора.

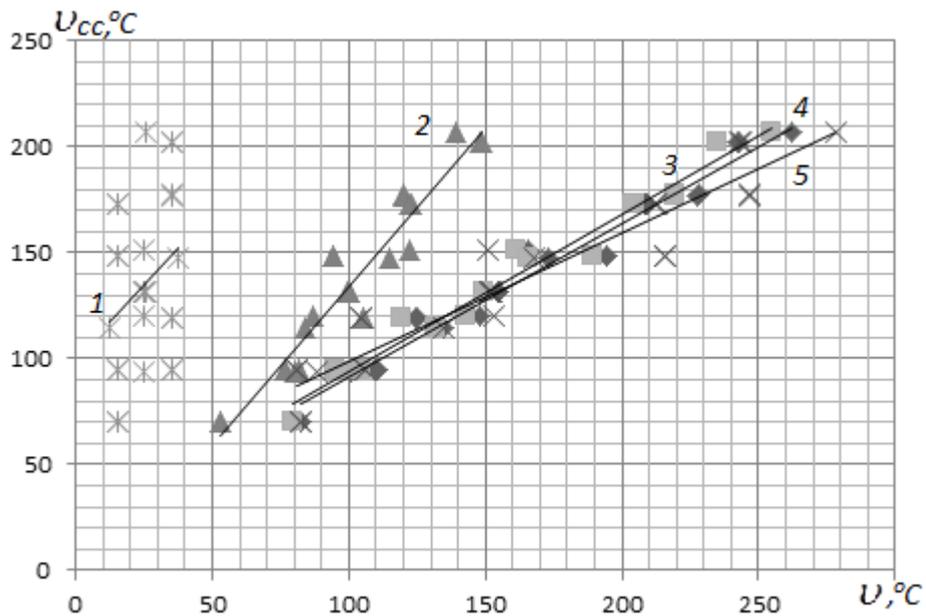


Рис. 3.2. Взаимосвязь между температурой сердечника статора электродвигателя ( $U_{cc}$ ) и температурами узлов АТЭД ( $U$ ): 1 – температура выходного воздуха электродвигателя; 2 – температура сердечника ротора; 3 – температура лобовой части ОС со стороны подачи охлаждающего воздуха; 4 – температура пазовой части ОС; 5 – температура лобовой части ОС со стороны выхода охлаждающего воздуха

Анализ представленной диаграммы показала положительную линейную зависимость между представленными величинами. [91].

Для оценки линейной взаимосвязи между двумя переменными X и Y используется выборочный коэффициент корреляции Пирсона [91]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}) \cdot (y_i - \bar{Y})}{(n-1)S_x S_y},$$

где  $\bar{X}$  – среднее арифметическое для X;

$\bar{Y}$  – среднее арифметическое для Y;

$S_x$  – выборочное среднеквадратическое для X;

$S_y$  – выборочное среднеквадратическое для Y;

n – объем выборки.

Применение данного коэффициента позволяет определить коэффициент изменения температур узлов асинхронного тягового электродвигателя при изменении температуры стали сердечника статора на 1 °С. Значения коэффициентов корреляции Пирсона представлены в таблице 3.2.

Полученные коэффициенты позволяют производить корректировку температур узлов тягового электродвигателя в зависимости от полученных значений температуры сердечника статора корпуса ТЭД.

Таблица 3.2. Значения коэффициентов корреляции Пирсона

Наименование узла электродвигателя	Коэффициент корреляции Пирсона
Лобовая часть ОС со стороны подачи воздуха ( $\nu_{c1}$ )	0.78548746
Пазовая часть обмотки статора ( $\nu_{cp}$ )	0.95236717
Лобовая часть ОС со стороны противоположной подачи воздуха ( $\nu_{c2}$ )	0.78529899
Лобовая часть ОР со стороны подачи воздуха ( $\nu_{p1}$ )	0.74957956
Пазовая часть обмотки ротора ( $\nu_{pp}$ )	0.85981168

Продолжение табл. 3.2

Лобовая часть ОР со стороны противоположной подаче воздуха ( $v_{p2}$ )	0.7519359
Сердечник ротора ( $v_{cp}$ )	0.87963868
Короткозамкнутое кольцо со стороны подачи воздуха ( $v_{k1}$ )	0.81952994
Короткозамкнутое кольцо со стороны противоположной подаче воздуха ( $v_{k2}$ )	0.81186933
Подогрев воздуха в области 1 ( $v1$ )	0.26953404
Подогрев воздуха в области 2 ( $v2$ )	0.30153559
Подогрев воздуха в области 3, выходная температура воздуха ( $v3$ )	0.2665269
Подогрев воздуха в области 4 ( $v4$ )	0.30970224
Подогрев воздуха в области 5 ( $v5$ )	0.30738354
Подогрев воздуха в области 6 ( $v6$ )	0.3037034
Подогрев воздуха в области 7 ( $v7$ )	0.29982591
Подогрев воздуха в области 8 ( $v8$ )	0.29615987
Подогрев воздуха в области 9 ( $v9$ )	0.31175227
Подогрев воздуха в области 10 ( $v10$ )	0.30950416
Подогрев воздуха в области 11 ( $v11$ )	0.30857006
Подогрев воздуха в области 12 ( $v12$ )	0.29934467
Подогрев воздуха в области 13 ( $v13$ )	0.29841407

Применение данного коэффициента позволяет оценить влияние температур узлов ТЭД на температуры сердечника статора двигателя и произвести корректировку получившихся в результате моделирования установившихся температур этих узлов для нестационарного режима.

### 3.1.5 Расчет нагревания АТЭД с помощью коэффициентов влияния

При работе тягового асинхронного электродвигателя в неустановившемся режиме приведение температур от установившихся к текущим с учетом их корреляции, можно производить по выражению:

$$U_i = U_{расчi} + (U_{сc_{изм}} - U_{сc_{расч}}) \cdot r_i,$$

где  $U_i$  – скорректированное значение температуры  $i$ -ого узла АТЭД;

$U_{расчi}$  – установившееся значение температуры  $i$ -ого узла АТЭД, рассчитанное по тепловой математической модели;

$U_{сc_{изм}}$  – значение температуры сердечника статора, измеренное на электродвигателе непосредственно при помощи термодатчика;

$U_{сc_{расч}}$  – значение установившейся температуры стали сердечника статора, рассчитанное по ТММ;

$r_i$  – коэффициент корреляции температур  $i$ -ого узла АТЭД и стали сердечника статора электродвигателя.

При этом характер изменения температуры при нагреве и охлаждении принимает вид ломанной кривой вместо экспоненты. Это обстоятельство является причиной высокой погрешности, что имеет существенное значение при тепловых расчетах. В результате для определения температур узлов АТЭД в нестационарных режимах более целесообразным представляется применение метода с помощью коэффициентов влияния.

### 3.2 Расчет температур узлов ТЭД через постоянные нагрева

Основная идея второго метода заключается в определении фактического времени нагрева опорного узла, по которому производится пересчет температур остальных узлов электродвигателя [90]. Графически данная методика расчета представлена на рисунке 3.3.

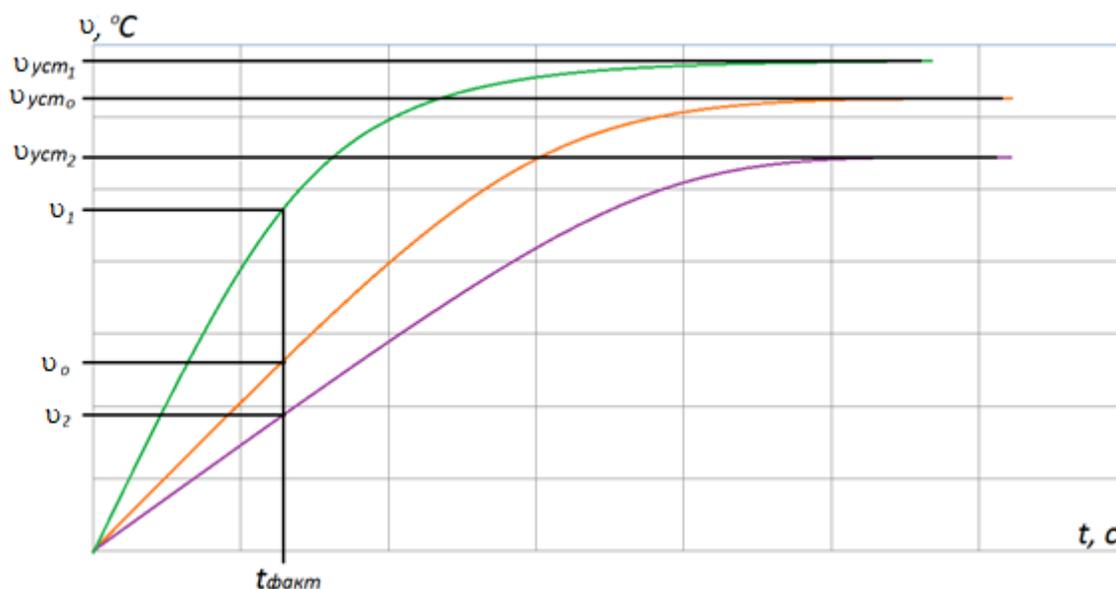


Рис. 3.3. Методика расчета температур узлов электродвигателя при работе в нестационарных режимах

С использованием тепловой математической модели рассчитываются значения температур узлов электродвигателя в установившемся режиме  $\nu_{уст0}$ ,  $\nu_{уст1}$ ,  $\nu_{уст2}$ . По фактической температуре опорного узла  $\nu_0$ , предоставленного с датчика, и информации о постоянной нагрева данного элемента конструкции электродвигателя, можно определить время нагрева соответствующего элемента  $t_{факт}$  при данных условиях работы. В свою очередь, по фактическому времени нагрева, величинах установившихся температур узлов электродвигателя и постоянным нагрева данных элементов, можно рассчитать их температуры  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , соответствующие температуре опорного узла  $\nu_0$ .

В качестве опорного узла тягового электродвигателя также выступает сердечник статора электродвигателя.

### 3.2.1 Определение постоянных нагрева элементов двигателя

В основе расчета постоянных нагрева лежит классическая теория нагрева однородных тел, к которым можно отнести каждый элемент конструкции электродвигателя.

В проводимых расчетах принято следующее допущение [39]: теплопроводность материала тела достаточно большая, при этом внутренними перепадами температуры по сравнению с превышением температуры на поверхности пренебрегаем. Тепловая инерция рассматриваемого тела характеризуется его массой  $M$  и удельной теплоемкостью  $c$ , постоянную нагрева тела можно представить как:

$$T = \frac{c \cdot M}{\alpha \cdot S},$$

где  $c$  – удельная теплоемкость тела;

$M$  – масса тела;

$S$  – площадь поверхности тела;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи тела.

Произведение  $\alpha \cdot S$  представляет собой тепловые проводимости теплоотдачи поверхности тела, внешней тепловой проводимости, расчет которых был проведен в тепловой математической модели АТЭД. Однако для того, чтобы достаточно точно характеризовать тепловое состояние реального объекта, необходимо также учитывать внутреннюю тепловую проводимость:

$$\lambda_{\lambda} = \lambda \cdot S / \Delta.$$

Таким образом, суммируя все вышесказанное, тепловую проводимость элемента конструкции АТЭД, можно определить:

$$T = cM / (\lambda_{\alpha} + \lambda_{\lambda}),$$

где  $\lambda_{\alpha}$  – внешнее тепловое сопротивление, характеризующееся конвективным теплообменом;

$\lambda_\lambda$  – внутреннее тепловое сопротивление, характеризующееся теплопроводностью материала.

### 3.2.2 Расчет нагревания ТЭД с использованием постоянных нагрева узлов электродвигателя

Расчет температур узлов электродвигателя в реальном времени до наступления установившихся значений возможен по имеющейся информации:

- температуры опорного узла: фактическая, полученная посредством измерения термопарой и установившаяся, рассчитанная с помощью ТММ;
- постоянная нагрева данного опорного узла.

По вышеуказанным данным становится возможным определение времени фактического нагрева этого узла:

$$t_\phi = -T \cdot \ln \left( \frac{v_0 - v_{уст0}}{v_{o.c.} - v_{уст0}} \right),$$

где  $T$  – постоянная нагрева стали сердечника статора с учетом условий его охлаждения;

$v_0$  – температура стали сердечника статора, измеренная при помощи термопары;

$v_{уст0}$  – установившаяся температура стали сердечника статора, рассчитанная при помощи ТММ;

$v_{o.c.}$  – температура окружающей среды.

Имея значение фактического времени, которому соответствует температура опорного узла, по функциям кривых нагрева других узлов можно определить фактическую температуру элементов конструкции электродвигателя:

$$v_i = v_{vCTi} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{\phi}}{T_i}} \right) + v_{o.c.} \cdot e^{-\frac{t_{\phi}}{T_i}},$$

где  $v_i$  – фактическая температура  $i$ -ого узла;

$v_{vCTi}$  – установившаяся температура  $i$ -ого узла, рассчитанная по ТММ;

$T_i$  – постоянная нагрева  $i$ -ого узла с учетом условий его охлаждения.

Превышения температур воздуха при движении его через электродвигатель определяется с учетом полученных значений фактических температур узлов двигателя из уравнений теплового баланса ТММ:

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n v_j \cdot \lambda_j + v_{i-1} \cdot X}{\sum_{j=1}^n \lambda_j},$$

где  $v_i$  – фактическая температура подогрева охлаждающего воздуха  $i$ -ого узла;

$\sum_{j=1}^n v_j \cdot \lambda_j$  – сумма тепловыделений подогревающих область воздуха  $i$ -ого

узла;

$v_{i-1} \cdot X$  – подогрев воздуха ( $i-1$ ) узла текущей области воздуха машины;

$\sum_{j=1}^n \lambda_j$  – сумма проводимостей данной области воздуха.

Представленные два метода расчета позволяют определять температуры узлов электродвигателя в нестационарных режимах.

### 3.3 Сопоставление методов, оценка точности

Оценка точности разработанных методов расчета температурного поля асинхронного тягового двигателя для нестационарных режимов работы была сделана на основе экспериментальных кривых нагрева тягового электродвигателя НТА-1200. Временные зависимости были сняты при следующих входных параметрах:

- ток статора  $I_f=455$  А;
- температура окружающего воздуха  $\nu=12$  °С;
- расход вентилируемого воздуха  $Q=66$  м<sup>3</sup>/мин.

На рисунке 3.4 представлены кривые нагрева обмотки статора электродвигателя НТА-1200.

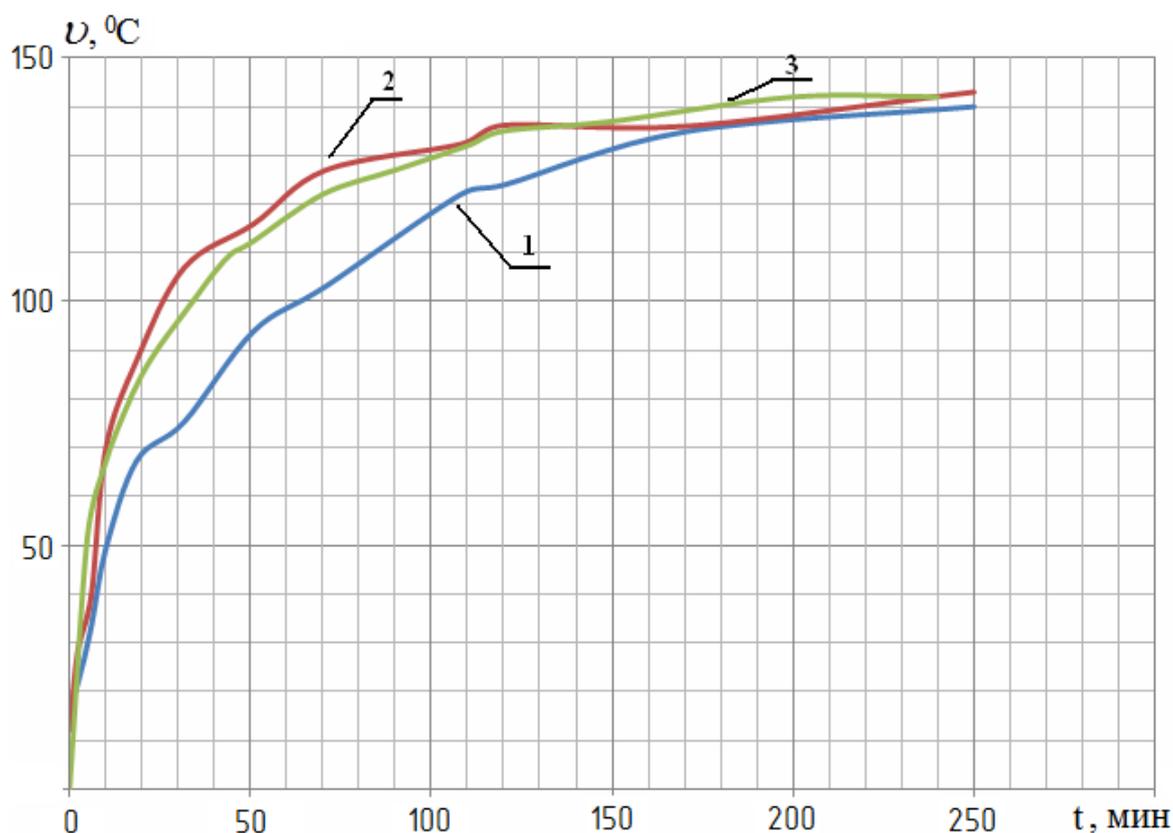


Рис. 3.4. Кривые нагрева обмотки статора тягового электродвигателя НТА-1200: 1 – расчет нагрева с помощью коэффициентов влияния; 2 – расчет нагрева с помощью постоянных нагрева; 3 – экспериментальная кривая нагрева

Экспериментальная кривая нагревания обмотки статора обозначена номером 3. Кривые 1 и 2 представляют собой зависимости, полученные с помощью моделирования двумя представленными ранее методами. Как видно из графика, кривая 1, полученная на основе использования для расчета нагрева обмотки статора корреляционной зависимости от температуры сердечника статора электродвигателя имеет вид ломанной кривой. В связи с этим

погрешность между экспериментальными и расчетными данными является достаточно большой. Максимальная величина погрешности составляет 18 %.

Зависимость, полученная с использованием методики через постоянные нагрева, имеет большую сходимость. Максимально полученная погрешность между расчетными данными этим способом и экспериментальными данными не превышает 8,3 %.

### 3.4 Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенные методы расчета температур узлов электродвигателя позволяют определять температурное поле машины для нестационарных режимов ее работы.

2. Метод, основанный на корреляционной зависимости температур узлов электродвигателя от опорного узла, имеет высокую погрешность расчета. Выявленная максимальная погрешность составила 18 %, что показывает непригодность данного метода для расчета температур узлов электродвигателя. Однако при температурах близких к установившимся погрешность между экспериментальными и расчетными данными становится меньше. Это позволяет использовать данный метод в случае превышения измеряемой температуры сердечника статора над температурой этого узла, рассчитанного по ТММ, в случае неисправности системы охлаждения электродвигателя (засорение охлаждающих каналов), когда происходит перераспределение потока охлаждения и нагрев его узлов составляет значения выше предполагаемых установившихся.

3. Предпочтительным для расчета нагрева до установившейся температуры элементов конструкции АТЭД является метод, основанный на определении постоянных нагрева. Максимальная погрешность данного метода составила 8,3 %.

## 4 СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

### 4.1 Назначение системы мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей

Эксплуатация подвижного состава происходит в тяжелых условиях, в том числе из-за постоянного повышения весовых норм перевозок. Другим фактором, усложняющим работу электровозов, являются климатические условия эксплуатации. В связи с чем работа тягового асинхронного электродвигателя электровоза сопровождается постоянным изменением входных параметров: тока статора, частоты вращения. Тяговый электропривод должен выдерживать эти изменения без нарушений эксплуатационных показателей. Система мониторинга позволяет получать информацию о текущем тепловом состоянии электродвигателя, которая формируется косвенным путем, на основании входных данных электродвигателя:

- $I_c$  – ток статора;
- $n$  – частота вращения двигателя;
- $f$  – частота питающей сети;
- $U$  – напряжение питающей сети;
- $v_{ex}$  – температура входного воздуха;
- $Q$  – расход охлаждающего воздуха.

Данная система является комплексным устройством. Предназначенный мониторинг позволит по возможности эксплуатировать электроподвижной состав без тепловых перегрузок тягового оборудования электровоза на основании имеющейся информации теплового поля тяговых машин. С учетом того, что наиболее уязвимым узлом любой асинхронной электрической машины является ее изоляция, до 90 % повреждений ведущих к выходу из строя

асинхронных электродвигателей является пробой изоляции [33], температурный фактор в основном определяет ресурс АТЭД. Известно, что повышение температуры на  $8^{\circ}\text{C}$  изоляционного материала примерно в 2 раза снижает срок ее службы и соответственно срок службы электродвигателя [99, 100]. Таким образом, информация о тепловом поле тягового электродвигателя в случае эксплуатации ЭПС в тяжелых условиях, при тепловой перегрузке АТЭД, обеспечит возможность объективной оценки и прогнозирования ресурса изоляции обмотки статора и двигателя в целом. Кроме того, система позволит производить оптимальное управление вспомогательными машинами, осуществляющими охлаждение тяговых электродвигателей с целью оптимизации энергетических процессов в электровозах с асинхронным тяговым электроприводом.

#### 4.2 Принцип работы системы мониторинга асинхронных тяговых электродвигателей

Разрабатываемая система реализуется в вычислительном блоке, в который заложена представленные ранее тепловые математические модели расчета температур узлов электродвигателя, учитывающие входные параметры работы асинхронного тягового. Во время эксплуатации локомотива, сигналы с датчиков, установленных на тяговый электродвигатель, с определенным интервалом времени преобразуются в электронном блоке и поступают в вычислительный блок (персональный компьютер). На основании входных данных система по заложенной ТММ в вычислительном блоке производит расчет тепловых проводимостей, потерь в электродвигателе и как результат, расчет значений установившихся температур элементов конструкции АТЭД. После чего значение температуры сердечника статора сравнивается со значением, полученным с датчика температуры, установленного на электродвигателе. В случае несовпадения температур, происходит пересчет

значений температур остальных узлов двигателя по предложенным ранее методикам. В случае если температура сердечника статора, измеренная с помощью датчика, меньше рассчитанной, корректировка производится по второй методике с применением постоянных нагрева. Если значение температуры с датчика больше, чем рассчитанная температура опорного узла – по методике, используемой расчет коэффициентов корреляции. Таким образом, система позволяет по информационным значениям входных параметров определять общую картину температурного поля двигателя в реальном времени. Использование данной системы мониторинга дает возможность контроля температур узлов машины, недоступных для непосредственного измерения во время эксплуатации, например, таких узлов как ротор и его обмотка.

Для реализации системы мониторинга теплового состояния АТЭД, с целью сокращения входных данных, необходимо иметь информацию о частоте тока статора и скорости движения электровоза.

#### 4.2.1 Регулирование частоты вращения тягового электродвигателя

Наиболее распространенным способом плавного регулирования частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей является изменение частоты напряжения питания  $f_1$  [86]. При этом необходимо отметить, что магнитный поток в воздушном зазоре прямо пропорционален подводимому напряжению  $U_1$  и обратно пропорционален числу витков фазы статорной обмотки  $\omega_1$  и частоте питающей сети  $f_1$ , то есть

$$\Phi \cong \frac{U_1}{c \cdot \omega_1 \cdot f_1},$$

где  $c$  – постоянный коэффициент.

Для наилучшего использования двигателя изменение частоты должно сопровождаться изменением в той же степени амплитуды напряжения питания

$U_1$ . Согласно приведенной формуле регулирование частоты питающей сети  $f_1$  приведет к изменению магнитного потока машины. Уменьшение  $f_1$  вызовет увеличение потока, что может привести к насыщению магнитопровода, резкому возрастанию намагничивающего тока и перегреву как стали сердечника, так и обмоток статора. Увеличение же частоты питающего напряжения приводит к уменьшению потока  $\Phi$ , что при постоянном моменте вызовет рост тока в роторе и, соответственно, перегрев ротора при недоиспользовании стали.

Для недопущения данных ситуаций и сохранения магнитного потока неизменным, необходимо регулировать напряжение питания статора при изменении его частоты.

Закон оптимального регулирования амплитудой и частотой напряжения позволяет осуществить два необходимых для электрической тяги способа реализации:  $M=\text{const}$ ,  $P=\text{const}$  [15, 86, 101, 102].

Первый способ регулирования используется для разгона электроподвижного состава до номинальной скорости, при этом напряжение и мощность возрастают до своих номинальных значений пропорционально частоте тока статора.

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \sqrt{\frac{M}{M_H}}, \text{ откуда } f_1 = \frac{f_{1H}}{U_{1H}} U_1.$$

$$f_1 = \frac{f_{1H}}{U_{1H}} U_1 = \frac{49,4}{2240} U_1 = 0,022 \cdot U_1.$$

Режим  $P=\text{const}$  используется в диапазоне от номинальной до максимальной частот. Данный способ регулирования является более благоприятным для двигателя, так как позволяет до максимальной скорости сохранять мощность, равную номинальной при постоянной статической перегружаемости. Момент при этом обратно пропорционален частоте и квадрату напряжения.

Данный закон регулирования описывается уравнением:

$$\left( \frac{U_1}{U_{1H}} \right)^2 = \frac{f_1}{f_{1H}}, \text{ откуда } f_1 = \frac{f_{1H}}{U_{1H}^2} U_1^2.$$

$$\frac{U_1^2}{f_1} = \frac{U_{1H}^2}{f_{1H}} = const$$

$$f_1 = \frac{f_{1H}}{U_{1H}^2} U_1^2 = \frac{49,4}{2240^2} U_1^2 = 9,845 \cdot 10^{-6} \cdot U_1^2.$$

Таким образом, для корректной работы системы мониторинга теплового состояния АТЭД необходимо производить постоянное сравнение значений скорости движения электроподвижного состава с номинальным значением для данного состава и принимать решение об использовании того или иного способа регулирования частоты и, соответственно, способа ее определения.

#### 4.2.2 Расчет частоты вращения тягового двигателя для системы теплового мониторинга тяговых электродвигателей

Согласно классической методике проектирования асинхронных тяговых электродвигателей, представленной М.Д. Находкиным [21, 86], частоту вращения тягового двигателя, эксплуатируемого на электроподвижном составе, можно определить двумя способами:

- через передаточное отношение:

$$n = \frac{5,3 \cdot \mu \cdot v_{лок}}{D_б},$$

где  $\mu$  – передаточное число;

$v_{лок}$  – скорость движения локомотива (км/ч);

$D_б$  – диаметр бандажа средне изношенного ведущего колеса по кругу катания (м).

- через вращающий момент:

$$n = \frac{2725 \cdot v_{лок} \cdot F}{M},$$

где  $F$  – сила тяги (кН);

$M$  – момент на валу тягового электродвигателя (Нм).

Частота вращения электродвигателя по каждому из способов для условий скорости движения локомотива  $v_{лок} = 42,9$  км/ч, силе тяги  $F = 78$  кН и моменте на валу электродвигателя  $M = 7748$  Н·м равна:

$$n = \frac{5.3 \cdot \mu \cdot v_{лок}}{D_{\sigma}} = \frac{5.3 \cdot 6.294 \cdot 42.9}{1.210} = 1182.70 \text{ об/мин};$$

при условии, что передаточное отношение составляет 6.294.

$$n = \frac{2725 \cdot v_{лок} \cdot F}{M} = \frac{2725 \cdot 42.9 \cdot 78}{7748} = 1176.78 \text{ об/мин.}$$

Расхождение частоты вращения электродвигателя по двум методам не превышает 2 %. Таким образом, имеется возможность в системе теплового мониторинга АТЭД применения обоих способов определения частоты вращения тягового электродвигателя в зависимости от имеющихся известных входных параметров.

#### 4.2.3 Алгоритм работы системы мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей переменного тока

Разработанная система имеет следующий алгоритм, представленный на рисунке 4.1.

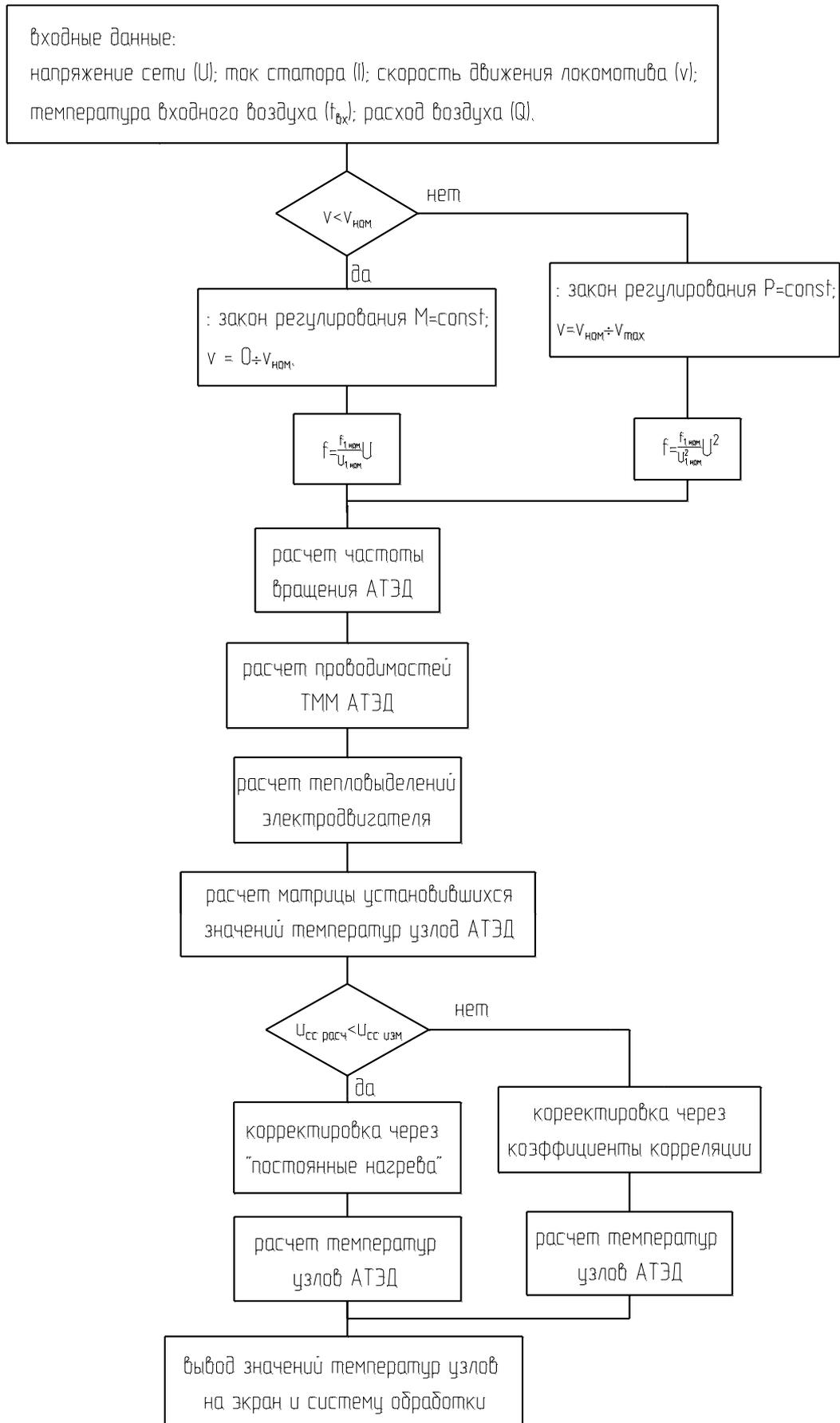


Рис. 4.1. Алгоритм работы системы мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей переменного тока

Согласно представленному алгоритму, система мониторинга имеет следующий принцип работы:

Начальным этапом является считывание входных данных в систему: ток статора, напряжение питающей сети, температура окружающей среды, расход охлаждающего воздуха, скорость движения электровоза. На основании полученных данных происходит сравнение скорости движения локомотива с номинальным значением скорости для определения закона регулирования частотой и ее определение. Следующим этапом является определение частоты вращения АТЭД по величине скорости локомотива. Затем производится расчет параметров тепловой математической модели: расчет проводимостей схемы замещения и расчет потерь. Результатом промежуточного расчета является определение установившегося температурного поля машины при данных входных параметрах.

Для приведения результатов температур узлов электродвигателя к реальному значению, производится сравнение температуры с датчика, расположенного в сердечнике статора, и температуры данного элемента конструкции, рассчитанной по средствам ТММ. Данное сравнение позволяет произвести перерасчет значений температур узлов всего электродвигателя к реальным значениям температур. С учетом сравнения выбирается тот или иной метод приведения температур.

Реализация работы данной системы возможна с совместным использованием следующих средств:

- физических – датчик напряжения, датчик тока статора, два датчика температуры, измеряющих температуру окружающей среды и «опорного узла» (температуру сердечника статора), датчик расхода охлаждающего воздуха, аналогово-цифровой преобразователь, персональный компьютер;
- виртуальных – программное обеспечение Matlab, установленное на компьютере.

### 4.3 Апробация работы системы мониторинга теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей

Апробация системы мониторинга теплового состояния АТЭД проводилась на электровозе 2ЭС10 «Гранит» № 062. Электровозы данной марки оснащены асинхронным тяговым электроприводом марки Siemens (рис. 4.2). Конструктивное исполнение, условия эксплуатации, номинальные параметры, применяемых асинхронных электродвигателей в данном электровозе, имеют аналогию по габаритам, характеристикам применяемых материалов и т. д. с электродвигателем серии НТА-1200, для которого была разработана система мониторинга. Приведение параметров математической модели для исследуемого двигателя НТА-1200 к двигателю, установленному на электровозе, позволило экспериментально исследовать адекватность разработанной системы мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей переменного тока.

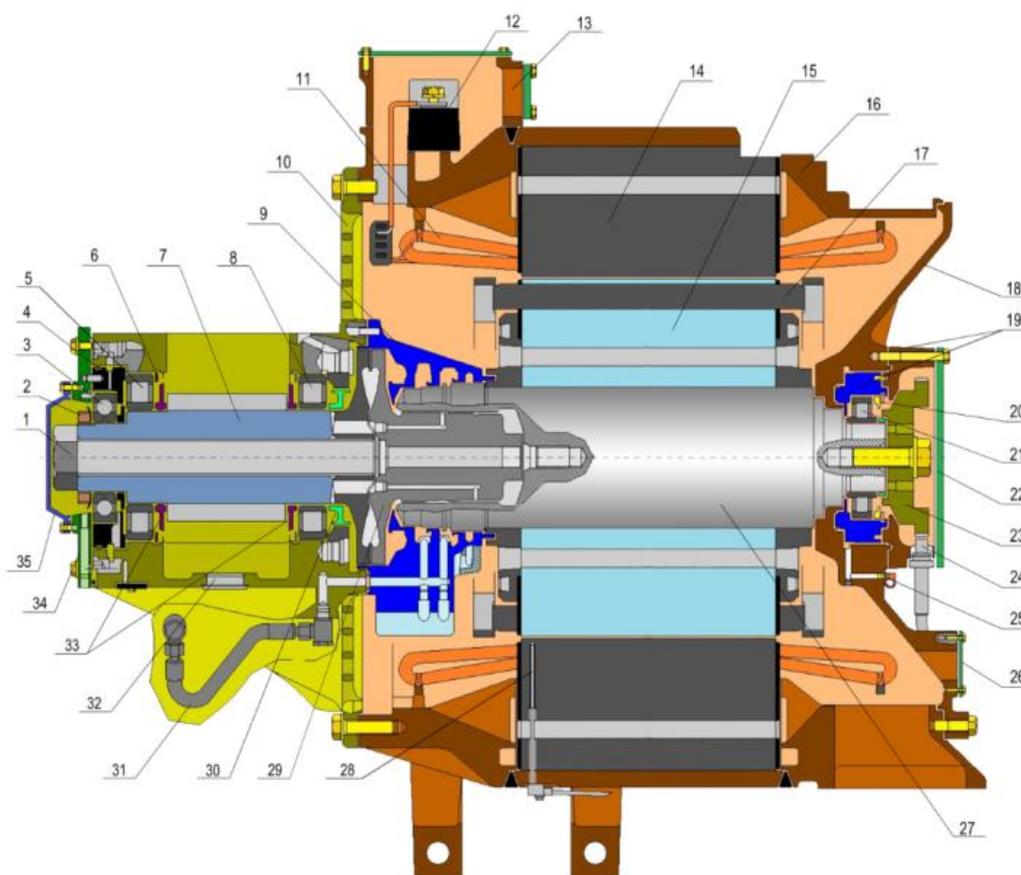


Рис. 4.2. Тяговый электропривод электровоза 2ЭС10

Эксплуатируемые электровозы «Гранит» оснащены системой определения температур узлов двигателя. Данная система позволяет отслеживать данные температурного состояния трех узлов каждого электродвигателя, установленного на секции электровоза: пазовая часть обмотки статора, сердечник статора и ротор. Значения температур указанных узлов выводятся на рабочий экран машинисту электровоза.

Информация о параметрах работы электровоза предоставляется машинисту на дисплее рабочего места, позволяющая производить их контроль. Интерфейс включает информацию о напряжении контактной сети, токе статора каждого электродвигателя, создаваемом моменте каждой секции электровоза, а также скорости движения состава. Вывод информации возможен как в табличном, так и в графическом режиме. Примеры интерфейса рабочего места машиниста электровоза 2ЭС10 «Гранит» представлены в Приложении 8. Информация о температурном состоянии тяговых электродвигателей предоставляется в табличном виде.

Необходимо отметить, что реализованная в данном электровозе система определения температур узлов АТЭД имеет ряд недостатков.

Применяемый АТЭД на электровоз 2ЭС10 «Гранит» так же как и двигатели типа НТА-1200 оборудованы датчиком температуры (позиция № 28), который производит измерение температуры пазовой части обмотки статора. Таким образом, температура данного узла передается непосредственно с датчика и является достоверной. Определение температур узлов сердечника статора и ротора производится по определенным зависимостям (пропорциональное соотношение между данными температур обмотки статора и сердечника статора и ротора), заложенным в систему. Система не отслеживает температуры таких узлов как лобовые части обмотки статора, а также рассматривает ротор как единый узел, без выделения обмотки и сердечника ротора как самостоятельных элементов конструкции АТЭД. Таким образом, данная система не позволит оценивать тепловое состояние электродвигателя в полном объеме.

#### 4.3.1 Апробация работы тепловой математической модели в установившемся режиме работы

Экспериментальные исследования работы тепловой математической модели были проведены при эксплуатации электровоза № 062 «Гранит». На рисунке 4.3 представлены экспериментальные данные кривых движения на руководящем подъеме перегона Бочаты – Артышта I (259 км пк6 по 284 км пк1) поезда № 2522 общей массой 6205 тонн с локомотивом 2ЭС10 № 062, секция «А» и асинхронного тягового электродвигателя № 083 72179 на участке Белово – Междуреченск в поездке № 3 от 22.08.2013 года. На рисунке представлены графики изменения температур указанных узлов электродвигателя, а также скорость движения и создаваемое данным асинхронным тяговым электродвигателем тяговое усилие.

Согласно представленным графикам на километраже с 27701 км по 282104 км, работа тягового электродвигателя проходила в установившемся тепловом режиме работы, при этом входные параметры АТЭД составили:

- ток статора  $I_f=796$  А;
- напряжение контактной цепи  $U=2800$  В;
- скорость движения электропоезда  $v_l=55.1$  км/ч;
- температура окружающего воздуха  $v_l=15$  °С;
- расход вентилируемого воздуха  $Q=90$  м<sup>3</sup>;
- тяговое усилие, создаваемое электродвигателем  $F=67.6$  кН;
- момент на валу двигателя  $M=6992$  Н·м.

Значения температур в данном режиме составили:

- обмотка статора  $v_{oc}=145$  °С;
- сердечник статора  $v_{cc}=110$  °С;
- обмотки ротора  $v_p=87$  °С.

Расчет установившихся температур узлов электродвигателя при этих же входных параметрах по разработанной тепловой математической модели для установившегося режима показал результаты, представленные в таблице 4.1.

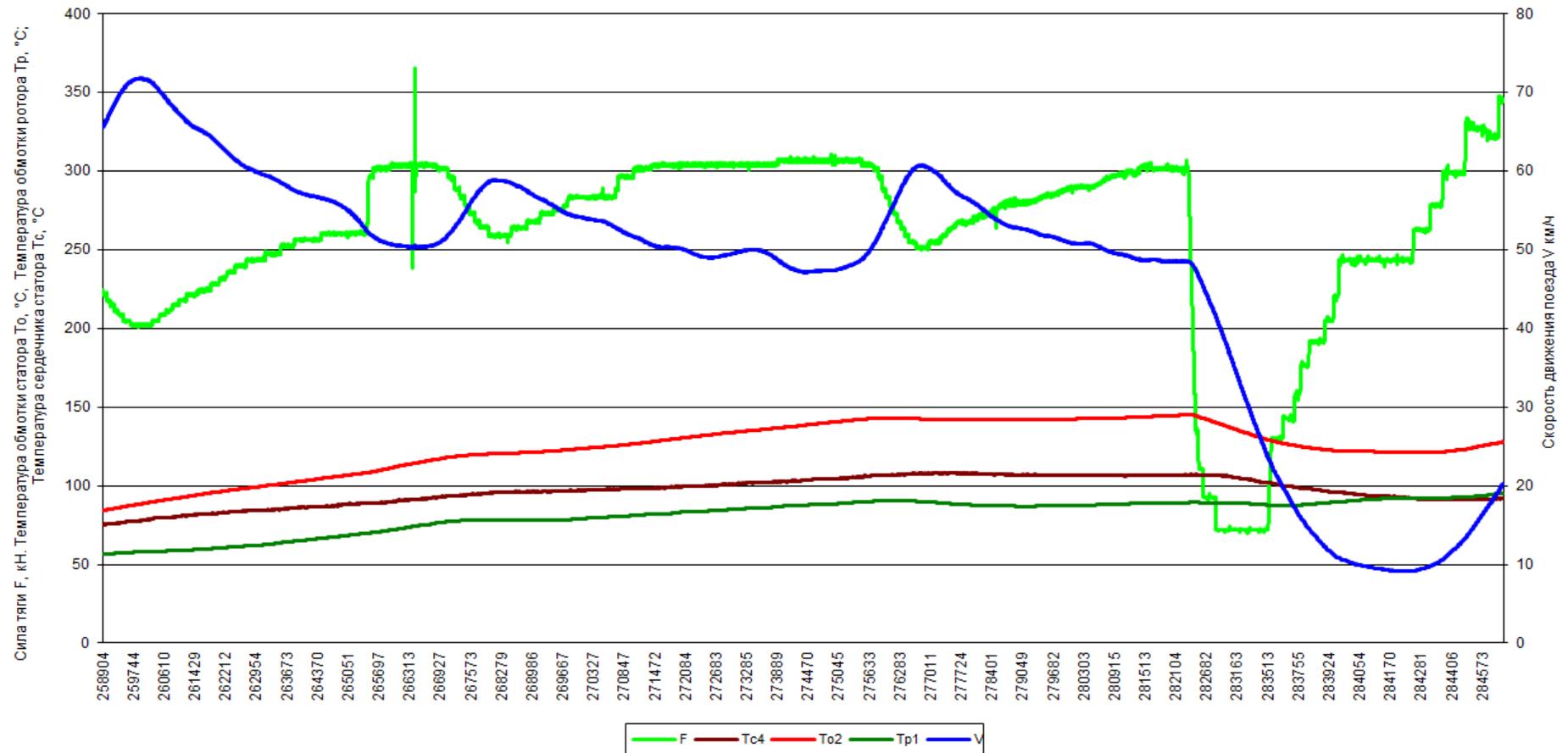


Рис. 4.3. Кривые движения поезда №2522 с локомотивом 2ЭС10 №062 секции «А» с двигателем № 083 72179 на руководящем подъёме перегона Бочаты-Артышта I (259 км пкб по 284 км пк1)

Таблица 4.1. Результаты математического моделирования установившегося температурного поля электродвигателя

Наименование узла электродвигателя	Температура узлов электродвигателя, °С
Лобовая часть ОС со стороны подачи воздуха ( $\nu_{c1}$ )	153.7
Пазовая часть обмотки статора ( $\nu_{cp}$ )	140.9
Лобовая часть ОС со стороны противоположной подачи воздуха ( $\nu_{c2}$ )	162.1
Сердечник статора ( $\nu_{cc}$ )	109.1
Лобовая часть ОР со стороны подачи воздуха ( $\nu_{p1}$ )	101.1
Пазовая часть ОР ( $\nu_{pp}$ )	83.6
Лобовая часть ОР со стороны противоположной подачи воздуха ( $\nu_{p2}$ )	110.0
Сердечник ротора ( $\nu_{cp}$ )	79.2
КЗ кольцо со стороны подачи воздуха ( $\nu_{k1}$ )	101.0
КЗ кольцо со стороны противоположной подачи воздуха ( $\nu_{k2}$ )	109.9
Подогрев воздуха в области 1 ( $\nu_1$ )	31.8
Подогрев воздуха в области 2 ( $\nu_2$ )	39.9
Подогрев воздуха в области 3, выходная температура воздуха ( $\nu_3$ )	48.8
Подогрев воздуха в области 4 ( $\nu_4$ )	30.4
Подогрев воздуха в области 5 ( $\nu_5$ )	34.2
Подогрев воздуха в области 6 ( $\nu_6$ )	40.8
Подогрев воздуха в области 7 ( $\nu_7$ )	47.4
Подогрев воздуха в области 8 ( $\nu_8$ )	49.3
Подогрев воздуха в области 9 ( $\nu_9$ )	32.1

Продолжение табл. 4.1

Подогрев воздуха в области 10 ( $\nu_{10}$ )	33.8
Подогрев воздуха в области 11 ( $\nu_{11}$ )	39.4
Подогрев воздуха в области 12 ( $\nu_{12}$ )	45.0
Подогрев воздуха в области 13 ( $\nu_{13}$ )	46.6

Погрешности между значениями температур, полученными расчетным путем и экспериментальными значениями, составили для:

- обмотки статора – 3 %;
- сердечника статора – 1 %;
- обмотки ротора – 5 %.

На рисунке 4.4 представлены кривые движения на другом руководящем подъеме перегона Углерод – Тырган (с 20 кмкп1 – 9км пк6) поезда № 2343 общей массой 6570 тонн с локомотивом 2ЭС10 № 062, секция «А», АТЭД № 083 72179 на участке Междуреченск – Белово в поездке № 14 от 01.09.2013 года. Движение ЭПС на участке пути, лежащем на промежутке от 19839 км до 14094 км, проходило при небольшом варьировании входных параметров, и его можно также считать в установившемся тепловом состоянии тягового электродвигателя.

В таблице 4.2 представлена выборка экспериментальных и расчетных значений температур обмотки статора, сердечника статора и обмотки ротора по километражу. А также рассчитана погрешность между полученными данными.

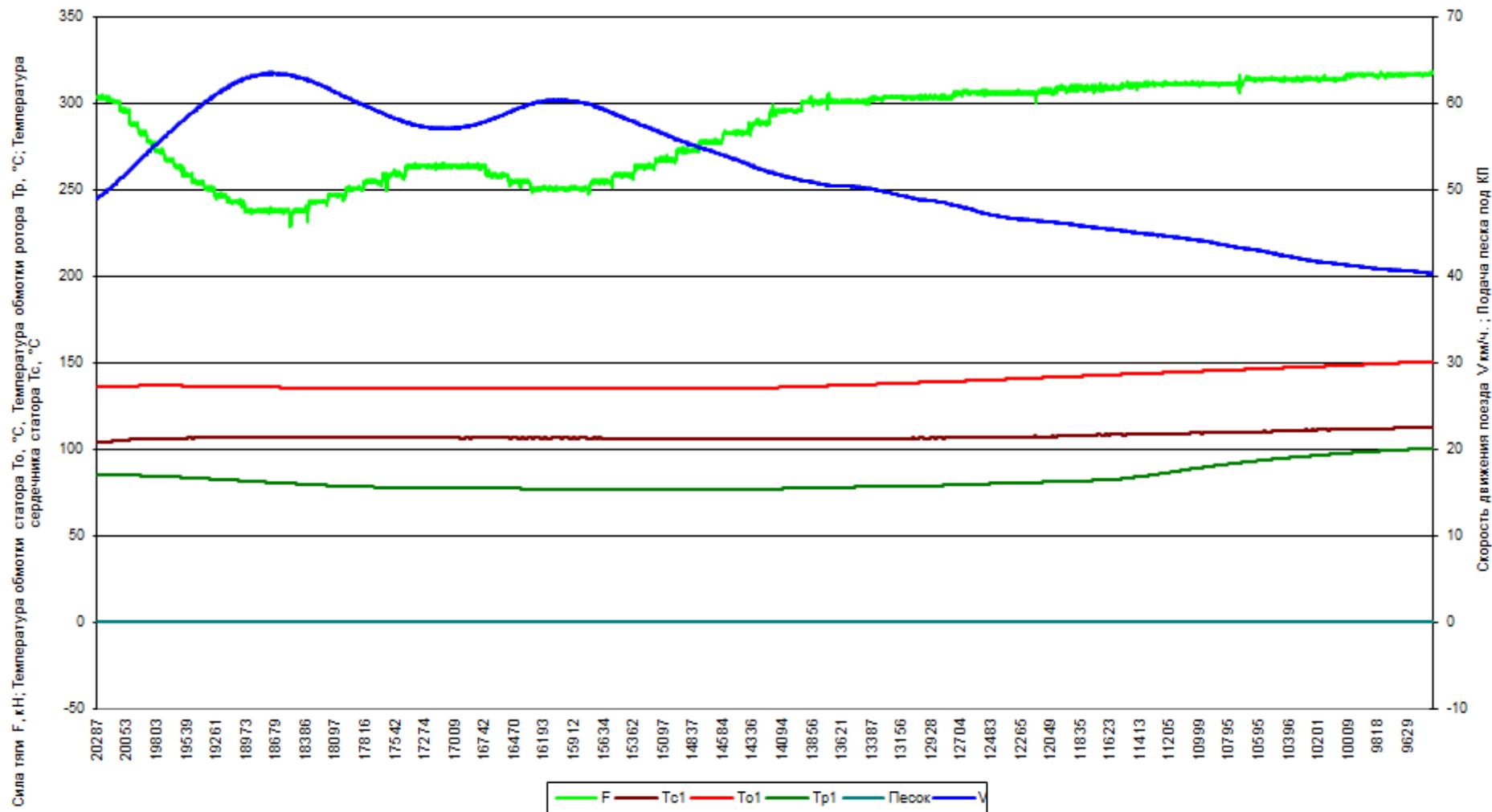


Рис. 4.4. Кривые движения поезда № 2343 с локомотивом 2ЭС10 №062 секции «А» с АТЭД № 083 72179 на руководящем подъёме перегона Углерод-Тырган (с 20 км пк1 – 9 км пк6)

Таблица 4.2. Результаты экспериментальных и расчетных значений температур по километражу

Километраж, (км)	17542	16742	15912	14094	13156
Ток статора, $I_f$ (А)	752	760	760	776	752
Напряжение контактной цепи, $U$ (В)	3040	3040	3040	3000	3040
Скорость движения электропоезда, $v_l$ (км/ч)	56.9	56.4	58.8	50.3	47.9
Температура окружающего воздуха, $v_l$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	11	11	11	11	11
Расход вентилируемого воздуха, $q$ (м <sup>3</sup> )	90	90	90	90	90
Тяговое усилие, создаваемое электродвигателем, $F$ (кН)	65.5	66.0	63.1	73.8	76.2
Момент на валу двигателя, $M$ (Н·м)	6500	6536	6264	7328	7524
Температура обмотки статора (эксперимент/расчет/величина погрешности), $v_{OC}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	135.6/ /132.9/ /2.0 %	135.4/ /134.7/ /0.5 %	133.8/ /133.7/ /0.1 %	136.0/ /140.5/ /3.2 %	138.4/ /137.2/ /0.8 %
Температура сердечника статора (эксперимент/расчет/величина погрешности), $v_{CC}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	106.9/ /105.3/ /1.5 %	106.9/ /106.5/ /0.4 %	106.9/ /106.4/ /0.5 %	105.8/ /107.6/ /1.7 %	106.3/ /109.5/ /3.0 %
Температура обмотки ротора (эксперимент/расчет/величина погрешности), $v_P$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	77.9/ /78.7/ /1.0%	77.5/ /78.1/ /0.8 %	77.2/ /78.0/ /1.0 %	77.3/ /78.7/ /1.8 %	78.8/ /80.2/ /1.7 %

Погрешность между расчетами установившихся значений температур узлов электродвигателя и экспериментальными значениями не превышает 5 %. Наибольшая погрешность получена для ротора.

Полученные результаты подтверждают адекватность составленной тепловой схемы замещения тягового асинхронного электродвигателя. Это позволяет сделать вывод о том, что тепловыделения узлов и параметры тепловых связей элементов конструкции электродвигателя определены верно.

#### 4.3.2 Апробация тепловой математической модели для неустановившихся режимов работы АТЭД

Кривые движения на руководящем подъеме перегона Бочаты-Артышта I-Трудармейская (259 км пк6 по 293 км пк2) поезда № 2642 общей массой 6367 тонн с локомотивом 2ЭС10 №062, секция «А» и асинхронного тягового электродвигателя № 083 72179 на участке Белово – Междуреченск в поездке № 15 от 01.09.2013 года представлены на рисунке 4.4.

На рисунке 4.5 представлены результаты расчета кривой нагрева по ТММ и представленные ранее экспериментальные кривые нагрева сердечника статора и обмотки ротора.

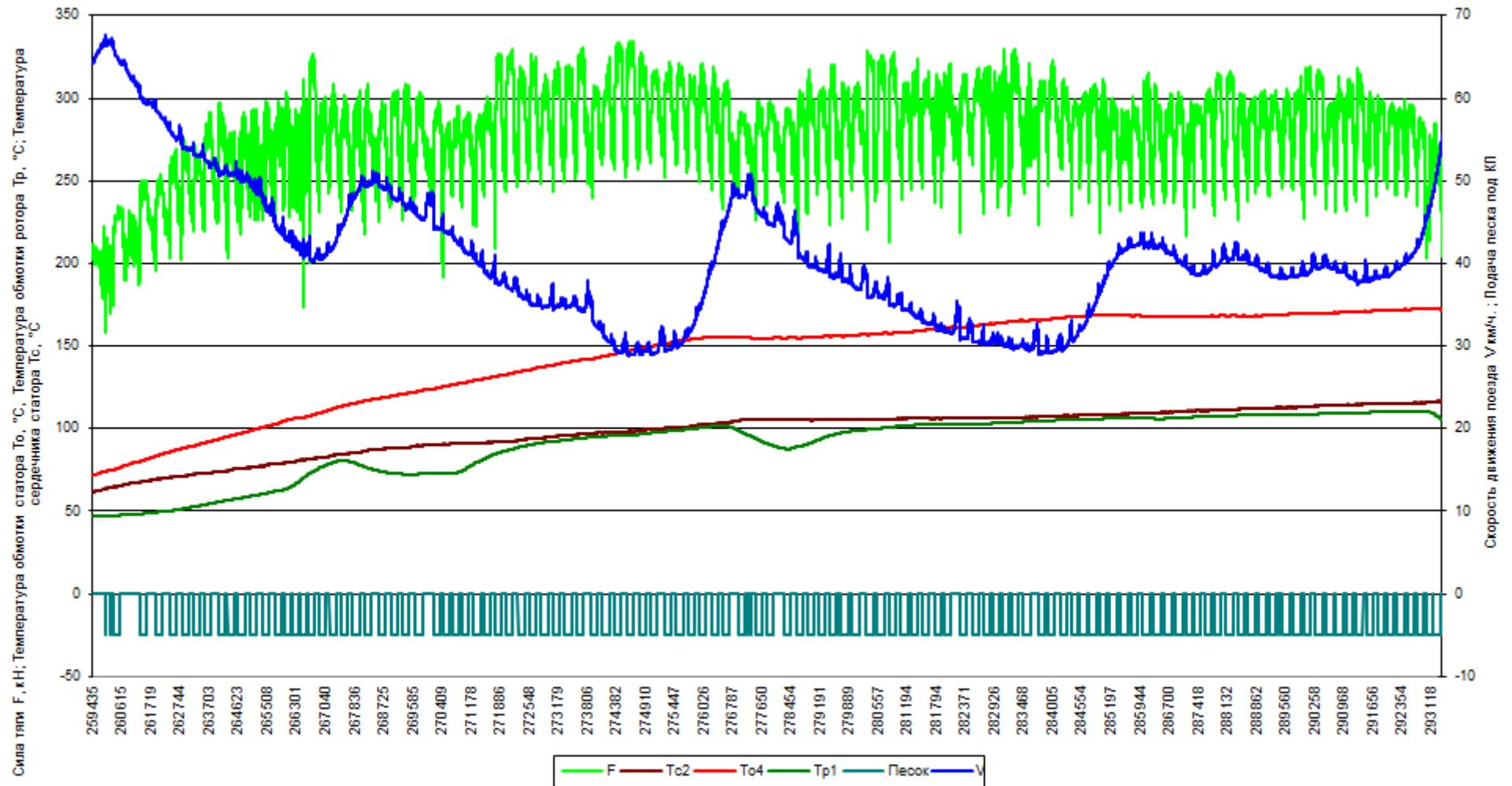


Рис. 4.4. Кривые движения поезда №2642 с локомотивом 2ЭС10 №062, секция «А» с электродвигателем № 083 72179 на руководящем подъёме перегона Бочаты-АртыштаI-Трудармейская (259 км ПКБ по 293 км ПК2)

Анализ данных характеристик показывает, что расхождения полученных расчетных и экспериментальных данных составляет не более 10 %.

Это позволяет сделать вывод о пригодности и возможности использования разработанных методик расчета температур узлов электродвигателя, эксплуатируемого в неуставившихся тепловых режимах.

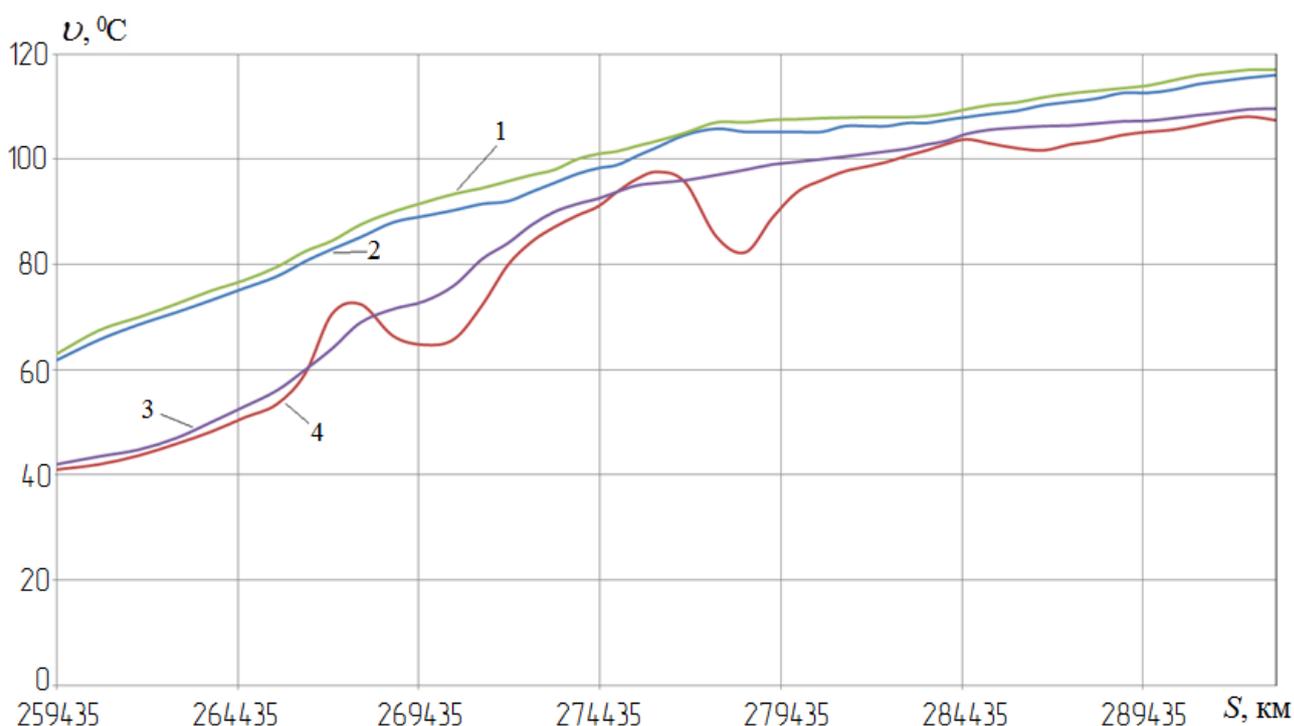


Рис. 4.5. Экспериментальные и расчетные кривые нагрева АТЭД при движении на руководящем подъеме перегона Бочаты-Артышта I-Трудармейская (1 – расчетная кривая нагрева сердечника статора, 2 – экспериментальная кривая нагрева сердечника статора, 3 – расчетная кривая нагрева обмотки ротора, 4 – экспериментальная кривая нагрева обмотки ротора)

Разработанная тепловая модель дает возможность с достаточной точностью определять температуры разных узлов АТЭД в реальном времени, реализовать на практике определения температур узлов, недоступных для непосредственного измерения в период эксплуатации.

#### 4.4 Анализ полученных результатов испытаний

1. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили результаты, полученные с помощью математических моделей теплового состояния асинхронного тягового двигателя.

2. Величина погрешности расчетов температур узлов электродвигателя по ТММ в установившемся режиме и режимах, близких к установившимся, не превышает 5 %. Наибольшая величина погрешности получена для ротора.

3. Погрешность расчетов температур узлов АТЭД в неустановившемся режиме не превышает 10 %.

4. Разработанная тепловая математическая модель может быть применена для асинхронных двигателей, имеющих подобную конструкцию. Адекватная работа модели может быть реализована при введении соответствующих параметров, геометрических размеров и свойствах используемых изоляционных материалов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами теоретической и практической работы по созданию система мониторинга теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей электровозов состоят в следующем:

1. Разработанная система теплового мониторинга тяговых асинхронных двигателей позволяет осуществлять непрерывный контроль теплового состояния всех элементов конструкции АТЭД (на неподвижных и вращающихся частях) во время его эксплуатации на электровозе в режиме реального времени. Данная система мониторинга может быть использована для любых асинхронных двигателей при условии введения соответствующих параметров, геометрических размеров и свойств используемых изоляционных материалов.

2. Минимальным количеством входных параметров, необходимых для нормальной работы системы теплового мониторинга для всех режимов эксплуатации АТЭД, являются: напряжение сети, фазный ток статора АТЭД, скорость движения локомотива, расход охлаждающего воздуха, температура входного воздуха и температура выбранного опорного узла. Для реализации работы системы мониторинга АТЭД на электровозе необходима только установка датчика расхода охлаждающего воздуха и его температуры, а остальные входные параметры можно получить с установленной штатной аппаратуры.

3. Математическая модель теплового состояния асинхронного тягового электродвигателя, разработанная на основе метода тепловых схем замещения, имеет большую детализацию элементов конструкции статора и ротора, связанными с условиями охлаждения, учитывает подогрев охлаждающего воздуха, проходящего через электродвигатель, что позволяет с большей точностью рассчитывать установившееся тепловое поле АТЭД. При этом необходимыми входными данными являются: фазный ток статора, напряжение

и частота питающей сети, температура входного воздуха, расход охлаждающего воздуха.

4. В разработанной модели теплового состояния тягового электродвигателя в неустановившихся режимах следует:

- при температуре опорного узла меньше установившейся использовать методику определения температур узлов АТЭД, базирующуюся на расчете постоянных нагрева;
- при температуре опорного узла выше установившейся использовать методику, основанную на определении корреляционной зависимости между температурами узлов.

При этом величины погрешностей определения температур узлов АТЭД не превышают 10 %.

5. Моделирование установившихся температурных полей во всех режимах работы электродвигателя показало необходимость контроля температур лобовых частей обмоток как имеющих наивысшую температуру нагрева. Поэтому температуру данного узла следует использовать как выходной параметр для корректировки загрузки тяговых электродвигателей электровоза. Данное обстоятельство было также подтверждено моделированием режимов работы в среде ELCUT.

6. Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что использование тепловых математических моделей дает достоверную информацию о величинах температур узлов электродвигателя. При этом погрешности расчетов в установившемся режиме и режимах, близких к установившемуся, не превышает 5 %. Наибольшая погрешность расчетов температур узлов АТЭД в неустановившихся режимах составляет 8,3 %.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АТЭД – асинхронный тяговый электродвигатель
- ДФЭ – дробный факторный эксперимент
- КЗ – короткозамкнутый
- МГЭ – метод граничных элементов
- МКР – метод конечных разностей
- МКЭ – метод конечных элементов
- МТП – метод тепловых параметров
- ОЦКП – ортогональный центрально-композиционный план
- ОР – обмотка ротора
- ОС – обмотка статора
- ППП – полупроводниковый прибор
- ПФЭ – полный факторный эксперимент
- РЖД – Российские железные дороги
- РЦКП – ротатабельный центрально-композиционный план
- ТММ – тепловая математическая модель
- ТО – техническое обслуживание
- ТП – тепловая проводимость
- ТР – технический ремонт
- ТЭД – тяговый электродвигатель
- ЦКП – центрально-композиционный план
- ЭВМ – электронно-вычислительная машина
- ЭПС – электроподвижной состав
- ЭТС – эквивалентная тепловая схема

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года». Утверждена Правительством Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.
2. Федоров, В. В. Перспективные направления развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://www.old.wciom.ru/fileadmin/news/2013/fedorov\\_rzhd\\_2013.pdf](http://www.old.wciom.ru/fileadmin/news/2013/fedorov_rzhd_2013.pdf), <http://xn----ctb4bme9c.xn--p1ai/upload/iblock/2ba/2ba14627e7261bc6f5d1a1422aee1b90.pdf>. (дата обращения 10.05.2014 г.).
3. Бахвалов, Ю. А. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Бахвалов, А. А. Зарифьян, В. Н. Кашников и др. под ред. Е. М. Плохова. – М. : Транспорт, 2001. – 286 с.
4. Стратегические направления научно; технического развития ОАО «РЖД» на период до 2015 г. («Белая книга» ОАО «РЖД», утверждены ОАО «РЖД» 31.08.2007 № 964).
5. Гапанович, В. А. «Соотношение в планах закупки техники в пользу машин нового поколения довольно быстро меняется» // Транспорт №03/2013, [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.indpg.ru/transport/2013/03/> (дата обращения 05.10.2014 г.).
6. Исмаилов, Ш. К. Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава : Монография / Ш. К. Исмаилов. – Омский государственный университет путей сообщения. Омск, 2007. – 391 с.
7. Грищенко, А. В. Новые электрические машины локомотивов : учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Козаченко. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 271 с.
8. Давыдов, Ю. А. Тяговые электрические машины : учебное пособие / Ю. А. Давыдов. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 116 с. : ил..

9. Давыдов, Ю. А. Тяговые электрические машины : учебное пособие / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – 126 с. : ил..
10. Бочаров, В. И. Тяговые электродвигатели электровозов / В. И. Бочаров, В. И. Захаров, Л. Ф. Комаровский, В. Г. Наймушин, В. И. Седов, И. И. Талья, В. Г. Щербаков, В. П. Янов; под ред. В. Г. Щербакова. – Новочеркасск : Агентство Наутилус, 1998. – 672 с. : ил..
11. Ротанов, Н. А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков, В. В. Литовченко; под ред. Н. А. Ротанова. – М. : Транспорт, 1991. – 336 с.
12. Карякин, А. В. «Обеспечить надежность парка локомотивов» [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://scbist.com/zhurnal-lokomotiv/30983-08-2007-obespechit-nadezhnost-parka-lokomotivov.html> (дата обращения 05.10.2014 г.).
13. Ильин, Ю. «Локомотивный парк полуюрского периода» // «Отечественные записки» №3(54)/2013, [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.strana-oz.ru/2013/3/lokomotivnyy-park-poluyurskogo-perioda> (дата обращения 05.10.2014 г.).
14. Наймушин, В. Г. Результаты эксплуатации первых российских пассажирских электровозов ЭП1 и задачи по созданию перспективных электровозов / В. Г. Наймушин, Ю. А. Орлов, И. К. Юренко // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения, 2006. – № 1. – с. 55-63.
15. Кабалык, Ю. С. Системы управления электроподвижным составом : учебное пособие / Ю. С. Кабалык. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. – 119 с. : ил..
16. Сопов, В. И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе : [учебник для вузов по направлению подготовки 140400 – «Энергетика и электротехника» модуль «Электротехника»] / В.И. Сопов, Н.И. Щуров. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013 – 727 с.

17. «Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года». Распоряжение ОАО «РЖД» от 15 декабря 2011г. № 2718-р.

18. Захаров, В. И. Пути повышения технических показателей тяговых электродвигателей. / В. И. Захаров, Н. В. Князев. – Электровозостроение : Сб. науч. тр. ОАО «Всерос. н.-и. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения» (ОАО «ВЭЛНИИ»), 1998. – т. 40. – 348 с., с. 57-72.

19. Грищенко, А. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава : учебник для студентов учреждений спер.проф. образования / А. В. Грищенко, В. В. Стрекопытов. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 320 с.

20. Николаев, А. Ю. Устройство и работа электровоза ВЛ80с : учебное пособие для учащихся образовательных учреждений железнодорожного транспорта, осуществляющих профессиональную подготовку / А. Ю. Николаев, Н. В. Сесявин ; под ред. А. Ю. Николаева. – М. : Маршрут, 2006. – 512 с.

21. Флора, В. Д. Тяговые электрические двигатели / В. Д. Флора ; под ред. доцента к.т.н. Ю. С. Коробкова. / – Запорожье – Информационная система iElectro, 2011. – 318 с.

22. Литвинов, А. В. Состояние и перспективы развития подвижного состава с асинхронным тяговым приводом в России. / А. В. Литвинов // Актуальные вопросы транспортной отрасли: проблемы и решения: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Воронеж, 22 ноября 2013 г.). – Воронеж : Руна, 2013. – №1. – с. 30-37.

23. Коноваленко, Д. В. Опыт отечественного и зарубежного электровозостроения с бесколлекторным тяговым приводом / Д. В. Коноваленко, А. Г. Полуянов // Проблемы транспорта Восточной Сибири : сборник трудов Третьей всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых электромеханического факультета 18–19 апреля 2012 г. – Иркутск : ИрГУПС, 2013. – Часть 1. – с. 87-91.

24. Куш, А. В. Комплекс микропроцессорных защит для систем возбуждения турбо- и гидрогенераторов / А.В. Куш, Б.Ф. Симонов, А.И. Кадышев // Электрические станции. 2011. – № 9. – с. 36-42.

25. Девликамов, Р. М. Повышение эксплуатационной надежности коллекторно-щеточного узла тяговых двигателей электроподвижного состава железных дорог. : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.07 : защищена 18.05.2007 / Девликамов Рашит Музаферович. – Ростов-на-Дону, 2007. – 151 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/3632.

26. Белан, Д. Ю. Анализ отказов тяговых двигателей по причине попадания смазки в остов / Д. Ю. Белан // Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта : сборник науч. статей молодых ученых и аспирантов университета. – Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2009. – вып. №10. – с. 48-52.

27. Щербатов, В. В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса. / В. В. Щербатов, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин // Известия Томского политехнического университета. – Томск. 2005. – т. 308. № 7. – с. 156-159.

28. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава // под редакцией Е.М. Зубкович. – М. : Транспорт, 1992.

29. Харламов, В. В. Оценка технического состояния изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, И. В. Шестаков // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов Материалы второй Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Омский государственный университет путей сообщения. Омск, 2014. – с. 211-221.

30. Харламов, В. В. Перспективные разработки в области испытаний асинхронных тяговых двигателей подвижного состава железных дорог / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем : Материалы международной научно-практической конференции. Министерство транспорта Российской

Федерации, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, ОАО «Российские железные дороги», Международная ассоциация транспортных университетов стран Азиатско-Тихоокеанского региона (МАТУ АТР, Омский государственный университет путей сообщения. Омск, – 2014. – с. 255-262.

31. ГОСТ Р 27.002 – 2009. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. 2009-12-09. – М. : Стандартиформ, 2010. – 32 с.

32. Попов, А. А. Результаты экспериментального и расчетного определения температур обмоток тягового электродвигателя электровоза / А. А. Попов, Е. Ю. Логинова. – Вестник ВНИИЖТ, 1999. – №6. – с. 34-39.

33. Копылов, И. П. Справочник по электрическим машинам : в 2 томах / под ред. Б. К. Клокова, И. П. Копылова. – М. : Энергоатомиздат, 1988 – т. 1. – 1988. – 456 с.

34. Кузнецов, Н. Л. Надежность электрических машин : учебное пособие для вузов / Н. Л. Кузнецов. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.

35. Котеленец, Н. Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин : учебник для вузов. / Н. Ф. Котеленец, Н. А. Акимова, М. В. Антонов. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с.

36. Смирнов, В. П. Износ изоляции тяговых электрических машин. / В. П. Смирнов, В. В. Лексаков, Д. В. Шарапов, Е. Г. Кармаданов // Наука и техника транспорта, 2012. – № 4. – с. 62-64.

37. Покровский, С. В. Система управления и диагностики электровоза ЭП10. / под ред. С. В. Покровского. – М. : Интекст, 2009. – 356 с.

38. Бочаров, Г. В. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В. И. Бочаров, Г. В. Василенко, А. Л. Курочка и др. ; под ред. В. И. Бочарова, В. П. Янова. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – с. 464. : ил.

39. Сипайлов, Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах : учебное пособие. / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М. : Высшая школа, 1989. – 239 с.

40. Борисенко, А. И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. / А. И. Борисенко, В. Г. Данько, А. И. Яковлев. – М. : Энергия, 1974. – 560 с.
41. Борисенко, А. И. Охлаждение промышленных электрических машин. / А. И. Борисенко, О. Н. Костиков, А. И. Яковлев – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
42. Логинова, Е. Ю. Влияние температуры обмоток тягового асинхронного двигателя на алгоритм управления им в передаче локомотива / Е. Ю. Логинова, В. В. Чащин // Транспорт, наука, техника, управление. – 2003. – №4.
43. Чащин, В. В. Прогнозирование эффективности работы асинхронного тягового привода на тепловозе / В. В. Чащин, Е. Ю. Логинова, В. А. Кофанов // Вестник ВНИИЖТа. – 2005. – №1.
44. Тихонов, Ф. В. Математическая модель асинхронного тягового электродвигателя ДАТ-470 как теплового объекта / Ф. В. Тихонов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2008. – №6.
45. Тихонов, Ф. В. Разработка методов выбора параметров асинхронного тягового двигателя с учетом теплового состояния обмоток: диссертация канд. тех. наук: 05.14.01 / Тихонов Филипп Владимирович. – М., 2008. – 136 с.
46. Тихонов, Ф. В. Исследование теплового состояния асинхронного тягового двигателя в эксплуатации / Ф. В. Тихонов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2007. – №12. с. 16–19.
47. Инструкция Министерства путей сообщения департаментов вагонного хозяйства и локомотивов ЦТВР №4099 «Испытание электрических машин подвижного состава на железнодорожном транспорте».
48. ГОСТ 25000 – 81. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. – Введ. 1987-07-01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – с. 32.
49. ГОСТ 25941 – 83. Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия. – Введ. 1984-01-01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – с. 30.

50. ГОСТ 11929 – 87. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. Определение уровня шума. – Введ. 1988-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1988. – с. 35.

51. Пат. 2274869 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ контроля электротехнического состояния электрических машин / Горелик А. В., Менщиков И. А., Монахов С. Б. ; заявитель и патентообладатель: Российский государственный открытый технический университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации (РГОТУПС) (RU). – № 2004119900/09 ; заявл. 01.07.2004 ; опубл. в БИ N 11, 20.04.2006.

52. Пат. 2484490 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Устройство диагностики асинхронных электрических двигателей / Хоменко А. П., Худоногов А. М., Каргапольцев С. К., Коноваленко Д. В. ; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС (ИрИИТ)) (RU). – № 2011140171/28 ; заявлен 03.10.2011 ; опубл. в БИ N 16, 10.06.2013.

53. Пат. 2386114 Российская Федерация, МПК G01K 13/08 G01R 27/02. Способ бесконтактного определения температуры обмотки короткозамкнутого ротора частотно-регулируемого асинхронного двигателя / Вольвич А. Г., Орлов Ю. А., Таргонский И. Л., Щербаков В. Г. ; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения» (ОАО «ВЭлНИИ») (RU). – № 2008135802/28 ; заявлен 03.09.2008 ; опубл. в БИ № 10, 10.04.2010.

54. Patent. US 3629676 A, UNITED STATES PATENT. Traction motor temperature control of locomotive power / Ephraim Max Jr, Smith Earl D. ; заявитель и патентообладатель : Gen Motors Corp. - № CA935905A1 ; заявл. 09.04.1970 ; опубл. 21.12.1971.

55. Patent. US 5528445 A, UNITED STATES PATENT. Automatic fault current protection for a locomotive propulsion system / Cooke Philip R. (Erie, PA),

Laukaitis Joseph A. (Erie, PA) ; заявитель и патентообладатель: General Electric Company ; заявл. 23.09.1994 ; опубл. 18.06.1996.

56. Patent. US20140062371 A1, UNITED STATES PATENT. Method and system for motor thermal protection/ Roy David Schultz, Jeffrey Daigle, Sudhir Gupta ; заявитель и патентообладатель: Roy David Schultz, Jeffrey Daigle, Sudhir Gupta ; заявл. 06.09.2012 ; опубл. 06.03.2014.

57. Пат. 2121209 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> H02K9/04. Устройство для автоматического регулирования температуры электрической машины / Космодамианский А. С., Луков Н. М. ; заявитель и патентообладатель: Российский государственный открытый технический университет путей сообщения. – № 97102016/09 ; заявлен 11.02.1997 ; опубл. в БИ 1998, № 30, 27.10.1998.

58. Пат. 2201028 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H02K9/04, H02H7/06. Исполнительно-регулирующее устройство для автоматических систем регулирования температуры обмоток тяговых электрических машин / Космодамианский А. С., Луков Н. М., Алейников И. А. ; заявитель и патентообладатель: Российский государственный открытый технический университет путей сообщения. – № 2000125692/09 ; заявлен 10.09.2002 ; опубл. в БИ 2003, № 8, 20.03.2002.

59. Авторское свидетельство 748683 (СССР), М. Кл<sup>2</sup> H02K9/04, H02K11/00. Устройство непрерывного контроля и автоматического регулирования температуры электрической машины / Герасимов А. Г., Луков Н. М. – № 2621358/27-07 ; заявлено – 01.06.1978 ; опубл. в БИ 1980, № 26, 15.07.1980.

60. Полезная модель 79840 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> H02H7/06 B60L11/02, Устройство для мониторинга теплового состояния тягового двигателя / Жадан В.А., Сидорук А. М., Хомченко Д. Н., Рапопорт О. Л. ; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет (RU). - № 2008129975/22 ; заявлен 21.07.2008 ; опубл. в БИ № 2, 20.01.2009.

61. Пат. 2478046 Российская Федерация, МПК В60L1/12. Устройство непрерывного температурного контроля и автоматического регулирования нагрузки силового электрооборудования электровоза / Коноваленко Д. В., Мельниченко О. В., Лукьянов Э. В. ; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС (ИрИИТ)) (RU). – № 2011132421/11 ; заявлен 01.08.2011 ; опубл. в БИ № 9, 27.03.2013.

62. Пат. 2256996 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H02K9/04. Автоматическая система регулирования температуры обмоток тяговых электрических машин с электрическим на переменном токе приводом вентилятора / Луков Н. М., Ромашкова О. Н., Космодамианский А. С., Алейников И. А., Попов Ю. В. ; заявитель и патентообладатель: Российский государственный открытый технический университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации (РГОТУПС) (RU) – № 2003132783/11 ; заявлен 11.11.2003 ; опубл. в БИ № 20, 20.07.2005.

63. Пат. 2456193 Российская Федерация, МПК В61L25/00, В60L11/02, В60L3/12, В60L9/00, G01K7/00. Устройство для мониторинга теплового состояния и уровня влажности тяговых электрических машин / Комков С. В. ; заявитель и патентообладатель: Закрытое акционерное общество «Созвездие-центр» (RU) – № 2011105324/11 ; заявлен 15.02.2011 ; опубл. в БИ № 20, 20.07.2012.

64. Филиппов, И. Ф. Теплообмен в электрических машинах: Учебное пособие для вузов / И. Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

65. Бухгольц, Ю. Г. Основы аэродинамических и тепловых расчетов в электромеханике: Учебное пособие для студентов по направлениям: мехатроника и автоматизация, энергетика и электротехника / Ю. Г. Бухгольц, В. А. Тюков, Т. В. Честюнина. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – 196 с.

66. Фисенко, В. Г. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов:

учебное пособие по курсу «Электромагнитные расчеты», по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»/ В. Г. Фисенко. – Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ). – М. : Изд-во МЭИ, 2002. – 44 с.

67. Вяльцев, Г. Б. Расчет характеристик электрической машины при помощи известных точек, определенных методом конечных элементов // Г. Б. Вяльцев, А. Ф. Шевченко // «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» ЭЭЭ-2009 материалы четвертой научно-технической конференции с международным участием. М-во образования и науки Российской Федерации, Новосибирский гос. технический ун-т, Фак. мехатроники и автоматизации г. Новосибирск, 2009. – с. 53-57.

68. Зинкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зинкевич– М. : Мир, 1975. – 115 с.

69. Демирчан, К. С. Машинные расчеты электромагнитных полей / К. С. Демирчан, В. Л. Чечурин. – М. : Высш. шк., 1986. – 240 с.

70. Шевченко, А. Ф. Сравнение возможностей аналитического и численного методов моделирования электрической машины /А. Ф. Шевченко, Г. Б. Вяльцев // Электротехника. 2011. – № 6. – с. 20а-24.

71. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.10. Руководство пользователя.— СПб.: ООО «ТОР», 2012.— 356 с.

72. Дубицкий, С. Д. Elcut 5.1 – Платформа разработки приложений анализа полей / С. Д. Дубицкий // ExponentaPro. – 2004. – № 1.

73. Дубицкий, С. Д. Elcut–инженерный инструмент МКЭ-моделирования / С. Д. Дубицкий, О. Я. Ильина [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://elcut.ru/publications/dubitsky8.pdf> (дата обращения 10.10.2014 г.).

74. ANSYSIcerak [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://cae-expert.ru/product/ansys-icerak> (дата обращения 10.10.2014 г.).

75. Филиппов, И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – Л.: Энергия, 1974. – 384 с.: ил..

76. ГОСТ 2582 – 2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – Введ. 2015-01-01. – М. :Стандартинформ, 2014. – с. 56.

77. Филиппов, И. Ф. Вопросы охлаждения электрических машин / И. Ф. Филиппов. – М. ; Л. : Энергия, 1964. – 334 с. : ил..

78. Брандина, О. В. Тепловые гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах : учебное пособие / Е. П. Брандина, О. В. Шелудько. – Л. : СЗПИ, 1991. – 92 с. : ил..

79. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1975. – 560 с.

80. Прандтль, Л. Гидроаэродинамика / Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.

81. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Часть 3. Описание и работа. Оборудование SIEMENS. 2ЭС10.00.000.000 РЭЗ. ООО «Уральские локомотивы».

82. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Часть 4. Описание и работа. Механическое оборудование и системы вентиляции. 2ЭС10.00.000.000 РЭЗ. ООО «Уральские локомотивы».

83. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2001. – 430 с.

84. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп.. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с. : ил..

85. Гольдберг, О. Д. Инженерное проектирование и САПР электрических машин : учебник / О. Д. Гольдберг, И. С. Свириденко. – М. : Академия, 2008. – 560 с. : ил..

86. Находкин, М. Д. Проектирование тяговых электрических машин : учебное пособие / под ред. М. Д. Находкина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1976. – 624 с. : ил..

87. Балагуров, В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока : учебное пособие / В. А. Балагуров. – М. : Высшая школа, 1982. – 272 с. : ил..

88. Щуров, Н. И. К определению мощности тягового двигателя троллейбуса с мотор-колесом / Н. И. Щуров, А. М. Головин, В. В. Бирюков // Транспорт: наука, техника, управление. 2009. – № 12. – с. 41-43.

89. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

90. Дорохина, Е. С. Применение метода конечных разностей для определения распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин / Е. С. Дорохина, О. Л. Рапопорт, А. А. Голдовская (Хорошко) // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013 – №. 6. – с. 29–30.

91. Константинова, Л. И. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / Л. И. Константинова; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во ТПУ, 2005. – 139 с. : ил..

92. Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для вузов / Н. Ш. Кремер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

93. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во Белорусского ГУ, 1982. – 302 с. : ил..

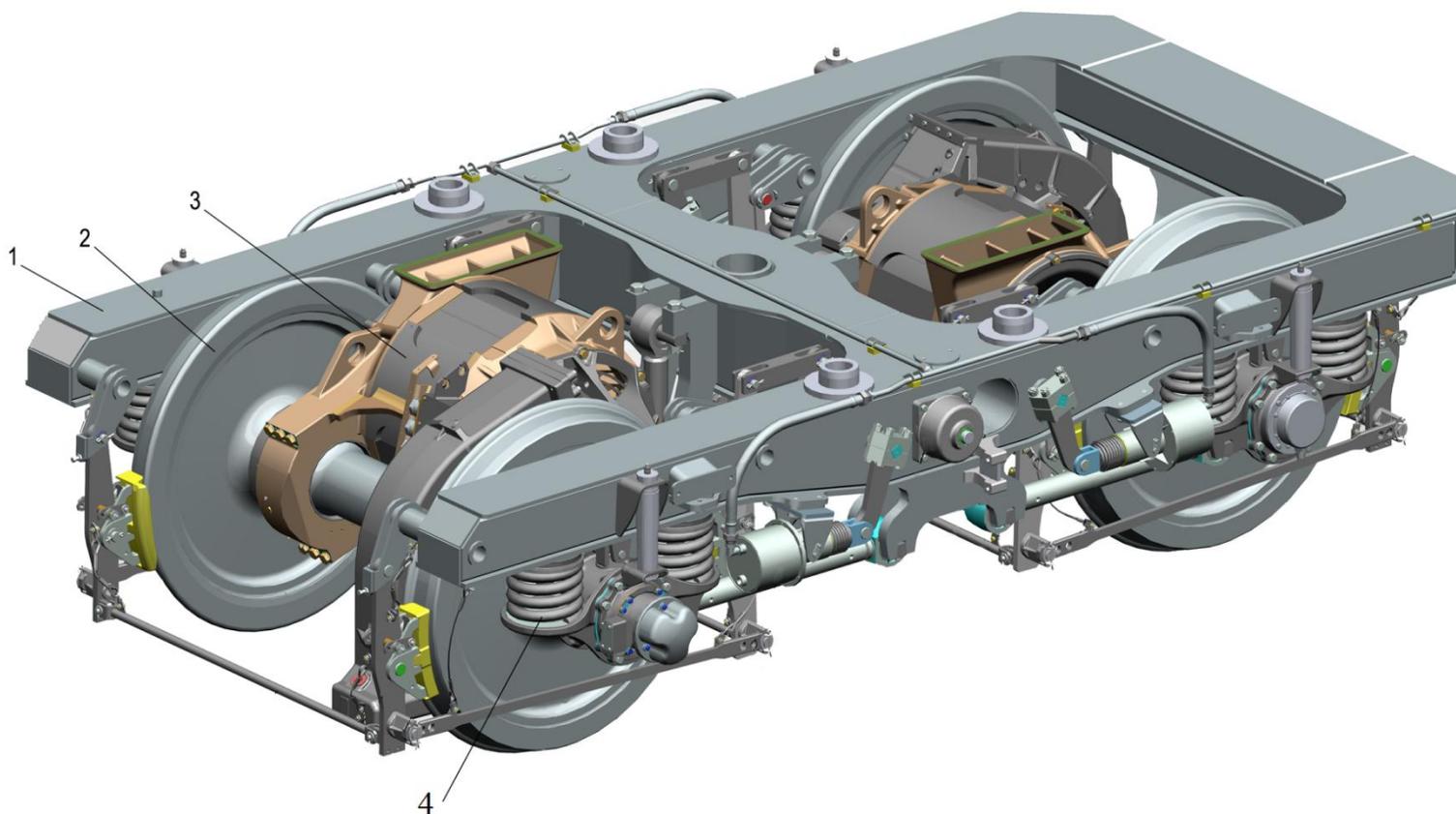
94. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1975. – 185 с. : ил..

95. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования эксперимента / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. – М. : ДеЛиПринт, 2005. – 296 с.

96. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / В. Е. Гмурман. – 7-е изд., стер.– М. : Высшая школа, 1999. – 479 с. : ил..
97. Горлач, Б. А. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / Б. А. Горлач. – СПб. : Издательство «Лань», 2013. – 320 с. : ил..
98. Налимов, В. В. Логические основания планирования эксперимента / В. В. Налимов, Т. И. Голикова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgia, 1981. – 151 с. : ил..
99. Радин, В. И. Электрические машины; Асинхронные машины : учебник / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович; под ред. И. П. Копылова. – М. : Высшая школа, 1988. – 328 с.: ил.. – Библиогр.: с. 325.
100. Хвостов, В. С. Электрические машины; Машины постоянного тока : учебник / В. С. Хвостов; под ред. И. П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1988. – 335 с.: ил.. –Библиогр.: с. 333.
101. Плакс, А. В. Системы управления электрическим подвижным составом : учебник для вузов ж.-д. транспорта / А.В. Плакс. – М. : Маршрут, 2005. – 360 с.
102. Вяльцев, Г. Б. Расчет характеристик электрической машины при помощи известных точек, определенных методом конечных элементов // Г. Б. Вяльцев, А. Ф. Шевченко // «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» ЭЭЭ-2009 материалы четвертой научно-технической конференции с международным участием. М-во образования и науки Российской Федерации, Новосибирский гос. технический ун-т, Фак. мехатроники и автоматизации г. Новосибирск, 2009. – с. 53-57.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Размещение тягового электродвигателя на раме тележки электровоза 2ЭС10 «Гранит»

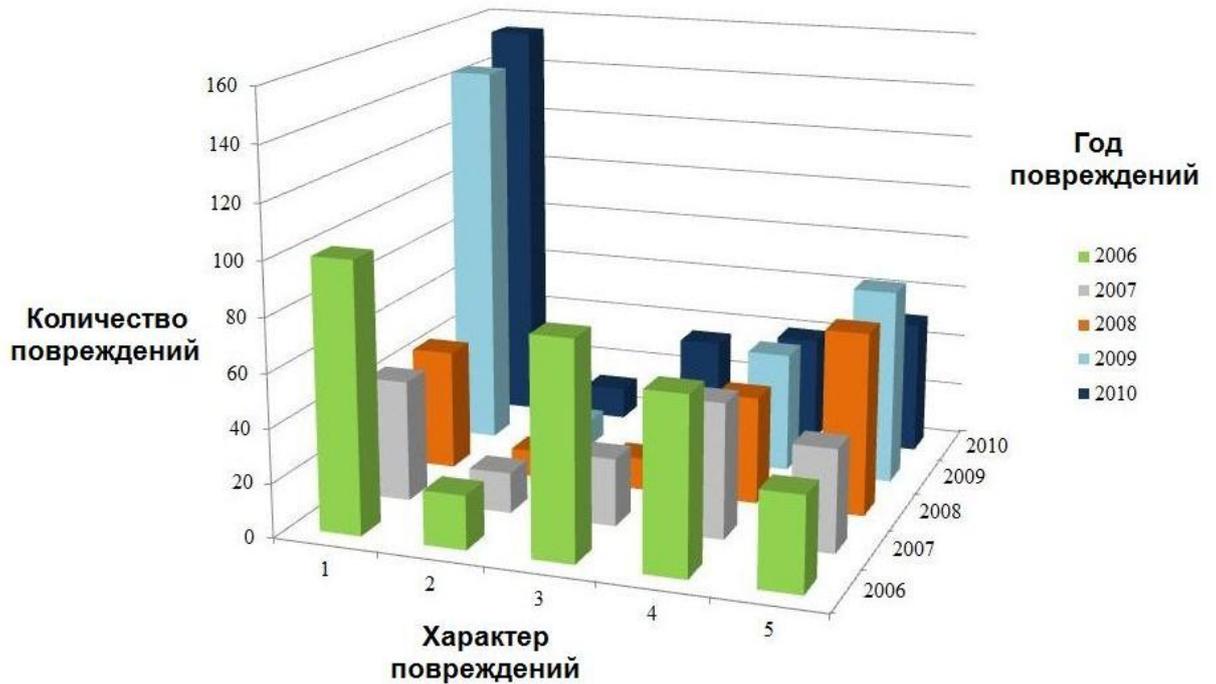


1 –рама тележки; 2 – колесная пара; 3 – тяговый электродвигатель; 4 – рессора буксового подвешивания

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

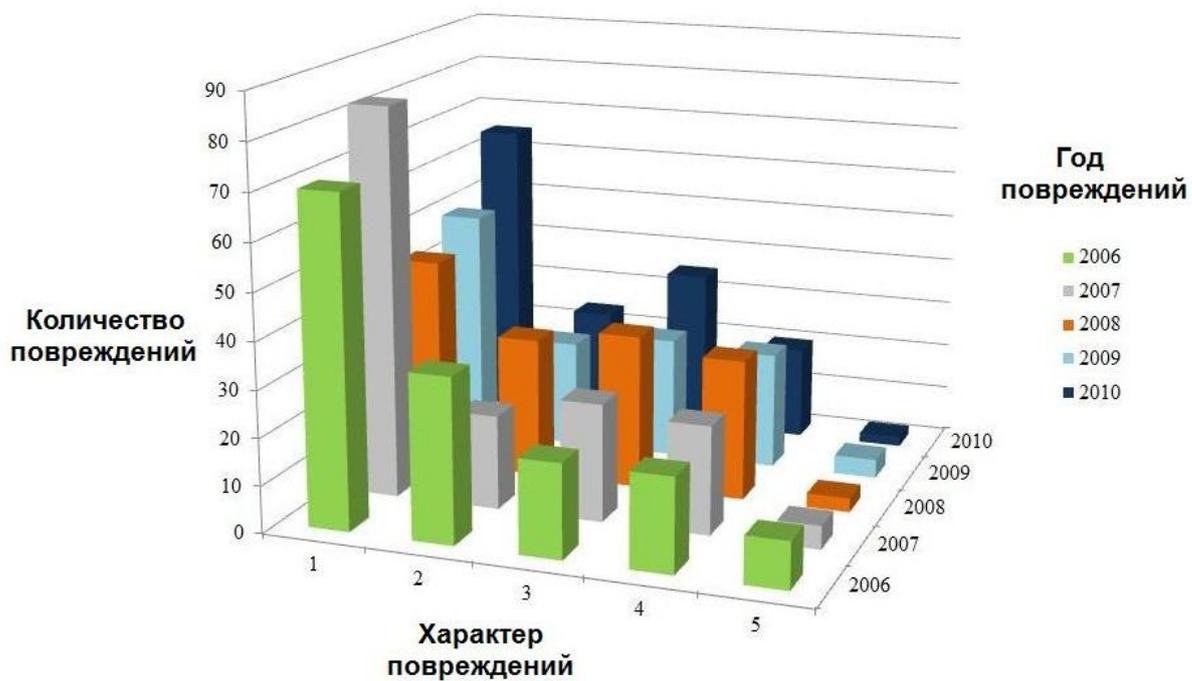
Диаграммы распределения повреждений ТЭД по отдельным узлам и деталям двигателя ТЛ-2К1 за 2006 -2010 года в случае планового и внепланового ремонта

## 1. Плановый ремонт



Характер повреждений: 1 – якорь (обмотка); 2 – полюсы; 3 – повреждение выводов катушек и кабелей; 4 – повреждение подшипников; 5 – прочие повреждения

## 2. Внеплановый ремонт



Характер повреждений: 1 – якорь (обмотка); 2 – полюсы; 3 – повреждение выводов катушек и кабелей; 4 – повреждение подшипников; 5 – прочие повреждения

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Основные технические характеристики асинхронного тягового электродвигателя типа НТА-1200 при питании синусоидальным напряжением

Наименование параметра	Величина
Мощность, кВт	1170
Напряжение линейное, В	2183
Ток фазы статора, А	375
Частота вращения, об/мин	1295
Частота тока, Гц	65.4
кпд, %	95.8
Масса, кг	2600
Вентиляция	Независимая
Количество охлаждающего воздуха, м/мин	90
Потери полного давления воздуха, Па	1700



(1-1)

1-2

$(-\lambda_{C11})$	0	0	$(-\lambda_{C14})$	$(-\lambda_{C15})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$(-\lambda_{CP6})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	$(-\lambda_{C23})$	0	0	0	$(-\lambda_{C27})$	$(-\lambda_{C28})$	0	0	0	0	0	0	0
$(-\lambda_{CC1})$	$(-\lambda_{CC2})$	$(-\lambda_{CC3})$	0	0	$(-\lambda_{CC6})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	$(-\lambda_{R15})$	0	0	0	$(-\lambda_{R19})$	$(-\lambda_{R110})$	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$(-\lambda_{RP6})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	$(-\lambda_{R27})$	0	0	0	0	0	$(-\lambda_{R212})$	$(-\lambda_{R213})$	0
0	0	0	0	0	$(-\lambda_{RC6})$	0	0	0	$(-\lambda_{RC10})$	$(-\lambda_{RC11})$	$(-\lambda_{RC12})$	0	0	0
0	0	0	0	$(-\lambda_{K15})$	0	0	0	$(-\lambda_{K19})$	$(-\lambda_{K110})$	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	$(-\lambda_{K27})$	0	0	0	0	0	$(-\lambda_{K212})$	$(-\lambda_{K213})$	0
$\begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{CC2} \end{pmatrix}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2-1

(2-2)

$$\begin{array}{cccccccccc}
0 & \begin{pmatrix} -\lambda_{CC1} \\ -\lambda_{CC2} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
(-\lambda_{C14}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\begin{pmatrix} -\lambda_{C14} \\ -\lambda_{C15} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & (-\lambda_{R15}) & 0 & 0 & 0 & (-\lambda_{K15}) & 0 \\
(-\lambda_{C15}) & (-\lambda_{CP6}) & 0 & (-\lambda_{CC6}) & (-\lambda_{R15}) & (-\lambda_{RP6}) & 0 & (-\lambda_{RC6}) & (-\lambda_{K15}) & 0 \\
0 & (-\lambda_{CP6}) & (-\lambda_{C27}) & (-\lambda_{CC6}) & 0 & (-\lambda_{RP6}) & (-\lambda_{R27}) & (-\lambda_{RC6}) & 0 & (-\lambda_{K27}) \\
0 & 0 & \begin{pmatrix} -\lambda_{C28} \\ -\lambda_{C27} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & \begin{pmatrix} -\lambda_{R274} \\ -\lambda_{R213} \end{pmatrix} & 0 & 0 & \begin{pmatrix} -\lambda_{K27} \\ -\lambda_{K213} \end{pmatrix} \\
(-\lambda_{C14}) & 0 & 0 & 0 & (-\lambda_{R19}) & 0 & 0 & 0 & (-\lambda_{K19}) & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \begin{pmatrix} -\lambda_{R19} \\ -\lambda_{R110} \end{pmatrix} & 0 & 0 & (-\lambda_{RC10}) & \begin{pmatrix} -\lambda_{K19} \\ -\lambda_{K110} \end{pmatrix} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & (-\lambda_{R110}) & 0 & 0 & \begin{pmatrix} -\lambda_{RC10} \\ -\lambda_{RC11} \end{pmatrix} & (-\lambda_{K110}) & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-\lambda_{R212}) & \begin{pmatrix} -\lambda_{RC11} \\ -\lambda_{RC12} \end{pmatrix} & (-\lambda_{K212}) & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{pmatrix} -\lambda_{R213} \\ -\lambda_{R213} \end{pmatrix} & (-\lambda_{RC12}) & 0 & \begin{pmatrix} -\lambda_{K212} \\ -\lambda_{K213} \end{pmatrix}
\end{array}$$

(2-1)

2-2

$$\begin{array}{cccccccccccc}
(-X12) \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{CC2} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & (-X23) \begin{pmatrix} 2\lambda_B + \\ \lambda_{CC3} + \\ \lambda_{C23} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & (-X38) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{C14} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & (-X45) \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{C15} + \\ \lambda_{K15} + \\ \lambda_{R15} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & (-X56) \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{CP6} + \\ \lambda_{RP6} + \\ \lambda_{RC6} + \\ \lambda_{CC6} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-X67) \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{C27} + \\ \lambda_{K27} + \\ \lambda_{R27} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-X78) \begin{pmatrix} 2\lambda_B + \\ \lambda_{C28} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-X138) \\
0 & 0 & 0 & (-X49) & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{K19} + \\ \lambda_{R19} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-X910) \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{K110} + \\ \lambda_{RC10} + \\ \lambda_{R110} \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-X1011) \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{RC11} \end{pmatrix} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-X1112) \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{K212} + \\ \lambda_{RC12} + \\ \lambda_{R212} \end{pmatrix} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-X1213) \begin{pmatrix} \lambda_B + \\ \lambda_{K213} + \\ \lambda_{R213} \end{pmatrix}
\end{array}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Тепловые проводимости, как функции от скорости вращения двигателя и производительности вентилятора воздушного принудительного охлаждения

$$\lambda_i = f(n, Q)$$

## 1. Тепловые проводимости статора

ТП между лобовой со стороны подачи воздуха и средней частями обмотки статора	$\lambda_{CPC1}$  ( $\lambda_{CPC1} = 48,3760$ )
ТП между лобовой со стороны противоположной подаче воздуха и средней частями обмотки статора	$\lambda_{CPC2}$  ( $\lambda_{CPC2} = 48,3760$ )
ТП между пазовой частью обмотки статора и сталью статора	$\lambda_{CCCP}$  ( $\lambda_{CCCP} = 383,7000$ )
ТП от стали статора в окружающий воздух через станину	$\lambda_{CC0}$  ( $\lambda_{CC0} = 13,2950$ )
ТП от лобовой части обмотки статора со стороны подачи воздуха в область над катушкой (1)	$\lambda_{C11} = \frac{1}{\left(0,025 + \frac{0,168}{1 + 0,61 \cdot Q}\right)}$  ( $\lambda_{C11} = 8,8709$ )
ТП от лобовой части обмотки статора со стороны подачи воздуха в область переднего подшипникового щита (4)	$\lambda_{C14} = \frac{1}{\left(0,086 + \frac{1,4}{1 + 3,15 \cdot Q^2}\right)}$  ( $\lambda_{C14} = 3,8594$ )
ТП от лобовой части обмотки статора со стороны подачи воздуха в область между катушкой и КЗ кольцом (5)	$\lambda_{C15} = \frac{1}{0,03} + 0,2 \cdot \left(1 + 0,25 \cdot \sqrt{(0,87 \cdot Q^2 + 0,0012 \cdot n^2)}\right)$  ( $\lambda_{C15} = 35,7774$ )
ТП от лобовой части обмотки статора со стороны противоположной подаче воздуха в область над катушкой (3)	$\lambda_{C23} = \frac{1}{\left(0,025 + \frac{0,168}{1 + 0,61 \cdot Q}\right)}$  ( $\lambda_{C23} = 8,8709$ )

ТП от лобовой части обмотки статора со стороны противоположной подачи воздуха в область между катушкой и КЗ кольцом (7)	$\lambda_{C27} = \frac{1}{0,03} + 0,2 \cdot \left( 1 + 0,25 \cdot \sqrt{(0,85 \cdot Q^2 + 0,0012 \cdot n^2)} \right)$ $(\lambda_{C27} = 34,3574)$
ТП от лобовой части обмотки статора со стороны противоположной подачи воздуха в область заднего подшипникового щита (8)	$\lambda_{C28} = \frac{1}{\left( 0,086 + \frac{1,4}{1 + 3,15 \cdot Q^2} \right)}$ $(\lambda_{C28} = 3,8594)$
ТП от пазовой части обмотки статора в воздушный зазор (6)	$\lambda_{CP6} = \frac{1}{\left( 0,061 + \frac{0,377}{\sqrt[4]{(110,25 \cdot Q^2 + 0,0011 \cdot n^2)}} \right)}$ $(\lambda_{CP6} = 8,5661)$
ТП от стали статора в область над катушкой обмотки статора со стороны подачи воздуха (1)	$\lambda_{CC1} = \frac{1}{\left( 0,0000485 + \frac{0,128}{1 + 3,549 \cdot Q^2} \right)}$ $(\lambda_{CC1} = 69,9591)$
ТП от стали статора в вентиляционные каналы статора (2)	$\lambda_{CC2} = 123,7 \cdot Q^{0,8}$ $(\lambda_{CC2} = 171,0971)$
ТП от стали статора в область над катушкой обмотки статора со стороны противоположной подачи воздуха (3)	$\lambda_{CC3} = \frac{1}{\left( 0,0000485 + \frac{0,128}{1 + 3,549 \cdot Q^2} \right)}$ $(\lambda_{CC3} = 69,9591)$
ТП от стали статора в воздушный зазор (6)	$\lambda_{CC6} = 2,752 \cdot \sqrt[4]{(110,25 \cdot Q^2 + 0,00109 \cdot n^2)}$ $(\lambda_{CC6} = 18,5762)$

## 2. Тепловые проводимости ротора

ТП между лобовой со стороны подачи воздуха и средней частями обмотки ротора	$\lambda_{RPR1}$ $(\lambda_{RPR1} = 30,2300)$
---	---

ТП между лобовой со стороны противоположной подаче воздуха и средней частями обмотки ротора	$\lambda_{RPR2}$  ( $\lambda_{RPR2} = 30,2300$ )
ТП между пазовой частью обмотки ротора и сталью ротора	$\lambda_{RCRP}$  ( $\lambda_{RCRP} = 4429$ )
ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны подачи воздуха в область между катушкой и КЗ кольцом (5)	$\lambda_{R15} = 1,862 \cdot (0,83 \cdot Q^2 + 0,0011 \cdot n^2)^{0,33}$  ( $\lambda_{R15} = 22,2783$ )
ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны подачи воздуха в область переднего подшипникового щита (9)	$\lambda_{R19} = 0,328 + 0,497 \cdot (21,35 \cdot Q^2 + 0,00105 \cdot n^2)^{0,4}$  ( $\lambda_{R19} = 10,3124$ )
ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны подачи воздуха в область под КЗ кольцом (10)	$\lambda_{R110} = 1,53 + 0,153 \cdot (21,35 \cdot Q^2 + 0,000973 \cdot n^2)^{0,5}$  ( $\lambda_{R110} = 7,8007$ )
ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны противоположной подаче воздуха в область над между катушкой и КЗ кольцом (7)	$\lambda_{R27} = 1,862 \cdot (0,83 \cdot Q^2 + 0,0011 \cdot n^2)^{0,33}$  ( $\lambda_{R27} = 22,2783$ )
ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны противоположной подаче воздуха в область заднего подшипникового щита (13)	$\lambda_{R213} = 0,328 + 0,497 \cdot (21,35 \cdot Q^2 + 0,00105 \cdot n^2)^{0,4}$  ( $\lambda_{R213} = 10,3124$ )
ТП от лобовой части обмотки ротора со стороны противоположной подаче воздуха в область под КЗ кольцом (12)	$\lambda_{R212} = 1,53 + 0,153 \cdot (21,35 \cdot Q^2 + 0,000973 \cdot n^2)^{0,5}$  ( $\lambda_{R212} = 7,8007$ )
ТП от пазовой части обмотки ротора в воздушный зазор (6)	$\lambda_{RP6} = 1,2 + 0,716 \cdot (110,3 \cdot Q^2 + 0,0011 \cdot n^2)^{0,45}$  ( $\lambda_{RP6} = 23,5486$ )
ТП от стали ротора в область под КЗ кольцом со стороны подачи воздуха (10)	$\lambda_{RC10} = 1,16 + 0,0016 \cdot (24,8 \cdot Q^2 + 0,0007 \cdot n^2)^{0,4}$  ( $\lambda_{RC10} = 1,1875$ )

ТП от стали ротора в вентиляционные каналы ротора (11)	$\lambda_{RC11} = 9,89 \cdot (265,37 \cdot Q^2 + 0,0006 \cdot n^2)^{0,4}$ ( $\lambda_{RC11} = 189,3224$ )
ТП от стали ротора в область под КЗ кольцом со стороны противоположной подаче воздуха (12)	$\lambda_{RC12} = 1,14 + 0,00155 \cdot (24,8 \cdot Q^2 + 0,0007 \cdot n^2)^{0,4}$ ( $\lambda_{RC12} = 1,1672$ )
ТП от стали ротора в воздушный зазор (6)	$\lambda_{RC6} = 3,8 \cdot (105,06 \cdot Q^2 + 0,0011 \cdot n^2)^{0,25}$ ( $\lambda_{RC6} = 25,6660$ )

### 3. Тепловые проводимости короткозамыкающие кольца

ТП между лобовой частью обмотки ротора и короткозамкнутым кольцом со стороны подачи воздуха	$\lambda_{R1K1}$ ( $\lambda_{R1K1} = 4411$ )
ТП между лобовой частью обмотки ротора и короткозамкнутым кольцом со стороны противоположной подаче воздуха	$\lambda_{R2K2}$ ( $\lambda_{R2K2} = 4411$ )
ТП от КЗ кольца со стороны подачи воздуха в область между катушкой и КЗ кольцом (5)	$\lambda_{K15} = 0,599 + 0,0599 \cdot (0,88 \cdot Q^2 + 0,0011 \cdot n^2)^{0,5}$ ( $\lambda_{K15} = 3,1731$ )
ТП от КЗ кольца со стороны подачи воздуха в область переднего подшипникового щита (9)	$\lambda_{K19} = 0,672 + 1,019 \cdot (21,16 \cdot Q^2 + 0,00085 \cdot n^2)^{0,4}$ ( $\lambda_{K19} = 19,5287$ )
ТП от КЗ кольца со стороны подачи воздуха в область под КЗ кольцом (10)	$\lambda_{K110} = 0,878 + 0,0878 \cdot (21,35 \cdot Q^2 + 0,00069 \cdot n^2)^{0,5}$ ( $\lambda_{K110} = 3,9260$ )
ТП от КЗ кольца со стороны противоположной подаче воздуха в область над между катушкой и КЗ	$\lambda_{K27} = 0,599 + 0,0599 \cdot (0,88 \cdot Q^2 + 0,0011 \cdot n^2)^{0,5}$ ( $\lambda_{K27} = 3,1731$ )

кольцом (7)	
ТП от КЗ кольца со стороны противоположной подаче воздуха в область заднего подшипникового щита (13)	$\lambda_{K213} = 0,84 \cdot \left( 1 + 0,54 \cdot (21,16 \cdot Q^2 + 0,00085 \cdot n^2)^{0,5} \right)$ $(\lambda_{K213} = 18,2495)$
ТП от КЗ кольца со стороны против подачи воздуха в область под КЗ кольцом (12)	$\lambda_{K212} = 0,878 + 0,0878 \cdot (21,35 \cdot Q^2 + 0,00069 \cdot n^2)^{0,5}$ $(\lambda_{K212} = 3,9260)$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Ортогональное планирование для четырех независимых переменных

	Номер эксперимента																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	Планирование типа 2 <sup>4</sup>																Звездные точки								0 точка
X0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1.4 142	1.4 142	0	0	0	0	0	0	0
X2	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	0	0	- 1.4 142	1.4 142	0	0	0	0	0
X3	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	0	0	0	0	- 1.4 142	1.4 142	0	0	0
X4	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	- 1.4 142	1.4 142	0



## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

## Коэффициенты уравнений регрессии

	Лобовая часть обмотки статора со стороны подачи воздуха ( $v_{c1}$ )	Пазовая часть обмотки статора ( $v_{cp}$ )	Лобовая часть обмотки статора со стороны противоположной подачи воздуха ( $v_{c2}$ )	Сердечник статора ( $v_{c\bar{n}}$ )	Лобовая часть обмотки ротора со стороны подачи воздуха ( $v_{p1}$ )	Пазовая часть обмотки ротора ( $v_{pp}$ )	Лобовая часть обмотки ротора со стороны противоположной подачи воздуха ( $v_{p2}$ )
b0	<b>93.69042</b>	<b>102.4118</b>	<b>96.73956</b>	<b>97.83264</b>	<b>62.80596</b>	<b>61.86886</b>	<b>66.22064</b>
b1	<b>14.8296</b>	<b>12.12181</b>	<b>15.75724</b>	<b>7.898978</b>	<b>7.241624</b>	<b>6.696558</b>	<b>8.631168</b>
b2	3.791268	5.406483	4.377327	5.424955	<b>7.242058</b>	<b>6.594003</b>	<b>8.408228</b>
b3	<b>18.40683</b>	<b>18.22058</b>	<b>18.36647</b>	<b>18.35852</b>	<b>19.48447</b>	<b>19.50033</b>	<b>19.4716</b>
b4	<b>-8.61474</b>	<b>-12.8187</b>	<b>-9.82018</b>	<b>-13.5466</b>	-1.17432	-1.90708	-2.47641
b11	<b>12.00527</b>	<b>12.31833</b>	<b>12.38009</b>	<b>11.15018</b>	<b>7.505862</b>	<b>7.328475</b>	<b>7.9556</b>
b22	<b>8.286265</b>	<b>9.375355</b>	<b>8.528635</b>	<b>9.310702</b>	<b>7.263137</b>	<b>7.087325</b>	<b>7.61445</b>
b33	<b>7.72549</b>	<b>8.80028</b>	<b>7.890585</b>	<b>8.747427</b>	<b>5.286662</b>	<b>5.252575</b>	<b>5.42855</b>
b44	<b>9.72249</b>	<b>11.76058</b>	<b>10.30456</b>	<b>11.9315</b>	<b>6.003763</b>	<b>6.14485</b>	<b>6.5964</b>
b12	2.018725	1.584525	2.275613	0.945794	3.842144	3.480038	<b>4.431663</b>
b13	-1.4844	-1.09131	-1.53041	-0.59383	-0.34353	-0.29478	-0.39252
b14	-3.31413	-3.44524	-3.69295	-2.96784	-0.83668	-1.10859	-1.36131
b23	1.927975	1.455388	2.01075	0.831156	0.727269	0.646725	0.843038
b24	1.34245	0.437813	1.255088	-0.29073	0.351269	0.013538	0.1378
b34	-1.88088	-1.34678	-1.95624	-0.70563	-0.56221	-0.51285	-0.66544

	Сердечник ротора ( $v_{cp}$ )	Короткозамкнутое кольцо со стороны подачи воздуха ( $v_{k1}$ )	Короткозамкнутое кольцо со стороны противоположной подачи воздуха ( $v_{k2}$ )	Подогрев воздуха в области 1 ( $v1$ )	Подогрев воздуха в области 2 ( $v2$ )	Подогрев воздуха в области 3, выходная температура воздуха ( $v3$ )	Подогрев воздуха в области 4 ( $v4$ )	Подогрев воздуха в области 5 ( $v5$ )
b0	<b>61.35357</b>	<b>62.77357</b>	<b>66.19734</b>	<b>49.67867</b>	<b>55.65545</b>	<b>58.17014</b>	<b>48.00982</b>	<b>49.61792</b>
b1	<b>6.444838</b>	<b>7.226119</b>	<b>8.620914</b>	0.319373	1.301029	2.460004	0.029032	0.598206
b2	<b>6.338027</b>	<b>7.226871</b>	<b>8.398692</b>	0.187192	0.829005	1.675636	0.007625	0.243509
b3	<b>19.50256</b>	<b>19.48457</b>	<b>19.47181</b>	<b>19.4912</b>	<b>19.35149</b>	<b>19.35144</b>	<b>19.53316</b>	<b>19.51341</b>
b4	-1.8903	-1.17048	-2.47455	-0.24249	-1.903	<b>-3.16103</b>	-0.01155	-0.70824
b11	<b>7.248057</b>	<b>7.500907</b>	<b>7.95205</b>	<b>5.415843</b>	<b>6.115695</b>	<b>6.451485</b>	<b>5.213365</b>	<b>5.419878</b>
b22	<b>7.014657</b>	<b>7.258757</b>	<b>7.611525</b>	<b>5.339193</b>	<b>5.812095</b>	<b>6.050535</b>	<b>5.20594</b>	<b>5.311653</b>
b33	<b>5.232308</b>	<b>5.285407</b>	<b>5.4275</b>	<b>4.836893</b>	<b>5.30232</b>	<b>5.38356</b>	<b>4.70584</b>	<b>4.783103</b>
b44	<b>6.121758</b>	<b>6.001608</b>	<b>6.59505</b>	<b>5.409193</b>	<b>6.294045</b>	<b>6.81721</b>	<b>5.207665</b>	<b>5.539878</b>
b12	3.343956	3.834106	<b>4.426688</b>	0.043131	0.1601	0.611313	0.0042	0.120306
b13	-0.28217	-0.34282	-0.39195	-0.02953	-0.10331	-0.14256	-0.00318	-0.03458
b14	-1.09033	-0.83442	-1.36053	-0.08549	-0.45705	-0.94499	-0.00485	-0.25373
b23	0.620669	0.725744	0.84195	0.039194	0.142488	0.235375	0.004037	0.055694
b24	-0.00877	0.350869	0.13655	0.023881	-0.00727	-0.19443	0.003138	-0.02016
b34	-0.49319	-0.56103	-0.66461	-0.03841	-0.12734	-0.21285	-0.00389	-0.05614

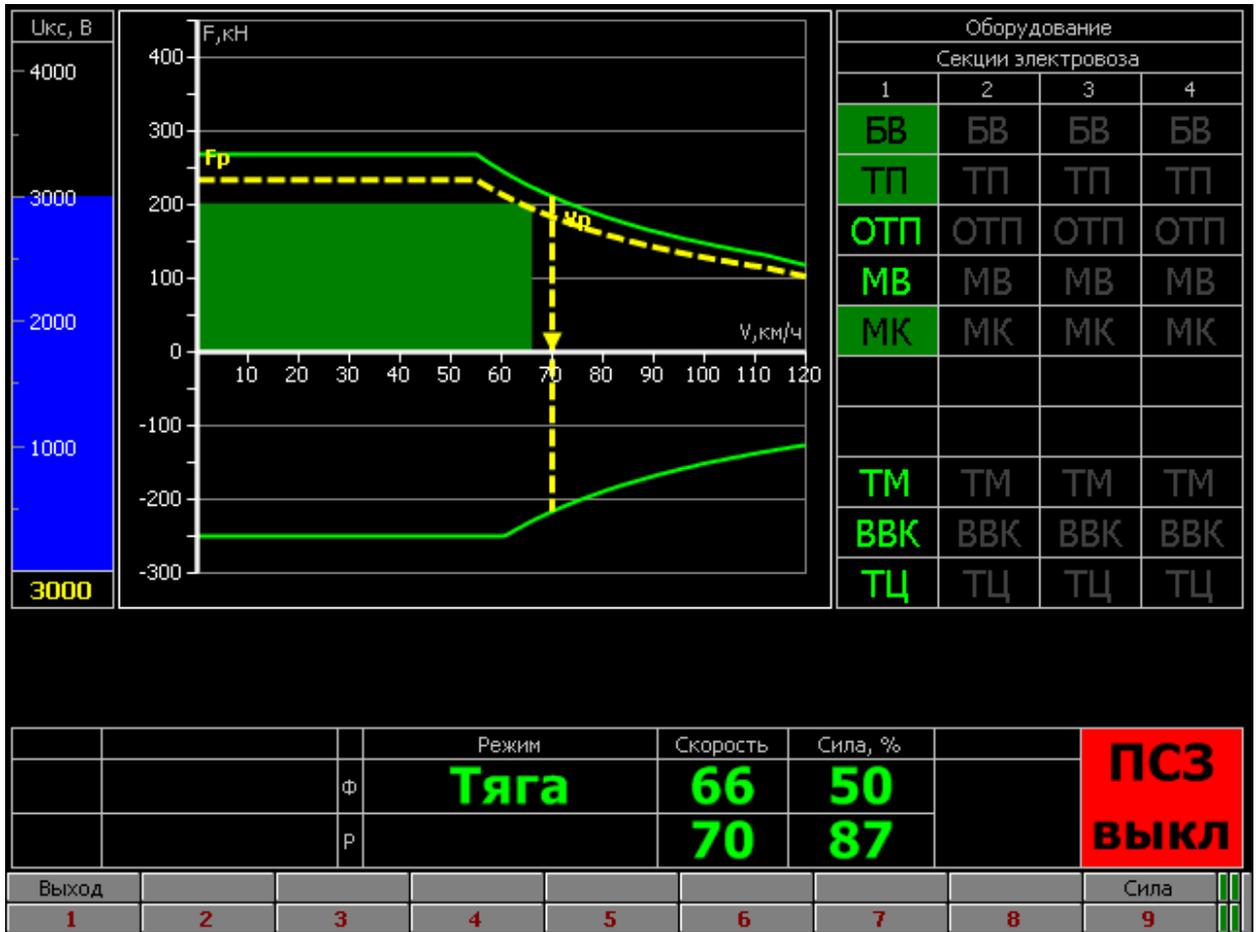
	Подогрев воздуха в области 6 (v6)	Подогрев воздуха в области 7 (v7)	Подогрев воздуха в области 8 (v8)	Подогрев воздуха в области 9 (v9)	Подогрев воздуха в области 10 (v10)	Подогрев воздуха в области 11 (v11)	Подогрев воздуха в области 12 (v12)	Подогрев воздуха в области 13 (v13)
b0	<b>52.52285</b>	<b>55.29473</b>	<b>54.91969</b>	<b>48.45002</b>	<b>48.94481</b>	<b>50.62416</b>	<b>52.30106</b>	<b>52.76007</b>
b1	1.5089	2.384443	2.684136	0.229788	0.472158	1.282169	2.088292	2.304151
b2	0.785443	1.315396	1.927797	0.181795	0.41687	1.198047	1.973855	2.177956
b3	<b>19.47917</b>	<b>19.44619</b>	<b>19.48767</b>	<b>19.53247</b>	<b>19.5348</b>	<b>19.54039</b>	<b>19.54568</b>	<b>19.54683</b>
b4	-2.03505	-3.25848	-2.80907	-0.15254	-0.3345	-0.91188	-1.48894	-1.65509
b11	<b>5.766345</b>	<b>6.105045</b>	<b>6.11123</b>	<b>5.275302</b>	<b>5.34407</b>	<b>5.57859</b>	<b>5.812485</b>	<b>5.875767</b>
b22	<b>5.526845</b>	<b>5.740445</b>	<b>5.83553</b>	<b>5.255528</b>	<b>5.31727</b>	<b>5.52594</b>	<b>5.73356</b>	<b>5.788967</b>
b33	<b>4.927145</b>	<b>5.06997</b>	<b>5.01273</b>	<b>4.723052</b>	<b>4.73927</b>	<b>4.79609</b>	<b>4.852935</b>	<b>4.868768</b>
b44	<b>6.17337</b>	<b>6.744995</b>	<b>6.49068</b>	<b>5.270403</b>	<b>5.347495</b>	<b>5.597115</b>	<b>5.84716</b>	<b>5.918418</b>
b12	0.36025	0.596938	0.963213	0.096219	0.220113	0.630612	1.038	1.144506
b13	-0.076	-0.11661	-0.11006	-0.01071	-0.01691	-0.03979	-0.06269	-0.06879
b14	-0.6658	-1.05156	-1.07724	-0.07621	-0.16969	-0.45991	-0.74805	-0.82722
b23	0.13275	0.207875	0.229125	0.021569	0.040663	0.106238	0.171613	0.188919
b24	-0.12848	-0.23008	-0.35408	-0.03256	-0.08696	-0.24169	-0.39378	-0.43428
b34	-0.1273	-0.1966	-0.21285	-0.02001	-0.03729	-0.09531	-0.15306	-0.16841

## ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Интерфейс рабочего места машиниста электровоза 2ЭС10 «Гранит»

Укс, В	Ток тяговых двигателей, А										Оборудование																					
	Секция 1			Секция 2		Секция 3		Секция 4			Секции электровоза																					
	Итп1, А	Итп2, А	М, кНм	Итп, А	М, кНм	Итп, А	М, кНм	Итп, А	М, кНм	Итп, А	М, кНм	1	2	3	4																	
4000	1000	1000	8	1000	8	1000	8	1000	8	1000	8	БВ	БВ	БВ	БВ																	
3000	900	900	7	900	7	900	7	900	7	900	7	ТП	ТП	ТП	ТП																	
	800	800	6	800	6	800	6	800	6	800	6	ОТП	ОТП	ОТП	ОТП																	
2000	700	700	5	700	5	700	5	700	5	700	5	МВ	МВ	МВ	МВ																	
	600	600	4	600	4	600	4	600	4	600	4	МК	МК	МК	МК																	
1000	500	500	3	500	3	500	3	500	3	500	3																					
	400	400	2	400	2	400	2	400	2	400	2																					
3000	300	300	1	300	1	300	1	300	1	300	1	ТМ	ТМ	ТМ	ТМ																	
	200	200		200		200		200		200		ВВК	ВВК	ВВК	ВВК																	
	100	100		100		100		100		100		ТЦ	ТЦ	ТЦ	ТЦ																	
3000	0	0	5.1																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>Режим</th> <th>Скорость</th> <th>Сила, %</th> <th colspan="2" rowspan="3" style="background-color: red; color: black; text-align: center; vertical-align: middle;"> <b>ПСЗ ВЫКЛ</b> </th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>ф</td> <td style="color: green; font-size: 1.2em;">Тяга</td> <td style="color: green; font-size: 1.2em;">66</td> <td style="color: green; font-size: 1.2em;">50</td> </tr> <tr> <td></td> <td>р</td> <td></td> <td style="color: green; font-size: 1.2em;">70</td> <td style="color: green; font-size: 1.2em;">87</td> </tr> </tbody> </table>																		Режим	Скорость	Сила, %	<b>ПСЗ ВЫКЛ</b>			ф	Тяга	66	50		р		70	87
		Режим	Скорость	Сила, %	<b>ПСЗ ВЫКЛ</b>																											
	ф	Тяга	66	50																												
	р		70	87																												
Выход															Сила																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9																								

## Интерфейс машиниста электровоза «Гранит»



Интерфейс машиниста электровоза «Гранит»  
(тепловое состояние)

		Состояние ТП	
ASG -> МПСУид			
0	0	Напр. пром. контура привода А, В	
0	0	Напр. пром. контура привода В, В	
0	0	Мгновен. мощность ТП, кВт	
0	0	Мгновен. мощность торм. рез., кВт	
0	0	Темпер. статора ТД, привод А, С	
0	0	Темпер. статора ТД, привод В, С	
0	0	Темпер. обмотки ТД, привод А, С	
0	0	Темпер. обмотки ТД, привод В, С	
0	0	Темпер. ротора ТД, привод А, С	
0	0	Темпер. ротора ТД, привод В, С	
0	0	Темпер. тяг. преобразов., С	
0	0	Темпер. ASG, С	
0	0	Темпер. хладогента, С	
0	0	Темпер. трансформатора БПСН, С	
0.00	0.00	Давление хладогента, Бар	

Выход		ОТД и ТП	БПСН	Управл. ТП	Состояян. ТП				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «Салют-М»

В.А. Крапивин

2015 г.



## АКТ

использования результатов диссертационной работы

Дорохиной Екатерины Сергеевны

«Мониторинг теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей»

Настоящий акт удостоверяет, что в автоматической испытательной станции тяговых электродвигателей локомотивов внедрена система мониторинга теплового состояния электродвигателей в установившихся и не установившихся режимах работы (НИОКР № ВИП-2-573/14, № АИС-2-573/14), использующая следующие результаты диссертационной работы:

- 1) математическая модель теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей с независимой системой вентиляции для определения установившегося теплового поля;
- 2) математическая модель расчета температур узлов асинхронных тяговых электродвигателей в не установившихся режимах работы;
- 3) алгоритм автоматического определения тепловых нагрузок тягового электродвигателя, с определением наиболее нагретого узла.

Система мониторинга позволяет производить контроль теплового состояния тяговых электродвигателей электровозов в реальном времени. Полученные данные могут быть использованы как при проведении ПСИ, так и в системах управления электродвигателями электровозов с целью принятия своевременных решений по предотвращению аварийных ситуаций в процессе эксплуатации.

Технический директор ООО «Салют-М»

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal line.

Г.В. Вокалов

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и инновациям ТПУ



А.Н. Дьяченко

2015 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Дорохиной Екатерины Сергеевны  
«Мониторинг теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей»  
в учебный процесс Национального исследовательского  
Томского политехнического университета

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Дорохиной Е.С. «Мониторинг теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей» переданы и используются на кафедре «Электротехнические комплексы и материалы» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета в виде:

- 1) математической модели теплового состояния асинхронных электродвигателей для определения установившегося теплового поля;
- 2) применения способов определения температурных нагрузок на узлы асинхронных тяговых электродвигателей, работающих в неуставившихся режимах.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», магистров 13.04.02 («Электроэнергетика и электротехника») и специалистов по направлению 140601.65 «Электромеханика» по дисциплинам: «Учебно-исследовательская работа студентов», а также в выпускных квалификационных работах студентов, что позволяет повысить качество подготовки выпускников.

Зав. кафедрой ЭКМ ЭНИН

д.т.н., профессор

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to A. G. Garganeev, is written over the text.

А. Г. Гарганеев