

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки/ специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Разработка и испытание кабельных муфт на напряжение 35кВ

Обучающийся

М. А. Потапов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доцент, М. Н. Третьякова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Аннотация

Выполненная работа на тему «Разработка и испытание кабельных муфт на напряжение 35 кВ» содержит пояснительную записку и графическую часть.

Пояснительная записка состоит из 74 стр., содержит: таблиц – 33, иллюстраций – 25, источников информации – 21.

В графической части работы представлено 6 листов формата А1.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена разработке муфт для кабеля из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 35 кВ с последующим испытанием и прохождением аттестации ПАО «Россети» и внедрением в энергосистему Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели в работе были выполнены анализ, расчет и испытание материалов применяемых в конструкции кабельных муфт. Все образцы были тщательно проверены и испытаны в аккредитованной лаборатории.

Так как учебного материала по данной теме не достаточно, при выполнении ВКР использовалась в основном только нормативно техническая документация (ГОСТ, СТО).

Испытания разработанных кабельных муфт проводились в испытательном центре «Всероссийский Научно Исследовательский проектно конструкторский и технологический Институт Кабельной Промышленности».

На данном этапе совместно с заводом «Таткабель» была подана заявка в НТЦ «Россети» на предмет аттестации кабельной системы.

В результате выполнения работы разработаны муфты для кабеля из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 35 кВ, которые будут интегрированы в энергетическую систему РФ.

Содержание

Введение.....	4
1 Анализ нормативных и технических требований к кабельным муфтам на 35кВ	6
1.1 Анализ нормативных требований к кабельным муфтам на 35кВ.....	6
1.2 Технические требования к материалам, применяемым при изготовлении кабельных муфт на номинальное напряжение 35 кВ	7
1.3 Технические требования к кабельным муфтам для кабелей из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 35 кВ.....	11
2 Подбор материала и разработка конструкций кабельных муфт на номинальное напряжение 35 кВ	15
2.1 Анализ, подбор и испытания материалов, применяемых в кабельных муфтах на напряжение 35 кВ	15
2.1.1 Материал, выравнивающий напряжённость электрического поля	17
2.1.2 Изоляционный материал	25
2.1.3 Гильзы и наконечники	30
2.1.4 Экранирующие материалы	40
2.1.5 Вспомогательные материалы	43
2.2 Разработка конструкции и технология монтажа кабельных муфт да кабеля из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 35 кВ.....	43
2.2.1 Соединительные муфты для трёхжильного кабеля	45
2.2.2 Концевые муфты для трёхжильного кабеля	54
3 Программа и методика испытаний кабельных муфт	58
3.1 Программа испытаний.....	58
3.2 Методика испытаний.....	59
4 Проведение испытаний кабельных муфт	66
Заключение	71
Список используемых источников.....	73

Введение

В современной энергетике для соединения строительных длин кабелей, а так же для оконцевания кабельных линий применяются кабельные муфты, изготовленные из поперечно радиационно – сшитых полимерных материалов (СПЭ) [14]. Данные кабельные муфты носят название – термоусаживаемые. Термоусаживаемые кабельные муфты имеют ряд преимуществ перед, уже устаревшими эпоксидными и свинцовыми.

Среди преимуществ могу отметить:

- простота и скорость монтажа;
- срок службы кабельной муфты не менее 30 лет, что не меньше срока службы кабеля;
- запас механической, а так же электрической прочности муфты не уступает данным показателям кабеля;
- изоляционный материал устойчив к явлению трекингу и к ультрафиолетовому излучению;
- большой срок хранения кабельных муфт на складе, который ограничивается лишь сроком хранения герметизирующих материалов, входящих в комплект муфты [15], [16], [19], [21].

На российском рынке присутствует ряд отечественных производителей, таких как:

- АО «Михневский завод электроизделий»;
- ЗАО «Подольский завод электроизделий»;
- ЗАО «Термофит»;
- ЗАО «ЗЭТА»;
- НПО «ЭРГ».

Среди зарубежных производителей на отечественном рынке доминирующую позицию занимает компания ООО «Тайко Электроникс РУС» с кабельными муфтами Raychem.

В отличие от кабельных муфт на номинальное напряжение 35 кВ

вышеуказанных производителей, конструкция муфт на номинальное напряжение до 10 кВ довольно проста и не требует особого внимания.

Актуальность данной темы обусловлена тем, что зачастую потребитель кабельных муфт ограничен в выборе производителя. Многие отечественные производители не производят кабельную арматуру на напряжение свыше 10 кВ. Предлагаемые на рынке кабельные муфты на напряжение 35 кВ сложны в монтаже и не отличаются особой надёжностью. Компания ООО «Тайко Электроникс РУС» предлагает достаточно надёжные кабельные муфты, по цене превышающие российские аналоги более чем в четыре раза.

Целью данной работы является повышение надёжности кабельных муфт на номинальное напряжение 35 кВ путём разработки экономически оптимальной конструкции на производственной базе АО «Михневский завод электроизделий» для кабелей из сшитого полиэтилена (СПЭ), с последующим испытанием и аттестацией в ПАО «Россети».

1 Анализ нормативных и технических требований к кабельным муфтам на 35кВ

1.1 Анализ нормативных требований к кабельным муфтам на 35кВ

Проверка качества (аттестация) оборудования, материалов и систем, поставляемых на объекты электросетевого хозяйства ДЗО Общества, проводится в соответствии с Положением ПАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе, утвержденным решением Совета директоров ПАО «Россети».

Проверка качества оборудования направлена на достижение следующих целей:

- поддержание бесперебойного электроснабжения потребителей, надежного, безопасного и эффективного функционирования объектов ДЗО Общества;
- повышение надежности и безопасности на объектах ДЗО Общества за счет предотвращения поставок оборудования, материалов и систем, не соответствующих по своим характеристикам требованиям отраслевой НТД, стандартам и НТД Общества и условиям применения;
- повышение качества изготовления, технических характеристик оборудования и материалов за счет организации работы с изготовителями и поставщиками по результатам эксплуатации оборудования на действующих объектах ДЗО Общества.

При разработке муфт для кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) будем руководствоваться Стандартом организации ПАО «ФСК ЕЭС», а именно – СТО 56947007– 29.240.65.205–2015 «Кабельные системы на напряжение 0,66 – 35 кВ. Типовые технические требования» [20].

Данные технические требования к кабельным системам 0,66 – 35 кВ включают:

- номинальные параметры;

- требования к конструкции и материалам;
- требования к характеристикам кабеля и муфт;
- требование по надежности;
- требования по объему и методам испытаний кабельных муфт 35кВ.

1.2 Технические требования к материалам, применяемым при изготовлении кабельных муфт на номинальное напряжение 35 кВ

Требования к электрическим и физико–механическим характеристикам материала деталей муфт (трубок и перчаток) приведены в таблице 1 [3], [18].

Таблица 1 – Электрические и физико–механические характеристики трубок и перчаток в исходном состоянии

Наименование характеристики	Значение
1 Трубки, перчатки электроизоляционные Электрическая прочность при переменном напряжении номинальной частотой до 50 Гц, кВ/мм, не менее Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом/см, не менее	15 10 ¹²
2 Трубки шланговые Прочность при разрыве, Н/мм ² , не менее Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	10 300
3 Трубки электропроводящие Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом/см, не менее	10 ⁴
4 Трубки и перчатки из материалов, обеспечивающих пониженную пожароопасность Стойкость к горению Кислородный индекс, %, не менее	ПВ–0 0,28

Продолжение таблицы 1

1	2
5 Трубки, регулирующие напряженность электрического поля Диэлектрическая проницаемость, не менее	20

–Термоусаживаемые детали муфт (трубки и перчатки) не должны иметь раковин, трещин, пузырей, расслоений, утолщений, проколов и т.п..

– Гильзы в соединительных и соединительно–переходных муфтах должны быть изолированы одной или несколькими термоусаживаемыми трубками с клеевым слоем.

Номинальная толщина изоляции по гильзе после усадки трубки (трубок) в зависимости от номинального напряжения муфт должна соответствовать указанной в таблице 2.

Таблица 2 – Номинальная толщина изоляции по гильзе

Номинальное напряжение муфты, кВ	Номинальная толщина изоляции по гильзе, мм, не менее
35	12,0

– Соединительные и соединительные переходные муфты должны иметь экран из алюминиевых или медных лент, или медной сетки. Толщина лент должна быть не менее 0,05 мм. Диаметр проволок медной сетки должен быть не менее 0,05 мм.

– Соединительные и соединительные переходные муфты должны иметь термоусаживаемый защитный кожух.

Номинальная толщина стенок защитного кожуха после усадки, измеренная в середине муфты, должна обеспечивать механическую прочность кабельной муфты.

Для соединения и оконцевания жил кабеля будут применяться гильзы и

наконечники из алюминиевого сплава с болтами со срывающимися головками типа НСП и ГСП. Технические требования, предъявляемые для контактных соединений следующие:

- Гильзы и наконечники применяют для соединения алюминиевых или медных жил кабелей.
- Минимальное число контактных винтов и их расположение в корпусе гильзы и наконечника для контактного соединения должно соответствовать указанным в таблице 3.

Таблица 3 – Минимальное число контактных винтов

Тип жилы, экрана	Минимальное число контактных винтов, шт.	Расположение контактных винтов
Секторная	2	Однорядное
Круглая	1	Двурядное *
Экран из медных проволок	2	Двурядное *
* Допускается однорядное расположение винтов		

– Гильзы, наконечники и контактные винты должны изготавливаться из прутков алюминиевого сплава марки В95Т1 по ГОСТ 21488. Допускается применение сплава марки Д16Т по ГОСТ 21488 [18].

– Удельное электрическое сопротивление алюминиевого сплава должно быть 3,4–5,7 мкОм×см.

– Механическая прочность (предел текучести) прутков из алюминиевого сплава должна быть в пределах 38–55 кгс/мм².

– Гильзы и наконечники не должны иметь трещин, острых кромок, заусенцев.

– Резьба для контактных винтов в корпусе гильз и наконечников и резьба самих контактных винтов должны выдержать усилие максимального значения момента затяжки контактного винта, указанного в таблице 4.

Таблица 4 – Требование к резьбовой части гильз и наконечников

Тип контактных винтов	Максимальный момент затяжки контактного винта, Н·м	Минимальный момент предела прочности резьбы, Н·м
50	26	40–60
120	32	60–80
240	59	100–150

– Диаметр шейки контактных винтов подбирают таким образом, чтобы в момент отрыва головки давление контактного винта на жилу было 0,35 Па.

– Механическая прочность контактных соединений для алюминиевых однопроволочных и многопроволочных жил кабелей должна составлять не менее 30% от предела прочности целого участка жилы при воздействии растягивающей статической нагрузки на соединения по ГОСТ 10434 [5]. При соединении жил разных сечений прочность контактного соединения оценивается сравнением с целым участком жилы меньшего сечения.

– Отношение начального электрического сопротивления контактного соединения к электрическому сопротивлению целого участка жилы, длина которого равна длине контактного соединения, не должно превышать 1.

– Температура нагрева контактных соединений при протекании длительно допустимого тока не должна превышать значений температуры нагрева целого участка жилы по ГОСТ 10434.

– Контактные соединения должны выдерживать ускоренные испытания в режиме циклического нагрева до 120°С с последующим охлаждением до температуры 20°С. Число циклов 500. После испытаний отношение сопротивления контактного соединения к начальному сопротивлению не должно превышать 1,5.

1.3 Технические требования к кабельным муфтам для кабелей из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 35 кВ

Длина пути утечки внешней изоляции концевых муфт должна соответствовать требованиям ГОСТ 9920–89 и указанным в таблице 5 значениям [6].

Таблица 5 – Длина пути утечки концевых муфт внутренней и наружной установки

Номинальное напряжение муфты, кВ	Длина пути утечки внешней изоляции, см, не менее, для концевых муфт типа	
	КВ	КН
35	105	115

В соединительных и соединительных переходных муфтах для кабелей на напряжение 35 кВ, соединение медного проволочного экрана кабелей выполняют механическим способом (опрессовкой или гильзами с контактными винтами, а так же пружинами постоянного давления ППД) [18].

Требования стойкости к внешним воздействующим факторам [3], [12], [14], [18], [20]:

- Муфты должны быть стойкими к воздействию повышенной температуры окружающей среды до 50°С.

- Муфты должны быть стойкими к воздействию пониженной температуры окружающей среды до минус 50°С.

- Муфты должны быть стойкими к воздействию повышенной относительной влажностью воздуха до 98% при температуре окружающей среды до 35° С. Требования к электрическим параметрам муфт таблица 6 и таблица 7.

Таблица 6 – Концевые муфты наружной и внутренней установки для кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 35 кВ

Испытания	Номинальное напряжение, кВ	Результаты испытаний
	35	
	Требования	
1 Переменное напряжение в течение 5 мин, кВ	115	Отсутствие пробоя и перекрытий
2 Переменное напряжение под дождем в течение 1 мин, кВ*	85	Отсутствие пробоя и перекрытий
3 Частичные разряды при напряжении, кВ	35	Частичные разряды не более 10 пКл
4 Импульсное напряжение, кВ	195 10 импульсов каждой полярности при температуре 90°C на жиле	Отсутствие пробоя и перекрытий
5 Циклы нагрева	60 циклов на воздухе при температуре на жиле кабеля 90 °С и напряжении, кВ 50	Отсутствие пробоя и перекрытий
6 Частичные разряды после циклов нагрев при напряжении, кВ	35	Частичные разряды не более 10 пКл
7 Электрическая прочность муфт после циклов нагрева, кВ	115	Отсутствие пробоя и перекрытий
8 Термическая стойкость при коротком замыкании	3 воздействия, Т _{ткз} = 250°C	Отсутствие механических и термических повреждений
9 Динамическая стойкость при коротком замыкании	3 воздействия тока динамической стойкости I _д	Отсутствие механических повреждений
10 Переменное напряжение в течение 15 мин, кВ	115	Отсутствие пробоя и перекрытий

Продолжение таблицы 6

1	2	3
11 Трекингостойкость*	500 ч при напряжении, кВ 26	Отсутствие эрозии превышающей 50 % толщины стенки наружной трубки (трубок)

Таблица 7 – Соединительные муфты для кабелей с изоляцией из СПЭ на напряжение 35 кВ

Испытания	Номинальное напряжение, кВ	Результаты испытаний
	35	
	Требования	
1 Переменное напряжение в течение 5 мин, кВ	115	Отсутствие пробоя
2 Частичные разряды при напряжении, кВ	35	Частичные разряды не более 10 пКл
3 Импульсное напряжение, кВ	195 10 импульсов каждой полярности при температуре 90°C на жиле	Отсутствие пробоя и перекрытий
4 Циклы нагрева	30 циклов на воздухе и 30 циклов в воде при температуре на жиле кабеля 90°C и напряжении, кВ 50	Отсутствие пробоя и перекрытий
5 Частичные разряды после циклов нагрева при напряжении, кВ	35	Частичные разряды не более 10 пКл
6 Электрическая прочность муфт после циклов нагрева, кВ	115	Отсутствие пробоя и перекрытий

Продолжение таблицы 7

1	2	3
7 Термическая стойкость при коротком замыкании (жила)	3 воздействия, $T_{ткз} = 250^{\circ}\text{C}$	Отсутствие механических повреждений
8 Термическая стойкость при коротком замыкании (экран)	3 воздействия замыкания токов короткого замыкания	Отсутствие механических и термических повреждений
9 Динамическая стойкость при коротком замыкании	3 воздействия тока динамической стойкости I_d	Отсутствие механических повреждений
10 Переменное напряжение в течение 15 мин, кВ	115	Отсутствие пробоя и перекрытий

Для надёжного функционирования кабельных муфт в составе кабельной системы нам необходимо соблюсти все вышеуказанные требования, как к материалам, так и к конструкции муфт в целом.

Выводы по разделу 1.

В данном разделе ВКР был проведён анализ нормативно технической документации, а именно: СТО и ГОСТ, которым должны соответствовать кабельные муфты. Ознакомились с требованиями к параметрам электроизоляционных, экранирующих, выравнивающих напряжённость электрического поля материалов. Так же были рассмотрены технические требования к контактным соединениям.

Для разработки надёжных кабельных муфт нам необходимо соблюсти все вышеизложенные требования.

2 Подбор материала и разработка конструкций кабельных муфт на номинальное напряжение 35 кВ

2.1 Анализ, подбор и испытания материалов, применяемых в кабельных муфтах на напряжение 35 кВ

Руководствуясь таблицей 1 из п. 1.2. Главы 1– Технические требования к материалам, применяемым при изготовлении кабельных муфт на номинальное напряжение 35 кВ, приступим к подбору материала.

В качестве изолирующего материала будем использовать набор термоусаживаемых трубок (манжет).

Термоусаживаемая трубка была изобретена корпорацией Raychem в 1962 году. Она производится из термопластиков, таких как полиолефины, фторполимеры (фторопласт 4), поливинилхлорида, неопрен, силиконовые эластомеры.

Процесс производства термоусаживаемых трубок начинается с подбора подходящего полимера, исходя из требуемых свойств. Затем в исходный полимер добавляют присадки и наполнители (красители, стабилизаторы и т. п.), после чего полимер экструдирован в трубку.

На следующем этапе полимерная трубка подвергается процедуре сшивки, например, при помощи радиации, пучка электронов или химическим способом. Сшивка формирует в полимере «память» исходной формы. Затем трубка нагревается до температуры ниже плавления кристаллической фазы полимера и подвергается растяжению (часто под вакуумом) с быстрым охлаждением в таком состоянии.

Позднее, когда трубка при использовании будет нагрета до температуры выше температуры плавления кристаллической фазы, трубка сожмется до ее исходного размера. Для использования под открытым небом в состав трубок вводят УФ стабилизаторы для защиты от солнечной радиации.

Для соединительных муфт на 35 кВ необходимая величина восстановленной изоляции по соединительной гильзе должна быть не менее 12 мм. Данная величина будет достигнута путём набора изолирующих термоусаживаемых трубок различного диаметра, которые будут усажены последовательно [18].

Для выравнивания напряжённости электрического поля на срезе полупроводящего слоя будем применять комбинированный узел, состоящий из мастичной ленты и трубки выравнивания напряжённости электрического поля с заданной диэлектрической проницаемостью.

Для соединения и оконцевания жил будут применяться гильзы и наконечники со срывными болтами из сплава Д16Т.

Для сглаживания напряжённости электрического поля и придания ему однородности в соединительных муфтах на гильзах будем использовать полупроводящую ленту и экранирующую трубку.

В качестве экрана соединительной муфты используется медная лужёная сетка. Медный проволочный экран и провод, соединяющий бронеленты будет соединяться с помощью пружин постоянного давления.

Для изолирования жил в концевых муфтах будем применять термоусаживаемые трубки устойчивые к явлению трекинга. Для концевых муфт наружной установки на каждую жилу предусмотрены фазные изоляторы, которые препятствуют загрязнению жил кабеля и явлению трекинга.

Для герметизации корешка разделки кабеля предусмотрена термоусаживаемая перчатка. Из вспомогательных материалов нам потребуется герметизирующая влагостойкая лента.

Наравне с изолирующими материалами, очень важную роль в кабельных муфтах играют материалы, выравнивающие напряжённость электрического поля.

2.1.1 Материал, выравнивающий напряжённость электрического поля

В месте среза экрана кабеля с СПЭ изоляцией, наблюдается повышенная плотность силовых линий электрического поля. Этого уровня напряженности поля достаточно для ионизации воздуха на поверхности жилы кабеля для того, что бы появились разряды (ЧР). Повышение температуры и побочные продукты ионизации с течением времени приведут к разрушению изоляционной поверхности. Кроме того, напряженность поля в месте среза экрана настолько высока, что даже малейший надрез может привести к пробое изоляции [1], [2].

Для того, чтобы сгладить скачки напряженности электрического поля, в наших муфтах будем применять специальный материал, который используется в виде мастичного подслоя, и в виде термоусаживаемых трубок. В этом материале очень точно регулируется удельное объемное электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость. На срезе экрана напряженность поля уменьшается до уровня, который обеспечивает надежную длительную работу в муфте.

Эта компактная универсальная система выравнивания напряженности электрического поля применима для всех кабелей с СПЭ изоляцией на напряжение до 35 кВ.

На рисунке 1 показан отрезок кабеля со снятым полупроводящим (экранирующим) слоем по жиле кабеля марки АПВП 1×95–35кВ без выравнивания напряжённости электрического поля и с системой выравнивания напряжённости электрического поля в виде трубки стресс-контроль на рисунке 2.

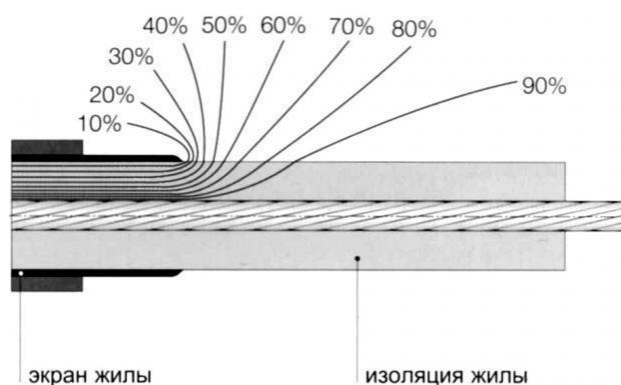


Рисунок 1 – Отрезок кабеля без элементов, выравнивающих напряжённость электрического поля

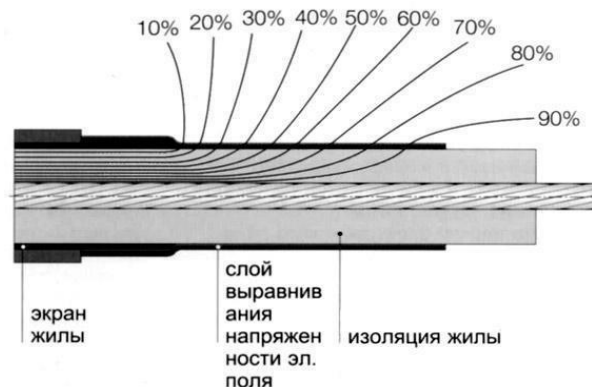


Рисунок 2 – Выравнивание напряжённости электрического поля с помощью трубки стресс-контроль

Для измерения диэлектрической проницаемости термоусаживаемых трубок стресс-контроля из формулы круглого конденсатора мною была выведена формула (1) определения диэлектрической проницаемости диэлектрика:

$$\varepsilon = \frac{C \cdot \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)}{2\pi \cdot \varepsilon^0 \cdot l} \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика,

C – ёмкость круглого конденсатора,

$d1$ – диаметр по внутреннему электроду,

$d2$ – диаметр по внешнему электроду,

ε^0 – диэлектрическая постоянная равная $8,85 \cdot 10^{-12} \left(\frac{\text{Кл}^2}{\text{В} \cdot \text{м}^2} \right)$,

l – длина электродов.

Из подручных средств был собран круглый конденсатор.

– Электрод №1 сделан из алюминиевой трубы, который был отшлифован на токарном станке,

– Электрод № 2 выполнен из отрезка алюминиевой фольги.

На электрод № 1 усаживалась термоусаживаемая трубка стресс–контроля, поверх трубки размещался электрод №2.

Определение ёмкости конденсатора проводились с помощью измерителя иммитанса (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Измерение ёмкости конденсатора.

Полученные данные:

$$C = 923,3 \text{ пФ}$$

$$d1 = 45 \text{ мм}$$

$$d2 = 49 \text{ мм}$$

$$l = 0,05 \text{ м}$$

Подставив исходные данные в выведенную нами формулу (1), получим величину диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = \frac{923,3 \cdot 10^{-12} \cdot \ln\left(\frac{0,049}{0,045}\right)}{2\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,05} \approx 34.$$

Диэлектрическая проницаемость нашего образца равна 34.

На сегодняшний день данный вид изделий производится исключительно на территории КНР, в связи с этим электрические показатели от партии к партии не стабильны.

Мною были проведены несколько измерений трубок стресс–контроль различных производителей. Результаты измерений приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты измерения диэлектрической проницаемости ε различных производителей

№ образца	Заявленная производителем ε	Фактическая ε	Требуемая ε
1	20	9	не менее 20
2	40	34	не менее 20
3	40	17	не менее 20
4	20	13	не менее 20

Самый приемлемый для нас результат показал образец № 2. Данные образец, после оценки регулирующей способности и получении положительного результата будем применять в наших кабельных муфтах.

Для того чтобы исключить воздушные включения между срезом экрана и трубкой выравнивания напряжённости электрического поля воспользуемся термоплавкой мастичной лентой, которая так же как и трубка выравнивания

напряженности электрического поля имеет повышенную диэлектрическую проницаемость. Показатели данной ленты приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Показатели ленты – мастики

Параметр	Значение
Прочность на разрыв	$\geq 0,5\text{Мпа}$
Предельное удлинение	$\geq 500\%$
Объемное сопротивление	$\geq 1,8 \times 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$
Электрическая прочность	12 кВ/мм
Относительная диэлектрическая проницаемость	≥ 15

Данная лента под воздействием пламени газовой горелки расплавляется, заполняя все пустоты и вытесняя воздух в месте среза полупроводящего экрана, под трубкой стресс–контроль.

Произведём оценку регулирующей способности материалов по измеряемому напряжению возникновения ЧР интенсивностью более 10 пКл [12]. Для измерения регулирующей способности был использован одножильный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 35 кВ с алюминиевой жилой сечением 95 мм².

Длина разделки концевых участков кабеля – 470 мм, края полимерного экрана по изоляции тщательно обрабатывались шкуркой до 500 ед. Регулирующая термоусаживаемая трубка длиной 270 мм и эластомерная лента накладывались на край подготовленного экрана.

Петля кабеля с регулируемыми элементами (Рисунок 4 и 5) подключалась к источнику высокого переменного напряжения MSR–600 и измерителю ЧР DDX 8003 (США), который обеспечивает измерений в диапазоне 0 – 1000пКл (Рисунок 6)



Рисунок 4 – Образец кабеля АПвП 1×95–35 кВ для испытания материалов и образцов концевых и соединительных муфт



Рисунок 5 – Подключение испытуемой кабельной сборки к источнику высокого переменного напряжения MSR–600 и измерителю ЧР DDX 800



Рисунок 6 – Частичные разряды, возникающие на срезе экранирующего слоя показаны на измерителе ЧР DDX 8003
Результаты испытаний испытуемой кабельной сборки приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Измеренная величина частичных разрядов

Измерительное напряжение (кВ)	Показатель частичных разрядов (пКл)
20	1
35	5
50	20
71	45

Как видно из таблицы 10 узел выравнивания напряжённости электрического поля в составе мастичной ленты и регулирующей трубки показал отличные результаты.

По техническим требованиям, предъявляемым к кабельным муфтам показатель ЧР при $1,73U_0 = 35$ кВ должен быть не более 10 пКл.

Можно видеть, что лента из эластомерного материала и тонкостенной термоусаживаемой трубки соответствуют по ЧР требованиям арматуры для кабелей на напряжение 35кВ.

Такая система из двух регулирующих материалов будет успешно применена как в концевых, так и в соединительных муфтах кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 35 кВ.

Первые образцы муфт с выбранными материалами регулирования электрического поля также были испытаны на одножильном кабеле марки АПвВ 1×95/25–35.

Испытательная система содержала две концевые муфты и соединительную муфту. Измеренные значения ЧР при напряжении 35 кВ – 5 пКл, при 90 кВ – 50 – 60 пКл. Что является довольно не плохим показателем.

Среди испытанных мною образцов выравнивающих элементов различных производителей, около 30% не прошли испытание повышенным напряжением 90 кВ в течении 4 часов. Данное явление связано с некачественными материалами, применяемыми при изготовлении элементов стресс–контроль, либо несоответствием заявленных и фактических

технических характеристик, а именно:

- диэлектрическая проницаемость;
- объёмное электрическое сопротивление;
- тангенс угла диэлектрических потерь.

В одном из вариантов конструкции кабельных муфт в качестве материала, выравнивающего электрическое поле по соединительной гильзе применялась лента АБРИС КИ–20 с $\epsilon=20$ (Рисунок 7).



Рисунок 7 – Применение ленты АБРИС КИ–20 в качестве материала выравнивающего электрическое поле по гильзе

Кабельная муфта с такой системой выравнивания электрического поля была собрана на одножильном кабеле АПВП 1×95–35 и подверглась испытанию повышенным напряжением 90 кВ с измерением частичных разрядов. Результаты испытаний приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты испытаний кабельной сборки с лентой АБРИС КИ–20 в качестве материала выравнивающего электрическое поле по гильзе

Испытательное напряжение, кВ	Время выдержки, мин.	Уровень ЧР, пКл
10	10	0
20	10	7
35	10	12
50	10	90
70	Пробой	Уровень ЧР при пробое составлял 2300 пКл

Как видно из таблицы 11 – уровень частичных разрядов рос с поднятием напряжения. На напряжении 70 кВ произошёл пробой соединительной муфты в месте контактного соединения.

В дальнейшем исследование данной ленты проводилось в заводской лаборатории. В ходе испытания ленты выяснилось, что при повышении напряжённости электрического поля менялось её объёмное электрическое сопротивление, вследствие чего происходил нагрев и дальнейший термический пробой муфты.

Вывод: данную ленту, возможно, применять в муфтах до 10 кВ.

2.1.2 Изоляционный материал

Изолирование контактных соединений будет производиться набором толстостенных термоусаживаемых трубок из полиэтилена высокого давления марки 153–10К.

153–10К – стойкая к термоокислительному и фотоокислительному старению композиция на основе полиэтилена низкой плотности марки 15303–003. Продукт характеризуется специальным составом рецептуры стабилизации, обеспечивающим высокую производительность экструзионных линий, снижение энергозатрат при переработке, улучшенный внешний вид изделий [7]. Технические характеристики полиэтилена

приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Характеристики ПВД 153–10К

Свойства	Значения
Прочность при разрыве, МПа	14.7
Относительное удлинение при разрыве, %	640
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	$3.6 \cdot 10^{17}$
Электрическая прочность, кВ/мм	43
Диэлектрическая проницаемость (при частоте 1 МГц)	2.2

Производство термоусадочных трубок из ПВД 153–10К можно условно разделить на три этапа: экструзия, сшивка и раздувка.

Производственный цикл содержит также несколько вспомогательных технологических процессов: подготовка полимерного сырья, резка трубок, нанесение клеевого слоя и упаковка.

Перед тем, как попасть в загрузочный бункер экструдера и превратиться в трубку, ингредиенты полимерного материала тщательно смешиваются. Кроме полимера основы — полиолефина, это могут быть антипирены — подавители горения, красители, пластификаторы, специальные добавки. Готовая смесь загружается в экструдер, где нагревается до температуры плавления. Расплав подается под давлением на фильеру, из которой выдавливается в виде трубки.

Готовая трубка сразу попадает в ванну с водой для охлаждения и фиксации новой формы. После охлаждения трубка проходит через узел очистки и наматывается на катушку.

После экструзии получается заготовка, которую можно применять как изолирующий кембрик. Но термоусадочной трубка станет только после сшивки. Полимеры в результате сшивки приобретают новое свойство

«памяти формы», которое и используется в производстве термоусадочных изделий. В производстве термоусадочных трубок чаще всего применяется радиационный метод сшивки полимеров, для чего используются специальные электронные ускорители.

Расширение или раздувка завершает превращение сшитых полимерных заготовок в полноценную термоусадочную трубку. Так как сырье, прошедшее радиационную модификацию, уже приобрело «память» первоначальной формы, теперь можно поперечно растянуть трубку в 2–3 раза до необходимого увеличенного диаметра. При нагреве поперечно расширенной трубки она «вспомнит» свое состояние до расширения и усядется до первоначального размера.

После того, как электроизоляционные трубки пройдут полный цикл производства, от экструзионного литья, до раздувки необходимо провести ряд физико–механических и электрических испытаний [8], [9], [11].

Результаты физико– механических испытаний приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты физико – механических свойств материала

Испытания	Требование согласно ТД	Фактические данные	Результаты испытаний
1	2	3	4
Коэффициент усадки не менее	не менее 3	3–5	Соответствует ТУ 27.33.13–008–01394461–2019
Впитывание влаги	не более 0,2%	0,01%	Соответствует ТУ 27.33.13–008–01394461–2019 ГОСТ 33847–2016
Прочность на разрыв 10 Н/мм ²	10 Н/мм ²	23,3 Н/мм ²	ТУ27.33.13–008–01394461– 2019 ГОСТ 29088–91

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4
Относительное удлинение при разрыве	100%	350%	ТУ27.33.13–008–01394461–2019 ГОСТ 29088–91

Испытания проводились при следующих атмосферных условиях:

- Температура окружающего воздуха, град. $25 \pm 20^{\circ}\text{C}$.
- Относительная влажность воздуха, % 30 ± 5 .
- Атмосферное давление, мм. рт. ст. 740 ± 5 .

Данные показатели соответствуют требованиям, предъявляемым к изоляционным материалам входящих в конструкцию кабельных муфт.

Далее нам необходимо определить электрическую прочность изоляционного материала. Данный показатель будем определять по ГОСТ 6433.3 [8].

В соответствии с ГОСТ 6433.3 п. 2.4 и п. 2.5 из трубки были вырезаны полоски шириной 30мм, которые были помещены между двумя электродами (Рисунок 5).

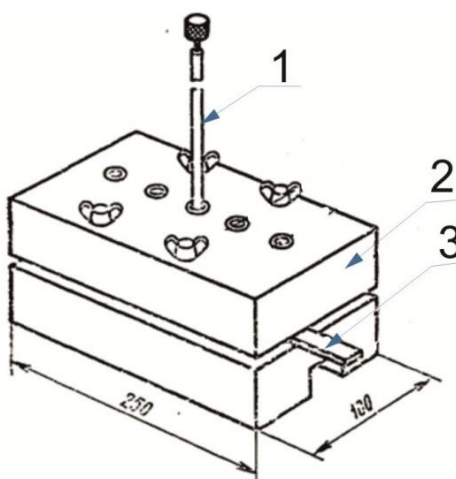


Рисунок 5 – Определение электрической прочности материала

На рисунке цифрой 1 обозначен электрод, цифрой 2 – изолятор, а цифрой 3 – испытуемый образец.

Напряжение поднималось с нуля кВ, в интервале времени 10–20 секунд. Скорость поднятия напряжения 3кВ/сек.

Образцы испытывались поочерёдно, до наступления электрического пробоя. Результаты испытаний приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты испытаний изоляционного материала на пробой повышенным напряжением.

Номер образца	Напряжение пробоя (Uпр) кВ	Время пробоя (t) сек.
1	63	20
2	60	18
3	61	19
4	63	20
5	62	19

Среднее арифметическое значение электрической прочности (кВ/мм) вычисляют по формуле:

$$E_{\text{пр}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{t_i} \quad (2)$$

где $E_{\text{пр}}$ – среднее арифметическое значение электрической прочности ,

n – количество измерений,

U_i – напряжение пробоя кВ,

t_i – средняя арифметическая толщина образца, мм.

Согласно формуле (2) произведем расчет:

$$U_i = 60 \text{ кВ},$$

$$n = 5,$$

$$t_i = 1,5\text{мм.}$$

Среднее арифметическое значение электрической прочности в нашем случае будет равна:

$$U_{np/n} = 40 \text{ кВ/мм.}$$

Электрическая прочность испытуемых образцов, в среднем, равна 40 кВ/мм, что удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к изоляционным материалам.

2.1.3 Гильзы и наконечники

В своих кабельных муфтах мы будем использовать наконечники и соединители марки ГСП и НСП из сплава Д16Т (Рисунок 6).



Рисунок 6 – Наконечник марки НСП и соединитель марки ГСП

Химический состав дюралюминия Д16Т регламентируется ГОСТом ГОСТ 21488–97 и расшифровывается следующим образом [4]:

- Д – дюралюминий;
- 16 – номер сплава в серии;
- Т – закаленный и естественно состаренный.

Наконечники и гильзы болтовые предназначены для оконцевания и соединения любого типа токопроводящих жил: круглых и секторных, моножильных и многожильных.

Используются для оконцевания и соединения токопроводящих жил сечением от 25 до 240 мм² на напряжение до 35 кВ. Крепление наконечника на жиле осуществляется методом завинчивания болтов с шестигранной головкой, которая срывается при достижении заданного усилия, обеспечивая оптимальные механические и электрические свойства контактного соединения [5], [17], [18]. Срок службы соединителей и наконечников – 30 лет.

Для определения надёжности нам необходимо провести испытания данных элементов кабельной муфты. В данном разделе будем руководствоваться требованиями ИЕС 61238–1–3:2018 «Соединители для силовых кабелей, закрепляемые опрессовкой и механическим способом. Часть 1–3. Методы испытания и требования к соединителям, закрепляемым опрессовкой и механическим способом, для силовых кабелей на номинальное напряжение от 1 кВ ($U_m = 1,2$ кВ) до 30 кВ ($U_m = 36$ кВ), испытываемых на неизолированных токопроводящих жилах» [21].

Ход проведения испытаний наконечников и соединителей:

- Всего было отобрано и пронумеровано 9 (девять) образцов кабельных гильз марки ГСП 70–120. (Инд. №1, №2, №3, №4, №5, №6, №7, №8, №9.)
- Размеры (L / d) – 83мм/26,5 мм. Класс – А1.
- Материал – Д16Т.
- Момент срыва головки болта – (32±2) Нм. Маркировка гильз ГСП 70–120, либо отсутствует.
- Размеры и маркировка соединительных гильз соответствуют чертежу и паспорту. Для испытаний смонтирован контур.
- Поперечное сечением проводника 120 мм².
- Длина эталонного проводника (участка жилы для сравнения) – 83мм. Материал проводника – алюминий.
- Класс в соответствии с ИЕС 60228 – твердый.
- Соединители смонтированы в соответствии с рекомендациями их

установки при монтаже кабельных муфт.

- Температура эталонного проводника и соединителей измеряется с помощью термопреобразователей сопротивления в точках, указанных в п. 6.2.3 ИЕС 61238–1– 3:2018.
- Испытания проводились при следующих атмосферных условиях: Температура окружающего воздуха, град. $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность воздуха, % 45 ± 5 ;
- Атмосферное давление, мм. рт. ст. 740 ± 5 .
- Средства испытаний и измерений (СИИ) приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Средства испытаний и измерений

Наименование и тип СИИ	Заводской номер
Трансформаторы тока ТШЛ–СВЭЛ–0,66	1779
ТРМ Овен	756398
Термопара ТНН–0199–К–Т3	32013
Вольтметр универсальный В7–91	117372
Вольтамперметр М2044	02658
Лабораторный автотрансформатор ПрофКиП 40М	32013
Металлическая линейка Энкор, 1000мм	76091
Штангенциркуль Микрон шц–2–500	1129
Таймер ОВЕН УТ24–Щ2.Р	26385
Счётчик импульсов ОВЕН СИ 8–Щ2.К.РС	44784
Комплект измерительный К506	145970
Разрывная машина РГМ–100–Г	68120
Нагрузочный трансформатор УБНТ	27845

Метод испытания состоит в воздействии на образцы циклами нагрева –

охлаждения с помощью нагрузки на контактные соединения током, достаточным для нагрева жилы до температуры $\leq 120^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 10 минут и охлаждением до температуры менее 35°C .

Ток и время нагрева–охлаждения определяются экспериментально с учетом условий испытаний в ходе первого и второго циклов.

Количество циклов – 1000.

После первых 200 циклов образцы 6 (шесть) раз испытываются током короткого замыкания.

После 250 циклов каждые 75 циклов проводится измерение сопротивления соединения методом вольтметр – амперметра.

Длительность цикла контролируется двухканальным таймером, количество контролируется счетчиком циклов.

Замеры температуры и определения сопротивления проводятся для эталонного проводника и каждого соединителя, результат документально фиксируется. Максимальные значения температуры эталонного проводника и каждого соединителя фиксируются непосредственно перед, или после, тепловых циклов.

Электрическое сопротивление соединителей и эталонного проводника определяется между двумя сопредельными точками измерения (точками выравнивания потенциалов) при протекании постоянного тока. Измерения проводятся методом амперметра–вольтметра. Сопротивление определяется отношением падения напряжения до величины постоянного тока, величина которого не превышает 10 % от тока теплового цикла. Измерение тока и падение напряжения осуществляются с погрешностью в пределах $\pm 0,2 \%$.

Всего за время испытаний проводилось 1000 тепловых циклов.

Замеры температур и определения сопротивлений контура выполнены для следующих циклов:

- 0 (перед тепловым циклом), только определение сопротивления; 200, перед коротким замыканием;
- 200, после короткого замыкания; 250;

- в дальнейшем через каждое 75 циклов (всего 14 замеров).

Технические показатели испытания:

- Коэффициент сопротивления – k ,
- Отношение коэффициента сопротивления – λ ,
- Изменение коэффициента сопротивления – D .

Таблица 16 – Результаты испытаний циклами нагрева и охлаждения

Цикл	Гильза №1		Гильза №2		Гильза №3		Гильза №4		Гильза №5		Гильза №6	
	Коэф. k	Отноше ние коэф.	Коэф.k	Отноше ние коэф.	Коэф. k	Отноше ние коэф.	Коэф. k	Отноше ние коэф. λ	Коэф.k	Отноше ние коэф.	Коэф.k	Отноше ние коэф.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
200	1,615	1,16	1,658	1,09	1,588	1,18	1,50	1,19	1,961	1,25	1,970	1,22
200	1,625	1,16	1,642	1,08	1,543	1,14	1,48	1,17	1,912	1,22	1,915	1,18
250	1,650	1,18	1,634	1,07	1,615	1,20	1,48	1,17	2,044	1,31	2,091	1,28
325	1,709	1,22	1,660	1,09	1,649	1,22	1,52	1,20	2,106	1,35	2,182	1,33
400	1,718	1,23	1,688	1,11	1,657	1,23	1,51	1,20	2,128	1,36	2,235	1,37
475	1,731	1,24	1,718	1,13	1,674	1,24	1,53	1,21	2,177	1,39	2,272	1,39
550	1,756	1,26	1,741	1,14	1,720	1,27	1,53	1,21	2,218	1,42	2,290	1,38

Продолжение таблицы 16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
625	1,775	1,27	1,773	1,17	1,734	1,28	1,59	1,25	2,23	1,43	2,295	1,40
700	1,807	1,29	1,789	1,18	1,769	1,31	1,60	1,26	2,23 0	1,42	2,313	1,40
775	1,816	1,30	1,800	1,18	1,778	1,32	1,60	1,27	2,23 5	1,43	2,320	1,40
850	1,849	1,32	1,816	1,19	1,790	1,33	1,59	1,26	2,24 8	1,44	2,323	1,41
925	1,860	1,33	1,826	1,20	1,807	1,34	1,64	1,30	2,26 2	1,44	2,330	1,40
1000	1,848	1,32	1,802	1,18	1,798	1,33	1,645	1,30	2,256	1,44	2,325	1,41
Изменение коэф. сопротивле ния	0,11	0,13	0,11	0,12	0,12	0,13						

Испытание током короткого замыкания:

Проводилось шесть операций короткого замыкания для каждой гильзы в контуре. Испытание на короткое замыкание проводилось короткими импульсами.

Уровень испытательного тока короткого замыкания равный такому, чтобы нагреть проводник от температуры ≤ 35 °C к температуре между 250 °C и 270 °C, рассчитанной согласно Приложению D IEC 61238–1–3:2018.

После каждого импульса короткого замыкания контур охлаждался до температуры ≤ 35 °C.

Технические показатели испытания (Таблица 17):

И.з.: 17200 А

Время влияния тока к.з.: 1,5с

Количество испытательных импульсов: 6 (шесть)

Температура жилы: 255°C – 262 °C

Таблица 17 – Показатели параметров испытания током короткого замыкания

Импульсы	1	2	3	4	5	6
Ток к.з., кА	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,
Время воздействия, с	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
θ жилы, °C	258	255	259	262	258	260

Технические показатели испытания (тепловой профиль) – в таблице 18:

$$I_n = 460 \text{ А};$$

$$t_1 = 36 \text{ мин.};$$

$$t_2 = 12 \text{ мин.};$$

$$I = I_r = 33 \text{ А.}$$

Таблица 18 – Технические показатели испытания

цикл	Проводник	Гильза №1	Гильза №2	Гильза №3	Гильза №4	Гильза №5	Гильза №6	В контуре
	$\theta_{\max}$	$\theta_{\max} (^{\circ}\text{C})$	$\theta_{\max} (^{\circ}\text{C})$	$\theta_{\max} (^{\circ}\text{C})$	$\theta_{\max}$	$\theta_{\max} (^{\circ}\text{C})$	$\theta_{\max} (^{\circ}\text{C})$	$\theta_k (^{\circ}\text{C})$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
200	120,0	109,0	111,0	114,0	100,0	115,0	107,0	22,6
200	120,0	110,0	110,0	118,0	100,0	117,0	110,0	22,8
250	120,0	105,0	110,0	119,0	101,0	118,0	108,0	21,8
325	120,0	106,0	111,0	118,0	100,0	117,0	110,0	22,0
400	120,0	108,0	111,0	119,0	100,0	119,0	108,0	22,5
475	120,0	109,0	113,0	118,0	100,0	115,0	106,0	22,5

Продолжение таблицы 18

1	2	3	4	5	6	7	8	9
550	120,0	111,0	113,0	117,0	100,0	114,0	108,0	21,8
625	120,0	110,0	114,0	119,0	102,0	114,0	109,0	22,0
700	120,0	111,0	114,0	115,0	100,0	112,0	109,0	21,9
775	120,0	109,0	115,0	115,0	101,0	114,0	112,0	23,2
850	120,0	105,0	115,0	117,0	100,0	116,0	110,0	23,1
925	120,0	111,0	117,0	117,0	102,0	119,0	110,0	22,6
1000	120,0	114,0	119,0	117,0	100,0	117,0	112,0	20,8
Макс. Знач.	120,0	114,0	119,0	119,0	102,0	119,0	112,0	23,2

Испытания на влияние статической нагрузки:

Образцы №7, №8, №9 смонтированы на алюминиевых твердых жилах поперечного сечения — 120 мм²

Класс – А1. Материал – Д16Т.

Момент срыва головки болта – (32±2)Нм.

Маркировка гильз ГСП 70–120.

Материал проводника – алюминий.

Класс в соответствии с IEC 60228 – твердый.

Болтовые гильзы монтируются в соответствии с рекомендациями их установки при монтаже кабельной муфты.

Контактное соединение испытывается на влияние статической нагрузки, которая состоит в приложении усилия из расчета 40 N на каждый мм² поперечного сечения проводника на протяжении 1 мин.

$$40 N \cdot 120 \text{ мм}^2 = 4800N.$$

Нагрузка не должна приводить к проскальзыванию жилы из гильзы более, чем на 3 мм.

Показатели параметров испытания приведены в таблице 19

Таблица 19 – Показатели испытания на влияние статической нагрузки

№ образца	Нагрузка отрезка жилы с гильзой, N	Длительность нагрузки, мин	Результат
7	4800	1	проскальзывания не обнаружено
8	4800	1	проскальзывания не обнаружено
9	4800	1	проскальзывания не обнаружено

Результаты испытаний на соответствие требованиям IEC 61238–1–3:2018 «Соединители для силовых кабелей, закрепляемые опрессовкой и механическим способом. Часть 1–3. Методы испытания и требования к соединителям, закрепляемым опрессовкой и механическим способом, для силовых кабелей на номинальное напряжение от 1 кВ ($U_m = 1,2$ кВ) до 30 кВ ($U_m = 36$ кВ), испытываемых на неизолированных токопроводящих жилах» приведены в сводной таблице 20.

Таблица 20 – Результаты испытаний на соответствие IEC 61238–1–3:2018

Номера пунктов IEC 61238–1– 3:2018	Показатель (параметр) объекта испытаний, в отношении, которого установлены требования.	Требования НД к объекту испытаний	Фактическое значение параметра по результатам испытаний
1	2	3	4
IEC 61238– 1–3:2018 Electrical tests p. 6.3	Температура жилы Температура среднего разъема Ток равновесия Время нагревания Выдержка Охлаждение	140° C ≥ 0 ≥ 120° C ≥ 120° C – min 15 мин min 10 мин	120° C 104° C 530A 15 мин 10мин 680с

Продолжение таблицы 20

1	2	3	4
IEC 61238–1–	Ток короткого замыкания	$\geq 25 \text{ кА}$	17,2 кА
3:2018 Short–circuit tests p.6.4	Температура жилы Время действия тока Количество циклов	250°C–270°C 0,9с<t<1,5с 6	255°C–262°C 1, 5с 6
IEC 61238–1–3:2018 p.6 Electrical tests p. 6.6 Requirements	Начальный разброс δ Средний разброс β Изменение фактора сопротивления D Соотношение коэффициента сопротивления Максимальная температура разъема $\theta_{\max}$	max 0,30 0,30 0,15 2,0 Не более θ жилы	0.033 0.035 0.0710 1.075 119,0°C
IEC 61238–1–3:2018 Mechanical test p. 7.3	Испытание на воздействие статической нагрузки из расчета 40 N на каждый мм 2 сечения. 40*120=4800 N	Проскальзывание жилы не должно быть более чем 3 мм на протяжении 1 минуты.	Все образцы гильз соответствуют требованию. При приложении усилия величиной в 4800 N на протяжении 1 минуты проскальзывания не обнаружено.

По завершению всех испытаний предусмотренных данным стандартом убеждаемся в том, что болтовые кабельные соединители марки ГСП 70–120 соответствуют требованиям IEC 61238–1–3:2018 [21]. Подобные испытания на наконечники проводить не будем, т.к. сплав и конструкция данных комплектующих идентична.

2.1.4 Экранирующие материалы

В качестве экранирующего элемента нашей муфты будем использовать полупроводящие трубки. Данный элемент применяется в кабеле, как по жиле, так и по изоляции – он позволяет получить плавное изменение напряженности электрического поля между изоляцией, где напряженность электрического поля не равна нулю, и проводником (металлический экран), где напряженность электрического поля равна нулю [10], [13], [18].

Удельное объемное электрическое сопротивление экранирующего материала, согласно техническим требованиям, должно быть 10^4 Ом×см. [18], [20]

Для изготовления экранирующих трубок мною был подобран материал СО–PLAS БПК ЭП 01 Краснодарской компании Евротек. Данный материал имеет лучшие показатели, которые подходят нам по всем параметрам. Характеристики СО–PLAS БПК ЭП 01 приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Характеристики электропроводящей полимерной композиции СО– PLAS БПК ЭП 01

Наименование показателя	Технические требования	Методы испытания
1	2	3
Прочность при разрыве	Не менее 8МПа	ГОСТ Р МЭК 60811–1–1
Удельное объёмное сопротивление при разрыве	10^4 Ом*см	ГОСТ 20212–74
Плотность	1,1 – 1,4	ГОСТ Р МЭК 60811–1–3
Твёрдость по Шору	90–100	ASTM D 2240

Продолжение таблицы 21

1	2	3
Содержание влаги	менее 0,1	ASTM D 2240
Показатель текучести расплава	1,5–2	

Показатели были предоставлены производителем. После всего производственного цикла (экструдирование, облучение, раздувка) проверяем удельное электрическое сопротивление по формуле (3):

$$\rho = \frac{0,2 \cdot \pi \cdot l \cdot R_p}{\ln(d_2/d_1)} \quad (3)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала,

l – длина электродов,

R_p – удельное электрическое сопротивление образца,

d_1 – диаметр по внутреннему электроду,

d_2 – диаметр по внешнему электроду.

Образец готового изделия в виде термоусаживаемой трубки с размерами 43/14 с толщиной стенки 2 мм усаживался на цилиндрический электрод. Замер параметров для вычисления объёмного электрического сопротивления проводился с помощью измерителя иммитанса.

Получились следующие результаты:

$$\rho = \frac{0,2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 30,6 \cdot 10^3}{0,07} = 1372 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см} \approx 1,3 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

Данный показатель соответствует техническим требованиям.

Лента проводящая, которой будет экранироваться соединительная гильза, имеет схожие показатели. Проверка осуществлялась по тому же алгоритму.

Материалы для экранирования, а также для заземления кабельной

муфты:

В качестве экрана в соединительной муфте будем применять сетку медную лужёную (Рисунок 7).



Рисунок 7 – Сетка, применяемая в качестве экрана

Сетка медная, лужёная выполнена в виде рукава. Диаметр проволок медной сетки не менее 0,05 мм. Данные показатели удовлетворяют нашим техническим требованиям.

Для заземления брони в соединительных муфтах будем применять гибкий медный лужёный провод соответствующий 3^{ему} классу по ГОСТ 22483–2021. Для данных целей нам отлично подойдёт провод марки ПМЛ (Рисунок 8).



Рисунок 8 – Провод, применяемый для соединения бронелент в соединительных муфтах.

Для крепления провода заземления применяются пружины постоянного

давления (ППД).

2.1.5 Вспомогательные материалы

Вспомогательные материалы, которые необходимы при монтаже кабельных муфт представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Вспомогательные материалы

Вспомогательный материал	Назначение
Лента ПВХ	Временная фиксация проволочного экрана.
Паста КПД	Увеличение электрической прочности муфты, путём нанесения между слоями изоляции.
Проволока медная	Бандажирование проволочного экрана на жиле.
Герметик влагостойкий	Герметизация кабельной муфты.

2.2 Разработка конструкции и технология монтажа кабельных муфт для кабеля из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 35 кВ

Перед тем, как приступить к разработке конструкции кабельных муфт для трёхжильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена была смонтирована и испытана пробная сборка, отвечающая требованиям рассматриваемых в главе 1. Результаты испытаний представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Результаты испытаний экспериментальной сборки на кабеле АПВП 1×95–35.

Виды испытаний, проверок	Технические требования	Методы испытаний	Нормированное значение и допуск показателя по НД	Полученные результаты
1	2	3	4	5
1. Испытание переменным напряжением 90 кВ частоты 50 Гц в течение 4 часов	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.1	ГОСТ 2990–78	Отсутствие пробоя и перекрытий	Пробой и перекрытия отсутствуют
2. Измерение уровня частичных разрядов при переменном напряжении 35 кВ частотой 50 Гц, пКл, не более	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.2	ГОСТ 28114–89	10	< 2
3. Испытание 60 Циклами нагрева при одновременном воздействии переменного напряжения 50 кВ частоты 50 Гц	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.3	СТО 00081866–001–2009, п. 7.4.6	отсутствие пробоя и перекрытий	пробой и перекрытия отсутствуют

Продолжение таблицы 23

1	2	3	4	5
4. Измерение уровня частичных разрядов при переменном напряжении 35 кВ частотой 50 Гц, пКл, не более	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.4	ГОСТ 28114–89	10	< 2
5. Испытание импульсным напряжением 190 кВ (10 импульсов каждой полярности) при температуре на жиле кабеля 90 °С	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.5	СТО 00081866–001–2009, п. 7.4.	Отсутствие пробоя и перекрытий	Пробой и перекрытия отсутствуют

Судя по результатам испытаний из таблицы 23, можно сделать выводы о том, что экспериментальная кабельная система показала достаточно хороший результат. В дальнейшем, для проведения полного цикла испытаний потребуется перенести данную конструкцию на трёхжильный бронированный кабель из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 35 кВ.

2.2.1 Соединительные муфты для трёхжильного кабеля

Для проведения испытаний, с последующей аттестацией кабельных муфт в ПАО «Россети» нам потребуется смонтировать кабельную систему (концевая муфта внутренней установки – соединительная муфта – концевая муфта наружной установки) на трёхжильном кабеле сечением 120 мм².

Марка кабеля АПвБВнг(А)–LS3×120мк/70–35 производства завода «Севкабель».

При разработке конструкции кабельной муфты необходимо учитывать габариты (длину) кабельной муфты, длину разделки кабеля и толщину восстановленной изоляции по соединительной гильзе. Как указано выше изолирование контактных соединений будет происходить набором термоусаживаемых трубок различного диаметра и толщин стенок. Набор термоусаживаемых трубок приведён в таблице 24.

Таблица 24 – Термоусаживаемые трубки для изолирования контактного соединения

Размеры изоляционных трубок	Сечение жилы кабеля				
	ед. изм	25–50	70–120	150–240	300
Трубка изолирующая №3 со сплошным клеевым слоем 60/15×4, длина 520 мм (белая)	шт.	3	3	–	–
75/20×4, длина 560 мм (белая)	шт.	–	–	3	3
Трубка изолирующая №4 без клеевого подслоя 75/21×7, длина 520 мм	шт.	3	3	–	–
90/21×7, длина 560 мм	шт.	–	–	3	3
Трубка изолирующая №5 без клеевого подслоя 130/28×10, длина 560 мм	шт.	–	–	3	3
Трубка изолирующая №6 с экранирующим слоем 90/25, длина 560 мм	шт.	3	3	3	–
120/25, длина 580 мм	шт.	–	–	–	3

При изоляции контактного соединения, для того что бы набрать необходимую толщину изоляции (12 мм), возможно применять одну, либо две термоусаживаемые трубки с большей толщиной стенки.

Данный подход я посчитал неверным, так как прогрев данных трубок (для равномерной усадки и исключения воздушных включений) практически невозможен. Особенно это актуально в районах вечной мерзлоты, где отрицательная температура достигает максимального значения.

В конструкции наших муфт будут применяться набор изолирующих трубок, которые одеваются на кабель по принципу «матрёшки» (Рисунок 9). Усадка данных трубок будет происходить поочерёдно.

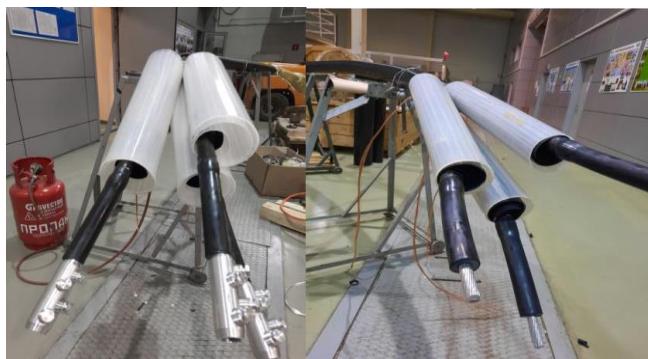


Рисунок 9 – Расположение изолирующих трубок на кабельных жилах

Длина разделки жил кабеля определяется исходя из длин изолирующих трубок (трубка должна перекрывать весь участок кабеля между срезами экранов) и допустимым расстоянием от края соединительной гильзы до среза экранирующего слоя (Рисунок 10, таблица 25).

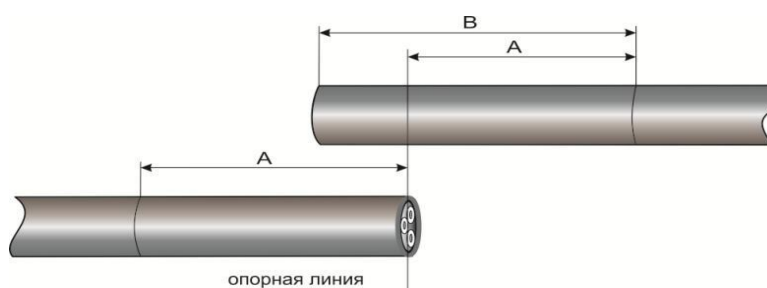


Рисунок 10 – Разделка кабеля

Таблица 25- Длины разделки кабеля в зависимости от сечения

Сечение жил кабеля, мм ²	50–120	150–300
А, мм	870	945
В, мм	1200	1300

Оболочка кабеля и межфазный заполнитель удаляется до среза оболочки. При дальнейшей разделке кабеля придерживаемся размеров указанных на рисунке 11 и в таблице 26.

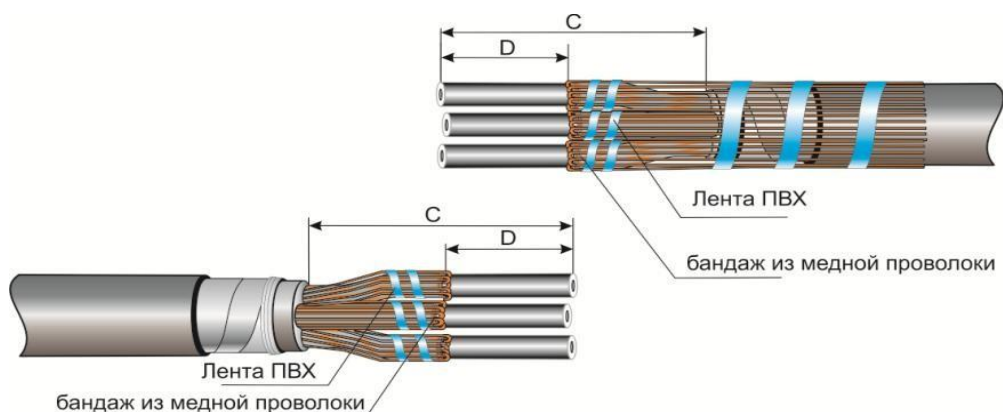


Рисунок 11 – Схема разделки трёхжильного кабеля

Таблица 26 – Точные размеры разделки трёхжильного кабеля в зависимости от сечения

Сечение жил кабеля, мм ²	50–120	150–300
C, мм	810	885
D, мм	260	285

Для снятия экранирующего слоя необходимо применять роликовый нож. Края среза экрана должны получиться ровными, без задиров (Рисунок 12).

Угол, образовавшийся в месте среза экрана между жилой изоляцией и экранирующим слоем необходимо сгладить с помощью наждачной бумаги.



Рисунок 12 – Образец некачественного снятия экранирующего слоя

Первым этапом монтажа узла выравнивания напряжённости электрического поля будет намотка на место среза экрана мастичной ленты, имеющую повышенную диэлектрическую проницаемость. Данная лента при воздействии пламени газовой горелки расплавляясь исключает возможность образования воздушных включений, которые провоцируют появление частичных разрядов (Рисунок 13).

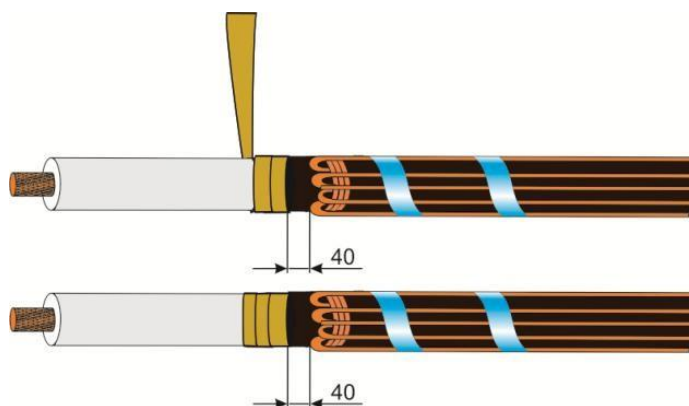


Рисунок 13 – Нанесение мастичной ленты на срез экрана

Данная лента имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon=15$.

Для повышения электрической прочности и исключения «гофрирования» трубок во время усадки между изоляционными слоями наносим диэлектрическую кремнийорганическую пасту.

Следующим этапом монтажа узла выравнивания напряжённости электрического поля усаживаем трубку стресс-контроль с более высокой диэлектрической проницаемостью. ϵ регулирующей трубки равен 36. Для расплавления мастичной ленты, усадку трубки производим от места нанесения ленты (Рисунок 14).

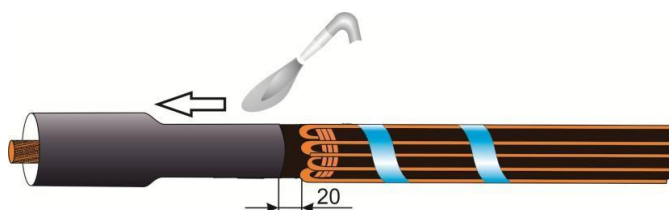


Рисунок 14 – Монтаж трубки стресс контроль

Перед соединением жил кабеля необходимо расположить набор изолирующих манжет на жилах кабеля (Рисунок 15).



Рисунок 15 – Набор изолирующих манжет

Трубка №6 – двухслойная:

- слой №1 – изоляционный;
- слой №2 – экранирующий.

Для соединения жил применяется болтовой соединитель из сплава Д16Т. Данное соединение относится к механическому типу. Соединение жил кабеля происходит с помощью затягивания болтов, у которых срывается головка при определённом усилии (Рисунок 16).

После срыва болтов не должно оставаться выступающих частей над поверхностью гильзы, для этого болт имеет два места срыва. Место срыва зависит от сечения кабеля.



Рисунок 16 – Соединение жил кабеля болтовыми соединителями марки ГСП

В месте соединения жил, по гильзе, наблюдается максимальная напряжённость электрического поля. Это связано с не идеально гладкой поверхностью гильзы, вследствие чего электрическое поле неоднородно. Для придания электрическому полю однородности будем применять экранирующие материалы с объёмным электрическим сопротивлением $1,3 \times 10^4 \text{ Ом} \times \text{см}$ (Рисунок 17).



Рисунок 17– Экранирующие материалы в виде полупроводящей ленты и полупроводящей трубки с объёмным электрическим сопротивлением $1,3 \times 10^4 \text{ Ом} \times \text{см}$.

Экранирующая трубка переносит потенциально опасную напряжённость электрического поля на свои края. Для распределения напряжённости в этих местах применяется мастичная лента с $\epsilon = 15$ и трубка стресс контроль с $\epsilon = 36$. На рисунке 18 и рисунке 19 показано как наносится мастичная лента и усаживается трубка стресс контроль.

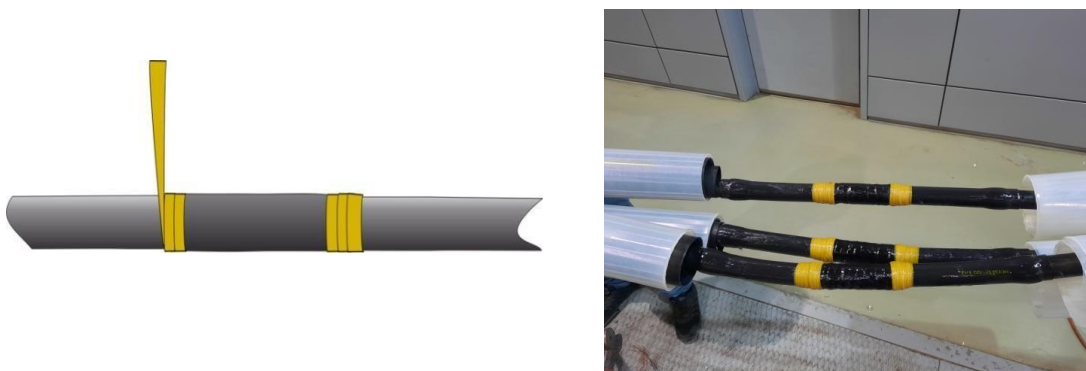


Рисунок 18 – Применение мастичной ленты для выравнивания электрического поля на краях экранирующей гильзы трубки

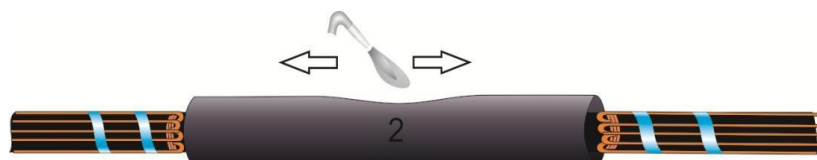


Рисунок 19 – Применение трубки стресс контроль на экранирующую по гильзе манжету

Данный узел показал отличные результаты при испытаниях экспериментальной муфты на одножильном кабеле АПВП 1×95–35 кВ.

Для изолирования контактного соединения поочерёдно усаживаем набор термоусаживаемых трубок. Для исключения образования разностенности изоляционных трубок (разные толщины изоляции по окружности) необходимо следить за равномерностью прогрева. Между каждым изоляционным слоем применяется кремнийорганическая смазка (КПД), которая повышает электрическую прочность муфты.

Для экранирования муфты применяется электропроводящий слой на последней электроизоляционной трубке и медная лужёная сетка, в соответствии с техническими требованиями. Данная сетка имеет форму рукава, надевается на жилы кабеля перед соединением жил и распределяется по экранирующему слою двухслойной термоусаживаемой трубки (Рисунок 20).

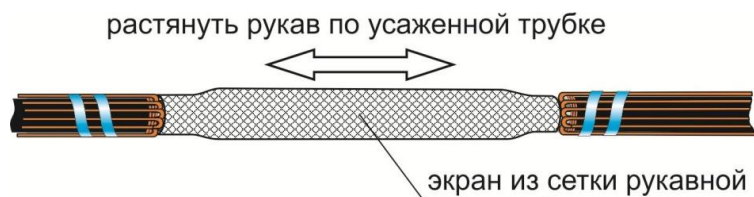


Рисунок 20 – Восстановление экрана по жиле кабеля

Соединение медного проволочного экрана осуществляется с помощью пружины постоянного давления.

Соединение брони выполняется плоским, медным, лужёным проводом. Сечение данного проводника зависит от сечения токопроводящих жил (Таблица 27).

Таблица 27 – Сечение заземляющего проводника в зависимости от сечения жил кабеля

Сечение жил кабеля	50	70–120	150–240
Сечение провода заземления	16	16	25

Для герметизации кабельной муфты используется термоусаживаемый кожух состоящий из двух частей, который усаживаются в нахлест (Рисунок 21). Данный кожух имеет внутренний клеевой слой, который надёжно герметизирует муфту. Механическая прочность нашего кожуха ничем не отличается от прочности самого кабеля.

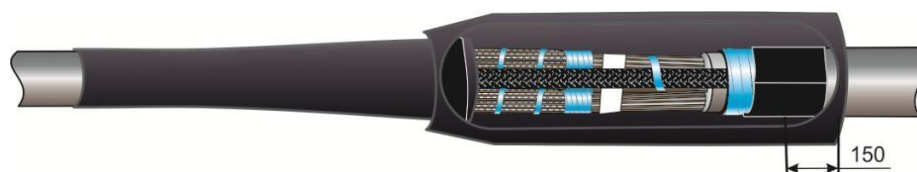


Рисунок 21 – Монтаж термоусаживаемого защитного кожуха

Данная кабельная муфта будет смонтирована на трёхжильном отрезке кабеля с последующим испытанием.

2.2.2 Концевые муфты для трёхжильного кабеля

В данном разделе мы рассмотрим конструкцию концевых кабельных муфт наружной и внутренней установки на отрезке трёхжильного кабеля из сшитого полиэтилена АПвБВнг(А)–LS3×120мк/70–35. Конструкция концевых муфт довольно проста. Она будет состоять из узла выравнивания напряжённости электрического поля, аналогичному соединительной муфте, трекинго– эрозионностойких трубок и наконечников из сплава Д16Т.

Длину жил концевых муфт внутренней (Таблица 28) и наружной (Таблица 29) определим с помощью ГОСТ 9920–89 [6].

Таблица 28 – Длина пути утечки концевых муфт внутренней установки ГОСТ 9920–89

Номинальное напряжение сети, кВ	Наибольшее рабочее напряжение сети, кВ	Длина пути утечки изоляции, см, не менее
3	3,6	2,25 см/кВ
6	7,2	
10	12,0	
20	24,0	
35	40,5	

Таблица 29 – Длина пути утечки концевых муфт наружной установки ГОСТ 9920– 89

Номинальное напряжение сети, кВ	Наибольшее рабочее напряжение сети, кВ	Длина пути утечки внешней изоляции, см, не менее
3	3,6	9
6	7,2	18
10	12,0	30
20	24,0	62
35	40,5	105

Для концевых муфт внутренней и наружной установки, для облегчения монтажа, возьмём равную длину разделки жил кабеля (Рисунок 22). Для увеличения длины пути утечки тока на концевых муфтах наружной установки будут применяться фазные юбки–изоляторы, которые гарантированно создают под собой сухую зону и увеличивают длину пути утечки тока.

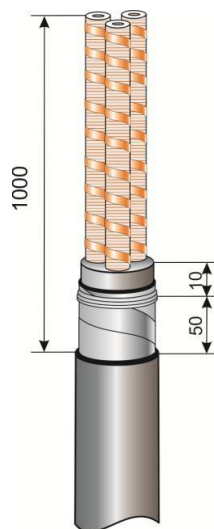


Рисунок 22 – Разделка жил кабеля для концевой муфты

Узел выравнивания напряжённости электрического поля выполним с

помощью мастичной ленты и трубки стресс контроль. Для увеличения электрической прочности между наконечником и срезом экранирующего слоя необходимо применить диэлектрическую пасту КПД (Рисунок 23).

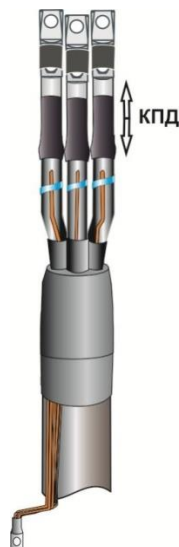


Рисунок 23 – Нанесение диэлектрической пасты КПД на жилы кабеля

Изолирование жил кабеля произведём с помощью заранее изготовленных трекингостойких трубок красного цвета. Для концевых муфт наружной установки предусмотрены фазные изоляторы, в количестве пяти штук на жилу кабеля (Рисунок 24).

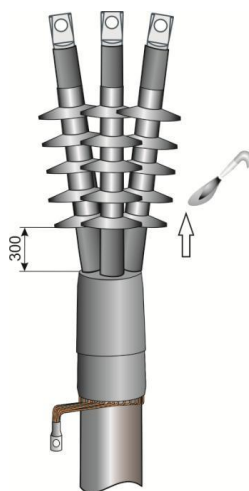


Рисунок 24 – Монтаж трекингостойких изоляционных трубок и фазных изоляторов на жилы кабеля

Выводы по разделу 2.

В данном разделе дипломной работы я произвел подбор, а также испытание материала для изготовления кабельных муфт для кабелей из СПЭ на номинальное напряжение 35 кВ. Как показали испытания – качество материала поступающего из КНР нестабильно. Для исключения попадания в производство сырья ненадлежащего качества необходимо ввести «входной контроль» материала поступающего на склад АО «МЗЭИ».

Также мной были разработаны и смонтированы, в соответствии с техническими требованиями и со всей нормативно–технической документацией данные кабельные муфты.

В работе я отразил разработку кабельных муфт для трёхжильного бронированного кабеля, так как, считаю то, что данный тип муфты наиболее сложный.

3 Программа и методика испытаний кабельных муфт

3.1 Программа испытаний

Испытания кабельных муфт на номинальное напряжение 35 кВ будет проводиться в соответствии с СТО 56947007–29.240.65.205–2015 Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» [20]. Программа испытаний приведена ниже (Таблица 30).

Таблица 30 – Программа испытаний кабельных муфт

Наименование параметра	Требование по НД (СТО, ГОСТ)
1	2
Испытание напряжением переменного тока номинальной частотой 50 Гц в течение 4 часов, кВ	90
Измерение уровня частичных разрядов разрядов, при напряжении $1,73U_0$ (кВ), пКл. не более	10
Проведение циклов нагрева при температуре на жиле 90 °С и напряжении $2,5 U_0$, кВ. — для концевых муфт – 60 циклов на воздухе; для соединительных муфт – 30 циклов на воздухе и 30 циклов в воде	50
	Отсутствие пробоя
Измерение уровня частичных разрядов при напряжении $1,73U_0$ (кВ) пКл, не более.	10
Испытание импульсным напряжением по 10 импульсов каждой полярности при $T = 90$ °С.	190 кВ
	Отсутствие пробоя
Испытание напряжением переменного тока в течение 4 часов.	90 кВ Отсутствие пробоя

Продолжение таблицы 30

1	2
Термическая стойкость при коротком замыкании.	Отсутствие механических и термических повреждений после воздействия тока КЗ при $T_{ж} — 250\text{ }^{\circ}\text{C}$
Выдерживаемое концевыми муфтами наружной установки переменное напряжение номинальной частоты под дождём в течении 1 минуты, кВ.	90 кВ Отсутствие пробоя и перекрытия
Требования по трекинговой стойкости для концевых муфт наружной установки методом увлажнения раствором CaCl_2 в течении 500 ч.	26 кВ
Муфты должны быть стойкими к температуре окружающего воздуха (испытание должно включать испытание переменным напряжением $4U_0$ номинальной частоты 50 Гц).	+50
Муфты должны быть стойкими к температуре окружающего воздуха (испытание должно включать испытание переменным напряжением $4U_0$ номинальной частоты 50 Гц).	–60
Муфты должны быть стойкими к воздействию окружающей среды с относительной влажностью, %.	95 – 98 при температуре до $35\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.2 Методика испытаний

Испытания проводят на муфтах, смонтированных в соответствии с технической документацией, утвержденной в установленном порядке, на

отрезках кабеля длиной не менее 3 м [18], [20].

П. 1 Таблица 30 – Испытание напряжением переменного тока номинальной частотой 50 Гц в течение 4 часов, кВ:

Испытание муфт переменным напряжением частотой 50 Гц проводят по ГОСТ 2990. Испытание муфт для трехжильных кабелей проводят по трехфазной схеме, допускается проводить испытания по однофазной схеме; испытание муфт для одножильных кабелей – по однофазной схеме.

П. 2 Таблица 30 – Измерение уровня частичных разрядов, при напряжении $1,73U_0$ (кВ), пКл.:

Измерение частичных разрядов проводят по ГОСТ 28114. Измерение проводят в нормальных климатических условиях на строительных или коротких длинах кабеля.

Напряжение, нормы частичных разрядов и чувствительность (если она указана) должны быть установлены в соответствии с требованиями стандартов или технических условий на кабели.

Испытательное напряжение прикладывают между токопроводящей жилой и экраном.

Напряжение предварительно должно повышаться до значения, превышающего на $0,25 U_0$ напряжение, при котором производится измерение частичного разряда. Время выдержки при этом значении напряжения не более 1 мин.

Если стандарт на конкретный тип кабеля требует, чтобы измерения частичных разрядов проводились при $1,75 U_0$, то напряжение плавно уменьшают и измерение частичных разрядов осуществляют при напряжении, установленном для измерения в стандарте на конкретный тип кабеля.

П. 3 Таблица 30 – Проведение циклов нагрева при температуре на жиле $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и напряжении $2,5 U_0$, кВ.

- для концевых муфт – 60 циклов на воздухе
- для соединительных муфт – 30 циклов на воздухе и 30 циклов в воде.

Испытание муфт циклами нагрева проводят: для трехжильных кабелей

– по трехфазной схеме, для одножильных кабелей и трехжильных кабелей с отдельно экранированными жилами – по однофазной схеме.

Длительность цикла нагрева определяют суммарным временем нагрева температуре не менее 4 ч.

Режим нагрева и охлаждения (длительность цикла, ток нагрева) определяют в зависимости от температуры окружающей среды экспериментально на контрольной муфте. Температуру контролируют термодатчиками и приборами класса точности не ниже 0,5, установленными на жилах кабеля на расстоянии $0,5 \pm 0,1$ м от контрольной муфты. Контрольную муфту монтируют на кабеле с жилами того же сечения и длины, что и испытываемые муфты.

Перерыв испытания в течение цикла не допускается, за исключением времени, необходимого для выполнения оперативных переключений (включение, отключение нагрева и т.д.).

П. 4 Таблица 30 – Измерение уровня частичных разрядов, при напряжении $1,73U_0$ (кВ), пКл.:

Методика испытаний по данному пункту аналогична П.2 Таблица 30.

П. 5 Таблица 30 – Испытание импульсным напряжением по 10 импульсов каждой полярности при $T_{ж} — 90\text{ }^{\circ}\text{C}$:

Испытания проводят при температуре окружающей среды от 5 до 35°C и относительной влажности воздуха не более 80%. Время пребывания испытываемого кабельного изделия в вышеуказанных условиях до начала испытания должно быть не менее 1 ч.

Испытуемое кабельное изделие следует подвергнуть действию нормальных полных 10 импульсов положительной полярности и 10 импульсов отрицательной полярности, а затем испытанию переменным напряжением. Промежуток времени между импульсами одинаковой полярности не должен превышать 120 с.

Амплитуду импульса и значение испытательного напряжения, а также условия проведения испытания устанавливают в НТД на кабельные изделия.

Испытание проводится полным импульсом, полный импульс должен иметь следующие параметры:

- длительность фронта . . . (1,2±0,36) мкс
- длительность спада . . . (50±10) мкс
- допуск на амплитуду импульса . . . ±3%
- обозначение импульса . . . 1,2/50

П. 6 Таблица 30 – Испытание напряжением переменного тока в течение 4 часов: Методика испытаний по данному пункту аналогична П.1 Таблица 30.

П. 7 Таблица 30 – Термическая стойкость при коротком замыкании:
Испытание муфт на стойкость к воздействию термических токов короткого замыкания проводят пропуском через муфты следующих токов:
а) тока, действующее значение периодической составляющей которого за время протекания должно быть не менее тока термической стойкости, указанного в таблице 31.

Таблица 31 – Допустимые токи термической стойкости I_t односекундного короткого замыкания для муфт кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

Номинальное сечение жил кабеля, мм ²	Допустимый ток односекундного короткого замыкания, кА	
	медные жилы	алюминиевые жилы
50	7,15	4,7
70	10,0	6,6
95	13,6	8,9
120	17,2	11,3
150	21,5	14,2
185	26,5	17,5
240	34,3	22,7
300	42,9	28,2
400	57,2	37,6
500	71,5	47,0
630	90,1	59,2
800	114,4	75,2

Число испытаний – три. Время протекания тока – 1–4 с. Интервал времени между испытаниями определяется временем охлаждения жил кабеля до начальной (длительно допустимой) температуры нагрева.

Разница значений токов в отдельных фазах при испытаниях не должна превышать $\pm 7\%$.

Температура нагрева и охлаждения жил кабеля при воздействии токов термической стойкости контролируется термопарами класса точности не ниже 0,5, установленными на токоведущих жилах кабеля контрольной муфты на расстоянии не менее 0,5 м от муфты. Контрольная муфта должна быть смонтирована на кабеле с жилами того же сечения и длины, что и испытываемые муфты.

Схема испытания: один конец кабельной линии должен быть подсоединен к испытательной установке, другой – замкнут накоротко.

После воздействия токов короткого замыкания муфты подвергаются внешнему осмотру. Если нет повреждений (трещин, деформации, течи заливочного состава), муфты испытывают переменным напряжением частоты 50 Гц 90 кВ.

П. 8 Таблица 30 – Выдерживаемое концевыми муфтами наружной установки переменное напряжение номинальной частоты под дождем в течение 1 минуты, 90 кВ:

После испытания переменным напряжением промышленной частоты по п. 1 на образце № 2 проводится испытание переменным напряжением промышленной частоты под дождем в течение 1 минуты при температуре окружающей среды.

Величина испытательного напряжения составляет $4 U_0$. Перед приложением напряжения испытываемый образец, установленный в рабочее положение, выдерживается не менее 15 мин под падающим на него равномерным дождем капельной структуры (под углом 45° к горизонтали). Испытательное напряжение прикладывается пофазно между одной из жил и заземленными остальными жилами и металлическим экраном. Муфты

считаются выдержавшими испытание, если в процессе испытания не произошел пробой изоляции или перекрытие.

П. 9 Таблица 30 – Требования по трекинговости для концевых муфт наружной установки методом увлажнения раствором CaCl_2 в течении 500 ч.:

Испытание должно проводиться на образце кабеля с двумя концевыми муфтами наружной установки (расстояние между муфтами не менее 2 м).

Испытуемая концевая муфта должна располагаться в испытательной камере с соляным туманом при температуре окружающей среды.

Испытуемый образец должен быть подвергнут воздействию соляного тумана при приложении переменного напряжения промышленной частоты величиной $1,25U_0$ (12,5 кВ) в течение 1000 ч.

Расход распыляемой воды с проводимостью 1600 мСм/м должен составлять $(0,4 \pm 0,1)$ л/ч/м³. Испытание напряжением должно проводиться по трехфазной схеме.

П. 10 Таблица 30 – Муфты должны быть стойкими к воздействию температуры окружающей среды $+50^\circ\text{C}$ (испытание должно включать испытание переменным напряжением $4U_0$ номинальной частоты 50 Гц):

Образцы помещают в климатическую камеру, после чего в камере устанавливают температуру плюс $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ и выдерживают при установившемся режиме не менее 4 ч.

После извлечения образцов из камеры их выдерживают в нормальных климатических условиях в течение не менее 1 ч, после чего муфты должны выдержать испытание переменным напряжением 80 кВ в течение 15 мин.

На поверхности образцов не должно быть разрывов и трещин, видимых при внешнем осмотре.

П. 11 Таблица 30 – Муфты должны быть стойкими к воздействию температуры окружающей среды -60°C (испытание должно включать испытание переменным напряжением $4U_0$ номинальной частоты 50 Гц):

Образцы помещают в климатическую камеру, после чего в камере

устанавливают температуру минус $(60\pm 2)^{\circ}\text{C}$ и выдерживают при установившемся режиме не менее 4 ч.

После извлечения образцов из камеры их выдерживают в нормальных климатических условиях в течение не менее 1 ч, после чего муфты должны выдержать испытание переменным напряжением 80 кВ в течение 15 мин.

На поверхности образцов не должно быть разрывов и трещин, видимых при внешнем осмотре.

П. 12 Таблица 30 – Муфты должны быть стойкими к воздействию окружающей среды с относительной влажностью 95–98% при температуре 35°C : Образцы помещают в камеру влажности и устанавливают режим влажности $(98\pm 2)\%$, температуру $(35\pm 2)^{\circ}\text{C}$ и выдерживают при установившемся режиме не менее 48 ч. После извлечения образцов из камеры их выдерживают в нормальных климатических условиях в течение не менее 1 ч, после муфты должны выдержать испытание переменным напряжением 80 кВ в течение 15 мин.

Вывод по разделу 3.

Программа испытаний СТО 56947007–29.240.65.205–2015 предусматривает испытание кабельных муфт в составе кабельной системы во всех режимах, включая: режим повышенного напряжения, импульсное (грозовое) перенапряжение, режим работы в неблагоприятных условиях для концевых муфт наружной установки (трекингостойкость), нагрев кабельной системы при токах короткого замыкания, циклические (ресурсные) испытания нагревом и охлаждением ускоренно воспроизводят весь срок службы муфты (30 лет). Все испытания проводятся последовательно и непрерывно. Если на каком-то этапе испытаний муфты выходят из строя, то все предыдущие аннулируются.

4 Проведение испытаний кабельных муфт

Согласно СТО 56947007–29.240.65.205–2015 при проведении испытаний для концевых и соединительных муфт типопредставитель выбирают из сечений: 120, 150 или 185 мм². Положительные результаты всех типовых испытаний для концевых и соединительных муфт, могут быть распространены на муфты, предназначенные для диапазона сечений жил 95–300 мм² [18], [20].

Если требуется расширение диапазона соответствия для одного типа арматуры на большие и/или меньшие сечения жил, отличающиеся от приведенных в приложении 95–300 мм², то должны быть проведены успешные дополнительные испытания по таблице 32.

Таблица 32 – Перечень дополнительных испытаний для расширения на большие и/или меньшие сечения

Виды испытаний, проверок	Требования	Результаты испытаний
1	2	3
.1 Переменным напряжением в течение 5 мин, кВ	4,5 U ₀	Отсутствие пробоя и перекрытия изоляции
Напряжением постоянного тока в течение 15 мин, кВ	4,0 U ₀	
2 Проверка уровня частичных разрядов (для муфт кабелей с пластмассовой изоляцией) при напряжении, кВ	1,73 U ₀	≤ 10 пКл
3 Импульсным напряжением	10 импульсов каждой полярности (положительной/ отрицательной) и температуре на жиле кабеля T _ж +(5 ÷ 10), °C	Отсутствие пробоя и перекрытия изоляции
4 Циклы нагрева на воздухе	10 циклов нагрева при напряжении 2,5 U ₀ и температуре T _ж +(5 ÷ 10)	Отсутствие пробоя и перекрытия

Продолжение таблицы 32

1	2	3
5 Внешний осмотр	Только для информации о подтверждении наличия(отсутствия) следов влаги, трекинга, коррозии и эрозии.	Обязательный

Кабельная система, состоящая из отрезка кабеля силового марки АПвБВнг(А)–LS 3×120мк/70–35 длиной 10 м с смонтированными на нем соединительной и концевыми муфтами марок: ЗПСТб 35(70–120)М (1шт.), ЗПКВТпб 35 (70–120)М (1шт.), ЗПКНТпб 35 (70–120)М (1 шт.) представлена на рисунке 25. Результаты испытаний представлены в таблице 33.



Рисунок 25 – Подключение концевых муфт к измерителю частичных разрядов DDX 8003

Вывод по разделу 4.

Испытания кабельных муфт на соответствие требованиям СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2 (п.п. 4.1,4.2, 4.3,4.4, 4.5, 4.6, 5, 7, 8, 9, 10) завершены успешно. Концевая муфта внутренней установки, концевая муфта наружной установки и соединительная муфта в составе кабельной системы успешно прошли весь цикл испытаний.

Таблица 33 – Результаты испытаний кабельных муфт на номинальное напряжение 35 кВ

Виды проверок и испытаний. Наименование контролируемого показателя, единица измерения	НД и номер пункта		Количество образцов, единица измерения	Значение параметра (характеристики)		Указание на соответст- вие/несоот- ветствие
	технических требований	методов испытаний		Нормированное значение и допуск показателя по НД	Фактическое значение	
1	2	3	4	5	6	7
1 Испытание переменным напряжением 90 кВ частоты 50 Гц в течение 4 часов	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.1	ГОСТ 2990–78	3	Отсутствие пробоя и перекрытий	Пробой и перекрытия отсутствуют	Соотв.
2 Измерение уровня частичных разрядов при переменном напряжении 35 кВ частотой 50 Гц, пКл, не более	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.2	ГОСТ 28114–89	3	10	< 2	Соотв.
3 Испытание циклами нагрева при одновременном воздействии переменного напряжения 50 кВ частоты 50 Гц Соединительная муфта: 30 циклов на воздухе, 30 циклов в воде. Концевые муфты: 60 циклов на воздухе. Цикл – нагрев до температуры жилы кабеля (95–100) °С, выдержка в течение 2 ч с последующим охлаждением до т–ры окр. среды и выдержкой в течение 3 ч, общая продолжительность цикла – 8 ч	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.3	СТО 00081866–001–2009, п. 7.4.6	3	отсутствие пробоя и перекрытий	пробой и перекрытия отсутствуют	Соотв.

Продолжение таблицы 33

1	2	3	4	5	6	7
4 Измерение уровня частичных разрядов при переменном напряжении 35 кВ частотой 50 Гц, пКл, не более	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.4	ГОСТ 28114–89	3	10	< 2	Соотв.
5 Испытание импульсным напряжением 190 кВ (10 импульсов каждой полярности) при температуре на жиле кабеля 90 °С	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.5	СТО 00081866–001–2009, п. 7.4.5	3	Отсутствие пробоя и перекрытий	Пробой и перекрытия отсутствуют	Соотв.
6 Испытание переменным напряжением 90 кВ частоты 50 Гц в течение 4 часов	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 4.6	ГОСТ 2990–78	3	Отсутствие пробоя и перекрытий	Пробой и перекрытия отсутствуют	Соотв.
7 Испытание переменным напряжением 90 кВ частотой 50 Гц под дождем в течение 1 мин	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 7	ГОСТ 20.57.406 (метод 218)	3	Отсутствие пробоя и перекрытий	Пробой и перекрытия отсутствуют	Соотв.
8 Стойкость к воздействию сквозных токов короткого замыкания, 3 воздействия, Тж = 250 °С	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 5	СТО 00081866–001–2009, п. 7.4.8	3	Отсутствие механических и термических повреждений	Механические и термические повреждения отсутствуют	Соотв.
9 Проверка стойкости к воздействию повышенной температуры окружающей среды (50±2)°С в течение 4 часов – испытание переменным напряжением 80 кВ частоты 50 Гц в течение 15 мин	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 9	ГОСТ 16962.1–89 (метод 201) ГОСТ 2990–78	3	Отсутствие на поверхности образца разрывов и трещин. Отсутствие пробоя и перекрытий	Разрывы и трещины на поверхности образца отсутствуют. Пробой и перекрытия отсутствуют	Соотв. Соотв.

Продолжение таблицы 33

1	2	3	4	5	6	7
10 Проверка стойкости к воздействию пониженной температуры окружающей среды (60 ± 2)°С в течение 4 часов – испытание переменным напряжением 80 кВ частоты 50 Гц в течение 15 мин	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 10	ГОСТ 16962.1–89 (метод 203) ГОСТ 2990–78	3	Отсутствие на поверхности образца разрывов и трещин Отсутствие пробоя и перекрытий	Разрывы и трещины на поверхности образца отсутствуют Пробой и перекрытия отсутствуют	Соотв. Соотв.
11 Проверка трекинговой стойкости (для муфт наружной установки) 500 ч увлажнения раствором CaCl_2 при одновременном воздействии переменного напряжения 26 кВ частотой 50 Гц	СТО 56947007–29.240.65.205–2015, раздел 5.2, п. 8	ГОСТ Р 52082–2003, п. 8.2 Внешний осмотр	3	Отсутствие эрозии превышающей 50% толщины стенки наружной трубки	Эрозия стенки наружной трубки отсутствует	Соотв.

Заключение

В результате проведённых работ, на производственной базе АО «Михневский завод электроизделий» мною были разработаны и испытаны соединительные и концевые муфты для кабеля из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 35 кВ. Надёжность данной кабельной муфты подтверждают результаты успешно пройденных испытаний в аккредитованном испытательном центре ОАО «ВНИИКП». Разработанная кабельная муфта по техническим характеристикам не уступает зарубежным аналогам, а по экономическим показателям многократно превосходит их. Ещё одним неоспоримым преимуществом является разработанная программа как теоретического, так и практического обучения монтажного персонала организаций.

Как показывает опыт разборки вышедших из строя кабельных муфт, смонтированных на кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 35 кВ, длительная эксплуатация зависит от возникновения частичных разрядов (ЧР) в изоляции муфт, в области воздушных включений, которые образуются в основном по причине небрежно проведенного монтажа.

В образцах некачественно смонтированной арматуры муфт различных производителей отмечались ЧР величиной более 100 пКл, изоляция которых повреждалась при эксплуатации. Наиболее типичной ошибкой при монтаже муфт, приводящей к образованию воздушной полости является отсутствие упорного кольца, ограничивающего перемещение циркулярного ножа для снятия экрана по изоляции кабеля.

При этом на краю экрана может образоваться неровный край и/или подрез изоляции кабеля. В этом месте после выполнения монтажа остается воздушная полость, в которой образуются ЧР, приводящие к образованию электрических триингов и пробоем муфты.

Результаты успешных испытаний муфт не всегда обеспечивают надёжную эксплуатацию кабельных муфт. Большинство повреждений (до 80%) муфт в эксплуатации связано с ошибками монтажа и нарушениями монтажных инструкций. Были случаи, когда в монтаже муфт принимал участие неквалифицированный и не аттестованный персонал, который не проходил обучение в специализированных центрах фирм – производителей арматуры.

Учитывая значительное влияние обучения на дальнейшее внедрение разработанных кабельных муфт, считаю необходимым проводить обучение персонала монтажных организаций монтажу кабельных муфт на напряжение 35 кВ силами производителя. На основе инструкций разработан план обучения монтажу персонала новой кабельной арматуры на напряжение 35 кВ, который включает как общие теоретические вопросы работы муфт в кабельных системах, так и практическую часть, связанную с разделкой кабеля и установкой элементов муфт.

Можно полагать, что выполнение плана внедрения разработанных концевых и соединительных муфт на напряжение 35 кВ, позволит обеспечить длительную безаварийную эксплуатацию в сетях РФ.

Список используемых источников

1. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника, М.: учебник, Энергоатомиздат, 2012. 552 с.
2. Библия электрика. ПУЭ, МПОТ, ПТЭ, М.: Гостехиздат, 2014. 690 с.
3. ГОСТ 13781.0–86 (СТ СЭВ 4449–83) Муфты для силовых кабелей на напряжение до 35кВ включительно. Общие технические условия. – Введ. 01.01.89. – М.: Издательство стандартов, 1999. 18 с.
4. ГОСТ 21488–97 Прутки, прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – Введ. 01.01.97. – М.: Изд-во стандартов, 2006. 21 с.
5. ГОСТ 10434–82 Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования. – Введ. 01.01.83. – М.: Стандартиформ, 1982. 14 с.
6. ГОСТ 9920–89 Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции. – Введ. 01.01.90. – М.: Стандартиформ, 2008. 6 с.
7. ГОСТ 29088–91 Материалы полимерные ячеистые эластичные. Определение условной прочности и относительного удлинения при разрыве. – Введ. 01.01.93. – М.: Издательство стандартов, 2004. 4 с.
8. ГОСТ 6433.3–71 Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрической прочности при переменном (частоты 50 Гц) и постоянном напряжении. – Введ. 01.01.72. – М.: Издательство стандартов, 1994. 21 с.
9. ГОСТ ИЕС 60811–1–1–2011 Общие методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических и оптических кабелей. Измерение толщины и наружных размеров. Методы определения механических свойств. – Введ. 01.01.2013. – М.: Стандартиформ, 2016. 14 с.
10. ГОСТ 22483–2021 Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и

шнуров. – Введ. 01.01.2021. – М.: Стандартиформ, 2021. 17 с.

11. ГОСТ 2990–78 Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением. – Введ. 01.01.1980. – М.: Издательство стандартов, 2003. 18 с.

12. ГОСТ 28114–89 Кабели. Метод измерения частичных разрядов. – Введ. 01.01.1990. – М.: Стандартиформ, 2007. 10 с.

13. ГОСТ 24183–80 Кабели силовые для стационарной прокладки. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1982. – М.: Стандартиформ, 2003. 16 с.

14. Инструкция по прокладке кабелей силовых с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6—35 кВ. — Витебск, ПО «Энергокомплект», 2010. 47 с.

15. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии.— М.: Энергоатомиздат, 1996

16. Лебедев В.Д. Силовые кабели, М.: учебник, Академия, 2014. 273 с.

17. Леонов В.М., Пешков И.Б. Основы кабельной техники: учебное пособие, Академия, 2013. 432 с.

18. Муфты на основе термоусаживаемых изделий для силовых кабелей на напряжение до 35 кВ включительно. Общие технические условия СТО 00081866.001–2009. — М., печатное издание ОАО «ВНИИКП».

19. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе».

20. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007–29.240.65.205–2015 «Кабельные системы на напряжение 0,66–35 кВ. Типовые технические требования».

21. ИЕС 61238–1–3:2018 «Соединители для силовых кабелей, закрепляемые опрессовкой и механическим способом. Часть 1–3. Методы испытания и требования к соединителям, закрепляемым опрессовкой и механическим способом, для силовых кабелей на номинальное напряжение от 1 кВ до 30 кВ, испытываемых на неизолированных токопроводящих жилах».