

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: Редько Виталий Владимирович
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: Боев Михаил Андреевич,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»,
профессор кафедры физики и технологии
электротехнических материалов и
компонентов

Артищев Сергей Александрович,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники», младший научный
сотрудник специального конструкторского
бюро «Смена»

Ведущая организация: Федеральное бюджетное учреждение
«Государственный региональный центр
стандартизации, метрологии и испытаний
в Томской области», г. Томск

Защита состоится «12» декабря 2017 г. в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: Россия, 634050, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук,

Е.А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 и электроемкостный. 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 электроемкостным методом необходимо наличие дополнительных 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 электроемкостного методов. 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, сдиры 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». Заявка на патент, составленная 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

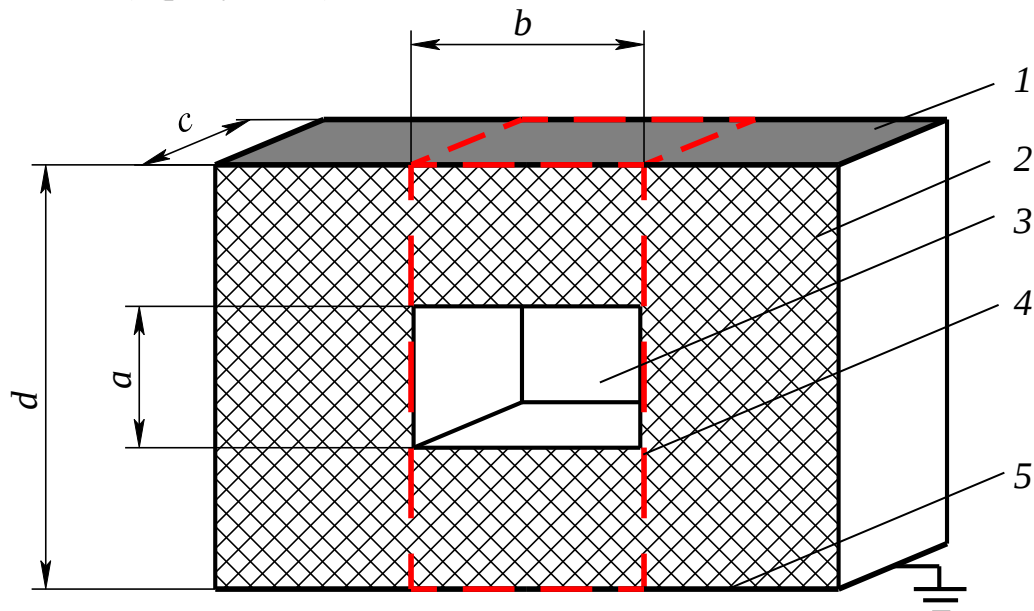
Во введении работы обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи проведенных исследований, сформулированы практическая значимость и научная новизна полученных результатов. Также определены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены основы технологии производства кабельных изделий, основные виды дефектов изоляции и причины их появления. Также представлен обзор существующих методов технологического контроля качества изоляции кабельных изделий и предложен новый комплексный метод контроля. Данный метод основан на электроискровом и электроемкостном методах и заключается в измерении локальной емкости кабельного изделия в процессе проведения электроискрового контроля изоляции. Дефекты в контролируемой изоляции или оболочке регистрируются по отклонению локальной емкости от номинального значения и по пробоем изоляции (резкому повышению тока в цепи). Комплексный метод контроля позволяет устранить некоторые недостатки электроискрового и электроемкостного методов, такие как нечувствительность к некоторым видам дефектов для электроискрового метода и необходимость проводящей среды и дополнительного технического обслуживания для электроемкостного метода.

В комплексном методе контроля измерение значения локальной емкости кабельного изделия происходит при высоком испытательном напряжении, т.е. в области сильных полей, в отличие от электроемкостного метода, где измерения проводятся в области слабых полей.

Измерения емкости в области сильных полей отличаются от измерений в области слабых тем, что при уменьшении толщины изоляции до предельного значения на месте дефекта 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 локальной электрической емкости от размеров дефектов типа воздушная полость был взят плоский конденсатор с неоднородным диэлектриком. Моделью дефекта является параллелепипед с размерами $a \times b \times c$ (высота, длина, ширина, соответственно) (рисунок 1).



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

Рисунок 1 – Модель изоляции провода с неоднородной изоляцией

Эквивалентная емкость модели участка изоляции (рисунок 1) имеет две составляющие: емкости дефектного и бездефектного участков, которые соединены параллельно.

Согласно формуле для определения емкости плоского конденсатора, была найдена результирующая емкость дефектного участка C_0 (отмечен красным пунктиром на рисунке 1):

$$C_{\partial} = \frac{C_{\varepsilon} \cdot C_u}{C_{\varepsilon} + C_u} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^B \cdot \varepsilon_r^H \cdot b \cdot c}{\varepsilon_r^B \cdot (d - a) + \varepsilon_r^H \cdot a}, \quad (1)$$

где ε_r^H - диэлектрическая проницаемость изоляционного материала;

ε_r^B - диэлектрическая проницаемость материала дефекта (в данном случае воздуха).

Формула (1) применима для нахождения результирующей емкости дефектного участка при отсутствии разрядных процессов в изоляции, т.е. при измерении локальной 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 локальную емкость участка изоляции с воздушной полостью в области слабых электрических полей.

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

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

$$C_{\partial} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^H \cdot \frac{b \cdot c}{(d - a)} \quad (2)$$

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 2) 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.

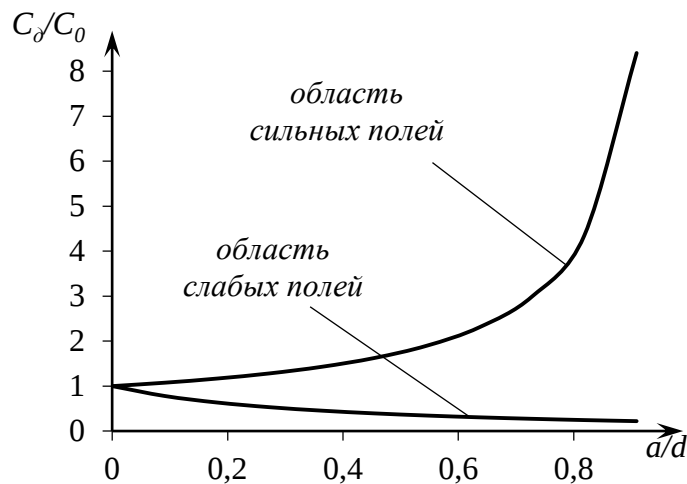


Рисунок 2 – Зависимость относительной емкости дефектного участка от относительного размера дефекта в области сильных и слабых полей

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 3).

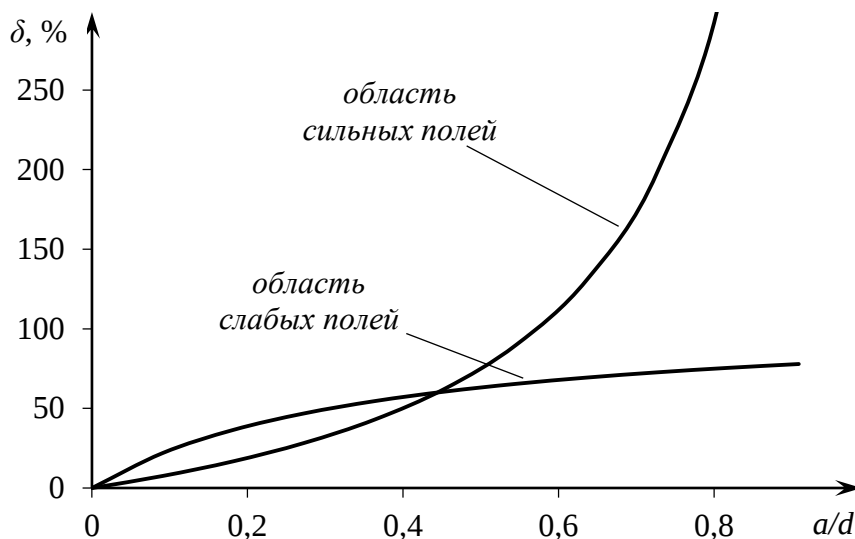


Рисунок 3 – Относительное отклонение локальной емкости от бездефектного значения в области сильных и слабых полей при увеличении относительного размера дефекта

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 емкостного метода.

В первой части **второй главы** было проведено математическое моделирование дефектного и бездефектного участков изоляции провода.

Провод можно представить в виде цилиндрического конденсатора, электрическая емкость которого определяется по известной формуле:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{l}{\ln(R/r)}, \quad (3)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная;

ϵ_r – диэлектрическая проницаемость изоляции;

l – длина провода;

R и r – внешние радиусы изоляции и жилы, соответственно.

Проведя моделирование участка провода ($R/r = 2,2$) с такими дефектами изоляции, как порез, локальное увеличение и уменьшение толщины, эксцентричность изоляции, было выявлено, что при использовании цепочечного электрода по изменению емкости контролируемой части кабельного изделия могут быть выявлены следующие дефекты:

- увеличение толщины изоляции или оболочки более, чем на 40 % при длине дефекта равной длине зоны контроля; 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; более, чем на 37 % при длине дефекта равной половине длины зоны контроля; более, чем на 59 % при длине дефекта, составляющей 20 % от длины зоны контроля;
- эксцентричность провода, при смещении центра жилы на расстояние, равное 57 % от толщины изоляции для протяженности дефекта равной длине зоны контроля.

Т.к. при электроискровом контроле пробой изоляции наступает при глубине дефекта (72...83) %, то можно отметить, что функция измерения емкости позволяет значительно расширить возможности дефектоскопа по обнаружению вышеперечисленных дефектов.

Для упрощения оценки влияния различных типов дефектов на емкость участка провода предложено использовать модель изоляции или оболочки кабельного изделия в виде плоского конденсатора (рисунок 4), геометрические размеры которого определяются из цилиндрической модели.

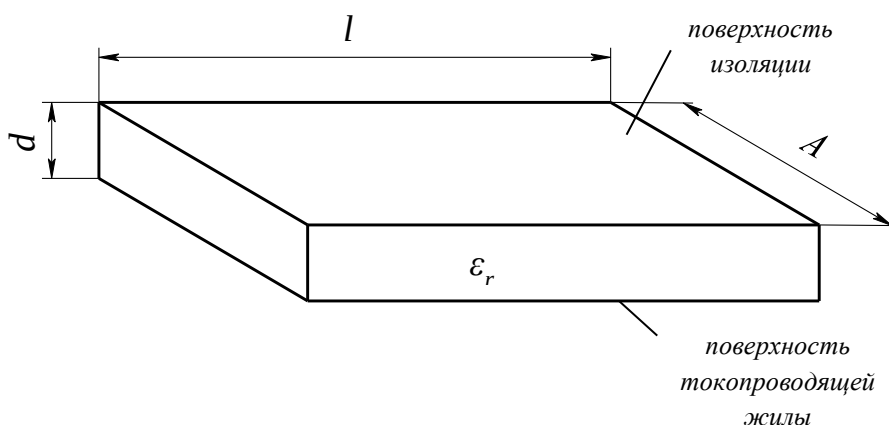


Рисунок 4 – Модель провода в виде плоского конденсатора

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

$$d = R - r, \quad (4)$$

Значение ширины обкладок плоского конденсатора A определяется по формуле

$$A = \pi \cdot (R + r). \quad (5)$$

Длина плоского конденсатора численно соответствует длине цилиндрического конденсатора. При использовании модели плоского конденсатора для моделирования изоляции провода возникает ошибка моделирования, которая не превышает (4...6) %, что позволяет применять ее для моделирования изоляции или оболочки кабельного изделия.

Для определения зависимости между размерами дефекта и величиной относительного изменения 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} .

Таким образом, контролируемый участок можно представить в виде матрицы, состоящей из $n \times m$ конденсаторов, соединенных параллельно. Емкость бездефектного контролируемого участка составляет:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S_{\Sigma}}{d}, \quad (6)$$

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij}(d), \quad (7)$$

где d – толщина бездефектной изоляции.

Определив геометрические размеры эквивалентного плоского конденсатора, электрическая емкость которого равна емкости цилиндрического конденсатора, формулу (6) можно преобразовать:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \pi l (R + r)}{d}, \quad (8)$$

где l – длина контролируемого участка;

R и r – радиусы изоляции и жилы, соответственно.

Модель контролируемого участка, имеющего внешнюю или внутреннюю несплошность, в области сильных полей представлена на рисунке 5.

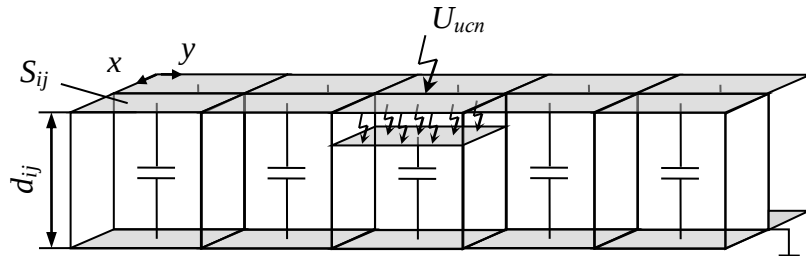


Рисунок 5 – Модель дефектной изоляции провода в виде плоского конденсатора

Емкость участка с несплошностью можно рассчитать по формуле:

$$C_{\partial} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \sum_{ij} \frac{S_{ij}(d_{ij})}{d_{ij}}. \quad (9)$$

Учитывая тот факт, что при использовании модели плоского конденсатора площадь обкладок зависит от его толщины, то площадь каждого из участков может быть рассчитана по формуле:

$$S_{ij}(d_{ij}) = x_{ij}(d_{ij}) \cdot y_{ij} = k_{ij} \cdot \pi \cdot (d_{ij} + 2r) \cdot y_{ij}, \quad (10)$$

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 поперечного сечения провода.

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

$$\delta = \frac{|C_0 - C_d|}{C_0} 100\% = \frac{\left| \pi l(R+r) - \sum_{ij} n_{ij} \cdot S_{ij}(d_{ij}) \right|}{\pi l(R+r)} 100\%, \quad (11)$$

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

Формулы (9-11) допустимо использовать для дефектов, которые уменьшают или увеличивают толщину изоляции или оболочки кабельного изделия, а именно для локальных увеличений/уменьшений номинального внешнего диаметра, эксцентрисичности изоляции, сдиров, порезов, трещин, воздушных полостей. Причем осевое смещение дефекта в пределах контролируемого участка не приведет к значимому изменению результирующей локальной емкости.

Во второй части **второй главы** была рассмотрена возможность контроля группы изолированных жил, получаемых в процессе скрутки. Скруткой является процесс объединения отдельных изолированных жил, пучков в сердечник, являющийся конструкцией более сложного вида. Данная задача является актуальной, так как после прохождения крутильных машин возможно появление сдиров и порезов на поверхности скрученных элементов.

Для выполнения поставленной задачи была создана модель на примере повивной скрутки (рисунок 6), проведен анализ распределения напряжения (рисунок 7) и напряженности электрического поля в поперечном сечении группы изолированных жил после возникновения ионизационных процессов.

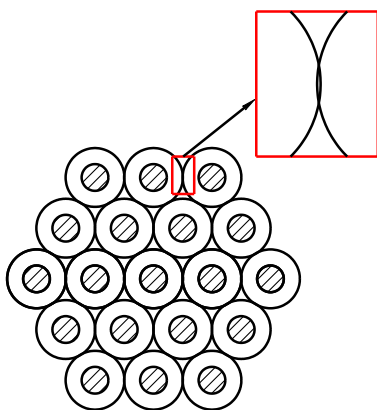


Рисунок 6 – Конструкция математической модели

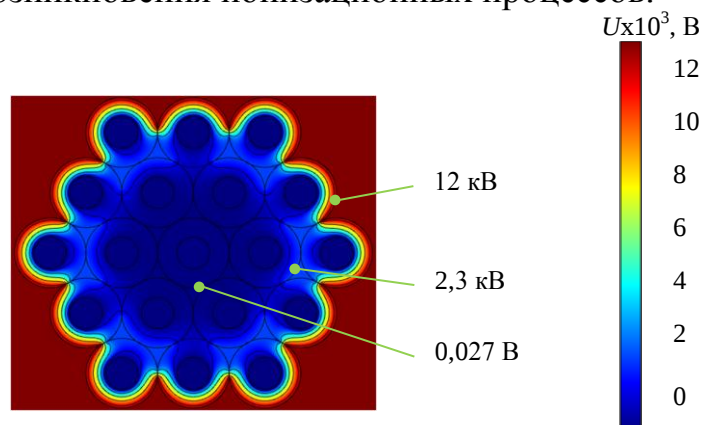


Рисунок 7 – Картина распределения электрического потенциала по поперечному сечению группы изолированных жил после возникновения ионизационных процессов

Высокое испытательное напряжение прикладывается только к частям изоляций жил второго повива, образующим поверхность группы (рисунок 7). Напряжения, прикладываемые к поверхностям изоляций жил первого повива и центральной жилы, кратно ниже испытательного напряжения.

При анализе величин напряженностей электрического поля можно отметить, что 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 емкости будет оказывать часть изоляций жил второго повива, непосредственно к которым прикладывается высокое испытательное напряжение.

Аналогичные результаты были получены при проведении экспериментов, а именно измерении емкости группы с количеством изолированных жил от 2-х до 40 в области сильных полей (рисунок 8).

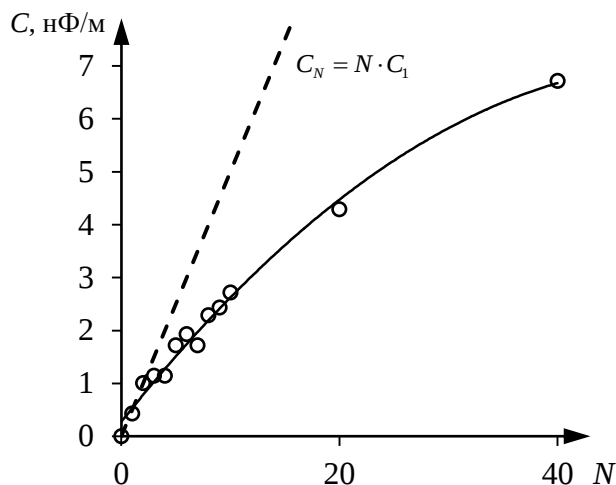


Рисунок 8 – Зависимость погонной емкости группы от количества изолированных жил при измерении с помощью электроискрового дефектоскопа «ЗАСИ-20» с длиной электрода 150 мм

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 локальной емкости, что подтверждает выводы, полученные при моделировании.

Для нахождения локальной емкости группы с бездефектными изолированными жилами была использована модель, приведенная на рисунке 6. При варьировании диэлектрической проницаемости материала изоляции и геометрических размеров изолированных жил, составляющих группу, было выявлено, что характер зависимости погонной емкости группы от данных параметров аналогичен зависимости, описывающей емкость цилиндрического конденсатора (3). Таким образом, было решено представить группу в виде «эквивалентного провода» (рисунок 9). Согласно результатам, полученным при моделировании, наибольший вклад в емкость группы скрученных изолированных жил вносит изоляция, находящаяся на поверхности группы, 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 9).

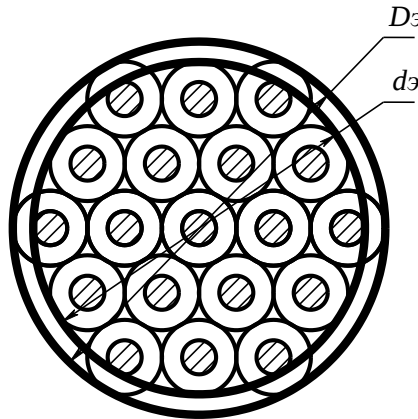


Рисунок 9 – «Эквивалентный провод»

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

$$C_э = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left(\frac{D_э}{d_э}\right)} \quad (12)$$

Для повышения точности полученной математической модели с помощью аппроксимации результатов моделирования были скорректированы геометрические параметры «эквивалентного провода» и формула (12) была преобразована в вид:

$$C_э = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left(\frac{D_э}{d_э} \cdot \left(1,0123 - \frac{0,0364 \cdot d_э}{D_э}\right)\right)} \quad (13)$$

Для проверки достоверности полученной функции было проведено сравнение значений локальной емкости, рассчитанных с помощью формулы (13) и полученных экспериментально при измерении прибором «ЗАСИ-20» емкости групп с количеством жил от 2 до 40. Так как количество жил в группе оказывает косвенное влияние на емкость, то были построены зависимости:

$$C_c = f\left(\frac{D_c}{D_c - d}\right), \quad (14)$$

где D_c - диаметр группы скрученных изолированных жил;

d - толщина изоляции проводов группы.

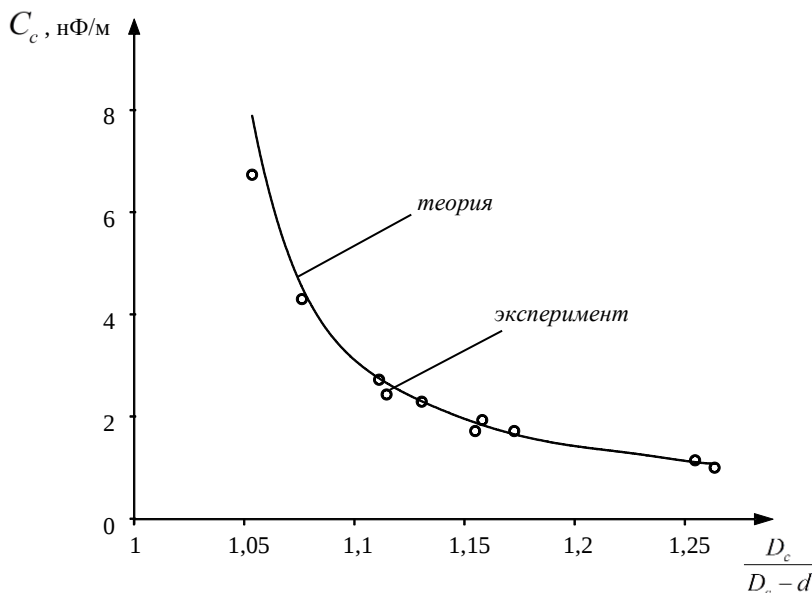


Рисунок 10 –
Теоретическая ($\varepsilon_r = 4,2$)
и экспериментальная
зависимости погонной
емкости группы
изолированных жил от
значения $D_c/(D_c - d)$

Для данной математической модели (13) отклонение теоретической зависимости от практических данных составило не более 10 % (рисунок 10). Таким образом, разработанную математическую модель для определения локальной емкости группы изолированных жил в виде «эквивалентного провода» можно считать достоверной.

Третья глава посвящена практической реализации комплексного метода контроля. Конструкция электрода для электроискрового дефектоскопа должна обеспечивать одинаковую чувствительность к дефектам по всей поверхности кабельного изделия в зоне контроля. Для выполнения этого условия необходима высокая однородность (отклонение не более 5 %) распределения потенциала по поверхности кабельного изделия в контролируемой зоне. Зная минимальное значение переменного испытательного напряжения, используемого при электроискровом контроле (пиковое значение 4 кВ), было выявлено, что расстояние между точками касания электрода и объекта контроля вдоль направления движения кабельного изделия не должно превышать 2 мм, а количество точек касания по поверхности поперечного сечения провода должно удовлетворять неравенству

$$N > \frac{\pi D}{2 \text{ мм}}, \quad (15)$$

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

D – диаметр контролируемого изделия, мм.

Структурная схема электроискрового дефектоскопа «ЗАСИ-20» приведена на рисунке 11. 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 11 – Структурная схема электроискрового дефектоскопа «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 изменении 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 изменению 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 11 условно не показаны).

Дефектоскоп «ЗАСИ-20» обладает следующими техническими характеристиками:

- амплитуда испытательного напряжения (3...22) кВ;

- частота синусоидального испытательного напряжения (500...1500) Гц;
- максимальная электрическая емкость нагрузки 300 пФ;
- максимальная скорость движения контролируемого кабельного изделия 3000 м/мин;
- диапазон измеряемой электрической емкости изоляции (10...300) пФ;
- погрешность измерения емкости $\pm (10 \% + 1 \text{ ед. мл. разряда})$.

На рисунке 12 представлена передняя панель электронного блока электроискрового дефектоскопа.

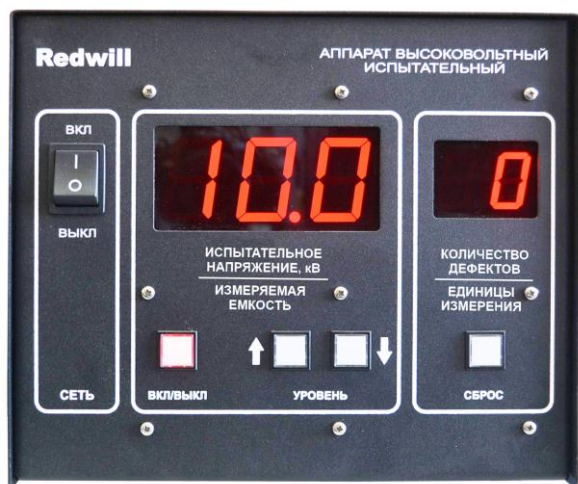


Рисунок 12 – Лицевая панель электроискрового дефектоскопа с функцией контроля емкости «ЗАСИ-20»

Цепочечный электрод для разработанного дефектоскопа с выбранными параметрами (диаметр шариков 1,8 мм, расстояние между цепочками 1,8 мм, длина электрода 150 мм) удовлетворяет требования действующих нормативных документов (ГОСТ 2990-78, ГОСТ Р 54813-2011, РД16 14.640-88) и обеспечивает высокую однородность потенциала на поверхности кабельного изделия в зоне контроля для электроискрового дефектоскопа «ЗАСИ-20».

В четвертой главе представлено устройство для имитации дефектов, необходимое для аттестации блока контроля емкости и регистрации дефектов. Структурная схема данного устройства приведена на рисунке 13. Устройство для имитации дефектов состоит из задающего генератора (ЗГ), усилителя мощности (УМ), высоковольтного реле (Р), блока имитации дефектов (БИД).

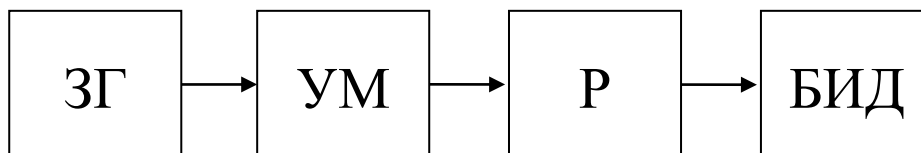


Рисунок 13 – Структурная схема устройства для имитации дефектов:
ЗГ – задающий генератор, УМ – усилитель мощности, Р – высоковольтное реле, БИД – блок имитации дефектов

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. Данный блок имеет 3 режима работы: режим имитации искрового пробоя, режим имитации увеличения толщины изоляции и режим имитации уменьшения толщины изоляции.

При неудовлетворительных результатах аттестации блока контроля емкости проводится настройка данного блока. Методика проведения настройки и внесения результатов в память дефектоскопа подробно изложена в главах 3 и 4.

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 пробоя 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).

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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.
2. 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.
3. Старикова, Н.С. Выбор параметров электроискрового контроля кабельных изделий / Н.С. Старикова, В.В. Редько // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – с. 76-79.
4. 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.

Статьи в изданиях из базы данных Scopus:

5. 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.
6. 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.
7. 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.

Публикации в других научных изданиях:

8. 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.
9. 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).
10. 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.
11. Старикова, Н. С. Влияние параметров испытательного напряжения при контроле состояния изоляции кабельных изделий в высоковольтных испытаниях [Электронный ресурс] / Н.С. Старикова, В.В. Редько // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы VI Научно-практической конференции с международным участием, Томск, 27-30 Мая 2015. – Томск: ТПУ, 2015. – с. 198-201. – Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C18/C18.pdf>.
12. Старикова, Н. С. Исследование возможности технологического контроля целостности изоляции кабельных изделий электроемкостным 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.
13. Старикова, Н.С. Исследование методов контроля целостности изоляции в области слабых и сильных электрических полей / Н.С. Старикова, В.В. Редько // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы IV Научно-практической конференции, Томск, 15-17 Мая 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – с. 145-150.
14. Старикова, Н.С. Исследование достоверности контроля целостности изоляции по изменению электрической емкости в области сильных электрических полей / Н.С. Старикова, В.В. Редько // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-

- конференции, Томск, 16-18 Августа 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – с. 153-159.
- 15.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.
 - 16.Старикова, Н. С. Современные методы контроля изоляции кабельных изделий/ Н. С. Старикова // Современные проблемы науки и образования. – 2015 – № 6. Приложение "Технические науки". – с. 4.
 - 17.Starikova, N. S. Cable insulation control / N. S. Starikova // Современные проблемы науки и образования. – 2015 – № 6. Приложение "Технические науки". – с. 5.
 - 18.Starikova, N.S. Efficiency of cable insulation control in weak and strong electric fields / N.S. Starikova // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы V научно-практической конференции с международным участием, Томск, 19-23 Мая 2014. – Томск: ТПУ, 2014. – с. 242-244.
 - 19.Starikova, N. S. Electrocapacity method of insulation quality control of cable product / N. S. Starikova // Электронные приборы, системы и технологии: сборник научных трудов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22-27 октября 2012. – Томск: ТПУ, 2012. – с. 136-139.
 - 20.Starikova, N. S. The methods of decreasing the influencing factors on the results of cable insulation control carried out with the complex methods / N. S. Starikova, V.V. Redko // Recent advances on systems, Signals, control, communications and computers: proceedings of the 7th international conference on sensors and signals (SENSIG '15)», Budapest, Hungary, 12-14 декабря 2015. – WSEAS Press, 2015. – с. 178-181.
 - 21.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.