Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого
Институт энергетики и транспортных систем
Кафедра «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»

Диссертация допущена к защите
Зав. кафедрой, д.т.н., профессор
_____В.В. Титков
«____»_____2016 г.

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
МАГИСТРА

Комбинированный подход к регулированию электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт высокого напряжения

Направление: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Магистерская программа: «Техника и физика высоких напряжений»

Выполнил:
студент гр. 63213/3 _____Д.А. Селезнёв

Руководитель:
К.т.н., доцент _____Г.В.Грешняков

по охране труда:
К.т.н., профессор _____К.Р. Малаян

г. Санкт-Петербург
2016 год

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт энергетики и транспортных систем
Кафедра «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника.»

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой

_____ Титков В.В.
(подпись)

«____» _____ 2016 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Дипломник на соискание квалификации магистра
(бакалавра, специалиста)

Селезнёв Дмитрий Александрович
(Фамилия, имя, отчество)

учебная группа 63213/3.

1. Тема дипломной работы:

«Комбинированный подход к регулированию электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт высокого напряжения»

Утверждено на заседании кафедры:
Протокол « » от « » 2016 г.

2. Срок представления выпускной квалификационной работы к защите
«____» _____ 2016 г.

3. Исходные данные для исследования:
Научно-техническая литература .

4. Перечень разделов выпускной квалификационной работы:
4.1. Введение.
4.2. Литературный обзор.
4.3. Методическая часть.
4.4. Экспериментальная часть.
4.5. Список литературы.

4.6. Приложение.

5. На защиту представляются:

- задание на выпускную квалификационную работу;
- литературный обзор, схема замещения кабельной разделки;
- смоделированная модель стресс-конуса соединительной и концевой высоковольтной муфт;
- экспериментально измеренная зависимость коэффициента теплопроводности КМ на основе ПЭНП от процентного содержания УНВ
- презентация пояснительной записки в PowerPoint;

Руководитель выпускной квалификационной работы:

_____ к.т.н., доцент Грешняков Г.В.

Задание принял к исполнению:

_____Селезнёв Д.А.

РЕФЕРАТ

Работа содержит 115 страниц, 50 рисунков, 17 таблиц.

Ключевые слова: СТРЕСС-КОНУС, ТРУБКА-РЕГУЛЯТОР, РЕФРАКЦИОННЫЙ СПОСОБ ВЫРАВНИВАНИЯ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ВЫРАВНИВАНИЯ, РЕЗИСТИВНЫЙ (ИМПЕДАНСНЫЙ) МЕТОД ВЫРАВНИВАНИЯ, ELCUT PROFESSIONAL, КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ВЫРАВНИВАНИЯ.

В этой работе описываются основные типы кабельных муфт и места их применения. Так же показано распределение электрического поля после разделки кабеля. Характер распределения силовых линий по длине разделки объясняется из её схемы замещения. Следуя из схемы замещения, делаем вывод о способах регулирования поля, откуда рассматриваем основные методы, используемые в высоковольтных муфтах силовых кабелей. В наше время в высоковольтных муфтах используется комбинированный метод выравнивания поля, то есть геометрический и рефракционный в совокупности. В Elcut Professional были рассчитаны и оптимизированы два стресс-конуса для концевой и соединительной муфт. В данное время проводятся испытания кабельной системы с применением стресс-конусов полученной конструкции в городе Подольск, Московская область. Более экономичным и рациональным является использование трубки-регулятора, которая выравнивает поле с помощью резистивного метода выравнивания. Подобные трубки, использующие данный метод применяют в кабелях на низкое и среднее напряжение. В данной работе были предоставлены данные результатов тепловых исследований образцов, матрицей которых является полиэтилен низкой плотности LE 4423, а добавка - углеродные нановолокна (УНВ) с различным процентным содержанием.

В результате исследования был предложен наиболее выгодный вариант добавления УНВ в матрицу ПЭ для получения наилучших характеристик необходимых для стабильной работы кабельной линии. Были сформулированы основные тезисы для создания оптимальной системы конструкции трубки-регулятора.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 7
ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР 8
1. Назначение и типы кабельных муфт 8
2. Разделка кабеля. Распределение электрического поля разделки. 11
3. Электрическая схема замещения разделки 14
3.1. Способы регулирования поля 18
4. Современные технологии производства кабельных муфт 24
4.1. Требования к материалам. 24
МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ 30
5.1. Дифференциальные уравнения распределения электрического поля в концевой кабельной разделке 30
5.2. Регулирование электрического поля омической составляющей поверхностной проводимости σ_S 32
6. Моделирование стресс конуса концевой и соединительной муфты. Нахождение оптимальной конструкции 35
6.1. Моделирование стресс-конуса концевой муфты. 35
6.1.1. Процесс оптимизации 37
6.1.2.Итоги моделирования 40
6.2. Моделирование стресс-конуса соединительной муфты 42
6.2.1. Исследование зависимости напряженности в зоне 3 от длины высоковольтного электрода 45
6.2.2. Исследование зависимости напряженности электрического поля в зонах 1,2 от длины дифлектора. 47
6.2.3. Исследование зависимости напряжённости электрического поля от угла наклона дифлектора к оси кабеля (Зона 1). 47
6.2.4. Исследование напряжённости электрического поля в Зонах 1 и 2 от расстояния между высоковольтным электродом и дифлектором. 48
6.2.5. Влияние проводимости высоковольтного электрода на напряженность поля в Зоне 2. 49
6.2.6. Итоги моделирования соединительной муфты 50
6.2.7. Распределение поля в реальной конструкции 53
7. Трубка-регулятор. Основные моменты 55
7.1 Предварительные варианты проекта конструкции 55

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ 57
8. Создание опытных образцов для трубки-регулятора. 57
8.1. Исходные материалы 57
8.2. Получение композитов 57
8.3. Исследование структуры композитов при помощи СЭМ 59
9. Измерение теплопроводности на измерителе ИТ- λ-400 62
9.1. Условия эксплуатации и технические данные: 62
9.2. Устройство и принцип работы 62
9.3. Порядок проведения эксперимента 66
9.4. Результаты проведённых исследований 66
10. Испытания. 69
10.1. Программа и методика предварительных электрических испытаний опытных образцов стресс конусов кабельных муфт на напряжение 110 кВ в составе кабельной системы. 69
10.1.1. Объект испытания 69
10.1.2. Цель испытаний 70
10.1.3. Условия проведения испытаний 71
10.1.4. Программа проведения испытаний, методика испытаний. 71
10.1.5. Испытательные установки и средства измерений, используемы при проведении испытаний 80
10.1.6. Обработка результатов испытаний. 81
10.2. Протокол испытаний двух прототипов стресс-конусов концевых муфт 110 кВ разработки ООО "НИИ "Севкабель" 82
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ 84
11.1. Общие сведения, средства защиты 84
11.2. Меры безопасности при работе с измерителем ИТ- λ-400 87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 88
ПРИЛОЖЕНИЕ 92

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко распространены кабельные линии высокого напряжения. Для успешной конкуренции требуется ускоренная разработка кабельной арматуры, включая соединительные и концевые кабельные муфты. В работе описаны современные методы выравнивания поля. Проведён численный анализ распределения электрического поля, по результатам которого предложены свойства материалов составляющих стресс-конус и конфигурация его активных элементов. Так же сделаны основные замечания, в результате которых возможно возникновение проблем при эксплуатации, монтаже и производстве стресс-конусов. Были сделаны первые образцы с повышенной теплопроводностью для последующего создания трубки-регулятора.

Задачи разработки и производства конкурентоспособной кабельной арматуры относятся к одним из наиболее высокоинтеллектуальных и высокотехнологичных задач современной кабельной техники. Их решение позволит разработать и исследовать муфты кабелей, обеспечивающих существенное снижение электрического поля и исполнение этих муфт в соответствии с современным уровнем усовершенствования технологической базы в разделе разработки и производства изоляционных материалов и полупроводящих компаундов. Для подбора необходимых физических параметров материалов требуется предварительное математическое моделирование электрического поля муфт, с применением специального программного комплекса ELCUT Professional.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1. Назначение и типы кабельных муфт

Кабельная муфта - устройство для электрического и механического соединения кабелей в кабельную линию, а также для присоединения кабельной линии к электроустановкам и ЛЭП. Основными типами муфт являются соединительные и концевые муфты.

Кабели поставляются заказчику строительными длинами, на кабельных барабанах. Строительная длина – по согласованию, из здравого смысла обычно от 250 до 500 м.

При помощи **соединительных муфт** (СМ) осуществляется электрическое и механическое соединение строительных длин, защиты мест соединения от механических повреждений и электрических пробоев изоляции. СМ бывают с прямым соединением экранов и с разделением экранов (транспозиционные).

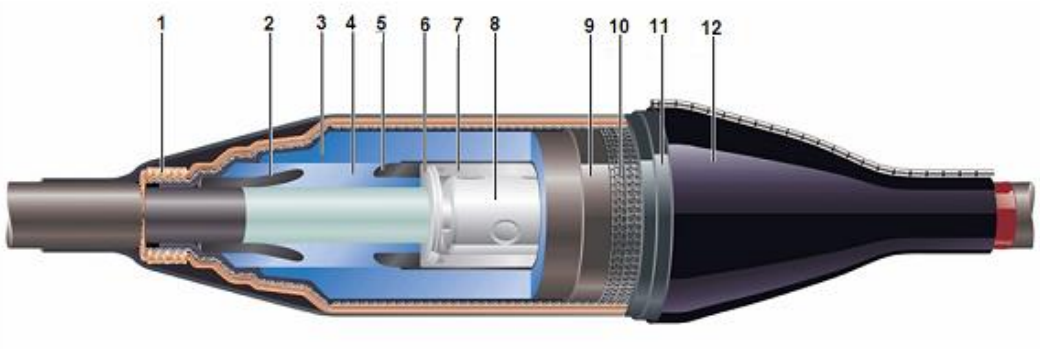


Рис.1.Основные элементы конструкции соединительной муфты XLPE – кабеля с прямым соединением экранов.

(1) – механический соединитель. (2) – элемент управления полем интегрированный в адаптер (регулирующий слой); (3) – главное изоляционное тело муфты. (4) – кабельный адаптер; (5) – элемент управления полем интегрированный в адаптер; (6) – фиксирующие кольца. (7) – металлический экран – «Клетка Фарадея». (8) – механический соединитель (гильза) со срывающимися болтами. (9) – полупроводящий слой;(10) – медная сетка; (11) – термоусаживаемая трубка. (12) – термоусаживаемая манжета с интегрированной защитой от проникновения влаги.

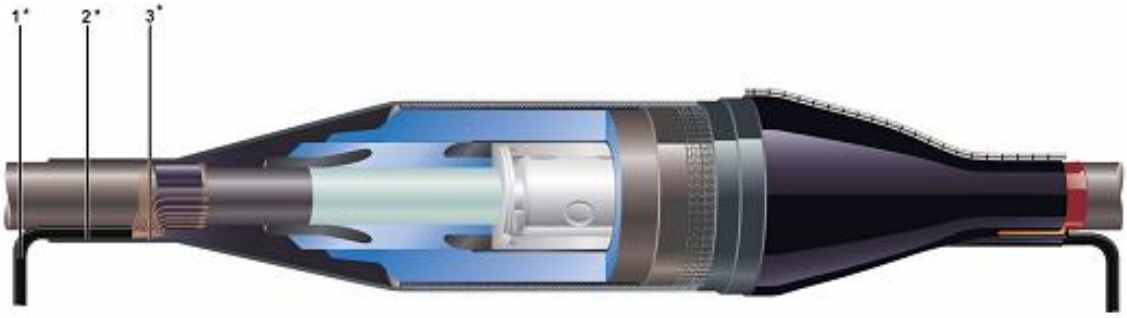


Рис. 2.Соединительная муфта XLPE – кабеля с разделением экранов.

(1) - Термоусаживаемая трубка для изоляции и защиты выведенного экрана; (2) - Герметизирующий элемент (клипса); (3) - Вывод экрана из муфты.

Концевые муфты (КМ) помогают подключить кабельную линию к воздушной или трансформатору на воздухе (КМ наружной установки). Также к трансформаторам в масле, распределительным устройствам с элегазовой изоляцией (КРУЭ) – КМ внутренней установки.

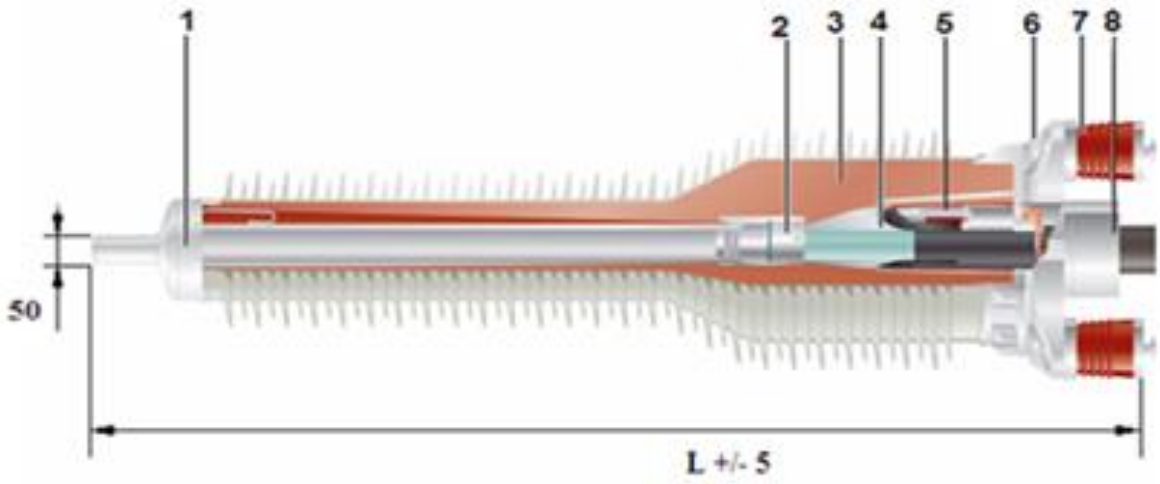


Рис.3. Основные элементы конструкции концевой муфты XLPE – кабеля наружной установки.

(1) – контактный вывод. (2) – болтовой механический наконечник с мульти-контактным разъемом. (3) – полимерный корпус со встроенным мульти-контактным разъемом. (4) – конус выравнивания напряженности электрического поля; (5) – металлическое подпружинивающее кольцо. (6) – плита основание из коррозионно-стойкого сплава; (7) – опорные изоляторы. (8) – система ввода и герметизации.

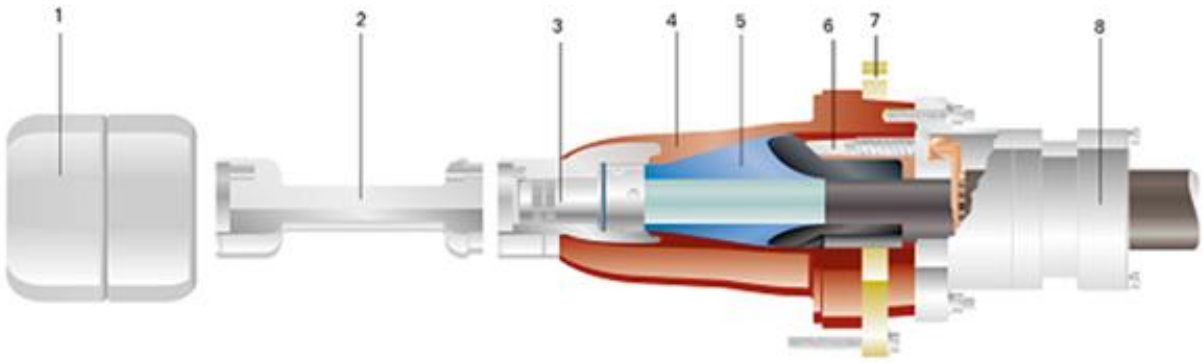


Рис. 4. Чертеж концевой муфты для подключения к КРУЭ и трансформаторам.

(1) - Экран «Анти - корона»; (2) - Адаптер; (3) - Мультиконтактный наконечник с самосрывающимися болтами. (4) - Эпоксидный изолятор со встроенным мультиконтактным электродом. (5) - Стресс-конус выравнивания напряженности электрического поля из силиконовой резины; (6) - Подпружиненное компрессионное кольцо. (7) - Фиксирующее кольцо. (8) - Система ввода и герметизации фиксирующая экран кабеля и броню.

2. Разделка кабеля. Распределение электрического поля разделки.

Разделка кабеля – целенаправленное удаление защитных покровов, оболочек, экранов с соблюдением определённых правил и требований, регламентированных набором документов (ГОСТ, МЭК, инструкции). Пример разделки кабеля с бумажно-пропитанной изоляцией представлен на рисунке 5 и 6. Разделка предваряет этап монтажа кабельных муфт [20].

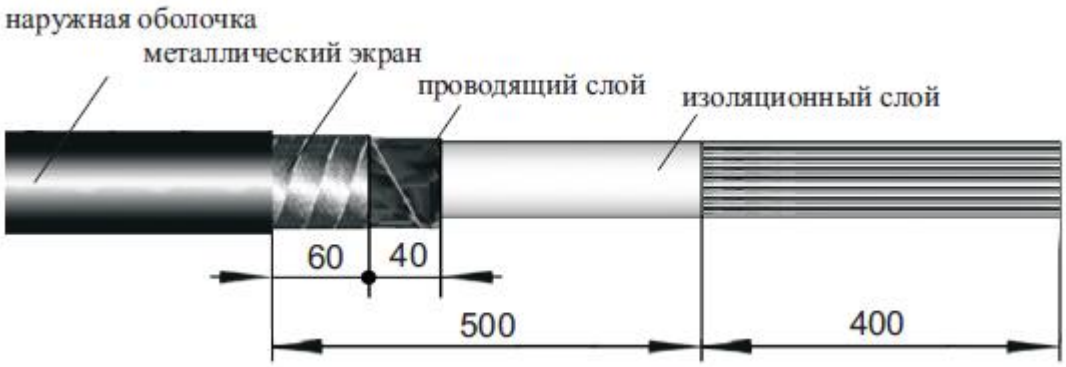


Рис.5. Вид разделки кабеля перед монтажом соединительной муфты:

Рис.6. Вид кабеля в разделке.

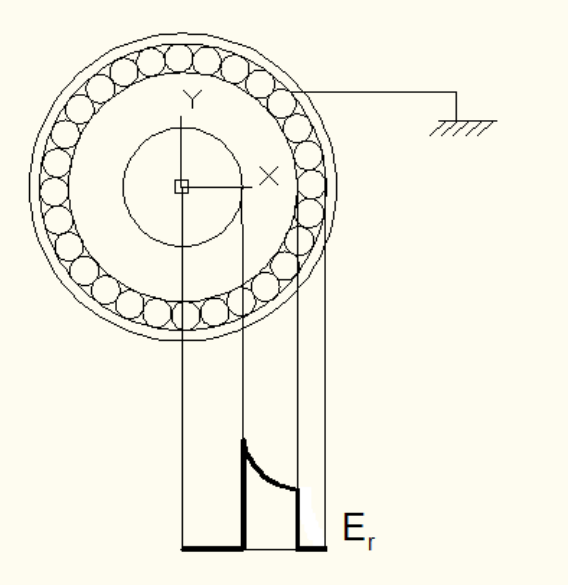


Рис.7. Характер распределения напряжённости электрического поля по сечению кабеля.

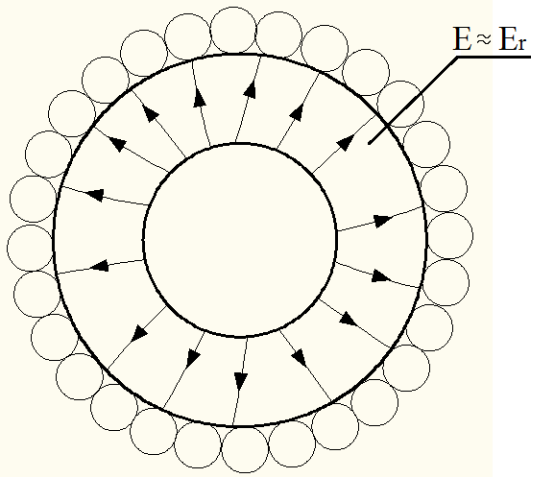


Рис.8. Картина поля в сечении кабеля в рабочем режиме

Разделка кабеля предполагает нарушение заводской изоляции, изменение его конструкции, что неизбежно ведёт к нарушению закона распределения электрического поля в изоляции и в окружающем пространстве [21]. Появляется касательная (тангенциальная) составляющая напряженности электрического поля, направленная вдоль поверхности изоляции (рис.9). Она является причиной возникновения скользящего разряда от жилы к трансформированному в результате разделки, заземлённому экрану.

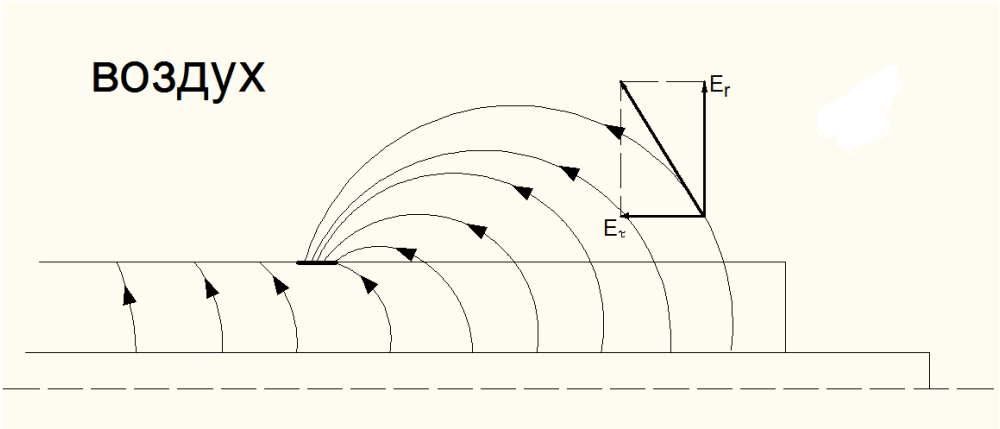


Рис. 9. Две составляющие поля в разделке.

Избежать пробоя не удаётся без создания дополнительной усиливающей изоляции. Это - основной вопрос при разработке кабельных муфт.

При конструировании усиливающей изоляции возможны два варианта:

1. Дополнительное изолирование без принудительного регулирования поля.

В этом варианте избегают пробоя за счёт увеличения толщины дополнительной изоляции муфты. Но тогда это приведёт к увеличению габаритов арматуры, а так же эффективность данного способа обратнопропорциональна классу напряжения.

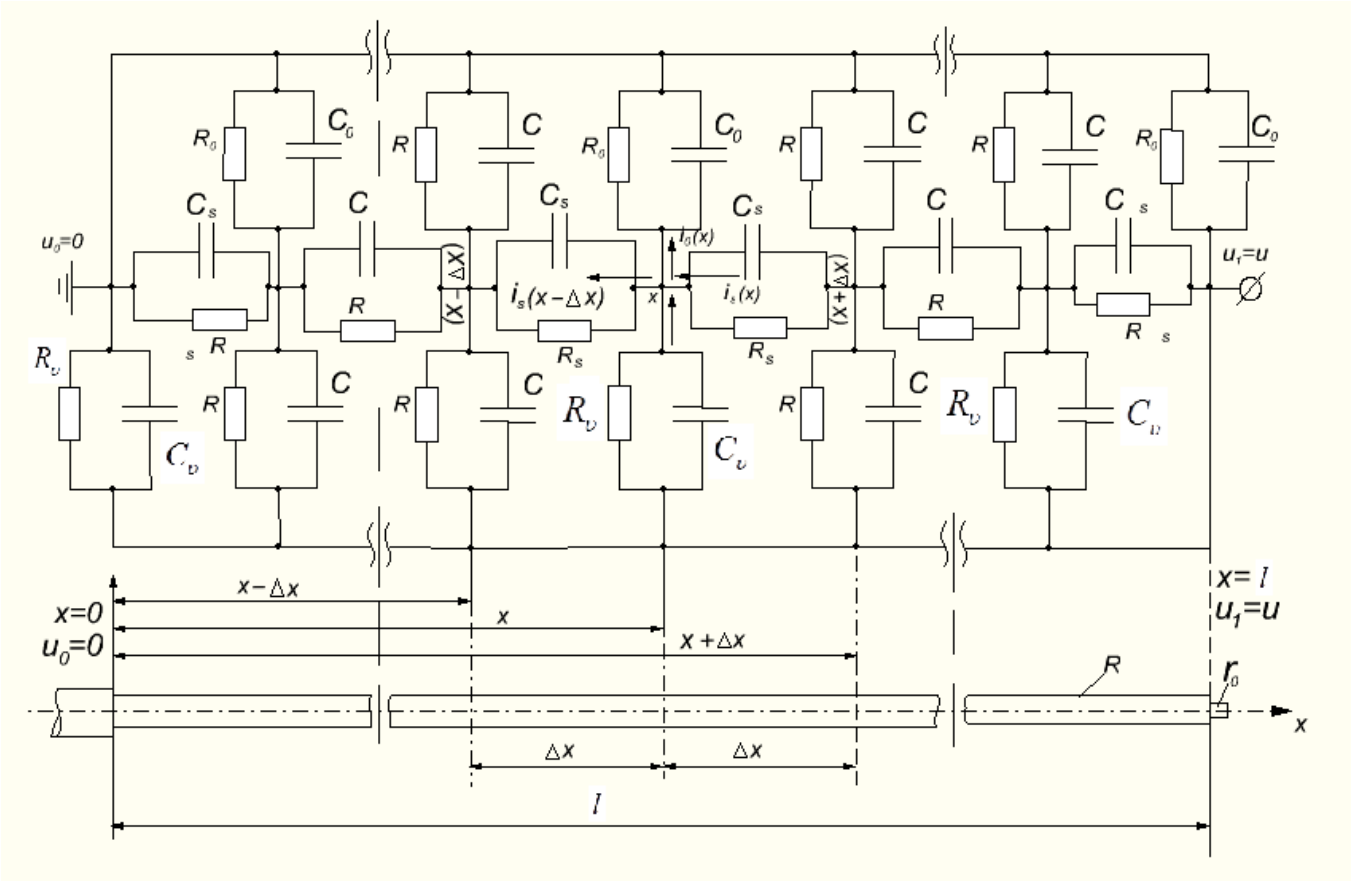
2. Регулирование поля в усиливающей изоляции.

Его сложнее реализовать, но при этом эффективность данного способа высока для любого класса напряжения и позволяет сохранить габариты.

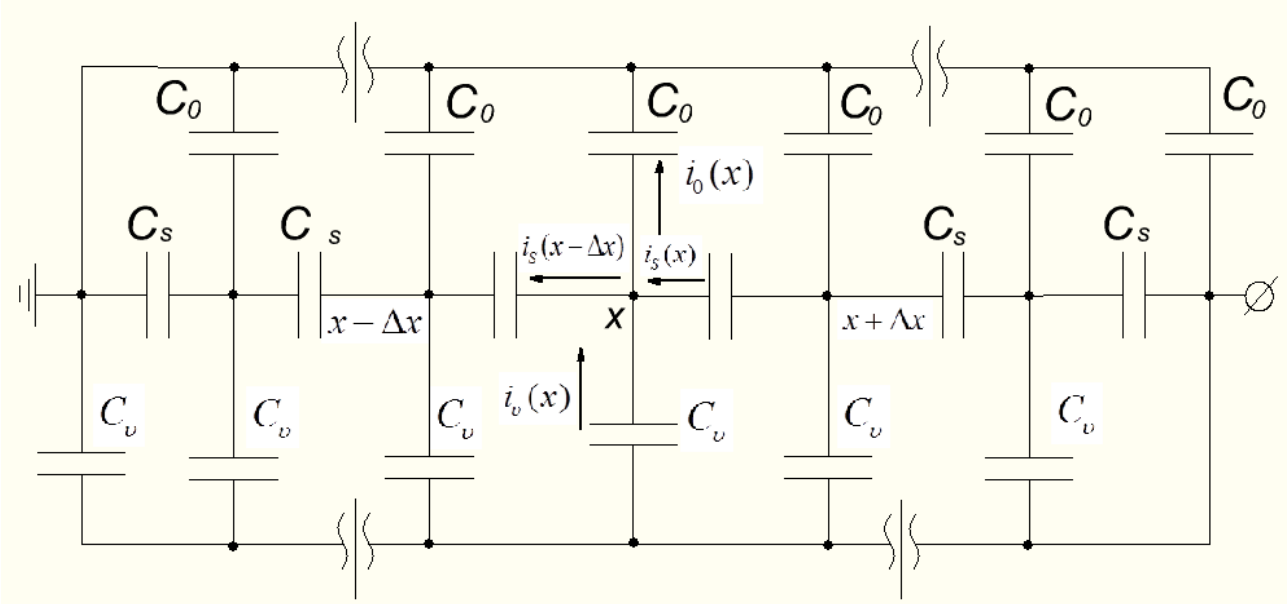
Характер распределения напряженности по длине разделки можно понять, анализируя электрическую схему замещения, представленную на рисунке 10А. Она представляет собой цепочку продольных и поперечных комплексных проводимостей, $\dot{\gamma}_S, \dot{\gamma}_\upsilon, \dot{\gamma}_0$.

3. Электрическая схема замещения разделки

А)



В)



C)

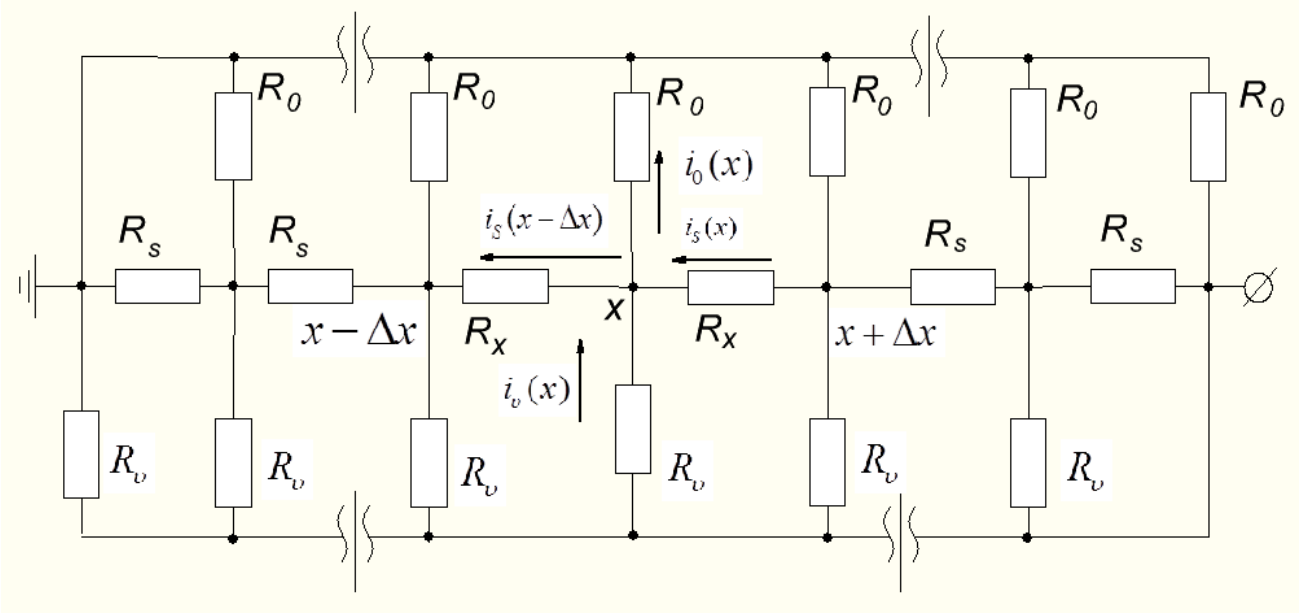


Рис. 10. Схема замещения концевой кабельной разделки.

A – в общем случае;

B – для кабеля переменного тока;

C – для кабеля постоянного тока.

Введём следующие обозначения:

$U_{ж}$, $u_ж$ - потенциал жилы (действующее и мгновенное значения);

U_0, u_0 - потенциал экрана (действующее и мгновенное значения);

U_X, u_x - потенциал (·) у поверхности кабельной разделки, отстоящей на расстоянии x от края экрана (действующее и мгновенное значения);

x - координата $\forall$ (·) поверхности разделки;

$x = 0$ - начало отсчёта – край экрана;

l -длина кабельной разделки;

r -радиус жилы;

R -наружный радиус изоляции;

r_x -радиус произвольной цилиндрической поверхности изоляции;

E, e - напряжённость электрического поля (E_τ -тангенциальная, E_r - радиальная);

E_x, e_x -напряжённость электрического поля в точке x, $кВ/мм$;

C_S -продольная ёмкость единицы длины кабельной разделки, $Ф$;

R_S -продольное сопротивление единицы длины кабельной разделки, $Ом$;

σ_S - активная составляющая продольной проводимости, $См$;

C_υ - ёмкость по отношению к жиле единицы длины кабельной разделки, $Ф$;

R_υ - сопротивление изоляции в направлении к жиле кабельной разделки, $Ом$;

σ_υ - активная составляющая проводимости изоляции по направлению к жиле единицы длины кабельной разделки;

C_0 - ёмкость по отношению к земле ед. длины кабельной разделки;

R_0 -сопротивление изоляции в направление к земле ед. длины кабельной разделки;

σ_0 - активная составляющая проводимости изоляции в направление к земле;

$\dot{\gamma}_S = \sigma_S + j\omega C_S$ -- комплексная продольная проводимость;

$\dot{\gamma}_\upsilon = \sigma_\upsilon + j\omega C_\upsilon$ -- комплексная поперечная проводимость в направление к жиле;

$\dot{\gamma}_0 = \sigma_0 + j\omega C_0$ -- комплексная поперечная проводимость по направлению к земле $i_S(x)$ - ток (продольный) по поверхности единицы длины кабельной разделки в (·)x;

$i_\upsilon(x)$ -ток через изоляцию на жилу единицы длины кабельной разделке в $(\cdot)x$;

$i_0(x)$ - ток через изоляцию на землю единицы длины кабельной разделке в $(\cdot)x$;

ρ_υ -удельное объёмное сопротивление изоляции (для СПЭ - $10^{17} Ом \cdot м$);

ε -относительная диэлектрическая проницаемость (ПЭ-2,3; масло-2,2; бумага-4,0).

Из схемы замещения следует, что причиной неравномерного распределения напряжённости является наличие ёмкостей и проводимостей по отношению к земле и жиле. Большее искажающее влияние имеет $\dot{\gamma}_\upsilon$ -

проводимость по отношению к жиле, которая по своей величине соизмерима с основной продольной проводимостью $\dot{\gamma}_S$. [26].

Так как необходимо выдержать определённую толщину изоляции для каждого класса напряжения и определённого диэлектрика, величину C_u, являющуюся основной причиной неравномерного распределения поля, уменьшить существенно нет возможности. Поэтому регулирование продольной составляющей электрического поля сводится к минимизации влияния этой ёмкости C_u на распределение этого поля.

В муфтах силовых кабелей высокого напряжения могут быть использованы следующие способы регулирования поля:

- Регулирование потенциала на поверхности разделки с помощью концентрической конденсаторной подмотки;
- Регулирование продольной проводимости $\dot{\gamma}_S$ изоляции с помощью конденсаторных элементов (реактивная составляющая);
- Регулирование ёмкости кабельной разделки по отношению к земле C_0.

3.1. Способы регулирования поля

Регулирование поля омической составляющей поверхностной проводимости σ_S, является универсальным способом регулирования поля вдоль кабельной разделки, и он может быть применён с одинаковым успехом для кабельных муфт переменного и постоянного тока.

Способ регулирования поля изменением ёмкости по отношению к земле C_0 основан, как видно из схемы замещения, на регулировании ёмкостного тока i_{C_0}, который стремится компенсировать ток смещения i_{C_υ}.

Проводящий заземлённый кожух должен находиться достаточно близко к жиле, что конструктивно позволяет обеспечить достаточно большое постоянное значение C_0. Подбирая необходимую форму заземлённого кожуха, задаются требуемые значения C_0 по длине разделки, можно снижать неравномерность электрического поля в муфте. В оптимальном случае экран должен обеспечить равенство значений токов смещения изоляции концевой разделки $i_{C_0} = i_{C_\upsilon}$.

Если говорить о диэлектрической проницаемости усиливающей изоляции концевой муфты, то увеличивая её значение, по сравнению с соответствующим параметром материала изоляции самого кабеля, можно за счёт этого увеличивать значение C_0, что приведёт к росту значения ёмкостного тока i_0, компенсации величины i_υ и, следовательно, к выравниванию продольного поля муфты.

Сегодня развитие технологической базы позволяет получать диэлектрические материалы с $\varepsilon = 20 \div 22$, что на порядок превышает соответствующий параметр современного изоляционного кабельного материала – XLPE – сшитого полиэтилена (СПЭ) с $\varepsilon = 2.2 \div 2.3$. К таким изоляционным материалам следует отнести этиленпропиленовую (EPDM) и кремнийорганическую резину (силиконовую) со специальными добавками.

Проанализируем распределение поля в разделке и вблизи неё (рис.11).

Распределение поля в срезе оболочки кабеля показано на рис.14. По нему видно, что концентрация силовых линий вблизи от среза оболочки весьма увеличивается по сравнению с распределением поля в целом кабеле. Коэффициент неоднородности: 5-10.

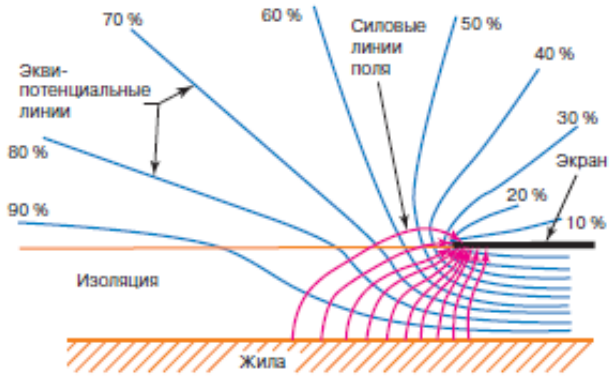


Рис.11. Резко неравномерное поле в зоне разделки при обрезе экрана.

Как уже отмечалось выше, в нашем случае применимы два метода регулирования поля в кабельных муфтах на высокое напряжение – регулирование C_0 за счёт выносного заземлённого экрана (*геометрический*) и за счёт увеличения значения диэлектрической проницаемости усиливающей изоляции муфты (*рефракционный*).

Рассмотрим более подробно эти методы:

Геометрический способ выравнивания базируется на постепенном расхождении экрана, путём наложения на место среза оболочки конуса из проводящего материала (см. рис.12).

Неравномерность поля при этом значительно уменьшается, и наиболее высокие уровни потенциала распределяются внутри первичной изоляции, что видно по расположению равно потенциальных линий на рисунке.

Подобное выравнивание выполняется наращиванием изоляции сразу за срезом оболочки кабеля при помощи лент.

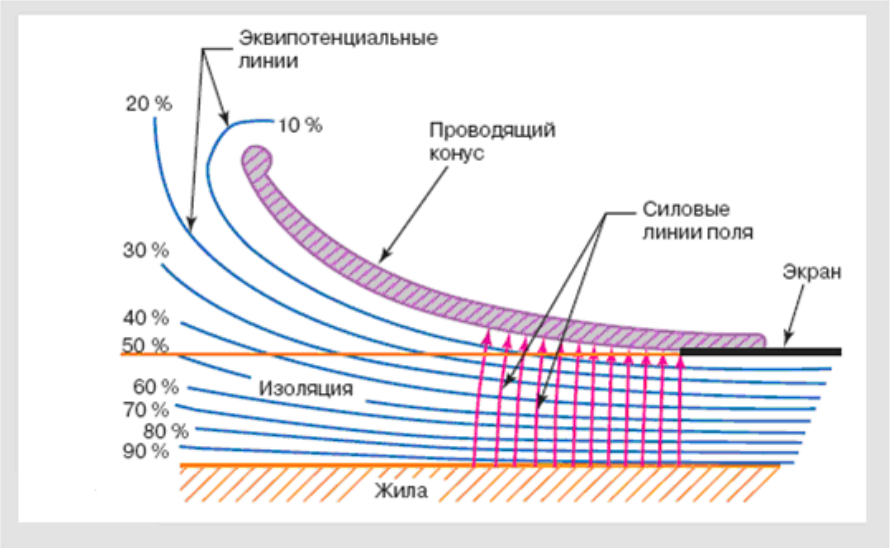


Рис.12. Геометрический способ выравнивания.

Рефракционный способ регулирования основан на наложении на разделку кабеля материала с большой относительной диэлектрической проницаемостью ε, на порядок выше этого же параметра основной изоляции (рис.13) [23].

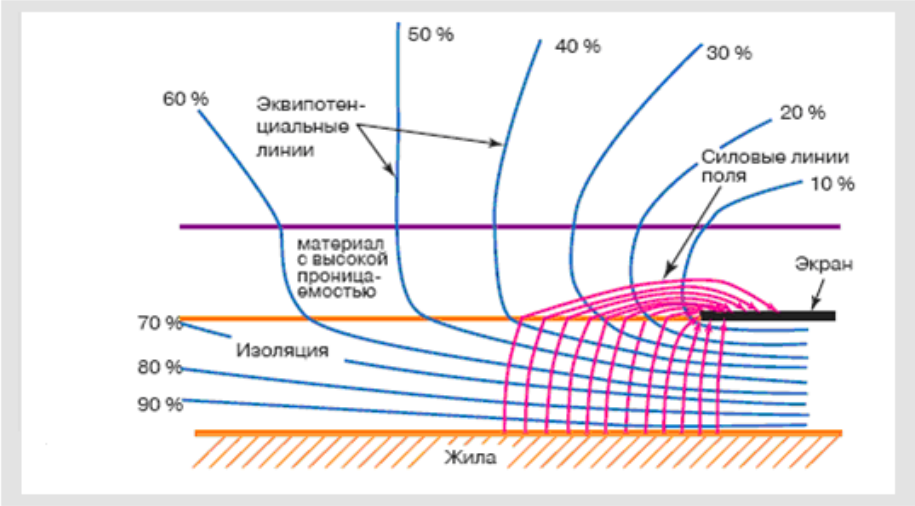


Рис.13. Рефракционный способ выравнивания.

На границе между двумя диэлектриками линии напряженности электрического поля меняют направление, вследствие чего концентрация силовых линий сильно уменьшается. Изменение электрического поля определяется углом отклонения линий, проходящих из одного материала в другой, который определяется отношением диэлектрических проницаемостей этих материалов (рис.14). Ясно, что чем больше разница между ε, тем

существеннее преломление эквипотенциальных линий поля в месте соприкосновения двух изоляций .

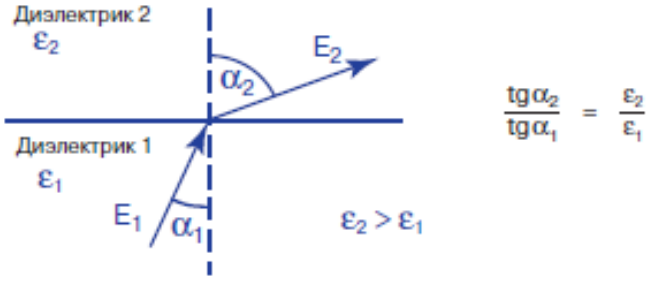


Рис.14. Прохождение силовых линий из одного диэлектрика в другой.

Так же есть способ снижения неравномерности напряженности электрического поля путём регулирования активной составляющей продольной проводимости $\sigma_S(R_S)=\frac{1}{R_S}$. Данный способ принято называть *импедансным (резистивный)*, а в случае нелинейной зависимости $\gamma_S(x)$ - нелинейным импедансным.

Для импедансного метода выравнивания необходимо привести критически высокую область поля в такое токопроводящее состояние, чтобы пространственный заряд, сформировавшийся там и создающий поле, уменьшил концентрацию силовых линий. Материал должен иметь нелинейную зависимость σ(E), которая резко возрастает от значения малой проводимости σ(0) до высоких значений в областях поля где △E близка к $E_в$ (напряжённость включения). Величина переменного поля $E_в$ показывает, где напряженность поля увеличивается,[15].

Важно, что переход из состояния высокого сопротивления в состояние высокой проводимости имеет реверсивный характер. Это обеспечивает повтор активации и малые потери.

При определённых заданных требованиях выдвигаемых электрическому устройству, например, определённое приложенное испытательное напряжение, максимально допустимое значение

электрического поля в определенных местах и для конкретных условий, можно оценить в E-σ плоскости, где кривая σ(E) должна лежать в месте эффективного выравнивания поля материала (рис. 15). Этот вопрос имеет решающее значение, при разработке материала, сглаживающего электрическое поле.

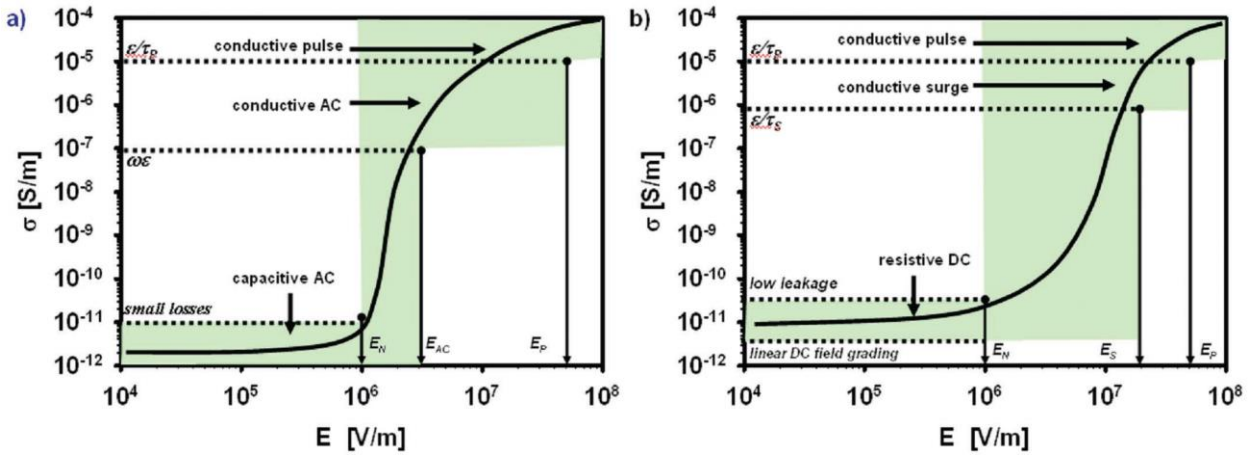


Рис.15. Качественная иллюстрация того, где располагается область, в E -σ плоскости для σ (E) кривой идеального нелинейного резистивного сглаживающего поле материала: (а) при переменном токе, (б) при постоянном токе.

Электрическое поле в изоляции кабеля вне области арматуры и центра арматуры распределяется концентрически и цилиндрически. Без выравнивания мы имеем геометрически сындуцированное очень большое увеличение поля вблизи отклоняющегося края и в верхней тройной точке. В случае если мы используем нелинейный материал, в принципе это увеличение может быть передвинуто на поверхность[6],[7],[8].

При отсутствии в поле выравнивающей трубки, когда имеет место только изоляция кабеля и совместная изоляция, поле может быть сосредоточено только в одном из двух изоляционных материалов. Если усиливающая изоляция не менее (или более) проводящая, чем изоляция кабеля, то присутствует сильное усиление поля в последнем материале, вблизи края дефлектора (рис. 16 a и b). В противном случае (рис. 16 c), усиление поля происходит в верхней тройной точке. Отношение проводимостей в иллюстративных примерах с (a) до (c) 100, 1 и 0,01

соответственно. Этот эффект обеспечивает серьезную проблему работоспособности для постоянного режима, потому что практически невозможно уравнять значения сопротивлений кабеля и материала усиливающей изоляции в интервале менее 1, 2 порядков по всему температурному диапазону. Тем не менее, надежность может быть установлена, если два изоляционных материала полностью (топологически) разделены сглаживающей трубкой с соответствующей высокой проводимостью (по крайней мере, в 100 выше по сравнению с изолирующими материалами). Это разделение, достигается соединением полупроводящего экрана с землей, что дает определенное падение потенциала вдоль трубки, которая контролирует распределение поля. На рисунке 16d показано, что концентрация поля, таким образом, уменьшается, и отношение сопротивлений изоляционных материалов становится ненужным [9],[12],[13].

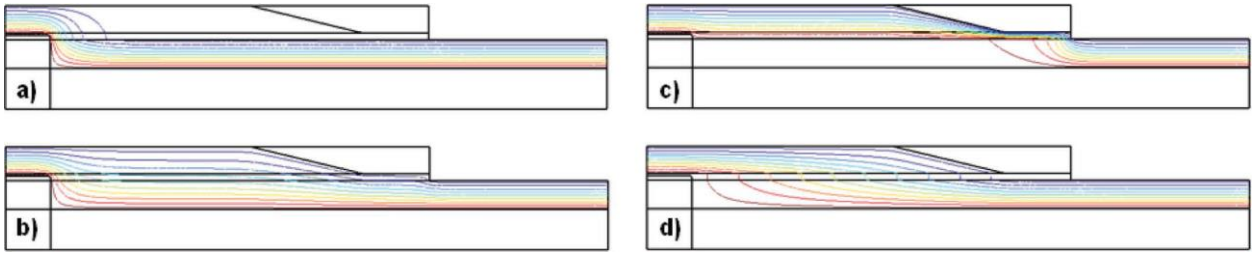


Рис. 16. Распределение поля при разных соотношениях проводимости изоляции кабеля и совместной изоляции, а так же при наличии сглаживающей трубки.

4. Современные технологии производства кабельных муфт

Для современных кабельных систем, в которых кабели изолированы полимерными материалами (СПЭ, этиленпропиленовая резина), кабельная арматура изготавливается также на основе полимерных материалов, а при монтаже применяются принципы термической и холодной усадки [1].

В обоих случаях применяются материалы кристаллической сетчатой структурой, которая даёт возможность им растягиваться и сжиматься, возвращаясь к начальной форме. В технологии холодной усадки - это EPDM (этиленпропиленовая) или кремнийорганическая (силикон) резины, а в технологии термоусадки – термореактивные полимеры EVA (полиэтилен).

В ходе изготовления трубку нагревают до температуры плавления кристаллической структуры. После её растягивают, охлаждают, и оставляют в растянутом состоянии, в котором поставляют потребителю [2]. При монтаже трубки на кабель, её снова нужно нагреть. Повторный нагрев снова приводит к плавлению кристаллической структуры, и материал возвращается в начальное состояние.

4.1. Требования к материалам.

Начально было выяснено, что при рефракционном способе регулирования поля в муфтах желательно использование материалов, у которых значение диэлектрической проницаемости 20-35, а значение электрической прочности – выше $4.7 кВ / мм$.

Материал должен обладать определенными физическими параметрами:

- *высокое значение относительного удлинения*;
- *модуль упругости должен быть достаточно низок*.

Предъявляемые требования к материалу:

- модуль упругости при удлинении 100 % должен быть менее 1,7 кПа;
- относительное удлинение при разрыве 450 %;

- материал должен сохранять малую остаточную деформацию в течение 40 и более лет эксплуатации муфты, обеспечивая на протяжении всего срока службы требуемое значение внутреннего давления в месте стыка с поверхностью кабеля.

Обеспечение высокого значения диэлектрической проницаемости. Высокое значение диэлектрической проницаемости обеспечивается путём добавления в матрицу полимерного материала необходимых компонентов.

За базовый полимер была выбрана EPDM-резина из-за её стабильных электрических характеристик. Был проведен ряд опытов с различными дополнительными включениями.

В таблице 1 приведены значения диэлектрической проницаемости и коэффициенты диэлектрических потерь саженаполненных материалов – нитрилов и EPDM-резины при различных температурах, а в таблице 2 – характеристики основных наполнителей, тестируемых для увеличения диэлектрической проницаемости эластомера.

Таблица 1

Температура, (°C)	Диэлектрическая проницаемость (ε)		Коэффициент диэлектрических потерь (%)	
	Нитрил	EPDM	Нитрил	EPDM
23	22	25	5	15
90	41	25	73	18
105	70	24	103	21
120	110	24	144	26
130	175	23	173	28

Таблица 2

Наполнитель	Удельный вес	Размер частиц (мкм)	Значение диэлектрической проницаемости
TiO2	4,25	2	90-110
B2TiO3	5,95	2-44	1000 – 12000
алюминий	2,71	5-25	бесконечное
медь	8,91	≈ 20	бесконечное
серебро	10,50	≈ 30	бесконечное
сажа	1,85	0,02-0,04	бесконечное

Исследование показало каков характер влияния на свойства резины наполнителей:

Керамика → изменение ёмкости;

Металлы → изменение проводимости;

Сажа → изменение сопротивления.

Использование в качестве наполнителя сажи. Исследования показали, что самым эффективным материалом в этом направлении является сажа.

Рисунок 17 иллюстрирует эффект влияния концентрации сажи на

электрическую прочность и на диэлектрическую проницаемость КМ. При этом имеет место резкое снижение электрической прочности, когда диэлектрическая проницаемость становится менее 10.[4]

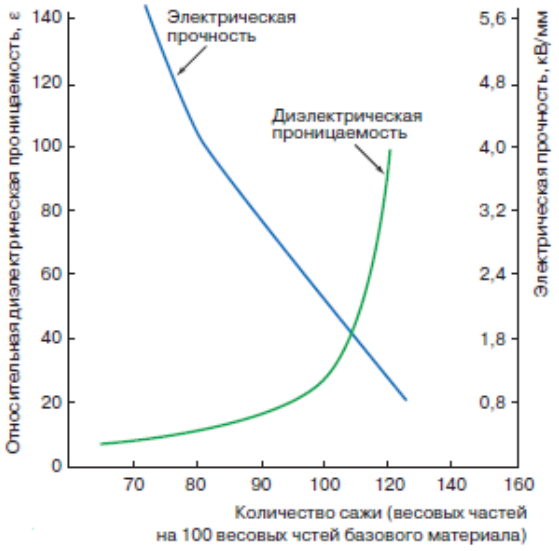


Рис.17. Влияние концентрации сажи на электрическую прочность и на диэлектрическую проницаемость композитного материала.

Влияние толщины стенок. Изменение толщины стенки влияет на значение диэлектрической проницаемости в продольном направлении, в то время как значение диэлектрической проницаемости в касательном направлении остается практически неизменным (рис.18).

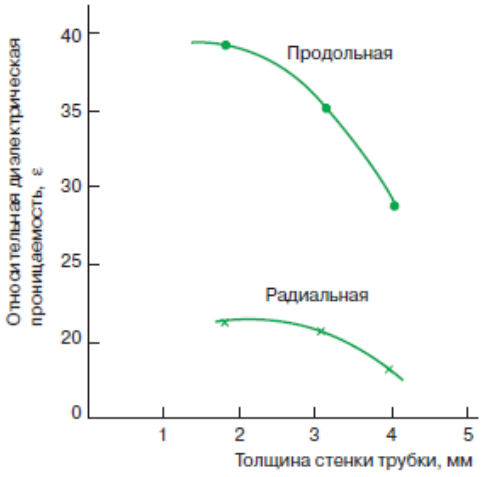


Рис.18. Влияние толщины стенки на диэлектрическую проницаемость.

Разница характеристик диэлектрических проницаемостей в продольном и радиальном направлении вызывается отличной ориентацией молекул материала и наполнителя в ходе экструзии.[7].

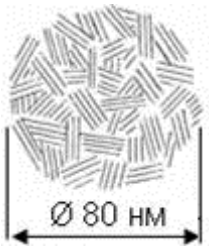
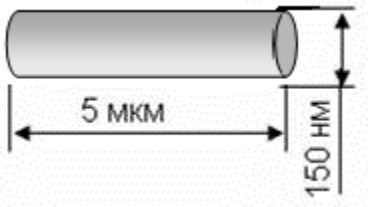
Придание необходимых теплопроводящих и нелинейных электропроводящих свойств, при помощи специализированных добавок.

Для обеспечения стабильной длительной работы муфты, в дальнейшем планируется использовать вместо стресс-конуса трубку-регулятор, либо систему из нескольких трубок, наложенных друг на друга. Предполагается первый внутренний слой использовать в качестве трубки с хорошими теплоотводящими свойствами. Чтобы придать материалу подобные свойства, необходимо в матрицу основного материала добавить наполнитель, который способен значительно увеличить коэффициент теплопроводности полученного композиционного материала и при этом он не должен значительно снизить электрическую прочность. В качестве матрицы будет выступать полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), так как необходимо оставить неизменным процесс монтажа, то есть сделать трубку термической усадки.

В качестве такого наполнителя предполагается использовать углеродные нановолокна (УНВ) (см. таблица 3). Самым лучшим вариантом было бы использование термически обработанные УНВ (до 2900 ˚С). Они обеспечивают значительный прирост теплопроводности полимерного композита (при 20% содержании УНВ в полимере увеличение теплопроводности составило 14 раз: от 0.2 до 2.8 Вт/м*К)

Помимо этого УНВ дешевле углеродных нанотрубок как одностенных, так и двустенных.

Таблица 3: Наполнители на основе углерода.

Наименование показателя, единицы измерения	Технический углерод (ТУ)	Углеродные нановолокна (УНВ)
Форма и размеры наночастицы		
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	**λ = 1,6**	**λ = 1200**
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-4}$

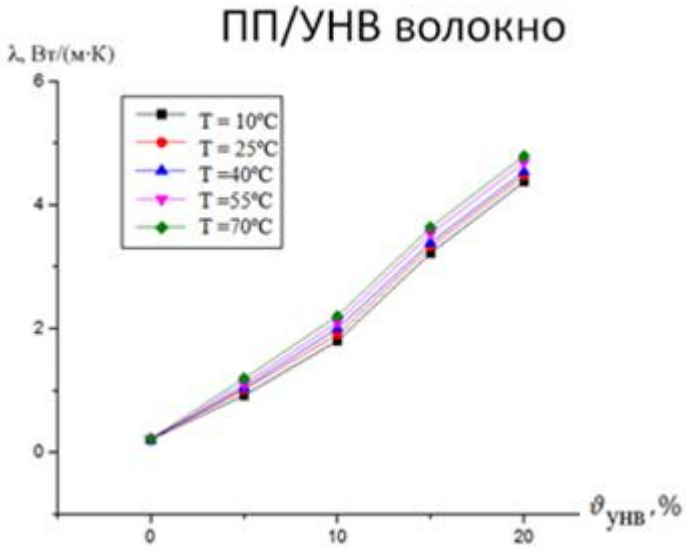


Рис. 19. График зависимости коэффициента теплопроводности КМ на основе полипропилена от процентного содержания УНВ при различных температурах.

Следующим шагом нужно обеспечить перераспределение электрического поля в кабельной разделке. Для этого будем использовать резистивный метод, который позволяет регулировать продольную

проводимость $\dot{\gamma}_s$. Данные свойства можно придать той же рубке, которая будет отводить тепло, или же сделать отдельную трубку, которая будет накладываться сверху или снизу первой. Созданию свойств материала использующего резистивный метод, может поспособствовать оксид цинка (ZnO), либо карбид кремния (SiC). Есть ещё ряд материалов, которые вероятнее всего помогут в создании данной конструкции. Но для того, чтобы определиться с выбором наполнителя, необходимо провести ряд исследований, которые планируются в дальнейшем.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

5.1. Дифференциальные уравнения распределения электрического поля в концевой кабельной разделке

Для кабельных разделок, работающих под воздействием переменного напряжения ёмкостная проводимость $\omega C_S \gg \sigma_S$

Поэтому схема замещения упрощается и в случае, если в разделке нет полупроводящих покрытий, $\gamma_S = \omega C_S$, $\gamma_\upsilon = \omega C_\upsilon$, $\gamma_0 = \omega C_0$ т.е. активные составляющие исчезают, и схема замещения становится чисто ёмкостной (рис.10 В).

Если в целях регулирования применяются проводящие покрытия, т.е. искусственно увеличивается продольная активная проводимость, то $\gamma_S = \sigma_S$.

В случае кабелей постоянного тока, ёмкостные проводимости равны нулю, ёмкости элементов $\to \infty$ и схема замещения превращается в резистивную (рис.10 С).

Значения, $\sigma_S, C_S, \sigma_\upsilon, C_\upsilon$ отнесённые к единице длины, определяются из следующих формул:

$$\sigma_S = \frac{\pi \cdot (R^2 - r_0^2)}{\rho_\upsilon} \tag{1}$$

$$C_S = \pi \cdot \varepsilon_a \cdot (R^2 - r_0^2) \tag{2}$$

$$\sigma_\upsilon = \frac{2 \cdot \pi}{\rho_\upsilon \cdot \ln(\frac{R}{r_0})} \tag{3}$$

$$C_\upsilon = \frac{2\pi\varepsilon_a}{\rho_\upsilon \cdot \ln(\frac{R}{r_0})} \tag{4}$$

Значения σ_0 и C_0 определяются также по формулам (3) и (4). При этом величина R равна расстоянию, на котором могут располагаться заземлённые предметы, окружающие концевую муфту.

Предположим, что C_s, C_υ, C_0 являются постоянными величинами. В этом случае для емкостной схемы замещения рис.10 В (в случае кабеля переменного тока) связь между напряжением и током может быть представлена следующим образом (для мгновенных значений) [16]:

$$\frac{dU_x}{dx} = \frac{i_s(x)}{\omega C_s};$$

$$\frac{di_s(x)}{dx} = \omega C_\upsilon (u_x - u) + \omega C_0 u_x = \omega u_x (C_\upsilon + C_0) - \omega C_\upsilon u$$

Решив совместно эти два уравнения, получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} = \frac{1}{\omega C_s} \cdot \frac{di_s(x)}{dx} = \frac{(C_\upsilon + C_0)}{C_s} \cdot u_x - \frac{C_\upsilon}{C_s} u = d^2 u_x - Au \qquad (5)$$

Где: $d^2 = \frac{(C_\upsilon + C_0)}{C_s}$; $A = \frac{C_\upsilon}{C_S}$;

Решив уравнение (5) получим формулу закона распределения напряжения по длине кабельной разделки:

$$u_x = \frac{u}{(C_\upsilon + C_0) \cdot sh(al)} [C_0 sh(ax) - C_\upsilon \cdot sh(a(l-x)) + C_\upsilon sh(al)] \qquad (6)$$

$$a = \sqrt{\frac{C_\upsilon + C_0}{C_S}} \qquad (7)$$

При $C_\upsilon >> C_0$ $\quad u_x = u[1 - \frac{sh(a(l-x))}{sh(al)}]$ (8)

При $C_0 >> C_\upsilon$ $\quad u_x = u \cdot \frac{sh(ax)}{sh(al)}$ (9)

Дифференцируя (6) по ”x” получим формулу для расчета распределения напряжённости электрического поля по длине кабельной разделки $e(x)$:

$$e(x) = -\frac{au}{(C_\upsilon + C_0) sh(al)} \cdot [C_0 ch(ax) + C_\upsilon ch(a(l-x))] \qquad (10)$$

При $C_\upsilon >> C_0$ $\quad e(x) = -au \frac{ch(a(l-x))}{sh(al)}$ (11)

Напряжённость поля будет иметь максимальное значение при $x = 0$:

$$e_{\max} = -au \cdot cth(al) \tag{12}$$

Если $C_0 >> C_\upsilon$, $e(x) = -au\dfrac{ch(ax)}{sh(ax)}$ (13)

Напряжённость поля будет максимальной при $x = l$ и также вычисляется по формуле (12).

В случае, если распределение электрического поля сильно неравномерно, $al \geq 2 \mid cth(al) \approx 1 \mid$, то максимальное значение напряжённости:

$$e_{\max} = -au \tag{14}$$

Это означает, что при неравномерном распределении напряжённости по длине разделки, максимальное значение в начале и конце ***не зависит от длины этой разделки.***

5.2. Регулирование электрического поля омической составляющей поверхностной проводимости σ_S

Регулирование поля омической составляющей поверхностной проводимости возможно при условии:

$$\sigma_s >> \omega C_S \tag{15}$$

Поэтому в схеме замещения в качестве продольного элемента с индексом s будет присутствовать только сопротивление. Дифференциальные уравнения для напряжения и тока (5) для точки, находящейся на расстоянии x от края кабельной разделки с нулевым потенциалом, при R_S, C_υ и C_0=const, будут иметь вид:

$$\frac{du_x}{dx} = i_S(x)R_S$$

$$\frac{di_S(x)}{dx} = \omega C_\upsilon(u_x - u) + \omega C_0 u_x = \omega u_x(C_\upsilon + C_0) - \omega C_\upsilon u$$

$$\frac{d^2u_x}{dx^2} = \frac{di_S(x)}{dx}R_S = \omega R_S(C_\upsilon + C_0)u_x + \omega C_\upsilon R_S u = a^2 u_x - Au \tag{16}$$

(16) похоже на (5), но в нём:

$$a = \sqrt{R_S \omega (C_\upsilon + C_0)} \tag{17}$$

$$A = \omega C_\upsilon R_S \tag{18}$$

Это значит, что распределение потенциалов и напряжённости электрического поля по поверхности изоляции кабельной разделки при регулировании изменением омической составляющей поверхностной проводимости будет определяться формулами (6) и (10) в которых параметр a находится из формулы (17).

Для равномерного распределения поля в разделке необходимо, чтобы R_S было переменным, причём закон изменения $R_S = f(x)$ может быть найден решением дифференциального уравнения (16), при соблюдении условия

$$e = \frac{du_x}{dx} = \frac{u}{l};\ \ u_x = \frac{u}{l}x;\ \ \frac{di_s(x)}{dx} = 0$$

Практически получить кабельную разделку с переменной омической продольной проводимостью очень сложно. В этой связи удобнее выбирать величину R_S постоянной – со значением, обеспечивающим такую неравномерность распределения поля, чтобы она, в продольном направлении, лежала в пределах допустимых значений.

Нижний предел определяется из условия $al \le 0.5; sh(al) \approx al$. В этом случае достигается вполне достаточное, для практических целей, равномерное поле:

$$R_S \ge \frac{0.25}{\omega (C_\upsilon + C_0) l^2} \tag{19}$$

Верхний предел – из условия $e_{\max} = -au$, которое обеспечивает максимальную продольную (тангенциальную) составляющую напряжённости в пределах допустимых значений:

$$R_S \le \frac{e^2}{\omega (C_\upsilon + C_0) u^2} \qquad \begin{matrix} e = E_{\max.доп} \\ u = U_{ж} \end{matrix} \tag{20}$$

т.е. при регулировании электрического поля в концевой разделке с помощью омической составляющей поверхностной проводимости, величина R_S в схеме замещения концевой разделки, должна находиться в пределах:

$$\frac{0.25}{\omega(C_\upsilon + C_0)l^2} \le R_S \le \frac{E^2_{\max.доп}}{\omega(C_\upsilon + C_0)U^2} \qquad (21)$$

если величиной C_0 можно пренебречь, то

$$\frac{0.25}{\omega C_\upsilon l^2} \le R_S \le \frac{E^2_{\max.доп}}{\omega C_\upsilon U^2} \qquad (22)$$

Практически правильнее уменьшить R_S не по всей длине l, а только на некоторой, относительно небольшой ($\sim 1.5l$) её части (т.е. в области наиболее неравномерного характера распределения продольного поля).

Более точное определение длины участка регулирования поля следует делать из анализа кривой, построенной в соответствии с (6) или (10). Предполагается, что при увеличении поверхностной проводимости на части разделки можно существенно уменьшить E у края заземлённого экрана, т.е. в месте, где эта напряжённость максимальна, без увеличения тока на поверхности разделки.

Следует отметить, что (22) не учитывает зависимость $R_S(T)$. В этой связи, при существенных нагревах полупроводящего слоя, величина R_S должна быть скорректирована для сохранения (22) во всём диапазоне изменения температуры. Этот вопрос сложен и требует специального изучения.

6. Моделирование стресс конуса концевой и соединительной муфты. Нахождение оптимальной конструкции

Оптимизация конструкций концевого и соединительного стресс-конуса муфты на 110 кВ производилась путём предварительного математического моделирования с применением специализированных пакетов прикладных программ. Были найдены наиболее опасные области разделки. В нашем случае использовался программный комплекс ELCUT Professional [5], в котором задействован метод конечных элементов.

6.1. Моделирование стресс-конуса концевой муфты.

В этой работе преследовалась цель найти оптимальную конструкцию стресс конуса концевой кабельной муфты по следующим показателям:

-Диэлектрическая проницаемость основного изоляционного тела стресс конуса муфты;

- Электропроводность рефлектора стресс конуса;

-Угол рефлектора;

-Длина соприкосновения рефлектора и полупроводящего экрана по изоляции;

-Длина нижнего основания рефлектора.

Геометрический способ выравнивания поля основан на постепенном расширении экрана, путём наложения на место среза оболочки конуса из проводящего материала.

Рефракционный способ выравнивания основан на наложении на место среза оболочки кабеля материала с высокой относительной диэлектрической проницаемостью ε, на порядок превышающей диэлектрическую проницаемость основной изоляции.

Комбинированный метод выравнивания. Сочетание геометрического и рефракционного методов позволяет уменьшить касательную составляющую напряженности поля в месте обрыва оболочки экрана, не используя сложные

технологические процедуры создания специфических свойств материалов. Например, основной модуль – стресс конус концевой муфты – может представлять собой конусообразное двухслойное тело (рис. 20) [18], [24].

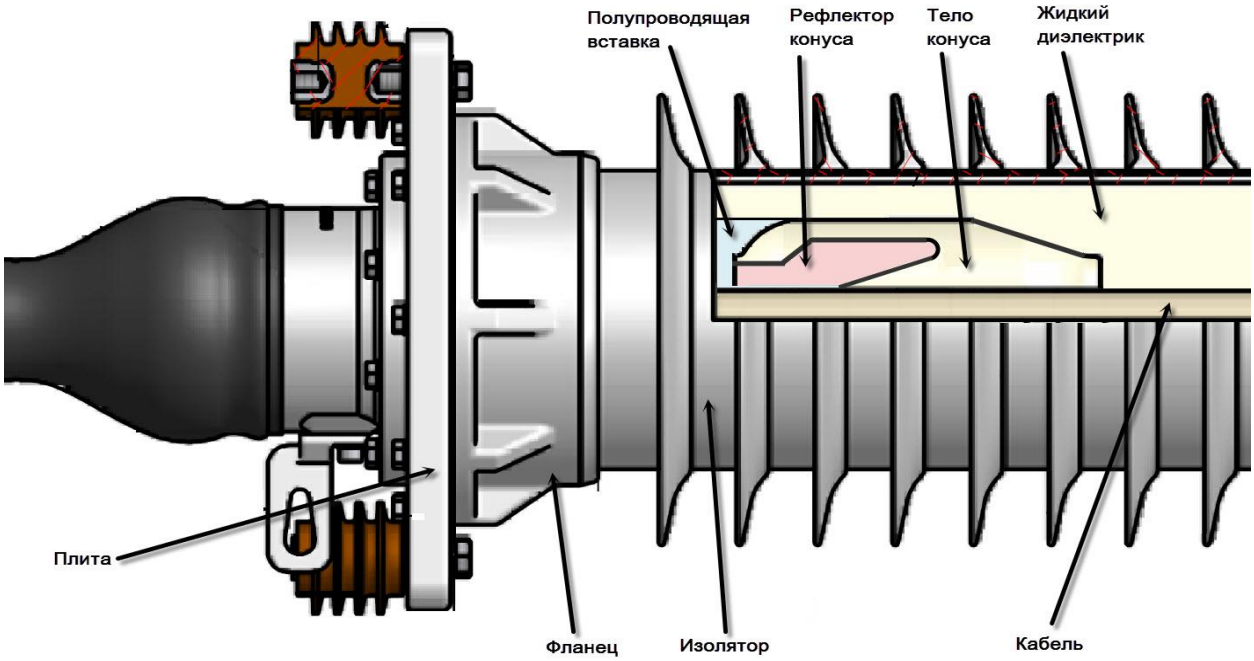


Рис 20. Концевая муфта и стресс конус.

Рис.21. Картина распределения электрического поля с критической зоной в концевой муфте.

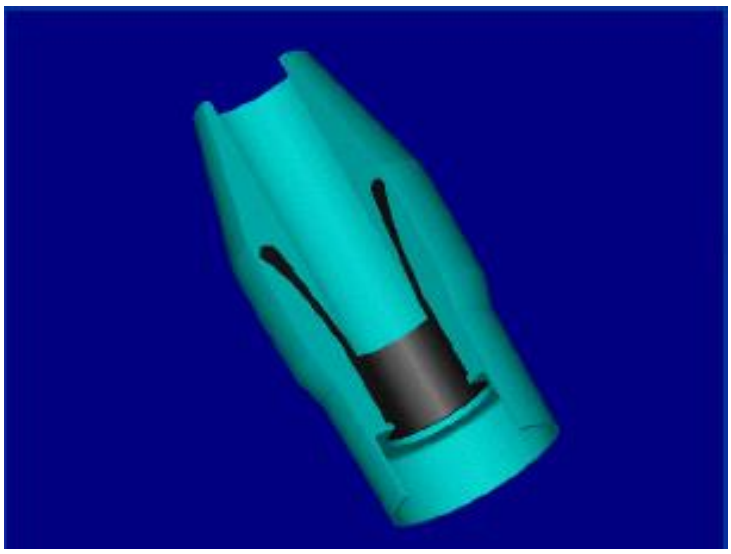


Рис.22. Стресс конус.

Его внешняя часть, занимающая основной объём, изготавливается из резины с хорошими электроизоляционными свойствами (основное изоляционное тело), а внутренняя часть – рефлектор, формируется из резины с простыми электропроводящими наполнителями (мелкодисперсная сажа, металлический порошок) и выполняет функцию выравнивания электрического поля в усиливающей изоляции. Пространство между стресс-конусом и внешним изолятором муфты заполнено жидким диэлектриком (маслом) [25].

6.1.1. Процесс оптимизации

Была построена геометрическая модель стресс конуса (рис. 23). Данная конструкция имеет несколько областей, в которых напряженность поля принимает значение выше среднего. Но наиболее значимое – место среза полупроводящего экрана по изоляции (Зона А). Здесь напряженность имеет наибольшее значение в конструкции [19],[22],[23].

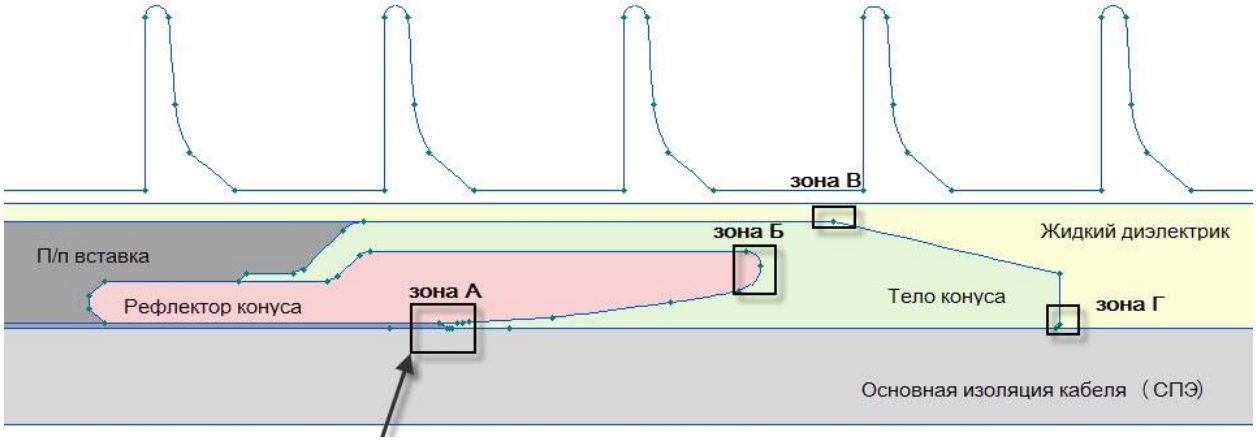


Рис.23. Геометрическая расчетная модель стресс конуса.

Расчеты производились следующим образом:

1. При фиксированном значении проводимости рефлектора изменялась диэлектрическая проницаемость основного изоляционного тела стресс конуса. Величина диэлектрической проницаемости изменялась в пределах от 5 до 25. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4:

ε	**E, В/м**
5	5356900
10	4798700
15	4606500
20	4509700
25	**4451400**

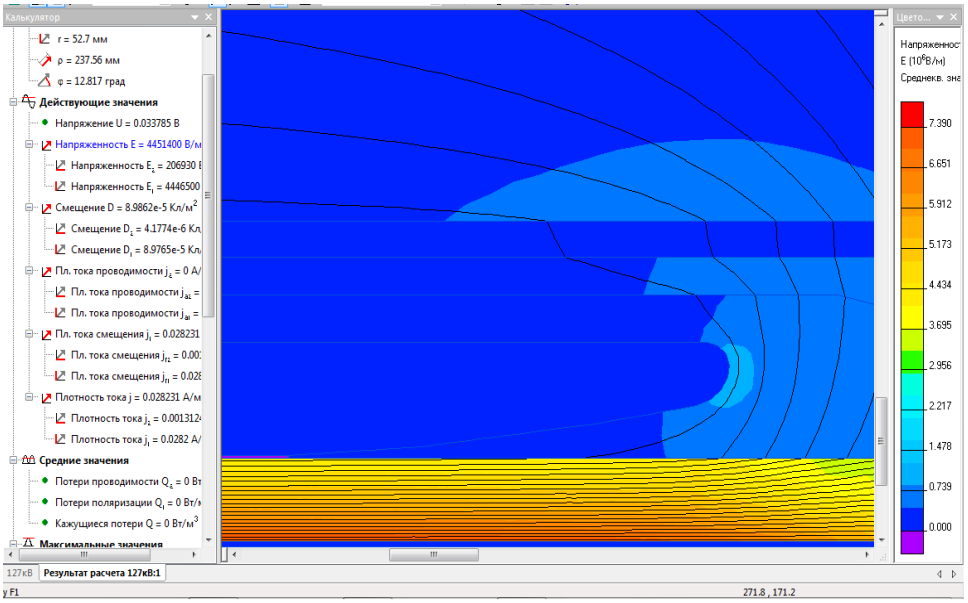


Рис24. Распределение напряженности поля при ε=25.

2. При выбранной диэлектрической проницаемости, при которой напряженность поля в зоне А минимальна(ε=25) варьировалась проводимость рефлектора от 0.00002 до 0.002(см. таблица 5).

Таблица 5:

γ, См/м	**E, В/м**
0.00002	4538700
0.0002	4510800
0.002	**4451400**

3. При фиксированных значениях диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела и проводимости стресс конуса в п. 1 и 2 изменялся угол наклона рефлектора относительно горизонтальной оси (таблица 6).

Таблица 6:

Угол α,°	E, В/м
20	4610600
15	4549100
10	**4451200**

4. При фиксированных значениях по пунктам 1,2 и 3 изменялась длина рефлектора (длина проекции рефлектора на ось). Целью расчета была фиксация длины рефлектора, при которой модель напряженности $E_{из\ пп}$ достигнет минимального значения. Результаты расчета приведены в табл. 7.

Таблица 7:

L, мм	**E, В/м**
270	4472900
260	**4438000**
250	4480100

5.При фиксированных значениях по пунктам 1 – 4 изменялась длина нижнего основания стресс конуса. За начальную точку была принято место среза полупроводящего экрана по изоляции (зона А). Результаты смотреть в таблице 8.

Таблица 8:

$l_{н.осн}$, мм	**E, В/м**
-10	4606200
0	4491200
+5	4435400
-10	4428200
+15	**4425300**

6.1.2.Итоги моделирования

В данной части работы был описан способ снижения концентрации силовых линий поля в месте обрыва полупроводящего экрана по изоляции, основанный на подборе геометрической конфигурации конструкции и сочетании специальных свойств материалов стресс-конуса кабельной муфты.

Установлено следующее:

- напряжённость поля в месте среза полупроводящего экрана ($E_{пп.экр.}$) обратнопропорциональна диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела стресс конуса. В данной задаче мы остановились на значении ε=25;

- $E_{пп.экр}$ обратнопропорциональна проводимости рефлектора. Мы приняли γ=0.002См/м;

- угол наклона рефлектора стресс конуса – α= 7 – 10°.

- длина рефлектора лежит в пределах L=260±5 мм.

Было найдено оптимальное значение длины нижнего основания стресс конуса от начальной точки. Она лежит в пределах: l=+15±5мм.

При этом значение напряженности электрического поля в критической зоне А (см. рис.25) равно **4,4253 кВ/мм.**

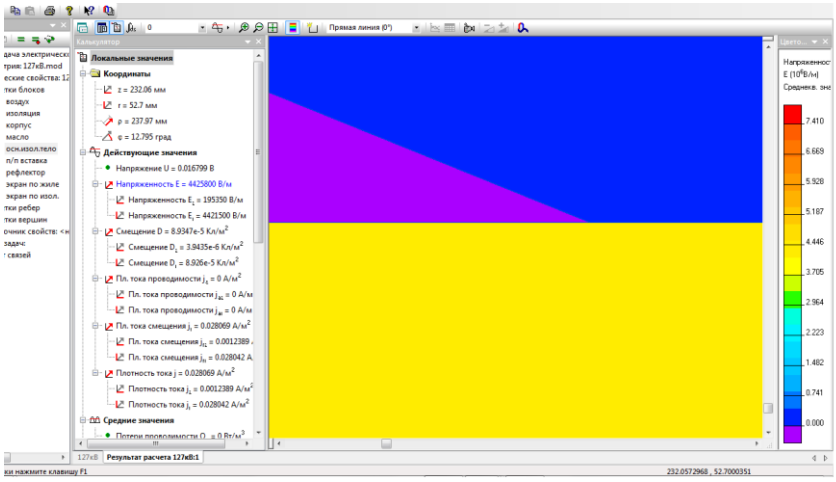


Рис.25. Значение напряженности электрического поля в критической точке при оптимально найденных значениях.

6.2. Моделирование стресс-конуса соединительной муфты

В стресс-конусе соединительной муфты присутствуют 4 зоны, в которых напряженность электрического поля может принимать значение больше рабочего. Данная информация получена благодаря моделированию в ELCUT.

Зная основу для стресс-конуса (этилен-пропиленовая резина) и какой результат необходимо получить, путём последовательного решения задач была найдена оптимальная конструкция арматуры, которая позволила свести максимальную рабочую напряжённость в самой критической зоне к минимуму. Помимо геометрических характеристик были выявлены физические параметры стресс конуса. Так, например, для успешной работы кабельной арматуры значение проводимости высоковольтного электрода не имеет смысла делать выше 0.0002 См. Так же были получены необходимые параметры для дифлекторов и основного изоляционного тела.

Хотелось бы отметить, что стресс-конус полученный по результатам данных исследований в данное время проходит испытания в высоковольтном испытательном центре ВИЦ ВНИИ кабельной промышленности, г. Подольск, Мос. область. (см. приложение).

Стресс конус соединительной муфты представляет собой два конусообразных двухслойных тела, соединённых цилиндрической частью, которая является также двухслойной (рис 26.). Основной объём, изготавливается из резины с изоляционными свойствами (основное изоляционное тело конуса). Внутренние (на рис. 26, 27 показаны чёрным) слои – два конуса (дифлектор) и цилиндр (высоковольтный электрод) - формуются из резины с проводящими свойствами и выполняют функцию выравнивания электрического поля в усиливающей изоляции [3]. Конструкция каждой из двух частей дифлектора, аналогична конструкции рефлектора концевой муфты. Поэтому проблемные зоны А и В в концевой муфте актуальны для соединительной. Кроме указанных зон, в

соединительной муфте появляется ещё одна – зона С, расположенная по краям высоковольтного электрода (рис.28).

Цель моделирования - нахождение оптимальной длины дифлектора и высоковольтного электрода [7]. Критерий – минимальная напряжённость электрического поля в областях А,В и С.

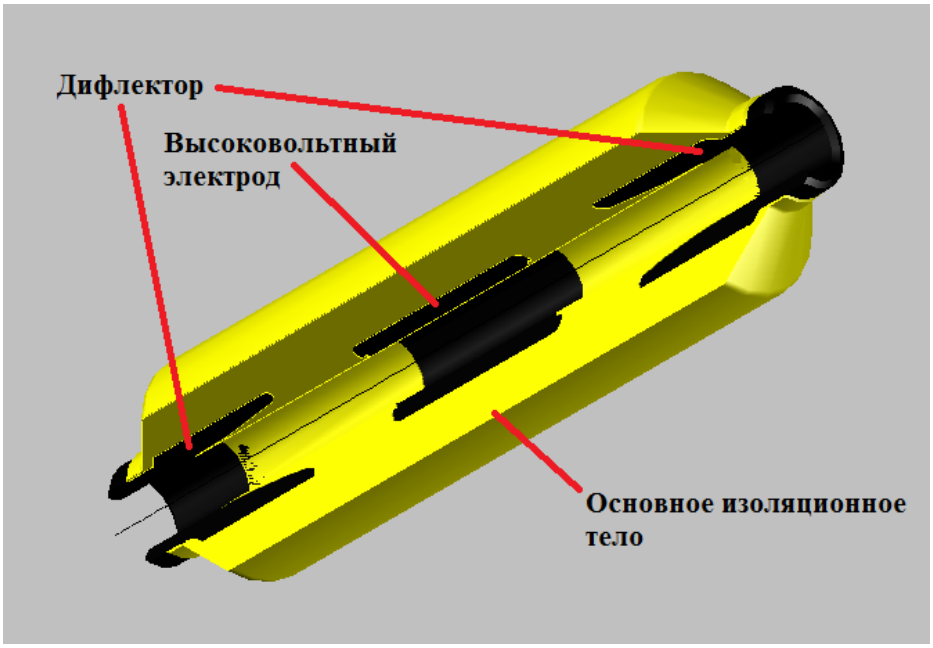


Рис.26 Стресс конус соединительной муфты

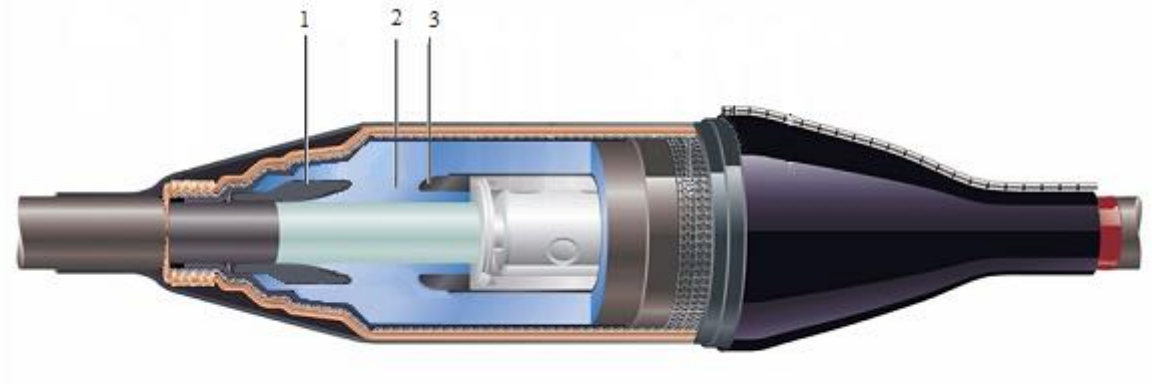


Рис. 27 Элементы стресс конуса соединительной муфты.

1 - Левая часть дифлектора;

2- основное изоляционное тело;

3- высоковольтный электрод

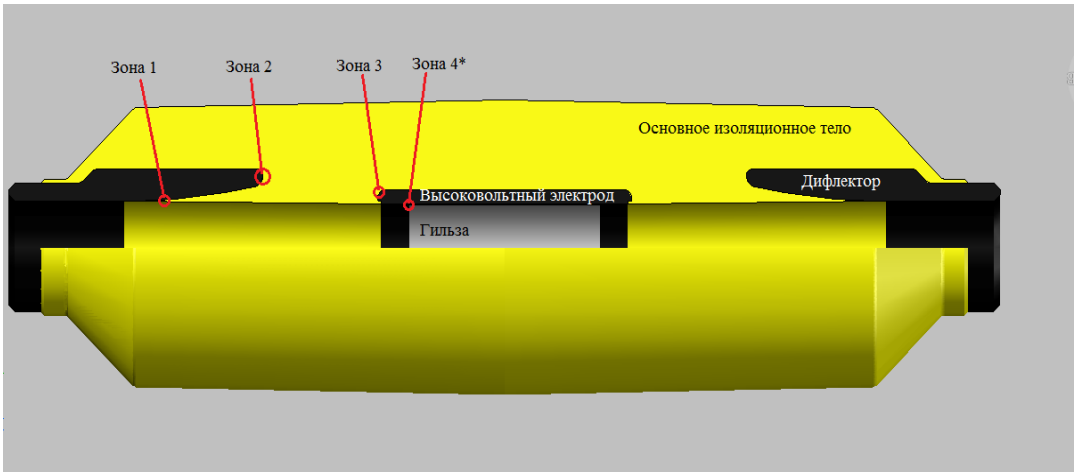


Рис. 28 Проблемные зоны напряжённости поля в стресс конусе соединительной муфты

Зона 1- граница полимерного экрана по изоляции кабеля и дифлектора

Зона 2 – край дифлектора

Зона 3 – край высоковольтного электрода

Зона 4^* – край соединительной гильзы (при несогласованном выборе длины высоковольтного электрода)

Зависимость напряженности электрического поля от длины высоковольтного электрода описывается характерной кривой (рис30, рис.31). Однако в случае, если соединительная гильза короче высоковольтного электрода менее чем на 10 мм, происходит резкое увеличение напряженности в критической зоне 3. При длине гильзы большей, чем длина высоковольтного электрода, появляется новая критическая зона 4^* (у края гильзы), значение напряженности в которой много больше значения напряженности у края высоковольтного электрода [4],[28].

6.2.1. Исследование зависимости напряженности в зоне 3 от длины высоковольтного электрода

Значения напряжённости поля в зонах 3,4 в зависимости от длины высоковольтного электрода при фиксированном размере соединительной гильзы сведены в Табл.9 [5], [28]

Таблица 9:

Длина высоковольтного электрода	**E, кВ/мм. (зона 3)**	**E, кВ/мм. (зона 4)**
280	5,11	0.0001
260	4,8	0.0008
200	4.79	0.0024
180	4,71	0.017
160	4,75	0.2
140	4,61	7.84

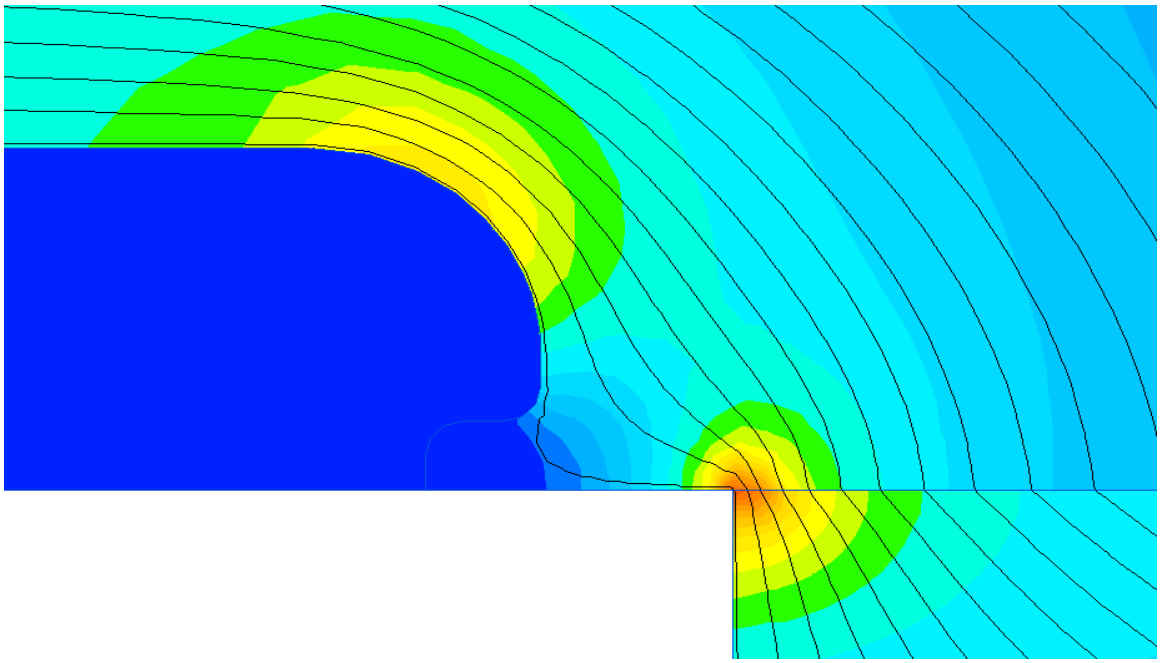


Рис.29. Распределение напряженности электрического поля у края высоковольтного электрода (Зона 3). Длина электрода 140мм.

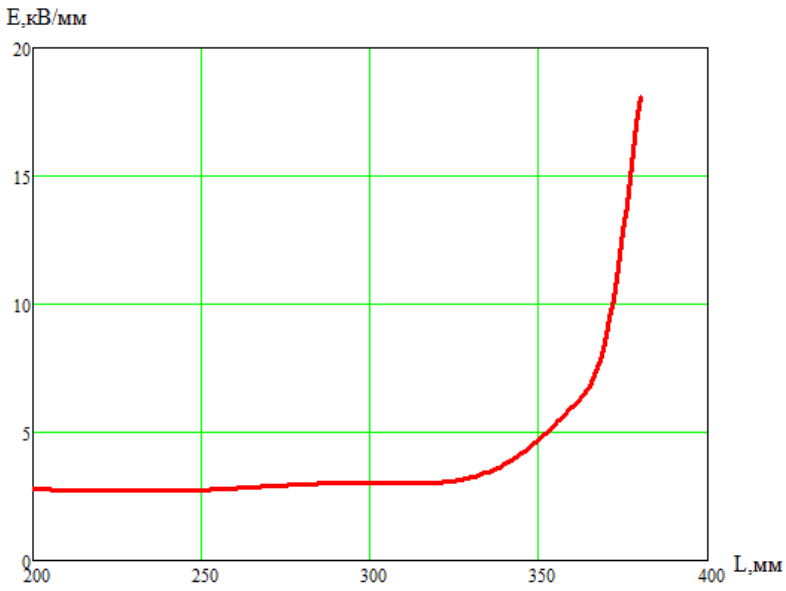


Рис. 30. График зависимости напряженности электрического поля в критической зоне 3 от длины высоковольтного электрода при длине гильзы 150 мм.

При сравнении зависимости напряженности электрического поля от длины высоковольтного электрода при разных длинах соединительной гильзы было обнаружено, что зависимость при длине гильзы 150 мм и при длине 160 мм. существенно не отличаются (см. рис. 30, 31):

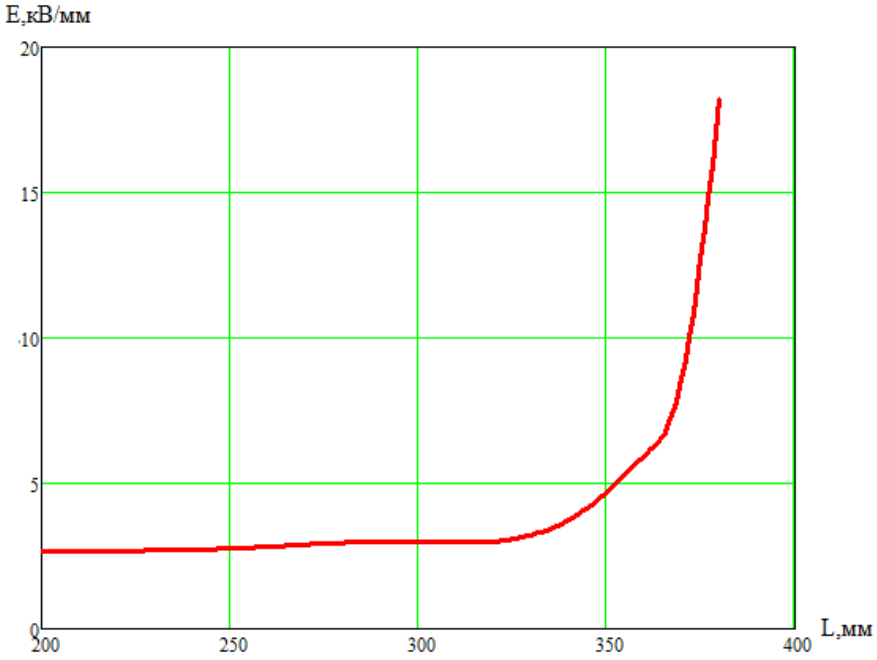


Рис. 31. Зависимость напряженности электрического поля в критической зоне 3 от длины высоковольтного электрода при длине гильзы 160 мм.

6.2.2. Исследование зависимости напряженности электрического поля в зонах 1,2 от длины дифлектора.

Значения напряжённости поля в зонах 1,2 при разной длине дифлектора сведены в Табл.10

Таблица 10:

Длина дифлектора , мм	E, кВ/мм (п/п) (Зона 1)	E, кВ/мм (у края) (Зона 2)
250	4,89	1,17
230	4,86	1,23
210	4,82	1,25
190	4,75	1,26
170	4,98	1,33

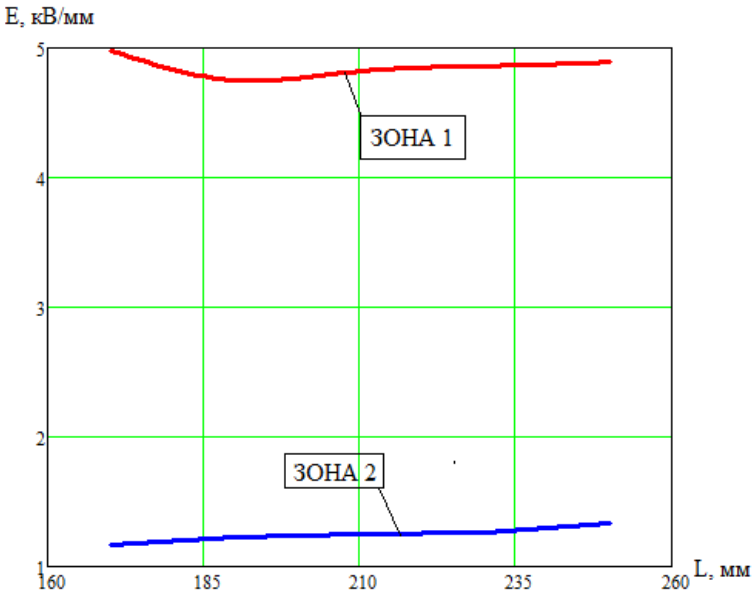


Рис.32. Зависимость напряжённости поля в Зоне 1,2 от длины дифлектора

6.2.3. Исследование зависимости напряжённости электрического поля от угла наклона дифлектора к оси кабеля (Зона 1).

Данная работа проводилась в предыдущем пункте, где исследовалась конструкция концевого стресс-конуса. Так как рефлектор в концевой муфте

полностью соответствует дифлектору в соединительной, следовательно геометрически оптимальная конструкция одного, также соответствует и для другого.

Таблица 11: значения напряженности электрического поля в тройной точке:

Угол α,°	**E, В/м**
20	4610600
15	4549100
10	**4451200**

Анализ распределения напряжённости поля показывает, что её значение прямо-пропорционально углу между касательной к начальному участку дифлектора (рефлектора) и осью кабеля (углу наклона). Т. е угол следует делать, по – возможности, минимальным (из соображений технологии изготовления).

6.2.4. Исследование напряжённости электрического поля в Зонах 1 и 2 от расстояния между высоковольтным электродом и дифлектором.

В Таблице 12 сведены данные по зависимости величины напряжённости электрического поля в критических зонах 1 и 2 от расстояния между краями дифлектора и высоковольтного электрода

Таблица 12:

Расстояние между дифлектором и высоковольтным электродом ,мм	Напряженность поля вблизи дифлектора (критическая зона 1) E, кВ/мм	Напряженность поля вблизи высоковольтного электрода (критическая зона 2) E, кВ/мм.
65	**1.10**	**2.78**
55	1.20	2.80
45	1.47	2.93
35	1.91	3.12
25	2.67	3.51
10	5.50	6.00

На рис. 33 приведена цветовая диаграмма распределения поля между дифлектором и высоковольтным электродом при расстоянии между ними равном 25 мм.

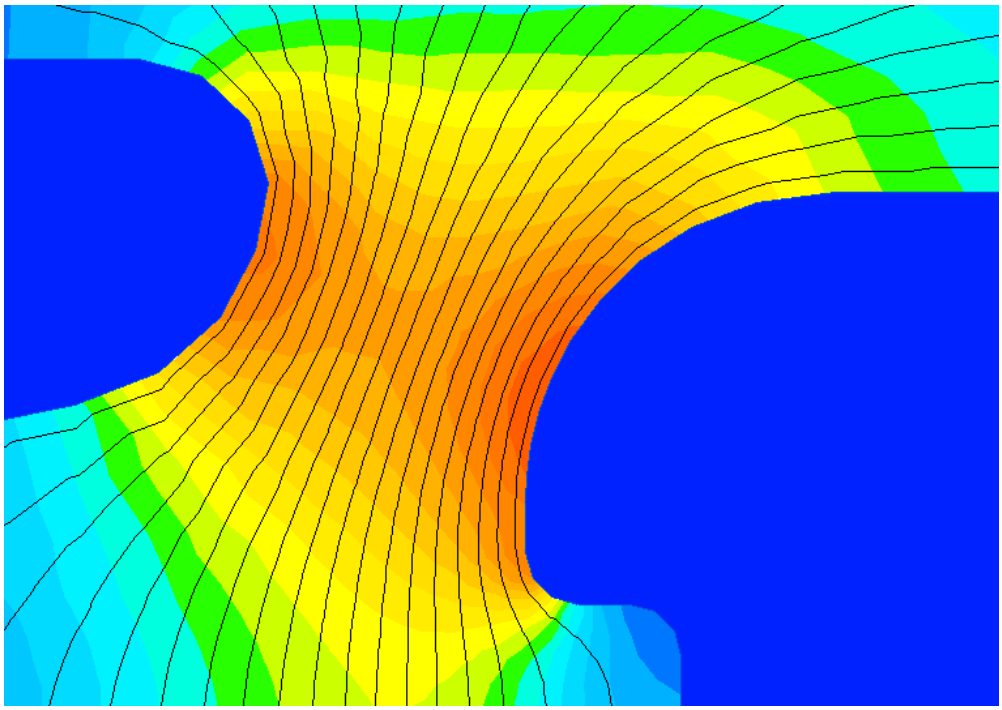


Рис.33. Распределение напряженности электрического поля между дифлектором и высоковольтным электродом. (оранжевым цветом отмечена наиболее уязвимая область)

6.2.5. Влияние проводимости высоковольтного электрода на напряженность поля в Зоне 2.

График зависимости величины напряжённости электрического поля в зоне 3 от величины активной проводимости материала дифлектора представлен на рис. 34.

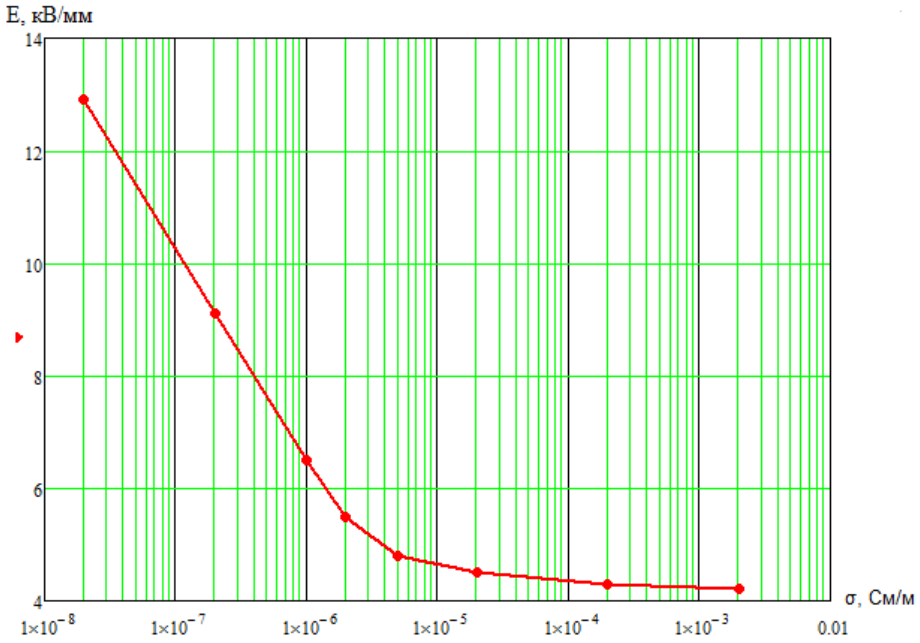


Рис.34. Зависимость напряжённости поля в Зоне 3 от активной составляющей проводимости дифлектора во логарифмическом масштабе.

Из графика видно, что начиная со значения 0.0002 См/м, дальнейшее увеличение не ведёт к существенному снижению напряженности поля в критической области 3. Очевидно, что эти результаты можно распространить и на область 1 в связке со значением проводимости материала дифлектора (материал – аналогичный материалу, из которого изготовлен высоковольтный электрод).

6.2.6. Итоги моделирования соединительной муфты

Определены проблемные зоны в усиливающей изоляции соединительной муфты и проведен анализ напряженности электрического поля в проблемных зонах стресс-конуса соединительной муфты. Произведена оценка конструктивных размеров стресс-конуса соединительной муфты, изготовленного из кремнийорганической резины известного производителя для кабелей класса напряжения 110 кВ. В результате предлагаются следующие параметры двухкомпонентного стресс-

конуса (электрические и механические свойства эластомерных изоляционных и проводящих материалов известны).

При длине соединительной гильзы (сплав меди) 150–160 мм:

• общая длина стресс-конуса 660 мм;

• длина дифлектора 170 мм (с каждой стороны);

• длина высоковольтного электрода 190 мм;

• расстояние между в/э и дифлектором 65 мм.

При этом расчетная максимальная напряженность поля в критической зоне — 2,78 кВ/мм (зона 3).

В процессе моделирования и испытаний был выявлен ряд преимуществ и недостатков данной конструкции:

Стресс-конус обладает всеми необходимыми качествами для обеспечения безопасной работы кабельной линии. Комбинированный метод успешно сочетает в себе рефракционный и геометрический способы выравнивания, что позволяет нам получить качественную сглаженную картину распределения напряженности электрического поля в месте разделки кабеля. Но вместе со всеми преимуществами данная конструкция имеет ряд недостатков.

Во-первых, габаритность конструкции, которая имеет большую массу и размеры. К примеру, в классе напряжения на 110 кВ масса только стресс-конуса концевой и соединительной муфт равно 7 и 19 килограмм соответственно. Естественно это сказывается при монтаже муфты. Так же при натягивании стресс-конуса велика вероятность монтажников натянуть стресс-конус не симметрично. Эта ошибка приведёт к критическому уменьшению расстояния между краем соединительной гильзы и краем высоковольтного электрода, что в свою очередь обеспечит возникновение 4 критической зоны.

Во-вторых, сложность производства. Стресс-конус - это двухкомпонентная конструкция. То есть, сначала отливают в пресс-форме дифлекторы и высоковольтный электрод. Затем их необходимо обработать,

чтобы не было рубцов и выступов (см. рис.35), иначе есть шанс возникновения пробоя (см. рис 36) в месте дефекта, так как в таких местах напряжённость поля имеет наибольшее значение.

Рис.35. Дефект на высоковольтном электроде соединительной муфты.

Рис. 36. Результат подачи импульсов на соединительную муфту с наличием дефекта.

В-третьих, это сложность конструкции. Из-за того что стресс-конус имеет двухкомпонентную основу, так как в современных муфтах используется комбинированный метод выравнивания электрического поля, в конструкции присутствует ряд критических зон, в которых повышается вероятность возникновения пробоя.

6.2.7. Распределение поля в реальной конструкции

Учтя все проведённые исследования и испытания была смоделирована и создана новая конструкция стресс-конуса. В результате решения поставленной задачи в Elcut было получено следующее распределение напряжённости поля (см. рис. 37). Чтобы наглядно увидеть значение напряжённости электрического поля в критических зонах были построены следующие контуры, по которым были построены графики суммарной и тангенциальной напряжённостей:

-- Контур «AB» - линия, проходящая по поверхности высоковольтного электрода и заканчивающаяся в месте стыка его с изоляцией кабеля (проходит через критическую зону 3);

-- Контур «BC» - линия от стыка высоковольтного электрода и изоляции кабеля, до стыка изоляции дифлектора и полупроводящего экрана по изоляции (тройная точка), проходящая по поверхности изоляции кабеля (проходит через критическую зону 1);

-- Контур «CD» - линия, проходящая по поверхности дифлектора от тройной точки (проходит через критическую зону 2)

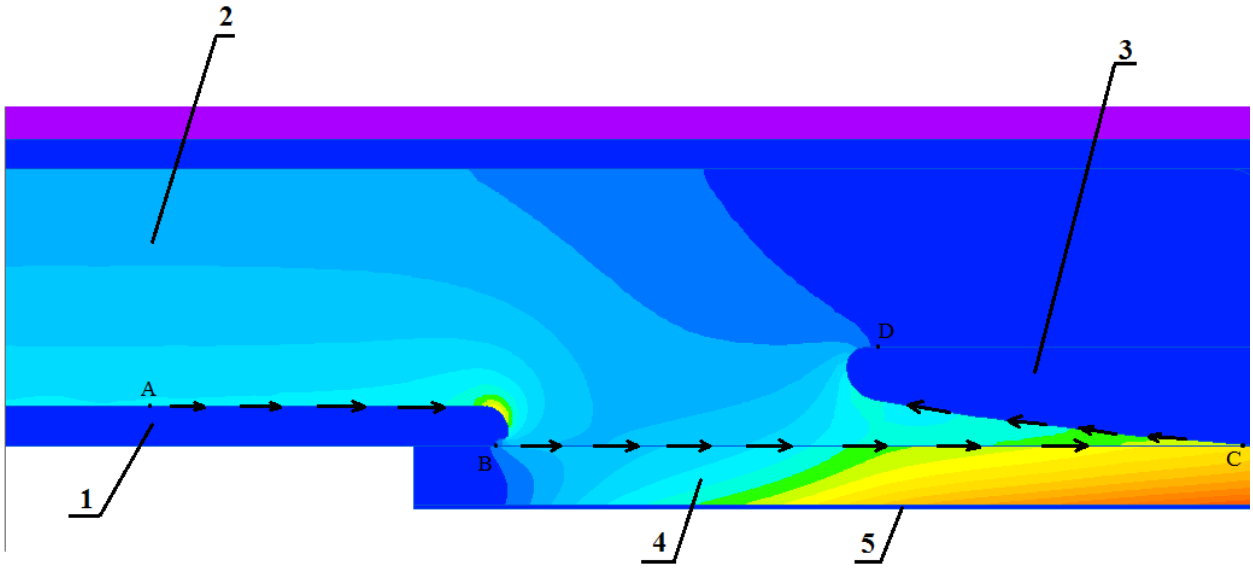


Рис.37. Контур для наглядности распределения поля

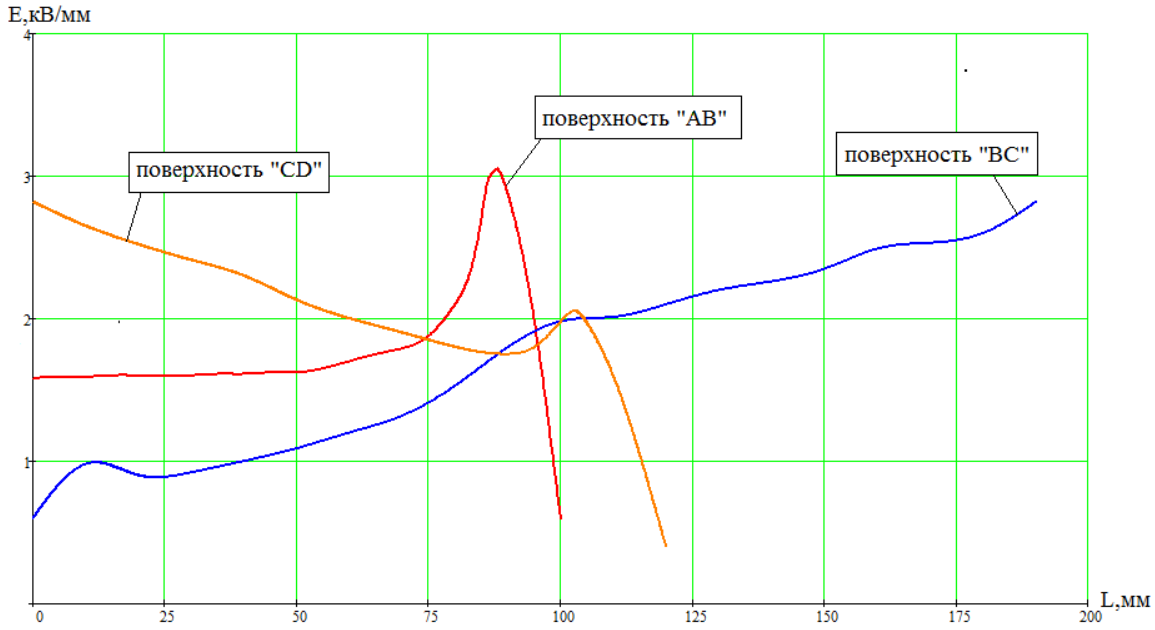


Рис. 38. Распределение суммарной напряженности электрического поля вдоль заданных контуров.

- Контур «AB» - $E_{\Sigma max}$=3.05 кВ/мм;
- Контур «BC» - $E_{\Sigma max}$=2.85 кВ/мм;
- Контур «CD» - $E_{\Sigma max}$=2.85 кВ/мм;

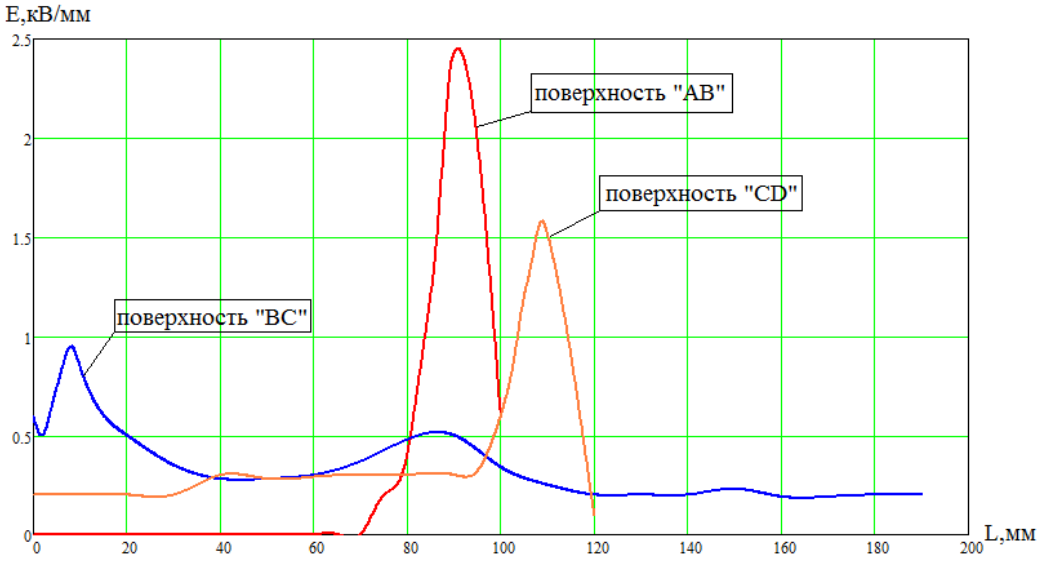


Рис. 39. Распределение тангенциальной напряженности поля вдоль заданных контуров

- Контур «AB» - $E_{\tau\ max}$=2.45 кВ/мм;
- Контур «BC» - $E_{\tau\ max}$=0.92 кВ/мм;
- Контур «CD» - $E_{\tau\ max}$=1.56 кВ/мм;

7. Трубка-регулятор. Основные моменты

7.1 Предварительные варианты проекта конструкции

Из всех высказываний про стресс-конус можно сделать вывод, что он является хорошим инструментом для выравнивания электрического поля. Но конструкцию нужно доработать, чтобы в дальнейшем при производстве и монтаже не возникало тех же ошибок, которые потенциально могут привести к пробою.

Поэтому в дальше планируется использовать другой комбинированный метод выравнивания, резистивно-емкостной. То есть создать такую конструкцию, в которой сочеталось бы два метода:

- выравнивание поля за счёт регулирования ёмкости по отношению к земле C_0, то есть регулирования емкостного тока i_{C_0}, который стремится компенсировать ток смещения i_{C_υ}. Данный метод называется емкостной;
- выравнивание поля за счёт регулирования продольной проводимости $\dot{\gamma}_S(x)$ - импедансный метод. Либо нелинейной зависимостью $\dot{\gamma}_S(x)$ - нелинейный импедансный метод регулирования. На практике подразумевается управление активной составляющей продольной проводимости $\sigma_S(R_S)$.

В сочетании эти два метода будут выравнивать силовые линии и снижать их концентрацию в критических зонах, где напряжённость поля имеет максимальное значение.

Этот способ можно реализовать несколькими методами:

- сделать трубку-регулятор, матрицей которой будет являться СПЭ. Наполнителем же будут углеродные нановолокна. Данная добавка позволяет значительно увеличить коэффициент теплопроводности СПЭ ($\lambda_{СПЭ} = 0.25\frac{Вт}{К \cdot м}$; $\lambda_{УНВ} \approx 100\frac{Вт}{К \cdot м}$) и увеличить электропроводность (импедансный метод).

- Помимо УНВ целесообразно использовать в виде наполнителя ZnO, либо SiC. Данные материалы широко используют в трубках на низкое и среднее напряжение для придания композиционному материалу нелинейной электропроводности (импедансный метод), [14], [10], [11].

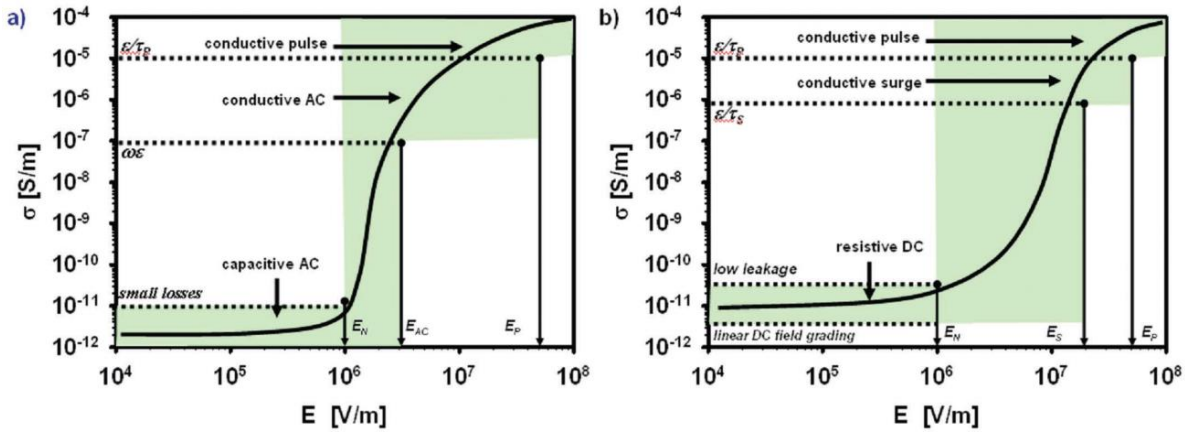


Рис.40. Качественная иллюстрация изменения электропроводности идеального нелинейного резистивного материала при увеличении напряженности электрического поля: (а) при переменном токе, (б) при постоянном токе.

- Для регулирования ёмкости по отношению к земле C_0 использовать гель смазку с высоким значением диэлектрической проницаемости. Этого можно достичь путём добавления в смазку мелкодисперсной сажи. Её необходимо наносить непосредственно на разделку кабеля (рефракционный метод).
- Так же для регулирования ёмкости по отношению к земле C_0 натянуть трубку на основе СПЭ с добавлением мелкодисперсной сажи. Толщина этой трубки для разного класса напряжения будет варьироваться. На напряжение 110 кВ толщина составит $\approx 20мм$ (рефракционный метод).

Трубка-регулятор хороша тем, что она имеет простую форму, то есть не нужно моделировать её конструкцию в специализированных программах для создания оптимальной формы.

Единственной проблемой является нахождение материала, который объединял в себе все необходимые физические свойства: хорошая теплопроводность, нелинейная зависимость электропроводности, требуемые механические свойства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

8. Создание опытных образцов для трубки-регулятора.

8.1. Исходные материалы

- Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) Borealis 4423

Для модификации ПЭНП использовали углеродные нано- и микроволокна в количестве от 1мас% до 15 мас%:

- Углеродные нановолокна (Carbon nanofibers – CNF), имеющие диаметр ~100 нм длинной от 20 до 200 мкм; плотность: 1,4-1,6 г/см^3; Удельной поверхностью: 39 м^2/г.

8.2. Получение композитов

Лабораторные блочные образцы были получены в виде дисков диаметром 25 мм и толщиной 2 мм литьевым способом из расплава. Для получения композитов на основе полиэтилена и углеродных нановолокон сухую смесь (шихту) двух порошков загружали в двухшнековый экструдер (Рисунок 41). В экструдере при температуре 165 °С за счет сильных сдвиговых усилий происходило диспергирование агрегатов углеродных нановолокон до наноразмерного состояния наполнителя и их равномерное распределение в полиэтилене. Затем полученный плав загружали в литьевую машину – «литник» (Рисунок 2) нагретый до 170 °С. Далее осуществляли впрыск расплава в пресс форму, нагретую до 70°С.

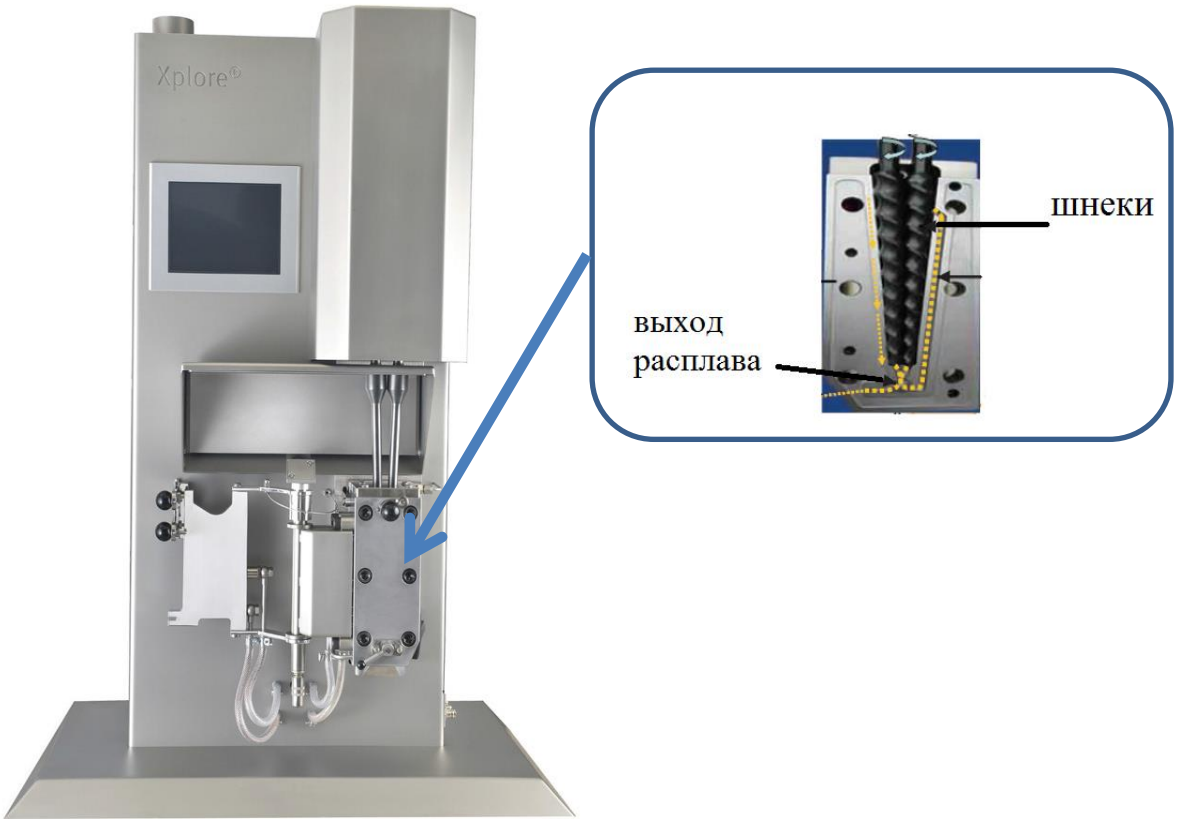


Рис.41. Двухшнековый экструдер для диспергирования

Рис. 42. Литьевая машина.

8.3. Исследование структуры композитов при помощи СЭМ

Структуру полученных на предыдущем этапе композитов исследовали на сканирующем электронном микроскопе. Для исследования равномерности распределения и диспергирования углеродных нановолокон в полиэтилене делали поперечный скол в жидком азоте.

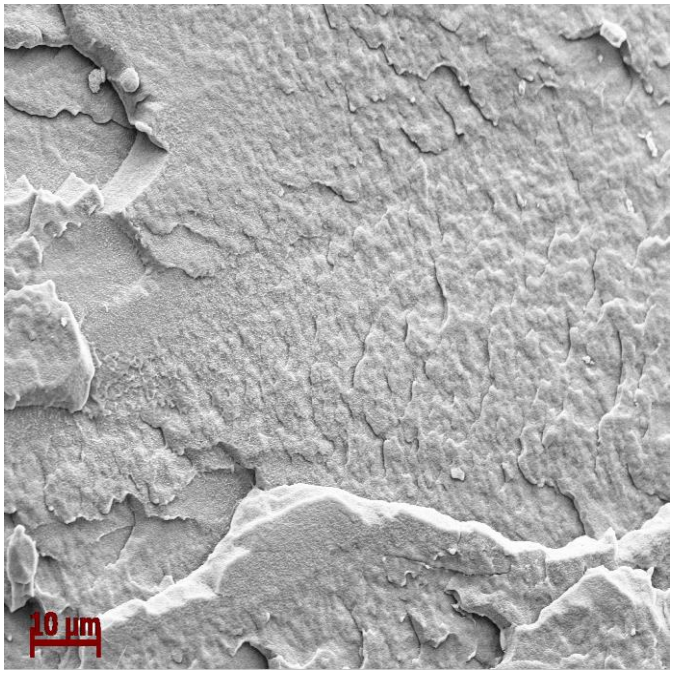


Рис. 43. Фотография СЭМ скола ПЭНП не содержащего УНВ.

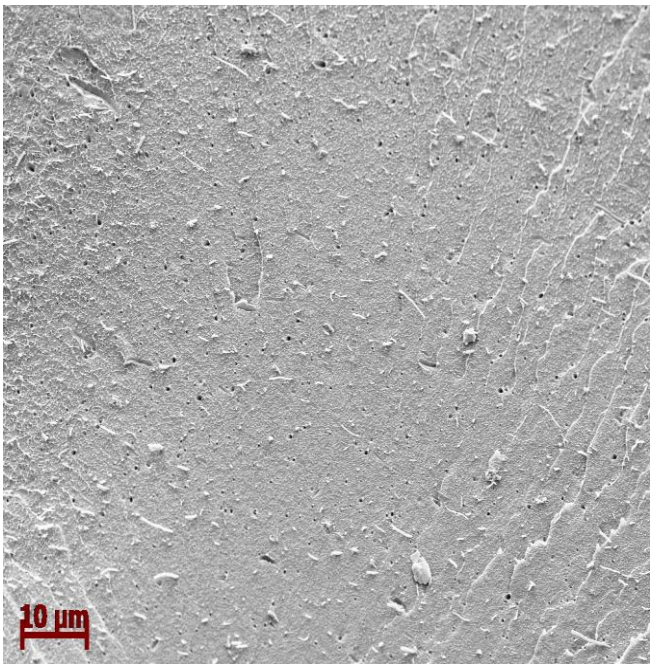


Рис. 44. Фотография СЭМ скола композита на основе ПЭНП содержащего 3мас.% УНВ.

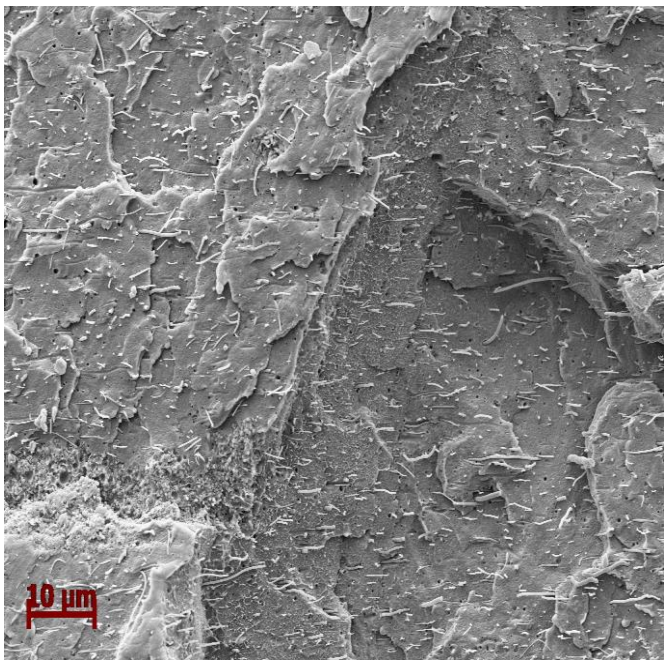


Рис. 45. Фотография СЭМ скола композита на основе ПЭНП содержащего 5мас.% УНВ.

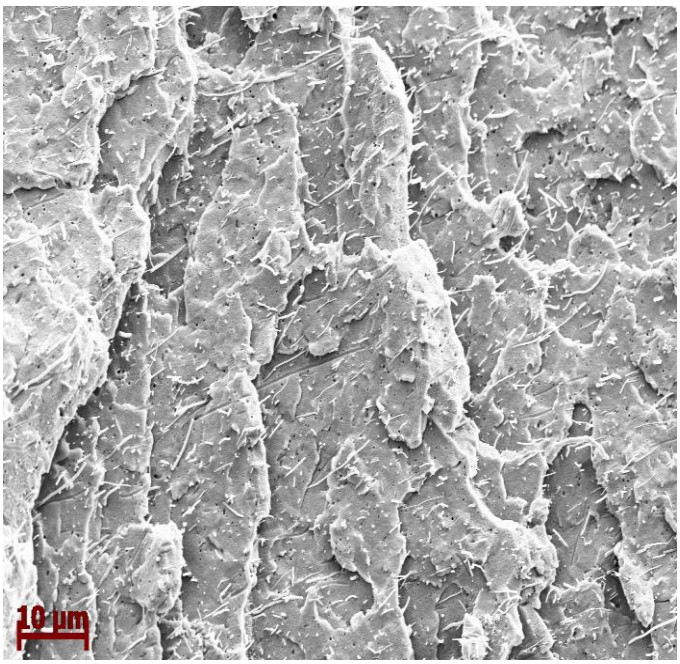
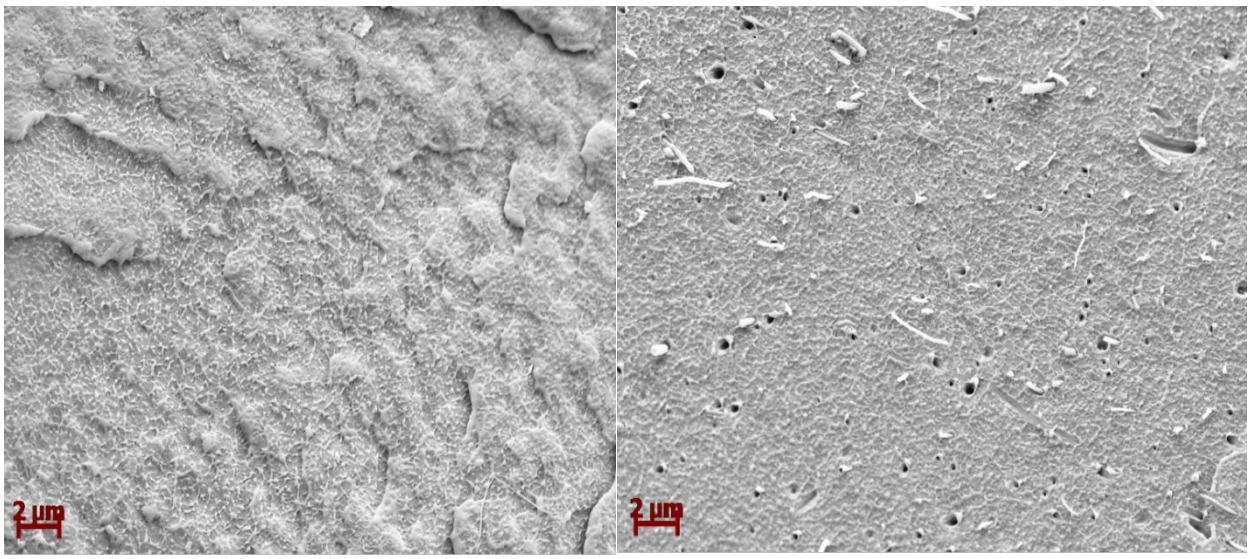
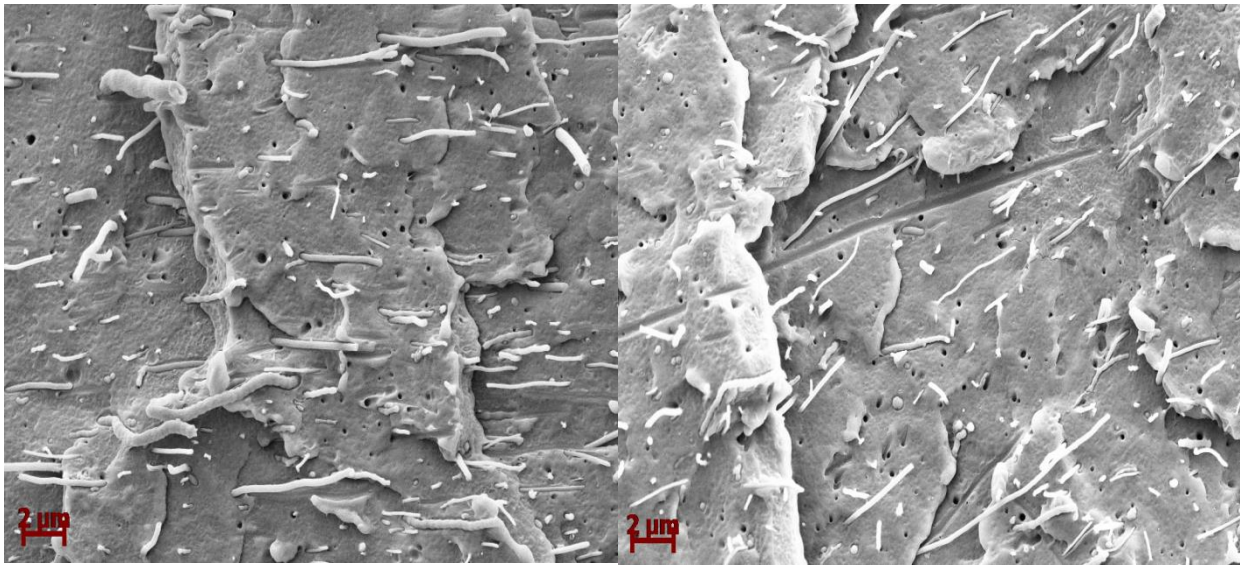


Рис. 46. Фотография СЭМ скола композита на основе ПЭНП содержащего 7мас.% УНВ.



а б



в г

Рис.47. СЭМ фотографии сколов композитов на основе ПЭНП содержащего углеродные нановолокна при большом приближении:

а) без углеродных нановолокон; содержащие

б) 3мас.%;

в) 5мас.%;

г) 7мас.% углеродных нановолокон

При анализе сколов композитов на основе ПЭНП и УНВ установлено, что используемые УНВ достаточно равномерно распределены в объеме полиэтилена (см. Рисунок 46) и диспергированы до исходных наноразмерных частиц без наличия существенных агрегатов (см. Рисунок 47).

9. Измерение теплопроводности на измерителе ИТ- λ-400

9.1. Условия эксплуатации и технические данные:

Температура окружающей среды Т, ˚С	22
диапазон измерения теплопроводности *К,* Вт/(м-К)	от 0,1 до 5
температурный диапазон измерения теплопроводности, ℃ -	25 до +75
диаметр испытуемого образца, мм	15
высота, мм	от 0,5 до 5
продолжительность измерений t, час	≤ 2,5
предел допускаемой основной погрешности, %	± 10

Состав изделия :

Блок измерительный ПУ.999.067, блок питания и регулирования ПУ 2.087.089, микровольтнаноамперметр Ф136, комплект запасных частей, инструмента и принадлежностей в соответствии с ведомостью ЗИП ПУ2899.0013И. Внешний вид измерителя представлен на рис. 48.

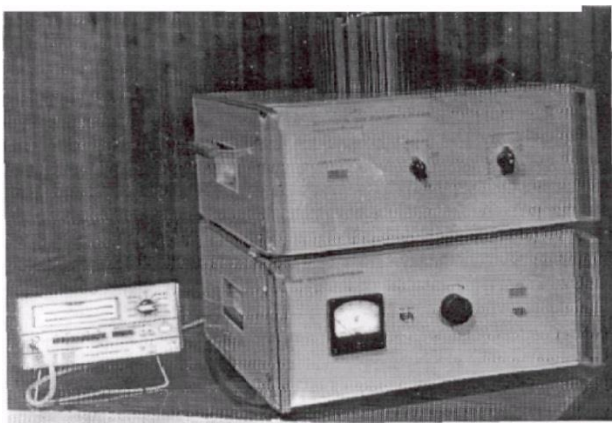


Рис. 48. - Внешний вид измерителя теплопроводности $ИТ-\lambda-400$

9.2. Устройство и принцип работы

Физическая основа

В измерителе используется метод динамического калориметра в течение времени τ, когда ее температурное поле остается близким к стационарному.

В качестве образца используются диски диаметром 15 *мм.* Оптимальная толщина диска обычно составляет 0,5 — 10 *мм.*

Тепловая схема метода показана на рис.49.

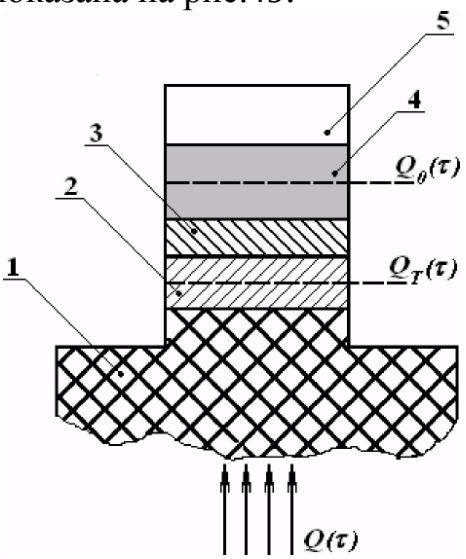


Рис.49. - Тепловая схема метода: 1 - основание; 2 – пластина (Тепломер); 3 - пластина контактная; 4 - испытуемый образец; 5 – стержень – холодильник.

Для тепловых потоков, идущих через образец $Q_O(\tau)$ для любого уровня температуры справедлива формула:

$$Q_0(\tau)=\frac{v_0 S}{P}=(\frac{1}{2}C_0+C_c)b, \tag{1}$$

где $Q_O(\tau)$- тепловой поток, проходящий через образец и поглощаемый стержнем, Вт;

v_O - перепад температуры на образце, К;

P - тепловое сопротивление между стержнем-холодильником и контактной пластиной, (м^{2}К)/Вт;

C_O - полная теплоемкость образца, Дж/К;

C_c - полная теплоемкость стержня-холодильника, Дж/К;

b - скорость разогрева измерительной ячейки, К/с;

S - площадь поперечного сечения образца, м^2

Для тепловых потоков, идущих через пластину-тепломер $Q_T(\tau)$ для любого уровня температуры справедлива формула:

$$Q_T(\tau) = K_T^* v_T = (\frac{1}{2} C_T + C_n + C_o + C_c) b\,, \tag{2}$$

где $Q_T(\tau)$ - тепловой поток, проходящий через среднее сечение пластины-тепломера (2), Вт;

K_T* - коэффициент пропорциональности, показывающий эффективную тепловую проводимость пластины-тепломера (2), Вт/К;

v_T - перепад температуры на пластине-тепломере (2), К;

C_T - полная теплоемкость пластины-тепломера (2), Дж/К;

C_n - полная теплоемкость контактной пластины (3), Дж/К;

Тепловое сопротивление между стержнем-холодильником и контактной пластиной определяется по формуле: $P = P_O + P_K$ *(3)*

где P_O - тепловое сопротивление образца, м^2 К/Вт;

P_K - поправка, учитывающая тепловое сопротивление контакта, неидентичность и тепловое сопротивление заделки термопар**,** м^{2}К/Вт.

Тепловое сопротивление образца определяется по формуле:

$$P_O = h/\lambda \tag{4}$$

где h - высота образца, м;

λ - теплопроводность образца, Вт/(м К);

На основании этих формул можно получить рабочие расчетные формулы для теплового сопротивления образца и его теплопроводности:

$$P_0 = \frac{v_0 S(1+\sigma_c)}{v_T K_T} - P_к, \tag{7}$$

где σ_c - поправка, учитывающая теплоемкость стержня-холодильника и образца;

$$\sigma_c = \frac{C_0}{2(C_0 + C_c)}, \tag{8}$$

где C_O - полная теплоемкость испытуемого образца, Дж/К; C_c - полная теплоемкость стержня-холодильника, Дж/К;

$$C_O = C_O(t)m_O\,, \tag{9}$$

где $C_O(t)$ - ориентировочное значение удельной теплоемкости образца, Дж/(кг К), m_O - масса образца, кг;

$$C_c = C_м(t)m_c\,, \tag{10}$$

где $C_M(t)$ - удельная теплоемкость меди, Дж/(кг К);

m_c - масса стержня, кг.

Влияние σ_c стандартно не превышает 5-10% и может прикидываться по примерным данным теплоемкости образца.

Значение тепловой проводимости слоя пластины теплометра определяется по следующей формуле:

$$K_T = K_T^* \frac{C_c}{0.5C_T + C_n + C_c}\,, \tag{11}$$

Окончательно значение теплопроводности вычисляются по формуле:

$$\lambda = \frac{h}{P_0}\,, \tag{12}$$

Полученные значения теплопроводности требуется относить к средней температуре образца, которая определяется по формуле:

$$t = t_c + 0{,}5A_t n_O, \tag{13}$$

где t - средняя температура образца, °С; t_c - температура, при которой проводилось измерение теплопроводности, °С; A_t - чувствительность термопары хромель-алюмель, К/мВ; n_O – напряжение на термопаре, соответствующее перепаду температуры на образце, мВ.

9.3. Порядок проведения эксперимента

9.1.1. Установите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение t_c.

9.1.2. Установите бачок на верхний колпак измерительного блока.

9.1.3. Снимите бачок с колпака измерительного блока через 2-3 минуты после достижения температуры минус 75°С.

Включите кнопкой «НАГРЕВ» основной нагреватель.

9.1.4. Снимите показания прибора Ф136 n_O и n_T, при достижении каждой из температур, указанных в табл.7, проводя переключения рукояткой переключателя «ИЗМЕРЕНИЕ», занес ите значения n_O и n_T в таблицу и переведите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение t_c.

9.1.5. Выключите кнопкой «НАГРЕВ» основной нагреватель при достижении верхнего уровня температуры, испытаний.

9.1.6. Установите переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» в положение УСТ 0.

9.1.7. Зааретируйте прибор Ф136.

9.1.8. Проведите охлаждение измерительной ячейки до комнатной *t*.

9.1.9. Выключите блок питания и регулирования.

9.4. Результаты проведённых исследований

По итогам исследований были получены данные указанные в таблицах 13-16

Таблица 13: Содержание УНВ 1%:

1%									
t,C	$n_т$,дел	$n_т$,мВ	n_0,дел	n_0,мВ	σ_c	$1+\sigma_c$	$К_т$	$Р_к$	**λ,Вт/К·м**
25	8	172	42	844	0,010359	1,010359	0,129	0,000814	0,253018
50	11,5	238	60	1255	0,010178	1,010178	0,137	0,000732	0,246481
75	14	282	77,5	1530	0,010077	1,010077	0,144	0,000682	0,250428

Таблица 14: Содержание УНВ 5%:

5%									
t,C	$n_т$,дел	$n_т$,мВ	n_0,дел	n_0,мВ	σ_c	$1+\sigma_c$	$К_т$	$Р_к$	**λ,Вт/К·м**
25	6,5	128	25,5	509	0,008525	1,008525	0,129	0,000814	0,319584
50	9,5	190	43	857	0,008375	1,008375	0,137	0,000732	0,291629
75	12	235	57,5	1137,5	0,008292	1,008292	0,144	0,000682	0,282303

Таблица 15: Содержание УНВ 7%:

7%									
t,C	$n_т$,дел	$n_т$,мВ	n_0,дел	n_0,мВ	σ_c	$1+\sigma_c$	$К_т$	$Р_к$	**λ,Вт/К·м**
25	7	134	25	503	0,008525	1,008525	0,129	0,000814	0,341923
50	9,5	192	40,5	815	0,008375	1,008375	0,137	0,000732	0,312549
75	12	238	137,5	1087,5	0,008292	1,008292	0,144	0,000682	0,301247

Таблица 16: Содержание УНВ 15%:

15%									
t,C	$n_т$,дел	$n_т$,мВ	n_0,дел	n_0,мВ	σ_c	$1+\sigma_c$	$К_т$	$Р_к$	**λ,Вт/К·м**
25	7	140	22,5	450	0,00863	1,00863	0,129	0,000814	0,405742
50	10	200	35	700	0,008478	1,008478	0,137	0,000732	0,38567
75	12	242	46,5	937	0,008394	1,008394	0,144	0,000682	0,358952

Таблица 17: наглядные показатели улучшения теплопроводности при внедрении УНВ

Содержание УНВ	Значение теплопроводности λ, Вт/м·К	Отношение теплопроводности КМ и чистого ПЭ
1%	0.25	1.25
5%	0.298	1.49
7%	0.319	1.6
15%	0.383	1.9

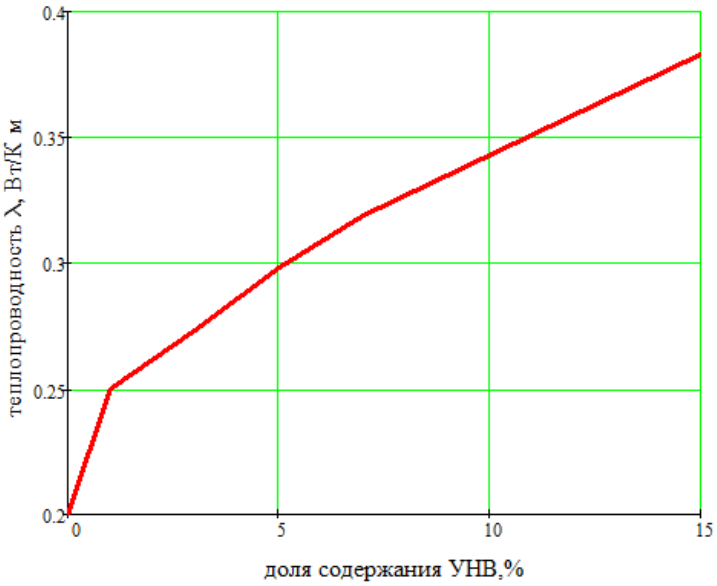


Рис. 50. График зависимости коэффициента теплопроводности композиционного материала на основе ПЭНП от содержания УНВ

ВЫВОД

На лабораторном экструдере был получены образцы композиционного материала на основе ПЭНП с различным процентным содержанием УНВ. Исследование на сканирующем электронном микроскопе показало, что используемые УНВ достаточно равномерно распределены в объеме полиэтилена (см. Рисунок 43 - 47) и диспергированы до исходных наноразмерных частиц без наличия существенных агрегатов. Измерения проведённые на $ИТ-\lambda-400$, позволили получить зависимость коэффициента теплопроводности от процентного содержания УНВ в пределах от 1 – до 15%. При массовом процентном содержании УНВ равном 15% теплопроводность материала увеличилась в 1.9 раза. Изучив иностранную литературу, было выяснено, что при использовании термически обработанных волокон, можно добиться четырнадцатикратного увеличения теплопроводности. Поэтому следующим шагом будет исследование материала и создания опытного образца трубки на основе полиэтилена с добавлением термически обработанных УНВ (предположительно марки PR-25-XT-HHT).

10. Испытания.

10.1. Программа и методика предварительных электрических испытаний опытных образцов стресс конусов кабельных муфт на напряжение 110 кВ в составе кабельной системы.

10.1.1. Объект испытания

Объектом предварительных электрических испытаний является кабельная система 110 кВ, состоящая из силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 64/110 кВ типа (А)ПвП и кабельных муфт*: соединительных типа XLPE CJB-64/110 CJ, концевых типа XLPE – 64/110 CT.

Монтаж кабельной арматуры произведен сертифицированным персоналом в соответствии с инструкциями изготовителя и с участием представителей фирм-производителей, осуществлявших шефмонтаж кабельной арматуры.

Кабельная система 110 кВ смонтирована и размещена в испытательном поле стенда 200 кВ Испытательного Центра высоковольтного электрооборудования ОАО "НИИПТ" (ИЦ ВЭ), г. С- Петербург. Кабельная система 110 кВ размещена в виде буквы "U" с радиусом изгиба 2,0–2,5 м, превышающим минимально допустимый радиус изгиба при прокладке для кабеля соответствующего сечения жилы. По всей длине кабельной системы через каждые 1,5–2,0 м установлены изолирующие подставки на расстоянии 0,3–0,5 м от пола высоковольтного зала, на которых расположен кабель.

Соединительные муфты размещены на изолирующих подставках. Концевые муфты установлены вертикально на металлических стойках. Металлический экран кабеля и стойки муфт заземлены гибким медным проводом сечением не менее 25 мм^2.

*** - кабельные муфты укомплектованы оригинальными стресс конусами, испытанными по программе и методике, представленной в Приложении 1**

Для нагрева кабельной системы 110 кВ током по жиле до требуемой температуры кабель пропущен сквозь ярмо трансформаторов нагрева. Для создания замкнутой цепи нагрева токоведущие выводы концевых муфт соединены между собой алюминиевой шиной (с использованием аппаратных зажимов). Для измерения тока нагрева на кабеле установлены

трансформаторы тока. Для контроля температуры нагрева кабельной системы 110 кВ в процессе испытаний циклическим нагревом, на оболочке кабеля по всей длине системы, на кабельных муфтах, а также на расстоянии 0,5 м от муфт установлены датчики температуры (12 шт.).

Для обеспечения требуемой температуры нагрева кабельной системы 110 кВ в процессе испытаний рядом с ней смонтирован образец испытуемого кабеля длиной 10–12 м (контрольный образец), который замкнут в виде петли.

Для нагрева контрольного образца током по жиле до требуемой температуры он пропущен сквозь ярмо трансформатора нагрева и расположен на изолирующих подставках на расстоянии 0,4 м от пола. Для измерения тока нагрева на контрольном образце кабеля установлен трансформатор тока. Для измерения температуры нагрева контрольного образца на нем в двух точках установлены датчики температуры (термопары): на жиле кабеля, на экране кабеля и на оболочке кабеля (6 шт.).

Обеспечение требуемой температуры нагрева кабельной системы 110 кВ в процессе испытаний осуществляется путем поддержания (регулирования) тока нагрева такой же величины, как и у контрольного образца (находящегося в одних и тех же климатических условиях), температура нагрева которого контролируется с помощью датчиков температуры, установленных на жиле и на оболочке кабеля.

10.1.2. Цель испытаний

Цель предварительных электрических испытаний кабельной системы 110 кВ – подтверждение эксплуатационной надежности и проверка соответствия кабельных муфт на напряжение 110 кВ требованиям п.14.3 международного стандарта МЭК 60840:2004 "Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ (U_m = 36 кВ) до 150 кВ (U_m = 170 кВ). Методы испытания и требования".

10.1.3. Условия проведения испытаний

Предварительные электрические испытания кабельных муфт на напряжение110 кВ на соответствие требованиям п.14.3 международного стандарта МЭК 60840 проводятся в естественных климатических условиях высоковольтного экранированного зала ИЦ ВЭ при температуре окружающей среды (20±15) °С. [1]

Испытание наружной защиты соединительной муфты 110 кВ на соответствие требованиям п. 14.3 международного стандарта МЭК 60840 проводятся в естественных климатических условиях при температуре окружающей среды (20±15) °С.

10.1.4. Программа проведения испытаний, методика испытаний.

10.1.4.1. Предварительные электрические испытания кабельных муфт на напряжение110 кВ проводятся в соответствии с п.14.3 международного стандарта МЭК 60840 и включают в себя электрические испытания на кабельной системе, состоящей из образца кабеля и кабельных муфт. Длина кабеля между кабельной арматурой должна быть не менее 5 м.

Перед предварительными испытаниями следует измерить толщину изоляции на образце испытуемого кабеля (п. 14.3.1 стандарта МЭК 60840) в соответствии со стандартом МЭК 60811-1-1 и ГОСТ 12177-79.

Толщина изоляции не должна превышать номинальную толщину, установленную в ТУ на кабели, более чем на 15 %. При превышении номинальной толщины более чем на 5 % при проведении испытаний должен быть произведен пересчет испытательного напряжения таким образом, чтобы градиент напряженности электрического поля на экране по жиле кабеля был равен градиенту напряженности при номинальной толщине изоляции и при нормированном значении испытательного напряжения для кабеля соответствующего номинального напряжения.

10.1.4.2. Предварительные электрические испытания кабельных муфт на напряжение110 кВ проводятся (по п. 14.3.2 стандарта МЭК 60840) в следующей последовательности:

а) измерение частичных разрядов при температуре окружающей среды (по п. 12.3.4 стандарта МЭК 60840);

б) испытание циклическим нагревом под напряжением (по п. 12.3.6 стандарта МЭК 60840);

в) измерение частичных разрядов при температуре окружающей среды и при высокой температуре (по 12.3.4 стандарта МЭК 60840) (измерение должно быть проведено после последнего цикла нагрева);

г) испытание грозовым импульсным напряжением с последующим испытанием напряжением промышленной частоты 50 Гц (по п. 12.3.7 стандарта МЭК 60840);

д) проверка кабельной системы после проведения испытаний (по п. 12.3.8 стандарта МЭК 60840);

е) испытание наружной защиты соединительной муфты 110 кВ с разделением экрана.

Испытания по п.п. а) – д) проводятся последовательно на одном и том же образце кабельной системы.

Испытания по п. е) проводятся на соединительной муфте, которая выдержала испытание циклами нагрева под напряжением по п. б) или на отдельной соединительной муфте, которая выдержала испытание не менее чем тремя термическими циклами в соответствии с приложением Н (п. 14.3 стандарта МЭК 60840).

10.1.4.3. После монтажа кабельной арматуры производится измерение частичных разрядов при температуре окружающей среды (по п. 12.3.4 стандарта МЭК 60840). Измерения уровня частичных разрядов производятся в соответствии со стандартом МЭК 60885-3 и ГОСТ 20074-83. Чувствительность схемы измерений должна составлять не менее 5 пКл.[2]

При измерениях частичных разрядов испытательное переменное напряжение промышленной частоты повышается постепенно и поддерживается на уровне $1{,}75U_0$ (112 кВ) в течение 10 с, затем испытательное напряжение медленно

снижается до значения 1,5U_0 (96 кВ), при котором производится измерение (U_0 = 64 кВ – номинальное фазное напряжение кабеля 110 кВ).

При испытательном напряжении 1,5U_0 (96 кВ) не должен быть обнаружен разряд от испытуемого объекта.

10.1.4.4. При испытаниях циклическим нагревом под напряжением (по п. 12.3.6 стандарта МЭК 60840) кабель должен быть изогнут в виде буквы "U" с диаметром изгиба не менее, указанного в п. 12.3.3 стандарта МЭК 60840.

При испытаниях циклическим нагревом под напряжением кабельная система подвергается воздействию 20 циклов нагрева и охлаждения при непрерывном приложении испытательного переменного напряжения промышленной частоты значением 2U_0 (128 кВ) в течение всего времени испытаний.

Испытания напряжением кабельной системы проводятся по однофазной схеме по ГОСТ 2990-78.

Нагрев кабельной системы осуществляется электромагнитным возбуждением тока в жиле кабеля с помощью нагревательного трансформатора.

Каждый цикл нагрева и охлаждения кабельной системы состоит из нагрева током по жиле кабеля до установившейся температуры жилы (95–100) °С в течение не менее 8 часов, включая выдержку в течение последних 2 часов при указанной температуре (с измерением тока нагрева), и охлаждения кабельной системы естественным путем не менее 16 ч после отключения нагрева до достижения температуры на жиле кабеля, не превышающей температуру окружающей среды более чем на 10 °С. Определение значения тока нагрева кабельной системы в зависимости от температуры окружающей среды и контроль температуры нагрева осуществляется при помощи контрольного образца кабеля той же марки, на жиле и на оболочке которого установлены датчики температуры.

Кабельная система считается выдержавшей испытание циклическим нагревом под напряжением, если в процессе испытаний не произошел пробой изоляции системы.

10.1.4.5. После последнего цикла испытаний циклическим нагревом под напряжением производится измерение частичных разрядов на кабельной системе при температуре окружающей среды и при высокой температуре (при температуре жилы 95–100 °С) в соответствии с п. 12.3.4 стандарта МЭК 60840.

При испытательном напряжении $1{,}5U_0$ (96 кВ) не должен быть обнаружен разряд от испытуемого объекта.

10.1.4.6 При испытаниях грозовым импульсным напряжением (по п. 12.3.7 стандарта МЭК 60840) кабельная система подвергается воздействию нормированных импульсов грозового перенапряжения 1,2/50 мкс (длительность фронта волны в диапазоне 1–5 мкс; длина волны – 40–60 мкс) по 10 импульсов положительной и отрицательной полярности. Испытания импульсным напряжением проводятся по стандарту МЭК 60230 и ГОСТ Р 53354-2009. Амплитуда испытательного импульсного напряжения составляет 550 кВ.

До проведения испытаний грозовым импульсным напряжением кабельная система нагревается до температуры жилы кабеля (95–100) °С и выдерживаются в указанных пределах не менее 2 часов. Нагрев образцов осуществляется электромагнитным возбуждением тока в жиле кабеля с помощью нагревательного трансформатора. Определение значения тока нагрева в зависимости от температуры окружающей среды и контроль температуры нагрева жилы кабельной системы осуществляется при помощи контрольного образца кабеля той же марки, на жиле и на оболочке которого установлены датчики температуры.

Испытуемая кабельная система считается выдержавшей испытание грозовым импульсным напряжением, если в процессе испытаний не произошел пробой изоляции или перекрытие.

После испытаний импульсным напряжением производится испытание системы при температуре окружающей среды напряжением промышленной

частоты значением 2,5U_0 (160 кВ) в течение 15 минут по ГОСТ 2990-78. Испытание проводится при температуре окружающей среды.

Испытуемая кабельная система считается выдержавшей испытание напряжением промышленной частоты, если в процессе испытаний не произошел пробой изоляции или перекрытие.

10.1.4.7. После окончания испытаний производится внешний осмотр кабельной системы (по п. 12.3.8 стандарта МЭК 60840).

При внешнем осмотре без применения увеличительных приборов кабельной системы, состоящей из кабеля и кабельной арматуры, не должно быть выявлено никаких следов повреждения, которые могут повлиять на эксплуатацию системы.

10.1.4.8. Испытание наружной защиты соединительной муфты 110 кВ с разделением экрана (по п. Н.2 Приложения Н стандарта МЭК 60840) проводится на соединительной муфте, которая выдержала испытание циклами нагрева под напряжением по п.4.4 или на отдельной соединительной муфте, которая выдержала не менее трех циклов нагрева без напряжения, в следующей последовательности:

–выдержка в воде с циклами нагрева (по п. Н.3 Приложения Н стандарта МЭК 60840);

–испытание напряжением постоянного тока (по п.Н.4.2.1 Приложения Н стандарта МЭК 60840);

–испытание импульсным напряжением (по п.Н 4.2.2 Приложения Н стандарта МЭК 60840);

– внешний осмотр (по п.Н.5 Приложения Н стандарта МЭК 60840).

- При испытаниях на отдельной соединительной муфте: на образце кабеля длиной 6 м монтируется соединительная муфта с разделением экрана. При испытаниях циклами нагрева без напряжения испытуемый образец с муфтой (испытуемая сборка) размещается на воздухе на изолирующих подставках в испытательном поле стенда 200 кВ. Для создания замкнутой цепи нагрева открытые концы кабеля соединяются с кабелем той же марки

длиной 6 м (контрольный образец) с использованием аппаратных зажимов. Для измерения тока нагрева на кабеле устанавливается трансформатор тока. Для контроля температуры нагрева испытуемой сборки в процессе испытаний на контрольном образце кабеля в двух точках (на расстоянии 3,0 и 3,5 м от места соединения) устанавливаются датчики температуры на жиле и на оболочке кабеля. Датчики температуры устанавливаются также на соединительной муфте и на оболочке кабеля на расстоянии 0,5 м от муфты (всего 7 датчиков).

- Испытуемая сборка подвергается воздействию трех циклов нагрева и охлаждения без приложения испытательного напряжения. Каждый цикл нагрева и охлаждения состоит из нагрева током по жиле до установившейся температуры жилы (95–100) °С в течение не менее 8 часов, включая выдержку в течение не менее 2 часов при указанной температуре (с измерением тока нагрева). И охлаждения естественным путем не менее 16 ч после отключения нагрева до достижения температуры на жиле кабеля, не превышающей температуру окружающей среды более чем на 10 °С.
- После трех циклов нагрева силовой кабель испытуемой сборки подрезается с обеих сторон от соединительной муфты на расстоянии 0,2–0,3 м от кожуха муфты. На открытые концы кабеля усаживаются защитные колпачки для герметизации кабеля. Испытуемая сборка с соединительной муфтой длиной 4,0–4,2 м размещается на изолирующих подставках в герметичном металлическом кессоне с водой (длина кессона – 4,3 м; ширина – 1 м; высота – 2 м). Испытуемая сборка погружается на глубину не менее 1 м от самой высокой точки наружной защиты соединительной муфты.

Испытуемая сборка подвергается воздействию 20 циклов нагрева и охлаждения с нагревом воды до (70–75) °С без приложения испытательного напряжения(по п. Н.3 Приложения Н стандарта МЭК 60840). Каждый цикл включает в себя нагрев до установившейся температуры воды (70–75) °С, выдержку в течение не менее 5 часов при указанной температуре воды и

охлаждение до температуры воды не более чем на 10 °С превышающей температуру окружающей среды.

Нагрев производится с помощью нагревательных элементов, расположенных в кессоне с водой. Сверху кессон закрывается герметичной крышкой. Для ускорения охлаждения крышка кессона открывается в режиме охлаждения и производится частичный слив горячей воды и долив холодной воды. Контроль температуры воды производится с помощью датчиков температуры, установленных в разных зонах кессона.

- После циклов нагрева и охлаждения испытуемая сборка остается в воде и производится испытание напряжением постоянного тока по ГОСТ 2990-78 при температуре окружающей среды. Изолированные выводы экранов силового кабеля длиной 3 м каждый выводятся на расстояние не менее 0,5 м выше уровня воды. Испытательное напряжение 20 кВ постоянного тока в течение 1 мин прикладывается последовательно между экранами кабеля (изолированными выводами) и между каждым из экранов (изолированным выводом) и внешней частью заземленной наружной оболочки соединительной муфты (по п.Н.4.2.1 Приложения Н стандарта МЭК 60840).

Испытуемая сборка считается выдержавшей испытание постоянным напряжением, если в процессе испытаний не произошел пробой или перекрытие.

- Перед испытанием импульсным напряжением испытуемая сборка вынимается из воды, и наружная поверхность испытуемой сборки оборачивается мокрой тканью или вокруг всей наружной поверхности испытуемой сборки накладывается проводящее покрытие.

При испытаниях грозовым импульсным напряжением (по п.Н.4.2.2 Приложения Н стандарта МЭК 60840) испытуемая сборка подвергается воздействию нормированных импульсов грозового перенапряжения 1,2/50 мкс по 10 импульсов положительной и отрицательной полярности. Значение испытательного импульсного напряжения составляет 60 кВ при приложении

напряжения между экранами и 30 кВ при приложении напряжения между каждым из экранов (изолированным выводом) и внешней частью заземленной наружной оболочки соединительной муфты (по табл. Н.1 Приложения Н стандарта МЭК 60840).

Испытуемая сборка считается выдержавшей испытание грозовым импульсным напряжением, если в процессе испытаний не произошел пробой.

- После окончания испытаний производится внешний осмотр испытуемой сборки (по п.Н.5 Приложения Н стандарта МЭК 60840).

Коробки наружной защиты соединительных муфт (кожуха), заполненные применяемыми материалами, рассматриваются как удовлетворяющие требованиям, если нет видимых следов внутренних пустот, внутренних перемещений заполнителя, обусловленных доступом воды, или утечки материала через различные соединения или стенки коробки (кожуха).

В наружной защите соединительной муфты, где используют другие технологии и материалы, не должно быть следов проникновения воды или внутренней коррозии.

10.1.4.9. Общие требования по проведению испытаний

- Перед началом проведения испытаний кабельной системы 110 кВ производится:

– внешний осмотр испытательных установок, состояние оборудования и правильность сборки схем в соответствии с Инструкциями по эксплуатации (ИЭ) на установки стенда 200 кВ, А-ИИ 70 и ГИН 4МВ;

– внешний осмотр систем измерения;

– внешний осмотр испытываемой кабельной системы 110 кВ;

– проверка наличия и надежности контактных соединений всех элементов схемы и заземления;

– проверка укомплектованности стенда 200 кВ, установки А-ИИ 70 и ГИН 4 МВ защитными средствами;

– проверка наличия Инструкций по эксплуатации на установки стенда 200 кВ, А-ИИ 70 и ГИН 4МВ, Программы испытаний, Инструкции на ведение режима испытаний и Эксплуатационного журнала.

- Включение и отключение испытательных установок стенда 200 кВ, А-ИИ 70 и ГИН 4МВ и их настройка производится в соответствии с Инструкций по эксплуатации на установки стенда 200 кВ, А-ИИ 70 и ГИН 4 МВ.
- Вывод на испытательный режим осуществляется в соответствии с Программой испытаний и Инструкцией на ведение режима испытаний разработанной в ОАО «НТЦ ЕЭС».
- Измерение испытательного напряжения и температуры нагрева кабельной системы 110 кВ осуществляется в соответствии с Методиками выполнения измерений (МВИ) высокого напряжения и температуры нагрева ИЦ ВЭ.
- При работе стенда в длительном режиме оперативный персонал, обслуживающий стенд, производит постоянный круглосуточный контроль за работой оборудования стенда, а также периодический (с корректировкой при необходимости) контроль за режимами испытаний в течение смены, согласно Программе испытаний, с записью в Эксплуатационном журнале стенда контролируемых параметров.
- В процессе испытаний в Эксплуатационном журнале фиксируются:

– дата и время контроля режима испытаний;

– температуры нагрева контрольных образцов (температуры жилы и оболочки кабеля) и испытываемой кабельной системы 110 кВ (температуры оболочки кабеля по всей длине и кабельных муфт);

– значение тока нагрева контрольного образца и испытываемой кабельной системы 110 кВ (на момент контроля до и после корректировки для поддержания заданного режима испытаний по температуре);

– температура, давление и влажность окружающей среды.

10.1.5. Испытательные установки и средства измерений, используемы при проведении испытаний

10.1.5.1. Испытания кабельной системы, включающей в себя кабель и кабельные муфты на напряжение 110 кВ, а также кабельной соединительной муфты 110 кВ с разделением экрана, проводятся на испытательном стенде 200 кВ ИЦ ВЭ, аккредитованного Федеральной службой по аккредитации (РОСАККРЕДИТАЦИЯ) на проведение испытаний силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 500 кВ включительно и муфт к ним (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21МВ14 от 30.10.2012 г.)

Стенд 200 кВ состоит из трех автономных установок: высоковольтной установки 200 кВ для получения однофазного испытательного переменного напряжения частоты 50 Гц и установок нагрева для нагрева системы и контрольного образца.

Высоковольтная установка включает в себя регулировочный трансформатор *M*1 типа GEg100/380 (U = 380/0–525кВ), высоковольтный трансформатор *M*2 типа PEOY 100/200 ($U_н$ = 200 кВ, $S_н$ = 100 кВА, $k_{тр}$ = 400), компенсирующий дроссель *L*1 и батарею компенсирующих конденсаторов *C*1.

Установки нагрева включают в себя регулировочный трансформатор *T*1 типа Geg 20/380 (U = 380/0–400 В), группу трансформаторов нагрева *T*2 типа ETKA 250 (U = 525 В, $S_н$ = 250 кВА) и батарею компенсирующих конденсаторов *C*2.

10.1.5.2. Испытания кабельной соединительной муфты 110 кВ с разрывом экрана постоянным напряжением производится с использованием установки постоянного напряжения А-ИИ 70 ($U_н$ = 70 кВ).

10.1.5.3. Испытания кабельной системы 110 кВ,а также кабельной соединительной муфты 110 кВ с разрывом экрана импульсным напряжением проводятся с использованием генератора импульсного напряжения (ГИН 4МВ) типа Sp640/4000 (импульсы напряжения – 1,2/50 мкс и 250/2500 мкс, амплитудой до 3200 кВ), расположенного в высоковольтном зале ИЦ ВЭ.

10.1.5.4. Измерение испытательного переменного напряжения частоты 50 Гц осуществляется с помощью емкостного делителя типа MCF 75/350 совместно с универсальным вольтметром MUT-9.

10.1.5.5. Измерение испытательного импульсного напряжения осуществляется с помощью емкостного делителя напряжения типа SMCF 750/3000 совместно с осциллографом ОВ-1.

10.1.5.6. Измерение значения тока нагрева кабельной системы 110 кВ и контрольных образцов осуществляется с помощью трансформаторов тока типа ТНШЛ-0,66-0,5-5000/5 и измерителей типа Е160.3.

10.1.5.7. Измерение температуры нагрева кабельной системы 220 кВ и контрольных образцов осуществляется автоматическим регистратором температуры Термодат-29М1 с помощью термопар типа ХК.

10.1.5.8. Измерение уровня частичных разрядов кабельной системы 220 кВ осуществляется с помощью цифрового измерительного комплекса "СКИТ ЧР".

10.1.5.9. Измерение тангенса диэлектрических потерь кабельной системы 220 кВ осуществляется мостом переменного тока Р5026.

10.1.5.10. Испытательные стенды 600 кВ, 200 кВ, установка А-ИИ 70 и генератор импульсных напряжений (ГИН 4МВ) аттестованы; средства измерений – поверены или откалиброваны.

10.1.6. Обработка результатов испытаний.

По результатам испытаний кабельной системы 110 кВ, а также кабельной соединительной муфты 110 кВ с разделением экрана, составляется сводная таблица, в которой приводятся суммарная продолжительность испытаний системы в каждом из испытательных режимов с указанием величин испытательных воздействий, пределов их изменений, а также условий окружающей среды, и общая продолжительность испытаний во всех режимах.

В случае пробоя изоляции испытуемой сборки указывается место, характер и причины пробоя, которые определяются по результатам разбора и изучения места пробоя и характеристик изоляции системы.

10.2. Протокол испытаний двух прототипов стресс-конусов концевых муфт 110 кВ разработки ООО "НИИ "Севкабель"

ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ:

- Наименование и название изделия, тип: два прототипа стресс-конусов концевых муфт 110 кВ разработки ООО "НИИ "Севкабель" (Россия).
- Код ОКП:
- Код ТН ВЭД:
- Заводской номер:
- Описание изделия: для проведения испытаний на кабеле АПвП2г 1×400/95-64/110 длиной 11 м смонтированы две концевые муфты с прототипами стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель". Монтаж кабельных муфт произведен бригадой ООО "Севкабель-Инжиниринг".
- фотографии испытуемых образцов приведены в Приложении 2.
- Предприятие-изготовитель: ООО "НИИ "Севкабель" (Россия).
- Нормативный документ (НД), по которому изготавливается изделие:
- Сведения об акте отбора образцов (организация, номер, дата):
- Дата получения образцов: 27.11.2012 г.
- Дата проведения испытаний: с 05 декабря 2012 г. по 07 декабря 2012 г.

ЦЕЛЬ, ПРОГРАММА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ:

- Цель испытаний: проверка соответствия предъявленных образцов прототипов стресс-конусов концевых муфт 110 кВ разработки ООО "НИИ "Севкабель" требованиям п.п. 9.2, 9.3 международного стандарта МЭК 60840.
- Программа испытаний: испытания проведены в соответствии с требованиями п.п. 9.2, 9.3 международного стандарта МЭК 60840.
- Метод (методика) испытаний: испытания проведены по п.п. 9.2, 9.3 международного стандарта МЭК 60840.

- Нормативный документ на изделие, на соответствие требованиям которого проведены испытания: международный стандарт МЭК 60840:2004 "Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ (U_m = 36 кВ) до 150 кВ (U_m = 170 кВ). Методы испытания и требования".

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ:

- Климатические условия проведения испытаний: испытания проводились в закрытом помещении при следующих атмосферных условиях:

температура окружающей среды: +(16–17)°С;

относительная влажность – 65 %;

атмосферное давление – 101 кПа.

ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Перечень применяемого испытательного оборудования (ИО) и средств измерений (СИ) приведен в Приложении 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

- Результаты испытаний приведены в Приложении 4.
- Фотография испытуемой кабельной системы приведена в Приложении 2.
- Схема проведения испытаний приведена в Приложении 5.
- Осциллограмма измерения ЧР приведена в Приложении 6.
- Фотографии муфты и кабеля после разборки приведены в Приложении 7.

ВЫВОДЫ

Два прототипа стресс-конусов концевых муфт 110 кВ разработки ООО "НИИ "Севкабель" соответствуют требованиям п.п. 9.2, 9.3 международного стандарта МЭК 60840.

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

11.1. Общие сведения, средства защиты

Кабельный аксессуар, проектируемый в данной магистерской работе, который называют стресс-конус, разрабатывается с целью снизить затраты на производство кабельной арматуры, а так же максимально снизить значение напряженности электрического поля в критических зонах кабельной разделки. Предполагается эксплуатация разрабатываемых аксессуаров для высоковольтных кабельных линий на напряжение 110 кВ, частота 50 Гц. Так же для подтверждения работоспособности данной арматуры, необходимо провести высоковольтные испытания. В связи с этим есть вероятность поражения электрическим током при испытаниях. Поэтому необходимо учесть:

- «ГОСТ 12.1.051-90 «Электробезопасность. Расстояния безопасности в охранной зоне линий электропередачи напряжением свыше 1000В.»
- «ГОСТ 12.1.019-79(1996) ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.»

Защита людей от поражения током должна обеспечивается техническими способами и средствами, организационными и техническими мероприятиями и контролем требований электробезопасности по ГОСТ 12.1.019. Так же при выполнении работ вблизи токоведущих частей, находящихся под напряжением свыше 1 кВ, защита обеспечивается установлением охранных зон, инструктажем работающих об опасности прикосновения или приближения к токоведущим частям.

В данном ГОСТе предъявляются следующие требования электробезопасности при выполнении работ в охранных зонах:

Работы в охранных зонах выполняются под непосредственным руководством человека, ответственного за безопасность производства работ. Если нет возможности соблюсти данные требования, тогда работу проводят только при снятом напряжении.

По ГОСТ 12.1.019-79 устанавливается защита людей от действия электрического поля.

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- продолжительности воздействия электрического тока или электромагнитного поля на организм человека;
- условий внешней среды.

Требования электробезопасности при воздействии электрических полей промышленной частоты по ГОСТ 12.1.002-84;

При проведении испытаний электробезопасность обеспечивалась:

конструкцией электроустановок;

техническими способами и средствами защиты;

организационными и техническими мероприятиями.

Технические способы и средства защиты, обеспечивающие электробезопасность, устанавливались с учетом:

а) номинального напряжения, рода и частоты тока электроустановки;

б) способа электроснабжения;

в) вида исполнения (стационарные);

г) условий внешней среды: помещения повышенной опасности;

д) возможности приближения к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на расстояние меньше допустимого или попадания в зону растекания тока;

е) Монтажа, наладки, испытаний, эксплуатации электроустановок, осуществляемых в зоне расположения установок.

Обеспечение электробезопасности происходит следующими техническими способами и средствами:

а) Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям применялись следующие способы и средства:

- защитная оболочка;
- защитные ограждения (стационарные);

Так же проводились следующие организационные и технические мероприятия:

- К работе в электроустановках допускались лица, прошедшие инструктаж и обучение безопасным методам труда, проверку знаний правил безопасности и инструкций в соответствии с занимаемой должностью.
- Для обеспечения безопасности работ в действующих электроустановках назначались ответственные за организацию и безопасность производства работ; устанавливался надзор за проведением работ.
- Для обеспечения безопасности работ в электроустановках выполнялось отключение установки от источника питания, проверка отсутствия напряжения, снятие предохранителей, отсоединение концов питающих линий. Так же ограждение рабочего места.
- При проведении работ со снятием напряжения в действующих электроустановках или вблизи них применяли отключение установки от источника в действующих электроустановках, механическое запирание приводов отключенных коммутационных аппаратов, ограждение остающихся под напряжением токоведущих частей, к которым в процессе работы можно прикоснуться или приблизиться на недопустимое расстояние, наложение заземлений, ограждение рабочего места.

11.2. Меры безопасности при работе с измерителем ИТ- λ-400

- К работе с измерителем допускаются лица, ознакомленные с общими правилами техники безопасности по эксплуатации электрооборудования с рабочим напряжением до 1000 В.
- Запрещается работа измерителя при отсутствии защитного заземления.
- При проведении работ необходимо помнить, что жидкий азот имеет температуру, около к минус 200°С, поэтому при его использовании должна соблюдаться осторожность, так как попадание жидкого азота на открытые участки кожи приводит к ожогам.

При работе должны соблюдаться следующее правила:

- Перелив жидкого азота из транспортировочного сосуда Дьюара производить через горловину, медленно наклоняя сосуд.
- Отверстие транспортировочного сосуда Дьюара для залива должно быть закрыто специальной крышкой.
- Запрещается закрывать отверстие транспортировочного сосуда Дьюара.
- Запрещается ставить сосуд Дьюара вблизи нагретых поверхностей, а также на прямые солнечные лучи и оставлять на открытом воздухе.
- Замену исследуемого образца производить только после охлаждения измерительной ячейки до комнатной температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на переменное напряжение 10, 20, 35 кВ./ Изд. 1. ОАО «Электрокабель» Кольчугинский завод», 2006.
2. Руководство по эксплуатации, прокладке и монтажу кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ.
3. Селезнёв Д.А., Грешняков Г.В. Некоторые аспекты конструирования соединительных муфт// Силовая электроника. 2014 № 4
4. Селезнёв Д.А. Исследование конструкции стресс конуса соединительной кабельной муфты // Неделя науки. Спб. 2014
5. Дубицкий С.Д. «Elcut 5.1 – платформа разработки приложений анализа полей». Exponenta Pro №1, 2004.
6. N. Rieux and M. Marugan, “Non-linear conductive polymers for power electronics passive components design” in *Proceedings of the INSUCON 2002*, Jun. 2002, pp.124–127.
7. A. Krivda, F. Greuter, and L. Palmqvist: “Characterisation of electric stress control materials by DC conductivity and impulse measurements” in *Proceedings of the XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Jun. 2003, p. 402.
8. M. Mailand, W. Aumeier, and W. Zaengl, “Electric field measurements on MV and HV components with an electrooptic sensor,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Insulated Power Cables*, Jun. 1995,pp. 415–418.
9. A. Krivda, F. Greuter, G. Stauch, and U. Fromm, “The influence of mechanical, thermal and electrical stresses on the performance of carbon black filled electric stress control material,” in *Proceedings of the XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Jun. 2003, p. 329.

10. T. Christen, L. Donzel, and F. Greuter, “Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation,” *IEEE Electr. Insul. Mag*., vol. 27, no. 2, pp. 18–28, March./April. 2011.

11. T. Christen, L. Donzel, and F. Greuter, “Nonlinear resistive electric field grading part 2: Materials and Applications,” *IEEE Electr. Insul. Mag*., vol. 26, no. 6, pp. 48–60, Nov./Dec. 2010.

12. P. N. Nelson and H. C. Hervig, “High dielectric constant materials for primary voltage cable terminations,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-103, pp. 3211–3215, Nov. 1984.

13. H. Gramespacher, T. Christen, L. Donzel, and F. Greuter, “Microvaristor based field grading elements for HV terminations ” in *Proceedings of the 6th International Conference on Insulated Power Cables*, Jun. 2003, pp. 213–217.

14. C. C. Lin, W. S. Lee, C. C. Sun, and W. H. Whu, “A varistor-polymer composite with nonlinear electrical-thermal switching properties,” *Ceramic Int.*, vol. 34, pp.131–136, 2008.

15. Патент на полезную модель № 160436 «Концевая муфта силового кабеля с пластмассовой изоляцией». Авторы: Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалёв, С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин. Зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей 20 февраля 2016г. Срок действия патента истекает 01.04. 2025 г.

16. L. Donzel and M. Hagemeister, “Nonlinear field control of high voltage bushings,” in *Proceedings of the 15th International Symposium on High Voltage Engineering*, Aug. 2007, pp. 119–122.

17. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. – Теоретические основы электротехники. В 2 томах, СПб, 2009, Питер.

18. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М. 1996.

19. Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д. «Комбинированный способ снижения неравномерности электрического поля в муфтах силовых кабелей» Силовая электроника, №2, 2010.

20. ELCUT 5.9.Руководство пользователя. ООО«ТОР».- С-Петербург, 2011.
21. Техника высоких напряжений. Ч.1. Под общей ред. Л.И. Сиротинского. М-Л., 1951.
22. Каталог «Кабели на напряжение 110-220 кВ», «Севкабель», 2012г.
23. Доронин М. В., Селезнёв Д.А. «численный расчет электромагнитного и теплового поля силового импульсного кабеля». Научно-исследовательский и инновационный потенциал молодёжи.- Чита, 2013.
24. Грешняков Г.В., Селезнёв Д.А., Доронин М.В. - «К вопросу о расчете теплового режима силового импульсного кабеля». В материалах второй международной научно-практической конференции «Fundamental and applied sciences today».- Москва, 2013.
25. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. «Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения» // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования. – СПб, 2008.
26. Шварцман Л.Г. «Регулирование электрического поля в концевых муфтах кабелей высокого напряжения» М., Энергия, Труды ВНИИКП, вып.13, 1969.
27. Селезнёв Д.А. Сравнение емкостного и резистивного методов выравнивания электрического поля в высоковольтной кабельной муфте. Выпускная работа бакалавра. Спб. 2014
28. Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин, С.Д. Дубицкий, Г.Г. Ковалёв «Численное моделирование электрического поля в усиливающей изоляции кабельной муфты» Кабели и провода, № 4 , 2013.
29. George Greshnyakov, Simon Dubitskiy, and Nikolay Korovkin «Optimization of Capacative and Resistive Field Grading Devices for Cable Joint and Termination» -International Journal of Energy, Volume 9, 2015, pp 24-30.
30. George V. Greshnyakov , Simon D. Dubitskiy, and Nikolay V. Korovkin «Capacitance and Impedance Methods of Electric Field Grading in Cable Joint and Termination», 2014 International Conference on Energy, Environment and

Material Science (EEMAS 2014), State Politechnic University, S-Peterburg, Russia, September 23-25, 2014.

31. Патент на полезную модель № 97013 «Соединительная муфта для силового кабеля». Авторы: Грешняков Г.В., Журавлёв И.В., Матвеев А.В. Зарегистрирована в Государственном реестре полезных моделей 20 августа 2010г. Срок действия патента истекает 29 декабря 2019г.

32. Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д. «Математическое моделирование электрического поля в муфтах силовых кабелей» Силовая Электроника, №3, 2010, с.с

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

Программа контрольных испытаний стресс конусов кабельных муфт в составе кабельной системы 110 кВ.

1. Этап 1.

1.1 Объект испытаний

Кабельная система 110 кВ, состоящая из отрезка силового кабеля длиной не менее 30 метров с изоляцией из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 64/110 кВ типа (А) ПвП и двух концевых кабельных муфт наружной установки. В состав каждой из муфт входит опытный образец испытуемого стресс конуса концевой муфты (заводской чертёж ЖИШЦ. 4485), выбранный случайным образом из партии изготовленных опытных образцов и комплект материалов для муфты концевой OHVT – 145 C в композитном корпусе с полимерной изоляцией производства Tyco Electronics.

1.2 Цель, программа и методы испытаний.

1.2.1 Цель испытаний: проверка соответствия опытных образцов стресс конусов требованиям п.п. 9.2, 9.3 международного стандарта МЭК 60840.

1.2.2 Программа и методика проведения испытаний.

1.2.2.1 Измерение частичных разрядов при температуре окружающей среды.

Производится в соответствии со стандартом МЭК 60885-3 и ГОСТ 20074-83.

Чувствительность схемы измерений должна составлять не менее 5 пКл.

Переменное напряжение частоты 50 Гц повышается постепенно и поддерживается на уровне 1,75 Uo (112 кВ) в течение 10 с. Затем испытательное напряжение плавно снижается до значения 1,5 Uo(96 кВ), при котором производится измерение частичных разрядов (Uo = 64 кВ – номинальное фазное напряжение кабеля класса 110 кВ).

При испытательном напряжении 1,5 Uo (96 кВ) не должен быть обнаружен разряд от испытуемого объекта.

1.2.2.2 Испытания повышенным напряжением промышленной частоты 50 Гц при температуре окружающей среды.

Действующее значение испытательного напряжения – 160 кВ (2,5 Uo). Испытания проводятся в течение 30 минут после плавного подъёма напряжения до необходимого значения (ГОСТ 2990-78). Входящие в состав кабельной системы, в качестве компонентов муфт, стресс конуса считаются выдержавшими испытания, если не произошёл пробой их изоляции.

2. Этап 2.

2.1 Объект испытаний

Кабельная система 110 кВ, представляющая собой кабельную систему, испытанную на Этапе 1, со следующими изменениями:

Отрезок силового кабеля разрезается на две равные части. Каждый элемент разделывается со стороны разреза, а жилы соединяются между собой с помощью соединительной муфты, состоящей из базового комплекта муфты соединительной EHVS 145-|| производства Tyco Electronics и испытуемого опытного образца стресс конуса (заводской чертёж ЖИШЦ. 4486), выбранного случайным образом из партии изготовленных опытных образцов стресс конусов соединительной муфты.

2.2 Цель, программа и методы испытаний.

2.2.1 Цель испытаний: проверка соответствия опытных образцов стресс конусов требованиям п.п. 9.2, 9.3 международного стандарта МЭК 60840.

2.2.2 Программа и методика проведения испытаний.

2.2.2.1 Измерение частичных разрядов при температуре окружающей среды.

Производится в соответствии со стандартом МЭК 60885-3 и ГОСТ 20074-83. Чувствительность схемы измерений должна составлять не менее 5 пКл.

Переменное напряжение частоты 50 Гц повышается постепенно и поддерживается на уровне 1,75 Uo (112 кВ) в течение 10 с. Затем испытательное напряжение плавно снижается до значения 1,5 Uo(96 кВ), при котором производится измерение частичных разрядов (Uo = 64 кВ – номинальное фазное напряжение кабеля класса 110 кВ).

При испытательном напряжении 1,5 Uo (96 кВ) не должен быть обнаружен разряд от испытуемого объекта.

2.2.2.2 Испытания повышенным напряжением промышленной частоты 50 Гц при температуре окружающей среды.

Действующее значение испытательного напряжения – 160 кВ (2,5 Uo). Испытания проводятся в течение 30 минут после плавного подъёма напряжения до необходимого значения (ГОСТ 2990-78). Входящие в состав кабельной системы, в качестве компонентов муфт, стресс конуса считаются выдержавшими испытания, если не произошёл пробой их изоляции.

3. Этап 3.

3.1 Объект испытаний.

Кабельная система 110 кВ, состоящая из двух отрезков силового кабеля длиной не менее 15 метров, типа (А) ПвП, соединённых между собой с помощью соединительной муфты, состоящей из базового комплекта муфты соединительной EHVS 145-|| производства Tyco Electronics и испытуемого опытного образца стресс конуса (заводской чертёж ЖИШЦ. 4486), выбранного случайным образом из партии изготовленных опытных образцов стресс конусов соединительной муфты. Свободные концы отрезков силового кабеля разделываются, а на разделках монтируются две концевые кабельные муфты. В состав каждой из муфт входит опытный образец испытуемого стресс конуса концевой муфты (заводской чертёж ЖИШЦ. 4485), выбранный случайным образом из партии изготовленных опытных образцов стресс конусов, а также комплект компонентов и материалов для муфты концевой OHVT – 145C в композитном корпусе с полимерной изоляцией производства Tyco Electronics.

3.2 Цель, программа и методы испытаний.

3.2.1 Цель испытаний: проверка соответствия опытных образцов стресс конусов требованиям п.п. 9.2, 9.3 международного стандарта МЭК 60840.

3.2.2 Программа и методика проведения испытаний.

3.2.2.1 Измерение частичных разрядов при температуре окружающей среды.

Производится в соответствии со стандартом МЭК 60885-3 и ГОСТ 20074-83. Чувствительность схемы измерений должна составлять не менее 5 пКл.

Переменное напряжение частоты 50 Гц повышается постепенно и поддерживается на уровне 1,75 Uo (112 кВ) в течение 10 с. Затем испытательное напряжение плавно снижается до значения 1,5 Uo(96 кВ), при котором производится измерение частичных разрядов (Uo = 64 кВ – номинальное фазное напряжение кабеля класса 110 кВ).

При испытательном напряжении 1,5 Uo (96 кВ) не должен быть обнаружен разряд от испытуемого объекта.

3.2.2.2 Испытания повышенным напряжением промышленной частоты 50 Гц при температуре окружающей среды.

Действующее значение испытательного напряжения – 160 кВ (2,5 Uo). Испытания проводятся в течение 30 минут после плавного подъёма напряжения до необходимого

значения (ГОСТ 2990-78). Входящие в состав кабельной системы, в качестве компонентов муфт, стресс конуса считаются выдержавшими испытания, если не произошёл пробой их изоляции.

Приложение 2

Фотография испытуемой кабельной системы

Приложение 3

Перечень применяемого испытательного оборудования (ИО) и средств измерений (СИ)

№ п/п	Наименование ИО/СИ	Аттестат, дата поверки, срок действия
1	Стенд длительных испытаний 200 кВ № 3, инв. № 30043	Аттестат НИИПТ № 53. Протокол периодической аттестации от 25.06.2010 г., периодичность на 3 года
2	Емкостной делитель напряжения MCF 135/200P, зав. № 859030	Серт-т ВНИИМС № RU-04-206.1-07-12 от 05.06.2012 г., периодичность 2 года
3	Универсальный вольтметр MUT-9, зав. № 850074	Серт-т К. НИИПТ № 07 от 05.12.2011 г., периодичность 2 года
4	Цифровой измерительный комплекс "СКИТ ЧР"	Серт-т ФБУ "Тест-С-Пб" № 1214260 от 04.12.2012 г., периодичность 1 год

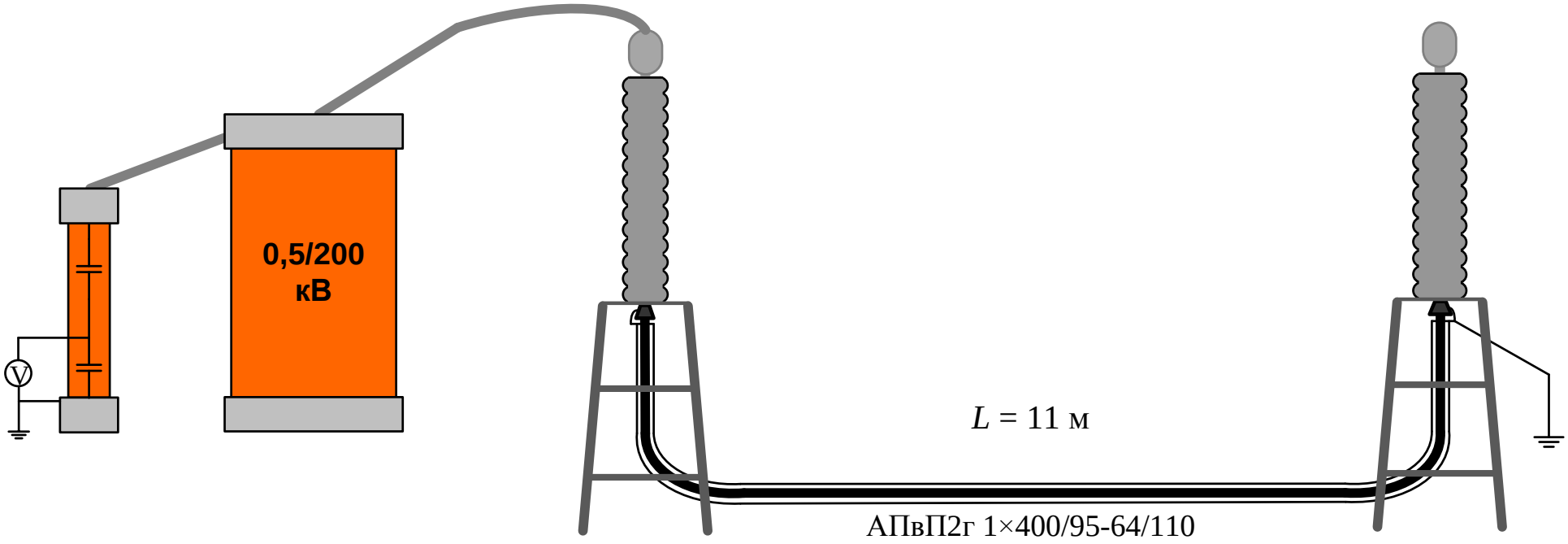
Приложение 4

Результаты испытаний

№ п/п	Виды проверок и испытаний	Номер пункта МЭК 60840		Нормированные параметры испытаний. Нормированное значение измеряемого параметра	Фактические параметры испытаний. Фактическое значение измеряемого параметра	Заключение о соответствии МЭК 60840
		Технические требования	Метод испытаний			
1	Измерение частичных разрядов	9.2	9.2 МС МЭК 60885-3	После монтажа кабельной арматуры измеряются частичные разряды. Чувствительность схемы измерения – не менее 5 пКл. Испытательное напряжение на кабельной системе 110 кВ должно быть плавно поднято до значения 1,75U_0 (112 кВ) и выдержано 10 с, затем снижено до 1,5U_0 (96 кВ). При напряжении 1,5U_0 (96 кВ) не должны быть обнаружены частичные разряды	После монтажа кабельной арматуры измерены частичные разряды при температуре окружающей среды (+16°С). Чувствительность схемы измерения – 2,5 пКл. Испытательное напряжение на кабельной системе 110 кВ было плавно поднято до значения 1,75U_0 (112 кВ) и выдержано 10 с, затем снижено до 1,5U_0 (96 кВ). При напряжении 1,5U_0 (96 кВ) не обнаружены частичные разряды	Соответствует
2	Испытание переменным напряжением промышленной частоты при температуре окружающей среды	9.3	9.3	Испытание кабельной системы переменным напряжением промышленной частоты величиной 2,5U_0 (160 кВ) производится в течение 30 минут при температуре окружающей среды. Кабельные муфты считаются выдержавшими испытание напряжением промышленной частоты, если в процессе испытаний не произошел пробой изоляции	Испытание кабельной системы производилось при температуре окружающей среды (+17°С) напряжением промышленной частоты величиной 2,5U_0 (160 кВ) в течение 30 минут. Кабельные муфты выдержали испытание напряжением промышленной частоты без пробоя изоляции	Соответствует

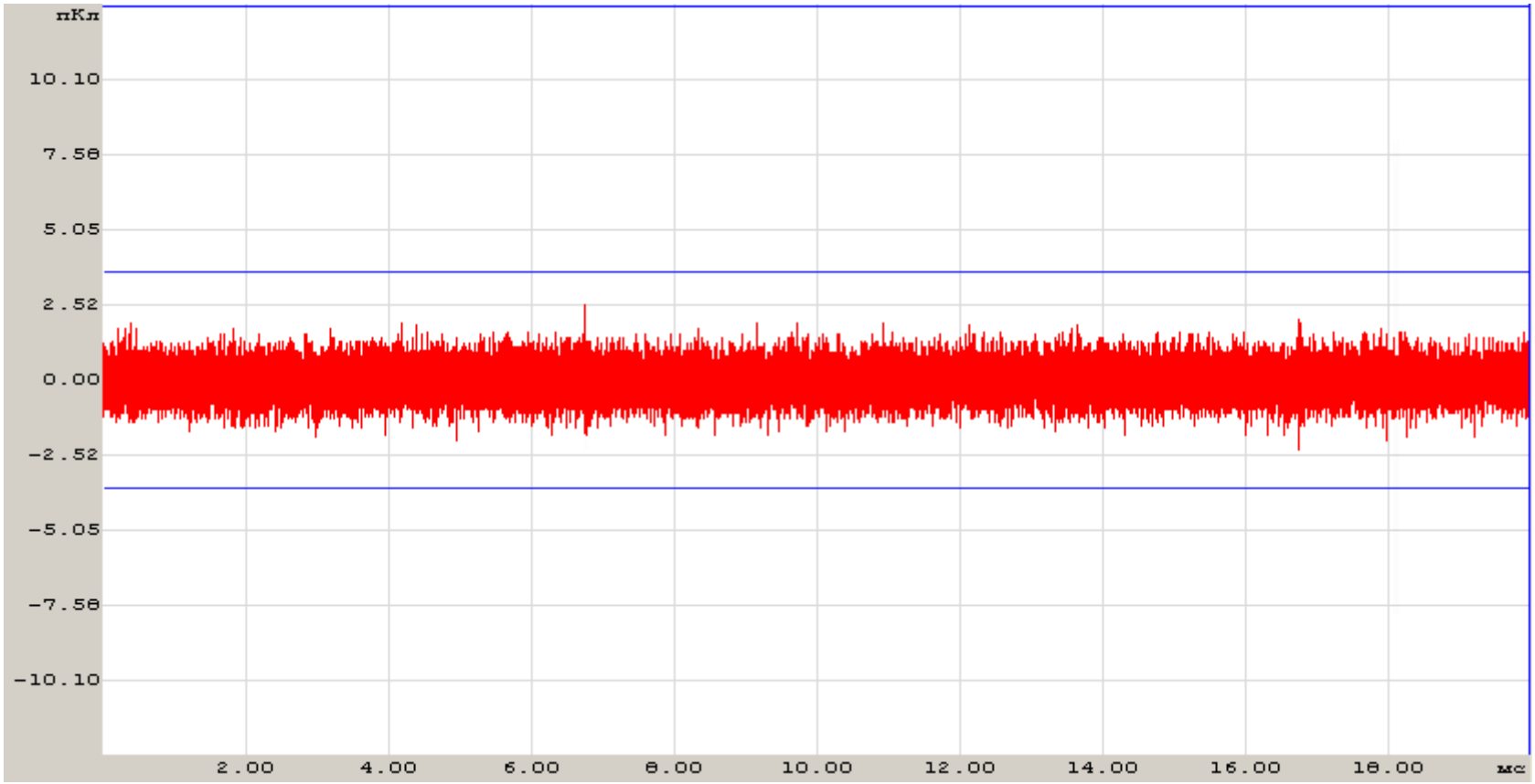
Приложение 5

Схема проведения испытаний



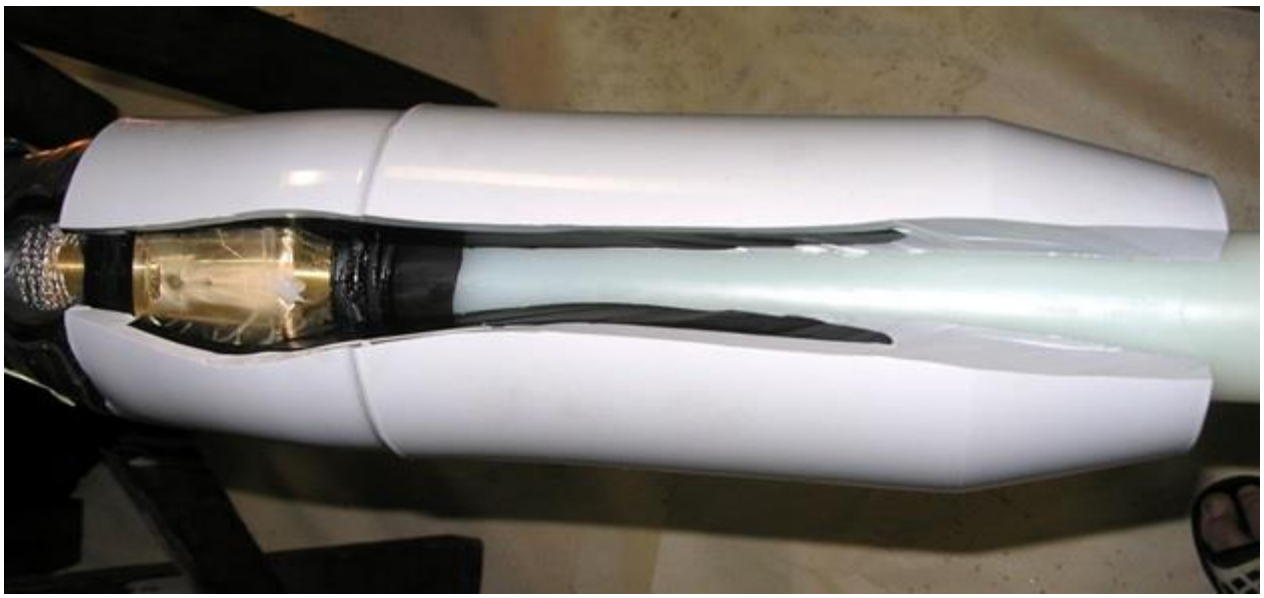
Приложение 6

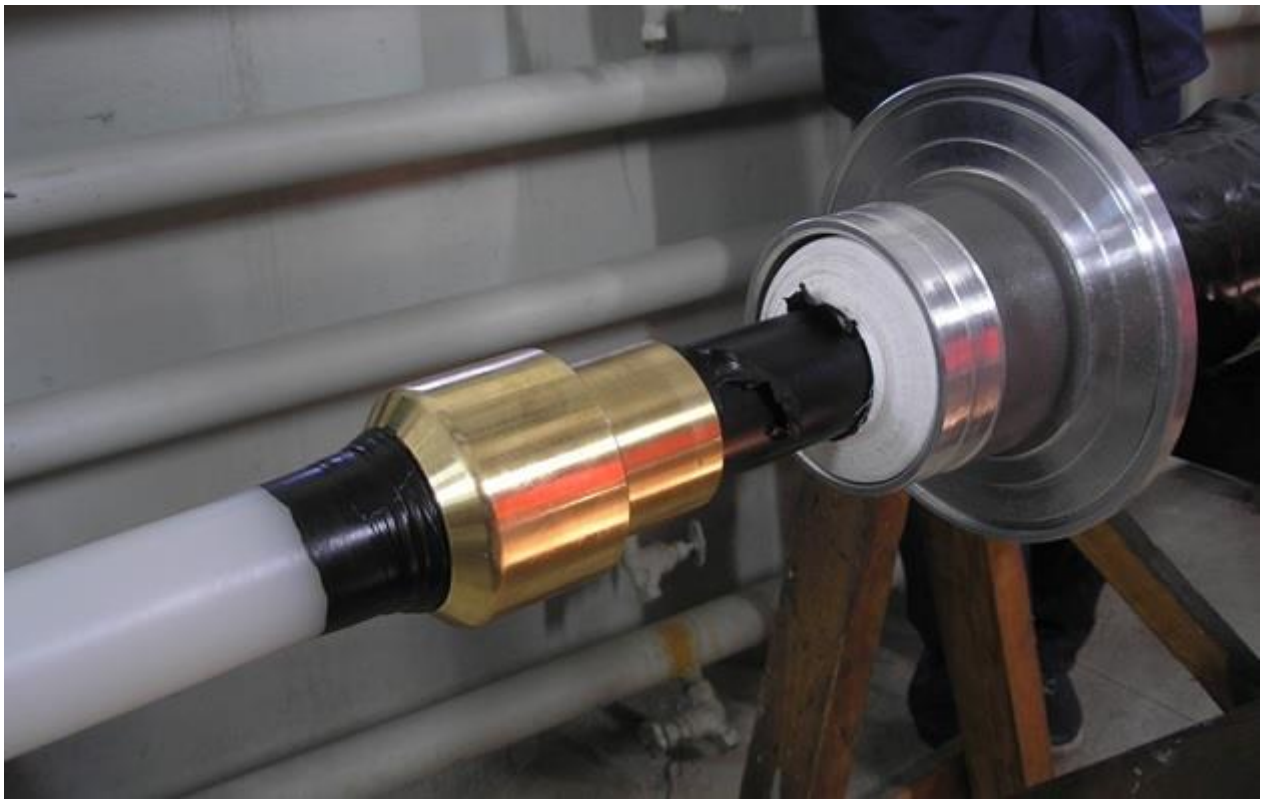
Осциллограмма измерения частичных разрядов



Приложение 7

Фотографии муфты и кабеля после разборки





Приложение 8

Протокол испытаний

Аккредитованный Федеральной службой по аккредитации на техническую компетентность и независимость
Испытательный центр высоковольтного электрооборудования Открытого акционерного общества
"Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения"
(ИЦ ВЭ ОАО "НИИПТ")

Аттестат аккредитации: № РОСС RU.0001.21ЭТ71
Зарегистрирован в Едином реестре: 27 января 2014 г.
Действителен до: 27 января 2019 г.
Юридический адрес: 194233, г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 14, лит. А

Арх. № О-16
Дата регистрации: 30.05.2014 г.

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ИЦ ВЭ ОАО "НИИПТ"

_____ Л.Л. Владимирский

МП

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 63-2-14/3

Объект испытаний	Кабельная система 110 кВ, состоящая из кабеля силового с изоляцией из сшитого полиэтилена марки ПвПг 1×185/95-64/110 кВ, двух концевых и одной соединительной муфт 110 кВ с опытными образцами стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель"
Заказчик	Общество с ограниченной ответственностью "НИИ "Севкабель" (юр. адрес: 199106, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 40)
Вид испытаний, документ на соответствие которому проводились испытания	Электрические испытания кабельной системы 110 кВ с кабелем марки ПвПг 1×185/95-64/110 кВ, с концевыми и соединительной муфтами 110 кВ с опытными образцами стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель" на проверку соответствия требованиям п.п. 9.2 и 9.3 международного стандарта МЭК 60840:2011
Место проведения работ	ИЦ ВЭ ОАО "НИИПТ"
Дата проведения испытаний	30 мая 2014 г.

ПРОТОКОЛ СОДЕРЖИТ:

1. **Объект испытаний** — лист 2
2. **Цель, программа и методы испытаний** — лист 2
3. **Условия проведения испытаний** — лист 2
4. **Испытательное оборудование и средства измерений** — лист 3
5. **Результаты испытаний** — лист 3
6. **Выводы** — лист 3

ВСЕГО ЛИСТОВ: 13

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Кабельная система 110 кВ, состоящая из кабеля силового с изоляцией из сшитого полиэтилена марки ПвПг 1×185/95-64/110 кВ, двух концевых и одной соединительной муфт 110 кВ с опытными образцами стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель", выдержала электрические испытания на проверку соответствия требованиям п.п. 9.2 и 9.3 международного стандарта МЭК 60840:2011.
Опытные образцы стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель" для муфт 110 кВ, соответствуют требованиям п.п. 9.2 и 9.3 международного стандарта МЭК 60840:2011

Дата подписания протокола испытаний: 30 мая 2014 г.

Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

1. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

1.1. Наименование и название изделия, тип: кабельная система 110 кВ, состоящая из кабеля силового с изоляцией из сшитого полиэтилена марки ПвПг 1×185/95-64/110 кВ, двух концевых и одной соединительной муфт 110 кВ с опытными образцами стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель".

1.2. Код ОКП: –

1.3. Код ТН ВЭД: –

1.4. Заводской номер: опытные образцы стресс-конусов для концевых муфт 110 кВ (чертеж ЖИШЦ.4485) и опытный образец стресс-конуса для соединительной муфты 110 кВ (чертеж ЖИШЦ.4486).

1.5. Описание изделия: стресс-конуса для муфт 110 кВ представляют собой формованные изделия из двух композиций на основе резин производства ф. Wacker: полупроводящей композиции Powersil 466 A/B LV (рефлектор, дефлектор, высоковольтный электрод) и изоляционной композиции Powersil 600 A/B (основное тело конуса). Сборочный чертеж (МС5.222.000СБ) опытного образца стресс-конуса для концевой муфты 110 кВ и сборочный чертеж (МС5.222.001СБ) опытного образца стресс-конуса для соединительной муфты 110 кВ приведены в Приложении 3.

Для проведения испытаний на кабеле длиной 12 м смонтированы две концевые муфты 110 кВ наружного применения с композитным изолятором Tyco Electronics Raychem GmbH с опытными образцами стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель" и соединительная муфта с опытным образцом стресс-конуса разработки ООО "НИИ "Севкабель". Монтаж кабельной арматуры произведен специалистами ООО "Севкабель-Инжиниринг".

1.6. Фото: фотография испытуемой кабельной системы 110 кВ приведена в Приложении 4.

1.7. Предприятие-изготовитель: Общество с ограниченной ответственностью "НИИ "Севкабель" (юр. адрес: 199106, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 40).

1.8. Нормативный документ (НД), по которому изготавливается изделие: международный стандарт МЭК 60840:2011 "Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ (U_m = 36 кВ) до 150 кВ (U_m = 170 кВ). Методы испытания и требования".

1.9. Сведения об акте отбора образцов (организация, номер, дата): б/н от 19.05.2014 г.

1.10. Дата получения образцов: 19.05.2014 г.

1.11. Дата проведения испытаний: 30.05.2014 г.

2. ЦЕЛЬ, ПРОГРАММА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

2.1. Цель испытаний: проверка соответствия опытных образцов стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель" для концевых и соединительных муфт 110 кВ требованиям п.п. 9.2 и 9.3 международного стандарта МЭК 60840:2011.

2.2. Программа испытаний: испытания проведены в соответствии с требованиями п.п. 9.2 и 9.3 международного стандарта МЭК 60840:2011.

2.3. Метод (методика) испытаний: испытания проведены по международному стандарту МЭК 60840:2011 (п.п. 9.2, 9.3).

2.4. Нормативный документ на изделие, на соответствие требованиям которого проведены испытания: международный стандарт МЭК 60840:2011 "Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ (U_m = 36 кВ) до 150 кВ (U_m = 170 кВ). Методы испытания и требования".

3. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

3.1. Климатические условия проведения испытаний: испытания проводились в закрытом помещении при следующих атмосферных условиях:

температура окружающей среды: +17°С;

относительная влажность – 65 %;

атмосферное давление – 101 кПа.

Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

4. ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Перечень применяемого испытательного оборудования (ИО) и средств измерений (СИ) приведен в Приложении 1.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

5.1. Результаты испытаний приведены в Приложении 2.

5.2. Конструкции опытных образцов стресс-конусов для муфт 110 кВ приведены в Приложении 3.

5.3. Фотография испытуемой кабельной системы 110 кВ приведена в Приложении 4.

5.4. Схема проведения испытаний приведена в Приложении 5.

5.5. Осциллограмма частичных разрядов приведена в Приложении 6.

5.6. Фотографии стресс-конуса и кабеля после разборки муфт приведены в Приложении 7.

6. ВЫВОДЫ

Кабельная система 110 кВ, состоящая из кабеля силового с изоляцией из сшитого полиэтилена марки ПвПг 1×185/95-64/110 кВ, двух концевых и одной соединительной муфт 110 кВ с опытными образцами стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель", выдержала электрические испытания на проверку соответствия требованиям п.п. 9.2 и 9.3 международного стандарта МЭК 60840:2011.

Опытные образцы стресс-конусов разработки ООО "НИИ "Севкабель" для муфт 110 кВ, соответствуют требованиям п.п. 9.2 и 9.3 международного стандарта МЭК 60840:2011.

Руководитель ИЦ
высоковольтного электрооборудования
ОАО "НТЦ ЕЭС", к.т.н. — Л.Л. Владимирский

Заместитель руководителя ИЦ — М.В. Ушакова

Руководитель лаборатории
испытаний внутренней изоляции ИЦ — А.Н. Лубков

Главный специалист ИЦ, к.т.н. — И.Н. Привалов

Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

Приложение 1

Перечень применяемого испытательного оборудования (ИО) и средств измерений (СИ)

№ п/п	Наименование ИО/СИ	Аттестат, дата поверки, срок действия
1	Испытательный стенд 600 кВ, инв. № 08303	Аттестат ВНИИМ № 2203-147-20024. Протокол периодической аттестации от 31.10.2013 г., периодичность 3 года
2	Емкостной делитель напряжения MCF 60/600, зав. № 853891	Серт-т ВНИИМС № RU-04-206.1-70-13 от 22.11.2013 г., периодичность 2 года
3	Универсальный вольтметр – MUT-7, зав. № 861932	Серт-т К. НТЦ ЕЭС № 83 от 06.12.2013 г, периодичность 1 год
4	Цифровой измерительный комплекс "СКИТ ЧР"	Серт-т К. ФБУ "Тест-С.-Пб" № 13 27393 от 06.12.2013 г., периодичность 1 год
5	Гигрометр психометрический ВИТ-1, зав. № во33	Св-во ФБУ "Тест-С-Пб" № 0176031 от 02.11.2012 г., периодичность 2 года
6	Барометр-анероид БАММ-1, зав.№ 1687	Св-во ФБУ "Тест-С.-Пб" № 0210809 от 19.12.2013 г., периодичность 1 год

Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

Приложение 2

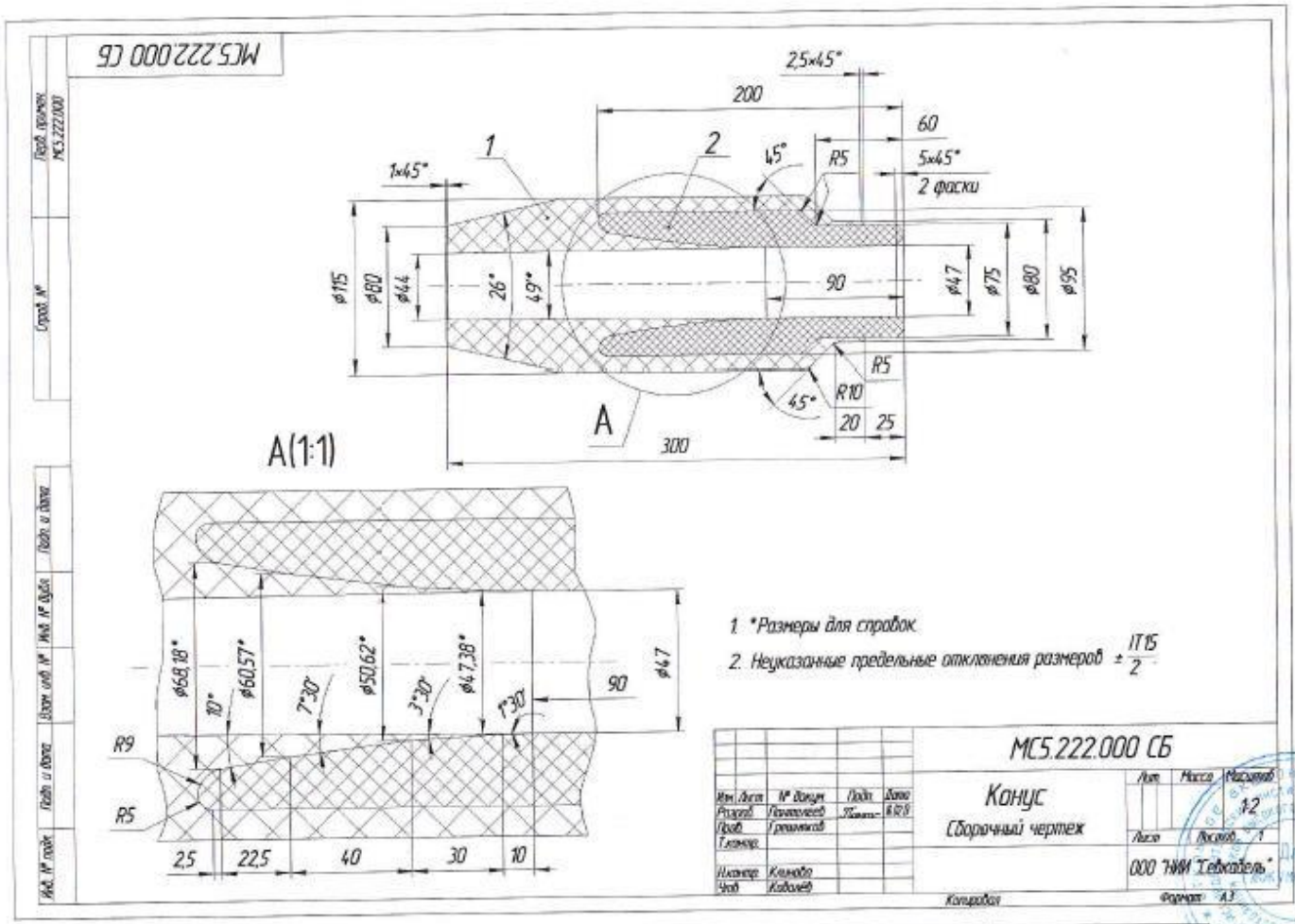
Результаты испытаний

№ п/п	Виды проверок и испытаний	Номер пункта МЭК 60840		Нормированные параметры испытаний. Нормированное значение измеряемого параметра	Фактические параметры испытаний. Фактическое значение измеряемого параметра	Заключение о соответствии МЭК 60840
		Технические требования	Метод испытаний			
1	2	3	4	5	6	7
1	Измерение частичных разрядов	9.2	9.2 МС МЭК 60885-3	После монтажа кабельной арматуры измеряются частичные разряды при температуре окружающей среды. Чувствительность схемы измерения – не менее 5 пКл. Испытательное напряжение на кабельной системе 110 кВ должно быть плавно поднято до значения $1{,}75U_0$ (112 кВ) и выдержано 10 с, затем снижено до $1{,}5U_0$ (96 кВ). При напряжении 96 кВ не должны быть обнаружены частичные разряды	После монтажа кабельной арматуры измерены частичные разряды при температуре окружающей среды (+17°С). Чувствительность схемы измерения – 5,0 пКл. Испытательное напряжение на кабельной системе 110 кВ было плавно поднято до значения 112 кВ и выдержано 10 с, затем снижено до 96 кВ. При напряжении 96 кВ не обнаружены частичные разряды	Соответствует
2	Испытание переменным напряжением промышленной частоты при температуре окружающей среды	9.3	9.3	Испытание кабельной системы 110 кВ переменным напряжением промышленной частоты величиной $2{,}5U_0$ (160 кВ) производится в течение 30 мин при температуре окружающей среды. Кабель и муфты считаются выдержавшими испытание напряжением промышленной частоты, если в процессе испытаний не произошел пробой изоляции	Испытание кабельной системы 110 кВ производилось при температуре окружающей среды (+17°С) напряжением промышленной частоты величиной (160±3) кВ в течение 30 мин. Кабельная система и кабельные муфты на напряжение 110 кВ выдержали испытание напряжением промышленной частоты без пробоя изоляции	Соответствует

Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

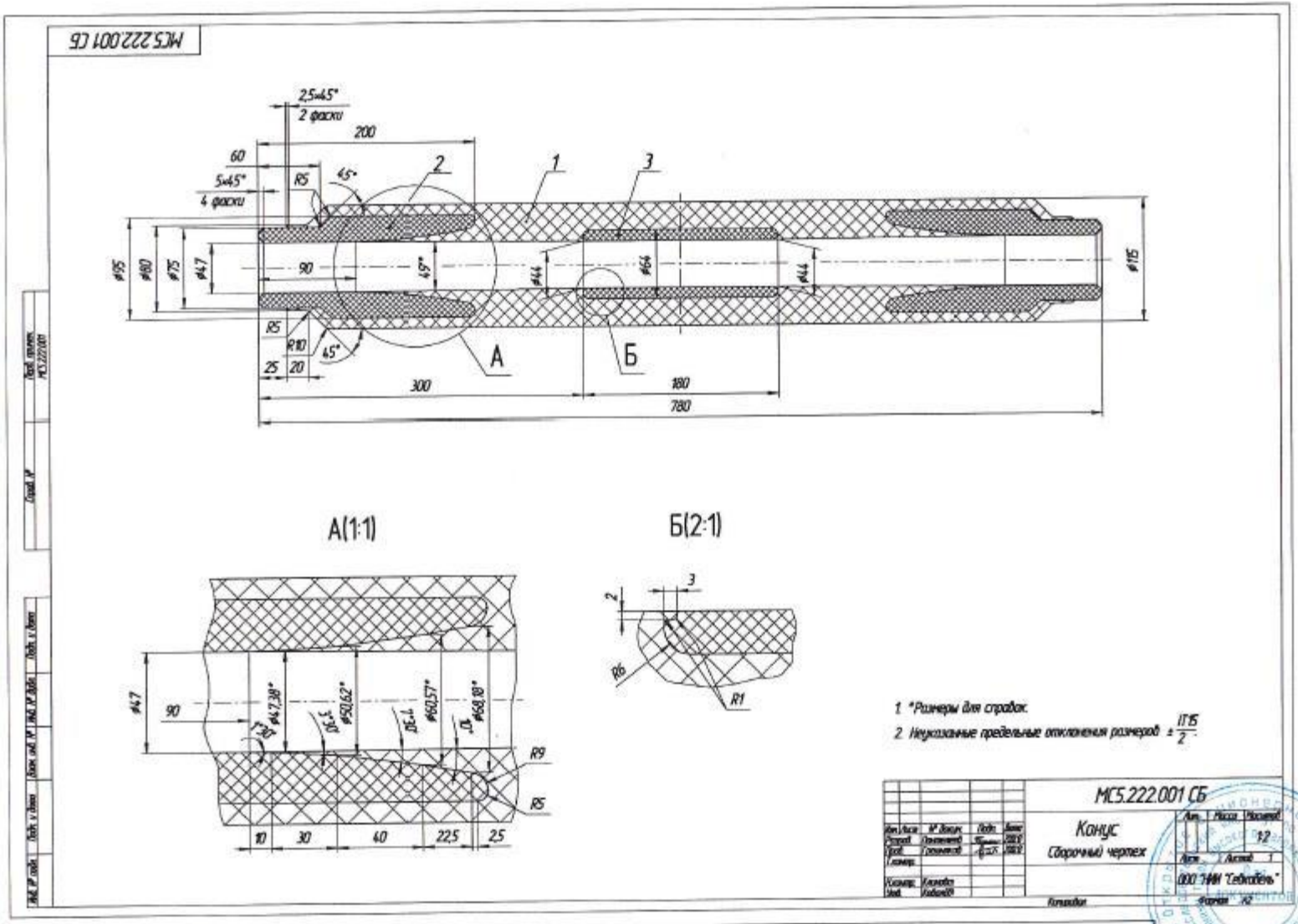
Конструкции опытных образцов стресс-конусов для муфт 110 кВ

Конструкция опытного образца стресс-конуса для концевой муфты 110 кВ



Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

Конструкция опытного образца стресс-конуса для соединительной муфты 110 кВ



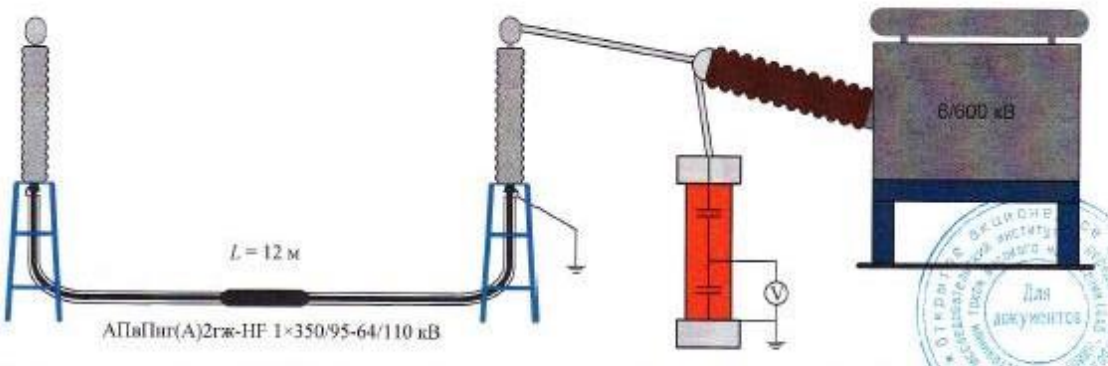
Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

Приложение 4

Фотография испытуемой кабельной системы 110 кВ

Приложение 5

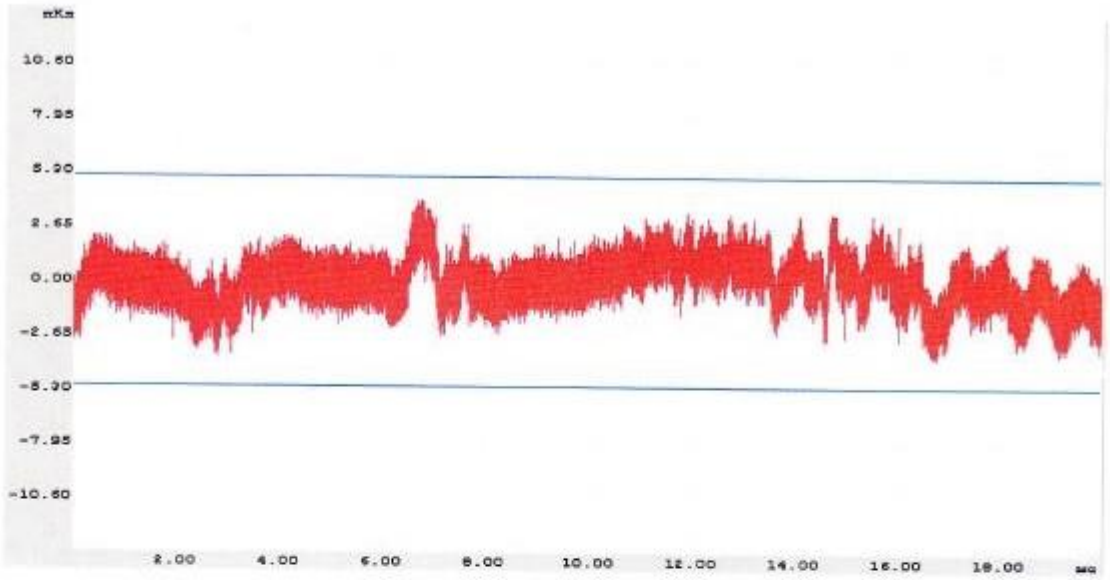
Схема проведения испытаний



Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

Приложение 6

Осциллограмма частичных разрядов



Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

Приложение 7

Фотографии стресс-конуса и кабеля после разборки муфт

Разборка концевой муфты

Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

Протокол испытаний не может быть частично или полностью перепечатан или размножен без разрешения Заказчика или Испытательного центра

Разборка соединительной муфты

Приложение 9

Таблица: данные необходимые при эксплуатации измерителя

t_c, °C	C_M, Дж/(кг К)	λ_M, Вт/(мК)	A_t, К/мВ
25	385	384	24.8
50	392	381	24.5
75	396	379	24.6

Обозначение символов табл.

tc , - температура стержня, °С; $C_М$, - удельная теплоемкость меди, Дж/(кг К); $\lambda_{,М}$ -теплопроводность меди, Вт/(м-К); A_t, - чувствительность термопары хромель-алюмель, К/мВ.