

На правах рукописи

Кокцинская Елена Михайловна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОКОРОННЫХ
ПОКРЫТИЙ ЛЕНТОЧНОГО ТИПА ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИСТЕМ ИЗОЛЯЦИИ 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 ВО «СПбГПУ»).

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Полонский Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Попов Виктор Васильевич

доктор технических наук,
Пак Владимир Моисеевич

Ведущая организация: Филиал ОАО «Силовые машины»
«Электросила» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 11 мая 2007 г. в 14 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. 284.

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

Автореферат разослан 10 апреля 2007 г.

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

Гумерова Н.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Для предотвращения краевых разрядов (коронирования) на поверхности изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин широко используются полупроводящие противокоронные покрытия, обладающие нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) за счет использования в качестве наполнителя порошка карбида кремния (SiC).

Покрытия выполняются как в виде эмалей, так и в виде лент. Полупроводящие ленты обладают рядом преимуществ перед эмалями:

- ленточные покрытия имеют более высокие механические характеристики и не повреждаются при укладке обмотки, что зачастую происходит в случае применения эмалей;
- ленты экологичны;
- после нанесения ленточного покрытия изделие сразу готово к дальнейшему производственному процессу, в отличие от эмалевого, которому для достижения необходимых электрических характеристик требуется сушка в течение 24 часов.

В настоящее время изоляция обмоток высоковольтных электрических машин изготавливается двумя основными способами: либо это изоляция на основе предварительно пропитанных слюдобумажных лент с их дальнейшим термопрессованием, либо с применением "сухих" (непротитанных) слюдобумажных лент с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой (ВНП) компаундами.

Полупроводящие ленточные покрытия могут применяться при обоих способах, они накладываются на основную изоляцию до опрессовки перед отверждением, или, при ВНП, до пропитки и отверждения.

ВНП подразделяется на два технологических процесса: пропитку отдельных стержней и полную ВНП. Полная ВНП, когда статор пропитывается с полностью уложенной обмоткой, изолированной сухими лентами и с нанесенным противокоронным покрытием, позволяет улучшить некоторые технические характеристики машины и существенно сокращает процесс изолировки и сборки, что приводит к значительному снижению стоимости изоляционной системы.

Ленточный вариант противокоронного покрытия незаменим при изготовлении изоляции высоковольтных электрических машин методом полной ВНП, поскольку эмалевые покрытия наносятся после прохождения изделием цикла ВНП, а в статоре с полностью уложенной обмоткой имеются места недоступные для их нанесения, что может приводить к невозможности испытаний машин.

Также у ленточного варианта противокоронного покрытия выше напряжение возникновения коронных разрядов, что, в связи со значительно возросшими сейчас требованиями по испытаниям электрических машин по этой характеристике, является существенным.

Противокоронные ленты с нелинейной ВАХ производятся рядом крупных зарубежных изготовителей изоляционных материалов. Однако опыт применения и проведенные испытания выявили их нестабильность – значительное ухудшение ВАХ в процессе ВНП. Это определяет актуальность разработки лент, обладающих устойчивостью к действию отечественных пропиточных компаундов, т.е. сохраняющих достаточную нелинейность ВАХ после ВНП.

Цель работы. Разработка ленточного противокоронного покрытия с нелинейной вольт-амперной характеристикой, пригодного для систем изоляции электрических машин, изготавливаемых методом вакуум-нагнетательной пропитки.

Цель работы обуславливает решение следующих задач, важных для современного электромашиностроения как с практической, так и научной точек зрения:

- разработка противокоронной ленты с нелинейной ВАХ, сохраняющей необходимые электрические характеристики под воздействием отечественных пропиточных компаундов, применяемых в настоящее время для ВНП;
- исследование влияния соотношения компонентов в материале разрабатываемого покрытия на его электрические характеристики;

- определение основных этапов технологического процесса изготовления нового материала и контроля наполнителя;
- установление влияния различных технологических факторов, воздействующих на противокоронные ленты в процессе изготовления изоляционной системы по методу ВПП, на величину их проводимости и нелинейности ВАХ;
- испытание разработанного материала и сравнение его с зарубежными аналогами противокоронных покрытий;
- моделирование электрических свойств созданных противокоронных лент для прогнозирования свойств материала в зависимости от соотношения компонентов.

Научная новизна работы.

1. Произведена оценка оптимального сочетания компонентов, основанная на знании технологических факторов, которым подвергается противокоронная лента в процессе изготовления изоляционной системы, и их влияния на электрические свойства материала. Анализ физико-химических процессов в материале, влияющих на проводимость, позволил достичь стабильности проводимости и нелинейности ВАХ лент, а в ряде случаев увеличения этих показателей, после прохождения материалом цикла ВПП.
2. Установлено, что технологическое старение пропиточного эпокси-ангидридного компаунда ПК-11, происходящее из-за роста числа сшивок между молекулами при нагревании и частичного испарения ингредиентов в процессе его использования, может привести к снижению величины электропроводности и коэффициента нелинейности полупроводящей ленты.
3. Определено, что толщина полупроводящего слоя в лентах оказывает существенное влияние на стабильность их свойств под действием ВПП; с увеличением толщины полупроводящего слоя лент возрастает их проводимость и нелинейность.
4. Показано, что электропроводность противокоронных ленточных покрытий существенно зависит от гранулометрического состава порошка карбида кремния. Наполнитель с большим процентным содержанием мелкодисперсной фракции оказался практически непригодным для изготовления лент с нелинейной ВАХ.
5. Предложена теоретическая модель четырехкомпонентного материала, состоящего из карбида кремния, эпоксидного связующего, лавсановой бумаги и воздушных включений. На основе теории перколяции получена формула, позволяющая описать электрические свойства разработанного противокоронного материала в зависимости от концентрации наполнителя в области выше порога протекания.

Практическая значимость работы.

1. В результате исследований разработана новая противокоронная нелинейная лента для сглаживания краевого эффекта в электрических машинах, которая может применяться для систем изоляции электрических машин, изготавливаемых методом ВПП. Основными компонентами данного композиционного материала являются: наполнитель – порошок карбида кремния, полимерная подложка – лавсановая бумага и эпоксидное связующее, взятые в определенном соотношении.
2. Установлено, что разработанный материал пригоден и для систем изоляции, изготавливаемых по технологии пропитанных лент.
3. Определено, что разработанный материал сохраняет необходимые электрические характеристики при ВПП компаундом ПК-11 на основе различных смол (ЭД-22 и DER-330).
4. Предложен способ контроля наполнителя для изготовления разработанного материала либо по гранулометрическому составу, либо по величине его коэффициента нелинейности.
5. Разработаны основные этапы технологического процесса изготовления противокоронных лент с нелинейной ВАХ.
6. Показано, что нелинейность ВАХ зарубежных аналогов противокоронных лент значительно снижается после цикла ВПП, в отличие от разработанного материала. Практическая значимость полученных результатов подтверждена актом об их использовании в фи-

лиале ОАО «Силовые машины» «Электросила» (г. Санкт-Петербург) – одним из ведущих в стране предприятий электромашиностроения.

7. Ряд результатов диссертационной работы, начиная с 2005 года, используется СПбГПУ в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 551300 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и инженеров по специальности 180300 «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника» на электромеханическом и вечернем электрорадиотехническом факультетах.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования влияния соотношения компонентов (концентрация наполнителя, использование порошков SiC разной дисперсности и различных подложек) на электрические характеристики противокоронных лент с нелинейной ВАХ в исходном состоянии и после прохождения материалом цикла ВМП.

2. Определение основных элементов технологического процесса изготовления разработанного материала – выбор вязкости пропиточного состава; толщины материала, определяемой зазором между валками; температуры сушки.

3. Изучение влияния технологических факторов, воздействующих на противокоронный ленточный материал при изготовлении изоляции методом ВМП, и оптимизация состава и размеров лент с учетом этих воздействий.

4. Способы контроля порошка карбида кремния для изготовления лент; зависимость между гранулометрическим составом наполнителя и свойствами противокоронных лент после цикла ВМП.

5. Теоретическая модель разработанного материала и формула, позволяющая описать его электропроводность в зависимости от концентрации наполнителя порошка SiC в области выше порога протекания.

6. Сравнение электрических характеристик разработанной противокоронной ленты и зарубежных аналогов после цикла ВМП.

Достоверность результатов. Достоверность обеспечивается обоснованным выбором и корректным использованием современных методов измерения электрофизических характеристик исследуемых материалов; изготовлением образцов в производственных условиях использования разрабатываемого материала; значительным количеством образцов; проведением повторных испытаний, показывающих воспроизводимость результатов.

Личный вклад автора состоит в постановке задач работы, изготовлении образцов и проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов. Все представленные в работе результаты получены автором лично. В процессе работы автор консультировался с к.т.н. Ваксером Б.Д. Автор благодарит сотрудников лаборатории электрической изоляции филиала ОАО «Силовые машины» «Электросила», содействовавших проведению исследований, в особенности инж. Пьянкову С.Н., и работников цеха № 4 того же предприятия.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. V международная конференция «Электротехнические материалы и компоненты», 20-25 сентября 2004, Крым, Алушта.

2. Всероссийская межвузовская научная конференция «XXXIII Неделя науки СПбГПУ», 29.11-4.12.2004, Санкт-Петербург.

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

4. Научно-практическая конференция и школа-семинар «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий», 16.06-18.06.2005, Санкт-Петербург.

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

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

7. IX Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах», 18.05-19.05.2006, Санкт-Петербург.

8. XI Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», 18-23 сентября 2006, Крым, Алушта.

Публикации. Опубликовано 16 печатных работ (из них 14 по теме диссертации).

Структура и объем диссертационной работы.

Работа состоит из списка основных сокращений и обозначений введения, трех глав, заключения, списка литературы (171 наименование), и содержит пять приложений, в том числе акты использования результатов работы. Общий объем диссертации 175 страниц, содержит 83 рисунка и 29 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, формулируются цель работы, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен обзор отечественных и зарубежных работ, отражающий современный взгляд на проблему сглаживания краевого эффекта в месте выхода обмотки из паза высоковольтных электрических машин с помощью противокоронных покрытий с нелинейной ВАХ.

Рассмотрены различные способы предотвращения возникновения краевых частичных разрядов на поверхности изоляции, их достоинства и недостатки. Сравниваются характеристики применяемых в настоящее время полупроводящих покрытий разного типа (эмалевые и ленточные) на основе порошка карбида кремния. Приводятся сведения о свойствах карбида кремния и механизме его электропроводности. Описывается влияние свойств компонентов на электропроводность эмалевых покрытий, возможность использования в качестве наполнителя ленточных покрытий порошка Fe_3O_4 . Приведены основные теоретические положения теории перколяции. Представлены современные способы изготовления изоляции электрических машин - на основе пропитанных лент и "сухих", с последующей ВМП.

Делается вывод о перспективности изготовления изоляции электрических машин высокого напряжения методом полной ВМП, когда статор пропитывается с полностью уложенной обмоткой и нанесенным полупроводящим ленточным покрытием. Констатируется, что ленточные покрытия зарубежных производителей значительно ухудшают свои характеристики под действием ВМП компаундом ПК-11, широко применяющегося для этой технологии в отечественном электромашиностроении.

Отмечается отсутствие отечественных разработок противокоронных покрытий ленточного типа с нелинейной ВАХ. Ставится задача о разработке подобного материала пригодного для современных технологий изготовления систем изоляции электрических машин.

Во второй главе представлены объекты исследований, методики и схемы измерений.

Объектами исследований являлись образцы полупроводящих лент, изготовленные в виде полос шириной 20 мм. Подложка пропусклась через ванну с пропиточным составом (ПС), а затем между валками с регулируемым расстоянием Δ между ними. Условную вязкость ПС η определяли вискозиметром ВЗ-4 с диаметром сопла 4 мм по ГОСТ 8420-74. Для предотвращения быстрого оседания наполнителя в ПС вводилась технологическая добавка аэросил.

Изготовленные образцы полупроводящих лент подвергались стандартному циклу ВМП филиала ОАО «Силовые машины» «Электросила», включающему предварительную сушку изделия при температуре $100-110^{\circ}C$ (на этом этапе полупроводящие ленты должны быть полностью отверждены), вакуумирование при давлении $P \leq 20$ Па, пропитку под давлением ($P=0,8$ МПа) и последующее отверждение при $160^{\circ}C$. Образцы подвергались циклу ВМП в цехе предприятия, вместе с изготавливаемой продукцией, для приближения к реальным условиям применения материала для создания изоляционной системы. Каждый образец ленты помещался между пластинками стеклотекстолита (обернутыми фторопластовой пленкой) для предотвращения искривления лент при воздействии производственно-

технологических факторов. Опыты показали, что фиксация образцов между пластинками не сказывалась на влиянии ВНП на их электрические характеристики, поскольку имеющийся зазор между ними и образцом обеспечивал компаунду ПК-11 (состав компаунда ПК-11: эпоксидная смола и изометилтетрагидрофталевый ангидрид) свободное проникновение.

После этого измерялись ВАХ лент при напряжении частотой 50 Гц. Для измерения поверхностной проводимости использовались металлические электроды “ножевого” типа, которые с помощью полупроводящей резины обеспечивали равномерный контакт с поверхностью образца. При подаче напряжения выше некоторой величины наблюдалось необратимое снижение тока в образце. Это, видимо, связано с разрушением части контактов между зернами наполнителя под воздействием приложенного высокого напряжения и выделяющегося за счет этого тепла. Для измерения установившихся значений токов, перед каждым измерением ВАХ образец выдерживался в течение 1 минуты при напряженности $E=9,9$ кВ/см (амплитудное значение).

Зависимость проводимости покрытий от напряженности электрического поля описывается экспоненциальной формулой:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \exp(\beta E), \quad (1)$$

где γ - поверхностная проводимость, E – напряженность электрического поля, γ_0 – коэффициент при $E \rightarrow 0$, β - коэффициент нелинейности.

Для расчета максимальной напряженности в начальной точке полупроводящего покрытия, где осуществляется контакт с проводящим низкоомным покрытием пазовой части, использовалась компьютерная программа, используемая в филиале ОАО «Силовые машины» «Электросила». Алгоритм расчета данной программы основан на уравнениях двухпроводной линии, проводимость покрытия описывается формулой (1), параметры γ_0 и β берутся из экспериментальных данных.

Гранулометрический анализ порошков был произведен на анализаторе “Analisetete 22 compact” фирмы Fritsch (Германия), в котором распределение частиц по размерам определяется методом лазерной дифракции.

Сопротивление порошков измеряли мегаомметром М4 по ГОСТ 4668-75, без приложения внешнего давления. Для этого проба порошка SiC помещалась в диэлектрический цилиндр между двумя металлическими электродами, высота столба порошка составляла 20 мм.

Для определения массового соотношения компонентов в лентах, образцы разрабатываемого материала взвешивались, затем помещались в печь при температуре 500°C , где выдерживались в течение 3 часов. По массам оставшегося в результате сжигания лент порошка SiC, и взвешенным отдельно материалам подложек, определялось массовое соотношение компонентов.

Контроль процесса отверждения осуществлялся измерением емкости образцов прибором Escort ELC-131D при температуре $100-110^{\circ}\text{C}$ до полной стабилизации этого параметра.

В первом разделе третьей главы представлены этапы исследования для нахождения оптимального состава полупроводящих лент:

- Выбор связующего, пригодного для применения при ВНП (отверждение лент на этапе предварительной сушки, сохранение нелинейности ВАХ материала после ВНП);
- Выбор подложки, позволяющей получить эластичный материал, обеспечивающий качественную намотку ленты и необходимые электрические характеристики;
- Выбор наполнителя, обеспечивающего необходимую величину проводимости и нелинейности ВАХ материала:
 - нахождение оптимальной концентрации SiC;
 - использование порошков SiC различной дисперсности;
 - нахождение способа контроля наполнителя.

В качестве основы ПС использовался эпоксидный модифицированный лак, применяемый для одного из типов пропитанных стеклослюдобумажных лент. Срок хранения лака с введенным ускорителем составил 7 дней, что является достаточным с производственной

точки зрения. Отверждение изготовленных образцов показало, что за ~3 часа происходит полное отверждение связующего, что удовлетворяет технологическим требованиям на этап предварительной сушки для изготовления изоляции методом ВМП. Следовательно, используемый лак пригоден для использования в качестве связующего полупроводящих ленточных покрытий.

Для дальнейшего выбора состава полупроводящих лент, устойчивых к воздействию компаунда ПК-11, в процессе исследований варьировались типы подложек (стеклоткань, лавсановая бумага), дисперсность наполнителя – микропорошка карбида кремния и содержание его относительно основы лака.

В качестве подложек полупроводящих лент были опробованы следующие: стеклоткань (СТ) марки ЛЭСБ толщиной 0,1 и 0,2 мм (ГОСТ 5937-81), лавсановая бумага (ЛБ) (ТУ 13-04-361-82). Проводимость и нелинейность полупроводящих лент на основе СТ толщиной 0,2 мм была гораздо ниже, чем для других используемых подложек, поэтому в дальнейшем она не исследовалась.

Были изготовлены образцы лент на основе порошка черного карбида кремния марки КЧМ-20 (ГОСТ 3647-80) с концентрацией наполнителя 55-75% мас. по отношению к сухому остатку лака. Вязкость ПС была одинаковой при изготовлении материалов на различных подложках для данного содержания SiC. Поскольку зависимости логарифма удельной поверхностной электропроводности от напряженности электрического поля $\ln\gamma=f(E)$ для исследуемых в работе покрытий характеризуются прямыми линиями, то имеет место экспоненциальная зависимость проводимости γ от напряженности E , описываемая формулой (1). Для образцов не подвергавшихся процессу ВМП, а только отвержденных, неоднородность образцов по параметрам γ_0, β на обеих подложках при одной и той же концентрации SiC была примерно одинаковой. После технологии ВМП неоднородность лент на основе СТ сильно

$\gamma \times 10^9, \text{ См}$

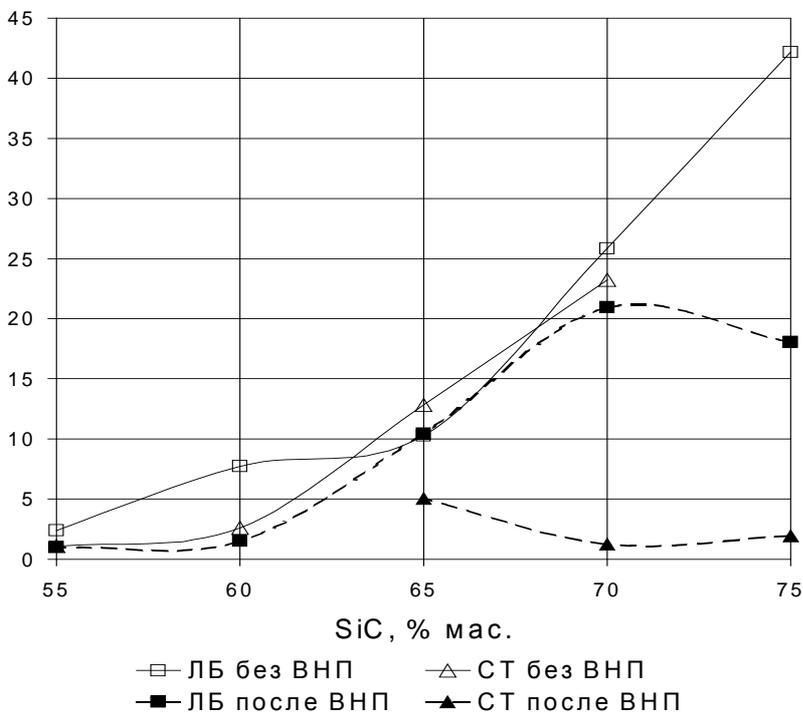


Рис. 1. Зависимость электропроводности лент в зависимости от концентрации наполнителя на основе ЛБ и СТ (при $E=9,9 \text{ кВ/см}$)

ния наполнителя не наблюдалось.

Было найдено массовое соотношение компонентов в материалах на различных подложках до ВМП. Для всех значений концентраций процентное содержание SiC выше в мате-

возросла - не менее, чем в два раза, как по γ_0 , так и по β , для всех концентраций, а для лент на основе ЛБ остался примерно на том же уровне для содержания 75-65% мас.

Полупроводящая лента на основе ЛБ после ВМП имеет максимум проводимости при концентрации SiC, равной 70% мас. (рис. 1). Дальнейшее снижение проводимости при увеличении концентрации наполнителя связано с недопиткой материала из-за высокой вязкости ПС. До пропитки проводимость лент как на основе ЛБ, так и СТ, увеличивалась с ростом концентрации. После цикла ВМП проводимость лент на СТ значительно снизилась и зависимости γ от содержания

риалах на основе ЛБ, по сравнению с СТ. Более высокая проводимость лент на основе ЛБ объясняется большим содержанием полупроводящего наполнителя в материале, чем у лент на основе СТ.

Установлено, что предельная напряженность электрического поля $E_{\text{пред}}$, при которой происходило перекрытие по поверхности образцов, выше для лент на ЛБ.

Таким образом, показано преимущество лент на основе ЛБ по электрическим характеристикам и величине напряженности перекрытия. В качестве подложки разрабатываемых лент была выбрана ЛБ.

Для изучения влияния дисперсности порошков на свойства лент в качестве наполнителя были взяты порошки SiC марок КЧМ-20 и КЧМ-28 с концентрацией 55-70% мас. по отношению к сухому остатку лака. Получено, что максимумом проводимости и нелинейности обладают ленты на основе порошка карбида кремния марки КЧМ-28 (с большим процентным содержанием крупнодисперсной фракции), при его концентрации равной 70% мас., поэтому к использованию в качестве наполнителя разрабатываемого материала рекомендован порошок этой марки

Учитывая нестабильность зернового и химического составов порошков SiC одной марки, проведены исследования по выбору способа контроля наполнителя.

В качестве наполнителей использовались порошки SiC одной марки (КЧМ-20) четырех разных поставок (порошки 1–4). Было определено электрическое сопротивление порошков SiC без приложения давления с помощью мегаомметра М4, имевшего рабочие напряжения 1,1 и 2,7 кВ. По этим данным для зависимости удельного объемного сопротивления порошка ρ_{SiC} от напряженности электрического поля E : $\rho_{\text{SiC}} = \rho_{\text{SiC}0} \cdot \exp(-\alpha E)$, где $\rho_{\text{SiC}0}$ – сопротивление при $E \rightarrow 0$, вычисляли коэффициент α , характеризующий нелинейность. Результаты представлены в табл.1.

Результаты гранулометрического анализа состава порошков 1- 4 приведены в табл. 2. Содержание крупных зерен (диаметр $d > 30$ мкм) преобладает в порошке 3, а в порошке 4 они полностью отсутствуют.

Из сравнения табл. 1, 2 видно, что для крупнодисперсных порошков (1 и 3) разброс значений измеренного сопротивления гораздо выше, чем для мелкозернистых, что связано с большей возможностью образования разнообразных контактов между зернами порошка. При этом у крупнодисперсных порошков коэффициент нелинейности α выше.

ВАХ полупроводящих лент, изготовленных на основе порошков SiC 1–4, измерялись на образцах, как прошедших цикл ВНП, так и не прошедших, а подвергавшихся только отверждению. На рис. 2 представлены результаты исследований лент, пропитанных составами с вязкостью $\eta = 200-250$ с, с наполнителями 1, 2 и 3 в виде зависимости удельной поверхностной проводимости γ от напряженности E . Данные для ленты на основе порошка 4 не приведены, поскольку этот материал потерял нелинейность ВАХ после ВНП. Этот факт, а также сравнение ВАХ лент на основе порошков 1–3 показывают, что наполнитель с наименьшим размером зерен оказался практически непригодным для изготовления лент с нелинейной ВАХ. По-видимому, в процессе пропитки происходило разрушение части контактов между зернами вследствие их относительно малой площади.

Материал с наполнителем 1 имеет самую высокую проводимость и наиболее однороден по нелинейности. Использование порошка 2 привело к сдвигу начала нелинейности ВАХ до $E = 11$ кВ/см. У лент на основе порошка 3 наблюдался большой разброс по нелинейности характеристик для других значений вязкости пропитываемого состава η , что, видимо, связано с повышенной седиментацией наполнителя в процессе изготовления ленты из-за большого содержания в нем крупных зерен.

Следует отметить значительное снижение электропроводности ленты с наполнителем 2 после ВНП, в то время как у лент на основе порошков 1 и 3 величина электропроводности даже увеличилась, что связано, видимо, с уплотнением материала во время цикла ВНП, приводящим к улучшению контактов между зернами SiC.

Таблица 1

Электрические свойства порошков SiC

Порошок SiC	1	2	3	4
Коэффициент нелинейности α , см/кВ	3,1	0,02	2,6	0,3
$\rho_{SiC} \times 10^{-6}$, Ом·м (при $U=2,7$ кВ)	82,1	3,4	114,3	380,4
Квар ρ_{SiC} , % (при $U=2,7$ кВ)	56,2	12,6	44,5	18,6

Таблица 2

Гранулометрический анализ состава порошков SiC

Фракция, мкм	Содержание частиц в порошках SiC, %			
	1	2	3	4
>30	18,8	0,4	36,2	0,0
>20	62,4	8,7	78,2	1,5
>15	84,3	24,4	92,2	10,8
>10	96,1	53,0	97,9	42,4
>5	99,0	83,9	99,1	85,4

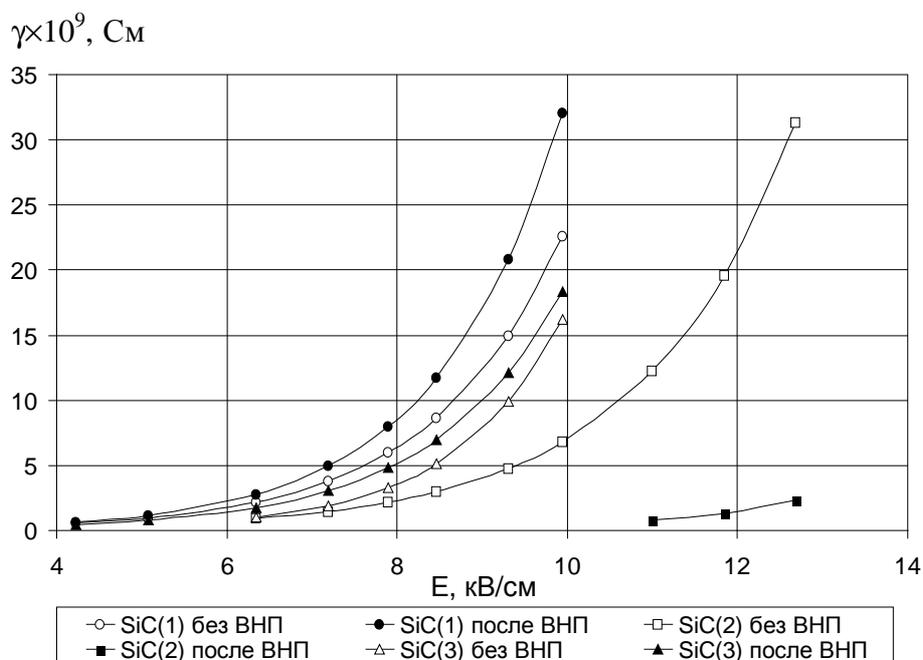


Рис. 2. Зависимость проводимости от напряженности электрического поля для лент на основе различных порошков карбида кремния без и после ВНП

Найденные из экспериментальных зависимостей параметры γ_0 и β из формулы (1) использовались для расчета напряженности электрического поля в начале полупроводящего покрытия E_0 по компьютерной программе, описанной выше. Для расчета были выбраны наиболее жесткие условия испытания электрических машин, изготовленных методом полной ВНП в филиале ОАО «Силловые машины» «Электросила»:

испытательное напряжение (амплитудное значение)..... $U_{исп\ m}=60,6$ кВ

длина покрытия..... $L=20$ см

диэлектрическая проницаемость изоляции..... $\epsilon=4,5$

толщина изоляции..... $d=4$ мм.

Расчет показал, что наименьшее значение E_0 имеет покрытие из ленты с наполните-

лем 1. Для ленты с порошком 2, подвергнутой циклу ВНП, напряженность в начале покрытия E_0 превышает предельно допустимую величину 11,1 кВ/см. Следует отметить, что для лент на основе порошков 1, 3 воздействие цикла ВНП привело к снижению величины расчетной максимальной напряженности E_0 в покрытии.

На основании проведенных исследований и расчетов можно сделать вывод, что при использовании в качестве наполнителя порошков черного SiC марки КЧМ-20, наиболее пригодными для изготовления противокоронных лент с нелинейной ВАХ являются порошки, содержащие 60..80% зерен диаметром $d > 20$ мкм, и имеющие коэффициент нелинейности $\alpha \geq 2,6$ см/кВ.

Таким образом, показана возможность контроля наполнителя для изготовления противокоронных лент либо по величине коэффициента нелинейности порошка SiC, либо по гранулометрическому составу.

Применяемый в настоящее время в филиале ОАО «Силовые машины» «Электросила» пропиточный компаунд ПК-11 изготавливается на основе эпоксидной смолы марки ЭД-22, либо ее зарубежного аналога DER-330. Разрабатываемые противокоронные ленты были подвергнуты ВНП в каждом из вариантов компаунда ПК-11, отличающихся маркой используемой эпоксидной смолы. Нелинейность ВАХ разрабатываемой противокоронной ленты сохраняется при пропитке в обоих компаундах.

Эффективность варианта покрытия с 70%-ным содержанием КЧМ-28 оценивали на натуральных макетах изоляции, на которых определяли напряжение начала коронирования и перекрытия. Были изготовлены макеты с изоляцией из сухих и пропитанных лент. Полупроводящая лента наматывалась с нахлестом в 1/4-2/3 ширины ленты.

В табл. 3 приведены результаты измерений напряжения начала коронирования и напряжения перекрытия по поверхности макета. Результаты испытаний говорят о пригодности созданного варианта противокоронного ленточного покрытия для изготовления изоляционной системы на основе как пропитанных, так и сухих лент. Следует отметить, что перекрытие по поверхности не приводило к прогару покрытия, в отличие от эмалевого варианта покрытия, и при повторном подъеме напряжение перекрытия происходило при том же значении напряжения.

Таблица 3

Испытание макетов с полупроводящим ленточным покрытием

Изоляция	Средняя толщина изоляции, мм	Длина покрытия, мм	Напряжение начала коронирования, кВ	Напряжение перекрытия, кВ
Пропитанные ленты	2,0	79,0	27,0	51,0
Сухие ленты	2,8	61,0	21,0	49,5
Сухие ленты	2,3	100,0	20,4	61,0

Во втором разделе третьей главы представлены основные этапы технологического процесса изготовления противокоронных лент с нелинейной ВАХ, предложенного в рамках данной работы.

Технологию изготовления полупроводящих лент можно изобразить схемой, изображенной на рис. 3.

Таким образом, для создания технологического процесса необходимо решить основные следующие задачи:

- определение вязкости пропитывающего состава;
- выбор толщины ленты (зазора между валками Δ);
- выбор концентрации аэросила;
- выбор температуры сушки.

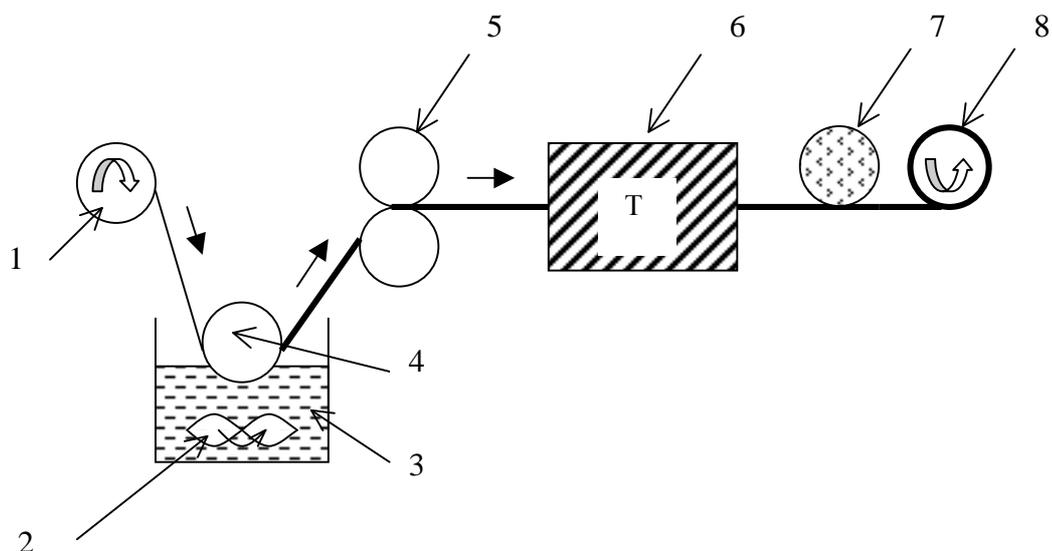


Рис. 3. Основные этапы технологии изготовления полупроводящих лент

- 1– Ролик с подложкой;
- 2– Мешалка;
- 3– Ванна с пропитывающим составом (лак + SiC + аэросил);
- 4– Направляющий ролик;
- 5– Валки;
- 6– Сушильная зона с температурой T;
- 7– Рулон с фторопластовой пленкой;
- 8– Рулон готовой полупроводящей ленты.

В процессе производства будет наблюдаться постоянное изменение соотношения компонентов в ПС, что обуславливает важность нахождения оптимального диапазона η , который необходимо сохранять в процессе изготовления лент для получения материала с требуемыми характеристиками.

Поскольку ранее было определено оптимальное процентное содержание SiC, равное 70% по отношению к сухому остатку лака, то регулирование вязкости η велось разбавлением ПС растворителем - ацетоном. Были изготовлены образцы противокоронных лент на основе четырех различных порошков SiC, вязкость ПС варьировалась в широком диапазоне $\eta=31-311$ с. Наиболее однородные и прогнозируемые по нелинейности и электропроводности ленты, вне зависимости от дисперсного состава наполнителя, получились при вязкости ПС $\eta=90-250$ с.

Известно, что в процессе многократного использования происходит изменение характеристик пропиточного компаунда ПК-11, его технологическое старение, проявляющееся в постепенном нарастании вязкости из-за роста числа линейных, а затем и пространственных сшивок при нагревании, а также частичного испарения ингредиентов, причем с разной скоростью (испарение ангидрида происходит более интенсивно, чем летучих фракций смолы). Поэтому в процессе эксплуатации состаренный компаунд разбавляют свежим для обеспечения определенной достаточно низкой вязкости, необходимой для качественной пропитки, и восполнения объема компаунда, израсходованного на пропитку изделий, вследствие чего соотношение состаренного к новому в общем объеме используемого пропиточного компаунда часто изменяется.

Во время экспериментов, выполняемых в диссертации, вязкость пропиточного компаунда и соотношение в нем состаренной компоненты к новой сопоставлялись с получаемыми электрическими характеристиками полупроводящих лент. Вязкость компаунда ПК-11, измеренная за время эксперимента 5 раз, сохранялась практически неизменной. Образцы полу-

проводящих лент, изготовленные на основе ПС с вязкостью, варьировавшейся в диапазоне $\eta=252-31$ с, и имевшие минимально возможную толщину b_{\min} , подвергались циклу ВНП в разные дни, с интервалами между ними, в течение которых происходило изменение состояния пропиточного компаунда ПК-11. Было сопоставлено содержание состаренной фазы в компаунде ПК-11 и электропроводность полупроводящих лент после цикла ВНП. Из результатов эксперимента видно, что при соотношении состаренного компаунда к новому $m_{\text{состар}}/m_{\text{нов}} \approx 6,8-7,0$ сохранялась стабильность проводимости полупроводящих лент. При возрастании этого соотношения до 7,9 электропроводность всех изготовленных вариантов лент значительно снизилась. Это можно объяснить тем, что при относительно большом содержании в компаунде ПК-11 состаренной фазы произошло обеднение компаунда ангидридом, что вызвало снижение степени полимеризации компаунда при последующем отверждении. Вследствие этого снизилось контактное взаимодействие между зёрнами наполнителя, что и привело к уменьшению величины проводимости материала.

Для избежания влияния степени состаренности компаунда представляло интерес изучение влияния на ВАХ толщины полупроводящей ленты, определяемой количеством наносимого на подложку ПС, которое регулировалось путем изменения величины зазора между валками Δ . Были изготовлены образцы (вязкость ПС $\eta=114$ с) трех вариантов толщин b : b_{\min} ; $1,7b_{\min}$; $2,2b_{\min}$. Далее эти образцы были одновременно подвергнуты ВНП.

В табл. 4 приведены значения электропроводности при напряженности $E=9,9$ кВ/см, средние значения параметров β и их коэффициенты вариации для лент с различной толщиной полупроводящего слоя после цикла ВНП. Видно, что с увеличением толщины противокоронных лент, возрастает и их проводимость, и нелинейность. Это можно объяснить тем, что с увеличением толщины слоя ПС, в объеме материала возрастает размер областей, в которые затруднено проникновение компаунда. После цикла ВНП наблюдается некоторое уменьшение толщины лент. Соотношение толщин лент без ВНП, только отвержденных, и после ВНП $b_{\text{Б}}/b_{\text{П}}$ приведено в табл. 4. Следует также отметить снижение разброса коэффициента нелинейности β при увеличении толщины полупроводящего слоя лент.

Таблица 4

Параметры лент с различной толщиной полупроводящего слоя, подвергнутых циклу ВНП

Толщина b	$\gamma \times 10^9$, См (при $E=9,9$ кВ/см)	β , см/кВ	$K_{\text{вар}} \beta$, %	$\frac{b_{\text{Б}}}{b_{\text{П}}}$	E_0 , кВ/см
b_{\min}	1,7	0,26	14,2	2,9	13,7
$1,7b_{\min}$	17,2	0,66	3,4	1,9	9,2
$2,2b_{\min}$	28,4	0,70	2,9	1,7	8,7

Как видно из результатов расчета по программе, описанной ранее, величина E_0 уменьшается с увеличением толщины ленты (табл. 4). При толщине полупроводящего слоя меньше некоторой пороговой величины, величина E_0 превышает $E_{\text{пред}}$, что приведет к повреждению покрытия в процессе испытания изоляции.

Учитывая условия, что толщина ленты должна быть больше b_{\min} , но при этом обеспечивать сохранение технологичности, то оптимальной является толщина, равная $1,7b_{\min}$.

Опытным путем было установлено, что удаление растворителя из изготовленной ленты, до начала отверждения материала, удается добиться сушкой при температуре 90°C в течение 10 минут. Срок хранения изготовленной ленты составляет не менее 2 месяцев.

Впервые в данной работе установлено влияние аэросила на сохранение нелинейности и электропроводности противокоронных лент под воздействием пропиточного компаунда при ВНП. Были изготовлены ленты на основе ПС одинаковой вязкости, но с различной концентрацией аэросила (А-D). Результаты измерения ВАХ лент без ВНП, только отвержденных, и после ВНП представлены на рис. 4. Видно, что для лент без ВНП концентрация аэросила не влияет на электрические характеристики. После цикла ВНП при концентрации аэросила D электропроводность и нелинейность противокоронной ленты возросли, что, по-

видимому, связано с уплотнением структуры материала при увеличении процентного содержания технологической добавки.

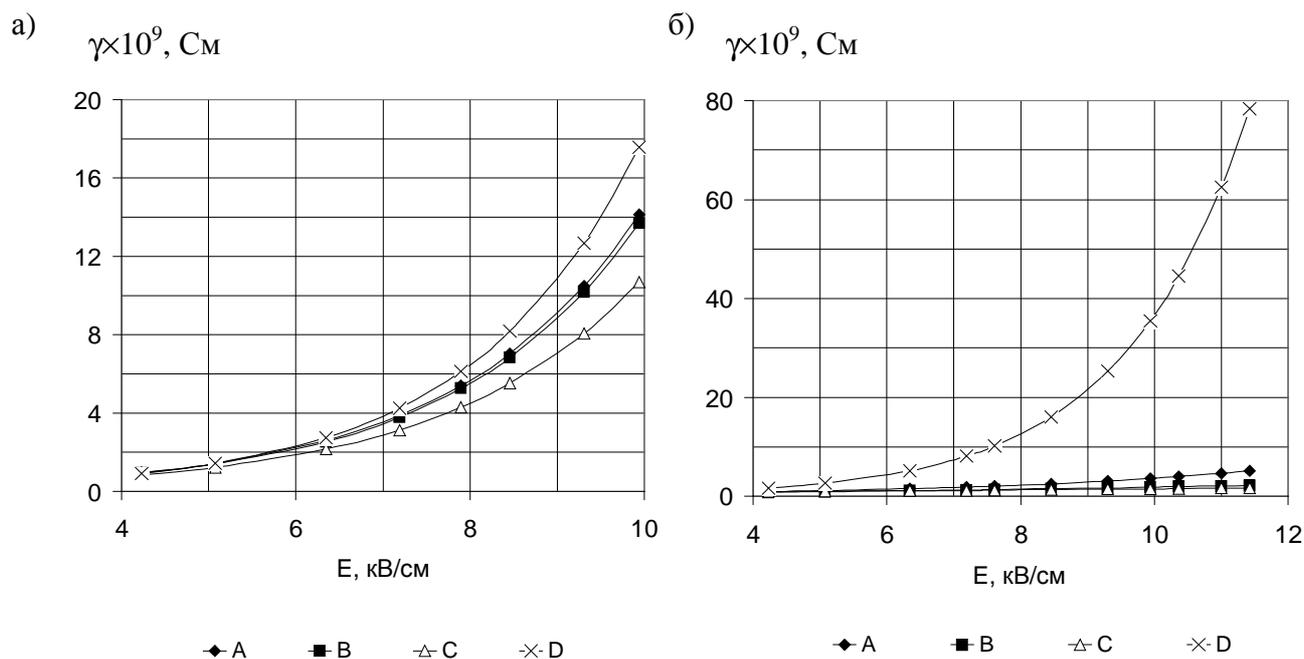


Рис. 4. ВАХ противокоронных лент с различным содержанием аэросила без ВНП (а) и после ВНП (б)

Апробация полученного материала проведена испытанием на стержне с двухступенчатой противокоронной системой. Высокопроводящая ступень длиной 11 см была выполнена из разработанного полупроводящего ленточного материала, намотанного вполнахлеста, низкопроводящая (длиной 16 см) – из эмали ПЛК-259, применяемой в филиале ОАО «Силовые машины» «Электросила». Изоляция стержня выполнена по технологии пропитанных лент (толщиной 2 мм), его внешний вид приведен на рис. 5. При напряжении 74 кВ, в зоне покрытия отсутствовали видимые электрические разряды, в то время как напряжение перекрытия подобного стержня с противокоронной двухступенчатой системой, выполненной на основе эмалей, составляет ≈ 35 –40 кВ.

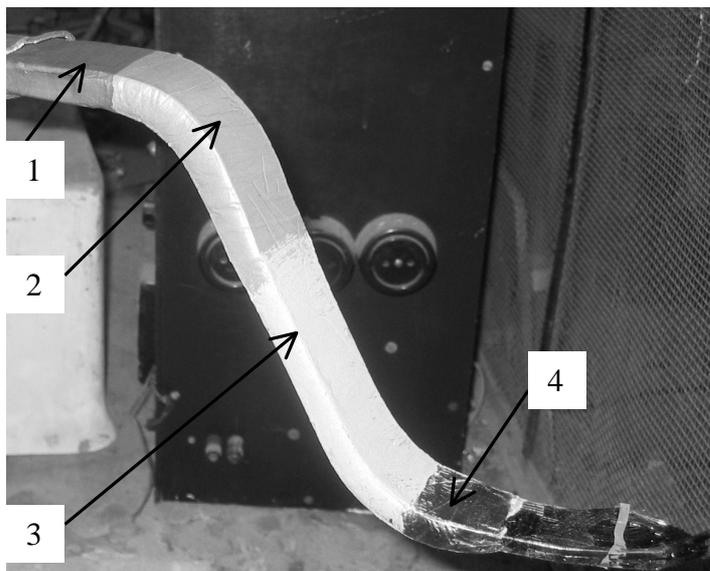


Рис. 5. Стержень с двухступенчатой конструкцией полупроводящего покрытия

- 1 – пазовое покрытие;
- 2 – разработанная противокоронная лента;
- 3 – полупроводящая эмаль ПЛК-259;
- 4 – изоляция.

В третьем разделе главы 3 предложена теоретическая модель разработанного противокоронного материала, позволяющая описать электрические свойства четырехкомпонентного материала, состоящего из мелкодисперсного полупроводящего наполнителя (карбид кремния), эпоксидного связующего, полимерной подложки (ЛБ) и воздушных включений (ВВ), выведена формула для расчета проводимости материала в зависимости от концентрации наполнителя.

Для описания свойств неоднородных сред широко применяется теория перколяции (протекания). Если в начальный момент все пространство заполнено изолятором, а затем случайным образом вводятся вкрапления проводника, то при малой концентрации проводящего наполнителя x проводящие области появляются одиночно или в виде небольших кластеров. По мере возрастания x появляются и большие скопления, которые вместе с малыми образуют изолированные кластеры. Когда концентрация x приближается к критической x_C , большие кластеры начинают сливаться друг с другом. При $x=x_C$ образуется, так называемый, бесконечный кластер (БК), система становится проводящей. По мере возрастания $x>x_C$ БК увеличивается, поглощая меньшие кластеры, и проводящие цепочки пронизывают всю систему. Согласно теории перколяции для концентрации $x>x_C$ зависимость удельного объемного сопротивления имеет вид: $\rho = \rho_H (x - x_C)^{-t}$, где x – объемная концентрация проводящей (полупроводящей) фазы с сопротивлением ρ_H ; x_C – критическая концентрация (порог протекания); $t \approx 1,6$ для трехмерных систем.

Были изготовлены образцы полупроводящих лент с различной концентрацией x карбида кремния. Сопротивление материала и связующего было определено по ГОСТ 6433.2-71. Сопротивление противокоронных лент было измерено без ВВП, в отвержденном состоянии, и после прохождения ими цикла ВВП. Были определены объемные соотношения компонентов в образцах: x , $x_{\text{лак}}$, $x_{\text{ЛБ}}$, $x_{\text{ВВ}}$.

Так как ВВ и ЛБ являются диэлектрическими включениями, то можно предположить, что в процессе электропроводности они не участвуют, следовательно, противокоронный материал можно рассматривать как двухкомпонентный, состоящий из лака и наполнителя. Полученная бинарная смесь будет иметь уже другие значения концентраций компонентов. Если обозначить объемную концентрацию SiC в приведенной смеси x' , тогда $x'_{\text{лак}} = 1 - x'$. Параметры x' и $x'_{\text{лак}}$ связаны с x и $x_{\text{лак}}$ зависимостями:

$$x' = \frac{x}{x + x_{\text{лак}}}; \quad x'_{\text{лак}} = \frac{x_{\text{лак}}}{x + x_{\text{лак}}}. \quad (2)$$

Определены критические концентрации наполнителя x_C' без ВВП и после 7,0 и 4,8 % соответственно. Это значительно ниже среднего теоретического значения, полученного при компьютерном моделировании, $x_{C \text{ теор}} = 15\%$.

Степенная зависимость сопротивления материала имеет место на участке $x>x_C$, где найдено значение параметра t , равное 0,22 (без ВВП) и 0,29 (после ВВП).

Модель исследуемого материала представляет собой плотно упакованную систему с введенными в нее непроводящими ВВ и волокнами подложки, создающими принудительное структурирование проводящей фазы путем уменьшения объема, в котором она распределяется. При такой структуре непрерывность проводящей фазы сохраняется до очень малых значений концентраций, чем и можно объяснить полученное низкое значение x_C' . Если предположить, что волокна подложки расположены вдоль длины БК, то их и ВВ наличие сказывается только на уменьшении площади поперечного сечения БК $S_{\text{БК}}$. При учете сопротивления диэлектрических прослоек между зёрнами наполнителя, в предположении, что они имеют одинаковую толщину, итоговая формула для расчета ρ противокоронных лент в зависимости от содержания полупроводящего наполнителя имеет вид, в области при $x' > x_C'$:

$$\rho = \frac{S_{\text{БК}}}{S_{\text{БКЭКСП}}} \left[\frac{1 - x_C'}{x' - x_C'} \right]^t \left(\rho_H + \frac{\pi D^2}{4(h + D)} \cdot \frac{h}{(\pi a^2 + Q_{\text{эф}}) \cdot \sigma_D} \right), \quad (3)$$

где σ_D – проводимость диэлектрической прослойки, h – ее толщина, a – радиус контактного пятна, D – средний диаметр частиц, $Q_{\text{эф}}$ – эффективная проводящая площадь вне контактного пятна, $S_{\text{БКЭКСП}}$ – площадь поперечного сечения БК с учетом ее уменьшения за счет ЛБ и ВВ. Расчет толщин прослоек между частицами в зависимости от x' производился по

формуле для кубической упаковки. Варьируя $Q_{эф}$ в области, ограниченной радиусами зерна

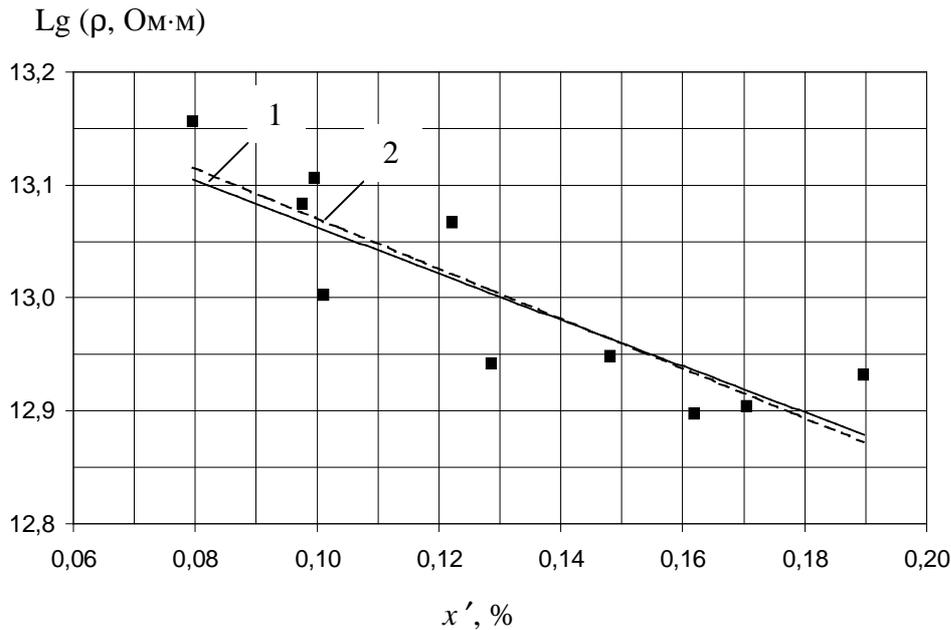


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные зависимости сопротивления противокоронных лент в зависимости от концентрации наполнителя без цикла ВНП

1 – эксперимент; 2 – расчет

наполнителя и контактного пятна a , рассчитанная по формуле (3) и экспериментальная кривые совпадают для материала без ВНП (рис. 6). Экспериментальное и расчетное значения сопротивления лент после ВНП различаются приблизительно на полпорядка, что видимо связано с увеличением количества непосредственных контактов между частицами.

В четвертом разделе третьей главы приводятся данные о грануло-

метрическом составе наполнителей полупроводящих лент зарубежного производства фирм Isola и Isovolta. Дисперсный состав очень близок к порошкам 1, 3 исследованным в данной работе (табл. 2). Также сравниваются электрические характеристики зарубежных лент Isola (марок 217.21 и 217.31, измерение ВАХ произведено на постоянном напряжении) и Isovolta (марки EGSB 2703) и разработанного материала после цикла ВНП, они приведены на рис. 7.

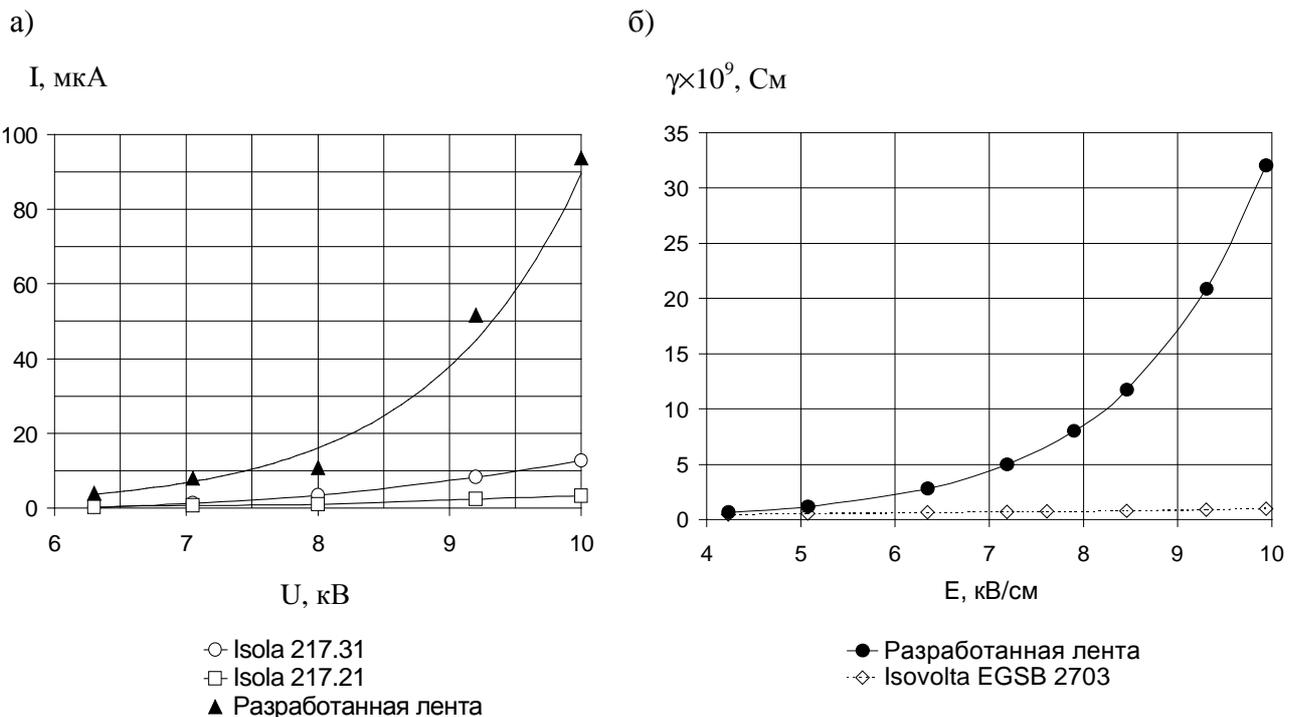


Рис. 7. Сравнение электрических характеристик разработанной ленты с лентами фирм Isola (а) и Isovolta (б) после цикла ВНП

Видно, что зарубежные аналоги противокоронных лент практически утратили нелинейность ВАХ после ВВП, в отличие от материала, разработанного в диссертации.

Основные выводы и результаты.

1. В результате работы создана новая противокоронная лента с необходимыми параметрами электропроводности и нелинейности ВАХ, позволяющая изготавливать системы изоляции электрических машин методом ВВП.

2. Установлено, что разработанная лента может быть использована и для систем изоляции на основе пропитанных лент.

3. Выбор оптимального соотношения компонентов позволил создать противокоронную ленту, отвечающую предъявляемым требованиям к материалу, подвергающемуся ВВП. При этом удалось добиться, что при ВВП проводимость и нелинейность материала либо не снижаются, либо даже происходит увеличение этих показателей. Основными компонентами разработанной противокоронной ленты являются: наполнитель - порошок карбида кремния, эпоксидное связующее и подложка – лавсановая бумага.

4. Показана возможность контроля наполнителя для изготовления противокоронных лент либо по величине коэффициента нелинейности порошка, либо по его гранулометрическому составу.

5. Впервые установлено, что технологическое старение пропиточного компаунда ПК-11, происходящее из-за роста числа сшивок между молекулами при нагревании и частичного испарения ингредиентов, может привести к снижению величины электропроводности и коэффициента нелинейности полупроводящей ленты. Для предотвращения этого влияния предложено выбирать толщину ленты больше некоторой пороговой величины. Выяснено, что в процессе ВВП происходит дополнительное уплотнение материала.

6. Определены основные этапы технологического процесса производства противокоронного ленточного материала, предусматривающие:

- пропитку подложки в пропитывающем составе с вязкостью $\eta=90-250$ с, определенную вискозиметром ВЗ-4 с диаметром сопла 4 мм по ГОСТ 8420-74;
- пропускание подложки между валками с зазором, обеспечивающим толщину материала равную $1,7b_{\min}$;
- сушку материала при температуре 90°C в течение 10 минут.

7. Впервые установлено влияние аэросила на сохранение стабильности проводимости и нелинейности противокоронного материала, подвергающегося ВВП.

8. На основании теории перколяции, в соответствии с предложенной в настоящей работе моделью, получена формула расчета проводимости материала в зависимости от концентрации наполнителя, в области выше порога протекания.

9. Показано, что противокоронные ленты зарубежных производителей значительно снижают нелинейность ВАХ после цикла ВВП по сравнению с материалом, разработанным в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Кокцинская, Е.М.* Исследование электропроводности полупроводящих лаков на основе карборунда (SiC) / Е.М. Кокцинская, Н.М. Ваксер // *Материалы межвузовской научной конференции “XXX Неделя науки СПбГТУ”*. 26.11-1.12.2001, Санкт-Петербург. – СПб.: СПбГТУ, 2002. – Ч. II. – С. 24-25.
2. *Кокцинская, Е.М.* Исследование свойств нелинейных противокоронных составов на основе эпоксидной смолы / Е.М. Кокцинская, А.Г. Гегенава // *Материалы V международной конференции “Электротехнические материалы и компоненты”*. 20.09-25.09.2004, Крым, Алушта. – М.: МЭИ, 2004. – С. 90-91.
3. *Кокцинская, Е.М.* Влияние концентрации карбида кремния на свойства противокоронных ленточных покрытий для электрических машин / Е.М. Кокцинская, Б.Д. Ваксер // *Мате-*

- риалы Всероссийской межвузовской научной конференции “XXXIII Неделя науки СПбГПУ”. 29.11-4.12.2004, Санкт-Петербург. – СПб.: СПбГПУ, 2005. – Ч. II. – С. 33-34.
4. *Кокцинская, Е.М.* Разработка покрытия ленточного типа для предотвращения краевых разрядов в изоляции электрических машин высокого напряжения / Е.М. Кокцинская, Б.Д. Ваксер, А.Г. Гегенава, Ю.А. Полонский // *Электротехника*. – №3. – 2005. – С. 22-25.
 5. *Кокцинская, Е.М.* Противокоронные покрытия ленточного типа для электрических машин высокого напряжения / Е.М. Кокцинская // *Материалы IX Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах”*. 18.05-19.05.2005, Санкт-Петербург. – СПб.: СПбГПУ, 2005. – С. 196-197.
 6. *Кокцинская, Е.М.* Исследование электропроводности противокоронных покрытий для высоковольтных электрических машин / Е.М. Кокцинская // *Материалы научно-практической конференции и школы-семинара “Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий”*. 16.06-18.06.2005, Санкт-Петербург. – СПб.: СПбГПУ, 2005. – С. 74-80.
 7. *Кокцинская, Е.М.* Исследование противокоронных покрытий ленточного типа для высоковольтных электрических машин / Е.М. Кокцинская, Ю.А. Полонский // *Материалы научно-практической конференции и школы-семинара “Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий”*. 16.06-18.06.2005, Санкт-Петербург. – СПб.: СПбГПУ, 2005. – С. 80-86.
 8. *Кокцинская, Е.М.* Оптимизация состава и технологии изготовления противокоронных полупроводящих лент / Е.М. Кокцинская, Б.А. Мурашев, Н.М. Ваксер // *Материалы межвузовской научной конференции “XXXIV Неделя науки СПбГПУ”*. 28.11-3.12.2005, Санкт-Петербург. – СПб.: СПбГПУ, 2006. – Ч. II. – С. 14-15.
 9. *Кокцинская, Е.М.* Влияние наполнителя на свойства противокоронных ленточных покрытий для электрических машин высокого напряжения / Е.М. Кокцинская, Б.Д. Ваксер // *Труды четвертой Международной научно-технической конференции “Электрическая изоляция-2006”*. 16.05-19.05.2006, Санкт-Петербург. – СПб.: СПбГПУ, 2006. – С. 226-228.
 10. *Кокцинская, Е.М.* Моделирование электрических свойств трехкомпонентного антикоронного материала, используемого в высоковольтных электрических машинах / Е.М. Кокцинская, Ю.А. Полонский // *Труды четвертой Международной научно-технической конференции “Электрическая изоляция-2006”*. 16.05-19.05.2006, Санкт-Петербург. – СПб.: СПбГПУ, 2006. – С. 243-246.
 11. *Кокцинская, Е.М.* Применение теории перколяции к противокоронным ленточным покрытиям для электрических машин высокого напряжения / Е.М. Кокцинская // *Материалы IX Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах”*. 18.05-19.05.2006, Санкт-Петербург. – СПб.: СПбГПУ, 2006. – С. 358-359.
 12. *Кокцинская, Е.М.* Выбор наполнителя пропиточного состава для ленточного противокоронного покрытия высоковольтных электрических машин / Е.М. Кокцинская, Б.Д. Ваксер, С.Н. Пьянкова // *Труды XI-ой Международной конференции “Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты”*. 18.09-23.09.2006, Крым, Алушта. – М.: МЭИ, 2006. – Ч. 1. – С. 33-34.
 13. *Кокцинская, Е.М.* Моделирование электрических свойств трехкомпонентного материала, применяемого для противокоронной защиты изоляции высоковольтных электрических машин / Е.М. Кокцинская, Ю.А. Полонский // *Труды СПбГТУ. Электроэнергетическое оборудование: надежность и безопасность*. №501. – СПб.: СПбГПУ, 2006. – С. 89-99.
 14. *Кокцинская, Е.М.* Выбор наполнителя для нелинейных противокоронных лент, используемых в электрических машинах высокого напряжения / Е.М. Кокцинская, Б.Д. Ваксер, Ю.А. Полонский // *Электротехника*. – №3. – 2007. – С. 13-18.