

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических  
систем и электрических сетей

УТВЕРЖДАЮ

И. о. заведующего кафедрой

\_\_\_\_\_ И. Ю. Погоняйченко

подпись

инициалы, фамилия

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения  
на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена**

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Профессор кафедры ГГЭС,

\_\_\_\_\_

д. т. н.  
должность, учёная степень

М.Ф. Носков

инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Д.С. Попырин

инициалы, фамилия

Рецензент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Начальник Службы  
мониторинга оборудования  
Филиала ПАО «РусГидро» -  
«Саяно-Шушенская ГЭС  
имени П. С. Непорожного»

\_\_\_\_\_

должность, учёная степень

В.В. Белобородов

инициалы, фамилия

Нормоконтролёр

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.А. Чабанова

инициалы, фамилия

Саяногорск; Черёмушки 2018

## АННОТАЦИЯ

к магистерской диссертации Попырина Дмитрия Сергеевича, студента 2 курса магистратуры Саяно-Шушенского филиала Сибирского федерального университета на тему: «Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена».

В работе провидится сравнительный анализ маслонаполненных кабелей (МНК) и кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), рассматривается эффективность применения кабелей с изоляцией из СПЭ с учетом всех их преимуществ и недостатков, а также применение систем мониторинга для решения возникающих проблем при их эксплуатации.

Рассматривается и обосновывается использование комплексного подхода к мониторингу высоковольтных кабельных линий, оборудование и программные обеспечения, входящие в него.

Ключевые слова: маслонаполненные кабели, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, высоковольтные кабельные линии, кабельная арматура, системы температурного мониторинга, мониторинг кабельных линий.

to the master's thesis Dmitry Popyrin, a 2nd-year student of the magistracy of the Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal University on the topic: "Temperature monitoring of high voltage cable lines based on cables with XLPE insulation".

In the paper, a comparative analysis of oil-filled cables and cables with XLPE insulation is envisaged, the efficiency of using XLPE insulated cables considering all their advantages and disadvantages is considered, as well as the use of monitoring systems to solve emerging problems in their operation.

The use of an integrated approach to the monitoring of high-voltage cable lines, equipment and software included in it is considered and justified.

Keywords: oil-filled cables, cables with XLPE insulation, high voltage cable lines, cable fittings, temperature monitoring systems, monitoring of cable lines.

## АВТОРЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена».

### **Актуальность:**

Учитывая повсеместное возникновение «малых» и «средних» промышленных предприятий, целесообразно предусматривать возможность совместного размещения ряда родственных предприятий на одной площадке. В связи с этим в условиях города необходимо учитывать и решать ряд требований:

- размещение питающих линий электропередач (ЛЭП) на максимально меньших земельных участках;
- повышенные требования к надежности, экономичности, к удобству и безопасности эксплуатации, к качеству электроэнергии, энергосбережение.

Решением размещения питающих ЛЭП с учетом наименьшего землеотвода является прокладка кабельных линий высокого напряжения вместо воздушных линий 110 - 220 кВ. Например, при строительстве воздушной ЛЭП 110 кВ протяженностью 1 км и охранной зоне 20 м по обе стороны линии, необходимый участок земли составляет 4 га, когда при прокладке кабельной линии - 0,30 га.

### **Цель работы:**

Анализ эффективности применения кабелей с изоляцией из СПЭ совместно системой температурного мониторинга в составе системы комплексного мониторинга высоковольтных кабельных линий.

### **Для достижения цели решаются следующие задачи:**

- 1 проводится сравнительный анализ МНК и кабелей с изоляцией из СПЭ;
- 2 обосновывается применение кабелей с изоляцией из СПЭ;
- 3 рассматривается принцип работы распределительного датчика температур, места размещения и возможность применения систем непрерывного мониторинга высоковольтных кабельных линий;
- 4 обосновывается целесообразность использования комплексного подхода к мониторингу высоковольтных кабельных линий;

5 рассматривается организация комплексного мониторинга высоковольтных кабельных линий, оборудование и программные обеспечения, входящие в него.

**Методы исследования:**

Анализ, классификация, сравнение, обобщение, структурно-функциональный метод, системный подход.

**Научная новизна:**

На основании анализа кабелей из СПЭ и различных систем температурного мониторинга, было доказано, что для мониторинга высоковольтных кабельных линий применение одних только систем температурного мониторинга недостаточно. Наиболее эффективной для этих целей является комплексная система оперативного мониторинга и диагностики состояния высоковольтных кабельных линий, которая включает в себя несколько подсистем.

**Практическая ценность:**

Использование системы комплексного мониторинга высоковольтных кабельных линий позволяет:

- контролировать температуру кабельной линии при помощи системы температурного мониторинга, которая позволяет не только оценивать температурный режим работы, но и определять возможность увеличения нагрузки на линию;

- выявлять дефекты изоляции кабеля и муфт по частичным разрядам на ранних стадиях возникновения и развития, определять тип и опасность выявленного дефекта;

- локализовать место возникновения дефекта в изоляции на работающей кабельной линии;

- проводить оперативный контроль емкостных и уравнивающих токов, протекающих по броне кабельной линии.

**Апробация работы:**

Промежуточные результаты выпускной квалификационной работы были опубликованы на следующих конференциях:

1) IV Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке», г. Саяногорск, рп. Черемушки, 13-14 апреля 2017 года.

2) V Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке», г. Саяногорск, рп. Черемушки, 26-27 апреля 2018 года.

**Публикации:**

По результатам диссертационного исследования опубликовано 2 работы.

**Структура и объем диссертации:**

Работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованных источников. Материал изложен на 97 страницах, содержит 41 рисунок и 24 таблицы.

Во введении раскрывается актуальность исследования по выбранному направлению и указывается его значимость, ставятся цели и задачи.

В первой главе производится сравнительный анализ эксплуатационных и технических характеристик МНК и кабелей с изоляцией из СПЭ.

Во второй главе рассматривается принцип работы распределенного датчика температур, виды систем температурного мониторинга, а также проводится выбор и анализ системы температурного мониторинга.

В третьей главе рассматривается и обосновывается применение комплексного мониторинга кабельных линий, оборудование и программное обеспечение, входящие в комплекс мониторинга кабельных линий.

Заключение посвящено основным выводам и предложениям, которые необходимо использовать при организации температурного мониторинга кабельных линий.

**Ключевые слова:** маслонаполненные кабели, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, высоковольтные кабельные линии, кабельная арматура, системы температурного мониторинга, мониторинг кабельных линий.

## ABSTRACT

Graduation qualification work on the topic "Temperature monitoring of high voltage cable lines based on cables with XLPE insulation".

### **Relevance:**

Given the widespread emergence of "small" and "medium" industrial enterprises, it is advisable to provide for the possibility of co-locating a number of related enterprises on the same site. In this regard, in the conditions of the city, it is necessary to take into account and solve a number of requirements:

- location of power transmission lines at the most smaller land plots;
- increased requirements to reliability, economy, to convenience and safety of operation, to quality of the electric power, energy saving.

The decision to locate power transmission lines taking into account the smallest land allocation is the laying of high voltage cable lines instead of 110-220 kV overhead lines. For example, for the construction of a 1-km long 110 kV aerial transmission line and a 20-m security zone on both sides of the line, the required plot of land is 4 hectares, when laying the cable line - 0,30 hectares.

### **Objective:**

Analysis of the effectiveness of the use of cables with XLPE insulation together with a system of temperature monitoring as part of a complex monitoring system for high-voltage cable lines.

### **To achieve the goal, the following tasks are solved:**

- 1 comparative analysis of oil-filled cables and cables with XLPE insulation;
- 2 the use of cables with XLPE insulation is justified;
- 3 the principle of operation of the temperature distribution sensor, the location and the possibility of using continuous monitoring systems for high-voltage cable lines;
- 4 the expediency of using an integrated approach to the monitoring of high-voltage cable lines is justified;
- 5 the organization of complex monitoring of high-voltage cable lines, equipment and software included in it is considered.

**Methods of research:**

Analysis, classification, comparison, generalization, structural-functional method, system approach.

**Scientific novelty:**

Based on the analysis of cables made of cross-linked polyethylene and various temperature monitoring systems, it has been proved that monitoring of high-voltage cable lines not only requires the use of temperature monitoring systems. The most effective for these purposes is a complex system of operational monitoring and diagnostics of the state of high-voltage cable lines, which includes several subsystems.

**Practical value:**

Using the system of complex monitoring of high-voltage cable lines allows:

- control the temperature of the cable line with the help of a temperature monitoring system that allows not only to evaluate the temperature regime of operation, but also to determine the possibility of increasing the load on the line;

- to identify defects in cable insulation and couplings for partial discharges in the early stages of development and development, determine the type and danger of the defect identified;

- localize the location of the defect in the insulation on the working cable line;

- carry out operational monitoring of capacitive and equalizing currents flowing through the armored cable line.

**Approbation of work:**

Intermediate results of the final qualifying work were published at the following conferences:

- 1) IV All-Russian scientific-practical conference of young scientists, specialists, graduate students and students "Hydroelectric power stations in the XXI century", Sayanogorsk, ws. Cheryomushki, April 13-14, 2017.

- 2) V All-Russian scientific-practical conference of young scientists, specialists, graduate students and students "Hydroelectric power stations in the XXI century", Sayanogorsk, ws. Cheryomushki, on April 26-27, 2018.

**Publications:**

According to the results of the thesis, 2 papers were published.

**Structure and scope of the thesis:**

The work consists of an introduction, 3 chapters, conclusion and list of sources used. The material is presented on 97 pages, contains 41 figures and 24 tables.

The introduction reveals the relevance of research in the chosen direction and indicates its significance, goals and objectives are set.

The first chapter compares the operational and technical characteristics of oil-filled cables and cables with XLPE insulation.

In the second chapter, the principle of operation of a distributed temperature sensor, the types of temperature monitoring systems, and the selection and analysis of a temperature monitoring system are discussed.

The third chapter considers and justifies the use of integrated monitoring of cable lines, equipment and software included in the monitoring complex of cable lines.

The conclusion is devoted to the main conclusions and suggestions that should be used in the organization of temperature monitoring of cable lines.

**Keywords:** oil-filled cables, cables with XLPE insulation, high-voltage cable lines, cable fittings, temperature monitoring systems, monitoring of cable lines.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	10
1 Сравнительный анализ достоинств и недостатков МНК и кабелей с изоляцией из СПЭ .....	11
1.1 Общая характеристика МНК .....	11
1.2 Общая характеристика кабелей с изоляцией из СПЭ .....	23
2 Принцип работы распределительного датчика температур. Виды систем температурного мониторинга. Анализ выбранной системы температурного мониторинга.....	46
2.1 Принцип работы распределительного датчика температур .....	46
2.2 Виды систем температурного мониторинга.....	49
2.3 Анализ выбранной системы температурного мониторинга .....	55
3 Комплексный подход к мониторингу кабельных линий .....	68
3.1 Организация комплексного мониторинга кабельных линий .....	68
3.2 Комплексная система мониторинга технического состояния энергетического оборудования iNVA .....	86
3.3 Классификация эксплуатационных и диагностических параметров оборудования .....	89
Заключение .....	94
Список использованных источников.....	96

## ВВЕДЕНИЕ

Для передачи и распределения электроэнергии используются воздушные и кабельные линии; стоимость кабельных линий выше, однако они находят широкое применение на промышленных предприятиях и в крупных городах, где плотность нагрузки и уровень электропотребления достаточно значительны, а также в местах, где применение воздушных линий затруднительно (например, при переходах трассы линии через водные пространства). В настоящее время при строительстве кабельных линий широко используются силовые кабели современных конструкций высокого напряжения 110-500 кВ. Для прокладки кабельных линий высокого напряжения ранее применялись маслonaполненные кабели (МНК), однако, в последнее время наибольшее распространение получают силовые однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ).

Основным эксплуатационным отличием кабелей с изоляцией из СПЭ от МНК является то, что большинство возникающих в них дефектов, являющихся опасными, развиваются за сравнительно краткий период времени, от нескольких месяцев, до нескольких дней. Проведение периодических диагностических испытания кабельных линий с СПЭ изоляцией не обеспечивает необходимого уровня надежности электроснабжения потребителей. Такие испытания оправдывают себя только при вводе кабельных линий в эксплуатацию, и после проведения ремонтных работ. Снижение аварийности работы кабельных линий возможно только за счет внедрения в эксплуатацию систем непрерывного мониторинга, которые могут контролировать состояние изоляции кабельных линий в режиме реального времени. Только такие системы могут своевременно выявлять быстро развивающиеся дефекты на самых ранних стадиях, тем самым оперативно предотвращать возможные аварийные ситуации с высоковольтными кабельными линиями.

# **1 Сравнительный анализ достоинств и недостатков МНК и кабелей с изоляцией из СПЭ**

## **1.1 Общая характеристика МНК**

МНК представляют собой силовые кабели высокого напряжения, у которых бумажная изоляция пропитана минеральным маслом под давлением. МНК с бумажно-масляной изоляцией в России остаются пока наиболее распространенными кабелями высокого напряжения. МНК в России и в странах СНГ применяются для электроснабжения городов и крупных потребителей энергии, для вывода мощности с тепловых станций и гидроэлектростанций, а также для передачи электроэнергии через труднопроходимые местности (горные районы, водные пространства и др.). При этом чем выше класс номинального напряжения кабелей, тем больше удельный вес МНК среди всех кабелей высокого напряжения. Очень часто МНК заменяются на кабели с изоляцией из СПЭ при проведении новых работ из-за значительных эксплуатационных затрат.

Основные типы конструкций силовых МНК - кабели низкого давления (до 3-5 атмосфер) в свинцовой или алюминиевой оболочке на номинальное напряжение 110, 150 и 220 кВ (рисунок 1.1) и кабели высокого давления (10-15 атмосфер) в стальном трубопроводе на номинальное напряжение 110, 220, 330, 380 и 500 кВ. Повышение давления масла приводит к увеличению электрической прочности бумажно-масляной изоляции и к возможности применения силовых маслонаполненных кабелей при более высокой рабочей напряженности электрического поля в изоляции кабелей (до 15 кВ/мм и более) [1].



Рисунок 1.1 - Элементы конструкции МНК низкого давления

В МНК низкого давления применяется маловязкое дегазированное масло (марки МН-3, МН-4 или их аналоги) для пропитки бумажной изоляции. При изготовлении кабелей сушка и пропитка изоляции производятся по технологии, исключающей появление газовых и воздушных включений в изоляции. В процессе эксплуатации и монтажа масло в изоляции кабеля постоянно находится под избыточным давлением, которое поддерживается в заданных пределах автоматически, что исключает возможность образования газовых включений в изоляции даже при резком падении нагрузки. Давление масла поддерживается устанавливаемыми вдоль кабельной линии баками давления, которые отдают его при охлаждении кабеля и принимают избыток масла при нагревании.

Токопроводящие жилы кабеля сечением до 800 мм<sup>2</sup> состоят из одного или нескольких повивов фасонных проволок. Внутренний повив жилы скручивается из z-образный проволок, образующих центральный маслопроводящий канал диаметром 12-14 мм, по которому происходит перемещение масла при изменении температуры нагрева кабеля. Жилы сечением 1000 мм<sup>2</sup> и выше скручиваются из четырех или шести изолированных друг от друга сегментов для

уменьшения сопротивления жилы переменному току за счет эффекта близости и снижения влияния поверхностного эффекта. Жилы изготавливаются из луженных медных проволок, которые являются слабым стимулятором старения масла. Токопроводящая жила, а также изоляция кабелей высокого напряжения, экранируются полупроводящей бумагой для сглаживания поверхности жилы или оболочки. При этом масляные пленки между жилой и изоляцией, а также и между изоляцией и металлической оболочкой, обладающие меньшей электрической прочностью в сравнении с пропитанной бумагой, оказываются в зоне с нулевой напряженности электрического поля.

Экран по жиле имеет следующую конструкцию: три ленты бумаги марки КП-080 толщиной 0,08 мм или две ленты КП-120 толщиной 0,12 мм, одна лента двухцветной бумаги марки КПДУ-080, накладываемая полупроводящим слоем к жиле. Общая толщина экрана - 0,35 мм [1].

Экран по изоляции имеет следующую конструкцию: одна лента бумаги марки КПД-120 толщиной 0,12 мм, накладываемая изоляционным слоем к изоляции, одна лента бумаги КП-120, медная лента толщиной 0,1 мм, накладываемая с зазором 3-5 мм, прослоенная полупроводящей бумажной лентой марки КП-120. Общая толщина экрана - 0,45 мм [1].

Полупроводящие ленты экранов накладываются с зазором 0,5-2,0 мм, а двухслойные - с перекрытием 2-3 мм [1].

Изоляция жил выполняется из бумаги различной толщины и плотности (градирование изоляции), для чего применяются ленты кабельной бумаги (марки КВ, КВУ, КВМУ) толщиной 0,08 и 0,12 мм. При этом непосредственно у жилы слой изоляции выполняется из более тонкой уплотненной бумаги. Ленты кабельной бумаги накладываются на жилу с зазором 0,5-2,0 мм методом обмотки и пропитываются маловязким минеральным маслом МН-3 или МН-4 (или их аналогом) [1].

Расчет толщины изоляции производится по напряжению промышленной частоты и по импульсному напряжению. Толщина изоляции для кабелей

различных сечений жил равна 9,6-11 мм для кабелей 110 кВ и 18-20,8 мм для кабелей 220 кВ (рабочая напряженность - не более 8 кВ/мм) [1].

Для защиты изоляции от увлажнения и от механических повреждений, а также для обеспечения работы под избыточным давлением поверх изоляции накладывается свинцовая или алюминиевая (гладкая или гофрированная) оболочка толщиной 2,5-4 мм [1].

Металлические оболочки имеют упрочняющие и защитные покровы. Упрочняющие покровы в виде нескольких синтетических лент и двух лент из немагнитного материала накладываются только поверх свинцовой оболочки. Алюминиевые оболочки упрочняющих покровов не имеют, так как алюминий не текуч и его механическая прочность в 2-2,5 раза выше по сравнению со свинцом. Защитные покровы кабелей в свинцовой оболочке состоят из чередующих слоев битума, лент поливинилхлоридного пластиката, лент предварительно пропитанной кабельной бумаги, кабельной пряжи и мелового покрытия. Для механической защиты на свинцовую оболочку может накладываться броня из стальных проволок. В случае применения алюминиевой оболочки используются защитные покровы повышенной влагостойкости. По существу, это сплошной шланг из полиэтилена или поливинилхлоридного пластиката. Для соединения МНК низкого давления с кабелями с изоляцией из СПЭ на напряжение 110-220 кВ используются переходные муфты типа МПМНП-М-110 [2].

- Переходные муфты типа МПМНП-М

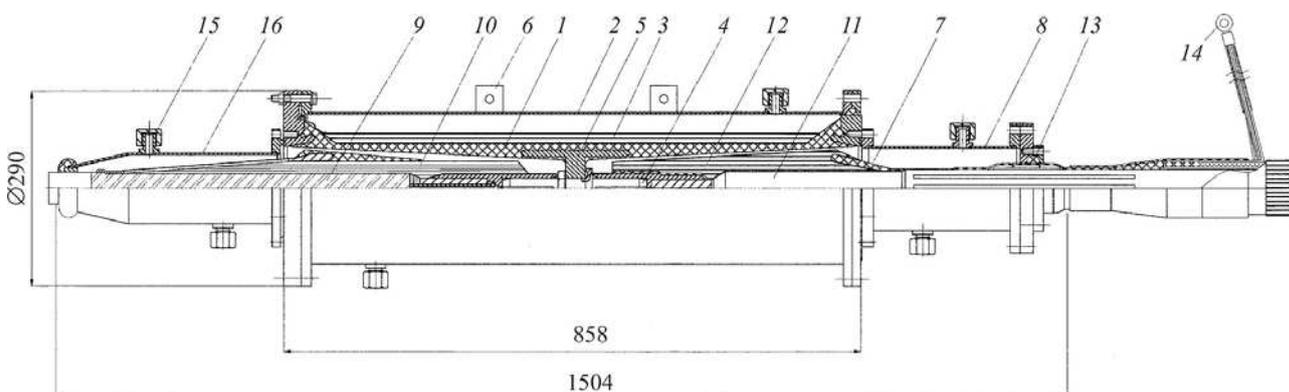
Область применения:

Для соединения МНК - кабелей (низкого и высокого давления) и кабелей с изоляцией из СПЭ с сечением жилы до 2000 мм<sup>2</sup> на напряжение 110-200 кВ.

Особенности конструкции:

Переходная соединительная муфта состоит из трех частей: центральной части 2, заключенной в кожух из нержавеющей, немагнитной стали, кожуха 16 для подготовленного конца маслonaполненного кабеля и кожуха 8 для подготовленного конца кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена. Такая

конструкция обеспечивает максимальную заводскую готовность, так как центральная часть собирается в условиях цеха и поставляется на место монтажа в собранном виде, заполненной кабельным маслом под баком давления. Наличие в центральной части стержневого штекерного элемента 4 упрощает сборку и разборку муфты. Элементы конструкции представлены на рисунке 1.2.



1 - эпоксидный армированный изолятор; 2 - центральная часть переходной муфты; 3 - усиливающая бумажная, пропитанная маслом изоляция; 4 - штекерный соединитель; 5 - центральный электрод; 6 - клемма заземления; 7 - электрод регулирования электрического поля; 8, 16 - кожухи концевых участков; 9 - МНК; 10 - усиливающая изоляция МНК; 11 - кабель с пластмассовой изоляцией; 12 - усиливающая изоляция пластмассового кабеля; 13 - узел уплотнения; 14 - наконечник заземления; 15 - заглушка

Рисунок 1.2 – Переходная соединительная муфта типа МПМНП-М

Кабели низкого давления предназначены для прокладки в кабельных каналах и туннелях (кабели марок МНС, МНСШв, МНАШв, МНАгШв), в земле, при условии, что кабель не подвержен растягивающим усилиям и защищен от механических повреждений (кабели марок МНСШв, МНАШву), а также болотистой местности и под водой, где требуется его дополнительная защита и где кабель подвергается растягивающим усилиям (кабель марки МНСК).

Опыт эксплуатации МНК низкого давления составляет около 80 лет и свидетельствует об их достаточно высокой надежности. Удельная повреждаемость кабельной линии низкого давления на напряжение 110 и 220 кВ составляет примерно 0,02 на 100 км в год. При этом большинство отказов обусловлено механическими повреждениями.

Кабельная линия высокого давления содержит три одножильных кабеля, затянутых в стальной трубопровод. Для пропитки бумажной изоляции МНК высокого давления и заполнения трубопровода применяется вязкое масло типа С-220 (или его аналог), которое обеспечивает большую импульсную прочность кабелей. Компенсация изменения объема масла в кабельной линии, а также поддержание избыточного давления в заданных пределах осуществляется с помощью автоматического подпитывающего устройства (АПУ), расположенного на одном из концов кабельной линии.

Токопроводящие жилы кабелей высокого давления имеют круглую форму (без центрального маслопроводящего канала) и скручиваются из луженых медных проволок. Жилы сечением более 700 мм<sup>2</sup> скручиваются из четырех секторов, изолированных слоями полупроводящей бумаги.

Экран по жиле состоит из трех полупроводящих лент бумаги КП-080 толщиной 0,08 мм или двух лент КП-120 толщиной 0,12 мм; при этом одна лента из двухцветной бумаги марки КПДУ-080. Экран по изоляции имеет следующую конструкцию: одна лента двухцветной бумаги марки КПД-120; одна лента полупроводящей бумаги КП-120 для кабелей 110-220 кВ или три ленты для кабелей 330-500 кВ; одна полупроводящая металлизированная перфорированная лента толщиной 0,14 мм; одна медная перфорированная лента толщиной 0,15 мм с прослойкой ленты полупроводящей бумаги толщиной 0,12 мм.

Изоляция жил также выполняется из бумаги различной толщины и плотности, для чего применяются ленты кабельной бумаги толщиной 0,08 и 0,12 мм для кабелей 110 кВ и толщиной 0,08, 0,12 и 0,17 мм для кабелей на напряжение 220 кВ и выше. Ленты бумаги накладываются на жилу с зазором 0,5-2,0 мм методом обмотки и пропитываются маслом С-220.

Толщина изоляции для кабелей различных сечений равна 9,6-12,4 мм для кабелей 110 кВ, 17,5-20,7 мм для кабелей 220 кВ (рабочая напряженность - не более 9 кВ/мм) и 30-31 мм для кабелей 500 кВ (рабочая напряженность - не более 15 кВ/мм).

На экран по изоляции накладываются (с шагом 100-300 мм) не менее двух полукруглых проволок скольжения из немагнитного материала (бронзовые проволоки или медные луженные) размером 2,5-5 мм, предохраняющие его и изоляцию от повреждения при затягивании кабеля в трубопровод.

МНК высокого давления выпускаются двух марок: МВДТ - маслонаполненный кабель в свинцовой оболочке, снимаемой на месте прокладки при протягивании кабеля в трубопровод, и МВДТк - маслонаполненный кабель, доставляемый к месту прокладки в контейнере с маслом.

Для сооружения кабельных линий в России применяются в основном стальные катаные трубы с наружным диаметром 219 или 273 мм и толщиной стенки 10 мм. Для защиты кабелей от механических повреждений используют стальной трубопровод, который является надежной защитой.

МНК высокого давления в стальном трубопроводе могут прокладываться в туннелях, в земле и под водой. Так, например, для вывода мощности от Усть-Илимской ГЭС в 1975-1979 гг. было сооружено 7 кабельных линий 500 кВ высокого давления длиной 1030-1100 м (проложены в двух туннелях), рассчитанных на передачу мощности 630 МВА по каждой кабельной линии. На Нижнекамской ГЭС в 1979-1983 гг. было сооружено 4 кабельные линии 500 кВ длиной 420-840 м (проложены в двух туннелях), рассчитанных на передачу мощности до 400 МВА по каждой кабельной линии. На всех этих линиях использовался маслонаполненный кабель высокого давления (МВДТ) с сечением медной жилы 625 мм<sup>2</sup> и толщиной изоляции 30 мм.

Отказы маслонаполненных кабельных линий высокого давления на номинальное напряжение 110-500 кВ носят единичный характер и обусловлены, в основном, предшествующими механическими повреждениями.

Сохранение маслом высоких диэлектрических свойств, таких как высокая электрическая прочность, малые диэлектрические потери очень важно для обеспечения требований электрической прочности и надежности маслонаполненных кабельных линий. Для маслонаполненных кабельных линий масло подвергается глубокой дегазации для предотвращения развития

ионизационных свойств и обеспечения стабильности диэлектрических свойств изоляции. [3]

При эксплуатации маслонаполненных кабельных линий особое внимание уделяется герметичности всей системы для избежания попадания в кабель воздуха, предотвращения образования газа из-за разложения масла и наблюдениям за качеством и состоянием масла в кабельных линиях [3].

Для избежания коррозионного разрушения оболочек кабелей маслонаполненных кабельных линий в особенности на линиях высокого давления (стальных трубопроводов) рекомендуется проводить мероприятия по их предотвращению [3].

За счет диэлектрических потерь происходит дополнительный нагрев изоляции с их учетом производится рациональное использование пропускной способности линий высокого давления. Кабельные линии низкого давления не требуют учета влияния токов, наводимых в оболочках, так как они изготавливаются из однофазных кабелей [3].

Допустимая температура длительного нагрева токопроводящих жил равна 70 °С, она установлена для любых условий прокладки (под водой, в грунте и в воздухе) для всех типов маслонаполненных кабельных линий напряжением до 500 кВ включительно. Если коэффициент нагрузки не превышает 0,8 от максимального расчетного значения и для засыпки траншей с кабелями применяется специальный грунт с улучшенными тепловыми характеристиками и при наличии сведений об охлаждении кабелей по всей длине трассы длительно допустимая температура нагрева токопроводящих жил кабелей проложенных (под водой, в грунте и в воздухе) рекомендована до 75 °С для кабелей на напряжение 330, 380, 500 кВ, и марок кабелей МНСА, МНСК, а для кабелей на напряжение 110, 150 и 220 кВ до 85 °С (кроме кабелей марок МНСА и МНСК) [3].

При проектировании кабельных линий для маслонаполненных линий длительно допустимые токовые нагрузки определяются расчетом с учетом результатом изысканий, выполненных трассе проектируемой линии, условий

прокладки, числа параллельно проложенных кабелей и конструкции кабеля. Для каждой линии в отдельности для конкретных условий их прокладки при проектировании устанавливаются длительно допустимые токовые нагрузки для маслонаполненных кабельных линий на напряжение 150, 330 и 500 кВ [3].

С помощью амперметров осуществляют контроль за нагрузками кабельных линий, допустимый ток можно определить по риску красного цвета на шкале амперметра. Если коэффициент нагрузки больше 0,8, то непрерывная нагрузка маслонаполненных кабельных линий в аварийных режимах рекомендуется длительностью 50 часов в год и 100 часов в год, если коэффициент не превышает 0,8. Контроль температуры кабельных линий рекомендуется в аварийных режимах и при их перегрузке. Для каждой конкретной линии рекомендуется определять нагрузки для условий, отличающихся от среднерасчетных и допустимые аварийные нагрузки [3].

Если в кабельной линии или отдельной секции было превышено допустимое давление масла, линия отключается до устранения причин повышения давления и включается после [3].

Для кабелей высокого давления с пропиткой синтетическим маслом и для кабелей низкого давления с пропиткой нефтяным маслом при эксплуатации допустимая минимальная температура не ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  [3].

В таблице 1.1 приведены минимальные значения температуры воздуха для кабельных линий и их элементов.

Таблица 1.1 – Минимальная температура окружающей среды

Температура окружающей среды	Линия низкого давления с маслом марок		Линия высокого давления с маслом марок	
	МН-3, МН-4	МПНК-2	С-110, С-220	ВК-21
Минимально допустимая по всей длине кабельной линии, не ниже, $^{\circ}\text{C}$	0	-20	0	-5
Минимально допустимая температура воздуха для открытой (без подогрева) установки концевых муфт и подпитывающих баков, $^{\circ}\text{C}$	-25	-45	-15	-20

Термодатчики для контроля за нагревом маслонаполненных кабельных линий низкого и высокого давления рекомендуется устанавливать на воздушных и подземных участках линии, при прокладке в грунте – на участках с наихудшими условиями охлаждения, то есть в мало теплопроводных грунтах (каменистый грунт, насыпные) и содержащих наименьшее количество влаги. На рисунке 1.3 представлены кривые для выбора таких участков.

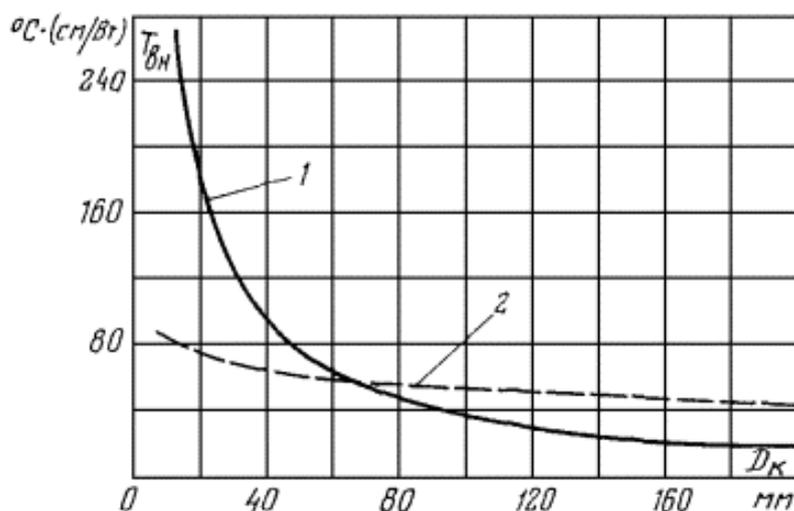


Рисунок 1.3 – Зависимость внешнего теплового сопротивления кабеля от его диаметра

На воздушных участках кабельных линий высокого давления установка термодатчиков предназначается для:

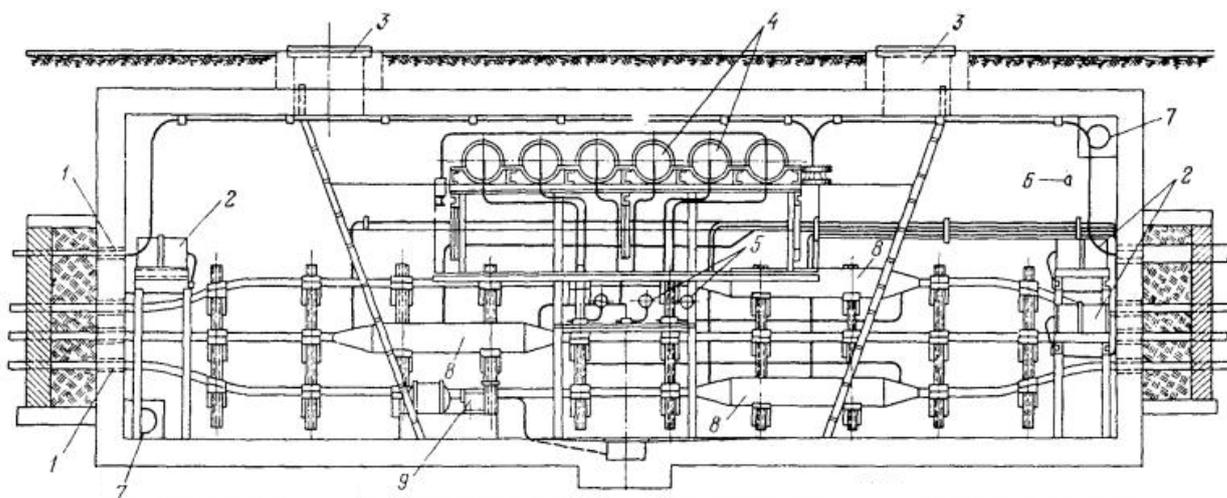
- температурного контроля разветвительных устройств;
- температурного контроля вертикальных участков кабелей, расположенных в шахтах и участков с крутым уклоном стального трубопровода;
- мониторинга пропускной способности кабельной линии в теплое время года.

Температурный контроль нагрева маслонаполненных кабельных линий рекомендуется выполнять совместно с наблюдениями за работой подпитывающих устройств с регистрацией давления при изменении температуры.

Сооружения и трассы маслонаполненных кабельных линий осматриваются в установленные соответствующими правилами технической эксплуатации сроки.

При нормальных условиях работы кабельной линии подпитывать маслом линии целесообразно в определенных расчетных точках, для поддержания заданного давления масла. В таблице 1.2 приведены вид подпитывающего устройства и параметры давлений масла для всех типов маслонаполненных кабелей. На рисунке 1.4 представлена схема подпитки кабельных линий низкого давления при помощи баков давления подпитывающих пунктов.

При помощи маслоподпитывающих агрегатов с боков для подпитки линии, нагнетательными насосами, сифонными вентилями, масляными коллекторами для групповой подпитки линий и другой аппаратуры происходит автоматическая подпитка кабельных линий высокого давления.



1 – асбоцементные трубы; 2 – баки давления; 3 – входные люки; 4 – баки питания; 5 – манометры; 6 – шина заземления; 7 – вентиляционные отверстия; 8 – стопорные муфты; 9 – насос для откачивания воды из колодца

Рисунок 1.4 – Подпитывающий пункт в колодце стопорных муфт

Таблица 1.2 – Вид подпитывающего устройства и параметры давлений масла

Конструкция кабеля	Параметры давления, Мпа (кгс/см <sup>2</sup> )			Вид подпитывающего устройства
	Длительно допустимое давление	Кратковременное давление при переходных режимах	Давление при аварийном отключении	
Низкого давления:	0,0245 - 0,147 (0,25 - 1,5)	0,0148 - 0,294 (0,15 - 3,0)	0,0102 (0,11)	Баки питания Баки давления
в свинцовой оболочке	0,0245 - 0,294 (0,25 - 3,0)	0,0148 - 0,590 (0,15 - 6,0)	0,0102 (0,11)	Баки давления
в алюминиевой оболочке	0,0245 - 0,49 (0,25 - 5,0)	0,0148 - 0,980 (0,15 - 10,0)	0,0102 (0,11)	Баки давления
Среднего давления:	0,0245 - 0,294 (0,25 - 3,0)	0,0148 - 0,590 (0,15 - 6,0)	0,0102 (0,11)	Баки давления
Высокого давления:	1,08 - 1,57 (11,0 - 16,0)	0,98 - 1,76 (10,0 - 18,0)	0,78 (8,0)	Подпитывающий агрегат
110 кВ	1,08 - 1,57 (11,0 - 16,0)	0,98 - 1,76 (10,0 - 18,0)	0,490 (5,0)	Подпитывающий агрегат
220 кВ и выше	1,08 - 1,57 (11,0 - 16,0)	0,98 - 1,76 (10,0 - 18,0)	0,785 (8,0)	

Постоянный контроль за характеристиками масла целесообразен на протяжении всего процесса эксплуатации.

Проверка кабельной линии на содержание растворенного и нерастворенного газа в масле, характеристики проб масла, отбираемых из различных элементов линии – данные показатели являются основными при оценке состояния изоляции маслonaполненной кабельной линии. Помимо окисления и полимеризации масла (старение масла) причиной диэлектрических потерь является дополнительный нагрев изоляции. Дополнительный нагрев изоляции также является причиной снижения пропускной способности линий в кабелях 110 кВ, 220 кВ и выше.

Отбор проб масла и восполнение его убыли производится в различных элементах кабельной линии с соблюдением необходимых мер, предотвращающих попадание воздуха в линию. В эксплуатации отбор проб масла производится в установленные нормами сроки. При несоответствии проб масла установленным нормам – производится повторный отбор проб масла. Если при повторном отборе проб масла его качество не соответствует нормам, то следует решить вопрос в выводе линии из работы.

Во время эксплуатации маслонаполненных кабельных линий в наличии должны иметься:

- установка для генерации масла (очистка);
- установка для дегазации масла;
- емкости для хранения кабельных масел;
- приспособления и оборудование для заполнения маслом отдельных элементов линии;

При помощи манометров производится измерение падения давления масла (потери масла). По полученным данным строятся графики изменения давлений в функции времени. Местонахождение утечки масла можно определить путем сравнения графиков двух испытываемых участков.

## 1.2 Общая характеристика кабелей с изоляцией из СПЭ

Современные кабели из СПЭ более экономичны и технически более совершенны по сравнению с МНК благодаря своей технологии изготовления, конструкции и изоляционным материалам. В последние годы кабели с изоляцией из СПЭ чаще используются в новых проектах, чем кабели с бумажной изоляцией. В таблице 1.3 приведены сравнительные характеристики кабелей с изоляцией из СПЭ и МНК.

Таблица 1.3- Сравнительные характеристики СПЭ и МНК – кабелей

Характеристики кабелей	СПЭ-кабель	МНК-кабель
Длительно допустимая температура жилы, °С	90	85
Допустимая температура в аварийном режиме, °С	130	90
Максимально допустимая температура жилы при протекании тока короткого замыкания, °С	250	200
Допустимая плотность 1секундного тока короткого замыкания, °С		
для медной жилы	144	101
для алюминиевой жилы	93	67
Относительная диэлектрическая проницаемость при температуре 20 °С	2,4	3,3
Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре 20 °С	0,001	0,004

При использовании кабелей с изоляцией из СПЭ основным преимуществом является более высокая надежность кабельной линии. Во многом это связано с более высоким качеством кабеля и технологией монтажа соединительных, и концевых муфт [4]. Помимо этого, кабели из СПЭ легче и имеют меньший диаметр, по сравнению с МНК, поэтому они могут прокладываться большими длинами. Это позволяет уменьшить число соединений, что увеличивает надежность линий. В изоляции кабелей из СПЭ отсутствуют жидкие компоненты, что позволяет их использовать при различной температуре окружающей среды и без ограничения разности уровней прокладки также кабельные линии, выполненные из сшитого полиэтилена, не требуют постоянного обслуживания и контроля в процессе эксплуатации. Современные технологии изготовления кабелей позволяют улучшить механические и электрические свойства изоляции, в процессе вулканизации полиэтиленовой изоляции молекулярная структура изменяется и образуются новые межмолекулярные связи за счет чего и происходит улучшение. Для улучшения электроизоляционных свойств и исключения возможности образования дефектов в изоляции используется более совершенный метод MDCV, процесс «сухой» сшивки или вулканизации. Суть этого метода заключается в том, что на жилу, которая подается с барабана, немедленно накладывается не содержащий влаги и посторонних включений изоляционный компаунд. Далее жила поступает в «вулканизационную трубу», где под воздействием постоянного тока (изолированная жила не подвергается воздействию азота), происходит нагрев «вулканизационной трубы» в результате чего и производится сшивка изоляции. Необходимо отметить, что экструзия электропроводящего экрана по изоляции, слоя изоляции и электропроводящего экрана по жиле происходит одновременно, то есть происходит трехслойное экструдирование. Эта технология обеспечивает отсутствие газовых включений на границе с экранами и в изоляции, а также обеспечивает хорошую адгезию между изоляцией и экранами [5]. Алюминиевые или медные токопроводящие жилы кабелей из СПЭ изготавливаются герметизированными и уплотненными, а если сечение жилы более 1000-1200 мм<sup>2</sup>

сегментными, что позволяет уменьшить поверхностный эффект. Внешний полупроводящий слой, изоляция и внутренний полупроводящий слой одновременно выпрессовываются из композиций сшиваемого полиэтилена высокой частоты. Также, при помощи приборов лазерного контроля непрерывно контролируется эксцентриситет и толщина слоев. Металлический экран кабеля состоит из спирально наложенной медной ленты и медных проволок. Сечение экрана выбирается из условия протекания токов короткого замыкания. Слой водонабухающего материала используется для обеспечения продольной герметизации, а оболочка из алюмополимерной ленты используется для более надежной защиты изоляции кабелей от влаги. Алюмополимерная оболочка сварена с ПВХ или полиэтиленовой оболочкой, для обеспечения радиальной герметизации (рисунок 1.5) [6].



Рисунок 1.5 – Конструкция СПЭ-кабелей с пластмассовой оболочкой

Помимо стандартного варианта кабелей, проложенных в земле (оболочка из ПВХ-пластика или полиэтилена), для сложных трасс может использоваться усиленная полиэтиленовая оболочка с продольными ребрами жесткости, а также свинцовая оболочка (рисунок 1.6) или гофрированная алюминиевая оболочка

(рисунок 1.7). Для защиты кабеля от возгорания поверх внешней оболочки может накладываться защитный слой. Для передачи данных и для измерения температуры нагрева кабеля по всей трассе могут быть интегрированы оптоволоконные нити под свинцовой оболочкой или между проволоками экрана.



Рисунок 1.6 - Конструкция СПЭ-кабелей со свинцовой оболочкой



Рисунок 1.7 - Конструкция СПЭ - кабелей с алюминиевой оболочкой

В последнее время за рубежом применяют трехжильные кабели в трубе с изоляцией из СПЭ (рисунок 1.8). Такие кабели используются для реконструкции старых линий при возможности использования уже существующих труб.

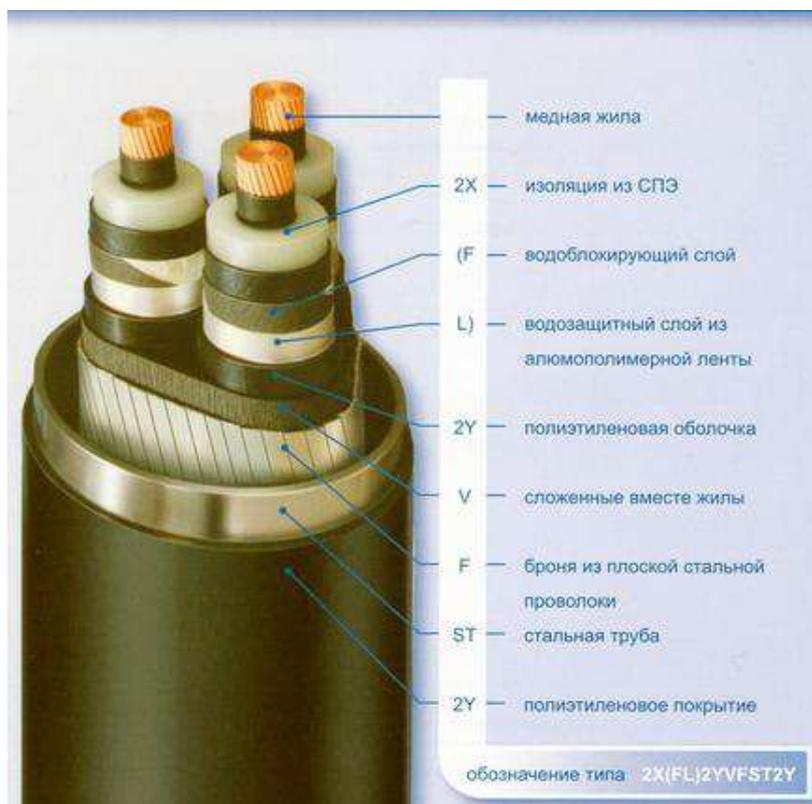


Рисунок 1.8 - Конструкция СПЭ-кабелей в стальной трубе

В таблице 1.4 представлены перспективные направления кабелей с изоляцией из СПЭ. Одножильные СПЭ-кабели с пропускной способностью до 1000 МВА, с сечением токопроводящей жилы до 2500-3000 мм<sup>2</sup> и напряжением до 500 кВ.

Таблица 1.4 – Основные характеристики СПЭ-кабелей напряжением до 500 кВ

Номинальное напряжение, кВ	Сечение медной жилы, мм <sup>2</sup>	Толщина изоляции, мм	Вес, т/км	Ток нагрузки при прокладке, в земле (на воздухе), А	Передаваемая мощность при прокладке в земле (на воздухе), МВА
64/110 (132)	185-1000	15-16	4,6-21	450-1050 (600-1500)	50-200 (100-250)
	1000-1600	14-16	15-28	1050-1450 (1500-2000)	200-280 (250-350)

Продолжение таблицы 1.4

Номинальное напряжение, кВ	Сечение медной жилы, мм <sup>2</sup>	Толщина изоляции, мм	Вес, т/км	Ток нагрузки при прокладке, в земле (на воздухе), А	Передаваемая мощность при прокладке в земле (на воздухе), МВА
127/220 (245)	500-1000	23-26	12-26	650-1000 (800-1400)	250-380 (300-550)
	1000-1600	20-23	16-32	1000-1400 (1400-1900)	380-500 (500-700)
230/400 (420)	630-1000	28-32	17-30	750-1000 (900-1300)	500-650 (600-800)
	1000-2500	26-28	20-40	950-1400 (1300-1800)	650-1000 (900-1200)
290/500 (525)	800-1600	32-35	28-40	800-1200 (900-1500)	700-1000 (750-1300)

Ведущие компании производящие высоковольтные кабели с изоляцией из СПЭ за рубежом: NKT Cable, NEXANS, Pirelli, ABB, Sumitomo Electric. Производитель в России – ЗАО «АББ Москабель» осуществляет производство кабелей с изоляцией из СПЭ с использованием новых технологий на номинальное напряжение 110 кВ, по лицензии ABB Energiekabel. Так же производитель в России – ООО «Таткабель», современный завод выпускающий весь спектр кабеля с изоляцией из СПЭ напряжением до 500 кВ. Производитель на Украине – ООО «Южнокабель» также осуществляет производство кабелей с изоляцией из СПЭ на номинальное напряжение 110 кВ. Конструкция кабеля с изоляцией из СПЭ (напряжение 110 кВ) марок ПвП, АПвП, ПвПу, АПвПу:

- круглая многопроволочная алюминиевая или медная жилы (сечением 185-800 мм<sup>2</sup>);
- изоляция из СПЭ (15-16 мм);
- полупроводящий слой изоляции;
- полупроводящая лента;
- экран из медной ленты и медных проволок;
- полупроводящая лента;
- оболочка из ПВХ пластика или полиэтилена.

Продольная герметизация в кабелях с индексом «г» обеспечивается при помощи водонабухающего слоя материала, слой разбухает при контакте с водой и формирует продольный барьер, который исключает повреждение наружной оболочки и распространение влаги. На сложных участках кабельных трасс при прокладке используют кабели с индексом «у», которые имеют усиленную полиэтиленовую оболочку с продольными ребрами жесткости. Кабельной арматурой, которая состоит из элементов заводской сборки, комплектуются все кабели в нее входят изолирующие части и конуса (изготавливаемые из силиконовой резины), включая муфты (концевые наружной установки, для ввода в элегазовые КРУ и трансформаторы, соединительные).

- Концевые муфты в полимерном корпусе типа ОНVT-C

Область применения:

Предназначены для работы в любых климатических условиях. Муфты могут устанавливаться на кабели с полимерной изоляцией и любой конструкцией металлических оболочек и брони.

Особенности и преимущества конструкции:

- легкий и герметичный композитный корпус с возможностью выбора различных длин пути утечки (до 50 мм/кВ);
- болтовой механический наконечник со срывом головки;
- легкий монтаж даже без применения специальных монтажных приспособлений;
- перед заливкой в муфту отсутствует нагрев масла;
- установка возможна под углом 45 градусов;
- возможность установки на все существующие конструкции кабеля с использованием системы ввода и герметизации на основе термоусаживаемых компонентов;
- комплексное решение по защите кабельной линии совместно с ОПН производства Тайко;

- муфты комплектуются дополнительными оптоволоконными наборами для кабеля с интегрированным оптоволоконном;
- испытаны в соответствии со стандартами МЭК 60840 и IEEE 48.

Элементы конструкции (рисунок 1.9):

1 Конус выравнивания напряженности электрического поля из силиконовой резины, его эластичность позволяет производить легкий монтаж без использования специальных инструментов.

2 Полимерный изолятор, произведенный на основе стекловолоконной технологии (GFR), с внешней изоляцией из силиконовой резины, наложенной непосредственно на цилиндр.

3 Пространство между кабельной изоляцией, КВНЭП и изолятором заполняется сверху силиконовым маслом.

4 Крышка изолятора из коррозионностойкого сплава.

5 Двойная система герметизации, увеличивающая монтажные допуски и сохраняющая высокую степень уплотнения.

6 Болтовой механический наконечник со срывом головки, который применяется для многопроволочных и цельнотянутых алюминиевых и медных жил. Монтаж наконечника не требует специальных инструментов.

7 Плита основания из коррозионностойкого сплава и опорные изоляторы для секционирования и возможности проведения испытания оболочки.

8 Система ввода и герметизации, фиксирующая экран кабеля и броню. Система адаптирована к кабелям с различными типами экрана, оболочки и брони.

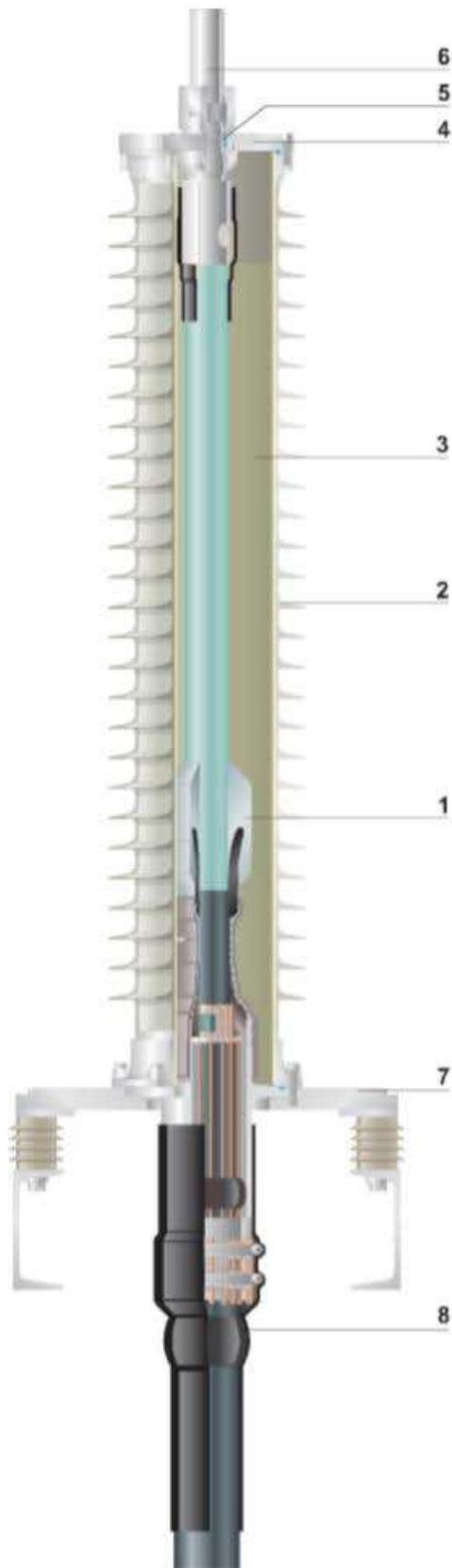


Рисунок 1.9 - Концевая муфта в полимерном корпусе типа OHVT-C

В таблице 1.5 представлены технические характеристики муфт.

Таблица 1.5 – Технические характеристики муфт типа ОНVT-C

Описание	Параметр	ОНVT-145С					ОНVT-170С				
		(-2А)	(-3А)	(-4А)	(-4В)	(-4С)	(-1А)	(-3А)	(-4А)	(-4В)	(-4С)
Наибольшее рабочее напряжение, Um	кВ	145					170				
Амплитуда грозового импульса	кВ	650					750				
Максимальный диаметр изоляции кабеля	мм	97					108				
Максимальное сечение обычного кабеля	мм <sup>2</sup>	2500					2500				
Максимальный угол наклона		45°					45°				
Диаметр по юбкам, G	мм	294		308			345			355	
Длина пути утечки	мм	3392	3829	4684	6100	8047	3829	4273	5272	5746	9436
Высота, L	мм	1871	2051	1796	2180	2708	2128	2324	2714	2156	2954
Примерный объем силиконового масла	л	37	42	35	46	60	64	69	85	64	103
Примерный вес	кг	105	115	119	130	165	259	270	292	264	318
Максимальное усилие на изгиб	кН	5	3	3,6	3	2,4	4	4	4	4	4

• Сухие концевые муфты типа ОНVT-D

Область применения:

Предназначены для работы в тяжелых климатических условиях. Конструкция муфты не содержит изоляционных жидкостей. Муфты предназначены для кабелей с пластмассовой изоляцией и различными типами экранов, брони и оболочек.

Особенности и преимущества конструкции:

- легкий и герметичный композитный корпус;
- легкий монтаж без использования специальных монтажных приспособлений;
- сухая конструкция без использования масла;
- самонесущая конструкция, которая не требует дополнительных поддерживающих изоляторов;
- болтовой механический наконечник со срывом головки;
- быстрый и легкий монтаж, объединяющий разъемную технологию с полимерным корпусом;

- штекерная часть может быть смонтирована на кабеле и затем установлена в приемном изоляторе, что облегчает установку как кабеля, так и изолятора, требует меньшей разделки кабеля по сравнению с маслонаполненными муфтами;

- возможность установки на все существующие конструкции кабеля с использованием системы ввода и герметизации на основе термоусаживаемых компонентов;

- муфты комплектуются дополнительными оптоволоконными наборами для кабеля с интегрированным оптоволоконном;

- испытаны в соответствии со стандартами МЭК 60840 и IEEE 48.

Элементы конструкции (рисунок 1.10):

1 Контактный фитинг, изготовленный из коррозионностойкого сплава.

2 Болтовой механический наконечник со срывом головки. Применяется для многопроволочных и цельнотянутых алюминиевых и медных жил. Его монтаж не требует специальных инструментов.

3 Полимерный корпус со встроенным мультиконтактным разъемом. Корпус фиксируется на поддерживающей конструкции с помощью металлического основания.

4 Конус выравнивания напряженности электрического поля из силиконовой резины. Его эластичность позволяет легко выполнить монтаж без использования специальных инструментов.

5 Металлическое подпружиненное компрессионное кольцо для создания необходимого контактного усилия и плотного прилегания конуса ВНЭП к изолятору.

6 Плита основания из коррозионностойкого сплава и опорные изоляторы для секционирования и возможности проведения испытания оболочки.

7 Опорный изолятор основания.

8 Система ввода и герметизации, фиксирующая экран кабеля и броню. Система адаптирована к кабелям с различными типами экрана, оболочки и брони.



Рисунок 1.10 - Сухие концевые муфты типа OHVT-D

В таблице 1.6 представлены технические характеристики муфт.

Таблица 1.6 – Технические характеристики муфт типа OHVT-D

Описание	Параметр	OHVT-145D
Наибольшее рабочее напряжение, Um	кВ	145
Амплитуда грозового импульса	кВ	650
Максимальный диаметр по изоляции	мм	78
Максимальное сечение кабеля	мм <sup>2</sup>	1200
Длина пути утечки	мм	4680
Высота	мм	1883
Примерный вес	кг	130
Максимальное усилие на изгиб	кН	5

- Штекерные муфты сухого исполнения типа PHVS, PHVT

Область применения:

Компактные штекерные муфты сухого исполнения предназначены для подключения кабельных линий к элегазовым распределительным устройствам (PHVS) и трансформаторам (PHVT). Муфта легко разъединяется и состоит из штекерной части и эпоксидного изолятора. Изолятор устанавливается в КРУЭ или трансформатор на заводе-изготовителе оборудования. В случае коротких кабельных длин, из-за небольшого веса кабеля и штекерной части, они могут быть поставлены на монтажную площадку предустановленными, что снижает время монтажа.

Особенности и преимущества конструкции:

- легкий монтаж без использования специальных монтажных приспособлений;
- принцип «сухого» соединения без использования масла;
- болтовой механический наконечник со срывом головки;
- герметизация кабеля на основе термоусаживаемой технологии;
- герметичный эпоксидный изолятор рассчитан на подключение к КРУЭ;
- муфты рассчитаны для работы в изоляционных жидкостях так и в среде элегаза;
- размеры эпоксидного изолятора соответствуют МЭК 62271-209;
- монтаж изолятора и кабеля легче и пространство для монтажа меньше, чем для маслонаполненных штекерных муфт;

- штекерная часть монтируется на кабеле; установка в изолятор может производиться позднее, при условии защиты штекерной части специальными защитными устройствами от влаги и механических повреждений;

- муфты комплектуются дополнительными оптоволоконными наборами для кабеля с интегрированным оптоволоконном;

- штекерная часть и изолятор испытаны на соответствие стандарту МЭК 60840.

Элементы конструкции (рисунок 1.11):

1 Антикороновый экран легко устанавливается на муфте для использования в изолирующих жидкостях (поставляется по запросу для муфт PHVT).

2 Адаптер для обеспечения размеров в соответствии с разделом 7.1 МЭК 62271-209 для маслonaполненных штекерных муфт (поставляется по запросу).

3 Болтовой механический наконечник со срывом головки. Применяется для многопроволочных и цельнотянутых алюминиевых и медных жил. Для монтажа не требуется специальных инструментов.

4 Эпоксидный изолятор со встроенным токопроводящим электродом обеспечивает газо- и маслонепроницаемое подключение муфты к оборудованию. Изолятор удерживается с помощью фиксирующего кольца (7).

5 Конус выравнивания напряженности электрического поля из силиконовой резины. Его эластичность позволяет производить легкий монтаж без использования специальных инструментов.

6 Металлическое подпружиненное компрессионное кольцо для создания необходимого контактного усилия и плотного прилегания конуса ВНЭП к изолятору.

7 Металлическое фиксирующее кольцо для крепления корпуса эпоксидного изолятора к распределительному устройству или трансформатору.

8 Система ввода и герметизации выполнена в виде кабельного сальника для различных типов экрана и брони. Система также обеспечивает фиксацию оболочки кабеля.

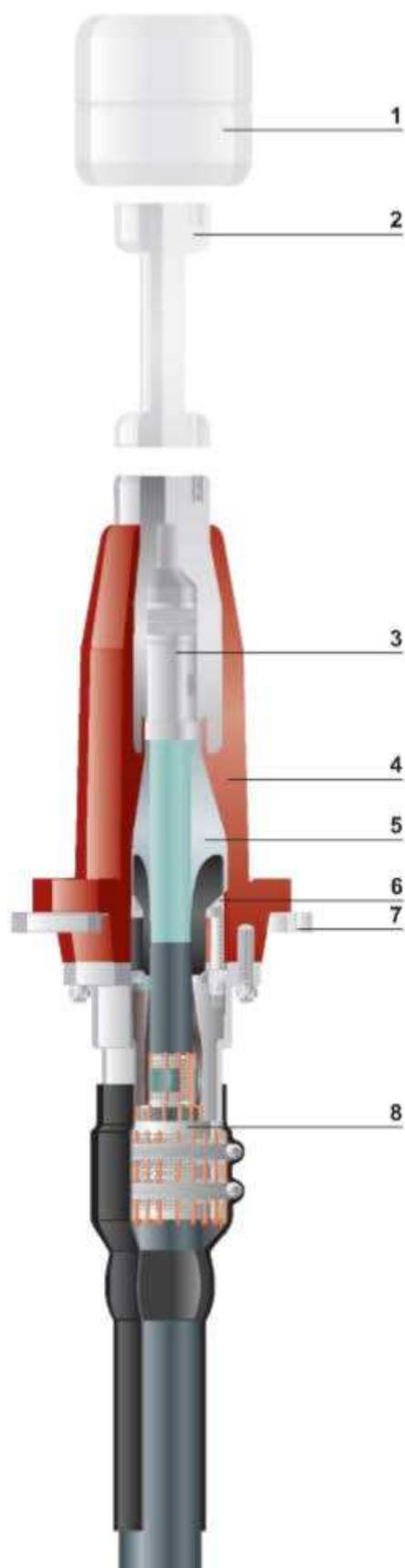


Рисунок 1.11 – Штекерные муфты сухого исполнения типа PHVS, PHVT

В таблице 1.7 представлены технические характеристики муфт.

Таблица 1.7 - Технические характеристики муфт сухого исполнения типа PHVS, PHVT

Описание	Параметр	КРУЭ PHVS-145	Трансформатор PHVT-145
Наибольшее рабочее напряжение, Um	кВ	145	145
Амплитуда грозового импульса	кВ	650	650
Длина (длина с адаптером)	мм	470 (757)	470 (757)
Вес изолятора (вес штекерной части)	кг	35 (24)	37 (24)
Действующее давление элегаза (SF6)	бар	3,5 – 8,5	нет
Максимальный диаметр изоляции кабеля	мм	78	78
Максимальное сечение кабеля	мм <sup>2</sup>	1200	1200

- Соединительные и транспозиционные муфты типа EHVS

Область применения:

Соединительные муфты типа EHVS имеют трехкомпонентную конструкцию, обладающую преимуществами при разделке кабеля и монтаже. Конструкция транспозиционной муфты типа EHVS-SB может быть применена для различных схем транспозиции и дополнительного заземления. Муфты предназначены для кабелей с пластмассовой изоляцией различной конструкции с оптоволоконном и без него, различными типами экранов, брони и оболочек.

Особенности и преимущества конструкции:

- легкий монтаж без использования специальных монтажных приспособлений;
- болтовой механический соединитель со срывом головки;
- интегрированная защита от проникновения влаги с использованием термоусаживаемой технологии;
- одна и та же конструкция используется для прямого соединения экранов, разрыва экранов и транспозиции;
- для кабеля с интегрированным оптоволоконном муфты комплектуются дополнительными оптоволоконными наборами;
- короткая длина разделки кабеля и установленной муфты;
- отсутствует необходимость снятия дополнительного участка оболочки для парковки корпуса муфты;

- возможность соединения кабелей разных сечений и конструкций;
- муфты испытаны в соответствии с МЭК 60840 и IEEE 404.

Элементы конструкции (рисунки 1.12-1.13):

1 Болтовой механический соединитель со срывом головки. Используется для многопроволочных алюминиевых и медных жил, может быть модифицирован для цельнотянутых жил. Не требуется специального инструмента для установки соединителя.

2 Кабельный адаптер из силиконовой резины. Предназначен для использования на различных диаметрах изоляции кабеля, создавая участок соединения с одинаковым диаметром по длине. Благодаря высокой эластичности не требуются специальные монтажные приспособления для натягивания адаптеров при их установке. Встроенный проводящий конус с точно определенной геометрией обеспечивает выравнивание электрического поля в адаптерах.

3 Силиконовый корпус с высокой степенью эластичности может быть установлен без специальных монтажных приспособлений. Благодаря трехкомпонентной конструкции возможно соединение кабелей с различными сечениями. Корпус и адаптеры создают клетку Фарадея в зоне соединителя.

4 Внутренний экран (Клетка Фарадея).

5 Конус выравнивания напряженности электрического поля.

6 Полупроводящий слой на силиконовом теле муфты, восстанавливающий полупроводящий экран кабеля.

7 Медная сетка, восстанавливающая металлический экран кабеля.

8 Соединение проволок экрана.

9 Герметик.

10 Термоусаживаемая изоляционная трубка, обеспечивающая герметизацию смонтированной муфты.

11 Термоусаживаемая манжета с интегрированной защитой от проникновения влаги.

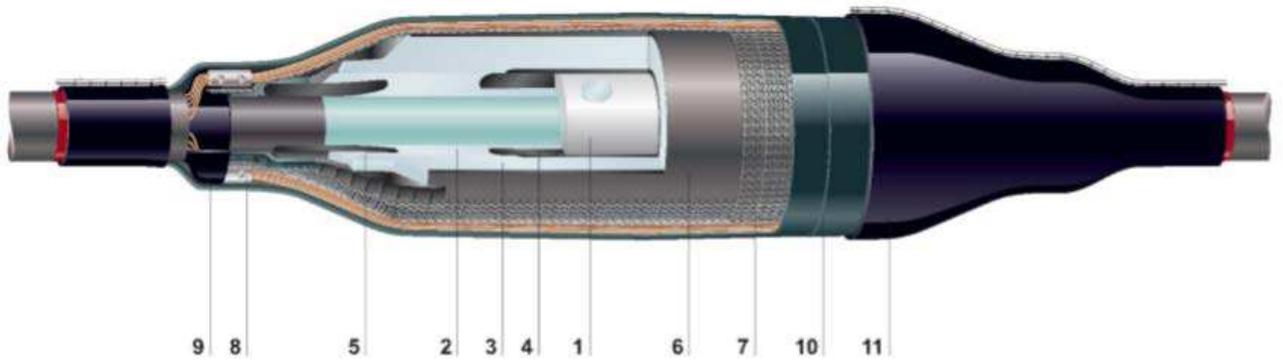


Рисунок 1.12 – Соединительная муфта

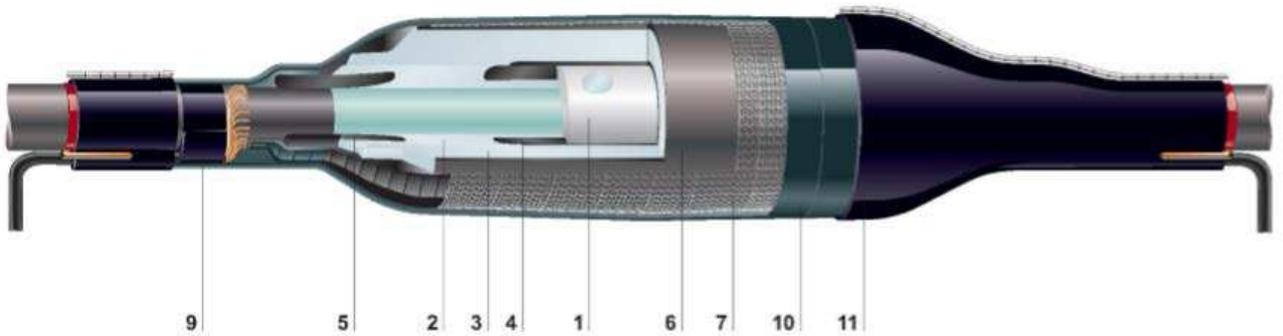


Рисунок 1.13 – Транспозиционная муфта

В таблице 1.8 представлены технические характеристики муфт.

Таблица 1.8 – Технические характеристики соединительных и транспозиционных муфт типа EHVS

Описание	Параметр	Соединительная муфта		Транспозиционная муфта	
		EHVS-145TWI	EHVS-170TWI	EHVS-145TWS	EHVS-145TWS
Максимальное длительное напряжение, Um	кВ	145	170	145	170
Амплитуда грозового импульса	кВ	650	750	650	750
Длина	мм	2000	2000	2000	2000
Длина основного корпуса вместе с адаптерами	мм	1150	1150	1150	1150
Диаметр	мм	200	250	200	250
Примерный вес	кг	40	50	40	50
Максимальный диаметр по изоляции	мм	83	110	83	110
Максимальное сечение кабеля	мм <sup>2</sup>	1600	2500	1600	2500

Кабельные линии из СПЭ обеспечивают надежное электроснабжение, минимальный землеотвод и максимальное сохранение окружающей среды, поэтому в последнее время кабельные линии высокого и сверхвысокого напряжения из СПЭ широко используются при организации глубоких вводов в центральные районы больших городов мира. Сооружение кабельных линий требует меньших капитальных вложений за счет усовершенствования технологии изготовления кабелей, их монтажа и прокладки. В настоящее время затраты на сооружение подземных высоковольтных кабельных линий в разы превышают вложения на сооружение воздушных линий, но при учете эксплуатационных и экономических факторов (меньшие потери и издержки при техническом обслуживании, высокая надежность, минимальный землеотвод) преимущество существенно увеличивается в пользу кабелей с изоляцией из СПЭ [7].

Можно сделать вывод, что замена маслonaполненных кабельных линий на кабельные линии с изоляцией из СПЭ необходима в связи со следующими преимуществами [8]:

- большая пропускная способность за счет более высокой допустимой температуры жилы (у кабелей с изоляцией из СПЭ, в зависимости от условий прокладки, допустимые токи нагрузки больше на 1500%, в сравнении с МНК);
- наименьший радиус изгиба, диаметр и вес, что позволяет легко прокладывать кабель на сложных трассах и в кабельных сооружениях;
- меньшие издержки при эксплуатации, в сравнении с МНК высокого давления при эксплуатации которых требуется обслуживающий персонал и сложная система контроля масла;
- высокий ток термической стойкости при коротком замыкании;
- использование полимерных материалов для оболочки и изоляции предоставляет возможность вести прокладку кабеля при отрицательных температурах без предварительного подогрева;
- при монтаже кабелей с изоляцией из СПЭ не требуется заморозка масла жидким азотом, что снижает трудозатраты и стоимость работ;

- отсутствие вредного воздействия масла на окружающую среду;
- твердая изоляция упрощает прокладку на трассах с большой разницей уровней, в вертикальных и наклонных коллекторах;
- пожаробезопасность;
- отсутствие жидких компонентов (масла под давлением) для подпитки которых требуется дорогостоящее оборудование, следовательно, это снижает эксплуатационные расходы;
- низкая удельная повреждаемость (на 2-3 порядка ниже, чем у МНК);
- обеспечение глубокого ввода электроэнергии в города, где сооружение воздушных линий электропередач невозможно или затруднено.

При сооружении кабельных линий большое значение имеет строительная длина кабеля, в большей степени зависящая от веса кабеля. В таблицах 1.9 - 1.11 приведены характеристики СПЭ и МНК – кабелей.

Таблица 1.9 – Номинальный наружный диаметр и расчетная масса МНК

Номинальный наружный диаметр кабеля, мм, марок			Расчетная масса кабеля, кг/км, марок		
МНАШ <sub>в</sub>	МНАШ <sub>ву</sub>	МНС	МНАШ <sub>в</sub>	МНАШ <sub>ву</sub>	МНС
120	50,2	56,8	54,2	4435	4899
150	54,4	59,2	56,6	5004	5488
185	55,0	59,8	57,2	5454	5944
240	56,9	61,7	59,1	6053	6599
270	56,8	61,6	59,0	6441	6946
300	64,0	68,8	59,8	7264	7829
350	65,6	70,4	61,4	8049	8626
400	66,6	71,4	62,2	8651	9238
500	69,6	74,4	65,4	9962	10575
550	72,0	76,8	67,6	10534	11168
625	72,4	77,2	68,0	11434	12089
800	85,4	85,4	75,0	14024	14730

Таблица 1.10 – Номинальное сечение и расчетная масса СПЭ-кабелей

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Расчетная масса, кг/км				
	АПвЭВ, АПвЭГВ	АПвЭВнг, АПвЭГВнг	АПвЭВнгд, АПвЭГВнгд	АПвЭгаВ	АПвЭгаВнг
240	3980	3990	4570	4130	4140
300	4470	4490	4960	4620	4640
350	4670	4690	5290	4820	4840

Продолжение таблицы 1.10

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Расчетная масса, кг/км				
	АПвЭВ, АПвЭгВ	АПвЭВнг, АПвЭгВнг	АПвЭВнгд, АПвЭгВнгд	АПвЭгаВ	АПвЭгаВнг
400	4980	5010	5650	5150	5180
500	5520	5550	6230	5680	5710
630	5920	5940	6680	6090	6110
800	6880	6920	7690	7060	7100

Таблица 1.11 – Наружный диаметр СПЭ-кабелей

Номинальное сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Наружный диаметр, мм, кабелей марок	Наружный диаметр кабелей, мм			
		АПвЭВнг, АПвЭВнгд, АПвЭгВнг, АПвЭгВнгд, АПвЭП, АПвЭгП, ПвЭВ, ПвЭгВ, ПвЭВнг, ПвЭВнгд, ПвЭгВнг, ПвЭгВнгд, ПвЭП, ПвЭгП	АПвЭгаВ, АПвЭгаВнг, АПвЭгаВнгд, ПвЭгаВ, ПвЭгаВнг, ПвЭгаВнгд, ПвЭгаП	АПвЭПу, АПвЭгПу, ПвЭПу, ПвЭгПу	АПвЭгаПу, ПвЭгаПу
240	18,3	64	65	67	68
300	20,6	67	68	70	71
350	22,1	68	69	71	72
400	23,7	70	71	73	74
500	26,5	74	75	76	77
630	30,0	75	76	77	78
800	34,0	80	81	83	84

Сопоставляя данные таблиц, можно сделать вывод, что вес кабеля с изоляцией из СПЭ почти в два раза меньше, чем вес МНК при одинаковом наружном диаметре, следовательно, строительная длина кабеля с изоляцией из СПЭ почти в два раза больше, чем длина МНК (таблица 1.12).

Таблица 1.12 – Расчетная длина кабеля с изоляцией из СПЭ на барабане

Номер барабана	Расчетная длина кабеля на барабане, м при наружном диаметре кабеля				
	65мм	70мм	75мм	80мм	85мм
22а	545				
22б	300	260	225	195	175
25	790	680	590	520	460
26	1040	895	780	685	605

Для МНК строительная длина составляет 200-800 м.

Радиус внутренней кривой изгиба кабеля с изоляцией из СПЭ при прокладке должен быть не менее  $16D$ , а МНК -  $30D$ . При исследовании основных параметров кабеля, таких как:

- радиус изгиба при прокладке, вес и диаметр;
- плотность односекундного тока короткого замыкания;
- эксплуатационные затраты и стоимость строительства;
- допустимый нагрев в послеаварийном режиме;
- простота монтажа;
- относительная диэлектрическая проницаемость.

На основании выше перечисленного, можно провести сравнительный анализ кабелей с изоляцией из СПЭ и МНК. Их достоинства и недостатки приведены в таблицах 1.13 - 1.14.

Таблица 1.13 – Достоинства и недостатки МНК

Достоинства	Недостатки
Относительно невысокая стоимость	Низкая экологическая безопасность
Устойчивы к старению	Пожароопасность
	Сложность монтажа и ремонта
	Повышенные требования к эксплуатации
	Большие расходы на эксплуатацию (необходимость установки дополнительных подпитывающих устройств)
	Наличие жидких компонентов

Таблица 1.14 – Достоинства и недостатки кабелей с изоляцией из СПЭ

Достоинства	Недостатки
Большая пропускная способность	Более высокая стоимость
Низкий вес, наименьший диаметр	Обязательный температурный контроль с целью сохранения эксплуатационных характеристик
Возможность применения больших строительных длин	
Более широкий диапазон температур	
Экологически более безопасны	
Уменьшение издержек на эксплуатацию	
Низкая удельная повреждаемость	

Таким образом, можно сделать вывод, что при необходимости передачи большой мощности, кабели с изоляцией из СПЭ имеют большое преимущество, в сравнении с МНК. Кабели с изоляцией из СПЭ довольно активно применяются на рынке в течение последних лет. На данный момент имеется очень мало статистических данных об авариях и их повреждаемости, что говорит о высокой надежности кабеля

## **2 Принцип работы распределенного датчика температур. Виды систем температурного мониторинга. Анализ выбранной системы температурного мониторинга**

### **2.1 Принцип работы распределенного датчика температур**

При распределенном волоконно-оптическом методе измерения кабель является линейным датчиком, представляющим собой непрерывный распределенный чувствительный элемент на всем своем протяжении. Полупроводниковый лазер в оптоволоконном кабеле используется для определения места изменения температуры и метод основывается на эффекте Рамана. При изменении температуры, изменяется структура оптоволокна. Когда свет от лазера попадает в область изменения температуры, то он взаимодействует с измененной структурой оптоволокна и помимо прямого рассеяния света, появляется отраженный свет.

Блок обработки измеряет скорость распространения и мощность как прямого, так и отраженного света и определяет место изменения температуры. При длине волны 1550 нм используется импульсный режим генерации с ограничением мощности лазера 10 мВт. Благодаря тому, что свойства оптического световода можно варьировать в широких диапазонах, существует множество типов волокон, каждый из которых по своим свойствам удовлетворяет определенным требованиям, в зависимости от применения. Физические воздействия на волокно, такие как давление, деформация, температурное изменение, влияют на свойства световода в месте воздействия и можно, измерив изменение свойств волокна в данной точке, вычислить параметры окружающей среды. В общем случае волоконный световод состоит из двух концентрических слоев: ядра (сердцевина) и оптической оболочки. Оптическая световедущая часть может защищаться слоем из акрилата, пластика, армированной оболочки в зависимости от применения данного кабеля [9].

Преимущества волоконно-оптических датчиков:

- небольшие размеры;

- очень высокая скорость отклика на изменение параметров среды;
- небольшой вес;
- возможность одновременной регистрации одним датчиком нескольких параметров;
- надежность;
- очень широкий температурный рабочий диапазон;
- небольшая цена за единицу длины измерительной линии;
- высокая чувствительность;
- большое время эксплуатации;
- высокое пространственное разрешение;
- устойчивость к химическому воздействию и агрессивным средам;
- не подвержены влиянию электромагнитного возмущения;
- чувствительная часть сенсора не требует подключения к линиям электропередачи.

Использование эффекта комбинационного рассеяния (КР) света (или эффект Рамана) является одним из способов измерения температуры вдоль оптического волокна, который был открыт еще в конце 1920-х годов независимо друг от друга советскими физиками Ландсбергом и Мандельштамом и индийским физиком Раманом. Согласно теории КР света, этот процесс сопровождается заметным изменением частоты рассеиваемого спектра, то есть если источник испускает монохроматический свет, то в спектре рассеянного излучения обнаруживаются дополнительные линии, число и расположение которых тесно связано с молекулярным строением вещества. При КР преобразование первичного светового потока обычно сопровождается переходом рассеивающих молекул на другие вращательные и колебательные уровни энергии, причем частоты новых линий в спектре рассеяния являются комбинациями частоты падающего света и частот колебательно-вращательных переходов рассеивающих молекул. Если молекула вещества перешла из основного состояния в возбужденное, тогда спектре КР проявляются линии, имеющие значительно большую длину волны по сравнению с источником света

(называемый стокс). Также возможен и обратный процесс, когда молекула в результате КР переходит из возбужденного в основное состояние (называемый антистокс). Таким образом, если в оптоволокно входит лазерный импульс с несущей частотой  $\nu_0$ , то в спектре обратного рассеянного света будет наблюдаться центральный пик на несмещенной частоте  $\nu_0$  и два дополнительных пика, смещенных на частоту  $\nu$ :  $\nu_s = \nu_0 - \nu$  (стокс) и  $\nu_{as} = \nu_0 + \nu$  (антистокс). При этом, заселенность возбужденного уровня напрямую зависит от температуры вещества, следовательно, и интенсивность антистоксовой компоненты будет проявлять температурную зависимость. На рисунке 2.1 представлен спектр комбинационного рассеяния.

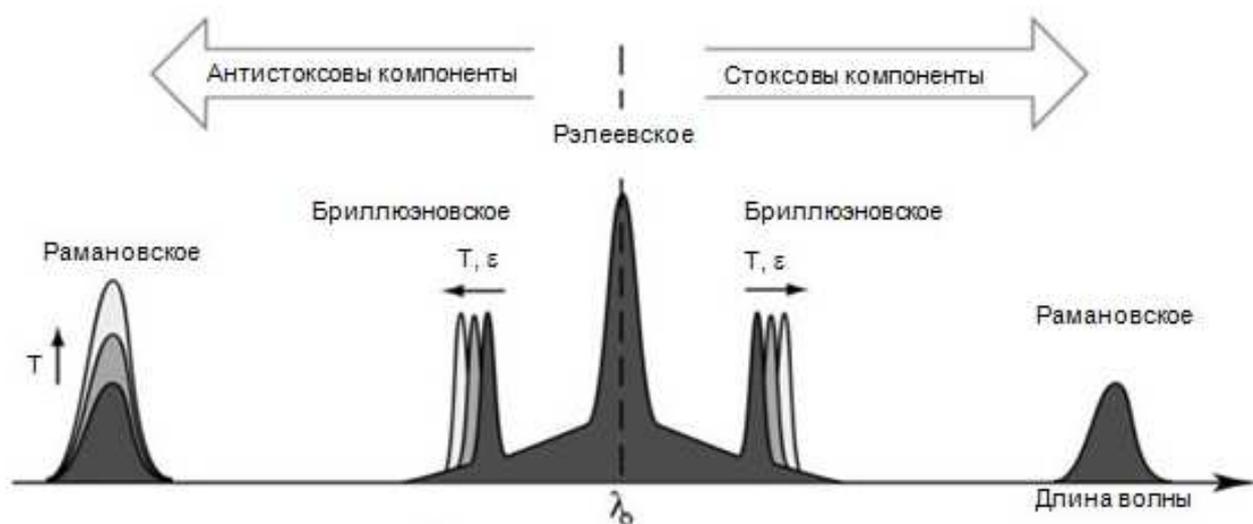
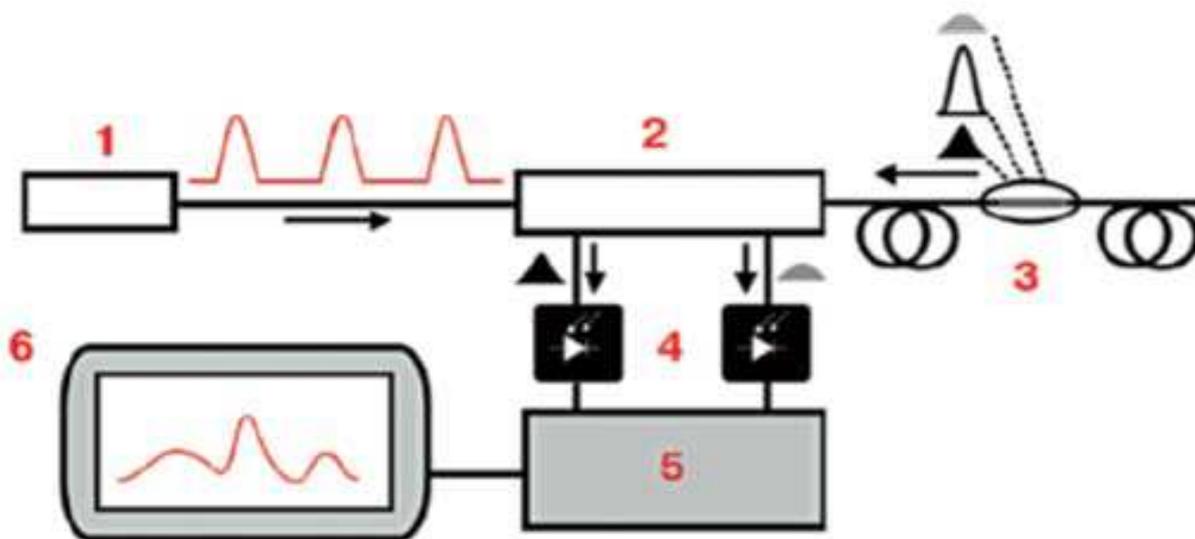


Рисунок 2.1 – Спектр комбинационного рассеяния

В основном информация о температуре содержится в антистоксовой компоненте, однако из-за слабой интенсивности эту линию рассеяния едва видно. Приемлемые характеристики датчика достигаются при помощи мощного импульсного источника опроса, высокочувствительной системы регистрации и сложных методов обработки сигнала. В настоящее время существует много систем распределенного контроля температуры, которые активно продаются в мире.

На рисунке 2.2 приведена упрощенная схема температурного датчика на основе КР. Лазерные импульсы с частотой несколько кГц заводятся в

оптоволоконную линию длиной, состоящую из одномодового или многомодового волокна. Место, где конкретно произошло рассеяние можно определить место при помощи регистрации времени прибытия обратно-рассеянного излучения, когда в каждой точке оптоволоконного кабеля происходит КР света. КР в обратном направлении, проходя через спектральный фильтр, разделяется на стоксовую и антистоксовую компоненты и перенаправляется на два высокочувствительных фотодиода, данные с которых поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и далее на компьютер, где эти сигналы обрабатываются и вычисляется температура [10].



1 - импульсный лазер, 2 - система фильтрации оптического сигнала, 3 - чувствительное волокно, 4 - фотодиоды, регистрирующие соответствующие компоненты рассеяния, 5 - АЦП, 6 - блок обработки и индикации

Рисунок 2.2 – Схема регистрации комбинационного рассеяния

## 2.2 Виды систем температурного мониторинга

В данный момент на технологическом рынке представлены системы температурного мониторинга следующих компаний:

### 1 Omnisens DITEST (Швейцария)

Принцип работы анализатора основан на измерении частотных характеристик вынужденного рассеяния Бриллюэна импульсного лазерного

излучения, распространяющегося в оптическом волокне. Частота рассеянного излучения сдвинута относительно частоты исходного излучения на величину, пропорциональную скорости акустических волн, распространяющихся в оптическом волокне, линейно зависящую от температуры и механической деформации среды распространения. При использовании одномодовых оптических волокон со специальным покрытием возможный диапазон измерений температуры может составлять от -200 до +700 °С с разрешением в 0,1 °С. Измерения распределения температуры и деформации осуществляются с использованием временного анализа, сходного с радиолокационным анализом. В оптическое волокно запускается лазерный импульс, и мощность вернувшегося рассеянного излучения записывается как функция времени. Таким образом, определяются температура и деформация в каждой точке оптического волокна по всей его длине. В таблице 2.1 приведены технические характеристики системы DITEST [11].

Таблица 2.1 – Технические характеристики системы DITEST

Наименование характеристики	Значение характеристики
Технические параметры:	
Диапазон измерений температуры, °С	от -273 до +700
Точность измерения температуры, °С	0,1
Время измерения температуры, сек	от 10
Пространственное разрешение, м	0,1
Максимально возможная длина линии, км	до 50
Волоконно-оптический кабель датчика	Single mode (одномодовое)
Рабочие условия эксплуатации:	
Температура окружающего воздуха, °С	от 0 до +40
Относительная влажность окружающего воздуха, %	не более 90
Габариты, мм (длина × ширина × высота)	449 × 500 × 266
Масса, кг	21

## 2 LIOS DTS (Германия)

Разработанный компанией «LIOS Technology» температурный датчик Рамана Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) работает в частотном диапазоне, а не во временном, как техника Raman Optical Time Domain Reflectometry (OTDR). При методе OFDR получают информацию о локальном

изменении температуры, если сигнал обратного рассеивания, обнаруженный на протяжении всего времени измерения, измеряется как функция частоты и в комплексе (комплексная передаточная функция), а затем подвергается преобразованию Фурье. Значительно более высокое отношение сигнал / шум (чем при использовании импульсной техники) достигается при помощи режима квазинепрерывного излучения лазера и узкополосного обнаружения оптического сигнала обратного рассеивания, которые являются существенными преимуществами техники OFDR. Данное техническое преимущество позволяет использовать недорогостоящие электронные блоки для передачи сигналов и недорогие полупроводниковые лазерные диоды. К недостаткам можно отнести технически сложное измерение комбинационного рассеиваемого света (комплексное измерение в соответствии с величиной и фазой) и высокая затратная часть из-за блока преобразования Фурье, необходимого для обработки сигнала и с более высокими требованиями к линейности электронных блоков и компонентов. В таблице 2.2 приведены технические характеристики системы LIOS DTS [12].

Таблица 2.2 – Технические характеристики системы LIOS DTS

Наименование характеристики	Значение характеристики
Технические параметры:	
Диапазон измерений температуры, °С	от -30 до +350
Точность измерения температуры, °С	1
Время измерения температуры, сек	от 10
Пространственное разрешение, м	1
Максимально возможная длина линии, км	до 40
Тип оптического волокна	Multi mode (многомодовое)
Рабочие условия эксплуатации:	
Температура окружающего воздуха, °С	от -10 до +60
Относительная влажность окружающего воздуха, %	не более 95
Габариты, мм (длина × ширина × высота)	131 × 483 × 338
Масса, кг	13

### **3 BARTEC RedGuard (Германия)**

В системе для измерения температуры использован сенсорный кабель типа SD в полиуретановой оболочке. Такой кабель измеряет температуру

электронного оборудования, делает адресацию датчиков и передает данные на вычислительные блоки. Между датчиками можно выбирать различные фиксированные расстояния от двух до двадцати метров. Один блок обработки результатов может контролировать сенсорный кабель длиной до 2 км. Сенсорный кабель типа SD состоит из плоского 8-полярного ленточного провода. У кабеля есть два избыточных провода для передачи данных, адресации, массы и питания. Плоские ленточные кабели защищают две дополнительные оболочки. Внешние полиуретановые оболочки оптимизируют химическую и механическую устойчивость, внутренние оболочки кабелей из термопластичных эластомеров создают барьер для влаги. В таблице 2.3 приведены технические характеристики системы RedGuard [13].

Таблица 2.3 – Технические характеристики системы RedGuard

Наименование характеристики	Значение характеристики
Технические параметры:	
Диапазон измерений температуры, °С	от -55 до +125
Точность измерения температуры, °С	2
Время измерения температуры, сек	от 5
Пространственное разрешение, м	2
Максимально возможная длина линии, км	до 2
Тип сенсорного кабеля	SD (полиуретан)
Рабочие условия эксплуатации:	
Температура окружающего воздуха, °С	от -25 до +65
Относительная влажность окружающего воздуха, %	не более 90
Габариты, мм (длина × ширина × высота)	241 × 160 × 90
Масса, кг	7

#### **4 ООО «СЕДАТЭК» ПТС-1000 (Россия)**

В системе для измерения температуры используется температурный датчик Рамана OTDR. За счёт использования последних научных разработок в области волоконной оптики и уникального программно-аппаратного комплекса российского разработчика система типа ПТС имеет отличные технические характеристики при сопоставимой стоимости с западными аналогами. В таблице 2.4 приведены технические характеристики системы ПТС - 1000 [14].

Таблица 2.4 – Технические характеристики системы ПТС – 1000

Наименование характеристики	Значение характеристики
Технические параметры:	
Диапазон измерений температуры, °С	от -40 до +300
Точность измерения температуры, °С	1,5
Время измерения температуры, сек	от 15
Пространственное разрешение, м	1
Максимально возможная длина линии, км	до 40
Тип оптического волокна	Multi mode (многомодовое)
Рабочие условия эксплуатации:	
Температура окружающего воздуха, °С	от -40 до +50
Относительная влажность окружающего воздуха, %	не более 95
Габариты, мм (длина × ширина × высота)	600 × 2010 × 800
Масса, кг	120

### 5 000 «Инверсия-Сенсор» ASTRO (Россия)

В системе для измерения температуры также используется температурный датчик Рамана OTDR. В таблице 2.5 приведены технические характеристики системы ASTRO [15].

Таблица 2.5 – Технические характеристики системы ASTRO

Наименование характеристики	Значение характеристики
Технические параметры:	
Диапазон измерений температуры, °С	от -55 до +300
Точность измерения температуры, °С	1
Время измерения температуры, сек	от 10 сек
Пространственное разрешение, м	0,5
Максимально возможная длина линии, км	до 90
Тип оптического волокна	Multi mode (многомодовое)
Рабочие условия эксплуатации:	
Температура окружающего воздуха, °С	от +10 до +40
Относительная влажность окружающего воздуха, %	не более 90
Габариты, мм (длина × ширина × высота)	500 × 450 × 130
Масса, кг	12

Оперативное определение температурного профиля кабельной линии позволяет обслуживающему персоналу эффективно эксплуатировать линию, используя:

- Метод контроля температуры по оптическому рассеянию в отраженных сигналах, позволяет проводить оперативное измерение температурного профиля

на кабелях, имеющих большие длины, до 90 км. Это дает возможность при помощи одного прибора контролировать протяженные объекты или несколько объектов сразу, включив их последовательно.

- Знание температурного профиля кабельной линии позволяет оптимизировать ее загрузку, рационально учитывать реальные климатические условия и локальные особенности пролегания всех участков кабельной линии.

- Поскольку оптоволоконной системой производится измерение температуры под оболочкой кабельной линии, в программном обеспечении мониторинга производится перерасчет на температуру токоведущей жилы кабеля, определяется переходный процесс нагрева при скачке нагрузки. Особенно важно это для определения технической возможности передачи по кабельной линии дополнительной мощности, с учетом наиболее нагретого участка кабеля.

- При помощи системы ASTRO можно определять места возникновения и оценивать степень развития дефектов, сопровождающихся локальным разогревом отдельных участков контролируемой кабельной линии.

- Можно оперативно проводить определение мест обрыва кабельной линии после возникновения фатальных дефектов или аварийных динамических воздействий на кабель [16].

Система ASTRO является важным составным элементом системы мониторинга высоковольтных кабельных линий. Наиболее эффективной для этих целей является комплексная система оперативного мониторинга и диагностики состояния высоковольтных кабельных линий, которая включает в себя несколько подсистем.

Примером комплексного подхода к мониторингу кабельных линий является система КМК (Комплексный Мониторинг Кабельных линий) фирмы DIMRUS, которая включает в себя:

- Систему температурного мониторинга кабельной линии на основе использования оптического волокна марки ASTRO, являющуюся подсистемой контроля режимов работы и технологических параметров линии.

- Систему регистрации и анализа частичных разрядов в изоляции кабельной линии, например, типа CDR (фирмы DIMRUS), являющуюся диагностической подсистемой. При помощи этой подсистемы удается максимально эффективно выявлять зарождающиеся дефекты в изоляции кабельной линии на ранних стадиях их развития, что невозможно сделать при помощи системы температурного мониторинга.

- Систему контроля емкостных и уравнивающих токов в экранах контролируемой кабельной линии. Благодаря знанию текущих величин этих токов можно более корректно прогнозировать возможное увеличение нагрузки на кабельную линию.

Проанализировав выбранные в данной работе системы распределенного контроля температуры, в процессе сравнения установлено, что технические характеристики и способы представления информации во всех системах очень похожи. Однако система ASTRO, в составе системы КМК фирмы DIMRUS, имеет более расширенные возможности, например, система диагностики дефектов и их локация в изоляции по частичным разрядам, система контроля состояния оболочек по величинам токов в экранах кабельной линии. Учитывая все это, а также возможность мобильного решения задач, в своей работе я рекомендую к применению систему температурного мониторинга фирмы Инверсия-Сенсор ASTRO в составе системы КМК фирмы DIMRUS.

### **2.3 Анализ выбранной системы температурного мониторинга**

Для организации температурного контроля кабельной линии оптоволоконный датчик может быть интегрирован в зону экрана кабеля еще на этапе производства [17].

Плюсы: датчик находится максимально близко к жиле, температура которой наиболее важна, и сам датчик максимально защищен от повреждения.

Минусы: невозможность демонтажа волокна при его повреждении, а также то, что каждое соединение оптического волокна вносит затухание в сигнал.

При расположении оптоволоконного датчика снаружи он фиксируется к кабельной линии по всей протяженности силового кабеля. При прокладке фаз силового кабеля треугольником, оптоволоконный датчик обычно расположен посередине, внутри фаз. Максимальная длина высоковольтного кабеля, контролируемого системой температурного мониторинга, зависит от типа используемого датчика - оптического волокна и мощности лазера. При многомодовом оптическом волокне максимальная длина контролируемой кабельной линии составляет до 16км, при использовании одномодового волокна контролируемая длина кабельной линии возрастает до 90 км. Недостатком использования одномодового волокна является то, что при его применении ухудшается пространственное разрешение системы мониторинга. Если в первом случае оно составляет 1 метр, то для одномодового волокна длина элементарного участка составляет уже до 5 м. Также требуется лазер повышенной мощности. Для расширения эксплуатационных возможностей системы ASTRO и снижении затрат на систему мониторинга, прибор может поставляться со встроенным оптическим мультиплексором, имеющим в своем составе до 16 переключаемых оптических входов. Это дает возможность контролировать одним прибором несколько кабельных линий. Различные модификации системы ASTRO представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Модификации системы ASTRO

Марка	Волокно	Каналов, шт	Длина, км
E540	Мультимодовое	1	8
E543	Мультимодовое	8	8
E544	Мультимодовое	16	8
E580	Мультимодовое	1	16
E583	Мультимодовое	8	16
E584	Мультимодовое	16	16
E581	Одномодовое	2	90

Существуют различные способы монтажа системы ASTRO для кабельных линий различной длины. Если контролируемая кабельная линия имеет сравнительно небольшую длину, до нескольких километров, то оптические датчики температуры всех трех фаз могут быть включены последовательно, и

измерения температур всех фазных кабелей будут проводиться одновременно. При помощи программного обеспечения мониторинга профили температур отдельных фаз будут отображаться на графиках и в отчетах реальным образом. Если длина кабельной линии больше 2 – 3 км, то система ASTRO должна быть поставлена со встроенным оптическим мультиплексором, и тогда оптический датчик температуры каждой фазы кабельной линии может быть подключен к отдельному входу измерительного прибора системы, что повысит точность проводимых измерений, но в то же время увеличит время проведения измерений температуры. Если длина контролируемой кабельной линии превышает максимально возможные 16 км, то в этом случае два независимых измерительных прибора ASTRO можно устанавливать на разных концах кабельной линии, и тогда длина контролируемой линии может достигать до 32 км. На рисунке 2.3 представлены способы монтажа системы ASTRO.

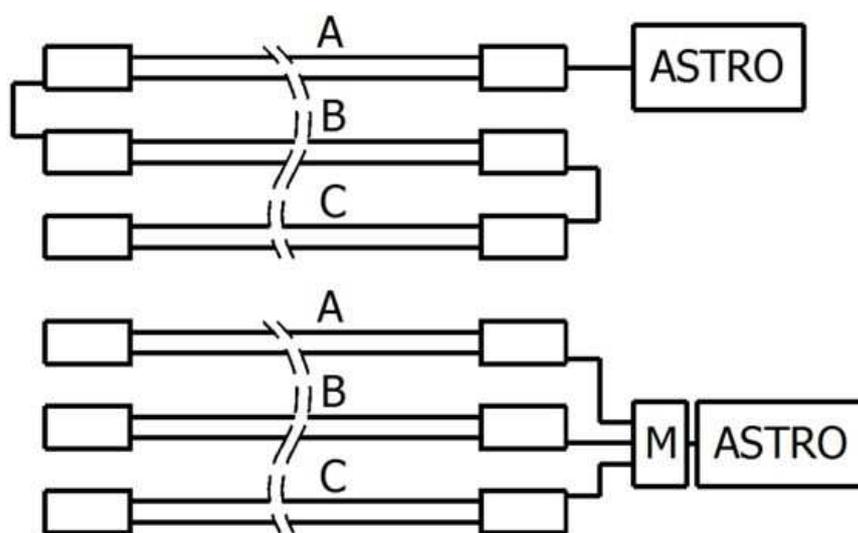


Рисунок 2.3 – Способы монтажа системы ASTRO

Мониторинг состояния изоляции кабельной линии производится по методу регистрации и анализа частичных разрядов. Он является наиболее эффективным методом оперативного контроля состояния и диагностики дефектов изоляции кабельных линий под рабочим напряжением является регистрация и анализ частичных разрядов в изоляции кабеля и муфт. Частичные разряды, по определению, «перекрывают только часть рабочего изоляционного

промежутка», поэтому, чаще всего, не являются аварийным дефектом, но практически всегда предшествуют фатальным повреждениям изоляции кабельных линий. Время от момента возникновения частичных разрядов до момента перехода частичного дефекта в дуговой разряд обычно достаточно для принятия персоналом управляющих воздействий на эксплуатацию кабельной линии.

Достоинства систем мониторинга частичных разрядов в кабельных линиях:

- высокая чувствительность метода диагностики по частичным разрядам к большинству дефектов в изоляции кабельной линии;
- возможность определения типа выявленного дефекта, степени его развития и опасности для дальнейшей эксплуатации кабельной линии;
- проведение оперативной локации места возникновения выявленных дефектов под рабочим напряжением в режиме «on-line» на работающей кабельной линии;

Недостатки использования систем мониторинга частичных разрядов в кабельных линиях:

- высокий уровень высокочастотных импульсных шумов в кабельных линиях, по параметрам соответствующих импульсам частичных разрядов, затрудняющий корректную оценку технического состояния и выявление дефектов в изоляции;
- необходимость использования специализированной экспертной диагностической системы для оценки состояния кабельной линии, так как ручная диагностика по частичным разрядам требует специальной подготовки персонала.

Измерение частичных разрядов в различном высоковольтном оборудовании может производиться датчиками трех типов, работающими в различных диапазонах частот:

- ультразвуковые микрофоны и пьезодатчики (U);

- высокочастотные трансформаторы тока и конденсаторы связи (HF);
- сверхвысокочастотные электромагнитные антенны (UHF).

Применительно к измерению частичных разрядов в высоковольтных кабельных линиях оптимальным является использование датчиков высокочастотного диапазона, особенно высокочастотных трансформаторов тока с ферритовыми сердечниками. Такие датчики серии RFCT (HFCT) легко монтируются на поводках заземления экранов кабельных линий, выведенных в муфтах. Самым важным является то, что такие датчики контролируют частичные разряды не только в самой муфте, но и в участке кабеля, отходящем от муфты. При этом длина контролируемого участка кабельной линии составляет не менее  $\pm 2000$  метров от места установки датчика, и зависит от типа кабеля и количества соединительных муфт. В таблице 2.7 приведены типы датчиков для измерения частичных разрядов.

Таблица 2.7 – Датчики для измерения частичных разрядов

Диапазон частот	Тип датчиков	Способ монтажа	Пространственное разрешение, м
U (ультразвук)	Пьезодатчики, микрофоны	Контактно и бесконтактно	$\pm 1$
HF (высокочастотные)	HF трансформаторы, конденсаторы связи	На земляных и токоведущих шинах	$\pm 2000$
UHF (сверхвысокочастотные)	Электромагнитные антенны	Бесконтактно	$\pm 20$

Эффективность работы системы мониторинга технического состояния изоляции кабельной линии по частичным разрядам в наибольшей мере зависит от того, насколько надежно удастся отстроиться от внешних помех. Все применяемые в оборудовании регистрации частичных разрядов способы отстройки от помех делятся на две группы – аппаратные и алгоритмические. Аппаратные средства отстройки от помех реализованы в электронных схемах регистрирующих приборов. Уже после использования аппаратных средств отстройки от помех производится преобразование импульсов частичных разрядов из аналоговой в цифровую форму. Наиболее часто применяемые

аппаратные средства – это «разборка» импульсов на входе каналов приборов по времени прихода, и метод сравнение амплитуд сигналов в различных точках контролируемого оборудования. Согласно рисунку 2.4, если первым приходит импульс от датчика 1, смонтированного на кабельной линии, то регистрируемый импульс возник в кабельной линии. Если все наоборот, то частичный разряд возник внутри КРУЭ. Чем больше в системе регистрации частичных разрядов реализовано способов и использовано средств отстройки от помех, тем выше эффективность ее применения.

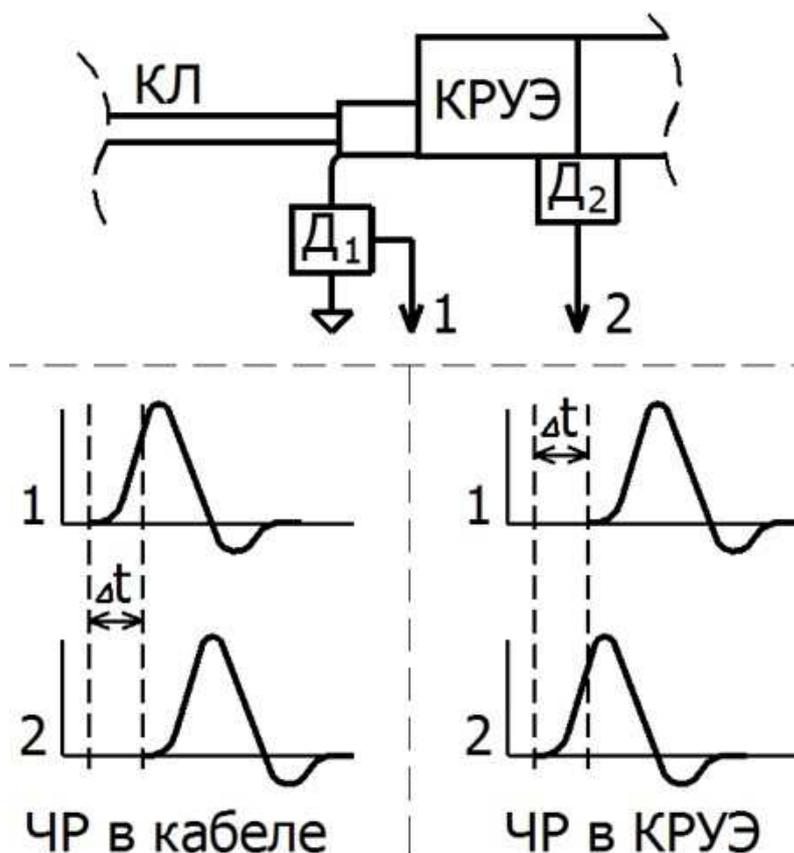


Рисунок 2.4 – Аппаратные средства при регистрации частичных разрядов

При регистрации и анализе частичных разрядов используются алгоритмические средства борьбы с помехами. Значительную часть внешних импульсных высокочастотных помех удается эффективно удалить из всей регистрируемой информации благодаря наличию прямой связи момента возникновения импульсов частичных разрядов с фазой высоковольтного питающего напряжения. Реальные импульсы частичных разрядов возникают

всегда в моменты роста синусоидально изменяющегося напряжения питающей сети, когда происходит постоянное повышение взаимных потенциалов между элементами диэлектрика в изоляции кабельной линии. Импульсы высокочастотных помех (например, помехи от сварочных работ), «похожие» на импульсы частичных разрядов, не связаны с синусоидой питающей сети, и на диаграмме будут представлены в виде равномерной шумовой полосы, и от которой можно достаточно легко отстроиться при помощи несложного алгоритма. На рисунке 2.5 представлены помехи при регистрации и анализе частичных разрядов.

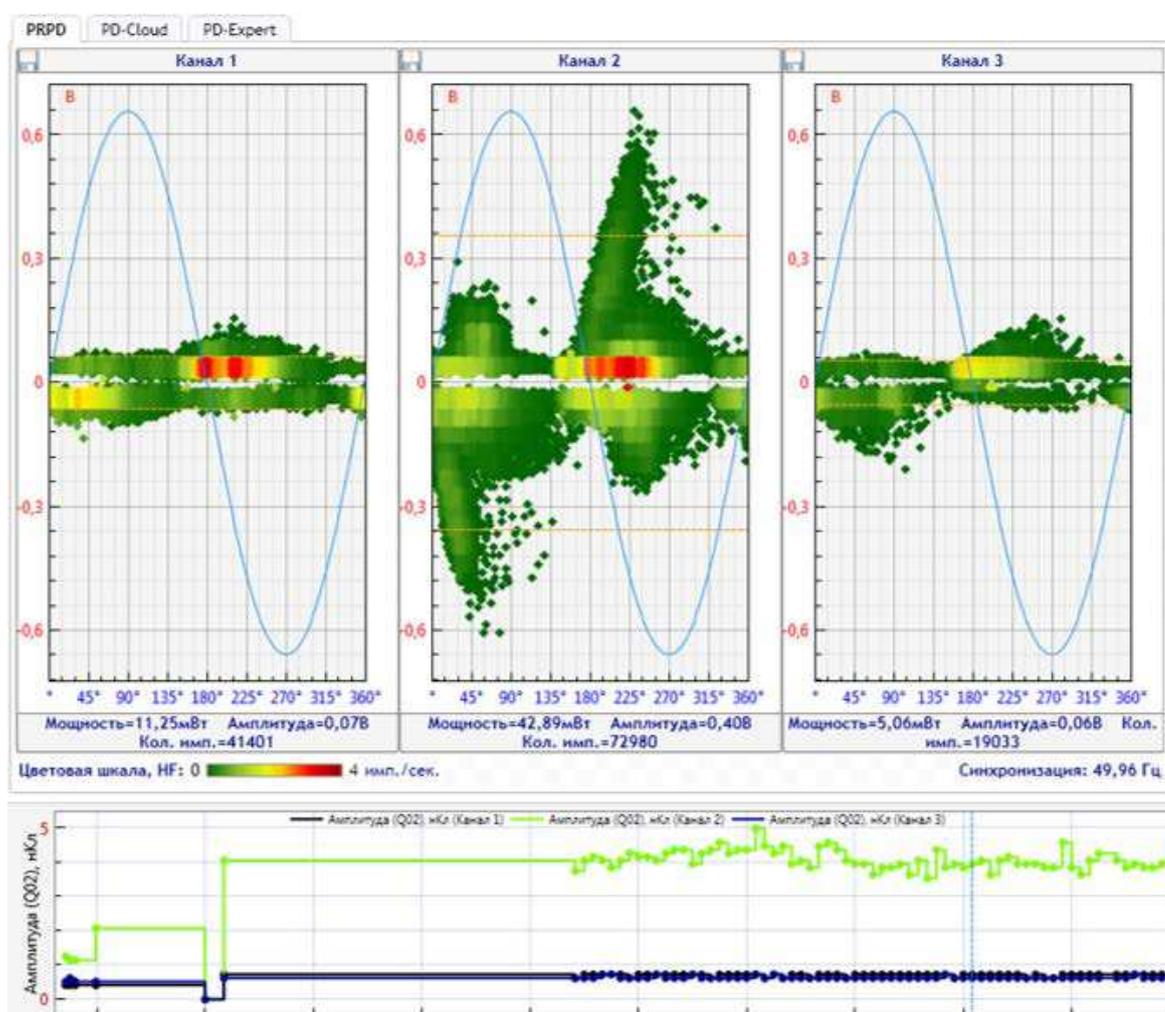


Рисунок 2.5 – Помехи при регистрации и анализе частичных разрядов

Определение типа дефекта в изоляции происходит на основании связи распределения частичных разрядов с фазой питающего напряжения. Каждому конкретному типу дефекта в изоляции практически однозначно соответствует

его образ, полученный на амплитудно-фазовом распределении импульсов частичных разрядов относительно фазы питающего напряжения. Такое распределение импульсов частичных разрядов в литературе обычно называется PRPD. Каждая автоматизированная экспертная диагностическая система имеет в своем составе библиотеку (базу) образов дефектов в изоляции, представленную в виде стандартных PRPD. Обычно база включает дефекты, возникновение которых возможно в данном оборудовании. Сравнивая полученное PRPD распределение с библиотекой образов можно достаточно точно определить тип дефекта, генерирующий частичные разряды в кабельной линии. На рисунке 2.6 при распределении частичных разрядов в кабельной линии есть признаки двух источников частичных разрядов – небольшой короны и «проводник под плавающим потенциалом». Оба они не представляют опасности для дальнейшей эксплуатации кабельной линии.

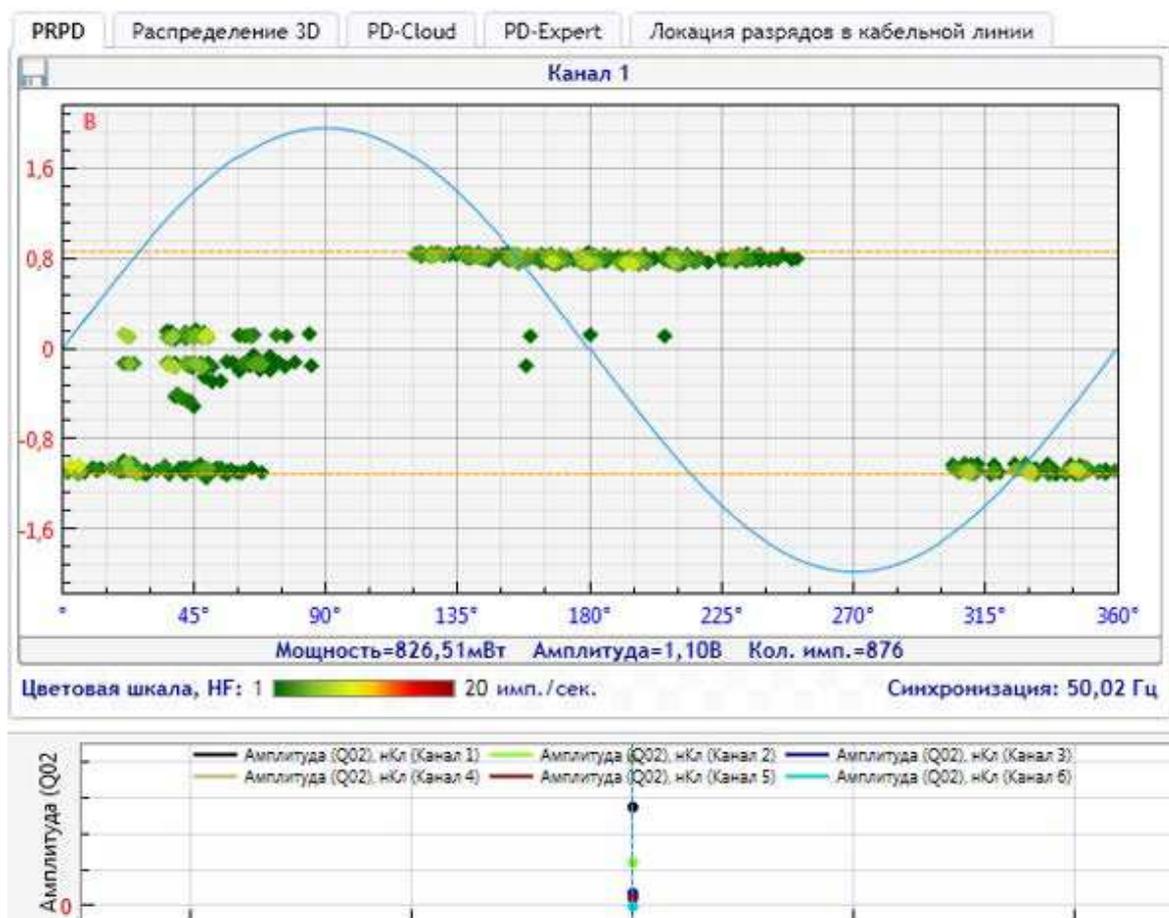


Рисунок 2.6 – Распределение частичных разрядов

На основании анализа параметров импульсов частичных разрядов происходит разделение нескольких дефектов в изоляции. Есть и более сложные способы графического и аналитического представления распределений импульсов частичных разрядов, предназначенные для фильтрации помех и разделения дефектов по типам и местам возникновения. Это широко известное распределение типа TF-Map, разработанное итальянской фирмой Tech Imp, и сравнительно новое распределение типа PD-Cloud, разработанное фирмой DIMRUS. Эти два графических распределения импульсов (2D и 3D типа), предназначены для использования в тех случаях, когда в контролируемой линии может быть два и более дефектов в изоляции, различающихся типом и местом возникновения. Все зарегистрированные импульсы частичных разрядов при помощи этих распределений по временным и частотным параметрам делятся на группы, после чего каждая группа импульсов диагностируется на тип дефекта при помощи стандартного PRPD распределения. На рисунке 2.7 представлены распределения типа TF-map и PD-cloud.

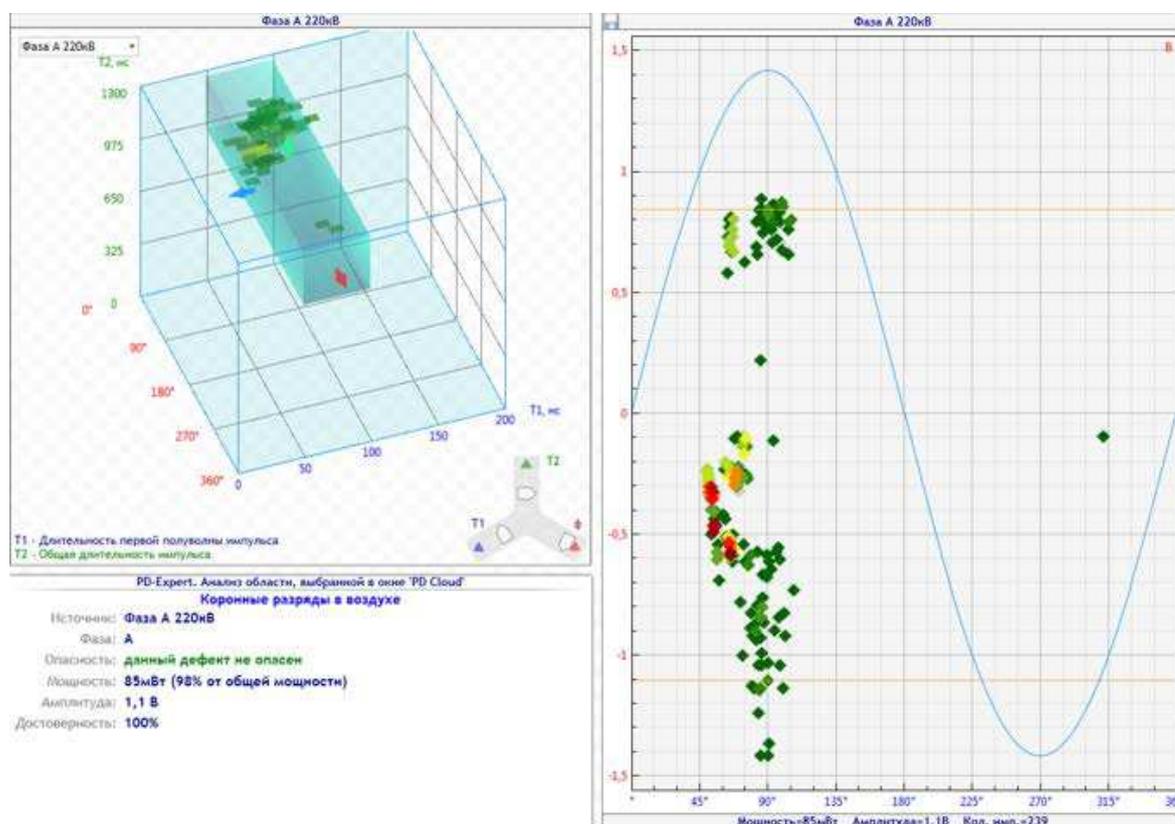


Рисунок 2.7 – Распределения типа TF-map и PD-cloud

Все алгоритмические решения, предназначенные для отстройки от помех, диагностики наличия дефектов, и определения их типов, для систем мониторинга и диагностики кабельных линий реализованы в автоматизированной экспертной системе PD-Expert (рисунок 2.8).

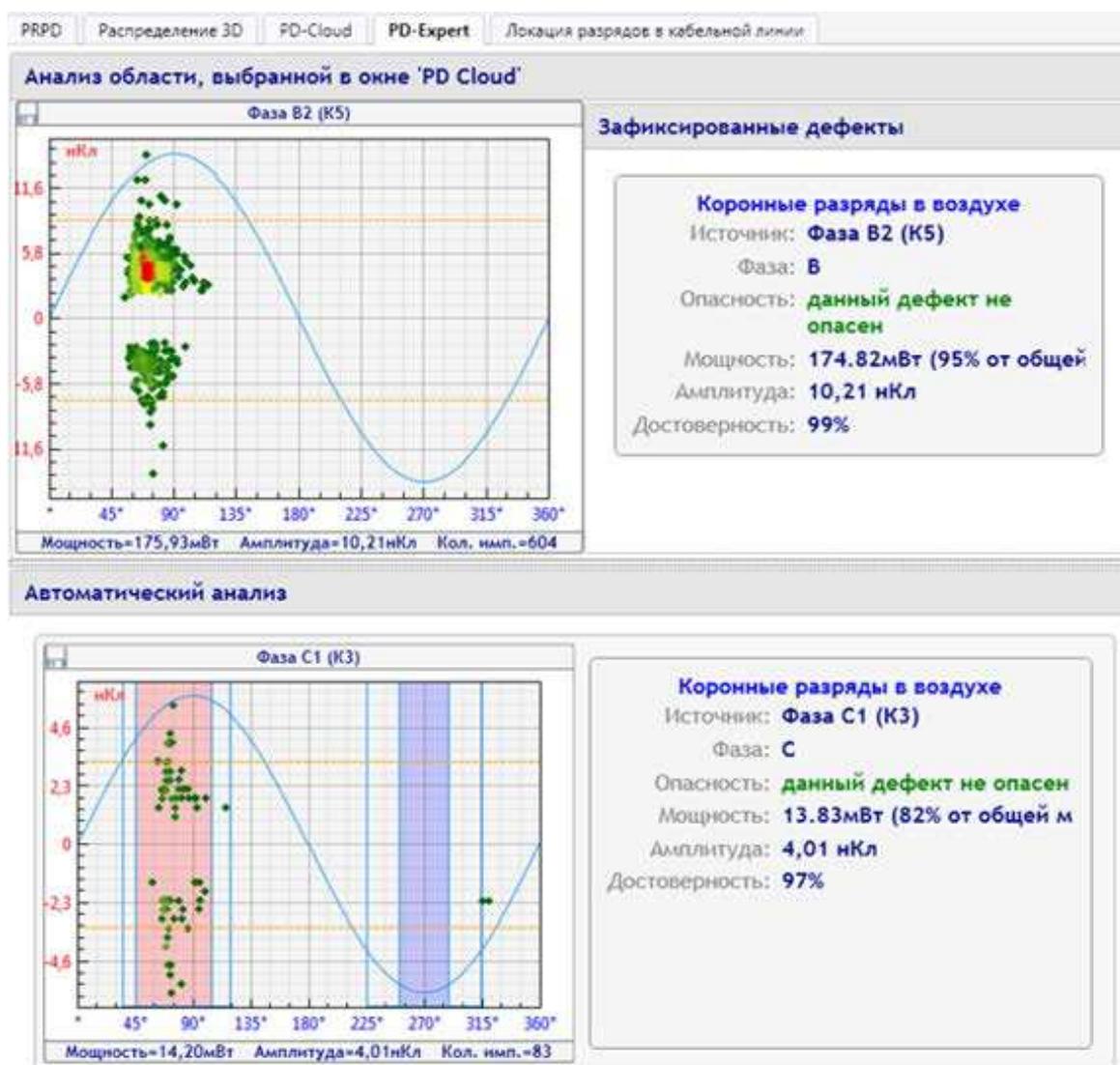


Рисунок 2.8 – Диагностика наличия дефектов и определения их типов в системе PD-Expert

При помощи этой системы, без прямого участия диагноста, выполняются все процедуры по обработке и анализу результатов замеров частичных разрядов в изоляции кабельных линий. Результаты работы системы представляются в виде готовых отчетов. Алгоритмы диагностики дефектов, учитывающие особенности конструкции и эксплуатации кабельных линий, поставляются в готовом виде.

При появлении у обслуживающего персонала достаточной диагностической квалификации и практического опыта эти алгоритмы могут быть уточнены, они не являются закрытыми.

Определение места возникновения дефекта в кабельной линии может быть проведено по методу рефлектографии (под рабочим напряжением), и по разнице времени прихода импульсов частичных разрядов к концам линии. Отличие метода частичных разрядов по рефлектографии от стандартного заключается в том, что в качестве тестирующего импульса используется не импульс от встроенного в прибор тестового генератора, а импульс частичного разряда, возникающего в зоне дефекта изоляции.

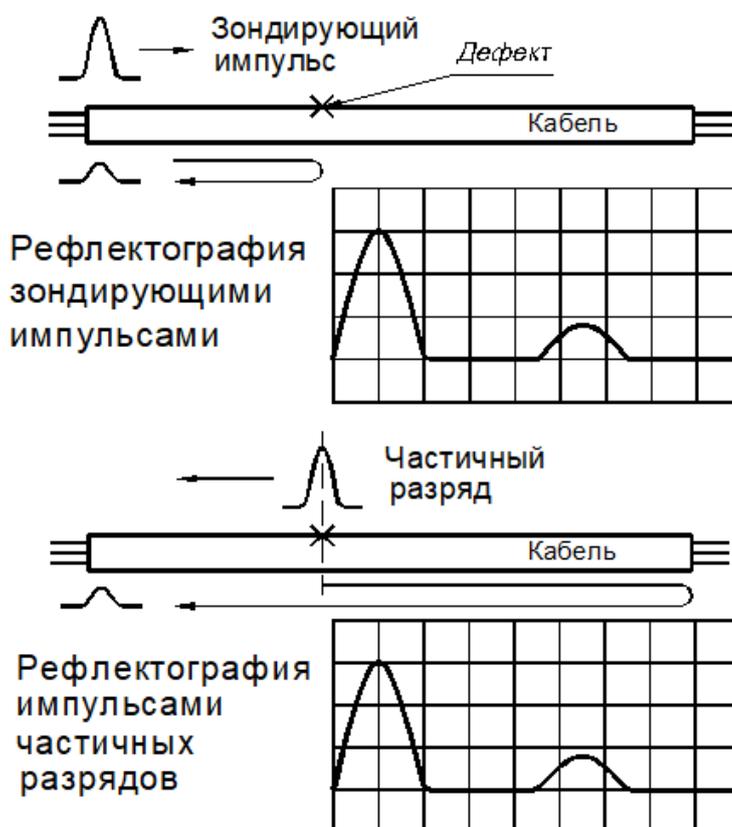


Рисунок 2.9 – Способы определения локации места возникновения дефектов изоляции

В месте наличия дефекта кабельной линии возникает частичный разряд, импульс от которого начинает распространяться по кабельной линии в обе стороны, в направлении концевых разделок кабельной линии (рисунок 2.9).

Прямой импульс будет сразу зарегистрирован прибором системы мониторинга. Противоположный импульс, приблизившись к правому концу кабеля отразится, и отраженный импульс, меньшей амплитуды, будет двигаться в обратном направлении. В тот момент, когда импульс придет к левому концу кабеля, он также будет зарегистрирован измерительным прибором. Разница во времени прихода импульса к прибору равняется удвоенному времени движения от места дефекта к противоположному концу кабельной линии.

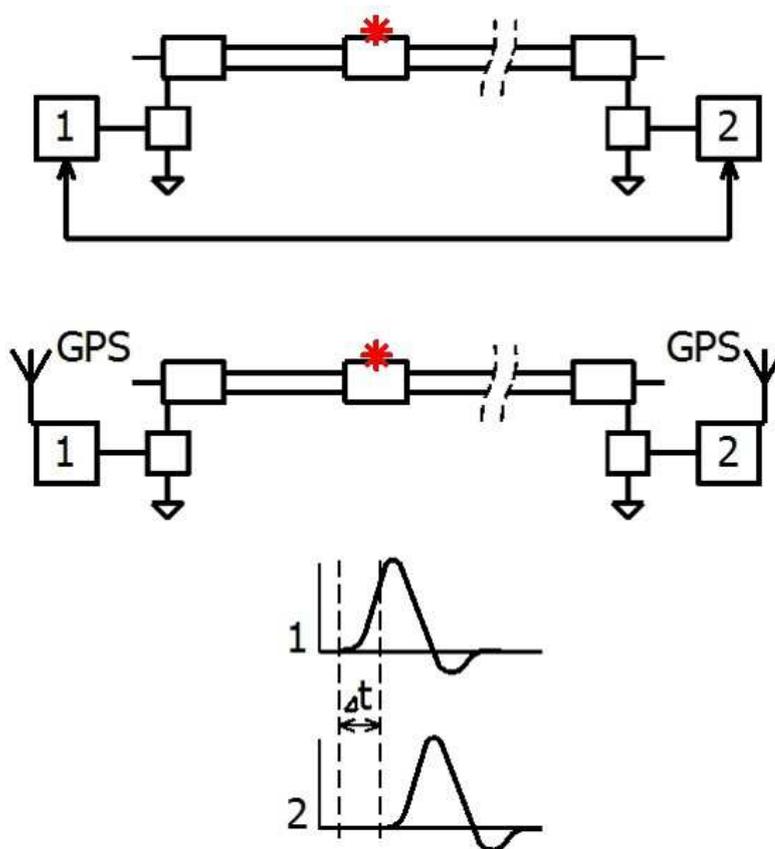


Рисунок 2.10 – Определение места возникновения дефекта по разнице времени прихода импульсов частичных разрядов к концам линии

Для достаточно длинных кабельных линий, у которых невозможно зарегистрирован отраженный от противоположного конца импульс из-за его затухания, определение места возникновения дефекта в кабельной линии производится по разнице времени прихода импульсов частичных разрядов к концам линии (рисунок 2.10). На двух концах кабельной линии устанавливают два регистрирующих прибора системы мониторинга, работающих синхронно.

Место возникновения дефекта рассчитывается по разнице времени прихода импульсов к измерительным приборам. Для обеспечения необходимой точности локации места возникновения дефекта оба регистрирующих прибора должны быть синхронизированы с очень высокой точностью. Для кабельных линий, в которых есть «свободное» встроенное оптическое волокно, синхронизацию можно осуществить при помощи этого волокна. Если такая возможность отсутствует, то синхронизировать приборы можно по сигналам системы точного времени GPS/GLONASS. Для этого в каждом измерительном приборе должен быть соответствующий приемник сигналов.

Использование датчиков для измерения частичных разрядов в системах мониторинга технического состояния изоляции кабельной линии позволяет своевременно подавать сигнал тревоги об аварийном участке кабельной линии, что дает возможность принять необходимые меры по устранению дефектов, таких как повреждения кабеля, обрыв волокна и возникновение аварийного тока в экране, которые могут привести к высоким затратам.

### **3 Комплексный подход к мониторингу кабельных линий**

#### **3.1 Организация комплексного мониторинга кабельных линий**

Наиболее эффективным является комплексный подход к диагностике, в котором информация от нескольких методов объединяется в едином диагностическом заключении. Фирмой DIMRUS поставляется комплексная система мониторинга марки КМК-500 (Комплексный Мониторинг Кабельных линий), предназначенная для контроля высоковольтных кабельных линий, которая включает в себя:

- Контроль температуры кабельной линии при помощи системы ASTRO с оптическим волокном. Она позволяет не только оценивать температурный режим работы, и проводить диагностику зон кабеля с повышенным нагревом, но и определять возможность увеличения нагрузки на линию.

- Выявление дефектов изоляции кабеля и муфт по частичным разрядам на ранних стадиях возникновения и развития, определение типа и опасности выявленного дефекта. Для этого используются диагностические приборы марок CDR (контроль состояния изоляции кабеля), и ADM (контроль состояния изоляции концевых и промежуточных муфт).

- Локализация места возникновения дефекта в изоляции на работающей кабельной линии на основании анализа формы и времени прихода «прямых» и «отраженных» импульсов частичных разрядов (системы CDR и CDM).

- Проведение оперативного контроля емкостных и уравнивающих токов, протекающих по броне кабельной линии при помощи CLM. Знание токов позволяет контролировать состояние оболочки, корректировать режимы работы контролируемой кабельной линии.

- Для более эффективного контроля кабельных линий, проводимого в режиме реального времени, используется двенадцати канальная система CDU-12. Она предназначена для непрерывного контроля технического состояния изоляции до 12 кабельных линий под рабочим напряжением, расположенных на одном объекте (КРУ). При необходимости система мониторинга марки CDU

может быть поставлена с большим количеством измерительных каналов. В качестве датчиков частичных разрядов в системе CDU-12 чаще всего используются высокочастотные трансформаторы тока марки RFCT-7, хотя могут быть использованы датчики и других типов. В системе мониторинга марки CDU-12 осуществляется контроль состояния изоляции высоковольтной кабельной линии на основе регистрации и анализа уровня частичных разрядов, и производится автоматическая локализация мест возникновения дефектов в изоляции, выявленных системой по частичным разрядам, как в муфтах, так и в самом кабеле. Встроенные в систему современные алгоритмы отстройки от помех реализованы на аппаратном уровне, позволяя устранить влияние до 95%, и более, внешних высокочастотных импульсов. Основное функциональное отличие системы мониторинга марки CDU-12 заключается в том, что в CDU-12 измерения частичных разрядов в кабельных линиях по всем 12 измерительным каналам производится непрерывно, в режиме реального времени. Использование непрерывного контроля позволяет повысить надежность и эффективность работы систем мониторинга, установленных на наиболее ответственных кабельных линиях. На рисунке 3.1 представлена система CDU для мониторинга состояния кабельных линий по частичным разрядам.

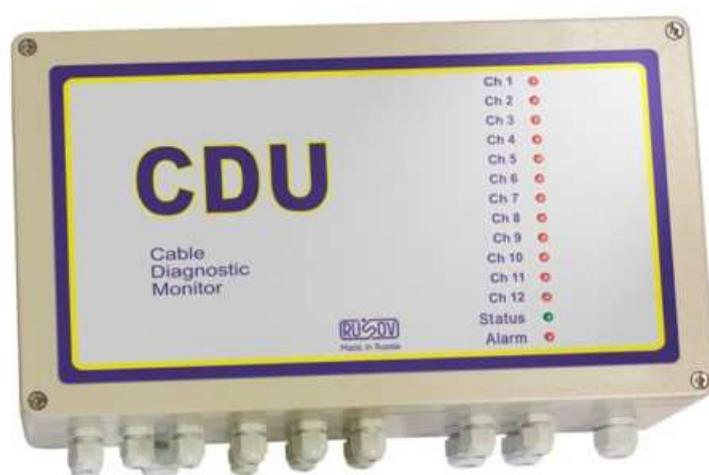


Рисунок 3.1 – Система CDU для мониторинга состояния кабельных линий по частичным разрядам

• Прибор марки CDR (рисунок 3.2) предназначен для организации мониторинга высоковольтных кабельных линий с рабочим напряжением до 500 кВ. Основные возможности системы:

- осуществляется непрерывный контроль состояния изоляции высоковольтной кабельной линии на основе метода регистрации и анализа уровня и распределения частичных разрядов. Определяется тип дефекта в изоляции и степень его развития;

- производится автоматическая локализация мест возникновения дефектов в изоляции, выявленных системой по частичным разрядам, как в муфтах, так и в самом кабеле. Уникальность этой важной диагностической функции в системе заключается в том, что она реализована для кабельной линии, находящейся под рабочим напряжением;

- производится непрерывное контактное измерение рабочей температуры фаз кабельной линии (концевых муфт), расположенных рядом с измерительным прибором системы мониторинга;

- контроль величины фазных токов утечки, протекающих по экрану кабельной линии. Появление уравнительных токов отрицательно сказывается на нагрузочной способности линии из-за увеличенной температурной нагрузки на изоляцию.



Рисунок 3.2 – Система CDR для мониторинга состояния кабельных линий до 500 кВ по частичным разрядам

С системой CDR можно использовать датчики двух типов, выбор зависит от конструкции и условий монтажа линии:

- Датчики марки CDR-S. Эти комплексные датчики частичных разрядов и температуры соединительных муфт монтируются непосредственно на поверхности кабеля. Датчик марки CDR-S обычно представляет собой гибкое металлизированное кольцо шириной до 200 мм, которыми оборачивается внешняя поверхность кабеля, рядом с концевой или соединительной муфтой. Благодаря такой разъемной конструкции монтаж датчика на кабеле не представляет большой сложности. Датчик работает в UHF (сверхвысокочастотном) диапазоне частот, поэтому имеет максимальную чувствительность к рядом расположенным дефектам. То есть он хорошо будет регистрировать частичные разряды в муфте, на которой он установлен, но к «удаленным дефектам» его чувствительность понижена. Это объясняется интенсивным затуханием высокочастотных импульсов в кабельной линии.

- Датчики марки RFCT-7. Это датчики трансформаторного типа, предназначенные для регистрации высокочастотных импульсов в проводе, заземляющем броню кабеля. Конструктивно датчик RFCT7 представляет собой две разъемные половинки, которые легко монтируются на проводниках заземления экрана кабеля, или корпуса соединительной муфты. Благодаря разъемной конструкции установка датчика RFCT-7 производится без разрыва цепей заземления. Датчик работает в HF (высокочастотном) диапазоне частот, поэтому он чувствителен к дефектам, которые могут располагаться от него на удалении до нескольких км. При этом чувствительность к «близким» дефектам у RFCT-7 будет ниже, чем у датчика CDR-S.

Особенности регистрации и анализа импульсов частичных разрядов в кабельных линиях, реализованные в системе CDR. В качестве устройства регистрации и анализа параметров кабельных линий в системе мониторинга CDR использован универсальный шестиканальный измерительный прибор. Это современный и эффективный прибор регистрации частичных разрядов. Его функциональными особенностями являются:

- Возможность регистрации импульсов частичных разрядов в очень широком диапазоне частот, от 50 кГц до 1 ГГц. Использование такого диапазона частот связано с тем, что импульсы частичных разрядов, перемещаясь по линии, уменьшаются по амплитуде и увеличиваются по длине. Если импульс возник рядом с датчиком, то его частота будет очень высокой, равной сотням МГц. Частота удаленного импульса может составлять «всего» сотни кГц. Чем длиннее линия, тем более низкочастотные импульсы частичных разрядов могут быть зарегистрированы в ней.

- В систему мониторинга марки CDR встроены два современных метода локации места возникновения дефекта в изоляции кабельной линии. Один работает независимо на основе анализа рефлектограмм распределения импульсов частичных разрядов в линии, а второй анализирует разницу по времени прихода высокочастотного импульса от дефекта к «концам» контролируемой кабельной линии.

- В системе CDR реализована экспертная диагностическая система PD-Expert, позволяющая в автоматическом режиме определять тип дефекта в изоляции, и степень его развития. Для реализации такого уникального набора функциональных возможностей в системе CDR использованы специфические технические решения:

Во-первых, это то, что регистрация импульсов частичных разрядов во всех шести измерительных каналах прибора CDR производится полностью синхронно. Только в этом случае возможна реализация всех вышеперечисленных диагностических алгоритмов.

Во-вторых, если система мониторинга создается для контроля нескольких кабельных линий, то ее приходится создавать, используя несколько приборов марки CDR. В этом случае задача синхронизации измерений частичных разрядов становится глобальной.

Такая синхронизация процессов регистрации частичных разрядов в удаленных друг от друга приборах может быть осуществлена двумя способами. При расстояниях до 1 км синхронизация осуществляется при помощи

оптических линий связи. По этим линиям будут посылаться синхронизирующие импульсы, а также проводиться обмен информацией. Если длина линии более одного км, или отсутствует возможность прокладки оптической линии, то измерения можно синхронизировать по сигналам системы GPS/GLONASS. Для этого во все приборы встроены приемники сигналов GPS.

На рисунке 3.3 приведена структурная схема системы мониторинга кабельной линии с двумя соединительными муфтами в каждой фазе. Полностью система мониторинга состоит из 4 приборов марки CDR и компьютера со специальным программным обеспечением. Поскольку расстояние не очень значительно, и существует техническая возможность прокладки оптической линии связи, то она используется для синхронизации процесса измерения.

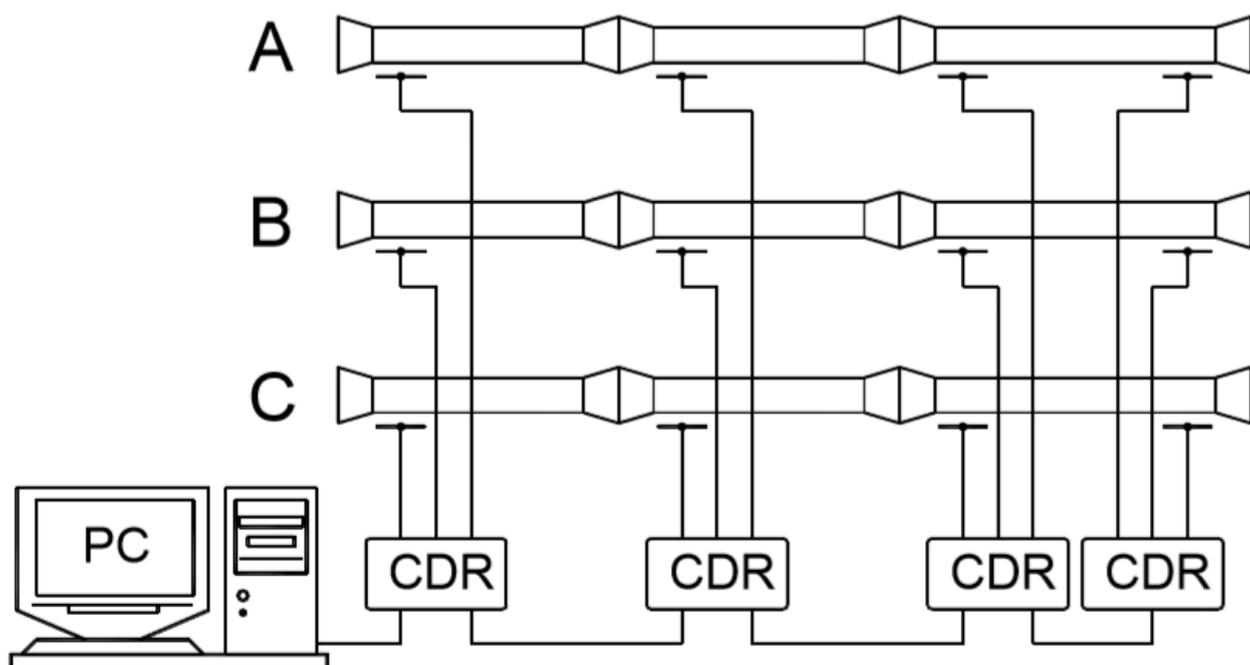


Рисунок 3.3 – Система мониторинга с оптоволоконной синхронизацией приборов между собой

Система мониторинга кабельной линии с синхронизацией по сигналам GPS приведена на рисунке 3.4. В ней для контроля состояния длинных кабельных линий и локализации мест возникновения дефектов используются сигналы системы глобального позиционирования GPS. Передача

информационных потоков в этом случае производится по обычным информационным каналам, которые на рисунке не показаны. Это доступные локальные сети предприятий, глобальные сети, и любые другие альтернативные каналы передачи информации.

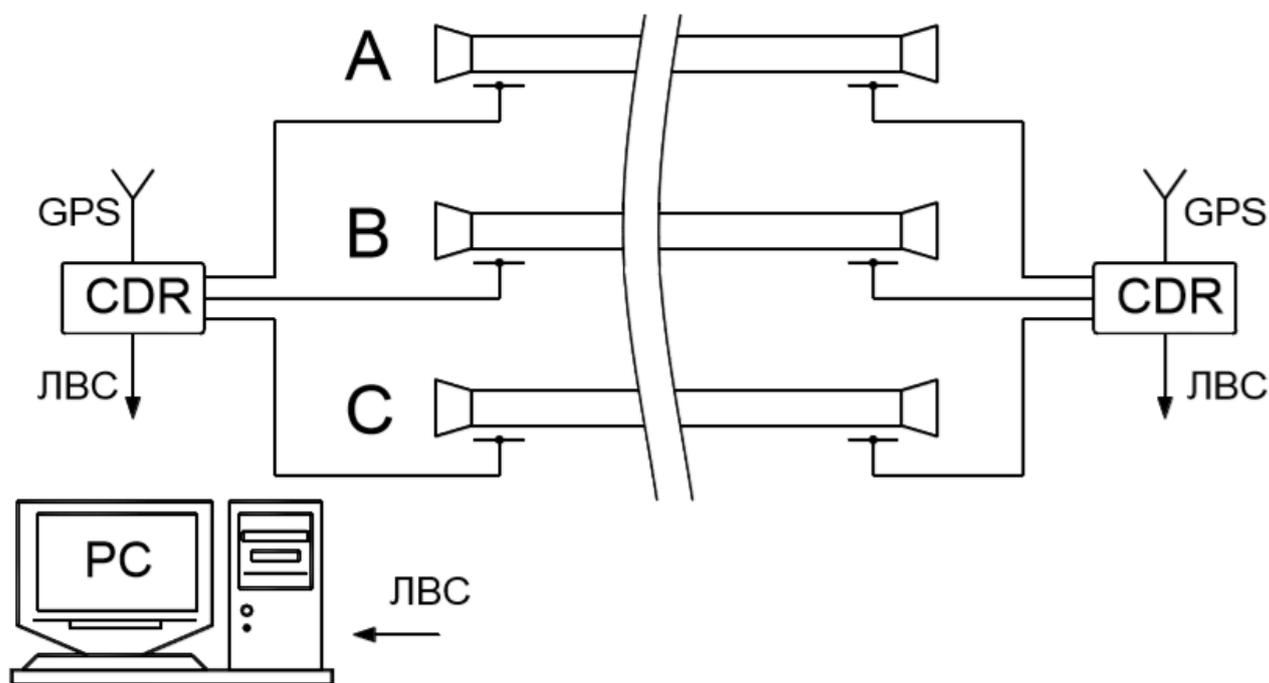


Рисунок 3.4 – Система мониторинга с синхронизацией приборов по сигналам системы GPS

Для осуществления общего мониторинга и диагностики, как одной линии, так и нескольких, в комплекте с приборами поставляется программное обеспечение марки iNVA.

В таблице 3.1 представлены технические данные системы CDR для мониторинга состояния кабельных линий.

Таблица 3.1 – Технические данные системы CDR

Параметр	Значение
Рабочее напряжение контролируемых кабельных линий, кВ	10 - 500
Способ контроля состояния изоляции	Частичные разряды
Количество контролируемых одной системой кабелей (фаз)	до 6
Длина контролируемых кабельных линий одним прибором, м	6000

### Продолжение таблицы 3.1

Параметр	Значение
Диапазон регистрируемых частичных разрядов, МГц	0,1 – 1000
Интерфейс связи с АСУ-ТП, RS-485	Оптоволокно
Синхронизация нескольких приборов	GPS, оптоволокно
Диапазон рабочих температур, без системы подогрева, °С	от -40 до +60
Габаритные размеры прибора мониторинга, мм	400 × 230 × 110
Вес прибора, кг	2,4

• Система ADM-9 предназначена для контроля изоляции высоковольтного оборудования по частичным разрядам при помощи акустических датчиков. При помощи системы мониторинга марки ADM-9 можно контролировать:

- состояние изоляции концевых и соединительных муфт кабельных линий;
  - состояние изоляции КРУЭ и КРУ различных модификаций;
  - состояние изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования
- силовых и измерительных трансформаторов, выключателей и т. д.

Система мониторинга ADM-9 (Acoustic Monitor) предназначена для оперативного контроля технического состояния и поиска дефектов изоляции высоковольтного оборудования под рабочим напряжением. В системе ADM-9 диагностика осуществляется на основе метода регистрации и анализа частичных разрядов, который имеет максимально высокую чувствительность при поиске дефектов в изоляции любого типа. Акустические датчики системы ADM-9 устанавливаются непосредственно на поверхности контролируемого оборудования, максимально близко к контролируемой зоне изоляции. Обычно это заземленные или изолированные поверхности, корпуса оборудования, на которых отсутствует высокий потенциал. При установке акустических датчиков применяются специальные средства, улучшающие акустический контакт с контролируемым объектом. На рисунке 3.5 представлена система ADM-9 для акустического мониторинга состояния муфт кабельных линий по частичным разрядам.



Рисунок 3.5 – Система ADM-9 для акустического мониторинга состояния муфт кабельных линий по частичным разрядам

При помощи системы мониторинга марки ADM9 эффективно решаются наиболее важные проблемы диагностики состояния оборудования, непосредственно влияющие на эксплуатацию высоковольтного оборудования:

- При помощи одного измерительного прибора марки ADM-9 может производиться контроль активности частичных разрядов в восьми различных точках оборудования, удаленных друг от друга на расстояние до 30 метров.

- Благодаря наличию функции синхронной регистрации сигналов по нескольким измерительным каналам, в приборе ADM-9 проводится локация места возникновения частичных разрядов внутри баков высоковольтного оборудования.

- На основании анализа полученной информации системой вырабатываются оперативные диагностические решения, и даются рекомендации о возможности дальнейшей эксплуатации оборудования.

Акустические датчики системы ADM-9 могут быть эффективно применены для контроля технического состояния концевых, а при

необходимости, и наличии технической возможности (наличии сетевого питания в этой зоне), и промежуточных соединительных муфт высоковольтных кабельных линий (рисунок 3.6).

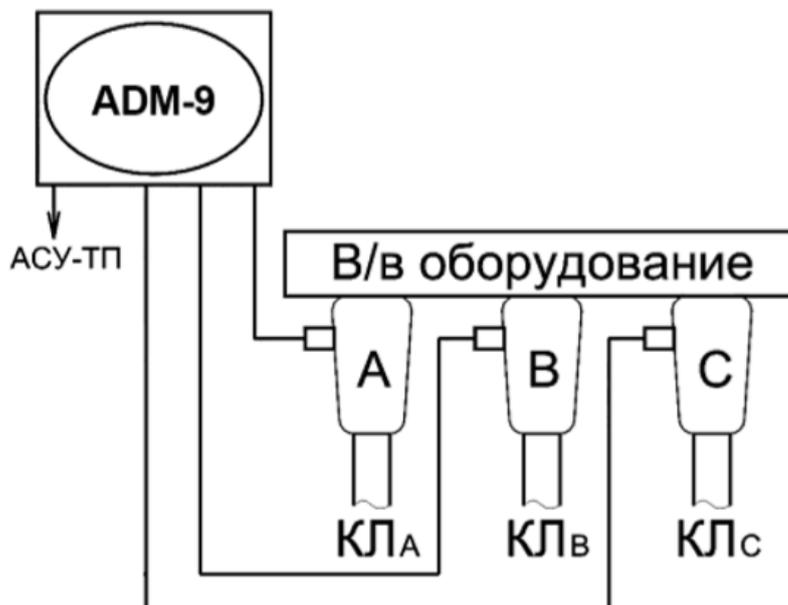


Рисунок 3.6 – Контроль концевых муфт высоковольтных кабельных линий при помощи акустических датчиков

Зона чувствительности акустических датчиков обычно не превышает  $\pm 1$  метр из-за интенсивного затухания акустических сигналов по длине кабеля, поэтому для контроля состояния изоляции самого кабеля такие датчики не применяются. Акустические датчики системы ADM-9 монтируются непосредственно на корпусе контролируемой муфты, или же, если сама муфта конструктивно недоступна, то на разделанной части кабеля, рядом с муфтой, максимально близко к ней. При установке датчика должен обеспечиваться надежный акустический контакт между датчиком и корпусом муфты. Зарегистрированные акустические импульсы от частичных разрядов обрабатываются и анализируются в приборе ADM-9, на выходе которого по каждому каналу формируется сигнал, пропорциональный интенсивности частичных разрядов PDI, учитывающей количество и амплитуду зарегистрированных импульсов частичных разрядов (рисунок 3.7). Полученная

информация, и диагностические заключения о состоянии изоляции, оперативно передаются в систему АСУ-ТП (автоматизированная система управления технологическим процессом) более высокого уровня.

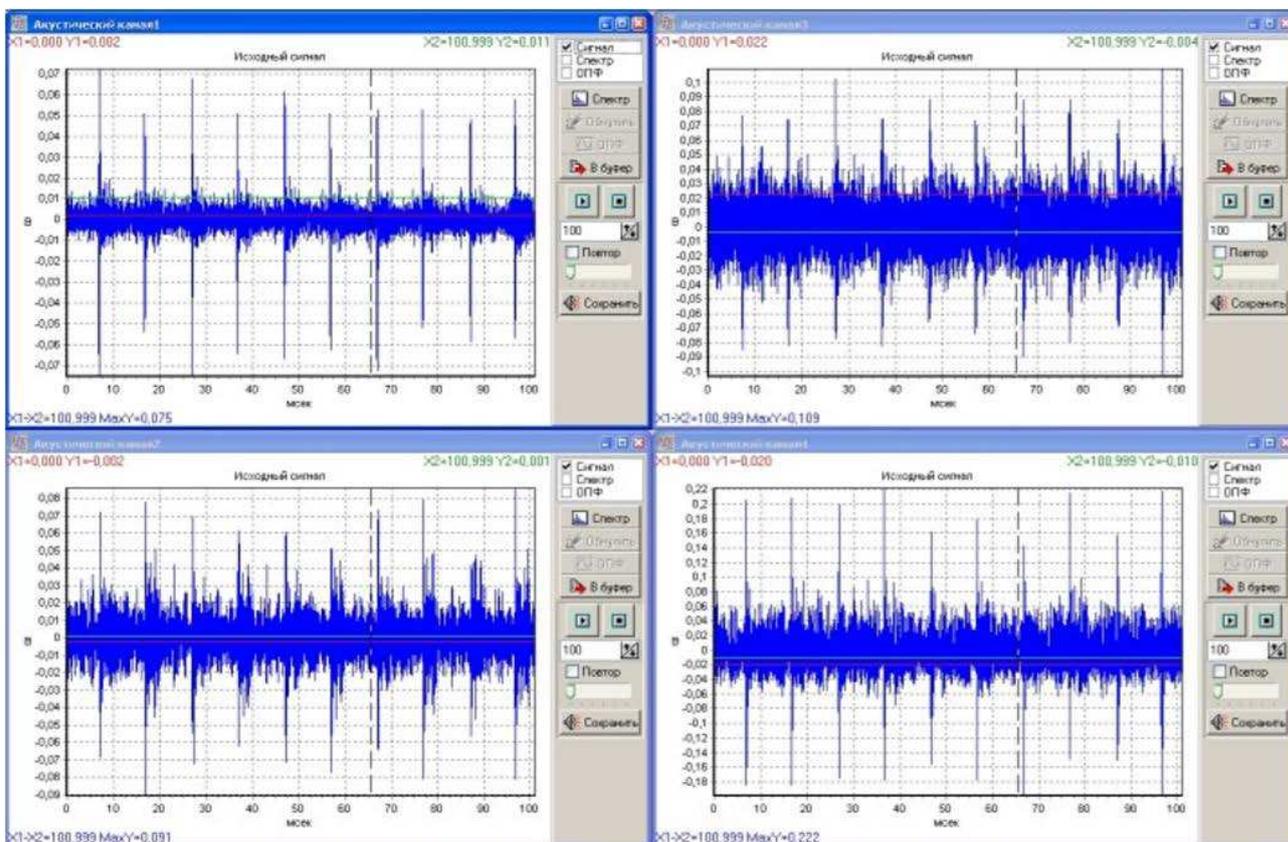


Рисунок 3.7 – Акустические сигналы от частичных разрядов в изоляции

В таблице 3.2 представлены технические данные системы ADM-9 для акустического мониторинга состояния муфт кабельных линий по частичным разрядам.

Таблица 3.2 – Технические параметры прибора ADM-9

Параметр	Значение
Количество измеряемых каналов	9
Рабочее напряжение оборудования, кВ	до 500
Частота импульсов разрядов, кГц	30-300
Диапазон рабочих температур, °С	от -40 до +60
Интерфейс связи с компьютером	RS-485, Ethernet
Габаритные размеры прибора мониторинга, мм	280 × 260 × 110
Вес прибора, кг	2,0

- Система марки CSM-1 предназначена для «углубленного» мониторинга состояния наиболее ответственных кабельных муфт и линий с рабочим напряжением до 500 кВ. Производятся приборы для контроля одной или трех муфт кабелей.

Прибор марки CSM-1 (Cables Sleeve Monitor) предназначен для комплексного мониторинга состояния изоляции наиболее ответственных, или критических муфт кабельных линий. Он позволяет:

- регистрировать частичные разряды в изоляции концевых и соединительных муфт используя датчики UHF (сверхвысокочастотные) диапазона частот, до 1 ГГц;

- регистрировать частичные разряды в изоляции самого высоковольтного кабеля, используя датчики HF (высокочастотные) диапазона частот, от 0,5 до 15,0 МГц;

- регистрировать частичные разряды в изоляции муфты акустическим датчиком, работающие на частотах до 100 кГц;

- локализовать место дефекта в кабеле, регистрируя рефлектограмму распространения импульса частичного разряда по кабельной линии;

- контролировать температуру муфты (кабеля) в месте установки прибора CSM-1;

- регистрировать ток промышленной частоты, протекающий по экрану кабеля, приводящий к дополнительному нагреву кабеля.

Вся основная информация от датчиков обрабатывается в приборе и уже в практически готовом виде передается в общую систему мониторинга. На рисунке 3.8 представлена система CSM-1 для комплексного мониторинга состояния наиболее ответственных муфт кабельных линий. Схема подключения датчиков прибора CSM-1 к муфте представлена на рисунке 3.9.



Рисунок 3.8 – Система CSM-1 для комплексного мониторинга состояния наиболее ответственных муфт кабельных линий

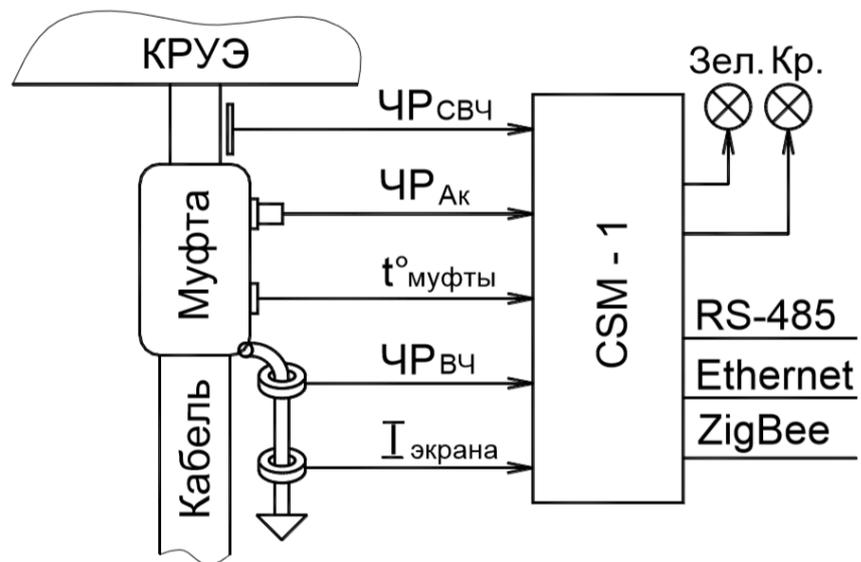


Рисунок 3.9 – Схема подключения датчиков прибора CSM-1 к муфте

В таблице 3.3 представлены технические данные системы CSM-1 для комплексного мониторинга состояния наиболее ответственных муфт кабельных линий.

Таблица 3.3 – Технические данные системы CSM-1

Параметр	Значение
Рабочее напряжение кабельной линии, кВ	10 - 500
Способ контроля состояния изоляции	Контроль ЧР, Т°С
Количество контролируемых одной системой кабелей (муфт)	1
Длина контролируемых кабельных линий одним прибором, м	4000
Диапазон регистрируемых частичных разрядов, МГц	0,1 – 1000
Интерфейс связи с АСУ-ТП	ZigBee,RS-485
Диапазон рабочих температур, без системы подогрева, °С	от -40 до +60
Габаритные размеры прибора мониторинга, мм	200 × 180 × 60
Вес прибора, кг	1,7

- Система мониторинга марки CLM для контроля токов утечки в экранах кабельных линий и диагностики повреждений оболочки. Для контроля емкостных токов утечки в экранах кабельных линий, в которых все три фазы проложены в одной оболочке, могут быть использованы практически любые измерительные приборы, регистрирующие токи промышленной частоты необходимой величины.

Для высоковольтных кабельных линий, где обычно применяются три однофазных кабеля, величина фазных токов в экранах является суммой емкостных токов утечки, и тока наведенного током нагрузки кабельной линии, который сильно зависит от способа прокладки линии. В этих случаях для контроля состояния оболочек фаз кабельной линии необходимо использовать сбалансированную схему измерения токов утечки (рисунок 3.10). В сбалансированной схеме измерения трехфазных токов контролируются не абсолютные величины токов, а векторная их сумма, точнее говоря контролируется величина вектора небаланса токов. Появление этого тока небаланса в процессе эксплуатации, или даже изменение его величины, может говорить о наличии повреждения оболочки кабельной линии. Это происходит потому, что в местах повреждений оболочки фазных кабелей возникают дополнительные цепи утечки для емкостных токов. Для контроля величины

небаланса фазных токов утечки, возникающих при повреждениях оболочки кабельных линий, применяется измерительный прибор марки СLM. В приборе реализована сбалансированная схема измерения трех фазных токов. На три входа прибора подключают три датчика, предназначенных для контроля токов утечки трех фаз высоковольтного кабеля. Входы прибора предназначены для измерения сравнительно небольших токов утечки, а единицы ампер, но имеют эффективную защиту от импульсных коммутационных и пусковых токов, величины которых могут быть на три порядка больше. При начальном включении прибора СLM производится балансировка входных цепей прибора таким образом, чтобы ток небаланса отсутствовал. Если теперь в процессе эксплуатации кабельной линии прибором будет зарегистрировано появление тока небаланса, то это будет говорить о нарушении оболочки одного из фазных кабелей. Ток небаланса появится только в том случае, когда будет иметь место нарушение оболочки, и через это нарушение будет протекать ток утечки, то есть в зоне нарушения имеет место увлажнение окружающей среды. Влага через повреждение проникнет к главной изоляции фазного кабеля и начнется развитие одного из самых опасных дефектов в СПЭ изоляции – возникновение «водяных деревьев», практически всегда приводящего к катастрофическим последствиям.

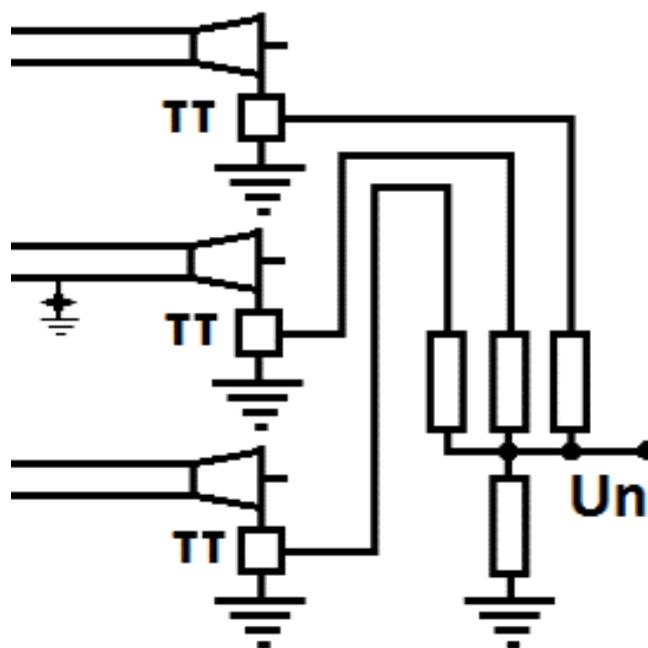


Рисунок 3.10 – Сбалансированная схема токов утечки

Все оборудование системы комплексного мониторинга марки КМК-500 располагается в монтажных шкафах трех типов (рисунок 3.11), в зависимости от поставленных технических задач и реальной топологии контролируемой кабельной линии.



Рисунок 3.11 – Техническое исполнение системы КМК-500

Центральный шкаф системы КМК-500/1. Здесь располагается промышленный компьютер с ПО мониторинга и диагностики, обеспечивающем комплексный подход к оценке состояния кабельной линии несколькими методами диагностики. При необходимости здесь монтируются приборы систем ASTRO, CDR, ADM и CDM. Локальный шкаф КМК-500/2, монтируемый рядом с началом и, для длинных линий, в конце линии. В шкафу КМК-500/2 обычно

располагаются диагностические ASTRO, CDR, ADM и CDM. При помощи оптических линий связи происходит сбор информации с промежуточных шкафов КМК-500/3, и ее передача в главный шкаф системы мониторинга. Для повышения информативности регистрация сигналов в шкафах КМК-500/2 синхронизируются по оптической линии, или по сигналам системы GPS. Промежуточный измерительный шкаф системы мониторинга КМК-500/3, используемый для контроля соединительных муфт длинных кабельных линий. Шкаф монтируется на линии, рядом с контролируемыми муфтами, обычно в кабельных колодцах. В шкафу марки КМК-500/3 монтируются приборы контроля состояния муфт ADM и датчики токов в экране кабеля.

Производство всего спектра диагностического оборудования системы КМК-500 одной фирмой DIMRUS, как и программного обеспечения мониторинга и экспертной части ПО, дает большие возможности по оперативной модификации свойств КМК-500 в соответствии с требованиями заказчика. В полной конфигурации система КМК-500 предназначена для контроля кабельных линий тремя методами:

- метод контроля режимов работы по температуре кабельной линии;
- диагностика дефектов и их локация в изоляции по частичным разрядам;
- контроль состояния оболочек по величинам токов в экранах кабельной линии. (По желанию заказчика выбирается любые методы диагностики).

Стандартная модификация системы КМК-500 поставляется для контроля состояния двух высоковольтных кабельных линий, состоящих из шести однофазных кабелей. При необходимости может быть поставлена система для контроля одной кабельной линии (три однофазных кабеля), или для большего количества кабельных линий. Допустимая длина контролируемой кабельной линии в стандартной конфигурации составляет до 8 км. Для мониторинга кабельных линий большей длины, до 32 и даже 90 км, необходимо использовать систему ASTRO с более мощным лазером, а в кабельной линии устанавливать одномодовое оптическое волокно. Для установки диагностического оборудования в узлах, в которых отсутствует питание, применяются

комбинированные блоки питания, использующие солнечные элементы и трансформаторы тока, накапливающие энергию емкостных токов утечки в экранах кабельных линий.

Пример конфигурации технических средств системы мониторинга КМК-500, включающей в себя все три метода диагностики состояния кабельной линии представлен на рисунке 3.12. На приведенной схеме система температурного мониторинга марки ASTRO располагается в шкафу КМК-500/1. Если расстояние от шкафа до кабельной линии достаточно велико, то эта система монтируется в шкафу КМК-500/2, вместе с системами контроля частичных разрядов и токов в экранах. Шкафы контроля изоляции соединительных муфт КМК-500/3 располагаются вдоль кабельной линии, и информационно объединены в общую систему оптической линией. Эта же оптическая линия используется и для синхронизации процессов измерения частичных разрядов, что необходимо для точной локации мест возникновения дефектов в линии. Место возникновения дефекта в изоляции кабельной линии определяется по разнице времени прихода от импульса частичного разряда к двум приборам, расположенным по краям участка контролируемой кабельной линии.

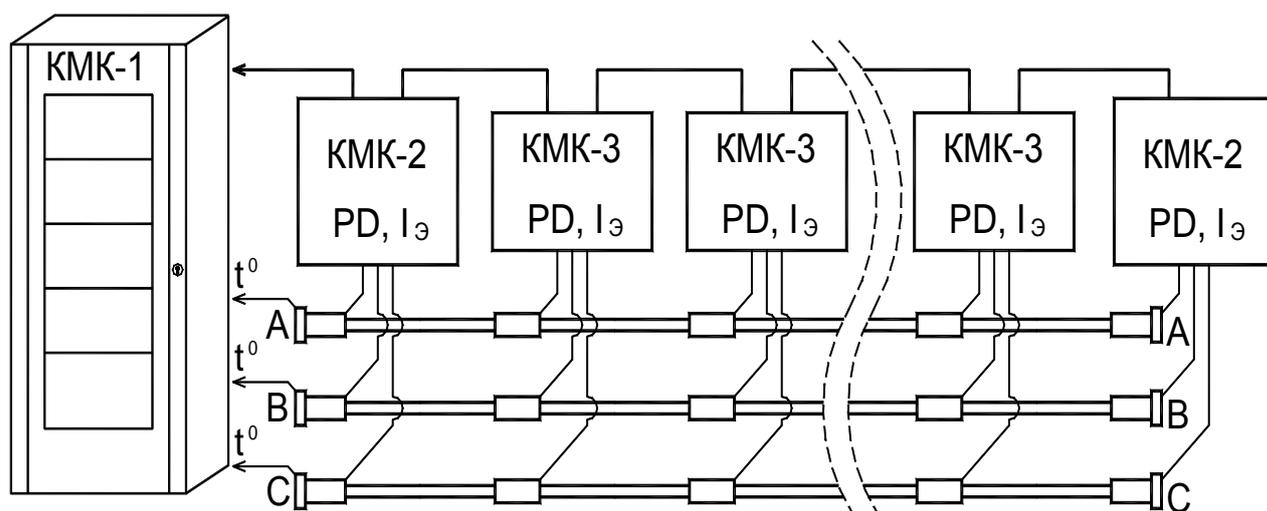


Рисунок 3.12 – Структура максимальной системы мониторинга трех фаз кабельной линии КМК-500

### **3.2 Комплексная система мониторинга технического состояния энергетического оборудования iNVA**

Для организации «верхнего уровня» мониторинга технического состояния кабельных линий используется программное обеспечение iNVA, работающее на персональном компьютере промышленного исполнения. Программное обеспечение мониторинга марки iNVA включает в себя:

- полную информацию о контролируемом оборудовании и смонтированных на нем технических средствах системы контроля;
- многоуровневую базу хранения данных от первичных датчиков;
- средства просмотра и анализа первичных и расчетных параметров кабельных линий;
- набор из нескольких экспертных систем для диагностики дефектов;
- обобщенную систему для формирования итогового заключения на основании результатов работы всех экспертных систем.

Результаты работы системы мониторинга передаются в систему АСУ-ТП более высокого уровня по протоколу МЭК 61850.

Для реализации единого подхода к мониторингу и диагностике кабельных линий процесс практического создания ПО системы мониторинга iNVA начинается с использования конструктора схем кабельных линий. Благодаря наличию в нем почти 50 различных элементов можно создавать схемы любого уровня подробности описания особенностей линии. На этой же схеме расставляются все первичные датчики, которые будут использованы в системе мониторинга. Благодаря этому создаются предпосылки для корректного и подробного анализа как отдельных элементов линии, так и всей линии в целом. Параметры созданной схемы кабельной линии будут управлять работой всех встроенных экспертных подсистем. Конструктор схем кабельных линий является частью общего конструктора высоковольтного оборудования подстанций – КРУ, КРУЭ, выключателей, силовых трансформаторов, и т. д. Это дает возможность проведения в будущем комплексной диагностики

оборудования энергетического транзита. На рисунках 3.13 и 3.14 представлены схема и элементы схемы кабельных линий.

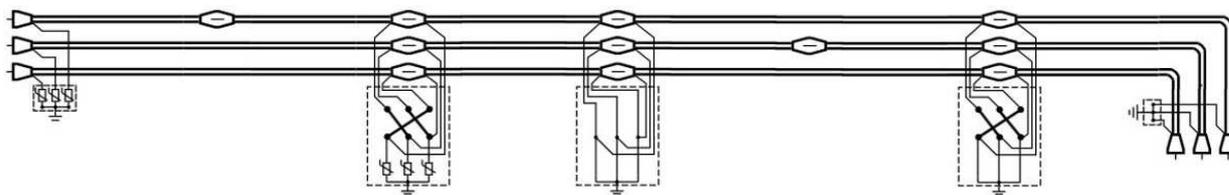


Рисунок 3.13 – Схема кабельной линии

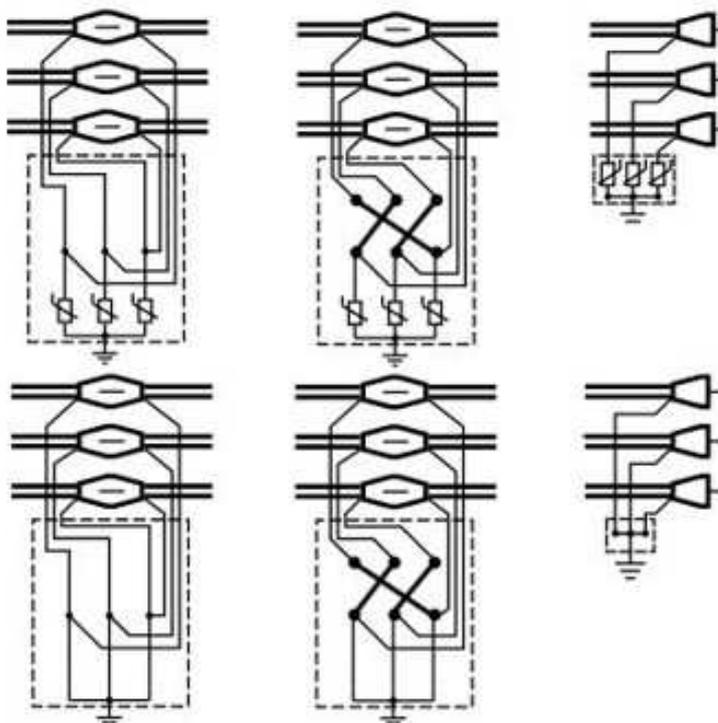


Рисунок 3.14 – Элементы схемы кабельной линии

Общее техническое состояние контролируемой кабельной линии на экране компьютера АРМ отображается стандартными светофорами состояния - зеленый, желтый и красный цвета. Если какой-либо диагностический метод системы iNVA диагностирует состояние кабельной линии как «тревожное», то на экране происходит изменение цвета светофора с указанием метода, давшего такое заключение. Пользователь может войти в соответствующую подпрограмму и оперативно уточнить причину, на основании которой экспертной системой было изменено техническое состояние кабельной линии.

При необходимости можно провести дополнительный анализ изменения параметров, который поможет принять обоснованное решение о необходимых управляющих воздействиях. Все это можно делать с удаленного компьютера, включенного в компьютерную сеть. Температурный профиль кабельной линии 500 кВ представлен на рисунке 3.15.

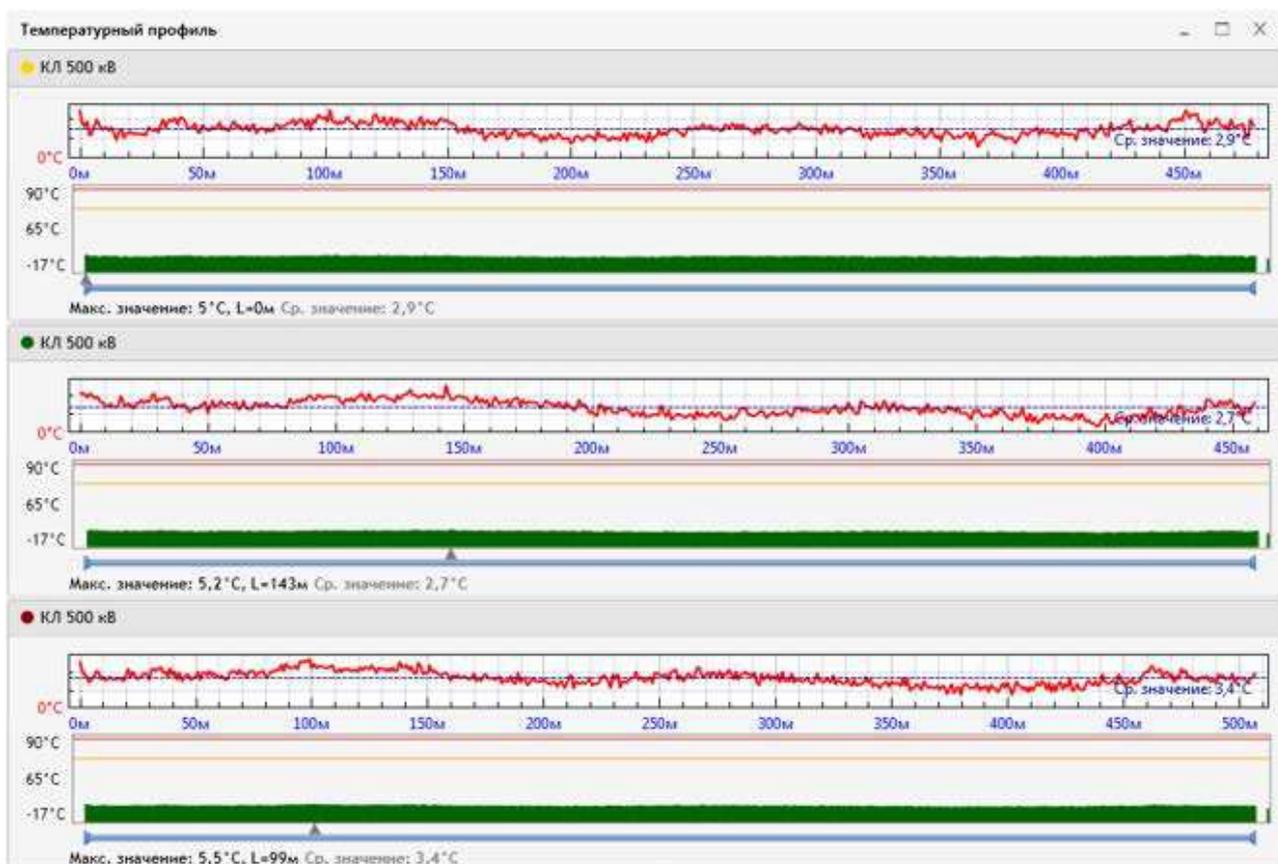


Рисунок 3.15 – Температурный профиль кабельной линии

Обо всех изменениях основных параметров кабельной линии, превышениях пороговых значений параметров, результатах работы экспертных систем, программным обеспечением мониторинга iNVA формируются готовые отчетные документы. Каждый отчетный документ всегда включает в себя первичную информацию, на основании которой делалось каждое диагностическое заключение.

Программой формируются отчеты:

- о текущем техническом состоянии кабельной линии на основании первичной информации;

- о превышениях первичными параметрами пороговых значений;
- отчеты о результатах работы диагностических экспертных систем.

В каждом диагностическом отчете программы приводится не только первичная информация, но и информация об итогах работы экспертной диагностической системы, на основании которого был изменен светофор состояния контролируемой кабельной линии.

### **3.3 Классификация эксплуатационных и диагностических параметров оборудования**

Все эксплуатационные и диагностические параметры оборудования классифицируются на:

- Критические параметры технического состояния контролируемого оборудования (измеренные и расчетные), непосредственно определяющие возможность дальнейшей эксплуатации оборудования. Эти параметры имеют максимальную значимость и наиболее активно используются в системе управления эксплуатацией, ремонтами и сервисным обслуживанием.

- Условно - критические параметры технического состояния контролируемого оборудования (измеренные и расчетные), косвенно влияющие на возможность дальнейшей эксплуатации оборудования. Обычно сюда же входят расчетные параметры, полученные на основании работы экспертных систем.

- Не критические параметры технического состояния контролируемого оборудования (измеренные и расчетные), не оказывающие прямого влияния на возможность дальнейшей эксплуатации оборудования.

Все эти параметры входят в комплексный параметр текущего технического состояния оборудования «Ктс», который является сложной функцией всех имеющихся данных. Он описывает состояние оборудования в момент проведения измерений и диагностики, определяет необходимость в сервисных и ремонтных воздействиях.

Значения параметров в абсолютных величинах трудно использовать в системах обслуживания оборудования, лучше использовать безразмерный коэффициент «Ктс», учитывающий в себе все параметры со своими весовыми коэффициентами. На рисунке 3.16 представлена связь параметров состояния со значением «Ктс» и с значением остаточного ресурса оборудования.



Рисунок 3.16 – Связь параметров состояния со значением «Ктс» и с значением остаточного ресурса оборудования

Если значение комплексного параметра текущего технического состояния оборудования «Ктс» равняется единице, то контролируемое оборудование не нуждается в каком-либо сервисном или ремонтном воздействии. Если он снижается до 0,9, то это «тревожное» состояние, и необходимо, как минимум, планирование ремонтных воздействий. Если значение «Ктс» равно 0,8 и менее,

то это соответствует оборудованию, находящемуся в состоянии «предаварийное», и в этом случае проведение ремонтных работ неизбежно.

Комплексный параметр технического состояния оборудования «Ктс» тесно связан с понятием «остаточный ресурс оборудования  $R_0$ », однако этот термин более сложен для практического применения из-за его неоднозначности и множественности толкования. Наиболее близок к параметру «Ктс» термин «остаточный ресурс оборудования на данном межремонтном цикле», однако и его применение в системах обслуживания неоднозначно.

Заключение о техническом состоянии оборудования может базироваться только на комплексном подходе к анализу имеющейся первичной информации от датчиков. При наиболее общем проведении диагностики высоковольтного оборудования необходимо использовать пятиступенчатый алгоритм оценки технического состояния:

1 Оценка общего технического состояния высоковольтного оборудования по величине измеренных и расчетных параметров.

2 Контроль быстрых изменений контролируемых и расчетных параметров, анализ скачков параметров.

3 Контроль медленных и монотонных изменений параметров оборудования, анализ временных трендов.

4 Использование комплексных результатов работы специализированных экспертных диагностических систем.

5 Корреляция всех полученных результатов со значениями и текущими изменениями технологических и эксплуатационных параметров.

Итоговое техническое заключение не является простой суммой заключений по каждому из пяти пунктов, каждый последующий пункт может дополнять и усиливать предыдущее заключение, а может даже и отрицать его. В результате получаемое по итогам диагностики техническое заключение о состоянии оборудования является сложной функцией многих первичных, расчетных и синтезированных параметров. Формирование итогового

заклучения можно представить в виде суммирования пяти векторов, направление и модуль каждого из которых влияет на конечный диагноз.

Алгоритм принятия оперативных решений о техническом состоянии контролируемого оборудования представлен на рисунке 3.17.

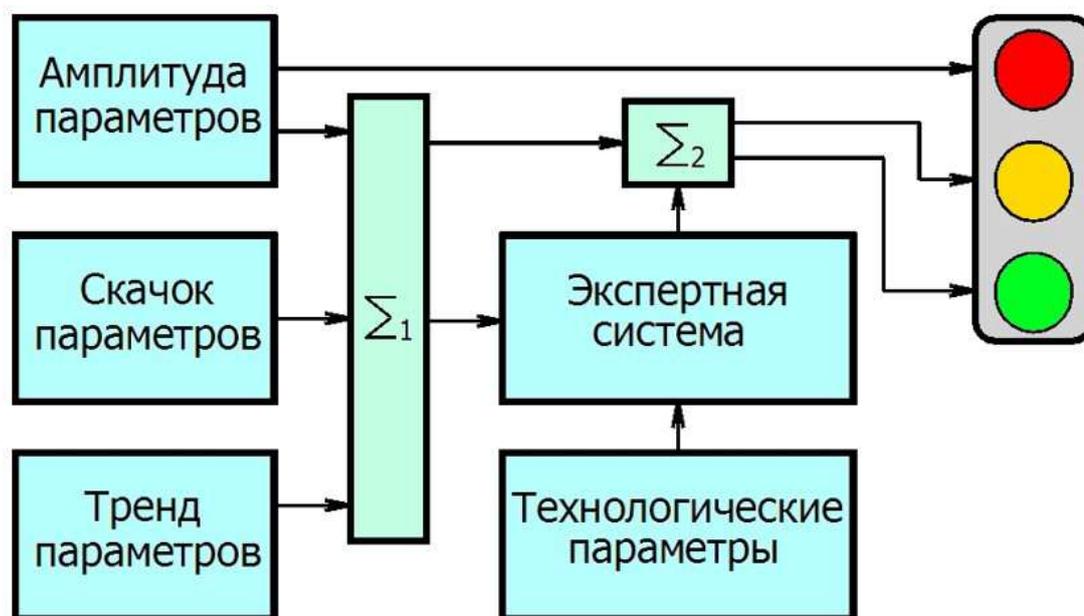


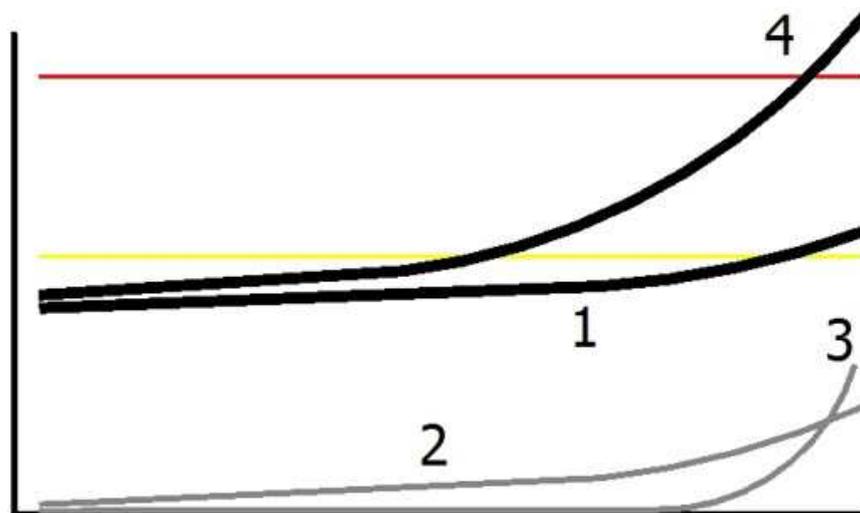
Рисунок 3.17 – Алгоритм принятия оперативных решений

Оборудование переводится системой мониторинга в категорию «предаварийное состояние» (красный сигнал светофора) только при недопустимо высоком уровне критических параметров (при наличии нормированных пороговых значений). Эта функция системы мониторинга дополняет работу систем РЗА.

Зеленый сигнал светофора включен системой мониторинга тогда, когда нет амплитудного превышения параметров, не было скачка, отсутствует временной тренд увеличения параметра. При этом экспертная диагностическая система по текущим значениям первичных параметров не выявила признаков дефектного состояния.

Желтый сигнал светофора («тревожное» состояние) загорается при определенных сочетаниях первичных параметров и функций состояния оборудования.

Конечной целью работы систем мониторинга является прогнозирование развития технического состояния. Определение допустимого интервала будущей безаварийной работы оборудования во многом определяет стратегию текущего управления эксплуатацией (рисунок 3.18).



- 1 – кривая изменения состояния кабельной линии по стационарной математической модели;
- 2 – влияние дефекта 1 на ухудшение состояния; 3 – дефект 2, или саморазвитие дефекта 1; 4 – реальная кривая ухудшения состояния линии

Рисунок 3.18 – Прогнозирование развития технического состояния

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были проведены теоретические исследования конструкций применяемых кабелей напряжением 110 кВ и выше, исследования по применению и эксплуатации кабелей напряжением 110 кВ и выше с изоляцией из СПЭ совместно с системой температурного мониторинга.

Рассмотрен принцип работы распределительного датчика температур, обоснована эффективность применения систем температурного мониторинга в составе системы КМК.

Система температурного мониторинга позволяет определять места возникновения и оценивать степень развития дефектов, сопровождающихся локальным разогревом отдельных участков контролируемой кабельной линии, оперативно проводить определение мест обрыва кабельной линии после возникновения фатальных дефектов или аварийных динамических воздействий на кабель. Знание температурного профиля кабельной линии позволяет оптимизировать ее загрузку, рационально учитывать реальные климатические условия и локальные особенности пролегания всех участков кабельной линии.

Проанализировав существующие в настоящее время системы температурного мониторинга, в процессе сравнения установлено, что способы представления информации во всех системах очень похожи. Однако отечественная система ASTRO (фирма Инверсия-Сенсор) не уступает по техническим характеристикам своим зарубежным аналогам и стоит дешевле.

Для получения полной картины о фактической наработке кабеля необходимо проводить комплексную диагностику технического состояния высоковольтных кабельных линий. Наиболее эффективной для этих целей является комплексная система оперативного мониторинга и диагностики состояния высоковольтных кабельных линий, которая включает в себя несколько подсистем.

Примером комплексного подхода к мониторингу кабельных линий является система КМК фирмы DIMRUS, которая включает в себя:

- Контроль температуры кабельной линии при помощи системы ASTRO с оптическим волокном. Она позволяет не только оценивать температурный режим работы, и проводить диагностику зон кабеля с повышенным нагревом, но и определять возможность увеличения нагрузки на линию.

- Выявление дефектов изоляции кабеля и муфт по частичным разрядам на ранних стадиях возникновения и развития, определение типа и опасности выявленного дефекта. Для этого используются диагностические приборы марок CDR (контроль состояния изоляции кабеля), и ADM (контроль состояния изоляции концевых и промежуточных муфт).

- Локализация места возникновения дефекта в изоляции на работающей кабельной линии на основании анализа формы и времени прихода «прямых» и «отраженных» импульсов частичных разрядов (системы CDR и CDM).

- Проведение оперативного контроля емкостных и уравнивающих токов, протекающих по броне кабельной линии при помощи CLM. Знание токов позволяет контролировать состояние оболочки, корректировать режимы работы контролируемой кабельной линии.

Таким образом, применение при строительстве кабельных линий 110 кВ и выше с изоляцией из сшитого полиэтилена эффективно при передаче больших мощностей, особенно при электроснабжении промышленных предприятий. Для обеспечения длительного срока службы кабелей необходим постоянный контроль его эксплуатационных характеристик, что возможно осуществить с помощью системы температурного мониторинга. В наших условиях рекомендуется применение систем температурного мониторинга ASTRO фирмы Инверсия-Сенсор (Россия), которая адаптирована к системам передачи данных с учётом отечественных условий и сертифицированы как «средство измерения температуры». Особое внимание необходимо обратить на созданную компанией DIMRUS (Россия) комплексную систему мониторинга КМК для обеспечения безопасности эксплуатации высоковольтных кабельных линий, позволяющую решить основные вопросы эксплуатации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 ГОСТ 16441-78 «Кабели маслonaполненные на переменное напряжение 110-500 кВ. Технические условия». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gost.online/document.htm?id=5991>

2 ГОСТ Р МЭК 141-1-96 «Кабели маслonaполненные с бумажной изоляцией в металлической оболочке на переменное напряжение до 400 кВ включительно и арматура к ним. Методы испытаний». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gost.online/document.htm?id=26275>.

3 СТО 56947007-29.240.85.046-2010 «Инструкция по эксплуатации силовых маслonaполненных кабельных линий напряжением 110-500 кВ». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gost.online/document.htm?id=46893>.

4 Екимов С. С., Цивилёв И. Ю. Особенности эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (защита от перенапряжений, диагностика и испытания). // Наука и Техника. – 2011. – №2 (327). – С. 22.

5 Халилов Ф. Х., Кузнецов Д. В. Способы увеличения пропускной способности КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена. // КАБЕЛЬ-news. – 2009. – №9. – С. 63.

6 Кожевников А. А. Современная кабельная изоляция. // Новости Электротехники. – 2009. – №2 (38). – С. 17.

7 Дмитриев М. А., Евдохин Г. В. Однофазные силовые кабели 6-500 кВ. // Новости Электротехники. – 2009. – №2 (44). – С. 24.

8 Кузнецов Д. В., Попова Ю. С., Халилов Ф. Х., Шилина Н. А. К вопросу об эксплуатации силовых кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. // Электро. – 2009. – №3. – С. 30.

9 Якунин А. Г. Новые возможности применения оптоволокна в электроэнергетике. // Новости Электротехники. – 2010. – №2 (50). – С. 2.

10 Ларин Ю. Т., Смирнов Ю. В., Гринштейн М. Л. Применение системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля

распределения температуры вдоль электрического силового кабеля. // КАБЕЛЬ-  
news. – 2009. – №8. – С. 48.

11 Система контроля температуры высоковольтных кабельных линий  
DITEST. [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://www.omnisens.com/ditest/363-ditest-fb.php>.

12 Система контроля температуры высоковольтных кабельных линий  
LIOS DTS. [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<https://www.nktpotonics.com/lios/en/product/lios-en-sure-long-range-power-cable-monitoring-system/>.

13 Система контроля температуры высоковольтных кабельных линий  
BARTEC RedGuard. [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
[http://www.bartec.kz/files/meter/RedGuard\\_rus.pdf](http://www.bartec.kz/files/meter/RedGuard_rus.pdf)

14 Система контроля температуры высоковольтных кабельных линий  
ПТС-1000. [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<https://www.sedatec.org/resheniya/intellektualnaya-sistema-kontrolya-temperatury-vysokovoltnykh-kabelnykh-liniy-serii-pts-1000/>

15 Система контроля температуры высоковольтных кабельных линий  
ASTRO. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://i-sensor.ru/index.php/production/distributed-sensors/89-produktsiya/174-astro-e56x>

16 Белковский С. В., Ботов С. В., Германенко Д. В. Оперативный контроль  
технического состояния высоковольтных кабельных линий. //  
ЭНЕРГОЭКСПЕРТ. – 2015. – №3. – С. 66 – 67.

17 Казанина И. В., Хадыева А. Р. Эффективность применения кабелей с  
изоляцией из сшитого полиэтилена с системой мониторинга. //Вестник  
электротехники. – 2013. – №4. – С. 14.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей

УТВЕРЖДАЮ

И. о. заведующего кафедрой

И. Ю. Погоняйченко

подпись

инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена**

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Профессор кафедры ГГЭЭС,

д. т. н.

должность, учёная степень

М.Ф. Носков

инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Д.С. Попырин

инициалы, фамилия

Рецензент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Начальник Службы  
мониторинга оборудования  
Филиала ПАО «РусГидро» -  
«Саяно-Шушенская ГЭС  
имени П. С. Непорожного»

должность, учёная степень

В.В. Белобородов

инициалы, фамилия

Нормоконтролёр

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.А. Чабанова

инициалы, фамилия

Саяногорск; Черёмушки 2018