

На правах рукописи

Карпушина Татьяна Игоревна

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНЫХ КАТУШЕК  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

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

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном  
учреждении высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
**Андреев Александр Михайлович**

Официальные оппоненты:

**Халилов Фирудин Халилович,**  
доктор технических наук, профессор,  
действительный член Академии  
электротехнических наук,  
профессор кафедры «Электротехника,  
техника высоких напряжений»  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный политехнический  
университет»

**Старовойтенков Виктор Валентинович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
проректор по научной работе Федерального  
государственного автономного  
образовательного учреждения  
дополнительного профессионального  
образования «Петербургский энергетический  
институт повышения квалификации»

Ведущая организация: открытое акционерное общество  
«Холдинговая компания «Элинар»  
(ОАО «ХК «Элинар») (Московская область)

Защита состоится « 13 » апреля 2012 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.229.16 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-  
Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « 12 » марта 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.16  
кандидат технических наук, доцент

Журавлева Н.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Усовершенствование электрофизических свойств витковой изоляции обмотки статора высоковольтных электрических машин, непосредственно влияющее на развитие всей системы изоляции, осуществляется либо с помощью исследования и внедрения новых изоляционных материалов, либо путем оптимизации и автоматизации технологического процесса изготовления статорных катушек.

Работа обычного асинхронного двигателя (АД) в составе частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭ) снижает его надежность из-за влияния пикового напряжения, приложенного к изоляции первого витка обмотки статора машины (возникающего при перенапряжениях на концах кабельной линии между автономным инвертором напряжения и АД), и частичных разрядов (ЧР) в пазовой изоляции обмотки статора. Поэтому в основные технические требования при проектировании таких электродвигателей для применения в составе ЧРЭ входит усиленная изоляция обмоток статора (особенно начальных витков) для защиты от перенапряжений и высших гармонических составляющих тока. Внедрение витковой изоляции, характеризующейся высокой кратковременной и длительной электрической прочностью, пониженными диэлектрическими потерями в области рабочих температур, высокой стойкостью к ЧР позволит повысить рабочие характеристики и надежность высоковольтных ЭМ.

Применение автоматизированного способа изготовления обмоток и современной системы контроля качества изделий в процессе производства позволит снизить количество отказов ЭМ при эксплуатации. Также появится возможность повышения объемов выпуска в целом, выполнения мелкосерийных заказов на модернизацию обмоток электрических машин различных серий и типов. Все это уменьшит сроки качественного обновления парка ЭМ.

Исследованию витковой изоляции электрических машин и новых типов обмоточных проводов посвящены работы Пыхтина В.В., Пешкова И.Б., Гнедина А.А., Мелешенко В.Н., J.A. Williams, Schuler R., S. Filliben, R. Brutsch, A. Bjorklund, Saeed, U. Naq и др. Однако, вопросы, касающиеся изучения и внедрения новых типов витковой изоляции с повышенными значениями электрической прочности, стойкостью к ЧР и низким значением диэлектрических потерь при максимальной рабочей температуре, в последние десятилетия оставались на втором плане и в настоящее время требуют подробного научного исследования.

**Цель диссертационной работы** заключается, во-первых, в исследовании и выборе новых типов витковой изоляции с улучшенными диэлектрическими свойствами (пониженными диэлектрическими потерями, высокой кратковременной и длительной электрической прочностью, стойкостью к ЧР) для автоматизированного процесса производства катушек высоковольтных электрических машин (в том числе, тяговых электродвигателей переменного тока), а, во-вторых, в создании методики контроля качества витковой изоляции с целью оптимизации технологии автоматизированного изготовления статорных катушек электрических машин.

### **Задачи, решаемые в диссертационной работе.**

1. Разработка комплексной экспериментальной методики исследования диэлектрических свойств витковой изоляции электрических машин в сильном электрическом поле.
2. Изучение влияния конструктивных особенностей слюдосодержащей и полиимидно-фторопластовой изоляции обмоточных проводов, а также технологических параметров автоматизированного процесса изготовления катушек на электрические свойства витковой изоляции.
3. Разработка и внедрение пооперационной методики контроля качества витковой изоляции в процессе автоматизированного изготовления статорных катушек.
4. Разработка основных параметров автоматизированных технологических процессов, предназначенных для создания обмоток с улучшенными характеристиками для высоковольтных электрических машин с катушечной обмоткой статора.

**Основные методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы экспериментального исследования свойств диэлектриков, теории электрического и теплового старения диэлектриков в переменном электрическом поле, теории электрических цепей, статистического анализа.

### **Научная новизна работы:**

1. Впервые при исследовании изоляции обмоточных проводов (марок ПМС, ПМС-М, ППИПК-2, ППИПКС-2 и новых модифицированных) для высоковольтных электрических машин, предназначенных для работы в составе ЧРЭ, помимо традиционно применяющихся методов испытаний, предложено использование методик определения диэлектрических свойств в сильном электрическом поле, которые позволяют путем поэтапных исследований модельных, макетных образцов и реальных катушек улучшить свойства витковой изоляции.
2. Посредством комплексных экспериментальных исследований, включающих разработку и изучение опытных вариантов систем витковой изоляции, впервые установлено, что применение эмалевого покрытия (вместо слоя ПЭТ-пленки) в конструкции изоляции на основе слюдосодержащих пленочных материалов снижает интенсивность ЧР, в результате чего повышается ее длительная электрическая прочность.
3. Выявлен эффект увеличения кратковременной и длительной электрической прочности витковой изоляции на основе короностойкой полиимидно-фторопластовой пленки (Каптон FCR) при нанесении слоев в перекрестном направлении (на примере оптимизации конструкции изоляции обмоточного провода ППИПКС-2).
4. Впервые показано влияние конструктивных особенностей слюдосодержащей и полиимидно-фторопластовой изоляции обмоточных проводов, а также технологических параметров автоматизированного процесса изготовления катушек (например, давления, скорости растяжки, времени удерживания на формообразующих операциях) на диэлектрические свойства витковой изоляции, что доказано с помощью проведенных пооперационных испытаний витковой изоляции высоковольтными импульсами с коротким фронтом с применением критерия количественной оценки.

**Практическая значимость** полученных результатов состоит в следующем:

1. Исследованы и внедрены в производство обмоточных проводов электроизоляционные слюдосодержащие материалы (Кондуктофол 0264 и 2009, Элмикафол 52801) с улучшенными электрическими свойствами.
2. Впервые разработана технология и внедрены технические условия на изготовление статорных катушек для высоковольтных электрических машин с изоляцией, имеющей улучшенные характеристики (надежность витковой изоляции, стойкость к перенапряжениям и импульсным нагрузкам), с применением обмоточных проводов со слюдосодержащей изоляцией (ТУ 339000-001-82126676-2011).
3. Исследованы и внедрены в автоматизированное производство статорных катушек электроизоляционные полиимидные материалы с короностойкими свойствами (в частности, в обмоточных проводах марки ППИПКС), предназначенные для создания витковой изоляции статорной обмотки тяговых электродвигателей переменного тока. Разработана технология изготовления изоляции статорной обмотки и ее автоматизированного производства для серийного выпуска тяговых электродвигателей повышенной надежности для применения в составе ЧРЭ.
4. Впервые разработана и внедрена методика пооперационного контроля качества витковой изоляции в процессе автоматизированного производства с помощью испытаний импульсами напряжения, с помощью которой также возможно внедрение новых электроизоляционных материалов в автоматизированный процесс изготовления статорных катушек, а также оптимизация технологических режимов работы оборудования.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты комплексных исследований диэлектрических свойств различных типов витковой изоляции (комбинированной слюдосодержащей и полиимидно-фторопластовой) при их применении при автоматизированном производстве статорных обмоток.
2. Принципы выбора электроизоляционных материалов, конструкция и технология изготовления витковой изоляции (F, H и C классов нагревостойкости) с улучшенными электрическими свойствами для высоковольтных электрических машин.
3. Методика и система пооперационного контроля качества витковой изоляции в процессе автоматизированного изготовления статорных катушек.

**Реализация результатов.** Экспериментальные результаты исследований использованы при внедрении обмоточных проводов ПМС и ПМС-М в производство на ОАО «Псковский кабельный завод», а также для разработки технологии автоматизированного процесса изготовления статорных катушек с усовершенствованной системой изоляции для высоковольтных электрических машин в ООО «РЭМ энд Коил» (Россия), что подтверждено соответствующими актами об использовании. Методика пооперационного контроля качества витковой изоляции используется в ООО «РЭМ энд Коил» для внедрения новых материалов, а также подбора оптимальных режимов работы оборудования.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты МКЭЭЭ-2008» (Алушта, 2008 г.), IV Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (Казань, 2009 г.), VII Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2009 г.), XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2009 г.), Международной научно-технической конференции «Безопасность, надежность, эффективность в электроэнергетике и энергопотребляющих установках» (Санкт-Петербург, 2010), V Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция - 2010» (Санкт-Петербург, 2010 г.), ПХ Международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики - 2011) (Санкт-Петербург, 2011 г.), VIII Международной научно-практической конференции «Электроизоляционные материалы и системы изоляции электрических машин» (Московская область, 2011 г.) и других.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 – в изданиях перечня ВАК.

**Структура и объём работы.** Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования, и одного приложения. Диссертация изложена на 177 страницах, содержит 55 таблиц и 86 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи, приведены основные научные и практические результаты проведенных исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** анализируются основные тенденции усовершенствования витковой изоляции электрических машин. Постоянное увеличение удельных нагрузок, необходимость повышения надежности электрических машин и работы в составе ЧРЭ привели к ужесточению требований к характеристикам ( $\text{tg}\delta$ , стойкости к ЧР, длительной электрической прочности, в том числе, в условиях импульсных нагрузок и перенапряжений) витковой изоляции обмоток, а также совмещению функций изоляции витка и обмоточного провода. Однако, количество и информативность современных публикаций по вопросам усовершенствования витковой изоляции ограничены стремлением авторов решить узкие научно-практические вопросы, такие как их выбор для того или иного типа электрической машины, исследование характеристик ЧР, сравнение разных типов путем определения электрической прочности. Создана комплексная система испытаний, обеспечивающая изучение свойств витковой изоляции (в том числе после электрического и теплового старения) статорных катушек при помощи хорошо известных и апробированных методов, а также ряда оригинальных методик.

Возникшая в настоящий момент в России проблема масштабной модернизации энергетического оборудования, требующая повышения производственных мощностей и качества выпускаемых изделий, может быть решена путем автоматизации производства, в частности, статорных катушек электрических машин. Таким образом, усовершенствование витковой изоляции статорных катушек происходит как путем создания новых изоляционных материалов (слюдосодержащих, полиимидно-фторопластовых (Рис.1)) с улучшенными

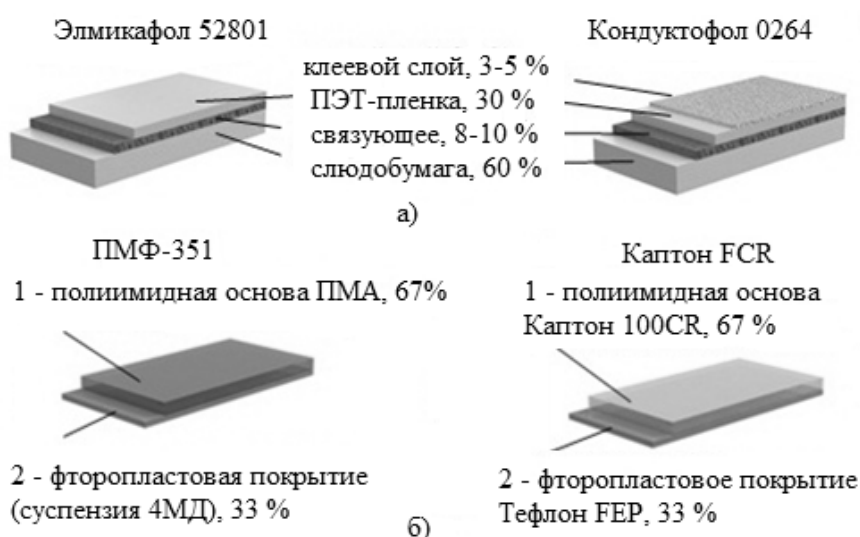


Рис. 1. Конструкция исследуемых пленок для витковой изоляции: а) слюдосодержащих; б) полиимидно-фторопластовых

характеристиками, так и путем совершенствования технологических процессов изготовления. В настоящее время имеется недостаток информации о способах исследования и внедрения новых материалов для витковой изоляции электрических машин, которые могут быть использованы для автоматизированных производств. Для автоматизированного производства катушек высоковольтных и тяговых электрических машин не выработаны принципы конструирования витковой изоляции и оптимизации параметров технологического процесса, не определены необходимые для этого технологические параметры и методики их оценки.

Во второй главе приведены описания разработанных модельных, макетных образцов и реальных катушек, методик исследования диэлектрических свойств, характеристик ЧР, а также изучения электрического и теплового старения витковой изоляции. Объектами исследования являлись обмоточные провода со слюдосодержащей комбинированной изоляцией марок ПМС и ПМС-М (с материалами Элмикафол 52801 и Кондуктофол 0264), а также с полиимидно-фторопластовой изоляцией ППИПК-2 и короностойкой ППИПКС-2 (с пленками ПМФ-351 и Каптон 150FCR019). Вследствие относительно невысокой сложности конструкции и стоимости большинства модельных образцов, возможно, проведение испытаний в широком диапазоне испытательных условий с использованием большого объема статистического материала. На рис.2 показано устройство для термоциклического старения макетов витковой изоляции.

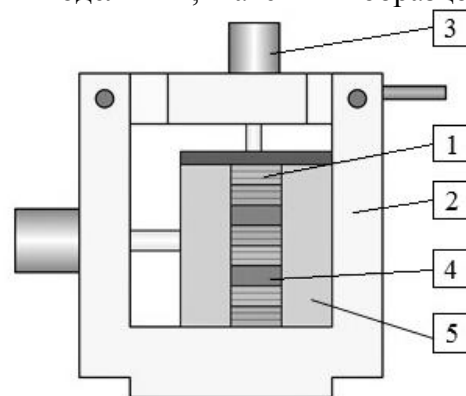


Рис. 2. Устройство для термоциклических испытаний изоляции проводов при постоянном давлении (1 - стопка проводов; 2 - трубочина; 3 - гидроцилиндр; 4 - стопорная планка; 5 - нагревательный элемент)

Для пооперационного технологического контроля качества витковой изоляции в процессе изготовления катушечных обмоток статора предложены: методика испытаний витковой изоляции импульсами напряжения; количественный критерий сравнения кривых затухающих колебаний напряжения в испытываемых катушках, который позволяет обнаружить дефекты витковой изоляции

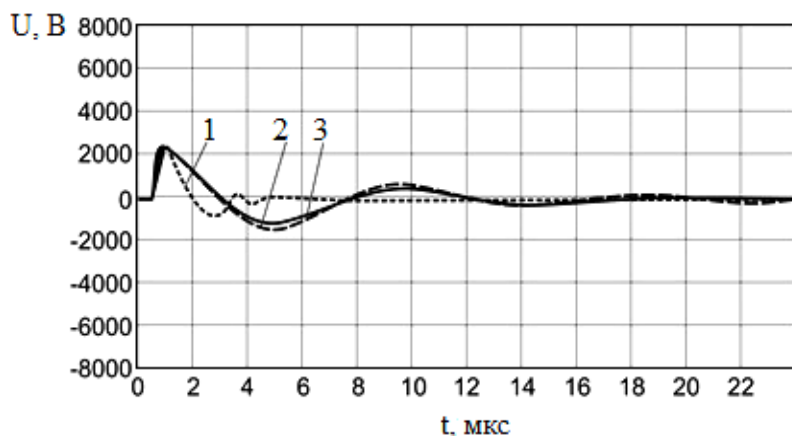


Рис. 3. Результаты сравнения междувитковой изоляции трех катушек: 1 – с коротким замыканием витков; 2 – с хорошей витковой изоляцией; 3 – последовательно включенная с сопротивлением 2,5 Ом

вопросы применения новых типов витковой изоляции для современных высоковольтных и тяговых электрических машин, внедрения современных материалов в автоматизированный процесс производства.

**Третья глава** содержит результаты экспериментального исследования изоляции новых типов обмоточных проводов для высоковольтных (F класса нагревостойкости) и тяговых (H, C классов) электрических машин.

Существует несколько вариантов конструкции обмоточных проводов со слюдосодержащими комбинированными пленками: с их нанесением на медную жилу, с адгезивным слоем (вверх или вниз) (марки ПМС-ММв, ПМС-ММн), на ПЭТ-пленку (ПМС и ПМС-М) или эмаль-провод (ПМС-МЭ). Распределения  $E_{пр}$  (при напряжении переменного тока, 50 Гц) изоляции образцов ПМС, ПМС-М, а также опытных партий с модифицированной конструкцией ПМС-ММв, ПМС-ММн и ПМС-МЭ, приведенные на рис.4, показали, что самая высокая  $E_{пр}$  изоляции наблюдалась у проводов ПМС и ПМС-М, у которых слюдосодержащий материал наносится на ПЭТ-пленку. Способ нанесения адгезивного слоя у ПМС-ММн, ПМС-ММв не дает разницы в  $E_{пр}$  изоляции. Применение предварительно нанесенного эмалевого покрытия на

(рис. 3). Эта методика и критерий оценки качества изоляции также позволяют осуществлять оптимальный подбор необходимых режимов оборудования при настройке на автоматизированный выпуск обмоток различных типов электрических машин и внедрении в производство новых материалов. Данный комплекс испытаний позволил обоснованно решать

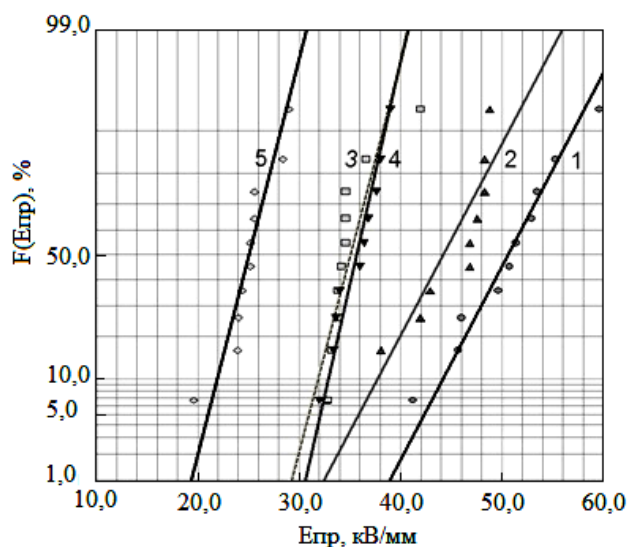


Рис. 4. Распределение  $E_{пр}$  изоляции проводов: 1 – ПМС, 2 – ПМС-М, 3 – ПМС-ММв, 4 – ПМС-ММн, 5 – ПМС-МЭ



медной шине (ПМС-МЭ) снизило  $E_{пр}$ , вероятно, необходимо применение более тонкой и электрически прочной эмали. Изоляция проводов ПМС с применением отечественного материала Элмикафол 52801 имеет более высокие значения  $E_{пр}$ , чем изоляция образцов ПМС-М (с адгезивным слоем) с импортной лентой Кондуктофол 0264 (производства Изовольта, Австрия). Доказано, что у проводов со слюдосодержащей пленочной изоляцией ПМС/0,44 кратковременная электрическая прочность изоляции значительно выше (более 20 %), чем у образцов марки ПЭТВСДТ-1 с эмалево-стекловолоконистой и ПЭТСЛО-2 с эмалево-стеклополиэфирной изоляцией при сравнимой толщине.

Определено влияние различных технологических факторов на электрическую прочность изоляции обмоточных проводов. Операция кратковременной термопрессовки позволяет повысить  $E_{пр}$  (около 1,5-2 %). При испытании образцов ПМС, изогнутых на стержнях с разными диаметрами, установлено, что  $E_{пр}$  слюдосодержащей комбинированной изоляции: 1) на малых радиусах (равных трем - четырем размерам широкой стороны проволоки) снижается примерно на 20 %; 2) снижается при увеличении сечения медной проволоки.

Измерение диэлектрических потерь (рис. 5) в изоляции проводов ПМС и ПМС-М показало, что по мере увеличения приложенного к изоляции напряжения происходит незначительный рост  $tg\delta$  изоляции проводов ПМС и ПМС-М. После того, когда  $U$  достигает 1000 В (что соответствует  $U_{нчр}$ ), возникают ЧР в газовых включениях изоляции, состоящей из несколько слоев лент, что вызывает дополнительные диэлектрические потери и значения  $tg\delta$  начинают возрастать.

Провод ПМС-М с применением адгезивного слоя (то есть с более плотным прилеганием ленты к медной жиле) имеет более низкие диэлектрические потери в изоляции (чем у ПМС), удовлетворяющие общепринятым требованиям к системам изоляции статорных обмоток до температуры 125 °С (до 0,01). При повышении температуры до 160 °С наблюдался сильный рост  $tg\delta$  изоляции как у провода ПМС, так и ПМС-М. В разных температурных зонах на диэлектрические потери в слюдосодержащей изоляции могут влиять различные физические явления, происходящие за счет изменения температуры. А именно, в низкотемпературной зоне, по-видимому, проявляется межслоевая поляризация, а в высокотемпературной – главным образом, ионная проводимость. Далее было установлено, что интенсивность ЧР в слюдосодержащей изоляции образцов с адгезивным слоем типа ПМС-М (с применением импортной ленты Кондуктофол 0264) и проводов

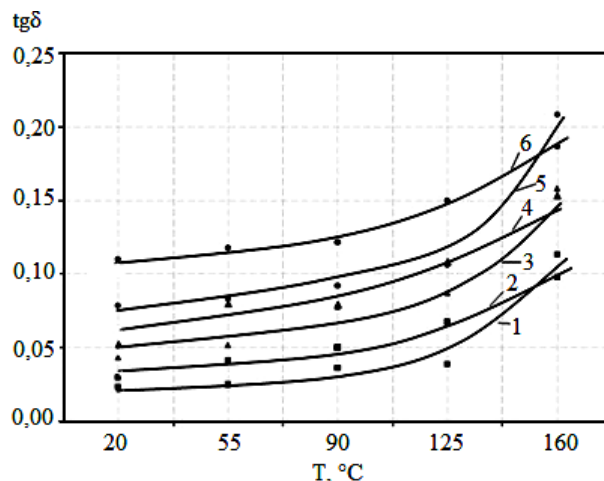


Рис. 5. Зависимости  $tg\delta=f(T)$  изоляции проводов при разных значениях  $U$ :  
 1 – ПМС-М при 0,5 кВ, 2 – ПМС при 0,5 кВ,  
 3 – ПМС-М при 1,5 кВ, 4 – ПМС при 1,5 кВ,  
 5 – ПМС-М при 3,0 кВ, 6 – ПМС при 3,0 кВ

ПМС (с отечественным материалом Элмикафол 52801) почти одинаковая и стабилизируется с увеличением времени испытания. Причем, у образцов, прошедших термоопрессовку, значения характеристик ЧР ниже, чем у исходных (рис. 6), что обусловлено тем, что данная операция

снижает пористость и дефектность слюдобумаги, равномерно пропитывающейся связующим при нагреве, а также обеспечивает плотное прилегание изоляционного материала к медной жиле.

Разработанные модифицированные провода ПМС-МЭ со слюдосодержащей

комбинированной лентой, нанесенной на эмаль-провод, обладают меньшей интенсивностью ЧР в изоляции по сравнению с ПМС-М и ПМС.

Экспериментальное изучение электрического старения слюдосодержащей комбинированной изоляции проводов ПМС и ПМС-М производилось двумя способами: путем испытаний до пробоя при постоянном значении испытательной напряженности (рис.7), при различных скоростях ее подъема.

Время наработки до отказа при высоких испытательных напряженностях (20 кВ/мм и 30 кВ/мм) изоляции проводов ПМС и ПМС-М практически одинаковы. В ходе дальнейшего исследования закономерностей

электрического старения изоляции этих проводов (и

конструктивно модифицированных образцов) проведены испытания при линейном подъеме испытательного напряжения (50 Гц) с двумя различными скоростями 10,7 В/с и 167,7 В/с, что соответствует  $\dot{E}_1=0,052$  кВ/(мм·с) и  $\dot{E}_2=0,815$  кВ/(мм·с). Значения скоростей подъема испытательных напряженностей электрического поля определялись с учетом толщины изоляции исследуемых образцов. В таблице 1 представлены параметры распределения  $E_{пр}$  изоляции проводов ПМС и ПМС-М при различных скоростях подъема испытательной напряженности.

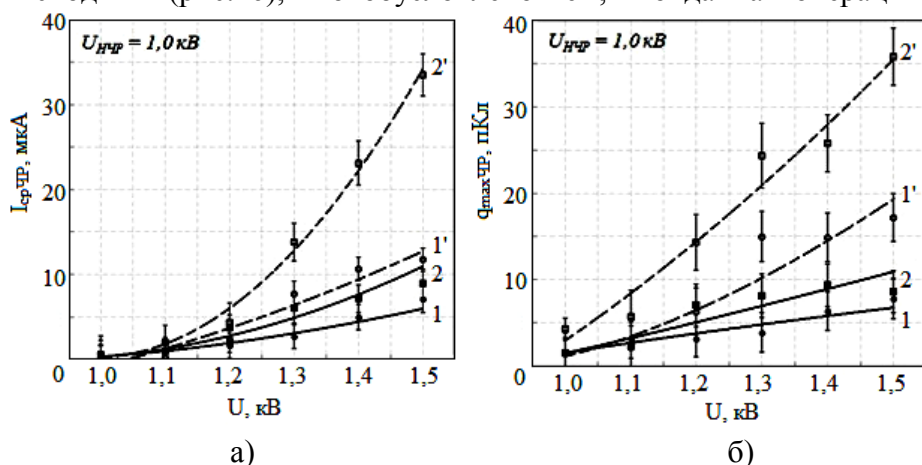


Рис. 6. Зависимости характеристик ЧР от U в изоляции образцов (1', 2' – до термоопрессовки ПМС и ПМС-М; 1, 2 – после термоопрессовки ПМС и ПМС-М, соответственно): а) максимальный кажущийся заряд  $q_{maxЧР}$ ; б) средний ток ЧР  $I_{срЧР}$

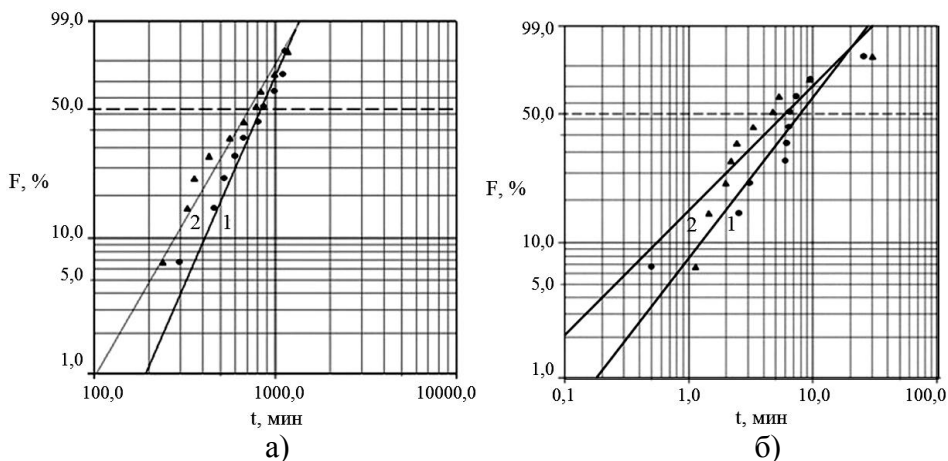


Рис. 7. Распределение  $\tau$  изоляции проводов: 1 – ПМС, 2 – ПМС-М: при  $E_1=20$  кВ/мм, б) при  $E_1=30$  кВ/мм

Параметры распределения  $E_{пр}$  проводов ПМС/0,44 и ПМС-М/0,44

Образец провода	$\dot{E}_{исп}$ , кВ/(мм·с)	Параметр положения $E_{пр63\%}$ , кВ/мм (доверительные границы при $\alpha=0,9$ )	Параметр формы $\beta$
ПМС/0,44	0,052	41,74(40,43-43,09)	13,54(10,01-18,32)
ПМС/0,44	0,815	52,86(50,88-54,92)	11,23(8,26-15,27)
ПМС-М/0,44	0,052	39,14(38,08-40,22)	15,43(10,88-21,87)
ПМС-М/0,44	0,815	46,26(44,78-47,79)	12,95(9,04-18,53)

Расчетные значения показателя степени  $m$  для изоляции проводов, изготовленных с применением комбинированных слюдосодержащих пленок в сочетании с лавсановой пленкой, составляют для ПМС/0,44 ( $m=(10,6\pm 0,3)$ ), для ПМС-М/0,44 ( $m=(15,1\pm 0,3)$ ). Аналогичным образом были определены показатели степени  $m$  закона электрического старения изоляции для модификаций изоляции проводов ПМС-ММн (27,3) и ПМС-МЭ (28,0).

Таким образом, образцы обмоточных проводов ПМС и ПМС-М промышленных партий, изготовленных с применением комбинированных слюдосодержащих пленок, обладают высокой длительной электрической прочностью, количественно сопоставимой с традиционно применяющимися системами корпусной изоляции. Длительная электрическая прочность у модификации провода ПМС-МЭ (с эмалевым слоем) выше, чем у провода ПМС-ММн с изоляцией, нанесенной на медную жилу. Несмотря на небольшую разницу в скоростях подъема испытательных напряженностей электрического поля, можно предположить, что предложенные нами модификации обмоточных проводов ПМС-ММ и ПМС-МЭ имеют большую длительную электрическую прочность, по сравнению с промышленно выпускаемыми марками ПМС и ПМС-М. Для продолжения исследования перспективной модификации ПМС-МЭ необходимо применение в ее конструкции более тонкого и электрически прочного эмалевого покрытия, чем у существующих в настоящее время в России стандартных эмаль-проводов.

Поскольку одним из факторов старения изоляции обмоток электрических машин является температурное воздействие, то проводилось определение стойкости изоляции исследуемых проводов ПМС и ПМС-М к воздействию термоциклов (на макетах, установленных в устройстве (рис. 2)). Количество термоциклов «нагрев-охлаждение» составило 65 по 12 часов (до 160 °С, при постоянном давлении) в три этапа (260, 520 и 780 ч.). Критериями стойкости к старению выбраны изменения значений  $\operatorname{tg}\delta$ ,  $\Delta\operatorname{tg}\delta$ ,  $E_{пр}$ . Уже после второго этапа старения, диэлектрические потери в изоляции провода ПМС-М существенно возросли в области высоких температур (рис. 8). После теплового старения образцов в течение 780 часов  $E_{пр}$  изоляции ПМС (с применением

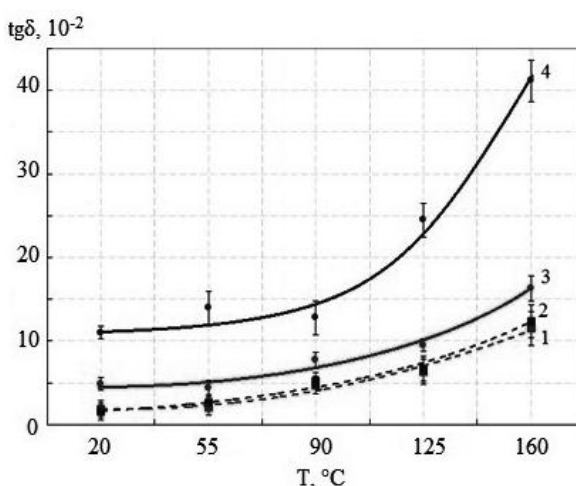


Рис. 8. Зависимость  $\operatorname{tg}\delta=f(T)$  изоляция проводов после 520 ч старения: 1 – ПМС при  $U=0,5$  кВ, 2 – ПМС-М при  $U=0,5$  кВ, 3 – ПМС при  $U=1,5$  кВ, 4 – ПМС-М при  $U=1,5$  кВ

отечественной ленты Элмикафол 52801) были существенно выше ((23,8±3,9) кВ/мм), чем у ПМС-М с адгезивным слоем (с Кондуктофол 0264) ((14,3±5,7) кВ/мм). Применение провода ПМС возможно в ответственных высоковольтных электрических машинах, у которых температура обмоток может достигать 160 °С, так как после длительного теплового старения значения tgδ остались достаточно низкими на всем диапазоне исследованных температур и напряжений.

Новый тип витковой изоляции из слюдосодержащих комбинированных материалов предлагается использовать взамен широко применяемой конструкции, состоящей из стекловолоконистой изоляции обмоточного провода (например, ПСД, ПСДК) и нанесенного на нее дополнительного электроизоляционного слоя (ленты ЛСЭ-934-ТПЛ и аналогичных). Поэтому было выполнено сравнение электрической прочности этих двух типов (вариант 2 – ПСДК с дополнительной изоляцией и вариант 1 - ПМС/0,64, с равной толщиной) междувитковой изоляции (ВИ) на макетах катушек двумя способами испытаний до пробоя: импульсами напряжения с коротким фронтом (с нанесением корпусной изоляции, результаты приведены в таблице 2) и напряжением переменного тока промышленной частоты (таблица 3).

Таблица 2

**Результаты испытаний ВИ катушек импульсным напряжением**

Вариант	U <sub>исп</sub> , кВ (на 1 виток)	U <sub>исп</sub> , кВ (на катушку)	U <sub>пр</sub> , кВ
1	5,0	30,0	Пробоев не было
2	3,8	22,8	15,3±1,8

Таблица 3

**Результаты испытаний ВИ катушек напряжением переменного тока, 50 Гц**

Вариант	U <sub>пр</sub> , кВ		
	На пазовой части	В месте перехода пазовой части в лобовую (радиус изгиба 30 мм)	На головках лобовых частей (радиус изгиба 15 мм)
1	17,3±1,9	12,9±1,7	13,0±1,0
2	5,8±0,4	4,4±1,0	3,5±0,5

Таким образом, применение обмоточных проводов со слюдосодержащей комбинированной изоляцией позволяет повысить кратковременную электрическую прочность витковой изоляции катушки при воздействии как импульсного, так и переменного напряжения (50 Гц).

В качестве объектов исследования для витковой изоляции тяговых электродвигателей (Н, С класса) использовались современные типы обмоточных проводов с полиимидно-фторопластовой изоляцией отечественного и зарубежного производства (рис. 1), такие как ППИПК-2, ППИПКС-2и модификации ППИПКС-2(М) (с перекрытием более 50% и нанесением слоев пленок в противоположных направлениях) (таблица 4).

Таблица 4

**Значения E<sub>пр</sub> изоляции исследованных проводов до и после изгиба**

Тип провода	E <sub>пр</sub> , кВ/мм		
	До изгиба	Изгиб по меньшей стороне	Изгиб по широкой стороне
ППИПК-2	111,8±6,8	69,1±4,6	98,2±6,0
ППИПКС-2	70,6±9,1	62,0±6,9	68,2±6,3
ППИПКС-2(М)	81,3±2,6	65,2±6,0	71,4±4,5

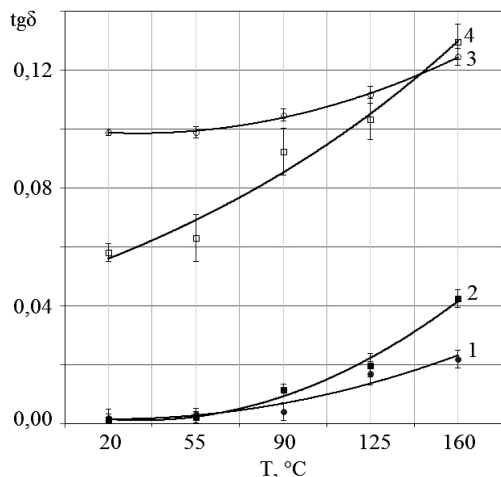


Рис. 9. Зависимость  $tg\delta=f(T)$  изоляции проводов: 1,3 – ППИПК-2 при 0,5 кВ и 3,0 кВ; 2, 4 – ППИПКС-2 при 0.5 кВ и 3.0 кВ

слюдосодержащей (рис. 10) за счет плотного прилегания расплавленного фторопластового покрытия к медной жиле.

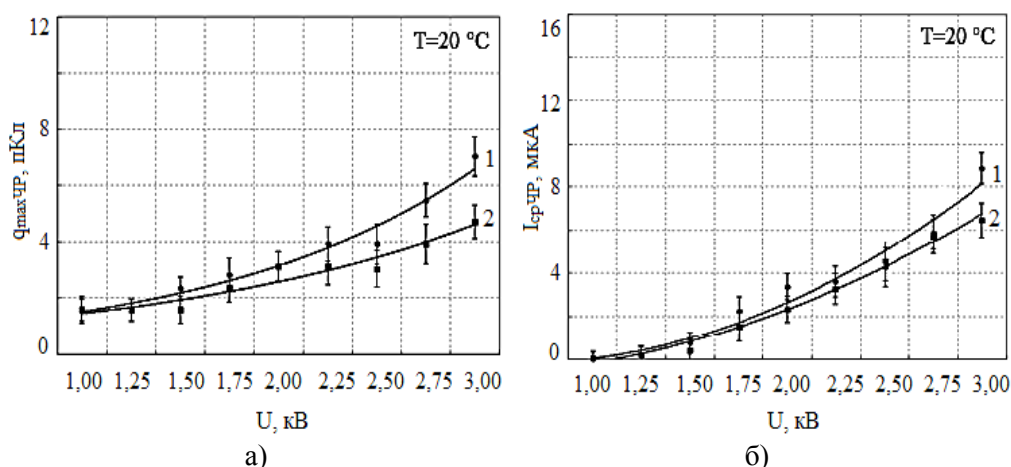


Рис. 10. Зависимости характеристик ЧР полиимидно-фторопластовой изоляции проводов от U (1 – ППИПК-2, 2 – ППИПКС-2): а)  $q_{maxCR}=f(U)$ ; б)  $I_{CR}=f(U)$

По результатам ускоренного электрического старения (с различными скоростями подъема  $E_{исп}$ ) исследованных образцов полиимидно-фторопластовой изоляции определены расчетные показатели степени  $m$  уравнения электрического старения, составившие для ППИПК-2 –  $(6,5 \pm 0,4)$ , ППИПКС-2 –  $(6,1 \pm 0,1)$  и разработанной модификации ППИПКС-2 –  $(7,3 \pm 0,6)$ .

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований витковой изоляции высоковольтных и тяговых электрических

Результаты измерений  $tg\delta$  полиимидно-фторопластовой изоляции образцов (рис. 9), показали, что при напряжениях более 1 кВ (после появления ЧР) практически на всем диапазоне возможных рабочих температур (60 – 90) °С обычные провода ППИПК-2 имеют более высокие диэлектрические потери в изоляции, чем ППИПКС-2 с применением короностойкой пленки.

Однако, при высоких температурах (125 – 160) °С значения  $tg\delta$  изоляции провода ППИПКС-2 становятся большими, чем у ППИПК-2. Интенсивность ЧР в полиимидно-фторопластовой изоляции ниже, чем в

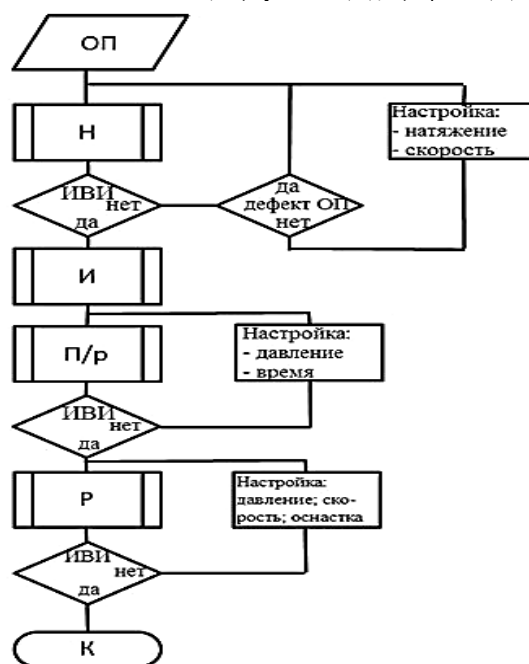


Рис. 11. Схема контроля качества витковой изоляции: ОП – обмоточный провод; Н – намотка; ИВИ – испытания витковой изоляции; И – изолирование; П/р – предварительная растяжка; Р – растяжка; К – катушка с хорошей витковой изоляцией

машин на реальных катушках. Эти испытания проводились с помощью разработанной методики пооперационного контроля качества, основанной на импульсных испытаниях (рис. 3) прибором D12R (Бейкер, США) (с применением двух способов оценки регистрируемых откликов (затухающих колебаний) «по огибающей» и «по амплитуде»).

Схема пооперационного контроля (рис. 11) при внедрении новых электроизоляционных материалов заключается в том, чтобы оценивать качество витковой изоляции после каждого технологического этапа, оперативно меняя настройки только текущей операции, а не всего процесса. При успешном прохождении испытаний витковой изоляции (ИВИ) катушка считается хорошей (КРК меньше, чем  $KPK_{max}$ ), а при большом значении КРК – отбраковывается, происходит наладка станка.

### **Основные выводы и результаты работы:**

1. Экспериментально установлено, что витковая изоляция статорных катушек высоковольтных электрических машин, изготовленная на основе обмоточных проводов ПМС и ПМС-М со слюдосодержащими комбинированными материалами (Элмикафол 52801 и Кондуктофол 0264, соответственно), обладает высокой кратковременной ((44-50) кВ/мм) и длительной электрической прочностью, низкими значениями тангенса угла диэлектрических потерь (до 0,01) во всем возможном диапазоне рабочих температур (от 55 до 125 °С). Изоляция обмоточных проводов ПМС и ПМС-М обладает длительной электрической прочностью, количественно сопоставимой с традиционно применяющимися системами корпусной слюдосодержащей изоляции (по показателям степени  $m$ , равным, соответственно, 10,6 и 15,1).

2. Установлено, что наилучшими свойствами из исследуемых образцов витковой изоляции обладает вариант с применением обмоточного провода ПМС с отечественной изоляционной лентой Элмикафол 52801 (она имеет более высокие значения  $E_{пр}$ , чем изоляция образцов ПМС-М (с адгезивным слоем) с импортной лентой Кондуктофол 0264 как до, так и после теплового старения и более низкие значения диэлектрических потерь).

3. Показано существенное преимущество витковой слюдосодержащей изоляции по сравнению с различными используемыми в настоящее время видами изоляции (эмалево-стеклополиэфирной (ПЭТСЛО-2), эмалево-стекловолоконистой (ПЭТВСДТ), а также стекловолоконистой изоляцией (ПСДК) с дополнительным изоляционным слоем из слюдяной ленты (ЛСЭП-934-ТПл)) для достижения высокой электрической прочности (стойкости к кратковременным перенапряжениям) при работе в составе ЧРЭ.

4. Исследование разработанных модификаций изоляции обмоточных проводов ПМС-ММ (без слоя ПЭТ-пленки) и ПМС-МЭ (с эмалевым покрытием проволоки вместо ПЭТ-пленки) выявило, что применение эмалевого покрытия несколько снижает кратковременную электрическую прочность, но позволяет снизить интенсивность ЧР и обеспечить высокие значения расчетного показателя  $m$ , по сравнению с марками проводов ПМС и ПМС-М.



5. Определено влияние различных технологических факторов на электрическую прочность слюдосодержащей изоляции обмоточных проводов ПМС и ПМС-М (режима термопрессования, величины радиусов изгиба провода, расположения адгезивного слоя). Рекомендовано применение технологической операции термопрессовки (при 120-160 С, не менее 15 минут) для проводов со слюдосодержащей комбинированной изоляцией.

6. Для витковой изоляции тяговых электрических машин на основе полиимидно-фторопластовых пленок установлено, что изоляция провода ППИПК-2 с обычной пленкой ПМФ-351 отечественного производства не уступает (при испытании переменным напряжением, 50 Гц) по кратковременной и длительной электрической прочности ( $m=(6,5\pm 0,4)$ ) импортным короностойким пленкам Каптон 150FCR, примененным для изготовления ППИПКС-2 ( $m=(6,1\pm 0,1)$ ).

7. Разработана и исследована модификация провода с короностойкой изоляцией ППИПКС-2(М). Увеличение перекрытия лент более 50 %, при нанесении их послойно в противоположных направления в конструкции ППИПКС-2(М) позволяет повысить кратковременную и длительную электрическую прочность (по сравнению с ППИПК-2) ( $m=(7,3\pm 0,6)$ ).

8. Предложена методика пооперационного контроля качества витковой изоляции статорных катушек в процессе автоматизированного производства на основе испытаний высоковольтными импульсами с коротким фронтом. Установлен критерий оценки качества витковой изоляции – коэффициент различия кривых отклика (КРК), зависящий от индуктивности и сопротивления испытуемой катушки. При подаче пониженного испытательного напряжения она позволяет выполнять «неразрушающий» контроль витковой изоляции катушек на производстве. Путем применения метода импульсных испытаний со сравнением катушек по критерию КРК исследованы и оптимизированы режимы работы автоматизированной линии по производству статорных обмоток, внедрены различные современные марки обмоточных проводов в производство реальных катушек высоковольтных и тяговых электродвигателей.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Карпушина, Т.И. Метод испытаний высоковольтными импульсами междувитковой изоляции и его применение при автоматизированном производстве обмоток электрических машин /Т.И. Карпушина, А.М. Андреев// Электротехника. – 2009. - №3. - С. 47-53.
2. Карпушина, Т.И. Исследование современных типов обмоточных проводов для высоковольтных электрических машин /Т.И. Карпушина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ. - 2010. - №1 (95): Наука и образование - С. 131-137.
3. Карпушина, Т.И. Изучение слюдосодержащей изоляции новых типов обмоточных проводов для высоковольтных электрических машин в процессе теплового старения / Т.И. Карпушина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ. – 2011. - № 2 (123): Наука и образование. – С. 129-135.

4. Карпушина, Т.И. Исследование изоляции современных обмоточных проводов в процессе теплового старения / Т.И. Карпушина, А.М. Андреев//Физика диэлектриков (Диэлектрики - 2011): Материалы IX Международной конференции, Санкт-Петербург, 23-26 мая 2011 г. Т.2. – СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. - 2011. - С. 87-90.
5. Карпушина, Т.И. Исследование обмоточных проводов с полиимидно-фторопластовой изоляцией /Т.И. Карпушина// Сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция - 2010», СПбГПУ, 1 июня – 4 июня 2010 г. Санкт-Петербург. – СПб. - С.40-41.
6. Карпушина, Т.И. Разработка и внедрение автоматизированной системы производства обмоток электрических машин/Т.И. Карпушина//VII Международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 28 апреля – 30 апреля 2009 г. Санкт-Петербург. – СПб. - 2009. - С. 341-342.
7. Карпушина, Т.И. Исследование метода испытания высоковольтными импульсами междувитковой изоляции обмоток электрических машин /Т.И. Карпушина//Материалы X Международной молодежной научной конференция «Севергеозкотех-2009», 18 марта – 20 марта 2009 г. Ухта. - Ухта. – 2009. - С. 66-70.
8. Карпушина, Т.И. Исследование длительной электрической прочности обмоточных проводов с комбинированной пленочной изоляцией на основе слюды/Т.И. Карпушина, А.М. Андреев//Материалы XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы, 18 мая 2009 г. Санкт-Петербург. – СПб. - 2009. - С. 229-230.
9. Карпушина, Т.И. Анализ кратковременной электрической прочности новых марок обмоточных проводов для высоковольтных электрических машин /Т.И. Карпушина// Материалы докладов IV Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения», 22 апреля – 24 апреля 2009 г. Казань. – Казань. - 2009. - Том 3. - С. 124-126.
10. Карпушина, Т.И. Исследование новых марок обмоточных проводов для применения при условиях импульсных воздействий и перенапряжений в обмотках электрических машин / Т.И. Карпушина, А.М. Андреев// Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «XXXVIII Неделя науки СПбГПУ», 30 ноября – 5 декабря 2009 г. Санкт-Петербург. – СПб. -2009. - С. 54.
11. Карпушина, Т.И. Исследование влияния конструктивных и технологических факторов на характеристики витковой изоляции высоковольтных электрических машин / Т.И. Карпушина, А.М. Андреев // Труды XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты МКЭЭЭ-2008», 29 сентября-4 октября 2008 г. Алушта. – Алушта. - 2008. - С.27.
12. Карпушина, Т.И. Новый подход к ремонту обмоток высоковольтных электродвигателей / Т.И. Карпушина, О.В. Соколова // Цемент и его применение. – 2008. - №2. - С. 1-2.
13. Карпушина, Т.И. Новый взгляд на ремонт обмоток машин. Технологии, оборудование, возможности/ Т.И. Карпушина, В.Ю. Русских // Электрика. – 2008. - №1. - С. 20-24.
14. Карпушина, Т.И. Обмотки электрических машин для мельничных механизмов /Т.И. Карпушина, О.В. Соколова // Цемент и его применение. – 2008. - №5. - С. 23-24.