



**Селезнёв Дмитрий Александрович**

**КОМБИНИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ И  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ  
НА 110 КВ**

Специальность 05.09.02 «Электротехнические материалы и изделия»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной  
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: д.т.н., доцент Грешняков Георгий Викторович  
«Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого»

Официальные оппоненты: к.т.н. Осина Юлия Константиновна,  
Акционерное общество «Научно- исследовательский  
институт электрофизической аппаратуры»  
им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург, начальник  
лаборатории ВЛ-17 отдела ВИ-2

д.т.н., доцент Таджибаев Алексей Ибрагимович,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение дополнительного  
профессионального образования «Петербургский  
энергетический институт повышения квалификации»,  
г. Санкт-Петербург, заведующий кафедрой диагностики  
и управления техническим состоянием энергетического  
оборудования

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-  
исследовательский институт по передаче электроэнергии  
постоянным током высокого напряжения»,  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 18 ноября 2021 года в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета У.05.09.02 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 (главный учебный корпус), аудитория 284.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета У.05.09.02

Резник Александр Сергеевич,  
к.т.н.

**Общая характеристика работы.** В диссертационной работе рассматриваются вопросы, связанные с выбором оптимальных физических и геометрических параметров разрабатываемого стресс-конуса, усиливающей изоляции соединительной кабельной муфты на 110 кВ. Комбинированный подход к решению данной задачи позволит получить более эффективное выравнивание силовых линий в кабельной разделке, что позволит снизить вероятность выхода из строя кабельной линии, где будет установлен этот элемент.

Анализируются основные способы регулирования тангенциальной составляющей электрического поля в кабельной разделке. Так же рассматриваются основные методы усадки муфт, существующих на сегодняшний день.

Приводятся теоретические выкладки, по которым создается предварительная компьютерная модель усиливающей изоляции соединительной кабельной муфты, а затем полная оптимизация её геометрических и физических параметров. В её основу вложен комбинированный резистивно-емкостной метод выравнивания электрического поля. Разработка подобной усиливающей изоляции позволит значительно снизить массогабаритные размеры муфты и упростить процесс монтажа муфты при отсутствии снижения надёжности муфты в целом.

**Актуальность проблемы.** При разделке кабеля происходит нарушение основной изоляции кабеля, в результате чего изменяется картина электрического поля, появляется тангенциальная составляющая напряженности электрического поля. Именно она оказывает основное негативное влияние на изоляцию муфты. Так же при усадке муфты, есть вероятность появления ещё одного фактора, отрицательно сказывающийся на её работе – это посторонние включения: примеси в теле муфты, которые могут появиться при производстве составляющих; воздушные включения или пыль, которые могут появиться в результате усадки муфты.

Следовательно, качество и срок службы усаженной муфты напрямую зависит от нескольких факторов:

- Качества составляющих, произведенных на производстве;
- Навыков работников, которые занимаются монтажом;
- Сложности процесса монтажа муфты;
- Качества выравнивания электрического поля, то есть снижение величины тангенциальной (касательной) составляющей напряженности электрического поля в разделке.

В связи с этими пунктами, актуальной является проблема разработки нового типа муфт, которые могли бы значительно снизить риски возникновения дефектов при производстве и монтаже муфт, а также улучшить выравнивание поля в разделке кабеля.

Работы многих специалистов, как зарубежных, так и отечественных, посвящены анализу полей в усиливающей изоляции муфт в зависимости от типов выравнивания поля, их отличие от полей в целом кабеле и методам их анализа. В разное время в теорию регулирования электрического поля в кабельной разделке и её практического применения, большой вклад внесли такие отечественные и иностранные учёные как: Шварцман Л.Г., Канискин В.А., Пешков И.Б., Ларина Э.Т., Грешняков Г.В., Шувалов М.Ю., Дубицкий С.Д., Образцов Ю.В., Макаров Л.Е., Сипилкин К.Г., Славинский А.З., Ветлугаев С.С., Кучерявая И.Н., Труфанова Н.М., T.Christen, L. Donzel and F.Greuter, P.N. Nelson, H.C. Hervig, X. Wang, C.C.Wang, K. Wu, D.M. Tu и др.

Кроме того, актуальность работы обусловлена распоряжением Правительства Российской Федерации от 4 августа 2015 года об импортозамещении в России. На данный момент на территории РФ ограничено производство муфт высокого и сверх высокого напряжения (от 35 кВ и выше), что негативно сказывается на ситуации в целом: во-первых, из-за вероятности полного отсутствия муфт, в случае ввода очередных санкций и отсутствия опыта и средств у промышленников в производстве высоковольтных муфт.

**Цель диссертационной работы** – повышение эксплуатационной надёжности кабельной арматуры путём разработки перспективного типа усиливающей изоляции муфт (трубка-регулятор или многофункциональный элемент) на напряжение 110 кВ, функционирование которой основано на резистивно-емкостном принципе снижения неравномерности электрического поля в кабельной разделке.

**Научные задачи**, выполняемые в ходе работы:

- Провести анализ конструкций усиливающей изоляции муфт, используемых в кабельной промышленности, путём численного моделирования электромагнитных и тепловых полей с учётом комбинации воздействующих факторов в специализированном программном комплексе;
- Найти оптимальную конструкцию для нового типа муфт;
- Провести анализ материалов (равномерность распределения наполнителя в матрице, проверка концентрации наполнителя), необходимых для создания элементов конструкции нового усиливающего слоя муфты;
- Разработать макет нового типа муфты (многофункциональный элемент или трубка-регулятор);
- Провести высоковольтные предварительные испытания макета муфты.
- Провести оценку работоспособности разработанных конструкций трубки-регулятора.

**Объект исследования** – усиливающая изоляция соединительной муфты силового кабеля из СПЭ изоляции на 110 кВ.

**Предмет исследования** – электромагнитные и температурные поля в усиливающей изоляции соединительных муфт на 110 кВ.

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

- 1) Определены критические зоны в конструкции стресс-конуса, соединительной муфты, в которых значение напряженности поля достигает максимальных значений;
- 2) Использован спектрально-корреляционный метод измерения концентрации композиционного материала на основе ПЭ с добавками в виде одностенных углеродных нанотрубок;
- 3) Сформулированы основные обязательные принципы необходимые для успешной работы нового типа усиливающей изоляции соединительных муфт, работающих на резистивно-емкостном методе выравнивания электрического поля в кабельной разделке.
- 4) Выполнено численное моделирование и, на этой основе, проведено макетирование соединительных муфт класса 110 кВ, в которых применён комбинированный резистивно-емкостной метод выравнивания поля, где в качестве элемента, управляющего полем, применена термоусаживаемая трубка-регулятор.
- 5) Разработан перспективный резистивно-емкостной метод выравнивания электрического поля в усиливающей изоляции соединительных кабельных муфт, на основе сочетания рефракционного и линейного резистивного способов. Разработанный метод реализован при разработке (численное моделирование), изготовлении (разработка макетов), предварительных испытаниях трёх разных макетов соединительной муфты на 110 кВ;
- 6) Разработана техническая документация по трубке-регулятору;

**Практическая ценность работы:**

- 1) Результаты анализа конструкций стресс-конуса существующих муфт, показывающие основные локации критических значений напряженности электрического поля в объёме стресс-конуса;
- 2) Разработаны и апробированы возможности перехода от комбинированного емкостного к новому комбинированному резистивно-емкостному методу выравнивания электрического поля в усиливающей изоляции соединительных кабельных муфт на 110 кВ, с регулирующим элементом типа трубка-регулятор;
- 3) Разработаны три конструкции усиливающей изоляции муфты (трубки-регулятора),

работа которой основана на резистивно-емкостном принципе снижения неравномерности электрического поля;

4) Разработаны материалы с заданными свойствами, для их применения в усиливающей изоляции трубки-регулятора;

5) Результаты измерений концентрации композиционного материала на основе полиэтилена со специальными добавками и оценка равномерности распределения наполнителя в матрице композиционного материала при помощи спектрально-корреляционного метода;

6) Результаты предварительных испытаний, подтверждающие возможность разработки многофункционального элемента;

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

- 1) Разработанные конструкции многофункционального элемента;
- 2) Методология определения критических зон в конструкциях муфт;
- 3) Анализ распределения электрических полей в области среза полупроводящего экрана по изоляции в зависимости от угла этого среза.

**Личный вклад соискателя** состоит в постановке цели и задач исследования; в моделировании и анализе существующих конструкций; в моделировании, оптимизации и разработке новой конструкции усиливающей изоляции муфты; в проведении исследований для создания свойств образцов для дальнейшего создания элементов трубки-регулятора; в разработке инструкции по монтажу. Предварительные испытания макетов трубки-регулятора были проведены на территории ООО ПК «Севкабель» под непосредственным руководством автора.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных научно-технических конференциях: «Научно-исследовательский и инновационный потенциал молодёжи» (Чита 2013), «Неделя науки» (СПб, СПбПУ 2014, 2016), 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (СПб, ЛЭТИ 2018), и на международном форуме «Электрические сети» в Москве в 2018 году.

**Публикации.** Основные практические и научные результаты диссертационной работы опубликованы в **13**-ти печатных работах, в том числе в **7** статьях (из них **3** статей в изданиях, рекомендованных ВАК, **2** статьи входят в систему цитирования Scopus), в **1** патенте на полезную модель, **5** научных докладах – материалы **1** из них опубликованы в издании, входящих в систему цитирования **Scopus**.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа представлена в одном томе: общий объём диссертации составляет 135 страниц, из них основной текст – 117 страниц, список литературы – 9 страниц, приложения – 9 страниц.

**Основное содержание работы.**

**Во введении** обоснована актуальность данной работы, сформулированы цели, задачи работы, обозначены объект и предмет исследования, новизна защищаемых научных положений, определена практическая значимость и представлены сведения, где были апробированы основные результаты исследования.

**В первой главе** проводится анализ кабельной разделки и электрических полей вокруг неё. По схеме замещения кабельной разделки (рис.1.) делается вывод о факторах, влияющих на нарушение распределения электрического поля, т.е. параметры которые больше всего влияют на величину тангенциальной составляющей напряженности электрического поля.

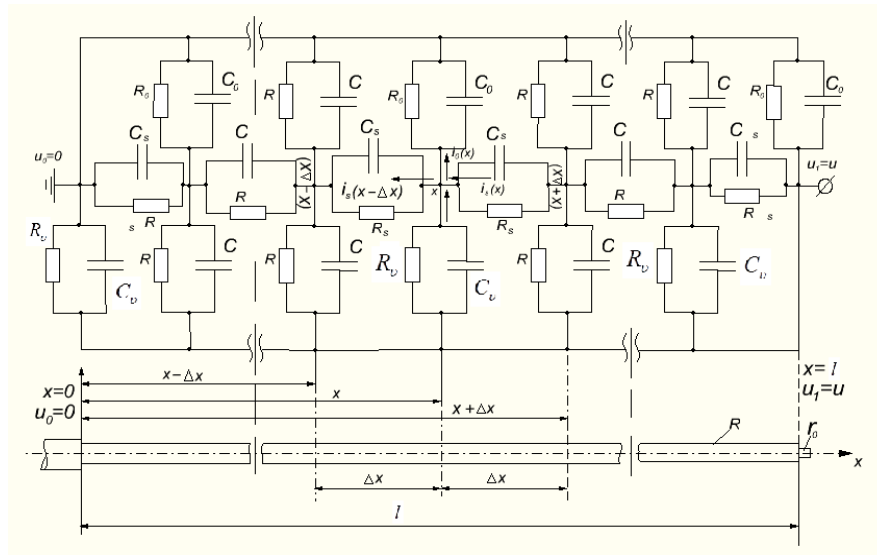


Рисунок 1. Схема замещения кабельной разделки.

Так же делается вывод о том, какими параметрами можно её компенсировать и способы, где эти параметры регулируются. Среди них выделяют:

**1) Ёмкостной метод выравнивания электрического поля;**

Этот метод основан, как видно из схемы замещения рис. 1, на регулировании ёмкостного тока на землю  $i_{C_0}$ , который стремится компенсировать ёмкостной ток на жилу  $i_{C_s}$ .

- Рефракционный способ регулирования электрического поля;
- Геометрический способ регулирования электрического поля;

**2) Резистивный (импедансный) метод выравнивания электрического поля;**

Метод, основанный на изменении продольной проводимости  $\frac{1}{R_s}$ . В данный метод входят:

- Нелинейный импедансный способ регулирования электрического поля;
- Линейный импедансный способ регулирования электрического поля.

**Во второй главе** проводится масштабная оптимизация стресс-конуса по его геометрическим и физическим параметрам. При решении предварительной модели были определены критические зоны в конструкции, где значение напряженности электрического поля принимало величину, значительно превышающую аналогичный параметр в остальной части конструкции (рисунок 2).

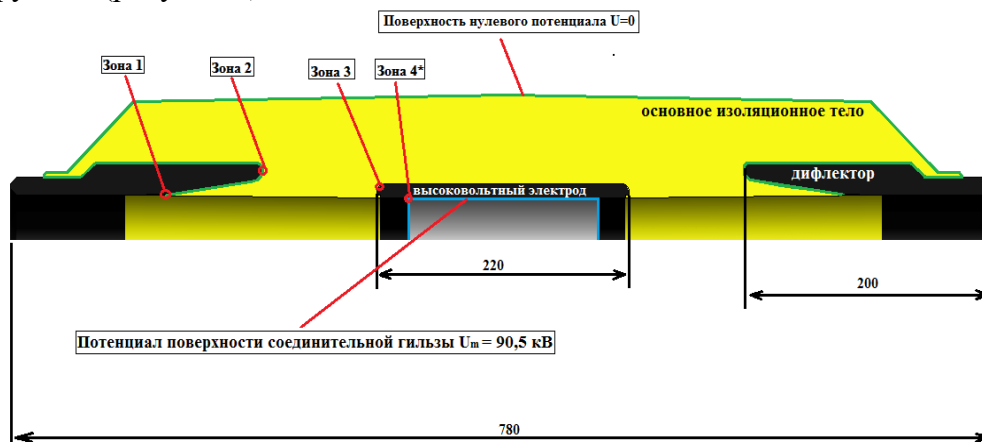


Рисунок 2. Элементы конструкции стресс конуса и критические зоны напряженности поля.

*Зона 1* - граница полимерного экрана по изоляции кабеля и диффлектора;

*Зона 2* – край диффлектора;

*Зона 3* – край полимерного высоковольтного электрода;

*Зона 4\** – край поверхности соединительной гильзы. В задаче рассматривался наихудший вариант, когда нет скругления (при несогласованном выборе длины высоковольтного электрода).

После определения местонахождения всех критических зон были установлены все параметры, влияющие на величину напряженности поля в этих зонах:

- Диэлектрическая проницаемость основного изоляционного тела;
- Электропроводность диффлекторов и высоковольтного электрода;
- Длина высоковольтного электрода;
- Длина диффлектора;
- Угол наклона диффлекторов к оси кабеля;
- Расстояние между высоковольтным электродом и диффлектором;

В результате проведенного моделирования была получена следующая конструкция:

- общая длина стресс конуса – 660 мм;
- Распределение напряжённости поля в зоне среза экрана по изоляции показывает, что её значение прямо пропорционально углу между касательной к начальному участку диффлектора и осью кабеля (углу наклона) и этот угол следует делать, по возможности, меньшим (в данной модели угол равен  $5^\circ$ );
- длина диффлектора (проекция на ось кабеля) – 170 мм (с каждой стороны);
- расстояние между высоковольтным электродом и диффлектором – 65 мм;
- Диэлектрическая проницаемость основного изоляционного тела -12;
- Электропроводность диффлекторов и высоковольтного электрода  $\geq 2 \cdot 10^{-4}$  См/м;

При этих параметрах максимальное расчётное значение тангенциальной составляющей напряженности поля  $E_t = 2,45$  кВ/мм (Зона 3).

Далее был проведён сравнительный анализ существующих (на тот момент) зарубежных аналогов («Zuit»)(рисунок 3) и «Pfisterer» (рисунок 4)) с разработанной конструкцией.

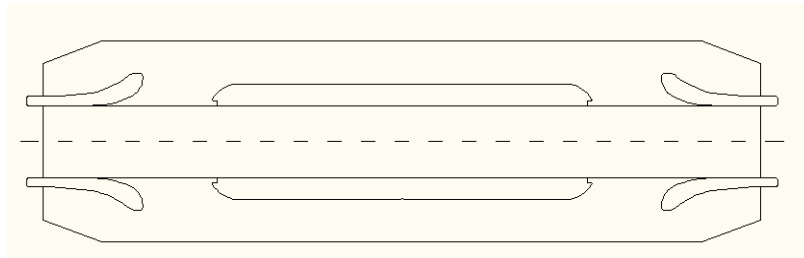


Рисунок 3. Чертёж эластомерного элемента управления полем фирмы Zuit.

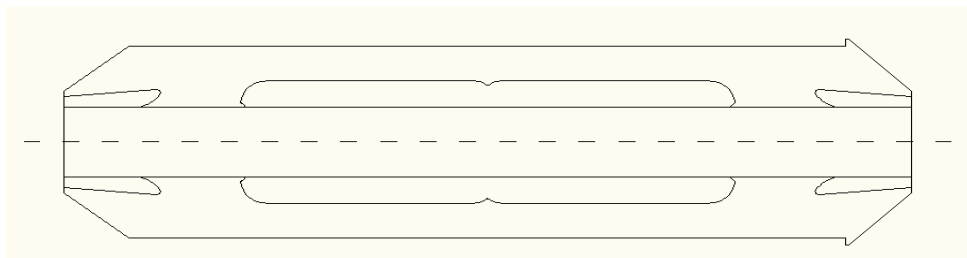


Рисунок 4. Чертёж эластомерного элемента управления полем фирмы Pfisterer.

В ходе сравнения были получены значения максимальной суммарной и тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в каждой из конструкций, указанных в таблице 1

Таблица 1: Значения напряженности электрического поля исследованных стресс-конусов в критической зоне 3:

Наименование	$E_{\Sigma}$ , кВ/мм	$E_{\tau}$ , кВ/мм
«Zuit»	4,1	4.09
«Pfisterer»	2,69	1.64
Разработанный	3.39	2.74

Как видно из полученных результатов, разработанный стресс-конус незначительно уступает швейцарскому стресс-конусу фирмы Pfisterer, в то время как значения напряженности электрического поля (как тангенциальной, так и суммарной) у немецкого стресс-конуса «Zuit» значительно выше, чем у разработанного.

**Третья глава** посвящена разработке усиливающего типа изоляции муфт, работа которых основана на резистивно-емкостном принципе выравнивания электрического поля в кабельной разделке. После проведения анализа теоретических данных, была смоделирована предварительная конструкция многофункционального элемента или трубки регулятора (рисунок 5).

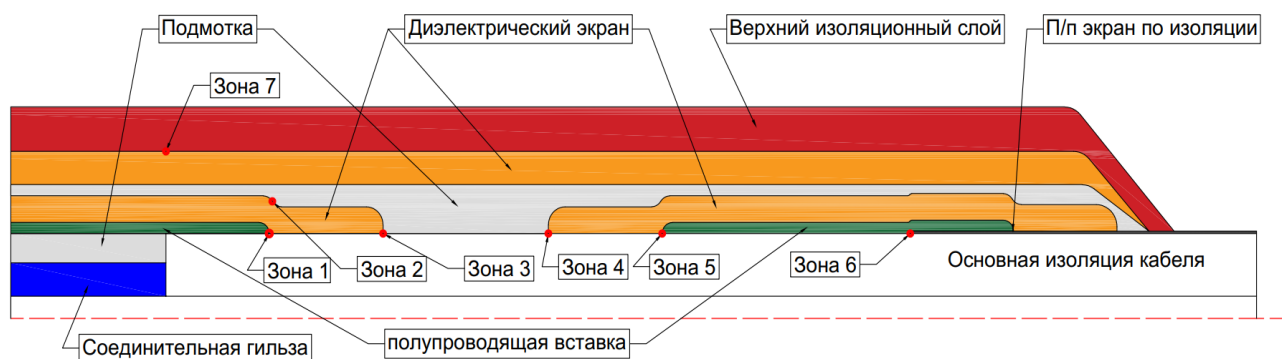


Рисунок 5. Предварительная конструкция трубки-регулятора с критическими зонами.

В процессе оптимизации данной конструкции были определены геометрические и физические параметры трубки-регулятора, при которых значение напряженности электрического поля принимает минимальное значение:

#### ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ:

- Толщина полупроводящей вставки – 5 мм;
- Толщина диэлектрических экранов над гильзой и над п/п экраном по изоляции – 12 мм;
- Толщина верхнего изоляционного слоя – 20 мм;
- Толщина большого диэлектрического экрана – 15 мм;
- Длина полупроводящей вставки над гильзой – 250 мм;
- Длина полупроводящей вставки над п/п экраном по изоляции, которая усаживается непосредственно на основную изоляцию кабеля – 120 мм;
- Расстояние между краями полупроводящей вставки и диэлектрическими экранами – 55 мм;
- Расстояние между диэлектрическими экранами – 80 мм;
- Большой диэлектрический экран должен полностью покрывать всю конструкцию, которая находится под ним. Его длина должна составлять не менее 900 мм;
- Длина верхнего изоляционного слоя должна быть больше длины большого диэлектрического экрана. Чтобы полностью покрыть всю конструкцию. Поэтому это значение должно быть больше 1100 мм.



### ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ:

- Диэлектрическая проницаемость ДЭ = 10;
- Подмотка, которая должна выровнять геометрию модели перед тем, как усаживать большой диэлектрический экран, должна быть изоляционной;
- Электропроводность полупроводящей вставки  $\gamma_{п/пВ} = 2 \cdot 10^{-4}$  См/м;
- Верхний изоляционный слой – изоляционные трубки без специальных свойств.

При таких параметрах общая картина электрического поля в усиливающей изоляции принимает вид, показанный на рисунке 6.

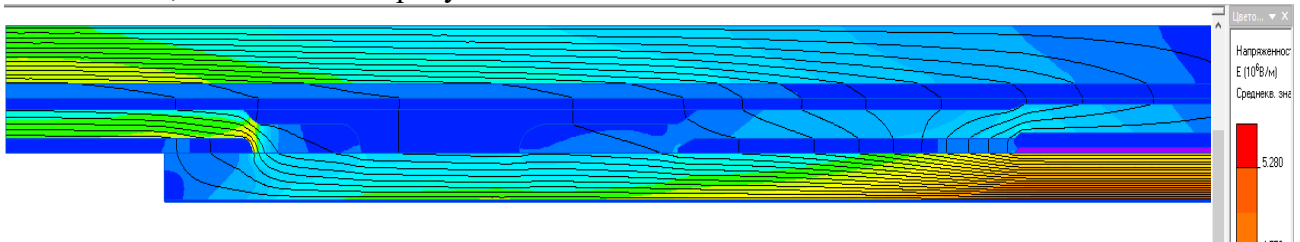


Рисунок 6. Картина распределения напряженности электрического поля в трубке-регулятор.

При этом значения напряженности электрического поля в критических зонах принимает значения, указанные в таблице 2.

Таблица 2: значения напряженности электрического поля во всех критических зонах

Зоны	1	2	3	4	5 (ус.из/осн.из)	6	7
$E_{\Sigma}$ , кВ/мм	3.57	0.10	1.51	1.74	1.37/2.71	3.64	2.60
$E_{\tau}$ , кВ/мм	3.27	0.04	1.50	1.72	0.07/2.62	3.62	2.60

Как видно из полученных значений, напряженность поля касательной составляющей в конструкции не превышает допустимого значения (5 кВ/мм), что говорит о работоспособности данной модели.

Так же в данной главе были показаны крайние случаи нарушения усадки элементов конструкции. По результатам этого моделирования можно сделать вывод, что даже при значительном отклонении геометрических параметров трубки-регулятора, напряженность электрического поля может значительно изменять свои величины, но при этом, в пределах проведённых измерений, её значения не превышают допустимых величин.

Важно отметить, что в данной конструкции главное соблюдать последовательность усадки слоев. Так же не допустимо, чтобы верхние слои были короче нижних (то есть край п/пВ не должен выступать за диэлектрический экран).

**Четвёртая глава** посвящена экспериментальной составляющей работы. В ней приводятся теоретические выкладки существующих работ по получению композиционных с заданными свойствами. Так для получения необходимой электропроводности композита особый интерес представляют одностенные углеродные нанотрубки, которых достаточно, для достижения значения 10 Ом·м, введения всего 0.1 вес.%. Для облегчения процесса диспергирования и введения одностенных углеродных наночастиц фирма OCSiAl производит концентраты («мастербатчи» TUBALL™ MATRIX) трубок для введения, как в термопластичные, так и в терморективные связующие.

Было проведено исследование по увеличению теплопроводности композиционного материала на основе полиэтилена с добавлением углеродных нановолокон. В результате теплопроводность композиционного материала увеличилась в 1.9 раз при добавлении 15 мас.%.

Так же было проведено исследование по увеличению диэлектрической проницаемости композиционного материала. При добавлении всего 2 мас.% ОСУНТ (одностенных

углеродных нанотрубок), диэлектрическая проницаемость композиционного материала увеличилась до 7.36.

При помощи спектрально-корреляционного метода была проверена равномерность распределения наполнителя в матрице композиционного материала на основе полиэтилена. Так же имея начальные значения концентрации в пленках аналогичного материала, была определена концентрация наполнителя в композите.

В данной главе так же показаны результаты проведения предварительных высоковольтных испытаний разработанного макета трубки-регулятора (рисунок 7).



**Рисунок 7. Подготовленная к испытаниям кабельная линия на 110 кВ с соединительной муфтой типа «трубки-регулятор».**

В перечень высоковольтных испытаний входило:

1. Измерение частичных разрядов при температуре окружающей среды под напряжением  $1,5U_0$  (96 кВ);
2. Испытание кабельной системы при температуре окружающей среды напряжением промышленной частоты значением  $2,5U_0$  (160 кВ).

В результате проведения испытаний были получены следующие результаты, указанные в таблицах 3 и 4:

**Таблица 3: Условия проведения измерения частичных разрядов и результаты**

Параметр	Требования для испытаний	Фактическое значение измеряемого параметра
Чувствительность схемы измерения, пКл	$\geq 5,0$	7,0
$T_{\text{окр.ср}}$ , °С		+ 21°С
Испытательное напряжение частоты 50 Гц, кВ	96	96
Частичные разряды в изоляции, пКл	Отсутствие разрядов в изоляции	Частичные разряды фиксировались ( $\sim 10^4$ пКл)

Таблица 4: Условия проведения испытания и результаты

Параметр	Требования для испытаний	Фактическое значение измеряемого параметра
Испытательное напряжение частоты 50 Гц, кВ	160	160
Время приложения напряжения, мин	30	28
Пробой изоляции муфты	Отсутствие пробоя	Пробой изоляции муфты

Так же был проведён демонтаж конструкции, сделаны выводы и даны рекомендации при дальнейшей оптимизации многофункционального элемента. Результаты проведённых испытаний показывают работоспособность применения резистивно-емкостного метода выравнивания электрического поля в высоковольтных кабельных муфтах на 110 кВ.

**Пятая глава** посвящена оптимизации первоначально полученного макета с учетом результатов, полученных в ходе работы.

В результате были получены две модели, указанные на рисунках 8 и 9.

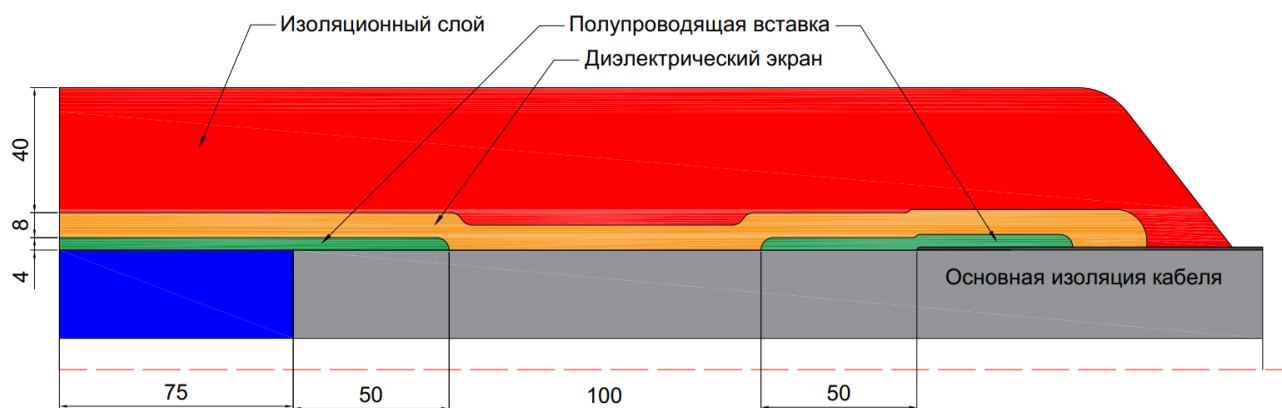


Рисунок 8. Обновлённая модель трубки-регулятора типа "Д.С.".

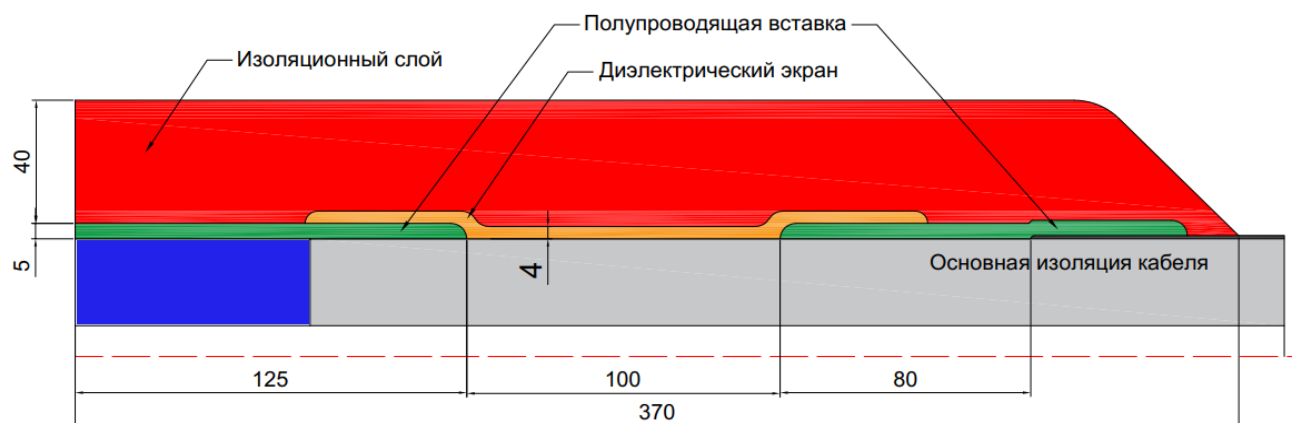


Рисунок 9. Обновлённая модель трубки-регулятора типа "Г.В.".

В данной главе описан процесс исследования данных конструкций:

- Определение критических зон в конструкциях;
- значения тангенциальной и суммарной составляющей напряженности электрического поля в критических зонах;
- проверка работоспособности конструкций при нарушении процесса монтажа;

В конце исследования было проведён сравнительный анализ первоначальной конструкции с моделями «Д.С.» и «Г.В.». Максимальные значения напряженностей поля указаны в таблице 5.

Таблица 5: максимальные значения напряженности поля  $E$  в каждой из разработанных конструкций

Конструкция	$E_{\Sigma}$ , кВ/мм	$E_{\tau}$ , кВ/мм
Первоначальная	3.64	3.62
Г.В.	3.01	1.94
Д.С.	2.01	1.89

### Выводы по работе

При разделке кабеля происходит нарушение распределения электрического поля, регулирование которого целесообразнее осуществлять при помощи термоусаживаемой усиливающей изоляции муфт, которые являются более удобным способом усадки.

- Предварительное компьютерное моделирование, используемого в качестве усиливающей изоляции муфты, стресс-конуса, позволило определить местонахождение критических зон, где напряжённость поля принимает наибольшую амплитуду и максимальное неоднородное распределение:

- Срез полупроводящего экрана по изоляции (Зона 1);
- Край диффлектора (Зона 2);
- Край высоковольтного электрода (Зона 3);

- Удалось определить оптимальную удельную проводимость диффлектора и высоковольтного электрода -  $2 \cdot 10^{-4}$  См/м;

- С точки зрения снижения рисков от нарушения процесса монтажа, полимерный высоковольтный электрод должен быть длиннее соединительной гильзы минимум на 10 мм;

- Угол наклона диффлектора следует делать минимально возможным. Основным сдерживающим критерием является технология изготовления;

- Сравнительный анализ показал, что разработанная модель стресс-конуса не уступает импортным аналогам и что максимальное значение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в конструкции равно  $E_{\tau} = 2,45$  кВ/мм в Зоне 3 (см.рис.2).

В ходе первоначальной разработки усиливающей изоляции муфт на основе термоусаживаемого полиэтилена был произведён анализ данных, полученных в ходе разработки эластомерного стресс-конуса, что позволило получить изначальную конструкцию трубки-регулятора (многофункционального элемента) и провести полную оптимизацию компьютерной модели. В результате данного моделирования максимальное значение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в конструкции составило  $E_{\tau} = 3,62$  кВ/мм, что говорит о работоспособности данной усиливающей изоляции.

До проведения экспериментальных исследований был проведён анализ литературных данных по использованию материалов в качестве добавок, для получения композиционного материала с увеличенной электропроводностью.

Особый интерес вызвали одностенные углеродные нанотрубки (ОСУНТ), при добавлении которых также повысился коэффициент теплопроводности относительно чистого полиэтилена. Также можно отметить, что для более весомого увеличения теплопроводности рекомендуется провести переориентацию наполнителя ортогонально поверхности матрицы

материала. Равномерность распределения и концентрация наполнителя проверялись при помощи спектрально-корреляционного метода.

Результаты предварительных испытаний первоначального макета многофункционального элемента показали работоспособность данной модели и указали на ряд деталей, которые были учтены при дальнейшей разработке:

- Следует отказаться от использования лент (подмотки);
- Обязательное использование длинных термоусаживаемых трубок, желательно одной длиной;
- Обязательное использование компаундов для снижения вероятности возникновения воздушных промежутков.

После проведения предварительных испытаний была значительно переработана изначальная модель трубки-регулятора. Две обновлённые конструкции с рабочими наименованиями «Д.С.» и «Г.В.» значительно превосходят своего предшественника:

- 1) Количество критических зон в обеих конструкциях меньше, чем в первоначальной модели;
- 2) Максимальное значение напряженности электрического поля (как суммарной, так и тангенциальной составляющей) в самой уязвимой зоне новых конструкций меньше, чем в первоначальной («Д.С.» - **1,89 кВ/мм** и «Г.В.» - **1,92 кВ/мм**);
- 3) В данных конструкциях отсутствует подмотка;
- 4) Изменение геометрии конструктивных элементов меньше сказывается на общей картине поля.
- 5) Габариты моделей «Д.С.» и «Г.В.» меньше, чем у первоначальной конструкции.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

1. Селезнёв Д.А., Доронин М. В. «Численный расчет электромагнитного и теплового поля силового импульсного кабеля». Научно-исследовательский и инновационный потенциал молодёжи.- Чита, 2013;
2. 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;
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. Селезнёв Д.А. «Сравнение емкостного и резистивного методов выравнивания электрического поля в высоковольтной кабельной муфте». Выпускная работа бакалавра. Спб. 2014
6. Селезнёв Д.А. «Комбинированный подход к регулированию электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт высокого напряжения», выпускная работа магистра, СПб, 2016
7. Селезнёв Д.А. «Некоторые аспекты использования резистивно-емкостного метода выравнивания электрического поля в высоковольтной кабельной муфте» // Неделя науки. СПб. 2016.
8. Грешняков. Г.В., Селезнёв Д.А., Коровкин Н.В. «Регулирование электрического поля в усиливающей изоляции соединительных кабельных муфт высокого напряжения» // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. – Спб, № 4. 2016. – С. 116-125.

9. D. Seleznev, N. Obraztsov, D. Kiesewetter. «Numerical Simulation of the High-Voltage Cable Sleeve Operation for 110 kV» // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – СПб. 2018.
10. Д. В. Кизеветтер; В. И. Малюгин; М. Э. Борисова; Д. А. Селезнев; А. М. Камалов. «Спектрально-корреляционный метод оценки концентрации одностенных углеродных нанотрубок в полиэтилене» // Оптический журнал, 2020, Т.87, №1, с 12-15.
11. Селезнёв Д.А., Грешняков Г.В. «Применение резистивно-емкостного принципа регулирования электрического поля кабельных муфт на 110 кВ» // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского Политехнического университета. – СПб, № 1, 2020.
12. Патент на полезную модель № 184107 «Соединительная муфта для силового кабеля». Авторы: Грешняков Г.В., Селезнёв Д.А., Ковалёв Г.Г. Зарегистрирован в государственном реестре полезных моделей 16 октября 2018г. Срок действия патента истекает 15 июня 2028 года.
13. G.Greshnyakov, D.Seleznev, A. Egupov, S. Dubitsky, «Combining Resistive and Capacitive Stress Grading in High Voltage Cable Joints» // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – СПб, 2021.
14. D.A.Seleznev, D.V. Kiesewetter, V.I. Malyugin, «Detection of Concentration Inhomogeneity of Carbon Nanotubes in Polyethylene by Spectral-Correlation Method»// IEEE 2021, Vol. 28, Issue 2, April 2021, p 594- 599.