

На правах рукописи

ШИКОВА Татьяна Михайловна

ИССЛЕДОВАНИЕ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВ-  
ЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ГОУ «СПбГПУ»).

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Полонский Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Попов Виктор Васильевич,  
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный политехнический университет».

кандидат технических наук,  
доцент Старовойтенков Виктор Валентинович,  
ФГОУ ДПО «Петербургский энергетический  
институт повышения квалификации»

Ведущая организация: ОАО «НИИ Электромаш»  
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета К 212.229.03 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. \_\_\_\_.

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

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2007 г.

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

Гумерова Н.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Постоянное увеличение удельных нагрузок и требований к надежности крупных турбо- и гидрогенераторов требует совершенствования систем изоляции статорных обмоток этих машин. Совершенствование изоляции на основе предварительно пропитанных лент осуществляется как путем внедрения новых исходных материалов - стеклослюдобумажных лент с улучшенными характеристиками входящих в их состав компонентов (слюдобумаги, стеклотканевой подложки и связующего – пропиточного состава), так и с помощью совершенствования технологического процесса изготовления изоляции. Совершенствование технологического процесса изготовления системы изоляции заключается, прежде всего, в оптимизации его параметров. Именно данный путь позволяет не только в полной мере реализовать преимущества нового материала, но и обеспечивает возможность улучшения характеристик изоляции на основе уже существующих материалов.

Однако, несмотря на длительный срок существования технологии изготовления изоляции, основанной на использовании пропитанных лент, не сформулирован достаточно четко подход и не определены характеристики пропитанных лент, подлежащие корректировке для оптимизации параметров технологического процесса изготовления изоляции.

Цель работы. Обоснование основных принципов оптимизации параметров технологического процесса изготовления изоляции высоковольтных статорных обмоток электрических машин. Для достижения этой цели требовалось выполнить следующее:

- исследовать кинетику отверждения однослойной и многослойной конструкции изоляции;
- обосновать принципы выбора температурно-временных параметров процесса термопрессования;
- разработать способ уменьшения вероятности появления дефекта в виде отслоения изоляции;
- установить технологические параметры, определяющие основные характеристики изоляции;
- сформулировать общие принципы оптимизации параметров процесса термопрессования высоковольтной изоляции электрических машин.

### Научная новизна работы.

1. В результате впервые проведенных исследований по сравнению кинетики отверждения для однослойной и многослойной конструкции изоляции статорных обмоток выявлены отличия в скорости их отверждения, установлена связь кинетики отверждения многослойной конструкции и изменения характеристик изоляции статорных обмоток в процессе отверждения, что позволяет научно-обоснованно подходить к выбору параметров технологического процесса.

2. Показана возможность уменьшения вероятности появления отслоений изоляции от токоведущей части путем использования внутренних слоев ленты, имеющей в своем составе связующее с пониженной температурой начала отверждения и повышенной скоростью процесса отверждения по сравнению с основной изоляцией.

3. Установлено, что одним из основных технологических параметров, определяющим механические и электрические характеристики изоляции, в частности, её длительную электрическую прочность, является “плотность изоляции”.

### Практическая значимость работы.

1. Разработаны основные принципы оптимизации параметров технологического процесса изготовления изоляции на основе пропитанных лент для высоковольтных статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов.

2. Предложен технологический параметр “плотность изоляции”, используемый для расчёта количества слоев ленты в изоляции заданной толщины.

3. Предложена комбинированная система изоляции, позволившая снизить вероятность появления дефекта в виде отслоения изоляции от токоведущей части.

4. Практическая значимость полученных результатов подтверждена актом об их использовании в ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила» (г. Санкт-Петербург) – одним из ведущих в стране предприятий электромашиностроения.

### На защиту выносятся:

1. Результаты исследования кинетики отверждения изоляции статорных обмоток.

2. Методика и результаты изучения влияния температурно-временных параметров процесса термопрессования на электрофизические характеристики изоляции статорных обмоток.

3. Обоснование эффективности и целесообразности использования “комбинированной” системы изоляции.

4. Экспериментальные данные, подтверждающие необходимость введения технологического параметра “плотность изоляции” (Пл) и методика его определения.

Достоверность результатов. Достоверность обеспечивается обоснованным выбором и корректным использованием современных методов измерения электрических и механических характеристик исследуемых материалов; применением разнообразных методик, позволяющих всесторонне рассмотреть проблему; статистической обработкой полученных данных; проведением повторных испытаний, показывающих воспроизводимость результатов.

Личный вклад автора состоит в определении цели и методов исследования; изготовлении образцов и проведении экспериментальных исследований; обработке, обобщении и анализе полученных результатов. Все результаты, представленные в работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. В процессе работы автор пользовался консультациями к.т.н., Ваксер Б.Д. и к.т.н., доцента Ваксер Н.М. Автор благодарит за помощь в проведении исследований сотрудников лаборатории электрической изоляции ОАО “Силовые машины”, филиал «Электросила» (г. Санкт-Петербург).

### Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Всероссийская межвузовская научная конференция «XXXIII Неделя науки СПбГПУ», 20.09-25.09.2004, Санкт-Петербург.

2. IX Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах», 18.05-19.05.2005, Санкт-Петербург.

3. Всероссийская межвузовская научная конференция «XXXIV Неделя науки СПбГПУ», 28.11-3.12.2005, Санкт-Петербург.

4. Четвертая международная научно-техническая конференция «Электрическая изоляция-2006», 16.05-19.05.2006, Санкт-Петербург.

5. XI Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», 18.09-23.09.2006, Крым, Алушта.
6. Всероссийская межвузовская научная конференция «XXXV Неделя науки СПбГПУ», 20.11-25.11.2006, Санкт-Петербург.
7. Научно-практическая конференция «Перспективные электроизоляционные материалы и системы изоляции вращающихся электрических машин», 25.04-27.04.2007, Наро-Фоминск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация общим объёмом 221 страниц состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (147 наименований), 4 приложения. Работа содержит 139 рисунков, 22 таблицы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель диссертационной работы, сформулированы научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор отечественных и зарубежных работ, в которых отражены основные требования, предъявляемые к современным системам изоляции электрических машин, тенденции их развития и проблемы, возникающие при решении задач усовершенствования изоляции. Работы, проводимые в настоящее время ведущими фирмами - изготовителями, как материалов, так и систем изоляции, позволяют значительно повысить электрические и физико-механические характеристики изоляции статорных обмоток. Однако указывается, что существующие технологические процессы не позволяют избежать образования в изоляции различных дефектов (мелких пор, отслоений, расслоений).

Несмотря на упоминание о влиянии технологических параметров на качество и характеристики изоляции, требования к параметрам технологического процесса и методика их выбора до сих пор не сформулированы. Исходя из этого, ставится задача обосновать принципы выбора параметров технологического процесса и исследовать их влияние на характеристики изоляции с целью минимизировать дефектообразование.

Во второй главе приведены методы и схемы измерений, используемые в данной работе. Для контроля отверждения однослойной и многослойной конструкции изоляции использовались два метода: определение растворимой (незаполимеризовавшейся) части связующего ( $C_p$ ) способом экстракции растворителем; определение коэффициента полной проводимости  $K_{пп} = I_{100Гц}/I_{100кГц}$ , где  $I_{100Гц}$  и  $I_{100кГц}$  – полный ток при частоте 100 Гц и 100 кГц, соответственно (метод полного тока).

Определение зависимостей  $tg\delta$  и  $\epsilon$  от температуры  $T$  проводилось с помощью автоматического моста «Вектор-2.0.» при переменном напряжении частотой 50 Гц и ступенчатом подъеме температуры с выдержкой на каждой ступени в течение 10 мин. Измерения проведены при напряженности  $E = 1,0$  кВ/мм.

Термомеханические кривые (ТМК) изоляции при изгибающей нагрузке по трехточечной схеме нагружения определялись на образцах размером  $d_{пп} \times 15 \times 100$  мм, при расстоянии между опорами 60 мм, скорости подъема температуры 60 град/ч. Деформация образцов (прогиб) при нагрузке 10 Н фиксировался с помощью индикатора часового типа с точностью до 0,01 мм.

Испытания на межслойный сдвиг проводились на плоских образцах путем растяжения вдоль оси образца на разрывной машине Р-0,5 при скорости растяжения 10 мм/мин.

В третьей главе представлены основные экспериментальные результаты, их анализ и основанные на полученных данных заключения.

Изоляция статорных обмоток высоковольтных электрических машин является композиционным материалом, который состоит из матрицы - связующего на основе эпоксидных смол и наполнителя – слюдобумаги и стеклоткани, и выполняется из ленточных материалов. Технологический процесс изготовления изоляции из пропитанных лент, независимо от типа слюдобумаги и связующего, имеет два этапа: нанесение на токоведущую часть заданного числа слоев стеклослюдобумажной ленты и их прессование в определенном температурном режиме (термопрессование). В общем виде процесс термопрессования изоляции состоит из следующих стадий (независимо от способа прессования и типа связующего): 1 – предварительный нагрев изоляции; 2 – прессование; 3 – отверждение изоляции (стадии 2 и 3 иногда совмещаются); 4 – охлаждение.

Таким образом, термопрессование изоляции является сложным процессом, основными параметрами которого являются температура и длительность стадии предварительного нагрева ( $T_1$ ,  $\tau_1$ ), стадии отверждения ( $T_2$ ,  $\tau_2$ ) и давление на стадии прессования. Параметры процесса термопрессования должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить формирование требуемых характеристик системы изоляции и исключить образование в ней дефектов в виде изломов слюдяного барьера, микрополостей и отслоений изоляции от токоведущей части. Температура и длительность этих стадий определяется, прежде всего, химической стороной процесса формирования характеристик изоляции и устанавливается в зависимости от химической природы связующего. Величина давления в большей степени определяется конструктивными факторами - размерами изделия и параметрами оборудования.

Для того, чтобы более наглядно показать влияние химической природы связующего на параметры процесса термопрессования и сформулировать общие принципы выбора этих параметров (независимо от природы связующего) проведены исследования на двух типах стеклослюдобумажных лент с существенно различными типами эпоксидного связующего.

1. Лента ЛТСС-3, использовавшаяся в объединении "Электросила" до конца 90-х годов XXв. для изготовления изоляции "слюдотерм" (СЛТ) класса нагревостойкости В. Связующее этой ленты состоит из эпоксидной диановой смолы, отверждаемой новолачной смолой идитол.
2. Лента ЛС-ЭН-526Т, где в качестве связующего используется эпоксиноволачная смола УП-643 с латентным отвердителем (комплекс  $VF_3$ -моноэтиламин). Эта лента разработана для системы изоляции "монотерм" (МТМ) класса нагревостойкости F. Аналогом ленты такого типа явились созданные Холдингом "Элинар" (Московская область) ленты типа Элмикатерм 55409 и Элмикатерм 52409, используемые в настоящее время для изоляции высоковольтных статорных обмоток.

Для выбора параметров режима термообработки проведено изучение кинетики отверждения однослойных и многослойных конструкций композиционного материала для изоляции статорных обмоток с целью определения температуры начала процесса отверждения ( $T_{но}$ ), времени до начала процесса отверждения ( $\tau_{но}$ ) и скорости, или постоянной времени ( $\tau_0$ ), процесса отверждения путем определения растворимой части связующего ( $C_p$ ) и коэффициента полной проводимости  $K_{мп}$ . Анализ данных, полученных этими методами для однослойной конструкции, показал, что для обоих видов изоляции справедливы те же закономерности процесса отверждения, что и для термореактивных полимеров: наличие двух участков - до гелеобразования и после него; существование экспоненциальной зависимости степени отверждения от температуры и длительности

нагрева; уровень энергии активации процесса отверждения близкий к данным по эпоксидным смолам.

Однако, при переходе от изоляции СЛТ к изоляции МТМ происходит значительное изменение параметров процесса отверждения:  $T_{но}$  уменьшается со 140 – 150°C до 120 - 125°C, а  $\tau_0$  - с 3,8 ч до 0,1 ч, что говорит о необходимости индивидуального подхода к выбору температурно-временных параметров термопрессования.

Исследования многослойной конструкции показали, что  $T_{но}$  не изменяется по сравнению с однослойными образцами, но значительно уменьшается скорость процесса отверждения –  $\tau_0$  возрастает более чем на порядок для обоих видов изоляции. Для установления причин этого явления требуются дополнительные исследования. Данные исследования позволяют перейти к обоснованному выбору параметров процесса термопрессования.

Поскольку стадия предварительного нагрева выполняет подготовку связующего для прессования высоким давлением, её температурно-временной режим определяется условиями достижения достаточно низкой вязкости и отсутствия полимеризации связующего по всей толщине изоляции. То есть температура  $T_1$  и длительность  $\tau_1$  этой стадии должны находиться в следующих пределах:

$$T_{(1)} < T_1 < T_{(2)}; \quad \tau_{(3)} < \tau_1 < \tau_{(2)},$$

где (1) – необходимая вязкость; (2) - начало отверждения; (3) – стабилизация температуры.

Указанные выше значения  $T_{но}$  являются верхним пределом температурного промежутка для данной стадии. Нижний предел температуры стадии предварительного нагрева определен, исходя из температурных зависимостей вязкости связующего при температурах, меньших температуры начала отверждения. Основное изменение вязкости (примерно в 20 раз) для изоляции МТМ наблюдается при температурах до 80°C, для изоляции СЛТ - до 110°C. Дальнейший рост температуры приводит к незначительному, до 30%, изменению вязкости, хотя при этом возрастает опасность преждевременной полимеризации из-за случайного отклонения режима. Таким образом, по известным пределам температуры, а также с учетом разброса свойств отдельных партий ленты и возможных отклонений в поддержании температурного режима оборудовании, следует сузить температурный интервал в центре указанного температурного промежутка: для изоляции МТМ 90-100°C, для изоляции СЛТ 120-130°C.

Нижняя граница длительности стадии предварительного нагрева -  $\tau_1$  выбрана с помощью экспериментального и расчетного определения постоянных времени нагрева конструкции стержня, состоящей из проводников и изоляции -  $\tau_{(3)}$ , и находится для обоих видов изоляции в пределах 15 – 40 мин, а верхняя задается временем до начала процесса отверждения  $\tau_{но}$  при выбранном ранее значении  $T_1$  ( для изоляции СЛТ 2,5 ч, МТМ – 2,0 ч). Окончательные значения параметра  $\tau_1$  выбраны как с учетом экономических соображений - нецелесообразности удлинения технологического режима, так и с учетом возможных отклонений температурного режима в сторону увеличения температуры  $T_1$  для реального оборудования. В результате для изоляции МТМ рекомендовано значение  $\tau_1$  40 мин, для изоляции СЛТ - 60 мин.

Стадия отверждения завершает процесс термопрессования. Во время этой стадии происходит полимеризация связующего, в результате чего формируются характеристики изоляции в целом. Для температуры ( $T_2$ ) и длительности ( $\tau_2$ ) этой стадии имеются ограничения:

$$T_{н.о.} < T_2 < T_{\text{появления отслоений}}; \quad \tau_2 = (1,1 - 1,2) \times \tau_{\text{формирования характеристик}}$$

На стадии окончательного отверждения при переходе связующего в нерастворимое состояние основной задачей исследования становится изучение процесса изменения характеристик изоляции, так как неизвестна величина степени отверждения, необходимая для формирования требуемого уровня электрических и механических характеристик. При этом, прежде всего, необходимо рассматривать те характеристики изоляции, которые наиболее чувствительны к подвижности боковых групп и сегментов молекул полимерного связующего, а значит, связаны со степенью отверждения, и важны при работе изоляции: температурные зависимости модуля упругости при растяжении  $E_y$ , модуля упругости при изгибе  $E_{и}$ , тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$ , термомеханические кривые изоляции (ТМК) на изгиб, температура стеклования  $T_c$ .

В результате для обоих видов изоляции установлено, что увеличение температуры и длительности отверждения ( $T_2$  и  $\tau_2$ ) приводит к сдвигу значений  $E_y$ ,  $\operatorname{tg}\delta$ , ТМК в сторону улучшения этих показателей при высоких температурах, но это не всегда сопровождается стабилизацией характеристик (особенно у изоляции СЛТ). Эти данные показывают повышенную теплостойкость изоляции МТМ по сравнению с вариантом изоляции СЛТ, имеющим практически предельную степень отверждения - максимум дипольно-сегментальной поляризации, скачкообразное снижение  $E_y$ , характеризующее температуру фазового перехода (стеклования) -  $T_c$ , и повышение деформации образца по ТМК наблюдаются при более высокой температуре.

Для изоляции СЛТ установлена связь температуры стеклования ( $T_c$ ) со степенью отверждения  $C_p$

$$T_c = a - b \cdot C_p, \quad (1)$$

где  $a = (114-114,6)^\circ\text{C}$ ,  $b = 1,7-2,1^\circ\text{C}$ .

Зная связь между  $C_p$  и температурно-временными параметрами процесса отверждения, можно легко связать изменение  $T_c$  с этими параметрами

$$\ln(a - T_c) = b \cdot (\tau / \tau_0) \cdot \exp(-W/k \cdot T),$$

где  $W$  – энергия активации процесса отверждения.

При этом кинетические постоянные изменения  $T_c$  в процессе отверждения совпадают с постоянными зависимости  $C_p = f(T, \tau)$  для многослойной изоляции.

Для изоляции МТМ постоянные времени изменения ТМК и  $\operatorname{tg}\delta$  в ходе процесса отверждения также довольно близки к постоянным времени процесса отверждения многослойной конструкции. То есть изучение кинетики процесса отверждения многослойной конструкции уже позволяет установить возможные сочетания  $T_2$  и  $\tau_2$ . Однако для окончательного выбора этих параметров необходимо изучение изменения характеристик изоляции в процессе отверждения и определение соответствия электрических и механических характеристик изоляции предъявляемым к ним требованиям.

Исследования процесса изменения механических характеристик двух видов изоляции показали, что повышение температуры отверждения увеличивает вероятность появления дефекта в виде отслоения изоляции от токоведущей части, так как увеличивает внутренние напряжения в изоляции, которые являются основной причиной появления такого дефекта. Адгезионная прочность, характеризующая силу, противодействующую отрыву изоляции, и определенная методом испытания на межслойный сдвиг (предел прочности при межслойный сдвиг -  $\sigma_{сд}$ ), также зависит от параметров режима отверждения. Причем для изоляции МТМ эта характеристика даже при наименьшем исследованном отверждении ( $140^\circ\text{C}$ , 3 ч) не изменяется при повышении температуры до



160°C, тогда как для СЛТ этого нельзя достичь даже при отверждении в течение 30 ч при 160°C. Исходя из этого, а также учитывая различия в кинетике отверждения изоляции СЛТ и МТМ, был впервые предложен способ предотвращения отслоений изоляции от токоведущей части. Суть этого способа заключается в уменьшении внутренних технологических напряжений путем использования изоляции СЛТ и повышении адгезии изоляции к токоведущей части с помощью изоляции МТМ - комбинированная система изоляции. В качестве основного слоя в такой системе использовалась изоляция СЛТ, а в качестве промежуточного (адгезионного) между токоведущей частью и основным слоем – МТМ. Введение в изоляцию СЛТ нескольких слоев изоляции МТМ привело к повышению прочности сцепления изоляции с токоведущей частью с 5,95 МПа до 12,43 МПа.

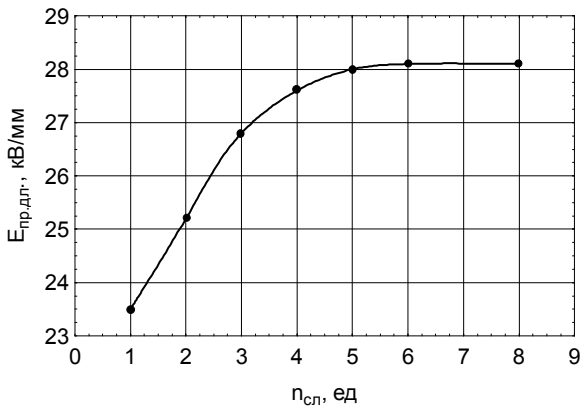


Рис. 1. Зависимость длительной электрической прочности изоляции СЛТ от числа слоев ленты ЛС-ЭН-526Т ( $n_{сл}$ )

Кроме того, это позволило повысить длительную электрическую прочность ( $E_{пр.дл.}$ ) системы изоляции. Причем определение  $E_{пр.дл.}$  на макетах изоляции с толщиной изоляции  $d_{из} = 2,0$  мм при ступенчатом подъеме напряжения 1 кВ/6 мин (рис. 1) позволило выбрать для ленты ЛС-ЭН-526Т оптимальное количество слоев ( $n_{сл}$ ). Данная конструкция изоляции позволила резко снизить вероятность появления отслоений изоляции.

Стадия прессования следует непосредственно за стадией предварительного нагрева. При правильно выбранных параметрах первой стадии процесса термопрессования связующее уже имеет необходимую подвижность. Поэтому на стадии прессования под действием повышенного давления происходит перераспределение связующего во всем объеме изоляции. Основная часть связующего, находящаяся в стеклотканевой подложке, под действием повышенного давления вытесняется из нее, заполняет воздушные включения, имеющиеся в изоляции, и в какой-то мере вытесняется из объема изоляции, что обеспечивает получение её расчетного геометрического размера (толщины).

Кроме того, именно на этой стадии, благодаря контактному давлению, достигается цементация слоев, что столь важно как с точки зрения механической, так и электрической прочности изоляции, имеющей слоистую структуру. Существенно также, что при вытеснении части связующего из объема изоляции, изменяется соотношение компонентов в композиционной системе.

При правильно выбранных параметрах процесса отверждения другим важнейшим фактором, определяющим характеристики изоляции, в том числе и длительную электрическую прочность, является плотность опрессования. Поэтому необходим единый параметр, который бы позволял рассчитать количество слоев ленты любого типа, для получения заданной толщины изоляции. В настоящее время в качестве такого параметра используется степень прессования. Недостатком этого показателя является то, что реальная плотность прессованной изоляции оказывается зависящей от разброса толщины исходной ленты, достигающего 30 %, что не обеспечивает стабильность качества изоляции. В данной работе на основе статистически достоверных экспериментальных данных предлагается технологический параметр, который позволяет с достаточной точностью ( $\pm 1$  слой) рассчитать необходимое количество слоев ленты для конструкций с разной толщиной

изоляции. Этот параметр, названный “плотность изоляции” (Пл), количественно определяется числом слоев ленты, содержащихся в 1мм толщины изоляции:

$$\text{Пл} = 1 / d_{л п/п}, 1/\text{мм}, \quad (3)$$

где  $d_{л п/п}$  - толщина единичного слоя ленты после прессования.

Показатель Пл можно отнести к параметрам не только процесса прессования, но и к технологическим параметрам ленты, который может задавать производитель пропитанной ленты.

В данной работе для определения Пл использовались плоские образцы размером 100×100 мм, собранные из отрезков ленты, которые укладывались с перекрытием 1/2 ширины ленты (коэффициент нахлеста  $k=2$ ). Направление лент в каждом последующем слое было перпендикулярно предыдущему. Общее количество слоев ( $N_{сл}$ ) рассчитывалось из условия получения толщины макета после опрессования ( $d_{пл}$ ) 2 – 3 мм. Образцы подвергались гидростатическому прессованию в битумном автоклаве фирмы “Микафил” по стандартному режиму изготовления реальных стержневых статорных обмоток в производственных условиях ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила». Этот способ позволяет изготавливать в одном и том же технологическом режиме большое количество образцов, что существенно уменьшает затраты времени. После прессования проводились замеры толщины макетов  $d_{пл}$  в 10 точках с точностью до 0,005 мм, рассчитывалась  $d_{пл}$ , как среднее арифметическое. На основании этих данных легко определить  $d_{л п/п}$  и Пл:

$$d_{л п/п} = d_{пл} / (N_{сл} \times k). \quad (4)$$

Определение величины Пл проводилось для трех марок предварительно пропитанных лент на эпоксиноволачных связующих, производимых Холдингом “Элинар” – Элмикатерм 55409, Элмикатерм 52409 и ЛС-ЭН-526Т. Для достоверного определения параметра Пл испытывался ряд партий каждой марки ленты (табл.1). При этом количество образцов для каждой партии ограничивалось тремя, так как коэффициент вариации толщины предварительно определенный по результатам измерений для партии из 10 образцов, не превышал 2,0 %. Результаты определения  $d_{л п/п}$ , Пл и доверительные интервалы для вероятности 0,95, полученные с использованием нормального закона распределения, представлены в таблице 1.

Результаты определения технологического параметра плотности Пл

Таблица 1

Марка ленты	ТУ	Колич. партий	$d_{л исх}$ , мм	$N_{сл}$	$d_{л п/п}$ , мм	Пл, 1/мм
Элмикатерм 55409	ТУ3492-013-00214639-2001	15	0,14	14	0,078±0,001	12,80±0,08
Элмикатерм 52409	ТУ3492-034-5015726-2003	8	0,14	14	0,078±0,001	12,81±0,01
ЛС-ЭН-526Т	ТУ16-503.191.2002	5	0,16	12	0,089±0,001	11,25±0,01

Проведенные исследования показали, что параметр Пл не зависит от количества слоев ленты в образце – коэффициент корреляции между  $d_{л п/п}$  и  $N_{сл}$  при изменении  $N_{сл}$  от 8 до 15 составил 0,16. Также установлено, что колебания содержания связующего ( $C_{св}$ ) в исходных материалах в пределах, указанных в технических условиях, не привели к значимому изменению  $d_{л п/п}$ , а следовательно, и параметра Пл (коэффициент корреляции составил 0,24). Все это указывает на то, что значения параметра Пл, приведенные в таблице 1, верны для всех партий лент, свойства которых соответствуют техническим условиям и являются максимально возможными для данного оборудования и данной марки ленты

В реальных условиях плотность изоляции может значительно отличаться от максимальной как по причине наложения недостаточного количества слоев ленты, так и при несоблюдении температурно-временных параметров стадии предварительного нагрева.

В работе исследовано влияние параметра плотности на электрические и механические характеристики изоляции, позволившее оценить его оптимальное значение. С этой целью рассмотрены характеристики, которые непосредственно связаны с содержанием компонентов в композиционной системе и цементацией отдельных слоев, и в то же время имеют прямое отношение к эксплуатационным воздействиям -  $\text{tg}\delta$ , относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ ,  $E_{и}$ .

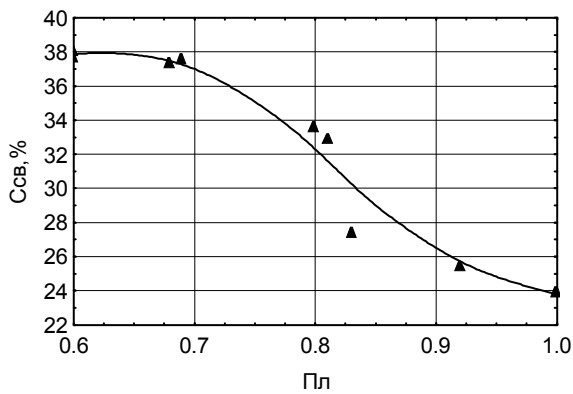


Рис. 2. Связь содержания связующего с параметром Пл изоляции Элмикатерм

(далее приводится только значение Пл в относительных единицах). При изменении Пл от 1 до 0,57 содержание связующего повышается с 24 -25 % до 37 – 38 % и приближается к содержанию связующего в исходной предварительно пропитанной ленте. При этом массовое содержание слюдо-бумаги и стеклоткани остается неизменным.

Увеличение Пл приводит к значительному (почти в 1,5 раза) снижению  $\text{tg}\delta$  при повышенной температуре 155°С, соответствующей классу нагревостойкости F (рис. 3), что важно учитывать в связи с ужесточением требований к значениям  $\text{tg}\delta$  для современных электрических машин.

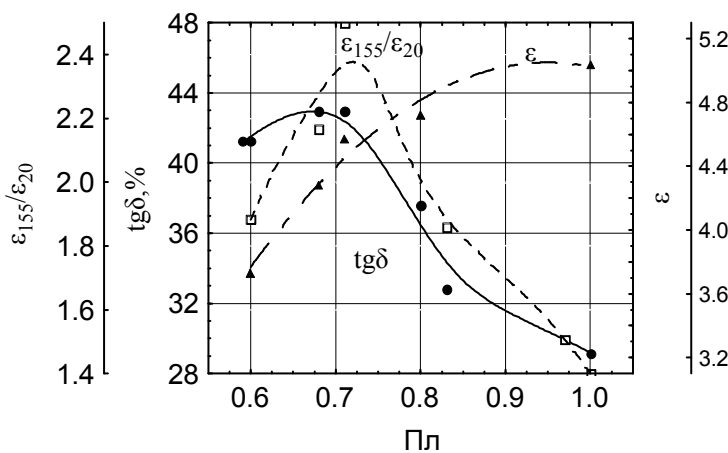


Рис. 3. Связь  $\text{tg}\delta$  при температуре 155°С,  $\epsilon_{155}/\epsilon_{20}$  и  $\epsilon$  с параметром Пл изоляции Элмикатерм 55409

Исследования проведены на образцах из ленты Элмикатерм 55409, которые имели разные значения Пл. Плотность изменялась за счет увеличения толщины макета с помощью фиксирующих упоров определенной толщины при сохранении неизменным количества слоев ленты, что приводило к изменению в процессе прессования содержания только одного компонента – связующего – из-за разного вытеснения его за пределы объема изоляции (рис. 2). Максимально возможная величина плотности принята за 1. Для нахождения оптимального значения параметра плотность уменьшалась до 0,57 от максимально возможной

Наличие максимума в этой зависимости объясняется появлением в изоляции воздушных включений при уменьшении Пл ниже 0,7.

Повышение  $\epsilon$  при температуре 155°С по отношению к значению при комнатной температуре ( $\epsilon_{155}/\epsilon_{20}$ ) также резко возрастает при уменьшении Пл (рис. 3). Увеличение  $\epsilon$  при повышенных температурах приводит к увеличению напряженности электрического поля в воздушных включениях в изоляции, которое составляет почти 2,5 раза для изоляции с Пл = 0,7 и почти вдвое меньше - 1,4 раза – для изоляции с Пл = 1. Столь значительная разница в значениях  $\text{tg}\delta$  и  $\epsilon_{155}/\epsilon_{20}$  для изоляции разной плотности обусловлена увеличением содержания

связующего при уменьшении Пл. При этом массовое содержание слюдо-бумаги и стеклоткани остается неизменным.

связующего ( $C_{св}$ ) в композиционной системе изоляции (рис. 2), что приводит к изменению соотношения компонентов в системе изоляции, имеющих разные значения  $tg\delta$  и  $\epsilon$ . При этом только полярное (эпоксисовлачное) связующее в данном температурном интервале имеет значительный рост диэлектрических потерь и проницаемости.

Однако, наибольшее влияние Пл на величину  $\epsilon$  для изоляции с разными значениями Пл наблюдается при температурах ниже 80 -100°C. Причем, увеличение Пл приводит к возрастанию  $\epsilon$  примерно на 30 % (рис. 3). Это, на первый взгляд, является отрицательным моментом увеличения Пл. Однако следует учитывать, что относительно низкое значение  $\epsilon$  для изоляции минимальной плотности, видимо, обусловлено резким увеличением содержания четвертого компонента в системе изоляции – воздуха, при неизменном массовом содержании остальных компонентов. Это было подтверждено анализом объемного содержания компонентов в изоляции образцов: для Пл=0,57 объемное содержание воздуха достигало 20 %. В результате положительный эффект снижения  $\epsilon$  до 3,8 теряется, так как  $\epsilon$  твердой фазы не снижается менее 4,65 - 4,7 (соответствует Пл=0,7, при которой резко возрастает объем воздушных включений). Именно эта величина  $\epsilon$  будет определять величину напряженности электрического поля в воздушных прослойках при температурах до 100°C.

Необходимо отметить, что при снижении Пл ниже значения 0,75  $C_{св}$  меняется незначительно, а  $\epsilon$  уменьшается с 4,6 до 3,8. Поэтому зависимость  $\epsilon$  от массового содержания связующего  $C_{св}$

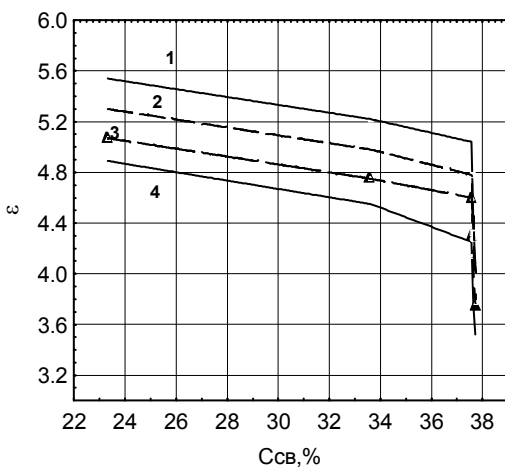


Рис. 4. Расчетные (1 – парал., 2 – Лихтен., 4 – послед.) и экспериментальная (3) зависимости  $\epsilon$  от содержания связующего

имеет два участка: линейного снижения  $\epsilon$  при увеличении  $C_{св}$  до 37 % (1) и крутого снижения при  $C_{св} = 37-38$  % (2) (рис. 4). Сделана попытка описать такое изменение  $\epsilon$  с помощью соотношений для расчета  $\epsilon$  гетерогенных систем при параллельном, последовательном соединении компонентов либо в виде матричной или статистической смеси. Наибольшее совпадение экспериментальных и расчетных данных получены при уточненном расчете, когда на первом участке снижения  $\epsilon$  при увеличении  $C_{св}$  используется модель статистической смеси (формула Лихтенеккера) для трех компонентов слюды, стеклоткани и связующего, а на втором - эта же модель, но уже для двухкомпонентной системы, где матрицей считается отвержденная изоляция, а наполнителем - воздушные включения.

Это позволило предположить, что воздух в изоляции расположен в виде отдельных включений, часть из которых, вероятно, соединяется в длинные прослойки.

Влияние плотности на стойкость к воздействию изгибающих нагрузок позволяет проследить изменение свойств изоляции, связанное именно с поведением связующего, а не армирующего материала. Испытания проведены на образцах размером  $d_{пл} \times 15 \times 100$  мм. На основании ТМК при изгибающих нагрузках получены зависимости относительного модуля упругости при изгибе  $E_{и отн} = E_{иТ} / E_{и20}$ , где  $E_{и20}$  и  $E_{иТ}$  – модули упругости при температурах 20°C и Т°C, соответственно. Значительное уменьшение  $E_{и}$ , а значит и жесткости изоляции, при повышенных температурах (рис. 5) связано с изменением содержания связующего, поскольку только для этого компонента характерно изменение прочностных и упругих характеристик в данном температурном интервале.

Причем при этих испытаниях может обнаружиться и пониженная степень сцепления (цементация) слоев при уменьшении плотности из-за появления воздушных включений, проявляющаяся в появлении деформации сдвига наряду с изгибающей деформацией.

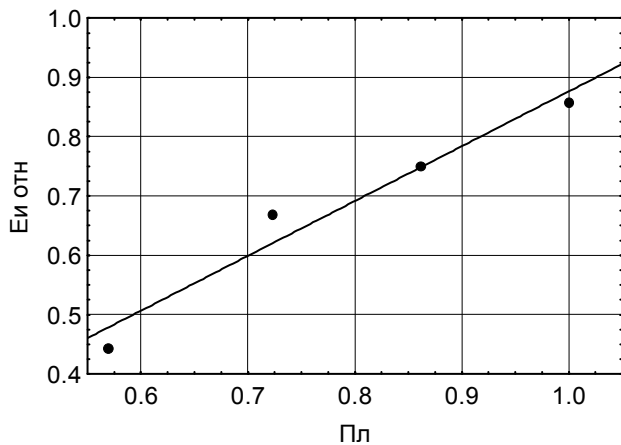


Рис. 5. Влияние Пл на величину относительного модуля упругости при изгибе

Наиболее важным аспектом в определении связи плотности изоляции с функциональными требованиями – надежностью и долговечностью – является исследование её влияния на длительную электрическую прочность. При уменьшении плотности изоляции Пл можно говорить о появлении участков расслоений или слабого сцепления слоев, что позволяет предположить влияние параметра Пл на стойкость к электрическому старению.

Полученная в результате расчета объемного содержания компонентов для всех макетов зависимость объема воздушных включений в изоляции от параметра Пл показала, что при уменьшении Пл ниже значения 0,75 резко возрастает как количество, так и размер воздушных включений.

Так как изоляция статорных обмоток имеет слоистую структуру, то в ней при длительном воздействии повышенного напряжения могут развиваться продольные (межслоевые) разряды. Поэтому для сравнительных испытаний вариантов изоляции, имеющих вследствие изменения Пл разную цементацию слоев, была выбрана известная методика инициирования развития именно продольных разрядов с помощью создания искусственного дефекта. Дефект имитировал разрушение, вызванное стадией нормального разряда. То есть заменял собой стадию развития нормального разряда, тем самым, сокращая время испытаний. На практике такие дефекты (щели, проколы) могут появляться в изоляции статорных обмоток как в результате механических воздействий при производстве и эксплуатации, так и в результате воздействия нормальных разрядов, разрушающих несколько слоев в зонах максимальной напряженности на ребрах стержней.

Для испытаний использовались плоские образцы, имевшие одинаковую толщину изоляции ( $d=2,19$  мм), но разное значение Пл, в которых искусственно создавался дефект в виде цилиндрического углубления диаметром 1 мм и глубиной 1/3, 1/2 и 2/3 от толщины макета.

Измерение амплитуды частичных разрядов (ч.р.) в таких образцах показало, что при максимальной плотности изоляции Пл =1,0 создание дефекта практически не сказывается на амплитуде  $q_m$  частичных разрядов по сравнению с изоляцией без дефекта независимо от его глубины. Это означает, что “нормальные” разряды, происходящие вдоль дефекта (нормально к плоскостям электрода), имеют интенсивность, не превышающую фоновый уровень. При снижении плотности до 0,85 и 0,57 увеличение глубины дефекта в обоих случаях вело к повышению  $q_m$ , причем, в большей степени этот эффект проявлялся для изоляции с Пл =0,57 (с  $4,6 \cdot 10^{-6}$  до  $5,6 \cdot 10^{-8}$  Кл). Для максимальной глубины дефекта, равной 2/3, наблюдалось значительное возрастание  $q_m$  (практически на 2 порядка) при уменьшении Пл с 1,0 до 0,57. Таким образом, в изоляции пониженной плотности даже до начала процесса электрического старения возникают продольные разряды в имеющихся воздушных прослойках.

Электрическое старение проводилось при  $U_{исп}=10$  кВ ( $E=4,5$  кВ/мм) в течение 200 ч, а затем при ступенчатом подъеме напряжения 0,5 кВ/12 ч до напряжения 15 кВ, при котором макеты выдерживали до пробоя. Для варианта изоляции с  $Пл=0,57$  оказалось достаточно около 50 ч, чтобы амплитуда ч.р. возросла на порядок (рис. 6). Столь быстрое нарастание уровня ч.р. в процессе электрического старения говорит о развитии разрядов по поверхности расслоений и свидетельствует о значительной длине расслоений, что приводит в результате к быстрому пробоя изоляции.

Так, первые пробои этого варианта изоляции произошли уже при времени менее 50 ч. То есть, величина амплитуды разрядов  $10^{-5}$  Кл, наблюдаемая при таком времени старения, является предельной, с точки зрения пробоя для образцов с максимальной глубиной искусственного дефекта. Увеличение параметра  $Пл$  с 0,57 до 0,85 приводит к увеличению времени до пробоя примерно в 260 раз (рис. 6) при глубине дефекта 2/3 (меньшая глубина дефекта была исключена из опыта из-за слишком большой длительности испытаний). Видимо, для изоляции с  $Пл=0,85$  сказывается указанная ранее разница в длине воздушных прослоек. Для их развития в непрерывную прослойку нужно разрушить более толстый слой связующего.

Для изоляции с максимально возможной плотностью ( $Пл=1$ ) за время испытаний, эквивалентное 120000ч не произошло ни одного пробоя изоляции даже при глубине дефекта 2/3 толщины изоляции, что можно объяснить прочным сцеплением слоев и малым количеством воздушных

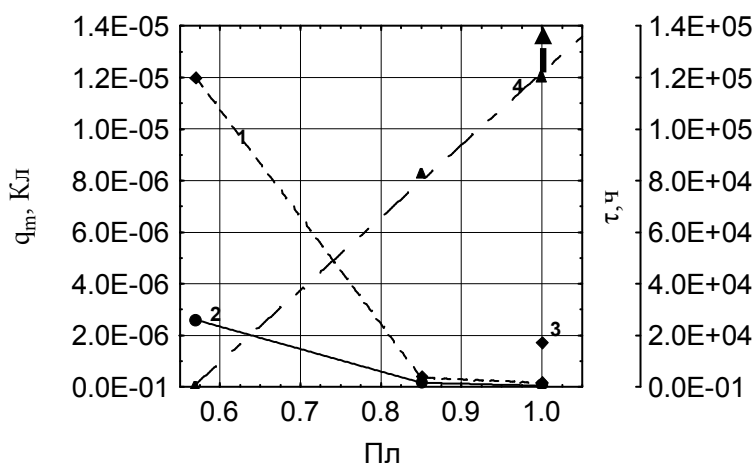


Рис. 6. Влияние  $Пл$  на изменение амплитуды ч.р. в процессе старения (1 – до старения, 2 – 50 ч, 3 – 90000 ч старения) и время до пробоя (4)

включений. Вследствие этого эрозия изоляции может развиваться только за счет нормального разряда в дефекте, интенсивность которого невелика. Исходя из имеющихся в настоящее время данных о временах пробоя изоляции, трудно говорить о характере зависимости  $\tau$  от параметра  $Пл$ , хотя можно предположить, что зависимость  $\tau=f(Пл)$  может быть нелинейной с резким возрастанием  $\tau$  при приближении  $Пл$  к 1 (рис. 6).

Из приведенных данных следует, что при максимальной плотности

$Пл=1$  повреждение части слоев изоляции не приводит к быстрому разрушению оставшихся слоев под действием продольных разрядов. Изоляция с меньшей плотностью ( $Пл=0,57$ ) оказывается чувствительной к повреждениям части слоев как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации. Это свидетельствует о необходимости изготавливать изоляцию с максимально возможным технологическим параметром  $Пл$ .

Таким образом, для оптимизации параметров технологического процесса изготовления изоляции статорных обмоток разработчиком предварительно пропитанной ленты, либо изготовителем системы изоляции должно быть проведено изучение кинетики отверждения, исследование изменения характеристик изоляции в процессе отверждения и установление параметра плотности для всех вновь разрабатываемых материалов.

### Основные выводы и результаты работы.

1. На основании выполненных в работе исследований кинетики отверждения сформулированы основные принципы оптимизации параметров процесса термопрессования изоляции из пропитанных лент, которые могут быть использованы для любого вида термореактивной изоляции с учетом особенностей компонентов, входящих в её состав.

2. Выявлено отличие параметров процесса отверждения связующего в многослойной структуре изоляции по сравнению с однослойной и показана связь кинетических параметров процесса отверждения многослойной изоляции и характеристик системы изоляции.

3. Предложен технологический параметр “плотность изоляции” Пл, определяющий число слоев ленты, необходимое для получения опрессованной изоляции толщиной 1мм, независимо от исходной толщины ленты. Использование этого показателя позволяет точнее рассчитывать количество слоев, уменьшить разброс размеров и повысить стабильность свойств изоляции.

4. Показано, что увеличение параметра плотности, сопровождающееся уменьшением содержания связующего в изоляции, улучшает электрические и механические характеристики при рабочей температуре. На основании исследования длительной электрической прочности системы изоляции путем инициирования внутренних продольных разрядов доказано, что уменьшение параметра плотности ниже значения 0,75 от максимально возможного недопустимо.

5. Установлены способы снижения вероятности образования основных типов дефектов в изоляции: отслоения изоляции от токоведущей части и наличие микропор.

Уменьшение вероятности появления отслоений изоляции достигается путем введения внутренних слоев ленты, имеющей в своем составе связующее с пониженной температурой начала отверждения и повышенной скоростью процесса отверждения по сравнению с основной изоляцией.

Для исключения пористости необходимо соблюдение оптимального значения температуры стадии предварительного нагрева изоляции и увеличение значения технологического параметра плотности более 0,75 от максимально возможного.

### Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Шикова, Т.М.* Регулирование остаточных напряжений при изготовлении стержней обмотки статора крупных электрических машин /Т.М. Шикова, С.Н. Кострицкий, А.А. Житомирский, А.Г. Исаева // Механика композитных материалов. – 1986. - № 2. - С. 313-319.

2. *Шикова, Т.М.* Совершенствование изоляции слюдотерм для статорных обмоток мощных генераторов / Т.М. Шикова, Г.К. Веселова, А.А. Житомирский, В.В. Петров // Сборник “Электросила”. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - № 36. - С. 114 -118.

3. *Шикова, Т.М.* Изменение механических свойств высоковольтной термореактивной изоляции при повышении температуры / Т.М. Шикова, Б.Д. Ваксер, А.Н. Чибриков // Сборник “Электросила”. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - № 37. - С. 140 -144.

4. *Шикова, Т.М.* Исследование технологии изготовления изоляции монотерм / Т.М. Шикова, А.А. Житомирский// Сборник “Электросила”. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. - № 38. - С. 115-120.

5. Патент 1302380 Российская Федерация, Н 02 К 3/30. Способ изготовления обмотки статора электрической машины / Шикова Т.М., Житомирский А.А., Петров В.В.; заявитель и патентообла-

- датель Ленинградское производственное электромашиностроительное объединение “Электросила”. - № 3797444/24-07; заявл. 09.10.84; опубл. 11.01.93, Бюл. № 13. – 1с.
6. *Шикова, Т.М.* Применение диэлектromетрии для анализа технологических свойств терморезистивных материалов в процессе хранения / Т.М. Шикова, В.В. Козлов, А.А.Пашичева // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов “XXXIII неделя науки СПбГПУ”. 29.11– 4.12.2004. Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во Политехнического университета. - 2005. – С. 30-31.
  7. *Шикова, Т.М.* О стабильности терморезистивных материалов, используемых для изоляции электрических машин/ Т.М. Шикова // Материалы IX Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах”. 18.05 – 19.05.2005, Санкт – Петербург. СПб.: Изд-во Политехнического университета. - 2005. - С. 336.
  8. *Шикова, Т.М.* Влияние степени опрессования на характеристики терморезистивной изоляции / Т.М. Шикова, В.В. Козлов, А.Е. Николаев // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «XXXIV неделя науки СПбГПУ». 28.11– 3.12.2005. Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во Политехнического университета. - 2006. – С. 16-17.
  9. *Шикова, Т.М.* Исследование влияния плотности на длительную электрическую прочность терморезистивной изоляции / Т.М. Шикова, М.С. Петушок // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «XXXIV неделя науки СПбГПУ». 28.11–3.12.2005. Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во Политехнического университета. - 2006. – С. 17-18.
  10. *Шикова, Т.М.* Возможности совершенствования систем изоляции на основе предварительно пропитанных терморезистивных материалов / Т.М. Шикова, В.М. Пак // Труды Четвертой Международной научно-технической конференции “Электрическая изоляция - 2006”. 16.05 -19.05.2006, Санкт-Петербург. - СПб.: СПбГПУ, 2006. - С. 205.
  11. *Шикова, Т.М.* Выбор параметров процесса термоопрессования терморезистивной высоковольтной изоляции статорных обмоток электрических машин / Т.М. Шикова, Ю.А. Полонский // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2006. - № 2. - С. 72-80.
  12. *Шикова, Т.М.* Влияние плотности на механические характеристики терморезистивной изоляции из предварительно пропитанных лент / Т.М. Шикова // Труды XI-ой Международной конференции ”Электромеханика, электротехнология, электротехнические материалы и компоненты”. 18.09 - 23.09.2006, Крым, Алушта. – М.: МЭИ, 2006. – Ч. 1. - С. 31-32.
  13. *Шикова, Т.М.* Влияние плотности на механические характеристики терморезистивной изоляции / Т.М. Шикова, А.А. Безбородов // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов “XXXV неделя науки СПбГПУ”. 20.11– 25.11.2006. Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во Политехнического университета. - 2007. – С. 18-29.
  14. *Шикова, Т.М.* Влияние плотности терморезистивной изоляции на ее длительную электрическую прочность / Т.М. Шикова, В.В. Козлов // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов “XXXV неделя науки СПбГПУ”. 20.11– 25.11.2006. Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во Политехнического университета. - 2007. – С. 26-27.
  15. *Шикова, Т.М.* Совершенствование системы изоляции крупных электрических машин из предварительно пропитанных материалов / Т.М. Шикова // Электротехника. – 2007.–№ 3. - С. 8-13.