

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Галеева Надежда Сергеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ КАБЕЛЬНЫХ
ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО И ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО МЕТОДОВ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
К.т.н., доцент
Редько Виталий Владимирович

Томск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИИ И ОБОЛОЧКИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	13
1.1 Основы технологии производства кабельных изделий	13
1.2 Виды технологических дефектов изоляции.....	15
1.3 Причины возникновения технологических дефектов изоляции и оболочки.....	17
1.3.1 Подготовка жилы или заготовки к наложению изоляции	17
1.3.2 Наложение изоляции или оболочки с помощью экструдера.....	18
1.3.3 Охлаждение изоляции после экструдирования.....	25
1.4 Методы технологического контроля качества изоляции кабельных изделий	26
1.4.1 Испытание напряжением.....	27
1.4.2 Контроль погонной емкости (электроемкостный метод)	32
1.4.3 Исследование частичных разрядов	33
1.4.4 Комплексный метод контроля	34
1.5 Выводы по главе 1	41
ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ЗНАЧЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ КАБЕЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ.....	43
2.1. Модель бездефектного кабельного изделия	43
2.2. Моделирование влияния дефектов изоляции или оболочки на локальную емкость кабельного изделия	44
2.2.1. Определение «дефектного провода».....	45

2.2.2. Моделирование основных типов дефектов	47
2.2.3. Определение зависимости между размерами дефекта и величиной относительного изменения локальной емкости кабельного изделия.....	55
2.3. Модель группы скрученных изолированных жил	61
2.3.1. Возможность контроля поверхности группы скрученных изолированных жил	62
2.3.2. Разработка математической модели для определения локальной емкости группы скрученных изолированных жил	75
2.4. Выводы по главе 2	82
ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА С ФУНКЦИЕЙ КОНТРОЛЯ ЕМКОСТИ.....	85
3.1. Исследование влияющих факторов на точность измерения локальной емкости и нахождение методов отстройки	85
3.2. Разработка требований к конструкции электрода.....	92
3.3. Измерение локальной емкости в электроискровом дефектоскопе с функцией контроля емкости	99
3.4. Техническая реализация электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости	110
3.5. Выводы по главе 3	115
ГЛАВА 4. АТТЕСТАЦИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА С ФУНКЦИЕЙ КОНТРОЛЯ ЕМКОСТИ	117
4.1. Аттестация чувствительности и блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа	117
4.2. Настройка блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа	122
4.3. Аттестация генератора	123
4.4. Выводы по главе 4	125

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРОЦЕДУРА ПОДГОТОВКИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДЕФЕКТΟΣКОПА С ФУНКЦИЕЙ КОНТРОЛЯ ЕМКОСТИ К ПРОВЕДЕНИЮ КОНТРОЛЯ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОПУСТИМОГО ОТКЛОНЕНИЯ ЕМКОСТИ КАБЕЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ ОТ НОМИНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Кабельные изделия находят широкое применение в различных сферах жизни человечества и используются для передачи энергии и информации через электрические сигналы. Для обеспечения корректной работы и продолжительного срока службы необходимо производство кабельных изделий высокого качества, требования к качественным характеристикам которых постоянно растут. Одной из составляющих качественного кабельного изделия является бездефектное изоляционное покрытие. Изоляция является одним из основных конструктивных элементов кабелей и проводов и необходима для предотвращения электрического контакта между проводящими частями кабелей, для обеспечения передаточных свойств кабеля, для защиты жилы кабеля от механических воздействий и других неблагоприятных факторов. Таким образом, требуется качественный контроль изоляции на протяжении всей длины кабельного изделия.

В кабельной отрасли применяются два электрических метода технологического контроля качества изоляции кабельных изделий: электроискровой [1-8] и электроемкостный [4, 7-11]. Электроискровой метод контроля заключается в приложении высокого испытательного напряжения с помощью специального электрода к поверхности контролируемого объекта, в то время как токопроводящая жила заземляется. При прохождении дефектных участков, ослабляющих электрическую прочность изоляции, происходит электрический пробой, регистрируемый автоматикой устройства. Существенным недостатком данного метода является возможность выявления только тех дефектов изоляции, которые значительно ослабляют электрическую прочность.

При проведении электроемкостного метода контроля кабельное изделие проходит через трубчатый электрод, погруженный в воду охлаждающей ванны, которая обеспечивает электрический контакт между электродом и поверхностью объекта контроля. При отклонении погонной емкости провода от номинального значения автоматикой прибора регистрируется дефект изоляции. К отклонению

погонной емкости приводит изменение геометрических параметров кабельного изделия и диэлектрических параметров изоляции, таким образом данный метод позволяет выявлять как уменьшение толщины изоляционного покрытия, так и ее увеличение, но не способен выявлять мелкие несквозные дефекты. Также для проведения контроля емкостным методом необходимо наличие дополнительного оборудования и технического обслуживания для обеспечения работоспособности измерителя емкости.

Для устранения недостатков существующих методов было предложено разработать новый метод контроля на основе комплексного использования электроискрового и емкостного методов [12-17]. Комплексный метод заключается в контроле локальной емкости кабельного изделия при подаче испытательного напряжения между поверхностью объекта контроля и проводящей частью кабельного изделия, находящейся непосредственно под контролируемым изоляционным слоем. Дефекты в объекте контроля регистрируются по отклонению локальной емкости от номинального значения или возникновению пробоя. Дефектоскоп, реализованный на основе комплексного метода, должен обладать следующими достоинствами:

- чувствительностью к таким дефектам, как локальные увеличения/уменьшения внешнего диаметра, трещины, проколы, воздушные полости, сдир изоляции, эксцентricность изоляционного покрытия относительно центра жилы;
- простотой обслуживания;
- универсальностью (возможность установки на нужном этапе технологического процесса);
- низкой стоимостью.

Цель диссертационной работы – разработка комплексного метода контроля изоляции, заключающегося в контроле локальной емкости при проведении электроискровых испытаний изоляции в процессе изготовления кабельных изделий.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

- определить значение локальной емкости бездефектного кабельного изделия;
- оценить влияние дефектов изоляции на величину локальной емкости;
- определить требования к параметрам электрода для обеспечения высокой однородности потенциала по поверхности кабельного изделия;
- разработать электроискровой дефектоскоп с функцией контроля емкости;
- разработать имитатор дефектов для проведения аттестации блока регистрации дефектов электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости;
- разработать методику настройки генератора и блока измерения емкости дефектоскопа.

Объект исследования – контроль изоляции и оболочки кабельных изделий.

Предмет исследования – технологические дефекты изоляции и оболочки кабельных изделий.

Методы исследования. В работе были использованы экспериментальные и аналитические методы, методы математического и физического моделирования, статистические методы для обработки экспериментальных данных.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что впервые:

- предложен метод технологического контроля кабельных изделий на основе комплексного использования электроискрового и электроемкостного методов, позволяющий повысить информативность контроля;

- выявлены различия характера зависимости отклонения локальной емкости от размеров дефекта воздушная полость при проведении контроля в области слабых и сильных полей;
- с помощью численного моделирования доказано, что группу скрученных изолированных жил можно представить в виде провода с эквивалентной емкостью, зная размеры которого возможно определить локальную емкость группы без проведения измерений;
- предложена математическая модель, позволяющая численно оценить относительное изменение локальной емкости кабельного изделия, к которому приводит дефект с заданными геометрическими параметрами;
- разработаны требования к конструкции электрода, при выполнении которых обеспечивается высокая однородность потенциала на поверхности изоляции кабельного изделия и, соответственно, повышается информативность контроля.

Степень достоверности результатов проведенных исследований:

достоверность результатов, полученных в ходе исследований, подтверждается согласованностью результатов аналитических расчетов, компьютерного моделирования и экспериментальной части исследований, проведенной в условиях близким к реальным посредством откалиброванной аппаратуры.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Математическая модель, описывающая зависимость между емкостью и геометрическими размерами группы скрученных изолированных жил и позволяющая определять номинальную локальную емкость группы с погрешностью не более 10%.
2. Повышение чувствительности к дефектам типа воздушная полость при контроле качества изоляции по изменению локальной емкости в области сильных полей, если размер дефекта составляет больше 45% от толщины бездефектной изоляции.

3. Зависимость относительного изменения локальной емкости кабельного изделия от геометрических параметров дефектов изоляции/оболочки.

4. Зависимость однородности распределения потенциала по поверхности объекта контроля от параметров и типа электрода.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Электроискровой дефектоскоп с функцией контроля емкости позволяет своевременно обнаруживать технологические дефекты изоляции кабельных изделий и может быть установлен после охлаждающей ванны, а также на этапах скрутки и перемотки кабельных изделий.

2. Получение временной зависимости локальной емкости для бухты кабельного изделия позволяет контролировать стабильность процесса экструдирования (вулканизации).

3. Методика определения емкости группы скрученных изолированных жил позволяет теоретически оценивать ее локальную емкость без необходимости проведения дополнительных экспериментальных исследований.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс студентов, обучающихся по направлению «Приборостроение».

5. Результаты диссертационной работы внедрены более, чем на 10 кабельных заводах, в том числе на таких, как АО «СИБКАБЕЛЬ» (г. Томск), ООО «Камский Кабель» (г. Пермь), ОАО «БЕЛАРУСКАБЕЛЬ» (г. Мозырь, Республика Беларусь).

Апробация работы. Результаты проведенных исследований обсуждались на Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (г. Барнаул, 2014 г., 2015 г.), на Российской школе конференции с международным участием «Информационные технологии неразрушающего контроля» (г. Томск, 2015 г.), на научно-практической конференции с международным участием «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 2012 г., 2013 г., 2014 г., 2015 г.), на всероссийской

молодежной школе-конференции «Неразрушающий контроль» (г. Томск, 2013 г.), на научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Электронные приборы, системы и технологии» (г. Томск, 2012 г.), на Международной конференции датчиков и сигналов «SENSIG '15» (г. Будапешт, Венгрия, 2015 г.).

Ценность научных работ соискателя. Ценность научных работ соискателя подтверждается публикациями в журналах из перечня ВАК, а также международных базах цитирования, в рамках диссертационной работы выполнена и защищена на «отлично» бакалаврская ВКР по направлению «Приборостроение». Патент на изобретение, составленный на основе результатов работы, находится в процессе подачи.

Публикации. По результатам проведенных исследований была опубликована 21 работа, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК и 3 статьи в зарубежных журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

Личный вклад автора заключается в:

- разработке математической модели электрода и выводе требований к конструкции электрода, при выполнении которых обеспечивается высокая однородность потенциала на поверхности изоляции кабельного изделия;
- разработке математической модели группы скрученных изолированных жил в программе конечно-элементного анализа и нахождении методики для определения локальной емкости по известным геометрическим и электрическим параметрам группы;
- определении зависимости между размерами дефекта и величиной относительного изменения локальной емкости провода от номинального значения;

- проведении экспериментальных исследований по определению влияния температуры кабельного изделия на локальную емкость провода;

- проведении экспериментальных исследований по измерению локальной емкости группы скрученных изолированных жил с помощью электроискрового дефектоскопа «ЗАСИ-20» с функцией контроля емкости при изменении количества жил в группе.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 86 источников и трех приложений. Работа содержит 143 страницы текста, 72 рисунка, 10 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведен личный вклад автора и описана структура диссертационной работы.

В первой главе представлен процесс производства кабельных изделий и приведены причины возникновения технологических дефектов изоляции и оболочки. Также в первой главе описаны методы электрического контроля изоляции и оболочки кабельных изделий, приведены их достоинства, недостатки и предложен комплексный метод контроля, позволяющий устранить перечисленные недостатки существующих методов и повысить информативность технологического контроля.

Во второй главе приведена математическая модель провода на основе цилиндрического конденсатора, представлены результаты математического моделирования влияния дефектов изоляции и оболочки на значение локальной емкости. Было выявлено, что по изменению локальной емкости могут быть зарегистрированы такие дефекты, как локальное увеличение и уменьшение внешнего диаметра, эксцентricность провода, что существенно расширяет возможности электроискрового дефектоскопа. Также во второй главе было доказано, для моделирования изоляции провода допустимо использовать модель в виде плоского конденсатора. На основании этой модели была определена

зависимость между размерами дефектов и отклонением локальной емкости от номинального значения.

При моделировании группы изолированных жил было выявлено, что для определения номинальной емкости группы ее можно представить в виде «эквивалентного провода». Емкость «эквивалентного провода» находится аналогично емкости одиночной изолированной жилы, что позволяет рассчитывать емкость группы без необходимости проведения измерений.

В третьей главе проведена оценка факторов, влияющих на результат контроля комплексного метода, были предложены методы отстройки. После проведения анализа распределения потенциала по поверхности кабельного изделия в зоне контроля были сформулированы требования, позволяющие обеспечить высокую однородность потенциала по поверхности изоляции и, соответственно, повысить чувствительность контроля. Также в третьей главе описаны алгоритмы проведения настроек генератора и блока контроля емкости, приведена структурная схема и принцип действия электроискрового дефектоскопа ЗАСИ-20 с функцией контроля емкости.

Четвертая глава посвящена описанию методик аттестации чувствительности и блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа, предложена методики настройки блока контроля емкости и регистрации дефектов и генератора электроискрового дефектоскопы, которая необходима при неудовлетворительных результатах аттестации. Также описаны структурная схема и принцип работы устройства для имитации дефектов, необходимого для проведения аттестации электроискрового дефектоскопа.

ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИИ И ОБОЛОЧКИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

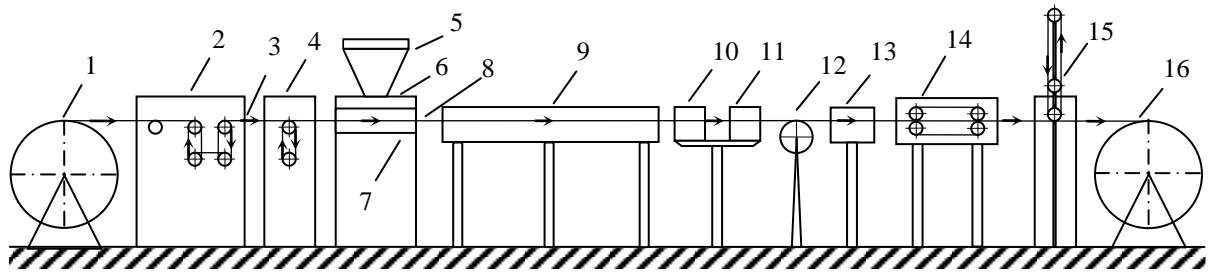
1.1 Основы технологии производства кабельных изделий

Кабельные изделия предназначены для передачи электрической энергии, сигналов информации, а также для изготовления обмоток электрических устройств [18]. Основными конструктивными элементами кабельных изделий являются: токопроводящая жила, изоляция, электрический экран, защитные покровы (в том числе влагозащитные оболочки). В зависимости от конструктивных особенностей кабельные изделия можно разделить на три основных типа: кабели, провода и шнуры [18-21].

Для обеспечения заданной конструкции, электрических и физико-механических свойств кабельного изделия необходима определённая последовательность технологических процессов. Так как длина кабельных изделий во много раз превышает их площадь поперечного сечения, большинство технологических процессов по изготовлению кабелей, проводов и шнуров выполняется при поступательном (осевом) перемещении заготовок через устройства технологических линий [19-21].

В настоящее время наиболее распространёнными являются технологические линии для производства кабельных изделий, включающие в себя следующие процессы и устройства: волочение и отжиг проволоки, изолирование, охлаждение изолированной жилы, контроль изоляционных и физико-механических свойств, а также учет длины готового изделия.

Схема типовой технологической линии приведена далее (Рисунок 1).



1 – отдающий барабан, 2 – волоочильная машина, 3 – токопроводящая жила, 4 – устройство для непрерывного отжига жилы, 5 – загрузочный бункер, 6 – экструдер, 7 – кабельная головка (формирующий инструмент: дорн и матрица), 8 – изолированный провод, 9 – охлаждающая ванна, 10 – устройство для обдува воды с поверхности изделия, 11 – измеритель диаметра, 12 – измеритель длины, 13 – высоковольтный испытатель, 14 – тяговое устройство; 15 – компенсатор, 16 – принимающий барабан

Рисунок 1 – Схема технологического процесса наложения изоляции из пластмасс

С отдающего барабана медная или алюминиевая катанка поступает в волоочильную машину. Далее полученная проволока (жила) подвергается непрерывному отжигу для повышения пластичности и электропроводности. Нагретая токопроводящая жила поступает в головку экструдера.

В головке экструдера расплавленная пластическая масса в виде изоляционной оболочки выдавливается через кольцевой зазор между дорном и матрицей и накладывается на неизолированный провод [20].

После этапа наложения изоляции изделие попадает в охлаждающую ванну. Наиболее распространены многосекционные ванны для ступенчатого охлаждения изоляции и токопроводящей жилы с помощью воды. Для трехсекционной ванны температура воды в первой секции составляет $(95 \dots 85)^\circ\text{C}$, во второй $(75 \dots 65)^\circ\text{C}$, в последней $(50 \dots 40)^\circ\text{C}$. Окончательное охлаждение осуществляется в проточной водопроводной воде [20].

После охлаждающей ванны размещается устройство для обдува, необходимое для удаления влаги с поверхности изолируемого изделия струей воздуха под давлением $0,2 \text{ МПа}$ [21]. Экструзионные линии оборудованы контрольно-измерительной аппаратурой, которая позволяет контролировать электрические, механические, конструктивные параметры, такие как диаметр, длина, погонная электрическая емкость и изоляционная прочность

изготовленного кабельного изделия. После блока контрольно-измерительной аппаратуры находится компенсатор, позволяющий обеспечивать постоянство натяжения кабельного изделия. В случае наложения резиновой изоляции обязательным этапом технологического процесса является прохождение кабельного изделия через талькирующее устройство для исключения порчи изоляции при приеме на барабан. Далее готовое изделие уже поступает на принимающее устройство (контейнер или барабан) [19 – 21].

Помимо экструзионных линий, в кабельном производстве также существуют крутильные линии. Скрутка осуществляется как для изолированных, так и для неизолированных токопроводящих жил. Скрутка производится либо вращением отдельных проволок или изолированных токопроводящих жил вокруг оси поступательно движущегося изделия, либо вращением самого поступательно движущегося изделия вокруг своей оси. Скрутка проволок применяется для придания изделиям гибкости и устойчивости конструкции. Число скручиваемых проволок определяется требуемым сечением жилы. В отличие от неизолированных, число изолированных жил, скручиваемых в кабель, зависит от его назначения [20].

1.2 Виды технологических дефектов изоляции

Согласно государственному стандарту дефектом является несоответствие продукции установленным требованиям [22], а именно, нормативной документации для соответствующего кабельного изделия [23–27]. Технологические дефекты изоляции обусловлены нарушениями условий или режимов производства кабельных изделий.

Изоляция кабельных изделий необходима для создания диэлектрического промежутка достаточной электрической прочности между токопроводящими жилами и между токопроводящей жилой и другими заземленными элементами, такими как экран, металлическая оболочка или оплетка [20, 21]. Также, изоляция должна обладать неизменными геометрическими параметрами для создания

качественного канала передачи информации, что в особенности важно для радиочастотных типов кабелей. Максимальное рабочее напряжение для кабельного изделия определяется исходя из материала, толщины и формы изоляции. Оболочка предохраняет изоляцию кабеля от воздействия внешней среды (влаги, пыли и т.д.) и от лёгких механических повреждений [28]. Таким образом, дефекты изоляции и оболочки кабельных изделий приводят к ослаблению электрической прочности, повышению уровня помех в информативной части передаваемого электрического сигнала, а также уменьшают срок службы кабельного изделия.

Исходя из требований нормативных документов, изоляция или оболочка признается дефектной в случае образования на поверхности трещин, пузырей, вмятин, выводящих толщину изоляции за предельные отклонения, или утолщений, выводящих диаметр одножильного провода за его максимальное значение. Также, дефектами признается эксцентричность наложенной изоляции (для радиочастотных кабелей) и наличие инородных включений [29-33].

Таким образом, можно выделить следующие виды дефектов для резиновых и пластмассовых изоляции и оболочки:

- эксцентричность наложенной изоляции или оболочки;
- дефекты по поверхности (оголения, царапины);
- воздушные включения в изоляции или оболочке;
- локальное увеличение/уменьшение внешнего диаметра;
- инородные включения в изоляции или оболочке;
- шероховатость поверхности.

Дефекты, характерные только для пластмассовой изоляции:

- неполное расплавление гранул пластиката.

Дефекты, характерные только для резиновой изоляции:

- недовулканизация;
- вулканизация резины в головке прессы.

На рисунках 2, 3 приведены некоторые примеры дефектов изоляции.



Рисунок 2 – Инородные включения, локальное уменьшение толщины изоляции



Рисунок 3 – Механическое повреждение изоляции

1.3 Причины возникновения технологических дефектов изоляции и оболочки

На качество изготавливаемого изделия оказывают существенное влияние такие этапы производства, как подготовка жилы к наложению изоляции, этап наложения изоляции или оболочки с помощью экструдера, а также следующий за ним этап охлаждения.

1.3.1 Подготовка жилы или заготовки к наложению изоляции

С отдающего устройства проволока или скрученная жила через направляющий ролик поступает в головку экструдера (Рисунок 1). Отдающий

барабан снабжен тормозным приспособлением, которое используется для обеспечения необходимого натяжения заготовки, а также служит для предотвращения раскрутки барабана или катушки с проволокой при резком уменьшении линейной скорости или остановке агрегата.

Перед поступлением в головку экструдера токопроводящая жила или кабельная заготовка подогревается до оптимальной температуры (около (100...120) °С) [20], которая близка к температуре головки. Это необходимо для решения таких технологических задач, как удаление следов влаги и загрязнений, имеющих на поверхности заготовки, которые при наложении изоляции могут привести к образованию газовых (воздушных) включений; для лучшей адгезии полимера к заготовке. Также, подогрев жилы или заготовки предотвращает «отвод» тепла от расплава в головке экструдера. Охлаждение расплава может привести к появлению внутренних механически напряжений в наложенном слое полимерного материала, что будет являться причиной растрескивания изоляции или оболочки при дальнейшей эксплуатации даже при нормальной температуре [7, 19-21].

При чрезмерном нагреве жилы может происходить разложение материала в матрице экструдера, что также приведет к наложению некачественной изоляции или оболочки [7].

1.3.2 Наложение изоляции или оболочки с помощью экструдера

Экструдер состоит из рабочей части, где происходит переработка массы и выпрессовывается оболочка, и привода, обеспечивающего вращение червяка с необходимым числом оборотов. Рабочая часть экструдера состоит из двух основных узлов: стальной втулки с вращающимся в ней червяком и головки, в которой закреплен формующий инструмент – дорн и матрица.

На производительность экструзионного агрегата и качество выпускаемой кабельной продукции оказывает значительное влияние геометрические размеры червяка и цилиндра, формующий элемент, скорость прохождения заготовки через

головку экструдера, частота вращения червяка, температурные режимы в цилиндре и головке [19-21].

Червяк имеет три основные зоны: I – зону питания, II – зону пластикации (сжатия) и III – зону дозирования (зону выдавливания) (Рисунок 4) [34, 35].

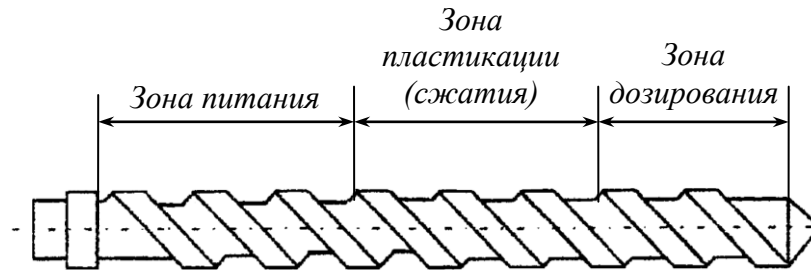


Рисунок 4 – Конструкция червяка

В зону питания пластикат (полиэтилен, ПВХ-пластикат) поступает в виде твердых гранул. Для исключения влажности гранул в технических условиях для каждого изоляционного материала указана допустимая влажность воздуха в цехе кабельного завода. При загрузке в червячный пресс влажного материала процесс переработки ухудшается, в изоляции образуются пузыри, поры, поверхность провода становится негладкой. Аналогичное явление происходит в зимнее время года при использовании пластиката, доставленного в цех после хранения при низкой температуре окружающей среды. В этом случае при загрузке охлажденных гранул в бункер червячного пресса на них конденсируются пары воды, что также приводит к увлажнению пластиката [19]. Немаловажным фактором для изготовления качественной изоляции или оболочки является отсутствие инородных включений в пластикате, а также запыленности пластиката, так как диэлектрические свойства наложенного изоляционного слоя будут значительно снижены [19].

При наложении изоляции из фторопласта материал поступает в зону загрузки в порошкообразном виде. Порошкообразный фторопласт имеет свойство скатываться в комки и прилипать к стенкам загрузочной воронки, цилиндру и другим деталям. Скомковавшийся фторопласт не поддается соединению. Если при прессовании применить скомковавшийся фторопласт, то это не только

мешает процессу образования монолитной массы, но и приводит к образованию трещин после запекания.

Головка червячных прессов предназначена для направления потока резины или пластмассы к инструменту – дорну и матрице, которые закрепляются к головке пресса. Основное требование к головке пресса – подведение потока резины или пластмассы к инструменту так, чтобы в кольцевом зазоре между дорном и матрицей давление было по всей плоскости одинаковое. Выполнение данного требования позволяет накладывать оболочку или изоляцию концентрично относительно кабельной заготовки или токопроводящей жилы [19-21].

Дорн и матрица (Рисунок 5) образуют кольцевое отверстие, размеры и форма которого определяют основные параметры накладываемой изоляции или оболочки.

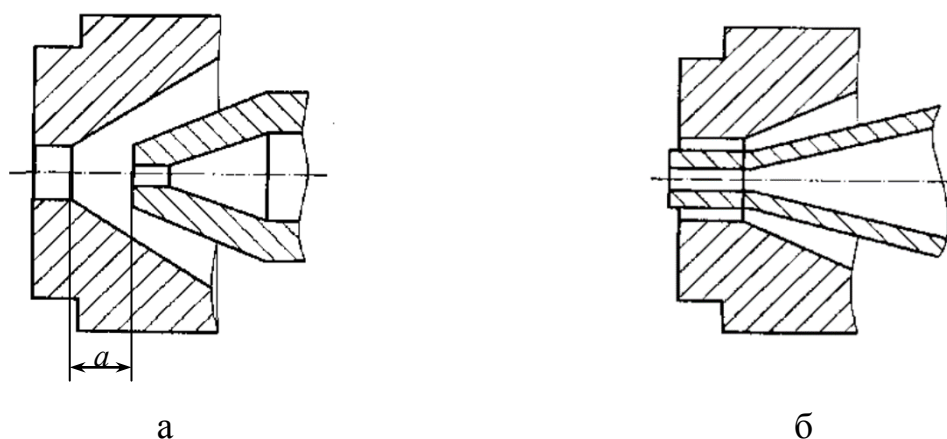


Рисунок 5 – Схемы расположения дорна и матрицы при наложении изоляции (а) и оболочки (б)

Дорн представляет собой полый цилиндр, переходящий в конус. Внутреннее отверстие дорна необходимо для прохождения через него проволоки или кабельной заготовки. Внутренний диаметр дорна должен быть несколько больше диаметра жилы с расчетом, чтобы могли проходить места паяк, а при наложении оболочки – места связок жил. Значительное увеличение внутреннего диаметра дорна по сравнению с диаметром проволоки или заготовки может привести к эксцентricности наложенной изоляции [19].

От взаимного расположения дорна и матрицы (Рисунок 5) зависит плотность наложения (или степень обжатия) изоляции на токопроводящую жилу, а также производительность экструдера [19-21]. При наложении изоляции обычно требуется достаточно плотное прилегание к токопроводящей жиле. Это возможно достигнуть при изменении взаимного расположения дорна и матрицы (Рисунок 5, а). Чем больше расстояние a между дорном и началом цилиндрической части матрицы (Рисунок 5, а), тем с большим обжатием накладывается изоляция. Слишком большое увеличение расстояния a может привести к нарушению концентричности наложения или обрыву жилы [19].

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, возможно расположение формирующего инструмента по схеме, обеспечивающей изолирование с малым обжатием. При малой степени обжатия возможно появление воздушных включений у поверхности жилы, но в данном случае это допустимо, так как значение напряженности электрического поля в изоляции или оболочке при низком рабочем напряжении мало [20].

При наложении оболочки обычно требуется получить ее в виде трубки, свободно располагающейся поверх изделия. Расположение дорна и матрицы, соответствующие этому случаю, приведено на рисунке 5, б. Если цилиндрическая часть, расположенная на конце дорна, выступает за переднюю стенку матрицы, как приведено на рисунке, то оболочка будет накладываться практически без обжатия. В этом случае обжатие будет определяться только некоторой усадкой пластической массы или резины [19].

Слабое обжатие или наложение оболочки без обжатия для многожильных кабелей используется для обеспечения их целостности при изгибах. При намотке 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 сильном обжатии оболочки возможны ее деформация и разрывы [21].

При использовании в качестве изоляции или оболочки различных материалов имеются существенные различия в устройстве отдельных узлов пресса и температурных режимах переработки. Соблюдение температурных режимов для обработки различных материалов позволяет получить качественное изоляционное покрытие и повысить производительность экструдера [19-21].

В дозирующей зоне важен равномерный нагрев материала по всему объему нарезки червя, что позволяет обеспечивать однородность расплава и, соответственно, однородность свойств по всей толщине изоляции. Наибольшая производительность экструдера достигается при максимально высокой температуре червяка, так как вязкость расплава существенно снижается. Однако в данном случае разница температур по высоте канала имеет большое значение, что приводит к гомогенности расплава, а также к возможности чрезмерного перегрева полимера и его разложения.

При уменьшении температуры цилиндра и червяка повышается вязкость расплава, что приводит к уменьшению производительности экструдера. Но в тоже время данные условия позволяют обеспечить более стабильную работу экструдера, и, следовательно, уменьшить колебания размеров кабельного изделий при отклонении от нормы различных технологических параметров, таких как колебания напряжения сети, однородности загружаемого полимера и т.д.

Температуру в головке экструдера задают выше, чем в дозирующей зоне на (10...40) °С, а температуру матрицы, соответственно, выше температуры головки.

Температурные режимы переработки некоторых изоляционных материалов приведены в таблице 1 [19-21].

Таблица 1 – Температурные режимы переработки изоляционных материалов

Тип материала	Температура, °С				
	Зоны обогрева			Головка экструдера	Матрица
	I	II	III		
Полиэтилен низкой плотности (при скоростях опрессования менее 500 м/мин)	100	150	180	200	220
Полиэтилен низкой плотности (при скоростях опрессования 600 м/мин и более)	120	180	240	270	270...300
Полиэтилен высокой плотности (при скоростях опрессования менее 500 м/мин)	140	180	220	250	280
ПВХ-пластикат различных рецептур	100...110	110...150	120...160	160...180	180...200
Фторсодержащие полимеры	260...310	280...320	320...340	340...380	330...370
Полиамидные смолы	200	260	280	290	-
Резины	30...60	30...80	-	55...90	-

При наложении покрытий из полиэтилена необходимо поддержание высокой стабильности температуры. Современные системы позволяют обеспечить необходимый уровень температуры с изменением в диапазоне ± 1 °С.

При наложении изоляции и оболочки из ПВХ-пластиката уровень температур для различных зон экструдера ниже, чем при использовании полиэтилена.

Переработка фторсодержащих полимеров на червячных прессах схожа по общему принципу с переработкой полиэтилена и ПВХ-пластиката, однако имеет ряд особенностей. Данные полимеры переходят в состояние пластического течения при высоких температурах порядка (300...400) °С, зачастую близких к температурам разложения, также имеют высокую вязкость расплава [19-21]. В связи с данными особенностями на пути прохождения расплава в экструдере все внутренние переходы выполнены с большим радиусом скругления во избежание образования зон, в которых может возникать застаивание материала и, как следствие, его разложение из-за чрезмерного нагрева. Причиной разложения

фторсодержащих полимеров также может служить местное охлаждение расплава, которое приводит к резкому увеличению вязкости расплава и, вследствие этого, торможению потока. Торможение потока расплава из фторсодержащего полимера также приводит к образованию участков с повышенными внутренними напряжениями, увеличивающими склонность покрытия к растрескиванию.

При сравнении скоростей обработки фторсодержащих полимеров и полиэтилена можно отметить, что скорость обработки первого материала значительно ниже. Это можно объяснить высокой вязкостью фторопластов и малым значением критической скорости сдвига, при превышении которой возможен разрыв расплава. Вследствие разрыва расплава полимера поверхность выпрессованного материала становится неровной, шероховатой [20, 21].

Полиамидные смолы обладают низкой вязкостью расплава, как и фторопласты высокой температурой переработки и сравнительно резким переходом из твердого состояния в расплав, что накладывает высокие требования к точности установления и поддержания температур в экструдере.

При изготовлении изоляционных оболочек из резин на червячных прессах изначально подогретая недовулканизированная резиновая смесь накладывается на токопроводящую жилу с помощью формующего элемента. Далее изделие подвергается вулканизации для образования сшитой структуры, которая обеспечивает материалу необходимые физико-механические свойства. Вулканизация резиновых смесей проводится при температуре (140...200) °С [20]. Наложение покрытий из резиновых смесей является менее сложным процессом, при сравнении с переработкой других изоляционных материалов, так как резиновая смесь не переходит в состояние расплава. При прохождении резиновой смеси через червячный пресс недопустима задержка смеси, а также ее перегрев. В противном случае возможна преждевременная вулканизация резиновой смеси, что является причиной получения некачественной изоляции (царапины на поверхности изоляции, нарушение цилиндричности провода, инородные включения в виде подгорелой резины) [19-21].

1.3.3 Охлаждение изоляции после экструдирования

Условия охлаждения изоляции после наложения изоляции с использованием червячного пресса являются одним из основных факторов, определяющих качество полимерной изоляционной оболочки, а также линейную скорость изолирования или ошлангования. Полимерное покрытие необходимо охладить до температуры, при которой оно не будет деформироваться или повреждаться на приемном барабане. В зависимости от материала, величина данной температуры будет варьироваться от 60 °С для полиэтилена низкой плотности и ПВХ-пластиката до 200 °С для фторопластов. Однако на кабельных предприятиях экструдированное покрытие охлаждают до температур (40...50) °С для соблюдения требований техники безопасности [20].

В процессе охлаждения тепло от поверхности покрытия отводится с помощью воздуха или воды более низкой температуры. Таким образом, процесс охлаждения преимущественно подчиняется закономерностям конвективного теплообмена, причем обычно наблюдается вынужденная конвекция за счет постоянного осевого перемещения заготовки в ходе технологического процесса. Процесс изменения температуры по толщине изоляции или оболочки, то есть внутри твердого тела, происходит по законам теплопроводности.

К процессу охлаждения обычно не предъявляются жесткие требования, так как большинство изоляционных материалов допускают достаточно резкое охлаждение. Исключением является полиэтилен, требующий постепенного охлаждения.

Охлаждение резиновой изоляции, изоляции из полиамидных смол и ПВХ-пластиката осуществляется холодной водой в охлаждающей ванне, а также на тяговом устройстве, колеса которого погружены в ванну с проточной водой. Второй способ применяется для уменьшения общей длины агрегата в случае ограниченной производственной площади.

Для кабелей и проводов, изолированных фторсодержащими полимерами, применяется воздушное охлаждение с последующим охлаждением водой или же только воздушное охлаждение.

Для охлаждения полиэтиленовой изоляции используют трехсекционные охлаждающие ванны. При охлаждении изоляции в охлаждающей ванне понижение температуры начинается с поверхности. В связи с большим значением теплового коэффициента расширения полиэтилена, максимальное значение которого находится в диапазоне температур (90...125) °С, происходит неравномерное сокращение объема верхних и внутренних слоев изоляции. Вследствие этого, резкое охлаждение полиэтилена приводит к образованию трещин, воздушных включений как между изоляцией и токопроводящей жилой, так и в слоях, расположенных вблизи жилы. В связи с этим охлаждение изоляции из полиэтилена производится ступенчато. Температура воды в первой секции должна составлять (80...90) °С, во второй – (50...70) °С, а в третьей секции (20...40) °С. В третьей секции также может применяться холодная водопроводная вода [19-21].

1.4 Методы технологического контроля качества изоляции кабельных изделий

Качество изоляции выпускаемой продукции контролируется посредством проведения испытаний. На кабельных заводах проводят контрольные и типовые испытания, которые утверждены в технических условиях как приемо-сдаточные и контрольно-выборочные, соответственно.

Приемо-сдаточные испытания проходят все выпускаемые строительные длины кабелей и проводов. Данный вид испытаний направлен на выявление дефектов, возникших в процессе производства. Величина испытательного напряжения выбирается таким образом, чтобы позволить выявить грубые дефекты, не снизив качества бездефектной изоляции.

Контрольно-выборочным испытаниям подвергают отрезки или строительные длины, отбираемые для каждого вида продукции. В ходе испытаний кабельные изделия подвергаются более интенсивным воздействиям, чем при приемо-сдаточных испытаниях [19, 36]. Данный вид испытаний необходим для оценки уровня качества определенного вида продукции.

В настоящее время существуют несколько видов приемо-сдаточного электрического контроля, позволяющих выявить дефекты в изоляционном покрытии.

1.4.1 Испытание напряжением

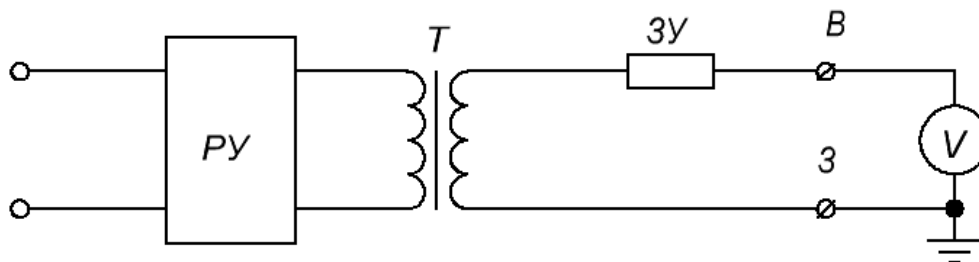
На современных кабельных предприятиях для контроля изоляционного покрытия наибольшее распространение получили испытания напряжением, в которых критерием качества изоляции является ее электрическая прочность. В зависимости от назначения кабельных изделий различают две категории испытаний напряжением: ЭИ-1 и ЭИ-2 [3, 37-39].

ЭИ-1 представляют собой итоговые испытания изоляции жил, оболочек, защитных шлангов кабельных изделий переменным напряжением без погружения в воду, с погружением в воду или после выдержки в воде испытуемого кабельного изделия.

Подготовка к проведению испытаний заключается в размещении изготовленных бухт с кабельным изделием в баке с водой, разделке и зачистке концов испытываемых кабелей. Продолжительность выдержки бухты в воде в зависимости от типа и размера изделия составляет от 0,5 до 24 часов.

Для проведения испытаний в зависимости от конструктивных особенностей кабеля (количества жил и наличия металлической оболочки или оплетки), выбирают схемы электрических испытаний, утвержденных в стандарте или технических условиях [4, 37], в соответствии с которыми осуществляется присоединение жил испытываемых изделий к зажимам испытательного

трансформатора. Испытания проводятся на высоковольтных установках, типовая схема которых приведена на рисунке 6 [4].



T – трансформатор испытательный; PY – регулирующее устройство; V – вольтметр; B и $З$ – зажимы обмотки высшего напряжения испытательного трансформатора, к которым присоединяется испытываемое кабельное изделие; $ЗУ$ – защитное устройство для защиты испытательной установки и испытываемого изделия от повреждений и для установления места пробоя

Рисунок 6 – Принципиальная схема установки для испытаний

Длительность приложения испытательного напряжения также определяется в соответствии с нормативной документацией для кабельного изделия и составляет не менее 5 минут [3]. При проведении испытаний не допускается резкое повышение напряжения при приложении его к жилам кабельного изделия, в связи с чем величина приложенного напряжения в первый момент составляет не более 40 %, далее повышается со скоростью не более 1 кВ в секунду.

В качестве испытательного напряжения может быть использовано переменное (в большинстве испытаний), импульсное (для кабелей высокого напряжения и импульсных кабелей) и постоянное (для кабелей постоянного напряжения и профилактических испытаний кабельных линий) [21]. Значение испытательного напряжения зависит от рабочего напряжения и условий эксплуатации изделия. Для расчета испытательного напряжения для кабелей и проводов с рабочим напряжением до 660 В руководствуются формулой [3]:

$$U_{исп} = 2 \cdot U_0 + 1000, \quad (1)$$

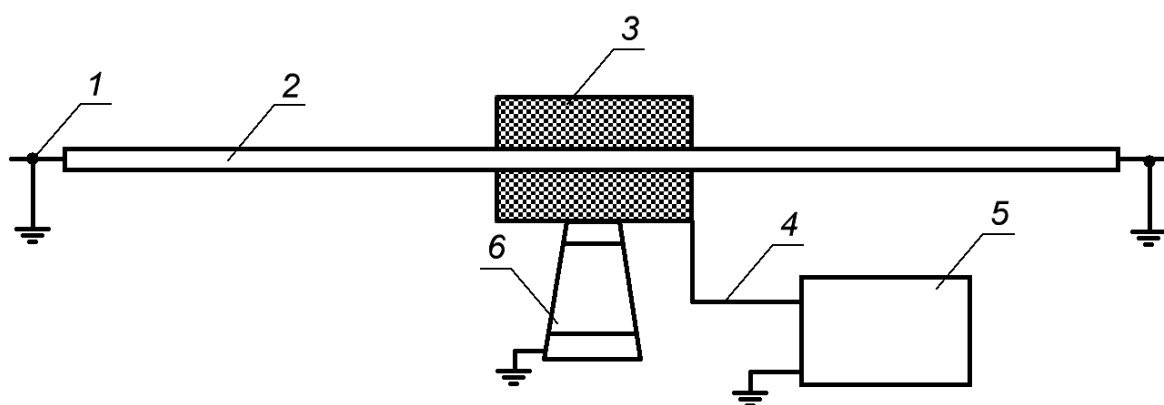
где $U_{исп}$ - испытательное напряжение, В;

U_0 - рабочее напряжение, В.

Согласно приведенной формуле, чем выше рабочее напряжение, тем меньше соотношение между испытательным и рабочим напряжением. Это объясняется повышением интенсивности ионизации при увеличении абсолютной величины испытательного напряжения, которая неблагоприятно действует на состояние изоляции [4].

По результатам данного метода контроля бездефектными считаются те изделия, у которых не оказалось пробоев изоляционного покрытия. Кабели и провода, не выдержавшие испытания, возвращаются в цех для исправления дефектных мест изоляции или, если это целесообразно, в месте пробоя разрезаются и повторно направляются на испытание.

Испытания по категории ЭИ-2 представляют собой технологические испытания изолированных жил в процессе наложения изоляции, скрутки или перемотки, а также оболочек или защитных шлангов в процессе их наложения или перемотки [37-39]. При проведении испытаний по категории ЭИ-1 после испытаний по категории ЭИ-2 не должно быть выявлено ни одного дефекта. На рисунке 7 приведена схема установки и электрода для проведения испытаний по категории ЭИ-2.



1 - токопроводящая жила или металлический покров кабельного изделия; 2 - изоляция, оболочка или защитный шланг; 3 - электрод; 4 - высоковольтный вывод; 5 - установка; 6 - изолятор

Рисунок 7 – Общая схема испытания «на проход»

Согласно приведенной схеме с установки (5) через электрод (3) подается высокое испытательное напряжение, значительно превышающее рабочее, на

внешнюю поверхность объекта испытаний (2), в то время как проводящая часть (1) объекта контроля заземляется. Во время проведения испытаний контролируемый кабель движется с постоянной скоростью через электрод, вследствие чего испытания по категории ЭИ-2 называют испытаниями напряжением «на проход». Заземление проводящей части объекта контроля в технологической линии производится как до, так и после испытаний «на проход», что объясняется не только требованиями электробезопасности, но и методикой проведения контроля, несоблюдение которой может привести к значительному снижению качества проводимого контроля. В качестве электродов применяют щеточные, пружинные и цепочечные электроды [4, 36, 40, 41]. Щеточный электрод можно представить в виде цилиндра с закрепленными по внутреннему периметру рядами щеток из проволоки, которые расположены под углом к поверхности объекта контроля [40]. При использовании пружинных электродов напряжение подается с помощью ряда пружинок, расположенных по винтовой линии на поверхности объекта контроля, концы которых закреплены на специальных кольцах [41]. Цепочечный электрод представляет собой несколько рядов шариковых цепей, закрепленных на общей металлической основе [4, 36].

При прохождении через контактную часть, участок провода с бездефектной изоляцией должен оставаться неповрежденным. В случае, если изоляция или оболочка имеет какой-либо дефект, то в этом месте произойдет пробой изоляционного слоя или оболочки [4]. Подробное описание физики электрического пробоя приведено в работе [42]. При пробое под действием появившегося в цепи тока срабатывает реле и размыкается цепь трансформатора с одновременным срабатыванием звуковой и световой сигнализаций.

Различают несколько типов аппаратов сухих испытаний (АСИ), разработанных для проведения контроля по категории ЭИ-2, а именно: АСИ промышленной частоты, высокочастотные АСИ, звукочастотные АСИ, импульсные АСИ.

1. АСИ промышленной частоты

В данных приборах на поверхность контролируемого кабельного изделия с помощью электрода подается высокое испытательное напряжение с частотой 50 Гц/60 Гц. Для достижения электробезопасности максимальный возможный ток при пробое ограничивают величиной 0,7 мА, что не опасно для человека в случае попадания под испытательное напряжение [5].

2. Высокочастотные АСИ (ВАСИ)

В данных приборах используется высокое напряжение с высокой частотой (200 кГц). При приложении высокочастотного напряжения между электродом и контролируемым кабельным изделием возникает разряд, охватывающий кабельное изделие по всей поверхности на длине (100...150) мм. Помимо высокочастотного напряжения к электроду подключен источник постоянного тока, выдающий напряжение величиной 75 В. При пробое изоляции или оболочки постоянный ток попадает на жилу через высокочастотную дугу, вследствие чего срабатывает регистратор дефектов [4-6, 21].

При сравнении с АСИ промышленной частоты, ВАСИ позволяет упростить устройство электрода, а также повысить безопасность работы с прибором, т.к. величина постоянного тока, протекающего при пробое, не превышает 1 мА.

АСИ промышленной частоты и ВАСИ имеют большие габаритные размеры, вследствие чего их использование на технологических линиях затруднено.

3. Звукочастотные АСИ (ЗАСИ)

Частота испытательного напряжения в ЗАСИ составляет около (0,5...5) кГц, при возникновении пробоя генерация переменного напряжения прекращается, что позволяет повысить безопасность персонала.

4. Импульсные АСИ (ИАСИ)

В ИАСИ на объект контроля подаются импульсы испытательного напряжения с амплитудой до 40 кВ и частотой повторения (50...250) Гц. Достоинством ИАСИ является малая средняя мощность в сочетании с высокой импульсной.

АСИ позволяют обнаружить дефекты, значительно ослабляющие электрическую прочность изоляции кабельного изделия, такие как локальные утонения, порезы изоляции, воздушные включения только большой толщины.

1.4.2 Контроль погонной емкости (электроемкостный метод)

Погонная емкость является важным параметром кабельных изделий. Любое кабельное изделие можно представить в виде цилиндрического конденсатора с определенной величиной электрической емкости. На ее величину оказывают влияние как геометрические размеры контролируемого изделия и материал изоляции, так и возможные дефекты.

Электроемкостный метод контроля проводится при нахождении контролируемого участка изделия в проводящей жидкости. Наиболее простым методом реализации является использование воды охлаждающей ванны. С помощью цилиндрического электрода (Рисунок 8) создается равномерное переменное поле высокой частоты ((10...30) кГц [43, 44]) и проводятся измерения емкости провода, находящегося в контролируемой зоне.

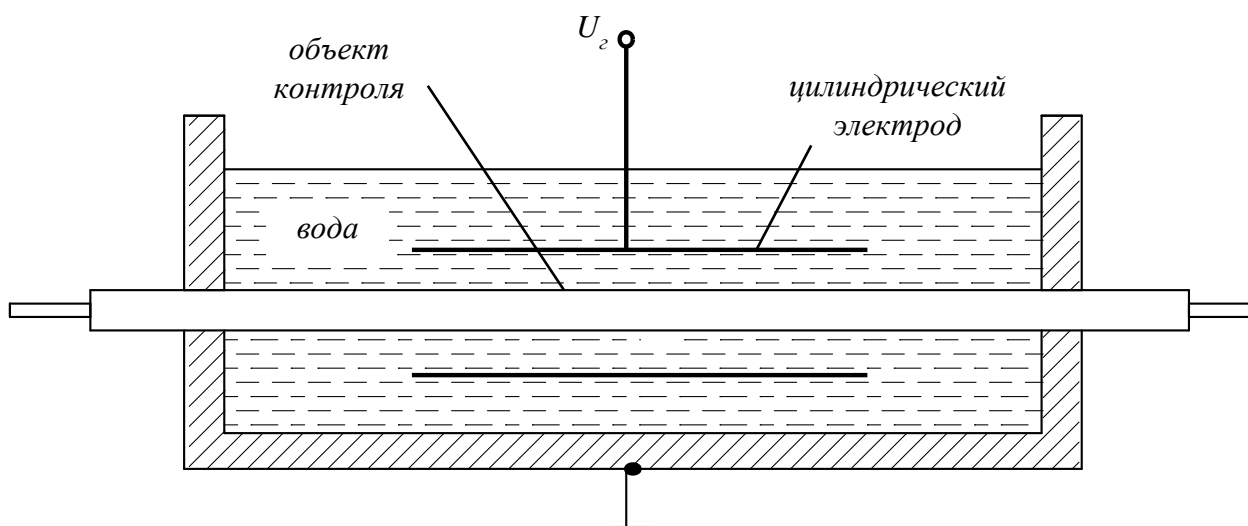


Рисунок 8 – Схема электроемкостного метода контроля провода

В отличие от электроискрового метода, данный метод позволяет выявить как уменьшение толщины изоляционного покрытия, так и увеличение.

Недостатком данного метода является невозможность определения несквозных дефектов в виде трещин, порезов на поверхности изоляции, так как изменение погонной емкости дефектного участка будет незначительным. Введение же дополнительных устройств для увеличения чувствительности приведет к удорожанию устройства. Еще одним недостатком является необходимость дополнительного оборудования и технического обслуживания для обеспечения работоспособности измерителя емкости, так как при длительной эксплуатации отверстие цилиндрического датчика загрязняется, что может затруднять прохождение объекта контроля и искажать показания прибора.

1.4.3 Исследование частичных разрядов

При нахождении провода в области сильных полей в изоляции могут происходить частичные разряды (ЧР). В случае твердой изоляции, ЧР происходят в тех местах, где электрическая прочность изоляции снижена за счет дефектов (воздушные включения, внутренние трещины). Таким образом, ЧР представляет собой частичный пробой твердого изоляционного покрытия в местах воздушных включений на время порядка 10^{-7} с за счет ударной ионизации.

ЧР регистрируют электрическими методами. Схема, описывающая общий принцип данного метода, представлена на рисунке 9.

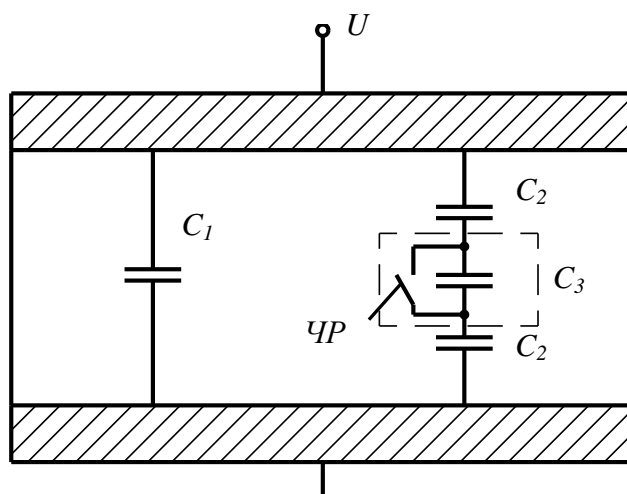


Рисунок 9 – Схема диэлектрика с воздушным включением

В области сильных полей на месте воздушного включения возникают интенсивные разряды, шунтирующие конденсатор C_3 . В этом случае суммарная емкость и заряд увеличиваются на величины ΔC_x и ΔQ_x , соответственно. Изменение суммарной емкости приводит к появлению импульса напряжения на образце C_x [21]:

$$\Delta U_x = \frac{U \cdot \Delta C_x}{C_x}, \quad (2)$$

где U – испытательное напряжение.

Таким образом, интенсивность частичных разрядов характеризуется по величине кажущегося заряда единичного ЧР (ΔQ_x), также по частоте следования ЧС, среднему току ЧС [45].

Недостатком данного метода является наличие сильных помех от поверхностных разрядов, коронирования на элементах схемы и, как следствие, сложной системы фильтрации сигнала.

Для возможности контроля строительных длин проводов используют схему, схожую с электроемкостным методом (Рисунок 8). Отличие составляет величина испытательного напряжения и проводимость жидкости, заполняющей ванну. В данном случае величина испытательного напряжения выбирается порядка единиц кВ [21], а металлическая ванная заполняется дистиллированной водой, что позволяет исключить коронирование и возникновение поверхностных разрядов.

1.4.4 Комплексный метод контроля

Проведя анализ существующих методов контроля изоляции кабельных изделий можно отметить, что данные методы имеют существенные недостатки, а именно:

- при применении методов испытания высоким напряжением и регистрации частичных разрядов возможно выявлять только те дефекты, которые ослабляют электрическую прочность участка изоляции;

– сложная система фильтрации для использования метода регистрации частичных разрядов;

– высокие требования к условиям эксплуатации при контроле кабельных изделий методом измерения погонной емкости и регистрации частичных разрядов.

Для устранения существующих недостатков был предложен метод контроля емкости при электроискровом контроле (комплексный метод контроля). Данный метод разработан недавно и является комплексным применением электроискрового метода контроля и метода контроля погонной емкости в воде. Комплексный метод контроля заключается в приложении к объекту контроля переменного испытательного напряжения с помощью специального электрода (Рисунок 10) и одновременном непрерывном контроле емкости объекта контроля [46-52].

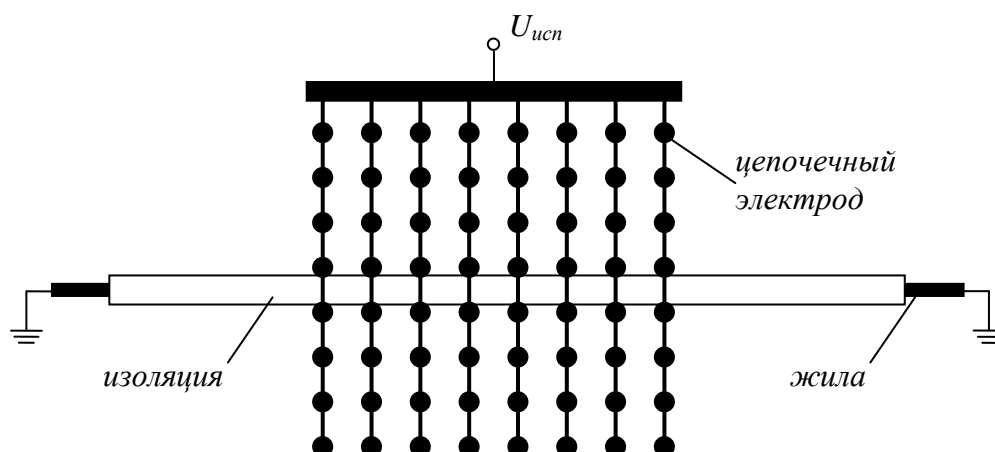


Рисунок 10 – Комплексный метод контроля

Использование высокого испытательного напряжения позволяет обеспечить контакт между электродом и поверхностью кабельного изделия по всей длине контролируемой зоны.

Величина испытательного напряжения выбирается исходя из толщины и материала изоляции, аналогично испытаниям по категории ЭИ-2 (испытания «на проход») [1, 3]. Таким образом, о качестве изоляции судят по двум факторам: по изменению локальной емкости или возникновению электрического пробоя.

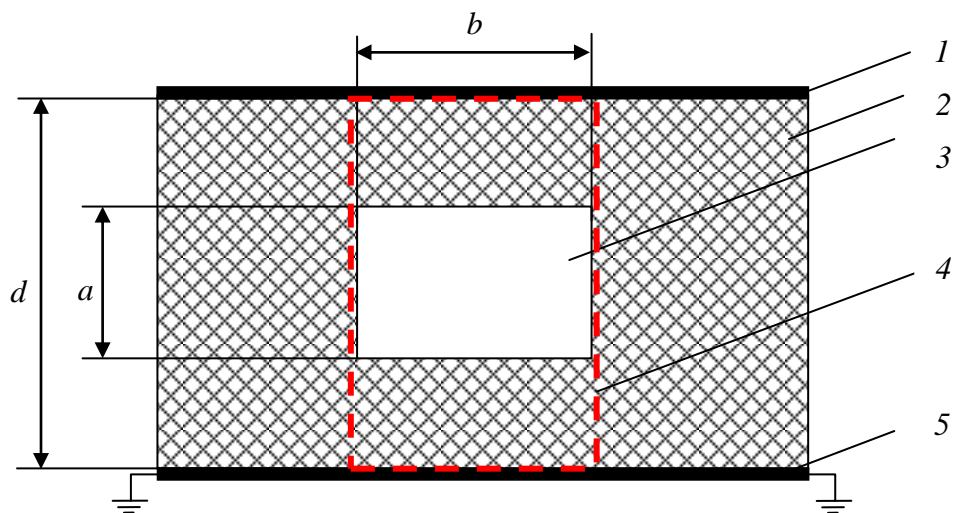
Значение локальной емкости бездефектного провода при электроискровом контроле (в области сильных полей, при $E \geq 3$ кВ/мм) не отличается от значения локальной емкости бездефектного провода при измерении с помощью электроемкостного преобразователя в воде охлаждающей ванны (в области слабых полей), т.к. материалы, используемые для изготовления изоляции, являются линейными диэлектриками. В случае дефектной изоляции значение локальной емкости при некоторых типах дефектов в области сильных и слабых полей будет отличаться.

Измерения емкости в области сильных полей отличаются от измерений в области слабых тем, что при уменьшении толщины изоляции на месте дефекта до предельного значения¹ в области сильных полей произойдет пробой изоляции, чего не будет в области слабых полей. Так как электрическая емкость участка изоляции не зависит от приложенного напряжения, то можно сделать вывод, что при толщине изоляции больше предельного значения, влияние размеров большинства типов дефектов на значение электрической емкости будет одинаково. Отличие будут составлять дефекты типа воздушная полость, т.к. при приложении испытательного напряжения к поверхности кабеля в области дефекта будет наблюдаться возникновение электрических разрядов высокой интенсивности. В области слабых полей данного явления происходить не будет.

Для нахождения теоретических зависимостей значения электрической емкости от размеров дефектов типа воздушная полость был взят плоский конденсатор с неоднородным диэлектриком². Моделью дефекта является параллелепипед с размерами $axbxc$ (высота, длина и ширина, соответственно) (Рисунок 11).

¹ Предельным значением толщины изоляции можно назвать толщину, при которой напряженность электрического поля для данного диэлектрика имеет предельное значение, т.е. наступает пробой изолятора. Для ПВХ-пластиката предельное значение напряженности электрического поля равно 30 МВ/м [21].

² Применимость плоского конденсатора для моделирования провода будет доказана в разделе 2.2.3.



1 – электрод (обкладка конденсатора); 2 – диэлектрик; 3 – дефект (инородное включение или воздушная полость); 4 – граница дефектного участка изоляции; 5 – жила кабеля (обкладка конденсатора)

Рисунок 11 – Модель изоляции провода с неоднородной изоляцией

Зная геометрические размеры, емкость плоского конденсатора описывается зависимостью:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad (3)$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость;

S – площадь обкладки конденсатора;

d – расстояние между обкладками.

Эквивалентная емкость модели участка изоляции (Рисунок 11) имеет две составляющие: емкости дефектного и бездефектного участков, которые соединены параллельно.

Электрической схемой замещения дефектного участка изоляции $d \times b \times c$ (Рисунок 11) является последовательное соединение (Рисунок 12) емкостей дефекта C_v и изоляционного материала C_u (геометрические размеры которого $(d-a) \times b \times c$).

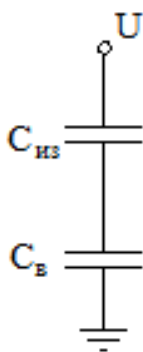


Рисунок 12 – Электрическая схема замещения дефектного участка изоляции с дефектом

Согласно формуле (3) была найдена результирующая емкость дефектного участка C_{δ} :

$$C_{\delta} = \frac{C_{\epsilon} \cdot C_u}{C_{\epsilon} + C_u} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r^{\text{в}} \cdot \epsilon_r^{\text{и}} \cdot b \cdot c}{\epsilon_r^{\text{в}} \cdot (d - a) + \epsilon_r^{\text{и}} \cdot a}, \quad (4)$$

где $\epsilon_r^{\text{и}}$ - диэлектрическая проницаемость изоляционного материала;

$\epsilon_r^{\text{в}}$ - диэлектрическая проницаемость материала дефекта (в данном случае воздуха).

Формула (4) применима для нахождения результирующей емкости дефектного участка при отсутствии разрядных процессов в изоляции, т.е. при измерении емкости изоляции с инородными частицами в области слабых и сильных полей, так как относительная диэлектрическая проницаемость инородных частиц сравнима или превышает величину проницаемости изолятора, что позволяет исключить возможность возникновения разрядных процессов в области сильных полей. Также данная формула позволяет вычислить емкость участка изоляции с воздушной полостью в области слабых электрических полей.

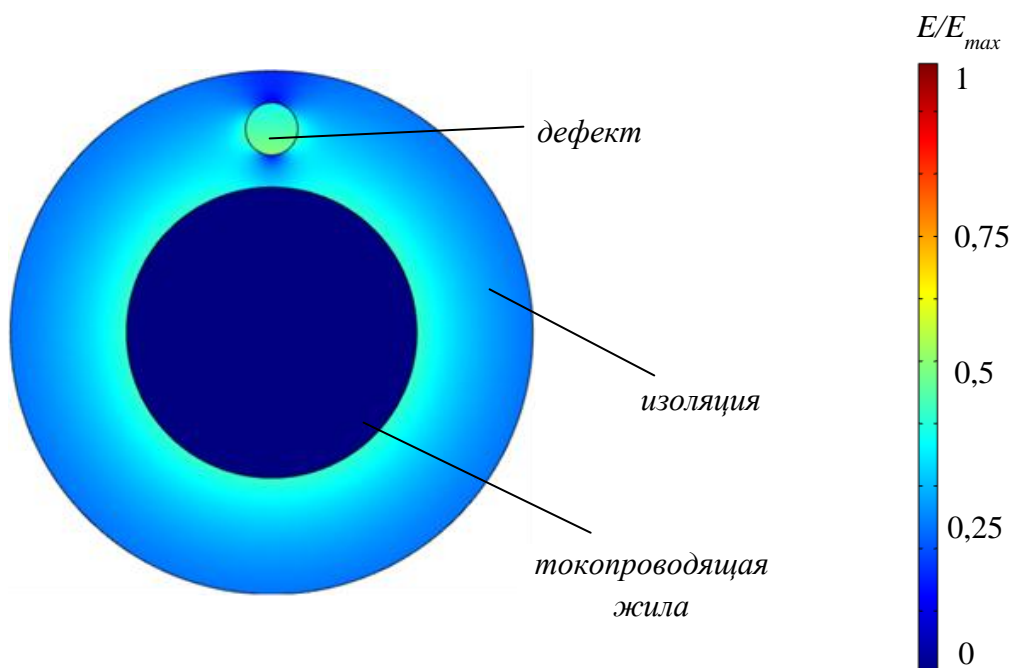


Рисунок 13 – Пример распределения напряженности провода в области слабых электрических полей (дефект изоляции: воздушная полость)

При измерениях в сильных электрических полях в воздушных полостях изоляции будут происходить электрические разряды высокой интенсивности, и область дефекта будет обладать высокой проводимостью (Рисунок 14).

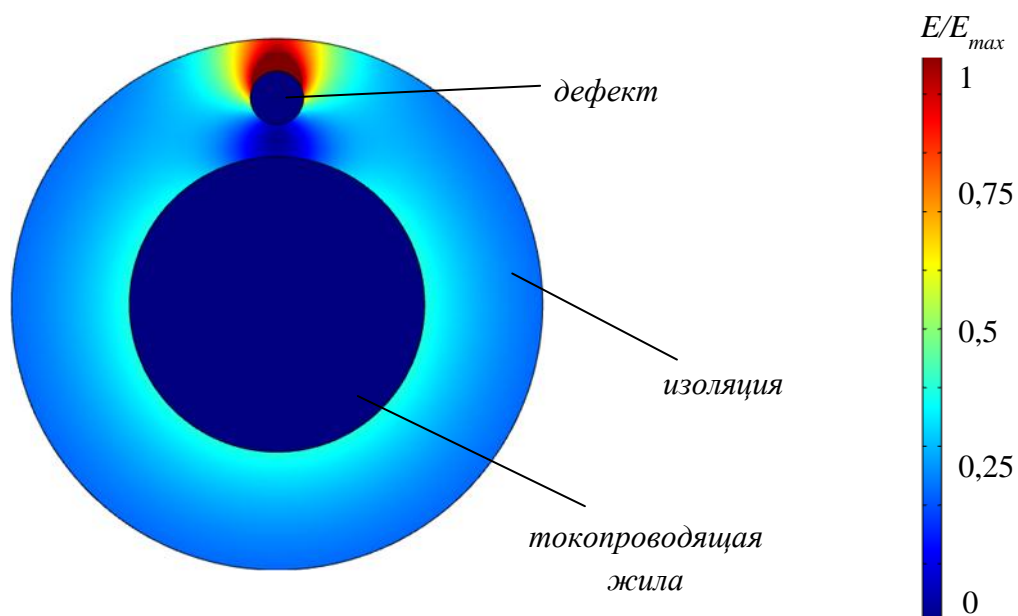


Рисунок 14 – Пример распределения напряженности электрического поля провода в области сильных электрических полей (дефект изоляции: воздушная полость)

Исходя из этого, зависимость емкости дефектного участка провода от величины дефекта типа воздушная полость в области сильных полей:

$$C_{\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^n \cdot \frac{b \cdot c}{(d - a)} \quad (5)$$

Проведя анализ формул (4) и (5), можно сделать вывод, что характер зависимостей различен.

По полученным формулам были построены зависимости относительного отклонения локальной электрической емкости от относительного размера дефекта типа воздушная полость в областях сильных и слабых полей. Согласно построенным графикам (Рисунок 15) можно отметить, что зависимости в областях сильных и слабых полей различны: с увеличением размера дефекта в области слабых полей локальная электрическая емкость монотонно уменьшается, а в области сильных полей – экспоненциально увеличивается [53-55].

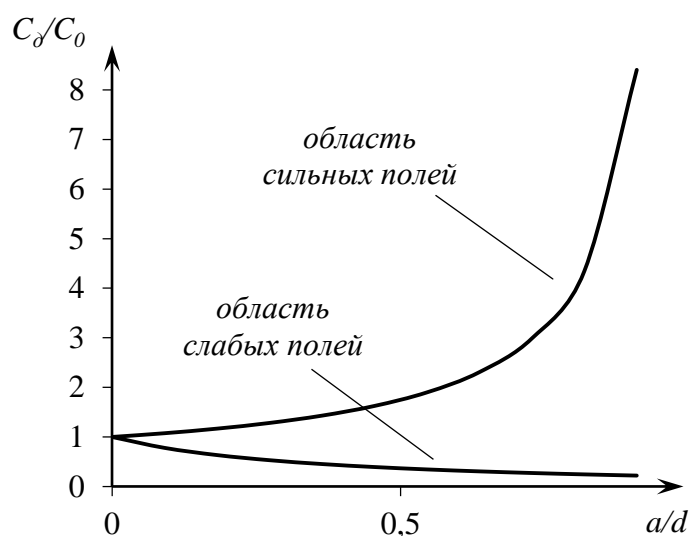


Рисунок 15 – Зависимость относительной емкости дефектного участка от относительного размера дефекта в области сильных и слабых полей

Чувствительность при измерениях в области слабых полей незначительно выше, чем при измерениях в области сильных полей до тех пор, пока параметр дефекта a не превысит 45% от бездефектной толщины изоляции (Рисунок 16).

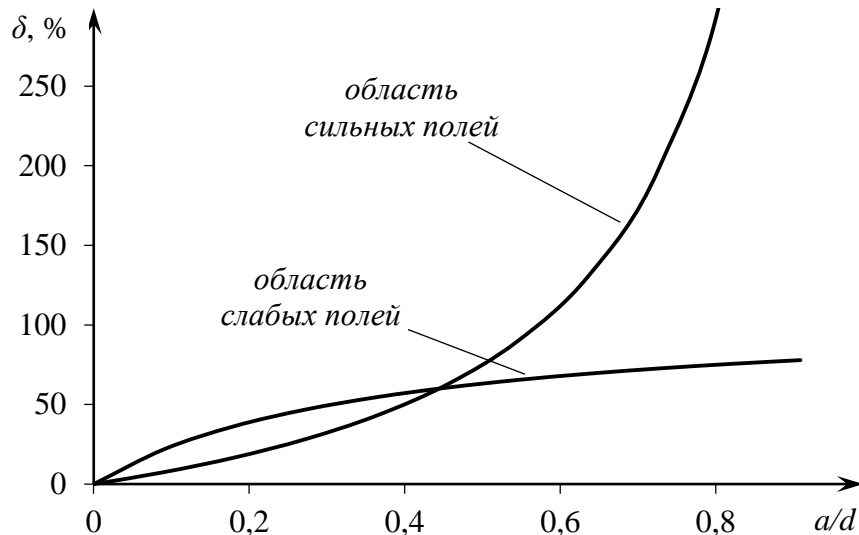


Рисунок 16 – Относительное отклонение локальной емкости от бездефектного значения в области сильных и слабых полей при увеличении относительного размера дефекта

При большем размере дефекта чувствительность измерения в области сильных полей выше, причем данный параметр увеличивается экспоненциально.

Таким образом, чувствительность комплексного метода контроля к дефектам изоляции сопоставима, а в некоторых случаях превышает чувствительность электроемкостного метода. Для проведения контроля комплексным методом нет необходимости в токопроводящей жидкости, а также данный метод реализуется на основе электроискровых дефектоскопов, которыми оборудовано большинство линий кабельных предприятий. Следовательно, предложенный метод контроля является перспективным для разработки с целью повышения качества технологического контроля кабельных изделий.

1.5 Выводы по главе 1

1. Приведен литературный обзор технологии производства кабельных изделий. При отклонении параметров технологических режимов (таких, как величина натяжения проволоки, температура предварительного нагрева проволоки, скорость наложения изоляции, температура воды охлаждающей ванны и т.д.) от установленных значений, некорректной подготовке пластика перед

загрузкой в экструдер, дефектах оборудования кабельной линии возникают дефекты изготавливаемой продукции. Для своевременного обнаружения дефектов и предотвращения массового брака необходим качественный технологический контроль.

2. Рассмотрены методы технологического контроля изоляций и оболочек кабельных изделий, перечислены их недостатки, которые свидетельствуют либо о недостаточной чувствительности метода к определенным типам дефектов, либо о сложности реализации метода и эксплуатации прибора, основанного на данном методе.

3. Предложен метод контроля, основанный на комплексном использовании электроискрового и емкостного методов контроля. Комплексный метод контроля заключается в проведении электроискрового контроля и непрерывного измерения локальной емкости кабельного изделия.

4. Проведено сравнение влияния различных типов дефектов (локальное уменьшение и увеличение толщины изоляции, инородные включения, воздушные полости, трещины, порезы) на локальную емкость провода при проведении измерений в области сильных полей (комплексный метод) и в области слабых полей (емкостный метод). Было выявлено, что дефекты оказывают одинаковое влияние на локальную емкость провода, кроме дефекта типа воздушная полость. В области сильных полей в воздушных полостях изоляции будут происходить интенсивные электрические разряды, и область дефекта будет обладать высокой проводимостью, чего не происходит в области слабых полей. Чувствительность при измерениях в области слабых полей незначительно выше, чем при измерениях в области сильных полей до тех пор, пока размер дефекта типа воздушная полость не превысит 45% от бездефектной толщины изоляции. При большем размере дефекта чувствительность измерения в области сильных полей выше, причем данный параметр увеличивается экспоненциально. Таким образом, чувствительность комплексного метода контроля к дефектам изоляции сопоставима, а в некоторых случаях превышает чувствительность емкостного метода.

ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ЗНАЧЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ КАБЕЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ

Контроль локальной емкости в комплексном методе контроля изоляции и оболочки кабельных изделий проводится на основе известного номинального³ значения локальной емкости. Номинальное значение заносится в память дефектоскопа и по изменению локальной емкости от заданного значения принимается решение о наличии дефектов в объекте контроля.

Номинальное значение погонной емкости указывается в государственных стандартах и технических условиях только для готовых кабелей связи и радиочастотных кабелей. Остальные типы кабельных изделий не имеют регламентированного значения погонной емкости. Учитывая тот факт, что в процессе производства контролю подвергаются не только готовые изделия, но и заготовки, для которых также не предусмотрены документы, регламентирующие значение погонной емкости, то в данной главе поставлена задача определить локальную емкость бездефектного кабельного изделия по известным геометрическим параметрам и материалу изоляции.

Кабельные изделия, которые необходимо контролировать с помощью электроискровых дефектоскопов, можно разделить на две группы. Моделью первой группы может являться провод. К данной группе относятся одножильные кабельные изделия, у которых необходимо выявить дефекты в изоляции (за исключением эмалевой, эмалево-волокнистой и волокнистой изоляций), а также в оболочках или защитных шлангах, наложенных на проводящий слой (оплетка, фольга). Ко второй группе относятся группы скрученных изолированных жил.

2.1. Модель бездефектного кабельного изделия

³ В данной работе номинальным значением локальной емкости является емкость бездефектного образца, длина которого равна длине контролируемой зоны.

На начальных этапах производства после выхода из экструдера провод можно представить в виде цилиндрического конденсатора, внутренний цилиндр которого является поверхностью токопроводящей жилы, а внешний – поверхностью изоляции (Рисунок 17).

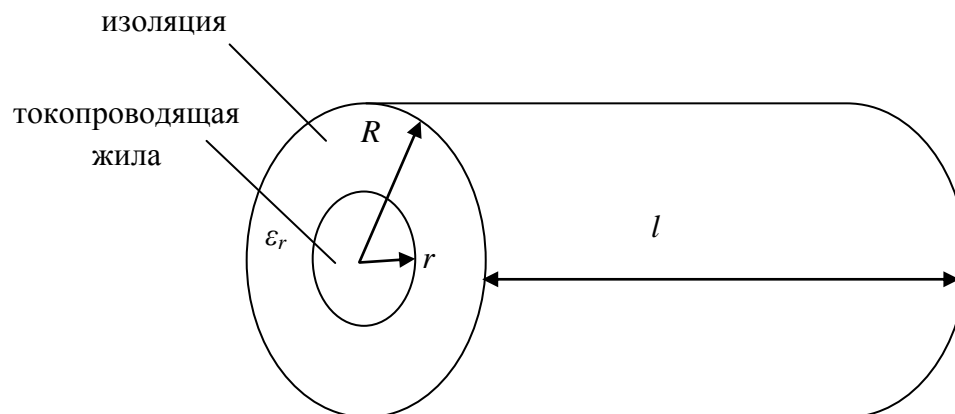


Рисунок 17 – Модель провода в виде цилиндрического конденсатора

В случае контроля оболочки или защитного шланга внутренний цилиндр будет являться поверхностью проводящего слоя, а внешний – поверхностью оболочки/защитного шланга. Электрическая емкость данного участка провода описывается зависимостью от диэлектрической проницаемости изоляции (ϵ_r) и геометрических параметров конденсатора:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{l}{\ln(R/r)}. \quad (6)$$

Используя данную формулу, можно определить номинальное значение локальной емкости изоляции провода, а также локальной емкости оболочки или защитного шланга кабеля при наличии внутреннего проводящего слоя.

2.2. Моделирование влияния дефектов изоляции или оболочки на локальную емкость кабельного изделия

В кабельной промышленности дефектом изделия можно назвать участок изоляции кабеля, в котором при проведении испытаний по категории «ЭИ-1» произойдет электрический пробой. Испытаниями по категории «ЭИ-1» являются

приемо-сдаточными испытаниями, при которых ко всей поверхности кабельного изделия прикладывают высокое напряжение в течение длительного времени. Если при проведении испытаний данной категории в изоляции кабельного изделия не произошло электрического пробоя, то изделие считают бездефектным.

2.2.1. Определение «дефектного провода»

Для определения максимального отклонения локальной емкости кабельного изделия, в пределах которого допустимо считать, что изоляция является бездефектной, были взяты образцы проводов, изоляционными материалами которых являются ПВХ-пластикат, резина и полиэтилен. Длина каждого образца – 100 м. Данные образцы были испытаны по категории «ЭИ-1», в соответствии с требованиями, предъявляемыми ГОСТ 23286-78, ГОСТ 2990-78. Образцы, признанные бездефектными после проведения испытаний, были подвергнуты электроискровому контролю с помощью высоковольтного испытателя с функцией контроля емкости «ЗАСИ-20». Длина электрода дефектоскопа составляет 150 мм, по конструкции электрод является цепочечным, материал – нержавеющая сталь. Испытательным напряжением являлось напряжение синусоидальной формы, амплитуда была подобрана согласно требованиям ГОСТ 23286-78. Для каждого из образцов было снято по 100 значений локальной емкости, по результатам измерений была построена гистограмма (Рисунок 18).

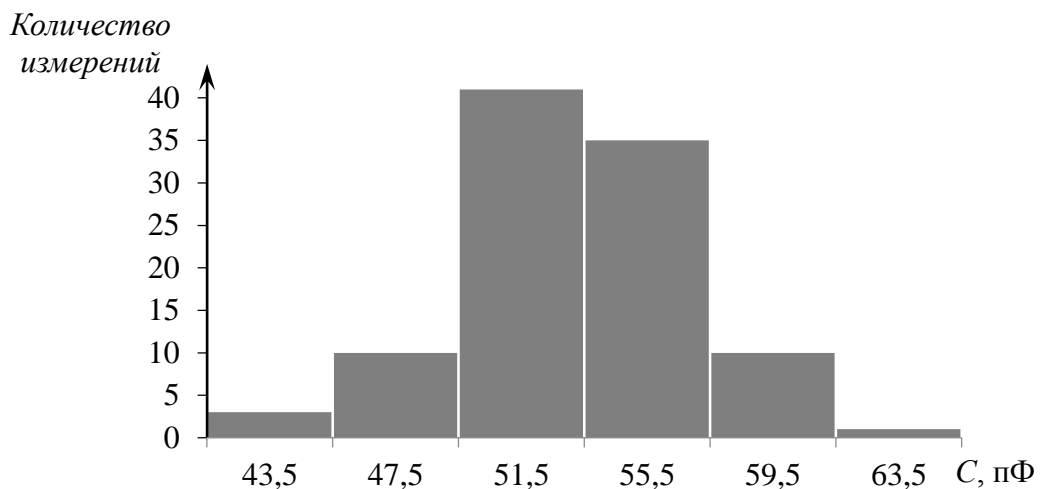


Рисунок 18 – Диаграмма распределения значений локальной емкости для шнура ШВВП 2x1

На рисунке 18 приведена гистограмма распределения значений локальной емкости для шнура ШВВП 2x1, материалом изоляции является ПВХ-пластикат, внешний диаметр изоляции 2 мм, диаметр токопроводящей жилы 1,1 мм.

Так как по форме распределение локальной емкости можно отнести к нормальному, то согласно правилу трех сигм в интервале $\pm 3\sigma$ от среднего значения лежит 99,73% значений локальной емкости для каждого из образцов.

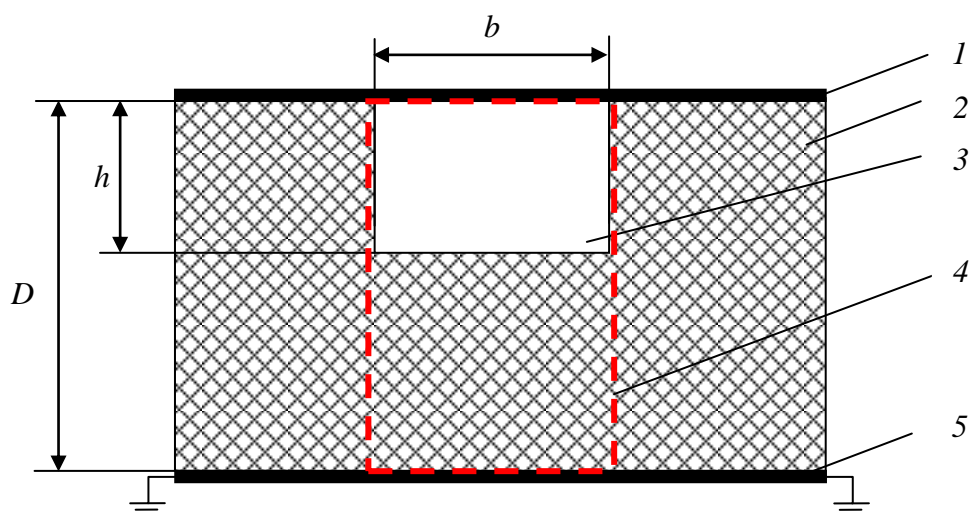
По результатам экспериментальных данных, основная часть значений будет находиться в интервале от 40,4 пФ до 61,9 пФ, или $\pm 20,7\%$ от среднего значения. Максимальным интервалом разброса значений является $\pm 23,5\%$ для 99,73% значений локальной емкости. Данный результат был у кабеля РПШ 3x1,5 (материал изоляции кабеля – резина, внешний диаметр изоляции – 3 мм, диаметр токоведущей жилы – 1 мм).

Отклонения локальной емкости бездефектных образцов могут возникать вследствие шероховатости поверхности, нестабильности внешнего диаметра изоляции и жилы, испытательного напряжения, однако основным влияющим фактором является конструкция электрода, т.к. у цепочечного электрода, используемого в эксперименте, в связи с вертикальным и горизонтальным смещением объекта контроля происходит раскачивание шариковых цепей, что оказывает влияние на распределение потенциала по поверхности провода и, соответственно, на результат контроля.

Таким образом, при использовании цепочечного электрода можно принять, что кабельное изделие является бездефектным, если его локальная емкость отклоняется от номинального значения не более, чем на 20%. При большем отклонении значения локальной емкости участок кабельного изделия, к которому приложено испытательное напряжение, можно считать дефектным. Принятое значение отклонения $\pm 20\%$ не является единственно правильным и может быть изменено как в большую сторону (при возникновении большого количества ложных срабатываний), так и в меньшую сторону (при проведении контроля наиболее ответственных и ресурсозатратных изделий).

2.2.2. Моделирование основных типов дефектов

Такие дефекты, как воздушная полость, эксцентricность изоляции, локальное изменение внешнего диаметра, трещины приводят к изменению толщины изоляции. Не учитывая влияния места расположения дефекта в изоляции, данные дефекты схематично можно представить в виде модели, представленной на рисунке 19.



1 – электрод (обкладка конденсатора); 2 – диэлектрик; 3 – воздух; 4 – граница дефектного участка изоляции; 5 – жила кабеля (обкладка конденсатора)

Рисунок 19 – Модель изоляции кабеля с уменьшением толщины изоляции

В данной модели дефектный участок состоит из изоляционного материала и воздуха. При проведении контроля в области слабых и сильных полей воздух можно считать проводящей частью, т.к. в первом случае объект погружается в воду, которая заполняет область на поверхности провода, занятую воздухом, а во втором случае воздух приобретает проводящие свойства за счет ионизации. Таким образом, емкость дефектного участка (выделен красным пунктиром на рисунке 19) можно вычислить по формуле:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^n \cdot \frac{b \cdot c}{(D - h)}, \quad (7)$$

где c – ширина конденсатора,

h – глубина дефекта,

ε_r'' – относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала.

На основе данной формулы (7) построены зависимости относительного изменения локальной емкости от относительной глубины дефекта в областях сильных и слабых полей:

$$\delta(h) = \frac{C_0 - C_d}{C_0} 100\% = \left(1 - \frac{D}{D+h}\right) 100\% \quad (8)$$

Введем обозначение $\frac{h}{D} = h'$, где h' – относительная глубина дефекта.

Данный параметр находится в диапазоне от -1 до 0 при уменьшении толщины изоляции (трещина, уменьшение внешнего диаметра) и имеет значение больше 0, если дефектом является увеличение толщины изоляции. Тогда относительное изменение емкости дефектного участка можно рассчитать по формуле:

$$\delta(h') = \left|1 - \frac{1}{1+h'}\right| 100\% \quad (9)$$

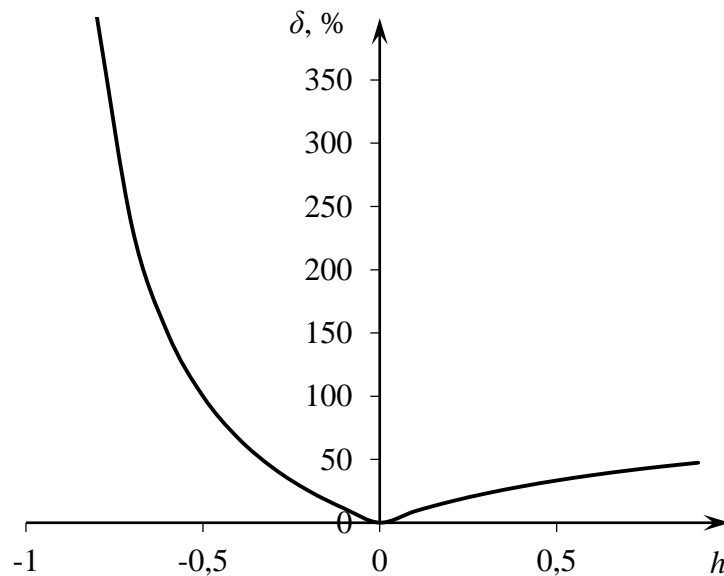


Рисунок 20 – Зависимость относительного изменения емкости дефектного участка от относительной глубины дефекта в области сильных полей

Чувствительность измерений при уменьшении толщины изоляции (левая полуплоскость) значительно выше чувствительности при увеличении толщины изоляции (правая полуплоскость), что позволяет с более высокой достоверностью регистрировать дефекты, приводящие к уменьшению изоляции, которые на практике встречаются чаще дефектов, приводящих к увеличению толщины изоляции.

Для более детального моделирования было рассмотрено влияние некоторых распространенных дефектов на величину локальной емкости.

– Увеличение/уменьшение толщины изоляции

Данные дефекты схематично представлены на рисунке 21.

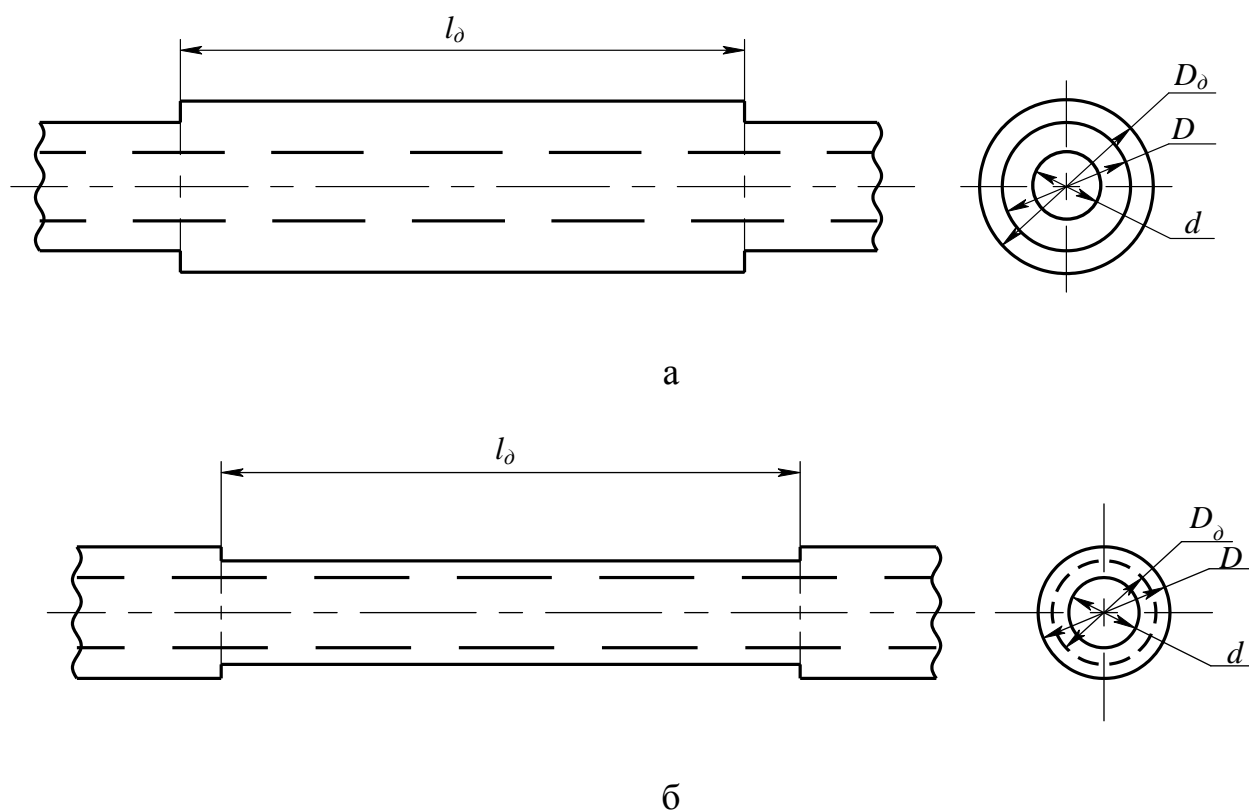


Рисунок 21 – Дефекты изоляции: локальное увеличение внешнего диаметра (а), локальное уменьшение внешнего диаметра (б)

Преобразуя формулу для нахождения электрической емкости цилиндрического конденсатора (6), была найдена зависимость между локальной

емкостью провода с данными типами дефектов и толщиной изоляции t_δ на месте дефекта:

$$C(t_\delta) = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r \left(\frac{l-l_\delta}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{l_\delta}{\ln \frac{2 \cdot t_\delta + d}{d}} \right), \quad (10)$$

$$t_\delta = \frac{D_\delta - d}{2}, \quad (11)$$

где l – длина контролируемого участка.

Для отстройки от параметров конкретного провода были построены зависимости относительного отклонения локальной емкости от нормированного параметра $t_\delta^* = \frac{t_\delta}{t}$, где:

$$t = \frac{D - d}{2}, \quad (12)$$

при различных значениях длины дефектного участка l_δ^* (Рисунок 22), который также является нормированным параметром $l_\delta^* = \frac{l_\delta}{l}$.

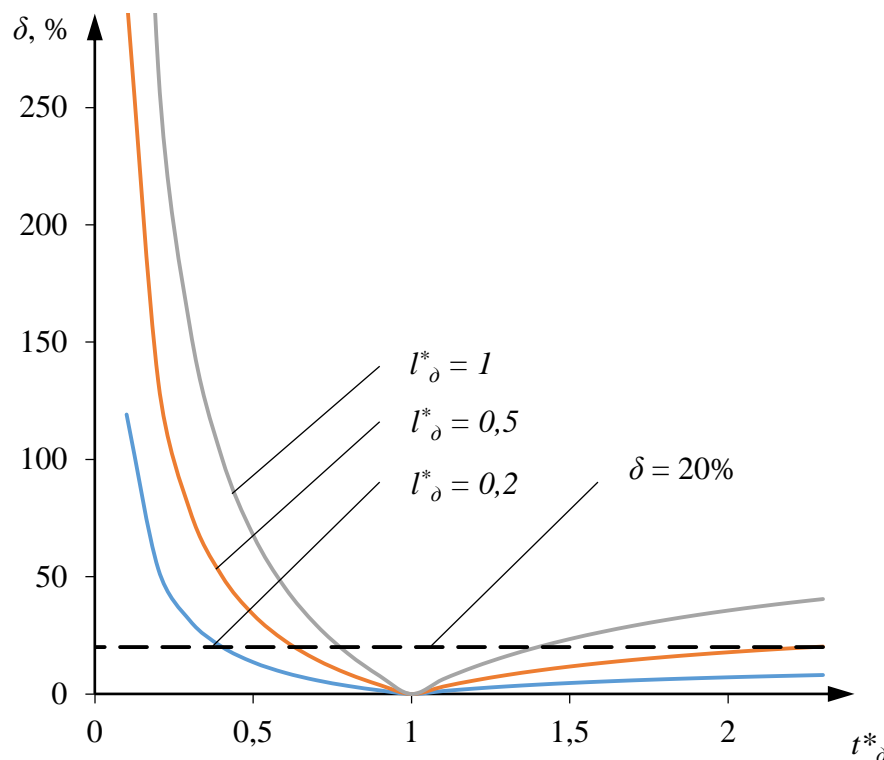


Рисунок 22 – Относительное отклонение локальной емкости при увеличении/уменьшении толщины изоляции провода с соотношением $D/d = 2,2$

Проведя анализ полученных графиков, можно отметить, что к изменению более 20 % от номинального значения локальной емкости провода приводит:

- увеличение толщины изоляции более, чем на 40 % при длине дефекта равной длине зоны контроля;
- увеличение толщины изоляции более, чем на 127 % при длине дефекта равной половине длины зоны контроля;
- уменьшение толщины изоляции более, чем на 22 % при длине дефекта равной длине зоны контроля;
- уменьшение толщины изоляции более, чем на 37 % при длине дефекта равной половине длины зоны контроля;
- уменьшение толщины изоляции более, чем на 59 % при длине дефекта, составляющей 20% от длины зоны контроля;

Увеличение толщины изоляции при длине дефекта, составляющей 20% от длины зоны контроля, обнаружить возможно только при значительном уменьшении локальной емкости провода.

Для моделирования дефектов с более сложной геометрией была использована программная среда COMSOL Multiphysics.

– Эксцентricность изоляции провода

При данном типе дефекта центр жилы оказывается смещенным относительно центра провода (Рисунок 23).

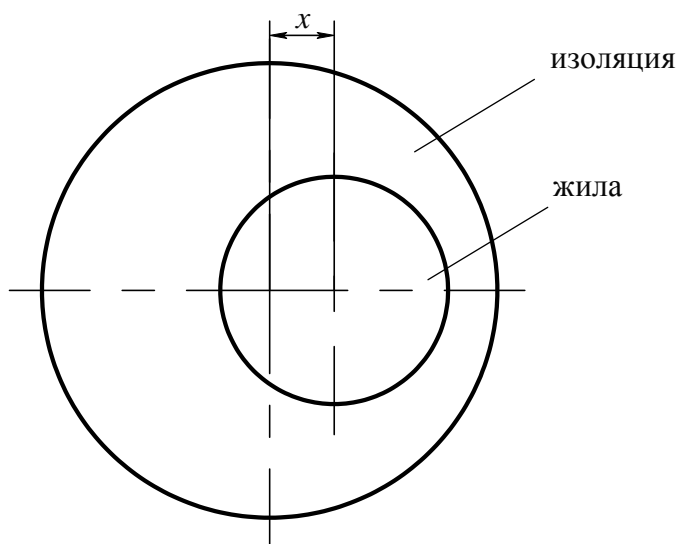


Рисунок 23 – Эксцентricность изоляции провода

Величина отклонения локальной емкости провода от номинального значения при изменении относительного параметра x^* :

$$x^* = \frac{x}{(D-d)/2} \quad (13)$$

представлена на рисунке 24.

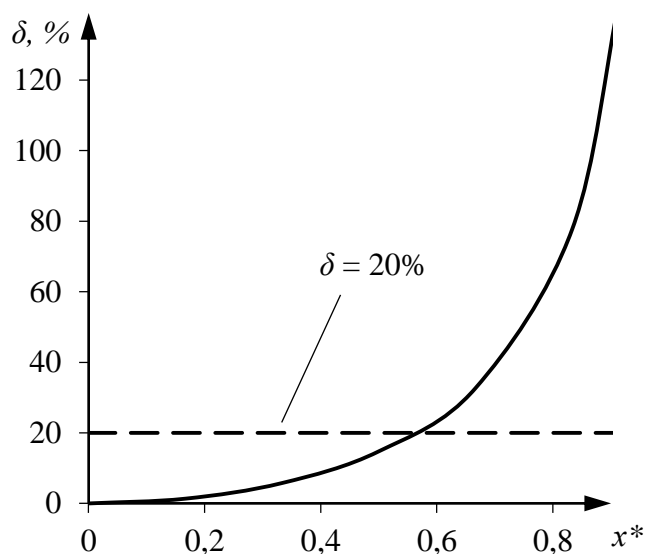


Рисунок 24 – Относительное отклонение локальной емкости при смещении центра жилы относительно центра провода с соотношением $D/d = 2,2$

Проведя анализ полученной зависимости, можно отметить, что к отклонению емкости более, чем на 20% приводит смещение центра жилы на расстояние, равное 57% от толщины изоляции.

– Продольные порезы изоляции

Продольный порез изоляции схематично представлен на рисунке 25.

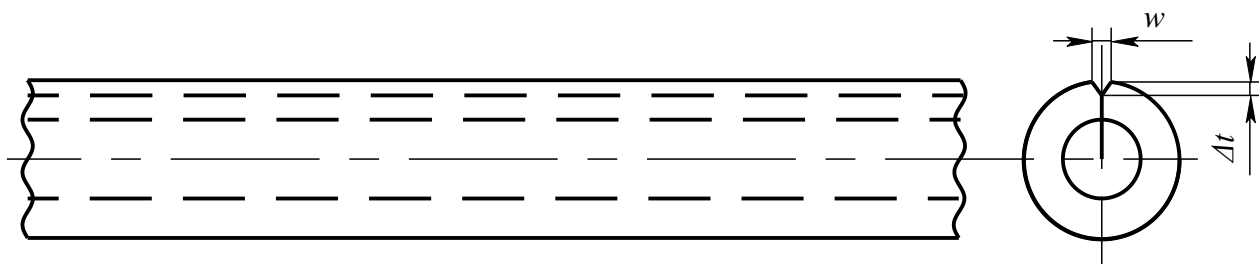


Рисунок 25 – Продольный порез изоляции

Данный дефект может быть охарактеризован такими параметрами, как: ширина раскрытия пореза (w), глубина пореза (Δt). Длина дефекта принята равной длине зоны контроля.

Для отстройки от геометрических размеров конкретного провода на рисунке 26 приведена зависимость относительного отклонения локальной емкости при изменении относительной глубины пореза Δt^* :

$$\Delta t^* = \frac{\Delta t}{(D-d)/2} \quad (14)$$

для различных значений параметра w . Для удобства восприятия абсолютный параметр w заменен на относительный параметр w^* . Данный параметр показывает, какой процент поверхности изоляции в поперечном сечении провода является дефектным, и определяется по формуле:

$$w^* = \frac{\pi \cdot D - w}{\pi \cdot D} 100\% , \quad (15)$$

где D – внешний диаметр изоляции.

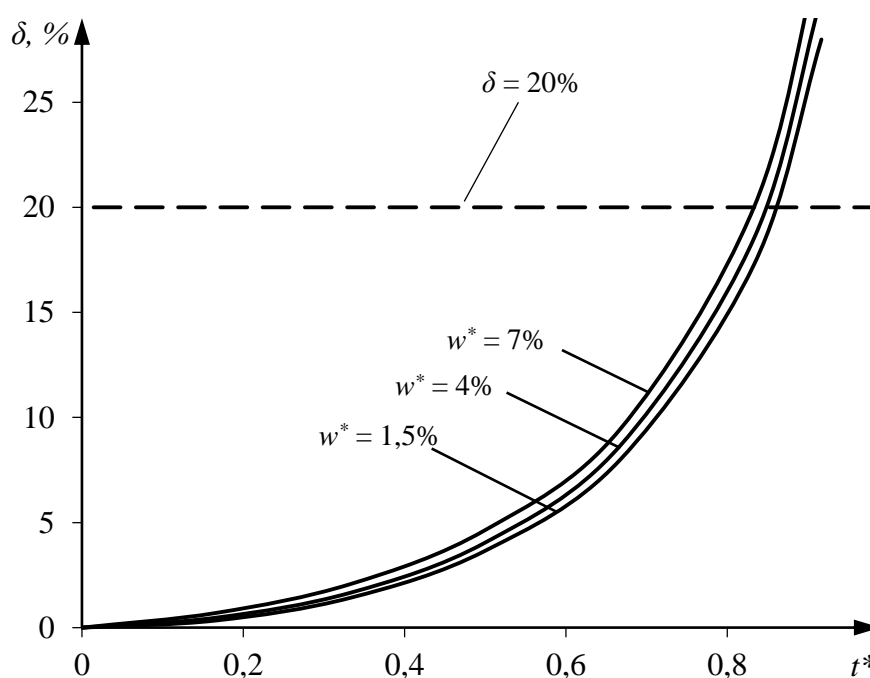


Рисунок 26 – Относительное отклонение локальной емкости при изменении глубины дефекта типа порез для провода с соотношением $D/d = 2,2$

Проанализировав рисунок 26, можно отметить, что ширина раскрытия пореза незначительно изменяет локальную емкость провода. Порез изоляции изменяет локальную емкость провода более, чем на 20%, если глубина пореза

составляет более (83...85) % от толщины бездефектной изоляции. Т.к. при проведении электроискрового контроля пробой изоляции наступает при глубине дефекта (72...83) %, в зависимости от материала изоляции [56], то данный тип дефектов невозможно обнаружить по изменению локальной емкости провода от номинального значения из-за возникновения пробоя изоляции.

Для данного типа дефекта достаточно просто выполнить физическую модель, поэтому был проведен эксперимент по выявлению дефектов типа порез в изоляции методом контроля «на проход» [57] при скорости движения объекта контроля на технологической линии 5 м/с. В качестве объекта контроля был использован провод ПВКВ-6 с диаметром токоведущей жилы 1,2 мм, наружным диаметром изоляции 3,3 мм, толщиной изоляции 1,05 мм. Согласно требованиям ГОСТ 23286-78 контроль был проведен при напряжении 10 кВ, частота испытательного напряжения – 1 кГц. Длина зоны контроля составляет 20 мм. Измеренное значение локальной емкости бездефектного участка провода составляло 9 пФ. Электрическая емкость электрода 5 пФ.

Для создания дефектов необходимого размера на различных участках изоляции провода были сделаны надрезы с глубиной 0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм, 0,4 мм и 0,5 мм. Влияние дефекта на значение локальной емкости было максимально при глубине надреза 0,3 мм и составило 0,3 пФ, что является 2% от суммарной локальной емкости бездефектного участка и электрода. На бездефектных участках изоляции максимальное отклонение значения локальной емкости составило 5%. В местах с более глубокими порезами (0,4 мм и 0,5 мм) были зафиксированы электрические пробои изоляции. Проведенный эксперимент позволяет подтвердить вывод, сделанный по результатам моделирования дефекта типа порез, о том, что данный тип дефекта невозможно зарегистрировать по изменению локальной емкости.

2.2.3. Определение зависимости между размерами дефекта и величиной относительного изменения локальной емкости кабельного изделия

Для оценки возможности выявления дефектов по изменению локальной емкости контролируемого участка необходимо установить зависимость между величиной относительного изменения локальной емкости кабельного изделия и размерами дефекта.

Для упрощения выполнения поставленной задачи было решено представить провод в виде эквивалентного плоского конденсатора (Рисунок 27), геометрические размеры которого определяются из модели провода в виде цилиндрического конденсатора, приведенной разделе 2.1.

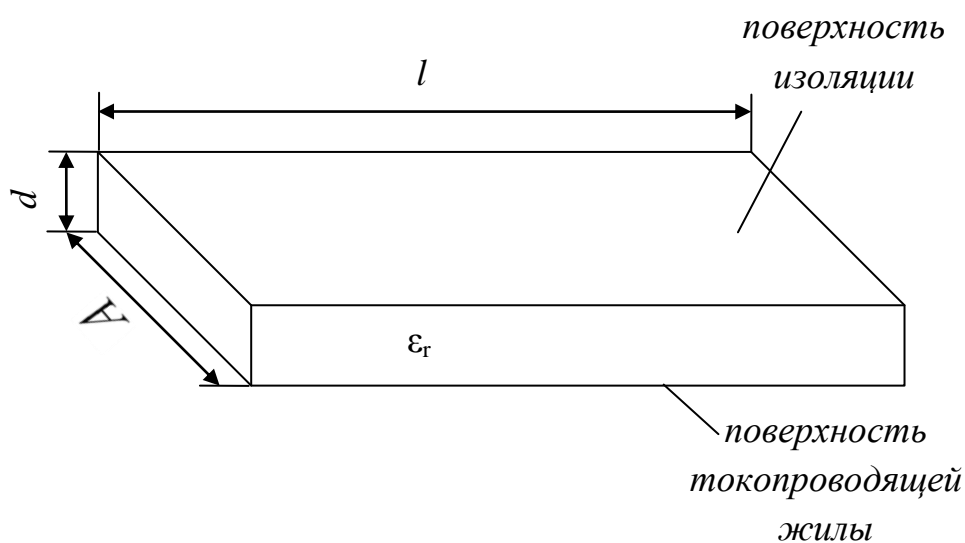


Рисунок 27 – Модель провода в виде плоского конденсатора

Расстояние между обкладками плоского конденсатора d эквивалентно толщине изоляции и составляет:

$$d = R - r, \quad (16)$$

где R - внешний радиус цилиндрического конденсатора;

r - внутренний радиус цилиндрического конденсатора.

Значение ширины обкладок плоского конденсатора A определяется по формуле:

$$A = \pi \cdot (R + r). \quad (17)$$

Длина плоского конденсатора численно соответствует длине цилиндрического конденсатора.

При использовании плоского конденсатора для моделирования изоляции провода возникает ошибка моделирования, которая имеет прямо пропорциональную зависимость с отношением R/r (Рисунок 28).

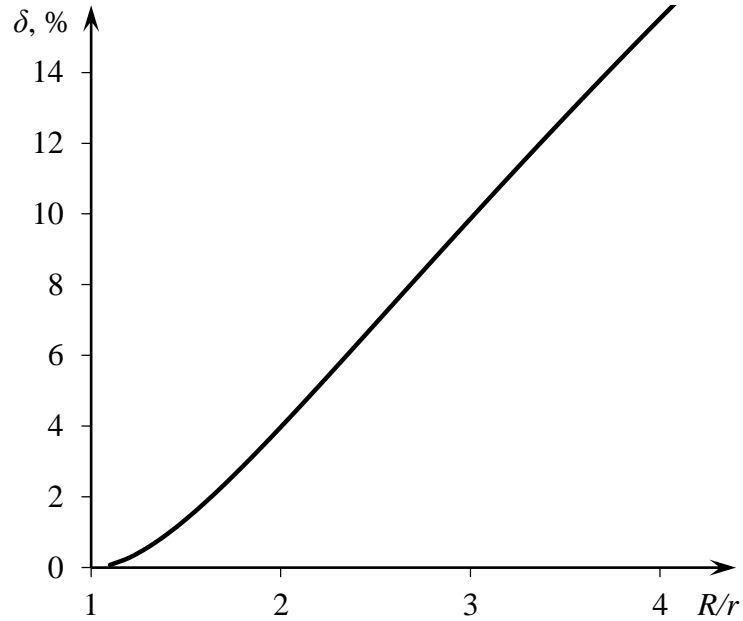


Рисунок 28 – Зависимость ошибки моделирования от отношения R/r

Согласно проведенному анализу литературы [27-32], отношение R/r для низковольтных кабелей при различных материалах изоляции (ПВХ-пластикат, резина) не превышает (2...2,4) и приводит к погрешности моделирования не более (4...6) %, что позволяет использовать плоский конденсатор для моделирования изоляции провода.

Для определения зависимости между размерами дефекта и величиной относительного отклонения локальной емкости кабельного изделия изоляция контролируемого участка была разделена на конденсаторы с малой площадью обкладок S_{ij} и расстоянием между обкладками (толщиной изоляции) d_{ij} .

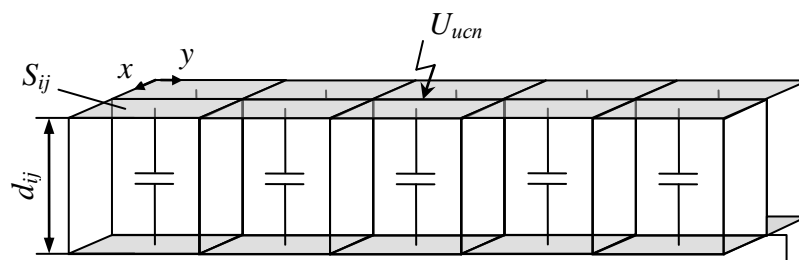


Рисунок 29 – Модель бездефектной изоляции провода в виде плоского конденсатора

Таким образом, контролируемый участок можно представить в виде матрицы, состоящей из $n \times m$ конденсаторов. Как можно увидеть на рисунке 29, все конденсаторы соединены параллельно. Емкость бездефектного контролируемого участка составляет:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S_\Sigma}{d}, \quad (18)$$

$$S_\Sigma = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij}(d), \quad (19)$$

где d – толщина бездефектной изоляции.

Используя формулы (16, 17) для определения геометрических размеров эквивалентного плоского конденсатора, электрическая емкость которого равна емкости цилиндрического конденсатора, формулу (18) можно преобразовать:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \pi l (R + r)}{d}, \quad (20)$$

где l – длина контролируемого участка;

R – внешний радиус изоляции;

r – радиус токопроводящей жилы.

В случае, если контролируемый участок имеет внешнюю или внутреннюю несплошность, его модель изменится (Рисунок 30).

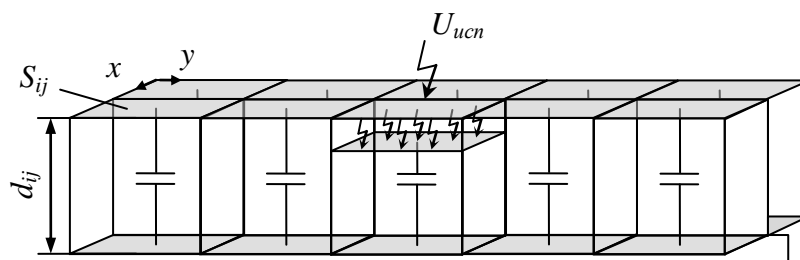


Рисунок 30 – Модель дефектной изоляции провода в виде плоского конденсатора

Емкость участка с несплошностью можно рассчитать по формуле:

$$C_{\partial} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \sum_{ij} \frac{S_{ij}(d_{ij})}{d_{ij}}. \quad (21)$$

Учитывая тот факт, что при использовании модели плоского конденсатора площадь участка зависит от его толщины, то площадь каждого из участков рассчитывается по формуле:

$$S_{ij}(d_{ij}) = x_{ij}(d_{ij}) \cdot y_{ij} = k_{ij} \cdot \pi \cdot (d_{ij} + 2r) \cdot y_{ij}, \quad (22)$$

где $x_{ij}(d_{ij})$, y_{ij} - геометрические размеры обкладки конденсатора ij ;

k_{ij} - доля $x_{ij}(d_{ij})$ от общей длины окружности по поверхности изоляции поперечного сечения провода.

Исходя из этого, величина относительного изменения локальной емкости рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{|C_0 - C_{\partial}|}{C_0} 100\% = \frac{\left| \pi l(R+r) - \sum_{ij} n_{ij} \cdot S_{ij}(d_{ij}) \right|}{\pi l(R+r)} 100\%, \quad (23)$$

где n_{ij} - коэффициент, показывающий во сколько раз толщина d_{ij} меньше толщины изоляции бездефектного участка.

Формулы (21-23) допустимо использовать для дефектов, которые уменьшают или увеличивают толщину изоляции провода, а именно для локальных увеличений/уменьшений внешнего диаметра, нарушения

эксцентрисности изоляции, сдиров, порезов, трещин, воздушных полостей. Причем осевое смещение дефекта в пределах контролируемого участка не приведет к значимому изменению результирующей локальной емкости.

Для проверки применимости данных выводов требуется определить достоверность формулы, устанавливающей связь между величиной дефекта и изменением локальной емкости. Для упрощения поставленной задачи был рассмотрен дефект типа уменьшение диаметра при длине дефекта равной половине длины контролируемой зоны. Для получения образцовых значений изменения локальной емкости провода с дефектом были использованы данные, полученные с помощью программы конечно-элементного анализа. Относительное изменение локальной емкости провода согласно проверяемой математической модели можно вычислить по формуле:

$$\delta = \left(\frac{n}{2} \cdot \frac{R_0 + r}{R + r} - 0,5 \right) \cdot 100\% , \quad (23)$$

где n – коэффициент, показывающий во сколько раз уменьшилась толщина изоляции в области дефекта;

R_0 – внешний радиус изоляции в области дефекта;

R – внешний радиус изоляции в бездефектной области;

r – внутренний радиус изоляции (жилы) в области дефекта.

Графики ошибок математической модели для расчета относительного изменения локальной емкости кабельного изделия при возникновении дефекта приведены на рисунке 31. Изменение относительной глубины h дефекта составляло от 0% до 100% толщины бездефектной изоляции.

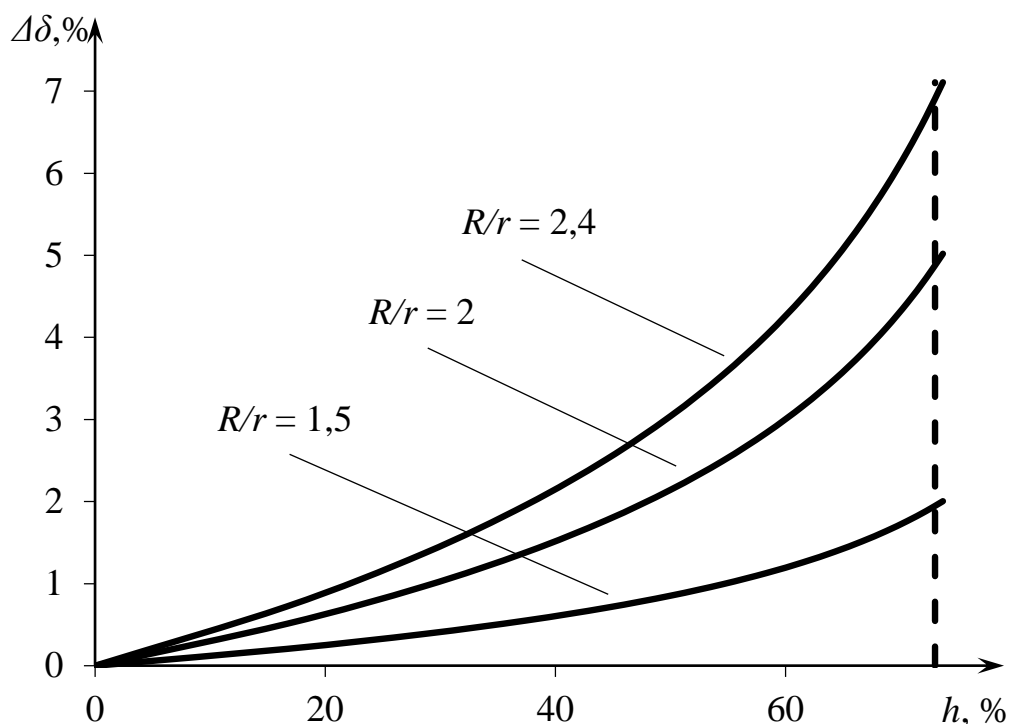


Рисунок 31 – Абсолютная ошибка математической модели для расчета относительного изменения локальной емкости кабельного изделия при изменении глубины дефекта

Анализировать данные зависимости имеет смысл до относительной глубины дефекта равной (72...83) % [56], т.к. при большей глубине дефекта наступает пробой изоляции. При анализе значений графиков в рассматриваемом диапазоне можно отметить, что абсолютная ошибка математической модели не превышает 7% для данной длины дефекта. Абсолютная ошибка моделирования является максимальной при длине дефекта равной длине контролируемой зоны и составляет не более 12%.

2.3. Модель группы скрученных изолированных жил

Согласно нормативному документу ГОСТ 2990-78 кабельные изделия должны быть подвергнуты испытаниям на этапе скрутки. Скруткой является процесс объединения отдельных изолированных жил, пучков в сердечник,

являющийся конструкцией более сложного вида [19-21]. Изначально, все элементы группы скрученных изолированных жил не имеют дефектов, но после прохождения крутильных машин возможно появление сдигов и порезов на поверхности скрученных элементов. Таким образом, далее проведена оценка возможности контроля поверхности группы по измерению электрической емкости участка в области сильных полей.

2.3.1. Возможность контроля поверхности группы скрученных изолированных жил

При сравнении процесса контроля группы скрученных изолированных жил с процессом контроля провода можно отметить, что при приложении высокого напряжения к поверхности группы наблюдается другая физика процесса из-за наличия воздушных зазоров между элементами скрутки. В связи с этим изначально необходимо исследовать возможность проведения контроля группы по значению локальной емкости в области сильных полей.

В качестве объекта исследований был выбран кабель ТОФЛЕКС КУВВнг(А) 19*0.75, характеристики которого указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики кабеля ТОФЛЕКС КУВВнг(А) 19*0,75

Рабочее напряжение	660 В
Токопроводящая жила	Медная 5 класса гибкости, 0.75 мм ²
Изоляция	ПВХ-пластикат
Оболочка кабеля	ПВХ-пластикат
Особенности	Не распространяющие горение при групповой прокладке
Количество изолированных жил	19

Так как токопроводящая жила данного кабеля имеет 5 класс гибкости, то она является многопроволочной [58]. Согласно техническим характеристикам (таблица 1), изоляция жил данного кабеля имеет категорию И-3 и толщину 0,6 мм. Испытательное напряжение (пиковое значение) для пластмассовой изоляции с данной толщиной составляет 12 кВ [3]. Скрутка является повивной, т.е. в середине расположена одна изолированная жила, вокруг которой 6 изолированных жил в первом повиве и 12 – во втором.

Для оценки возможности контроля поверхности группы изолированных жил с использованием разрабатываемого метода была создана математическая модель в программе конечно-элементного анализа.

– Математическое моделирование

Конструкция модели представляет собой 19 изолированных ПВХ-пластиком медных жил, которые плотно прижаты друг к другу за счет скрученного состояния. Зазоры между изолированными жилами заполнены воздухом. В конструкции математической модели приняты два допущения. Первым допущением является тот факт, что жила состоит из одной проволоки. В процессе реальной скрутки изоляция жил в небольшой степени деформируется и касание друг с другом осуществляется не в одной точке (если рассматривать поперечное сечение группы), а по небольшой площадке (Рисунок 32). Поэтому вторым допущением являются контуры изолированных жил – они представляют собой окружности без деформаций, которые накладываются друг на друга для моделирования площадок касания (Рисунок 32).

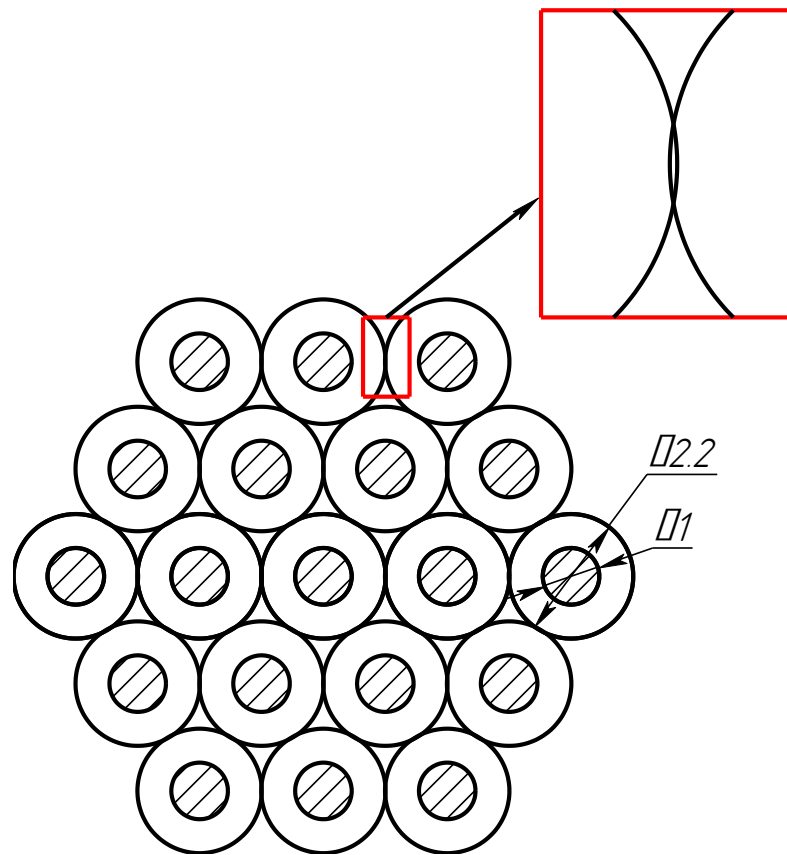


Рисунок 32 – Конструкция математической модели

Кабельные изделия являются длинномерными объектами и распределение электрического поля по поперечному сечению кабеля одинаково по всей длине в контролируемой зоне. Таким образом, целесообразно разрабатывать двухмерную модель объекта исследований.

В ходе испытаний жилы изолированных проводов группы заземляются, а с помощью специального электрода к поверхности группы прикладывается испытательное напряжение. Тогда граничные условия модели в цилиндрических координатах:

- для каждой токопроводящей жилы:

$$V(r = r_{\text{ж}}, \varphi, t) = 0 \text{ В},$$

где $r_{\text{ж}}$ - радиус жилы,

- для поверхности группы:

$$V(r = r_c(\varphi), \varphi, t) = 12 \text{ кВ},$$

где $r_c(\varphi)$ - функция, описывающая поверхность группы изолированных жил.

Картина распределения электрического поля в начальный момент времени до возникновения ионизационных процессов представлена на рисунке 33.

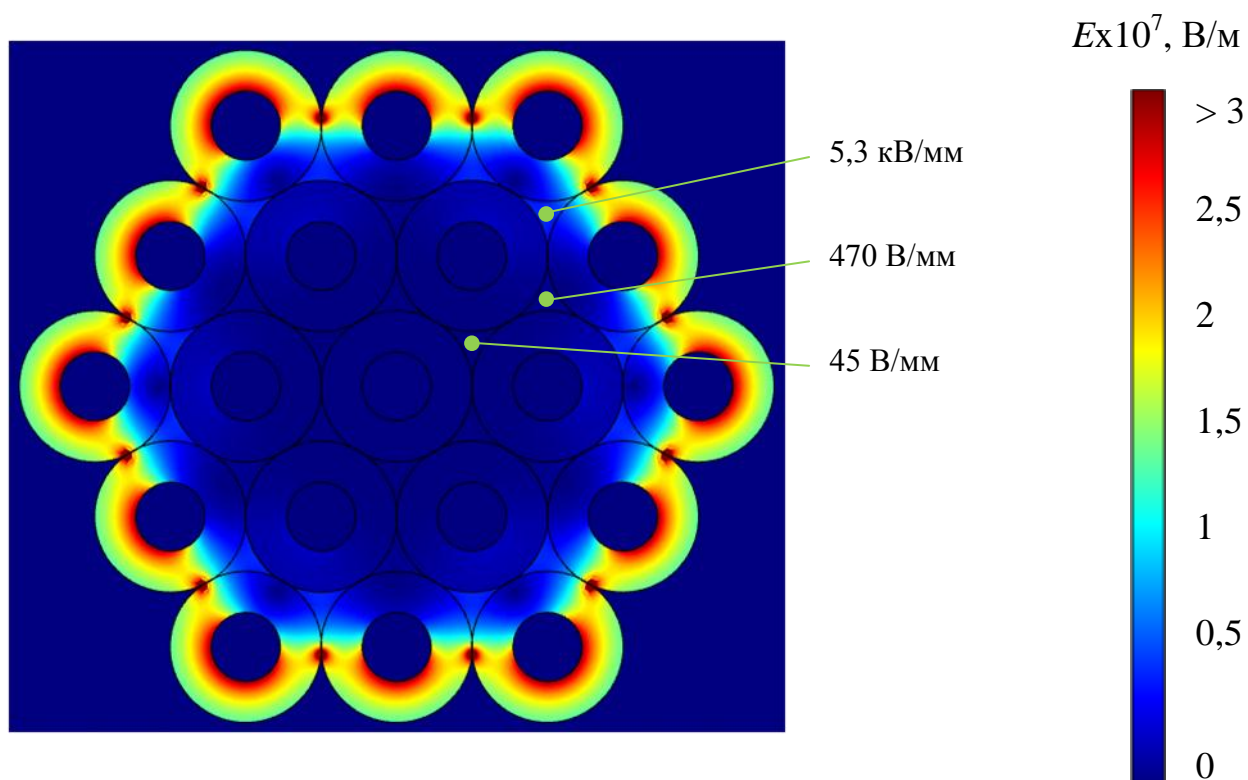


Рисунок 33 – Картина электрического поля в поперечном сечении группы до возникновения ионизационных процессов

Анализируя полученную картину поля можно отметить, что ионизационные процессы возникнут только в первом ряду воздушных зазоров между первым и вторым повивом, где напряженность электрического поля составляет 5,3 кВ/мм [59-61]. Во втором и третьем рядах зазоров, где напряженность 470 В/мм и 45 В/мм, соответственно, частичных разрядов происходить не будет.

Учитывая возникновение частичных разрядов в первом ряду воздушных зазоров, получены картины распределения электрического потенциала и электрического поля (Рисунок 34, 35).

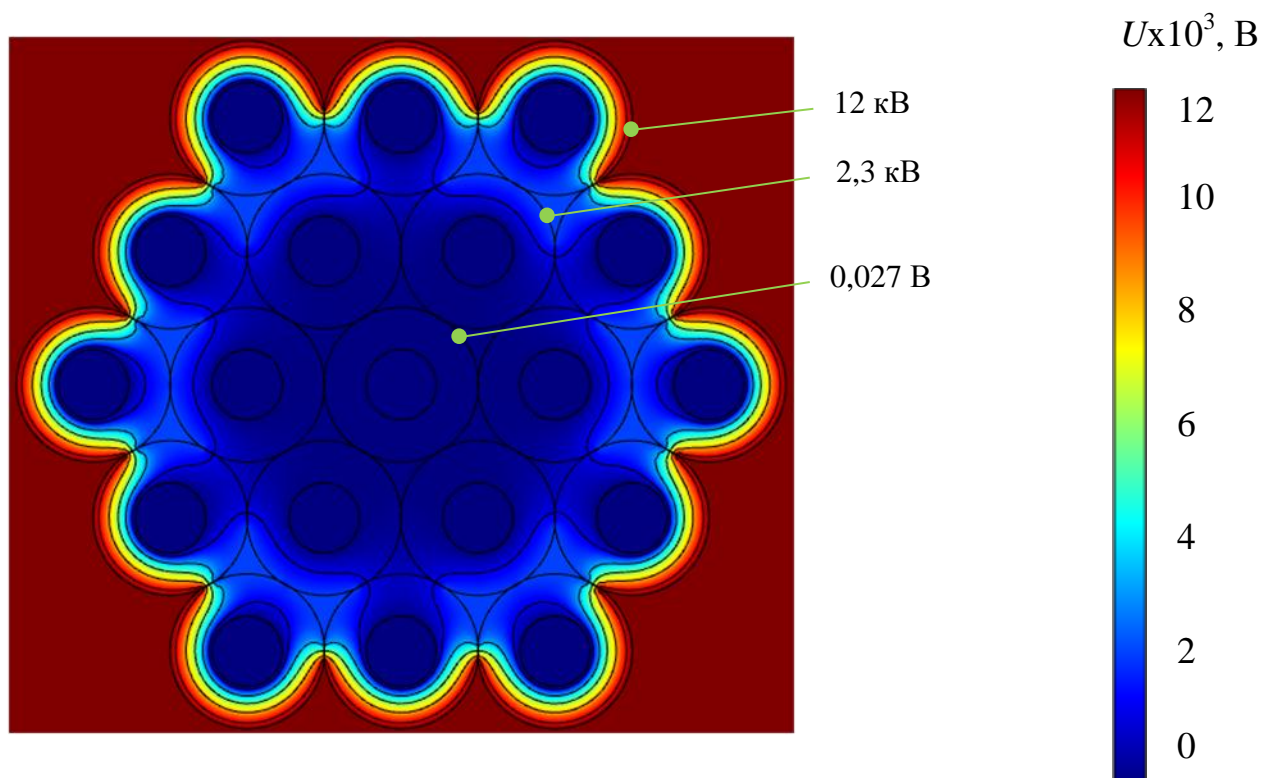


Рисунок 34 – Картина распределения электрического потенциала по поперечному сечению группы изолированных жил после возникновения ионизационных процессов

Высокое испытательное напряжение прикладывается только к частям изоляций жил второго повива, образующим поверхность группы (Рисунок 35). Напряжение, приложенное к поверхности изоляций жил первого повива и центральной жилы не превышает 2,3 кВ и 0,027 кВ соответственно, что кратно ниже испытательного напряжения.

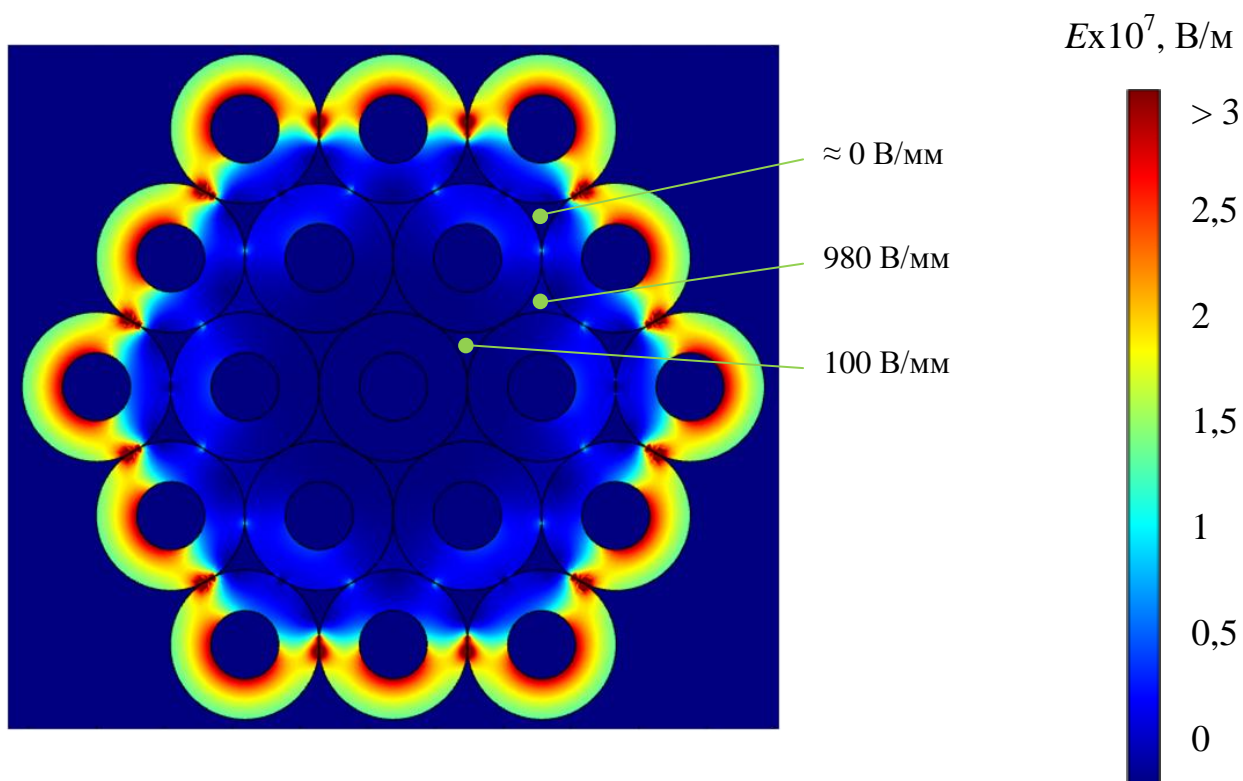


Рисунок 35 – Картина электрического поля в поперечном сечении группы изолированных жил после возникновения ионизационных процессов

При анализе величин напряженностей электрического поля после возникновения ионизационных процессов в первом ряду воздушных зазоров (Рисунок 34) можно отметить, что во втором и третьем рядах по-прежнему не будет происходить ионизации воздуха. Максимальная величина напряженности электрического поля в изоляции жил первого повива и центральной жилы будет отличаться от аналогичной величины для изоляций второго повива, в среднем, в 6 и 472 раза соответственно. Таким образом, наибольшее влияние на значение локальной емкости будет оказывать часть изоляций жил второго повива, непосредственно к которым прикладывается высокое испытательное напряжение.

Для проверки данного утверждения было проведено моделирование группы скрученных изолированных жил с дефектом в виде продольного пореза центральной изолированной жилы (1 вариант), изолированной жилы первого повива (2 вариант) и изолированной жилы второго повива (3 вариант),

конструкции моделей приведены на рисунке 36. Протяженность дефекта принята равной длине контролируемого образца, ширина – 0,6 мм, высота – 0,35 мм.

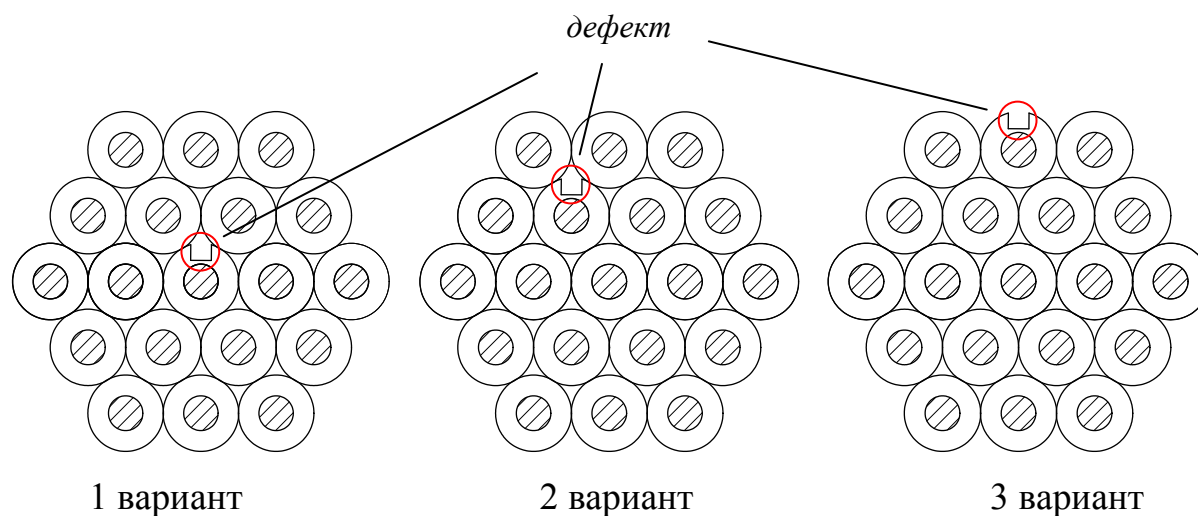


Рисунок 36 – Конструкция математической модели группы изолированных жил с различными вариантами расположения дефекта

В результате проведенного моделирования были получены относительные изменения локальной емкости от емкости бездефектного образца для каждого варианта (таблица 3).

Таблица 3 – Величина относительного изменения локальной емкости группы при возникновении дефекта изоляции жилы

Относительное изменение локальной емкости, %		
1 вариант	2 вариант	3 вариант
0,001	0,095	3,56

Можно отметить, что изменение локальной емкости при появлении дефекта в изоляции жилы второго повива превышает изменение локальной емкости при аналогичном дефекте в первом повиве или центральной жиле в 37,5 и 3497 раз соответственно. Таким образом, изолированные жилы внутренних повивов оказывают незначительное влияние на измеряемое значение локальной емкости всего образца и им можно пренебречь. На практике 2 и 3 варианты расположения

дефектов возможны только в том случае, если перед этапом скрутки не был проведен контроль изоляции используемых проводов, что является нарушением технологического процесса. Моделирование данных вариантов расположения дефектов позволяет сделать вывод, что влияние изоляции, напряженность в которой кратно меньше максимальной, на емкость всего изделия крайне мало.

– Физическое моделирование

Физическое моделирование измерений локальной емкости группы изолированных жил в области сильных полей заключается в измерении локальной емкости образцов, но в области слабых полей. Напряжение прикладывается ко всей поверхности образца с помощью водного раствора соли NaCl, в который помещается исследуемый образец. Для физического моделирования эксперимента используется монтажный провод. Диаметр жилы составляет $d_{жс}=1,2$ мм, внешний диаметр изоляции $d_{из}=1,95$ мм, изоляция выполнена из ПВХ-пластиката. Для проведения моделирования были сделаны образцы групп скрученных изолированных жил, в которых содержится от 2 до 10 элементов. Длина каждой изолированной жилы составляет 1000 мм.

Согласно методике измерения локальной емкости проводов, указанной в стандарте [43, 44, 62, 63], исследуемые образцы частично погружались в металлический бак с водным раствором. Длина погруженной части проводов составляла 500 мм. Одна из клемм измерителя емкости была подключена к проводящим частям элементов группы, вторая – к металлическому баку с водой, который был заземлен. Измерения проводились с помощью измерителя иммитанса АМ-3001, базовая погрешность которого не превышает 0,05% [64]. Уровень напряжения составлял 1 В, при проведении измерений использовалась параллельная схема замещения электрической емкости. В результате эксперимента были получены временные зависимости измеряемой локальной емкости групп изолированных жил, часть из которых приведена на рисунке 37.

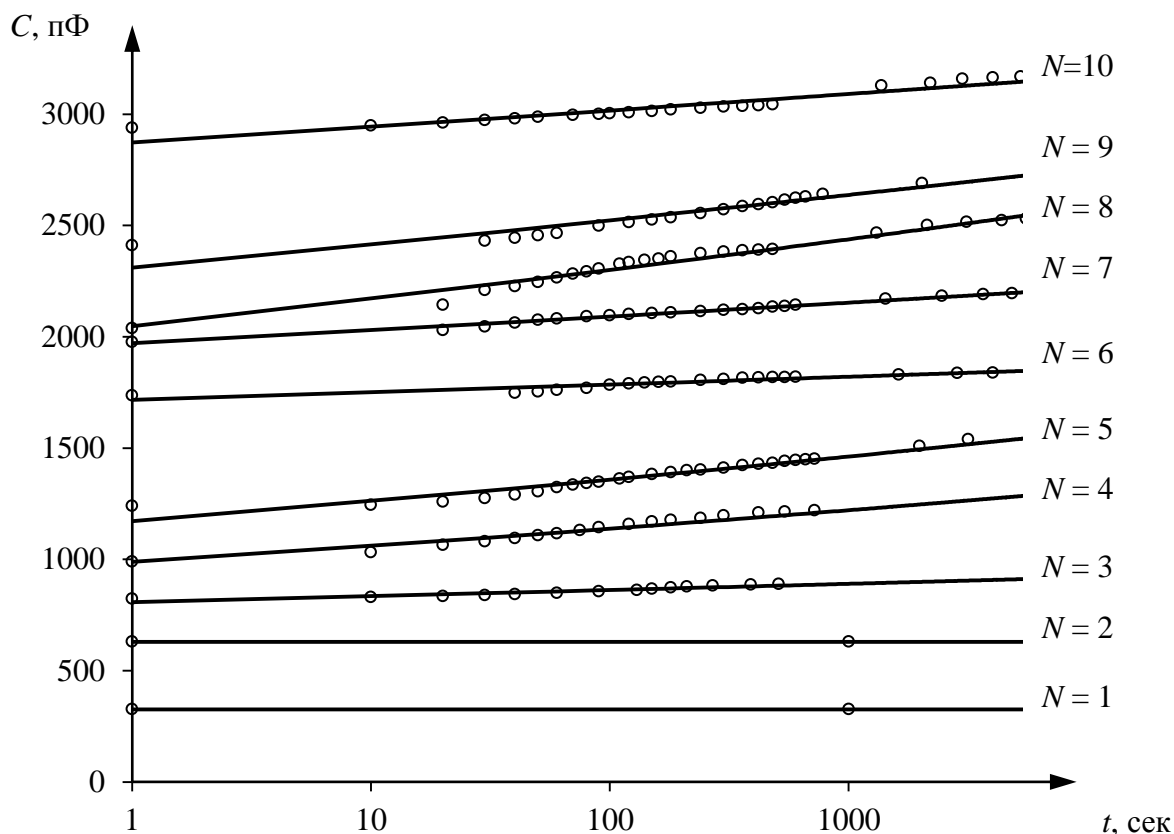


Рисунок 37 – Временная зависимость локальной емкости группы изолированных жил при разном количестве элементов

Чтобы оценить достоверность математической модели необходимо определить разность между измеренной локальной емкостью группы и значением арифметической суммы локальных емкостей каждого из элементов группы, которыми являются изолированные жилы, в отдельности (Рисунок 38, Рисунок 39). Красный график для рисунков 38 и 39 получен по формуле:

$$C_N = N \cdot C_1, \quad (24)$$

где N – количество изолированных жил;

C_1 – емкость одной изолированной жилы с длиной погруженной части 500 мм.

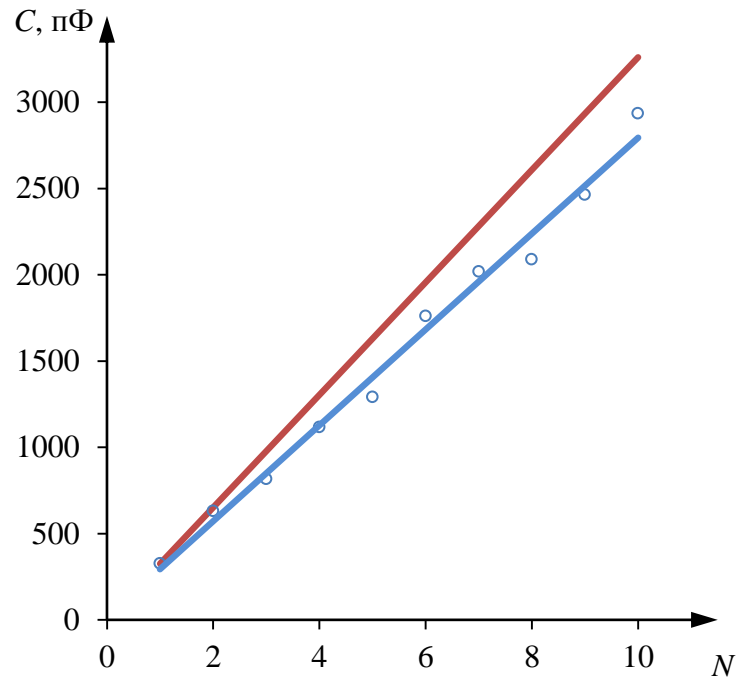


Рисунок 38 – Суммарная локальная емкость изолированных жил, расположенных по отдельности (красный график) и в скрутке (синий график), в начальный момент времени

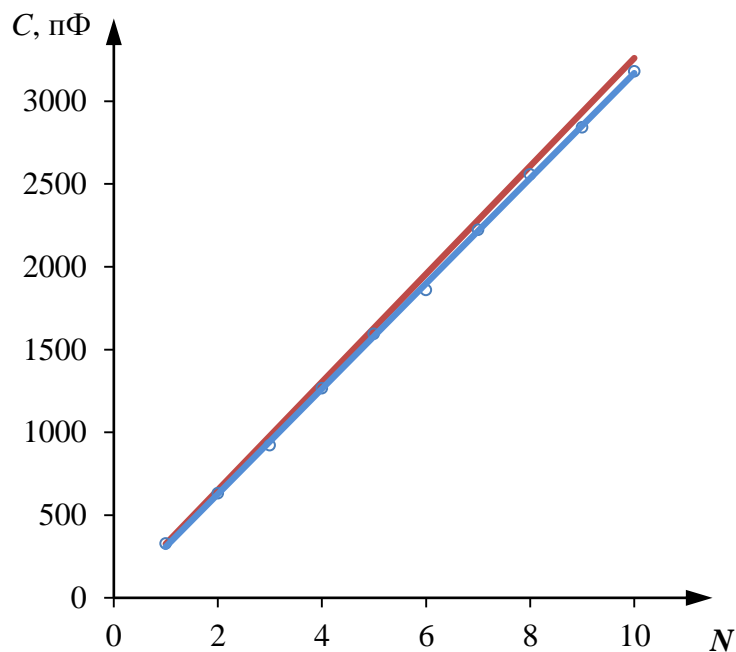


Рисунок 39 – Суммарная локальная емкость изолированных жил, расположенных по отдельности (красный график) и в скрутке (синий график), после выдержки в воде

Анализируя полученные графики можно отметить, что локальная емкость группы ниже, чем суммарная локальная емкость аналогичного количества изолированных жил, что подтверждает результаты математической модели, а именно тот факт, что изолированные жилы, находящиеся не на поверхности группы, вносят малый вклад в значение суммарной локальной емкости.

Увеличение значений емкости групп со временем (Рисунок 39) и, соответственно, уменьшение разницы между значением локальной емкости группы и суммарной локальной емкости соответствующего количества отдельных изолированных жил можно объяснить несовершенством физической модели.

При проведении моделирования группы погружалась в воду без натяжения, которое обеспечивается на предприятии за счет особенностей технологического процесса, вследствие чего между изолированными жилами возникали зазоры. После погружения данные зазоры постепенно заполнялись водой, обеспечивая заземление не только на поверхности, но и внутри группы. Также, при продолжительном нахождении в воде поверхность внутренней части группы, находящаяся над водой, оказывалась смоченной за счет действия капиллярных сил (Рисунок 40). Таким образом, более достоверные результаты были получены при измерениях в начальный момент времени.

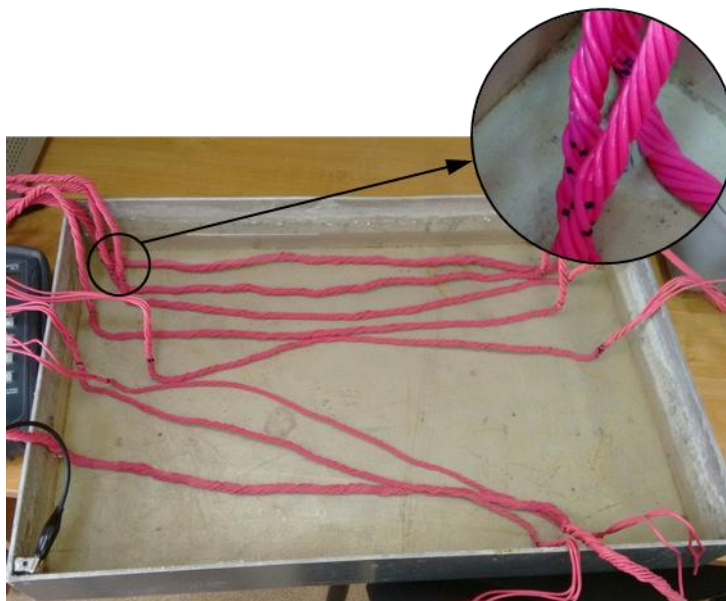


Рисунок 40 – Проведение физического моделирования

– Измерение локальной емкости группы в области сильных полей

Для проведения аналогичного эксперимента в области сильных полей группа была помещена в электрод электроискрового испытателя с функцией контроля емкости ЗАСИ-20. В соответствии с нормативным документом ГОСТ 23286-78 было выбрано испытательное напряжение с пиковым значением 8 кВ. При проведении эксперимента были использованы образцы групп с количеством изолированных жил от 2-х до 40 (Рисунок 41).

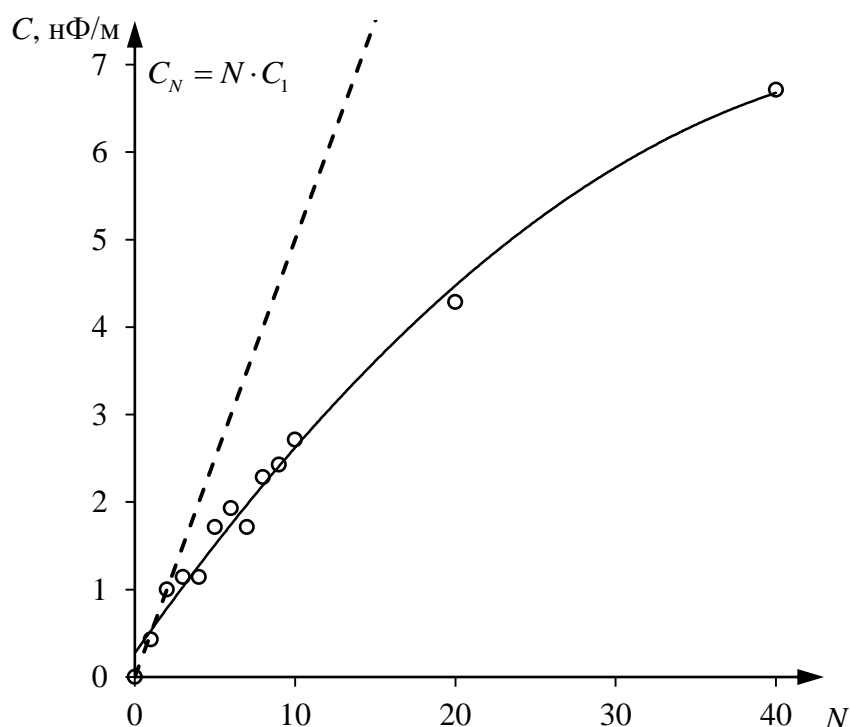


Рисунок 41 – Зависимость емкости групп от количества изолированных жил при проведении контроля с помощью ЗАСИ – 20 с длиной электрода 70 мм

При увеличении количества жил в группе увеличивается количество изолированных жил, относящихся к внутренним повивам, к поверхностям которых не прикладывается испытательное напряжение и которые, соответственно, вносят незначительный вклад в измеряемое значение емкости. Этот факт объясняет монотонное увеличение погонной емкости и увеличение отклонения $C(N)$ от линейного графика C_N (Рисунок 41).

При проведении данного эксперимента было отмечено, что ЗАСИ – 20 выдавал необходимое испытательное напряжение (8 кВ) только при $N \leq 3$ (при длине электрода 70 мм) и при $N = 1$ (при длине электрода 150 мм) (Рисунок 42).

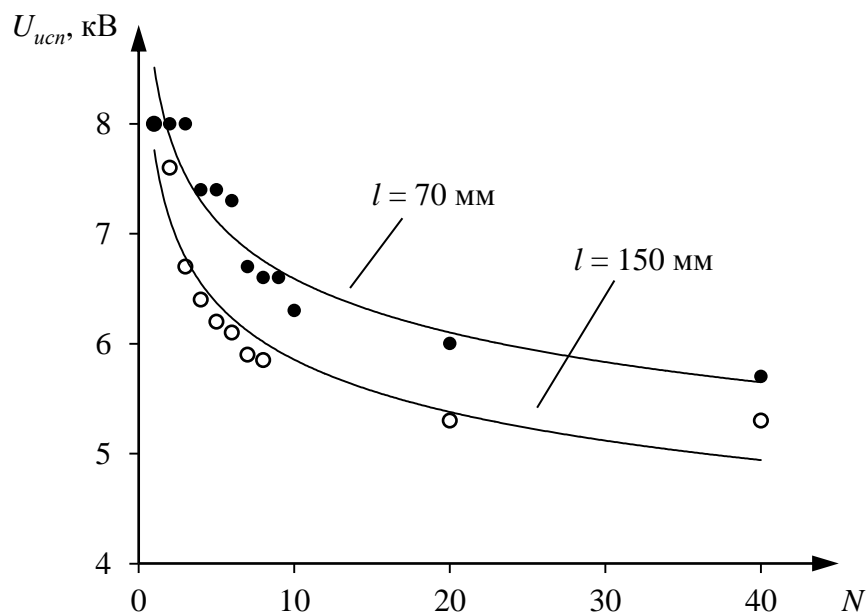


Рисунок 42 – Зависимость испытательного напряжения (ЗАСИ – 20) от количества изолированных жил в группе при длине электрода 70 мм и 150 мм

Увеличение затрачиваемой мощности при контроле групп изолированных жил можно объяснить двумя факторами:

1. повышением уровня диэлектрических потерь с увеличением количества изолированных жил, находящихся в контролируемой зоне;
2. потерей мощности на поверхностные разряды, количество которых увеличивается с увеличением площади поверхности объекта контроля.

Таким образом, данный прибор не способен обеспечить проведение контроля высоким напряжением «на проход», регламентируемых нормативными документами ГОСТ 2990-78, ГОСТ 23286-78, для групп с большим числом изолированных жил. На контроль локальной емкости испытательное напряжение не оказывало влияния. Так как при контроле используется переменное испытательное напряжение, то электрический потенциал по сечению группы

распределяется согласно диэлектрическим проницаемостями материалов, на величины которых напряжение не оказывает влияния [65-68].

2.3.2. Разработка математической модели для определения локальной емкости группы скрученных изолированных жил

Для определения качества изоляции на поверхности контролируемой группы изолированных жил необходимо знать значение локальной емкости бездефектного образца C_c . Для определения данного значения было проведено моделирование с использованием математической модели, представленной в разделе 2.3.1.

Как известно из формулы для цилиндрического конденсатора, его электрическая емкость является функцией нескольких параметров [61, 69]:

$$C = f\left(\varepsilon_r, l, \frac{D}{d}\right), \quad (25)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции;

l – длина провода;

D – диаметр изоляции;

d – диаметр жилы.

Т.к. далее будет проводиться анализ емкости математической модели группы C_c^M , то в качестве влияющих параметров можно рассматривать только ε_r , D , d . Так как геометрия группы схожа с геометрией проводов, которые являются цилиндрическими конденсаторами, то можно предположить, что емкость группы также является функцией этих параметров.

Для проверки данной гипотезы были получены зависимости емкости от данных параметров для одножильного провода, пучковых скруток из 7 проводов (1 повив), 19 проводов (2 повива), 37 проводов (3 повива) (Рисунок 43, 44).

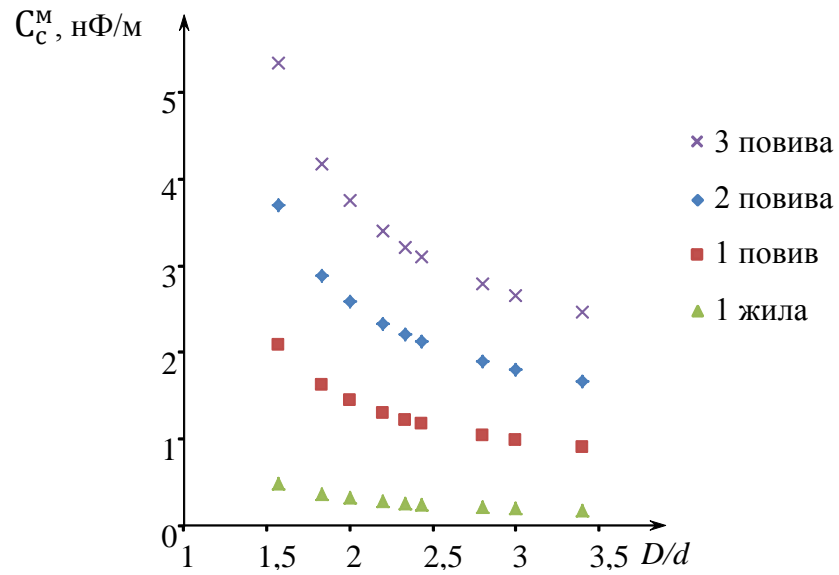


Рисунок 43 – Зависимость емкости образцов от отношения внешнего и внутреннего радиусов изоляции при $\varepsilon_r = 4$

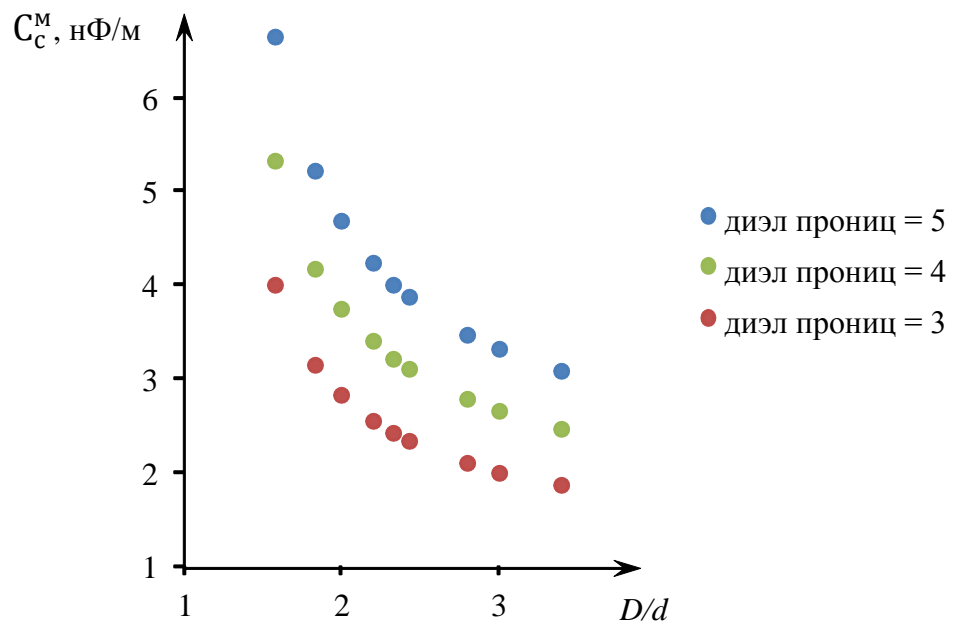


Рисунок 44 – Зависимость емкости группы из 37 проводов (3 повива) от отношения внешнего и внутреннего радиусов изоляции

Анализируя рисунок 43, можно отметить, что зависимости для групп и для одиночной жилы аналогичны, т.е. емкость группы пропорциональна величине $\frac{1}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}$.

По рисунку 44 заметно, что емкость группы прямо пропорциональна параметру ε_r .

Таким образом, для расчета емкости представим группу изолированных жил в виде «эквивалентного провода» (рисунок 45).

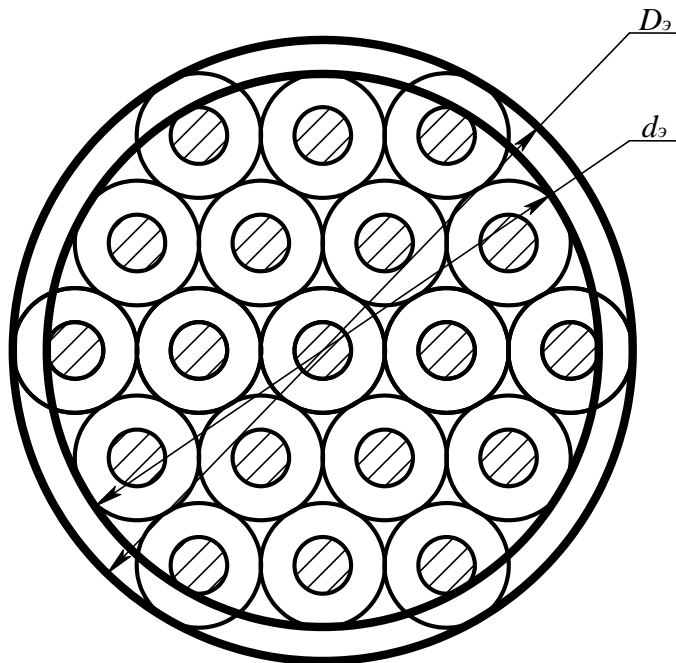


Рисунок 45 – «Эквивалентный провод»

Согласно выводам, сделанным в разделе 2.3.1, наибольший вклад в емкость группы вносит изоляция, находящаяся на поверхности, поэтому примем, что внешний диаметр изоляции «эквивалентного провода» $D_э$ - это диаметр окружности, описывающей скручиваемое изделие, а толщина изоляции «эквивалентного провода» соответствует толщине проводов, образующих группу. Относительная диэлектрическая проницаемость изолятора «эквивалентного провода» также соответствует аналогичному параметру для проводов, образующих группу (Рисунок 45).

Тогда электрическую емкость «эквивалентного провода» можно определить по формуле для цилиндрического конденсатора:

$$C_3 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln\left(\frac{D_3}{d_3}\right)} \quad (26)$$

Далее была рассмотрена зависимость емкости группы от параметра $\frac{1}{\ln(D_3/d_3)}$ при различном количестве изолированных жил в группе (Рисунок 46).

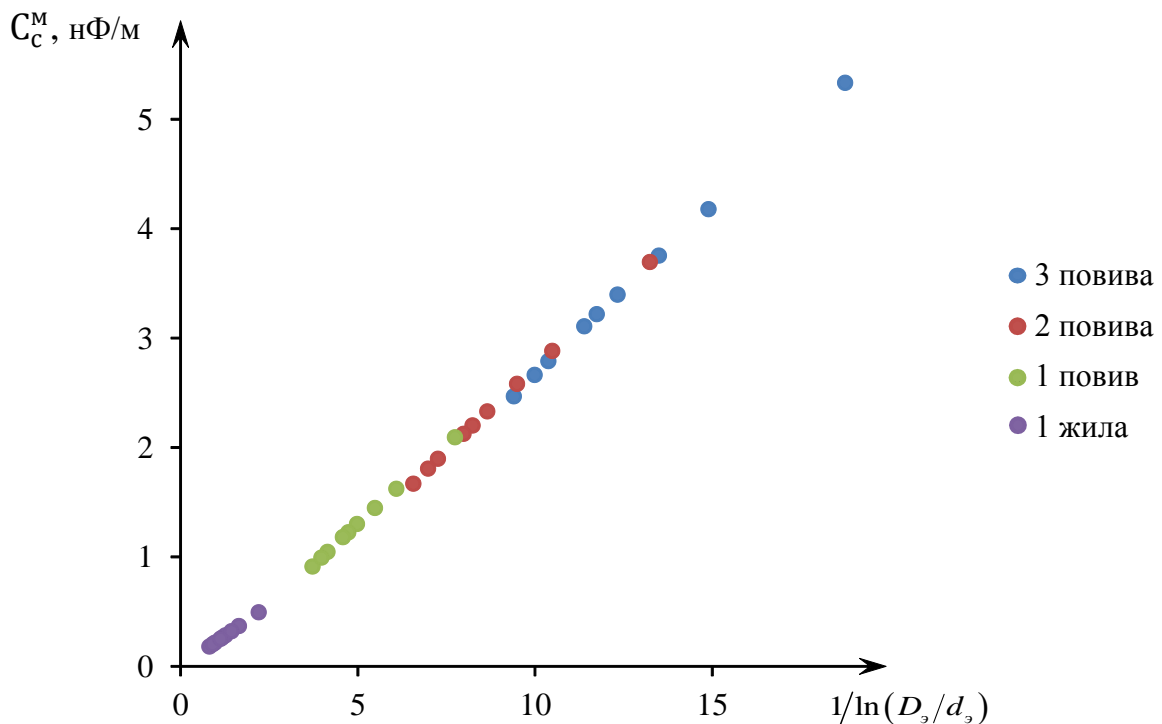


Рисунок 46 – Зависимость емкости модели от емкости соответствующего «эквивалентного провода»

Проведя анализ полученного массива данных, можно отметить, что емкость группы изолированных жил коррелирует с величиной $\frac{1}{\ln(D_3/d_3)}$ и зависимость является линейной практически на всем диапазоне моделируемых значений емкости. Линейность нарушается только на начальном участке зависимости (зависимость для одножильного провода).

Для уточнения полученной математической модели было решено скорректировать размеры «эквивалентного провода», а именно величину $\frac{D_3}{d_3}$. Для этого из значений емкости, полученных в результате моделирования, было выражено аналогичное отношение для скорректированных размеров «эквивалентного провода» $\frac{D'_3}{d'_3} = e^{\frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{C^M}}$, и найдена зависимость $\frac{D'_3}{d'_3} = f\left(\frac{D_3}{d_3}\right)$

(Рисунок 47).

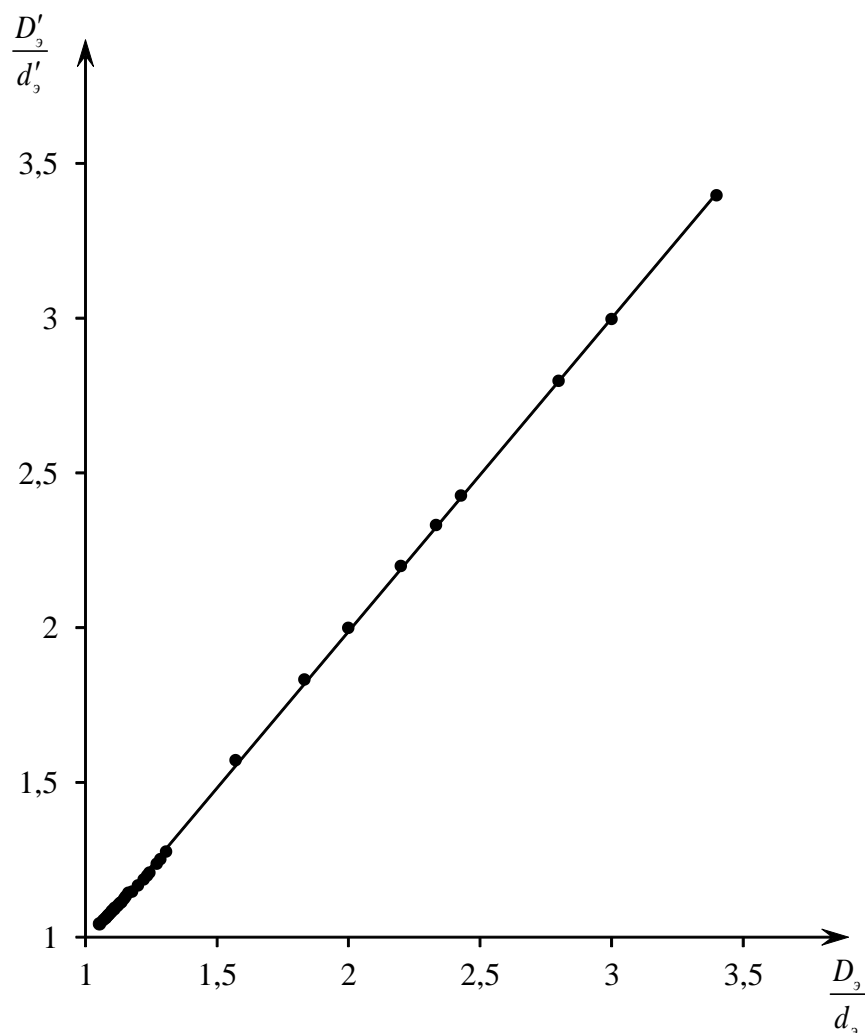


Рисунок 47 – Зависимость скорректированного параметра D'_3/d'_3 от размеров «эквивалентного провода» D_3/d_3

Далее была проведена аппроксимация и получена линейная функция, с высокой достоверностью описывающая зависимость на рисунке 47 (коэффициент достоверности аппроксимации 1):

$$\frac{D'_3}{d'_3} = 1,0123 \frac{D_3}{d_3} - 0,0364 \quad (27)$$

Тогда скорректированная формула для определения емкости «эквивалентного провода» будет следующей:

$$C_3 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln\left(\frac{D_3}{d_3} \cdot \left(1,0123 - \frac{0,0364 \cdot d_3}{D_3}\right)\right)}. \quad (28)$$

Для проверки достоверности полученной функции было проведено сравнение величин емкости, рассчитанных с помощью формулы (28), и полученных экспериментально при измерении прибором ЗАСИ-20 емкости групп с количеством изолированных жил от 1 до 40. Так как количество жил в группе оказывает косвенное влияние на емкость, то были построены зависимости:

$$C_c = f\left(\frac{D_c}{D_c - d}\right), \quad (29)$$

где D_c - диаметр группы изолированных жил;

d - толщина изоляции проводов группы (Рисунок 48). Материалом изоляции проводов группы является ПВХ-пластикат, его диэлектрическая проницаемость была определена экспериментально при измерении емкости одножильного провода и составила 5,69.

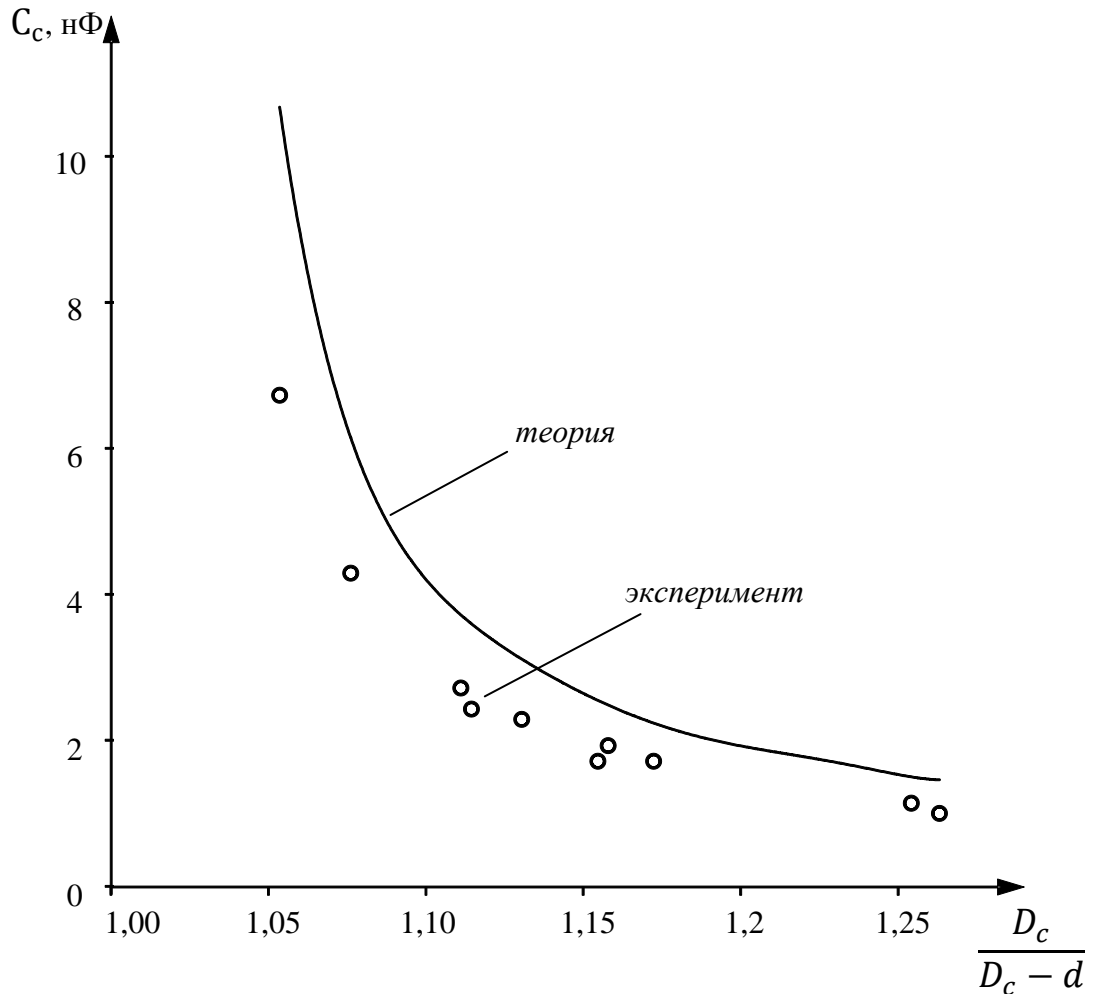


Рисунок 48 – Теоретическая ($\varepsilon_r = 5,69$) и экспериментальная зависимости

емкости группы от величины $\frac{D_c}{D_c - d}$

Сравнивая теоретическую и экспериментальную зависимости, можно отметить, что характер разработанной математической модели соответствует экспериментальным данным. Разницу между значениями теории и практики можно объяснить погрешностью при определении диэлектрической проницаемости изоляции проводов группы. Согласно справочным данным [65-68, 70], значение диэлектрической проницаемости ПВХ-пластиката варьируется в диапазоне (4,2...4,5). Так, если принять значение этого параметра равным 4,2, то рассчитанные значения емкости группы изменятся (Рисунок 49).

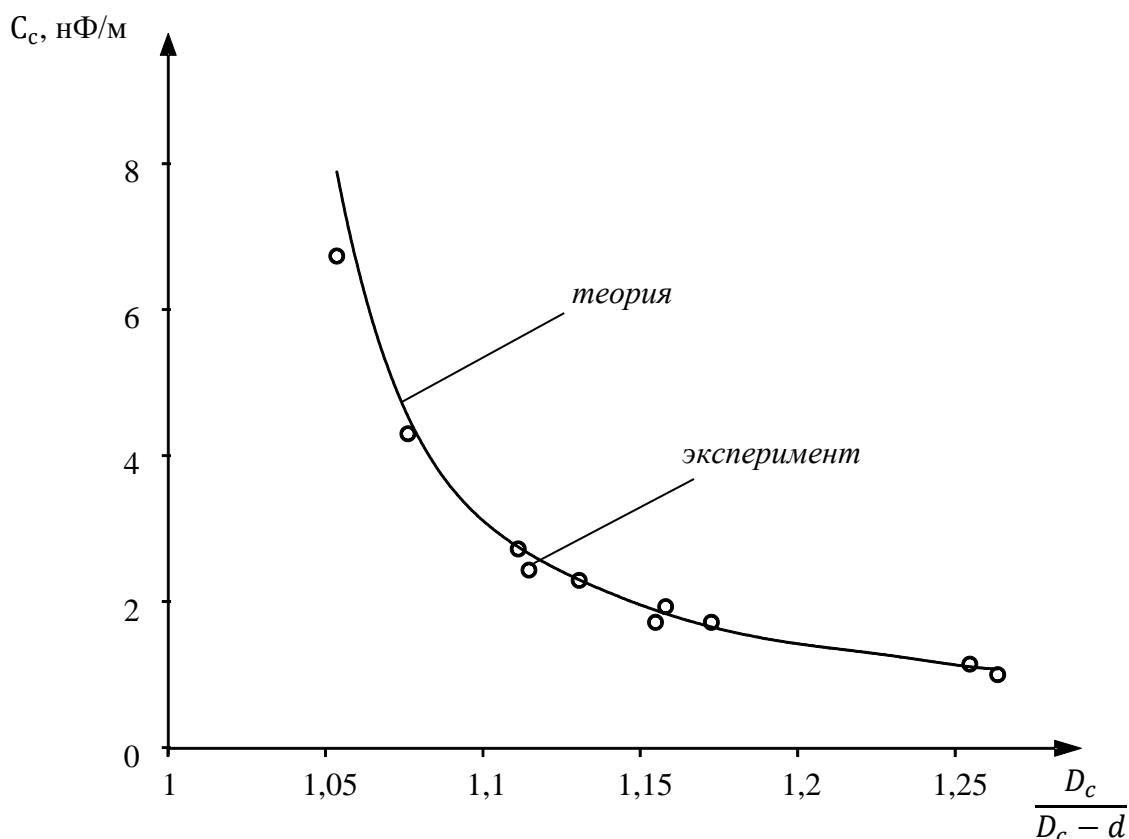


Рисунок 49 – Теоретическая ($\varepsilon_r = 4,2$) и экспериментальная зависимости

емкости группы от величины $\frac{D_c}{D_c - d}$

По данному рисунку видно, что теоретические и экспериментальные данные практически совпадают, отклонения экспериментальных данных от теоретической зависимости не превышают 10 %. Таким образом, разработанную математическую модель группы изолированных жил в виде «эквивалентного провода» можно считать достоверной.

2.4. Выводы по главе 2

1. На основе статистических данных было выявлено, что при использовании цепочечного электрода кабельное изделие является бездефектным, если его локальная емкость отклоняется от номинального значения не более, чем на 20%. Принятое значение отклонения $\pm 20\%$ может быть изменено как в большую

сторону (при возникновении большого количества ложных срабатываний), так и в меньшую сторону (при проведении контроля наиболее ответственных и ресурсозатратных изделий) для конкретного случая. Исходя из этого, был проведен анализ влияния различных дефектов на величину емкости. В данном случае по значению локальной емкости при электроискровых испытаниях могут быть выявлены следующие дефекты:

1) увеличение толщины изоляции более, чем на:

- 40 % при длине дефекта равной длине зоны контроля;
- 127 % при длине дефекта равной половине длины зоны контроля;

2) уменьшение толщины изоляции более, чем на:

- 22 % при длине дефекта равной длине зоны контроля;
- 37 % при длине дефекта равной половине длины зоны контроля;
- 59 % при длине дефекта, составляющей 20% от длины зоны контроля;

3) эксцентричность провода, при смещении центра жилы на расстояние, равное 57% от толщины изоляции.

Т.к. при электроискровом контроле пробой изоляции наступает при глубине дефекта (72...83) % [56], то можно отметить, что функция измерения емкости позволяет значительно расширить возможности дефектоскопа по обнаружению вышеперечисленных дефектов. Такие дефекты, как порезы изоляции (а также трещины, проколы, воздушные полости малой протяженности) не приводят к выявляемому отклонению емкости и могут быть обнаружены только по возникновению пробоя изоляции.

2. Было доказано, что для моделирования изоляции провода допустимо использовать модель провода в виде плоского конденсатора. На основании данной модели было выведена зависимость между размером дефекта и относительным изменением локальной емкости дефектного кабельного изделия от бездефектного. Данная зависимость подходит для дефектов, которые уменьшают или увеличивают толщину изоляции провода, а именно для

локальных увеличений/уменьшений внешнего диаметра, нарушения эксцентricности изоляции, сдиров, порезов, трещин, воздушных полостей.

3. При анализе распределения электрического поля в группе скрученных изолированных жил было выявлено, что основной вклад в емкость группы вносит изоляция внешнего повива изолированных жил. Из данного утверждения следует, что по значению локальной емкости возможно проводить контроль изоляции на поверхности группы. Для нахождения номинальной локальной емкости группу необходимо представить в виде «эквивалентного провода». Параметры «эквивалентного провода» (внешний диаметр изоляции, толщина изоляции и относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции) совпадают с параметрами группы (внешний диаметр группы, толщина изоляции проводов группы, относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции проводов, соответственно). Емкость «эквивалентного провода» находится аналогично емкости одиночной изолированной жилы по формуле для определения емкости цилиндрического конденсатора. Для повышения точности полученной зависимости отношение диаметра изоляции к диаметру жилы «эквивалентного провода» $\frac{D_2}{d_1}$ было скорректировано эмпирической формулой.

Это позволило уменьшить погрешность моделирования, которая без корректировки увеличивалась с увеличением количества изолированных жил в группе. При исследовании группы с количеством изолированных жил от 2 до 40 максимальная погрешность полученной модели составила 10%.

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА С ФУНКЦИЕЙ КОНТРОЛЯ ЕМКОСТИ

3.1. Исследование влияющих факторов на точность измерения локальной емкости и нахождение методов отстройки

При проведении контроля комплексным методом высокое испытательное напряжение подается между поверхностью кабельного изделия и проводящей частью кабельного изделия, находящейся под контролируемой изоляцией или оболочкой (Рисунок 50).

В сильных электрических полях возникают интенсивные поверхностные разряды, которые обеспечивают электрический контакт между электродом и поверхностью объекта контроля. Приложенное переменное испытательное напряжение позволяет контролировать комплексное сопротивление изоляции.

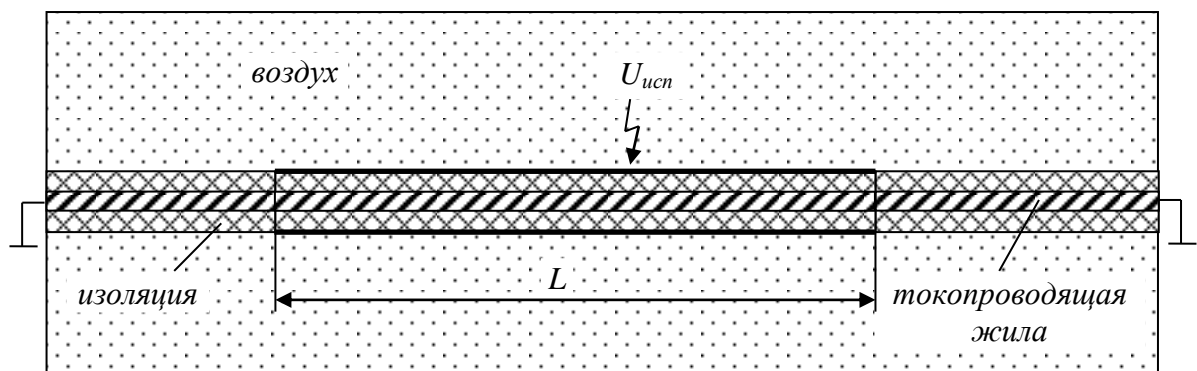


Рисунок 50 – Теоретическая модель проведения контроля

При практической реализации предложенного комплексного метода измеренная электрическая емкость контролируемого участка будет отличаться от теоретически рассчитанной из-за увеличения зоны контроля за счет поверхностных разрядов. Таким образом, зона контроля L (Рисунок 1) превышает по длине специальный электрод, к которому прикладывается испытательное напряжение.

При разработке комплексного метода контроля необходимо учитывать возможное влияние на результат контроля электрической емкости таких факторов, как параметры испытательного напряжения (амплитуда и частота), напряженность электрического поля, материал, температура и состояние изоляции кабельных изделий, режим работы технологической линии.

Влияние параметров испытательного напряжения

Амплитуда испытательного напряжения при электроискровом контроле значительно превышает рабочее напряжение кабельного изделия и нормирована российскими и зарубежными стандартами [1, 9, 38, 39] в соответствии с толщиной и материалом изоляции или оболочки.

При приложении высокого испытательного напряжения на поверхности диэлектрика формируются поверхностные разряды. Длина поверхностного разряда может быть оценена с помощью эмпирической формулы Теплера [57, 71]:

$$l_n = k \cdot C^2 \cdot U^5 \sqrt{\frac{dU}{dt}},$$

где k – коэффициент, определяемый опытным путем;

C – удельная поверхностная емкость.

Учитывать длину поверхностного разряда необходимо, т.к. от него зависит распределение высокого потенциала по поверхности кабельного изделия. При проведении экспериментальных исследований были получены зависимости удлинения зоны контроля (Δl) от амплитуды испытательного напряжения при разных значениях частоты (Рисунок 51).

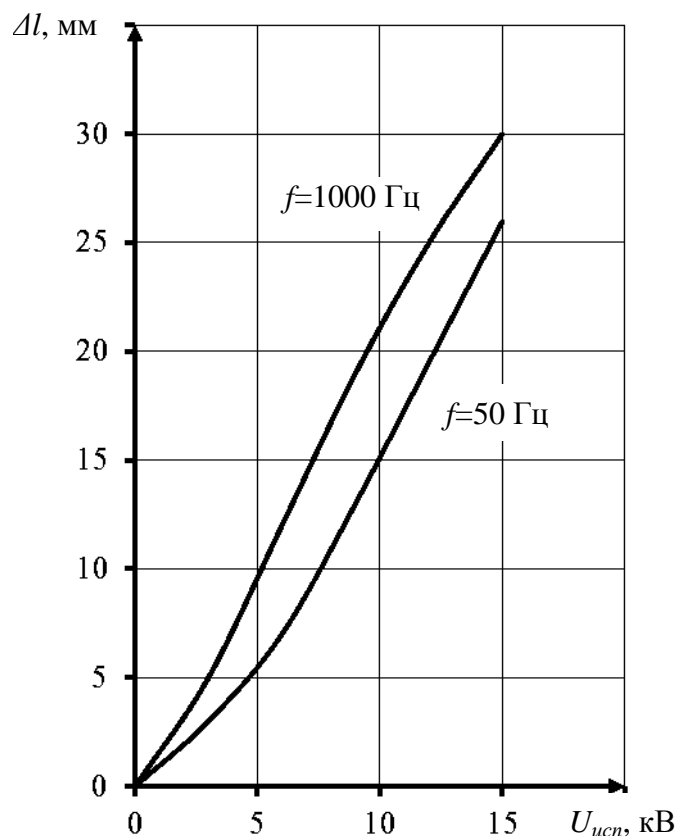


Рисунок 51 – Зависимость длины поверхностного разряда от значения испытательного напряжения при разных значениях частоты

Согласно полученным данным можно отметить, что величина Δl с увеличением частоты и амплитуды испытательного напряжения увеличивается. Для уменьшения влияния параметров напряжения необходимо учитывать этот фактор при разработке конструкции электрода.

Влияние состояния поверхности изоляции

Для оценки длины зоны контроля также необходимо рассмотреть влияние, которое оказывает наличие талька (для резиновой изоляции) и влаги на поверхности изоляции или оболочки кабельных изделий.

Для исследования влияния талька на результат контроля был проведен анализ соответствующей литературы, в которой авторы решали аналогичную задачу [57, 72]. Было выявлено, что тальк (при отсутствии влаги) не оказывает

значительного воздействия на процессы, возникающие при проведении контроля в области сильных электрических полей. Таким образом, влиянием данного фактора можно пренебречь.

Влажной изоляция может быть после охлаждения в воде охлаждающей ванны. Согласно нормативным документам [73], регламентирующим проведение электроискрового контроля, поверхность изоляции перед попаданием в электрод электроискрового дефектоскопа должна быть высушена с помощью специальных устройств для обдувки. Следовательно, влага не будет оказывать влияния на результаты контроля.

Влияние напряженности поля на электрическую емкость

Основными материалами, используемыми в качестве изоляции кабельного изделия, являются следующие полимерные материалы: поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилен (ПЭ), фторопласт, резиновые смеси. Данные материалы являются линейными диэлектриками [74-76], т.е. их диэлектрическая проницаемость постоянна и не зависит величины электрического поля, в котором они находятся, поэтому данный фактор не оказывает влияния на результаты контроля.

Влияние температуры и материала изоляции кабельных изделий на величину электрической емкости

Температура изоляции кабельных изделий на разных этапах технологического процесса не является постоянной величиной и оказывает влияние на диэлектрические параметры изоляционного материала, а именно на диэлектрическую проницаемость (соответственно, и на электрическую емкость).

На выходе из экструдера температура изоляции составляет около 100 °С, после прохождения охлаждающей ванны температура объекта контроля снижается до (40...50) °С [15]. Контроль качества изоляции проводится сразу после этапа наложения изоляции или оболочки. На остальных этапах

технологического процесса, где размещаются электроискровые дефектоскопы, нагрев изоляции кабельного изделия не предусмотрен. Таким образом, необходимо учитывать изменение температуры в диапазоне от 20 до 50 °С.

Для определения влияния температуры на величину емкости был проведен эксперимент (Рисунок 52), который заключался в нагреве образцов проводов с разными материалами изоляции (ПВХ-пластикат и резина). В ходе эксперимента исследуемый объект контроля частично погружался в водный раствора соли NaCl. Длина погруженной части провода составляла 200 мм. В качестве объектов контроля были использованы:

1. провод с изоляцией из ПВХ-пластиката (составляющий ШВВП 2 х 0,75 шнур гибкий с параллельными жилами в двойной ПВХ изоляции);
2. провод с изоляцией из резины (составляющий КГ-ХЛ 2 х 0,75 кабель силовой с медными жилами гибкий в хладостойкой изоляции).

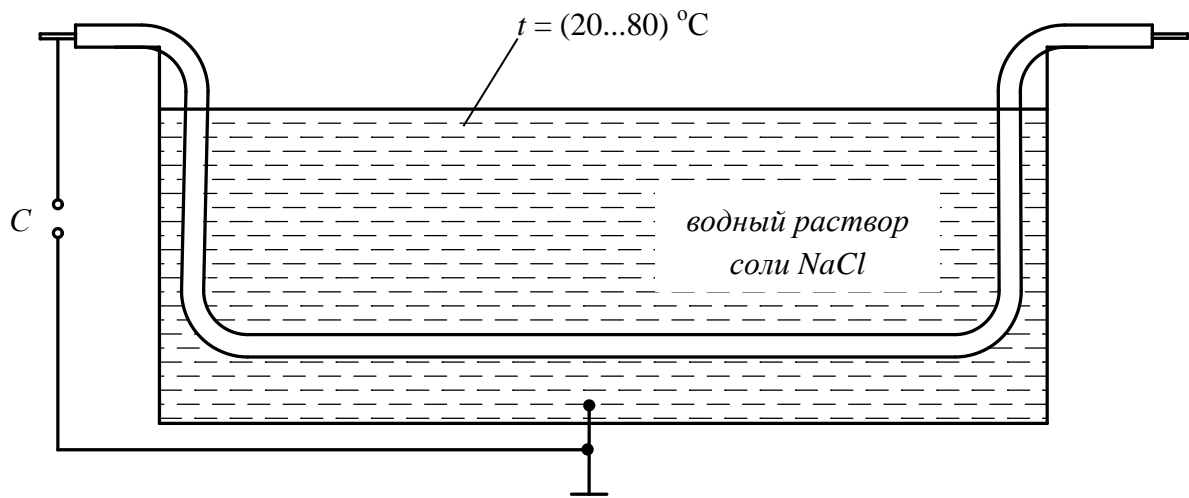


Рисунок 52 – Схема эксперимента

Одна из клемм измерителя емкости была подключена к проводящим частям исследуемого провода, вторая – к баку с водой, который был заземлен. Измерения проводились с помощью измерителя иммитанса АМ-3001, базовая погрешность которого не превышает 0,05 %. Уровень напряжения составлял 1 В, при проведении измерений использовалась параллельная схема замещения электрической емкости. Нагрев кабельного изделия производился через нагрев

раствора с помощью электронагревательного устройства ЭП-0,5/220. Для измерения температуры был использован технический жидкостный термометр ТТ-КП.

Так как водный раствор соли и изоляция провода имеют низкую теплопроводность [77, 78], то перед снятием показаний обеспечивалось неизменное значение температуры в течение времени, необходимого для завершения тепловых переходных процессов в проводе. О завершении переходных процессов свидетельствовала установка показаний измерителя иммитанса АМ-3001.

В результате проведенных экспериментов были получены зависимости погонной емкости от температуры провода (Рисунок 53).

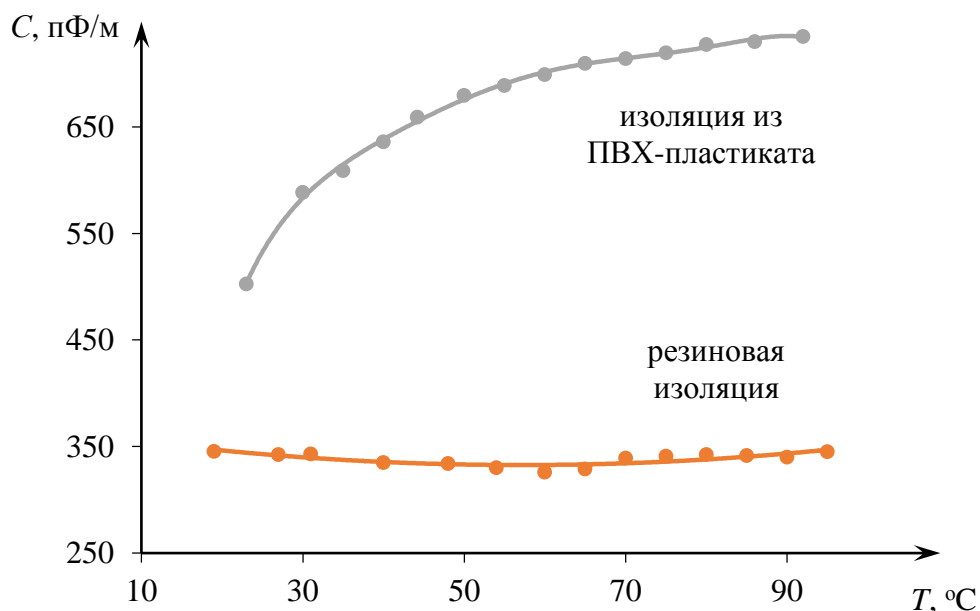


Рисунок 53 – Зависимость погонной емкости от температуры провода при резиновой изоляции и изоляции из ПВХ-пластиката

Согласно полученным зависимостям можно отметить, что изменение температуры не оказывает значимого влияния на погонную емкость провода с резиновой изоляцией, тогда как погонная емкость провода с изоляцией из ПВХ-пластиката в рассматриваемом диапазоне температур (20...50) °C изменяется более, чем на 35%.

Для выявления причин изменения емкости провода с изоляцией из ПВХ-пластиката были рассмотрены факторы, влияющие на значение емкости.

Согласно математической модели провода на основе цилиндрического конденсатора на значение емкости оказывают влияние геометрические размеры и величина относительной диэлектрической проницаемости изоляции. Тогда формулу электрической емкости для участка провода можно представить в виде:

$$C(T) = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r(T) \frac{l}{\ln(R(T)/r(T))}, \quad (30)$$

$$r(T) = r + \Delta r = r + \alpha_r \cdot \Delta T \cdot r, \quad (31)$$

$$R(T) = R + \Delta R = R + \alpha_R \cdot \Delta T \cdot R, \quad (32)$$

где ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость;

l – длина провода;

R – радиус изоляции;

r – радиус жилы;

α_R – коэффициент теплового линейного расширения изоляционного материала;

α_r – коэффициент теплового линейного расширения проводящего материала.

При анализе влияния изменения геометрических размеров провода на величину емкости было выявлено, что из-за малого значения коэффициента объемного температурного расширения изоляционного и проводящего материалов данным фактором можно пренебречь, т.к. при изменении температуры провода от 20 °С до 90 °С изменение погонной емкости составило менее 1 %. Таким образом, основной причиной изменения емкости провода с изоляцией из ПВХ-пластиката является зависимость относительной диэлектрической проницаемости изоляционного материала от температуры, что также подтверждают справочные данные [65-68].

Таким образом, влияние температуры на номинальное значение емкости провода необходимо учитывать. Отстроиться от влияния температуры на

результат контроля возможно, если учитывать изменение диэлектрической проницаемости материала. Т.е. при подготовке электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости к проведению контроля в память аппарата необходимо задавать номинальную емкость кабельного изделия, определённую с учетом температуры. Если дефектоскоп установлен после охлаждающей ванны, то температура объекта контроля будет близка к температуре воды в последней секции охлаждающей ванны. Если прибор установлен на других участках технологического процесса, то температуру объекта контроля можно принять равной температуре окружающей среды.

Влияние радиальных вибраций объекта контроля

Согласно технологии производства кабельных изделий кабель всегда находится в движении. Линейная скорость технологических линий определяется согласно необходимому режиму работы. При высоких скоростях технологических линий часто происходят радиальные вибрации объекта контроля, что также является причиной помех при определении емкости кабельного изделия. В нормативном документе РД16 14.640-88, регламентирующем испытания «на проход», максимально допустимым отклонением объекта контроля от центрального положения является 10 мм. Для отстройки от данного фактора возможно применение цифровой фильтрации полученного измерительного сигнала. Фильтрацию целесообразно осуществлять с помощью преобразования Фурье, которое позволит удалить из спектра полученного сигнала низкочастотную составляющую, обусловленную механическими вибрациями кабельного изделия.

3.2. Разработка требований к конструкции электрода

Для проведения достоверного контроля необходимо обеспечить однородное распределение потенциала по поверхности изоляции кабельного изделия. Для

приложения испытательного напряжения в электроискровых дефектоскопах используют цепочечные, щеточные и пружинные типы электродов [4, 36, 40, 41]. При подаче испытательного напряжения с помощью перечисленных электродов в зоне контроля образуется неоднородное электрическое поле. Проведя анализ картины электрического поля в начальный момент времени (показано на примере цепочечного электрода с диаметром шариков 3,2 мм (Рисунок 54) [79]), т.е. до возникновения ионизационных процессов, было выявлено, что нормальная составляющая преобладает над тангенциальной составляющей электрического поля. Преобладание нормальной составляющей электрического поля приводит к термической ионизации, которая облегчает процесс возникновения разряда по поверхности [59, 80].

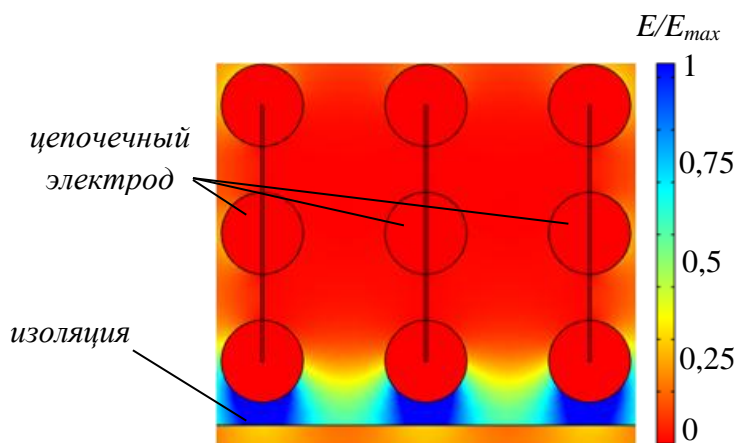


Рисунок 54 – Картина электрического поля между поверхностью изоляции и цепочечным электродом

Таким образом, выбирая конструктивные параметры и тип электрода, необходимо обеспечить однородное приложение напряжения за счет «растекания» потенциала по поверхности изоляции.

Наиболее распространенным типом электрода является цепочечный электрод, который обладает хорошими эксплуатационными характеристиками и прост в обслуживании.

В руководящих документах по эксплуатации цепочечных электродов указано, что для корректной работы данного типа электродов необходимо, чтобы

объект контроля располагался в центральной части электрода с обязательным касанием проводящей подложки (Рисунок 55).

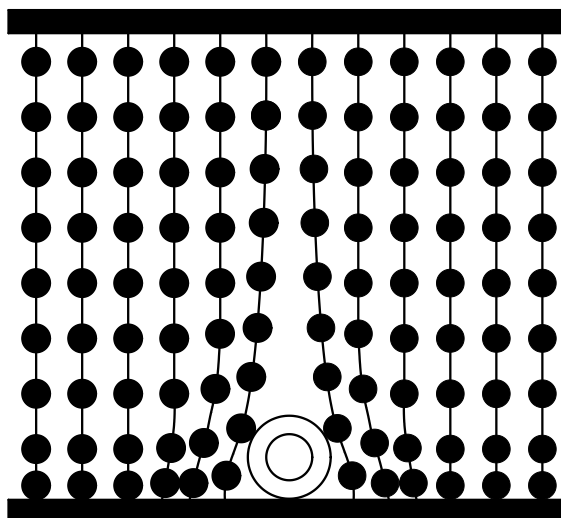


Рисунок 55 – Корректное расположение провода в цепочечном электроде

При таком расположении провода в цепочном электроде обеспечивается касание поверхности провода и цепочек не менее, чем в 3-х точках для каждого поперечного сечения ряда цепочек.

Для количественной оценки равномерности распределения потенциала по поверхности изоляции был введен параметр β , который может быть вычислен по формуле:

$$\beta = \frac{\varphi_{\min}}{\varphi_{\text{исп}}}, \quad (33)$$

где φ_{\min} – минимальный потенциал на поверхности изоляции в зоне контроля;

$\varphi_{\text{исп}}$ – высокий потенциал испытательного напряжения, значение которого выбрано согласно толщине контролируемой изоляции или оболочки [3].

При однородном распределении потенциала по поверхности $\beta = 1$.

Так как на распределение потенциала по поверхности изоляции оказывает значительное влияние расстояние между рядами цепочек, то следует также найти зависимость $\beta(D)$, где D – расстояние между цепочками в электроде. В программе конечно-элементного анализа была создана модель провода (Рисунок 56).

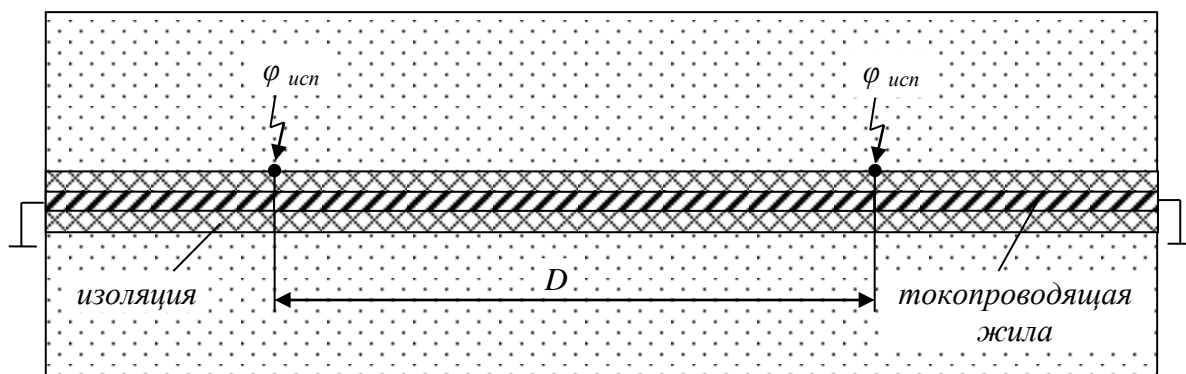


Рисунок 56 – Математическая модель провода

Материалом изоляции моделируемого провода является ПВХ-пластикат ($\epsilon_r = 3,5$), диаметр провода – 1,4 мм, диаметр изоляции – 1 мм. Пиковое значение испытательного напряжения было выбрано 4 кВ, частота 1 кГц. Варьируя такие параметры изоляции, как поверхностная проводимость и емкость, была задана зависимость растекания высокого испытательного напряжения от расстояния, аналогичная полученной экспериментально [81]. На рисунке 57 представлено распределение испытательного напряжения по поверхности изоляции в разработанной модели.

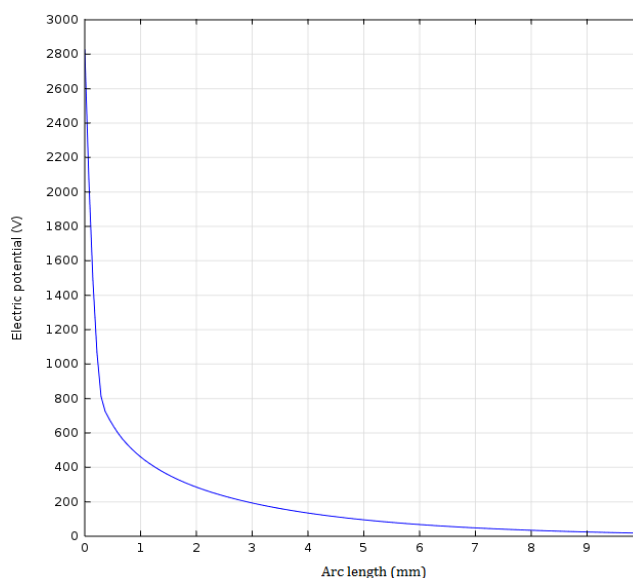


Рисунок 57 – Распределение напряжения по поверхности изоляции провода при моделировании

Распределение напряжения на поверхности изоляции было проанализировано для двух случаев: для поперечного сечения в точке

приложения напряжения и в точке, равноудаленной от точек приложения испытательного напряжения (рисунок 58, помечены пунктирной линией).

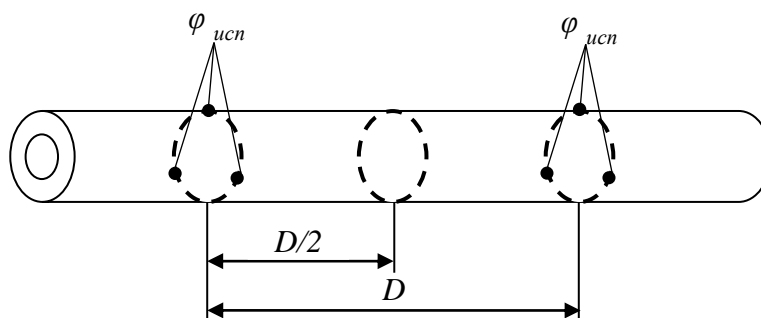


Рисунок 58 – Схема проведения моделирования для трех точек касания электрода и поверхности провода

Было исследовано распределение напряжения при изменении параметра D от 0,01 до 10 мм.

Некоторые из полученных зависимостей приведены ниже (Рисунок 59).

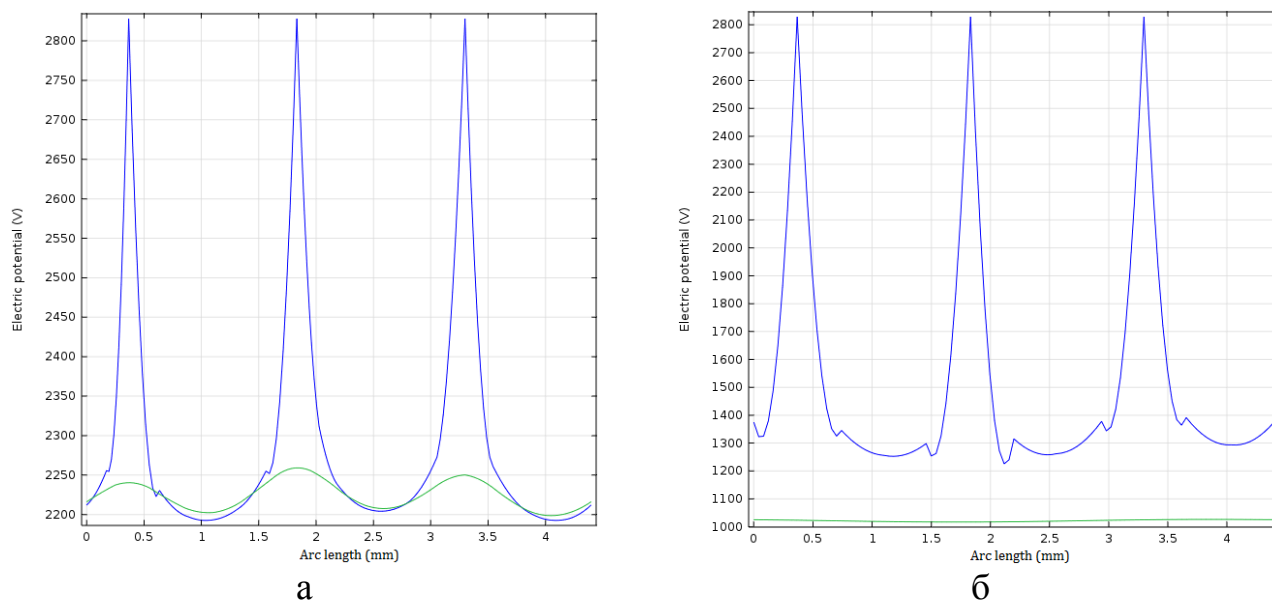


Рисунок 59 – Распределение напряжения на поверхности провода по замкнутой окружности в точке приложения испытательного напряжения (синий график) и в точке, равноудаленной от точек приложения испытательного напряжения (зеленый график) при $D = 1$ мм (а), $D = 5$ мм (б)

По рисунку 59 можно отметить, что при увеличении расстояния между цепочками уменьшается величина потенциала не только на окружности по

поверхности изоляции, равноудаленной от точек приложения напряжения (зеленый график), но и в плоскости приложения напряжения (синий график).

Для параметра β была получена зависимость (Рисунок 60).

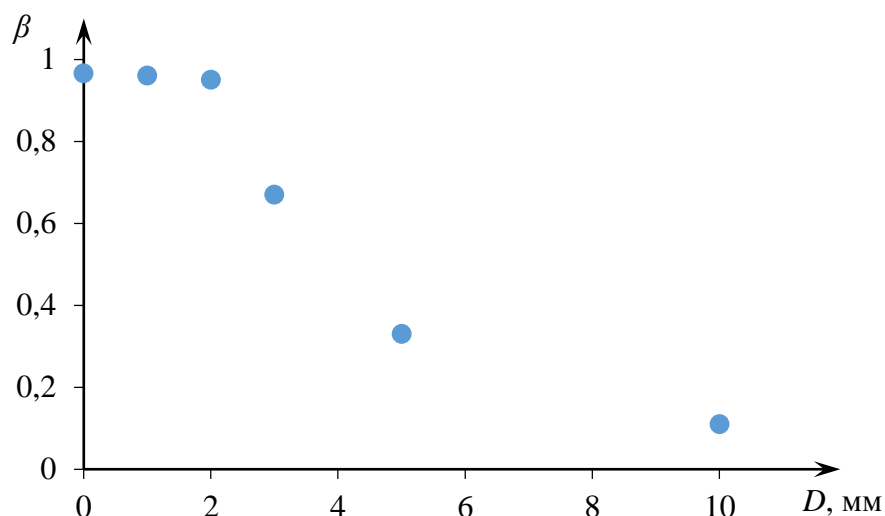


Рисунок 60 – Зависимость параметра β от расстояния между цепочками D для трех точек касания электрода и поверхности провода

Если цепочки одного ряда электрода имеют три точки касания с поверхностью провода, то максимальное значение параметра β составляет 0,97 (при $D = 0,01$ мм) (Рисунок 60). Из-за особенностей геометрии шариковых цепей минимальное расстояние между рядами цепочек D соответствует диаметру шарика. Шариковые цепи являются типовым изделием, и минимальный диаметр шарика составляет 1,8 мм [8]. Таким образом, исходя из полученной зависимости, при $D = 1,8$ мм параметр β составляет 0,95. Значение отклонения потенциала от максимального значения оказывает влияние на чувствительность электроискрового дефектоскопа к дефектам, т.к. при нахождении дефекта в той части провода, где потенциал поверхности изоляции значительно меньше максимального, изменение емкости от номинального значения будет минимальным.

Согласно нормативным документам для электроискрового контроля, напряжение, приложенное к поверхности кабельного изделия не должно изменяться более, чем на 5% [1]. Таким образом, необходимо определить

требования к электроду, при которых отклонение испытательного напряжения в контролируемой зоне составит не более 5%, т.е. параметр β должен быть равен не менее 0,95. Цепочечный электрод удовлетворяет заданным требованиям, но при увеличении внешнего диаметра контролируемого кабельного изделия однородность распределения потенциала по поверхности будет недостаточной.

В данном случае для увеличения значения параметра β необходимо применение электродов других типов, позволяющих обеспечить большее количество точек касаний для поперечного сечения провода и/или уменьшить расстояние между точками касания электрода и поверхности изоляции вдоль провода (параметр D). Этим требованиям удовлетворяют щеточные и пружинные электроды.

Ниже приведен пример зависимости $\beta(D)$ при большем количестве точек касания (Рисунок 61).

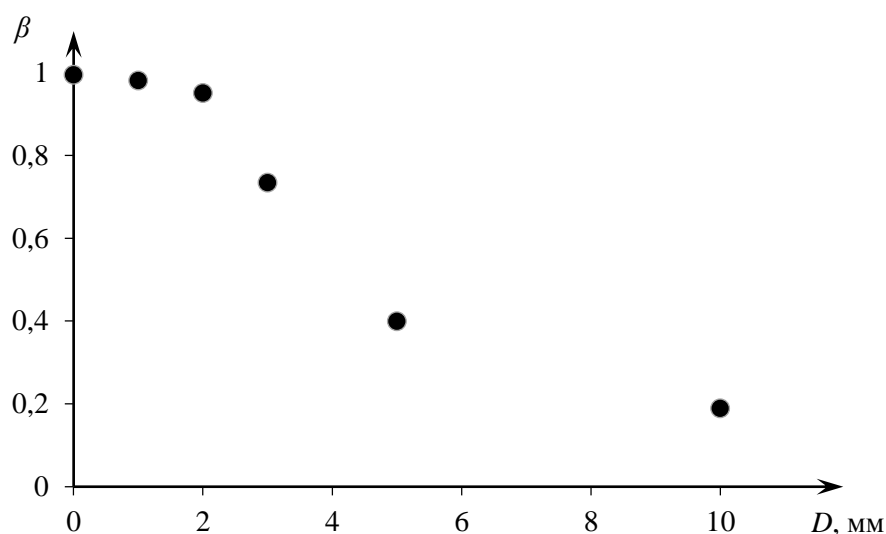


Рисунок 61 – Зависимость параметра β от расстояния D для четырех точек касания электрода и поверхности провода

Максимальное значение параметра β при четырех точках касания электрода и поверхности изоляции составило 0,98, при шести точках – 0,99. Из анализа графиков $\beta(D)$ можно сделать вывод, что при обеспечении между электродными рядами расстояния не более 2 мм достаточно обеспечить касание

проводящей части электрода и поверхности в четырех точках по поверхности поперечного сечения изоляции провода.

Зависимости, приведенные на рисунках 59-61, были получены для провода с внешним диаметром 1,4 мм и минимального испытательного напряжения, используемого при электроискровом контроле (пиковое значение 4 кВ [3]). При контроле кабельного изделия с большим внешним диаметром при аналогичном значении испытательного напряжения 4 точек приложения испытательного потенциала может быть недостаточно. В этом случае необходимо задаваться не только минимальным расстоянием D , но количеством точек касания, зависящих от диаметра провода:

$$N > \frac{2\pi R}{2 \text{ мм}}, \quad (34)$$

где N – количество точек касания по поверхности поперечного сечения провода;

R – внешний радиус контролируемого изделия, мм.

Таким образом, данные исследования доказывают, что тип электрода оказывает влияние на чувствительность комплексного метода контроля. Для контроля основной части кабельной продукции возможно использовать цепочечный электрод, т.к. он является более дешевым и простым в эксплуатации, позволяя обеспечивать хорошую достоверность контроля при корректном использовании. Для более ответственных кабелей и проводов предпочтительнее использовать щеточные или пружинные электроды, позволяющие проводить контроль с более высокой чувствительностью к дефектам.

3.3.Измерение локальной емкости в электроискровом дефектоскопе с функцией контроля емкости

Исходя из конструкции электроискровых дефектоскопов функцию измерения емкости возможно реализовать на основе метода амперметра-вольтметра и резонансного метода. Метод амперметра-вольтметра позволяет проводить контроль с большей точностью, но приводит к усложнению

конструкции и, соответственно, удорожанию дефектоскопа. Резонансный метод имеет больше влияющих факторов, но является более простым и может быть реализован только с помощью программных методов.

Измерение емкости в разработанном аппарате реализовано на основе резонансного метода. В выражение для частоты испытательного напряжения электроискрового дефектоскопа входят емкость испытываемого кабельного изделия и амплитуда испытательного напряжения. Аналитическое выражение, полученное на основе данной зависимости, не позволяет с достаточной точностью рассчитать значение емкости провода, так как зависит от параметров внутренних элементов отдельного прибора. Тем не менее, в рамках отдельного прибора зависимость емкости испытываемого кабельного изделия от амплитуды и частоты испытательного напряжения остается постоянной и практически не зависит от изменения в рабочем диапазоне внешних условий эксплуатации (температура, влажность и т.д.) прибора. Таким образом, при проектировке отдельного прибора необходимо получить зависимость частоты испытательного напряжения от емкости кабельного изделия и амплитуды испытательного напряжения, провести аппроксимацию данной зависимости с помощью полинома и внести полученный полином в память микропроцессора дефектоскопа для последующего вычисления емкости.

Далее приведен поэтапный порядок проведения калибровки конкретного прибора ЗАСИ-20.

1. Проводится измерение зависимости частоты испытательного напряжения f (Гц) от предварительно известной емкости образцовых конденсаторов и амплитуды испытательного напряжения. Полученные результаты заносятся в таблицу (Таблица 4).

Таблица 4 – Значения частоты испытательного напряжения при изменении емкости образцов провода и амплитуды испытательного напряжения

$U, \text{кВ}$								
$C, \text{пФ}$	2	3	6	9	12	15	18	22
25	1031	1015	1009	1015	1030	1040	1060	1090

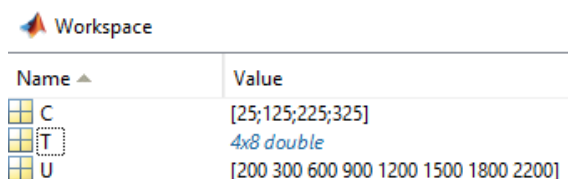
125	793	784	781	790	804	823	850	883
225	686	680	684	675	690	715	740	783
325	580	587	590	608	625	650	680	730

Так как в микропроцессоре частота испытательного напряжения находится с помощью подсчета количества тактовых импульсов таймера (фактически измеряется период), то значения частоты пересчитываются как F_{TIM}/f . В данном случае частота тактовых импульсов таймера составляет 16 МГц. Тогда таблица 4 будет пересчитана (Таблица 5).

Таблица 5 – Значения периода колебаний напряжения во вторичной обмотке трансформатора дефектоскопа

$U, \text{кВ}$ $C, \text{пФ}$	2	3	6	9	12	15	18	22
25	15518,91	15763,55	15857,28	15763,55	15533,98	15384,62	15094,34	14678,9
125	20176,54	20408,16	20486,56	20253,16	19900,5	19441,07	18823,53	18120,05
225	23323,62	23529,41	23391,81	23703,7	23188,41	22377,62	21621,62	20434,23
325	27586,21	27257,24	27118,64	26315,79	25600	24615,38	23529,41	21917,81

2. Полученная таблица (Рисунок 62) заносится в программу Matlab для получения полинома, аппроксимирующего экспериментальные данные.



Name	Value
C	[25;125;225;325]
T	4x8 double
U	[200 300 600 900 1200 1500 1800 2200]

Рисунок 62 – Внесение в программу MatLab данных из таблицы 5

Затем запускается приложение *cftool* [82], позволяющее аппроксимировать поверхности с помощью аналитических выражений. Полученная поверхность аппроксимируется с помощью полинома 2-й степени для обеих координат. По оси x откладываются значения емкости, по оси y – значения испытательного напряжения. Matlab находит коэффициенты для выражения:

$$f(x, y) = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y + p_{20} \cdot x^2 + p_{11} \cdot x \cdot y + p_{02} \cdot y^2, \quad (35)$$

описывающего заданную поверхность, а также вычисляет ошибку аппроксимации (Рисунок 63). Ошибка аппроксимации составляет не более 1%.

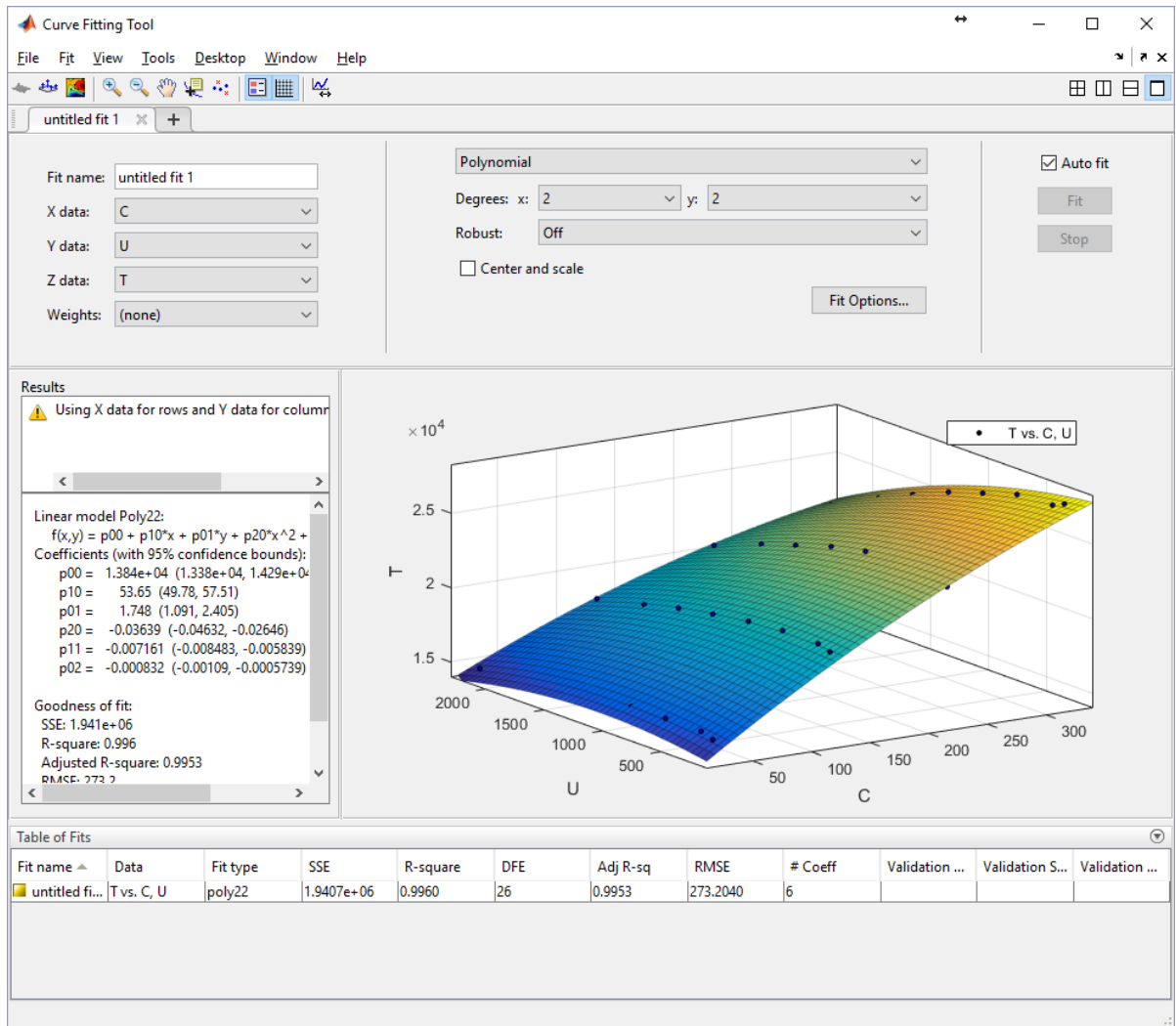


Рисунок 63 – Внешний вид окна приложения *cftool*

3. Далее из полученного уравнения 35 необходимо определить локальную емкость провода. В этом случае выражение 35 можно рассматривать как квадратное уравнение, решение которого может быть найдено по формуле (исходя из физического смысла рассчитываемой величины, выбирается только положительный корень уравнения):

$$C(T, U) = \frac{-b(U) + \sqrt{D(T, U)}}{2a}, \quad (36)$$

где

$$a = p20, \quad (37)$$

$$b(U) = p_{10} + p_{11} \cdot U, \quad (38)$$

$$D(T, U) = \sqrt{b(U)^2 - 4 \cdot a \cdot c(T, U)}, \quad (39)$$

$$c(T, U) = p_{00} - T + p_{01} \cdot U + p_{02} \cdot U^2, \quad (40)$$

где U – испытательное напряжение, измеряемое киловольтметром прибора;

T – период колебаний испытательного напряжения;

$C(T, U)$ – емкость контролируемого кабельного изделия

Полученная зависимость $C(T, U)$ в течение эксплуатации изменяется незначительно, поэтому для пользовательской корректировки достаточно внести поправки в 4-х угловых точках аппроксимирующего полинома и провести билинейную интерполяцию (Рисунок 64) [83, 84].

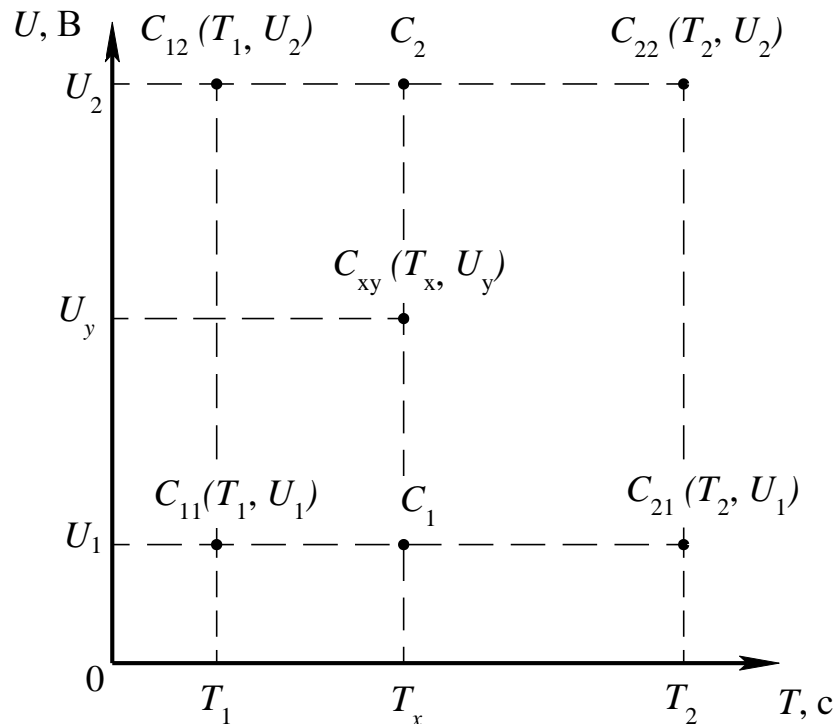


Рисунок 64 – Методика проведения билинейной интерполяции

В данном случае $C_{11}(T_1, U_1)$, $C_{12}(T_1, U_2)$, $C_{21}(T_2, U_1)$, $C_{22}(T_2, U_2)$ – значения емкости в заданных точках; T_1 и T_2 – периоды колебаний испытательного напряжения при минимальной и максимальной эталонных емкостях; U_1 и U_2 –

минимальное и максимальное испытательные напряжения; T_x , U_y – текущие период колебаний и амплитуда испытательного напряжения соответственно. C_1 и C_2 – вспомогательные точки интерполяции. $C_{xy}(T_x, U_y)$ – искомое значение емкости.

Для ввода значений емкости в память дефектоскопа необходимо провести настройку аппарата. Чтобы войти в сервисное меню аппарата необходимо нажать и удерживать кнопку СБРОС при отключенном высоком напряжении (кнопка ВКЛ/ВЫКЛ не светится). Через 3 секунды аппарат войдет в сервисное меню настроек. Навигация по пунктам сервисного меню осуществляется кратковременным нажатием клавиши СБРОС. Пункты меню следуют последовательно один за другим. При достижении последнего пункта очередное нажатие клавиши СБРОС выводит аппарат в обычный режим работы. Изменение настроек параметров, доступных в пунктах меню осуществляется кнопками ↓ - в сторону уменьшения и ↑ - в сторону увеличения. В таблице 6 приведен список доступных настроек сервисного меню аппарата и их описание.

Таблица 6 – Параметры сервисного меню

№	Отображение на индикаторе	Описание параметра	Диапазон изменения	Значение по умолчанию
1	Ad-30	Сетевой адрес аппарата при обмене данными с внешними устройствами по последовательному интерфейсу RS-485	От 0 до 32	1
2	U 96	Скорость обмена данными по последовательному интерфейсу RS-485	96 – 9600 19 – 19200 38 – 38400 76 – 76800 (бит/с)	96
3	[of	Вход в режим корректировки погрешностей генератора	On – войти Off – пропустить	Off
4	[[of	Вход в режим корректировки погрешностей измерения емкости	On – войти Off – пропустить	Off

5	On Off	Вход в режим корректировки настроек детектирования емкостных дефектов	On – войти Off – пропустить	Off
6	S- Off	Сохранение изменённых параметров	On – принять Off – отклонить	Off

Пользователь может самостоятельно проводить настройку генератора дефектоскопа. Навигация в режиме настройки генератора осуществляется аналогично навигации в основном меню. После входа в режим корректировки погрешностей дефектоскоп предложит добавлять корректировочные точки в соответствии с таблицей 7.

Таблица 7 – Режим корректировки погрешностей

№	Отображение на индикаторе	Описание параметра	Диапазон изменения	Значение по умолчанию
1	Add 1 или Out 1	Добавление первой точки корректировки (нижний предел измерений)	Out – обнуление значения предыдущей корректировки Add – добавление точки	Add 1
2	Add 2 или Out 2	Добавление второй точки корректировки. (верхний предел измерений)	Out – отказ от добавления точки Add – добавление точки	Add 2
3	REG	Выход аппарата в процентах	От 0 до 100	0



Для добавления точки корректировки, соответствующей измеряемому напряжению, необходимо кнопками ↓ и ↑ выбрать значение Add – «добавить точку» (таблица 7) и клавишей СБРОС подтвердить свой выбор, после чего на индикаторе отобразится значение REG. Пользователь кнопками ↓ и ↑ устанавливает значение выхода силовой части аппарата в процентах. Нажатие клавиши СБРОС фиксирует установленное значение в памяти аппарата и на экране отображается мигающее значение напряжения, которое пользователь устанавливает кнопками ↓ и ↑ в соответствии с показаниями эталонного

киловольтметра. После установки значения напряжения очередное нажатие клавиши СБРОС фиксирует значение точки корректировки в памяти прибора и переводит прибор в режим настройки для следующего значения, где следует повторить все действия, описанные выше. В процессе корректировки погрешностей значения напряжения должны следовать в порядке возрастания. Для отказа от дальнейшей настройки следует выбрать значение Out – «отказ от добавления точки». После подтверждения выбора клавишей СБРОС аппарат перейдет в основное сервисное меню. Для того чтобы результаты настройки вступили в силу необходимо в сервисном меню сохранить изменения настроек прибора в соответствии с таблицей 6.

Для самостоятельной настройки погрешностей измерения емкости предусмотрена процедура калибровки. Навигация в режиме настройки погрешностей измерения емкости аналогична описанной выше. После входа в режим калибровки дефектоскоп предложит добавлять корректировочные точки в соответствии с таблицей 8.

Таблица 8 – Режим корректировки погрешностей



№	Отображение на индикаторе	Описание параметра	Диапазон изменения	Значение по умолчанию
1	Add 1 или Out 1	Добавление первой точки корректировки (нижний предел измерений, минимальная емкость)	Out – обнуление значение предыдущей настройки Add– добавление точки	Add 1
2	Add 2 или Out 2	Добавление второй точки корректировки. (верхний предел измерений, минимальная емкость)	Out – отказ от добавления точки Add– добавление точки	Add 2
3	Add 3 или Out 3	Добавление третьей точки корректировки (нижний предел измерений, максимальная емкость)	Out – обнуление значение предыдущей настройки Add– добавление точки	Add 3

4	 или 	Добавление четвертой точки корректировки (верхний предел измерений, максимальная емкость)	Out – отказ от добавления точки Add– добавление точки	Add 4
---	---	---	--	-------

Для того, чтобы добавить точку корректировки, соответствующую измеряемой емкости, необходимо кнопками ↓ и ↑ выбрать значение Add – «добавить точку» (Таблица 8) и клавишей СБРОС подтвердить свой выбор, после чего на индикаторе отобразится мигающее измеренное значение емкости. Очередное нажатие клавиши СБРОС фиксирует это значение в памяти измерителя и на экране отображается реальное значение емкости, по которой в данный момент происходит корректировка. Это значение необходимо менять клавишами ↓ и ↑ в меньшую или большую сторону пока значение на индикаторе не совпадёт с реальной емкостью. После установки реального значения емкости очередное нажатие клавиши СБРОС фиксирует значение точки корректировки в памяти прибора и переводит прибор в режим корректировки для следующего значения, где следует повторить все действия, описанные выше. В процессе корректировки погрешностей калибры должны следовать друг за другом в порядке возрастания емкости. После осуществления корректировки по последнему калибру (пункт 4 таблицы) и подтверждения выбора клавишей СБРОС дефектоскоп перейдёт в основное сервисное меню. При выборе значения Out для количества точек меньше 4-х, сохранение поправок не осуществляется. Для того чтобы результаты настройки вступили в силу необходимо в сервисном меню сохранить изменения настроек прибора в соответствии с таблицей 6.

Для самостоятельной настройки максимального допустимого отклонения емкости бездефектного кабельного изделия предусмотрена процедура настройки. Навигация в режиме корректировки настроек детектирования емкостных дефектов осуществляется аналогично тому, как описано выше. После входа в данный режим дефектоскоп предложит изменить настройки в соответствии с таблицей 9.

Таблица 9 – Режим корректировки настроек детектирования емкостных дефектов

№	Отображение на индикаторе	Описание параметра	Диапазон изменения	Значение по умолчанию
1		Минимальная амплитуда изменения емкости при детектировании дефекта, пФ	От 0,1 до 99	50
2		Максимальное время длительности фронта тренда при изменении емкости, мс	От 1 до 99	10

Изменение настроек параметров, доступных в пунктах меню осуществляется кнопками ↓ - в сторону уменьшения и ↑ - в сторону увеличения. Навигация по пунктам сервисного меню осуществляется кратковременным нажатием клавиши СБРОС. Для того чтобы результаты калибровки вступили в силу необходимо в сервисном меню сохранить изменения настроек прибора в соответствии с таблицей 6.

Для наглядного отображения результатов измерения емкости, а также для ведения логов была разработана утилита *Capacity PC control* (Рисунки 65, 66), позволяющая:

- отображать на семисегментном индикаторе и графике текущую емкость кабеля;
- задавать максимальную, номинальную и минимальную емкости;
- отображать мгновенное изменение текущей емкости;
- фиксировать выход текущей емкости за минимальную и максимальную границы;
- вести подсчет дефектов кабеля на основе изменения его емкости;
- сохранять логи всех переменных;
- настраивать параметры фиксации дефектов.

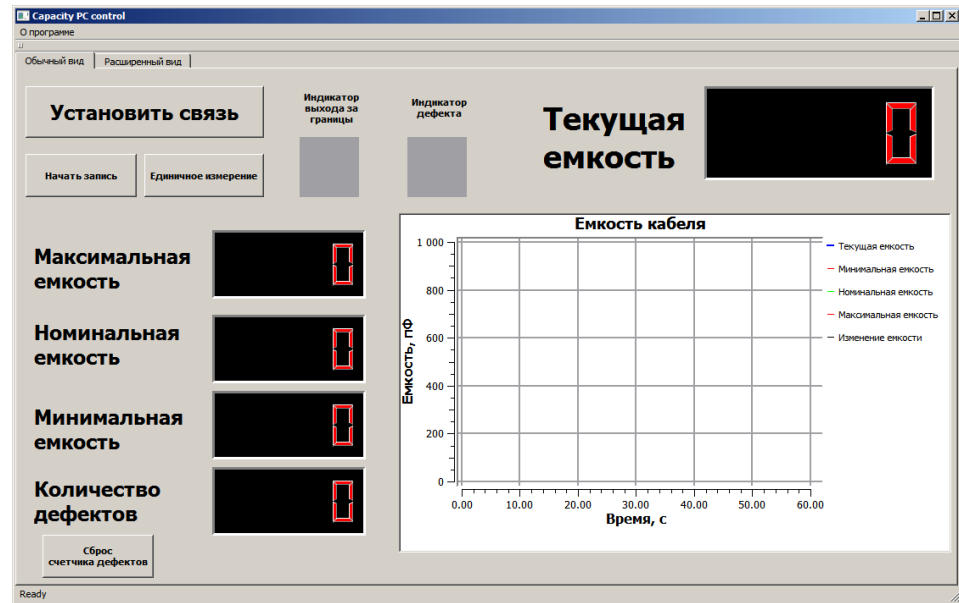


Рисунок 65 – Основное окно программы

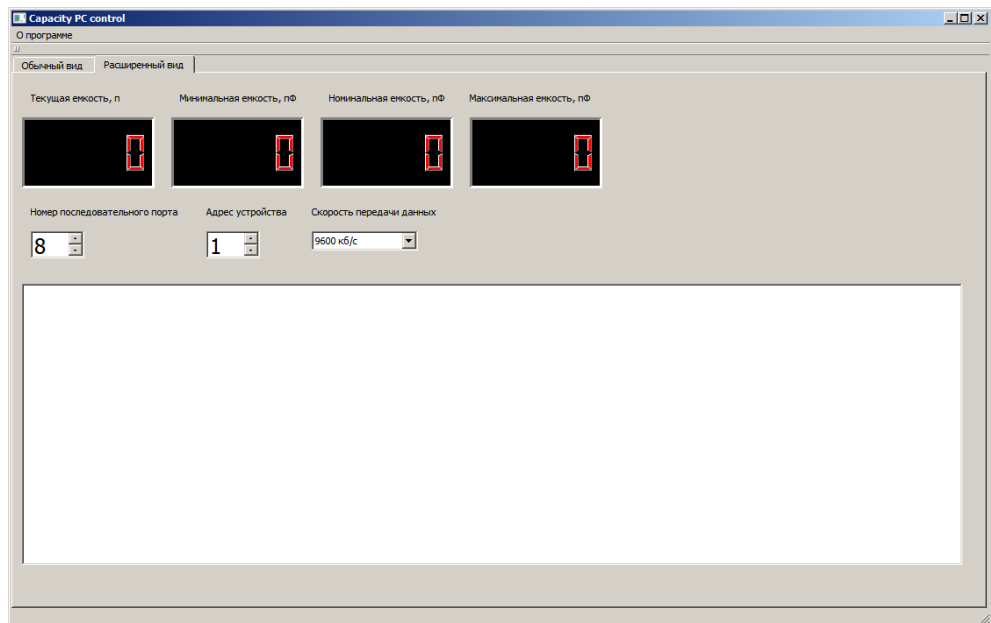


Рисунок 66 – Окно расширенного вида программы

Начиная работу с разработанной утилитой, пользователь вводит номер последовательного порта, к которому подключен прибор, выставляет адрес устройства и скорость связи с ним. Затем в основном окне программы нажимается кнопка «Установить связь». После этого программа начинает получать данные с прибора. В случае корректности ввода всех параметров они будут запомнены, и не потребуют нового ввода при следующем открытии программы. Логи ведутся с

часовым интервалом, то есть каждый час создается новый файл, имя которого включается в себя дату и время создания.

3.4. Техническая реализация электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости

Электроискровой дефектоскоп «ЗАСИ-20» предназначен для контроля качества изоляции кабельных изделий. В основу работы дефектоскопа положен электроискровой метод неразрушающего контроля. Контроль качества 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 электродного узла. Уровень испытательного напряжения выбирается таким, что качественная изоляция не повреждается и не изменяет своих характеристик. На участках изоляции с пониженной электрической прочностью (сквозные отверстия, посторонние включения, существенное уменьшение толщины 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 контроля по каналу цифровой связи. Электрический сигнал «Дефект», формируемый испытателем, включает звуковую и световую сигнализацию.

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 контроль 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 контроль можно только после повторного нажатия кнопки включения испытательного напряжения. Такой режим работы облегчает работу оператора участка контрольной перемотки и повышает электробезопасность.

В дефектоскопе реализована функция контроля емкости. Измерение емкости реализуется резонансным методом. Электрод выполнен в виде высокопрочных шариковых цепей из нержавеющей стали. Оптимальные требования к конструкции электрода подобраны с использованием результатов моделирования (Раздел 3.2). Измерение активного сопротивления контролируемой изоляции реализовано методом амперметра-вольтметра. Такое разделение методов измерения обусловлено тем, что для измерения электрической емкости в электроискровом дефектоскопе не требуется дополнительных аппаратных реализаций. Определение емкости происходит программным путем. Программа разработана единожды при проектировании прибора и в дальнейшем записывается в память микропроцессора. Функция измерения емкости актуальна при электроискровом контроле практически всех кабельных изделий. Измерение эквивалентного активного сопротивления изоляции технически возможно только для некоторых изоляционных материалов. Для материалов с малыми диэлектрическими потерями, например, полиэтилен,

фторопласт измерение активного сопротивления в электроискровых дефектоскопах практически невозможно. Это объясняется тем, что при реализации требуемых режимов контроля емкостная составляющая тока через изоляцию превышает активный ток на несколько порядков (3...5).

Структурная схема электроискрового дефектоскопа «ЗАСИ-20» с функцией контроля емкости приведена на рисунке 67. Дефектоскоп состоит из генератора переменного напряжения 1, повышающего высоковольтного трансформатора 2, электрода 3, блока измерения испытательного напряжения 4, блока контроля емкости и регистрации дефектов 5, блока управления 6, блока индикации 7 и блока питания 8.



1 – генератор гармонического напряжения; 2 – повышающий высоковольтный трансформатора, 3 – электрод; 4 – блок измерения испытательного напряжения; 5 – блок контроля емкости и регистрации дефектов; 6 – блок управления; 7 – блок индикации; 8 – блок питания

Рисунок 67 – Структурная схема электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости «ЗАСИ-20»

Напряжение питания поступает на генератор гармонического напряжения 1, работающий в режиме самовозбуждения, с регулируемой амплитудой и переменной угловой частотой. Далее сигнал поступает на повышающий трансформатор 2, на выходе которого формируется испытательное напряжение заданной амплитуды. Посредством цепочного электрода 3 испытательное

напряжение прикладывается к контролируемому кабельному изделию, жила (ы) которого заземлена. Блок 4 регистрирует амплитуду и частоту напряжения во вторичной обмотке, которое является испытательным. Блок 5 контролирует величину тока во вторичной цепи трансформатора и величину емкости. При возникновении резкого скачка тока или отклонения значения емкости блок 5 формирует сигнал на блок управления 6 о наличии дефекта в контролируемом образце. Блок управления 6 определяет дефекты изоляции по пробое изоляции или оболочки и отклонению значения емкости от номинального значения и передает полученную информацию на блок индикации 7. При регистрации дефекта блок управления 6 формирует сигнал на внешнюю звуковую и световую сигнализацию. Общее количество дефектов отображается на блоке индикации 7. Для питания устройства предусмотрен блок питания 8 (связи с остальными блоками на рисунке 67 не показаны).

Вычисление емкости происходит следующим образом. Резонансная частота, на которой работает генератор напряжения, является функцией параметров внутренних элементов генератора (фильтра нижних частот), высоковольтного трансформатора (индуктивностей намагничивания и рассеяния, межвитковой и межобмоточной емкостей и потерь на перемагничивание) и емкости контролируемого кабельного изделия. В этом случае существенное влияние на резонансную частоту оказывает индукция в магнитопроводе высоковольтного трансформатора. Таким образом, частоту испытательного напряжения можно представить в виде функции двух переменных: емкости изоляции кабельного изделия и амплитуды испытательного напряжения. Практические попытки представить данную зависимость аналитически приводили к недопустимо высоким погрешностям измерения. По этой причине функция была построена эмпирически по результатам экспериментов и восстановлена с помощью математических пакетов. Разработанная методика приведена далее.

Первичный сигнал снимается с измерительной обмотки высоковольтного трансформатора. С помощью резистивной цепи производится смещение биполярного сигнала в униполярный диапазон и масштабирование. Далее

преобразованный сигнал поступает на вход АЦП, встроенный в микропроцессор. Данное решение является экономически наиболее эффективным, так как не требует никаких дополнительных аппаратных затрат и настроек при изготовлении прибора.

В настоящее время электроискровой дефектоскоп с функцией контроля емкости «ЗАСИ-20» готовится к производству.

На рисунке 68 представлена передняя панель электронного блока электроискрового дефектоскопа.

Включение и выключение электроискрового дефектоскопа выполняется тумблером «СЕТЬ» 1. Для обеспечения электробезопасности подача и снятие высокого испытательного напряжения с электрода осуществляется дополнительной кнопкой «ВКЛ/ВЫКЛ» 2.

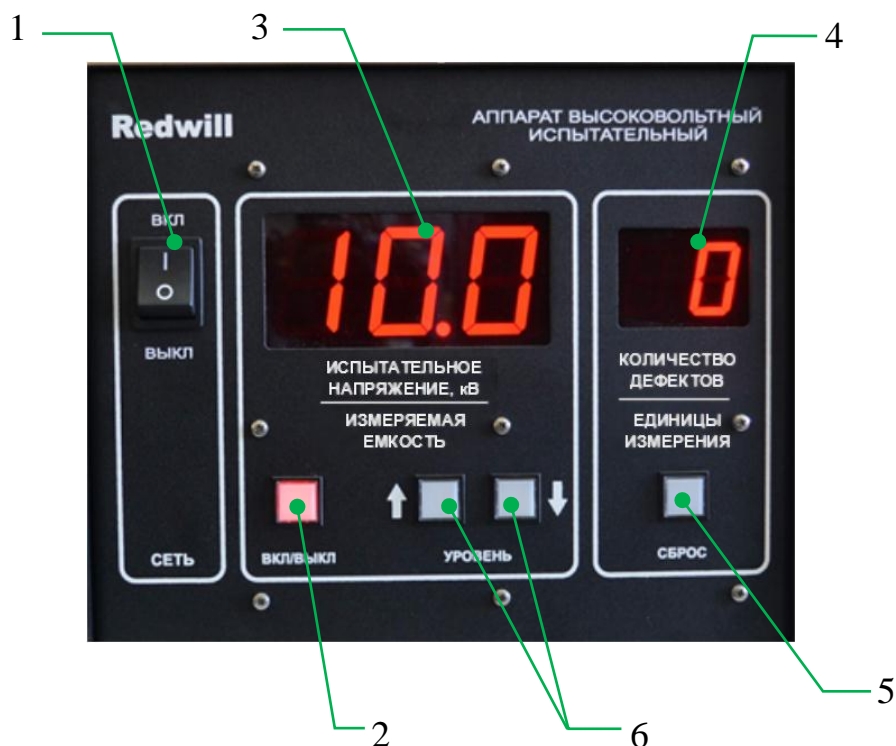


Рисунок 68 – Лицевая панель электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости «ЗАСИ-20»

Для отображения информации на лицевой панели расположены светодиодные семисегментные индикаторы. На данном приборе запрограммировано два режима отображения информации. В основном режиме трехразрядный индикатор 3 показывает величину заданного испытательного

напряжения в кВ, индикатор 4 – количество зарегистрированных дефектов изоляции. В дополнительном режиме индикатор 3 отображает измеряемую емкость кабельного изделия, находящегося в электродном узле, длина активной части которого составляет 70 мм. Двухразрядный индикатор 4 отображает единицы измерения емкости. Дополнительный режим включается при удержании в нажатом состоянии кнопки «СБРОС» 5. Повторное нажатие кнопки 5 необходимо для сброса показаний счетчика дефектов на индикаторе 4. Кнопки «УРОВЕНЬ» 6 необходимы для задания уровня напряжения, выбираемого согласно действующей нормативной документации [3].

Электроискровой дефектоскоп с функцией контроля емкости применяется в комплексе с электродным узлом «ЭУ-30/70» (Рисунок 69).



Рисунок 69 – Внешний вид электродного узла «ЭУ-30/70»

3.5. Выводы по главе 3

1. Было выявлено, что на контроль электрической емкости оказывают влияние параметры испытательного напряжения (амплитуда и частота), температура и материал изоляции объекта контроля, радиальные вибраций объекта контроля при прохождении через электрод. Для отстройки от данных параметров достаточно использовать программные методы.

2. При приложении испытательного напряжения поле в зоне контроля становится резко неоднородным. Преобладание нормальной составляющей электрического поля приводит к термической ионизации, которая облегчает процесс возникновения поверхностного разряда, позволяющего обеспечить высокий потенциал не только в точке касания электрода и поверхности кабельного изделия, но и в прилегающей поверхности объекта контроля.

По результатам исследований было выявлено, что для обеспечения однородного распределения потенциала по поверхности изоляции кабельного изделия необходимо задаться достаточным количеством точек касания электрода и поверхности изоляции по поперечному сечению кабельного изделия, а также максимальным расстоянием между электродными рядами.

3. Описаны алгоритмы проведения «рабочих» настроек генератора и блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа ЗАСИ-20 с функцией контроля емкости.

4. Приведена структурная схема и принцип действия электроискрового дефектоскопа ЗАСИ-20 с функцией контроля емкости, описаны органы управления прибором, располагаемые на лицевой панели.

ГЛАВА 4. АТТЕСТАЦИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА С ФУНКЦИЕЙ КОНТРОЛЯ ЕМКОСТИ

Согласно нормативному документу, регламентирующему технические требования к оборудованию для контроля электроискровым методом [1], для корректного функционирования электроискрового дефектоскопа необходимо проведение периодической аттестации. Процедура аттестации стандартного электроискрового дефектоскопа включает в себя проверку и настройку (при необходимости) чувствительности электроискрового дефектоскопа и проверку работы генератора [85]. В случае электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости к стандартным пунктам процедуры аттестации необходимо добавить проверку блока контроля емкости.

4.1. Аттестация чувствительности и блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа

Чувствительность электроискровых дефектоскопов должна быть настроена таким образом, чтобы обеспечить срабатывание детектора дефектов при имитации пробоя между высоковольтным электродом и землей.

Для аттестации чувствительности между высоковольтным электродом дефектоскопа и землей подключают устройство для имитации дефектов, типовая конструкция которого приведена в патенте [86]. Устройство имитации дефектов представляет собой иглу, положение которой зафиксировано, и металлическую пластину, расположенную на диэлектрическом диске. Диэлектрический диск вращается для изменения расстояния от проводящей пластины до иглы. Испытательное напряжение от дефектоскопа прикладывается между иглой и металлической пластиной. В точке, где расстояние между иглой и проводящей пластиной минимальное (искровой зазор), происходит искровой разряд, регистрируемый автоматикой дефектоскопа. Геометрические параметры иглы и искрового зазора регламентированы нормативным документом [1].

Основным недостатком данного устройства является требование обеспечения размеров искрового зазора при вращении диска и необходимость использования иглы, которая не является типовым элементом.

Для устранения вышеперечисленных недостатков было предложено универсальное устройство имитации дефектов, описание которого будет приведено ниже.

При корректной работе блока контроля емкости отклонения от номинального значения емкости, превышающие допустимые, должны приводить к регистрации дефектов автоматикой прибора. Возможность имитации дефектов по отклонению емкости от номинального значения была реализована с помощью устройства имитации дефектов.

Устройство для имитации дефектов

Данное устройство позволяет проводить аттестацию чувствительности электроискрового дефектоскопа и блока контроля емкости и имеет следующую структурную схему (Рисунок 70), где ЗГ – задающий генератор, УМ – усилитель мощности, Р – высоковольтное реле, БИД – блок имитации дефектов.

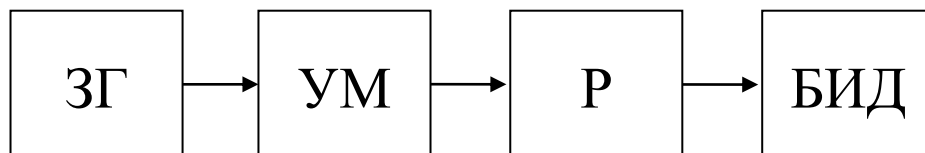


Рисунок 70 – Структурная схема устройства для имитации дефектов

Блок ЗГ задает ряд управляющих импульсов, длительность и частота которых задается оператором. Далее сигнал усиливается с помощью усилителя мощности и подается на управляющий вход реле. За счет этого происходит замыкание и размыкание реле, которое управляет БИД. Схема БИД, в зависимости от режима работы устройства для имитации дефектов, представлена на рисунке 71.

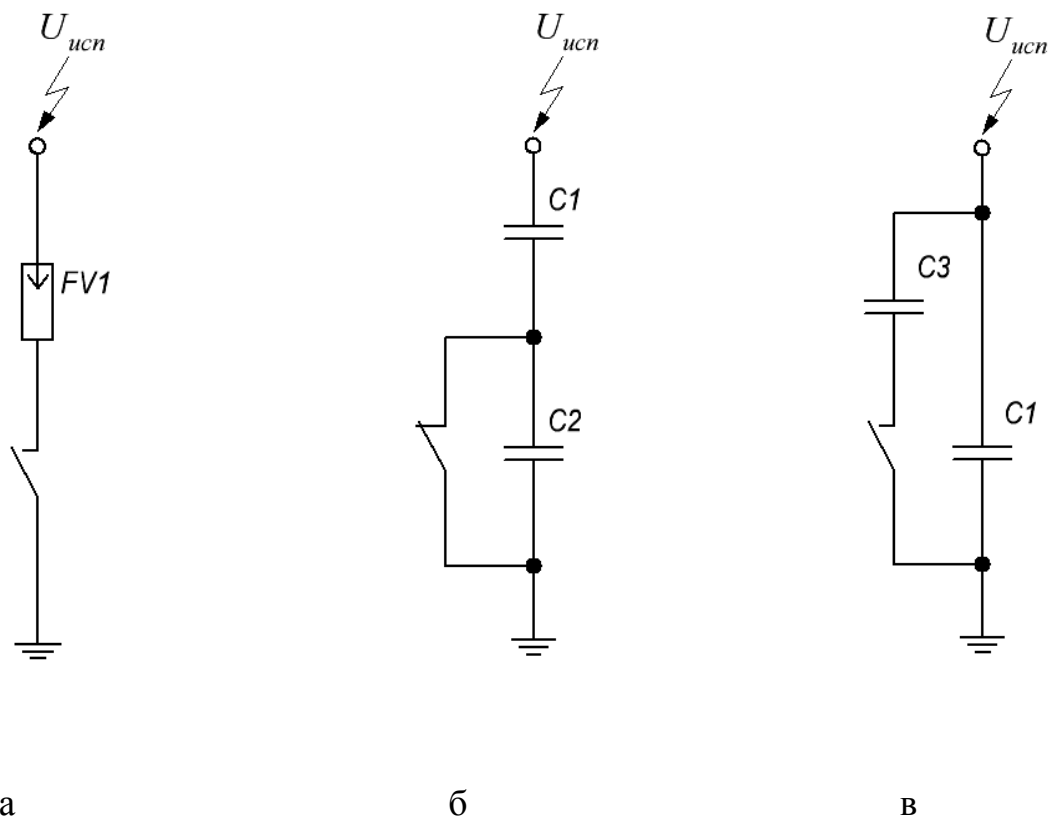


Рисунок 71 – Принципиальная схема блока имитации дефектов с помощью искрового пробоя (а), уменьшения суммарной емкости (б) и увеличения суммарной емкости (в)

Ключом на рисунке 71 является высоковольтное реле, которое позволяет коммутировать цепь блока имитации дефектов, к которой подключено высокое испытательное напряжения от электрода аттестуемого дефектоскопа.

Устройство для имитации дефектов имеет 3 режима работы: режим имитации искрового пробоя (для аттестации чувствительности электроискрового дефектоскопа), режим имитации увеличения толщины изоляции и режим имитации уменьшения толщины изоляции (для аттестации блока контроля емкости).

Перед проведением аттестации необходимо задать параметры выходного сигнала задающего генератора. Задающий генератор формирует прямоугольные импульсы, длительность которых зависит от типа испытательного напряжения аттестуемого электроискрового дефектоскопа. Для электроискровых дефектоскопов переменного или высокочастотного напряжения длительность

импульса составляет не менее 0,025 с, постоянного напряжения – не менее 0,0005 с. Частота импульсов устанавливается не менее 1 Гц. После установки параметров задающего генератора пользователь включает электроискровой дефектоскоп и настраивает величину испытательного напряжения. Амплитуда испытательного напряжения, прикладываемого к блоку имитации дефектов, для электроискровых дефектоскопов переменного и высокочастотного напряжения устанавливается 3кВ, для электроискровых дефектоскопов постоянного напряжения - 5 кВ, или минимальное испытательное напряжение, если оно больше приведенных значений [1].

В режиме имитации искрового пробоя при замыкании ключа, реализованного с помощью высоковольтного реле, испытательное напряжение оказывается приложенным к выходам газового разрядника FV₁ (Рисунок 71, а). В этот момент в газовом разряднике происходит серия дуговых пробоев, которые должны быть зарегистрированы автоматикой аттестуемого электроискрового дефектоскопа. При размыкании ключа пробои в газовом разряднике прекращаются.

Для аттестации электроискрового дефектоскопа необходимо подать не менее 20 прямоугольных импульсов на входы высоковольтного реле З (ВР) и, соответственно, дефектоскоп должен зарегистрировать аналогичное число пробоев, что свидетельствует о его пригодности к эксплуатации. При несоответствии числа импульсов, которые формирует задающий генератор, и числа зарегистрированных дефектов производится подстройка чувствительности дефектоскопа до получения удовлетворительных результатов аттестации.

В режиме имитации увеличения толщины изоляции при замкнутом ключе электрическая емкость цепи равна емкости бездефектного кабельного изделия, которая имитируется конденсатором C₁. Емкость конденсатора C₁ рассчитывается по формуле:

$$C_1 = C_n \cdot l, \quad (41)$$

где C_n – погонная емкость кабельного изделия, контролируемого на линии с помощью аттестуемого дефектоскопа;

l – длина высоковольтного электрода аттестуемого дефектоскопа.

При размыкании ключа суммарная емкость в цепи снижается и становится равной емкости дефектного кабельного изделия:

$$C_\partial = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (42)$$

Емкость второго конденсатора C_2 определяется как:

$$C_2 = \frac{C_1^2}{\Delta C} - C_1, \quad (43)$$

где ΔC – минимальное изменение емкости, при котором контролируемое кабельное изделие считается дефектным.

Рекомендации по выбору данного параметра приведены в приложении Б.

В режиме имитации уменьшения толщины изоляции емкость цепи равна емкости бездефектного кабельного изделия C_1 при разомкнутом ключе. При замыкании ключа суммарная емкость в цепи увеличивается и становится равной емкости дефектного кабельного изделия:

$$C_\partial = C_1 + C_3. \quad (44)$$

Емкость конденсатора C_3 равна минимальному изменению емкости, при котором контролируемый провод считается дефектным:

$$C_3 = \Delta C. \quad (45)$$

Для аттестации электроискрового дефектоскопа в режимах имитации увеличения и уменьшения толщины изоляции задающий генератор подает на входы высоковольтного реле не менее 20 импульсов. Аттестуемый электроискровой дефектоскоп должен зарегистрировать отклонения суммарной емкости от номинального значения. Количество зарегистрированных отклонений должно быть равно числу импульсов, поданных с задающего генератора на высоковольтное реле. Если данное условие выполняется, то электроискровой дефектоскоп признается годным к эксплуатации.

Далее приведены некоторые примечания к аттестации электроискрового дефектоскопа с помощью предложенного имитатора дефектов:

1. Переключение схем блока имитации дефектов для изменения режима аттестации осуществляется при выключенном испытательном напряжении.

2. Процедуру аттестации чувствительности и блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа необходимо проводить не реже одного раза в год и после устранения неполадок оборудования или после проведения основных регулировок оборудования.

3. Аттестация блока контроля емкости осуществляется после настройки чувствительности дефектоскопа, проверка корректности которой осуществляется с помощью первого режима работы имитатора дефектов.

4. При неудовлетворительных результатах аттестации блока контроля емкости проводится настройка, а затем повторная аттестация блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа. При отрицательных результатах повторной аттестации требуется провести ремонт электроискрового дефектоскопа.

4.2. Настройка блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа

При неудовлетворительных результатах аттестации блока контроля емкости необходимо проведение корректировки погрешностей электроискрового дефектоскопа. Корректировка погрешностей проводится при настройке блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа.

Для проведения настройки блока контроля емкости электроискрового дефектоскопа требуется 2 образцовых конденсатора. Емкости конденсаторов соответствуют минимальному и максимальному значению емкостей кабельных изделий, для контроля которых планируется применение настраиваемого электроискрового дефектоскопа.

Для проведения настройки блока контроля емкости в память прибора достаточно задать 4 точки коррекции. Для получения первой точки коррекции

первый конденсатор с минимальной емкостью подключается к электроду при выключенном испытательном напряжении. Далее к конденсатору прикладывается испытательное напряжение 3 кВ и производится запись емкости в память прибора. Алгоритм занесения точек коррекции в память электроискрового дефектоскопа подробно рассмотрен в разделе 3.3.

Для получения второй точки коррекции к первому конденсатору прикладывается максимальное испытательное напряжение, прописанное в технической документации к дефектоскопу, и затем точка коррекции вносится в память электроискрового дефектоскопа.

Запись третьей и четвертой точек коррекции производится по аналогии с первой и второй, но для второго образцового конденсатора. Значения испытательного напряжения для первой и третьей, второй и четвертой точек коррекции попарно равны.

4.3. Аттестация генератора

Аттестация генератора электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости проводится аналогично аттестации генераторов типовых электроискровых дефектоскопов. Согласно нормативной документации [1], перед проведением проверки генератора необходимо провести аттестацию и, при необходимости, настройку чувствительности дефектоскопа.

Процедура аттестации генератора электроискрового дефектоскопа необходимо проводится не реже одного раза в год и после устранения неполадок оборудования или после проведения основных регулировок оборудования.

Для проведения аттестации электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости между высоковольтным выводом и землей подключается нагрузка в виде высоковольтного конденсатора и устройство для измерения напряжения. Аттестация генератора проводится с помощью киловольтметра или осциллографа с делителем. Для проведения аттестации достаточно провести 2

измерения: на нижнем и на верхнем пределах. Результаты проведения аттестации заносятся в протокол (Таблица 10).

Таблица 10 – Протокол аттестации генератора электроискрового дефектоскопа

Емкость нагрузки, пФ	Измеренные значения		Относительная погрешность, %		Заключение о пригодности
	По аттестуемому дефектоскопу	По образцовому киловольтметру	Фактическая	Норма	
Минимальная емкость нагрузки				5%	
Максимальная емкость нагрузки					

Относительная погрешность рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{U_0 - U_a}{U_0} \cdot 100\%, \quad (46)$$

где U_0 - показания эталонного киловольтметра (осциллографа), кВ;

U_a - показания аттестуемого дефектоскопа, кВ.

При превышении относительной погрешности измерений значения 5 % следует провести настройку генератора.

При проведении настройки генератора к электроду дефектоскопа подключается нагрузка и эталонный прибор для измерения напряжения, как и при аттестации. Для настройки генератора в память прибора достаточно задать 2 точки коррекции. Чтобы получить первую точку коррекции, на нагрузку, подключенную к электроду, подается испытательное напряжение, значение которого равно нижнему пределу измерения дефектоскопа. Далее производится запись показаний эталонного устройства для измерения напряжения в память дефектоскопа. Алгоритм занесения точек коррекции в память дефектоскопа рассмотрен в разделе 3.3. Для получения второй точки коррекции к нагрузке прикладывается испытательное напряжение, равное верхнему пределу измерения

дефектоскопа. После этого вторая точка коррекции записывается в память дефектоскопа.

После проведения настройки генератора проводится повторная аттестация. При неудовлетворительных результатах повторной аттестации требуется провести ремонт электроискрового дефектоскопа.

4.4. Выводы по главе 4

1. Разработана структурная схема устройства для имитации дефектов, позволяющая проводить аттестацию электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости.

2. Разработана принципиальная схема блока имитации дефектов, позволяющего имитировать пробой изоляции, увеличение и уменьшение толщины изоляции.

3. Предложены методики аттестации и настройки блока контроля емкости и регистрации дефектов электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель, описывающая зависимость между емкостью и геометрическими размерами группы изолированных жил, которая позволяет рассчитывать номинальную локальную емкость группы с погрешностью не более 10% без необходимости проведения дополнительных экспериментальных исследований.

2. Доказано, что чувствительность контроля по отклонению локальной емкости изоляции для дефекта типа воздушная полость в области сильных полей увеличивается, если размер дефекта составляет больше 45% от толщины бездефектной изоляции.

3. Определена зависимость относительного изменения локальной емкости кабельного изделия от геометрических параметров дефектов изоляции, таких как сдиры, порезы, локальные уменьшения/увеличения толщины изоляции, проколы, воздушные полости, эксцентricность изоляции.

4. Разработаны требования к конструкции электрода, при выполнении которых обеспечивается высокая однородность потенциала на поверхности изоляции кабельного изделия и, соответственно, повышается информативность контроля.

5. Разработано устройство, которое позволяет имитировать с помощью электрического пробоя и изменения емкости сквозные дефекты и дефекты, изменяющие толщину изоляции, но не приводящие к ее пробоям при прохождении дефектной части кабельного изделия через электрод. Предложена методика аттестации блока контроля емкости и регистрации дефектов электроискрового дефектоскопа, основанная на применении разработанного устройства.

6. Разработан электроискровой дефектоскоп с функцией контроля емкости «ЗАСИ-20», позволяющий проводить технологический контроль изоляции и оболочки кабельных изделий по категории ЭИ-2, а также проводить контроль их локальной емкости в диапазоне (10...300) пФ. Было выявлено, что блок контроля емкости, встроенный в электроискровой дефектоскоп, позволяет расширить возможности аппарата, а именно позволяет регистрировать увеличение толщины

изоляции более, чем на 40 %, уменьшение толщины более, чем на 22%, смещении центра жилы на расстояние более, чем 57% от толщины изоляции (приведенные значения определены для длины дефекта равной длине контролируемой зоны и $R/r = 2,2$). Мониторинг локальной емкости для бухты кабельного изделия позволяет контролировать стабильность процесса экструдирования (вулканизации). На данный момент электроискровой дефектоскоп «ЗАСИ-20» внедрен более, чем на 10 кабельных заводах, в том числе на таких, как АО «СИБКАБЕЛЬ» (г. Томск), ООО «Камский Кабель» (г. Пермь), ОАО «БЕЛАРУСКАБЕЛЬ» (г. Мозырь, Республика Беларусь).

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРОЦЕДУРА ПОДГОТОВКИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА С ФУНКЦИЕЙ КОНТРОЛЯ ЕМКОСТИ К ПРОВЕДЕНИЮ КОНТРОЛЯ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Для проведения электроискрового контроля кабельных изделий с помощью электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости, установленного на линии, необходимо определить номинальное значение емкости кабельного изделия. Если проводится контроль оболочки или изоляции, то емкость рассчитывается по формуле (6), приведенной разделе 2.2, где R – внешний радиус оболочки или изоляции, r – внутренний радиус оболочки или изоляции, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость оболочки или изоляции, l – длина электрода. Для определения номинального значения емкости группы скрученных изолированных жил необходимо использовать формулу (28) из раздела 2.3.2. Далее необходимо определить максимальное допустимое отклонение номинального значения бездефектного кабельного изделия, рекомендации по определению которого приведены в приложении Б.

После определения номинального значения емкости кабельного изделия и максимального отклонения емкости данные параметры заносятся в память прибора согласно алгоритму, приведенному в разделе 3.3.

Далее выбирается пиковое значение испытательного напряжения исходя из толщины изоляции (оболочки) изделия [3] и устанавливается на приборе с использованием кнопок на лицевой панели прибора. После этого дефектоскоп готов к проведению контроля.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОПУСТИМОГО ОТКЛОНЕНИЯ ЕМКОСТИ КАБЕЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ ОТ НОМИНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Для определения допустимого отклонения емкости от номинального значения необходимо задаться минимальным размером дефекта, который дефектоскоп должен обнаружить. Далее приведен пример расчета относительного отклонения емкости от номинального значения для дефекта с заданными параметрами.

В качестве примера рассмотрим дефект типа воздушная полость с геометрическими размерами $axbxc$, где a – ширина дефекта в поперечном сечении провода, b – высота дефекта в поперечном сечении провода, c – длина дефекта в продольном сечении провода. Параметры провода: R – внешний радиус изоляции, r – внутренний радиус изоляции, l – длина контролируемой части провода (Рисунок 72).

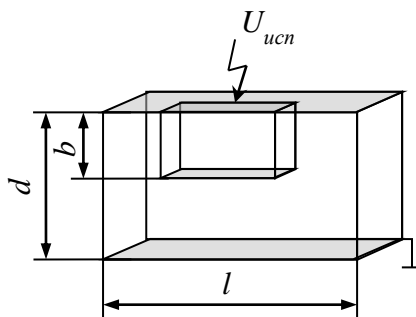


Рисунок 72 – Модель провода с дефектом

Относительное изменение емкости рассчитывается согласно формуле (23) из раздела 2.2.3 .

Для определения выражения $\sum_{ij} n_{ij} \cdot S_{ij}(d_{ij})$ необходимо разделить модель провода с дефектом на бездефектную и дефектную части. Дефектной частью является параллелепипед с размером $axlxc$, остальная часть является бездефектной. Тогда данное выражение для бездефектной части, согласно формуле (22) из раздела 2.2.3:

$$n_{\delta} \cdot S_{\delta}(d_{\delta}) = \pi \cdot (R+r) \cdot l - a \cdot c,$$

для дефектной части:

$$n_{\delta} \cdot S_{\delta}(d_{\delta}) = \frac{d}{d-b} \cdot \frac{R+r-b}{R+r} \cdot a \cdot c.$$

Тогда относительное отклонение емкости для данного дефекта составит:

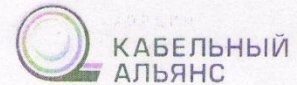
$$\delta = \frac{a \cdot c}{\pi l (R+r)} \cdot \left(n \cdot \frac{R+r-b}{R+r} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (47)$$

где n – коэффициент, показывающий во сколько раз уменьшилась толщина изоляции в области дефекта.

В случае, если при проведении контроля с заданным допустимым отклонением емкости происходит большое количество ложных срабатываний, значение допустимого отклонения емкости рекомендуется увеличить.

Данные расчёты применимы, если в аппарате предусмотрена программная отстройка от влияния на результат контроля радиальных вибраций кабельного изделия или установлены специальные стойки, позволяющие механически уменьшить вибрации. Если такие способы отстройки от влияния радиальных вибраций отсутствуют, то значение допустимого отклонения целесообразно выбрать $\pm 20\%$.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Акционерное общество «Сибкабель»
634003, г. Томск, Пушкина ул., д. 46,
Тел.: (3822) 700-700, тел/факс: (3822) 700-700 доб. 115-65
E-mail: office@sibkabel.ru
http://www.sibkabel.ru
ОКПО 00214474, ОГРН 1027000860072
ИНН/КПП 7020012261 /702001001
13.09.2017г. № 01-1041

На № _____ от _____

О внедрении результатов диссертационной работы

Комиссия в составе: председателя - главного инженера Побережского С.В., и членов комиссии главного метролога Вакуровой Г.И., начальника ОТК Жевжика А.Н., начальника технического бюро Болотникова А.Г. – составила настоящий акт о том, что в процессе технологического контроля кабельных изделий на АО «Сибкабель» используются приборы электроискрового контроля изоляции кабельных изделий типа ЗАСИ, разработанные в результате диссертационной работы Галеевой Надежды Сергеевны «Повышение информативности контроля кабельных изделий на основе комплексного использования электроискрового и электроемкостного методов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Диссертантом предложен комплексный метод контроля, позволяющий повысить информативность технологического контроля изоляции/оболочки кабельных изделий после этапа экструдирования, а также на этапах скрутки и перемотки. Также диссертантом предложены математические модели для определения емкости провода и сердечника кабеля. Данные зависимости позволяют оценить емкость кабельных изделий, зная их геометрические и электрические параметры, что необходимо для выбора электроискрового дефектоскопа, мощность которого будет достаточна для обслуживания определенной технологической линии.

Диссертантом предложена структурная схема электроискрового дефектоскопа с функцией измерения погонной емкости ЗАСИ и требования к конструкции электрода, позволяющего значительно уменьшить величину отклонения емкости бездефектного участка от номинального значения.

Председатель комиссии
Главный инженер

С.В. Побережский

Члены комиссии
Главный метролог
Начальник ОТК
Начальник технического бюро

Г.И. Вакурова
А.Н. Жевжик
А.Г. Болотников



федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по образовательной
деятельности ТПУ
Ю.С. Боровиков /

« 08 » сентября 2017 г.

АКТ

« 08 » сентября 2017 № 235
г. Томск

Проверка использования результатов кандидатской диссертации
Галеевой Надежды Сергеевны

Об использовании результатов диссертационной работы «Повышение информативности контроля кабельных изделий на основе комплексного использования электроискрового и электроемкостного методов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в учебной и научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Составлен комиссией:

Председатель - зав. каф. ФМПК ИНК, А.П. Суржиков

Члены комиссии: доцент каф. ФМПК ИНК, Б.Б. Мойзес
доцент каф. ФМПК ИНК, Г.В. Вавилова

С 06.09.2017 по 08.09.2017 комиссия провела проверку и постановила, что результаты диссертационной работы Галеевой Н.С. внедрены в учебный процесс и используются при выполнении НИРС и ВКР студентами ИНК ТПУ:

1. Основные результаты диссертационного исследования Галеевой Н.С. использовались при разработке оборудования учебно-научной лаборатории «Магнитный, электрический, вихретоковый контроль» кафедры ФМПК ТПУ.
2. По теме диссертации Галеевой Н.С. выполнена и защищена на «отлично» бакалаврская ВКР по направлению «Приборостроение»

Председатель комиссии

Члены комиссии

А.П. Суржиков

Б.Б. Мойзес

Г.В. Вавилова

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ГОСТ Р 54813-2011. Кабели, провода и шнуры электрические. Электроискровой метод контроля [Электронный ресурс] – Введ. 2013.01.01.– с измен. 2017.07.13 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/51723/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.08.2017).

2 ГОСТ 25315-82. Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения [Электронный ресурс] – Введ. 1983.06.30 – с измен. 2017.07.13 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/21777/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.09.2017).

3 ГОСТ 23286-78 Кабели, провода и шнуры. Нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний напряжением. [Электронный ресурс] – Введ. 1981.01.01. – с измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/32228/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.12.2015).

4 Саакян, А.Е. Технический контроль производства кабелей, проводов и шнуров с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией: учебное пособие/ А.Е. Саакян. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 239 с.: ил.

5 Городецкий, С.С. Испытания кабелей и проводов: учебное пособие/ С.С. Городецкий, Р.М. Лакерник. – Москва: Энергия, 1971. – 272 с.: ил.

6 Редько, В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий [Электронный ресурс]: монография/ В.В. Редько – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 928 с.: ил. – Режим доступа: URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2013/m213.pdf>, доступ из корпоративной сети ТПУ. – Загл. с титульного экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.09.2016).

7 Балашов, А.И. Кабели и провода. Основы кабельной техники/ А.И. Балашов, М.А. Боев, А.С. Воронцов и др. Под редакцией И.Б. Пешкова. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 467 с.: ил.

8 Основы кабельной техники: учебное пособие/ Под ред. В.А. Привезенцева. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 472 с.

9 ГОСТ 27893-88 (СТ СЭВ 1101–87). Кабели связи. Методы испытаний [Электронный ресурс]. – Введ. 1990.01.01. – с измен. 2015.01.16. – Режим доступа: URL: <http://meganorm.ru/Index/11/11797.htm>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 05.03.2015).

10 ZUMBACH Electronics [Электронный ресурс]/ CAPAC[®]/ FFT / SRL – Режим доступа: URL: <http://www.zumbach.com/ru/products/product-finder/capac-fft-srl/capac-overview.html/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 20.04.2015).

11 Гольдштейн, А.Е. Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова// Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – с. 146-150.

12 Редько, В.В. Повышение информативности электроискрового технологического контроля изоляции кабельных изделий/ В. В. Редько, Л. А. Редько, Н. С. Старикова // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – с. 164-167.

13 Редько, В.В. Выявляемость дефектов изоляции кабельных изделий при испытаниях высоким напряжением / В.В. Редько, Н.С. Старикова // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 12. – с. 69-73.

14 Старикова, Н.С. Выбор параметров электроискрового контроля кабельных изделий / Н.С. Старикова, В.В. Редько // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – с. 76-79.

15 Старикова, Н. С. Способы отстройки от влияющих факторов на результат контроля состояния изоляции кабельных изделий комплексным методом / Н.С. Старикова, В.В. Редько // Ползуновский вестник. – 2015. – № 3. – с. 142-146.

16 Redko, V.V. Determination of sensitivity for in-process control of cable product insulation / V.V. Redko, N.S. Starikova, L.A. Redko, G.V. Vavilova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – № 81. – с. 1-8.

17 Старикова, Н.С. Контроль состояния изоляции кабельных изделий по изменению электрической емкости при высоковольтных испытаниях [Электронный ресурс] / Н.С. Старикова, В.В. Редько, Г.В. Вавилова // Информационные технологии неразрушающего контроля: сборник трудов Российской школы конференции с международным участием, Томск, 27-30 октября 2015. – Томск: ТПУ, 2015. – с. 124-127. – Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C111/C111.pdf>– Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 25.12.2016).

18 ГОСТ 15845-80 (СТ СЭВ 585-77). Изделия кабельные термины и определения [Электронный ресурс]. – Введ. 1981.06.30 – с измен. 2015.01.16 – Режим доступа: URL: <http://meganorm.ru/Index/23/23800.htm>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 28.07.2016).

19 Холодный, С.Д. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике: учебное пособие / С.Д. Холодный, С.В. Серебрянников, М.А. Боев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 232 с.

20 Троицкий, И.Д. Производство электрических кабелей и проводов с резиново-пластмассовой изоляцией: учебное пособие/ И.Д. Троицкий , Л.С. Лахман, О.Ш. Бабицкий, И.Ш. Берин. – М.: Высшая школа, 1967. – 400 с.: ил.

21 Леонов, В.М. Основы кабельной техники / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б.Рязанов, С.Д.Холодный. Под ред. И.Б. Пешкова. – М.:Академия, 2006. – 432 с.

22 ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. [Электронный ресурс] – Введ. 1979.07.01. – с измен. 2015.05.21. – Режим доступа: URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4294851/4294851954.htm>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 29.05.2015).

23 ГОСТ 11326.0-78. Радиочастотные кабели. Общие технические условия. [Электронный ресурс] – Введ. 1981.01.01. – с измен. 2015.01.16 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/8070/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.01.2015).

24 Кабели и провода связи. Кабели радиочастотные [Электронный ресурс]/RusCable – Режим доступа: <http://www.ruscable.ru/info/cable/t191.html/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 14.07.2015).

25 ГОСТ Р 54429-2011. Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия. [Электронный ресурс] – Введ. 2012.07.01. – с измен. 2017.07.13 – Режим доступа: URL: <http://internet-law.ru/gosts/gost/51354/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.08.2017).

26 ГОСТ 7006-72. Покровы защитные кабелей. Конструкция и типы, технические требования и методы испытаний. [Электронный ресурс] – Введ. 1975.01.01. – с измен. 2017.07.13 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/8352/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 21.08.2017).

27 Кабельно-проводниковая продукция [Электронный ресурс]/Энерго-Грант – Режим доступа: <http://energogrant.ru/kpp/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.07.2015).

28 Троицкий, И.Д. Производство электрических кабелей и проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией: учебник / И. Д. Троицкий [и др.]. – М.: Высшая школа, 1972. – 382 с.: ил.

29 ГОСТ Р 53768-2010. Провода и кабели для электрических установок на номинальное напряжение до 450/750 в включительно. Общие технические условия. [Электронный ресурс] – Введ. 2010.07.01 – Режим доступа: URL: <http://www.vashdom.ru/gost/53768-2010/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 03.08.2015).

30 ГОСТ Р 51311-99. Кабели телефонные с полиэтиленовой изоляцией в пластмассовой оболочке. Технические условия. [Электронный ресурс] – Введ. 2000.06.30. – с измен. 2017.07.13 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/8519/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 03.08.2017).

31 ГОСТ 10348-80. Кабели монтажные многожильные с пластмассовой изоляцией. Технические условия. [Электронный ресурс] – Введ. 1982.01.01. – с

измен. 2017.07.13 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/23356/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 03.08.2017).

32 ГОСТ 16442-80. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией. Технические условия. [Электронный ресурс] – Введ. 1982.01.01. – с измен. 2017.07.13 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/736>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 05.08.2017).

33 Технологические и эксплуатационные дефекты в изоляции кабелей [Электронный ресурс] / КАБЕЛЬ-NEWS. – Режим доступа: http://www.ruscable.ru/article/Tehnologicheskie_i_ekspluatacionnye_defekty_v/ /, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 18.05.2013).

34 Литвинец, Ю.И. Технологические и энергетические расчеты при переработке полимеров экструзией/ Ю.И. Литвинец. Под ред. К.В. Корнева. – Екатеринбург: УГЛТА, 2010. – 55 с.

35 Шварц, О. Переработка пластмасс / О. Шварц, Ф.-В. Эбелинг, Б. Фурт; под ред. А. Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия, 2005. – 320 с.

36 Городецкий, С.С. Испытания кабелей и проводов: учебное пособие для техникумов / С.С. Городецкий, Р.М. Лакерник. – Москва: Энергия, 1971. – 272 с.: ил.

37 ГОСТ 2990-78. Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением. [Электронный ресурс] – Введ. 1980.01.01. – с измен. 2017.07.13 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/15226/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 05.09.2017).

38 BS 5099:2004. Electric cables. Voltage levels for spark testing. [Электронный ресурс] – Введ. 2004.01.30 – Режим доступа: URL: <https://ru.scribd.com/document/287659857/BS-5099-2004-Electric-Cables-Voltage-Levels-for-Spark-Testing>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 05.12.2015).

39 UL 1581-2009 Electrical Wires, Cables, and Flexible Cords. [Электронный ресурс] – Введ. 2001.10.31 – Режим доступа: URL: <https://wenku.baidu.com/view/>

c4f656d133d4b14e85246884.html?re=view, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 01.07.2015).

40 Патент № 5302904 US, МПК G01R31/08. Method of detecting insulation faults and spark tester for implementing the method [Электронный ресурс]/ P. Nopper; заявл. 30.09.1992; опубл. 12.04.1994. – № 953717. – Режим доступа: URL: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US5302904.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 11.08.2017).

41 Патент № 7489140 US, МПК G01R31/02. Apparatus, method and system for spark testing an insulated cable [Электронный ресурс]/ Cyrus Scott Butterworth, Wilber Freeman Powers, Jr.; заявл. 05.11.2007; опубл. 10.02.2009. – № 934881. – Режим доступа: URL: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US7489140.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 11.08.2017).

42 Косенчук, Н.А. Контроль качества изоляции обмоточных проводов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец. 05.11.13 / Н.А. Косенчук; Томский институт автоматизированных систем управления и радиоэлектроники; науч. рук. Г. В. Смирнов. – Томск: 1992. – 173 с.: ил.

43 Гольдштейн, А.Е. Электроемкостный измерительный преобразователь для технологического контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства / А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова, В.Ю. Белянков// Дефектоскопия. – 2015. – № 2. – с. 35-43.

44 Goldshtein, A.E. An electro-capacitive measuring transducer for the process inspection of the cable capacitance per unit length in the process of production/ A.E. Goldshtein, G. V. Vavilova, V.Yu. Belyankov// Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Т 51. – Выпуск 2. – с. 35-43.

45 ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. [Электронный ресурс] – Введ. 1984.06.30. – с измен. 2017.07.13 – Режим доступа: URL: <http://www.internet->

law.ru/gosts/gost/21276/, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 03.09.2017).

46 Патент № 2491562 RU, МПК G01R31/08. Способ контроля изоляции кабельного изделия [Электронный ресурс]/ А.Е. Гольдштейн, В.В. Редько, Л.Б. Бурцева; заявл. 14.03.2012; опубл. 27.08.2013. – № 2012109968/28. – Режим доступа: URL: <http://www.freepatent.ru/images/patents/488/2491562/patent-2491562.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 11.10.2013).

47 Starikova, N. S. Effect of Temperature in Electrocapacity In-Process Control of Cable Products / N. S. Starikova, V. V. Redko, L. A. Redko, N. I. Ermoshin // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 79. – с. 1-6.

48 Starikova, N. S. Control of cable insulation quality by changing of electrical capacitance per unit during high voltage testing / N. S. Starikova, V. V Redko, G. V. Vavilova // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – № 671. – с. 1-5.

49 Редько, В. В. Эффективность контроля целостности изоляции кабельных изделий в области слабых и сильных электрических полей / В. В. Редько, Н. С. Старикова // Измерение. Контроль. Информатизация: материалы XVI Международной научно-технической конференции, Барнаул, 23 апреля 2014 – Барнаул: АлтГУ, 2014. – с. 117-120.

50 Старикова, Н. С. Влияние параметров испытательного напряжения на достоверность контроля погонной электрической емкости в высоковольтных испытаниях изоляции кабельных изделий / Н. С. Старикова, В. В. Редько // Измерение. Контроль. Информатизация: материалы XVI Международной научно-технической конференции, Барнаул, 12 мая 2015 – Барнаул: АлтГУ, 2015. – Т. 1. – с. 120-123.

51 Старикова, Н. С. Современные методы контроля изоляции кабельных изделий/ Н. С. Старикова // Современные проблемы науки и образования. – 2015 – № 6. Приложение "Технические науки". – с. 4.

52 Starikova, N. S. Cable insulation control / N. S. Starikova // Современные проблемы науки и образования. – 2015 – № 6. Приложение "Технические науки". – с. 5.

53 Старикова, Н. С. Исследование методов контроля целостности изоляции в области слабых и сильных электрических полей [Электронный ресурс] / Н. С. Старикова, В. В. Редько // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 3 (9) . – с. 55-59.

54 Starikova, N. S. Comparison of Cable Insulation Control in Weak and Strong Electric Fields / N.S. Starikova, V. V. Redko, G. V. Vavilova // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – № 756. – с. 486-490.

55 Старикова, Н. С. Исследование возможности технологического контроля целостности изоляции кабельных изделий емкостным методом / Н. С. Старикова, В. В. Редько // Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов III Научно-практической конференции/ под ред. А.В. Юрченко, Томск, 9-13 апреля 2012 – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – с. 136-141.

56 Редько, В.В. Разработка методов и средств электроискрового технологического контроля изоляции кабельных изделий: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : спец. 05.11.13 / В.В. Редько; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); науч. конс. А. Е. Гольдштейн. – Томск: 2013. – 38 с.: ил.

57 Редько, В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий [Электронный ресурс]: монография/ В.В. Редько – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 928 с.: ил. – Режим доступа: URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2013/m213.pdf>, доступ из корпоративной сети ТПУ. – Загл. с титульного экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.08.2015).

58 Общие требования к элементам конструкции. Токопроводящие жилы [Электронный ресурс]/ RusCable – Режим доступа: <http://www.ruscable.ru/info/cable/t118.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 12.07.2014).

59 Важов, В.Ф. Техника высоких напряжений. Руководство к лабораторным работам: уч. пособие / В.Ф. Важов, М.Т. Пичугина и др. – Томск: ТПУ, 2006. – 79 с.

60 Сканава, Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г.И. Сканава. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 909 с.

61 Говорков, В.А. Электрические и магнитные поля / В.А. Говорков – М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 462 с.

62 Blohm, W. Advanced on-line measuring and analysis techniques for an economical cable production / W. Blohm // Proceedings Intl. IWMA Conf. Economical Processing of Rod to Wire & Cable. – 1999, с. 67-75.

63 Гольдштейн, А.Е. Технологический контроль погонной емкости электрического кабеля в условиях значительных изменений солености воды/ А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова// Контроль. Диагностика: научно-технический журнал/ Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике. – 2013. – № 9. – с. 57-60.

64 АКТОКОМ [Электронный ресурс]/ АМ-3001 Измеритель иммитанса – Режим доступа: URL: http://www.aktakom.ru/kio/index.php?ELEMENT_ID=7194, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.12.2015).

65 Справочник по электротехническим материалам: в 3 т./ под ред. Ю.В. Корицкого. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986-1988. – Т. 1. – 368 с.

66 Справочник по электротехническим материалам: в 3 т./ под ред. Ю.В. Корицкого. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986-1988. – Т. 2. – 1987. – 464 с.

67 Григорьян, А.Г. Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин/ А.Г. Григорьян, Д.Н. Дикерман, И.Б. Пешков. – М.: Машиностроение, 2011. – 368 с.

68 Крыжановский, В.К. Технические свойства пластмасс: учебное пособие для вузов / В.К. Крыжановский. – Санкт-Петербург: Профессия, 2014. – 246 с.: ил.

69 Сканава, Г. И. Физика диэлектриков (область слабых полей) / Г. И. Сканава . – М. : Гос.изд-во технико-теоретич. лит., 1949 . – 500 с.

70 Описание и марки полимеров - Поливинилхлорид [Электронный ресурс]/Полимерные материалы. Режим доступа: <http://www.polymerbranch.com/>

catalogp/view/6.html&viewinfo=2, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.01.2016).

71 Техника высоких напряжений/под ред. Д.В. Разевига. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергия, 1976. – 471 с.

72 Григорьев, А.Н. Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика. Ч. 1. Особенности развития и существования поверхностного разряда / А.Н. Григорьев, А.В. Павленко, А.П. Ильин, Е.И. Карнаухов // Известия ТПУ, 2006. – №1. – с.66-69.

73 РД 16 14.640 - 88. Кабели, провода и шнуры. Испытание напряжением на проход. Типовой технологический процесс. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 10 с.

74 Тареев, Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 320 с.

75 Технология конструкционных материалов: Учебник для вузов / Под ред. Ю.М. Барона. – СПб.: Питер, 2012. – 512 с.: ил.

76 Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов: учебник/ Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифуллин. – М.: ОНИКС, 2013. – 622 с.

77 Чубик, И.А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов / И.А. Чубик, А.М. Маслов. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 185 с.

78 Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов. Справочник / В. С. Чиркин. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 356 с.

79 The world leader in ball chain and accessories: Ball chain [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.ballchain.com/chain_sizes.html, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 20.03.2014).

80 Бурцева, Л.Б. Исследование достоверности динамических испытаний изоляции кабельных изделий постоянным напряжением / Л.Б. Бурцева, В.В. Редько // XIV Международная научн.-практ. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – с. 143-145.

81 Редько, В.В. Изоляция кабельных изделий как объект электроискрового технологического контроля / В. В. Редько, Л. Б. Бурцева, Л. А. Редько // Известия Томского политехнического университета. – Томск: ТПУ. – 2010. – Т. 317. – № 4: Энергетика. – с. 111-114.

82 Основы работы в Curve Fitting Toolbox [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/curvefitting/3_2.php, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.04.2015).

83 Масштабирование изображения. Алгоритмы и программирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://algorithmiclib.org/scaling_image, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 25.04.2015).

84 Интерполяция функции двух переменных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.machinelearning.ru>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 30.04.2015).

85 ГОСТ Р 8.568-97. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. [Электронный ресурс] – Введ. 1998.06.30.– с измен. 2015.01.16 – Режим доступа: URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/791/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.01.2015).

86 Патент № US8643385 B2, МПК H01H 31/12. Method for the simulation of defects with spark testers and spark testers [Электронный ресурс]/ Н. Sikora; заявл. 29.03.2011; опубл. 04.03.2014. – № US 13/074,082. – Режим доступа: URL: <https://www.google.com/patents/US8643385>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 12.12.2015).