

На правах рукописи

Дорохина Екатерина Сергеевна

**МОНИТОРИНГ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ  
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.01 –  
«Электромеханика и электрические аппараты»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электротехнические комплексы и материалы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научные руководители:** кандидат технических наук, доцент  
**Рапопорт Олег Лазаревич**  
доктор технических наук, профессор  
**Гарганеев Александр Георгиевич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
  
кандидат технических наук, доцент

**Ведущая организация:**

Защита состоится «28» декабря 2015 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, уч. корп. 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru:7777/council/2801/worklist>.

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Дементьев Юрий Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Количество грузовых железнодорожных перевозок в Российской Федерации постоянно возрастает. Одним из решений обеспечения повышающегося спроса является увеличение полезной нагрузки и скорости движения поездов, что приводит к снижению сроков их эксплуатации и межсервисного интервала по сравнению с установленным регламентом. Анализ основных показателей технического состояния локомотивного парка сети магистральных железных дорог Российской Федерации, эксплуатируемого в настоящее время, показывает, что общее число выходов из строя локомотивов находится на уровне 10–12 % в год. При этом следует отметить, что число отказов, приходящихся на тяговые электродвигатели (ТЭД), составляет 17–21 %. Такой высокий уровень выхода из строя ТЭД обусловлен тяжелыми условиями их эксплуатации, приводящими к значительному перегреву элементов конструкции электродвигателя. Нагрев элементов конструкции ТЭД выше допустимых значений является основной причиной снижения срока его работы. Поэтому актуальным является постоянный контроль теплового состояния тяговых электродвигателей при эксплуатации, где имеется возможность получения информации не только о величине достигнутой температуры, но и о длительности и частоте температурных воздействий, скорости нагревания или охлаждения. Все эти данные позволяют оценивать величину остаточного ресурса электродвигателя.

С учетом существующей в настоящее время тенденции к оснащению грузовых составов локомотивами нового поколения с асинхронным тяговым электроприводом, которые будут эксплуатироваться в тяжелых условиях, имеется большая вероятность также снижения сроков эксплуатации и межсервисного интервала. В связи с этим, актуальным является мониторинг теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД) при эксплуатации, который может обеспечивать установленные регламентом сроки.

Необходимо отметить, что выпускаемые локомотивы нового поколения с асинхронными тяговыми электродвигателями оснащаются тепловыми системами защиты. Так, для тяговых электродвигателей локомотива предусмотрена установка блока защиты, представляющая собой термодатчик, установленный в двигатель с блоком управления, который при превышении допустимого уровня выводит сообщение на рабочий монитор машиниста поезда. Однако, такая информация не позволяет корректно оценить температурную нагрузку на все узлы электродвигателя, поскольку узел, в который установлен термодатчик не всегда является наиболее нагретым. Для получения информации о тепловом состоянии всего объекта необходимо использование большего количества контрольных узлов, и, как следствие, установка соответствующего количества термодатчиков. Это не всегда является возможным по причине ограниченного пространства внутри машины, сложностью установки соответствующих датчиков на вращающиеся части электродвигателя и существенного усложнения системы защиты. Таким образом, одним из возможных решений задачи мониторинга теплового состояния АТЭД является определение в режиме реального времени картины

температурного поля электродвигателя путем математического описания его как теплового объекта.

В настоящее время, существует большое количество исследований, посвященных проблемам, связанным с тепловым состоянием тяговых машин. К числу таких работ относятся работы И.Н. Богаенко, А.И. Борисенко, Ю.Г. Бухгольц, Э.И. Гуревича, Ш.К. Исмаилова, Н.А. Платова, Д.И. Санникова, Г.А. Сипайлова, В.П. Смирнова, В.А. Тюкова, И.Ф. Филиппова, Т.В. Честюниной, А.И. Яковлева и другие. Разработанные методы в основном направлены на оценку теплового состояния тяговых электродвигателей постоянного тока. Исследования асинхронных тяговых электродвигателей в эксплуатации как тепловых объектов только начинаются. Данные исследования отображены в работах Е.Ю. Логиновой, Ф.В. Тихонова, В.В. Чашина. Объяснением этого является то, что до настоящего времени основное применение АТЭД имели на пассажирском подвижном составе, эксплуатация которого осуществляется в более щадящих режимах по сравнению с грузовыми поездами (при не высоких нагрузках и высокой интенсивности охлаждения), где вероятность отказа по причине предельного теплового состояния является маловероятным.

Комплексное исследование асинхронного тягового электродвигателя как теплового объекта позволит получить расчетным путем температуры узлов, с выявлением наиболее нагретого, и использовать эту информацию для корректировки режима работы АТЭД. Данная система стала бы одним из путей, позволяющим не допустить предельного температурного состояния АТЭД и своевременно предотвращать возможные аварийные ситуации в период эксплуатации.

**Цель работы.** 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.

**Методы исследования.** 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** 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.

**Основные научные положения работы, выносимые на защиту**

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.

**Реализация и внедрение результатов работы.**

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.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы обсуждались на заседаниях кафедры «Электротехнических комплексов и материалов» ЭНИН ТПУ и на ежегодных 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 г.

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

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 102 наименований и 9 приложений. Содержит 155 страниц машинописного текста, содержит 18 иллюстраций и 8 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели и задачи работы. Приведено краткое содержание работы.

**В первой главе** приведена характеристика отказов тяговых электродвигателей постоянного и переменного тока, которая показала, что главными причинами выхода из строя электродвигателей являются пробой изоляции и межвитковые замыкания в обмотках машины. Учитывая, что одной

из главных причин ускоренного старения изоляции является частый перегрев обмоток машины при работе на электровозе, показана необходимость мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей при их эксплуатации.

Проведенный в работе критический анализ существующих в настоящее время систем контроля теплового состояния тяговых электродвигателей при эксплуатации выявил, что они не в полной мере подходят для решения задачи теплового мониторинга АТЭД. Большинство из рассмотренных систем контроля теплового состояния ТЭД предоставляют данные о температуре только одного узла электродвигателя, что не позволяет произвести корректную оценку теплового состояния всей машины в период эксплуатации, поскольку данный узел не всегда является наиболее теплонапряженным. В свою очередь, использование большого количества контрольных узлов с установленными в них датчиками температуры загромождают объем машины. Рассмотренные патентные разработки, использующие расчет температур узлов электродвигателя косвенным путем, позволяют определить температуру обмоток электродвигателя для установившегося режима работы. Также необходимо отметить, что большинство патентных разработок направлены на контроль теплового состояния тяговых электродвигателей постоянного тока.

По результатам проведенного анализа можно говорить о необходимости разработки и создания системы теплового мониторинга асинхронных тяговых электродвигателей в условиях их реальной эксплуатации для непрерывного контроля и оценки тепловых нагрузок с целью своевременного обнаружения неисправностей, связанных с нарушением теплового состояния.

**Вторая глава** посвящена разработке тепловой математической модели (ТММ) асинхронного тягового электродвигателя в установившемся режиме.

Проведенный сравнительный анализ аналитических и численных методов показал, что для решения поставленной задачи, создания системы непрерывного контроля теплового состояния АТЭД во время их эксплуатации, оптимальным является применение аналитических методов расчета температурного поля: методов тепловых полей и эквивалентных тепловых схем. Основным узлом системы является тепловая математическая модель, позволяющая получить картину температурного поля в электродвигателе. Использование указанных методов позволяет учитывать влияние различных параметров на температурное поле машины без помощи сложной и достаточно дорогостоящей вычислительной техники и программного обеспечения, а также большого количества времени, что дает возможность производить расчет температур узлов электродвигателя в реальном времени его работы на электровозе.

ТММ базируется на полном и достоверном описании электродвигателя как теплового объекта. При этом электродвигатель рассматривается как схема соединения источников тепла, тепловых сопротивлений и приемников, объединенных в единую схему, с общими узлами по внутреннему воздуху двигателя. Тепловая схема замещения, отображающая физическую картину процессов, протекающих между отдельными теплореагирующими элементами

для АТЭД типа НТА-1200, представлена на рисунке 1. В тепловой схеме предусмотрена детализация обмоток статора (ОС) и ротора (ОР) 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 выделенными узлами являются сердечник статора и ротора, а также короткозамыкающие (КЗ) кольца.

Постепенное повышение температуры охлаждающего потока воздуха вдоль оси машины, при прохождении различных ее участков, учтено в тепловой схеме рядом базовых точек с температурой, возрастающей в направлении движения потока воздуха. При этом поток охлаждающей среды был разбит на области, совпадающие по длине с соответствующими охлаждаемыми частями машины. Для каждого элемента потока прирост температуры рассчитывается исходя из теплового баланса.

Система уравнений, описывающих процесс передачи тепла в двигателе согласно эквивалентной тепловой схеме, реализуется в среде MATLAB, в матричной форме имеет вид:

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

где:  $\langle \Lambda \rangle$  – квадратная симметричная матрица взаимных собственных проводимостей схемы размерностью 23x23;

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

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

Результаты расчета температурного поля АТЭД с помощью разработанной тепловой математической модели были сравнены с результатами моделирования в приложении по расчету температурных полей программного продукта ELCUT. Данное приложение позволяет моделировать двумерные установившиеся температурные поля электродвигателей методом конечных элементов.

В таблице 1 приведены значения температур, полученные с помощью разработанной тепловой математической модели АТЭД для двух режимов работы: близкого к номинальному ( $I_f=336$  А) и при токовой перегрузке ( $I_f=600$  А). Моделирование при аналогичных параметрах проведено в среде ELCUT (рисунок 2 и 3). Расхождения между результатами расчета ТММ и моделированием в программном комплексе ELCUT установившихся температурных полей не превышают 10 %. Наибольшее отклонение получено для узлов электродвигателя, расположенных с противоположной стороны от подачи охлаждающего воздуха. Это объясняется тем, что моделирование в программном комплексе ELCUT не позволяет произвести учет системы вентиляции.



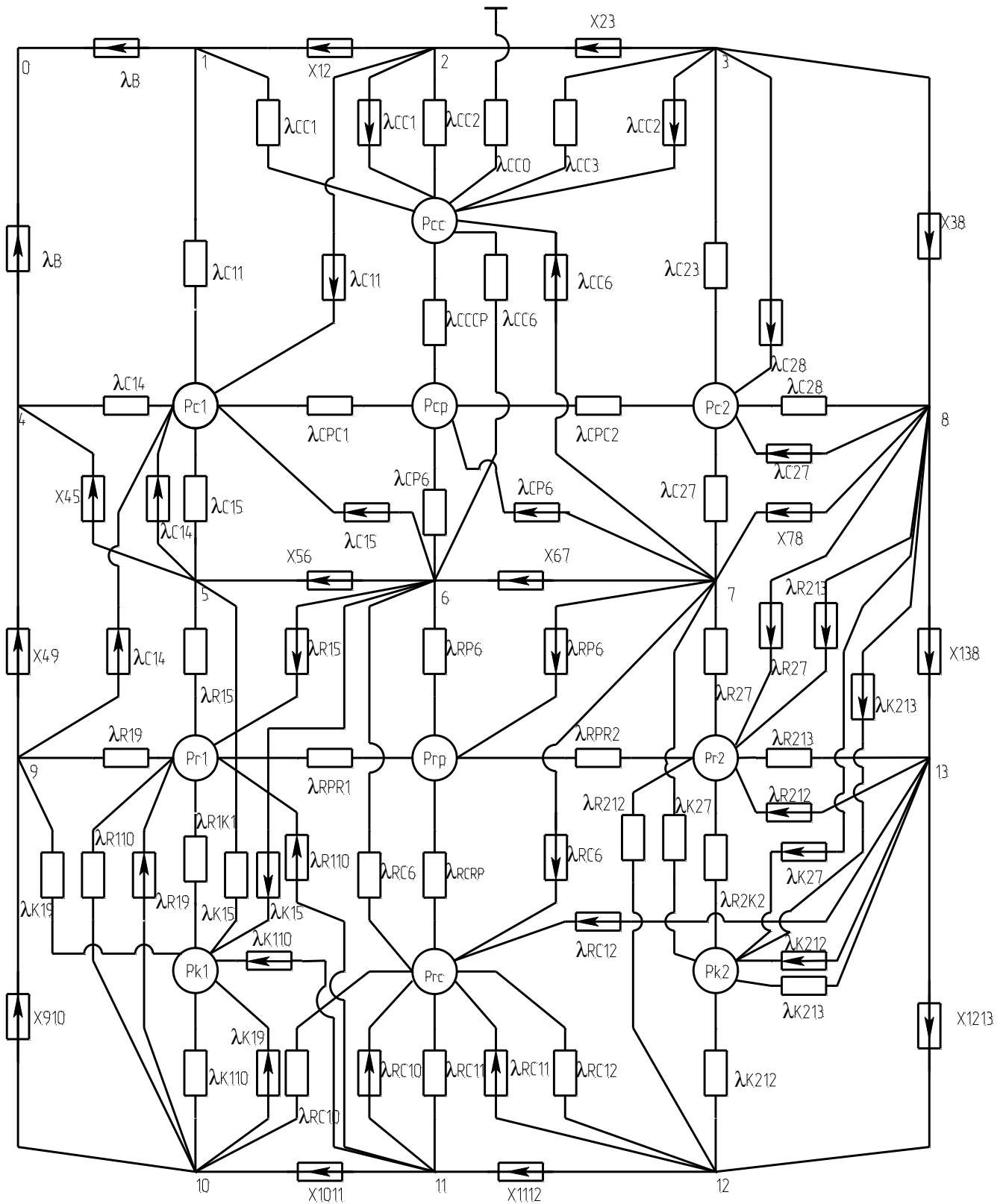


Рис. 1. Тепловая схема замещения АТЭД типа НТА-1200

Таблица 1. Результаты моделирования теплового состояния АТЭД 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 обмотки статора со стороны подачи воздуха	91.4	121.7
Пазовая часть обмотки статора	106.0	121.3
Лобовая часть обмотки статора со стороны противоположной подачи воздуха	97.3	128.8
Сердечник статора	104.8	104.8
Лобовая часть обмотки ротора со стороны подачи воздуха	84.5	105.2
Пазовая часть обмотки ротора	88.0	90.1
Лобовая часть обмотки ротора со стороны противоположной подачи воздуха	88.8	113.7
Сердечник ротора	84.0	87.7
КЗ 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

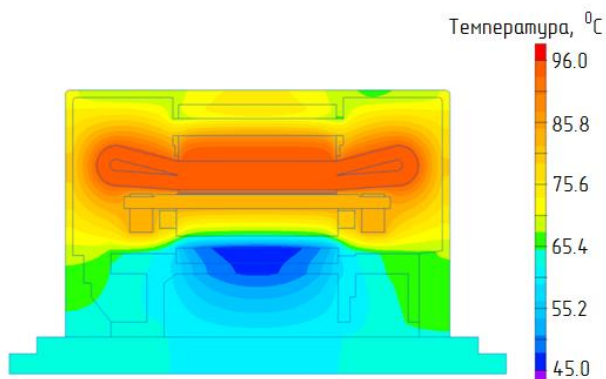


Рис. 2. Моделирование теплового состояния АТЭД при U=3320 В, If=336 А, t=20 °С, n=796 об/мин

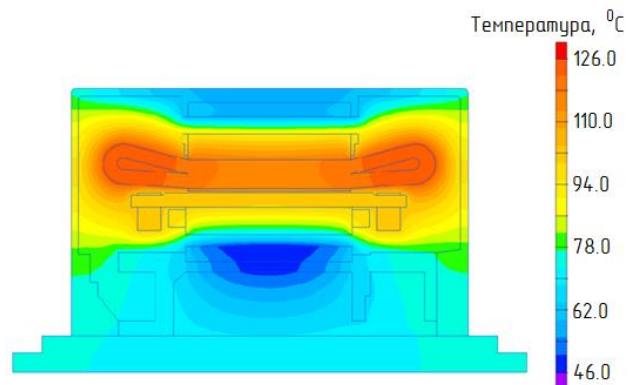


Рис. 3. Моделирование теплового состояния АТЭД при U=3000 В, If=600 А, t=20 °С, n=1306 об/мин

Результаты моделирования показали при режиме номинального тока статора классическое распределение температуры для электродвигателя. Однако, в режимах токовой перегрузки имеется перегрев лобовых частей обмоток электродвигателя. Представленные данные расчетов и моделирования подтвердили, что имеющийся контроль температуры в АТЭД только пазовой

части обмотки электродвигателя при эксплуатации является недостаточным. Необходимым для корректной оценки теплового состояния электродвигателя в режимах перегрузок является получение информации о температурах его лобовых частей.

**Третья глава посвящена** разработке математической модели асинхронного тягового электродвигателя для нестационарных режимов работы.

Учитывая, что условия эксплуатации тяговых электродвигателей связаны с постоянными изменениями режимов работы, которые сопровождаются быстрым и опасным повышением температуры отдельных узлов, весьма актуальным является контроль температуры узлов АТЭД при нестационарных режимах.

С этой целью, созданную тепловую модель необходимо дополнить расчетом температур элементов конструкции электродвигателя при нестационарных режимах его работы. При этом предлагается использовать две методики:

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

Предложенные 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 пересчет температур остальных узлов. С учетом того, что электродвигатели типа НТА-1200 оборудованы датчиком температуры, установленным в сердечник статора, оптимальным является использование данного узла тягового электродвигателя в качестве опорного.

Расчет нестационарного температурного поля асинхронного тягового электродвигателя с помощью коэффициентов влияния основан на использовании коэффициентов корреляции Пирсона. Для расчета температур узлов АТЭД по рассматриваемому методу определены коэффициенты корреляции температуры сердечника статора и температур остальных узлов машины. Расчет корреляционных зависимостей температур сделан по случайной выборке с использованием тепловой математической модели с помощью планирования эксперимента.

Приведение температур узлов электродвигателя, работающего в неустановившихся режимах, от установившихся к текущим значениям производится по выражению:

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

где  $v_i$  – скорректированное значение температуры  $i$ -ого узла;

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

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

$\vartheta_{\text{расч}}$  – значение установившейся температуры сердечника статора, рассчитанное по ТММ;

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

С учетом того, что при нагреве и охлаждении температура узла изменяется по ломанной кривой вместо экспоненты, данный метод дает высокие погрешности. Таким образом, для определения температур узлов АТЭД в нестационарных режимах, более целесообразным представляется применение метода с использованием постоянных нагрева узлов.

Основная идея второго метода заключается в определении значений температур узлов электродвигателя по информации фактического времени их нагрева. Определение фактического времени нагрева ведется по опорному узлу, которым также является сердечник статора электродвигателя.

В основе расчета постоянных нагрева лежит классическая теория нагрева однородного тела. При этом в проводимых расчетах принято допущение: теплопроводность материала тела достаточно большая, внутренними перепадами температуры по сравнению с превышением температуры на поверхности пренебрегаем.

Расчет температур элементов конструкции электродвигателя в реальном времени до наступления установившихся значений производится по информации значений температур опорного узла (фактической, полученной с датчика, установленного на АТЭД и установившейся, рассчитанной с помощью ТММ) и постоянной нагрева данного узла.

Определяется время фактического нагрева опорного узла:

$$t_{\phi} = -T \cdot \ln \left( \frac{\nu_0 - \nu_{\text{уст}0}}{\nu_{\text{о.с.}} - \nu_{\text{уст}0}} \right),$$

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

$\nu_0$  – температура сердечника статора, измеренная при помощи термопары;

$\nu_{\text{уст}0}$  – установившаяся температура сердечника статора, рассчитанная при помощи ТММ;

$\nu_{\text{о.с.}}$  – температура окружающей среды.

Величина фактического времени позволяет рассчитать фактическую температуру элементов конструкции электродвигателя:

$$\nu_i = \nu_{\text{уст}i} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{\phi}}{T_i}} \right) + \nu_{\text{о.с.}} \cdot e^{-\frac{t_{\phi}}{T_i}},$$

где  $\nu_i$  – фактическая температура  $i$ -ого узла;

$\nu_{\text{уст}i}$  – 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 определяем с учетом полученных значений фактических температур узлов двигателя из системы 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 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.

Сопоставление предложенных методов и оценка их точности была сделана на основе экспериментальных кривых нагрева тягового электродвигателя НТА-1200. На рисунке 4 представлены кривые нагрева обмотки статора электродвигателя.

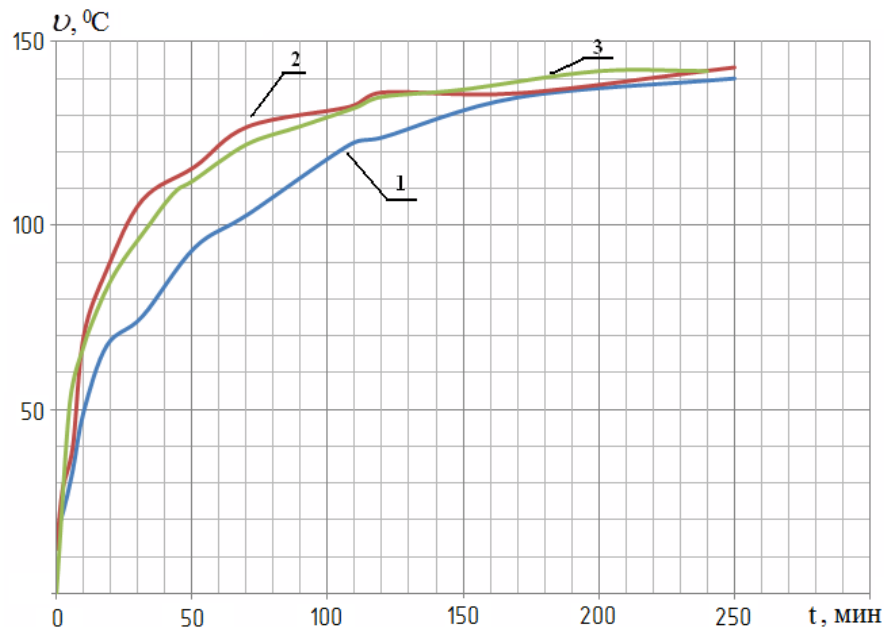


Рис. 4. Кривые нагрева обмотки статора АТЭД при номинальных условиях работы: 1 – расчет нагрева с помощью коэффициентов влияния; 2 – расчет нагрева с помощью постоянных нагрева; 3 – экспериментальная кривая нагрева

Как видно из графика, кривая 1, полученная на основе использования для расчета нагрева обмотки статора корреляционной зависимости от температуры сердечника статора электродвигателя, имеет вид ломаной кривой. Данный метод расчета показывает достаточно большую погрешность между экспериментальными и рассчитанными данными, максимальная величина которой составляет 18 %. Необходимо отметить, что при температурах, близких к установившимся, погрешность между данными становится меньше. Это дает возможность использования данного метода 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 узлов электродвигателя составляет значения выше предполагаемых установившихся. Использование методики через «постоянные нагрева», имеет большую сходимости. Максимально полученная погрешность составляет 8,3 %. Предпочтительным методом корректировки моделирования температурного неустойчившегося поля АТЭД является метод, основанный на определении постоянных нагрева узлов.

**В четвертой главе** рассматриваются вопросы, посвященные разработке системы мониторинга теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей электровозов.

Данная система позволяет получать информацию о текущем тепловом состоянии электродвигателя, которая формируется косвенным путем.

Реализация работы данной системы возможна с совместным использованием следующих средств:

- физических – датчик напряжения, датчик тока статора, датчик частоты вращения, 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 персональном компьютере.

Система мониторинга реализуется в вычислительном блоке, в который заложена разработанная тепловая математическая модель расчета температур узлов электродвигателя. Алгоритм работы системы представлен на рисунке 5.

Во время эксплуатации локомотива входными данными для системы являются: ток статора, напряжение сети, температура окружающей среды, расход охлаждающего воздуха, скорость движения электровоза. В программе производится сравнение скорости движения локомотива с номинальным значением скорости для определения закона регулирования частотой и ее определение. Следующим этапом является расчет частоты вращения АТЭД по величине скорости локомотива. Затем производится расчет параметров тепловой математической модели: расчет проводимостей схемы замещения и расчет потерь. Промежуточным результатом является определение установившегося температурного поля машины при данных входных параметрах. После чего значение температуры сердечника статора сравнивается со значением, полученным с датчика температуры, установленного на электродвигателе. В случае несовпадения температур, когда температурное поле машины не достигло или превысило установившееся температурное поле, происходит пересчет значений температур узлов двигателя к реальным по предложенным ранее методикам.

Апробация системы мониторинга теплового состояния АТЭД проводилась на электровозе 2ЭС10 «Гранит» № 062. Электровозы данной марки оснащены асинхронным тяговым электроприводом марки Siemens.

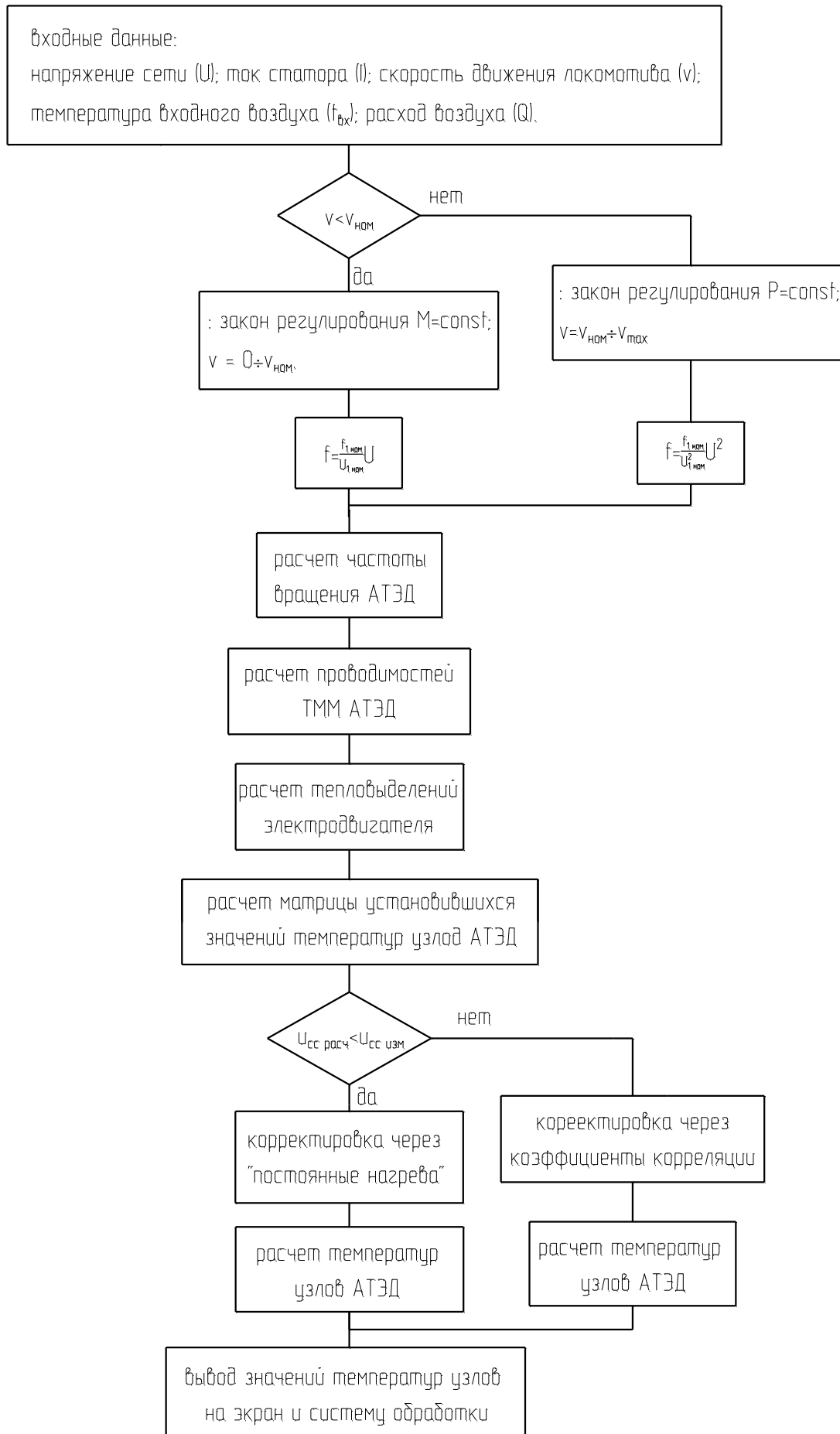


Рис. 5. Алгоритм работы системы мониторинга теплового состояния АТЭД

Приведение параметров математической модели для исследуемого двигателя НТА-1200 к двигателю, установленному на электровозе, позволило экспериментально исследовать адекватность разработанной системы мониторинга теплового состояния АТЭД.

В таблице 2 представлена выборка экспериментальных и расчетных значений установившихся температур узлов электродвигателя по километражу, а также рассчитана погрешность между полученными данными.

Таблица 2 Результаты экспериментальных и расчетных данных

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, $\nu_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	11	11	11	11	11
расход вентилируемого воздуха, $q$ ( $\text{м}^3$ )	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), $\nu_{\text{OC}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	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), $\nu_{\text{CC}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	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), $\nu_{\text{P}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	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 расчетов установившихся значений температур узлов АТЭД от экспериментальных значений не превышает 5 %. Наибольшая погрешность получена для ротора. Полученные результаты подтверждают адекватность составленной тепловой схемы замещения тягового асинхронного электродвигателя, а также правильность определения тепловыделений узлов и параметров тепловых связей элементов конструкции электродвигателя. Это позволяет сделать выводы об адекватности разработанной ТММ для определения установившихся температур узлов электродвигателя.

Апробация системы мониторинга теплового состояния АТЭД для неустановившихся режимов работы проходила для того же электропоезда. На рисунке 6 представлены результаты расчета кривых нагрева и



экспериментальные кривые нагрева сердечника статора и обмотки ротора электродвигателя.

Расхождения полученных расчетных и экспериментальных данных составляют не более 10 %.

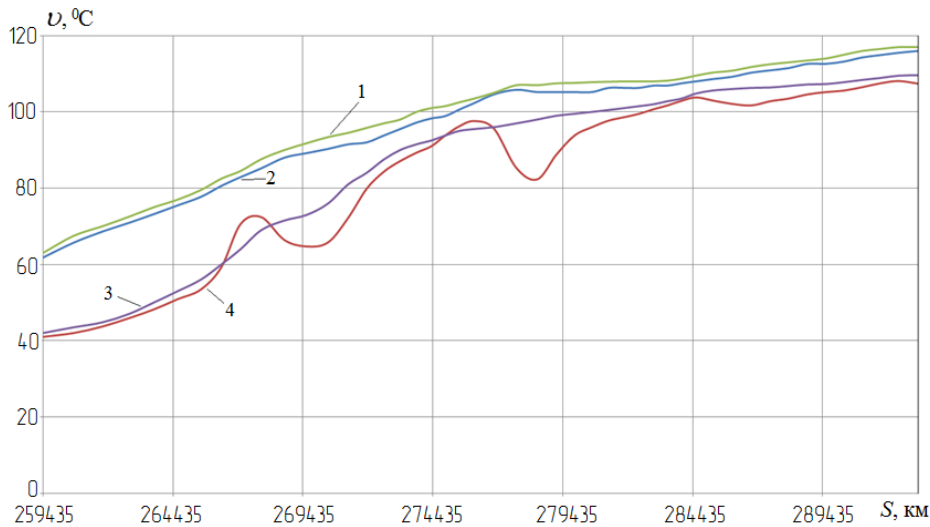


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные кривые нагрева АТЭД (1, 2 – расчетная и экспериментальная кривые нагрева сердечника статора; 3, 4 – расчетная и экспериментальная кривые нагрева обмотки ротора)

**В заключении** изложены выводы и основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе.

В приложениях представлены иллюстрационный материал и акты внедрения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты теоретической и практической работы по созданию системы 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 %.

#### **Научные публикации по теме диссертационной работы в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Дорохина Е.С. Система мониторинга теплового состояния тягового электродвигателя постоянного тока / Е.С. Дорохина, А.А. Хорошко, О.Л. Рапопорт // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 4. – с. 16-21.
2. Дорохина Е.С. Учет нестационарности в тепловой математической модели тягового электродвигателя / Е.С. Дорохина, О.Л. Рапопорт, А.А. Хорошко // Интернет-журнал науковедение. – 2013. – № 3 (16). – с. 1-6. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/83tvn313.pdf>.

3. 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.

4. Голдовская А.А. Актуальность создания и применения системы теплового контроля асинхронных тяговых электродвигателей / А.А. Голдовская, Е.С. Дорохина, О.Л. Рапопорт, Р.О. Асланян // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 2 (32). – с. 315-318.

**Другие научные публикации по теме диссертации:**

5. Дорохина Е.С. Косвенная оценка теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей / Е.С. Дорохина // IV Международная научно-техническая конференция «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии управляемые электромеханические системы» ЕЕССЕС-2011, УрФУ, Екатеринбург, 2011 г., с. 52-55.

6. Дорохина Е.С. Тепловая модель асинхронного тягового двигателя / Е.С. Дорохина // XVII международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», ТПУ, Томск, 2011 г.

7. Дорохина Е.С. Система мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей / Е.С. Дорохина, А.А. Хорошко // XVIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Москва, 2012 г., с. 379.

8. Дорохина Е.С. Математическая модель для автоматической регистрации теплового состояния электродвигателей постоянного тока / Е.С. Дорохина, А.А. Хорошко // IX международная научно-техническая конференция «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии», Омск – 2013 г.

9. Голдовская А.А. Математическая модель асинхронного тягового электродвигателя для контроля теплового состояния. / А.А. Голдовская, Е.С. Дорохина, А.Б. Серов // Сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых. Новосибирский государственный технический университет. Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. «Электротехника. Электротехнология. Энергетика», Новосибирск – 2015 г., с. 87-91.

**Личный вклад автора**

В работах, написанных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: [1, 5, 8, 9] разработка тепловой математической модели тягового электродвигателя, являющейся основой системы мониторинга; [2] разработка методик расчета температурного поля электродвигателя в неустановившихся тепловых режимах; [3] моделирование распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин; [4] моделирование температурных полей асинхронного тягового электродвигателя; [7] разработка алгоритма работы системы мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей.