

На правах рукописи



Редько Виталий Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность: 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

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

Томск 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный консультант:** Гольдштейн Александр Ефремович, доктор технических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:** Смирнов Геннадий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Недавний Олег Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры оснований, фундаментов и испытаний сооружений Томского Государственного Архитектурно-Строительного Университета.

Седалищев Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (г.Барнаул).

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Защита состоится " 17 " сентября 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета



Е.А. Васендина

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный консультант:** Гольдштейн Александр Ефремович, доктор технических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:** Смирнов Геннадий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Недавний Олег Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры оснований, фундаментов и испытаний сооружений Томского Государственного Архитектурно-Строительного Университета.

Седалищев Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (г.Барнаул).

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Защита состоится " 17 " сентября 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета



Е.А. Васендина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Основным параметром качества кабельных изделий, определяющим их эксплуатационные характеристики, является целостность изоляции. С целью обеспечения качества продукции кабельные изделия в процессе производства подвергаются контролю электроискровым методом. Суть метода заключается в том, что при движении изделия по технологической линии к поверхности его изоляции прикладывается высокое напряжение посредством специального электрода, а токопроводящая жила, броня или экран заземляются. При попадании дефектного участка изоляции кабельного изделия в зону контроля происходит искровой разряд, что фиксируется электроискровым дефектоскопом, качественная изоляция при этом не повреждается. Контроль электроискровым методом является обязательным при производстве кабельных изделий с полимерной изоляцией с рабочими напряжениями до 3 кВ.

Данный вид контроля применяется на производстве с 50-х годов 20-го века. Несмотря на большой мировой опыт его применения, остается ряд нерешенных вопросов. Отсутствует качественное и количественное описание видов и геометрии дефектов, обнаруживаемых данным видом контроля. Не описаны модели дефектной и бездефектной изоляции как электрической нагрузки при электроискровом контроле. Не выявлены различия контроля напряжением различной формы и частоты. Недостаточно изучены вопросы обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала при работе с высоковольтными электроискровыми дефектоскопами.

**Цель диссертационной работы** - комплексное решение научных и технических проблем эффективного использования электроискрового метода контроля в производстве кабельных изделий.

### **Основные решаемые задачи:**

- определение дефектов изоляции, обнаруживаемых электроискровым методом контроля, их качественная и количественная оценка;
- разработка математической модели изоляции дефектной и бездефектной;
- разработка методов обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала при проведении электроискрового контроля высоким напряжением;
- определение эффективности контроля напряжением различной формы и частоты;
- совершенствование методов аттестации электроискровых дефектоскопов;
- совершенствование нормативной базы электроискрового контроля кабельных изделий.

**Методы исследований.** Теоретические исследования проводились с использованием методов математического анализа, математической физики и аппарата математической статистики. Математическое моделирование результатов электродинамического взаимодействия электрического поля электрода дефектоскопа с объектом осуществлялось средствами современного программного обеспечения. Физическое моделирование и экспериментальная проверка теоретических положений проводились с использованием современной контрольно-измерительной аппаратуры, специальных стендов и измерительных установок.

### **Научная новизна работы** заключается в следующем:

- предложена методика расчета глубины обнаруживаемых дефектов в изоляции кабельных изделий по электротепловому пробую, основанная на комплексном учете влияния свойств диэлектрика и режимов контроля;

- в результате теоретических и экспериментальных исследований определено влияние формы и частоты испытательного напряжения на достоверность электроискрового технологического контроля для реальных условий взаимодействия поля электрода и контролируемого кабельного изделия;
- предложен метод обнаружения дефектов при технологическом контроле электроискровыми дефектоскопами по изменению погонных электрической емкости и диэлектрических потерь кабельных изделий;
- исследована возможность обнаружения дефектов изоляции на технологической линии электроискровыми дефектоскопами по амплитуде и интенсивности частичных разрядов, определены минимальные размеры обнаруживаемых дефектов;
- разработан алгоритм определения параметров схемы замещения участка кабельного изделия, являющегося электрической нагрузкой электроискрового дефектоскопа с учетом параметров технологического процесса и режимов контроля.

**Практическая ценность работы** определяется ее прикладной направленностью, ориентированной на использование полученных результатов при проектировании высокоинформативных средств электроискрового контроля целостности изоляции кабельных изделий. На основании анализа взаимодействия электрического поля с объектом контроля оценены информативные возможности и даны рекомендации по эффективному практическому использованию различных видов электрических полей. Предложена и разработана техническая реализация методов обеспечения электрической безопасности обслуживающего персонала в средствах электроискрового контроля. Даны практические рекомендации по аттестации электроискровых дефектоскопов.

**Реализация результатов работы** заключается в разработке, испытании и внедрении ряда приборов электроискрового контроля изоляции кабельных изделий контроля:

- прошел испытания и внедрен на предприятии Беларускабель электроискровой дефектоскоп «ЗАСИ-20»;
- прошли испытания и внедрены на предприятии Энергокабель электроискровые дефектоскопы «ЗАСИ-15», «ЗАСИ-20»; «ЗАСИ-30М», «ИАСИ-30», электродный узел «ЭУ-30/150»;
- прошли испытания и внедрены на предприятии Рыбинсккабель электроискровые дефектоскопы «ЗАСИ-15», «ЗАСИ-30», «ЗАСИ-30М», электродный узел «ЭУ-60/150»;
- прошли испытания и внедрены на предприятии Алюр электроискровые дефектоскопы «ЗАСИ-30»;
- прошли испытания и внедрены на предприятии Агрокабель электроискровой дефектоскоп «ЗАСИ-30», электродный узел «ЭУ-60/150»;
- прошел испытания и внедрен на предприятии Смолкабель электроискровой дефектоскоп «ЗАСИ-30М»;
- прошел испытания и внедрен на предприятии Норис электроискровой дефектоскоп «ЗАСИ-30М»;
- прошел испытания и внедрен на предприятии Нексанс Рус электроискровой дефектоскоп «АСИП-30/110»;
- прошел испытания и внедрен на предприятии Иркутсккабель электроискровой дефектоскоп «ЗАСИ-20»;
- выполнен грант Министерства образования РФ на тему «Исследования и разработка технологий построения высоковольтных испытателей изоляции». Контракт № 1.43.2005;

- выполнен грант агентства «Роснаука» РФ на тему «Исследование достоверности динамических испытаний изоляции кабельных изделий постоянным напряжением» в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы». Гос. к. № 02.442.11.7479;
- выполнен грант Президента РФ на 2007- 2008 годы. Гос. к. № 02.120.11.19630;
- работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, соглашение 14.В37.21.0457»;
- ряд научных результатов вошли в национальный стандарт ГОСТ Р 54813-2011 «Кабели, провода и шнуры электрические. Электроискровой метод контроля», дата введения 1.01.2013 г.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертационной работе, использованы в разработанных автором лекционных курсах «Технологический контроль в производстве» и «Технологический контроль в кабельном производстве», а также при подготовке практических и лабораторных работ для студентов института неразрушающего контроля и энергетического института ТПУ.

***Основные положения, выносимые на защиту:***

- электроискровым методом контроля изоляции кабельных изделий могут быть надежно обнаружены сквозные дефекты диаметром более 30 мкм и снижение толщины изоляции до (15...30) % от толщины бездефектного участка в зависимости от материала диэлектрика и режимов контроля;
- теоретическими и экспериментальными исследованиями определено влияние формы и частоты испытательного напряжения на достоверность электроискрового технологического контроля кабельных изделий;
- измерение электрической емкости и диэлектрических потерь при электроискровом контроле изоляции кабельных изделий позволяет надежно обнаружить дефекты со снижением до (35...80) % и увеличением на (40...50) % от толщины бездефектного участка изоляции в зависимости от конструкции изделия и материала изоляции;
- обнаружение в технологическом процессе дефектов изоляции размером менее 100 мкм по амплитуде частичных разрядов на текущем уровне технического развития невозможно в связи с высоким уровнем поверхностных разрядов;
- методика определения электрических параметров дефектной и бездефектной изоляции кабельных изделий, позволяющая предъявлять обоснованные требования к энергетическим параметрам электроискрового дефектоскопа;
- методика аттестации электроискровых дефектоскопов, на соответствие требованиям стандарта ГОСТ Р 54813-2011, рекомендации к дальнейшему совершенствованию нормативной документации.

***Апробация результатов работы.*** Основные положения диссертации были изложены в следующих докладах и материалах.

1. Высоковольтные аппараты для испытаний кабельно-проводниковой продукции на проход печатный. Международная конференция «Кабельные материалы и оборудование -2007». Москва.
2. Высоковольтные испытатели изоляции кабеля. Схемы регистрации пробоев 4-я международная конференция «Актуальные проблемы науки», Самара 2003 г.
3. К вопросу об обеспечении электробезопасности обслуживающего персонала при работе с высоковольтными испытателями изоляции кабеля на проход. 9-я международная научно- практическая конференция «Современные техника и технологии», г. Томск, 2003 г.

4. Приборы контроля качества изоляции кабельных изделий. 10-я международная научно- практическая конференция «Современные техника и технологии», г. Томск, 2004 г.
5. Высоковольтный испытатель изоляции постоянным напряжением «КОРОНА-ПН». Российская научно-техническая конференция «Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения» г. Томск, 2004.
6. Использование электроискрового метода для контроля электрической изоляции кабелей в процессе производства. Международная- практическая конференция «Качество- стратегия XXI века». г. Томск, 2004.
7. Исследование достоверности динамических испытаний изоляции кабельных изделий постоянным напряжением. 14-я международная научно- практическая конференция «Современные техника и технологии», г. Томск, 2008 г.
8. Модернизация методик испытаний изоляции кабельных изделий. 5-я международная конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» г. Санкт- Петербург -2008 г.
9. Состояние в России вопроса о динамических испытаниях изоляции кабелей высоким постоянным напряжением. 5-я международная конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» г. Санкт- Петербург -2008 г.
10. Импульсный испытатель изоляции кабеля методом контроля «на проход». Международная научная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора А. А. Воробьева - Томск, 2009.
11. Изоляция кабельных изделий как объект электроискрового технологического контроля. Международная научная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора А. А. Воробьева - Томск, 2009.
12. «Электроискровой метод испытания кабельных изделий. Средства аттестации испытательного оборудования». Международная конференция «Современные техника и технологии- 2010». Томск.
13. «Влияние формы и частоты повторения испытательного напряжения на достоверность электроискрового контроля». Международная конференция «Современные техника и технологии- 2010». Томск.
14. «Электроискровой метод испытания кабельных изделий. Анализ нормативной документации». Международная научно-практическая конференция молодых ученых. «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений». Томск. 2010 г.
15. Технологический контроль в кабельном производстве. I Всероссийская научно-практическая конференция по Инновациям в неразрушающем контроле «SibTest».
16. Бесконтактный электрод для высоковольтных испытателей целостности изоляции кабеля печатный. 14-я международная научно- практическая конференция «Современные техника и технологии», г. Томск., 2008 г.

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 24 научных работах из них, в изданиях рекомендуемых ВАК для защиты докторских диссертаций- 14, в том числе монографии, 7 опубликованных докладах конференций и 2 описаниях изобретений, по которым получены патент на способ и свидетельство на полезную модель, а также в национальном стандарте ГОСТ Р 54813-2011 «Кабели, провода и шнуры электрические. Электроискровой метод контроля», дата введения 1.01.2013 г.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 268 источников. Основная часть диссертации изложена на 207 страницах машинописного текста, содержит 93 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** В данном разделе обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследований, основные решаемые задачи, научная новизна, положения, выносимые на защиту и практическая ценность полученных результатов, приведены сведения об их апробации.

**Глава 1. Электроискровой технологический контроль целостности изоляции кабельных изделий.**

В первой главе проанализированы принципы организации электроискрового технологического контроля на кабельных предприятиях. Проанализированы требования действующих нормативных документов РФ и других промышленно развитых стран в данной области. Рассмотрены основные виды дефектов изоляций, покрытий и оболочек, возникающих при производстве продукции (рисунок 1). Сформулированы основные проблемы контроля, требующие научных решений.

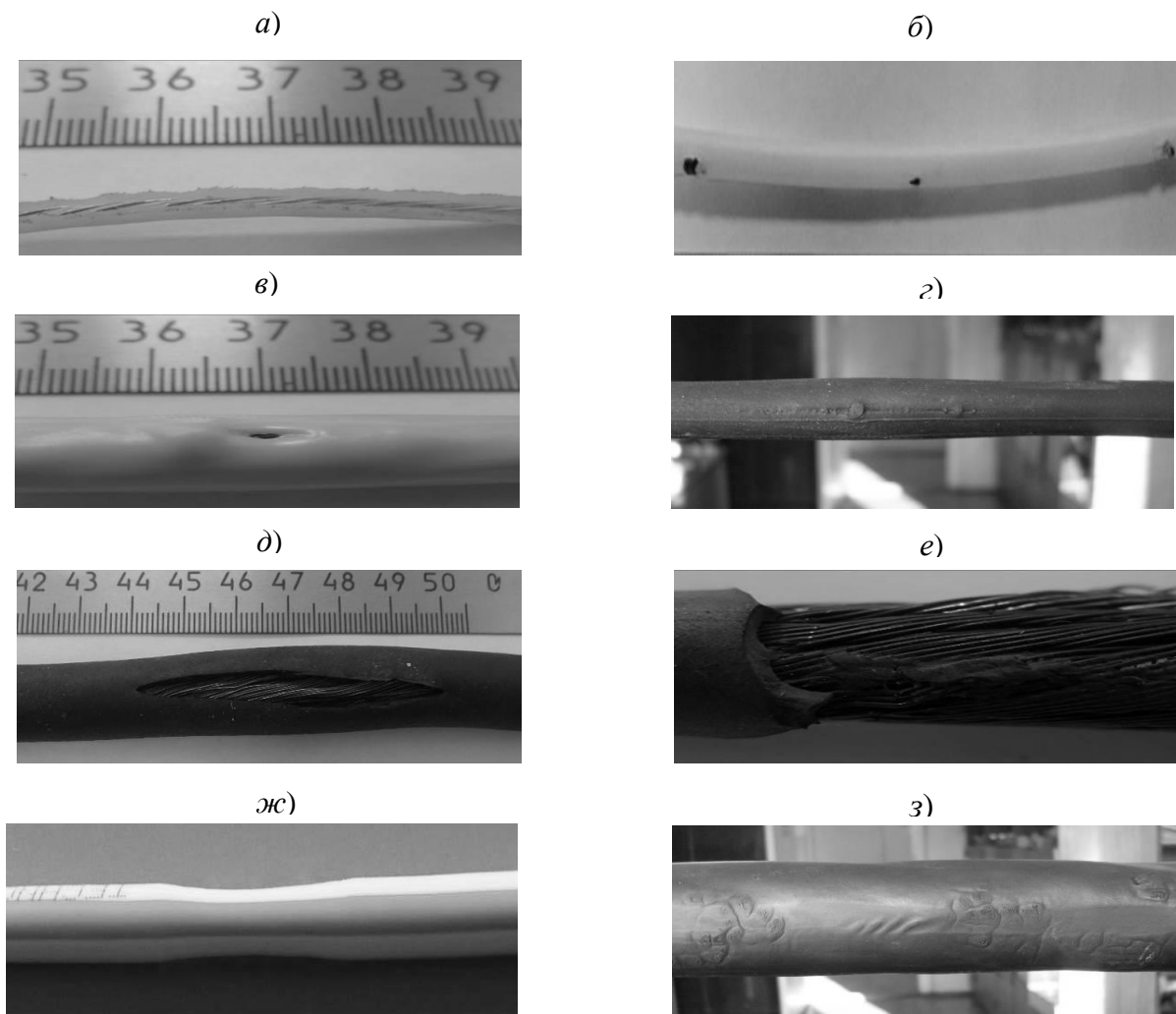


Рис. 1. Основные виды дефектов изоляции кабельных изделий: «срез» изоляции – а; посторонние включения – б; местные разрывы и шишки по изоляции – в, г, д; залипание изоляционного материала на жилах КИ – е, утонение изоляции – ж; неравномерность наружного диаметра, наплывы по поверхности изоляции – з

**Глава 2. Изоляция кабельных изделий как объект электроискрового контроля.**

Во второй главе проанализированы электрические параметры изоляции, исследовано влияние режимов технологического процесса. Показана нелинейная зависимость емкостного и активного тока через контролируемую изоляцию при изменении

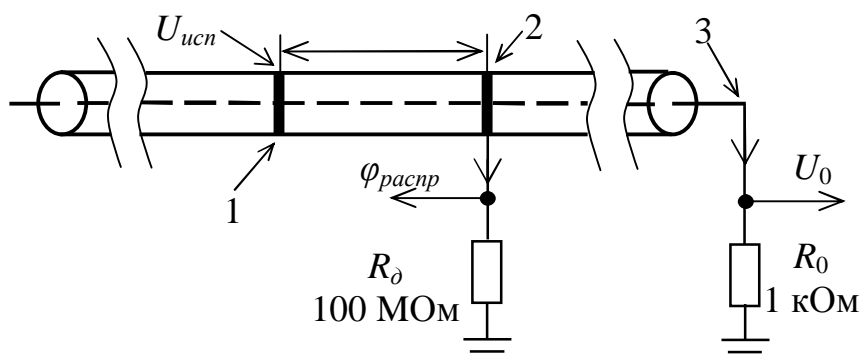


испытательного напряжения. Даны рекомендации по практическому определению параметров контролируемой изоляции как электрической нагрузки для электроискровых дефектоскопов.

Важным параметром электроискрового дефектоскопа является его возможность воспроизводить условия контроля. Для этого он должен обладать достаточной мощностью, чтобы обеспечить необходимую величину испытательного напряжения на изоляции кабельного изделия. Также должна быть обеспечена и жесткость внешней характеристики источника высокого напряжения при изменениях электрических параметров объекта контроля и режимов технологического процесса. Недостаточная мощность дефектоскопа приведет к снижению достоверности контроля. Необоснованно завышенная мощность приведет к увеличению затрат на контроль и снижению электробезопасности. В настоящее время требуемые энергетические параметры дефектоскопов определяются исходя из требований руководящего документа РД 16.14.640-88. ОСТПП. «Кабели, провода и шнуры. Испытание напряжением на проход. Типовой технологический процесс». Требования носят общий характер и не учитывают особенностей конкретного производства и параметров изоляции контролируемого кабельного изделия. В связи с этим возникла необходимость в создании методики определения энергетических параметров дефектоскопов с учетом электрических параметров изоляции и особенностями технологии производственного процесса. Ниже приведены результаты исследований, устанавливающие такую взаимосвязь. Исследованию подлежали следующие зависимости:

- распределение прикладываемого контролирующего напряжения по поверхности изоляции;
- изменение погонной электрической емкости изоляции при повышенных напряжениях;
- изменение диэлектрических потерь в изоляции при повышенных напряжениях;
- влияние параметров технологического процесса на электрические характеристики контролируемой изоляции.

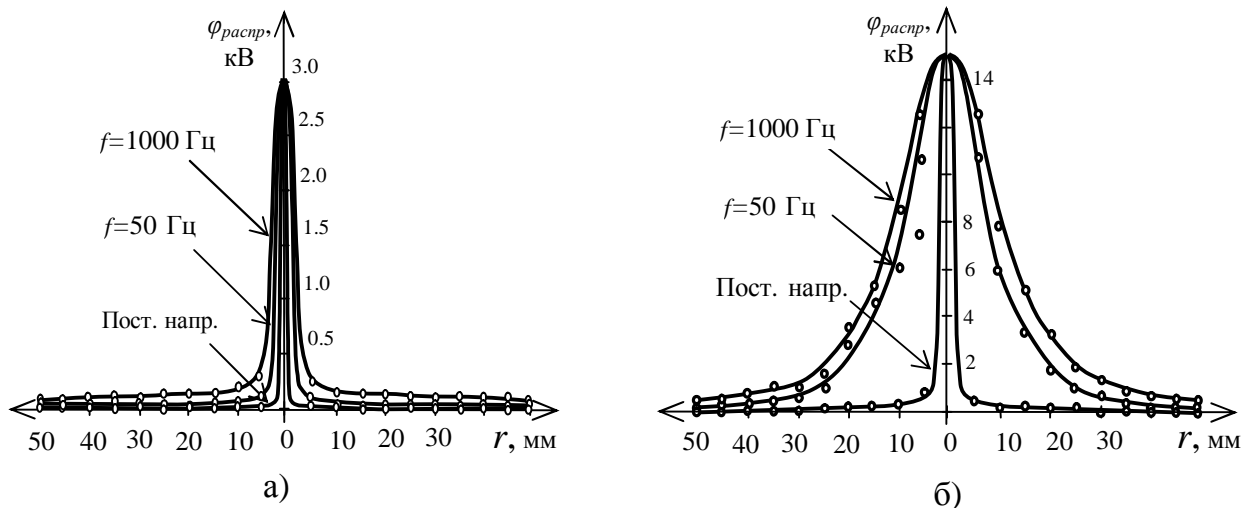
Распределение высокого потенциала по поверхности контролируемой изоляции является важным фактором электроискрового метода. Это связано с тем, что в зависимости от условий контроля расстояние, на которое способно распространиться испытательное напряжение от точки приложения к изоляции, должно учитываться при расчете длины электрода дефектоскопа. От выбора длины электрода зависит выбор мощности источника напряжения. Эксперимент по исследованию распределения потенциала на поверхности изоляции схематично представлен на рис. 2.



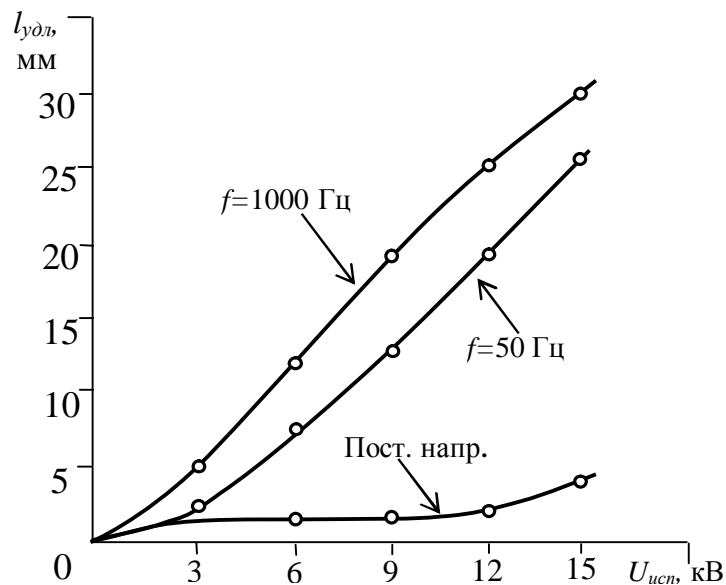
**Рис. 2.** Схема эксперимента по исследованию распределения высокого потенциала по поверхности изоляции контролируемого кабеля: 1) кольцевой электрод, к которому прикладывается напряжение  $U_{исп}$ ; 2) кольцевой электрод, на котором измеряется потенциал  $\varphi_{распр}$ ; 3) жила кабельного изделия, заземленная через резистор  $R_0$ ,  $R_\delta$  – сопротивление высоковольтного делителя напряжения

На рисунке 3 приведены диаграммы распределения напряжения по поверхности сухой изоляции резинового кабеля марки ПРСН 2×2,5.

На основе полученных результатов были рассчитаны зависимости удлинения электрода дефектоскопа от изменения амплитуды и частоты повторяющегося контролирующего напряжения. Расчеты проводились графически, и при других напряжениях (6 кВ, 10 кВ и 12кВ). В осях каждой из приведенных выше зависимостей строилась область прямоугольной формы, площадь которой была равна площади под кривой, увеличенной на 20%. Увеличение на 20 % вызвано соотношением действующего и среднего значений напряжения, так как площадь под кривой соответствует среднему значению. Высота прямоугольной области была равна величине контролирующего напряжения. Ширина области и являлась искомым расстоянием, которое необходимо учитывать при проектировании электроискровых дефектоскопов. Результаты расчетов приведены на рис. 4.



**Рис. 3.** Распределение потенциала по поверхности контролируемого кабеля марки ПРСН 2×2,5: а) при  $U_{исп} = 3$  кВ; б) при  $U_{исп} = 15$  кВ.



**Рис. 4.** Зависимости удлинения электродного узла  $l_{удл}$  при контроле резиновой изоляции сухого кабеля от величины контролирующего напряжения на различных частотах

В технике высоких напряжений известны работы, посвященные скользящим вдоль поверхности диэлектрика разрядам. Длину канала  $L_{ск}$  скользящего разряда в зависимости

от приложенного напряжения  $U_{исп}$  и удельной поверхностной емкости  $C_{уд}$  можно определить по эмпирической формуле Тэплера:

$$L_{ск} = \chi C_{уд}^2 U^5 \sqrt[4]{dU/dt}, \quad (1)$$

где  $\chi$  – коэффициент, определяемый опытным путем.

Если предположить, что длина скользящих разрядов связана с распределением напряжения по поверхности изоляции, то формула Тэплера соответствует зависимостям, приведенным на рис. 3. По кривым видно, что влияние частоты контролирующего напряжения на распределение его по поверхности изоляции невелико, основное влияние оказывает амплитуда. Таким образом, формулу (1) можно использовать при проектировании электроискровых дефектоскопов. Рассчитать теоретически все требуемые изоляционные расстояния для конструкции дефектоскопа невозможно, так как изначально точно неизвестен коэффициент  $\chi$ . Однако полезно знать зависимости пробивных расстояний от влияния частоты и амплитуды контролирующего напряжения.

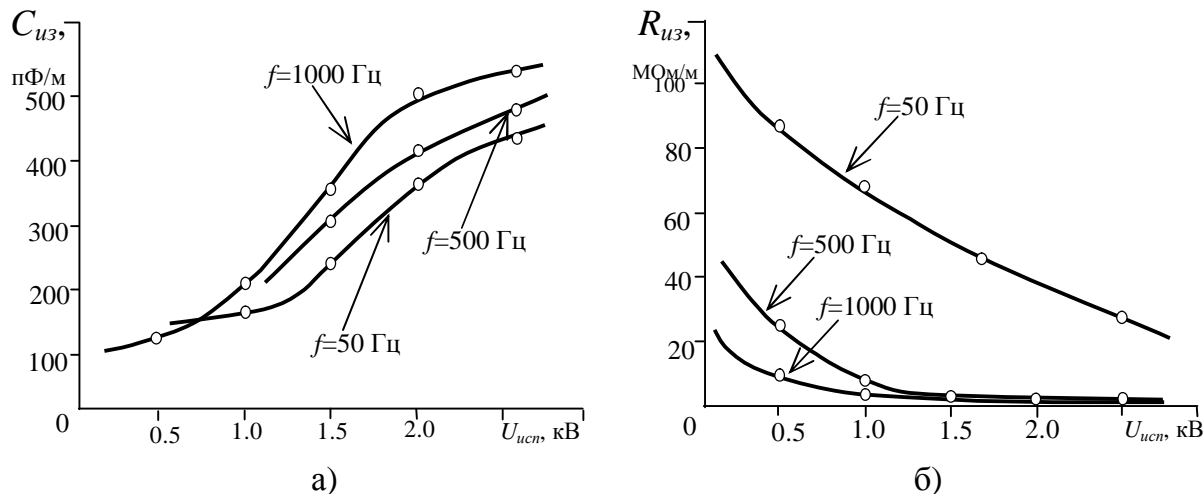
На постоянном токе основным фактором, определяющим распределение потенциала, является поверхностное сопротивление.

На характер распределения контролирующего напряжения по поверхности изоляции влияют также особенности технологического процесса производства кабельных изделий, такие как увлажненность и загрязненность поверхности изоляции. Наиболее существенное влияние на распределение оказывает увлажненность поверхности изоляции. Вода имеет низкое значение удельного объемного сопротивления (около  $10^3$  Ом·м). Действующие стандарты, регламентирующие данный вид контроля, требуют удаления (съема) воды с поверхности изоляции кабельного изделия на технологических линиях. Съем воды производится механически с помощью мягких щеток или обдува технологическим воздухом. Однако встречаются технологические линии, не содержащие устройства съема воды. Их доля составляет менее 10 % от общего числа. Капли воды и их наборы образуют участки с равным потенциалом на поверхности испытуемой изоляции. Тем самым значительно увеличивается расстояние  $l_{удл}$  распределения высокого напряжения, что требует большей электрической мощности от испытателя. Экспериментально установлено, что на максимальных, регламентируемых для электроискрового контроля, напряжениях 40 кВ амплитудного значения вода не образует сплошных проводящих каналов на расстояниях свыше 100 мм. Это связано, прежде всего, с тем, что даже на пористой поверхности капли воды не образуют сплошную пленку. Удельное удлинение электродного узла для увлажненного кабельного изделия зависит от материала изоляции, наличия талька, как связующего вещества и от степени увлажнения. Экспериментальные исследования показали, что удлинение электрода для увлажненного кабельного изделия в практике контроля можно с высокой достоверностью принимать в расчетах как удвоенное от удлинения для сухого кабельного изделия.

Для определения требуемых энергетических параметров электроискрового дефектоскопа необходимо знать значения погонных сопротивления и электрической емкости контролируемого кабельного изделия.

Исследование зависимости погонной электрической емкости и диэлектрических потерь в изоляции при повышенных напряжениях является важной задачей в связи с тем, что контроль осуществляется при напряжениях, многократно превышающих рабочие напряжения изоляции. Отношение контролирующего и рабочего напряжения может достигать трех порядков. Например, для автотракторного провода марки ПГВА с поливинилхлоридной изоляцией, медной жилой сечением  $95 \text{ мм}^2$  и толщиной изоляции 3,5 мм рабочее напряжение составляет 48 В, а контролирующее напряжение на технологической линии должно быть не менее 40 кВ амплитудного значения в соответствии с ГОСТ 23286-78 «КАБЕЛИ, ПРОВОДА И ШНУРЫ.».

На рис. 5-а, приведены зависимости погонной емкости изоляции  $C_{из}$  кабеля ПРСН 2×2,5 от амплитуды испытательного напряжения на различных частотах. Схема эксперимента соответствовала рис. 2. Отличия заключались лишь в том, что между кольцевыми электродами на всем промежутке устанавливался электрод из набора шариковых цепей. Количество цепей 100, диаметр шара 3,2 мм, расстояние между шарами 2,5 мм. Такая конструкция электрода является наиболее часто используемой для испытателей изоляции кабельных изделий.



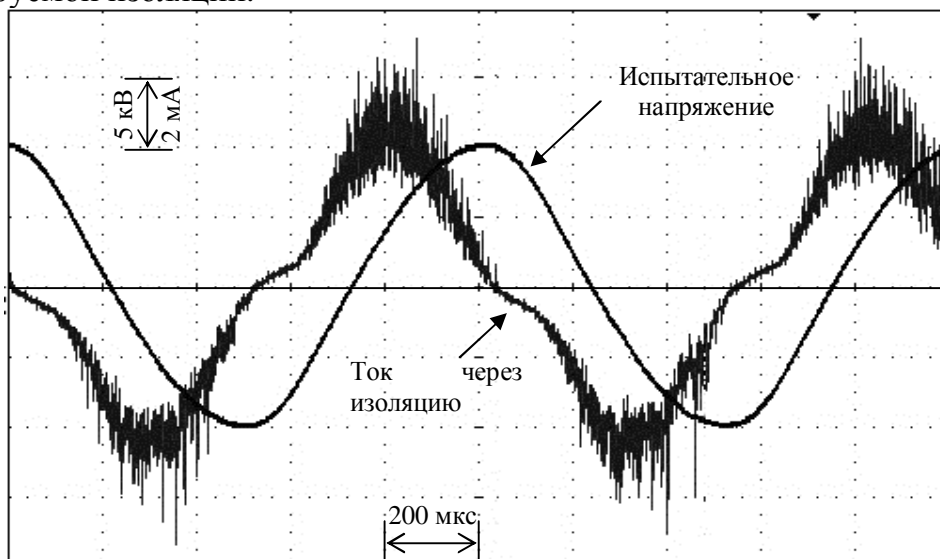
**Рис. 5.** Зависимости погонной емкости  $C_{из}$  (а) и эквивалентного сопротивления  $R_{из}$  диэлектрических потерь резиновой изоляции сухого кабеля (б) от амплитуды испытательного напряжения на различных частотах.

Из графиков (рис. 5) видно, что с ростом напряженности погонная емкость существенно возрастает. Для линейных диэлектриков, используемых в качестве электрической изоляции кабельных изделий, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  может считаться не зависящей от напряжения, приложенного к диэлектрику. А рост погонной емкости обуславливается двумя факторами: улучшением качества контакта электродов испытателя и поверхности изоляции и увеличением расстояния растекания (распределения) высокого испытательного напряжения. На рис. 4-б, приведены зависимости суммы диэлектрических потерь в изоляции и потерь на коронные разряды, пересчитанных в эквивалент погонного сопротивления от напряженности электрического поля на различных частотах. Уровни напряженности электрического поля при технологическом контроле соответствуют 20 кВ/мм. Из графиков видно, что с ростом напряженности погонное сопротивление существенно снижается. Происходит это по трем причинам: с ростом напряжения улучшается качество контакта электродов дефектоскопов с поверхностью изоляции и увеличивается расстояние, на которое распределяется напряжение, а также происходит рост диэлектрических потерь в самой изоляции и потерь на поверхностные разряды.

Из приведенных выше зависимостей можно сделать вывод о нелинейной зависимости емкостного и активного тока контролируемой изоляции при изменении испытательного напряжения при электроискровом контроле. Подтверждением этого предположения является осциллограмма испытательного напряжения и тока через изоляцию, рис. 6.

В ходе работы было исследовано влияние других технологических факторов на электрические параметры контролируемой изоляции как электрической нагрузки электроискровых дефектоскопов. В ходе исследований было выяснено, что при расчетах параметров схем замещения изоляции недостаточно использовать справочные данные на

материалы, из которых она изготовлена. Причина тому - существенное отличие физического состояния изоляции в процессе изготовления кабельного изделия от состояния готового изделия. Главным влияющим фактором является температура полимера. На экструзионной линии при выходе кабельного изделия температура изоляции в слоях прилегающих к жиле может достигать 80 °С, хотя на поверхности изоляции температура может быть 40 °С. Диэлектрическая проницаемость полимеров, используемых при производстве кабельных изделий, достаточно стабильна при изменении влияющих факторов и может изменяться не более чем на (10-20)% от начальной величины при изменении температуры во всем рабочем диапазоне. Диэлектрические потери наоборот существенно зависят от целого ряда параметров, в особенности от температуры. Например, у изоляции из поливинилхлоридного (ПВХ) пластика при изменении температуры с 20 °С до 80 °С диэлектрические потери увеличиваются в (2...5) раз в зависимости от марки материала. Увеличение температуры и диэлектрических потерь приводят к существенному снижению электрической прочности изоляции. При низких скоростях контроля эти факторы могут приводить к повреждению (пробою) бездефектной изоляции. В связи с этим предлагается внести требования по максимальной температуре контролируемого кабельного изделия в действующие нормативные документы. В работе подробно рассмотрены вопросы влияния температуры на параметры схемы замещения контролируемой изоляции.



**Рис. 6.** Осциллограмма контролирующего напряжения и тока через изоляцию кабеля марки ПРСН 2x2,5

**Выводы по главе 2.** Приложение испытательного напряжения к поверхности контролируемого изделия приводит к распределению потенциала за границы электрода. Удлинение электрода для сухой поверхности изоляции можно рассчитать из соотношений 1,5 мм/кВ для низкочастотных напряжений и 2 мм/кВ для высокочастотных напряжений. Для увлажненной поверхности удлинения удваиваются. Значения емкостного и активного тока через изоляцию зависят от величины приложенного напряжения. Причина – не идеальность электрода. До амплитудных значений испытательного напряжения (2÷2,5) кВ ток через изоляцию является нелинейным, а эквивалентная емкость меньше погонной, приходящейся на длину электрода. Дальнейший рост электрической нагрузки на электроискровой дефектоскоп с увеличением испытательного напряжения необходимо рассчитывать из учета относительного удлинения электрода. Существенным фактором, влияющим на параметры изоляции и режимы контроля, является температура полимера. Температура изоляции на выходе из охлаждающей ванны может достигать 80 °С, что

приводит к увеличению диэлектрической проницаемости до 20%, а диэлектрических потерь в (2...5) раз в зависимости от марки материала. Наличие талька не оказывает существенное влияние на параметры изоляции как электрической нагрузки на электроискровой дефектоскоп.

Полученные результаты позволяют определить требуемую электрическую мощность электроискровых дефектоскопов в зависимости от параметров изоляции и условий технологического процесса.

### ***Глава 3. Исследование возможности обнаружения дефектов изоляции в сильных электрических полях.***

В третьей главе проанализированы возможности обнаружения дефектов по трем факторам. По электрическому пробую дефектного участка в сильных электрических полях. По контролю амплитуды и интенсивности частичных разрядов. По изменению электрической погонной емкости и диэлектрических потерь. Исследовано влияние различных параметров технологического процесса и режимов контроля на его достоверность. Рассмотрено влияние формы и частоты контролирующего напряжения на достоверность контроля.

Недостатком контроля по электротепловому пробую изоляции является ограничение возможности выявления дефектов, таких как поры, неглубокие разрезы и неровности поверхности изоляции, инородные непроводящие включения и т.д.

Одними из наиболее сложно обнаруживаемых видов дефектов являются воздушные включения и поры изоляции, в которых под действием напряжения возникает явление частичных разрядов, вызывающее старение и последующее разрушение твердой изоляции.

Физический принцип рассматриваемого контроля позволяет выявить только те виды дефектов, в которых за короткое время нахождения участка изоляции изделия (порядка 0,001..0,1с) происходит искровой пробой. Многолетняя практика контроля показывает, что при нормальных расчетных уровнях напряжений, выбранных для разных толщин изоляции из резины или пластика в соответствии с нормативными документами, искровой пробой происходит в 100 % случаев только для сквозных дефектов (полное отсутствие изоляции на некотором участке кабельного изделия). Это могут быть проходящие насквозь изоляции трещины, отверстия, сдиры, проводящие включения. Физически это может быть объяснено следующими факторами: пробивное напряжение воздуха значительно меньше пробивного напряжения диэлектрика, в указанных видах дефектов легко происходит пробой по поверхности диэлектрика (по границе воздух-диэлектрик).

Возникает вопрос, возможно ли электроискровым контролем обнаружить несквозные дефекты, (воздушные включения, утонения, порезы, шероховатость, наплывы и т.д.)? Очевидно, что существует минимальная толщина изоляции, в которой произойдет электротепловой пробой за время контроля. Были рассчитаны толщины изоляции в дефектных участках, в которых произойдет электротепловой пробой на примере трех основных изоляционных материалов, используемых при производстве кабельных изделий (ПВХ-пластикат, полиэтилен и резина). Толщины пробиваемых дефектных участков изоляции зависят от конструкции контролируемых кабельных изделий, материала изоляции, технологических особенностей производства и режимов контроля. В работе даны оценки влияния указанных выше факторов и приведены примеры расчетов максимальных пробиваемых толщин дефектных участков изоляции. В большинстве случаев надежно пробиваемыми являются толщины не более (100÷150) мкм. Также было выявлено влияние величины испытательного напряжения на перегрев изоляции. Оказалось, что в зависимости от условий контроля и свойств материалов изоляции перегрев составляет (0,3÷25) °C/с. В таблице приведены результаты расчетов, где  $h_0$ - высота дефектного участка,  $h$ - общая высота изоляции,  $\Delta T/\Delta t$ - скорость нагрева изоляции.

Таблица 1.

Материал, марка провода	$h_d/h$ , мм/мм	$\Delta T/\Delta t$ , °C/c
ПВХ пластикат, МГШВ-0.35	$0,14/0,62=0,23$	13
Полиэтилен, СИП-3	$0,29/2,25=0,13$	0,26
Резина, АПВР	$0,33/1,2=0,28$	25

На основе приведенных выше данных можно сделать вывод, что при высокоскоростном контроле, при временах приложения напряжения порядка нескольких единиц - десятков миллисекунд перегрев изоляции не превышает нескольких градусов и не оказывает существенного влияния на электрическую прочность изоляции, а соответственно на вероятность обнаружения дефектных участков с тонкими слоями изоляции. При контроле на низких скоростях при временах приложения напряжения более 1 с в изоляционных материалах с высокими диэлектрическими потерями происходит существенный перегрев. Перегрев приводит к снижению электрической прочности изоляции, вплоть до возможности пробоя и возгорания бездефектной изоляции, например из резины или некоторых марок ПВХ пластиката.

В ходе работы был проведен расчет минимального размера сквозного дефекта, обнаруживаемого электроискровым методом контроля. Очевидно, что существует сквозной дефект малой площади сечения проводящего канала, который не будет обнаружен. За основу при расчетах чувствительности детектирования дефектов были взяты требования действующих стандартов, а именно, при величине контролирующего напряжения  $U=3$  кВ, ток через дефектный участок должен быть не менее  $I=600$  мкА, что соответствует минимальному порогу детектирования дефектов. На величину тока влияют два фактора: поверхностная проводимость внутренних стенок дефектов, причем как реактивная, так и активная и значение тока пробоя в канале дефекта. Расчеты показали, что для достижения активной составляющей тока диаметр на примере дефекта круглой формы должен быть не менее 0,127 м для изоляции из полиэтилена. При толщине изоляции  $h=0.25$  мм, что соответствует норме контролирующего напряжения  $U=3$  кВ в соответствии с действующими стандартами, диаметр сквозного участка должен быть не менее 400 м для того, чтобы емкостной ток через дефектный участок достиг значения  $I=600$  мкА при частоте контролирующего напряжения  $f=1$  кГц.

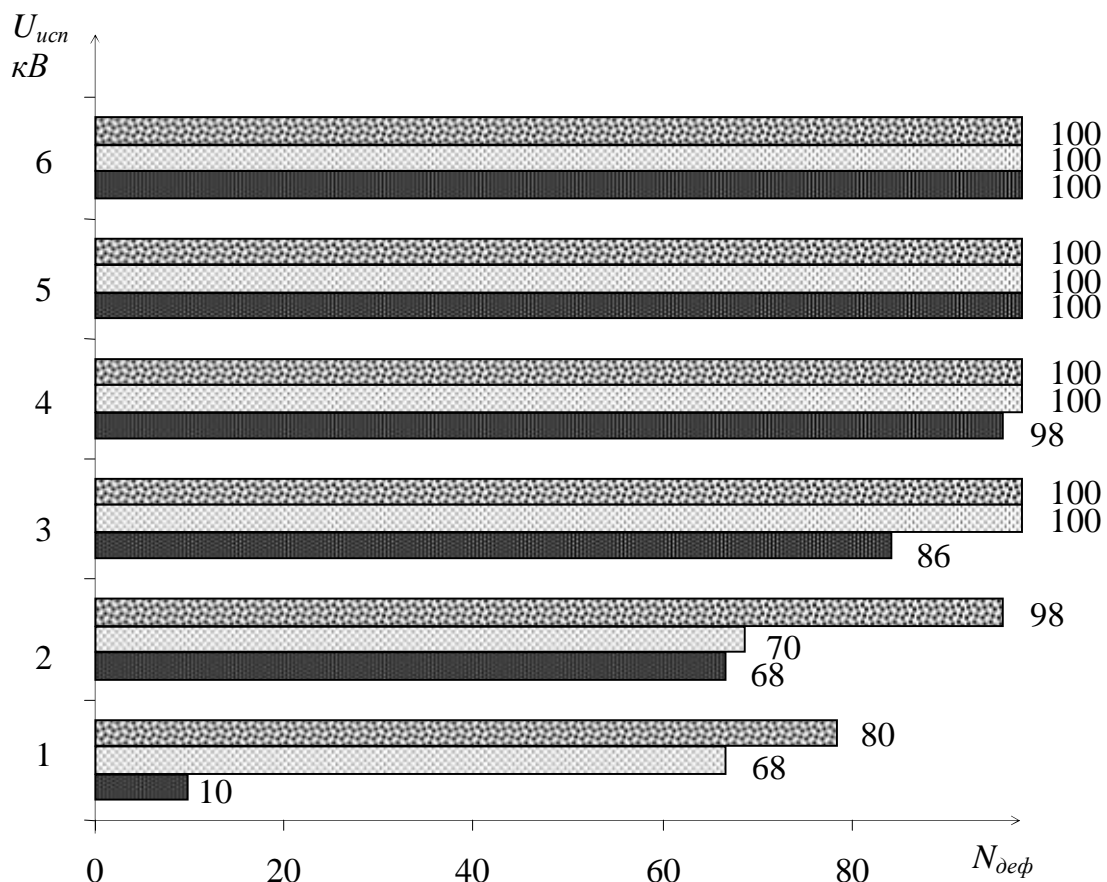
В работе был проведен расчет наименьшего диаметра дефекта при электрическом разряде. При токах до  $I=10^{-3}$  А протекает тлеющий разряд. Тлеющий разряд характеризуется высоким падением напряжения между электродами. Плотность тока при тлеющем разряде достигает  $J=10^6$  А/м<sup>2</sup>. Соответственно для достижения уровня тока дефекта  $I_{def}=600$  мкА необходимо отверстие диаметром не менее  $d_{def}=28$  мкм. При больших значениях контролирующего напряжения в дефектах будет увеличиваться разрядный ток, и тлеющий разряд перерастет в дуговой. Плотность тока при дуговом разряде находится в диапазоне  $J=(10^6 \div 10^{12})$  А/м<sup>2</sup> и характеризуется малым падением напряжения между электродами.




Сравнивая факторы влияния поверхностного сопротивления и разряда в воздушном промежутке можно сделать вывод о том, что для надежного обнаружения сквозного дефекта в изоляции кабельных изделий его диаметр должен быть не менее 30 мкм. Поверхностное сопротивление и электрическая емкость на обнаружение дефектов таких размеров не оказывает влияние.

В работе было исследовано влияние формы и частоты контролирующего напряжения на выявляемость дефектов. Выявляемость сквозных дефектов не зависит от формы и частоты контролирующего напряжения при условии соблюдения требований действующих стандартов. Одними из таких требований являются время приложения контролирующего напряжения не менее 2,5 периодов при частоте повторения (50÷4500)

Гц. Электрический пробой в газах происходит за время порядка  $10^{-7}$  с, что значительно меньше времени приложения контролирующего напряжения. Определяющим фактором в этом случае является амплитуда контролирующего напряжения. Выявляемость несквозных дефектов зависит от действующего значения напряжения и его частоты, при несинусоидальных формах зависит от спектрального состава. Амплитуда и частота гармоник контролирующего напряжения будут определять диэлектрические потери в изоляции и как следствие вероятность пробоя несквозного дефекта. В действующем стандарте ГОСТ 2990-78 указываются амплитудные значения контролирующих напряжений. С ростом действующего значения напряжения при сохранении амплитудного будет возрастать вероятность обнаружения несквозных дефектов, такое же влияние будет оказывать рост доли высших гармоник в контролирующем напряжении. В работе приведены примеры расчета толщин несквозных дефектов для основных материалов изоляции в зависимости от величины действующего напряжения и его частоты повторения. Экспериментально и расчетно установлено, что рост высших гармоник в контролирующем напряжении положительно сказывается на качестве электрического контакта электрода дефектоскопа с поверхностью изоляции контролируемого кабельного изделия. Это происходит по причине создания более однородного электрического поля на поверхности изоляции, за счет поверхностной емкости.

Были проведены эксперименты по выявлению сквозных дефектов в изоляции нескольких типов проводов. На рисунке 7 приводятся результаты контроля проводов кабеля связи КСПВ 4х0,12, с электродом из шариковой цепи. Такая форма электродного узла является наиболее распространенной в электроискровых дефектоскопах и применяется в более чем 90 % случаях. Данная конструкция электродного узла



**Рис. 7** - Статистика контроля проводов кабеля связи КСПВ 4х0,12 переменным напряжением 100 Гц (ряд ) , переменным напряжением частотой 50 Гц (ряд ) и постоянным напряжением (ряд )



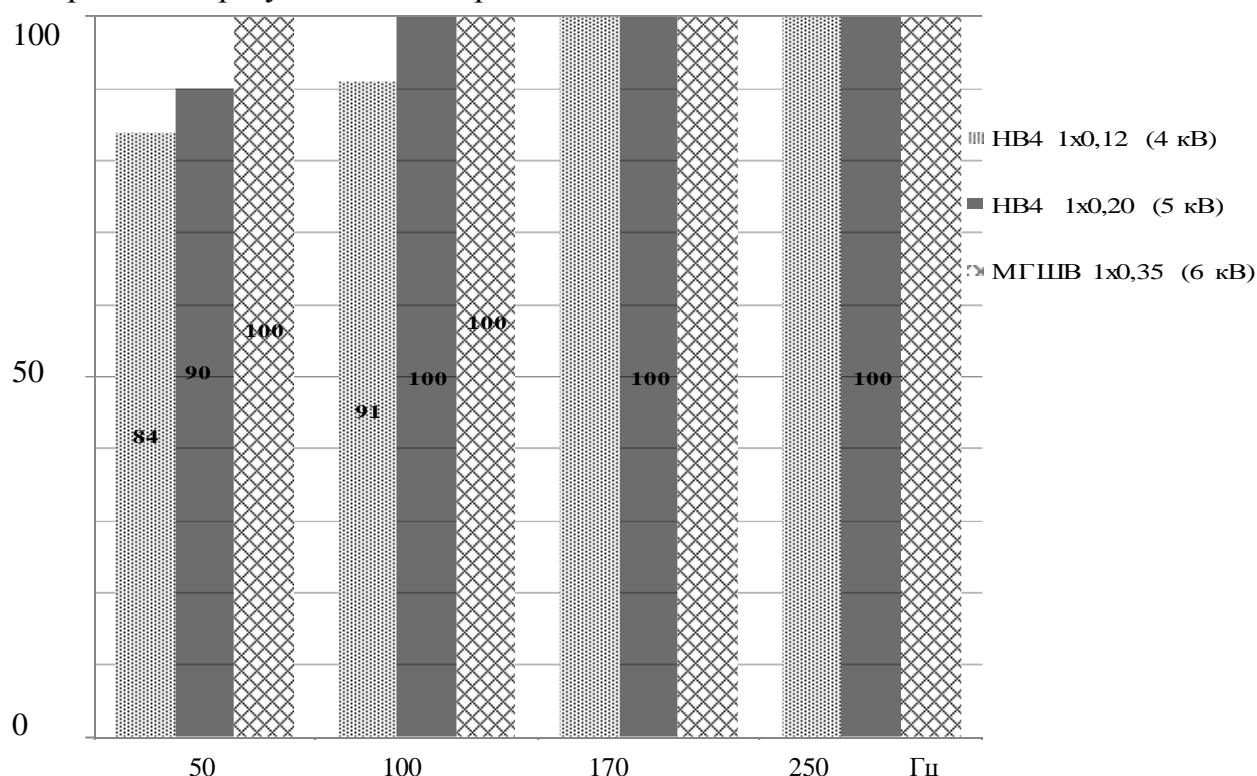
рекомендована действующими стандартами. На рисунке 7 по осям ординат отложены величины испытательного напряжения, а по осям абсцисс количество зафиксированных дефектов.

Длина электрода составляла  $l_{узда}=150$  мм, время нахождения контролируемого участка изоляции в электроде  $t=10$  мс, а скорость движения провода  $v=900$  м/мин. Дефектный участок изоляции каждого провода пропусклся через электрод по 100 раз для каждого вида и величины испытательного напряжения. Величина напряжения изменялась от максимальной к минимальной. В качестве детектора дефекта использовался датчик максимального тока в цепи электродного узла. Чувствительность детектора устанавливалась в соответствии с требованиями действующих стандартов. Для каждого случая предварительно проверялась вероятность ложных срабатываний. При прохождении бездефектного участка изоляции через электрод в количестве 100 раз не происходило ни одного ложного срабатывания. При малых испытательных напряжениях, когда качество электрода оказывает существенное влияние на достоверность контроля, положение дефектного участка относительно оси движения провода изменялось при каждом проходе. Это необходимо было для снижения влияния положения дефекта относительно шариков цепочного электрода на результаты эксперимента.

Как показано в главе 4 диссертационной работы контроль на высоких частотах (более 1 кГц) является более безопасным для обслуживающего персонала, по сравнению с контролем на частотах 50/60 Гц. При этом низкочастотный контроль не приводит к увеличению достоверности контроля. Однако в ряде нормативных документов указываются конкретные требования по частоте контролирующего напряжения именно 50 или 60 Гц синусоидальной формы. Мотивируется это тем, что данные кабельные изделия контролируются напряжением той же формы и частоты, при которых эксплуатируются. Это касается, прежде всего, силовых кабелей. Результаты исследований показали, что электроискровой контроль на высоких частотах позволяет увеличить достоверность контроля при снижении стоимости оборудования, а главное - более высоком уровне безопасности обслуживающего персонала.

В ходе работы были проведены исследования по зависимости вероятности обнаружения сквозных дефектов импульсным напряжением от частоты повторения. Необходимость исследования возникла в связи с тем, что действующие международные стандарты, регламентирующие данный вид контроля (МЭК 62230-2006, BS EN 50356-2004 и др.), требуют минимальной частоты контроля выше 170 Гц. Мотивируются требования тем, что на низких частотах электроды цепочной конструкции не обеспечивают качественного контакта с поверхностью контролируемой изоляции и возникает вероятность пропуска дефектов. Практика электроискрового контроля изоляции кабельных изделий показывает, что указанные выше требования регламентировались исходя из применения в электроискровых дефектоскопах автомобильных катушек зажигания, что значительно снижало себестоимость оборудования. Особенности таких решений заключались в сочетании высокой частоты повторения (до 300 Гц) испытательного напряжения и относительно невысокой его амплитудой (не более 20 кВ). Такой режим использовался при контроле тонких проводов с невысокими удельными потерями и малой погонной емкостью. В Советском Союзе, а затем и РФ сложилась практика использования импульсного контроля на низких частотах (50÷100) Гц, но на больших амплитудах (6÷40) кВ при контроле изоляции силовых кабелей с высокими диэлектрическими потерями и высокой удельной емкостью. Действующий ГОСТ 2990-78 не запрещал указанных режимов контроля, которые показали свою эффективность многолетним опытом использования. С 2008 г. начались работы по адаптации стандарта МЭК 62230-2006 к практике электроискрового контроля в РФ. При прямом введении норм контроля

международного стандарта имеющиеся в эксплуатации импульсные дефектоскопы должны были быть сняты с эксплуатации, что повлекло бы значительные финансовые потери кабельных предприятий. Ориентировочное количество низкочастотных импульсных дефектоскопов в РФ составляет не менее 100 шт. При средней стоимости 150 тыс.р. суммарные потери по отрасли составили бы не менее 15 млн. р. Основываясь на результатах исследований по распределению потенциала испытательного напряжения вдоль поверхности контролируемой изоляции следует отметить, что помимо частоты повторения наиболее значимым фактором, определяющим качество электрода, является амплитуда испытательного напряжения. Были проведены экспериментальные исследования по определению вероятности обнаружения дефектов зависимости от частоты повторения и амплитуды испытательного напряжения для различного состояния электрода для нескольких образцов проводов. Материалы изоляции: полиэтилен, поливинилхлорид и резина. Форма импульса соответствовала требованиям МЭК 62230-2006. Частота повторения: 50 Гц, 100 Гц, 170 Гц и 250 Гц. Амплитуда испытательного напряжения выбиралась исходя из требований ГОСТ 23286-78. Минимальная амплитуда испытательного напряжения соответствовала минимально допустимой величины, регламентируемой ГОСТ 23286-78 и была равна 4 кВ. Контролю подверглись провода НВ4 1x0,12 (4 кВ), НВ4 1x0,20 (6 кВ) и МГШВ 1x0,35 (8 кВ). Электрод представлял собой набор шариковых цепей с диаметром шара 3,2 мм установленные на расстоянии 5 мм между центрами. Длина электрода вдоль движения контролируемого изделия 150 мм. Скорость движения изделия 10 м/с. Дефекты представляли собой сквозные отверстия диаметром 1мм. Контроль проводился для 100 дефектов в различных их положениях в электроде. Для сухого и чистого электрода и сухих поверхностей контролируемых кабельных изделий для всех изделий вероятность обнаружения составила 100 %. Имитировалось сильное загрязнение элементов электрода тальком, что существенно ухудшало надежность контакта электрода с поверхностью контролируемого изделия. На рисунке 8 приведены результаты экспериментов.



**Рис. 8.** Статистика обнаружения дефектов при разных напряжениях и частоте повторения испытательного напряжения

По результатам экспериментов видно, что частота повторения испытательного напряжения оказывает влияние только на напряжениях не более 5 кВ. Далее независимо от частоты достоверность обнаружения составляет 100 %. Также эксперименты проводились для варианта увлажненной поверхности контролируемой изоляции. Тем самым имитировались условия технологической линии после охлаждающей ванны. Для всех контролируемых образцов на всех частотах начиная с наименьшего напряжения достоверность контроля, составила 100 %.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что контроль импульсным напряжением низкой частоты, от 50 Гц и выше, можно производить на напряжениях свыше 5 кВ, амплитудного значения. Данная рекомендация вошла в нормы стандарта ГОСТ Р 54813 «Кабели, провода и шнуры электрические. Электроискровой метод контроля», разработанного с участием автора. Это позволило сохранить в эксплуатации большое количество импульсных электроискровых дефектоскопов и сохранить тем самым значительные средства для кабельной отрасли.

**Выводы по разделу.** Размер надежно обнаруживаемых дефектов по наличию электротеплового пробоя составляет для изоляции из ПВХ пластикатов 77%, полиэтилена 83%, резины 72 % от толщины бездефектной изоляции. Перегрев изоляции за время контроля составляет менее 1 °С. Минимальный размер, надежно обнаруживаемого, круглого дефекта равен 30 мкм. Частота повторения и форма испытательного напряжения не оказывает влияние на вероятность обнаружения сквозных дефектов при соблюдении норм действующих стандартов. В производственных условиях электроды электроискровых дефектоскопов могут находиться в загрязненном состоянии, что приводит к снижению вероятности обнаружения дефектов при импульсной форме испытательного напряжения, частотой повторения ниже 170 Гц. Для обеспечения 100 % достоверности обнаружения дефектов на частотах (50-170) Гц амплитуда импульсного испытательного напряжения должна быть не менее 6 кВ.

***В работе была исследована возможность обнаружения несквозных дефектов по амплитуде частичных разрядов.*** Интересовала, прежде всего, возможность обнаружения воздушных пузырьков и проводящих включений. Частичными разрядами (ЧР) называют разрядные процессы в изоляции, которые развиваются под действием приложенного напряжения и распространяются лишь на часть изоляционного промежутка. Данный вид контроля широко используется в статике для контроля состояния высоковольтного оборудования и кабельных линий. Измерение амплитуды ЧР способствует обнаружению дефектов в изоляции. В связи с малым временем контроля, менее 1 с, контроль интенсивности ЧР нецелесообразен. Фактором, снижающим достоверность контроля по уровню ЧР, является наличие поверхностных разрядов (ПР), которые возникают в местах контакта высоковольтного электрода дефектоскопа с поверхностью контролируемой изоляции. Физика процесса возникновения ЧР и ПР схожа.

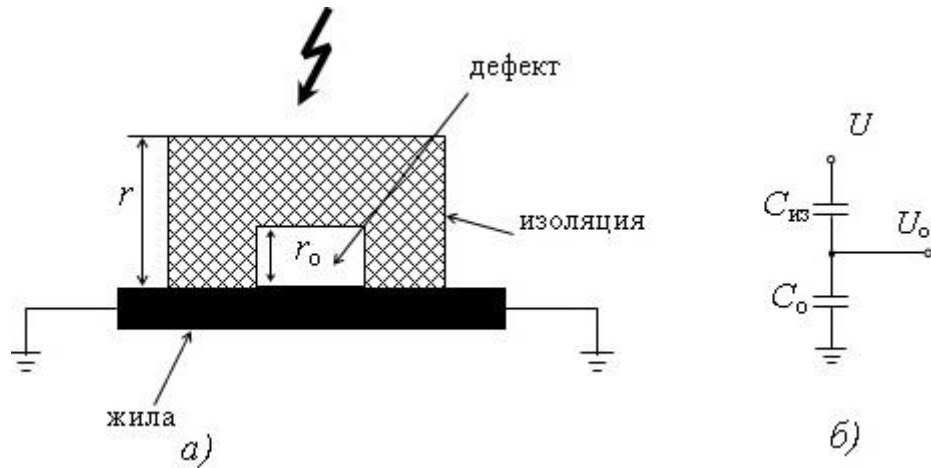
На рисунке 9 показан пример расположения дефекта в изоляционном слое и его схема замещения.

Для определения возможности обнаружения дефектов изоляции по амплитуде ЧР на ряде конкретных примеров сравнивался уровень ПР с уровнем ЧР от дефектов и были рассмотрены методы селекции. Схема эксперимента приведена на рис. 10.

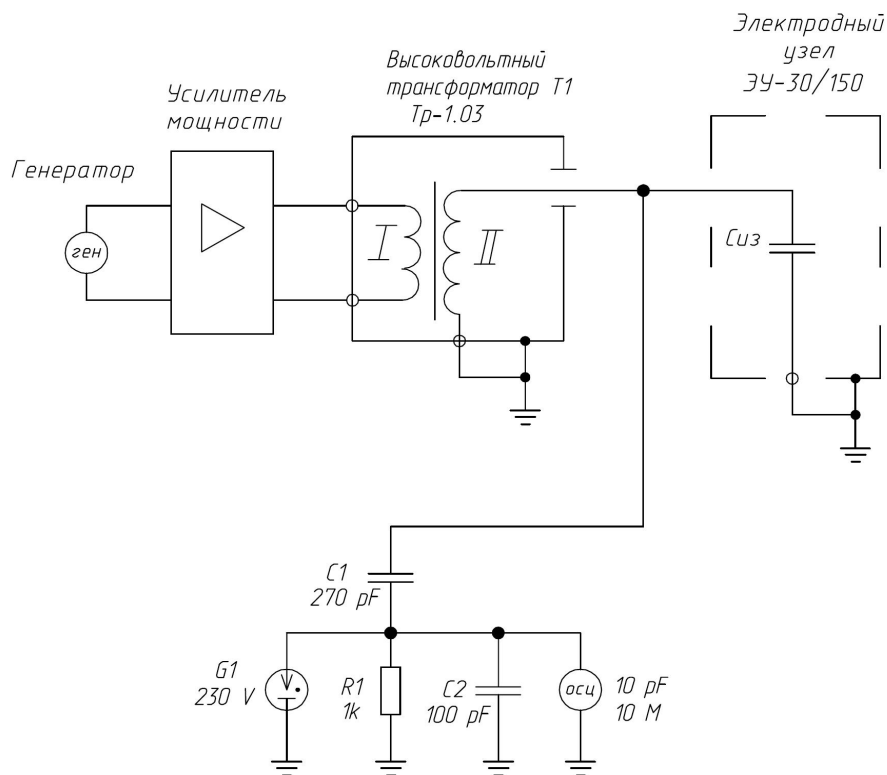
Уровень ЧР измерялся в соответствии с ГОСТ 20074-83 «Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов».

Полоса пропускания полосового фильтра, образованного элементами  $C1$ ,  $R1$ ,  $C2$ ,  $R_{осц}$  и  $C_{осц}$  составляла  $(0,3 \div 2)$  МГц. Коэффициент передачи в полосе пропускания составляет

$\kappa_{п}=0,5$ . Электродный узел «ЭУ-30/150» выполнен по классической схеме, состоящей из шариковых цепей из нержавеющей стали. Диаметр шариков 3,2 мм.

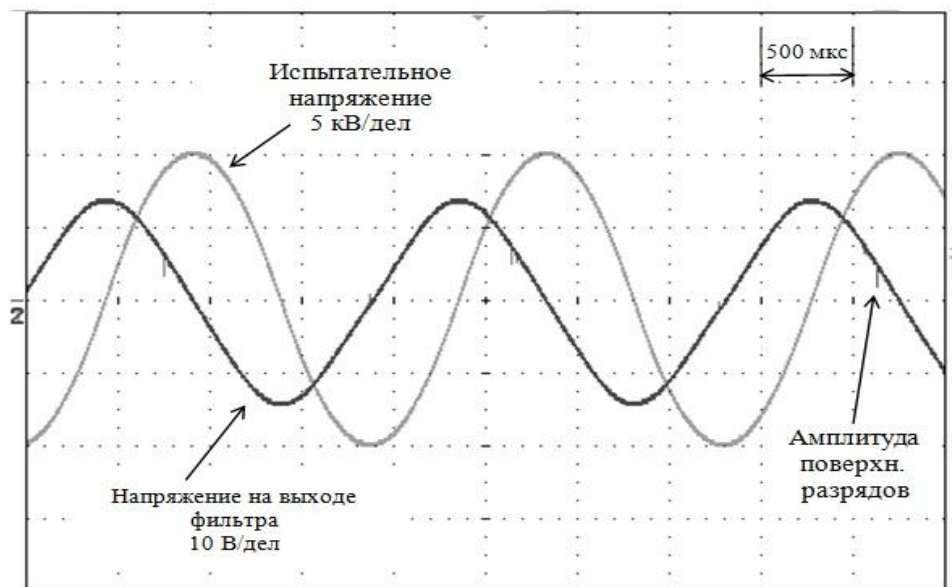


**Рис. 9.** Пример расположения дефекта в изоляционном слое (а) и электрическая схема замещения (б)



**Рис. 10.** Схема измерения уровня ЧР и ПР

При отсутствии контролируемого кабельного изделия  $C_{из}$  (объекта контроля) в зоне электродного узла уровень ПР пренебрежительно мал, рис. 11. Суммарная емкость электродного узла по отношению к точке заземления составила около 4,8 пФ. С учетом коэффициента передачи полосового фильтра максимальная величина ПР составила не более 100 пКл. При введении объекта контроля в область испытаний неоднородность электрического поля возрастает, при этом возрастают интенсивность и амплитуда ПР.



**Рис. 11.** Осциллограмма контролирующего напряжения и напряжения ПР при отсутствии объекта контроля в электроде

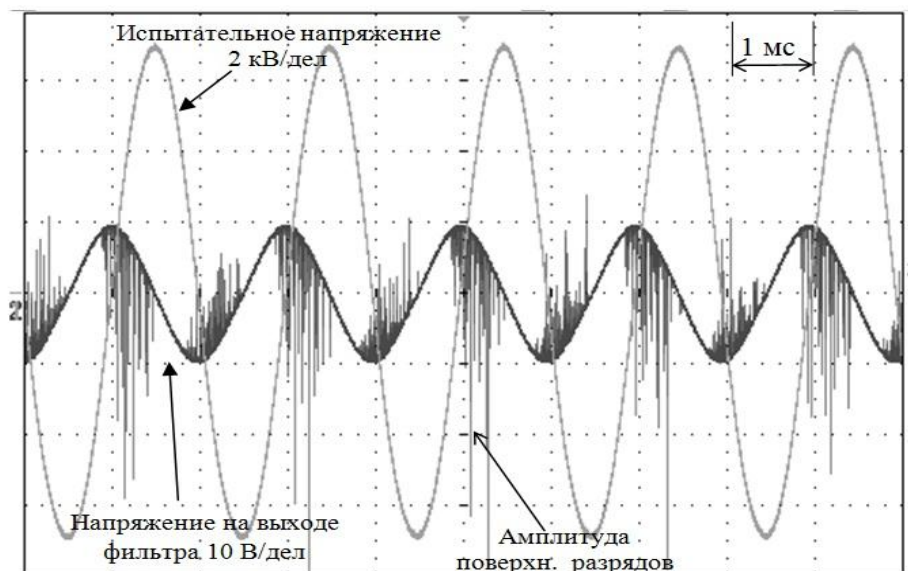
На рис. 12 приведена осциллограмма напряжений при контроле монтажного провода НВ-1-0,2 (провод с медной луженой жилой в изоляции из поливинилхлоридного пластиката). Внешний диаметр  $D=1,3$  мм, диаметр токопроводящей жилы  $d=0,6$  мм, радиальная толщина изоляции  $r=0,35$  мм. В соответствии с ГОСТ 23286-78 «КАБЕЛИ, ПРОВОДА И ШНУРЫ. Нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний напряжением» амплитуда контролирующего напряжения должна быть не менее 7 кВ. Контроль проводился по методике в соответствии с ГОСТ 2990-78. В ходе работы были проведены замеры амплитуды ПР при контроле монтажного провода МГШВ-0,35 (провод с медной луженой жилой с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката с дополнительным волокнистым слоем), внешний диаметр  $D=1,6$  мм, диаметр токопроводящей жилы  $d=0,6$  мм, радиальная толщина изоляции  $r=0,5$  мм, в соответствии с ГОСТ 23286-78 амплитуда контролирующего напряжения должна быть не менее 10 кВ, а так же провода ПВКВ-6 (провод с медной жилой и изоляцией и оболочкой из кремнийорганической резины). Внешний диаметр  $D=4,7$  мм, диаметр токопроводящей жилы  $d=2,7$  мм, радиальная толщина изоляции  $r=1$  мм. В соответствии с ГОСТ 23286-78 амплитуда контролирующего напряжения должна быть не менее 18 кВ.

Из приведенных осциллограмм видно, что с ростом испытательного напряжения увеличивается уровень и интенсивность ПР.

Для провода НВ-1 уровень ПР составляет 3 нКл, для провода МГШВ-0,35 уровень поверхностных зарядов 3,5 нКл, а для провода ПВКВ-6 уже 10 нКл.

Расчетный уровень частичных разрядов для дефекта кубической формы со стороны размером 100 мкм в соответствии с выражением при соответствующих уровнях контролирующих напряжений составит:

- для провода НВ-1-0,2- 4 пКл;
- для провода МГШВ-0,35 – 7 пКл;
- для провода ПВКВ-6 уже 12 пКл.



**Рис. 12.** Осциллограмма напряжений при контроле монтажного провода НВ-1

Таким образом, фоновый уровень ПР превышает уровень ЧР от дефекта размером 100 мкм более чем в 1000 раз. В ряде работ, посвященных контролю состояния изоляции по уровню ЧР, отмечается, что уровень помех, как правило, находится в диапазоне (0,1÷1) нКл. Существуют методы частотного разделения сигналов от частичных и ПР. Скорость протекания ПР ниже ЧР. Для анализа использовался фильтр верхних частот с частотами среза 10 МГц и 100 МГц. При использовании фильтра с частотой среза 10 МГц величина заряда от ПР составила 3,5 нКл, при использовании фильтра с частотой среза 100 МГц величина заряда от ПР составила 1 нКл. Увеличение частоты среза до 100 МГц привело к существенному снижению сигнала от ПР, в 10 раз. Тем не менее, этого недостаточно для выделения на их фоне сигналов от ЧР величиной в единицы, десятки пКл. Дальнейшее увеличение частоты среза не представляется возможным, так как требует для анализа сигналов специальных СВЧ зондов со связью по электромагнитному каналу.

Разделение сигналов от ЧР и ПР по их интенсивности затруднительно, так как интенсивность ЧР в изоляции контролируется на временном интервале в единицы, десятки минут, а контроль изоляции кабельных изделий на технологической линии происходит в течение единиц - десятков миллисекунд.

В работе проводились исследования по влиянию частоты контроля на интенсивность поверхностных разрядов. Экспериментально было выяснено, что уровень поверхностных разрядов обладал наименьшей амплитудой при контроле постоянным напряжением. Соотношение между уровнем ПР на частоте 5 кГц и уровнем ПР на постоянном токе было равно 4. На основе экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что выбор частоты контролирующего напряжения также не является достаточным фактором для снижения фонового уровня ПР для определения дефектов в слое изоляции по уровню ЧР при технологическом контроле.

В работе была исследована зависимость уровня ПР от параметров электрода.

Конструкция электрода и параметры величин прикладываемого напряжения выбирались в соответствии с действующим стандартом МЭК 62230. Такой электрод может быть выполнен в виде трубы или кольца. Для эксперимента с использованием постоянного напряжения был выбран электрод в виде трубы. Внутренний диаметр выбранного электрода составил 12 мм, длина 150 мм, контролирующее напряжение 10 кВ постоянного

тока. Контролю подвергался кабель МГШВ-0,35. Уровень фоновых ПР составил  $q_{кр}=150$  пКл.

Для контроля переменным напряжением был выбран электрод в виде кольца. Расстояние между электродом и поверхностью изоляции составило 2 мм. Амплитуда контролирующего напряжения составила 10 кВ при частоте повторения 500 Гц. Форма напряжения – синусоида. Для удобства сравнения контролю подвергался кабель МГШВ-0,35. Уровень фоновых ПР составил  $q_{кр}=1230$  пКл.

Исследования показали, что применение других конструкций электродов, в том числе и бесконтактных, используемых на практике, не привело к существенным изменениям уровня фоновых ПР.

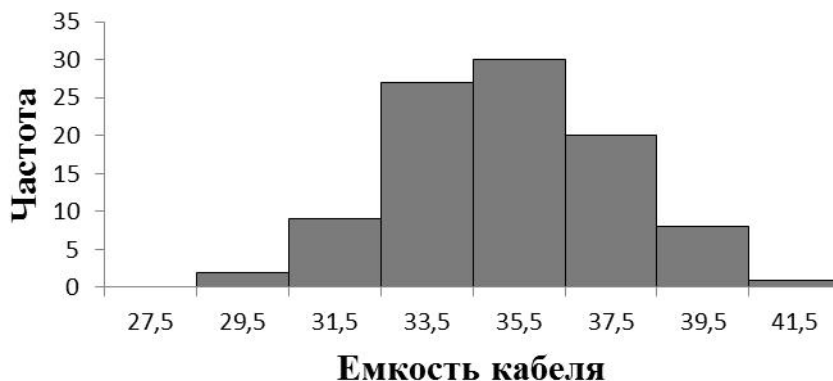
**Выводы по разделу.** Электроискровым методом контроля на технологической линии на текущем уровне развития технологий невозможно выделить сигналы от частичных разрядов. Величина фоновых поверхностных разрядов при испытаниях переменным напряжением превышает величину частичных разрядов в условном дефекте кубической формы размером сторон 0,1 мм более чем в 1000 раз. Применением специальных фильтров удастся снизить соотношение до нескольких сотен раз. При контроле постоянным напряжением уровень фоновых поверхностных разрядов значительно ниже, чем при контроле переменным напряжением. Однако этого уровня недостаточно для выявления дефекта. При увеличении размера дефекта уровень частичных разрядов также будет увеличиваться, но при этом электрический пробой дефектного участка изоляции наступит раньше, чем уровень частичных разрядов превысит уровень фоновых поверхностных разрядов.

**Исследование возможности обнаружения дефектов с помощью контроля значения ёмкости и/или диэлектрических потерь.**

В работе были определены критерии чувствительности детектора изменения емкости или мощности диэлектрических потерь. В производственных условиях погонная электрическая емкость кабельных изделий на участке приложения испытательного напряжения будет изменяться в некотором интервале даже при отсутствии дефектов. Детектирование таких участков как дефектных будет являться ложным срабатыванием. Причина нестабильности результатов контроля погонной емкости: поперечная вибрация контролируемого изделия и изменение за счет этого площади приложения испытательного напряжения, наличие влаги или талька на поверхности изделия, незначительные изменения геометрии, не являющиеся дефектами. В производственной практике дефектами кабельных изделий являются участки изоляции, в которых произошел электрический пробой при испытаниях по категории «ЭИ-1». Испытания по категории «ЭИ-1» - это приемо-сдаточные испытания, суть которых заключается в длительном приложении высокого напряжения ко всей поверхности кабельного изделия. Если электрического пробоя в изоляции при испытаниях по категории «ЭИ-1» не произошло, то изделие считается бездефектным. По этой причине в производственной практике для электроискрового контроля на кабельной линии вероятность обнаружения дефектов принимается 100 %, если после его проведения при испытаниях по категории «ЭИ-1» не произошло ни одного пробоя.

Для определения коэффициента изменения погонной емкости, при значении менее которого, в процессе контроля изоляцию допустимо считать бездефектной были взяты образцы кабельных изделий из трех основных изоляционных материалов: ПВХ пластикат, полиэтилен и резина, длиной 100 м каждый. Образцы подверглись испытаниям по категории «ЭИ-1» в соответствии с требованиями ГОСТ 23286-78 и ГОСТ 2990-78. Выдержавшие испытания образцы были подвергнуты контролю электроискровым дефектоскопом с функцией измерения погонной емкости «ЗАСИ-20». Протяженность

электрода составляла 150 мм. Конструкция электрода: шариковые цепочки из нержавеющей стали диаметром шара 3,2 мм. Шаг между центрами шариков - не более 5 мм. Амплитуда испытательного напряжения - 5 кВ, частота - 1 кГц, форма - синус. В процессе контроля для каждого образца было снято 100 значений погонной емкости и проведена статистическая обработка результатов. На рисунке 13 приведена диаграмма распределения значений погонной емкости для кабеля ПВ-3-1,5, материал изоляции ПВХ пластикат, внешний диаметр 3,6 мм, диаметр токоведущей жилы 1,6 мм.



**Рис. 13.** Диаграмма распределения значений погонной емкости для кабеля ПВ-3

Так как распределение емкости близко к нормальному, то можно воспользоваться правилом  $3\sigma$ , т.е. в интервале  $\pm 3\sigma$  от среднего значения лежит 99,7% процента значений емкости -  $X$ .

На основе экспериментальных данных, основная масса значений будет принадлежать интервалу (27,2; 41,4). Или изменяться относительно среднего значения на  $\pm 20,7\%$ .

Максимальный разброс значений погонной емкости был зафиксирован для провода кабеля РПШ 3х 1,5 (материал изоляции резина, внешний диаметр 3 мм, диаметр токоведущей жилы 1 мм). Разброс составил  $\pm 23,5\%$  для 99,7% процентов значений емкости.

На основании проведенных исследований для анализа возможности обнаружения дефектов по изменению погонной емкости был выбран коэффициент  $k_c=1,3$ . В условиях конкретного производства может быть выбран другой коэффициент, с учетом требований к вероятности обнаружения дефектов и вероятности ложных срабатываний, а также с учетом особенностей технологического процесса. Виды дефектов, которые приведут к изменению электрической емкости:

- внутренние воздушные полости или включения;
- изменение наружного диаметра кабельного изделия (локальное утонение или утолщение);
- наличие эксцентриситетности;
- трещины, порезы на поверхности изоляции.

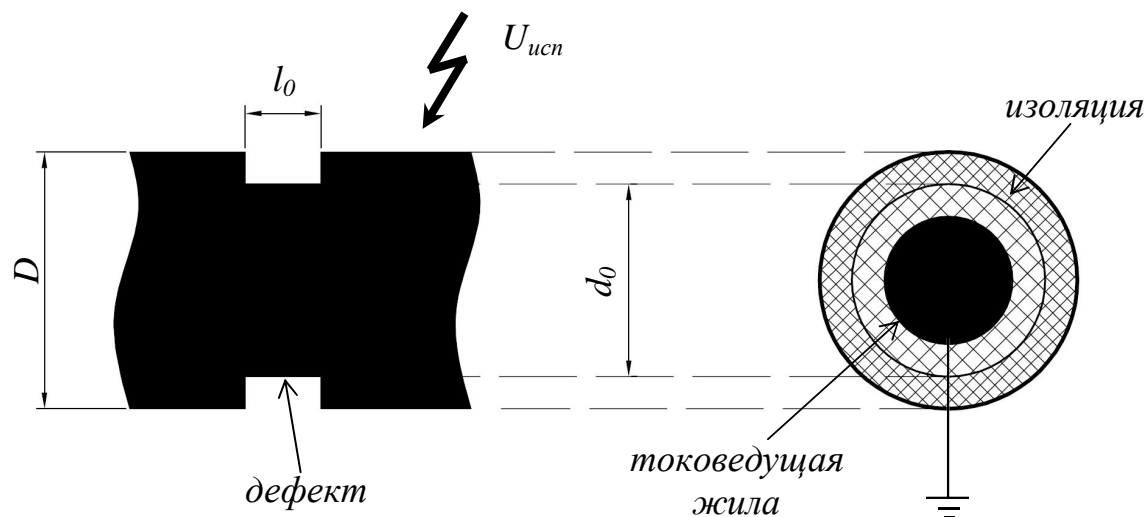
Превышение пробивного напряжения над испытательным составляет  $k_U=3..10$  раз. Данное соотношение было определено в Главе 2 диссертации. При анализе коэффициент напряжения  $k_U$  был принят максимальным - 10. Цель: обеспечение надежного перекрытия зон обнаружения с контролем по электротепловому пробоем дефектного участка. Соотношение может изменяться при изменении материала изоляции, конструкции кабельного изделия и особенностей технологического процесса. Необходимо определить такое изменение геометрии изоляции, которое будет приводить к изменению ее



электрической емкости, но не приведет к ее пробояю.

На рисунке 14 показан пример расположения дефекта в изоляционном слое. На примере изоляции из ПВХ пластиката при  $\epsilon_r=4$ ,  $k_c \geq 1,3$ ,  $k_U=r/(r-r_0) \geq 10$  необходимое требование к размеру дефекта вдоль приложения контролирующего напряжения:

$$0,1 \leq \frac{r_0}{r} \leq 0,9.$$



**Рис. 14.** Пример дефекта типа локальное утонение

С учетом того, что контроль проводится при напряженностях близких к напряженности пробоя диэлектрика, соотношение  $\epsilon_r/\epsilon_0$ , как правило, находится в пределах 2,5 ... 6, а электрическая прочность дефекта кратно ниже электрической прочности изоляции, то при контроле напряжением в области дефекта будут происходить электрические разряды высокой интенсивности и область дефекта будет обладать высокой проводимостью. В этом случае всё контролирующее напряжение будет приложено к целому участку изоляции  $r-r_0$ . Электрическая емкость дефекта потеряет физический смысл, а эквивалентная емкость участка изоляции с дефектом увеличится и будет равна:

$$C_{\Sigma} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r r^2}{r - r_0} \quad (4)$$

На примере изоляции из ПВХ пластиката в области сильных полей при  $\epsilon_r=4$   $k_c=1,3$ ,  $k_U=10$  из выражения (4) получим необходимое требование к размеру дефекта вдоль приложения контролирующего напряжения:  $0,23 \leq \frac{r_0}{r} \leq 0,9$ . На рис. 14 приведен пример дефектного участка круглого кабеля. Тип дефекта: локальное утонение длиной  $l_0$ , изменение наружного диаметра кабеля с величины  $D$  до величины  $d_0$ .

Например, для провода МГШВ-0,35 с диаметром жилы  $d_{жк}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,6$  мм обнаруживаемое утонение будет составлять в диапазоне  $0,7 \text{ мм} \leq d_0 \leq 1,3 \text{ мм}$ .

Для провода НВ1-0,2 с диаметром жилы  $d_{жк}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,3$  мм обнаруживаемое утонение будет составлять в диапазоне  $0,8 \text{ мм} \leq d_0 \leq 1,1 \text{ мм}$ .

Для провода ПВКВ-6 с диаметром жилы  $d_{жк}=2,7$  мм и с наружным диаметром  $D=4,7$  мм обнаруживаемое утонение будет составлять в диапазоне  $2,8 \text{ мм} \leq d_0 \leq 4,2 \text{ мм}$ .

Указанные выше соотношения соответствуют протяженности дефектов вдоль кабельного изделия и длине участка приложения контролирующего напряжения. Рассмотрим возможность обнаружения дефекта изоляции в виде пореза (трещины) длиной  $l_d=1$  мм на примере провода МГШВ-0,35 с диаметром жилы  $d_{жс}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,6$  мм. Из приведенных выше расчетов: минимальный диаметр дефектного участка  $d_0=0,7$  мм. При  $k_C=1,3$  длина участка приложения напряжения  $l_{контр}$  будет равна:

$$l_{контр} = l_d k_C (\text{при } d_0 = d_{0min}) / k_C \quad (5)$$

В данном случае  $l_{контр}=5,0$  мм.

Из приведенных соотношений видно, что при электроискровом контроле высоким напряжением условия обнаружения дефектов достаточно жесткие. Требования к относительным размерам дефектов должны выполняться на всем участке приложения высокого напряжения. Дефекты типа «локальное утонение», как правило, имеют большую протяженность, единицы, десятки метров. Длина участков контролируемых кабельных изделий, находящихся в области высоких напряжений, составляет десятые доли метра. По этой причине дефекты типа «локальное утонение» могут быть обнаружены при условии выполнения приведенных выше соотношений.

Дефекты типа «локальное утолщение» ( $d_0 > D$ ) также встречаются в производстве. Очевидно, что такие дефекты имеют только ограничения по относительному размеру только снизу, так как увеличения радиальной толщины изоляции не приводит к снижению электрической прочности.

Например, для провода МГШВ-0,35 с диаметром жилы  $d_{жс}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,6$  мм обнаруживаемое утолщение будет составлять  $d_0 \geq 2,15$  мм при  $k_C=1,3$ .

Для провода НВ1-0,2 с диаметром жилы  $d_{жс}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,3$  мм обнаруживаемое утолщение будет составлять  $d_0 \geq 1,64$  мм.

Для провода ПВКВ-6 с диаметром жилы  $d_{жс}=2,7$  мм и с наружным диаметром  $D=4,7$  мм обнаруживаемое утолщение будет составлять  $d_0 \geq 5,55$  мм.

На экструзионной линии при скорости движения контролируемого провода  $v=5$  м/с, проводились эксперименты по выявлению дефектов изоляции в виде порезов. Использовался провод ПВКВ-6 с диаметром жилы  $d_{жс}=1,2$  мм, с наружным диаметром  $D=3,3$  мм, радиальной толщиной изоляции  $h_{из}=1,05$  мм. В соответствии с ГОСТ 23286-78 контроль проводился при напряжении 10 кВ. Длина участка провода, находившегося в зоне контроля не более  $l=20$  мм. Измеренная электрическая емкость бездефектного участка провода  $C_{из}=9$  пФ. Электрическая емкость электрода  $C_{эл}=5$  пФ. Частота контролирующего напряжения  $f_{конт}=1$  кГц.

На различных участках провода делались надрезы фиксированной глубины  $\Delta_1=0,1$  мм,  $\Delta_2=0,2$  мм,  $\Delta_3=0,3$  мм,  $\Delta_4=0,4$  мм и  $\Delta_5=0,5$  мм. Максимальное изменение емкости было зафиксировано при глубине надреза  $\Delta_3=0,3$  мм и составило  $\Delta C=0,3$  пФ, что составило 2% от суммарной емкости бездефектного участка и электрода. Колебания значений емкости бездефектных участков изоляции достигали 5%.

На участках с глубиной пореза  $\Delta_4=0,4$  мм и  $\Delta_5=0,5$  мм происходили электрические пробой изоляции, которые были зафиксированы автоматикой электроискрового дефектоскопа.

### **Возможность обнаружения дефектов в изоляции по мощности диэлектрических потерь.**

Мощность диэлектрических потерь в диэлектрике:

Где:  $E$ - напряженность,  $\gamma$ - удельная проводимость.

$$P = U^2 \omega C t g \delta = E^2 \gamma \quad (21)$$

Удельные диэлектрические потери:

$$P_{\text{уд}} = \frac{P}{V} = E^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan \delta + E^2 \gamma_a \quad (22)$$

Где:  $V$ - объем диэлектрика,  $\gamma_a$ - активная составляющая удельной проводимости.

Удельные диэлектрические потери увеличиваются пропорционально увеличению квадрата напряженности. Снижение толщины изоляции приводит пропорциональному увеличению мощности диэлектрических потерь. Изменение толщины изоляции  $d$  приводит к обратному пропорциональному изменению емкости изоляции. В итоге изменение мощности диэлектрических потерь в изоляции при изменении ее толщины происходит в точном соответствии с изменением ее электрической емкости. Весь проведенный анализ по возможности обнаружения дефектов в изоляции по изменению электрической емкости справедлив в равной степени и для обнаружения дефектов по изменению диэлектрических потерь.

Однако стоит отметить, что на практике комплексное сопротивление контролируемой изоляции носит ярко выраженный емкостной характер. Соотношение емкостного тока и активного через изоляцию составляет, как правило,  $I_c/I_a=5\div 100$ . По этой причине контролировать качество изоляции надежнее по значению электрической емкости.

**Выводы по разделу.** В процессе электроискрового контроля можно обнаруживать дефекты типа воздушные полости или включения в случае если такие дефекты занимают всю геометрию (вокруг жилы) кабельного изделия и имеют протяженность близкую к длине электрода (участку кабельного изделия к поверхности изоляции которого прикладывается напряжение). Диапазон чувствительности на примере изоляции из ПВХ

пластиката при  $\varepsilon_r=4$ ,  $k_c=1,3$ ,  $k_U=10$  составляет  $0,23 \leq \frac{r_0}{r} \leq 0,9$ . Дефекты меньших размеров не удастся распознать на уровне помех. Дефекты больших размеров приведут электрическому пробую участка изоляции.

В процессе электроискрового контроля можно обнаруживать дефекты типа изменение наружного диаметра кабельного изделия (локальное утонение или утолщение) в случае если такие дефекты имеют протяженность близкую к длине электрода (участку кабельного изделия к поверхности изоляции которого прикладывается напряжение). Диапазон чувствительности при  $k_c=1,3$ ,  $k_U=10$  на примере провода НВ1-0,2 с диаметром жилы  $d_{\text{жс}}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,3$  мм составляет  $0,78 \text{ мм} \leq d_0 \leq 1,3$  мм для локальных утонений. Дефекты меньших размеров не удастся распознать на уровне помех. Дефекты больших размеров приведут электрическому пробую участка изоляции.

Локальные утолщения должны удовлетворять требованию  $\frac{d_0}{D} \geq 1,34$ . Дефекты меньших размеров не удастся распознать на уровне помех. Ограничений сверху нет, так как большее увеличение наружного диаметра изоляции не приведет к ее электрическому пробую. Дефекты в виде трещин, порезов на поверхности изоляции контролем значения электрической емкости могут быть обнаружены только на малых участках контроля, когда длина электрода сопоставима с длиной дефекта вдоль движения кабельного изделия. Например, для провода МГШВ-0,35 с диаметром жилы  $d_{\text{жс}}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,6$  мм при минимальном диаметре дефектного участка  $d_0 = 0,7$  мм и при  $k_c=1,3$  максимальная длина участка приложения напряжения  $l_{\text{контр}}$  будет равна 5,0 мм. На больших длинах контролируемого участка локальное изменение электрической емкости изоляции обнаружить будет затруднительно. Обнаруживать дефекты в изоляции кабельных изделий по величине диэлектрических потерь возможно. Характер поведения диэлектрических потерь совпадает с поведением величины емкостного тока. Однако стоит

отметить, что на практике комплексное сопротивление контролируемой изоляции носит ярко выраженный емкостной характер. Соотношение емкостного тока и активного через изоляцию составляет, как правило,  $I_c/I_a=5\div 100$ . По этой причине контролировать качество изоляции надежнее по значению электрической емкости.

#### ***Глава 4. Вопросы аттестации электроискровых дефектоскопов и обеспечение электробезопасности обслуживающего персонала.***

В четвертой главе проанализированы требования действующих нормативных документов в области электроискрового контроля с учетом полученных в работе научных результатов. Обоснованы рекомендации по внесению изменений. Предложены методы и средства для аттестации электроискровых дефектоскопов.

Одним из результатов исследований является рекомендация о конструкции имитатора дефектов при аттестации электроискровых дефектоскопов. Рекомендуемая в МЭК 62230-2006 конструкция электромеханического имитатора основана на электрическом разряде между иглой и плоскостью. Частота повторения и длительность электрического разряда обеспечиваются частотой вращения и угловой скоростью диска, на котором расположена игла. К игле подводится испытательное напряжение с аттестуемого дефектоскопа, а плоскость заземляется. Эксперименты показали, что данная конструкция обладает рядом недостатков, главный из которых нестабильность длительности электрического разряда. Например, при амплитуде испытательного напряжения  $U_{исп}=4$  кВ частоте повторения напряжения  $f=1$  кГц и предварительно установленной длительности разряда  $t_{разр}=20$  мс разброс фактического времени разряда составлял  $t_{разр}=(20\div 10)$  мс. Происходит это по причине того, что каждый раз при электрическом пробое воздушного промежутка разрядный путь проходит по индивидуальной траектории. В результате длина разрядного пути и длительность разряда нестабильны от импульса к импульсу. К тому же в связи с одновременно большим размером диска вращения (диаметр не менее 100 мм) и малым размером разрядного промежутка между иглой и заземленной плоскостью (250 мкм) задача обеспечения высокой стабильности длительности разряда становится достаточно сложной и дорогостоящей. Влияющими факторами на длительность разрядного импульса являются: амплитуда испытательного напряжения, влажность и температура воздуха. Это приводит к необходимости предварительной настройки имитатора дефектов перед каждым проведением аттестационных работ по средствам специализированной аппаратуры. Например, цифрового осциллографа и высоковольтного осциллографического щупа. Указанное оборудование приводит к удорожанию процедуры аттестации и не всегда имеется на кабельных предприятиях. В работе предлагается конструкция имитатора дефектов, свободная от указанных выше недостатков. Конструкция состоит из высоковольтного герконового реле и последовательно включенным с ним искровым промежутком. Герконовое реле обеспечивает высокую стабильность времени разряда и независимость его от внешних влияющих факторов. Нестабильность длительности разрядных импульсов составляет не более 5%.

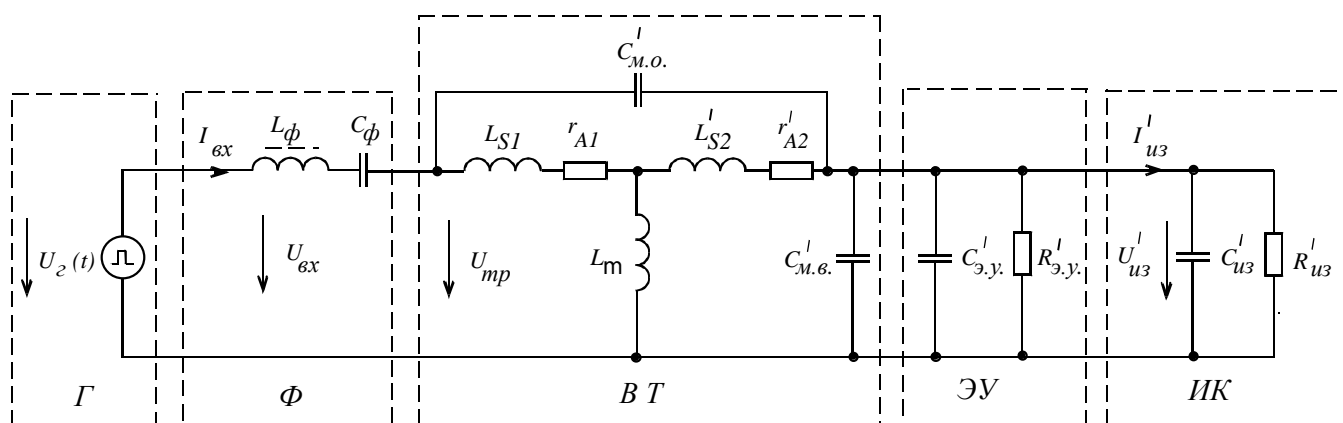
В работе проанализированы вопросы обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала. Выявлены основные вредные и опасные факторы. Выработаны рекомендации по их минимизации.

Электроискровые дефектоскопы являются устройствами повышенной опасности. Уровень контролируемых напряжений достигает 30 кВ, а токов - 50 мА, в различных их сочетаниях. Уровень коммутируемой реактивной мощности в цепи контроля может превышать 1 кВАр, а потребляемая из сети мощность быть более 500 Вт. Участки технологических линий, на которых эксплуатируются электроискровые дефектоскопы, не всегда полностью автоматизированы и обслуживаются людьми. При этом на экструзионных линиях используется вода для охлаждения изготавливаемой изоляции, и

поверхность кабеля увлажнена на значительных расстояниях. По этим причинам возникает необходимость в обеспечении электробезопасности обслуживающего персонала технологических линий, операторов электроискровых дефектоскопов. В соответствии с действующим стандартом ГОСТ 12.1.038-82 величины токов при долговременном воздействии на организм человека не должны превышать 6 мА для напряжения частотой 50 Гц и 8 мА для напряжения 400 Гц и выше.

Уровень максимального выходного тока электроискровых дефектоскопов, как отмечалось выше, может превышать безопасный уровень, установленный ГОСТ 12.1.038-82. Снижение выходной мощности дефектоскопа не может быть решением проблемы, так как основной ток через изоляцию кабеля является емкостным, а при попадании человека под высокое напряжение ток имеет активный характер. Поэтому необходимо разработать способы снижения выходного активного тока электроискровых дефектоскопов при сохранении высокого уровня емкостного тока.

Схему замещения генератора высокого напряжения электроискрового дефектоскопа можно представить в виде, изображенном на рис. 15.



**Рис. 15.** Схема замещения генератора высокого напряжения электроискрового дефектоскопа

где  $G$  - генератор;

$\Phi$  - фильтр;

$VT$  - высоковольтный трансформатор;

$ЭУ$  - электродный узел;

$ИК$  - испытуемый кабель.

Источником переменного напряжения является генератор, как правило, работающий в ключевом режиме. Для согласования генератора с высоковольтным трансформатором используются фильтры.

Ток через изоляцию кабельных изделий носит ярко выраженный емкостной характер. Причем емкостная составляющая тока, как правило, превосходит активную на порядок и выше.

Для высокочастотных дефектоскопов частота переменного контролирующего напряжения находится в следующих пределах: от сотен герц до единиц кГц (как правило, эта величина составляет более 500 - 5000 Гц).

Не смотря на то, что высоковольтный трансформатор обладает большой индуктивностью рассеяния (десятки Генри), ток в первичной цепи трансформатора также имеет емкостной характер. Это было выяснено в ходе экспериментов на действующих электроискровых дефектоскопах и при численном анализе схемы замещения электроискрового дефектоскопа.

## Способ защиты от поражения электрическим током по характеру тока в первичной обмотке высоковольтного трансформатора

В ходе экспериментов и числового моделирования схемы замещения высокочастотного электроискрового дефектоскопа было выяснено, что при изменении нагрузки (емкости и активного сопротивления изоляции), а так же при электрическом пробое изоляции изменится характер тока  $I_{ex}$ . Входной ток может быть как емкостным, так и индуктивным. Сопротивление человека при высоких напряжениях менее 1 кОм. В большинстве случаев модуль комплексного сопротивления емкости изоляции кабеля составляет единицы МОм, а активное сопротивление изоляции десятки МОм.

В результате проведенных исследований было выявлено, что в режиме, при котором нагрузкой электроискрового дефектоскопа является изоляция кабельного изделия ток  $I_{ex}$  носит емкостной характер. А при попадании человека под напряжение, на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора ток  $I_{ex}$  – становится индуктивным. Из этого следует, что попадание человека под высокое напряжение можно однозначно распознавать по характеру входного тока.

Индуктивный характер тока  $I_{ex}$  может быть вызван не только попаданием человека под высокое напряжение, но и пробоем изоляции контролируемого кабельного изделия. Однако этот факт не будет являться препятствием для применения предлагаемого способа защиты, так как по существующим стандартам при пробое изоляции контролирующее высокое напряжение должно быть временно снято.

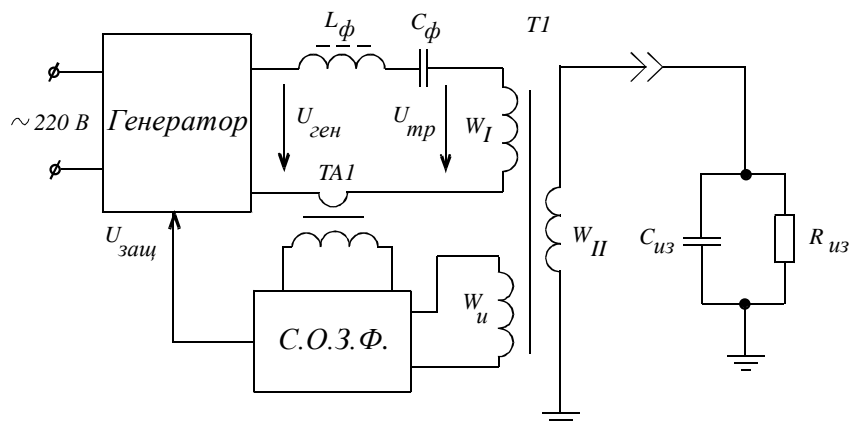
На основе вышеизложенного можно предложить следующую схему защиты обслуживающего персонала электроискрового дефектоскопа от поражения электрическим током (рис. 16).

Ниже описан принцип работы устройства.

Для более достоверной работы устройства защиты и повышения надежности силовой части дефектоскопа может быть использована двухуровневая защита.

Первый более высокий уровень защиты  $I_{защ1}$  соответствует максимальному току, на который рассчитывается силовая часть дефектоскопа. Этот уровень предназначен для ограничения мощности, отдаваемой генератором при превышении тока нагрузки допустимого уровня. Схема защиты входящая в состав генератора не допускает превышение тока первичной обмотки высоковольтного трансформатора данного уровня.

Второй более низкий уровень защиты  $I_{защ2}$  соответствует уровню максимально допустимого активного тока вторичной обмотки, пересчитанного в первичную. Однако, в рабочем режиме возможно превышение данного уровня, так как при большом емкостном токе вторичной обмотки ток первичной обмотки и без попадания человека под опасное напряжение может превышать уровень  $I_{защ2}$ .



**Рис. 16.** Схема защиты обслуживающего персонала высоковольтного испытателя от поражения электрическим током

где *С.О.З.Ф.* - схема определения знака фазы;

$C_{из}$  - емкость изоляции кабеля;

$R_{из}$  - активное сопротивление изоляции кабеля;

*T1* - высоковольтный трансформатор;

*TA1* - трансформатор тока;

$W_I$  и  $W_{II}$  - первичная и вторичная обмотки высоковольтного трансформатора соответственно;

$W_u$  - измерительная обмотка высоковольтного трансформатора.

При попадании человека под высокое напряжение схема защиты работает следующим образом. Ток первичной обмотки высоковольтного трансформатора становится индуктивным. В этом случае схема *СОФС* выдает сигналы уровня на генератор, а встроенная схема защиты, в зависимости от заданного алгоритма, либо ограничивает ток  $I_{ex}$  до уровня  $I_{защ2}$  путем снижения напряжения  $U_{ин}$ , либо вообще прекращает работу генератора до установления причин перегрузки.

Диапазон токов от 0 до  $I_{защ1}$  соответствует активно – емкостному характеру тока  $I_{ex}$ . Диапазон токов от 0 до  $I_{защ2}$  соответствует активно – индуктивному характеру тока  $I_{ex}$ .

На приведенной выше схеме сигналы о фазах тока  $I_{ex}$  и напряжения  $U_{тр}$  подаются на схему *СОЗФ* через трансформаторы *TA1* и *T1* соответственно. Это необходимо для удобства, так как возбуждающее напряжение  $U_{тр}$  как правило составляет сотни вольт и к тому же не развязано гальванически от сети.

Конструктивно достаточно просто обеспечить условия, при которых индуктивность рассеяния измерительной обмотки  $W_u$  относительно обмотки  $W_I$  была минимальной, так как обмотка  $W_u$  содержит малое количество витков и находится на одном каркасе с обмоткой  $W_I$ .

Из приведенного анализа следует, что строить защиту человека от поражения электрическим током, предложенным выше способом, т.е. посредством анализа характера тока, возможно. В пятой главе приведена схема реализации данного способа и анализ ее работы.

**Выводы по главе 4.** Требуемый уровень выходных напряжений и токов электроискровых дефектоскопов кратно превышает безопасный для человека уровень. По этой причине ограничение выходного тока на некотором максимальном уровне неэффективно, требуется определение факта попадания человека под действие испытательного напряжения. Данный факт однозначно можно определить по характеру тока на первичной обмотке высоковольтного трансформатора дефектоскопа. При контроле

изоляции характер тока емкостной, а при попадании человека под действие испытательного напряжения становится индуктивным. При емкостном характере тока максимальный его уровень ограничивается исходя из требований контроля, а при индуктивном характере тока максимальный его уровень ограничивается исходя из требований электробезопасности. Еще одним эффективным способом обеспечения электробезопасности является контроль эквивалентного сопротивления нагрузки. Модуль комплексного сопротивления контролируемой изоляции более чем на три порядка превышает сопротивление человека под действием высокого напряжения. Эффективным способом обеспечения электробезопасности является ограничение выходного тока при одновременном контроле сопротивления нагрузки.

Приведенная в МЭК 62230-2006 рекомендованная конструкция имитатора дефектов имеет ряд недостатков: высокая нестабильность длительности имитируемых пробоев, а так же требования к наличию специализированной аппаратуры для контроля и настройки имитатора. В работе предложена конструкция, состоящая из последовательно включенного высоковольтного реле и стационарного искрового промежутка. Данная конструкция свободна от указанных выше недостатков.

### ***Глава 5. Принципы построения электроискровых дефектоскопов***

Результаты научно-исследовательских работ были использованы в разработках высоковольтных электроискровых дефектоскопов. На рис. 17 показан внешний вид дефектоскопа «ЗАСИ-30». Дефектоскоп «ЗАСИ-30» предназначен для контроля целостности изоляции кабельных изделий. Рекомендован для скоростных линий. Дефектоскоп позволяет работать в двух режимах: «линия» или «перемотка». Имеет функцию дистанционного отключения контролирующего напряжения при остановке линии. Невосприимчив к электрическим перегрузкам в электродном узле и способен долговременно работать в режиме короткого замыкания. Уровень выходного тока короткого замыкания не превышает 8 мА действующего значения, что соответствует требованиям стандарта ГОСТ 12.1.038-82. «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».



**Рисунок 17.** Внешний вид высоковольтного электроискрового дефектоскопа «ЗАСИ-30»

В таблице 1 приведены основные технические характеристики прибора.



**Таблица 1.** Основные технические характеристики электроискрового дефектоскопа «ЗАСИ-30»

Амплитуда контролирующего напряжения, кВ	1,5÷30
Форма контролирующего напряжения	синус
Частота повторения контролирующего напряжения, не менее, Гц	500
Максимальная электрическая емкость нагрузки, пФ	300
Минимальное сопротивление активной электрической нагрузки, МОм	10
Максимальная погрешность измерения контролирующего напряжения, %	±5
Максимальная скорость движения контролируемого кабельного изделия, м/мин	1500
Чувствительность детектора дефектов при напряжении 3 кВ, мкА	600
Минимальная частота детектирования дефектов, Гц	1
Максимальный ток короткого замыкания, мА	8
Продолжительность работы в режиме короткого замыкания	не огранич.
Наличие цифрового интерфейса	RS-485

На рисунке 18 приведена структурная схема электроискрового дефектоскопа «ЗАСИ-30»

Дефектоскоп может эксплуатироваться с одним из двух электродных узлов: «ЭУ-30/150» для малых размеров кабельных изделий или «ЭУ-60/150» для тяжелых кабелей. На рисунке 19 приведен внешний вид электродного узла. В Таблице 2 приведены их основные характеристики. Электродный узел «ЭУ-60/150» состоит из двух функциональных узлов: электрода и защитного кожуха. Для обеспечения надежного контакта электрода с испытуемым кабелем и увеличения срока службы электрода все его детали и цепочки выполнены из нержавеющей стали.

Защитный кожух электрода состоит из двух частей:

- нижней неподвижной профилированной пластины, установленной на фторопластовых изоляторах;
- верхней откидывающейся пластины, в которой установлен объемный цепочечный электрод, к нему испытательное напряжение подводится от профилированной пластины за счет контакта цепочек с пластиной.

В боковых стенках защитного кожуха выполнены отверстия диаметром 110 мм, предназначенные для прохождения испытуемого кабеля через электродный узел. Над отверстиями с внешней стороны верхней части защитного кожуха установлены кронштейны, в каждом из которых находится ряд заземленных цепочек. Они предназначены для обеспечения безопасности работающего с высоковольтным испытателем персонала, предотвращая растекание заряда по влажной поверхности испытуемого кабеля за пределы защитного кожуха электрода. Защитный кожух электрода изготовлен из стального листа толщиной 1,5 мм. Отдельные элементы конструкции кожуха усилены стальным листом толщиной 3 мм. Выполнение защитного кожуха полностью стальным позволяет надежно заземлить электродный узел, что обеспечивает электробезопасность работающего с ним персонала. Все элементы и узлы, находящиеся под высоким напряжением находятся внутри стального заземленного защитного кожуха. Газовые пружины предназначены для обеспечения плавного опускания верхней части защитного кожуха, имеющего достаточно большую массу.

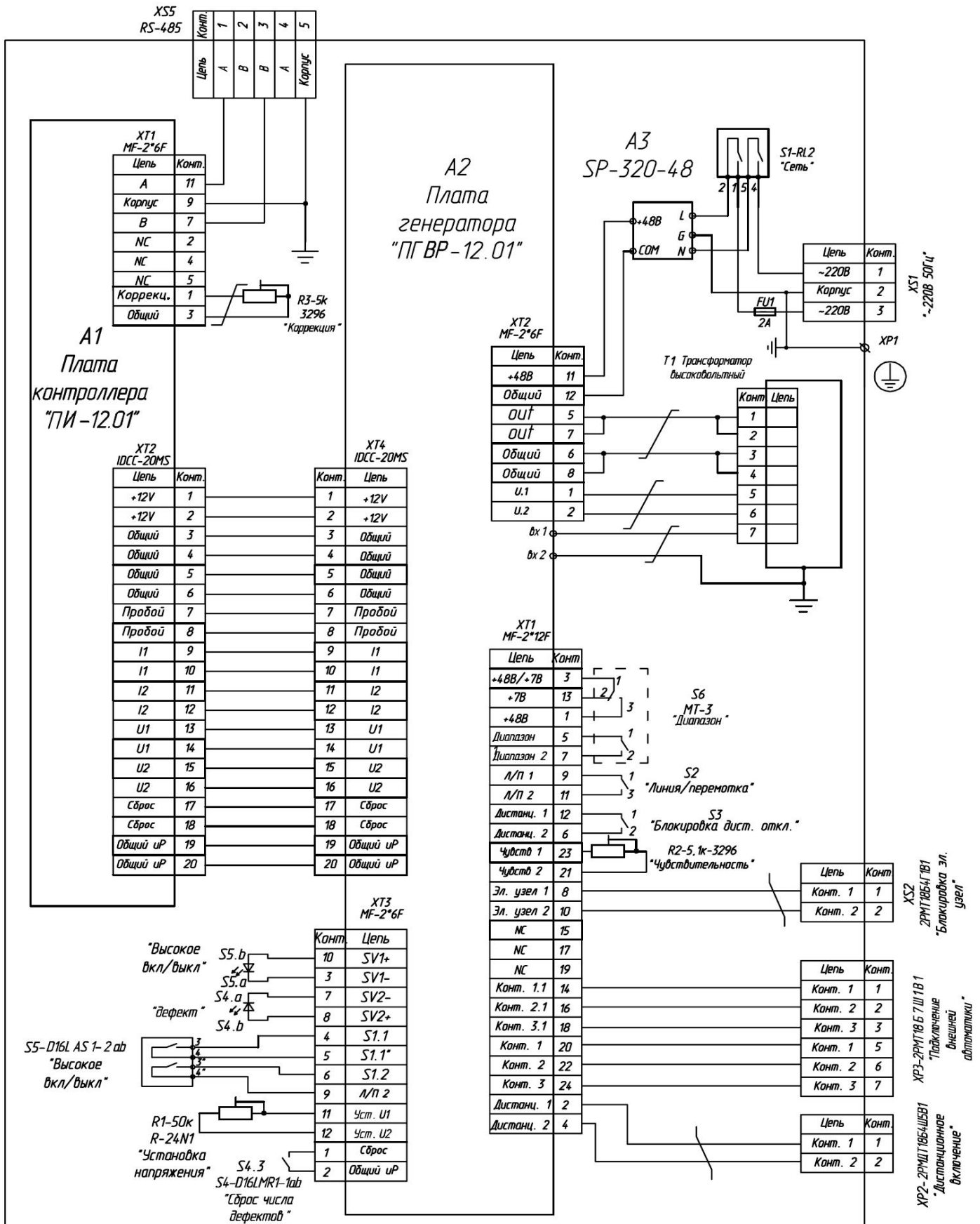


Рис. 18. Структурная схема высоковольтного электроискрового дефектоскопа «ЗАСИ-30»

. Таблица 2. Основные технические характеристики электродного узла «ЭУ-60/150»

Диаметр контролируемого кабеля, мм	1÷60
Длина активной части электрода, мм	150
Макс. рабочее напряжение, кВ	30
Макс. рабочая частота при 30 кВ, кГц	5
Наличие защитной блокировки	есть
Габариты д×в×г, мм	510×330×455
Масса, не более, кг	18,5
Режим работы	долговременный



Рис. 19. Внешний вид электродного узла «ЭУ-60/150»

На рисунке 20 показан внешний вид прибора ИАСИ-30. Импульсный электроискровой дефектоскоп «ИАСИ-30» предназначен для контроля целостности изоляции кабельных изделий, в том числе и с низким объемным сопротивлением, например, из резин.



Рис. 20. Внешний вид высоковольтного электроискрового дефектоскопа ИАСИ-30

Импульсный режим работы позволяет снизить жесткость воздействия на испытываемую изоляцию и уменьшить мощность оборудования. Уровень выходного тока, при этом, не превышает 6 мА действующего значения, что соответствует требованиям стандарта ГОСТ 12.1.038-82. «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов». Дефектоскоп позволяет работать в двух режимах: «линия» или «перемотка». Имеет функцию дистанционного отключения испытательного напряжения при остановке линии. Дефектоскоп невосприимчив к электрическим перегрузкам в электродном узле и способен долговременно работать в режиме короткого замыкания. Основные технические характеристики прибора приведены в таблице 3.

**Таблица 3.** Основные технические характеристики электроискрового дефектоскопа ИАСИ-30

Амплитуда испытательного напряжения, кВ	1,5÷30
Форма испытательного напряжения	импульс
Частота повторения испытательного напряжения, не менее, Гц	250
Максимальная электрическая емкость нагрузки, пФ	100
Мин. сопротивление электрической нагрузки, МОм	2
Макс. погрешность измерения испытательного напряжения, %	±5
Макс. скорость контроля, м/мин	750
Минимальная частота детектирования дефектов, Гц	1
Максимальный ток короткого замыкания, мА	6
Продолжительность работы в режиме короткого замыкания	не ограничено

Для аттестации электроискровых дефектоскопов был разработан и изготовлен имитатор «ИмД-1» предназначен для аттестации высоковольтных испытателей изоляции на соответствие требованиям стандартов ГОСТ Р 54813-2011 и МЭК 62230-2006 в части детектирования дефектов. На рисунке 21 приведен внешний вид имитатора. В пятой главе диссертационной работы приведена схема и принцип работы устройства. В таблице 6 приведены основные технические характеристики имитатора.

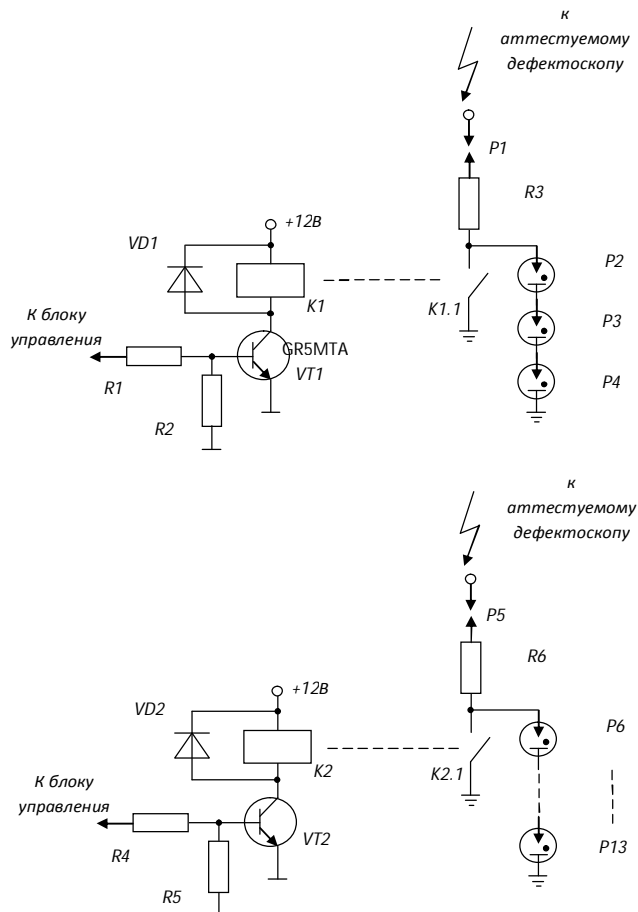


**Рисунок 21.** Внешний вид имитатора дефектов «ИмД-1»

На рисунке 22 представлена схема коммутирующей части имитатора дефектов.

**Таблица 5.** Основные технические характеристики имитатора дефектов «ИмД-1»

Рабочее напряжение (амплитуда), кВ	1 ÷ 40
Длительность имитируемых дефектов, мс	25 ± 5
Период повторения дефектов, с	1
Количество генерируемых в пачке дефектов, шт	20
Максимальный коммутируемый ток, А	10



**Рис. 22.** Схема коммутационной части имитатора дефектов «ИмД-1»

Всего в ходе работы было создано 9 моделей электроискровых дефектоскопов, три модели электродных узлов и стенд для проведения аттестации электроискровых дефектоскопов на соответствие требованиям действующих стандартов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе экспериментальных данных и численного моделирования доказано, что при электроискровом методе контроля изоляции кабельных изделий могут быть достоверно обнаружены сквозные дефекты диаметром более 28 мкм и снижение толщины изоляции до (13...28) % от толщины бездефектного участка в зависимости от материала диэлектрика и режимов контроля.
2. Рассчитаны границы дефектов, обнаруживаемые с помощью контроля по изменению погонной емкости и уровня диэлектрических потерь. Показано, что могут быть достоверно обнаружены дефекты со снижением толщины изоляции до (33...77) % от толщины бездефектного участка в зависимости от конструкции кабельного изделия и

(42...50) % для локальных утолщений. Характер поведения диэлектрических потерь совпадает с поведением величины емкостного тока. Соотношение емкостного тока и активного через изоляцию составляет, как правило,  $I_c/I_a=5\div 100$ . По этой причине контролировать качество изоляции надежнее по значению электрической емкости.

3. Исследования возможности применения контроля по уровню частичных разрядов в технологическом процессе с целью обнаружения дефектов размером менее 100 мкм в слое изоляции показали, что на текущем уровне технического развития это невозможно по причине того, что фоновый уровень от поверхностных разрядов превосходит уровень частичных разрядов от дефектов более чем в 100 раз.
4. Разработаны алгоритмы оценки параметров дефектной и бездефектной изоляции как объекта электроискрового контроля в зависимости от особенностей технологического процесса и режимов контроля. Показано, что удлинение электрода можно приближённо рассчитать исходя из соотношений (1...4) мм/кВ в зависимости от материала и состояния поверхности изоляции, а также амплитуды и частоты испытательного напряжения.
5. Проведен анализ влияния формы и частоты контролирующего напряжения на достоверность контроля. Доказано, что контроль высоким напряжением промышленной частоты не имеет преимуществ по сравнению с контролем напряжением высокой частоты, 500 Гц и более. Доказано, что возможно контролировать целостность изоляции кабельных изделий импульсным напряжением частотой повторения (50-170) Гц при его амплитуде более 5 кВ.
6. Разработаны рекомендации по внесению изменений в действующий стандарт ГОСТ 29990-78 и ГОСТ Р 54813-2011 о контроле импульсной формой напряжения.
7. Разработана установка для аттестации электроискровых дефектоскопов на соответствие ГОСТ Р 54813-2011.
8. Разработаны модели электроискровых дефектоскопов в которых были воплощены результаты научно- исследовательской работы. «ЗАСИ-20» прошел испытания и внедрен на предприятиях «Беларускабель», г. Мозырь, «Иркутсккабель», г. Шелехов, Иркутской обл. и «Энергокабель», г. Электроугли Московской обл., «ЗАСИ-15», прошел испытания и внедрен на предприятиях «Рыбинсккабель», г. Рыбинск Ярославской обл. и «Энергокабель» г. Электроугли Московской обл., «ЗАСИ-30» прошел испытания и внедрен на предприятиях «Алюр», г. Великие Луки Псковской обл., «Агрокабель», г. Окуловка Новгородской обл., и «Рыбинсккабель» Рыбинск Ярославской обл., «ЗАСИ-30М» прошел испытания и внедрен на предприятиях «Рыбинсккабель» г. Рыбинск Ярославской обл., «Норис» г. Бугульма и «Смолкабель», г. Сафоново Смоленской обл., «ЗАСИ-15М» прошел испытания и внедрен на предприятии «Паритет» г. Подольск московской обл., «АСИП-30/110» прошел испытания и внедрен на предприятии «Нексанс Рус», г. Углич Ярославской обл. В разработанных приборах были воплощены оригинальные методы обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала.
9. Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертационной работе, использованы в разработанных автором лекционных курсах «Технологический контроль в производстве» и «Технологический контроль в кабельном производстве», а также при подготовке практических и лабораторных работ для студентов института неразрушающего контроля и энергетического института ТПУ.

*Публикации в периодических изданиях списка ВАК*

1. Редько В.В., Редько Л.А. Способ защиты от поражения электрическим током при высоковольтных испытаниях изоляции кабельных изделий. // Журнал «Электричество» № 8 2004. С. 65-67
2. Редько Л.А., Редько В.В. Высоковольтный испытатель изоляции кабеля методом на проход // Датчики и системы, 2004. -№ 9 -с. 43-45.
3. Редько Л.А., Редько В.В., Кулешов В.К. Способ защиты обслуживающего персонала при контроле изоляции кабеля высоким напряжением // Известия Томского политехнического университета, 2004. -Вып. 7. -т. 307 -с. 100-101.
4. Редько В.В., Редько Л.А. Измерение высокого напряжения в импульсных аппаратах сухих испытаний изоляции кабеля // Известия Томского политехнического университета, 2006. -т. 309 -№ 1 -с. 175-178.
5. Редько В.В. Высоковольтный испытатель оболочки оптических кабелей связи // Датчики и системы, 2006. -№ 4 -с. 35-37.
6. Редько В.В., Свендровский А.Р. Адаптация ГОСТа 2990 к современным условиям кабельного производства // Кабели и провода, 2006. -№ 6 -с. 17-22.
7. Редько В.В., Свендровский А.Р. Предложения о внесении изменений в требования стандарта ГОСТ 2990-78 «Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением» // Кабели и провода, 2008. -№ 9 -с. 154-157.
8. Редько В.В., Свендровский А.Р. О возможности испытаний изоляции кабельных изделий методом контроля «на проход» постоянным высоким напряжением // Кабели и провода. № 1 2009. с. 24-25.
9. Редько В.В., Л.Б. Бурцева, Л.А. Редько. Изоляция кабельных изделий как объект электроискрового технологического контроля // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 4. С. 111-114.
10. Редько В.В., Л.Б. Бурцева. Аттестация высоковольтных испытателей изоляции // Ползуновский вестник. № 3/1 2011 г. С.111-113.
11. Редько В.В., Л.Б. Бурцева, Л.А. Редько. Достоверность электроискрового контроля кабельных изделий // Дефектоскопия. № 10 2011 г. с. 31-34.
12. Редько В.В., Л.Б. Бурцева, Л.А. Редько. Приборы электроискрового контроля изоляции кабельных изделий. // Контроль и диагностика. № 11 2011 г. С.9-11.
13. Редько В.В., Л.Б. Бурцева, Л.А. Редько. «Reliability of the Spark Inspection of Cable Product Insulation». Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, Vol. 47. № 10 с. 672-674.
14. Редько В. В. , Леонов А. П. , Бурцева (Иконникова) Л. Б. , Редько Л. А. Выявление электроискровым методом контроля изоляции кабельных изделий дефектов, приводящих к возникновению частичных разрядов // Контроль. Диагностика. - 2012 - №. 13 - С. 126-131.

*Монография*

15. Редько В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий: монография / В.В. Редько; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 176 с.

### *Патенты и свидетельства на полезную модель*

16. Редько В.В., Гольдштейн А.Е., Бурцева Л.Б. Способ испытаний полимерной изоляции. Положительное решение от 03.04.2013 г. МКИ7 G01R 31/14. Заявлено 14.03.2012. Заявка № 2012109968.
17. Редько В.В., Редько Л.А. Устройство для испытания полимерной изоляции кабеля. Свид. на ПМ 45834 Россия. МКИ<sup>7</sup> G01R 31/14. Заявлено 27.12.2004; Опубл. 27.05.2005, Бюл. № 15. – 3 с.: ил.

### *Материалы научно-технических конференций*

18. Гольдштейн А. Е. , Редько В. В., Федоров Е. М. Технологический контроль в кабельном производстве // Инновации в неразрушающем контроле SibTest: сборник научных трудов I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по Инновациям в неразрушающем контроле, Горно-Алтайск, 25-29 Июля 2011. - Томск: Изд-во ТПУ, 2011 - С. 24-29.
19. Редько Л.А., Редько В.В. Высоковольтные испытатели изоляции кабеля. Схемы регистрации пробоев //Труды 4-й международной конференции «Актуальные проблемы науки» - Самара, сент. 2003. - Самара: 2003. - с. 20 – 22.
20. Редько В.В. Использование электроискрового метода для контроля электрической изоляции кабеля в процессе производства //Качество - стратегия XXI века: Материалы XI международной научно-практической конференции, 2006. -с. 191-192.
21. Редько В.В., Федоров Е.М., Якимов Е.В. Модернизация методик испытаний изоляции кабельных изделий //Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, промышленность : Сборник трудов шестой международной научно-практической конференции - С.-Петербург, 16-17 октября 2008. - С.-Петербург: С.-П ГПУ, 2008. - с. 191-192.
22. Бурцева Л.Г., Редько В.В., Федоров Е.М., Якимов Е.В. Состояние в России вопроса о динамических испытаниях изоляции кабелей высоким постоянным напряжением //Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, промышленность: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности»/ Под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко - С.-Петербург, 16-17 октября 2008. - С.-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2008. - с. 130-132.
23. Редько В.В. Импульсный испытатель изоляции кабеля методом контроля «на проход» //Становление и развитие научных исследований в высшей школе: Сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева - Томск, ТПУ, 14-16 сентября 2009. - Томск: Изд. ТПУ, 2009. - с. 168-171.
24. Редько В.В., Бурцева Л.Б. Изоляция кабельных изделий как объект электроискрового технологического контроля //Становление и развитие научных исследований в высшей школе: Сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А.Воробьева - Томск, ТПУ, 14-16 сентября 2009. - Томск: Изд. ТПУ, 2009. - с. 90-95.