

На правах рукописи

Гегенава Анна Геннадиевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
ПРОТИВОКОРОННЫХ ПОКРЫТИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2003

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбГПУ)

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор  
Полонский Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
Волокобинский Юрий Михайлович  
  
кандидат технических наук,  
доцент  
Тихомиров Антон Федорович

Ведущая организация: ВНИИ Электромаш (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится "16" мая 2003 г. в 14 часов в аудитории 284 (Главное здание) на заседании диссертационного совета К 212.229.03 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Электромеханический факультет. Диссертационный совет К 212.229.03

Автореферат разослан " " апреля 2003 г.

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

Гумерова Н.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

При изготовлении и эксплуатации высоковольтных электрических машин, особенно при их электрических испытаниях, как на заводе изготовителе, так и на месте установки, одной из важнейших проблем является подавление поверхностных разрядов на статорной обмотке. По данным производителей мощного электрооборудования ~ 60% проблем, возникающих при эксплуатации, связаны именно с этими процессами. Борьба с поверхностными разрядами, иногда называемыми коронированием, в электрической машине осуществляется путем использованием двух, различных по функциям и характеристикам, видов покрытий. Первое, называемое пазовым покрытием, наносится на прямолинейную часть элементов статорной обмотки (стержня или катушки). Оно обладает проводящими свойствами, обеспечивает контакт во многих точках между покрытием и стенками паза и устраняет разность потенциалов между поверхностью изоляции и стенкой паза. Второе покрытие, исследованию которого и посвящена данная работа, начинающееся от конца пазового покрытия, называется противокоронным лобовым покрытием.

Противокоронное покрытие лобовой части статорной обмотки электрических машин предназначено для ослабления краевого эффекта на конце пазового покрытия. При его отсутствии продольная составляющая электрического поля на поверхности изоляции у края внешнего электрода секции обмотки превышает напряжение ионизации воздуха при напряжении на внутреннем электроде (проводнике) меньшем, чем рабочее, что приводит к появлению в этой области интенсивных разрядных процессов, препятствующих проведению испытаний изоляции и способствующих постепенному ее повреждению в работе. С целью устранения ионизации воздуха в лобовой части обмотки используется противокоронное покрытие, предназначенное для выравнивания распределения напряжения по поверхности изоляции и снижения продольной напряженности электрического поля до уровня, обеспечивающего отсутствие ионизации при рабочих нагрузках и перекрытиях при высоковольтных испытаниях.

Разработанные в 70 годы XX века противокоронные покрытия (эмали), у которых проводимость резко нарастала с увеличением напряженности (так называемые, материалы с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ)) благодаря использованию в них в качестве наполнителя порошкообразного карбида кремния (SiC), успешно применялись несколько десятилетий.

Однако, при изготовлении и эксплуатации генераторов современных конструкций выявилась острая необходимость в совершенствовании покрытий. Созданные ранее покрытия оказались непригодными для новых условий, когда произошло существенное увеличение рабочих и испытательных напряженностей в изоляции, вызванное

требованиями рынка. Ужесточение воздействий на покрытия и необходимость их совершенствования связаны с тремя тенденциями в создании современных высоковольтных электрических машин.

Во-первых, в связи с необходимостью снижения материалоемкости машин на 30-60 % возросла напряженность электрического поля в изоляции при рабочих условиях и, соответственно, испытаниях. Однако нагрузки в покрытии при этом возрастают, как будет показано ниже в данной работе, почти пропорционально квадрату напряженности.

Во-вторых, переход к воздушному охлаждению (вместо водородного при давлении 3-4 атм) в крупных турбогенераторах в 2-3 раза снизил разрядное напряжение газовой среды и создал возможность генерации под действием частичных разрядов повышенного количества озона, резко ускоряющего химическое разрушение органических компонентов покрытия и изоляции. При этом повышению интенсивности частичных разрядов способствует, также, увеличение рабочей температуры.

В-третьих, повысилось номинальное напряжение в наиболее крупных генераторах. Так, например, крупнейшим в России производителем электроэнергетического оборудования предприятием АО "Электросила" (г. Санкт-Петербург) в 2000 г. был получен заказ на изготовление турбогенератора мощностью 1000 МВт с номинальным напряжением 27 кВ для иранской атомной электростанции "Бушер". До этого максимальное напряжение производимых предприятием генераторов мощностью 800-1000 МВт составляло 24 кВ. Проблема, связанная с увеличением номинального напряжения, усложнялась требованием заказчика непропорционально повысить одноминутное испытательное напряжение отдельных стержней обмотки статора: номинальное напряжение увеличилось на 12,5 %, а испытательное напряжение возросло на 30 % (82 кВ вместо 62 кВ) при неизменной толщине изоляции. Конструкция лобового противоразрядного покрытия, как показали предварительные опыты, не позволяла выполнить требуемые испытания. Также необходимо отметить, что подобные условия невыполнимы и для известных зарубежных аналогов лобовых покрытий таких производителей, как "Alstom" (Франция), "General Electric" (США) – на этих предприятиях высоковольтные испытания отдельных стержней статорной обмотки напряжением свыше 70 кВ проводятся три раза по 20 секунд, так как покрытие не обеспечивает термостабильность в течение 1 мин.

Указанные выше проблемы, связанные с усовершенствованием и созданием новых конструкций крупных генераторов, а также отмеченное ужесточение условий испытаний изоляции, определили необходимость работы по изучению и усовершенствованию противокоронных покрытий. Исследование характеристик противокоронных покрытий, их составов, определение влияния компонентов на свойства, разработка новых конструкций, разработка методик контроля, а также

изучение изменения свойств при старении в различных режимах являются важными задачами, как с научной точки зрения, так и с точки зрения обеспечения работоспособности и надежности конструкции изоляции, и следовательно, электрической машины в целом. Это является, несомненно, актуальной проблемой для современного электромашиностроения.

Целью работы является разработка противокоронного покрытия, обладающего технологическими преимуществами эмалевого варианта и обеспечивающего как проведение массовых производственных испытаний статорной изоляции при максимально возможном уровне напряжений, так и длительную работу на месте эксплуатации, независимо от климатических особенностей региона; теоретическое и экспериментальное обоснование новой конструкции; оценка ее работоспособности при длительном воздействии рабочих условий.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана комплексная экспериментальная методика контроля противокоронных покрытий высоковольтных электрических машин, базирующаяся на обоснованном выборе электрических и технологических характеристик. Использование данной методики позволило провести многофакторное исследование имеющихся аналогов противокоронных покрытий и разработать новое по свойствам и составу покрытие, позволяющее повысить испытательные и рабочие напряженности электрического поля в изоляции на 30-40%.

2. Установлено, что вольт-амперная характеристика разработанного композиционного материала на основе карбида кремния и электроизоляционных лаков, используемая в качестве противокоронного покрытия, наиболее адекватно описывается экспоненциальной зависимостью между напряженностью электрического поля и проводимостью материала.

3. Разработана и экспериментально обоснована двухступенчатая конструкция противокоронного лобового покрытия. Впервые введена в конструкцию покрытия первая ступень, имеющая повышенную проводимость, по сравнению с основной второй ступенью, обеспечивающая равномерное распределение плотности тока по периметру элемента статорной обмотки (стержня или катушки). Предложенная конструкция не только позволяет увеличить нормы испытательных и рабочих напряжений, но и увеличивает срок службы покрытия более чем в 3 раза. Разработанное покрытие (состав и конструкция) защищены патентом РФ (№ 2187874).

Практическая значимость.

1. Разработанное в диссертационной работе покрытие используется во вновь изготавливаемых и модернизируемых высоковольтных турбо- и гидрогенераторах, обеспечивая в заводских условиях проведение массовых производственных испытаний полных комплектов статорных обмоток высоким напряжением и надежную работу на

электростанциях заказчиков. Начиная с 2000 г., изготовлено более 20 машин мощностью до 1000 МВт с разработанным покрытием.

2. Новая двухступенчатая конструкция противокоронного покрытия статорной обмотки высоковольтных машин стандартизирована на предприятии-изготовителе этого оборудования. Результаты диссертационной работы, начиная с 2000г., используются в АО «Электросила». Разработана и введена в действие соответствующая нормативно-техническая документация (пять стандартов и инструкций предприятия).

Работа выполнена в соответствии с производственной программой и заказами, полученными АО "Электросила" на поставку турбо- и гидрогенераторов:

1. Турбогенератор типа ТВВ-1000-2-27 для АЭС "Бушер" (Иран), на номинальное напряжение 27 кВ, 1999-2000 гг.

2. Турбогенератор типа ТВВ-1000-2-24 для АЭС "Тянь-вань" (Китай), на номинальное напряжение 24 кВ, 2001 г.

3. Гидрогенератор типа СВ-1313 для ГЭС "Бурея" (Россия), на номинальное напряжение 15.75 кВ, 2002 г.

4. Серия гидрогенераторов типа СВ-772/120 для ГЭС в Бразилии, на номинальное напряжение 13.8 кВ, 2000-2003 гг.

#### На защиту выносятся.

1. ВАХ противокоронного эмалевого покрытия с карбидкремниевым наполнителем и методика экспериментального определения параметров ВАХ.

2. Расчет нагрузок покрытия в предельных испытательных режимах и экспериментальное определение их максимально допустимых значений.

3. Определение области параметров зависимости проводимости покрытия от напряженности электрического поля, в которой нагрузки не превышают предельно допустимые.

4. Методика и результаты ресурсных испытаний различных вариантов противокоронного эмалевого покрытия.

5. Конструкция покрытия и состав эмали, обеспечивающие работоспособность покрытия в кратковременных предельных и длительных рабочих режимах.

#### Достоверность результатов подтверждается:

– применением современной измерительной техники и удовлетворительной воспроизводимостью экспериментальных результатов;

– соответствием полученных результатов экспериментальным данным других авторов (в тех случаях, когда эти данные имеются);

– совпадением расчетных и экспериментальных результатов при определении нагрузок в покрытии;

– использованием статистических методов обработки экспериментальных данных.

Личный вклад автора.

Полученные результаты были достигнуты как самостоятельно (создание всех экспериментальных установок, используемых в работе, получение экспериментальных данных и их обработка), так и в соавторстве (разработка расчетной методики).

В процессе работы автор пользовался консультациями к.т.н. Ваксера Б. Д.

Апробация работы.

Результаты работы обсуждались и докладывались на двух Российских и четырех международных конференциях (Конференция молодых специалистов электроэнергетики–2000, 18-22.09.2000 г., Москва; Девятая международная конференция «Физика диэлектриков – 2000», 17-22.09.2000 г., Санкт-Петербург; IV Международная конференция «Электротехника, электромеханика и электротехнология-2000», 18-22.09.2000 г., Клязьма; Межвузовская научная конференция «XXIX Неделя науки СПбГТУ», 27.11-02.12.2001 г., Санкт-Петербург; Четвертый международный симпозиум ЭЛМАШ-2002 «Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования для энергетики, транспорта, нефтяной и газовой промышленности», 7-11.10.2002 г., Москва; Третья Международная конференция «Электрическая изоляция – 2002», 18-21.06.2002 г., Санкт-Петербург).

Публикации. Опубликовано 10 печатных работ по теме диссертации.

Структура и объем диссертационной работы.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (139 наименований) и четырех приложений (29 страниц). Диссертация выполнена на 206 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 33 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели исследования, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен обзор опубликованных работ, отражающих современное состояние проблемы противокоронных покрытий лобовых частей статорной обмотки электрических машин. Проведен анализ различных способов расчета и регулирования электрического поля в лобовой части статорной обмотки. Рассмотрены различные составы эмалевых покрытий с наполнителем из карбида кремния (SiC) и различными органическим связующими, влияние свойств компонентов на характеристики эмалей.

Проведенный анализ литературных данных позволил обозначить нерешенные проблемы, связанные с противокоронными покрытиями лобовых частей статорных обмоток высоковольтных электрических машин:

1. Отсутствует однозначное и обоснованное математическое описание ВАХ и метод определения ее параметров для противокоронных покрытий в эмалевом варианте с наполнителем из SiC для высоковольтных электрических машин.

2. Нет обоснованных данных для ответа на вопрос – какие из нагрузок покрытия (плотность тока, напряженность электрического поля, потери) определяют его работоспособность? Отсутствуют количественные оценки нагрузок.

3. Имеющиеся методики расчета напряженностей и токов в покрытии не достаточно корректны и не позволяют установить связи между этими нагрузками и параметрами ВАХ покрытия.

4. Не выявлено влияние компонентов применяемых эмалевых покрытий на параметры их ВАХ, не определен оптимальный состав.

5. Отсутствуют данные об устойчивости эмалевых покрытий к длительному воздействию эксплуатационных условий.

На основании данных проблем были сформированы конкретные задачи настоящей диссертационной работы.

Вторая глава посвящена исследованию вольт-амперной характеристики противокоронных покрытий, поскольку ВАХ дает полное представление о поведении покрытия в электрическом поле, а ее параметры определяют функциональную пригодность эмали.

Измерения ВАХ производились на образцах эмали, нанесенных на пластинки из фольгированного стеклотекстолита толщиной 2 мм, на которых с промежутком 10 мм методом травления (для обеспечения наибольшей точности и наилучшего контакта) были образованы медные полосы – электроды. Хотя основной рабочей нагрузкой покрытия является высокое напряжение промышленной частоты, для определения ВАХ в максимально широком диапазоне напряжений все измерения проводились при напряжении постоянного тока. Это позволило избежать погрешности от емкостного тока в образце и от помех, вызываемых внешним электромагнитным полем. Предварительно было установлено, что в диапазоне от постоянного тока до высоких гармоник промышленной частоты проводимость карбидкремниевой эмали почти неизменна.

Анализ экспериментальных результатов позволил выбрать и обосновать экспоненциальную зависимость вольт-амперной характеристики для тонкослойных противокоронных конструкций:

$$G=G_0 \exp(\beta E), \quad (1)$$

где  $G$  – проводимость покрытия,  $E$  – напряженность электрического поля,  $G_0$  – коэффициент,  $\beta$  – показатель нелинейности.

В дальнейшем формула (1) применялась для математического описания зависимости проводимости от напряженности в расчетах распределения напряжения, в которых соблюдалось условие  $\beta E > 1$ . Для описания свойств эмали использовались значения коэффициента  $G_0$  и показателя экспоненты  $\beta$ , далее именуемого коэффициентом нелинейности, определяемые из экспериментальных характеристик  $G=f(E)$ .



На рис. 1 приведены результаты измерений ВАХ эмали ПЛК-259, используемой в АО «Электросила», и зарубежной эмали SIB-14,06с, а также степенные и экспоненциальные аппроксимации соответствующих опытных данных. Видно, что экспериментальные ВАХ образцов практически совпадает с экспоненциальной аппроксимацией, а степенная аппроксимация дает погрешность, нарастающую с повышением напряжения и

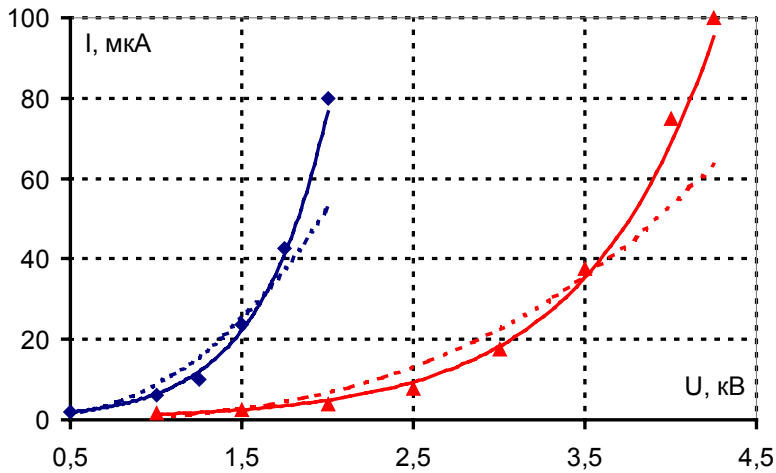


Рис. 1. ВАХ противокоронных покрытий с наполнителем из SiC для отечественных и зарубежных эмалей.

- ◆ экспериментальная ВАХ ПЛК-259
- ▲ экспериментальная ВАХ SIB-14,06с
- ⋯ степенная аппроксимация ВАХ покрытия
- экспоненциальная аппроксимация ВАХ покрытия

попадает с экспоненциальной аппроксимацией, а степенная аппроксимация дает погрешность, нарастающую с повышением напряжения и доходящую до 200 % при  $E=8\div 10$  кВ/см. Преимущества экспоненциальной аппроксимации для всех материалов очевидны. Во второй главе, также, определено влияние электрических и тепловых условий испытаний на свойства эмалей. Исследования выявили, что термостабилизация и выдержка в электрическом поле значительно уменьшает разброс определяемых параметров. Так, стабилизация путем выдержки в течение 1 мин при напряженности поля 10 кВ/см понижает коэффициент вариации измеренных значений тока с 25-20 % до 4-6 %, что указывает на увеличение однородности материала по объему. Это явление можно объяснить тем, что нелинейность ВАХ эмали, наполненной порошком SiC, связана с явлениями в контактах на поверхности зерен. Вероятно, термостабилизация влияет на количество и плотность контактов между зёрнами, структуру запорного слоя, поскольку дополнительная полимеризация и усадка связующего под действием температуры приводят к воздействию на контакты зерен карбида кремния.

Увеличение значения коэффициента  $G_0$  у термостабилизированных образцов после выдержки в электрическом поле можно объяснить увеличением эффективной площади контактов зерен: при повышении напряжения сопротивление запорных слоев уменьшается и происходит образование новых проводящих цепочек за счет пробоев зазоров между местами неплотных контактов зерен SiC с сильно развитой поверхностью.

Опыты показали, что стабилизация ВАХ не происходит, если напряженность электрического поля в образце ниже некоторой критической величины, при которой начиналось необратимое снижение проводимости, связанное, вероятно, с разрушением части проводящих каналов между зёрнами карбида кремния. При превышении этой

напряженности, составлявшей 6-7 кВ/см, происходило снижение тока в образце в 1,5-3 раза за время 1-5 мин, после чего изменение проводимости прекращалось. Стабилизация образцов путем выдержки при напряжении, превышающем критическое, позволяет получить устойчивые параметры ВАХ, которые можно использовать для расчетов покрытия, как в рабочем, так и испытательном режимах. Такая стабилизация необходима и при проведении приемочных испытаний образцов эмали, т.к. при контрольных испытаниях изоляции стержней напряженность в покрытии достигает критических значений.

На основании вышеизложенного в методику контроля эмали была введена предварительная стабилизация образцов при напряженностях 7-10 кВ/см длительностью 1 мин. Все образцы контролируемой эмали подвергались стабилизации, при этом величина напряженности стабилизации зависела от расчетной напряженности в покрытии при максимальном испытательном напряжении и устанавливалась меньшей

для эмали с большей проводимостью.

Термостабилизация покрытия после нанесения на стержень, несмотря на указанный выше положительный эффект, применялась только для отдельных изделий ввиду технологической сложности этой операции

в производственных условиях. В частности, термостабилизация была применена для изделий с особо тяжелыми условиями испытаний – для стержней турбогенератора на номинальной напряжении 27 кВ, у которых

испытательное напряжение составляло 82 кВ. Практически термостабилизация производилась с

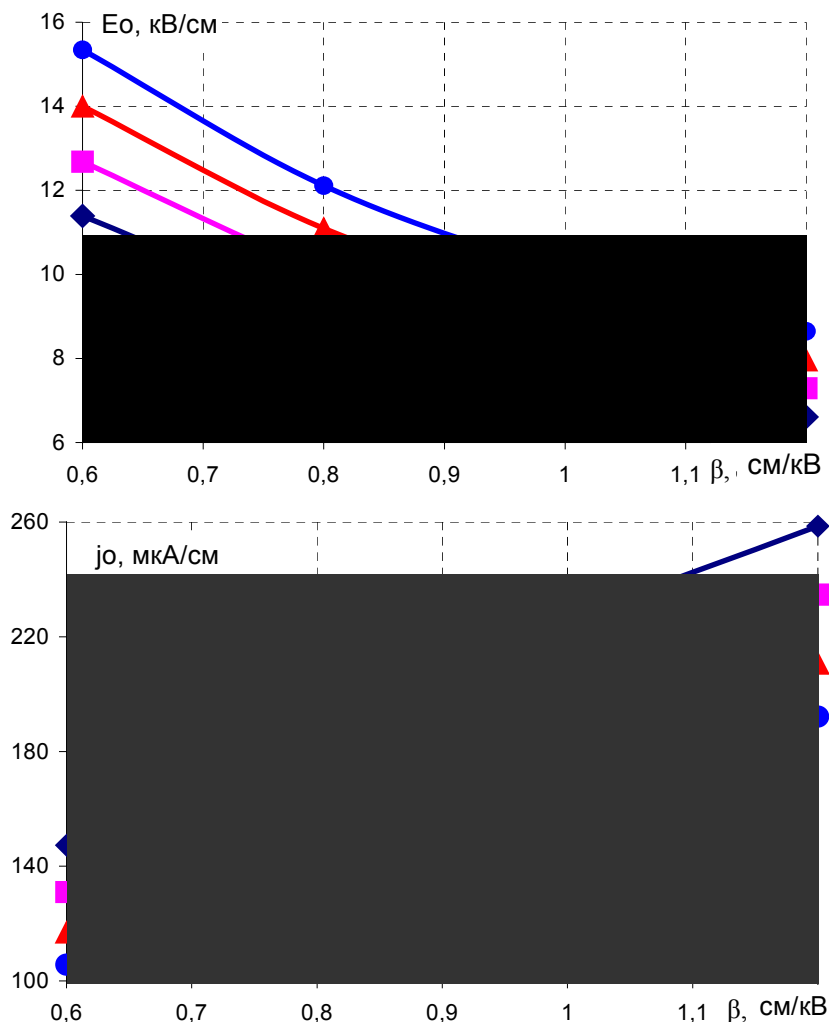


Рис. 2. Зависимости напряженности поля и плотности тока в начале покрытия от коэффициента нелинейности при разных значениях проводимости ( $C_m$ ):

◆  $1,39 \cdot 10^{-11}$  ■  $5,11 \cdot 10^{-12}$  ▲  $1,88 \cdot 10^{-12}$  ●  $6,91 \cdot 10^{-13}$

(в затемненных областях выполняются условия  $E_0 \leq E_n$  и  $j_0 \leq j_n$ ).

помощью промышленного фена, создававшего на поверхности изоляции температуру 150 °С.

В третьей главе с использованием численных методов при сочетании аналитического и экспериментального подходов были решены следующие задачи:

– Выполнен расчет нагрузок (напряженности электрического поля и плотности тока) в зависимости от параметров вольт-амперной характеристики покрытия, его длины, удельной емкости изоляции и напряжения. Вычисления производились по специальной программе, исходными данными в которой являются: толщина и диэлектрическая проницаемость изоляции, параметры  $G_0$  и  $\beta$ , длина покрытия, величина и частота испытательного напряжения. При этом рассчитывалось распределение  $E$  и плотности тока  $j$  по длине покрытия ( $j$  – "погонная" плотность тока (мкА/см) – величина, принятая в электротехнике для оценки тока в тонкослойных покрытиях), из которого используются значения напряженности поля  $E_0$  и плотности тока  $j_0$  в начале покрытия (в самой нагруженной области лобового противокоронного покрытия в месте стыка с пазовым покрытием). Длина покрытия определяется подбором таким образом, чтобы напряжение на изоляции в конце покрытия было меньше напряжения начала коронирования.

– Экспериментально определены предельные нагрузки ( $E_{п}$ ,  $j_{п}$ ), допустимые в покрытии в условиях кратковременного воздействия максимального испытательного напряжения: напряженность  $E_{п} \approx 11$  кВ/см; плотность тока  $j_{п} \approx 250$  мкА/см.

– Определена область допустимых параметров  $G_0$  и  $\beta$ , в которой нагрузки покрытия, не превышают предельные величины. На рис. 2 представлены расчетные зависимости  $E_0$  и  $j_0$  от  $G_0$  и  $\beta$ , там же затемнением обозначены области, где выполняются условия  $E_0 \leq E_{п}$  и  $j_0 \leq j_{п}$ .

– Установлены зависимости нагрузок покрытия от напряженности поля в изоляции ( $E_{исп}$ , кВ/см) и ее толщины ( $d_{изл}$ , см):

$$j_0(E_{исп}, d) = 0,4 * (E_{исп})^{1,8} * d^{0,8} ; \quad (2)$$

$$E_0(E_{исп}, d) = 5,3 * (E_{исп})^{0,22} * d^{0,11} . \quad (3)$$

Хотя численные значения коэффициентов и степеней в выражениях (2) и (3) получены для покрытия с определенными параметрами ( $G_0 = 7,46 \cdot 10^{-12}$  См и  $\beta = 0,67$  см/кВ), их анализ тем не менее позволяет сделать заключение о том, какие факторы оказывают наибольшее влияние на нагрузки в покрытии. На плотность тока в начале покрытия основное влияние оказывает величина испытательной напряженности (зависимость близка к квадратичной), а влияние толщины незначительно. Также незначительно влияние  $E_{исп}$  и  $d$  на напряженность поля в начале покрытия. То есть, в связи с имеющейся в современном генераторостроении тенденцией утонения изоляции статорной обмотки необходимо обращать особое внимание на повышение стойкости покрытия к токовой нагрузке, которое может быть достигнуто увеличением запаса прочности по тепловой стабильности и улучшением равномерности распределения тока по периметру элемента обмотки.

Четвертая глава посвящена выбору оптимального состава эмали.

Разработанная в диссертационной работе противокоронная эмаль, являющаяся композиционным материалом, содержит порошкообразный карбид кремния (КЧМ-20), определяющий электрические характеристики покрытия, лаки двух типов в качестве связующего и растворитель (этилцеллозольв). Лак № 1 (нитроцеллюлозный) обеспечивает быструю полимеризацию связующего и контакт между зёрнами SiC, лак № 2 (глифталевый) необходим для создания адгезии эмали к поверхности изоляции.

При производстве противокоронных эмалей в ряде случаев качество карбида кремния и свойства связующих компонентов не позволяют получить необходимые проводимость и нелинейность композиции даже при оптимальном содержании карбида кремния. В связи с этим был произведен поиск присадок, позволяющих увеличить проводимость и нелинейность эмали путем добавления порошка из материала, обладающего высокой электропроводностью. Предполагалось, что небольшие количества частиц проводящего материала, распределяясь между частицами SiC, способствуют увеличению размеров кластеров из основного полупроводящего материала SiC, но не образуют сплошных токопроводящих цепочек.

В данной главе проведен анализ исходных дисперсионных и электрических свойств наполнителя эмалей – SiC, разработан способ первичного контроля порошка карбида кремния, выбрана проводящая присадка – порошок алюминия, подобная по дисперсионному составу порошку SiC. Значения электропроводности исследованных порошков карбида кремния (№ 1 и № 2) различались приблизительно на два порядка.

Выбор состава противокоронного покрытия, обладающего оптимальными свойствами, выполнен на основании данных, полученных при исследованиях влияния компонентов эмали на ее параметры. Проведенные опыты выявили следующие закономерности:

1. Наибольшее значение проводимость покрытия достигает при содержании наполнителя SiC, составляющем 80% весовых частей, причем имеет место резко выраженный максимум, величина которого зависит от проводимости исходного порошка SiC (рис. 3). Увеличение содержания наполнителя увеличивает количество токопроводящих кластеров, но, по-видимому, имеется определенное минимальное содержание связующего, ниже которого его оказывается недостаточно для "стягивания" зёрен SiC при полимеризации связующего и образования контактов между ними.

2. Имеет место влияние свойств порошка SiC на параметры покрытий с содержанием наполнителя 80 %: увеличение сопротивления порошка на два порядка уменьшает значение  $G_0$  почти на порядок, а  $\beta$  вдвое (рис. 3) .

3. Проводящая добавка Al в количестве 5 % увеличивает значение параметров ВАХ на 20-40 % и уменьшает разброс экспериментальных данных на 40-60 %.

Необходимо отметить, что эмаль, содержащая 80 % SiC и 20 % лака при соотношении лаков № 1 и № 2 3:1, обладает также наилучшими технологическими свойствами – укрывистостью и адгезией.

В результате проделанной работы определен оптимальный состав противокоронного покрытия: SiC – 80 %; лак № 1 – 15 %; лак № 2 – 5 %; порошок алюминия – 5 %.

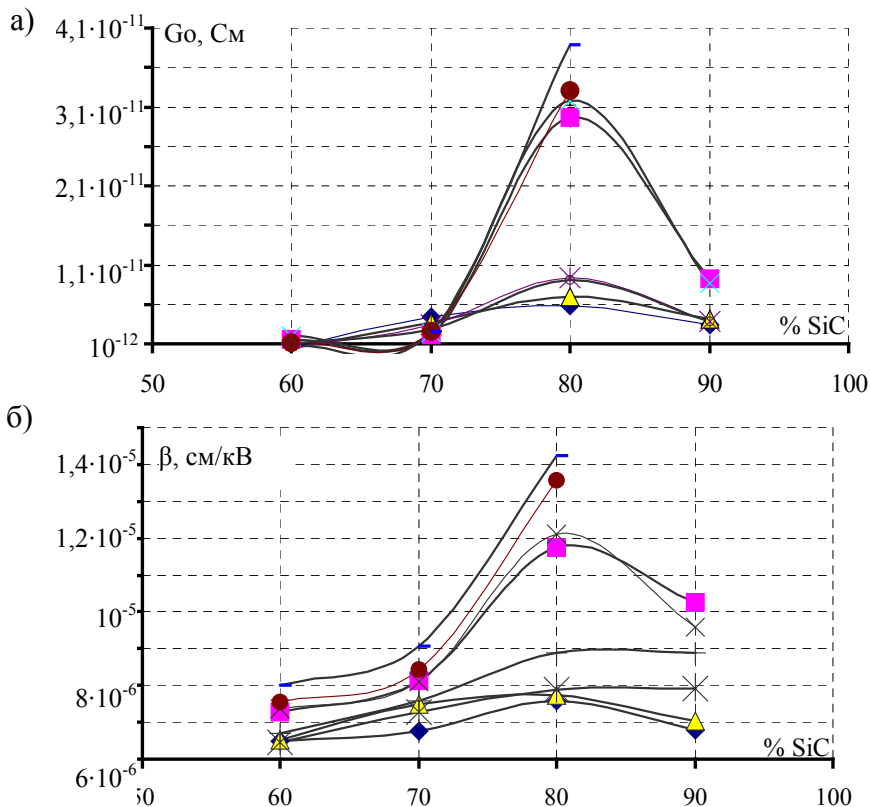


Рис. 3. Зависимость начальной проводимости  $G_0$  (а) и коэффициента нелинейности  $\beta$  (б) покрытия от содержания наполнителя SiC и проводящей присадки

—◆— SiC №2 B=0%    —■— SiC №1 B=0%    —▲— SiC №2 B=5%    —✧— SiC №1 B=5%  
 —✱— SiC №2 B=10%    —●— SiC №1 B=10%    —+— SiC №2 B=15%    —— SiC №1 B=15%

B – содержание проводящей присадки (Al).

противокоронного покрытия (рис. 4), а также представлены результаты ресурсных испытаний. Впервые предложенная укороченная первая ступень противокоронного лобового покрытия, имеющая более высокую проводимость, чем вторая ступень, необходима для обеспечения равномерного распределения плотности тока по периметру стержня или катушки, что имеет, как было показано в третьей главе, решающее значение при создании мощных высоковольтных генераторов нового поколения.

На основании расчета и экспериментов, проведенных как в лабораторных, так и в производственных условиях на натуральных стержнях обмоток турбо- и гидрогенераторов на номинальное напряжение от 10,5 до 24 кВ, были установлены параметры ВАХ и геометрические размеры обеих ступеней.

Возможность повышения испытательного напряжения, то есть электрической нагрузки покрытия, обеспечивается, во-первых, правильным выбором параметров зависимости проводимости от напряженности электрического поля, основанном на результатах экспериментального определения предельных допустимых нагрузок (напряженности электрического поля  $E_n$  и плотности тока  $j_n$ ) в покрытии и расчетом зависимости нагрузок покрытия от этих параметров.

Разработаны также способы корректировки свойств:

– для увеличения проводимости и нелинейности покрытия необходимо дополнительно вводить порошок Al (в количестве 10-15 %);

– для снижения значений параметров  $G_0$  и  $\beta$  – увеличивать содержание лака № 2;

– при необходимости изменения консистенции эмали – добавлять растворитель этилцеллозольв (в количестве 5 % от массы партии).

В пятой главе предложена и обоснована новая двухступенчатая конструкция

Во-вторых, необходимым условием стабильности покрытия и его работоспособности при предельных нагрузках, как показали испытания, является наложение у края электрода дополнительной ступени относительно малой длины (20-40 мм), имеющую проводимость на 1-2 порядка более высокую чем у основного покрытия. В такой конструкции обеспечивается более равномерное распределение тока по периметру края электрода и повышается напряжение появления ионизационных

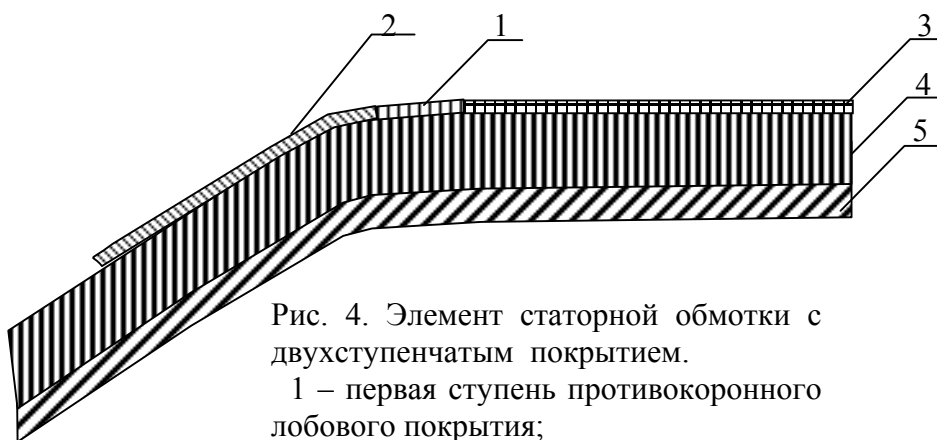


Рис. 4. Элемент статорной обмотки с двухступенчатым покрытием.

- 1 – первая ступень противокоронного лобового покрытия;
- 2 – вторая ступень противокоронного лобового покрытия;
- 3 – пазовое покрытие;
- 4 – изоляция;
- 5 – медный проводник.

процессов в покрытии. Наблюдения в темной камере показали, что в конструкции с дополнительным покрытием повышенной проводимости разрядные явления, в частности, свечение у края внешнего электрода, возникают при напряжении на 60-80% более высоком.

Также в пятой главе представлены результаты ресурсных испытаний разработанного покрытия в одноступенчатом и двухступенчатом вариантах. Необходимость проверки их устойчивости в условиях, воспроизводящих длительные эксплуатационные воздействия, определяется следующим.

Во-первых, имеющийся ранее опыт эксплуатации получен на генераторах, в которых была принята относительно большая толщина изоляции и рабочие напряженности не превышали 20 кВ/см, причем генераторы с наиболее высоким номинальным напряжением (от 18 до 24 кВ) работали в водородной среде. В этих условиях, как было показано выше, нагрузки покрытия весьма малы, а высокая короностойкость термореактивной слюдосодержащей изоляции позволяет ей выдерживать возникающий при повреждении лобового покрытия слабый разрядный процесс (типа тлеющего разряда) достаточно долго.

Однако, в последнее время произошло резкое увеличение рабочей напряженности (до 30 кВ/см) и предполагается дальнейшее ее нарастание. Опыт эксплуатации при таких нагрузках практически отсутствует и требуется экспериментальная проверка работоспособности покрытия.

Во-вторых, характерной тенденцией современного мониторинга крупных электрических машин является введение процедуры измерений электроразрядной активности при рабочих и испытательных напряжениях. Поэтому, даже если изоляция имеет высокую короностойкость и сохраняет работоспособность при наличии краевых разрядов, вызванных повреждением лобового покрытия, требования конкуренции определяют необходимость использования «нестареющих» составов покрытия.

Деструкция противокоронного покрытия в эксплуатационных условиях может происходить в результате совместного действия электрического поля, температуры и воздушной среды. При решении поставленной задачи – оценки работоспособности покрытия при длительном воздействии указанных факторов – принципиально невозможно ускорение испытаний путем повышения уровня воздействия, т.к. увеличение напряженности электрического поля и температуры может привести к изменению механизма старения покрытия, коэффициенты пересчета скорости, которого неизвестны.

Поэтому в работе выполнена сравнительная оценка стойкости вариантов покрытия и определено влияние различных факторов на скорость его деструкции. Полученные данные выявили следующие закономерности:

1. Электрическая нагрузка. Увеличение напряженности электрического поля в изоляции ( $E_{исп}$ ) с 33 до 40 кВ/см резко ускоряет деструкцию покрытия при атмосферных условиях: на образцах, не имевших повреждений после воздействия  $E_{исп}=33$  кВ/см в течение 260 ч при 120 °С и 800 ч при 20 °С, покрытие в приэлектродной зоне оказалось полностью разрушенным за 400-1000 ч при  $E_{исп}=40$  кВ/см и 20 °С.

Столь резкая зависимость стойкости покрытия от  $E_{исп}$  не может быть объяснена только изменением его нагрузки, составляющем 20 %. По-видимому, здесь имеют место пороговые эффекты, связанные с появлением ионизационных процессов.

2. Температура. Влияние температуры прослеживается при сравнении результатов испытаний, проводившихся при температурах от 20 до 120 °С. Повышение температуры от 20 до 50 °С резко замедляет разрушение эмали, а при температурах выше 90 °С старение не наблюдается даже после 2000 ч. Однако в атмосферных условиях (20 °С) разрушение покрытия наблюдалось, несмотря на предварительную длительную выдержку при 120 °С.

3. Влажность. Приведенные выше данные о влиянии напряженности электрического поля и температуры дают основания предположить, что в процессе электрического старения покрытия большую роль играет влажность воздуха. Это подтвердили результаты опытов, показавших существенное замедление старения в атмосфере сухого воздуха.

Состав покрытия. Добавление в связующее небольшого количества пленкообразующей глифталевой эмали оказало существенное положительное влияние даже при атмосферных условиях.

Результаты ресурсных испытаний показали, во-первых, необходимость повышения влагостойкости покрытия и, во-вторых, – опасность для покрытия даже кратковременных воздействий электрических полей высокой напряженности.

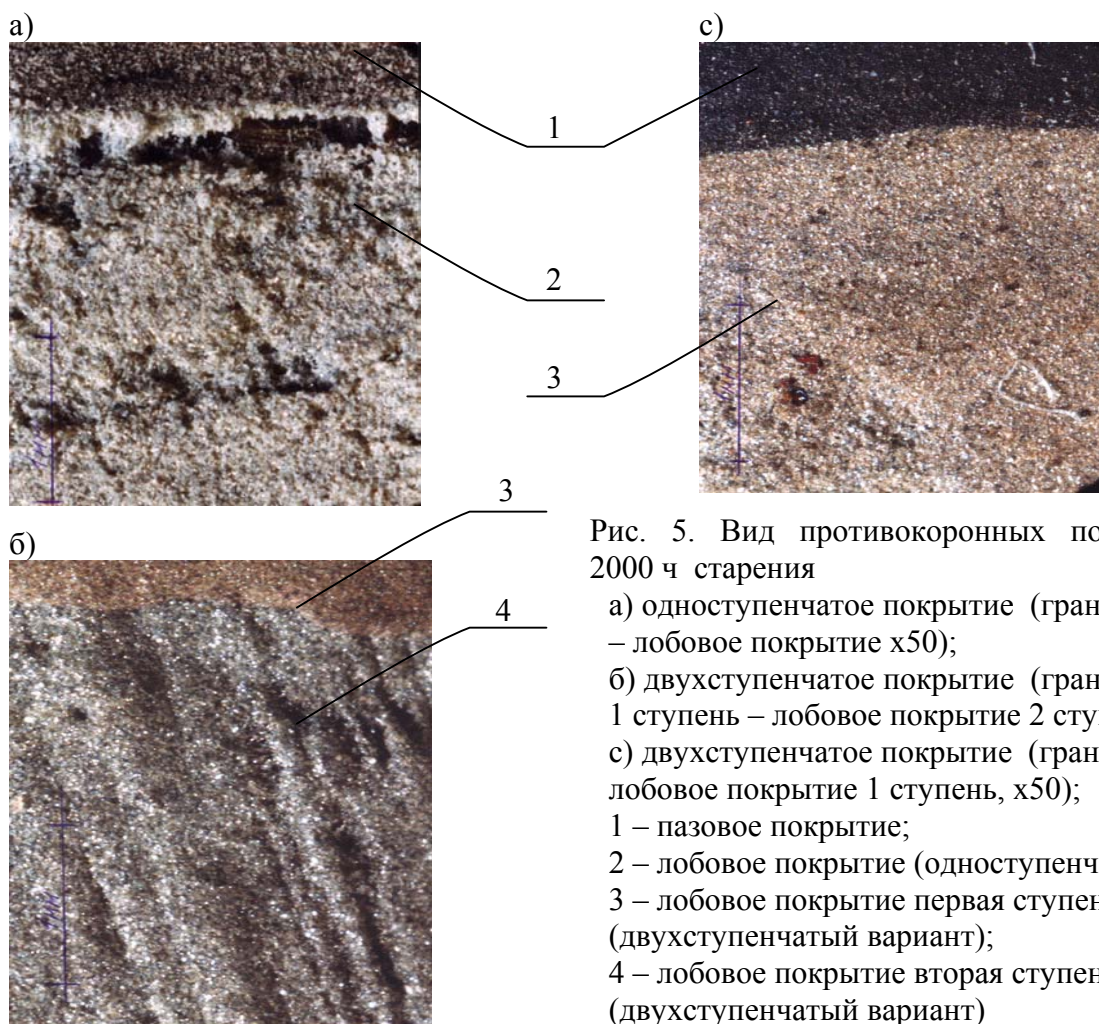


Рис. 5. Вид противокоррозионных покрытий после 2000 ч старения

- а) одноступенчатое покрытие (граница: пазовое – лобовое покрытие x50);  
 б) двухступенчатое покрытие (граница: лобовое 1 ступень – лобовое покрытие 2 ступень, x50);  
 с) двухступенчатое покрытие (граница: пазовое – лобовое покрытие 1 ступень, x50);  
 1 – пазовое покрытие;  
 2 – лобовое покрытие (одноступенчатый вариант);  
 3 – лобовое покрытие первая ступень (двухступенчатый вариант);  
 4 – лобовое покрытие вторая ступень (двухступенчатый вариант)

Для иллюстрации эффективности двухступенчатого покрытия на рис. 5 (а, б, с) представлены фотографии противокоррозионных двухступенчатых и одноступенчатых покрытий после 1080 ч ресурсных испытаний. Из сравнения рис. 5а (одноступенчатая конструкция) и рис. 5с (двухступенчатая конструкция) четко видно полное разрушение покрытия в первом случае и отсутствие разрушений во втором. На рис. 5б представлена граница между первой и второй ступенью лобового покрытия, видны изменения второй ступени, но их можно признать незначительными в сравнении с рис. 5а.



Таким образом, введение в конструкцию покрытия дополнительной, прилегающей к внешнему электроду, относительно короткой ступени с повышенной проводимостью стабилизирует работу покрытия в кратковременном (испытательном) и длительном (рабочем) режимах. В первом случае эффект достигается за счет более равномерного распределения тока по периметру края внешнего электрода, а во втором – благодаря повышению напряжения ионизации

#### Основные выводы и результаты работы.

1. Экспериментально установлено, что необходимое для расчетов эффективности покрытия математическое описание зависимости проводимости ( $G$ ) покрытия от напряженности электрического поля ( $E$ ) имеет вид экспоненты  $G=G_0 \exp(\beta E)$ . Определен диапазон параметров этой зависимости – начальной проводимости  $G_0$  и показателя нелинейности  $\beta$  для производственного потока партий противокоронного покрытия.

2. Обоснована методика измерения вольт-амперных характеристик, необходимых для определения  $G_0$  и  $\beta$ , с использованием напряжения постоянного тока; выявлено влияние стабилизирующих факторов – воздействия электрического поля и температуры.

3. Экспериментально определены предельные нагрузки покрытия – напряженность поля и плотность тока, превышение которых в испытательном режиме приводит к отказу покрытия и необратимым его повреждениям.

4. Разработана методика и выполнен расчет области параметров покрытия, в которых нагрузки в наиболее напряженном режиме не превышают предельно допустимые.

5. Выявлено влияние компонентов противокоронного покрытия – порошкообразных наполнителей и связующих лаков – на электрические характеристики покрытия, определены способы корректировки этих параметров и технологических свойств исследуемых композиционных материалов.

6. Разработаны новые состав и конструкция двухступенчатого покрытия, обеспечивающие предотвращение поверхностных разрядов при максимально возможных (до 110 кВ) кратковременных испытательных режимах и полное подавление ионизационных процессов при длительных эксплуатационных режимах. Разработанное покрытие, защищенное патентом РФ, используется в АО "Электросила" (что подтверждено актом внедрения, приведенным в диссертации).

#### Основные результаты работы опубликованы в следующих работах:

1. Ваксер Б.Д., Полонский Ю.А., Гегенава А.Г. Вольт-амперная характеристика краевого противокоронного покрытия статорных обмоток электрических машин высокого

напряжения: Тезисы докладов девятой международной конференции «Физика диэлектриков – 2000». 17-22.09.2000. – Санкт-Петербург, 2000. – С. 111-112.

2. Гегенава А.Г. Свойства противокоронного покрытия статорных обмоток электрических машин высокого напряжения: Конференция молодых специалистов электроэнергетики–2000. 18-22.09.2000. – Москва, 2000. – С. 27-29.

3. Ваксер Б.Д., Петров В.В., Гегенава А. Г. Подавление разрядов на поверхности обмоток электрических машин высокого напряжения: Труды IV Международной конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнология-2000». 18-22.09.2000.– Клязьма, 2000.–С. 291-292.

4. Ваксер Б.Д., Гегенава А. Г. Подавление поверхностных разрядов в конструкции проходного изолятора с помощью резистивного покрытия // Электротехника. – 2001. – № 6. – С. 52-56.

5. Гегенава А. Г. Противоразрядное покрытие стержней статорной обмотки турбогенератора с номинальным напряжением 27 кВ // Сборник «Электросила». – 2001.– № 40.– С. 22-28.

6. Ваксер Б.Д., Полонский Ю.А., Гегенава А.Г. Исследование характеристик противокоронных покрытий различного состава, используемых для статорных обмоток электрических машин: Материалы межвузовской научной конференции «XXIX Неделя науки СПбГТУ». 27.11-02.12.2001. – Санкт-Петербург, 2001.– Ч.1.– С. 76-77.

7. Гегенава А.Г. Исследование эмалевого противокоронного покрытия высоковольтных электрических машин: Труды третьей международной конференции «Электрическая изоляция – 2002». 18-21.06.2002. – Санкт-Петербург, 2002. – С. 268-269.

8. Гегенава А.Г. Свойства противокоронного покрытия статорных обмоток электрических машин высокого напряжения // Электричество. – 2002. – № 9. – С. 64-66.

9. Ваксер Б.Д., Гегенава А.Г. Воздействие эксплуатационных условий на противокоронные покрытия изоляции высоковольтных электрических машин: Труды четвертого международного симпозиума «Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования для энергетики, транспорта, нефтяной и газовой промышленности» ЭЛМАШ-2002. 7-11.10.2002. – Москва, 2002.– Ч. 2. – С. 79-80.

10. Гегенава А.Г., Полонский Ю.А. Карбид кремния как наполнитель в противокоронных композиционных материалах для высоковольтных электрических машин // Ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. 2002. № 4. С. 125-127.

По результатам работы получен Патент Российской Федерации № 2187874 «Обмотка электрической машины высокого напряжения». Действует с 30.06.2001. Авторы: Гегенава А.Г., Пищулина О.П. (заявка № 202001121365/09(022694) от 30.07.2001).