

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

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

диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант – доктор технических наук,
Профессор Гольдштейн Александр Ефремович

Томск 2013

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Электроискровой технологический контроль изоляции кабельных изделий.....	12
1.1 Основы технологии производства кабельных изделий.....	12
1.2 Электрическая схема замещения кабельного изделия	15
1.3 Дефекты изоляции кабельных изделий.....	18
1.4 Причины возникновения дефектов. Влияние технологических параметров и режимов на качество изготавливаемых изделий.....	23
1.5 Электроискровой контроль целостности изоляции кабельных изделий...	40
1.6 Нормативная база электроискрового технологического контроля кабельных изделий.....	44
1.7 Приборы для контроля целостности изоляции кабельных изделий высоким напряжением по категории «ЭИ-2».....	48
Выводы по главе 1.....	60
Глава 2. Исследование изоляции кабельных изделий как объекта электроискрового контроля.....	61
2.1 Изоляция кабельных изделий как объект электроискрового контроля..	61
2.2 Определение эквивалентных электрической емкости и активного сопротивления контролируемого кабельного изделия.....	68
2.3 Влияние особенностей технологического процесса на электрические параметры контролируемого кабельного изделия.....	74
Выводы по главе 2.....	83
Глава 3. Исследование возможности обнаружения дефектов изоляции кабельных изделий электроискровым контролем.....	84
3.1 Определение размеров дефектов обнаруживаемых по электрическому пробую изоляции.....	84
3.2 Выявляемость дефектов изоляции кабельных изделий при испытаниях высоким напряжением различной частоты.....	88

3.3 Исследование возможности обнаружение дефектов по уровню частичных разрядов.....	115
3.4 Исследование возможности обнаружение дефектов по изменению ёмкости и мощности диэлектрических потерь.....	129
Выводы по главе 3.....	138
Глава 4. Обеспечение элетробезопасности и аттестация электроискровых дефектоскопов.....	141
4.1 Обеспечение элетробезопасности в электроискровых дефектоскопах...	141
4.2 Аттестация электроискровых дефектоскопов.....	152
Выводы по главе 4.....	169
Глава 5. Практическая реализация электроискровых дефектоскопов..	170
Заключение.....	188
Литература.....	190
Приложения.....	208

Введение

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 поле контроля происходит искровой разряд, что фиксируется электроискровым дефектоскопом, качественная изоляция при этом не повреждается. Электроискровой метод контроля 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. Не смотря 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 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 168 источников. Основная часть диссертации изложена на 207 страницах машинописного текста, содержит 93 рисунка.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

1.1 Основы технологии производства кабельных изделий

Кабельные изделия (кабели, провода, шнуры) являются одними из наиболее широко используемых элементов электротехники и электроники [2-4]. Конструктивными элементами кабельных изделий являются токопроводящие жилы, изоляция, электрические экраны и защитные покровы. Токопроводящие жилы предназначены для передачи электрической энергии и сигналов информации. Изоляция необходима для создания геометрически стабильного разделительного промежутка между токоведущими жилами и заземленными поверхностями. Изоляция кабельных изделий изготавливается из полимеров: резина, ПВХ пластиката, полиэтилен, фторопласт [2-4].

Кабельные изделия изготавливаются на поточных линиях, которые объединяют в себе несколько технологических процессов (Рисунок 1.1.1). Современные технологические линии (экструзионные линии или линии вулканизации) объединяют в себе волочение проволоки, ее отжиг, наложение изоляции, охлаждение изолированной жилы, ее испытание и прием на машинную тару или в контейнеры [2-4].

Алюминиевая или медная проволока после волочения подвергается отжигу. Затем проволока поступает в червячный пресс, где происходит наложение изоляции. После наложения изоляции изделие поступает в секционированную охлаждающую ванну. При выходе из охлаждающей ванны изолированная жила подвергается обдувке сжатым воздухом, контролю целостности высоким напряжением, измерению его длины, после чего он принимается в контейнер или на барабан [2-4].

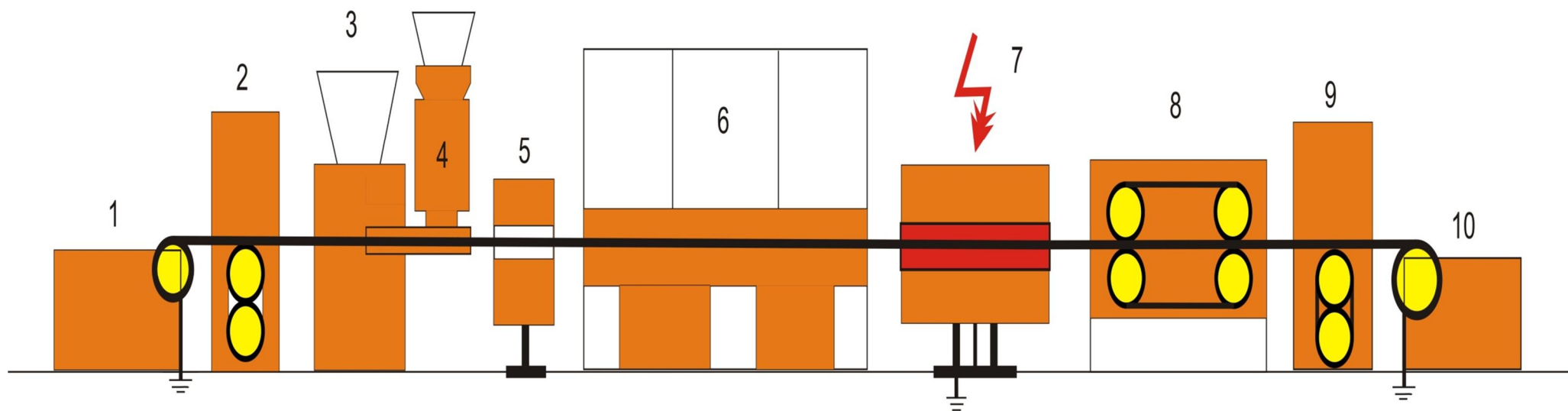


Рисунок 1.1.1 - Технологическая схема типовой экструзионной линии

1 – отдающее устройство; 2 – компенсатор отдающего устройства; 3 и 4 – экструдеры;

5 – измеритель эксцентриситета и диаметра; 6 – ванны охлаждения; 7 – электроискровой дефектоскоп; 8 – тяговое устройство;

При обнаружении дефектов экструзионная линия не останавливается, а точное положение дефекта на кабельном изделии обнаруживается на участках контрольной перемотки (рисунок 1.1.2).

Для изготовления многожильных проводов используют участки скрутки (рисунок 1.2.3).

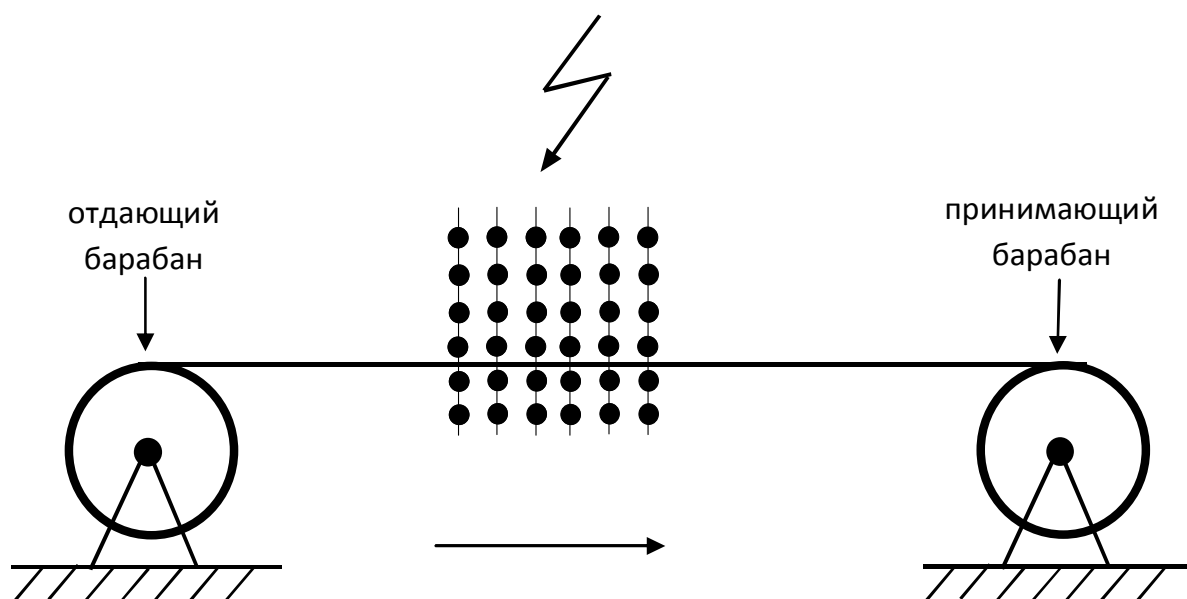


Рисунок 1.1.2 – Участок контрольной перемотки

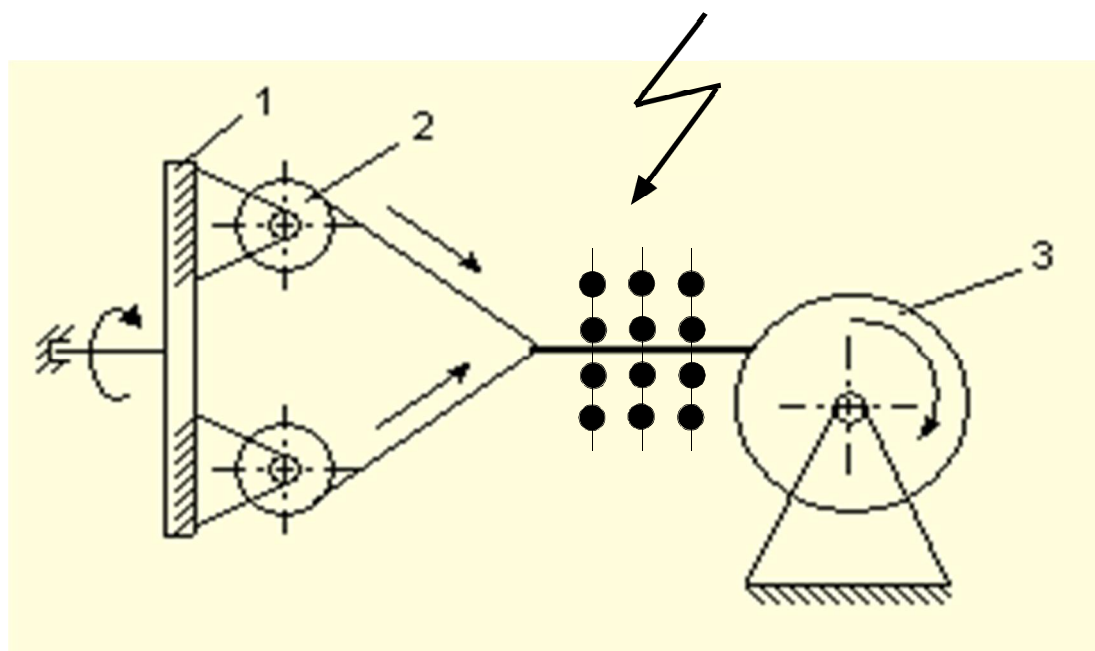


Рисунок 1.1.3 – Участок скрутки изолированных жил

1 - вращающийся барабан; 2 - отдающие устройства; 3 - приемник

1.2 Электрическая схема замещения кабельного изделия

Изоляцию кабельных изделий можно представить в виде эквивалентных схем, состоящих из последовательно или параллельно соединенных идеального конденсатора, активного сопротивления (диэлектрических потерь), а также индуктивности [19-21].

Полная схема замещения кабельного изделия является цепью с распределенными параметрами, приведенными к единице длины: активным сопротивлением токопроводящих жил R_A , индуктивностью L_K , сопротивлением изоляции $R_{из}$, емкостью изоляции $C_{из}$ [22]. На рисунке 1.2.1 приведена упрощенная схема замещения кабельного изделия.

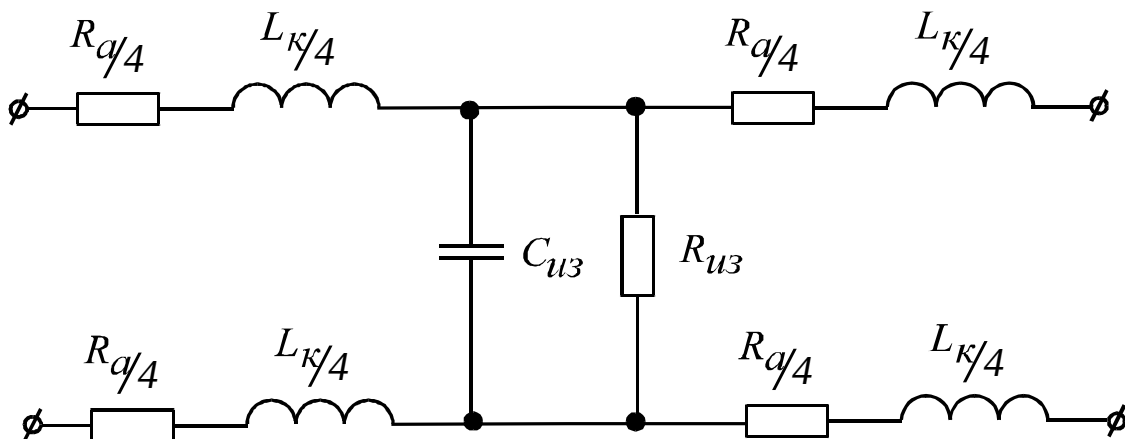


Рисунок 1.2.1 - Электрическая схема замещения кабельного изделия

Индуктивность кабельного изделия оказывают влияние только на частотах значительно превышающих частоты испытательного напряжения. Активное сопротивление жилы при протекающих токах приводит к пренебрежительно малому падению испытательного напряжения. При контроле целостности изоляции частота испытательного напряжения не превышает 5 кГц [1,5,7,18,24-29]. Ток через контролируемую изоляцию не превышает 100 мА [117]. В связи с этим влиянием индуктивности и активного сопротивления жилы при электроискровом контроле целостности изоляции кабельных изделий пренебрегают. Для примера, монтажный

провод МКПВ имеет параметры [16,36]: $R_A=16$ Ом/км, $R_{из}=15\,000$ МОм·км, $C_{из}=34,5$ нФ/км.

Индуктивность $L_K=3\cdot 10^{-4}$ Гн/км. На максимальной частоте испытательного напряжения 5 кГц и расстоянии от места установки электрода электроискрового дефектоскопа до экструдера, где токоведущая жила заземлена (как правило, 20 м) модуль индуктивного сопротивления составляет 0,2 Ом, модуль емкостного сопротивления изоляции – 920 МОм, активное сопротивление жилы – 1,6 Ом, сопротивление постоянному току изоляции – 0,15 ТОм. Из приведенных расчетов, можно сделать вывод о том, что влияние погонной индуктивности токоведущей жилы и ее активного сопротивления на режимы контроля будут пренебрежительно малы и для упрощения анализа допустимо использовать упрощенную схему замещения изоляции кабельного изделия, состоящую из емкости и активного сопротивления диэлектрических потерь.

На рисунке 1.2.2 показана упрощенная схема замещения кабельного изделия, используемая при электроискровом контроле, с параллельно включенными активным сопротивлением и электрической емкостью. Сопротивление изоляции $R_{из}$ характеризует все процессы, приводящие к поглощению энергии).

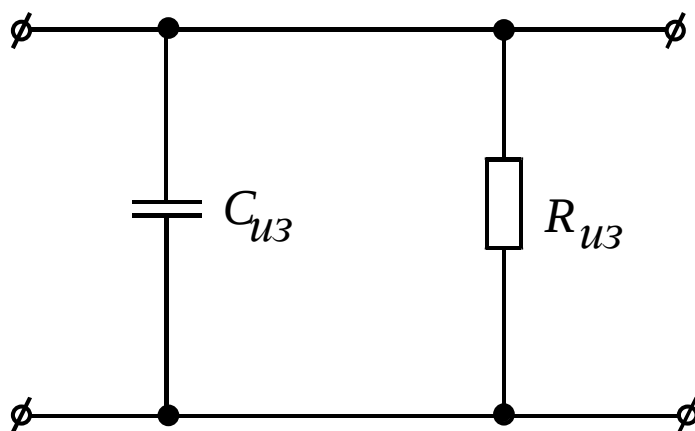


Рисунок 1.2.2 – Упрощенная электрическая схема замещения кабельного изделия

Для концентрического кабеля сопротивление изоляции и емкость выражаются формулами [20,22]:

$$R_{из} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right), \quad (1.2.1)$$

$$C_{из} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot L}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}, \quad (1.2.2)$$

где L – длина кабеля, м;

d, D – диаметры проводящей жилы и изоляции соответственно, мм;

ε_0 – электрическая постоянная, $8,86 \cdot 10^{-12}$, Ф/м;

ρ – удельное сопротивление, Ом/м;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции.

Приведенные зависимости справедливы для условий эксплуатации готового кабельного изделия. Контроль целостности изоляции производится в процессе их изготовления. Состояние элементов конструкции кабельного изделия существенно отличается от состояния в процессе эксплуатации. По этой причине приведенные выше зависимости можно использовать только как очень приблизительные при анализе кабельного изделия как объекта электроискрового контроля. В последующих разделах работы будут приведены методики более точного анализа параметров схемы замещения кабельных изделий при электроискровом контроле.

Основным видом контроля целостности кабельных изделий с изоляцией из полимерных материалов является электроискровой контроль. В кабельной отрасли РФ принято его называть испытаниями напряжением по категории «ЭИ-2» или испытаниями напряжением «на проход» [24,25]. Дефекты обнаруживаются по факту возникновения электрического пробоя. При этом режимы контроля устанавливаются такими, что в изоляции не возникает новых дефектов. Данный метод контроля относится к электроискровым методам неразрушающего контроля [22,30]. Контроль происходит с помощью приборов, которые в кабельной промышленности

принято называть высоковольтными испытателями изоляции или аппаратами сухих испытаний (АСИ) [12,17,18,24,25,35]. По классификации [22] данные приборы следует относить к электроискровым дефектоскопам. Указанными приборами производится контроль целостности изоляции кабельных изделий непосредственно в процессе их производства.

В данном разделе главы 1 дано обоснование электрической схеме замещения изоляции кабельного изделия. Описан метод контроля целостности изоляции высоким напряжением, приведены характеристики электроискровых дефектоскопов.

1.3. Дефекты в изоляции кабельных изделий

Виды дефектов. Существует много видов дефектов изоляции, возникающих в процессе производства КИ. Количество и размер этих дефектов могут зависеть от разных факторов: качества материалов, параметров технологического процесса, условий хранения готовой продукции.

Понятие дефекта. Дефект – это несоответствие продукции установленным требованиям. Т.о. дефект в изоляции кабельного изделия – это любое несоответствие изоляции КИ установленным к ней требованиям.

Требования к изоляции КИ. Изоляция предназначена для создания электрически прочного диэлектрического промежутка между токопроводящими жилами и между жилами и другими заземленными элементами (экранами, металлическими оболочками). Кроме того, очень часто изоляция должна обладать большой геометрической стабильностью размеров, что важно для кабелей связи (особенно радиочастотных). Материал, толщина и форма изоляции определяют максимальное значение рабочего напряжения КИ.

Основные параметры изоляции КИ, контролируемые на выявление несоответствий. Для изоляции КИ используются различные виды

термопластичных диэлектриков. Основными материалами производства являются полимеры, такие как поливинилхлоридные пластикаты (ПВХ), полиэтилен, полипропилен, полиамиды, фторопласты и резиновые смеси.

Электрические свойства изоляции. Удельная объемная проводимость твердых материалов лежит в пределах 10^{-8} - 10^{-16} См/м и зависит от температуры:

$$\gamma_T = \gamma_0 \exp[\alpha \cdot (T - 293)], \quad (1.3.1)$$

где γ_0 - проводимость при 20 °С; γ_T - проводимость при данной температуре; α - температурный коэффициент, колеблется в пределах 0,01-0,04 в зависимости от вида материала.

Рост проводимости наблюдается и при высоких напряженностях поля:

$$\gamma_E = \gamma_0 \exp[\alpha \cdot (E - E_0)], \quad (1.3.2)$$

где γ_0 - проводимость в слабых полях (при $E < E_0$).

Проводимость в твердых диэлектриках, так же как и в жидкостях, определяется в основном перемещением ионов и зависит от вида диэлектрика, примесей, нарушений кристаллической решетки. При высоких напряженностях поля быстрое нарастание тока вызывается электронной проводимостью.

Поверхностная проводимость твердых материалов зависит от состояния поверхности, степени ее увлажнения и загрязнения и колеблется для одного и того же материала в пределах нескольких порядков. При этом токи утечки по поверхности иногда могут значительно превысить объемные токи.

Относительная диэлектрическая проницаемость неполярных ($\varepsilon = 2-4$) и слабополярных ($\varepsilon = 3-6$) твердых диэлектриков в допустимых диапазонах температур меняется в сравнительно нешироких пределах.

Удельные потери p в диэлектрике при переменном напряжении выражаются формулой [10]

$$p = \omega \varepsilon E^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (1.3.3)$$

где ω - угловая частота, с^{-1} ; E - напряженность поля, В/см; δ - угол диэлектрических потерь.

Тангенс угла диэлектрических потерь, а следовательно, и удельные потери p_T с ростом температуры возрастают по экспоненциальному закону[10]:

$$p_T = \omega \varepsilon E^2 (\operatorname{tg} \delta)_{T_0} \exp[\alpha(T - T_0)], \quad (1.3.4)$$

где $(\operatorname{tg} \delta)_{T_0}$ соответствует начальной условной температуре T_0 ; α - температурный коэффициент.

Геометрические параметры изоляции. Изоляция кабельных изделий должна непрерывно контролироваться по толщине и на отсутствие газовых полостей (что приводит в эксплуатации к возникновению частичных разрядов), посторонних включений, неоднородностей.

Производственный процесс. Дефекты. Виды, причины возникновения, методы устранения. В условиях производственного процесса вместо понятия «дефект изоляции» фигурирует в основном понятие «брак изоляции». Такой брак подразделяется на следующие типы рисунки 1.2.3- 1.2.11 [125]:



Рисунок 1.2.3 – Сдир изоляции



Рисунок 1.2.4 – Шероховатость и растрескивание изоляции



Рисунок 1.2.5 – Местные разрывы и шишки по изоляции



Рисунок 1.2.6 – Эксцентричность изоляции



Рисунок 1.2.7 – Недостаточная вулканизация изоляции

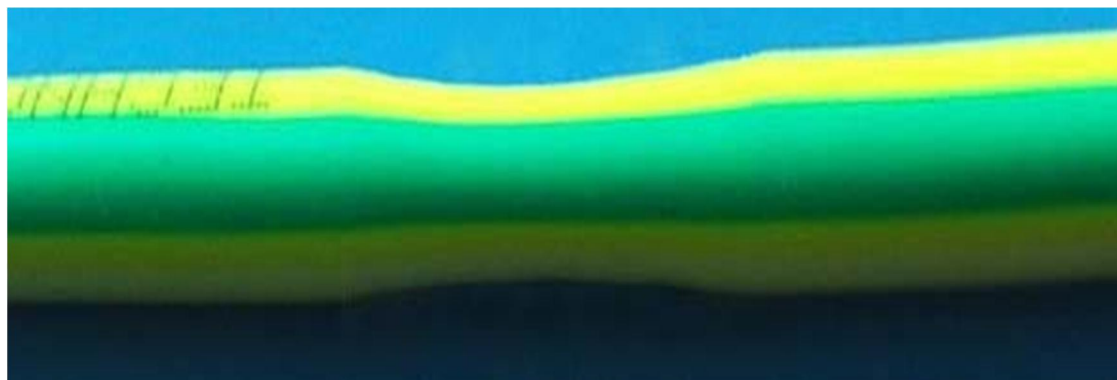


Рисунок 1.2.8 – Занижение диаметра изоляции



Рисунок 1.2.9 – Повышенная пористость изоляция



Рисунок 1.2.10 – Неравномерность наружного диаметра, наплывы



Рисунок 1.2.11 – Включение посторонних частиц, пузырей

1.4 Причины возникновения дефектов. Влияние технологических параметров и режимов на качество изготавливаемых изделий

Причины возникновения дефектов в производственном процессе связаны либо с качеством материала изоляции, либо с неточностями в расчетах режимов изготовления и в выборе оборудования.

Влияние формующего инструмента. На производительность экструзионного агрегата и качество выпускаемой кабельной продукции существенное влияние оказывает формующий инструмент (дорн, матрица), в котором происходит непосредственное формирование расплава полимера в цилиндрический слой изоляции или оболочки. Кроме того, большое значение имеют такие технологические параметры, как геометрические размеры

червяка и цилиндра, частота вращения червяка, температурный режим в цилиндре и головке, скорость прохождения заготовки через головку экструдера.

От взаимного расположения дорна и матрицы (рис. 1.4.1) зависит плотность наложения изоляции на токопроводящую жилу или, как обычно говорят, *степень обжатия*, а также производительность экструдера. Наиболее часто используется расположение формирующего инструмента, представленное на рис. 2.1, а, при котором обеспечивается наиболее плотное наложение изоляции. При расположении, соответствующем рис. 2.1, б, наоборот, происходит свободное выпрессовывание слоя полимера, который накладывается на жилу или сердечник кабеля свободно, без обжатия в виде трубки. Расположение инструмента в соответствии со схемой, показанной на рис. 2.1, в, обеспечивает промежуточный результат, т. е. наложение полимера в этом случае происходит с малым обжатием [3,4].

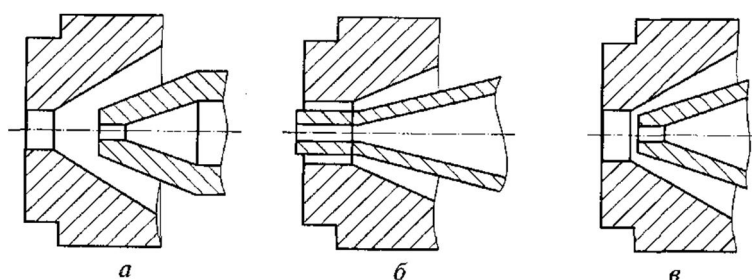


Рисунок. 1.4.1 Схемы взаимного расположения дорна и матрицы: а – плотное наложение изоляции (с обжатием); свободное наложение изоляции (трубкой); в – наложение изоляции с малым обжатием

Высокая степень обжатия применяется обычно при изготовлении кабельных изделий высокого напряжения, для которых недопустимо наличие воздушных включений у поверхности жилы. При наложении изоляции кабелей и проводов, работающих при низком напряжении, когда наличие воздушных включений не опасно, так как мала напряженность электрического поля в изоляции, возможно расположение формирующего

инструмента по схеме, обеспечивающей изолирование с малым обжатием. Свободное наложение слоя полимера обычно применяется в следующих случаях: наложение пластмассовых оболочек на сердечник кабеля; наложение изоляции на жилу некруглой формы (например, секторную) с использованием вакуумирования дорна; наложение изоляции с вытяжкой [3,4].

Свободное наложение оболочек используется для обеспечения целостности их при изгибах кабеля. При намотке (например, на барабан) элементы кабеля, расположенные около центральной продольной оси, находятся в ненагруженном состоянии, в то время как из-за разного радиуса изгиба наружные слои растягиваются, а внутренние - сжимаются. При «жестком» сцеплении оболочки с внутрилежащими элементами кабеля (при наложении оболочки с обжатием) возможны ее деформации и разрывы.

При изолировании жил некруглой формы выходящая свободно без обжатия трубка за счет разрежения во внутреннем отверстии дорна плотно облегает жилу.

Наложение изоляции с вытяжкой происходит в том случае, когда жила движется через головку экструдера быстрее, чем выпрессовывается слой полимера. При этом происходит вытягивание полимера движущейся жилой и уменьшение радиальной толщины изоляции. Для получения нужной толщины изоляции при наложении ее с вытяжкой следует увеличить зазор между дорном и цилиндрической частью матрицы. Степень вытяжки характеризуется коэффициентом вытяжки K_v , который равен отношению площади сечения потока расплава полимера в зазоре между дорном и матрицей к площади сечения слоя, полученного при вытяжке изоляции, где $K_v = S_p/S_{из}$. Чем выше K_v , тем выше линейная скорость изолирования и меньше скорость сдвига в формующей части матрицы [3,4].

Расстояние между концом дорна и началом цилиндрической части матрицы a (рис. 1.4.2) влияет как на степень обжатия, так и на

производительность экструдера. При увеличении расстояния a увеличивается конусный кольцевой зазор между дорном и матрицей, а следовательно, пропускная способность головки K_2 . Слишком большое расстояние между дорном и матрицей может привести к обрыву токопроводящей жилы и нарушению ее центровки жилы в цилиндрической части матрицы. Обычно расстояние a при плотном наложении изоляции принимается не менее удвоенной радиальной толщины накладываемого слоя изоляции [3,4].

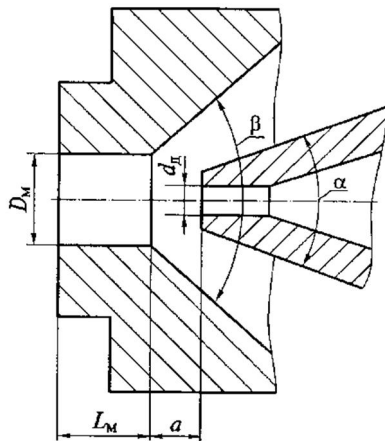


Рисунок 1.4.2. Схема расположения дорна и матрицы

Угол между образующими конусных поверхностей дорна и матрицы $(\beta - \alpha)/2$ влияет на производительность, так как определяет пропускную способность данного участка головки экструдера K_2 . С увеличением этого угла производительность увеличивается, однако с точки зрения лучшего прогрева слоя полимера за счет нагретых поверхностей дорна и матрицы этот угол целесообразно выбирать небольшим ($0... 10^\circ$).

Диаметр цилиндрической части матрицы D_M определяет наружный диаметр $D_{из}$ выпрессованного слоя полимера, поэтому (если только прессование не ведется с вытяжкой) $D_M \approx D_{из}$. Однако следует учитывать, что ряд полимеров после выхода из головки экструдера и последующего охлаждения меняет свои размеры. Так как полиэтиленовая изоляция из-за сравнительно большого температурного коэффициента расширения в

процессе охлаждения имеет заметную усадку, то D_M для нее принимают примерно на 10 % больше, чем требуемый диаметр $D_{из}$. В то же время изоляция из пористого полиэтилена или невулканизированной резиновой смеси после выхода из головки экструдера несколько увеличивает свои размеры, что связано с наличием пузырьков газа под давлением и высокоэластических деформаций, поэтому D_M для этих материалов выбирают несколько меньшим, чем требуемый диаметр $D_{из}$.

При экструдировании поливинилхлоридного пластика D_M принимают равным диаметру изготавливаемого изделия.

Длина цилиндрической части матрицы L_M оказывает весьма существенное влияние как на производительность экструдера, так и на качество накладываемого полимерного покрытия. На этом участке происходит формирование слоя изоляции, поэтому увеличение его длины способствует более стабильному течению потока расплава в этой зоне, а следовательно, и получению более качественной и однородной изоляции. Однако с увеличением L_M пропорционально увеличивается сопротивление, оказываемое поток расплава этим участком, т. е. уменьшается пропускная способность K_3 , а именно эта величина оказывает решающее влияние на общую пропускную способность головки $K_Г$ и в конечном счете на производительность экструдера.

Внутренний выходной диаметр дорна d_d приблизительно равен диаметру токопроводящей жилы (больше на 0,05...0,5 мм для обеспечения свободного прохождения жилы). При заметном увеличении зазора между жилой и внутренней поверхностью выходного отверстия дорна жила может оборваться из-за проникновения в тот зазор полимера, находящегося под избыточным давлением.

Кроме формующего инструмента на производительность технологических линий и качество изготавливаемых на экструдерах кабельных изделий существенное влияние оказывают размеры и форма

червяка и температурные режимы в зонах цилиндра, головки и охлаждающих устройствах.

Влияние размеров червяка и температур в экструдере на параметры изоляции [3,4]. Форма и размеры червяка зависят от типа экструдера и вида перерабатываемого полимера. Основным параметром червяка является диаметр D . Остальные размеры обычно выражаются относительно диаметра. Для таких широко применяемых полимеров, как полиэтилен и поливинилхлоридные пластикаты, применяют червяки с большой длиной L , достигающей $(20...25) D$ и выше, и относительно небольшой глубиной нарезки.

Глубину нарезки в дозирующей зоне h_d для пластмасс обычно выбирают в пределах $(0,05...0,15) D$, а степень сжатия (компрессия), равная отношению глубины нарезки в зоне загрузки h_z и зоне дозирования h_d , в зависимости от вида перерабатываемого материала составляет $2,0...4,5$. Чем меньше h_d , тем более равномерно расплав прогревается, а следовательно, обеспечиваются более стабильные вязкость в канале червяка и соответственно однородность изоляции.

Чем больше длина зоны дозирования L_d , тем выше стабильность работы экструдера, так как при этом больше выравнивается температура, а значит, и вязкость расплава в этой зоне. Длина переходной зоны или зоны сжатия обычно бывает небольшой $(0,5...1)D$.

Шаг нарезки t для большинства червяков, используемых для переработки пластмасс, постоянен по всей длине червяка и обычно равен диаметру червяка по нарезке D .

Угол нарезки φ червяка определяют при известных шаге t и диаметре D из соотношения $\operatorname{tg} \varphi = t/(\pi D)$.

Ширина гребня нарезки e червяка обычно составляет $(0,1... 0,15) D$.

Зазор δ между гребнем нарезки и стенкой цилиндра должен быть как можно меньше и составлять $(0,001 \dots 0,002) D$ В процессе работы допускается некоторое увеличение зазора δ до $0,004 D$.

Температура в зонах цилиндра, головки экструдера и охлаждающем устройстве оказывает большое влияние на качество изоляции и производительность экструдера.

В зоне загрузки, как отмечалось ранее, температуры стенки цилиндра $t_{\text{ц}}$ поверхности червяка $t_{\text{ч}}$ выбирают такими, чтобы обеспечивался наибольший коэффициент трения между полимером и стенкой цилиндра и наименьший - между полимером и поверхностью червяка.

В дозирующей зоне важно иметь равномерный нагрев по всему объему нарезки червяка, что обеспечивает однородность расплава и соответственно однородность свойств по толщине слоя изоляции, т.е. ее высокое качество.

Типовые температурные режимы наложения покрытий из полимерных материалов

Типовые температурные режимы наложения покрытий из полимерных материалов в отечественной практике унифицированы, хотя это не означает, что производство кабелей и проводов не может осуществляться с отклонениями от регламентируемых температур расплава и линейных скоростей, тем более с учетом появления на кабельных заводах новых современных экструзионных линий. Примерные температурные режимы экструдера при наложении покрытий из полиэтилена низкой и высокой плотности и ПВХ пластикатов приведены в табл. 2.1.

При наложении покрытий из полиэтилена необходимо поддерживать высокую стабильность температуры. Современные системы регулирования температуры обеспечивают точность в пределах ± 1 °C. Следует учитывать, что стабильность температуры расплава, как и его давления, зависит не только от температуры цилиндра, но и от профиля распределения температуры по зонам экструдера, конструкции червяка, его охлаждения и

т.д. В современных экструдерах колебания температуры и давления минимальны.

При наложении покрытий из полиэтилена и поливинилхлоридного пластика важным фактором температурного режима является подогрев токопроводящей жилы или заготовки кабеля перед входом в головку экструдера до температуры 90... 150 °С.

При переработке ПВХ пластика температура в экструдере несколько ниже, чем при переработке полиэтилена (см. табл. 1.4.1) [3,4].

Таблица 1.4.1. Температурные режимы переработки кабельных полиэтиленовых композиций и ПВХ пластикаторов

Тип полиэтилена	Температура нагрева, °С				
	Зоны цилиндра			Головка экструдера	Матрица
	I	II	III		
Полиэтилен низкой плотности:					
при радиальной толщи- не покрытия < 0,8 мм	130... 150	160... 180	180...210	200...230	220... 240
при радиальной толщи- не покрытия > 0,8 мм	160... 180	160... 180	170... 190	180...200	90...200
Полиэтилен высокой плотности	200... 220	230... 250	240... 260	250... 270	260...280
ПВХ пластикат	135	145... 150	150... 165	165	175

Перед пуском в переработку ПВХ пластикат рекомендуется не только выдерживать в производственном помещении до 12 ч, но и подвергать сушке в отдельных печах или загрузочном бункере экструдера. Это особенно важно, когда пластикат с завода-изготовителя транспортируется на большие расстояния и при этом увлажняется. При переработке вулканизирующегося (сшиваемого) полиэтилена температура расплава должна быть ниже, чем при переработке стандартных полиэтиленовых композиций во избежание преждевременной (хотя бы и частичной) вулканизации материала в экструдере, поэтому обычно температура в цилиндре экструдера составляет 100... 120°C, а в головке - 120... 130°C.

При переработке вспенивающегося полиэтилена температура по зонам цилиндра экструдера также должна быть несколько ниже, чем при переработке обычных полиэтиленовых композиций. Особенно это важно для химического метода вспенивания. Так как для вспенивания применяются порообразующие вещества (порофоры), температура разложения которых 120... 140°C, во избежание преждевременного порообразования необходимо по зонам цилиндра поддерживать температуру в пределах 110... 140 °C, при этом в матрице, когда выделяющийся азот образует ячеистую структуру с мелкими замкнутыми порами, она уже может достигать 200 °C. Точность поддержания температуры должна быть также достаточно высокой, т.е. в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$. Особенно важен предварительный подогрев токопроводящей жилы при наложении вспенивающейся изоляции. Если жила не подогрета до нужной температуры, то вокруг нее может образоваться невспененный монолитный слой; и наоборот, если жила имеет слишком высокую температуру, то могут образоваться крупные ячейки, и кабельное изделие не будет отвечать заданным техническим требованиям.

Температурные режимы переработки термопластичных фторполимеров (табл. 1.4.2) имеют свои особенности [3,4,8]. При переработке и их материалов практически всегда необходимо применять

предварительный подогрев токопроводящей жилы до температуры 150... 180 °С.

Таблица 1.4.2 Температурные режимы переработки термопластичных фторполимеров

Тип фторполимера	Температура нагрева, °С				
	Зоны цилиндра			Головка экструдера	Матрица
	I	II	III		
Фторированный этиленпропилен Ф-4МБ	260...310	280...320	320...340	340...380	330...370
Сополимер этилена и тетрафторэтилена Ф-40Ш	260...280	280...310	330...340	340...350	310...330
Поливинилиденфторид Ф-2М	180...210	220... 240	250... 270	270...290	260...270

Температурные режимы экструдера при переработке термопластичных фторопластов должны быть исключительно стабильны, ввиду возможного разложения материала при температурах переработки, превышающих допустимые. Даже местное охлаждение расплава приводит к резкому увеличению его вязкости и торможению потока, что может привести к разложению фторполимера или образованию в покрытии участков с повышенными внутренними напряжениями, увеличивающими склонность покрытия к растрескиванию.

Наложение покрытий из резиновых смесей представляет собой более простой процесс по сравнению с переработкой пластмасс, так как резиновая смесь не переходит в состояние расплава. Однако при перемещении резиновой смеси в цилиндре экструдера необходимо принять меры для исключения задержки потока смеси и ее местных перегревов. В противном

случае может начаться преждевременная вулканизация, исключающая получение качественной продукции. Температура при экструдировании резиновых смесей в зоне I цилиндра - 30...60 °С, в зоне II (часто для переработки резины используют только две зоны нагрева цилиндра) - 30...80 °С, а температура в головке экструдера - 55...90°С. Естественно, что конкретная температура нагрева определяется типом применяемой резиновой смеси.

Влияние режимов охлаждения кабельного изделия после экструдирования на качество изоляции [3,4,8]. Условия охлаждения после экструдирования являются одним из основных факторов, определяющих как качество наложенного полимерного покрытия, так и линейную скорость изолирования или ошлангования. Полимерное покрытие после экструдирования необходимо охладить до температуры, при которой оно не будет деформироваться или повреждаться на приемном барабане. Эти температуры достаточно высоки: для полиэтилена низкой плотности - 60...80°С, для ПВХ пластиката - 110...90°С, для фторопластов - 110...200°С и т.д. Однако в реальных условиях экструдированное покрытие охлаждают до температур 40...50°С, что отвечает требованиям техники безопасности.

При резком охлаждении полимерных покрытий могут происходить изменения структуры и некоторых физических свойств материала. Так как в этом случае релаксационные процессы не успевают завершиться и образуется неравновесная структура материала, и которой преобладает аморфная фаза. Плотность такой структуры ниже, чем у неравновесной, возникающей при медленном охлаждении кабельного изделия. В процессе эксплуатации (особенно при повышенных температурах) структура будет стремиться прийти в равновесное состояние, что приведет к перераспределению напряжений и ее усадке, которые могут вызвать появление трещин при тепловом старении и снижение морозостойкости.

Причем трещины как раз и появляются в местах концентрации механических напряжений.

Следствием быстрого охлаждения является также образование внутренних пустот в покрытии. Особенно это касается переработки полиэтилена, объем расплава которого при температуре 200 °С примерно на 25% выше, чем при 20 °С, причем резкое изменение объема происходит вблизи его температуры плавления. В охлаждающей ванне понижение температуры начинается с поверхности изделия. Поверхностный слой, охлаждаясь, стремится сократить свой объем, а внутренние, еще не остывшие слои препятствуют этому сокращению. При этом поверхностный слой затвердевает под воздействием радиального давления и находится в растянутом состоянии с замороженными внутренними напряжениями. При последующем охлаждении внутренних слоев их объем сокращается, но это происходит в условиях, когда наружные слои уже затвердели. Сокращение объема может проходить не равномерно, а по наиболее механически слабым местам, т.е. там, где покрытие охлаждается в последнюю очередь, поэтому внутри покрытия могут образоваться пузыри и пустоты, в основном у жилы. Чем ближе температура охлаждающей среды к температуре плавления полимерного материала, тем меньше вероятность образования пустот в покрытии. Поэтому теоретически идеально охлаждение покрытия при температуре охлаждающей среды, равной температуре плавления материала покрытия (что, однако, практически невозможно).

Известно, что пустоты в полиэтиленовом покрытии не образуются, если охлаждение начинать с температуры порядка 80...90 °С. В то же время при повышении температуры охлаждающей среды линейная скорость изолирования может снизиться на 10...15%. Следовательно, охлаждение покрытий из полиэтилена следует производить ступенчато. Чаще всего используют трехсекционные ванны. Температура воды в первой секции должна составлять 80... 90 °С, во второй - 50...70 °С, а в третьей секции

используется холодная водопроводная вода. Перепад температур в покрытии малой толщины (менее 0,7 мм) невелик, поэтому такое покрытие можно охлаждать холодной водопроводной водой.

Поливинилхлоридный пластикат имеет небольшой температурный коэффициент объемного расширения. Кроме того, плотность его вблизи температуры плавления резко не изменяется, и, следовательно, склонность к образованию пустот у него значительно ниже. По этой причине допускается охлаждение покрытий из ПВХ пластиката в водопроводной воде.

Холодную воду используют также для охлаждения резиновых покрытий.

Неравномерность охлаждения возрастает с увеличением не только толщины покрытия, но и его температуры при выходе из экструдера. Более того, у ряда термопластичных фторопластов при резком охлаждении расплава образуется структура с меньшей степенью кристалличности, поэтому покрытия из этих фторопластов толщиной, превышающей 0,5... 0,8 мм, сначала до входа в ванну с охлаждающей водой охлаждают в воздушной среде либо воду вообще не применяют.

Способы устранения брака. Во время изготовления КИ существуют определенные способы устранения причин, вызывающих возникновение дефектной изоляции. В таблице 1.4.3 определены меры по устранению дефектов для резиновой изоляции, в таблице 3.2 – для изоляции из пластиката [3,4.8].

Таблица 1.4.3. Меры по устранению дефектов для резиновой изоляции

Виды дефектов	Причины дефектов	Меры по устранению дефектов
1. Разрывы оболочки (изоляция)	Холодный инструмент	Прогревание дорна и матрицы
2. Сдир оболочки	Попадание в	Прочистка матрицы

(изоляция)	матрицу посторонних предметов или наличие пленки завулканизированной резины	
3. Шероховатость и растрескивание оболочки (изоляции)	Недостаточная подача резины Низкая температура головки Низкая пластичность резины Питание пресса холодной резиной Завышенный диаметр матрицы	Увеличение подачи резины Увеличение температуры головки пресса Смена резины Смена резины Смена матрицы
4. Местные разрывы и шишки по оболочке (изоляции)	Подгорание резины в прессе Неравномерная подача жилы с отдающего барабана	Чистка пресса и смена резины Исправление тормоза на отдающем барабане
5. Эксцентричность резиновой оболочки (изоляции)	Завышенный диаметр дорна Некачественный инструмент Попадание постороннего предмета между дорном и	Замена дорна Замена инструмента Остановка агрегата и чистка пресса

	матрицей	
6. Недовулканизация оболочки (изоляции)	Низкое давление в вулканизационной трубе или большая скорость тяги Наличие конденсата в трубе Резина плохого качества или недостаточный промесс вулканизирующей группы	Увеличение давления или уменьшение скорости тяги Продувка вулканизационной трубы Смена резины
7. Обрывы заготовки кабеля	Рассогласована работа тянуще-задающего и тянуще-натяжного устройств	Согласование работы тянуще-задающего и тянуще-натяжного устройств
8. Занижен диаметр по оболочке (изоляции)	Установлена матрица малого диаметра Малое опережение шнека	Смена матрицы Увеличение опережения червяка
9. Завышен диаметр по оболочке (изоляции)	Установлена матрица большого диаметра Большое опережение шнека	Замена матрицы Уменьшение скорости вращения шнека
10. Слипание кабеля на приемном барабане	Недовулканизация Плохое охлаждение	Увеличение подачи охлаждающей воды и уменьшение скорости

11.Промины резиновой оболочки (изоляции)	Недовулканизация резиновой оболочки Недостаточное охлаждение Некачественная раскладка жилы на приемном барабане	Увеличение подачи воды в охлаждающую трубу или замена резиновых прокладки в промежуточном затворе труб Улучшение качества раскладки на приемном барабане
--	---	---

Таблица 1.4.3. Меры по устранению дефектов для изоляции из пластика

Виды дефектов	Причины дефектов	Меры по устранению дефектов
1. Пористая оболочка (изоляция)	Подгорание пластиката	Чистка пресса, снижение температуры нагрева
2. Пузыри на поверхности оболочки (изоляции)	Влажный ПВХ пластикат	Включение агрегата для сушки пластиката
3. Шероховатость и растрескивание оболочки (изоляции)	Завышена скорость Низкая температура массы ПВХ пластиката	Снижение скорости тяги и червяка Проверка температуры на возможность отключения
4. Нарушение центровки оболочки	Больший диаметр дорна Большое давление	Замена дорна Снижение оборотов

(изоляция)	массы	червяка; Уменьшение зазора между дорном и матрицей Смена центровочных болтов
5. Неравномерность наружного диаметра, наплывы по поверхности	Неравномерная тяга Большое давление массы (велика подача массы)	Регулировка работы тягового устройства Снижение оборотов червяка; Уменьшение зазора между дорном и матрицей
6. Включение посторонних частиц, разрез оболочки	Засорение пластиката	Чистка пресса, снижение температуры нагрева

Технологический процесс ремонта изоляции и оболочек кабельных изделий [3,4]. Большинство кабельных изделий при возникновении дефектов в изоляции или оболочке подвергаются ремонту в соответствии с нормативными документами (техническими условиями или ГОСТами на эти КИ). Вследствие того, что обычные полуфабрикаты типа изолированная жила, входящие в состав более сложных кабелей, в случае обнаружения брака проще отремонтировать, вырезав дефектный участок, действия, описанные ниже, применяются в основном для ремонта оболочек кабелей.

Ремонту подвергаются участки оболочек кабеля, имеющие: утонение, единичные мелкие инородные включения, утолщения (шишки) по оболочке,

отверстия в оболочке, размером не более 10x10 мм (в том числе трещины и разрывы по оболочке).

Такие дефекты, как утонение изоляции, устраняются с помощью наложения заготовки в виде ленты, вырезанной из оболочки готового кабеля той же марки пластиката, и приваривания этой заготовки с помощью сварочного пистолета. После всей операции участок выравнивается специальным ножом и шлифовальной шкуркой. Максимальный диаметр кабеля в месте ремонта не должен превышать фактический диаметр кабеля более чем на 15%.

Места в изоляции с инородными включениями и отверстиями удаляются ножом, зачищаются и ремонтируются в помощью сварочного пистолета методом, описанным выше. Шишки и наплывы по изоляции срезаются ножом и зачищаются.

Контроль качества починки осуществляется путем изгиба кабеля вокруг цилиндра, диаметр которого равен $10 D_n$ (D_n – максимальный наружный диаметр). Количество починки в строительной длине не должно превышать 5, иначе она отбраковывается полностью.

1.5 Электроискровой контроль целостности изоляции кабельных изделий

Кабельные изделия должны соответствовать большому числу требований по характеристикам изоляции и их временной стабильности: сопротивлению токопроводящих жил, механической прочности, герметичности металлических оболочек, коррозионной стойкости и т. д. Широкий набор требований приводит к большому числу видов контроля и испытаний кабельных изделий. В том числе химические и механические испытания, измерения емкости, тангенса угла диэлектрических потерь, определение сопротивления токопроводящих жил, сопротивления изоляции, электрической прочности [6,17,18,21].

Основными показателями, характеризующими свойства изоляционных материалов, являются: удельное объемное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность [9,21].

Основными требованиями, предъявляемыми к качеству изготавливаемой изоляции, являются, прежде всего, отсутствие посторонних включений, пор, засоров, трещин и других неоднородностей, вызывающих преждевременный отказ кабельного изделия в процессе эксплуатации. Основными причинами возникновения перечисленных выше дефектов являются невысокое качество исходного сырья и нарушение технологии производства. Поэтому после наложения изоляции в обязательном порядке производится проверка ее целостности. В случае обнаружения дефектов в зависимости от требований к кабельному изделию дефекты либо устраняются, либо кабельное изделие разрезается на меньшие бездефектные длины, либо в крайнем случае изделие полностью бракуется. Для кабельных изделий, предназначенных для ответственных применений, наличие даже небольшого числа дефектов может являться признаком некачественного изделия, в результате чего изделие бракуется целиком. Электроискровой контроль целостности изоляции кабельных изделий является основным видом контроля и регламентируется стандартами и техническими условиями на кабельные изделия. Данный метод контроля относится к неразрушающим методам контроля [13,22].

Электрическая прочность – важнейшая характеристика изоляции, оболочек или защитных покровов кабельных изделий. Для определения электрической прочности кабельные изделия испытывают высоким напряжением.

Плотность тока через диэлектрик при рабочих приложении рабочих напряжений мала. При повышенных напряжениях ток существенно увеличивается, т.е. между электродами образуется проводящий канал. В

результате изоляционные свойства материала ухудшаются, а затем наступает пробой. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называют напряжением пробоя U_{np} [2,3,102-105].

Наиболее важными факторами, определяющими величину пробивного напряжения диэлектриков, являются: форма напряжения, частота его повторения, длительность приложения, климатические условия, тип материала и его размеры.

За меру электрической прочности в однородном поле принимают пробивную напряженность - величину напряженности, при которой произошел пробой, E_{np} [2,3,102-105]:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d}, \quad (1.5.1)$$

где d - толщина образца, см или мм;

U_{np} - пробивное напряжение, кВ.

Для определения электрической прочности применяют переменное, постоянное и импульсное напряжение.

При определении электрической прочности пользуются постоянным, переменным и импульсным напряжением.

Наиболее распространены два метода контроля целостности изоляции напряжением, а именно: длительное приложение испытательного напряжения к изоляции одновременно вдоль всей длины контролируемого изделия (категория ЭИ-1), и кратковременное - к небольшому участку (по длине) контролируемого изделия (категория ЭИ-2) [24,25]. Исходя из условий приложения испытательного напряжения, первый метод контроля производится одновременно по всей длине кабельного изделия, намотанного на бухту или барабан, а второй – «на проход» - в процессе движения, на участке контролируемого изделия, находящемся в электроде дефектоскопа. Последний метод контроля является динамическим.

Основным методом контроля целостности изоляции кабельных

изделий в процессе их производства, скрутки и перемотки является контроль повышенным напряжением согласно ГОСТ 2990-78, ГОСТ Р 54813-2011 и МЭК 62230-2006.

Величина испытательного напряжения в каждом случае устанавливается в соответствии с требованиями стандартов или технических условий на кабельное изделие. В зависимости от толщины и материала изоляции, а некоторых случаях частоты и формы испытательного напряжения его амплитуда составляет (1..50) кВ [24,25].

Основные требования к электроискровым дефектоскопам (испытательному оборудованию) при контроле целостности изоляции кабельных изделий, к методике контроля, а также к технике безопасности регламентированы ГОСТ 2990-78, ГОСТ Р 54813-2011 и МЭК 62230-2006.

Электроискровой контроль должен осуществляться с помощью устройства, состоящего из регулируемого источника высокого напряжения, измерительных устройств, световой сигнализации указывающей наличие высокого напряжения и пробой контролируемой изоляции, защитную блокировку, обеспечивающую безопасность обслуживающего персонала [23,35,107]. На рисунке 1.5.1 показана функциональная схема установки для

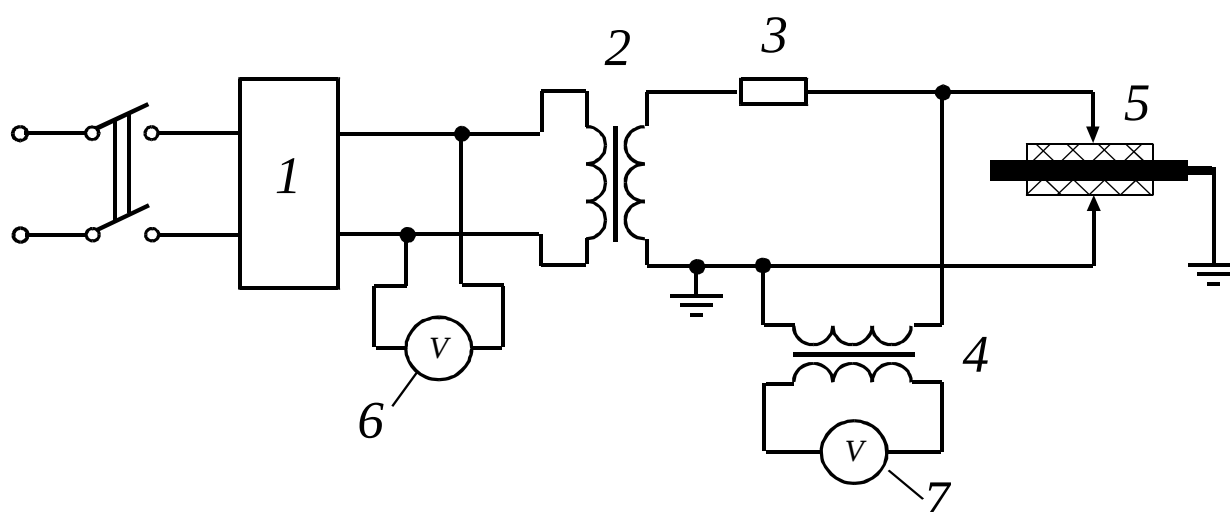


Рисунок 1.5.1 – Функциональная схема установки для контроля изоляции кабельного изделия высоким напряжением

контроля изоляции кабельного изделия высоким напряжением.

Высокое переменное напряжение получают с помощью повышающих трансформаторов, мощность которых выбирается, исходя из электрической емкости и мощности потерь объекта контроля [23,35,106,111,117]. В большинстве случаев емкостной ток через изоляцию значительно превышает активный и в этих случаях для расчет габаритной мощности трансформатора используется реактивная коммутируемая мощность.

Требуемая мощность трансформатора выражается формулой

$$P = U^2 \omega C, \quad (1.5.2)$$

где U - номинальное напряжение трансформатора, В;

C - емкость контролируемого образца, Ф;

ω - круговая частота, рад/с.

1.6 Нормативная база электроискрового технологического контроля кабельных изделий

Электроискровой контроль целостности изоляции кабельных изделий в процессе их изготовления регламентируется целым рядом национальных и международных стандартов. Основоположником в данной области является Великобритания с национальным стандартом BS 5099. До 2002 года стандарт регламентировал требования к методике и средствам электроискрового контроля целостности изоляции кабельных изделий. На указанный стандарт до сих пор ссылаются большинство мировых производителей электроискровых дефектоскопов для кабельной отрасли. С 2004 г. стандарт был разделен на два стандарта, один из которых регламентирует уровни испытательных напряжений, другой требования к методам и средствам контроля:

- BS 5099:2004. Electric cables - Voltage levels for spark testing [27].
- BS EN 50356:2002. Method for spark testing of cables [26].

В США основными стандартами являются:

- ANSI/SCTE 63 2009. Test Method for Voltage Withstand of Outer Jacket. (Society of Cable Telecommunications Engineers. American National Standard) [138].
- UL1581-2000. Reference Standard for Electrical Wires, Cables, and Flexible Cords [31].
- NEMA Standards Publication WC 56-1986 (R2005). 3.0 kHz Insulation Continuity Proof Testing of Wire and Cable. (National Electrical Manufacturers Association) [33].
- NEMA Standards Publication WC 52-2005. High-Temperature and Electronic Insulated Wire, Impulse Dielectric Testing [33].
- ANSI/ICEA T-27-581, NEMA WC 53. Standard Test Methods for Extruder Dielectric Power, Control, Instrumentation, and Portable Cables for Test [75].

В Российской Федерации контроль регламентируется стандартами:

- ГОСТ 23286-78. КАБЕЛИ, ПРОВОДА И ШНУРЫ. Нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний напряжением.
- ГОСТ 2990-78. КАБЕЛИ, ПРОВОДА И ШНУРЫ. Методы испытания напряжением.
- ГОСТ Р 54813-2011 «Кабели, провода и шнуры электрические. Электроискровой метод контроля».

Стандарт МЭК:

- CEI/IEC 62230- 2006. Electric cables – Spark-test method.

Приведенный выше перечень является далеко не полным. Существовали национальные стандарты европейских стран, включая DIN (Германия). Однако в международной практике они широко не использовались.

В Российской Федерации по сложившейся традиции контроль целостности изоляции кабельных изделий непосредственно в процессе производства принято называть испытаниями напряжением по категории «ЭИ-2», в соответствии с терминологией стандарта ГОСТ 23286-78. Отличительными

особенностями контроля является кратковременное (менее 1 с) приложение высокого испытательного напряжения к короткому участку (менее 1 м) изоляции кабельного изделия. Данный способ контроля является динамическим. Существуют испытания изоляции по категории «ЭИ-1». Отличительными особенностями указанных испытаний является длительное (5 минут и более) приложение высокого испытательного напряжения ко всему кабельному изделию (барабан, более 1000 м). При этом нормы испытательных напряжений существенно отличаются. Амплитуда испытательного напряжения по категории «ЭИ-2» может кратно превышать амплитуду испытательного напряжения по категории «ЭИ-1». Испытания по категории «ЭИ-1» производятся напряжением частотой не более 50 Гц, в том числе «ультранизкой» частоты (менее 1 Гц) и постоянным напряжением. Испытания по категории «ЭИ-2» может производиться напряжением частотой от 50 Гц до 5 кГц, а также постоянным напряжением.

Нормы испытательных напряжений $U_{исп}$ в зависимости от номинальной толщины оболочки или защитного шланга α , мм, при испытаниях оболочек или защитных шлангов кабельных изделий по категории «ЭИ-1» вычисляют по формуле с округлением до 500 В в сторону максимума [25]:

$$U_{исп} = U_{прив} \alpha + 2000$$

где: $U_{прив}=1\text{кВ/мм}$.

Пиковое значение испытательного напряжения в зависимости от толщины и вида изоляции для кабельных изделий с резиновой и пластмассовой изоляцией по категории «ЭИ-2» должно соответствовать указанному в приведенной ниже таблице [25].

Таблица 1.6.1. Нормы испытательных напряжений при контроле по категории «ЭИ-2»

Номинальная толщина изоляции, мм	Пиковое значение испытательного напряжения, кВ	
	Резиновая изоляция	Пластмассовая изоляция
0,20		4
0,25		5
0,35	-	7
0,55		11
0,60	6	12
0,70	7	14
0,80	8	16
1,20	12	20
1,30	13	21
1,40	14	22
1,50	15	23
1,90	19	27
2,20	22	30
2,30	23	31
2,60	26	34
2,70	27	35
3,00	30	38
3,10	31	39
3,20	32	
3,50	35	40
3,60	36	
4,00	40	

Испытания по категории «ЭИ-2» стали повсеместно вводиться на предприятиях кабельной отрасли с 50-х годов 20 века. Задача, которая ставилась перед данными испытаниями - это, прежде всего не создать новых дефектов и выявить все дефекты, которые могут быть обнаружены в процессе испытаний по категории «ЭИ-1».

Основные отличия требований ГОСТ 2290-78 и МЭК 62230-2006 можно свести к следующему:

- В ГОСТ 2990-78 не регламентирован контроль высоким постоянным напряжением;
- В МЭК 62230-2006 контроль импульсным напряжением допускается

только в диапазоне частот (170-400) Гц, в ГОСТ 2990-78 в диапазоне частот 50Гц- 1МГц;

- В соответствии с требованиями ГОСТ 2990-78 длительность приложения испытательного напряжения должна быть не менее 3 периодов испытательного напряжения, а в соответствии с требованиями МЭК 62230-2006 не менее 2,5 периодов;
- В ГОСТ 2990-78 и ГОСТ 23286-78 испытательное напряжение регламентируется в амплитудных/пиковых значениях в МЭК 62230-2006 в действующих значениях (за исключением импульсных напряжений);
- В МЭК 62230-2006 присутствуют требования к максимальному току короткого замыкания дефектоскопа, для обеспечения электробезопасности;
- В МЭК 62230-2006 приводятся требования к порогу срабатывания детектора дефектов электроискрового дефектоскопа, а так же приведена конструкция имитатора дефектов. В ГОСТ 2990-78 подобной информации нет.

Также в стандартах присутствует большое количество менее существенных отличий.

1.7. Приборы для контроля целостности изоляции кабельных изделий высоким напряжением по категории «ЭИ-2»

Контроль целостности изоляции кабельных изделий по категории «ЭИ-2» осуществляется приборами, которые в кабельной отрасли принято называть аппаратами сухих испытаний (АСИ) [108,110], высоковольтными испытателями [107,112-121], или приборами электроискрового контроля, как принято классифицировать данные приборы в мировой практике контроля (Рисунок 1.7.1).



Рисунок 1.7.1 – Высокочастотный электроискровой дефектоскоп

В настоящее время на кабельных заводах России используются электроискровые дефектоскопы как отечественных, так и зарубежных производителей, таких как Beta (Великобритания), Clintoninstrument (США), Proton (Китай), Zumbach (Швейцария), Sikora (Германия) и других [153-156]. В СССР централизованно разработкой и производством высоковольтных испытателей занимался «НПО Электросигнал», г. Ташкент [35,114,115]. В этом институте были разработаны проекты стандартов регламентирующих контроль целостности изоляции. Изготовленные данным предприятием приборы контроля эксплуатируются до сих пор на некоторых предприятиях отрасли. Электроискровые дефектоскопы изготавливались в небольших количествах, в основном для собственных нужд и на крупных кабельных предприятиях. В настоящее время в РФ, производит приборы контроля кабельных изделий предприятие «НПО Редвилл», г. Томск [142-144, 157].



Рисунок 1.7.2 – Электродные узлы для электроискрового контроля кабельных изделий

В электроискровом дефектоскопе кабельное изделие пропускается через электрод (Рисунок 1.7.2), к которому подключается высокое испытательное напряжение. Напряжение прикладывается к поверхности контролируемой изоляции, а жила кабельного изделия при этом заземляется. Серия дефектов или один длительный дефект свидетельствует о неправильном режиме технологического процесса и о возникновении массового брака. В случае обнаружения дефектов кабельное изделие отправляется на участок контрольной перемотки, где с помощью другого электроискрового дефектоскопа определяется точное положение дефектных мест [35].

Контроль с помощью электроискровых дефектоскопов осуществляется на различных технологических этапах: изолирование жил, контрольная перемотка, скрутка, наложение защитной оболочки или покрова [140,141].

В связи с этим контроль предназначается для решения одной или нескольких задач: недопущение массового брака, отбраковку бухт или барабанов с дефектной изоляцией, определение точного местоположения дефектов в процессе скрутки или контрольной перемотки.

В соответствии с действующими стандартами скорость движения кабельного изделия через дефектоскоп и длина электрода должны быть выбраны таковыми, чтобы каждый участок поверхности изоляции подвергалась воздействию испытательного напряжения не менее 2,5 периодов [26,27].

Выбор параметров испытательного напряжения. В процессе контроля целостности изоляции кабельных изделий используется постоянное, импульсное, синусоидальное напряжение промышленной частоты и синусоидальное напряжение повышенной частоты (500-5000) Гц. В связи с этим этой электроискровые дефектоскопы классифицируют по типам: АСИП, ИАСИ, ЗАСИ (таблица 1.7.1) [35,107].

Таблица 1.7.1 - Параметры электроискровых дефектоскопов, в зависимости от типа

Тип аппарата	Напряжение, кВ	Частота испытательного напряжения, кГц	Емкость нагрузки, пФ	Активное сопротивление нагрузки, МОм	Потребл. мощность, Вт
АСИП	1 ÷ 50	0,05	500	5	50÷300
ЗАСИ	1 ÷ 40	0,5 ÷ 5	300	10	100÷400
ИАСИ	6 ÷ 50	0,05 ÷ 0,5	300	3	50÷200

Электроискровые дефектоскопы с напряжением промышленной частоты (АСИП) используются на технологических линиях со средними рабочими скоростями, не более 500 м/мин. Достоинства дефектоскопов этого типа: низкие токи через контролируемую изоляцию как емкостные, так и активные, а значит малая мощность по сравнению с высокочастотными дефектоскопами при прочих равных условиях. Это дает возможность изготавливать дефектоскопы с высокой амплитудой испытательного напряжения, вплоть до 50 кВ. Важным достоинством контроля напряжением промышленной частоты является тот факт, что испытательное напряжение совпадает с рабочим для силовых кабелей как по форме так и по частоте [35]. Основными недостатками дефектоскопов типа АСИП являются их большие масса и габариты, а также высокая опасность для обслуживающего персонала. Масса таких дефектоскопов составляет несколько сотен килограмм, а протяженность вдоль кабельной линии более метра.

Электроискровые дефектоскопы с напряжением высокой частоты ЗАСИ (Звуковой аппарат сухих испытаний) используются на технологических линиях с высокой рабочей скоростью, до 3000 м/мин. Основные достоинства этих дефектоскопов: возможность производить

контроль кабельных изделий, движущихся с высокой скоростью, короткий электрод вдоль направления движения кабеля. Последнее дает возможность устанавливать дефектоскоп даже в компактные технологические линии. Недостатком таких дефектоскопов является большой ток через контролируемую изоляцию. Этот фактор значительно усложняет задачу построения подобных дефектоскопов на высокие испытательные напряжения, которое, как правило, не превышает 20-30 кВ в амплитудного значения [26,27,109].

Электроискровые дефектоскопы с испытательным напряжением импульсной формы ИАСИ (импульсные аппараты сухих испытаний) используются на линиях с низкой скоростью, как правило, не выше до 500 м/мин. Основные достоинства дефектоскопов данного вида: способность контроля изоляций с высокими диэлектрическими потерями. Таких как резин или некоторых марок ПВХ пластикатов. Сопротивление участков изоляции кабельных изделий на участках контроля с такой изоляцией может быть менее 5 МОм. В результате требуется низкая средняя мощность источника испытательного напряжения, что в свою очередь снижает стоимость дефектоскопа, повышает электробезопасность контроля и снижает тепловое воздействие на изоляцию. Скважность в дефектоскопах данного вида лежит в пределах 10-100.

Основным недостатком дефектоскопов с импульсным испытательным напряжением является низкая скорость контроля, так как в соответствии с действующими стандартами, частота повторения импульсов должна составлять $f = 50 - 400$ Гц. В связи с этим дефектоскопы данного вида используются при контроле изоляции силовых кабелей с резиновой или изоляцией из ПВХ пластикатов. Скорость таких линий низкая и не превышает, как правило, 300 м/мин.

Дефектоскопы с постоянным испытательным напряжением широко распространены на предприятиях США и Западной Европы [26,27,153-156].

Исторически сложилось так, что действующие еще во времена Советского Союза стандарты не регламентировали данный вид контроля в связи с малой его изученности. По этой причине на территории РФ электроискровые дефектоскопы с постоянным испытательным напряжением не используются. Только с вводом нового стандарта ГОСТ Р 54813-2011 их применение допускается.

Преимуществом дефектоскопов с постоянным испытательным напряжением является низкие токи через контролируемую изоляцию, практически полное отсутствие частичных разрядов в пористой изоляции и самая высокая скорость контроля. Для некоторых видов изоляции, таких как пористая изоляция кабелей связи, недопустим контроль высокочастотным напряжением, так как в порах возникают интенсивные частичные разряды. Высокая интенсивность частичных разрядов может приводить к ложным срабатываниям детектора дефектов или к повреждению бездефектных участков. Электроискровые дефектоскопы с постоянным испытательным напряжением обладают наименьшими габаритами, мощностью и стоимостью. Уровень электробезопасности в данных приборах наивысший по сравнению со всеми остальными типами дефектоскопов.

Недостатком электроискровых дефектоскопов с постоянным испытательным напряжением является низкая чувствительность к дефектам в связи малыми диэлектрическими потерями в дефектных участках [2,37,74]. Распределение постоянного испытательного напряжения по поверхности контролируемой изоляции определяется только поверхностным сопротивлением. Этот факт предъявляет более жесткие требования к конструкции электрода дефектоскопа.

Форма и частота испытательного напряжения регламентируется стандартом или техническими условиями на изготавливаемое кабельное изделие.

Электроискровые дефектоскопы НПО «Электросигнал», г. Ташкент.

С 70-х годов 20-го века в Советском Союзе централизованно разработкой и производством электроискровых дефектоскопов (аппаратов сухих испытаний) занималось НПО «Электросигнал», г. Ташкент. Данное предприятие изготавливало дефектоскопы без электродов. Электродные узлы на кабельных предприятиях изготавливали самостоятельно. Конструкции электродов и требования к ним подробно описывались в руководящем документе [32]. Основными типами изготавливаемых дефектоскопов были ЗАСИ и ИАСИ с амплитудами испытательных напряжений до 50 кВ. Частота повторения испытательного напряжения в дефектоскопах типа ЗАСИ была в диапазоне (1-2) кГц, в дефектоскопах типа ИАСИ в пределах (50-100) Гц. Данные дефектоскопы хорошо себя зарекомендовали на предприятиях кабельной отрасли и несмотря на большой срок эксплуатации до сих пор эксплуатируются на некоторых предприятиях. В начале 90-х годов 20-го века производство дефектоскопов НПО «Электросигнал» было прекращено.

Электроискровые дефектоскопы, выпускаемые предприятиями «НПО Редвилл», г. Томск, «Эрмис+», г. Томск

Типовая структурная схема электроискрового дефектоскопа показана на рис. 1.7.3.

Дефектоскоп состоит из: генератора напряжения, высоковольтного повышающего трансформатора, блока управления, блоков измерения испытательного напряжения и регистрации дефектов, электрод, через который протягивается кабельное изделие [145].

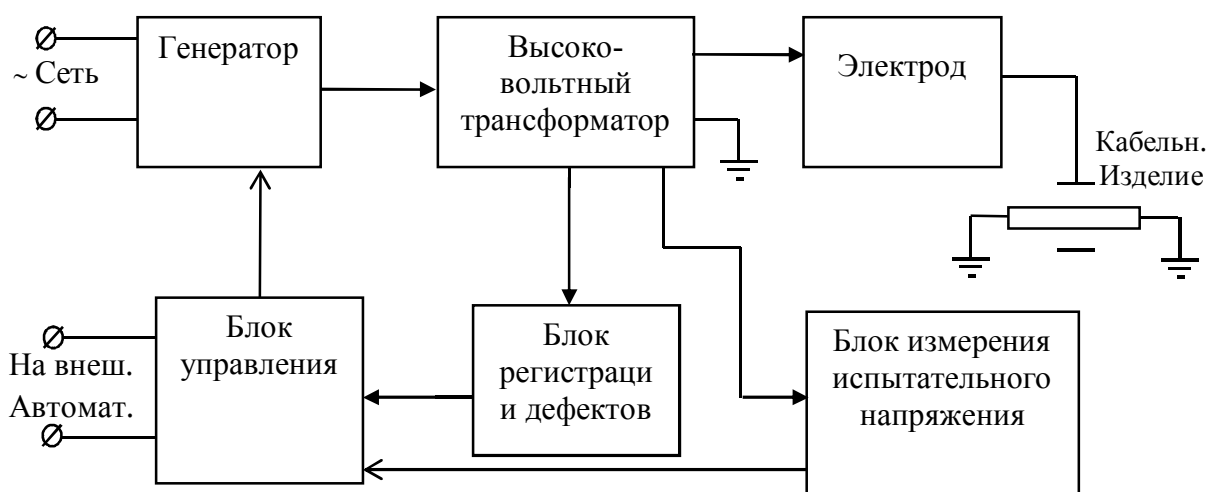


Рисунок 1.7.3 Типовая структурная схема высоковольтного испытателя

Принцип работы устройства по структурной схеме следующий. Напряжение от промышленной сети поступает на генератор. В некоторых дефектоскопах с импульсной формой испытательного напряжения сетевое напряжение без предварительного выпрямления и фильтрации поступает на генератор импульсов. В таких генераторах испытательное напряжение синхронизируется с сетью. В большинстве конструкций дефектоскопов сетевое напряжение выпрямляется и фильтруется и только затем поступает на генератор напряжения. Для повышения напряжения используется высоковольтный трансформатор с сухой или масляной изоляцией. Полученное испытательное напряжение посредством электрода определенной конструкции прикладывается к поверхности контролируемой изоляции кабельного изделия. Блоки измерения испытательного напряжения и регистрации дефектов позволяют контролировать параметры контроля и фиксировать наличие дефектов. Информация с этих блоков поступает на блок управления, который в свою очередь на основе полученных данных и предварительных установок управляет всеми режимами контроля и устройствами внешней автоматики.

Основные характеристики электроискровых дефектоскопов приведены в таблице 1.7.2 [157].

Выбор дефектоскопа определяется параметрами контролируемой изоляции: радиальной толщиной изоляции, материалом изоляции, геометрическими размерами кабельного изделия, удельными емкостью и диэлектрическими потерями, скоростью контроля. Чем выше скорость движения кабельного изделия, тем выше частота испытательного напряжения. Параметры испытательного напряжения (частота, форма и амплитуда) регламентируется стандартами и техническими условиями на кабельное изделие.

Таблица 1.7.2 - Параметры электроискровых дефектоскопов предприятия «НПО Редвилл», г. Томск

Наименование прибора	Форма и частота испытательного напряжения, Гц	Диапазон регулировки испытательного напряжения, кВ	Допустимый диаметр проверяемого кабеля, мм	Максим. скорость движения каб. изд, м/мин
ЗАСИ-15	Синусоида 500...2000	1,5...15	30	3000
ЗАСИ-30	Синусоида 500...2000	1,5...30	60	1800
ЗАСИ-40	Синусоида 500...2000	3...40	60	1800
ИАСИ-30	Разнополярные импульсы, 250	1,5...30	60	600
АСИП-30	Синусоида, 50	3...30	110	300

Таблица 1.7.3 - Параметры электроискровых дефектоскопов предприятия «Эрмис+», г. Томск [158].

Наименование прибора	Форма и частота испытательного напряжения, Гц	Диапазон регулировки испытательного напряжения, кВ	Допустимый диаметр проверяемого кабеля, мм	Максим. скорость движения каб. изд., м/мин
ЭРМИС+				
Корона – 1	Синусоида 0,8...2000	1,5...15	15	3000
Корона – 2	Синусоида 0,8...2000	6...30	30	1800
Корона – 2И	Разнополярные импульсы, 50	6...30	50	70
Корона – 3И	Разнополярные импульсы, 50	10...40	50	70
Корона – 1П	Постоянное положительное напряжение	5...15	-	-

Электроискровые дефектоскопы зарубежных производителей

В кабельной отрасли РФ широко используются электроискровые дефектоскопы зарубежных производителей. Дефектоскопы приобретались как в составе технологических линий так и отдельно.

Характеристики дефектоскопов наиболее распространённых в кабельной отрасли РФ представлены в таблице 1.7.3 [153-156].

**Таблица 1.7.4 - Параметры электроискровых дефектоскопов
зарубежных производителей**

Наименование прибора	Форма и частота испытательного напряжения, Гц	Диапазон регулировки испытатель- ного напряжения, кВ	Допустимый диаметр проверяемого кабеля, мм	Допустимая скорость движения кабеля, м/мин
BETA				
S1525		0,5...15	1 – 25	400
S2550		0,5...25	1 – 50	400
S25100		0,5...25	1 – 100	240
S40100		0,5...40	1 – 100	240
S25125		0,5...25	1 – 150	240
S50150		0,5...50	1 – 150	240
SIKORA				
HP 300 – CENE	Импульсное 300	1,5...25	0,2 – 40	
HP 300 – COM	Синусоида 2000	0,5...7,5	0,1 – 10	
HP 300 – UL	Синусоида 2000	0,5...15	0,1 – 10 0,5 – 30	
HP 300 – BS	Синусоида 50	1...25 (30)		
ZUMBACH				
ASTL	50/60	15, 25	50	240
ASTL	50/60	15, 25, 40	130, 150,	
AST-HF	3000	15	200	2400
DST	Постоянное	10, 25	12	3000
IST	Импульсное	15, 25	12, 20 15, 25	

Выводы по главе 1

1. В настоящее время в нормативной документации и теоретической базе контроля отсутствует качественное и количественное описание видов и геометрии дефектов, обнаруживаемых данным видом контроля.
2. Не описаны модели дефектной и бездефектной изоляции как электрической нагрузки при электроискровом контроле.
3. Не выявлены различия контроля напряжением различной формы и частоты.
4. Недостаточно изучены вопросы обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала при работе с высоковольтными электроискровыми дефектоскопами.
5. Недостаточно изучены вопросы аттестация электроискровых дефектоскопов.

Глава 2.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ КАК ОБЪЕКТА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ

2.1 Распределение испытательного напряжения по поверхности контролируемого кабельного изделия

Важным параметром испытателя является его возможность воспроизводить условия испытаний. Для этого он должен обладать достаточной мощностью, чтобы обеспечить необходимую величину испытательного напряжения на изоляции контролируемого кабельного изделия. Так же должна быть обеспечена и жесткость внешней характеристики источника высокого напряжения при изменениях электрических параметров объекта контроля и режимов технологического процесса. Недостаточная мощность испытателя приведет к снижению достоверности контроля. Необоснованно завышенная мощность приведет к увеличению затрат на контроль и снижению электробезопасности. В настоящее время требуемые энергетические параметры испытателей определяются исходя из требований руководящего документа [32]. 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 испытателей с учетом электрических параметров изоляции и особенностями технологического процесса. Ниже приведены результаты исследований, устанавливающие такую взаимосвязь. Исследованию подлежали следующие зависимости:

- распределение испытательного напряжения по поверхности контролируемой 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.

Зависимость распределения высокого напряжения по поверхности контролируемой изоляции является важным фактором электроискрового метода. Это связано с тем, что в зависимости от условий испытаний расстояние, на которое способно распространиться испытательное напряжение от точки приложения к изоляции, должно учитываться при расчете длины электрода испытателя. От выбора длины электрода зависит выбор мощности источника испытательного напряжения. Эксперимент по исследованию распределения испытательного напряжения на поверхности изоляции схематично представлен на рис. 2.1.1. В качестве источника высокого испытательного напряжения $U_{исп}$ использовался комплекс оборудования, состоящего из генератора сигналов Tabor WW5061, усилителя мощности Volta PA-1200 и высоковольтного трансформатора ЗНОЛ-06/20. Рабочий диапазон частот высоковольтного генератора составлял 50...10000 Гц, амплитуда напряжения 0,1...30 кВ, мощность 500 Вт, внутреннее сопротивление менее 200 кОм. Напряжение измерялось согласованной парой, состоящей из осциллографического делителя Textronix P6015A и цифрового осциллографа LeCroy WJ314.

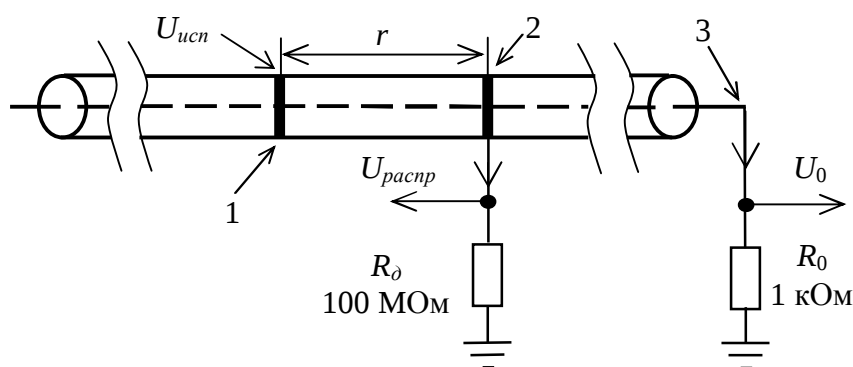


Рисунок 2.1.1 Схема эксперимента по исследованию распределения высокого напряжения по поверхности изоляции контролируемого кабеля: 1) кольцевой электрод, к которому прикладывается испытательное напряжение $U_{исп}$; 2) кольцевой электрод, на котором измеряется напряжение распределения $U_{распр}$; 3) жила кабельного изделия, заземленная через резистор R_0 , R_0 – сопротивление высоковольтного делителя напряжения.

На рис. 2.1.2- 2.1.14 приведены диаграммы распределения напряжения по поверхности сухой изоляции резинового кабеля марки ПРСН 2×2,5 при различной амплитуде испытательного напряжения.

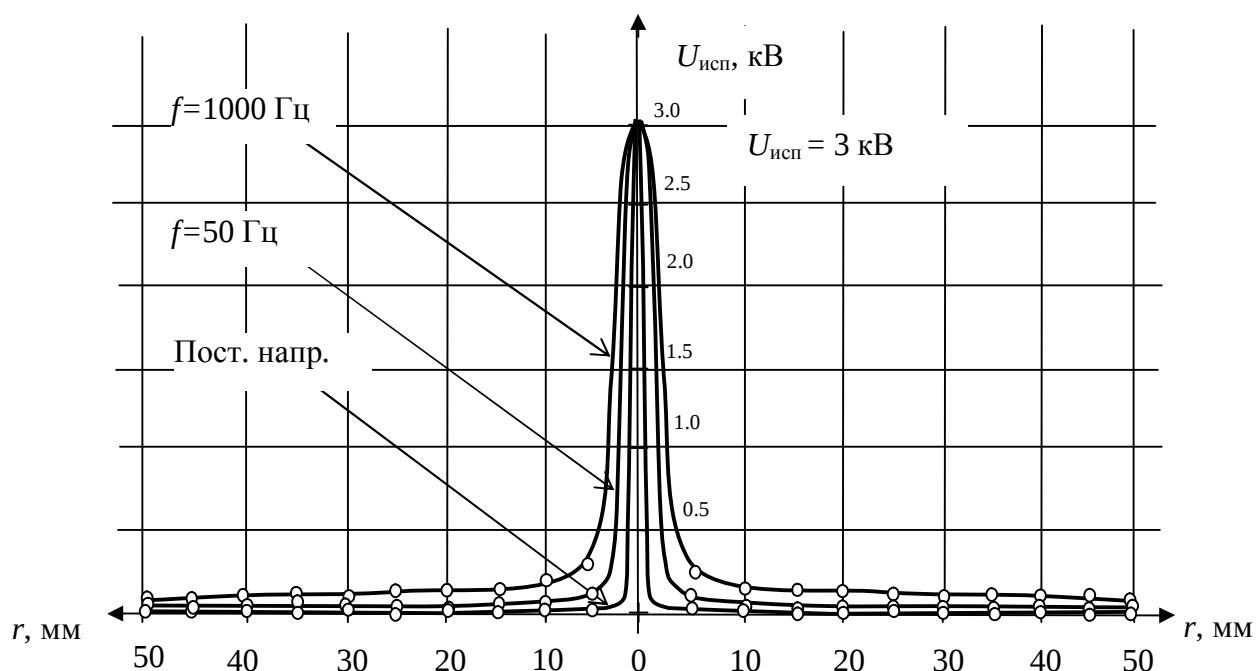


Рисунок. 2.1.2 Диаграммы распределения напряжения по поверхности сухой изоляции кабеля марки ПРСН 2 х 2,5 при $U_{исп}=3 \text{ кВ}$

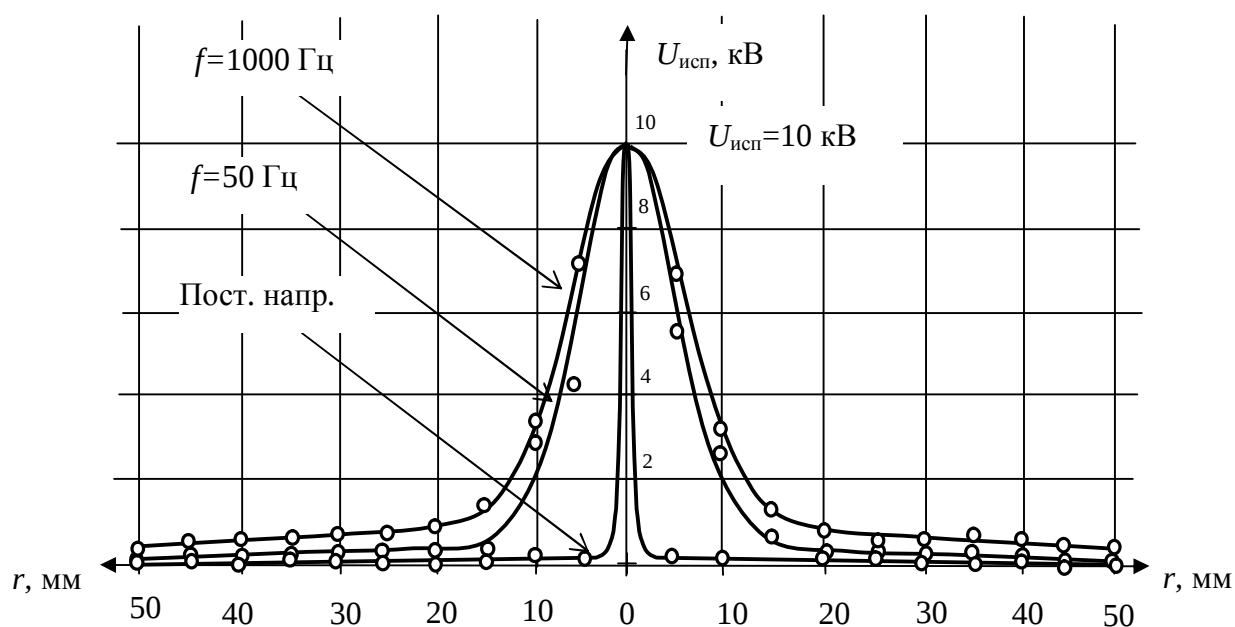


Рисунок. 2.1.3 Диаграммы распределения напряжения по поверхности сухой изоляции кабеля марки ПРСН 2 х 2,5 при $U_{исп}=10 \text{ кВ}$

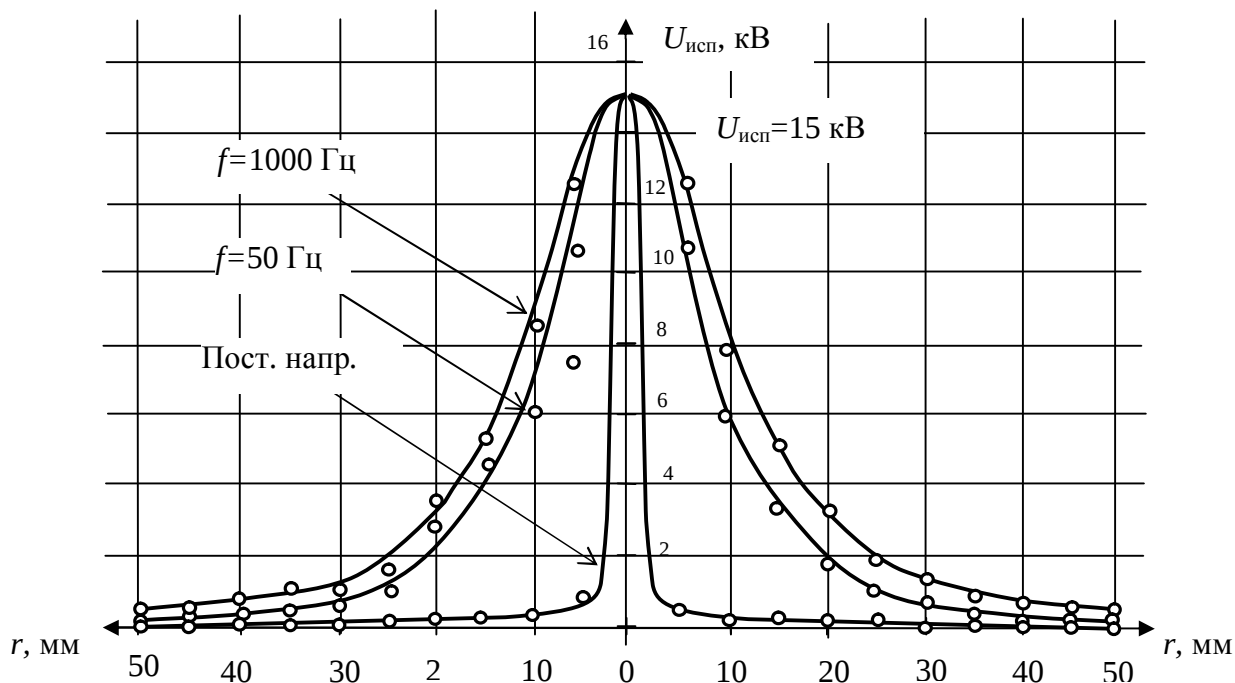


Рисунок. 2.1.4 Диаграммы распределения напряжения по поверхности сухой изоляции кабеля марки ПРСН 2 x 2,5 при $U_{исп}=15$ кВ

На рисунках 2.1.5- 2.1.7 приведены диаграммы распределения напряжения по поверхности сухой изоляции из ПВХ пластиката кабеля марки ПВС 2 x 2,5

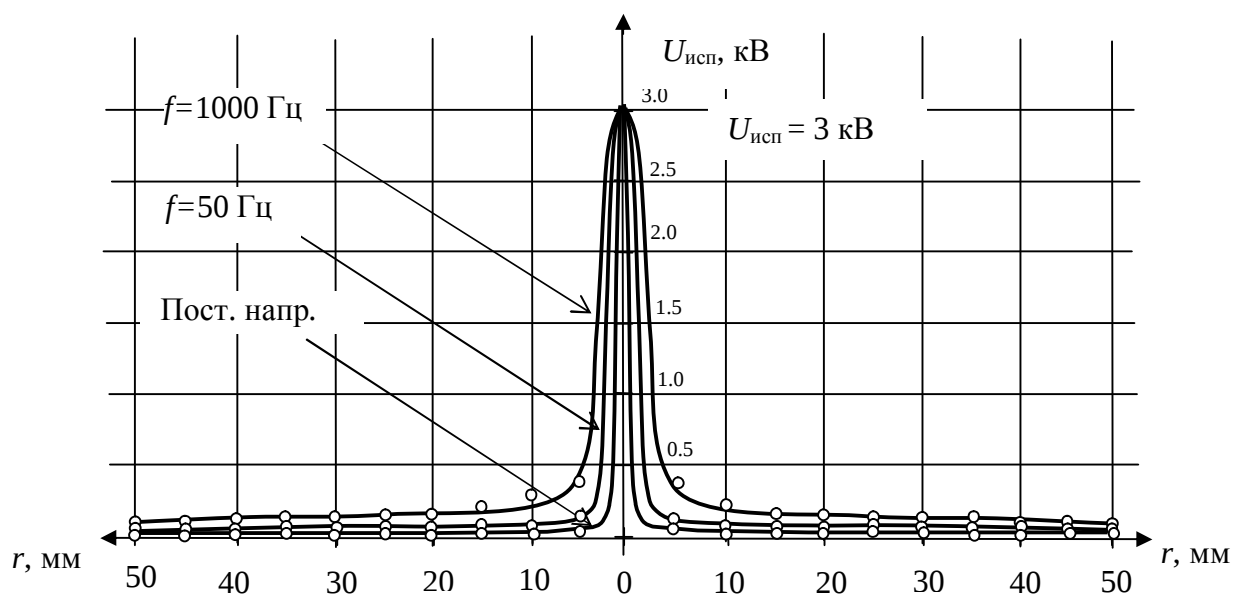


Рисунок. 2.1.5 Диаграммы распределения напряжения по поверхности сухой изоляции из ПВХ пластиката кабеля марки ПВС 2 x 2,5 при $U_{исп}=3$ кВ

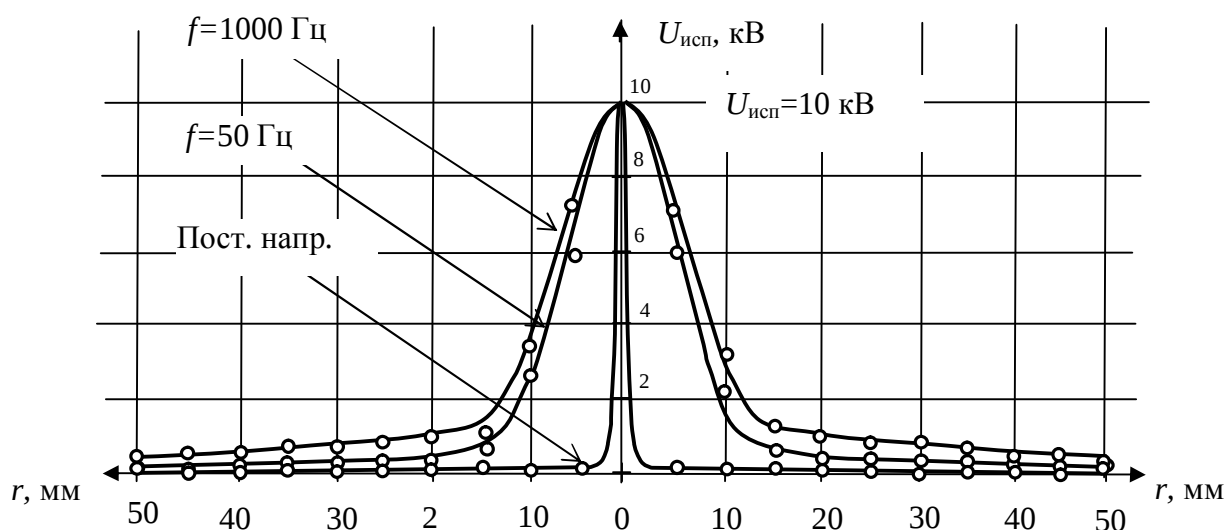


Рисунок. 2.1.6 Диаграммы распределения напряжения по поверхности сухой изоляции из ПВХ пластиката кабеля марки ПВС 2 х 2,5 при $U_{исп}=10$ кВ

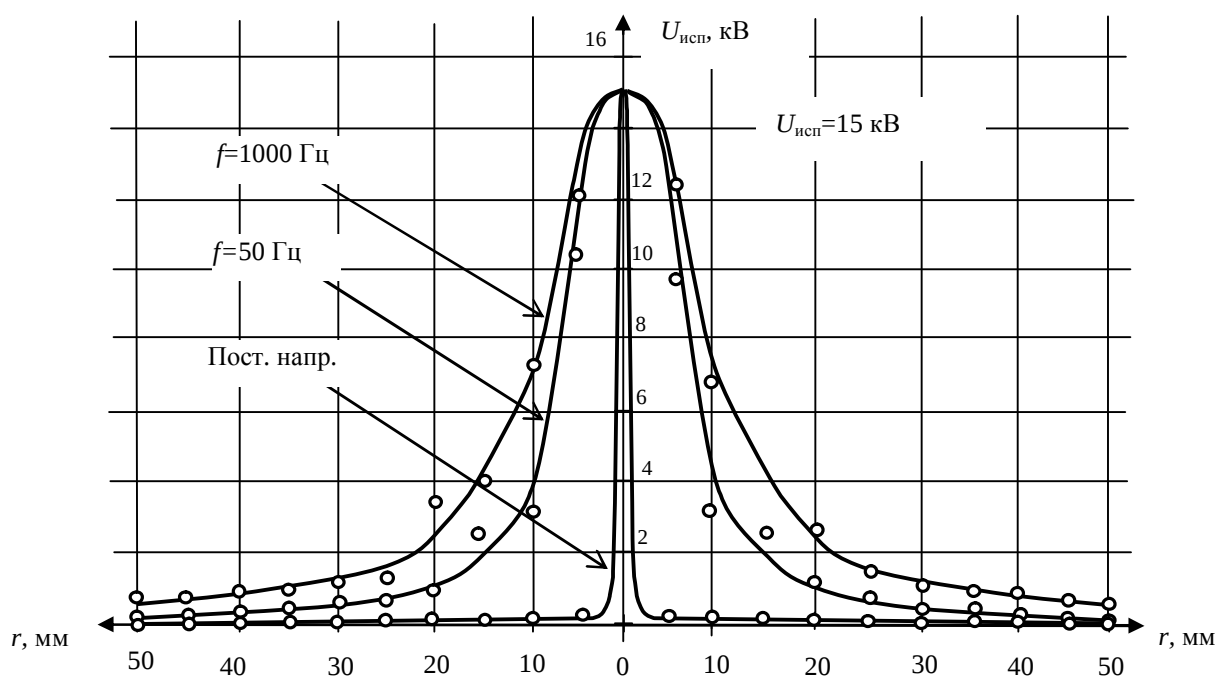


Рисунок. 2.1.7 Диаграммы распределения напряжения по поверхности сухой изоляции из ПВХ пластиката кабеля марки ПВС 2 х 2,5 при $U_{исп}=15$ кВ

На основе полученных результатов были рассчитаны зависимости эквивалентного удлинения электрода испытателя от изменения амплитуды и частоты повторения испытательного напряжения. Расчеты проводились

графически. В осях каждой из приведенных выше зависимостей строилась область прямоугольной формы, площадь которой была равна площади под кривой. Высота прямоугольной области была равна величине испытательного напряжения. Ширина области и являлась искомым расстоянием, которое необходимо учитывать при проектировании испытательного оборудования. Результаты расчетов приведены на рис. 2.2.8.

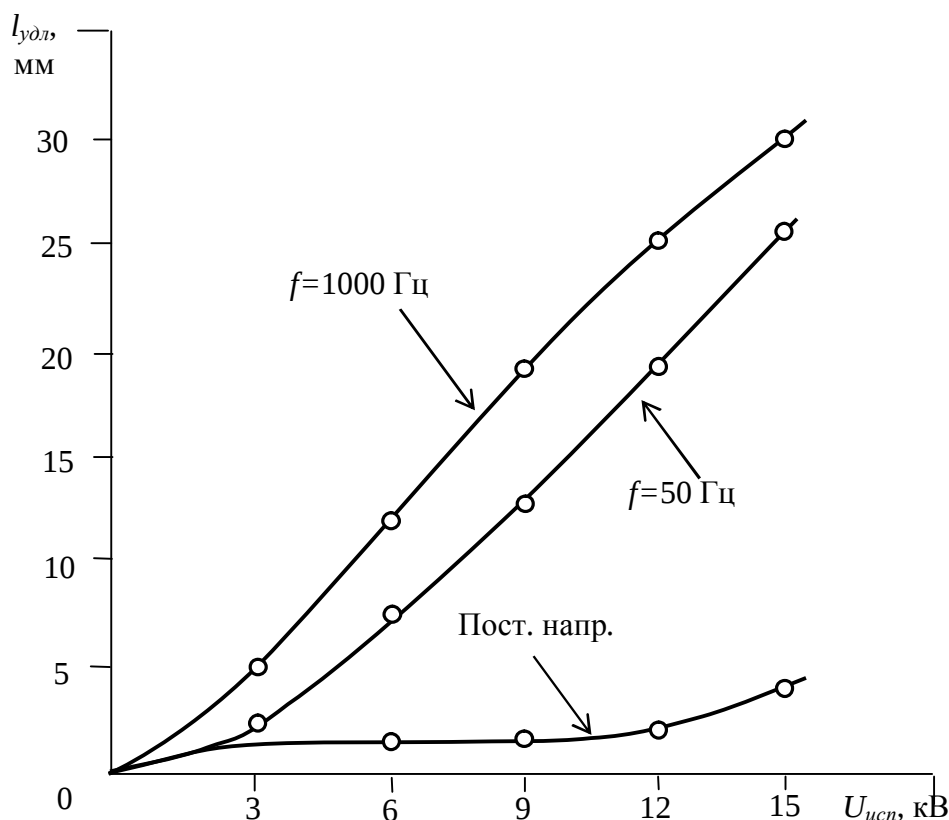


Рисунок. 2.1.8. Зависимости удлинения электродного узла $l_{удл}$ при контроле резиновой изоляции сухого кабеля от величины испытательного напряжения на различных частотах

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

удельной поверхностной емкости C можно определить по эмпирической формуле Тэплера [11,106,126]:

$$L_{ск} = \chi C^2 U^5 \sqrt[4]{dU/dt}, \quad (2.1.1)$$

где χ – коэффициент, определяемый опытным путем.

Если предположить, что длина скользящих разрядов связана с распределением напряжения по поверхности изоляции, то формула Теплера соответствует зависимостям, приведенным на рис. 2.1.8. На этих кривых видно, что влияние частоты испытательного напряжения на распределение его по поверхности изоляции невелико, основное влияние оказывает амплитуда. Таким образом, формулу Теплера можно использовать при проектировании испытательного оборудования. Рассчитать теоретически все требуемые изоляционные расстояния для конструкции испытателя невозможно, так как изначально точно неизвестен коэффициент χ . Однако полезно знать зависимости пробивных расстояний от влияния частоты и амплитуды испытательного напряжения.

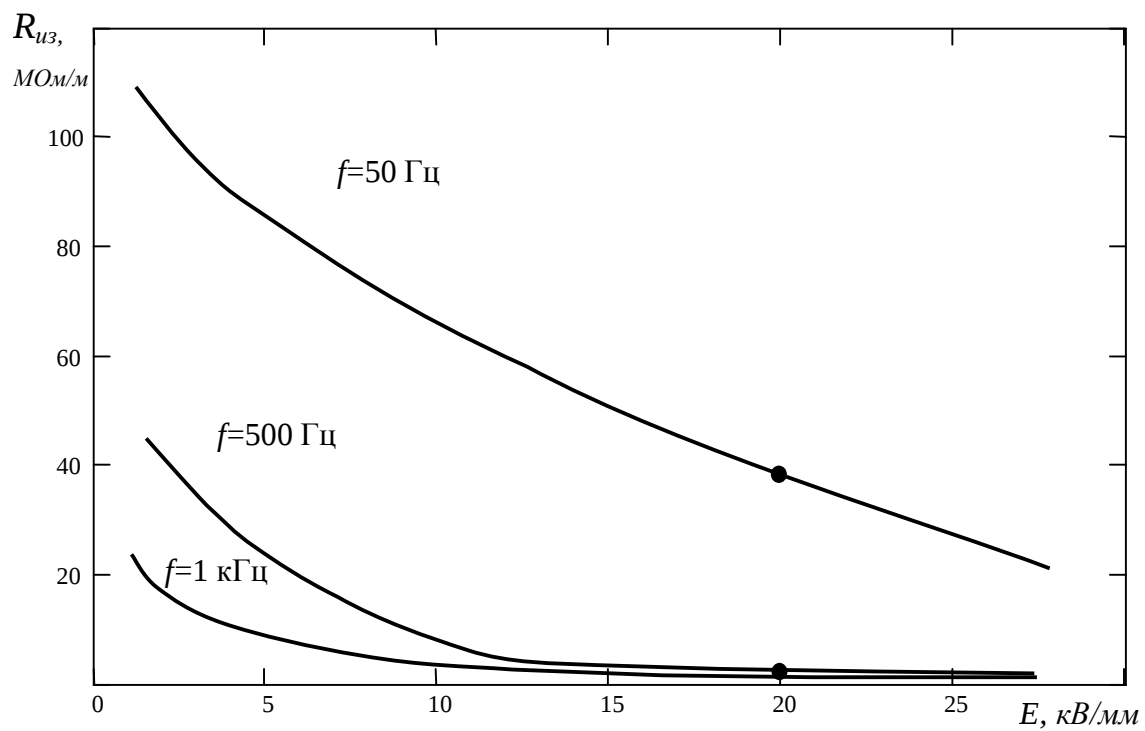
На характер распределения испытательного напряжения влияют также особенности технологического процесса производства кабельных изделий, такие как увлажненность и загрязненность поверхности изоляции. Наиболее существенное влияние на распределение оказывает увлажненность поверхности изоляции. Вода имеет низкое значение удельного объемного сопротивления (около 10^3 Ом·м) [106,126]. Действующие стандарты, регламентирующие данный вид контроля, требуют обязательного съема воды с 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. Наличие талька на поверхности изоляции не оказывает влияние на величину, в связи с высоким его объемным сопротивлением $l_{удл}$ [76].

2.2 Определение эквивалентных электрической емкости и активного сопротивления 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 рабочее для изоляции. Соотношение испытательного и рабочего напряжения может достигать трех порядков. Например, для автотракторного провода марки ПГВА с поливинилхлоридной изоляцией, медной жилой сечением 95 мм^2 и толщиной изоляции 3,5 мм рабочее напряжение составляет 48 В, а испытательное напряжение на технологической линии должно быть не менее 40 кВ амплитудного значения в соответствии с [16,25].

На рисунке 2.2.1, а, приведены зависимости погонной емкости изоляции $C_{из}$ кабеля ПРСН 2×2,5 от напряженности электрического поля на различных частотах. Схема эксперимента соответствовала рисунку 2.1.1. 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 [26,32].



а

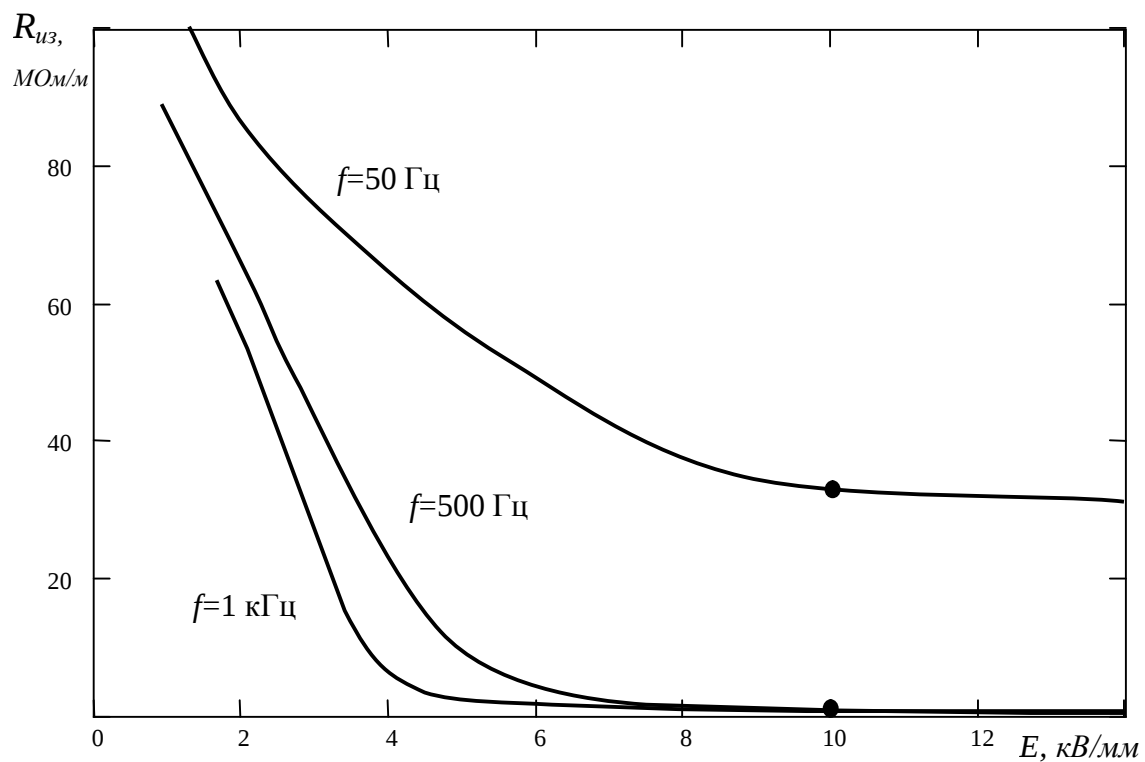


Рисунок 2.2.1 - Зависимости и эквивалентного сопротивления
а) ПВХ пластиката и б) резиновой изоляции сухого кабеля от
напряженности электрического поля на различных частотах

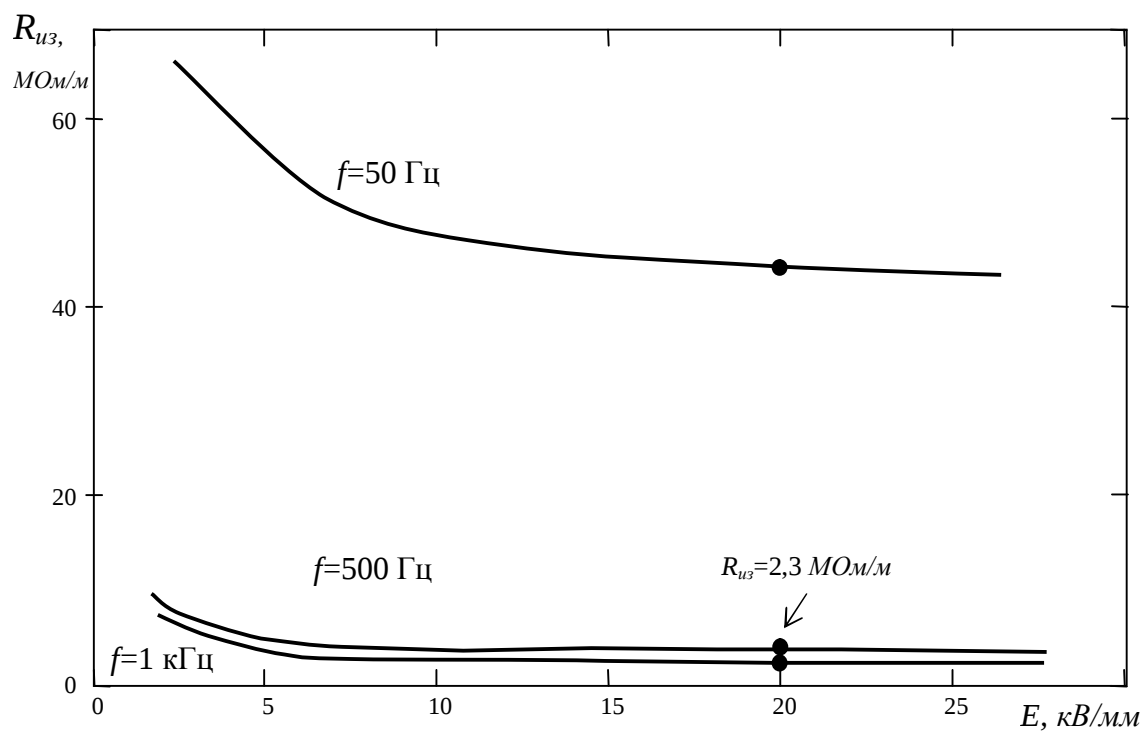


Рисунок 2.2.2 - Зависимости удельного сопротивления изоляции из ПВХ пластика мокрого кабеля от напряженности электрического поля на различных частотах

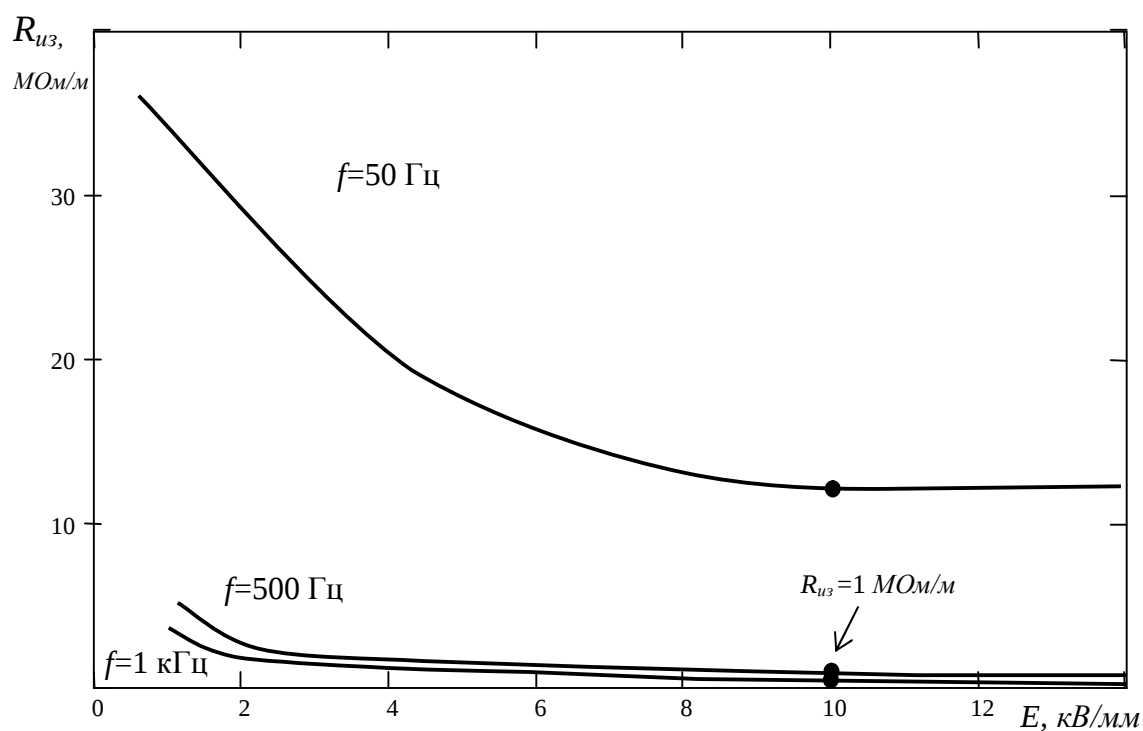


Рисунок 2.2.3 - Зависимости удельного сопротивления резиновой изоляции мокрого кабеля от напряженности электрического поля на различных частотах

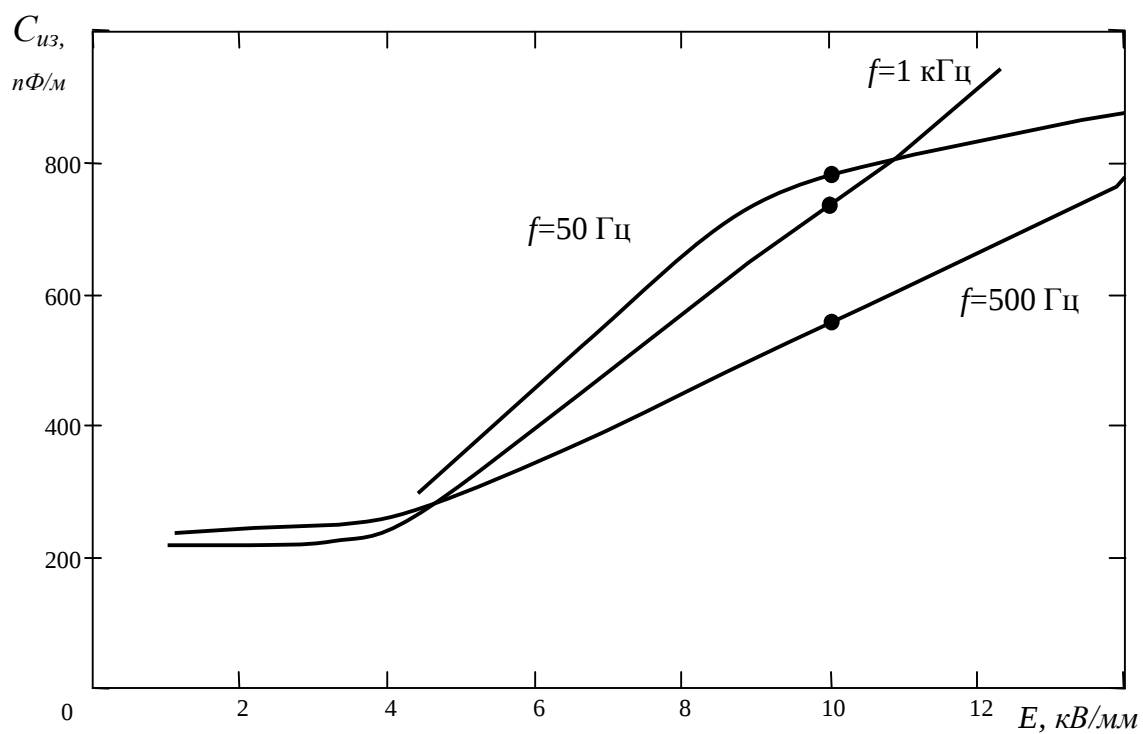


Рисунок 2.2.4 - Зависимости удельной емкости резиновой изоляции сухого кабеля от напряженности электрического поля на различных частотах

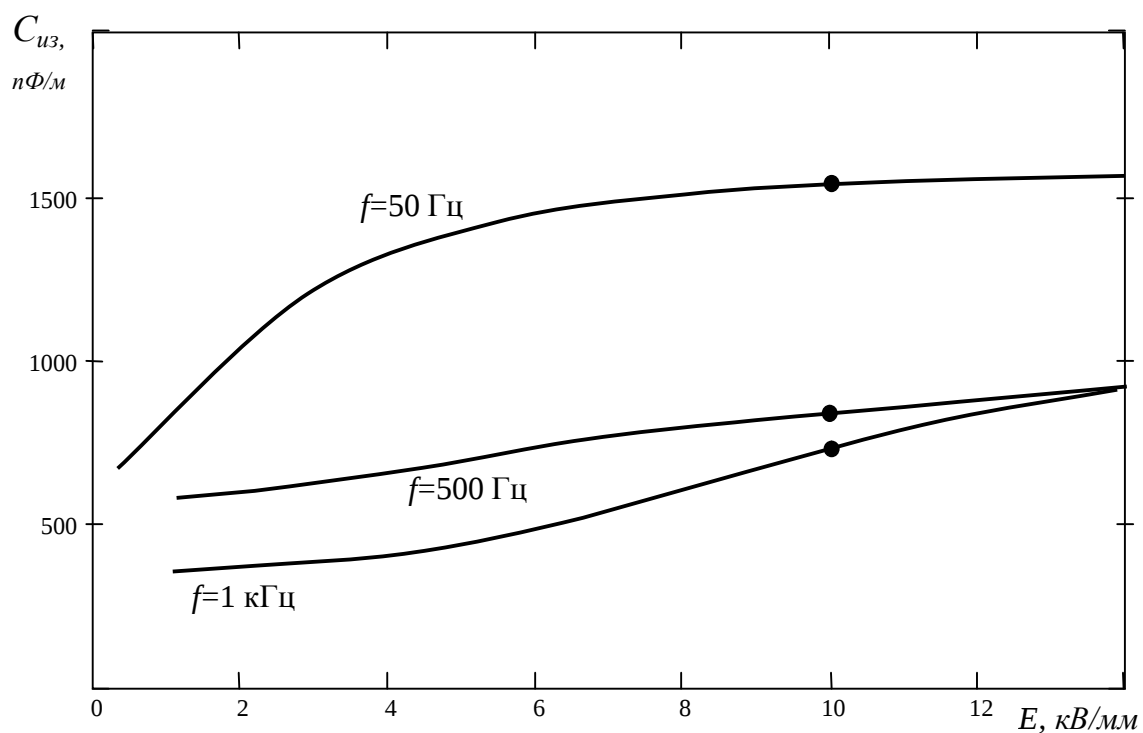


Рисунок 2.2.5 - Зависимости удельной емкости резиновой изоляции мокрого кабеля от напряженности электрического поля на различных частотах

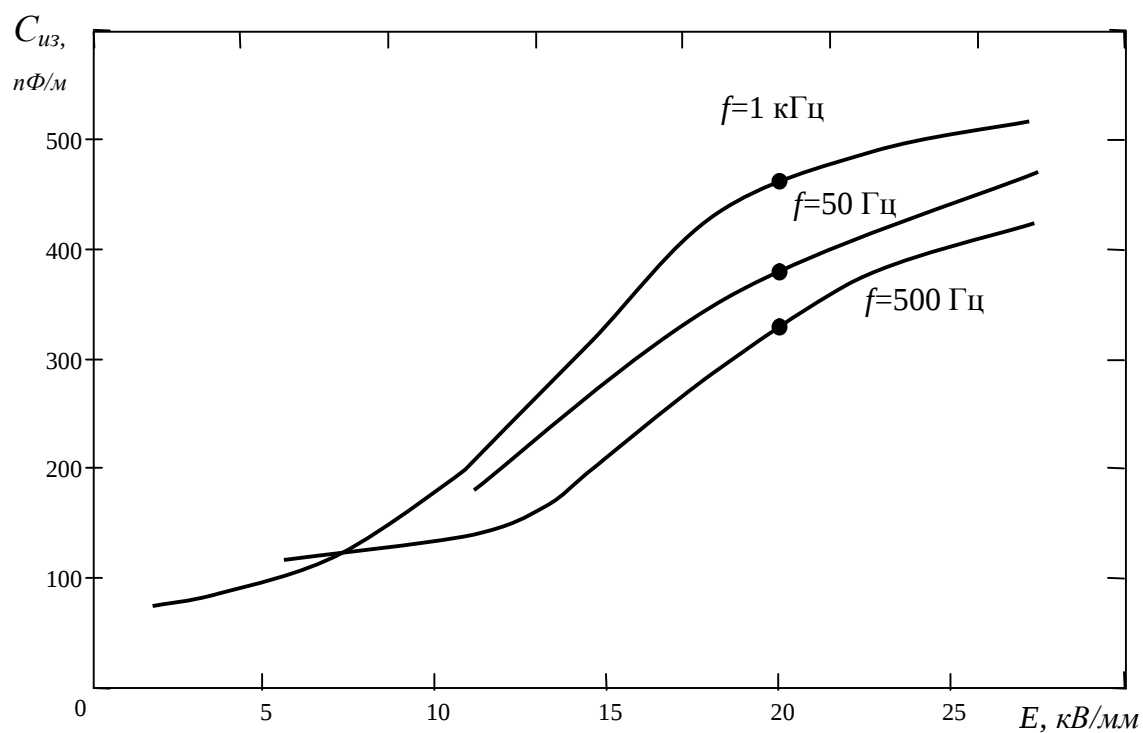


Рисунок 2.2.6 - Зависимости удельной емкости изоляции из ПВХ пластика сухого кабеля от напряженности электрического поля на различных частотах

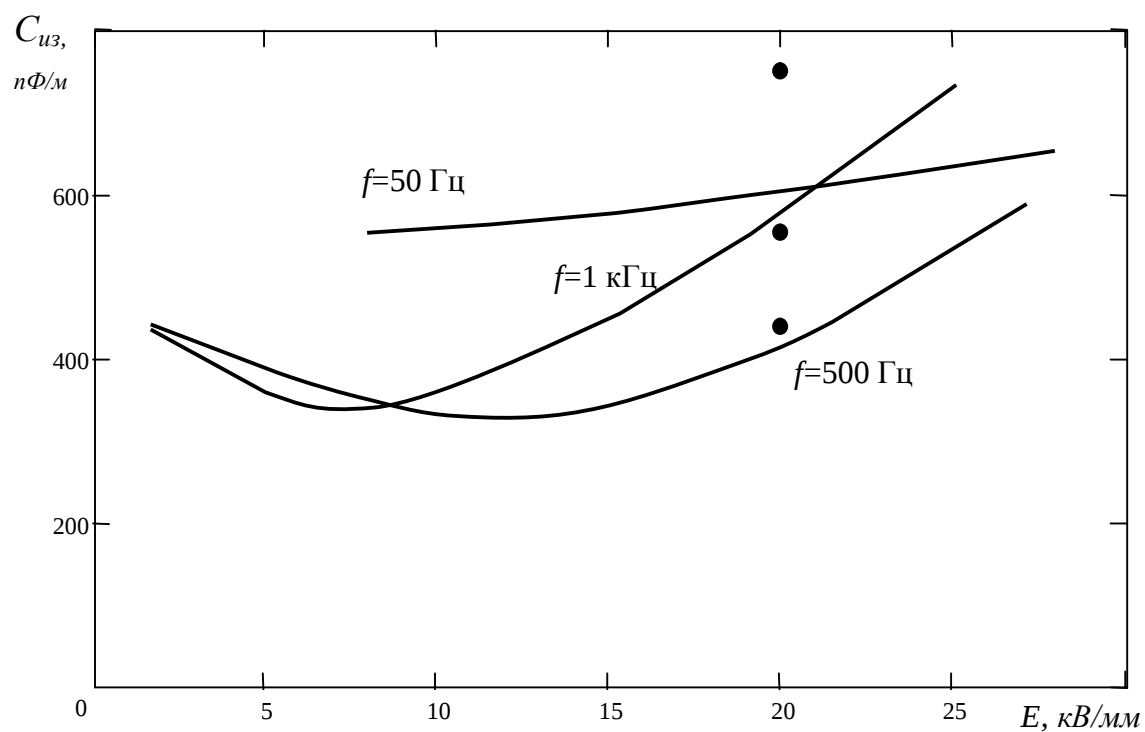


Рисунок 2.2.7 - Зависимости удельной емкости изоляции из ПВХ пластика влажного кабеля от напряженности электрического поля на различных частотах

Значения величин погонных емкости и сопротивления изоляции рассчитывались по формулам: $C_{из} = \frac{U_0 \sin \varphi}{U_{исп} R_0 \omega}$, $R_{из} = \frac{U_{исп} R_0 \cos \varphi}{U_0}$, где φ – угол фазового сдвига между напряжениями $U_{исп}$ и U_0 . Из графиков видно, что с ростом напряженности погонная емкость существенно возрастает. Для линейных диэлектриков, используемых главным образом в качестве электрической изоляции кабельных изделий, диэлектрическая проницаемость ε в большинстве случаев может считаться практически не зависящей от напряжения, приложенного к диэлектрику [96-98]. А рост погонной емкости обуславливается двумя факторами: улучшением качества контакта электродов испытателя и поверхности изоляции и увеличением расстояния растекания высокого испытательного напряжения. На рис. 2.2.1, б, приведены зависимости суммы диэлектрических потерь в изоляции и потерь на поверхностные разряды, пересчитанных в эквивалент погонного сопротивления от напряженности электрического поля на различных частотах. Уровни напряженности электрического поля при технологическом контроле соответствуют 20 кВ/мм [24-27]. Из графиков видно, что с ростом напряженности погонное сопротивление существенно снижается. Происходит это по трем причинам: с ростом напряжения улучшается качество контакта электродов испытателя с поверхностью изоляции и увеличивается расстояние, на которое распределяется испытательное напряжение, а также происходит рост диэлектрических потерь в самой изоляции и потерь на поверхностные разряды.

Из приведенных выше зависимостей можно сделать вывод о нелинейности активной и емкостной составляющих тока через изоляцию кабельного изделия при электроискровом контроле. Подтверждением этого предположения является осциллограмма испытательного напряжения и тока через изоляцию, рисунок 2.2.8.

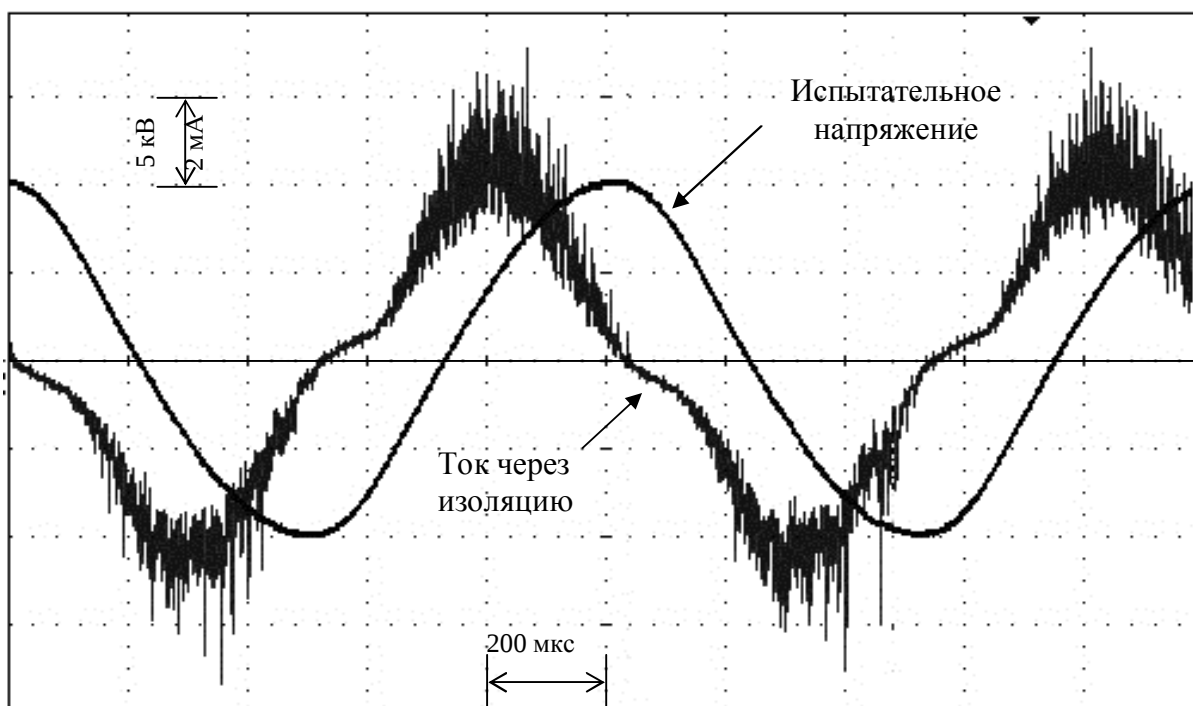


Рисунок 2.2.8. Осциллограмма испытательного напряжения и тока через изоляцию кабеля марки ПРСН 2×2,5

2.3 Влияние особенностей технологического процесса на электрические параметры контролируемого кабельного изделия

Важным фактором, определяющим полное сопротивление изоляции, является форма и частота испытательного напряжения. Изменение омического сопротивления (тангенса угла потерь) изоляции приводит к изменению выделяемого тепла в ней. Изменение температуры изоляции приводит к изменению ее электрической прочности. Известно, что потери в диэлектрике связаны с величиной приложенного напряжения, частотой и емкостью и удельными потерями следующей зависимостью:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \beta \quad (2.3.1)$$

Рассмотрим влияние факторов влияющих на потери в диэлектрике по отдельности.

Влияние величины приложенного напряжения. В кабельной отрасли в качестве изоляционных материалов применяются линейные диэлектрики, диэлектрическая проницаемость которых остается практически неизменной при изменении величины приложенного напряжения [95-98]. Соответственно емкость изоляции можно считать независимой от величины испытательного напряжения.

Влияние приложенного напряжения на диэлектрические потери.

В качестве основных в изоляционных материалах выделяют следующие виды диэлектрических потерь. Потери на электропроводность – присутствуют во всех диэлектриках при приложении как постоянного, так и переменного напряжения. Для неполярных однородных диэлектрических материалов это единственные потери. Релаксационные потери – это потери на поляризацию диэлектриков. Они связаны с активными составляющими токов абсорбции медленных поляризаций.

Потери, обусловленные неоднородностью - проводящими и газовыми включениями, слоистостью и т. п. Эти потери являются дополнительными релаксационными потерями. Ионизационные потери возникают в порах или газовых включениях диэлектрика. Резонансные потери, возникающие на частотах, совпадающих с собственными частотами колебаний электронов или ионов [4,90,101,133].

Тангенс угла потерь зависит от величины приложенного напряжения. Фактором, влияющим на величину тангенса удельных потерь, является ионизация воздушных пор в изоляционном слое. Толщина изоляционного слоя составляет, как правило, $(0,2 \div 3)$ мм. Размеры воздушных включений составляют, как правило, десятки микрометров. Ионизация в таких участках происходит при напряженностях $(1 \div 2)$ кВ/мм. Напряженность в воздушных полостях значительно выше напряженности в полимере. С другой стороны исходя из требований действующих стандартов [25-28] уровень контролируемых напряжений выбирается исходя из величины напряженности в полимере 10 кВ/мм. Соответственно в воздушных полостях

напряженность будет составлять $(25\div 70)$ кВ/мм в зависимости от диэлектрической проницаемости полимера изоляции. Электрическая прочность сухого воздуха 2 кВ/мм. Для малых промежутков электрическая прочность воздуха достигает 20 кВ для размера 10 мкм [126]. В результате можно сделать вывод о том, что при электроискровом контроле при соблюдении требований действующих нормативных документов ионизация воздушных промежутков присутствует всегда. В этом случае тангенс угла диэлектрических потерь не зависит от величины испытательного напряжения при соблюдении требований нормативных документов.

Влияние частоты испытательного напряжения. Диэлектрическая постоянная практически не зависит от частоты [78-89]. Диэлектрические потери с ростом частоты в диэлектриках увеличиваются. Однако если обратить внимание на зависимости тангенса угла потерь то, рост либо отсутствует вовсе, либо незначителен с ростом частоты. А в области низких частот, ниже 100 Гц происходит рост тангенса угла потерь с понижением частоты, связанное со снижением емкостного тока. Если выполняется условие постоянства произведение частоты испытательного напряжения и время его приложения к участку изоляции $\omega t_{\text{конт}} = \text{const}$, будет наблюдаться рост диэлектрических потерь при снижении частоты испытательного напряжения и пропорционального увеличению времени контроля. То есть перегрев диэлектрика при контроле напряжением частотой 50 Гц будет выше, чем при контроле напряжением частотой 5 кГц.

Влияние температуры контролируемой изоляции. Ниже приведены экспериментальные зависимости электрических свойств полимерных материалов, используемых в кабельной отрасли, от температуры [79-102].

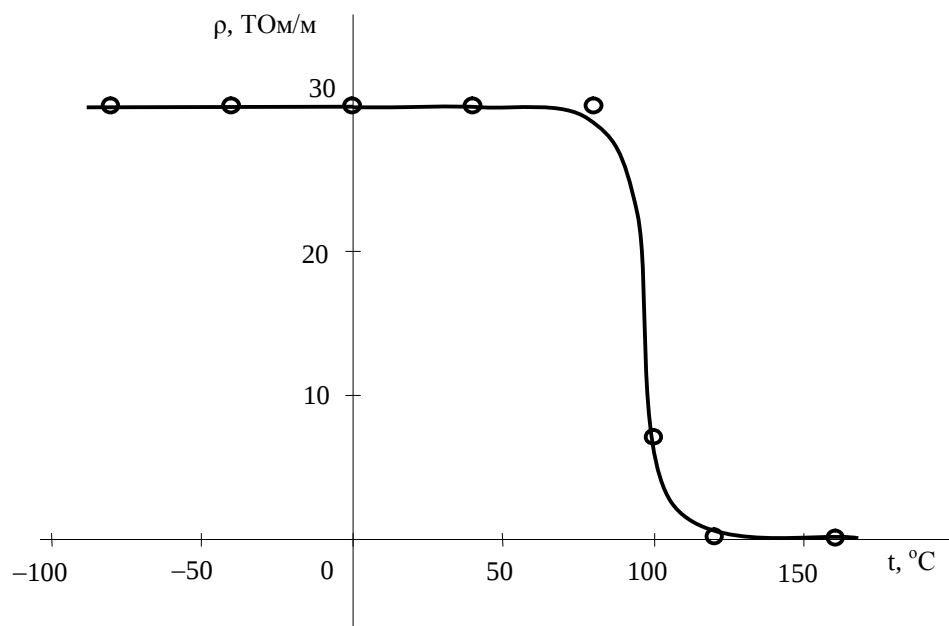


Рисунок 2.3.1- Зависимость удельного объемного электрического сопротивления ρ ПВХ пластиката от температуры

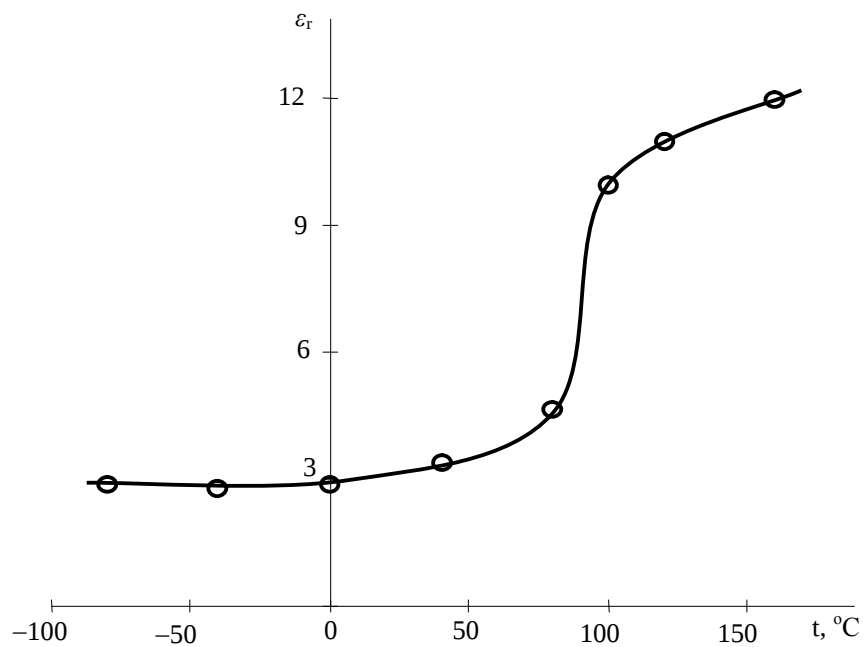


Рисунок 2.3.2- Зависимость относительной диэлектрической проницаемости ϵ ПВХ пластиката от температуры

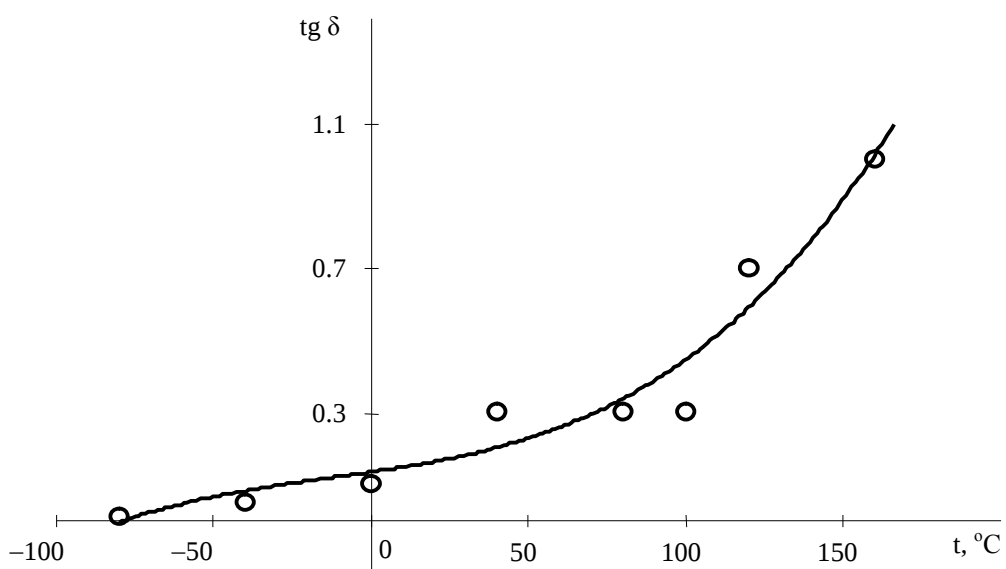


Рисунок 2.3.4- Зависимость тангенса диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ ПВХ пластика от температуры

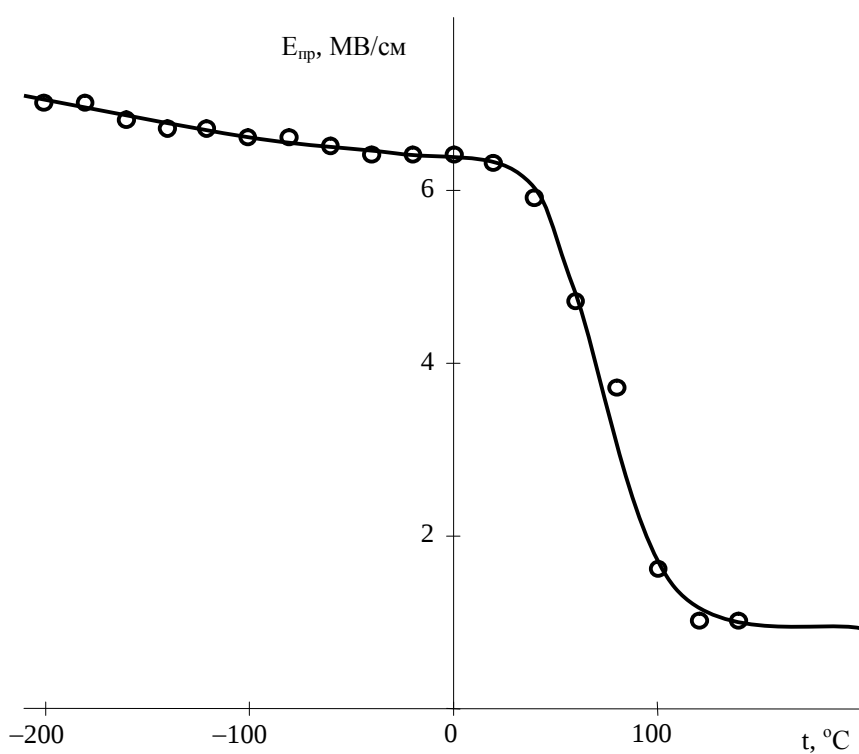


Рисунок 2.3.5- Зависимость электрической прочности $E_{\text{пр}}$ полиэтилена высокого давления от температуры

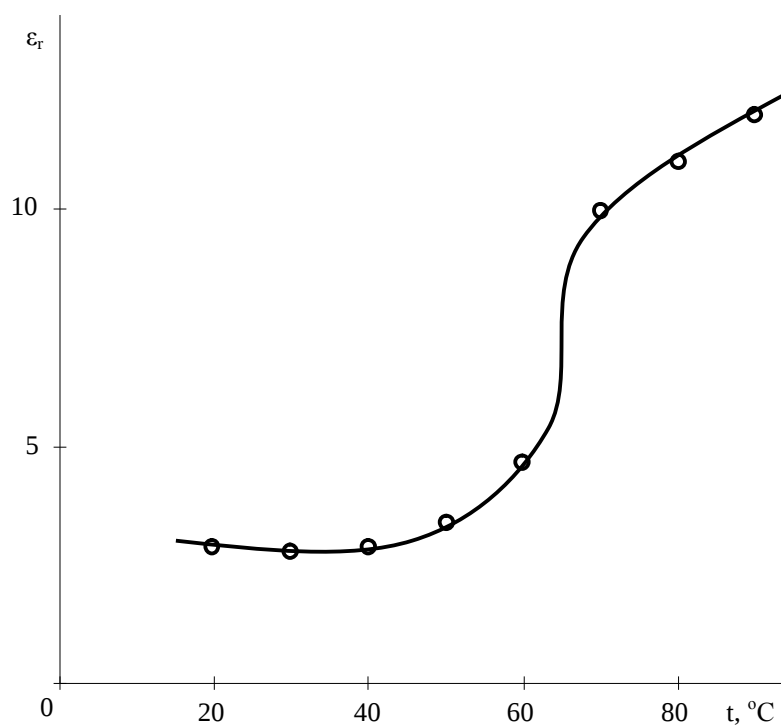


Рисунок 2.3.6- Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ резины от температуры

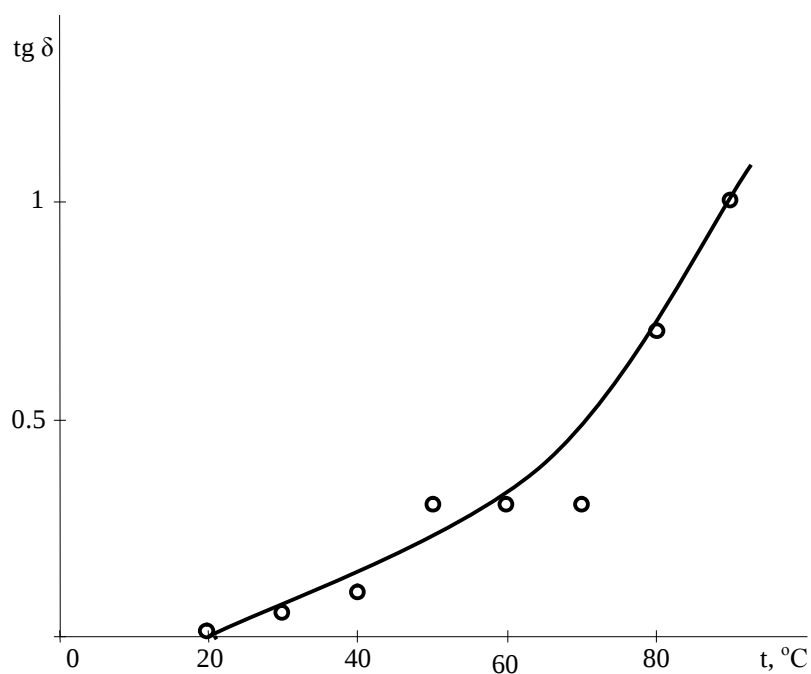


Рисунок 2.3.7- Зависимость тангенса диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ резины от температуры

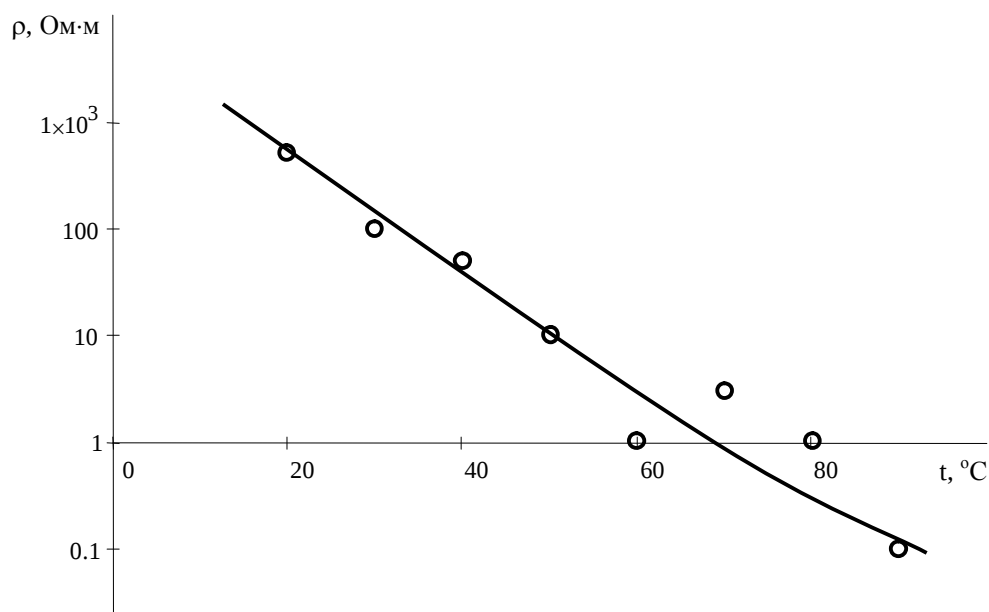


Рисунок 2.3.8- Зависимость удельного объемного электрического сопротивления ρ резины от температуры

Из приведенных зависимостей видно, что диэлектрическая проницаемость мало зависит от температуры для основных материалов, применяемых в кабельной отрасли. Диэлектрические потери, напротив, существенно зависят от температуры. Например, для ПВХ пластиката

$$\frac{P(80^\circ\text{C})}{P(20^\circ\text{C})} = 3...5.$$

В результате для изоляции из ПВХ пластиката принципиально важно, на каком технологическом участке происходит контроль. При контроле на экструзионной линии температура внутренних слоев изоляции из ПВХ пластикатов может достигать $(60-80)^\circ\text{C}$. В этом случае изоляция будет представлять собой, прежде всего активную нагрузку.

На основе проведенных исследований и опыта создания высоковольтных испытателей можно дать следующие практические рекомендации для определения требуемых параметров схемы замещения испытуемой изоляции.

1. Определение эквивалентной длины электрода.

Для сухой поверхности можно воспользоваться приближенной зависимостью $l_{удл}[\text{мм}] = \alpha \cdot U_{исп}[\text{кВ}]$, где $\alpha = 2 \text{ мм/кВ}$ для высокочастотных напряжений, $\alpha = 1,5 \text{ мм/кВ}$ для напряжений промышленной частоты. Для увлажненной поверхности, после охлаждающей ванны, полученные значения удваиваются. Эквивалентная длина электрода определяется как сумма значений геометрической длины электрода и его удлинения $l_{удл}$.

2. Определение значения погонной емкости испытуемого кабеля.

Для этого можно воспользоваться теоретическими зависимостями, например, на основе [165]. В этом случае будет сложно учесть реальные особенности конструкции кабеля (эксцентриситет, расслоение многопроволочных жил, локальные утонения изоляции и т.д.). Наиболее простой и надежный способ определения погонной емкости - это ее измерение в электролите на низком напряжении С-метром с возможностью разделения мнимой и реальной составляющей. Итоговая электрическая емкость контролируемого участка определяется как произведение погонной емкости на эквивалентную длину электрода. В случае испытаний нескольких изолированных жил, например, после скрутки общая емкость равна сумме емкостей всех жил помноженная на коэффициент укрутки.

3. Определение эквивалентного активного сопротивления изоляции.

Данная задача является самой сложной из представленных. Наиболее точный способ заключается в непосредственном измерении сопротивления при условиях соответствующих условиям испытаний, напряжением той же амплитуды и частоты. Для этого потребуется специальное оборудование и соответствующая квалификация персонала. Многолетний опыт работы в области высоковольтных испытаний изоляции позволяет сделать следующие рекомендации по определению активного сопротивления с точностью, достаточной для практического использования результатов. В изоляции из неполярных диэлектриков - полиэтилена и экструдированного фторопласта активные потери чрезвычайно малы и ими можно пренебречь. Для изоляции

из ПВХ пластикатов, термоэластопластов удельное активное сопротивление составляет, как правило, более (1..2) МОм·м при температуре 20 °С. В горячем состоянии, активное сопротивление существенно снижается. Его значение в большинстве случаев находится в диапазоне (0,3...2) МОм·м. Причем, чем выше сечение токоведущей жилы, тем ниже сопротивление, так как растет площадь изоляции, к которой прикладывается испытательное напряжение. Чем ниже толщина изоляции при том же сечении и конструкции токоведущей жилы, тем ниже сопротивление. Для изоляции из резин удельное активное сопротивление находится в диапазоне (0,1...1) МОм·м. Разброс значений является следствием различий физико-химических свойств материалов. Итоговое активное сопротивление контролируемого участка определяется как произведение удельного активного сопротивления на эквивалентную длину электрода. В случае испытаний нескольких изолированных жил, например, после скрутки общее активное сопротивление соответствует параллельному включению активного сопротивления всех жил, поделенному на коэффициент укрутки.

Полученные результаты позволяют производить анализ влияния параметров изоляции и технологического процесса на требуемую электрическую мощность испытательного оборудования

Выводы по главе 2

1. 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.
2. До амплитудных значений испытательного напряжения ($2 \div 2,5$) 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.
3. 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.
4. Наличие талька не оказывает существенное влияние на параметры изоляции как электрической нагрузки на электроискровой дефектоскоп.

Глава 3. Исследование возможности обнаружения дефектов изоляции кабельных изделий электроискровым контролем

3.1. Определение размеров дефектов обнаруживаемых по электрическому пробую изоляции

При анализе возможности обнаружения дефектов изоляции кабельных изделий по факту наличия электрического или электротеплового пробоя необходимо определить размер дефектов.

Рассмотрим задачу расчета максимальной толщины слоя изоляции, в которой возможен пробой изоляции. Пример контроля изоляции МГШВ-0,35. Материал изоляции- ПВХ пластикат, внешний диаметр $D= 1,9$ мм, диаметр жилы- $d_{жс}= 0,66$ мм, радиальная толщина изоляции $h= 0,62$ мм. Частота контролирующего напряжения $f= 1$ кГц, длительность контроля $t= 10$ мс, амплитуда напряжения $U= 12$ кВ. Режимы контроля соответствуют действующим стандартам ГОСТ 23286-78 и ГОСТ 2990-78. Контроль производится на экструзионной линии после охлаждающей ванны. Средняя температура изоляции $T= 60^{\circ}\text{C}$. Тангенс угла потерь при указанных температуре и частоте повторения напряжения $\text{tg}\beta= 0,01$, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r= 4,5$. В качестве дефекта примем локальное утонение длиной $l= 1$ мм. Необходимо определить максимальную толщину изоляции, в которой произойдет пробой при указанных условиях. Решение задачи производится итерационным способом. Зададимся начальным значением толщины изоляции дефектного участка $h_0= 0,1$ мм.

Электрическая емкость дефектного участка провода $C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(D/d_{жс})} = 1$ пФ.

Погонная емкость провода $C_n= 240$ пФ/м. Мощность диэлектрических потерь в дефектном участке $P=U^2\omega C_0\text{tg}\delta = 4,5$ мВт. Переданное дефектному участку тепло $\Delta Q = Pt = 4,5 \cdot 10^{-5}$ Дж. Масса дефектного участка $m= 3,3 \cdot 10^{-7}$ кг.

Перегрев дефектного участка за время контроля $\Delta T = \frac{\Delta Q}{c \cdot m} = 0,13 \text{ }^{\circ}\text{C}$, где c – теплоемкость ПВХ пластиката. Электрическая прочность ПВХ пластикатов при температуре $T_1 = 60,13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и толщине изоляции $l_{из} = 0,1 \text{ мм}$ равна $E_{np} = 60 \text{ кВ/мм}$. Толщина изоляции, в которой надежно произойдет пробой за время испытаний $h_{оэф} = \frac{U}{E_{np}} = 0,144 \text{ мм}$. Итерационным способом определяем обнаруживаемую толщину дефекта $h_0 = 0,14 \text{ мм}$.

На примере изоляции из полиэтилена. Провод СИП-3. внешний диаметр $D = 12,6 \text{ мм}$, диаметр жилы- $d_{жс} = 8,1 \text{ мм}$, радиальная толщина изоляции $h = 2,25 \text{ мм}$. Частота контролирующего напряжения $f = 1 \text{ кГц}$, длительность контроля $t = 10 \text{ мс}$, амплитуда напряжения $U = 31 \text{ кВ}$. Режимы контроля соответствуют действующим стандартам ГОСТ 23286-78 и ГОСТ 2990-78. Контроль производится на экструзионной линии после охлаждающей ванны. Средняя температура изоляции $T = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Тангенс угла потерь при указанных температуре и частоте повторения напряжения $\tan \beta = 0,00075$, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 2,4$. В качестве дефекта примем локальное утонение длиной $l = 1 \text{ мм}$. Необходимо определить максимальную толщину изоляции, в которой произойдет пробой при указанных условиях. Решение задачи производится итерационным способом. Итерационным способом определяем обнаруживаемую толщину дефекта $h_0 = 0,29 \text{ мм}$. Электрическая емкость дефектного участка провода

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(D/d_{жс})} = 2 \text{ пФ. Погонная емкость провода } C_n = 300 \text{ пФ/м. Мощность}$$

диэлектрических потерь в дефектном участке $P = U^2 \omega C_0 \tan \beta = 4,55 \text{ мВт}$.

Переданное дефектному участку тепло $\Delta Q = Pt = 4,55 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$. Масса дефектного участка $m = 7 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$. Перегрев дефектного участка за время

контроля $\Delta T = \frac{\Delta Q}{c \cdot m} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$, где c – теплоемкость полиэтилена.

Электрическая прочность полиэтилена при температуре $T_1 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и толщине

изоляции $h_{из} = 0,1$ мм равна $E_{np} = 77$ кВ/мм. Толщина изоляции, в которой надежно произойдет пробой за время испытаний $h_{деф} = U/E_{np} = 0,29$ мм.

Для резиновой изоляции. Провод АПВР. Внешний диаметр $D = 4,2$ мм, диаметр жилы- $d_{жс} = 1,8$ мм, радиальная толщина изоляции $h = 1,2$ мм. Частота контролирующего напряжения $f = 1$ кГц, длительность контроля $t = 10$ мс, амплитуда напряжения $U = 12$ кВ. Режимы контроля соответствуют действующим стандартам ГОСТ 23286-78 и ГОСТ 2990-78. Контроль производится на экструзионной линии после охлаждающей ванны. Средняя температура изоляции $T = 60^\circ\text{C}$ [92]. Тангенс угла потерь при указанных температуре и частоте повторения напряжения $tg\beta = 0,03$, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 5,5$. В качестве дефекта примем локальное утонение длиной $l = 1$ мм. Необходимо определить максимальную толщину изоляции, в которой произойдет пробой при указанных условиях. Решение задачи производится итерационным способом. Итерационным способом определяем обнаруживаемую толщину дефекта $h_\delta = 0,33$ мм. Электрическая емкость дефектного участка провода $C_\delta = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(D/d_{жс})} = 1$ пФ.

Погонная емкость провода $C_n = 360$ пФ/м. Мощность диэлектрических потерь в дефектном участке $P = U^2 \omega C_\delta tg\delta = 131$ мВт. Переданное дефектному участку тепло $\Delta Q = Pt = 1,34 \cdot 10^{-3}$ Дж. Масса дефектного участка $m = 2,65 \cdot 10^{-6}$ кг.

Перегрев дефектного участка за время контроля $\Delta T = \frac{\Delta Q}{c \cdot m} = 0,25^\circ\text{C}$, где c - теплоемкость резины. Электрическая прочность резины при температуре $T_1 = 60,25^\circ\text{C}$ и толщине изоляции $h_{из} = 0,1$ мм равна $E_{np} = 25$ кВ/мм. Толщина изоляции, в которой надежно произойдет пробой за время контроля $h_{деф} = U/E_{np} = 0,33$ мм.

В таблице 3.1.1 приведены результаты расчетов, где h_δ - высота дефектного участка, h - общая высота изоляции, $\Delta T/\Delta t$ - скорость нагрева изоляции.

Таблица 3.1.1. Относительные размеры обнаруживаемых дефектов и скорость их перегрева

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

Из приведенных расчетов видно, что размер дефекта, обнаруживаемого по электрическому пробую различный для кабельных изделий из различных материалов изоляции и её толщин. Очевидно, что надежно будут обнаруживаться сквозные дефекты.

Расчет минимального размера сквозного дефекта. Путей распространения разряда два: по поверхности изоляции и сквозной разряд в воздушном промежутке. Разряд вдоль поверхности диэлектрика происходит при меньших напряжениях, чем разряд в воздушном промежутке.

Рассмотрим пример сквозного дефекта в изоляции из резин не менее 10^{10} Ом. Для поливинилхлорида 10^{14} Ом, для полиэтилена не менее 10^{15} Ом. Исходя из требований действующих стандартов [26,27] необходимо обеспечить порог срабатывания детектора дефектов при величине контролирующего напряжения $U=3$ кВ, а тока через дефектный участок $I=600$ мкА. В этом случае необходимо обеспечить поверхностное сопротивление изоляции не более $R_{нов}=5$ МОм. Контролирующее напряжение $U=3$ кВ соответствует толщине изоляции $h=0,25$ мм. Материал резина, с наименьшим поверхностным сопротивлением. Для сквозного дефекта круглой формы длина окружности, при которой будет достигнуто требуемое сопротивление будет равна $l_{окр} = \rho \frac{h}{R_{нов}} = 0,5$ м. Диаметр отверстия $d_{def}=0,16$ м.

Расчет наименьшего диаметра дефекта при электрическом разряде. При токах до $I=10^{-3}$ А протекает тлеющий разряд [160.]. Тлеющий разряд характеризуется высоким падением напряжения между электродами. Плотность тока при тлеющем разряде достигает $J=10^6$ А/м². Соответственно

для достижения уровня тока дефекта $I_{\text{деф}}=600$ мкА необходимо отверстие диаметром не менее $d_{\text{деф}}=28$ 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/м² 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 на обнаружение дефектов практически не оказывает влияние.

3.2 Выявляемость дефектов изоляции кабельных изделий при испытаниях высоким напряжением различной частоты

Ниже приводятся результаты исследований испытаний изоляции кабельных изделий переменным высокочастотным напряжением, переменным частотой 50 Гц и постоянным напряжением.

Из ГОСТ 23286-78 видно, что испытательные напряжения для резиновой изоляции соответствуют 10 кВ/мм, а для пластмассовой (11,4 ÷ 20) кВ/мм, не зависимо от формы и частоты испытательного напряжения. Обратимся к стандарту BS 5099: 2004. В нем градация величин испытательных напряжений происходит в зависимости от формы и частоты испытательного напряжения и не зависит от типа изоляции. Для высокочастотной синусоиды (500 Гц ÷ 4 кГц) испытательные напряжения составляют 7 кВ/мм действующего значения, то есть 9,9 кВ/мм амплитудного значения. Для постоянного напряжения испытательные напряжения составляют 9 кВ/мм.

Пробивные напряжения для резиновой изоляции составляет не менее 20 кВ/мм, для пластмассовой изоляции не менее 30 кВ/мм, для

электрокартона не менее 40 кВ/мм, а для фторопластовой изоляции не менее 50 кВ/мм [96-98]. Эксперименты с реальными образцами кабельных изделий показывают, что фактические пробивные напряжения могут значительно превышать величины, указанные в справочниках. Например, для пластиковой изоляции провода *КССПВ UTP 4 Cat. 5e* с толщиной 0,2 мм пробивное напряжение на частоте 1 кГц составляет около 100 кВ/мм. И это при длительности воздействия высоким напряжением в единицы секунд. Кратковременный характер приложения высокого напряжения, равный единицам- десяткам миллисекунд, при динамических испытаниях приводит к еще большему увеличению пробивного напряжения изоляции кабеля.

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что уровни пробивных напряжений превышают уровни испытательных напряжений, как правило, в 3...10 раз. Причем в стандарте Великобритании BS 5099: 2004 уровень испытательного напряжения не зависит от материала изоляции. С учетом этого можно сделать вывод о том, что данным видом контроля выявляются лишь явные дефекты изоляции, многократно снижающие электрическую прочность изоляции, такие как, например трещины или поры, пронизывающие всю или почти всю толщину изоляции. Многократные эксперименты показали, что искровыми испытаниями можно выявлять и неглубокие дефекты, однако для этого требуется высокая чувствительность детекторов пробоя, улавливающие небольшое изменение тока через контролируемую изоляцию. Устройства с подобными детекторами обладают соответственно низкой помехоустойчивостью, что отрицательно сказывается на достоверности контроля. Высокий уровень помех, воздействующий на детектор пробоя изоляции, входящий в состав высоковольтного испытателя, обуславливается двумя причинами:

- большой протяженностью (10...30 м) контура заземления жилы испытуемого кабеля, который в этом случае является хорошим приемником промышленных помех;

- не идеальностью электродного узла, по средствам которого происходит приложение высокого напряжения к испытуемой изоляции, что приводит к броскам тока через испытуемый участок изоляции.

В Российских, общеевропейских стандартах и в стандартах Великобритании не описываются дефекты изоляции кабеля с их геометрией, неоднородностью и другими параметрами, которые должны однозначно распознаваться динамическими высоковольтными испытаниями. Таким образом, нет четкого определения *контролируемого* дефекта. Однако следует отметить, что в стандартах BS EN 50356:2002 «Method for spark testing of cables» и Cenelec TC 20 есть указания по уровню тока, для конкретного типа испытателя, который он должен однозначно распознавать как дефект. Но в требованиях границы сильно размыты как, например, для испытателей с синусоидальным напряжением промышленной частоты и высокой частоты ток срабатывания детектора пробоя может составлять от 0,5 до 10 миллиампер, в зависимости от параметров контроля [26,27].

В связи с приведенным выше анализом действующих Российских и зарубежных стандартов для проведения сравнительного анализа динамических испытаний постоянным и переменным высоким напряжением в качестве модели дефекта принимаем тонкий сквозной дефект, выполненный тонкой иглой.

В случае статических испытаний определение дефекта происходит более однозначно. Испытуемая изоляции кабельного изделия выдерживается под высоким напряжением в течении нескольких минут под источником мощностью от десятков до сотен киловатт. В этом случае при пробое изоляции происходит выделение значительной энергии и прогару дефектного места.

При статических испытаниях можно отметить отличие испытаний постоянным и переменным напряжениями заключающееся в том, что

распределение потенциала в слое диэлектрика при постоянном испытательном напряжением будет определяться проводимостью. При приложении переменного испытательного напряжения потенциал будет определяться в большей степени диэлектрической постоянной. Таким образом, испытания постоянным и переменным напряжением, прежде всего для многослойной изоляции, неоднозначны. Развитие диэлектриков привело к тому, что для низковольтных кабельных изделий используется однослойная изоляция. Перечисленные выше особенности могут быть отнесены и к динамическим испытаниям.

Ниже приведены результаты исследований посвященных выявлению отличий динамических испытаний изоляции кабельных изделий постоянным и переменным напряжениями.

В ходе работ были проанализированы ГОСТы и ТУ на следующие кабельные изделия [38-72]:

Кабели силовые

ВВГ, ВВГзж, ВВГз, ВВГ-ХЛ, ВВБГ, ВВБ, ВВбШв, ВВБГз, ВВБз, ВВГ-П, ВВГ-Б, АВВГ, АВВГзж, АВВГз, АВВГ-ХЛ, АВВБГ, АВВБ, АВБбШв, АВВБГз, АВВБз, АВВГ-П, АВВГ-Б, АВРГ, ВРГ, АНРГ, НРГ, АВРБГ, ВРБГ, АВРБГ

Кабели силовые гибкие

КОГ-1, КЛГСН, КГ, КГН, КГЭ, КГЭН, КГЭ-Т, КГЭ-ХЛ

Кабели судовые

КНР, НРШМ

Кабели контрольные

КВВГ, АКВВГ, КВВГ-ХЛ, АКВВГ-ХЛ, КВВГз, АКВВГз, КВВГЭ, АКВВГЭ, КВВГнг, АКВВГнг, КВВГЭнг, АКВВГЭнг, КВВБГ, АКВВБГ, КВБбШв, АКВБбШв

Кабели и провода для погружных электронасосов

КПБК, КПБП, КЭПБТ, КЭПБПТ, КБПТ, КПБПТ, ПВДП, ПЭВВП

Провода с поливинилхлоридной изоляцией для электрических установок

АПВ, ПВ, АППВ, ППВ, ПВ1, ПВ3, ПВ4

Провода автотракторные

ПВА, ПГВА

Провода установочные

ВПВ, ВПП

Провода переносные с резиновой изоляцией

ШПЭП-УХЛ

Кабели городские телефонные

ТППэп, ТППэп3, ТПВ

Кабели связи шахтные

КТАПВ, КТАПВТ

Кабели телефонной связи

ТППШВ, ПРППМ

Кабели для структурированных кабельных систем связи

КВП

Провода телефонные распределительные

ТРП

Провод для промышленных взрывных работ

ВП

Шнуры соединительные

ШВП-2, ШРО, ШВВП

Провода соединительные

ШР

Провода шланговые

ПВС, ПРС

Провода для электрифицированного транспорта

ПС

Шнур для шахтных головных аккумуляторных светильников

АШП

Наиболее часто встречающаяся формулировка требований к испытаниям «на проход» выглядит следующим образом: «жилы кабелей и защитные оболочки экранированных кабелей должны выдержать испытание переменным напряжением категории ЭИ-2 в соответствии с ГОСТ 23286-78 и ГОСТ 2990-78», без указаний на форму и частоту испытательного напряжения. Хотя стоит отметить и исключения, такие как требования ГОСТа Р 51311-99 «КАБЕЛИ ТЕЛЕФОННЫЕ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ В ПЛАСТМАССОВОЙ ОБОЛОЧКЕ» [47] п.7.2.2 Проверку герметичности изоляции (п.4.1.1.2) проводят по ГОСТ 2990 на аппарате сухого испытания приложением пикового значения напряжения 4 кВ переменного тока частотой не менее 50 Гц для кабелей со сплошной изоляцией и 2 кВ для кабеля с пленко- пористой изоляцией. Или требования ГОСТа 27893-88 «КАБЕЛИ СВЯЗИ» [25]:

п.2.3.4.1. Испытания проводят на кабелях с пластмассовыми оболочками и защитными шлангами, имеющими экран, металлическую оболочку или броню. Испытания проводят переменным или импульсным электрическим напряжением на проход по ГОСТ 2990.

п.2.1.3.1. Установка для испытания переменным или импульсным электрическим напряжением на проход по ГОСТ 2990.

Из проведенного анализа стандартов на кабельные изделия можно сделать вывод о том, что в стандартах жестких требований к форме и частоте испытательного напряжения методом контроля «на проход» нет. Таким образом, право выбора вида испытательного напряжения остается за производителями кабельных изделий. Выбор осуществляется исходя из оптимизации технологического процесса по ряду производственных критериев. Линии по производству силовых кабелей являются низкоскоростными (до 10 м/с) и поэтому контролируются, как правило, низкочастотным (50 Гц) переменным синусоидальным напряжением. Линии по производству тонких проводов и кабелей работают на скоростях до 60 м/с и требуют малогабаритного испытательного оборудования. Поэтому кабели и

провода, изготавливаемые на таких линиях, испытываются высокочастотным переменным напряжением частотой до 4,5 кГц. Существуют кабельные изделия, имеющие изоляцию с низким сопротивлением, например резину. Сопротивление такой изоляции на длине электродного узла, как правило, десятки сантиметров, может составлять единицы МОм или даже сотни КОм. Для генерирования испытательного напряжения в десятки кВ для подобной изоляции в непрерывном режиме понадобится источник мощностью в сотни ватт. Помимо высоких габаритов и стоимости подобный источник испытательного напряжения будет являться и источником повышенной опасности на производственной линии. К примеру, если необходимо испытывать провод с резиновой изоляцией сопротивлением 0,5 МОм, приходящегося, на длину электродного узла, напряжением 20 кВ действующего значения, то для этого потребуется источник напряжения с выходным током 40 мА и мощностью 800 Вт. По ГОСТ 12.1.038 предельно допустимый уровень тока частотой 50 Гц является величина 6 мА. Для снижения мощности и обеспечения безопасности в подобных случаях применяют импульсные испытательные напряжения. Таковы основные критерии выбора формы и частоты испытательного напряжения при производстве кабельных изделий.

Первоначально была снята зависимость пробивного напряжения воздушных промежутков от частоты синусоидального напряжения в рабочем диапазоне частот от 0 до 5 кГц. На сегодняшний момент высоковольтные испытатели работают на частотах, как правило, до 3 кГц. Хотя некоторые производители начали вывод на рынок испытателей работающих на частоте 4,5 кГц. Зависимость снималась при температуре воздуха $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 55%. В качестве электродов использовались металлические шары диаметром 16 мм из стали марки ШХ15. Таким образом, радиус электродов много больше расстояния между ними, что необходимо для обеспечения однородности электрического поля [101-105]. На рисунке 6 приведена зависимость пробивного напряжения от частоты для различных размеров воздушных промежутков. Значения напряжений амплитудные.

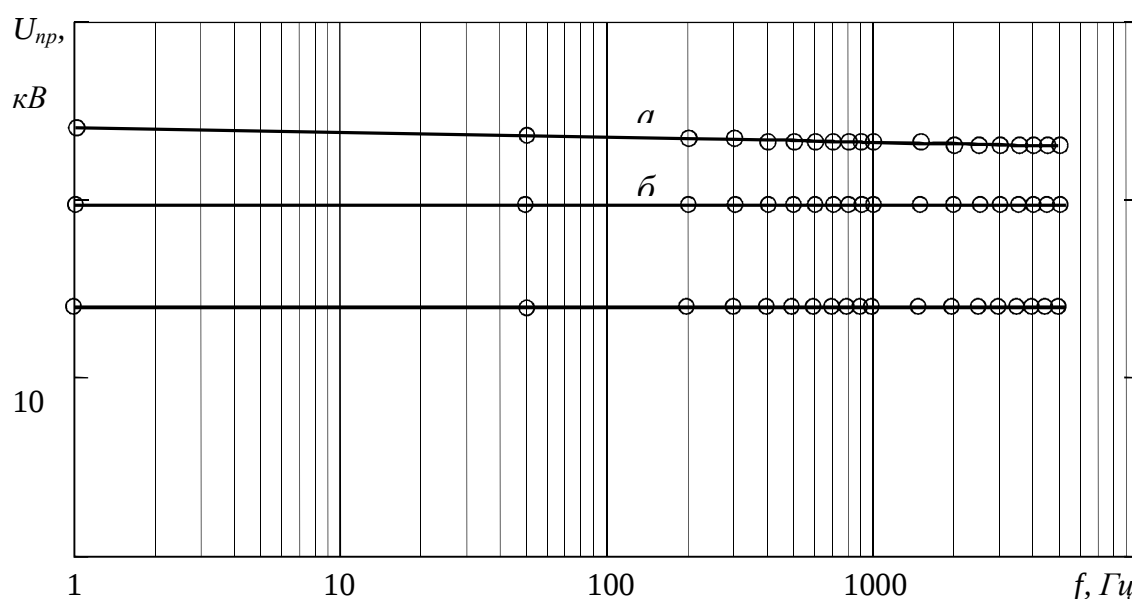


Рисунок 3.2.1. - Зависимость пробивного напряжения от частоты высокого напряжения для воздушных промежутков различных размеров: *а*- 2.8 мм, *б*- 2 мм, *в*- 1.2 мм

Из приведенных зависимостей видно, что в рабочем для высоковольтных испытателей диапазоне частот пробивное напряжение

воздушных промежутков от частоты практически не зависит и составляет $E_{np} = 4 \dots 6$ кВ/мм. Причем с увеличением величины воздушного промежутка напряженность пробоя уменьшается, так для промежутка размером $\delta = 1,2$ мм $E_{np} = 5,8$ кВ/мм, для $\delta = 2$ мм $E_{np} = 4,9$ кВ/мм, а для $\delta = 2,8$ мм $E_{np} = 4,15$ кВ/мм. В ходе экспериментов изменялась и форма напряжения, то есть содержание высших гармоник в синусоидальном сигнале. Оказалось, что значение пробивного напряжения не зависит от формы и действующего значения испытательного напряжения, а только от его амплитуды. Происходит это потому, что электрический пробой в газах протекает за время от 10^{-8} до 10^{-7} с [106,160], а более медленный тепловой пробой происходит только в твердых диэлектриках. Отсюда следует вывод, что в статике для воздушных промежутков в диапазоне частот испытательных напряжений от 0 до 5 кГц следует говорить об амплитуде напряжения, а не о его действующем или среднем за полупериод значении.

Частотная зависимость была снята и для некоторых типов проводов. Из широкой номенклатуры кабелей и проводов интересовали, прежде всего, кабели связи, так как в первую очередь для контроля их качества предназначены высоковольтные испытатели с постоянным напряжением, выпускаемые ведущими зарубежными компаниями. Например, компания *Sicora* (Германия) рекомендует собственную модель высоковольтного испытателя *SPARK 2000-DC* для контроля *LAN*- кабелей, коаксиальных, радиочастотных, телефонных кабелей, а также оболочек оптических кабелей связи [154]. Компания *Zumbach* (Швейцария) рекомендует собственную модель испытателя *SPARKE TESTER SP 20* для контроля низковольтных проводов, контрольных и телефонных кабелей, а также оболочек оптических кабелей связи [153].

На рисунке 3.2.2 приведены зависимости пробивного напряжения от частоты для монтажных проводов *НВ1 1х1,8* (ПВХ пластикат) и *МГТФ 1х0,07* (Фторопласт), на рисунке 3.2.4 для проводов телефонного кабеля *КСПВ 4х0,12* (полиэтилен) и *LAN* кабеля *КССПВ UTP 4 Cat. 5e* (полиэтилен) и на рисунке 9 для проводов телефонного кабеля *ТСВ 20х2х0,5*. Значение напряжения амплитудные. Форма напряжения – синусоида. Начальное значение частоты на оси абсцисс 0 Гц, то есть постоянное напряжение. Скорость подъема напряжения $dU/dt = 1$ кВ/с.

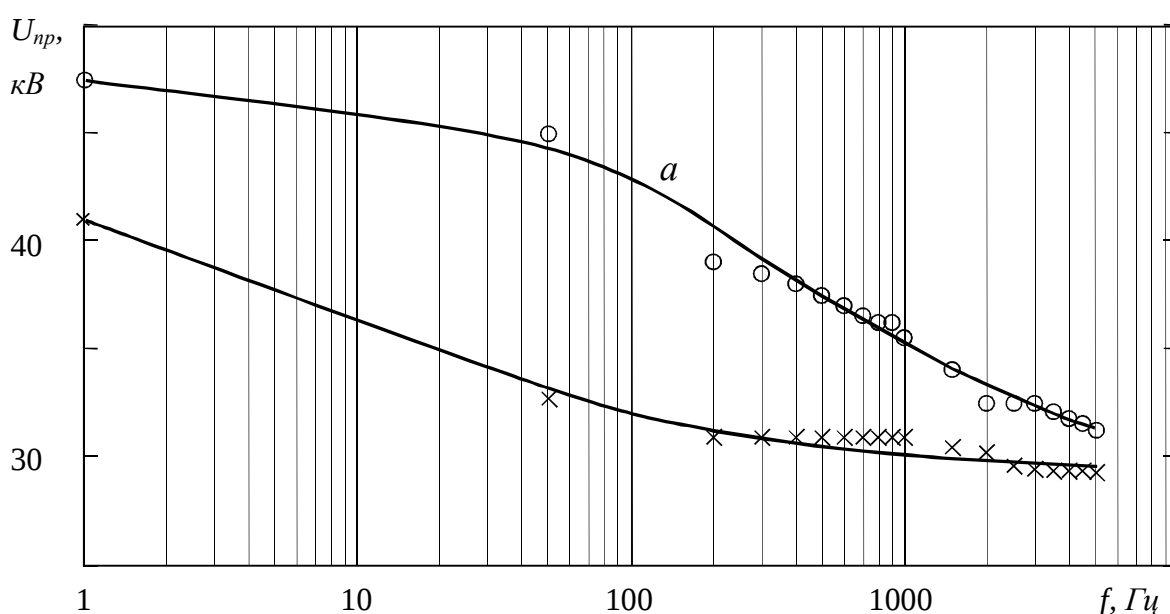


Рисунок 3.2.2 - Зависимость пробивного напряжения от частоты высокого напряжения для монтажных проводов *НВ1 1х1,8 а* и для *МГТФ 1х0,07 б*.

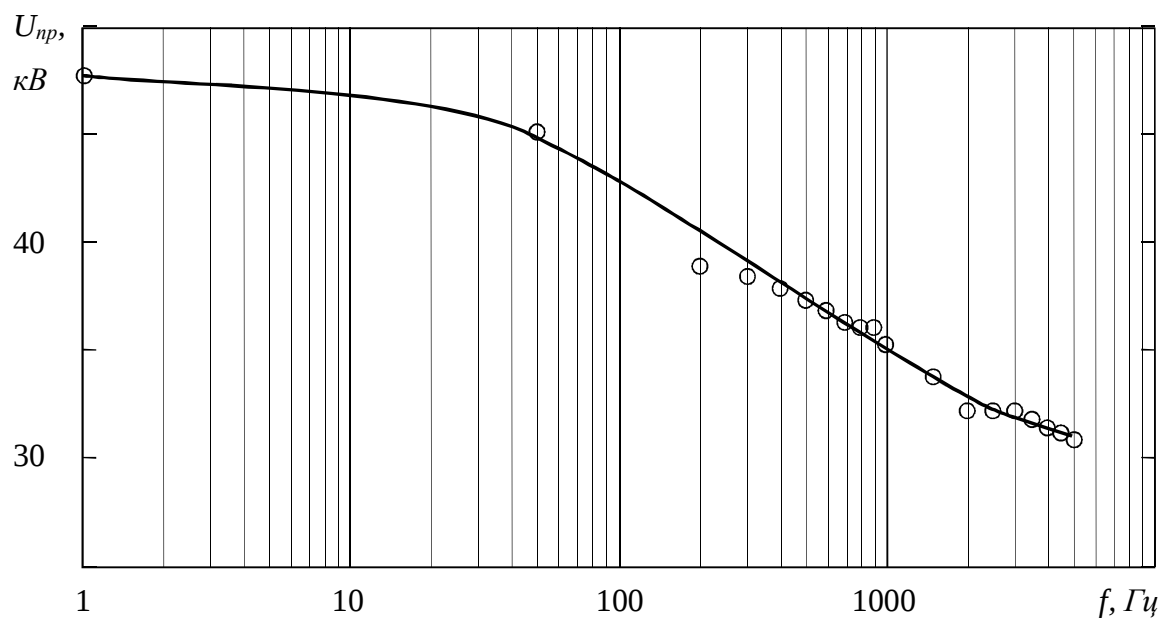


Рисунок 3.2.3 - Зависимость пробивного напряжения от частоты высокого напряжения для изоляции из поливинилхлоридного пластика провода телефонного кабеля *ТСВ 20х2х0,5*

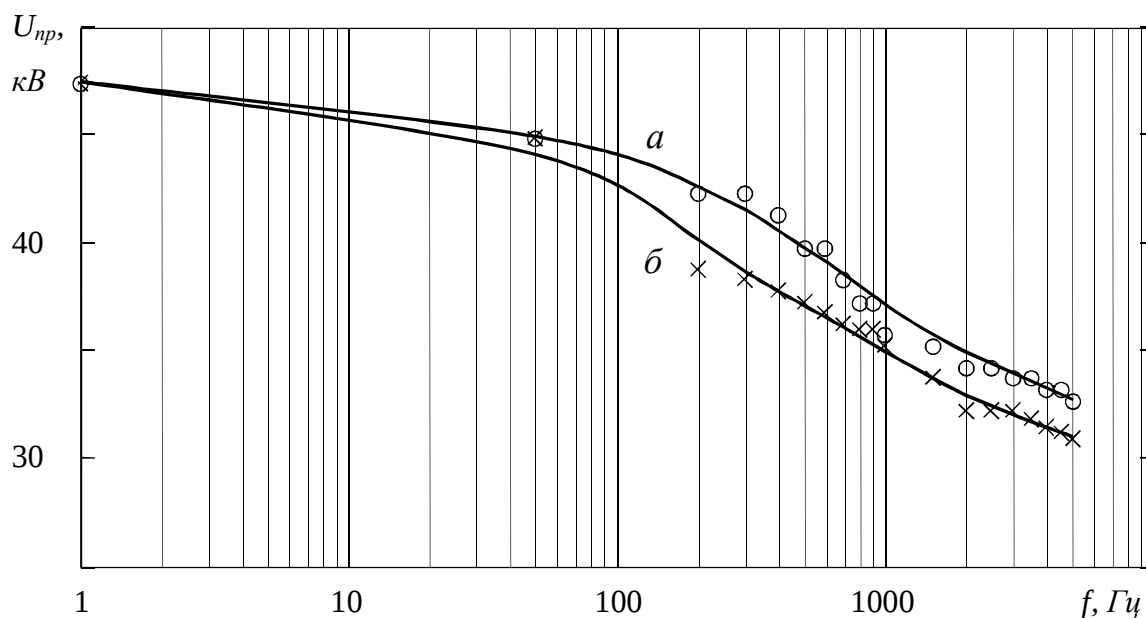


Рисунок 3.2.4 - Зависимость пробивного напряжения от частоты высокого напряжения для телефонного провода *КСПВ 4х0,12* *а* и проводов *LAN* кабеля *КССПВ UTP 4 Cat. 5e* *б*

Из приведенных зависимостей видно, что частота испытательного напряжения будет оказывать существенное влияние на контроль изоляции. Пробивное постоянное напряжение превышает пробивное напряжение частотой 5 кГц в 3...5 раз. Происходит это по причине увеличения диэлектрических потерь с ростом частоты, как правило, обратно пропорционально величине $\sqrt{f}$ [73]. Результаты экспериментов показывают, что если необходимо обнаруживать несквозные дефекты (содержавшие тонкий слой изоляции), то эффективней это будет делать переменным высокочастотным напряжением. В этом случае понадобится испытательное напряжение со значительно меньшим действующим значением.

Приведенные выше зависимости были сняты при длительных воздействиях на изоляцию проводов, более 5 с. Электроискровой контроль является динамическим со временем приложения напряжения от единиц до сотен миллисекунд. По стандартам BS EN 50356 и Cenelec TC 20 время воздействия может быть и меньше 1 мс, хотя на рынке электроискровые дефектоскопы с таким временем воздействия не встречаются. По ГОСТ 2990 время контроля не может быть менее 2 мс для высокочастотных дефектоскопов и не менее 50 мс для дефектоскопов с высоким напряжением частотой 50 Гц.

С целью исследования динамических свойств изоляции кабельных изделий были сняты зависимости пробивного напряжения от времени воздействия высоким напряжением. Время воздействия выбиралось исходя из практики электроискрового контроля на экструзионных линиях. Воздействующее напряжение – синусоида частотой 3 кГц.

Из приведенных на рисунках 3.2.5-3.2.8 зависимостей видно, что с увеличением времени воздействия на изоляцию высокого напряжения пробивное напряжение снижается по причине увеличения в ней диэлектрических потерь. Это в свою очередь говорит о том, что при выборе величины испытательного напряжения мало учитывать материал и толщину

изоляции необходимо также учитывать и скорость работы экструзионной линии. На кабельных предприятиях принято считать, что электроискровой контроль напряжением частотой 50 Гц более достоверны, нежели испытания повешенной частотой (сотни герц, единицы килогерц). В особо ответственных случаях стараются использовать высоковольтные испытатели с частотой контролирующего напряжения 50 Гц. Если обратиться к зависимостям пробивного напряжения от частоты для изоляции кабельных изделий, рисунки 3.2.2 -3.2.4, то можно увидеть, что с ростом частоты пробивное напряжение уменьшается. В свою очередь это означает, что при том же испытательном напряжении достоверность контроля высокочастотным напряжением должна быть выше достоверности контроля напряжением 50 Гц. Качество электродного узла, которое также влияет на достоверность контроля, с ростом частоты только улучшается, так как увеличивается корона вокруг контролируемого кабеля или провода. Как зарубежные, так и российские стандарты привязываются в первую очередь к количеству периодов испытательного напряжения, а не к длительности воздействия. Ряд зарубежных стандартов устанавливают количество периодов равное 2.5, 3 или значительно реже 5, без ограничения по времени. В российском стандарте ГОСТ 2990-78 требования к высокочастотным испытаниям сводятся к приложению напряжения не менее 3-х периодов и одновременно к времени не менее 2 мс, для электроискрового контроля напряжением частотой 50 Гц время приложения должно быть не менее 50 мс, то есть не менее 2.5 периодов. Более высокая достоверность контроля напряжением частотой 50 Гц обеспечивается большей длительностью приложенного напряжения. Для выравнивания качества контроля необходимо, что бы испытательное напряжение при высокочастотных испытаниях было несколько выше, чем при испытаниях на 50 Гц, что, к сожалению, ГОСТ 2990-78 и ГОСТ 23286-78 не учитывают. Вероятно по этой причине в стандартах BS EN 50356 и Cenelec TC 20 величины испытательных напряжений высокой частоты выше величин напряжений 50 Гц на 1 кВ

действующего значения во всем диапазоне толщин изоляций и испытательных напряжений. Это еще один момент, который требует учета в действующем российском стандарте ГОСТ 2990-78.

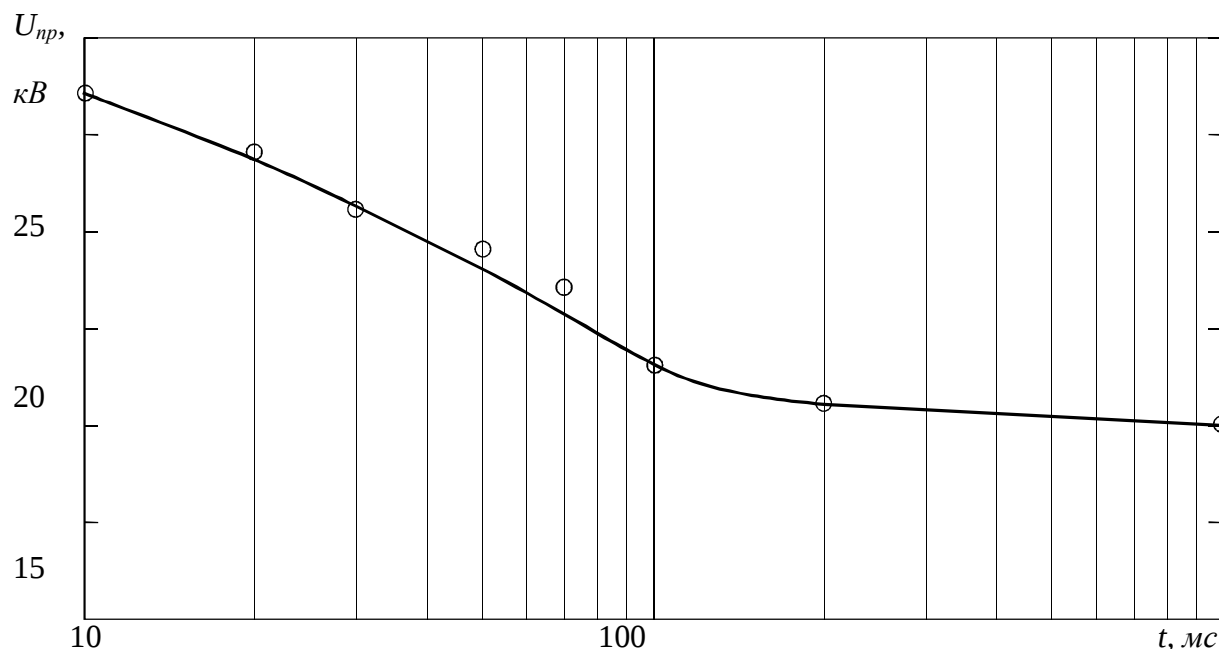


Рисунок 3.2.5 - Зависимость пробивного напряжения от времени приложения испытательного напряжения для изоляции из поливинилхлоридного пластика провода телефонного кабеля *TСВ 20х2х0,5*.

В подтверждение возможности контроля постоянным напряжением были проведены эксперименты по выявлению дефектов в изоляции нескольких типов проводов. На рисунках 3.2.9-3.2.11 приводятся результаты контроля проводов кабеля связи *КСПВ 4х0,12*, проводов *LAN* кабеля *КССПВ UTP 4 Cat. 5e* и монтажных проводов *НВ1 1х1,8* с электродным узлом типа "бусинковая цепочка". Такая форма электродного узла является наиболее распространенной при электроискровом технологическом контроле и применяется в более чем 90 % случаях. Данная конструкция электродного узла рекомендована стандартом [27,32,150].

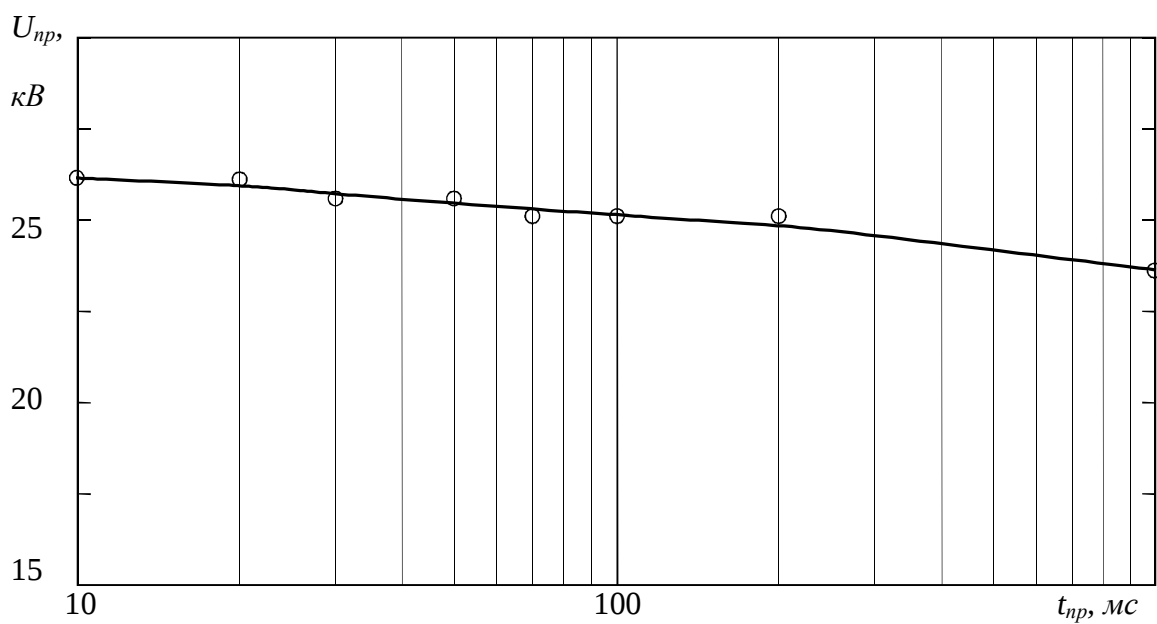


Рисунок 3.2.6 - Зависимость пробивного напряжения от времени приложения испытательного напряжения для полиэтиленовой изоляции проводов LAN кабеля *KCCPB UTP 4 Cat. 5e*

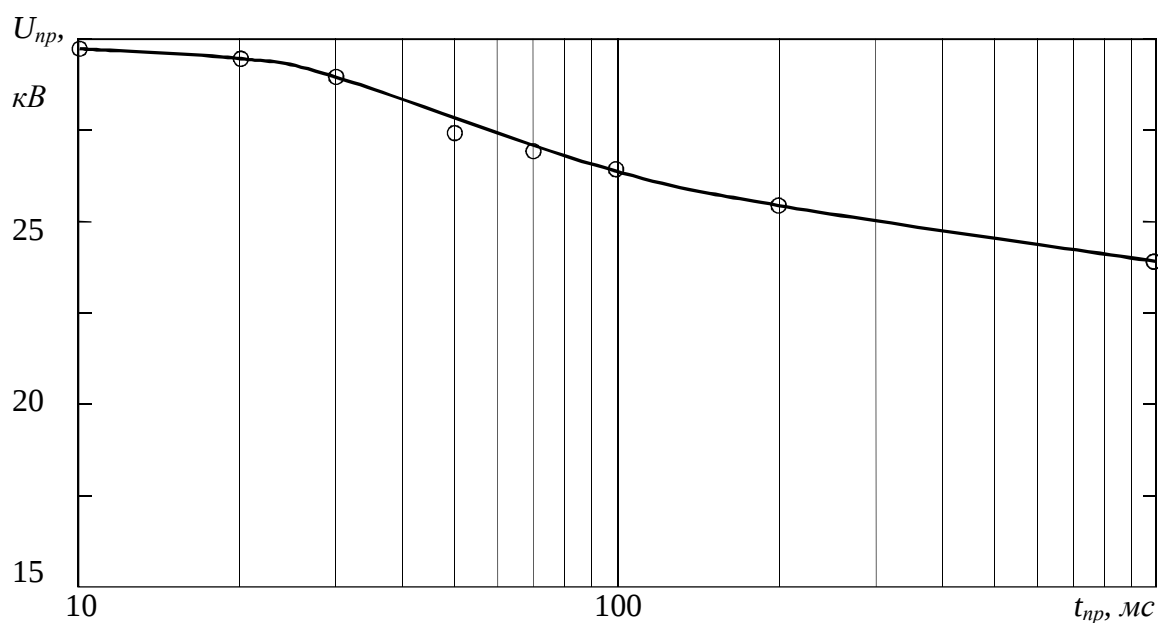


Рисунок 3.2.7 - Зависимость пробивного напряжения от времени приложения испытательного напряжения для полиэтиленовой изоляции телефонного провода *KCPB 4x0,12*

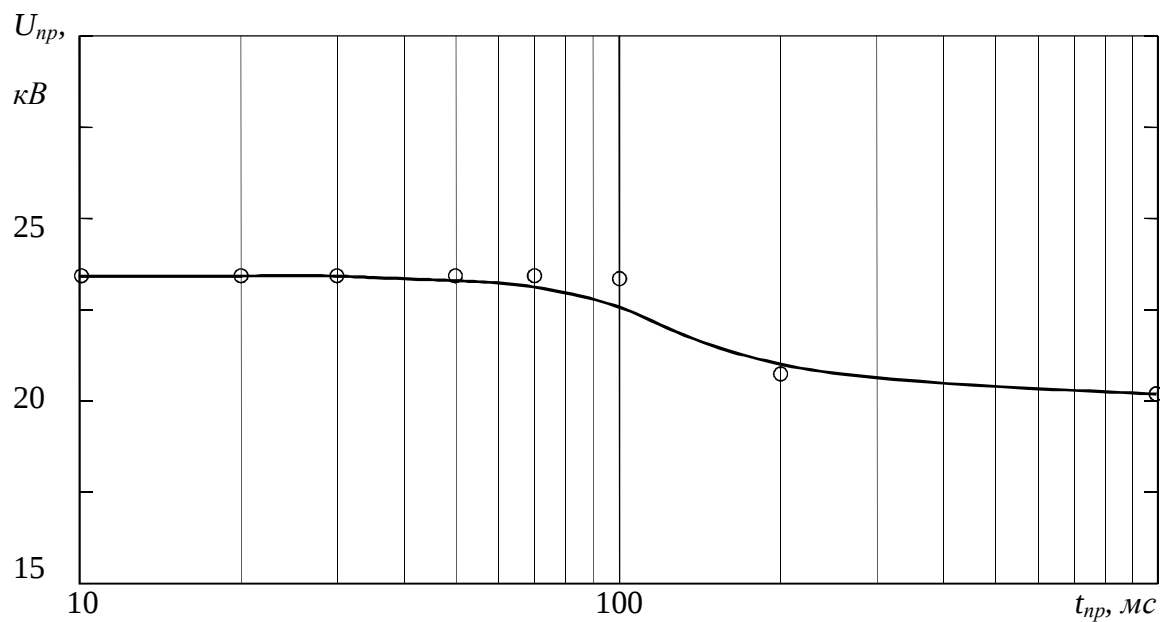


Рисунок 3.2.8 - Зависимость пробивного напряжения от времени приложения испытательного напряжения для провода с фторопластовой изоляцией *МГТФ 1х0,07*

Длина электродного узла составляла $l_{узда}=150$ мм, время нахождения

контролируемого участка изоляции в электродном узле $t=10$ мс, а скорость движения провода $v=900$ м/мин. Дефектный участок изоляции каждого провода пропусклся через электродный узел 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 для каждого вида испытаний отдельно и была максимально возможной, с которой при прохождении бездефектного участка изоляции через электродный узел в количестве 100 раз не происходило ни одного ложного срабатывания. При малых испытательных напряжениях, когда качество электродного узла оказывает существенное влияние на

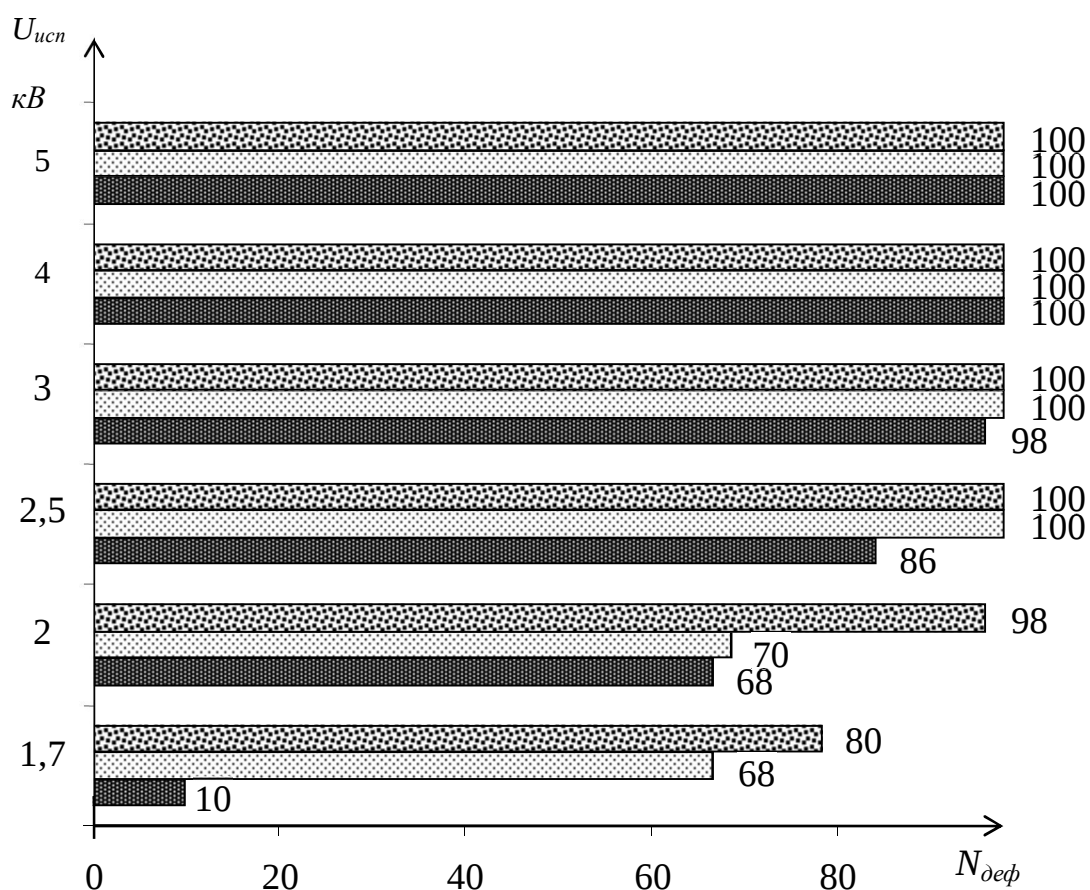


Рисунок 3.2.9 - Статистика контроля проводов кабеля связи *КСПВ 4х0,12* переменным высокочастотным напряжением (ряд ▨), переменным напряжением частотой 50 Гц (ряд ▤) и постоянным напряжением (ряд ■)

достоверность контроля, положение дефектного участка относительно оси движения провода изменялось при каждом проходе. Это необходимо было для снижения влияния положения дефекта относительно бусинок электродного узла на результаты эксперимента. Конструкция электродного узла и положение испытуемого провода в нем показана на рисунке 3.2.12. На рисунках 3.2.9-3.2.11 по осям ординат отложены величины испытательного напряжения, а по осям абсцисс количество зафиксированных дефектов.

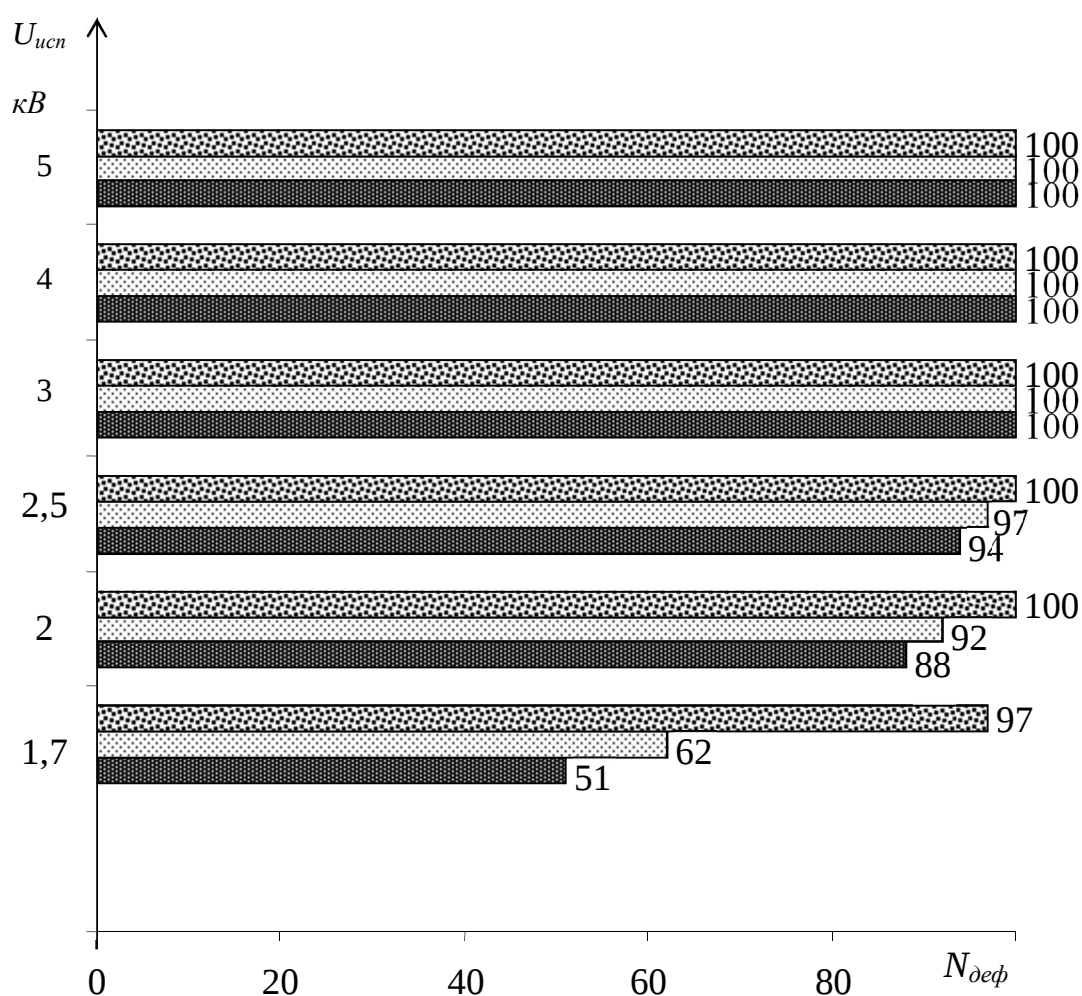


Рисунок 3.2.10 - Статистика контроля проводов LAN кабеля КССПВ UTP 4 Cat. 5e переменным высокочастотным напряжением (ряд ) , переменным напряжением частотой 50 Гц (ряд ) и постоянным напряжением (ряд )

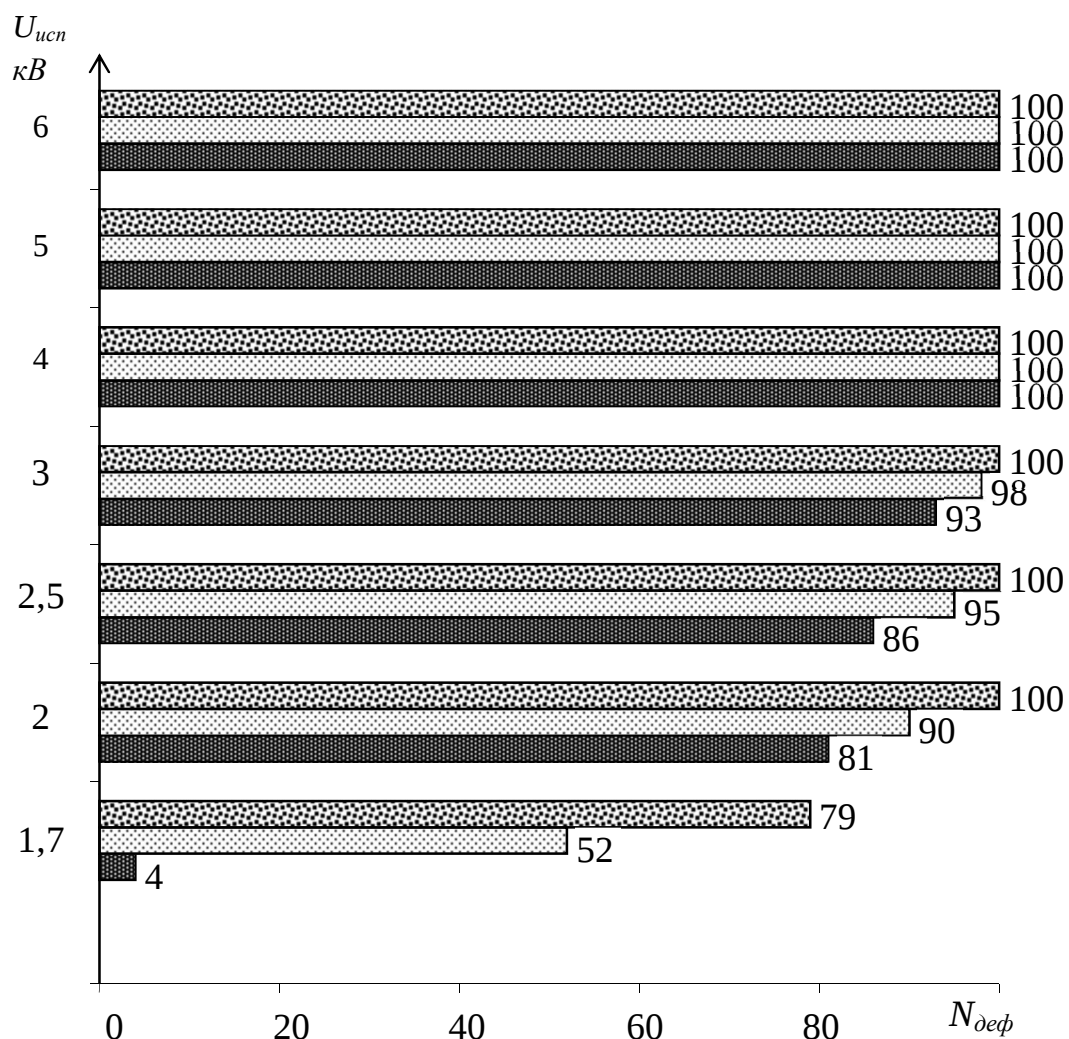


Рисунок 3.2.11 - Статистика контроля монтажных проводов *НВ1* $1 \times 1,8$ переменным высокочастотным напряжением (ряд ) , переменным напряжением частотой 50 Гц (ряд ) и постоянным напряжением (ряд )

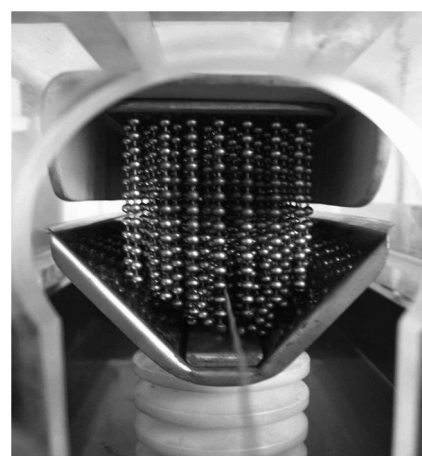


Рисунок 3.2.12 - Конструкция электродного узла и положение контролируемого провода в нем

В таблице 3.2.1 приводятся значения испытательных напряжений в соответствии со стандартами ГОСТ 23286 и BS 5099. Отличия требований стандартов заключается не только в величинах испытательных напряжений, но и в их зависимости от формы и частоты напряжений и типа изоляции. В стандарте ГОСТ 23286 нет зависимости величины испытательного напряжения от его формы и частоты, но есть разделение на резиновую и пластмассовую изоляцию. В ГОСТ 23286 указываются амплитудные значения испытательных напряжений. В стандарте BS 5099 нет разделения по типам изоляции, но присутствует разделение по форме и частоте испытательного напряжения. В BS 5099 указываются действующие значения испытательных напряжений.

Таблица 3.2.1 - Значения испытательных напряжений для проводов кабелей *КСПВ 4x0,12*, *КССПВ UTP 4 Cat. 5e* и *НВ1 1x1,8*.

Вид испытательного напряжения	Величина испытательного напряжения, кВ (действующее значение)					
	провод <i>КСПВ 4x0,12</i> толщина изоляции 0,23 мм		провод <i>КССПВ UTP 4 Cat. 5e</i> толщина изоляции 0,2 мм		провод <i>НВ1 1x1,8</i> толщина изоляции 0,55 мм	
	ГОСТ 23286	BS 5099	ГОСТ 23286	BS 5099	ГОСТ 23286	BS 5099
Переменное напряжение 3 кГц	3,54 (5 ампл.)	4	2,83 (4 ампл.)	4	7,78 (11 ампл.)	7
Переменное напряжение 50 Гц		3		3		6
Постоянное напряжение	-	5	-	5	-	9

Из приведенных на рисунках 3.2.9-3.2.11 диаграмм видно, что при величинах напряжений, указанных в BS 5099 и даже несколько ниже, контроль постоянным напряжением не уступают по достоверности контролю переменным напряжением частотой 50 Гц и 3000 Гц. Однако при снижении испытательного напряжения достоверность контроля постоянным напряжением уменьшается раньше. Происходит это в первую очередь по

причине ухудшения контакта элементов электродного узла с поверхностью контролируемой изоляции. В подтверждении этого проведен эксперимент, в ходе которого определялось влияние положения контролируемого провода в электродном узле на величину пробивного напряжения дефектного участка изоляции. Контроль проводился для постоянного напряжения и переменного синусоидальной формы и частотой 3 кГц. Рассматривалось два варианта расположения цепочного электрода по отношению к дефекту изоляции, показанных на рисунке 3.2.13. Наихудший - *а* и наилучший вариант *б*. В экспериментах использовался монтажный провод *НВ1 1х1,8* с толщиной изоляции 0,55 мм.

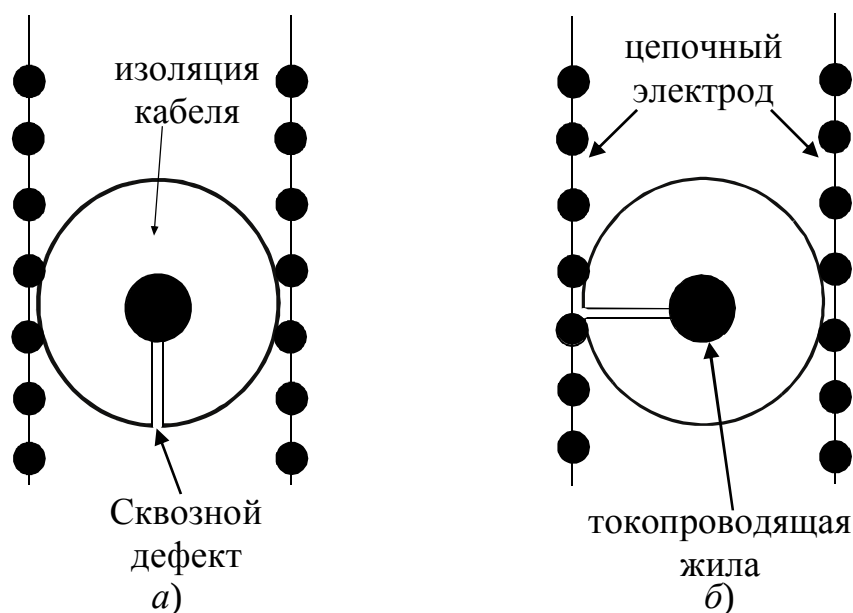


Рисунок 3.2.13 - Варианты расположения цепочного электрода по отношению к дефекту изоляции

Результаты экспериментов приведены в таблице 3.2.2.

Таблица 3.2.2 - Результаты экспериментов по определению влияния положения дефекта в электродном узле на пробивное напряжение

Форма испытательного напряжения	Величина пробивного напряжения, кВ	
	вариант <i>а</i>	вариант <i>б</i>
Синус, 3 кГц	2,5	1,5
Постоянное	3,5	1,9

Из приведенных в таблице 3.2.2 результатов экспериментов видно, что контакт элементов электродного узла с поверхностью изоляции на низких постоянных испытательных напряжениях будет хуже, чем на низких испытательных напряжениях высокой частоты. Происходит это по той причине, что на высокой частоте более интенсивно образуются поверхностные разряды, которые способствуют лучшему распределению потенциала по поверхности изоляции и обеспечивает более однородное поле вокруг контролируемого провода. При испытательных напряжениях свыше 3,5 кВ качество электродного узла для данного провода на переменном и постоянном напряжениях будет одинаковой. Эти эксперименты объясняют причину более раннего снижения достоверности контроля качества изоляции постоянным напряжением по сравнению с контролем синусоидальным напряжением частотой 3 кГц, (рисунки 3.2.9-3.2.11). Этот факт накладывает ограничения на контроль постоянным напряжением при малых величинах испытательных напряжений. Если обратиться к зарубежному опыту, то можно увидеть, что в стандарте BS5099 величины испытательных напряжений для высокочастотного напряжения синусоидальной формы задаются в диапазоне от 4 до 20 кВ действующего значения, а для постоянного напряжения от 5 до 38 кВ. Причем начальные значения испытательных напряжений соответствуют одной толщине изоляции.

Для обеспечения надежного контроля величина постоянного испытательного напряжения должна быть выше величины переменного напряжения на 2..3 кВ. Из экспериментальных зависимостей пробивных напряжений от частоты для проводов кабеля *КСПВ 4х0.12*, кабеля *КССПВ UTP 4* и *НВ1 1х1.8*, приведенных на рисунках 3.2.2 и 3.2.4, видно, что это можно делать без опасения произвести пробой бездефектной изоляции. Однако возникает вопрос: как повышение испытательного напряжения скажется на качестве изоляции провода, даже если пробой не произошел? Основным параметром изоляции, определяющим ее изоляционные свойства, является сопротивление, как правило, приведенное к единице длины.

Необходимо выяснить приводят ли многократные испытания бездефектной изоляции к резкому снижению ее сопротивления. Для этого была экспериментально снята зависимость сопротивления изоляции кабеля от величины испытательного напряжения для провода телефонного кабеля *ТСВ 20х2х0,5*. Зависимость приведена на рисунке 3.2.14. Испытания проводились на участках кабеля длиной 2 метра напряжением частотой 50 Гц. Испытательное напряжение изменялось от минимального к максимальному. Время приложения напряжения составляло 3...5 секунд. Испытания

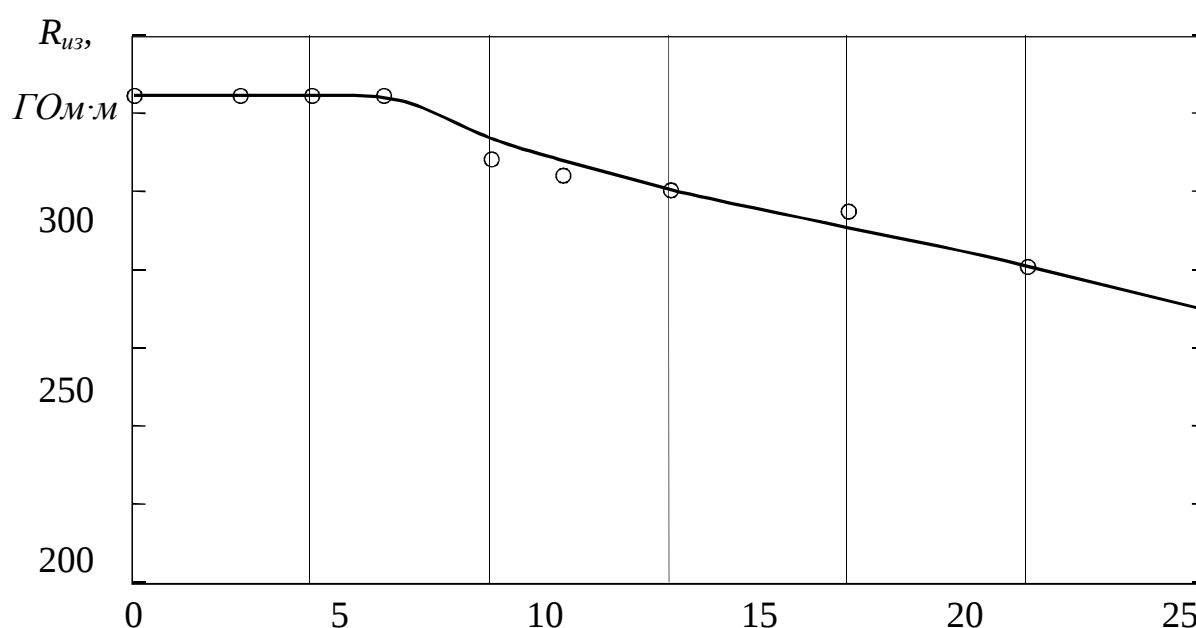


Рисунок 3.2.14 - Зависимость сопротивления изоляции от величины испытательного напряжения для провода телефонного кабеля *ТСВ 20х2х0,5*.

проводилось и с марками кабеля *КССПВ UTP 4 Cat. 5e* и *НВ1 1х1,8*. Однако достоверно удалось установить лишь то, что при всех величинах испытательных напряжений в плоть до пробоя сопротивление изоляции было выше 2 $ГОм \cdot м$ при паспортной величине не менее 6 $ГОм \cdot м$.

Для проводов кабеля *ТСВ 20х2х0,5* испытательное напряжение по ГОСТ 23286-78 составляет $U_{исн}=5$ кВ, амплитудного значения. Сопротивление изоляции не менее 95 $ГОм \cdot м$. Из приведенной зависимости

видно, что данный провод имеет запас по испытательному напряжению минимум 2...3 кВ до 7...8 кВ. Дальнейшее увеличение испытательного напряжения приводит к снижению сопротивления изоляции, то есть к ухудшению ее качества. Вывод заключается в том, что для контроля изоляции ряда проводов можно использовать постоянное напряжение, превышающее переменное испытательное напряжение на 2...3 кВ, чтобы обеспечить хорошее качество электродного узла. Однако еще большее увеличение испытательного напряжения может привести к снижению качества изоляции и это обстоятельство необходимо учитывать при разработке методики контроля.

Еще одно отличие контроля переменным высокочастотным и постоянным напряжениями заключается в требованиях к заземлению жилы контролируемого кабельного изделия. Изготавливаемый кабель или провод может иметь дефект не только изоляции, но и дефект токоведущей жилы (обрыв). Внешне провод или кабель с таким дефектом не отличается от бездефектного и удерживается на экструзионной линии за счет изоляции или других элементов конструкции кабеля. Хотя такого рода дефект встречается крайне редко, вероятность его появления на несколько порядков ниже вероятности появления дефекта изоляции, тем не менее, его влияние необходимо учесть.

Жила контролируемого кабеля или провода заземлена технологически через отдающий барабан. При обрыве жилы в начале линии теряется прямой контакт с точкой заземления. Если испытательное напряжение переменное высокочастотное, то заземление обеспечивается за счет высокой емкости между жилой контролируемого кабеля и технологическим оборудованием. Особенно большой вклад вносит в этот процесс охлаждающая ванна, наполненная водой. Ее протяженность составляет десятки метров. Емкость между жилой и точкой заземления на этой длине составляет единицы - десятки нФ, что при частоте 3 кГц составляет реактивное сопротивление единицы - десятки кОм. Емкость изоляции, приходящейся на длину

электродного узла, составляет десятки, гораздо реже сотни пикофарад. По этой причине даже при обрыве жилы контролируемого кабеля, кабель остается заземленным с удовлетворительным для контроля и безопасности персонала качеством. При постоянном испытательном напряжении эффект заземления через емкость изоляции кабеля будет отсутствовать, что при обрыве жилы приведет к невозможности контроля протяженного участка кабеля. Этот недостаток при контроле постоянным напряжением легко устраним, если заземлять жилу не только технологически на отдающем барабане, но и на приемнике, тем более, эта процедура, согласно ГОСТ 2990-90, является обязательной, но на производстве почти всегда игнорируется из-за сложности подключения.

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 испытательного напряжения и относительно невысокой его амплитудой. 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 1х0,12 (4 кВ), НВ4 1х0,20 (6 кВ) и МГШВ 1х0,35 (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 3.2.15 приведены результаты экспериментов.

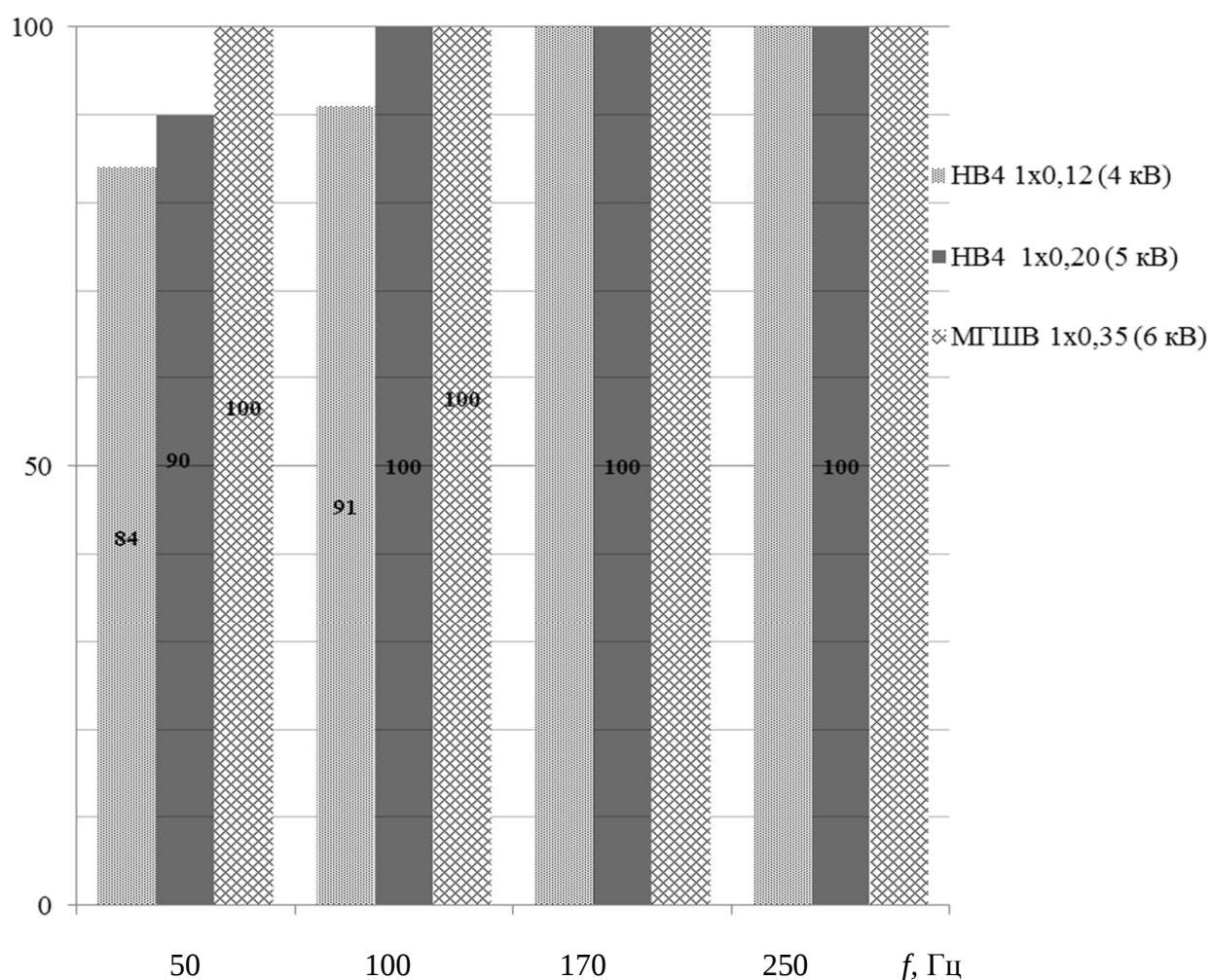


Рисунок 3.2.15 – Вероятность обнаружения сквозных дефектов импульсным напряжением различной частоты

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 низкого 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.

3.3 Исследование возможности обнаружение дефектов по уровню частичных разрядов

Газовые включения в изоляционных слоях кабельных изделий в процессе контроля высоким напряжением будут являться источником частичных разрядов. **Частичными разрядами (ЧР)** называют разрядные процессы в изоляции, которые развиваются под действием приложенного напряжения и распространяются лишь на часть изоляционного промежутка[122-125,127-132].

Задача данного раздела диссертации определить возможность обнаружения дефектов с помощью контроля величины заряда ЧР. Фактором, снижающим достоверность контроля по величине заряда ЧР, будет являться наличие поверхностных разрядов, прежде всего, в местах контакта высоковольтного электрода испытателя с поверхностью испытываемой изоляции.

На рисунке 3.3.1 показан пример расположения дефекта в изоляционном слое и его схема замещения.

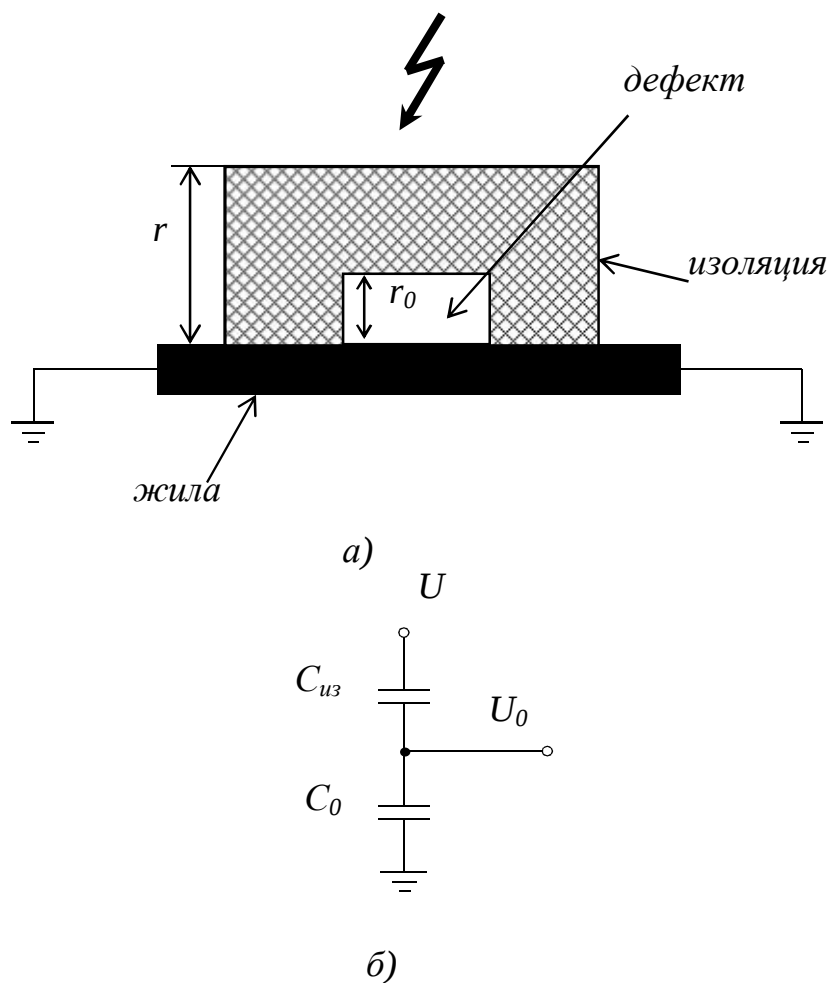


Рисунок 3.3.1. Пример расположения дефекта в изоляционном слое а) и электрическая схема замещения б)

Пользуясь известными методами расчета подобных схем [132] определим значение напряжения на участке дефекта U_0 . При отсутствии частичных разрядов

$$U_0 = \frac{U}{1 + \frac{r - r_0}{r_0 \varepsilon_r}} \quad (3.3.1)$$

где U – испытательное напряжение, r – радиальная толщина изоляции, r_0 – размер дефекта вдоль приложения испытательного напряжения, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции. Относительная

диэлектрическая проницаемость дефекта, для упрощения, принята за единицу, так как дефект заполняется, как правило, воздухом.

Выражение (3.3.1) справедливо для диэлектрика, находящимся в однородном электрическом поле. Как правило, поле в изоляции не однородно. При этом напряжение U_0 зависит еще от места расположения газового включения. Наименьшее значение напряжения U_0 имеет место, если дефект находится в области наибольших напряженностей [132]. В этом случае

$$U_0 = \frac{U}{K_n \left(1 + \frac{r - r_0}{r_0 \varepsilon_r}\right)} \quad (3.3.2)$$

где: K_n – коэффициент неоднородности электрического поля в диэлектрике, равный отношению максимальной напряженности E_{max} к средней E_{cp} в диэлектрике.

Расчеты и анализ номенклатуры показывают, что для кабельных изделий с рабочим напряжением не более 3 кВ, а именно они подвергаются электроискровому контролю, коэффициент неоднородности не превышает $K_n=1,5$.

Чтобы определить возможность обнаружения дефектов изоляции по уровню частичных разрядов (ЧР) необходимо на ряде конкретных примеров сравнить уровень ЧР от поверхностных разрядов с уровнем ЧР от дефектов и рассмотреть методы селекции. Схема эксперимента приведена на рисунке 3.3.2. Где Электродный узел «ЭУ-30/150», генератор сигналов Tabor WW5061, усилитель мощности Volta PA-1200 и «Тр-1.03» высоковольтный трансформатор. Рабочий диапазон частот высоковольтного генератора составляет 50...10000 Гц, амплитуда напряжения 0,1...30 кВ, мощность 500 Вт, внутреннее сопротивление менее 200 кОм. Напряжение измерялось согласованной парой, состоящей из осциллографического делителя Textronix P6015A и цифрового осциллографа LeCroy WJ314.

Уровень частичных разрядов измерялся в соответствии с действующим ГОСТ 20074-83 «ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ. Метод измерения характеристик частичных разрядов».

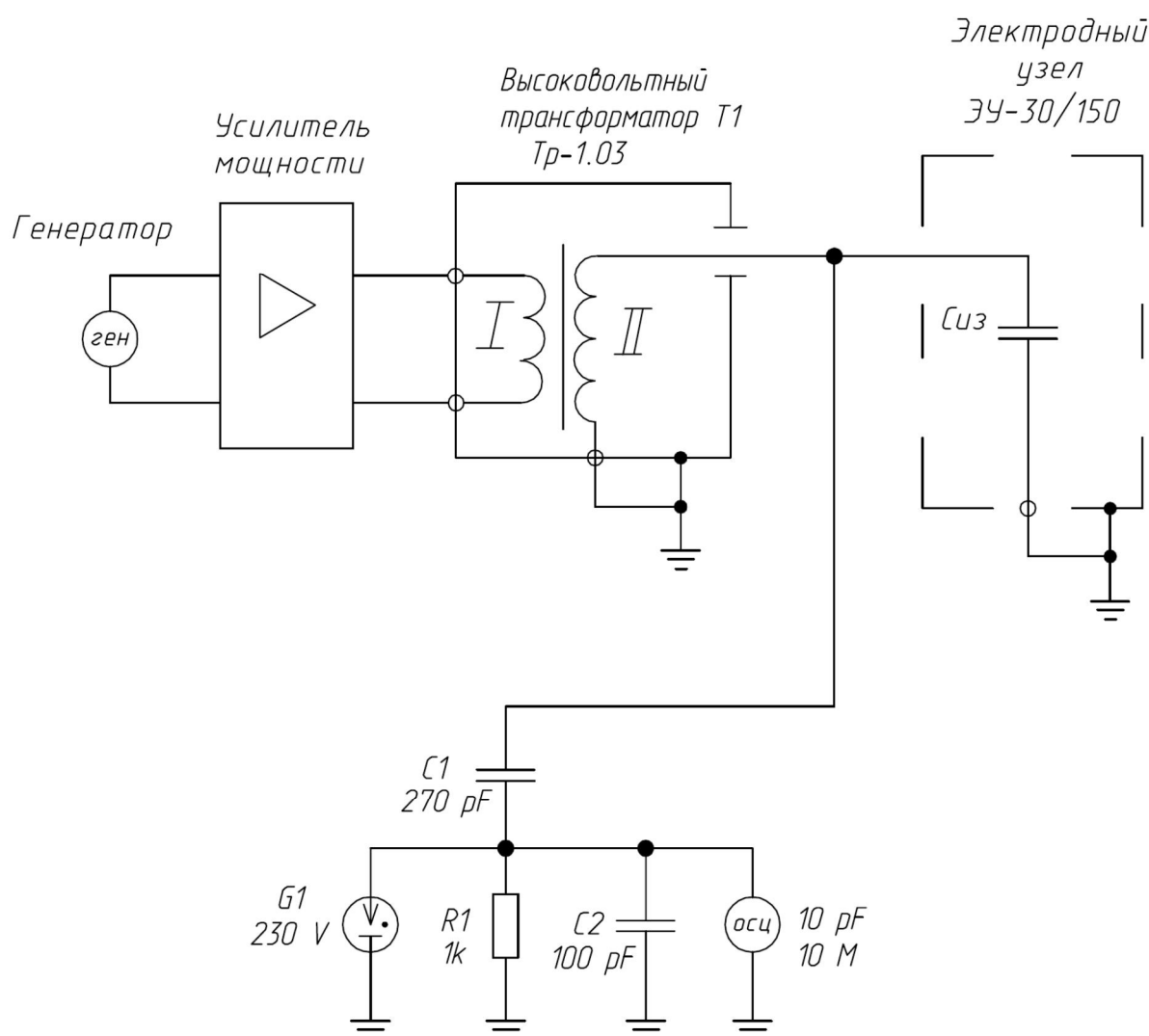


Рисунок 3.3.2. Схема измерения уровня частичных и поверхностных разрядов

Полоса пропускания полосового фильтра, образованного элементами $C1R1C2R_{осц}C_{осц}$ составляет $(0,3 \div 2)$ МГц. Коэффициент передачи в полосе пропускания составляет $\kappa_n = 0,5$. При отсутствии контролируемого кабельного изделия в зоне испытаний уровень поверхностных разрядов пренебрежительно мал.

Электродный узел «ЭУ-30/150» выполнен по классической схеме, состоящей из шариковых цепей из нержавеющей стали. Диаметр шариков 3,2

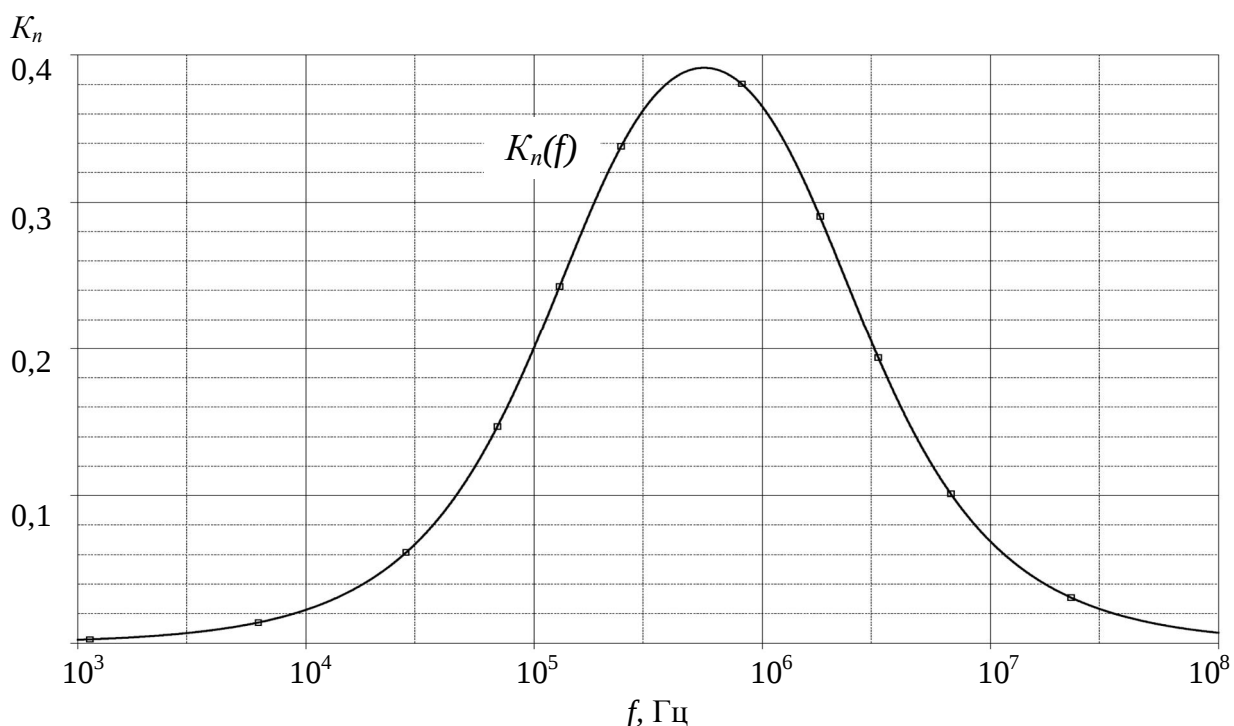


Рисунок 3.3.3. Амплитудно- частотная характеристика полосового фильтра мм. Данная конструкция электродных узлов стала фактически стандартом в высоковольтных испытателях изоляции кабельных изделий и используется в более чем 90% случаев [32,150-158].

На рисунке 3.3.4 приведена фотография электродного узла в процессе контроля. К поверхности кабеля приложено испытательное напряжение амплитудой 18 кВ. На поверхности кабеля видны поверхностные разряды.

На рисунке 3.3.5 приведены осциллограммы напряжений на выходе фильтра (схема в соответствии с рисунком 3.3.2).

Суммарная емкость электродного узла по отношению к точке заземления составила около 4,8 пФ. Измерения проводились RCL- метром Е7-22. С учетом коэффициента передачи полосового фильтра максимальная интенсивность поверхностных разрядов составила не более 100 пКл

При введение объекта контроля в область испытаний неоднородность электрического поля существенно возрастает и интенсивность поверхностных разрядов и величина заряда.

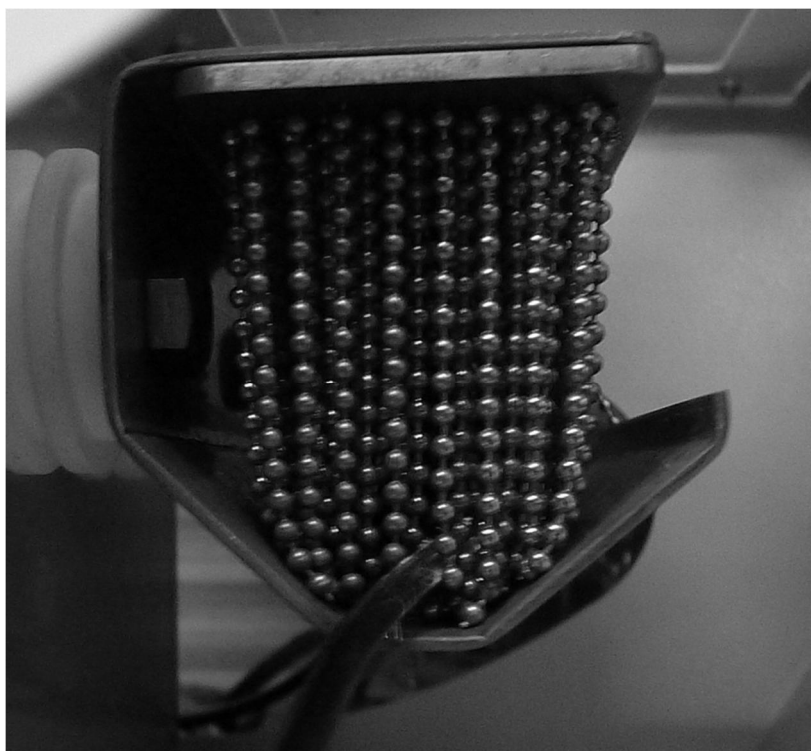


Рисунок 3.3.4. Фотография электродного узла в процессе контроля

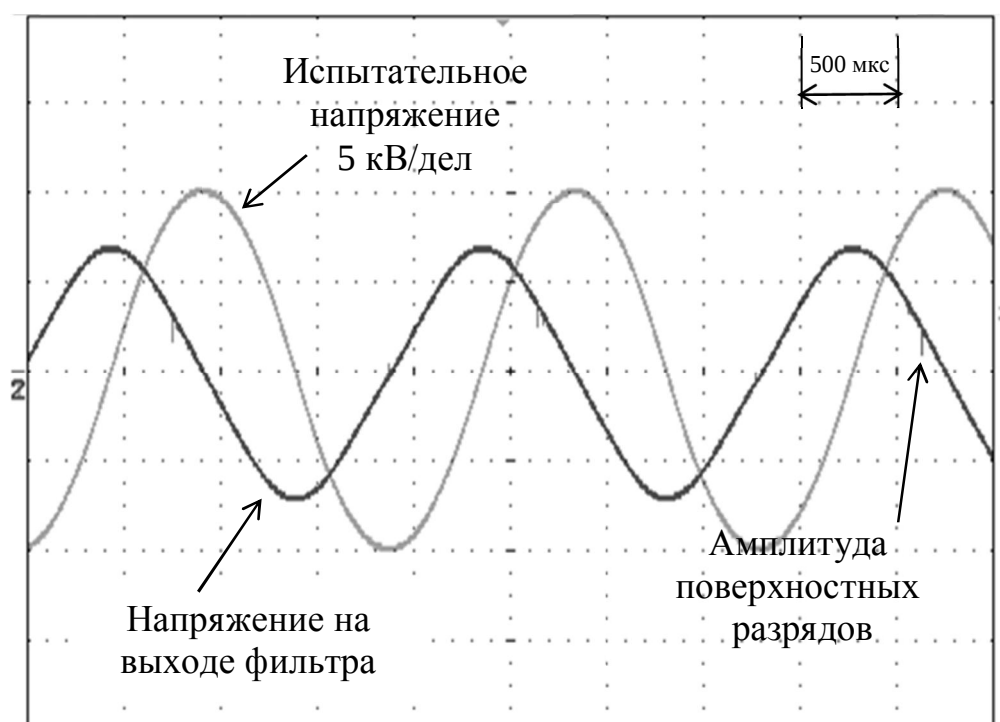


Рисунок 3.3.5. Осциллограмма испытательного напряжения и напряжения поверхностных разрядов при отсутствии объекта контроля в зоне испытаний

На рисунке 3.3.6 приведена осциллограмма напряжений при

испытании монтажного провода НВ-1-0,2 (провод с медной луженой жилой в изоляции из поливинилхлоридного пластика). Внешний диаметр $D = 1,3$ мм, диаметр токопроводящей жилы $d = 0,6$ мм, радиальная толщина изоляции $r = 0,35$ мм. В соответствии с действующим ГОСТ 23286-78 «КАБЕЛИ, ПРОВОДА И ШНУРЫ. Нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний напряжением» амплитуда испытательного напряжения должна быть не менее 7 кВ. Испытания проводились по методике в соответствии с действующим ГОСТ 2990-78 «КАБЕЛИ, ПРОВОДА И ШНУРЫ. Испытания напряжением».

На рисунке 3.3.7 приведена осциллограмма напряжений при испытании монтажного провода МГШВ-0,35 (провод с медной луженой жилой с изоляцией из поливинилхлоридного пластика 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 испытательного напряжения должна быть не менее 10 кВ.

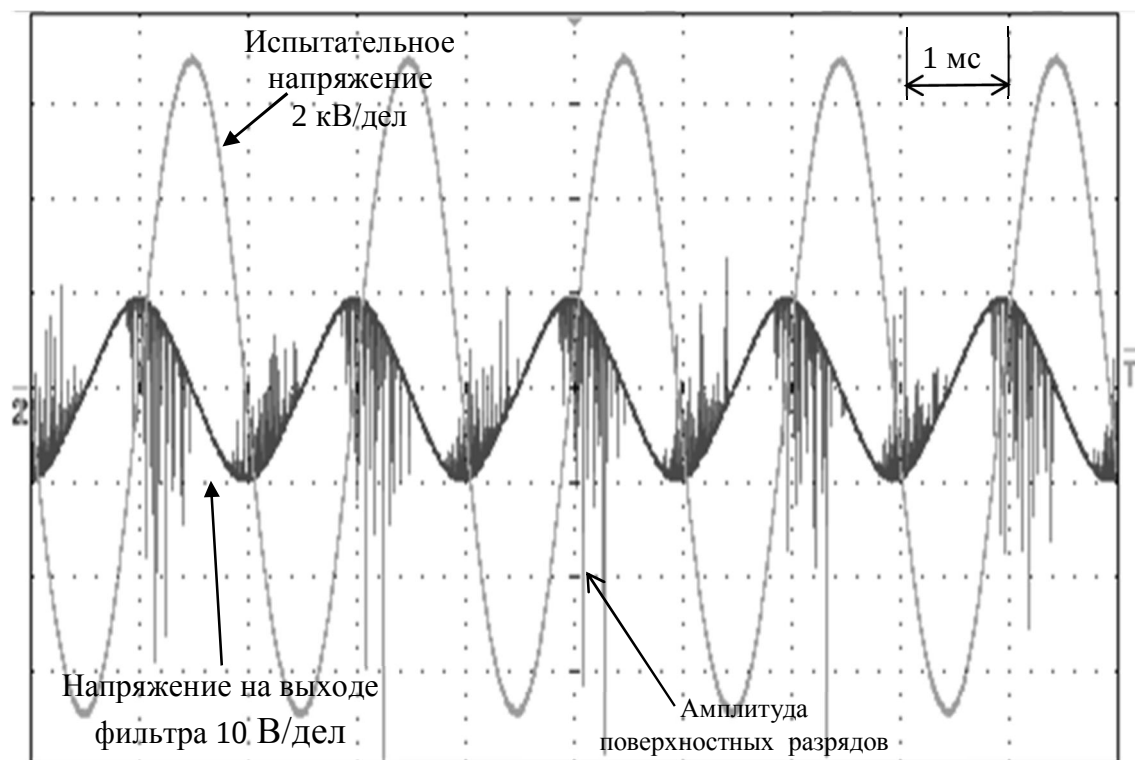


Рисунок 3.3.6. Осциллограмма напряжений при испытании монтажного провода НВ-1

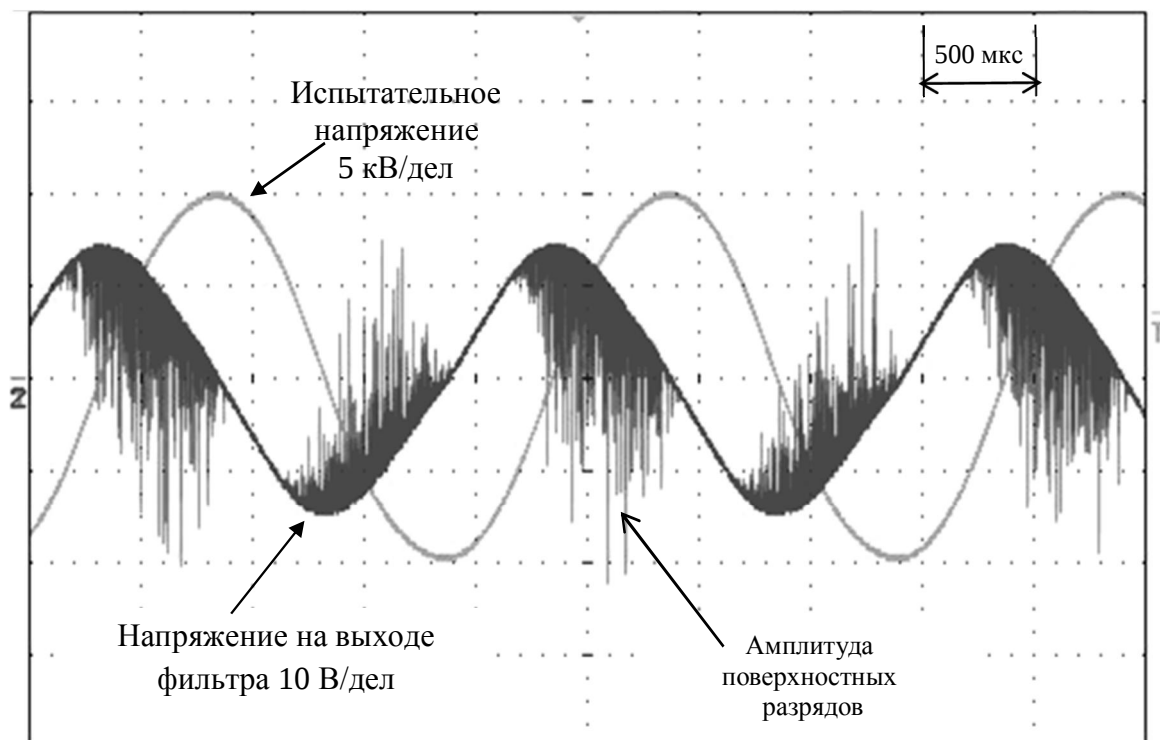


Рисунок 3.3.7. Осциллограмма напряжений при испытании монтажного провода МГШВ-0,35

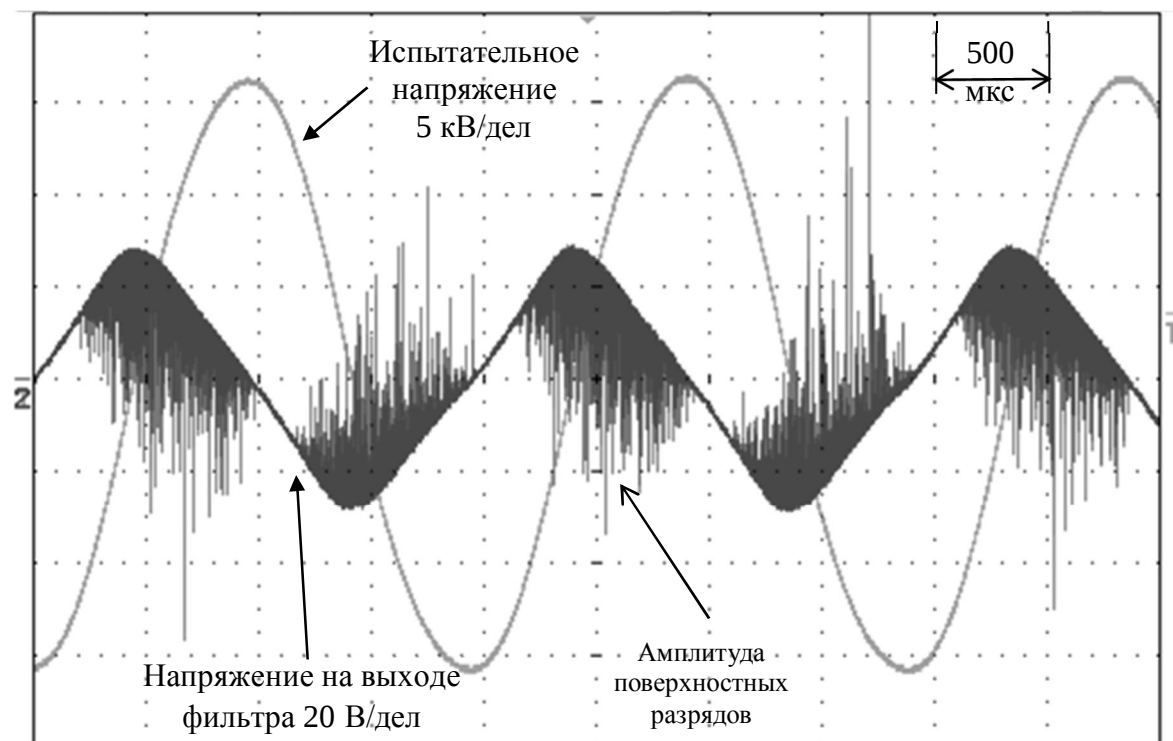


Рисунок 3.3.8. Осциллограмма напряжений при испытании монтажного провода ПВКВ-6

На рисунке 3.3.8 приведена осциллограмма напряжений при испытании

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 испытательного напряжения должна быть не менее 18 кВ.

Из приведенных осциллограмм видно, что с ростом испытательного напряжения увеличивается уровень и интенсивность поверхностных разрядов. Уровень поверхностных разрядов рассчитывался по формуле:

$$q = \frac{1}{k_n} U_k C_k \quad (3.3.2)$$

где: k_n – коэффициент передачи фильтра на частоте следования поверхностных разрядов, U_k – наибольшая амплитуда поверхностных разрядов, C_k – электрическая емкость участка кабеля, находящегося в зоне контроля.

Для провода НВ-1 уровень поверхностных разрядов 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 стороной размером 100 мкм в соответствии с формулой 3.1 при соответствующих уровнях испытательных напряжений составит:

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

Таким образом, фоновый уровень поверхностных разрядов превышает уровень частичных разрядов от дефекта размером 100 мкм более чем в 1000 раз. В ряде работ, посвященных контролю состояния изоляции по уровню частичных разрядов, отмечается, что уровень помех, как правило, находится в диапазоне $(0,1 \div 1)$ нКл [161].

Существуют методы частотного разделения сигналов от частичных и поверхностных разрядов [131,134-137]. Скорость протекания поверхностных

разрядов 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 короны составила 1 нКл. На рисунке 3.3.9 представлена осциллограмма импульса коронного разряда на выходе фильтра 100 МГц. Схема фильтра приведена на рисунке 3.3.10, а его АЧХ на рисунке 3.3.11. Увеличение частоты среза до 100 МГц привело к существенному снижению сигнала от поверхностных разрядов, в 10 раз. Тем не менее, этого недостаточно для выделения на их фоне сигналов от частичных разрядов 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, например «РЧРВ-1» [162].

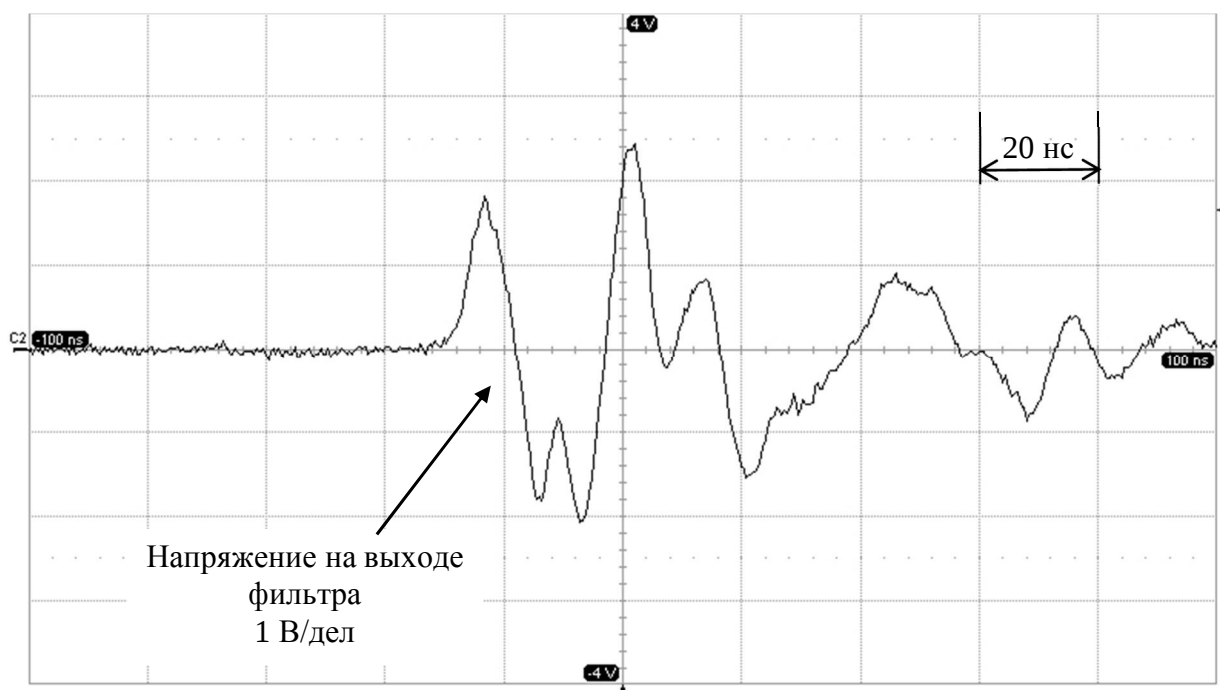


Рисунок 3.3.9. Осциллограмма импульса коронного разряда на выходе фильтра 100 МГц

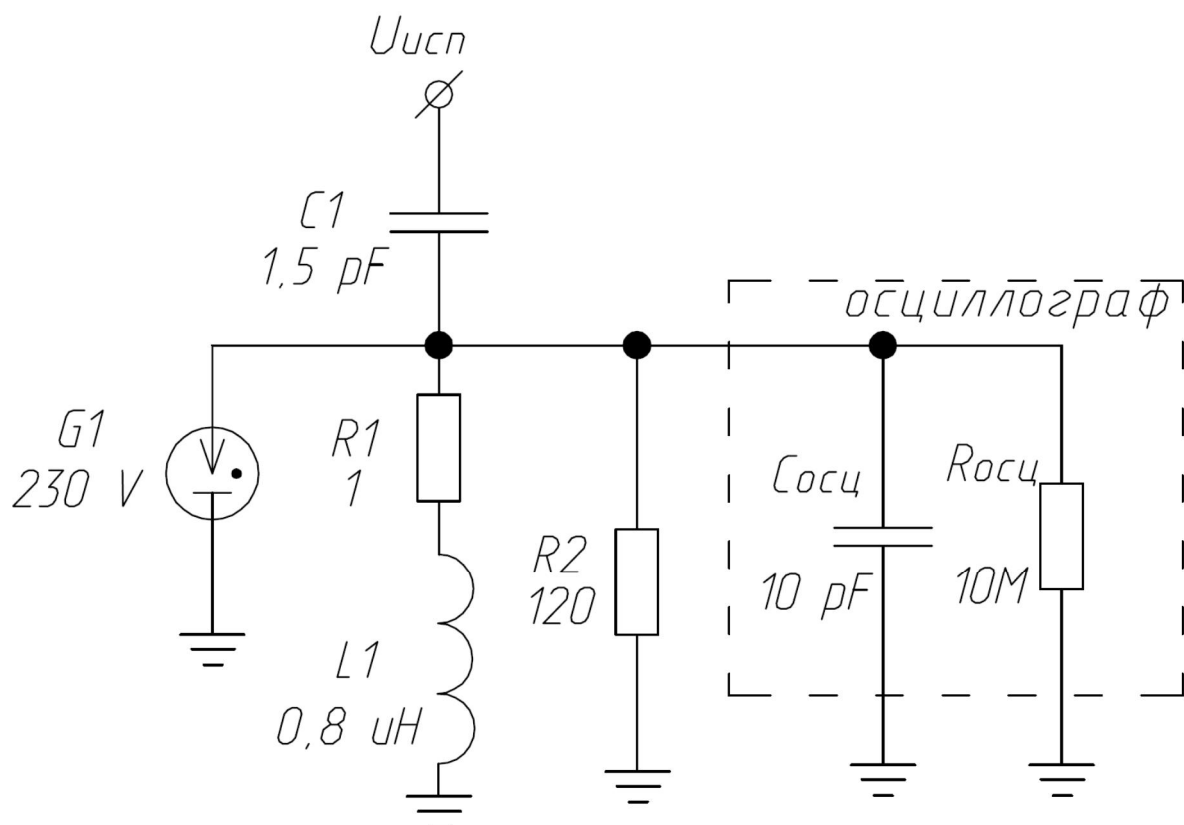


Рисунок 3.3.10. Схема измерения уровня частичных и поверхностных разрядов через фильтр 100 МГц

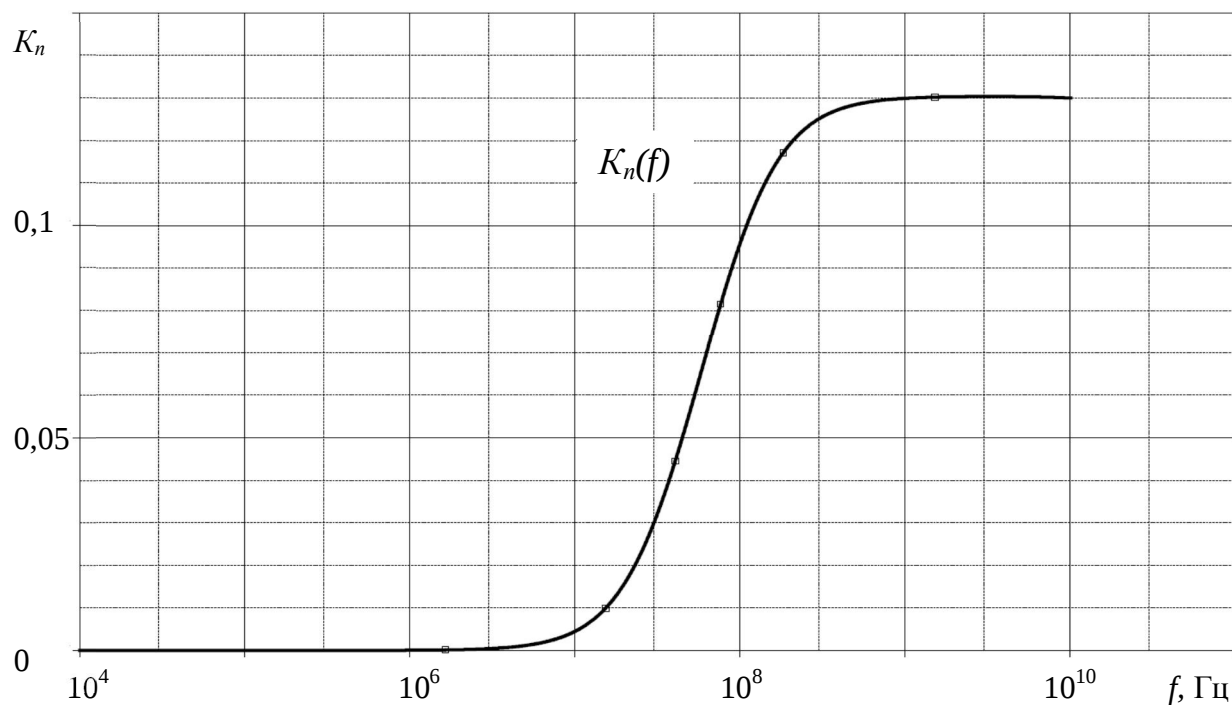


Рисунок 3.3.11. Амплитудно- частотная характеристика фильтра с нижней частотой среза 100 МГц

Разделение сигналов по их интенсивности также затруднительно, так как интенсивность частичных разрядов в изоляции контролируется на временном интервале в единицы, десятки минут, а испытание изоляции кабельных изделий на технологической линии происходит в течении единиц, десятков миллисекунд.

Исследованию также подверглась зависимость величины поверхностных разрядов от частоты. В качестве электродного узла использовался шариково- цепочный электрод. Контролировался провод МГШВ-0,35 напряжением 10 кВ амплитудного значения синусоидальной формы. Диапазон частот выбран исходя из практики контроля и требований нормативных документов. Замеры проводились, в том числе и при контроле постоянным напряжением. Частота среза фильтра высоких частот при измерениях уровня поверхностных разрядов составляла 100 МГц. Результаты экспериментов приведены на рисунке 3.3.12.

Из приведенных зависимостей видно, что наименьший уровень фоновых поверхностных разрядов имеется при контроле постоянным

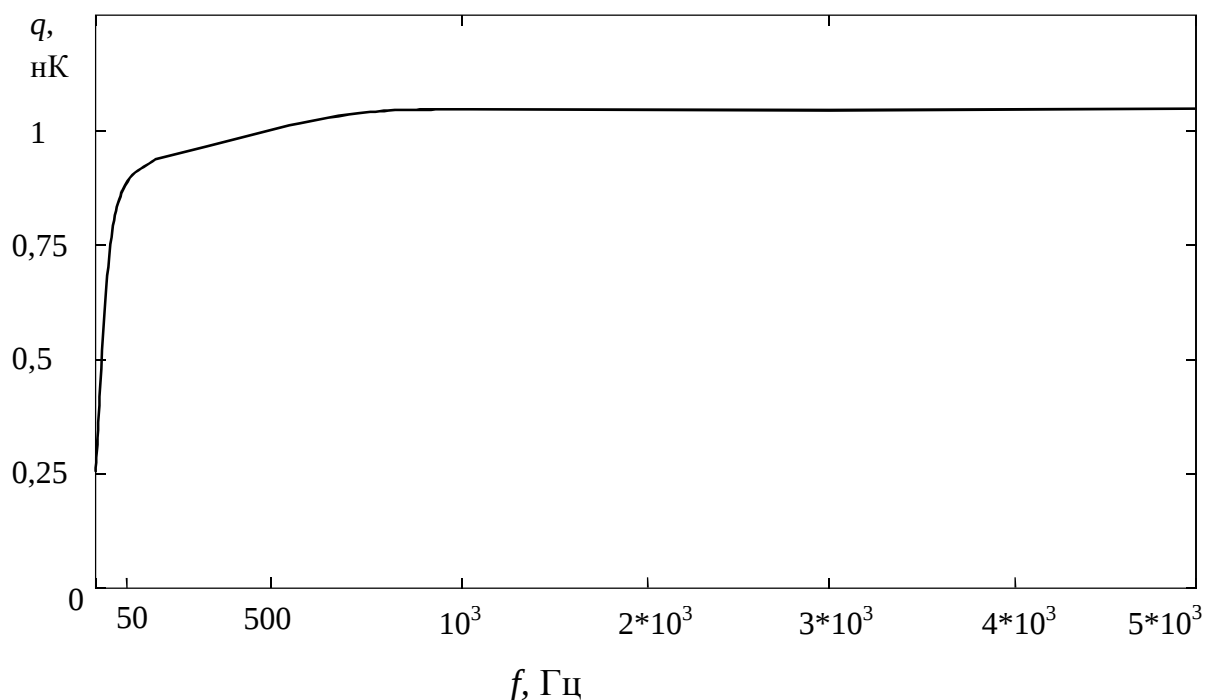


Рисунок 3.3.12. Зависимость величины поверхностных разрядов от частоты испытательного напряжения

высоким напряжением. С ростом частоты уровень поверхностных разрядов возрастает. При частоте контролирующего напряжения свыше 1 кГц рост уровня поверхностных разрядов прекращается. Наибольшее соотношение уровня поверхностных разрядов на высокой частоте по сравнению с постоянным напряжением равно 4. Уровень фона при контроле высоким постоянным напряжением составил $q_{кр}=250$ пКл при длине электрода 150 мм. Используя формулы 3.3.1 и 3.3.2 определим минимальный размер дефекта, имеющий уровень частичных разрядов не менее $q_{чр}=250$ пКл. Размер дефекта кубической формы составит $r_{def}=0,25$ мм при величине испытательного напряжения $U_{исп}=10$ кВ и радиальной толщине изоляции $r_{из}=0,5$ мм. Такой уровень сигнала еще не позволит надежно разделять сигналы частичных разрядов в дефектах изоляции от фоновых шумов от поверхностных разрядов. При этом радиальная толщина изоляции снижается вдвое. Пробивное напряжение изоляции из ПВХ пластиката толщиной 0,25 мм составит (6..10) кВ [96,98]. Соответственно дефект, еще не достигнув размера, необходимого для надежного обнаружения по уровню частичных разрядов приведет к электрическому пробоев дефектного участка изоляции.

Исследованию также подверглась зависимость величины поверхностных разрядов от формы электрода. На рисунке 3.3.13 приведена конструкция бесконтактного электрода для контроля постоянным напряжением.

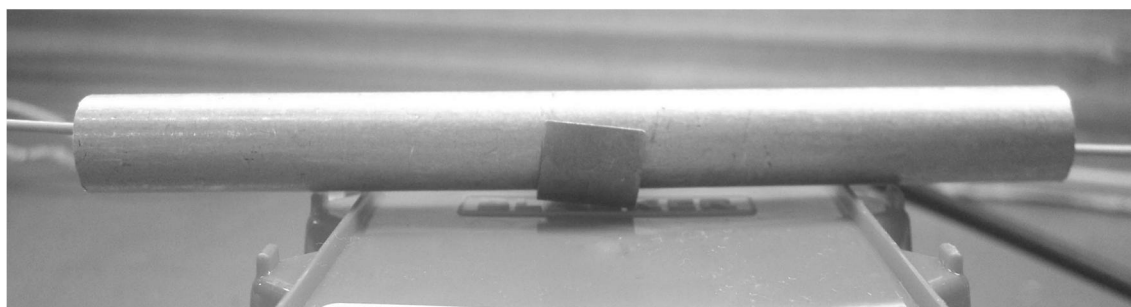


Рисунок 3.3.13. Бесконтактный электрод на постоянном напряжении

Конструкция электрода и параметры величина испытательного напряжения выбирались в соответствии с действующим стандартом МЭК 62230. Внутренний диаметр электрода составил 12 мм, длина 150 мм, испытательное напряжение 10 кВ постоянного тока. Испытанию подвергался кабель МГШВ-0,35. Уровень фоновых поверхностных разрядов составил $q_{кр}=150$ пКл.

На рисунке 3.3.14 приведена конструкция бесконтактного электрода для контроля переменным напряжением. Расстояние между контактами электрода и поверхностью изоляции составило 2 мм. Амплитуда испытательного напряжения составила 10 кВ при частоте повторения 500 Гц. Форма напряжения синусоида. Для удобства сравнения испытанию подвергался кабель МГШВ-0,35. Уровень фоновых поверхностных разрядов составил $q_{кр}=1230$ пКл.



Рисунок 3.3.14. Бесконтактный электрод на переменном напряжении

Исследования показали, что применение других конструкций электродов, используемых на практике, не привело к существенным изменением уровня фоновых поверхностных разрядов.

Проводились исследования зависимости уровня поверхностных разрядов от длины электрода. Использовались цепочно- шариковый и

бесконтактный трубчатый электроды. Выяснилось, что длина электрода не оказывает существенного влияния на уровень поверхностных разрядов, а лишь на их интенсивность.

3.4 Исследование возможности обнаружение дефектов по изменению ёмкости и мощности диэлектрических потерь

Задача данного раздела диссертации определить возможность обнаружения дефектов с помощью контроля значения ёмкости и/или мощности 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 3.4.1 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.

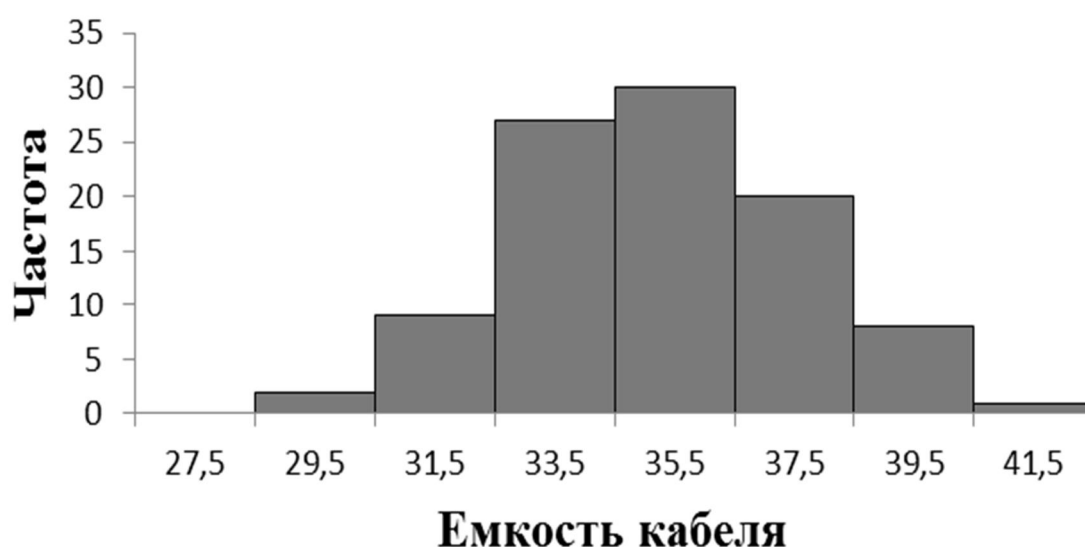


Рисунок 3.4.1. Диаграмма распределения значений погонной емкости для кабеля ПВ-3

Так как распределение емкости – близко к нормальному, то можно воспользоваться правилом 3σ , 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:

Соотношение пробивного напряжения над испытательным составляет $k_U=3..10$ раза. Данное соотношение было определено в разделе 3.1. При анализе коэффициент напряжения k_U был выбран равным максимальным 10. Цель: обеспечение надежного перекрытия с контролем на пробой дефектного участка. Соотношение может изменяться при изменении материала изоляции, конструкции кабельного изделия и особенностей технологического процесса. 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 пробую. Необходимо определить такое изменение геометрии изоляции, которое будет приводить к изменению ее электрической емкости, но не приведет к ее пробую.

На рисунке 3.3.1 показан пример расположения дефекта в изоляционном слое и его схема замещения. Емкость изоляции без дефекта для участка размером r :

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r r^2}{r} = \varepsilon_0 \varepsilon_r r \quad (3.4.1)$$

где: ε_0 – электрическая постоянная, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика изоляции.

Емкость дефекта в области слабых полей:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 r^2}{r_0} \quad (3.4.2)$$

где: r_0 – размер дефекта вдоль приложения испытательного напряжения. Относительная диэлектрическая проницаемость дефекта, для упрощения, принята за единицу, так как дефект заполняется, как правило, воздухом.

Эквивалентная емкость участка с дефектом в области слабых полей:

$$C_\Sigma = \frac{C_{из} \cdot C_0}{C_{из} + C_0} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 r^2}{r + r_0 (\varepsilon_r - 1)} \quad (3.4.3)$$

Коэффициент емкости:

$$K_c = \frac{C}{C_\Sigma} = \frac{r_0}{r} (\varepsilon_r - 1) + 1 \quad (3.4.4)$$

На примере изоляции из ПВХ пластиката при $\varepsilon_r=4$, $k_c \geq 1,3$, $k_U = r/(r-r_0) \geq 10$ из выражения (3.4) получим необходимое требование к размеру дефекта вдоль приложения испытательного напряжения:

$$0,1 \leq \frac{r_0}{r} \leq 0,9 \quad (3.4.5)$$

Напряженность поля в дефекте:

$$E_0 = E_r \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \quad (3.4.6)$$

где: E_r – напряженность поля в диэлектрике.

С учетом того, что контроль проводится при напряженностях близких к напряженности пробоя диэлектрика, соотношение $\varepsilon_r/\varepsilon_0$, как правило,

находиться 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 испытательное 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:

$$C_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r r^2}{r - r_0} \quad (3.4.7)$$

Коэффициент емкости в области сильных полей:

$$K_c = \frac{C}{C_{\Sigma}} = \frac{r}{r - r_0} \quad (3.4.8)$$

На примере изоляции из ПВХ пластиката при $\varepsilon_r=4$ $k_c=1,3$, $k_U=10$ из выражения (3.4.8) получим необходимое требование к размеру дефекта вдоль приложения испытательного напряжения:

$$0,23 \leq \frac{r_0}{r} \leq 0,9 \quad (3.4.9)$$

На рисунке 3.4.2 приведен пример дефектного участка круглого кабеля.

Тип дефекта- локальное утонение длиной l_0 , изменение наружного диаметра кабеля с величины D до величины d_0 .

Емкость изоляции без дефекта для участка кабеля длиной l :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln(D/d_{\text{ж}})} \quad (3.4.11)$$

где: $d_{\text{ж}}$ – диаметр токоведущей жилы.

Емкость дефектного участка кабеля длиной l_0 :

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l_0}{\ln(d_0/d_{\text{ж}})} \quad (3.4.12)$$

где: d_0 – наружный диаметр кабельного изделия на участке утонения.

Соотношение емкостей бездефектного и дефектного участка кабеля одинаковой длины:

$$k_c = \frac{C_0}{C} = \frac{\ln(D/d_{\text{жс}})}{\ln(d_0/d_{\text{жс}})} \quad (3.4.13)$$

При $k_U = \frac{D-d_{\text{жс}}}{d_0-d_{\text{жс}}} \leq 10$ и $k_C \geq 1,3$ система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{\ln(D/d_{\text{жс}})}{\ln(d_0/d_{\text{жс}})} \geq 1,3 \\ \frac{D-d_{\text{жс}}}{d_0-d_{\text{жс}}} \leq 10 \end{cases} \quad (3.4.13)$$

Например, для провода МГШВ-0,35 с диаметром жилы $d_{\text{жс}}=0,6$ 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 $d_{\text{жс}}=0,6$ 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 $d_{\text{жс}}=2,7$ мм и с наружным диаметром $D=4,7$ мм обнаруживаемое утонение будет составлять в диапазоне $2,8 \text{ мм} \leq d_0 \leq 4,2 \text{ мм}$.

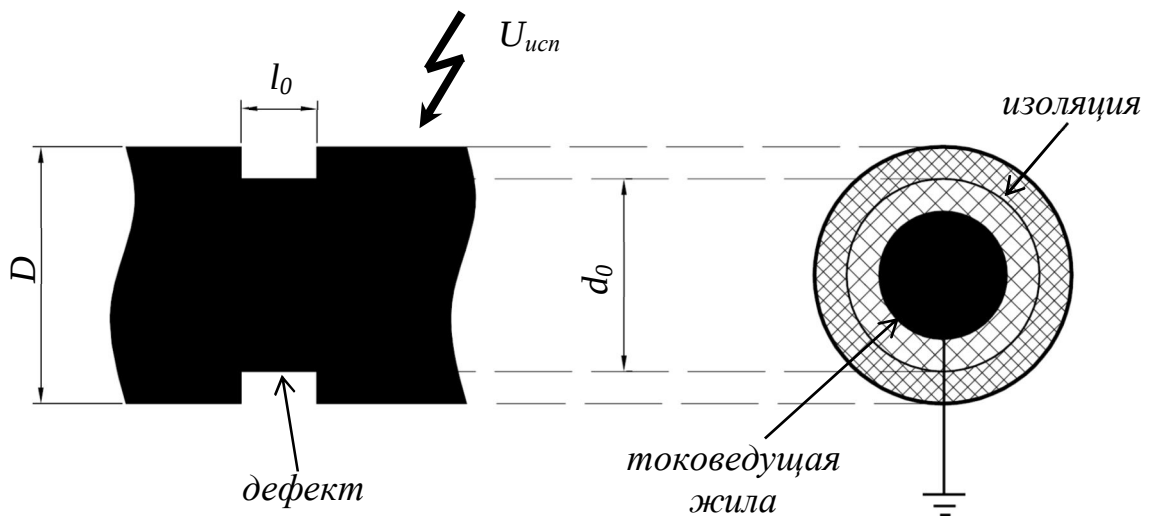


Рисунок 3.4.2. Пример дефекта типа локальное утонение

Указанные выше соотношения соответствуют равным протяженности дефектов вдоль кабельного изделия и длине участка приложения контролирующего напряжения. Рассмотрим возможность обнаружения дефекта изоляции в виде кругового 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:

$$l_{контр} = l_d k_C (\text{при } d_0 = d_{0min}) / k_C \quad (3.4.14)$$

В данном случае $l_{контр}=5,0$ мм.

Из приведенных соотношений видно, что при электроискровом контроле высоким напряжением условия обнаружения дефектов достаточно узкие. 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 десятки 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 ограничения по относительному размеру только снизу, так как увеличения радиальной толщины изоляции не приводит к снижению электрической прочности.

Соотношение емкостей бездефектного и дефектного участка кабеля одинаковой длины:

$$k_c = \frac{C}{C_0} = \frac{\ln(d_0/d_{жс})}{\ln(D/d_{жс})} \quad (3.4.15)$$

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.

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 $d0 \geq 1,64$ 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 $d0 \geq 5,55$ мм.

На экструзионной линии при скоростях 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 $C_{из}=9$ нФ. Электрическая емкость электрода $C_{эл}=5$ пФ. Частота испытательного напряжения $f_{исп}=1$ кГц.

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

На участках с глубиной пореза $\Delta_1=0,4$ мм и $\Delta_1=0,5$ мм происходили электрические пробои изоляции, которые были зафиксированы автоматикой высоковольтного испытателя.

Возможность обнаружения дефектов в изоляции по мощности диэлектрических потерь.

Мощность диэлектрических потерь в диэлектрике [106]:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = E^2 \gamma \quad (3.4.16)$$

Где: E - напряженность, γ - удельная проводимость.

Удельные диэлектрические потери [106]:

$$P_{\gamma d} = \frac{P}{V} = E^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan \delta + E^2 \gamma_a = \quad (3.4.17)$$

Где: V - объем диэлектрика, γ_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 главе 3

1. Размер надежно обнаруживаемых дефектов по наличию электротеплового пробоя составляет для изоляции из ПВХ пластиката 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.
2. 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.
3. 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.

4. 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 пластика 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 пробое участка изоляции.

5. 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 $d_{жс}=0,6$ мм и с наружным диаметром $D=1,3$ мм составляет $0,78 \text{ мм} \leq d_0 \leq 1,3 \text{ мм}$ для локальных утонений. Дефекты меньших размеров не удастся распознать на уровне помех. Дефекты больших размеров приведут электрическому пробое 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 пробое. 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 $d_{жс}=0,6$ 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 $l_{контр}$ 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

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ И АТТЕСТАЦИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

4.1 Обеспечение электробезопасности в электроискровых дефектоскопах

Электроискровые дефектоскопы являются устройствами повышенной опасности. Уровень контролируемых напряжений достигает 30 кВ, а токов 40 мА, в различных их сочетаниях. Уровень коммутируемой реактивной мощности в цепи испытаний 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 быть более безопасного уровня, регламентируемого действующим стандартом. Уменьшение выходной мощности дефектоскопа не является эффективным решением, по причине того, что протекающий ток через изоляцию кабельного изделия носит ярко выраженный реактивный характер. В связи с этим возникает необходимость в создании методов снижения уровня выходного активного тока

электроискровых дефектоскопов изоляции при одновременном обеспечении высокого уровня реактивного тока [19,20,32,110,117].

Схема замещения силового каскада генератора испытательного напряжения электроискрового дефектоскопа представлена на рисунке 4.1.1.

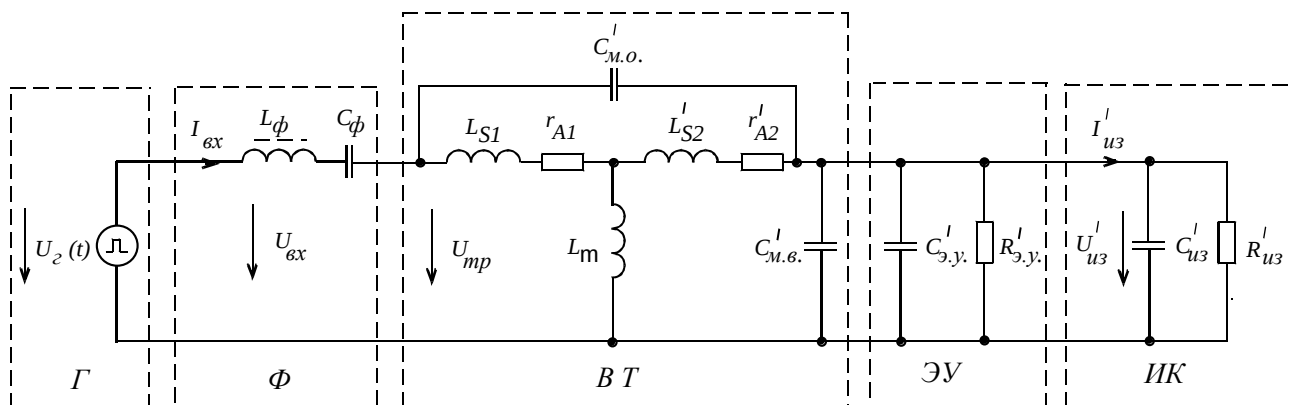


Рисунок 4.1.1 - Схема замещения генератора высокого напряжения электроискрового дефектоскопа
 где Γ - генератор напряжения;
 Φ – согласующий фильтр;
 BT - высоковольтный трансформатор;
 $\mathcal{E}U$ - электрод;
 $ИК$ - испытуемое кабельное изделие.

Переменное напряжение формируется генератором, работающим в ключевом режиме. Для формирования гармонической формы напряжения применяются согласующие фильтры.

Как отмечалось в предыдущих разделах работы, изоляция кабельного изделия в процессе контроля может обладать значительными диэлектрическими потерями. А активное сопротивление изоляции находится в пределах (10^6-10^7) Ом.

Ток через изоляцию кабельного изделия в процессе контроля имеет реактивный характер. При этом емкостной ток может превышать активный в $(10-100)$ раз. Например, для участка кабельного изделия, находящегося в электродном узле электроискрового дефектоскопа, с учетом распределения

напряжения на поверхности контролируемой изоляции, наиболее вероятны следующие значения токов:

- активный (1-5) мА;
- емкостной (5-50) мА.

Высоковольтный трансформатор имеет высокое значение межвитковой емкости и индуктивности рассеяния. В рабочей области частот (50-5000) Гц ток первичной обмотки трансформатора обладает ярко выраженным емкостным характером. В генераторах, работающих в режиме самовозбуждения, высоковольтный трансформатор не вносит фазовых искажений между первичной и вторичной цепями. То есть отсутствует фазовый сдвиг между напряжением в первичной цепи и напряжением во вторичной цепи. То же справедливо и для токов.

Ниже рассмотрено два способа обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала при проведении электроискрового контроля.

Способ защиты по характеру нагрузки высоковольтного генератора

На рисунке 4.1.2 приведена схема замещения выходного каскада электроискрового дефектоскопа [108,110].

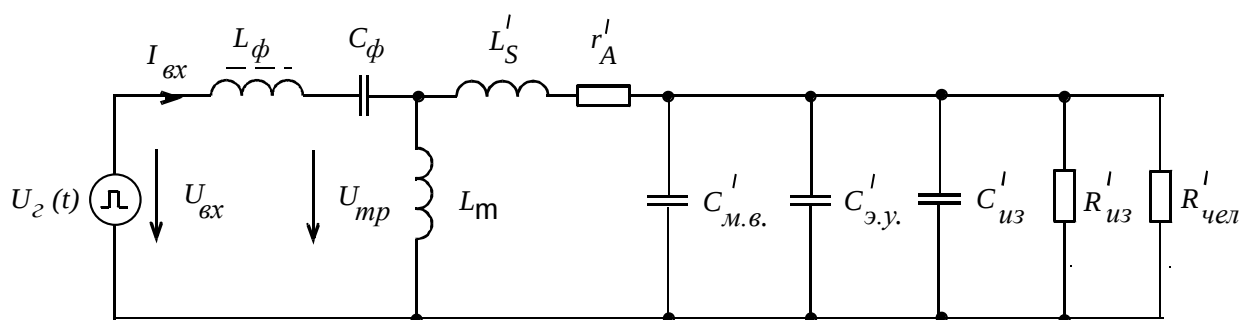


Рисунок 4.1.2 - Схема замещения выходного каскада электроискрового дефектоскопа

Экспериментальные исследования показали, что при изменении параметров контролируемой изоляции (погонных емкости и диэлектрических потерь), а так же при ее пробое характер тока $I_{\text{вх}}$ изменится. Он может быть, в зависимости от режима, активно-индуктивным, либо активно-емкостным.

На рисунке 4.1.3 приведена схема силовой части высокочастотного электроискрового дефектоскопа при пробое дефектного участка или при подключении электрического эквивалента человека под напряжение [108,110]. Сопротивление человека при попадание под действие высокого напряжения составляет не более 1 кОм [165]. В тоже время емкостное сопротивление изоляции контролируемого кабельного изделия находится в пределах единиц мегаом, а активное сопротивление в пределах десятков мегаом. В связи с этим схему замещения выходного каскада электроискрового дефектоскопа при попадании человека под испытательное напряжение можно представить в виде, изображенном на рисунке 4.1.3.

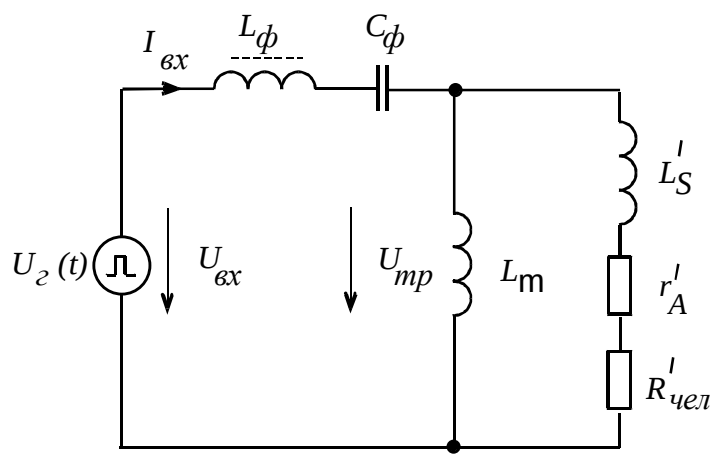


Рисунок 4.1.3 - Схема замещения высокочастотного электроискрового дефектоскопа при попадании человека под высокое испытательное напряжение

При условии, что фильтр $L_\phi \cdot C_\phi$ не вносит фазовых искажений в работу схемы и фазы напряжений U_{ex} и U_{mp} совпадают. В этом случае фазовый сдвиг между I_{ex} и U_{mp} будет равен:

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{Im z_{ex}}{Re z_{ex}} \quad (4.1.3)$$

$$\text{где } \dot{z}_{ex} = \dot{z}_{L_\mu} \Pi(\dot{z}_{L'_S} + r'_a + r'_{чел}) = \frac{j\omega L_\mu \cdot (j\omega L'_S + r'_a + r'_{чел})}{j\omega(L_\mu + L'_S) + r'_a + r'_{чел}} \quad (4.1.2)$$

Для используемых высоковольтных трансформаторов $L_\mu \gg L_S$ [163], а значит $x_{L_\mu} \gg x_{L_S}$. На примере действующего генератора дефектоскопа $x_{L_S} = 12 \text{ Ом}$; $x_{L_\mu} = 380 \text{ Ом}$; $r'_a = 0,15 \text{ Ом}$ и $r'_{чел} = 0,1 \text{ Ом}$. В этом случае сопротивление подключенное к выводам генератора можно упростить до следующего вида:

$$\dot{z}_{ex} = j\omega L'_S + r'_a + r'_{чел} \quad (4.1.4)$$

Фазовый сдвиг:

$$\Delta\varphi = \arctg \left(\frac{\omega L'_S}{r'_a + r'_{чел}} \right) \quad (4.1.5)$$

В соответствии с полученными выражениями и схемой замещения видно, что в режиме, при котором нагрузкой электроискрового дефектоскопа является изоляция кабельного изделия ток I_{ex} опережает напряжение U_{ex} . А при подключении эквивалента человека к высокому испытательному напряжению, ток I_{ex} отстает от напряжения U_{ex} . На основе проведенного анализа можно сделать однозначный вывод о том, что попадание человека под действие испытательного напряжения можно достоверно определять по характеру нагрузки генератора.

Индуктивный характер тока I_{ex} может быть вызван не только попаданием человека под высокое напряжение, но и пробоем дефектного

участка изоляции контролируемого кабельного изделия. По действующим нормативным документам в этом случае контролирующее высокое напряжение должно быть временно снято [24]. По этой причине противоречий в применении описанного способа защиты с алгоритмом работы дефектоскопа не возникает.

На основе предложенного способа предложена структурная схема электроискрового дефектоскопа (Рисунок 4.1.5).

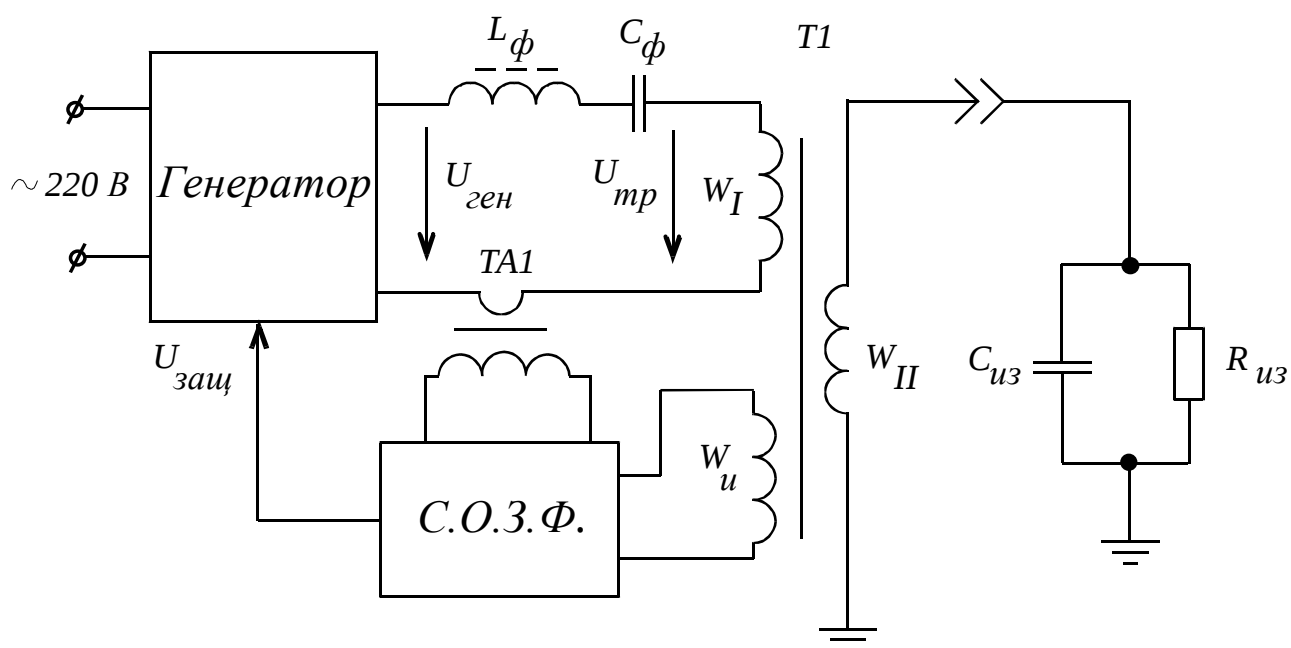


Рисунок 4.1.5 – Функциональная схема силовой части дефектоскопа, обеспечивающая необходимый уровень электробезопасности

Где:

$C_{из}$ - емкость изоляции кабельного изделия;

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

$R_{из}$ - активное сопротивление изоляции кабельного изделия;

TA1 – измерительный трансформатор тока;

$T1$ - высоковольтный трансформатор;

W_I и - первичная обмотка высоковольтного трансформатора;

W_{II} – вторичная обмотка высоковольтного трансформатора

W_u - измерительная обмотка высоковольтного трансформатора.

Далее приведен принцип работы схемы.

Для более достоверного функционирования схемы защиты и увеличения надежности силовой части дефектоскопа может быть использована двухуровневая защита (Рисунок 4.1.6).

Высокий уровень защиты $I_{защ1}$ равен наибольшему значению тока, который должна обеспечивать силовая часть дефектоскопа. Внутренняя схема защиты генератора ограничивает ток первичной обмотки высоковольтного трансформатора на указанном уровне.

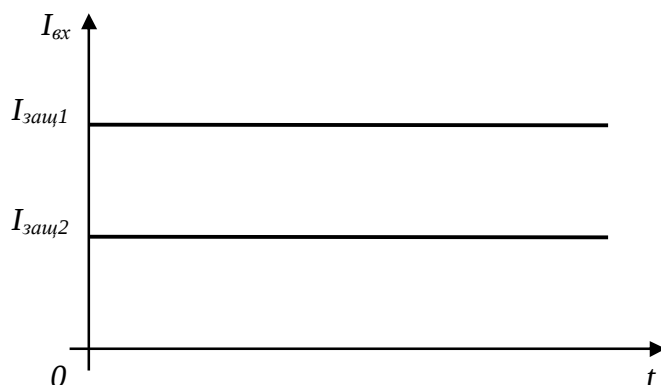


Рисунок 4.1.6 - Токовые уровни защиты электроискрового дефектоскопа

Второй более низкий уровень защиты $I_{защ2}$ равен значению, соответствующему максимальному активному току, пересчитанному в первичную цепь с учетом потерь в трансформаторе и тока намагничивания.

В случае подключения эквивалента человека к испытательному напряжению схема защиты функционирует в следующем порядке. Характер нагрузки по отношению к первичной обмотки высоковольтного трансформатора становится активно- индуктивным. Вследствие этого блок

СОФС вырабатывает управляющий сигнал для генератора. Генератор в зависимости от заложенного в него принципа снижает уровень выходного напряжения либо вовсе прекращает генерацию напряжения.

Диапазон значений тока от 0 до $I_{защ1}$ соответствует активно – емкостному характеру нагрузки, а диапазон значений токов от 0 до $I_{защ2}$ соответствует активно – индуктивному характеру нагрузки.

Технологически не сложно обеспечить условия, при которых индуктивность рассеяния измерительной обмотки W_u относительно обмотки первичной обмотки W_I была минимальной, так как обмотка W_u состоит из небольшого числа витков и может быть намотана совместно с обмоткой W_I .

Входной ток $I_{вх}$ будет отставать от входного напряжения $U_{вх}$ (активно – индуктивный характер) не только при подключении эквивалента человека к выходу дефектоскопа, но и при очень малой, и одновременно очень большой суммарной емкости $C'_{из} + C'_{мв} + C'_{эу}$ (рисунок 4.1.1).

На рисунке 4.1.7 а и б, приведены схемы замещения выходного каскада для крайних случаев $(C'_{из} + C'_{мв} + C'_{эу}) \rightarrow 0$ и $(C'_{из} + C'_{мв} + C'_{эу}) \rightarrow \infty$ соответственно.

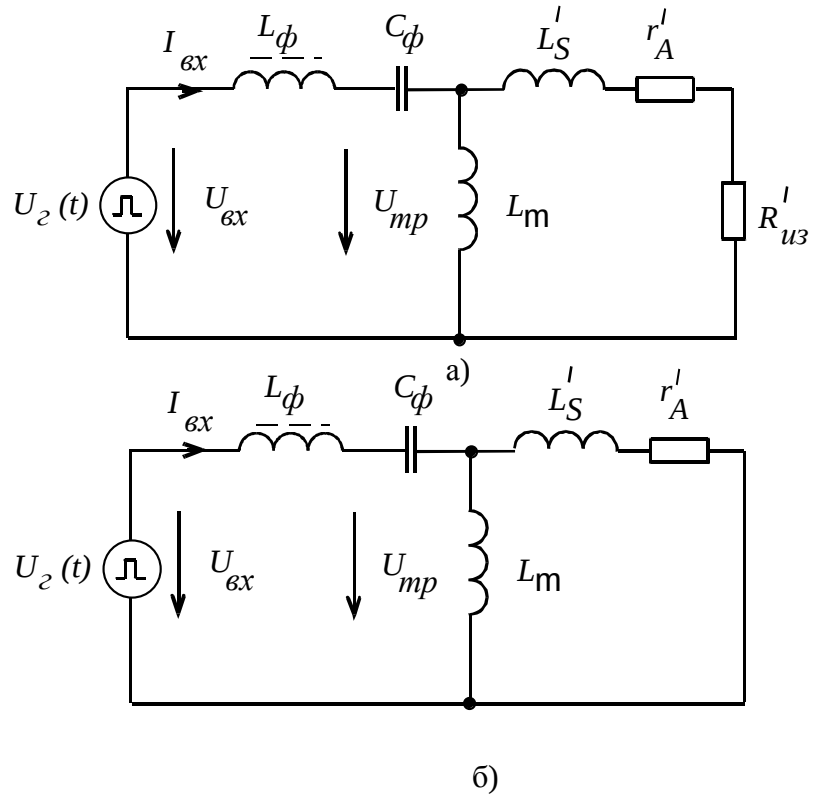


Рисунок 4.1.7. Схема замещения выходного каскада электроискрового дефектоскопа для случаев: *а* - $(C'_{uz} + C'_{мв} + C'_{эу}) \rightarrow 0$; *б* - $(C'_{uz} + C'_{мв} + C'_{эу}) \rightarrow \infty$

При $(C'_{uz} + C'_{мв} + C'_{эу}) \rightarrow 0$ сдвиг фаз между током I_{6x} и напряжением U_{mp} :

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{\omega^2 \cdot L_\mu \cdot L'_S \cdot (L_\mu + L'_S) + L_\mu \cdot (R'_{uz} + r'_a)^2}{\omega \cdot L_\mu \cdot L'_S \cdot (R'_{uz} + r'_a) + \omega \cdot (L_\mu + L'_S) \cdot L_\mu \cdot (R'_{uz} + r'_a)} \quad (4.1.6)$$

При $(C'_{uz} + C'_{мв} + C'_{эу}) \rightarrow \infty$ сдвиг фаз:

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{\omega^2 \cdot L_\mu \cdot L'_S \cdot (L_\mu + L'_S) + L_\mu \cdot (r'_a)^2}{\omega \cdot L_\mu \cdot L'_S \cdot r'_a + \omega \cdot (L_\mu + L'_S) \cdot L_\mu \cdot r'_a} \quad (4.1.7)$$

С учетом того, что суммарное сопротивление фильтра $L_\phi \cdot C_\phi$ на первой гармонике близко к нулю, то в обоих случаях ток I_{6x} будет отставать от напряжения U_{6x} , т.е. нагрузка будет иметь активно – индуктивный характер.

На рисунке 4.1.8 приведена зависимость фазового сдвига между $I_{\text{вх}}$ и $U_{\text{тр}}$ от суммарной емкости ($C_{\text{из}} + C_{\text{м.в.}} + C_{\text{э.у.}}$). Значения других элементов соответствуют примерам действующих электроискровых дефектоскопов с гармоническим испытательным напряжением. Дополнительно расчеты проводились для нескольких моделей действующих дефектоскопов. Полученные результаты не выходили за пределы указанного диапазона.

Из приведенной зависимости видно, что в рабочем режиме (без

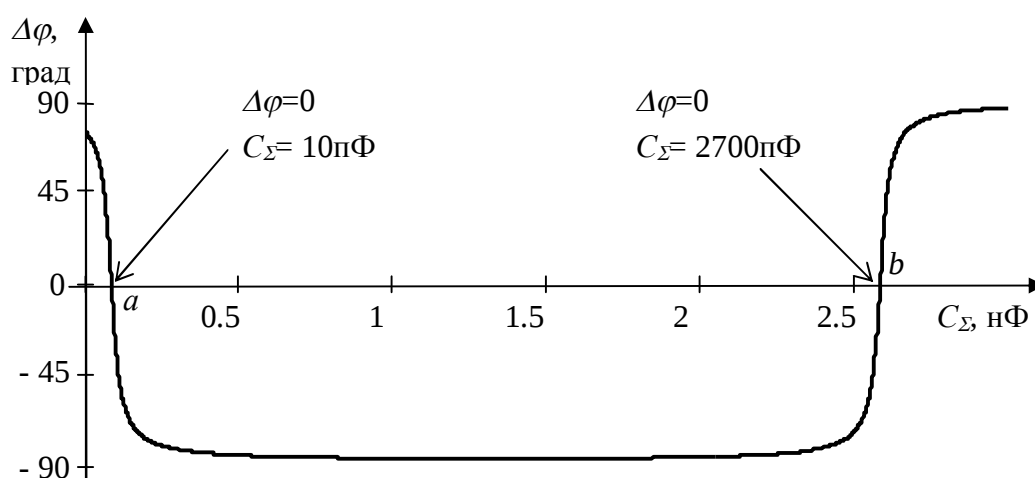


Рисунок 4.1.8 - Зависимость фазового сдвига между $I_{\text{вх}}$ и $U_{\text{тр}}$ от суммарной емкости ($C_{\text{из}} + C_{\text{м.в.}} + C_{\text{э.у.}}$)

подключения эквивалента человека под испытательное напряжение) некоторых участках ток $I_{\text{вх}}$ отстает по фазе от напряжения $U_{\text{вх}}$. Значение суммарной емкости в точке “ a ” $C_{\Sigma} = 10\text{нФ}$. В дефектоскопе межвитковая емкость достигает десятков пФ. В ходе электроискрового контроля на технологической линии напряжение к поверхности контролируемой изоляции кабельного изделия прикладывается посредством электрода, имеющего собственную емкость. Электрическая емкость электрода находится в пределах единиц, реже десятков пикофарад. У использованного в экспериментах Электродном узле «ЭУ-30/150» емкость между электродом

и точкой заземления составляла $C_{\text{э}} \approx 8$ пФ. Также емкостью обладает и соединительный кабель между высоковольтным трансформатором и электродным узлом. В зависимости от конструкции соединительного высоковольтного кабеля и его общей длины его емкость может достигать десятков пикофарад. В результате, даже при отсутствии кабеля в электроде, т.е. $C_{\text{из}} = 0$, $R_{\text{н}} \rightarrow \infty$, суммарной емкости электрода и межвитковой ($C_{\text{э.у.}} + C_{\text{м.в.}}$) ≈ 100 пФ достаточно, чтобы ток первичной обмотки $I_{\text{вх}}$ отставал по фазе от напряжения $U_{\text{вх}}$.

Значение суммарной емкости в точке “b” $C_{\Sigma} = (C_{\text{из}} + C_{\text{м.в.}} + C_{\text{э.у.}}) \approx 2700$ пФ. Имеющиеся на рынке электроискровые дефектоскопы допускают максимальную емкость контролируемой изоляции не более 300 пФ [151-155]. Для электроискровых дефектоскопов с испытательным напряжением промышленной частоты максимально допустимая емкость кабеля может достигать (500-1000) в зависимости от [151-155]. Таким образом, значение тока $I_{\text{вх}}$ в точке “b” будет значительно превышать уровень защиты $I_{\text{защ1}}$ (Рисунок 4.1.6) и точка “b” выходит за рабочий диапазон дефектоскопа.

Проведенный выше анализ показал, для реальных устройств рабочие режимы находятся в диапазоне суммарной емкости между точками “a” и “b” (Рисунок 4.1.8). В этом случае попадание человека под опасное напряжение можно достоверно определять по одновременному сочетанию следующих факторов:

- ток первичной обмотки высоковольтного трансформатора $I_{\text{вх}}$ отстает по фазе от напряжения $U_{\text{вх}}$;
- значение тока $I_{\text{вх}}$ больше некоторого установленного значения $I_{\text{защ2}}$, соответствующему безопасному значению активного тока электроискрового дефектоскопа, пересчитанного в первичную обмотку с учетом тока намагничивания.

4.2 Аттестация электроискровых дефектоскопов

В данном разделе диссертации рассмотрены вопросы аттестации электроискровых дефектоскопов.

В настоящее время документом, регламентирующим контроль изоляции высоким напряжением, является ГОСТ 2990-78 «Кабели. Провода. Шнуры. Испытания напряжением», а так же отраслевой руководящий документ РД16.14.640, более подробно описывающий нормы указанного стандарта. Стандарт имеет ряд существенных недостатков, затрудняющих его практическое применение. Также стандарт не отвечает современным требованиям производственного контроля. Причины такого положения изначальные недоработки и ошибки при формировании норм стандарта, а также более чем тридцатилетний срок существования стандарта без внесения в него изменений или дополнений.

Далее приведены основные недостатки действующего стандарта:

- Противоречивые требования, связывающие скорость контроля, частоту контролирующего напряжения и минимальную длину электрода, посредством которого осуществляется приложение напряжения к изоляции;
- Чрезмерно жесткие и не реализуемые на практике требования к быстродействию детектирования дефектов;
- Не регламентирован контроль постоянным напряжением;
- Не описан способ аттестации приборов.

Ниже более подробно рассмотрены указанные недостатки.

Пункт 4.3.3 ГОСТ 2990-78: *Длина электрода должна обеспечивать время приложения напряжения к испытуемой изоляции, оболочке или*

защитному шлангу не менее 0,06 с. Длину электрода l , мм, вычисляют по формуле

$$l = 60v$$

где v – максимальная линейная скорость прохождения через электрод изолированной жилы, оболочки или защитного шланга, м/с.

Для экструзионных линий с линейной скоростью свыше 10 м/с допускается использовать электрод, обеспечивающий время приложения испытательного напряжения к испытываемой изоляции не менее 0,002 с при использовании установки, обеспечивающей за это время не менее трех периодов испытательного напряжения, а также сигнализацию и регистрацию пробоев, имеющих длительность $2 \cdot 10^{-4}$ и более.

Исходя из указанных требований, возникает противоречие. Например: высокочастотный испытатель с частотой контролирующего напряжения 3 кГц, длиной электрода 100 мм способен работать на скоростных линиях до 100 м/с.

При использовании на низкоскоростных линиях такой испытатель может быть использован при скорости контроля только менее 1,7 м/с.

Многолетний опыт проведения контроля, а также экспериментальные исследования показали, что качественного изменения при переходе величины скорости контроля 10 м/с не происходит, а сама величина условная.

Вероятная причина противоречия заключается в том, что первая часть требований, а именно:

Длина электрода должна обеспечивать время приложения напряжения к испытываемой изоляции, оболочке или защитному шлангу не менее 0,06 с. Длину электрода l , мм, вычисляют по формуле

$$l = 60v$$

где v – максимальная линейная скорость прохождения через электрод изолированной жилы, оболочки или защитного шланга, м/с.

позаимствована из предыдущей редакции стандарта ГОСТ 2990-72 и рассчитывается из стандартной частоты контролирующего напряжения 50 Гц. Дополнение:

Для экструзионных линий с линейной скоростью свыше 10 м/с допускается использовать электрод, обеспечивающий время приложения испытательного напряжения к испытываемой изоляции не менее 0,002 с при использовании установки, обеспечивающей за это время не менее трех периодов испытательного напряжения, а также сигнализацию и регистрацию пробоев, имеющих длительность $2 \cdot 10^{-4}$ и более.

было внесено с учетом появления в составе готовых высокоскоростных технологических линий высокочастотных испытателей производства западноевропейских стран и США.

Устранение противоречия возможно путем введения единой зависимости учитывающей взаимосвязь скорости контроля, частоты контролирующего напряжения и минимальную длину электрода, по аналогии с действующими зарубежными стандартами.

Например, требуемая длина электродного узла (L) линейно зависит от скорости кабеля (V) и обратно пропорциональна частоте (f) испытательного напряжения.

В стандарте UL 1581 (США):

$$V[\text{м / мин}] = \frac{1}{150} \cdot f[\text{Гц}] \cdot L[\text{мм}]$$

В стандарте BS 5099
(Великобритания) и МЭК 62230:

$$V[\text{м / мин}] = \frac{1,2}{50} \cdot f[\text{Гц}] \cdot L[\text{мм}]$$

В стандарте MIL W16878 и НП-1-1979 (США):

$$V[\text{м / мин}] = \frac{1}{50} \cdot f[\text{Гц}] \cdot L[\text{мм}]$$

Следующее противоречие: требование к быстродействию детектирования дефектов 0,2 мс. Данное требование очень сложно технически реализуемо и при этом практически избыточно. При времени приложения напряжения к каждому участку контролируемой изоляции не менее 3-х периодов (т. е. не менее 6 мс) время реакции детектора дефектов должно быть менее 0,2 мс (т. е. $1/15$ от времени приложения напряжения). Никакой практической необходимости в этом нет. С другой стороны реализовать на практике, как показывает практика, детектор дефектов с высокой чувствительностью и таким быстродействием чрезвычайно сложно. При этом данное устройство будет обладать низкой помехоустойчивостью, что в условиях реального производства является существенным недостатком. $1/15$ от времени контроля это $1/5$ от периода контролирующего напряжения, что может соответствовать участку напряжения с амплитудой менее 20% от максимума, что недостаточно для пробоя дефектного участка изоляции. К тому же возникает необходимость проверки быстродействия детектора с помощью имитаторов дефектов способные коммутировать напряжения в диапазоне (1..50) кВ, токов (0,1..100) мА, с временами коммутации менее 0,2 мс, и обратном восстановлении в условиях приложения прямого напряжения.

Исходя из вышесказанного предлагается введение следующей нормы, например:

Детектор должен фиксировать дефект за время не более 2-х полных периодов контролирующего напряжения при времени приложения напряжения не менее 3-х периодов.

Следующее противоречие заключается в том, что ГОСТ 2990 не регламентирует контроль постоянным напряжением, достоинства и правомерность которого доказывается в главе 2 настоящей диссертационной работы.

Вопросы реализации детекторов дефектов рассмотрены в следующих разделах диссертации.

В настоящее время действующим международным стандартом, регламентирующим электроискровой контроль, является МЭК 62230-2006. Качество проработки данного стандарта выше, чем ГОСТ 2990-78. Однако и он не лишен противоречий, которые необходимо если не изменять, то хотя бы учитывать при организации технологического контроля на кабельных предприятиях.

Далее приведены основные недостатки действующего стандарта МЭК 62230-2006:

- Требования к быстродействию детектора дефектов дефектоскопов с высокочастотным и постоянным контролирующими напряжениями;
- Неэффективность предлагаемого имитатора дефектов.

Требования к быстродействию детектора дефектов в высокочастотных дефектоскопах в МЭК 62230-2006 выглядят следующим образом:

Устройство имитации дефектов должно быть настроено так, чтобы обеспечить электрический пробой с максимальной длительностью 0,025 с для систем переменного и высокочастотного напряжения и 0,0005 с для системы постоянного напряжения для каждого имитируемого дефекта.

Исходя из требований максимальной длительности имитируемого пробоя (дефекта) 25 мс и отсутствия увязки его длительности с реальным временем нахождения контролируемого участка изоляции в зоне контроля приводит к тому, что имитаторы дефектов настраиваются на время электрического пробоя именно 25 мс. Между тем в процессе контроля на технологической линии время нахождения в зоне контроля может быть значительно меньше 25 мс. Например: скорость линии составляет 20 м/с, на линии установлен электроискровой дефектоскоп длиной электрода 0,1 м, частота контролирующего напряжения составляет 3 кГц. В соответствии с

требованиями стандарта МЭК 62230-2006 минимальное время нахождения участка изоляции в зоне контроля должно составлять 832,5 мкс при частоте 3 кГц. Реально, же время контроля при указанных скорости линии и длине электрода будет составлять 5 мс. Может сложиться ситуация при которой достоверность контроля дефектоскопа будет 100% при времени дефекта 25 мс, а при времени дефекта 5 мс достоверность резко снизиться. В результате аттестацию успешно пройдет дефектоскоп, который на технологической линии будет обладать низкой достоверностью контроля. В связи с этим в будущем предлагается внести в стандарт следующие изменения:

Устройство имитации дефектов должно быть настроено так, чтобы обеспечить электрический пробой с максимальной длительностью 2/3 от минимального времени нахождения участка изоляции в зоне контроля для каждого имитируемого дефекта.

Причем такую норму предлагается ввести как для переменного, так и для постоянного напряжений, так как во многих случаях требования к быстродействию 0,5 мс является избыточным.

Следующий недостаток- это неэффективность предлагаемого в стандарте имитатора дефектов. Стандарт гласит:

Рекомендуемая конструкция имитатора искусственного дефекта включает острые иглы и металлическую пластину. Один из данных элементов монтируется на вращающийся шпиндель, а другой – неподвижен, таким образом, что образуется искровой зазор между ними в одной точке во время каждого вращения шпинделя.

Искровой промежуток между иглой и пластиной устанавливается величиной $(0,25 \pm 0,05)$ мм.

Размеры пластины и скорость вращения шпинделя должны быть таковы, что бы искровой разряд имел требуемую длительность, а период повторения разрядов был не более одной секунды.

Особенность предлагаемой конструкции заключается в том, что длительность искрового промежутка будет зависеть не только от расстояния между электродами и скоростью вращения шпинделя, но и от состояния окружающей среды, прежде всего влажности и температуры окружающего воздуха. Более того даже при одинаковых условиях длительности пробоя будут нестабильны и иметь разброс в несколько десятков процентов. Существенным фактором оказывающим влияние на длительность пробоя будет являться амплитуда и частота контролирующего напряжения. Как результат: существенная нестабильность длительности имитируемых разрядов.

Ниже предлагается устройство, свободное от указанного недостатка.

По результатам научных исследований на основе действующего стандарта МЭК 62230-2006 был разработан проект стандарта ГОСТ Р 54813-2011 "Кабели, провода и шнуры электрические. Электроискровой метод контроля". Стандарт принят. Дата введения 1.01.2013 г.

Реализация стенда для аттестации электроискровых дефектоскопов

Исходя из требований действующего стандарта МЭК 62230-2006 и принятого стандарта ГОСТ Р 54813-2011 проверке подлежат следующие основные требования:

- значение испытательного напряжения, при изменении питающего в диапазоне (220 ± 20) В не должно изменяться более чем на $\pm 5 \%$;
- значение испытательного напряжения не должно изменяться более чем на $\pm 5 \%$, в случае изменения электрической емкости нагрузки на $\pm 25 \%$, от ее номинального значения. В случае если в документации на испытательное оборудование не указана номинальная нагрузка, то за ее значение необходимо принять половину от максимальной;
- значение испытательного напряжения должно быть измерено и отображено на индикаторе испытателя или передано системе

управления технологическим процессом с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$. Испытатели, шкалы которых градуированы в амплитудных значениях, должны быть аттестованы на показания амплитудных значений. Испытатели, шкалы которых градуированы в действующих значениях, должны быть аттестованы на показания действующих значений;

- к электродному узлу в режиме холостого хода первоначально должно быть приложено переменное напряжение величиной 3 кВ или постоянное напряжение величиной 5 кВ. Если это невозможно, то должно быть установлено напряжение, минимальное для аттестуемого испытательного оборудования. Ток короткого замыкания должен быть ограничен на уровне 600 мкА для 3 кВ переменного напряжения или для 5 кВ постоянного напряжения. Последовательно с искровым промежутком имитатора может быть включен резистор ограничивающий ток короткого замыкания. Для импульсного испытательного оборудования при аттестации последовательно с искровым промежутком включается резистор сопротивлением 0,5 МОм. Имитатор искусственного дефекта должен быть настроен на формирование искрового разряда максимальной длительностью 25 мс для переменного напряжения промышленной частоты, переменного высокочастотного и импульсного напряжения или 0,5 мс для постоянного напряжения. Последовательность не менее чем из 20 искровых разрядов должна быть сгенерирована с интервалом не более 1 сек. Счетчик испытательного оборудования должен регистрировать один отсчет на один искровой разряд.

Конструктивные требования к установке для аттестации электроискровых дефектоскопов заключаются в мобильности установки, что позволит проводить аттестацию на месте работы дефектоскопа, без его демонтажа. Масса некоторых дефектоскопов превышает 100 кг.

На рисунке 4.2.1 приведена структурная схема аттестационной установки.

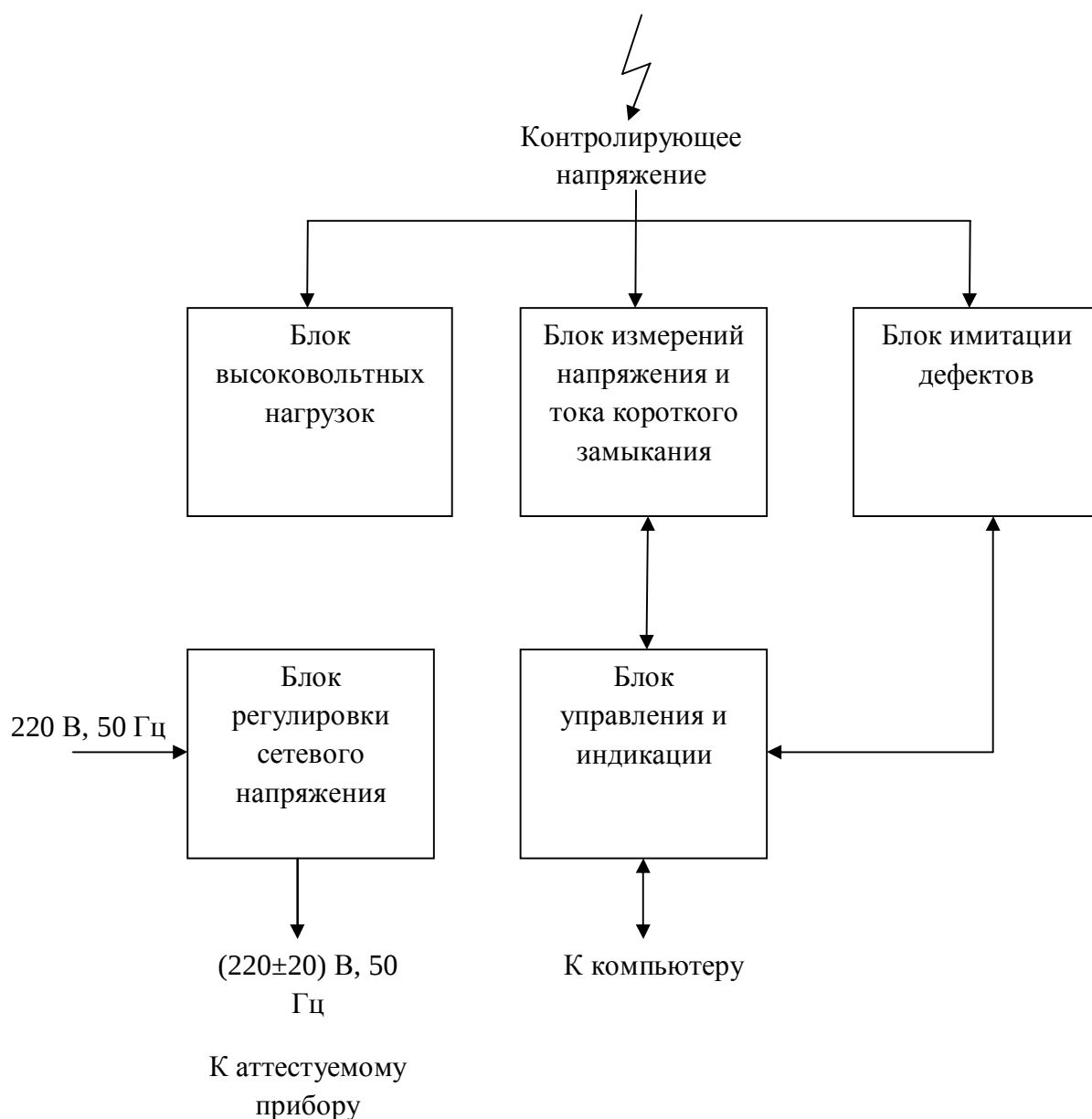


Рисунок 4.2.1 Структурная схема установки для аттестации электроискровых дефектоскопов

Блок высоковольтных нагрузок должен имитировать емкостную нагрузку в диапазоне не менее (0-300) пФ с шагом 10 пФ и активную нагрузку наиболее распространенных номиналов 2 МОм и 10 МОм. Для решения данной задачи предлагается схема, приведенная на рисунке 5.2. Все конденсаторы марки КВИ-2 и КВИ-3, резисторы марки КЭВ-5. Коммутация (S1-S8) осуществляется вручную. Технические характеристики блока высоковольтных нагрузок:

Максимальное рабочее напряжение, кВ.....40;
 Диапазон устанавливаемых емкостей, пФ.....0÷400;
 Шаг изменения емкости, пФ.....10;
 Устанавливаемое активное сопротивление, МОм.....2; 10.

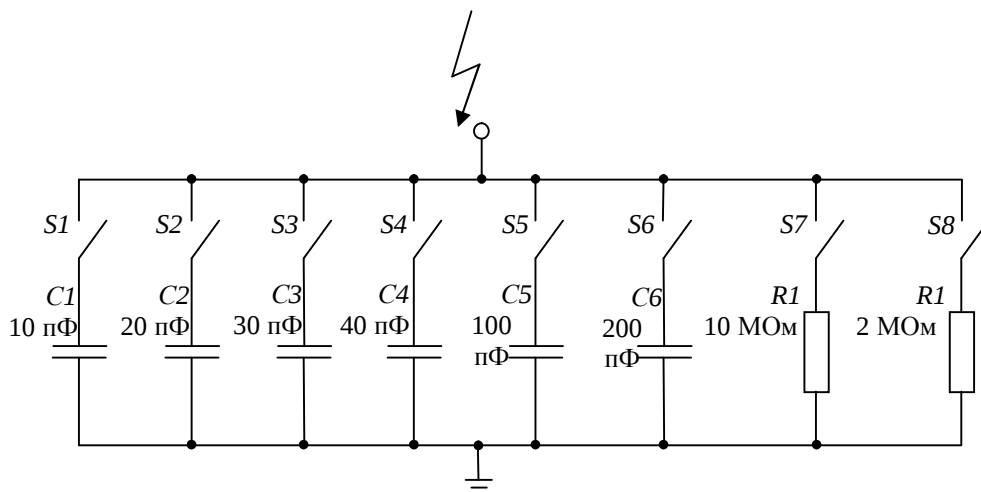


Рисунок 4.2.2 Принципиальная схема блока высоковольтных нагрузок

Сложным и дорогостоящим узлом является **имитатор дефектов**. Основные требования к имитатору можно сформулировать следующим образом:

Максимальное коммутируемое переменное напряжение, кВ.....40;
 Максимальное коммутируемое постоянное напряжение, кВ.....12;
 Максимальный коммутируемый ток, мА.....100;
 Время коммутации переменного напряжения, мс.....25;

Время коммутации постоянного напряжения, мс.....0,5;
 Период повторения коммутации, с.....1;
 Временная нестабильность искровых разрядов, не более, %..... ± 5 .
 На рисунке 4.2.3 приведена схема имитатора дефектов.

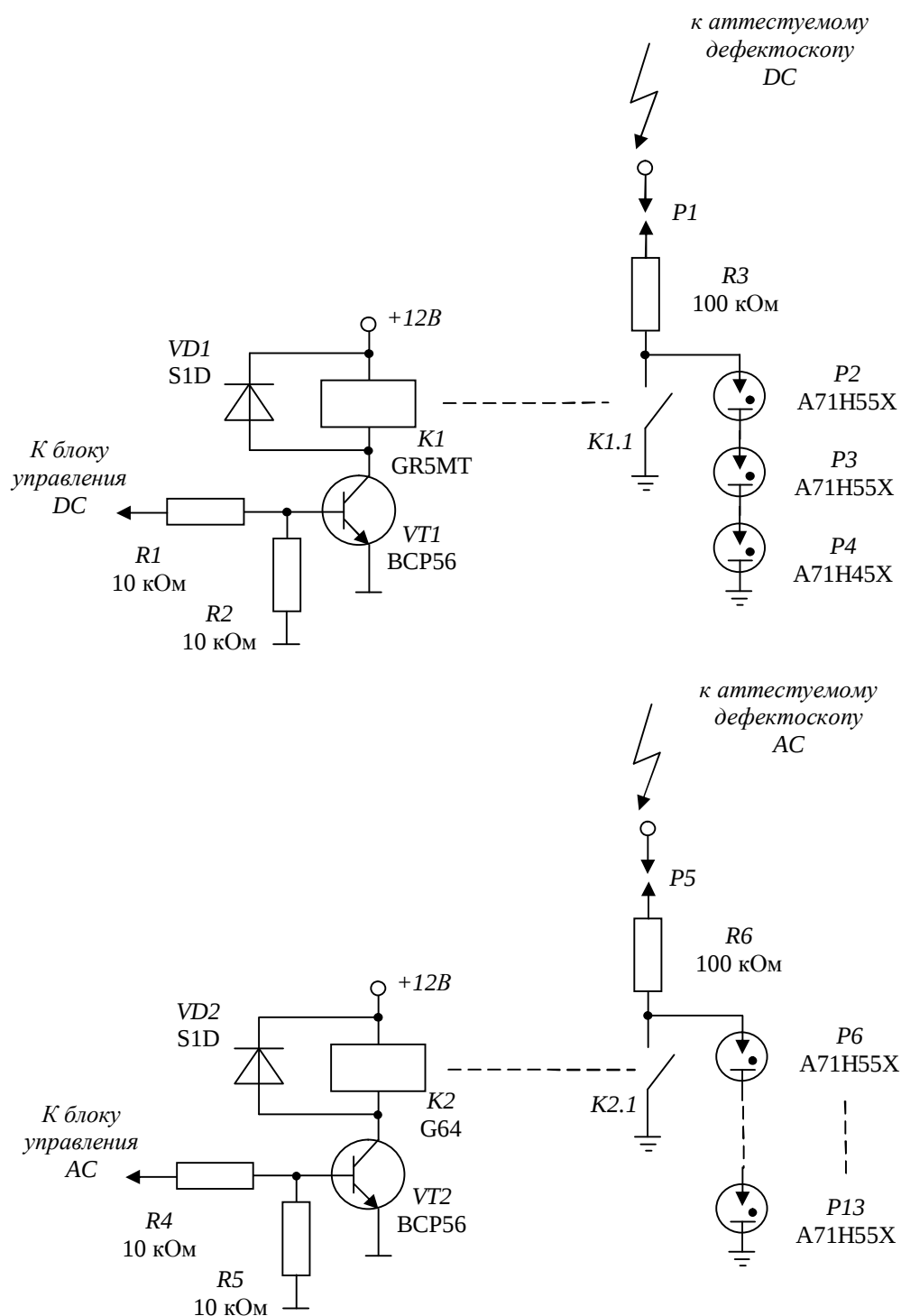


Рисунок 4.2.3 Принципиальная схема имитатора дефектов

Схема имитатора выполнена на двух высоковольтных реле и двух искровых промежутках. В отличие от рекомендуемой в стандарте МЭК 62230-2006 конструкции имитатора дефектов, приведенная схема позволяет формировать искровые разряды с высокой временной точностью и стабильностью. На реле *K1* и разрядном промежутке *P1* реализован имитатор дефектов с длительностью разряда 0,5 мс для дефектоскопов с постоянным контролирующим напряжением. Разрядный промежуток представляет собой две встречно направленные иглы с расстоянием между ними, не более, 0,2 мм. Газовые разрядники *P1-P3* и резистор *R3* предназначены для защиты высоковольтного реле от перегрузок по току и напряжению. На реле *K2* и разрядном промежутке *P4* реализован имитатор дефектов с длительностью разряда 25 мс для дефектоскопов с переменным контролирующим напряжением. Газовые разрядники *P6-P13* и резистор *R6* предназначены для защиты высоковольтного реле от перегрузок по току и напряжению. На рисунке 4.2.4 приведена структурная схема блока измерений высокого напряжения и тока короткого замыкания.



Рисунок 4.2.4 Структурная схема блока измерений высокого напряжения и тока короткого замыкания

Принцип работы блока следующий. Измеряемое высокое напряжение с электроискрового дефектоскопа поступает на высоковольтный делитель, затем на блок сопряжения и один из измерительных каналов платы сбора данных. Мгновенные значения измеряемого напряжения оцифровываются с частотой 700 кГц и через высокоскоростной интерфейс *PCI* поступают в блок управления. По результатам измерений мгновенных значений напряжения определяются амплитудное, средние и действующее значения напряжения. Измерение тока короткого замыкания определяется по падению напряжения на резисторе *R1*. Высоковольтное реле *K1* замыкает контакты на время 5 с при максимальном контролирующем напряжении. Измерение действующих значений происходит на промежутках времени в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82. "Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов". Результаты измерений поступают через интерфейс *PCI* в блок управления.

Основные технические характеристики платы сбора данных

- 12 разрядный АЦП, время преобразования – 1,4 мкс;
- 32 однополюсных каналов или 16 дифференциальных каналов;
- входное сопротивление не менее 9 МОм;
- программно переключаемые диапазоны входного напряжения АЦП: $\pm 10\text{В}$, $\pm 5\text{В}$, $\pm 2,5\text{В}$, $\pm 1\text{В}$, $\pm 0,5\text{В}$, $\pm 0,25\text{В}$, $\pm 0,1\text{В}$, $\pm 0,05\text{В}$ (для каждого канала);
- число эффективных разрядов 11,2(12,5) для частоты входного сигнала 5 кГц;
- передача данных в режиме Bus-Master с возможностью генерации прерывания в произвольной точке буфера данных
- буферная память типа FIFO 2048Слов;
- высокостабильный кварцевый генератор 50 МГц и программируемый делитель частоты от 5 до 31 для таймера обеспечивает широкую сетку частот

дискретизации; запуск АЦП от внутреннего кварцевого генератора;
программный; от внешней тактовой частоты;

- 16 цифровых линий: 8 - ввода и 8 - вывода;
- три шестнадцатиразрядных счётчика;
- разъём DHS-26 для цифровых линий и DHS-44 для аналоговых;
- относительная систематическая погрешность, не более, 0.2 %.

Блок регулировки сетевого напряжения. Схема блока приведена на рисунке 5.5.

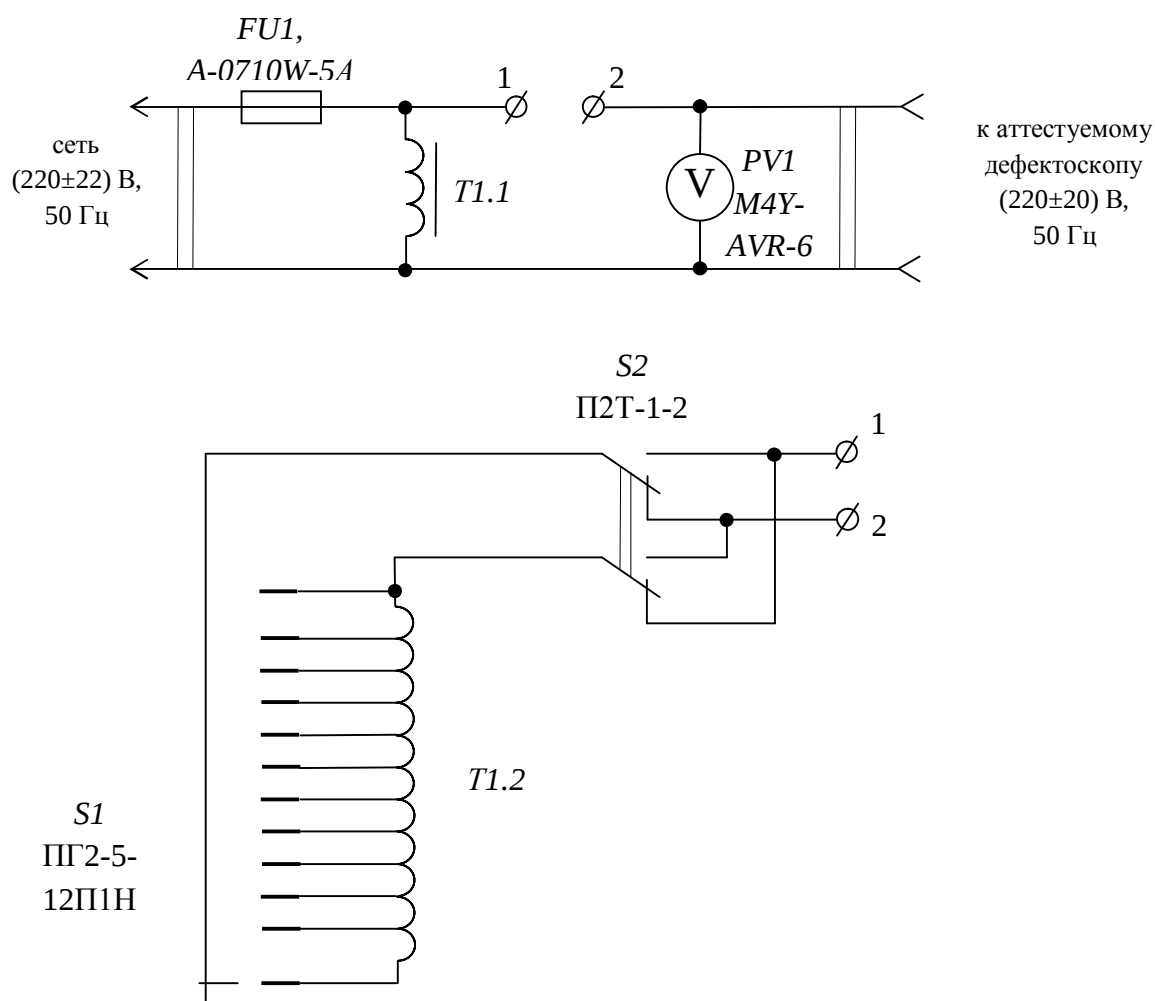


Рисунок 4.2.5. Схема блока регулировки сетевого напряжения

Принцип ступенчатой регулировки напряжения питания реализован на переключении отводов трансформатора $T1$ с помощью переключателей $S1$ и $S2$. Всего выполнено 12 отводов. Перекидной переключатель $S2$

предназначен для установки режима суммирования или вычитания входного напряжения за счет изменения полярности подключения обмотки *T1.2*. В отличие от автотрансформатора такой принцип регулировки позволяет значительно снизить мощность, а значит и габариты трансформатора. Переключатель *S2* выбран со средним нейтральным состоянием для предотвращения замыканий обмоток вторичной обмотки. Вольтметр *PV1* позволяет контролировать значение выходного напряжения, поступающее на аттестуемый дефектоскоп. Автоматический предохранитель *FU1* предназначен для защиты цепей стенда и аттестуемого дефектоскопа.

Основные технические характеристики блока регулировки сетевого напряжения приведены ниже:

Диапазон входных напряжений, В.....(220±22);
 Диапазон выходных напряжений, В.....(220±20);
 Шаг регулировки выходного напряжения, В.....±3,5;
 Максимальная мощность нагрузки, Вт.....500.

Блок управления и индикации реализован на одноплатном компьютере формата PC104 plus **FASTWEL CPC308**. Обмен данными с платой сбора происходит по высокоскоростному интерфейсу PCI. Управление электронными ключами блока измерений напряжений и токов короткого замыкания и блока имитатора дефектов производится через модуль дискретного ввода- вывода **FASTWEL UNIO-96-1**. Индикация и органы управления реализованы на сенсорном мониторе **TM12RSS**. Связь с внешним компьютером осуществляется через интерфейсы *RS-232*, *RS-485*, *USB*.

Основные технические характеристики компьютера:

- Процессор Intel Atom D510 или N450 1.66 ГГц из долгосрочной производственной программы

- Поддержка модулей PC/104-Plus
- 512 Мбайт или 1 Гбайт DDR2 667 МГц, напаяна
- Видеоинтерфейс VGA до 2048×1536 точек и LVDS 18 бит до 1365x768 точек
- Два порта Gigabit Ethernet
- 2×SATA I 150 Мбит/с, NAND SATA до 2 Гбайт, CF Type I/II
- 4×USB 2.0, 2×RS-232, 2×RS-485/422 с гальваноразвязкой
- Диапазон рабочих температур -40...+85 °С промышленный, 0...+70 °С коммерческий

Программная совместимость для: Microsoft Windows® XP Embedded, Linux, QNX.

Основные технические характеристики сенсорного монитора: 10.4" TFT LCD дисплей, резистивный сенсорный экран, LED-подсветка, разъемы VGA, RS232, вход питания.

Основные технические характеристики модуля дискретного ввода-вывода: Выдача и прием последовательного кода по любому каналу, -40°С...+85°С, Программируемый "антидребезг", 96 каналов ввода/вывода.

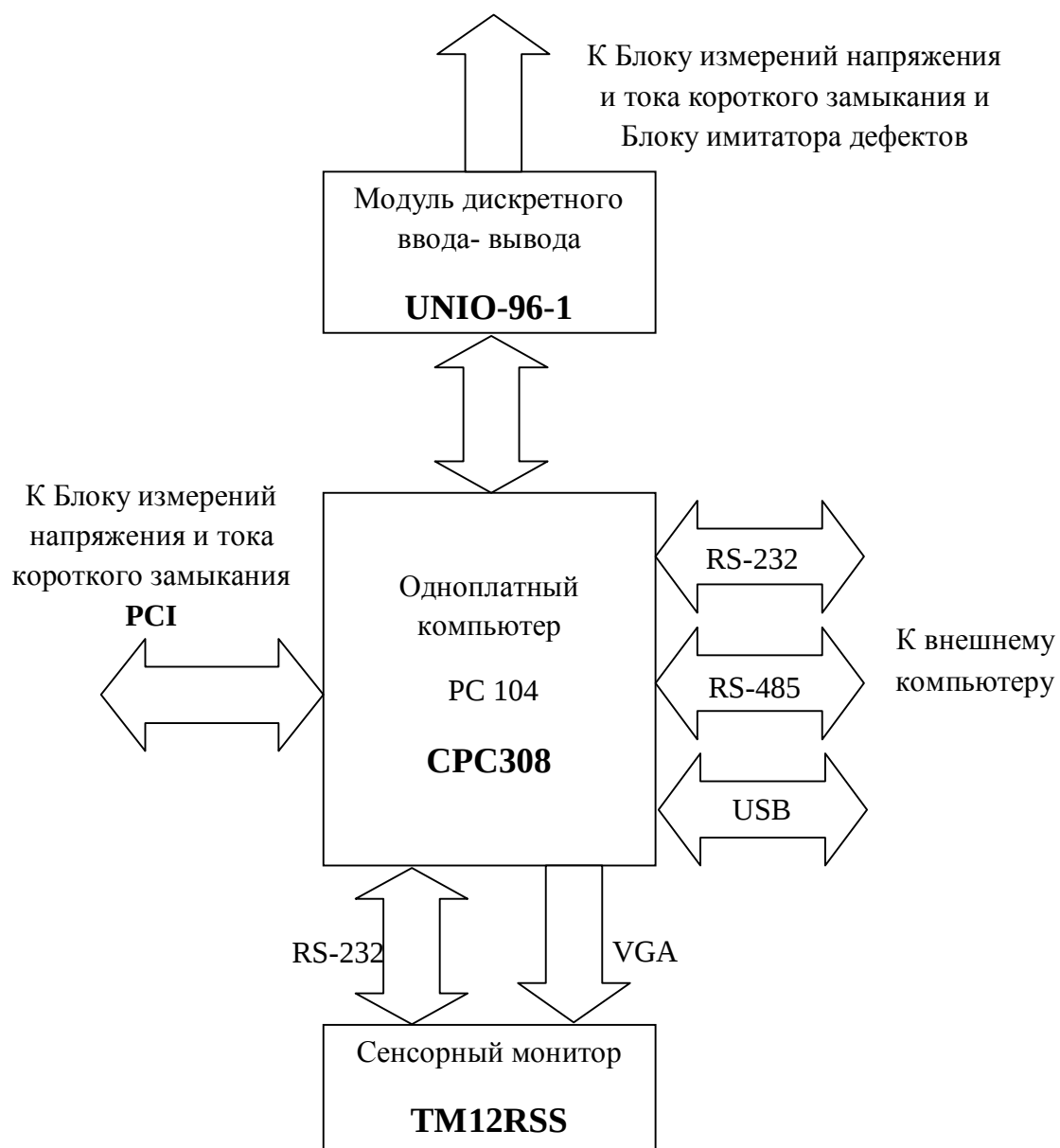


Рисунок 4.2.6. Схема блока управления и индикации

Выводы по главе 4

1 Исследования показали, что попадание человека под действие испытательного напряжения электроискрового дефектоскопа можно достоверно установить по смене характера нагрузки относительно первичной обмотки высоковольтного трансформатора. В режиме контроля, когда нагрузкой дефектоскопа является изоляция кабельного изделия, характер нагрузки является активно-емкостным, а при попадании человека под действие испытательного напряжения активно-индуктивным. Предложенный способ защиты заключается в том, что при изменении характера нагрузки генерация испытательного напряжения полностью прекращается, либо его уровень снижается до безопасного уровня. Ток короткого замыкания электроискровых дефектоскопов, как правило, не превышает 100 мА. В соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.038-82. Человек может находиться под действием такого напряжения не более 1 с. Частота повторения испытательного напряжения высокочастотных дефектоскопов находится в диапазоне (500-5000) Гц. Для достоверного определения характера нагрузки достаточно несколько периодов напряжения, что не превысит нескольких десятков миллисекунд.

Следовательно, предложенный в главе 4 способ позволяет создать электроискровой дефектоскоп, полностью соответствующий требованиям действующего стандарта ГОСТ 12.1.038.

Глава 5

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

Результаты научно-исследовательских работ были использованы в разработках высоковольтных электроискровых дефектоскопов. На рис. 5.1 показан внешний вид прибора ЗАСИ-30.



Рисунок 5.1- Внешний вид высоковольтного электроискрового дефектоскопа ЗАСИ-30

Основные технические характеристики прибора приведены в табл. 5.1.

Дефектоскоп «ЗАСИ-30» предназначен для использования на предприятиях кабельной промышленности и устанавливается стационарно на экструзионных линиях наложения изоляции, на агрегатах непрерывной вулканизации, а также на участках контрольной перемотки кабеля и кабельных полуфабрикатов. Предназначен для контроля целостности изоляции кабельных изделий. Рекомендован для скоростных линий. Дефектоскоп позволяет работать в двух режимах: «линия» или «перемотка». Имеет функцию дистанционного отключения испытательного напряжения

при остановке линии. Невосприимчив к электрическим перегрузкам в электродном узле и способен длговременно 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».

В основу работы дефектоскопа положен электроискровой метод неразрушающего контроля. Контроль целостности изоляции осуществляется посредством испытаний ее электрической прочности высоким переменным напряжением. При этом токоведущая жила или броня кабельного изделия заземляется, а к поверхности изоляции или оболочки соответственно прикладывается испытательное напряжение с помощью элементов электродного узла. Уровень испытательного напряжения выбирается таковым, что качественная изоляция не повреждается и не изменяет своих характеристик. На участках изоляции с пониженной электрической прочностью (сквозные отверстия, посторонние включения, существенное утонение изоляции и т.п.) под действием высокого испытательного напряжения происходит электрический пробой, который фиксируется автоматикой дефектоскопа. Счетчик дефектов дефектоскопа увеличивает число дефектов на единицу. После пробоя изоляции дефектоскоп на время менее одной секунды прекращает генерацию высокого напряжения. Это необходимо для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала и снижения вероятности возгорания изоляции кабельного изделия при пробое.

Дефектоскоп вырабатывает высокое испытательное напряжение, поддерживает амплитудное значение испытательного напряжения на установленном уровне, обеспечивает защиту обслуживающего персонала от поражения электрическим током, выполняет защиту высоковольтного

генератора от перегрузок, осуществляет измерение и индикацию пикового значения испытательного напряжения, детектирует дефекты изоляции кабельных изделий и подсчитывает их количество, передает информацию о режимах работы дефектоскопа и результатах испытаний по каналу цифровой связи. Электрический сигнал «Дефект», формируемый испытателем, включает звуковую и световую сигнализацию. Кроме того, сигнал «Дефект» может быть использован для управления внешним технологическим оборудованием.

Логика работы дефектоскопа при регистрации дефекта зависит от режима работы дефектоскопа. В режиме «Линия» после регистрации дефекта дефектоскоп на время менее одной секунды прекращает генерацию напряжения. Далее уровень испытательного напряжения восстанавливается, и испытания продолжают в установленном режиме. Такой режим позволяет непрерывно осуществлять контроль целостности изоляции кабельных изделий и вести подсчет дефектов. В режиме «Перемотка» после регистрации дефекта дефектоскоп полностью прекращает генерацию напряжения. Восстановить генерацию можно только после отжатия и далее нажатия кнопки включения испытательного напряжения. Такой режим работы облегчает работу оператора участка контрольной перемотки и повышает электробезопасность. Испытательное напряжение можно включать/выключать дистанционно посредством подачи/снятия соответственно напряжения 220 В, 50 Гц на разъем задней панели дефектоскопа. Выход на автоматику имеет пару переключаемых сухих контактов реле. Один переключаемый контакт может быть использован для быстродействующей автоматики. Одно переключение этой группы соответствует одному дефекту, обнаруженному испытателем. Суммарное время переключения и возврата в исходное состояние эта группа имеет менее 1 секунды. Восприятие оператором линии данного сигнала затруднительно, вследствие его малой длительности. По этой причине вторая группа

контактов переключается на время (2÷3) секунды. Этот сигнал можно использовать для подключения внешних световой и звуковой сигнализаций.

Электродный узел прикладывает испытательное напряжение к поверхности изоляции испытуемого кабельного изделия.

Таблица 5.1

Основные технические характеристики электроискрового дефектоскопа
ЗАСИ-30

Амплитуда испытательного напряжения*, кВ	1,5÷30
Форма испытательного напряжения	синус
Частота повторения испытательного напряжения, не менее, Гц	500
Максимальная электрическая емкость нагрузки, пФ	300
Минимальное сопротивление активной электрической нагрузки, МОм	10
Максимальная погрешность измерения испытательного 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 ограниченно
Наличие цифрового интерфейса	RS-485
Длительность сигнала «Дефект», с	1÷3
Максимальный коммутируемый ток в цепи внешней автоматики, А	1
Максимальное коммутируемое напряжение в цепи внешней автоматики, В	220
Потребляемая мощность, не более, Вт	300
Габариты д×в×г, мм	550×364×325
Масса, не более, кг	27

Напряжение питающей сети, В	220±22
Частота питающей сети, Гц	50±2
Режим работы	долго- временный

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 рис. 5.2 и 5.3 приведены внешний вид электродных узлов. В табл. 5.2 и 5.3 приведены их основные характеристики.



Рисунок 5.2- Внешний вид электродного узла «ЭУ-30/150»

Корпус электродного узла ЭУ-30/150 выполнен из металла с двумя прозрачными вставками из толстого органического стекла, что позволяет визуально контролировать процесс испытаний. Электрод выполнен по классической схеме – набором шариковых цепей из высокопрочной нержавеющей стали. Это обеспечивает надежный контакт с контролируемой изоляцией и большой срок службы электрода. Кожух электрода также выполнен из нержавеющей стали и крепится к стенке из стеклотекстолита двумя фторопластовыми изоляторами с ребрами переменного диаметра. Такой способ крепления электрода обеспечивает защиту от образования сплошных водяных проводящих каналов при испытаниях неосушенных

кабельных изделий. На задней стенке расположены два изолированных вывода для подключения высокого напряжения, а также клемма заземления и контакты концевого выключателя блокировки при подъеме кожуха электродного узла.

Таблица 5.2

Основные технические характеристики электродного узла «ЭУ-30/150»

Диаметр контролируемого кабеля, мм	1÷30
Длина активной части электрода, мм	150
Макс. рабочее напряжение, кВ	30
Макс. рабочая частота при 30 кВ, кГц	5
Наличие защитной блокировки	да
Габариты д×в×г, мм	365×250×310
Масса, не более, кг	12
Режим работы	долговременный

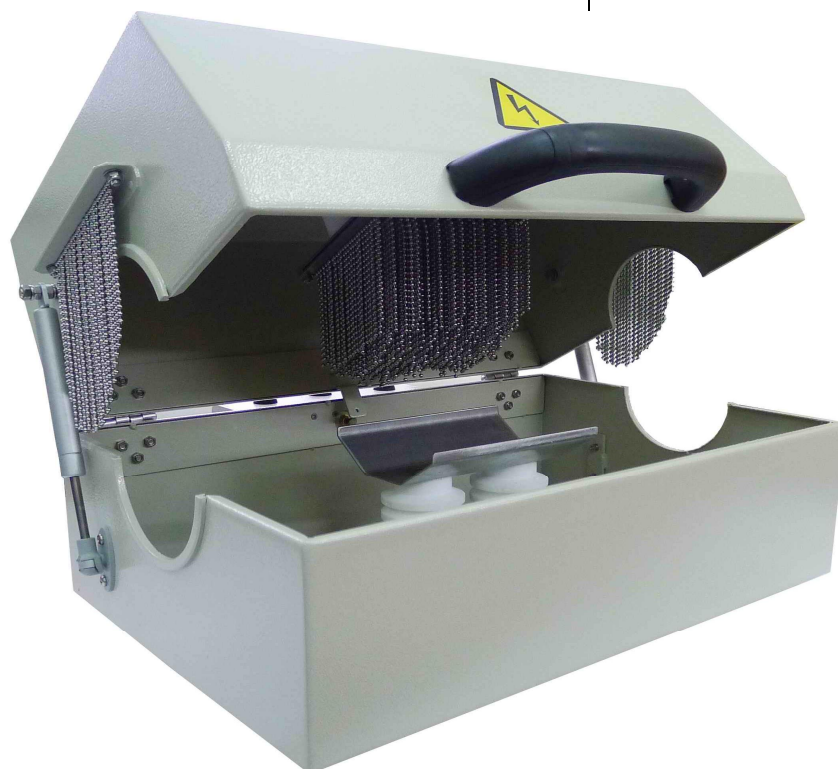


Рисунок 5.3.- Внешний вид электродного узла «ЭУ-60/150»

Таблица 5.3

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	да
Габариты д×в×г, мм	510×330×455
Масса, не более, кг	18,5
Режим работы	долговременный

Электродный узел 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 стальными 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, что необходимо для предотвращения механического травмирования персонала работающего с высоковольтным испытателем.

На рис. 5.4 показан внешний вид прибора ИАСИ-30.



Рисунок 5.4- Внешний вид высоковольтного электроискрового дефектоскопа 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. 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 табл. 5.4.

Таблица 5.4

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
Минимальное сопротивление активной электрической нагрузки, МОм	2
Максимальная погрешность измерения испытательного напряжения, %	±5
Максимальная скорость движения контролируемого кабельного изделия, м/мин	750
Минимальная частота детектирования дефектов, Гц	1
Максимальный ток короткого замыкания, мА	6
Продолжительность работы в режиме короткого замыкания	не ограниченно
Длительность сигнала «Дефект», с	1÷3
Максимальный коммутируемый ток в цепи внешней автоматики, А	1
Максимальное коммутируемое напряжение в цепи внешней автоматики, В	220
Потребляемая мощность, не более, Вт	150
Габариты д×в×г, мм	485×140×530
Масса, не более, кг	12

Напряжение питающей сети, В	220±22
Частота питающей сети, Гц	50±2
Диапазон рабочих температур, °С	15÷40
Относительная влажность воздуха, не более, %	95
Режим работы	долго- временный

На рис. 5.5 показан внешний вид прибора ЗАСИ-20М.



Рисунок 5.5- Внешний вид высоковольтного электроискрового дефектоскопа ЗАСИ-20М

Таблица 5.5

Основные технические характеристики электроискрового дефектоскопа ЗАСИ-20М

Амплитуда испытательного напряжения*, кВ	1,5÷20
Форма испытательного напряжения	синус
Частота повторения испытательного напряжения, не менее, Гц	500
Максимальная электрическая емкость нагрузки, пФ	300

Минимальное сопротивление активной электрической нагрузки, МОм	10
Максимальная погрешность измерения испытательного 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 ограниченно
Наличие цифрового интерфейса	RS-485
Длительность сигнала «Дефект», с	1÷3
Максимальный коммутируемый ток в цепи внешней автоматики, А	1
Максимальное коммутируемое напряжение в цепи внешней автоматики, В	220
Потребляемая мощность, не более, Вт	200
Габариты д×в×г, мм	550×364×325
Масса, не более, кг	27
Напряжение питающей сети, В	220±22
Частота питающей сети, Гц	50±2
Диапазон рабочих температур, °С	15÷40
Относительная влажность воздуха, не более, %	95
Режим работы	долго- временный

Дефектоскоп «ЗАСИ-20М» предназначен для контроля целостности изоляции кабельных изделий. Рекомендован для скоростных линий. Дефектоскоп позволяет работать в двух режимах: «линия» или «перемотка». Имеет функцию дистанционного отключения испытательного 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».

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 рис. 5.6 приведен внешний вид имитатора. В таблице 5.6 приведены основные технические характеристики имитатора.

Имитатор дефектов может быть использован для первичной и периодической аттестаций электроискровых дефектоскопов (высоковольтных испытателей) с испытательным напряжением гармонической и импульсной формой. Опционально в него может быть встроен блок имитации дефектов длительностью 0,5 мс, что необходимо для аттестации дефектоскопов с постоянным испытательным напряжением.

Таблица 5.6

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
Потребляемая мощность, не более, Вт	100
Габариты д×в×г, мм	280×180×180
Масса, не более, кг	5
Напряжение питающей сети, В	220±22

Частота питающей сети, Гц	50±2
Диапазон рабочих температур, °С	15÷40
Относительная влажность воздуха, не более, %	95



Рисунок 5.6- Внешний вид имитатора дефектов "ИмД-1"

Электроискровой дефектоскоп **“АСИП-30-110-300”** предназначен для контроля целостности изоляции кабельных изделий методом контроля «на проход» высоким напряжением промышленной частоты в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 2990-78 и IEC 62230:2006. Полностью соответствует требованиям стандарта ГОСТ Р 54813-2011.

На рис. 5.7 приведен внешний вид имитатора. В таблице 5.7 приведены основные технические характеристики имитатора.



Рисунок 5.7- Внешний вид высоковольтного электроискрового дефектоскопа АСИП-30-110-300

Дефектоскоп предусматривает два способа управления.

Автономная работа (без подключения к технологической линии), с управлением и выводом величины испытательного напряжения на цифровой дисплей прибора. При этом по цифровому каналу связи **Profibus-DP** передается информация о режимах работы: испытательное напряжение вкл/выкл; амплитуда испытательного напряжения, кВ; количество обнаруженных дефектов; ток через контролируемую изоляцию, мА. Управление испытателем по цифровому каналу в этом режиме запрещено.

Подключение к технологической линии (через интерфейс **Profibus-DP**) с возможностью управления и сигнализации о наличии «дефекта». В режиме внешнего управления (устанавливается переключателем на задней панели блока управления) разрешается управлять состоянием дефектоскопа. Дополнительно с получением информации, перечисленной выше, разрешено включать/выключать испытательное напряжение, задавать его амплитуду, сбрасывать количество подсчитанных дефектов.

Таблица 5.5

*Основные технические характеристики электроискрового
дефектоскопа АСИП-30-110-300*

Амплитуда испытательного напряжения*, кВ	3÷30
Форма испытательного напряжения	синус
Частота повторения испытательного напряжения, Гц	50
Диаметр испытуемого кабеля, мм	1÷110
Максимальная скорость движения кабеля, в соответствии с ГОСТ 2990-78, м/мин	300
Максимальная скорость движения кабеля, в соответствии с ГОСТ Р 54813-2011, IEC 62230-2006, м/мин	360
Высота установки зоны испытаний кабеля, мм	1100÷1300
Максимальная электрическая емкость нагрузки, пФ	500
Минимальное сопротивление активной электрической нагрузки, МОм	10
Максимальная погрешность измерения испытательного напряжения, %	±5
Порог чувствительности детектора дефектов при напряжении 3 кВ, мкА	600
Минимальная частота детектирования дефектов, Гц	1
Максимальный ток короткого замыкания, мА	6
Наличие цифрового интерфейса	<i>Profibus DP</i>
Длительность сигнала «Дефект», с	1÷3
Максимальный коммутируемый ток в цепи внешней автоматики, А	1
Максимальное коммутируемое напряжение в цепи внешней автоматики, В	220
Потребляемая мощность, не более, Вт	300
Габариты электронного блока, ш×в×г, мм	330×280×400
Масса блока управления (без стойки), не более, кг	8,5
Габариты высоковольтного блока, ш×в×г, мм	750×630×550

Масса высоковольтного блока (без стоек), не более, кг	60
Масса одной стойки, не более, кг	15

Дефектоскоп позволяет также работать в режимах: «линия» или «перемотка». Имеет функцию дистанционного отключения испытательного напряжения при остановке линии. Невосприимчив к электрическим перегрузкам в электродном узле и способен долговременно работать в режиме короткого замыкания. Уровень выходного тока не превышает 6 мА действующего значения, что соответствует требованиям стандарта ГОСТ 12.1.038-82. «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».

В качестве средства обмена информацией между ПЭВМ (контроллером) и дефектоскопом (высоковольтным испытателем) используется **Profibus**.

В качестве *Profibus* “Slave”а используется конвертер ICP CON I-7550 *PROFIBUS* to RS-232/422/485. Конфигурационный файл устройства находится на диске, поставляемом с прибором.

Его адрес в сети устанавливается с помощью специальных переключателей. По умолчанию адрес выставлен равным 2. Для доступа к переключателям необходимо снять кожух блока управления и крышку конвертора интерфейса.

Выходной пакет данных содержит 6 байт системной информации и 8 байт запроса. Входной пакет данных содержит 4 байта системной информации и 17 байт ответа. Описание системной информации дано в документации на I-7550. Описание запроса и ответа представлено ниже. В качестве основы, для обмена между преобразователем интерфейса *Profibus* DP I-7550 и высоковольтным испытателем «АСИП-30» взят протокол WAKE, который является логическим уровнем интерфейса управления оборудованием с помощью асинхронного последовательного канала. В качестве физического уровня интерфейса используется RS-485.

Последовательный канал должен быть сконфигурирован следующим образом:

- скорость передачи – 9600 б/с;
- число бит в посылке – 8;
- стоп бит – один;
- бит четности – “None”.

Основой протокола WAKE является протокол SLIP (UNIXTM Serial Link Interface Protocol). Передача данных осуществляется в двоичном виде, т.е. используются все возможные значения байта (00h...FFh). Для передачи служебной информации зарезервированы два кода: FEND = C0h (Frame End) и FESC = DBh (Frame Escape). Управляющий код FEND служит для обозначения начала посылки, а код FESC служит для передачи ESC-последовательностей. Если в потоке данных встречаются байты, значения которых совпадают с управляющими кодами, производится подмена этих байт ESC-последовательностями. Такой механизм называют байт-стаффингом (byte stuffing). Код FEND заменяется последовательностью <FESC>, <TFEND>, а код FESC - последовательностью <FESC>, <TFESC>, где TFEND = DCh (Transposed FEND), TFESC = DDh (Transposed FESC). Коды TFEND и TFESC являются управляющими только в ESC-последовательностях, поэтому при передаче данных они в подмене не нуждаются.

Структура пакета WAKE следующая: пакет всегда начинается управляющим кодом FEND (C0h), за ним следует байт количества данных и собственно байты данных. Завершает пакет байт контрольной суммы CRC-8. Контрольная сумма равна сумме всех полей, с учетом однобайтного сложения, до применения стаффинга.

В данных содержится информация о том, кому адресован пакет, от кого он следует, команды, состояние устройства, результаты измерений, уставки, флаги. ПЭВМ является «Master» (главным устройством), она же является и

инициатором обмена. Высоковольтный дефектоскоп «АСИП-30» «Slave», может только отвечать на запрос главного устройства.

Напряжение на приборе устанавливается в виде кода от 0 до 4095, что соответствует минимальному и максимальному напряжениям соответственно. Получаемое напряжение задается десятками Вольт (например, коду 1234 соответствует напряжение 12,34 кВ). Ток принимается в виде кода от 0 до 4095, чему соответствует 0 и 12 мА соответственно.

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.

Список использованных источников

1. Саакян А. Е. Технический контроль производства кабелей, проводов и шнуров с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией: учебное пособие/ А. Е. Саакян. - М. ; Л.: Госэнергоиздат, 1957. - 239 с. : ил. - Библиогр.: с. 240.
2. Основы кабельной техники: учебное пособие/ Под ред. В.А. Привезенцева. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1975. – 472.
3. Аникеев В. М.. Основы кабельной техники : учебное пособие: в 2 ч. / В. М. Аникеев; Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во ТПУ, 2005- (Учебники Томского политехнического университета). Ч. 1. - 2005. - 126 с.
4. Аникеев В. М. Основы кабельной техники: учебное пособие: в 2 ч./ В. М. Аникеев; Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во ТПУ, 2005- (Учебники Томского политехнического университета). Ч. 2. - 2005. - 167 с.
5. Электроизоляционная и кабельная техника. Методы испытания электротехнических материалов и изделий: [сборник статей]/ Иркутский политехнический институт (ИрПИ); под ред. Ю. Т. Плискановского. - Иркутск: Б. и., 1975. - 214 с.
6. Кижаяев, С. А. Интеллектуальные системы измерения в процессе экструзии в кабельной промышленности/ С. А. Кижаяев// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика : журнал. - М., 2004. - № 7. - С. 52-54.
7. Петров А. В. Методы испытаний электрической изоляции : практикум по курсу: учебное пособие/ А. В. Петров; Томский политехнический университет. - Томск : Изд-во ТПУ, 2005. - 121 с.
8. Григорьян А. Г. Производство кабелей и проводов с применением пластмасс и резин/ А. Г. Григорьян, Д. Н. Дикерман, И. Б. Пешков; под ред. И. Б. Пешкова. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 304 с.

9. Пешков И.Б. Мировые тенденции развития кабельной техники// Журнал кабеля и провода. – 2002. – № 3. – С. 15 – 19.
10. Канискин В. А. Основы кабельной техники: учебное пособие / В. А. Канискин, Б. И. Сажин; Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина (ЛПИ). - Л.: Изд-во Ленинградского технологического ин-та, 1990. - 86 с.
11. Техника высоких напряжений / под ред. Д.В. Разевига. – 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Энергия, 1976. – 471 с.
12. Новодворец Л. А. Испытание и проверка силовых кабелей/ Л. А. Новодворец. - М.: Энергия, 1970. - 112 с.
13. Ключев С. А. Монтаж средств измерений и систем автоматизации/ С. А. Ключев. - М.: ИСПО-Сервис, 1999. - 156 с. Кижаяев, С. А. Автоматизация процесса испытания кабелей на электрическую прочность изоляции/ С. А. Кижаяев// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика: журнал. - М., 2004. - № 9. - С. 14-17.
14. Кузнецов В. А. Основы метрологии: учебное пособие/ В. А. Кузнецов, Г. В. Ялунина. - М.: Изд-во стандартов, 1995. - 280 с.
15. Кузнецов В. А. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы): учебное пособие/ В. А. Кузнецов, Г. В. Ялунина. - М.: Изд-во стандартов, 1998. - 336 с.
16. Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии. Технический справочник. Издание 3-е. М.:НКП «Эллипс» - 2006.
17. Глушук П. С. Система контроля качества производства кабельных изделий [Электронный ресурс]/ П. С. Глушук. - Электронные текстовые данные (1 файл: 5.1 Мб)// Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]/ Томский политехнический университет (ТПУ). - Томск., 2004. - Т. 307, № 3. - [С. 118-121]. - (Технические науки). - Заглавие с титульного листа. - Электронная версия печатной публикации.
18. Редько В. В. Приборы контроля качества изоляции кабельных изделий/ В. В. Редько, Л. А. Редько// Т. 2. - 2004. - С. 337-338.

19. Редько В. В. Изоляция кабельных изделий как объект электроискрового технологического контроля/ В. В. Редько, Л. Б. Бурцева// Становление и развитие научных исследований в высшей школе: сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А. А. Воробьева, Томск, 14-16 сентября 2009 г./ Российская академия наук (РАН); Ассоциация инженерного образования России (АИОР); Томский политехнический университет (ТПУ). - Томск. -2009. - Т. 2. - С. 90-95.

20. Якимов Е. В. Исследование, разработка и применение методов защиты от помех преобразователей больших сопротивлений, применяемых при контроле изоляции кабельных изделий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: Спец. 05.11.13/ Е. В. Якимов; Томский политехнический университет; науч. рук. В. К. Жуков. - Защищена 02.03.2004 г. - Томск: Б.и., 2003. - 131 л.: ил. - Библиогр.: с. 110-114.

21. Холодный С. Д. Методы испытаний и диагностики кабелей и проводов/ С. Д. Холодный. - М. : Энергоатомиздат, 1991. - 200 с.

22. Белоруссов Н. И. Электрические кабели и провода. Теоретические основы кабелей и проводов, их расчет и конструкции/ Н. И. Белоруссов. - М.: Энергия, 1971. - 512 с.

23. Кижаяев С. А. Автоматизация процесса испытания кабелей на электрическую прочность изоляции/ С. А. Кижаяев// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика: научно-технический и производственный журнал. - М., 2004. - № 9. - С. 14-17.

24. ГОСТ 2990-78. Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением.

25. ГОСТ 23286-78. Кабели, провода и шнуры. Нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний напряжением.

26. British standard BS EN 50356:2002 «Method for spark testing of cables».

27. British standard BS 5099:2004 «Electric cables - Voltage levels for spark testing».
28. Clinton H.H., Stewart T.W. Comparison of impulse and 3 kilohertz sine wave spark testing. Proceedings of 16th International Wire and Cable Symposium. Atlantic City, 1967. – 13 p.
29. H. Clinton. Grounding of conductors during the spark test. Wire Journal, 1986.
30. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
31. UL 1581-2000. Reference Standard for Electrical Wires, Cables, and Flexible Cords.
32. РД 14.640-88. ОСТПП. Кабели, провода и шнуры. Испытание напряжением на проход. Типовой технологический процесс.
33. NEMA Standards Publication WC 56-1986 (R2005). 3.0 kHz Insulation Continuity Proof Testing of Wire and Cable.
34. NEMA Standards Publication WC 52-2005. High-Temperature and Electronic Insulated Wire, Impulse Dielectric Testing
35. Стеблевская Л.А., Черневский И.Н. Исследование эффективности испытаний изолированных жил и проводов аппаратами непрерывного контроля. – Труды ВНИИ кабельной промышленности. М., ВНИИКП, 1974, с. 217 – 232.
36. Белоруссов Н. И. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник/ Н. И. Белоруссов, А. Е. Саакян, А. И. Яковлева. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 536 с.
37. Дикерман Д. Н. Провода и кабели с фторопластовой изоляцией/ Д. Н. Дикерман, В. С. Кунегин. - М. : Энергоиздат, 1982. -145 с.
38. ГОСТ 7006-72. Покровы защитные кабелей. Конструкция и типы, технические требования и методы испытаний.
39. ГОСТ Р МЭК 60851-5-2002. Провода обмоточные. Методы испытаний.

40. ГОСТ Р МЭК 60245-4-2002 Кабели с резиновой изоляцией на номинальное напряжение до 450/750 В включительно. Шнуры и гибкие кабели.

41. ГОСТ Р МЭК 60227-6-2002. Кабели с поливинилхлоридной изоляцией на номинальное напряжение до 450/750 В включительно. Лифтовые кабели и кабели для гибких соединений.

42. ГОСТ Р МЭК 60227-4-2002. Кабели с поливинилхлоридной изоляцией на номинальное напряжение до 450/750 В включительно. Кабели в оболочке для стационарной прокладки.

43. ГОСТ Р МЭК 60227-3-2002. Кабели с поливинилхлоридной изоляцией на номинальное напряжение до 450/750 В включительно. Кабели без оболочки для стационарной прокладки.

44. ГОСТ Р МЭК 60227-1-99. Кабели с поливинилхлоридной изоляцией на номинальное напряжение до 450/750 в включительно. Общие требования.

45. ГОСТ Р 52372-2005. Кабели гибкие и шнуры для подземных и открытых горных работ. Общие технические условия.

46. ГОСТ Р 51978-2002. Кабели грузонесущие геофизические бронированные. Общие технические условия.

47. ГОСТ Р 51311-99. Кабели телефонные с полиэтиленовой изоляцией в пластмассовой оболочке. Технические условия.

48. ГОСТ 27893-88. Кабели связи. Методы испытаний.

49. ГОСТ 26445-85. Провода силовые изолированные. Общие технические условия.

50. ГОСТ 26411-85. Кабели контрольные. Общие технические условия.

51. ГОСТ 24334-80. Кабели силовые для нестационарной прокладки. Общие технические требования.

52. ГОСТ 18410-73. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия.

53. ГОСТ 18410-73. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия.
54. ГОСТ 18404.2-73. Кабели управления с полиэтиленовой изоляцией в резиновой оболочке. Технические условия.
55. ГОСТ 18404.1-73. Кабели управления с фторопластовой изоляцией в усиленной резиновой оболочке. Технические условия.
56. ГОСТ 18404.0-78. Кабели управления. Общие технические условия.
57. ГОСТ 17515-72. Провода монтажные с пластмассовой изоляцией. Технические условия.
58. ГОСТ 16442-80. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией. Технические условия.
59. ГОСТ 16092-78. Кабели многожильные гибкие подвесные. Технические условия.
60. ГОСТ 15634.4-70. Провода обмоточные. Методы испытания изоляции напряжением.
61. ГОСТ 11326.91-79. Кабель радиочастотный марки РД 200-7-11. Технические условия.
62. ГОСТ 11326.81-79. Кабели радиочастотные марок РК 75-33-17, РК 75-33-17-БГ, РК 75-33-17-Б и РК 75-33-17-Ба. Технические условия.
63. ГОСТ 11326.78-79. Кабели радиочастотные марок РК 75-13-17, РК 75-13-17-БГ, РК 75-13-17-Б, РК 75-13-17-Ба и РК 75-13-17-К. Технические условия.
64. ГОСТ 11326.0-78. Кабели радиочастотные. Общие технические условия.
65. ГОСТ 10348-80. Кабели монтажные многожильные с пластмассовой изоляцией. Технические условия.
66. ГОСТ 7399-97. Провода и шнуры на номинальное напряжение до 450/750 В. Технические условия

67. ГОСТ 7006-72. Покровы защитные кабелей. Конструкция и типы, технические требования и методы испытаний.
68. ГОСТ 6323-79. Провода с поливинилхлоридной изоляцией для электрических установок. Технические условия.
69. ГОСТ 5960-72. Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей. Технические условия.
70. ГОСТ 1508-78. Кабели контрольные с резиновой и пластмассовой изоляцией. Технические условия.
71. ГОСТ 6285-74. Провода для промышленных взрывных работ. Технические условия.
72. ГОСТ 7866.1-76. Кабели судовые с резиновой изоляцией в резиновой или свинцовой оболочке. Технические условия.
73. Сканави Г. И. Физика диэлектриков; Область сильных полей/ Г. И. Сканави. - М.: Физматгиз, 1958. - 907 с.
74. Макиенко Г. П. Кабели и провода, применяемые в нефтегазовой индустрии/ Г. П. Макиенко. -Пермь: Стиль-МГ, 2004. - 560 с.
75. ANSI/NEMA ICEA T-27-581. Standard Test Methods for Extruded Dielectric Power, Control, Instrumentation, and Portable Cables for Test.
76. Электрическая прочность талька. Известия ТПУ. Том 91. 1956. К.М. Кевролева. С. 311-316.
77. Еще раз о температурной зависимости электрической прочности при электрическом пробое. А.А. Воробьев, Е.К. Заводская. Известия ТПУ. Том 71. 1952. С. 7-16.
78. N. M. Renukappa, Siddaramaiah R. D. Sudhaker Samuel J. Sundara Rajan Ж Joong Hee Lee. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. Dielectric properties of carbon black: SBR composites. (2009) 20: 648–656.
79. Dielectric losses of various filled phenolic resins. For the degree of doctor of technical science. The swiss federal institute of technology. Zurich. Robert l. Loftness. 1952.

80. Low-loss Coaxial Cable with Highly Foamed Insulator. Ryo Watanabc, Tomonori Kondo, and Tomohisa Watanabc. Fujikura Technical Review, 2008. 43-48. Chemical Structure and Dielectric Properties of High Polymer. W. Reddish. I.C.I. LTD, Plastic Division, Herts., UK. <http://pac.iupac.org/publications/pac/pdf/1962/pdf/0503x0723.pdf>.
81. The Effect of Frequency and Temperature on Dielectric Properties of Pure Poly Vinylidene Fluoride (PVDF) Thin Films. Vikram S Yadav *Member, IAENG*, Devendra K Sahu, Yashpal Singh *Member, IAENG*, and D.C.Dhubkarya. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010 Vol III, IMECS 2010, March 17 - 19, 2010, Hong Kong.
82. Impulse Propagation Measurements of the Dielectric Properties of Several Polymer Resins. W. Scott Bigelow Everett G. Farr Farr Research, Inc. Measurement Notes, Note 55 November, 1999.
83. Dielectric Properties of Polyester Reinforced with Carbon Black Particles. 2011 International Conference on Applied Physics and Mathematics(ICAPM 2011). Omed Ghareb Abdullah, Gelas Mukaram Jamal, Salah Raza Saeed, Dana Abdull Tahir.
84. Chapter 7: Dielectric Properties. Results of this chapter have been accepted for publication in Journal of Polymer Engineering. http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/70/5/14_chapter7.pdf.
85. О.С. Гефле, Е.И. Черкашина. Диагностика предпробивного состояния полимерных диэлектриков по тепловым эффектам. Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 1. С. 54-59.
86. Effect of Chlorination of Ground Rubber Tire on Its Compatibility with Poly(vinyl chloride): Dielectric Studies. Amit K. Naskar, D. Khastgir, ANIL K. Bhowmick, S. K. DE. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 84, 993–1000 (2002).
87. Optical and electrical properties of polyvinyl-chloride (pvc) films. Omed Gh. Abdullah, Dana A. Tahir, Shuja-Aldeen B. Aziz. Iraqi Journal of Science, Vol.51, No.2, 2010, PP.295-300.

88. Dielectric properties and thermal conductivity of hdpe and ps. Hameed Majed Ahmed, Shakhawan Hassan Ali. Iraqi Journal of Science, 2012, vol.53, No.2, pp 330-334.
89. Plasticizer effect on the dynamics of polyvinylchloride studied by dielectric spectroscopy and quasielastic neutron scattering. Reiner Zorn, a Michael Monkenbusch, and Dieter Richter. Angel Alegría and Juan Colmenero, Bela Farago. THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS 125, 154904 - 2006. pp. 125-137.
90. Современное состояние теории электрического пробоя твердых диэлектриков. В. А. Чуенков. Успехи физических наук. 1954 Т. LIV, вып. 2. С.186-230.
91. Dielectric studies of molecular b-relaxation in low density polyethylene: the influence of drawing and ionizing radiation. Edin Suljovrujic. Polymer 43 (2002) 5969–5978.
92. Численное моделирование технологических напряжений при изготовлении пластмассовой изоляции провода. Р.Р. Зиннатуллин, Н.М. Труфанова// Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2, № 1. – С. 38-53.
93. Thermal, dielectric and mechanical study of poly(vinyl chloride)/olive pomace composites. H. Djidjelli¹, D. Benachour, A. Boukerrou, O. Zefouni, J. Martinez-Véga, J. Farenc, M. Kaci. eXPRESS Polymer Letters Vol.1, No. 12 (2007) 846–852.
94. Sejal Shah, Dolly Singh, Anjum Qureshi, N L Singh, K P Singh & V Shrinet. Dielectric properties and surface morphology of proton irradiated ferric oxalate dispersed PVC films. Indian Journal of Pure & Applied Physics Vol. 46, June 2008, pp. 439-442.
95. Dielectric Properties of Commercial non-Polar Polymers. Hameed M. Ahmed , Shuja-Aldeen B. Aziz. Journal of Zankoy Sulaimani, 2008, 11 (1) Part A (1-8).

96. Технические свойства полимерных материалов: Учеб. справ. пособие/ В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. - 2-е изд., испр. и доп. - СПб.: Профессия, 2005. - 248 стр.
97. Электрические свойства полимеров/ [Б. И. Сажин, А. М. Лобанов, О. С. Романовская и др.]; Под ред. Б. И. Сажина. - 3-е изд., перераб. - Л.: Химия: Ленингр. отд-ние, 1986. - 224 с.
98. Рычков А. А. Полимерные диэлектрики: учеб. пособие/ А.А. Рычков, Д.А. Рычков, С.А. Трифонов; Рос. гос. пед. ун-т им. А.И. Герцена. - Санкт-Петербург: Кн. дом, 2005. - 156 с.
99. Electrical and electronic properties of polymers : A state-of-the-art compendium/ Ed.: Jacqueline I. Kroschwitz. - New York etc.: Wiley, Cop. 1988. - XXVI, 330 с.
100. Electrical properties of polymers : Chem. principles/ By Chen C. Ku a. Raimond Liepins. - Munich etc.: Hanser, Cop. 1987. - IX, 389 с.
101. Лущейкин Г. А. Методы исследования электрических свойств полимеров/ Г. А. Лущейкин. - М.: Химия, 1988. - 157 с.
102. Физика полимеров. Электрические свойства: Учеб. пособие/ С. Н. Каримов, Н. И. Конкин, М. К. Курбаналиев, А. А. Мирзоев; Тадж. гос. ун-т им. В. И. Ленина. - Душанбе: ТГУ, 1989. - 119 с.
103. Ястребов А. С. Электрические поля и процессы пробоя в диэлектриках, полупроводниках и структурах на их основе/ А. С. Ястребов. - СПб.: Политехника, 1997. - 111 с.
104. Вершинин Ю. Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков/ Ю. Н. Вершинин; Рос. акад. наук. Ур. отд-ние. Ин-т электрофизики. - Екатеринбург : Ин-т электрофизики УРО РАН, 2000. - 257 с.
105. Важев Вл. Ф. Пробой твердых диэлектриков : Учеб. пособие/ В. Ф. Важев; Том. политехн. ун-т. - Томск: ТПУ, 1992. - 80 с.
106. Ларионов В. П. Техника высоких напряжений: (Изоляция и перенапряжения в электр. установках). [Учебник для энерг. и энергостроит.

техникумов]/ В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев; Под ред. В. П. Ларионова. - М. : Энергоиздат, 1982. - 296 с.

107. В.В. Разработка методов и средств электроискрового технологического контроля изоляции кабельных изделий: монография/ В.В. Редько; Мин-во образования РФ, ТПУ. – Томск, 2013. – 91 с.

108. 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.

109. Редько Л.А., Редько В.В. Высоковольтный испытатель изоляции кабеля методом на проход // Датчики и системы, 2004. - № 9 -с. 43-45.

110. 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.

111. Редько В.В., Редько Л.А. Устройство для испытания полимерной изоляции кабеля. Свид. на ПМ 45834 Россия. МКИ7 G01R 31/14. Заявлено 27.12.2004; Оpubл. 27.05.2005, Бюл. № 15. – 3 с.: ил.

112. 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.

113. Редько В.В. Высоковольтный испытатель оболочки оптических кабелей связи// Датчики и системы, 2006. -№ 4 -с. 35-37.

114. Редько В.В., Свендровский А.Р. Адаптация ГОСТа 2990 к современным условиям кабельного производства// Кабели и провода, 2006. - № 6 - с. 17-22.

115. 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.

116. 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.
117. 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.
118. Редько В.В., Л.Б. Бурцева. Аттестация высоковольтных испытателей изоляции// Ползуновский вестник. № 3/1 2011 г. С.111-113.
119. Редько В.В., Л.Б. Бурцева, Л.А. Редько. Достоверность электроискрового контроля кабельных изделий // Дефектоскопия. № 10 2011 г. с. 31-34.
120. Славинский А. З. Физика диэлектриков/ А. З. Славинский. - Москва: Научтехлитиздат, 2007. Т. 1: Высоковольтная изоляция энергетической аппаратуры. - 2007. - 327 с.
121. Редько В.В., Л.Б. Бурцева, Л.А. Редько. Приборы электроискрового контроля изоляции кабельных изделий// Контроль и диагностика. № 11 2011 г. С.9-11.
122. E. Gulski, J. Smith, F. Wester, 2005, "PD Knowledge Rules for Insulation Condition Assessment of Distribution Power Cables" («Данные о частичных разрядах для оценки состояния изоляции распределительных кабелей»), IEEE TDEI, vol.15, 223– 239.
123. F. Petzold, M. Beisert, E. Gulski, 2007, "Experience with Offline PD-diagnosis on MV Cables – Knowledge Rules for Asset Decisions" («Опыт диагностики частичных разрядов на кабелях среднего напряжения – Данные для принятия решений по активам»), IICABLE, Versailles, paper C7.2.5, 818–821.
124. 5. F. Wester, 2004, Condition Assessment of Power Cables using Partial Discharge Diagnosis at Damped AC Voltages (Оценка состояния силовых кабелей с помощью диагностики частичных разрядов на затухающем

напряжении переменного тока), Optima Grafische Communicatie, Rotterdam, Holland, 66–70.

125. 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.

126. Харченко А. Ф. Техника высоких напряжений: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта/ А. Ф. Харченко; Московский гос. ун-т путей сообщ. - Москва: РОАТ, 2010.

127. 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.

128. ГОСТ 28114-89. Кабели. Метод измерения частичных разрядов. М.: Изд-во стандартов 1989.

129. ГОСТ 21023-1975. Трансформаторы силовые. Методы измерений характеристик частичных разрядов при испытаниях напряжением промышленной частоты.

130. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. М.: Изд-во стандартов, 1983. М.: Изд-во стандартов 1983.

131. МЭК-60270-2000. Методы высоковольтных испытаний. Измерение частичных разрядов.

132. Сви, П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. М.: Энергоатомиздат, 1992. 128 с.

133. Кучинский, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения/ Г. С. Кучинский. М.: Энергоатомиздат, 1987. 367 с.

134. Беляевский, О. А. Система контроля изоляции по характеристикам частичных разрядов СКИ-3/ О. А. Беляевский, Р. М. Идиатуллов, А. Ф. Курбатова// Сб. материалов семинара, 19-23 апреля 2004 г. в г. Санкт-Петербург. СПб.: ПЭИпк, 2005. С. 123–128.

135. Д. В. Максудов, Е. М. Федосов. Метод селекции сигналов частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов// Вестник УГАСТУ. Т.12, № 2(31). С. 138–143.
136. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Диэлектрики в электрическом поле. Уфа: УГАТУ, 2009. 104 с.
137. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Разрядные процессы в диэлектриках в электрических и магнитных полях. М.: Машиностроение, 2010. 180 с.
138. ANSI/SCTE 63. Test Method for Voltage Withstand of Outer Jacket / Note: revision of ANSI/SCTE 63-2003*Approved 2009-05-21.
139. Свид. на ПМ 45834 Россия. МКИ7 G01R 31/14. Устройство для испытания полимерной изоляции кабеля. Редько В.В., Редько Л.А. Заявлено 27.12.2004; Оpubл. 27.05.2005, Бюл. № 15. – 3.
140. 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.
141. Редько В.В., Редько, Л.А., Гладышев Ю.Г. Высоковольтный испытатель изоляции постоянным напряжением «КОРОНА-ПН»// Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения: Сборник трудов Российской научно-технической конференции - Томск, ТПУ, 28-29 сентября 2004. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - с. 55-58.
142. 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.
143. 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.

144. 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.

145. 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.

146. 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.

147. Бурцева Л.Б., Редько В.В. Электроискровой метод испытания кабельных изделий. Анализ нормативной документации// Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений: Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых - Томск, ТПУ, 23-25 ноября 2010. - Томск: Изд. ТПУ, 2010. - с. 319-322.

148. 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.

149. Редько В.В., Редько Л.А. «Исследование и разработка технологий построения высоковольтных испытателей изоляции». Отчет по НИР. Гос. регистрация №01200504844. Инвентарный номер № 02200602729, 2006 г.

150. ГОСТ Р 54813-2011 "Кабели, провода и шнуры электрические. Электроискровой метод контроля".

151. <http://www.sikora.net/spark-testing/>

152. http://www.zumbach.com/e/product/spark_testers.asp

153. <http://www.cicsparkers.com/products/ac-sparkers/sta-30g-30kv-power-mains-spark-tester/>

154. <http://www.betalasermike.com/index.php/en/beta-lasermike-products-en/fault-detection-systems-en/spark-testers>

155. <http://www.mikronixcable.com/spark-tester.html>

156. Грановский, Вениамин Львович. Электрический ток в газе. Установившийся ток. - Москва, 1971.

157. http://www.redwill.ru/index.php?option=com_content&view=section&id=5&Itemid=59

158. <http://www.ermis.tomsk.ru/catalog/korona/index.htm>

159. http://rudu.user.s-and-b.ru/partial_discharges/pd_field_measure/PDFieldMeas.html

160. http://rudu.user.s-and-b.ru/tech/ics_3/to_ski3.pdf

161. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. - Л.: Энергия, 1971.

162. Основы теории цепей: Учебник для вузов/ Г.В. Зевеке. - М.: Энергоатомиздат, 1989.

163. ГОСТ 12.1.038–82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

164. Черневский И.Н. Аппараты для испытания на проход изолированных жил и проводов напряжением переменного тока//

Электротехническая промышленность. Серия Кабельная техника. – 1970. - № 67. - С. 15 – 16.

165. Иоссель Ю. Я. Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергоиздат, 1981. - 288 с.