

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

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и
систем
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Исследование систем мониторинга изоляции силовых кабельных
линий»

Студент

Е.С. Селезнев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

В.Н. Кузнецов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

«___» _____ 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

«___» _____ 2017 г.

Тольятти 2017

Содержание

Введение.....	4
1 Проблемы эксплуатации кабельных линий.....	7
1.1 Существующие методы диагностики кабельных линий.....	18
1.2 Испытания изоляции повышенным переменным напряжением.....	19
1.3 Испытание изоляции повышенным выпрямленным напряжением.....	21
1.4 Использование метода бегущей волны.....	25
1.5 Использование метода импульсного тока	26
1.6 Использование метода импульсной рефлектометрии.....	27
1.7 Использование акустического метода	28
1.8 Использование индукционных средств контроля	29
1.9 Использование метода импульсно-дугового контроля	31
Выводы по главе 1.....	32
2 Методы диагностики изоляции предлагаемые для замены существующих средств контроля.....	34
2.1 Метод контроля и мониторинга технического состояния кабельной линии на основе непрерывного измерения температуры изоляции КЛ с использованием встроенных оптических линий	34
2.2 Состав системы и результаты измерений.....	40
2.3 Метод оперативного контроля и мониторинга технического состояния кабельной линии на основе измерения и анализа частичных разрядов в изоляции муфт и кабеля	44
2.4 Природа возникновения частичных разрядов.....	48
2.5 Общие параметры регистрации частичных разрядов в системе CDM30....	55
2.6 Дополнительные параметры программирования	57
2.7 Работа с рефлектометром	57
2.8 Разделы для просмотра замеров	62
2.9 Распределение частичного разряда на амплитудно-фазовой плоскости для различного типа дефектов.....	70

2.10 Диагностическое правило	76
Выводы по главе 2.....	79
3 Анализ результатов измерений системой CDM 30 полученных экспериментальным путем.....	81
Выводы по главе 3.....	89
Заключение	90
Список использованных источников	92

Введение

Современные тенденции в электроэнергетике, которые направлены на достижение целей наиболее эффективного использования природных энергетических ресурсов, защиты окружающей среды, повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии, выполнения требований заказчика с графиком неравномерной нагрузки, снабжения крупных городов и децентрализованной нагрузки, стали новыми условиями функционирования электроэнергетики как социальной и клиентоориентированной инфраструктуры.

Надежность современных систем аутентификации для генерации и распределения электроэнергии в значительной степени определяется электрической надежностью электрооборудования. Аварийные повреждения, зачастую влекут за собой непоправимый ущерб для оборудования, в результате происходит сбой электроснабжения, что приводит к большим финансовым потерям в системе электроснабжения и у потребителей. Особенно значительны потери аппаратного сбоя на оборудовании высших классов напряжения, которые имеют большую единичную мощность.

Для поддержания необходимого уровня надежности оборудования во время эксплуатации применяется система планового технического обслуживания и ремонта. Традиционно эта система основана на периодическом осмотре и плановом техническом обслуживании оборудования, является системой обслуживания по количеству отработанного времени. Если применять данную систему к установкам высокого напряжения, то такая система является не самым оптимальным вариантом, так как приводит к ненужным отключениям работоспособного оборудования. Загруженные графики работы электрической сети и отсутствие введения резервов привели к необходимости увеличения межремонтного периода, что при нынешней системе обслуживания имеет тенденцию к снижению надежности основного оборудования.

Огромная значимость для увеличения эффективности эксплуатации высоковольтных установок заключена в переходе на техническое обслуживание

по реальной потребности. Таким образом, необходимость в обслуживании и ремонте заключается на основании фактического состояния оборудования.

Переход на техническое обслуживание оборудования не возможен без применения надежных методов контроля и оценки его текущего состояния. Данная проблема и выявляет необходимость развития технической диагностики.

Необходимость совершенствования системы и методов технического контроля электрооборудования в эксплуатации определяется также их недостаточной эффективностью. Существующие на сегодняшний день методы испытаний разработаны давно и направлены на выявление дефектов, которые уже не определяют надежность, современного высоковольтного оборудования.

Периодичность испытаний не соответствует скорости развития дефектов. Все это снижает вероятность раннего обнаружения новых повреждений и возможность для прогнозирования отказов.

Актуальность работы. Для повышения надежности систем электроснабжения необходимо внедрение ряда мероприятий по обеспечению технического контроля за состоянием изоляции.

Наиболее эффективным способом контроля за состоянием электрооборудования является мониторинг, который не оказывает разрушающих воздействий на качество электрической изоляции. Среди наиболее важного электрооборудования, надежность которого необходимо контролировать и поддерживать на достаточном уровне, выделяются высоковольтные кабельные линии (КЛ).

Цель работы. В данной магистерской диссертации рассматривается проблема исследование систем диагностического мониторинга состояния изоляции силовых кабельных линий; исследование представлено в виде описания принципа работы системы, а также проведенных экспериментальных измерений на предприятии ООО "Сибур Тольятти".

Задачи:

1. Рассмотреть и проанализировать существующие методы испытаний и диагностики кабельных линий.
2. Провести анализ и рассмотреть принцип работы методов диагностики, которые предлагаются в диссертационной работе.
3. Провести экспериментальные измерения частичных разрядов в изоляции кабельных линий при помощи предлагаемой системы, рассмотреть результаты замеров, провести по ним анализ.

1 Проблемы эксплуатации кабельных линий

В городских условиях самый распространенный способ передачи электроэнергии – при помощи кабельных линий (КЛ). Кабельные линии не требуют создания и обслуживания опор, которые занимают много места на улицах и дорогах. Тем не менее, за состоянием кабельных линий, а также соединяющих их муфт необходимо следить, потому как при возникновении аварийной ситуации на КЛ потребитель останется без электроэнергии. При возникновении тока КЗ необходимо найти место утечки и устранить его. Это является не совсем простой задачей, потому что кабели могут прокладываться на расстоянии многих километров под землёй, в коллекторах, туннелях, каналах.

Во время эксплуатации время до пробоя изоляции, как правило, гораздо меньше, чем 30 лет, несмотря на то, что гарантийный срок изоляции определяется с учетом предполагаемого влияния режимных факторов. Данное противоречие характеризуется сложными проблемами и может быть решено только за счет определения причин их возникновения путем изучения законов повреждаемости и старения электрической изоляции при работе с учетом многофакторных воздействий. К наиболее изученным факторам можно включить воздействие теплового и электрического полей. Несмотря на большой объем работ, выполненный в данной области, нужно учитывать оценку воздействия и других факторов, с которыми сталкиваются при эксплуатации, хотя они могут иметь незначительное влияние на процесс старения изоляции. Вопросам, касающимся принятых конструктивных и эксплуатационных решений, ошибок персонала, электродинамическим влияниям, с влиянием магнитной составляющей электромагнитного поля (ЭМП) кабеля на формирование частичных разрядов (ЧР), пробоя изоляции и воздействиям коррозии, уделено мало внимания. Эти факторы, действуя совместно с электрическими и тепловыми полями, могут наряду с режимом работы приводить к ускорению старения изоляции. Проблемы с оценкой каждого фактора несут в себе сложный, комбинированный характер с множеством конкурирующих процессов. Необходимо и дальше проводить

поиск связей, изучать физико-химические процессы, которые проходят в изоляции кабелей при их эксплуатации, влияние и оценку воздействия вышеперечисленных факторов на ресурс изоляции кабелей, а также разработку методов повышения надёжности эксплуатации КЛ.

Огромный вклад в исследования отказов кабельных линий, износа изоляции, исследований и внедрения методов диагностики, оценки условий надёжности и безопасности внесли такие учёные, как Борисова М.Э., Брагин С.М., Долин П.А., Herburn D.M., Reid A.J., Похолков Ю.П., Таджибаев А.И., Дьяков А.Ф., Канискин В.А., Князевский Б.А., Койков С.Н., Кудрин Б.И., Кучинский Г.С., Ларина Э.Т., Воробьёв Г.А., Пешков И.Б., Лебедев Г.М., Манойлов В.Е., Медведев В.Т., Мещанов Г.И., Ahmad M. Мусин А.Х.

Увеличение срока службы и надёжности изоляции КЛ будет возможно, если разработать ряд мероприятий по внедрению устройств по диагностике силовых кабельных линий с оптимизацией конструктивных и эксплуатационных решений. Необходимо учесть тот акт, что существующие на данный момент методы диагностики силовых кабельных линий 110/6 (10) кВ не могут обеспечить условий для полной селективности и противопожарной безопасности изоляции кабелей без замены основных кабелей. Это приводит к усилению воздействия на изоляцию режимных факторов при коротком замыкании (КЗ), особенно факторов, которые связаны с магнитным полем кабеля. В то же время, в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60986-2009, на данный момент очень мало знаний о научных и экспериментальных данных о поведении кабелей при КЗ. Ссылаясь на правила эксплуатации электроустановок (ПУЭ), предусмотренные в России, запланированные тесты кабельных линий повышенным напряжением, шестикратно превышающим номинальное, также способствуют более раннему отказу изоляции. В соответствии с ГОСТ 12.2.007.14, к кабелям и кабельной арматуре устанавливаются требования по электрической и пожарной безопасности. Пробои изоляции в кабелях линий городских распределительных сетей прежде всего относятся к проведению ремонтных и диагностических работ и, как следствие, связаны с безопасностью их работы и увеличивают вероятности

возникновения опасных для человека напряжений прикосновения и шага. Диагностика вероятности старения кабельных линий 6 (10) кВ на основе статистических данных и прогнозирования опасных зон для человека, с развитием безопасных технологий проведения восстановительных работ и методов монтажа КЛ улучшат условия безопасности для их работы.

Таким образом, исследование путей дальнейшего повышения эксплуатационной надежности и безопасности КЛ 6 (10) кВ в качестве основного звена городской сети в сочетании со статистическими данными, почвы, погодных условий и электромагнитных параметров, человеческого фактора и устройств РЗА является важной научно-технической проблемой.

Во время эксплуатации воздействует целая группа факторов, которые влияют на изоляцию: климатические, электрические, тепловые, механические, вибрация, коррозия. Когда эти факторы действуют в комплексе, то происходит процесс старения изоляции, с накоплением необратимых изменений, ухудшение диэлектрических и эксплуатационных свойств кабеля, и именно они определяют требования к стандартам ТС.

В работах по физике диэлектриков говорится о том, что пробой изоляции (в данном случае изоляция КЛ) может быть вызван множеством факторов и совокупностью физических процессов: электрических, тепловых, механических, электрохимических и т. д.

Обратим внимание, что в соответствии с условиями работы КЛ в городских электросетях процесс старения изоляции будет определяться как режимными факторами, так и проектными решениями. Накопление негативных изменений в изоляции происходит как в рабочих, так и более интенсивно в аварийных режимах работы (режим КЗ). Для повышения надежности и безопасности кабельной продукции, необходима разработка систем мониторинга для выявления слабых звеньев в комплексе КЛ с решением обратной задачи для оценки результативности принятых проектных, эксплуатационных и режимных факторов на состояние изоляции сетей 6 (10) кВ.

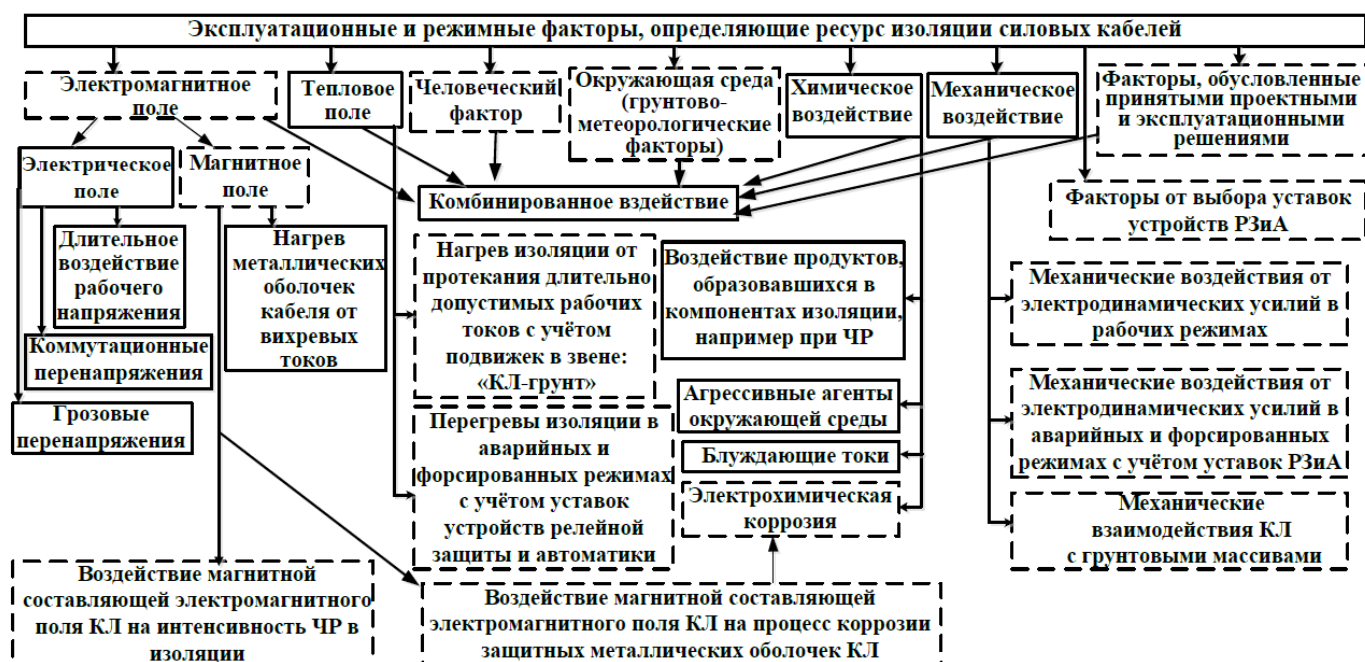


Рисунок 1 – Эксплуатационные и режимные факторы, определяющие ресурс изоляции кабельных линий городских электрических сетей

Главные требования к методам анализа и контроля изоляции в том, что они должны быть основаны на физических процессах, которые протекают в изоляции. Основные причины повреждений КЛ - дефекты изоляции, которые возникают в процессе производства, хранения, транспортирования, монтажа и эксплуатации. Дефекты можно разделить на распределенные (недостаточная толщина изоляции, увлажненная изоляция, внешние загрязнения, коррозия и т. д.) и локальные (складки, трещины, вмятины, порезы, газовые включения, вкрапления и др.). Такие дефекты в зависимости от физических свойств диэлектрика, величины напряжения, рода тока, условия эксплуатации и других факторов могут послужить причиной двух основных видов пробоя изоляции: электрический пробой и тепловой пробой. Особенностью этих типов пробоя является зависимость пробивной напряженности от температуры и времени воздействия. При электрическом пробое пробивная напряженность не зависит от температуры и времени воздействия напряжения, а при термическом пробое наоборот пробивная напряженность зависит как от температуры, так и от длительности воздействия напряжения. Для того, чтобы проанализировать

метод неразрушающего контроля изоляции, необходимо выделить основные требования к методу:

- 1) безопасность проведения испытания для изоляции КЛ;
- 2) определение величины распределенного дефекта (дефектов);
- 3) определение величины локального дефекта (дефектов);
- 4) определение вида дефекта;
- 5) определение местонахождения дефекта в изоляции КЛ;
- 6) электробезопасность проведения испытания;
- 7) низкая стоимость аппаратуры контроля изоляции КЛ;
- 8) наименьшее время проведения испытания;
- 9) проведение испытания без отключения КЛ;
- 10) информативность полученных данных.

Раннее в России широко использовались кабели с пропитанной бумажной изоляцией, но они имели ряд недостатков: высокую повреждаемость, ограничение нагрузочной способности в соответствии с разностью по уровням прокладки, небольшой срок службы, высокие эксплуатационные расходы, и т. д. Из-за того, что не было альтернативы кабелям с бумажной изоляцией, приходилось мириться с их недостатками и необходимостью производить целый ряд мероприятий для их решения. Создавалось резервирование с параллельной прокладкой кабелей, которые, в свою очередь, приводили к значительному усложнению схем электроснабжения что приводило к снижению её надежности и увеличению инвестиционных капиталов.

В настоящее время находящиеся в эксплуатации городских электрических сетей 6(10) кВ имеют два основных типа кабельной изоляции: 1. пропитанной бумаги (БПИ); 2. Полиэтилен (СП). В последние годы наметилась тенденция перехода к эксплуатации с БПИ на СП. Кроме того, на сегодняшний день, практически во всех крупных российских городах кабельные сети 6 (10) кВ имеют довольно большой срок эксплуатации, что влияет на растущее число пробоев изоляции. Следует учитывать, что даже при принудительном переходе на КЛ с изоляцией из СП для этой процедуры должен быть выделен значительный период времени. Как показывает опыт эксплуатации, в связи с

сложностью изменения схем при реконструкции темп обновления соизмерим с темпом прироста стареющей сети. Надо понимать, какие линии в схеме на фидере должны быть заменены в первую очередь.

Такое положение может изменить только принципиальное усовершенствование конструкции кабелей, что и произошло с началом производства кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Кабели с СПЭ изоляцией лишены большинства недостатков, характерных для кабелей с бумажной изоляцией, поэтому их применение позволяет решить многие проблемы, связанные с надежностью электроснабжения, оптимизацией схемы сети, значительно снизив расходы на реконструкцию и содержание кабельных линий.

На данный момент кабели с СПЭ получили широкое распространение в западных странах, которые проиллюстрированы диаграммой, представленной на рисунке 2.

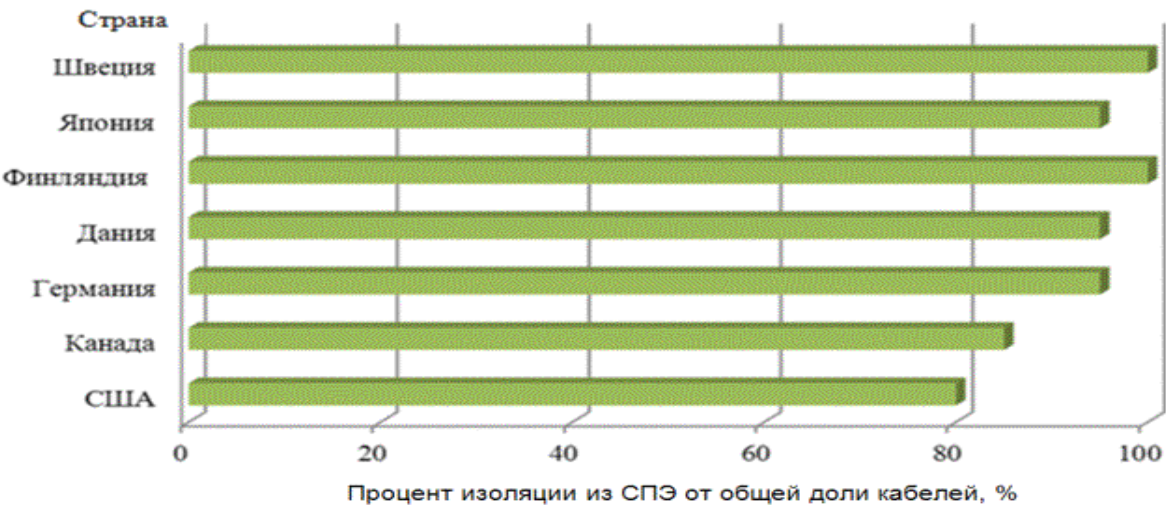


Рисунок 2 – Использование кабелей с СПЭ в различных странах по состоянию на 2012 г (в процентах)

Характерные свойства кабелей из СПЭ обусловлены материалом, из которого изготовлена изоляция. Современные предприятия производят процесс сшивки и вулканизации при значительном давлении и высокой температуре. Данный способ позволяет добиться хорошего качества конечного продукта и предотвратить появление мелких воздушных включений. Такой метод сшивки

позволяет расширить диапазон рабочих температур кабеля и значительно улучшить рабочие характеристики, предотвратить появление частичных разрядов.

Так, в нормальном режиме для сшитого полиэтилена допускается температура 90°C, в кратковременном режиме (протекание токов короткого замыкания) 250°C, прокладка и монтаж кабелей могут осуществляться без предварительного подогрева при температуре до минус 20°C.

Однако основное преимущество СПЭ кабелей перед бумажными – это низкая повреждаемость. К сожалению, из-за небольшого опыта эксплуатации в РФ, отсутствует достоверная информация о количестве повреждений кабелей. По зарубежным источникам, повреждаемость СПЭ кабелей на 1 км на 2–3 порядка ниже, чем у кабелей с бумажной изоляцией. Кабели из сшитого полиэтилена имеют определенные преимущества:

- нечувствительность оболочки к агрессивным средам;
- нормальная эксплуатация в зонах блуждающих токов;
- стойкость к вибрации (возможна прокладка по мостовым конструкциям);
- отсутствует проблема «течей» оболочки при прокладке в кабельных сооружениях и концевых муфтах;
- низкая удельная повреждаемость;
- высокая электрическая прочность;
- большая пропускная способность за счет увеличения допустимой температуры жилы;
- больший ток короткого замыкания (примерно в 1,5 раза);
- меньший вес, меньший диаметр радиус изгиба;
- возможность вести прокладку при температуре до -20°C без предварительного подогрева;
- отсутствие каких-либо жидких компонентов, вследствие чего улучшается экологичность зоны прокладки кабелей.

Преимуществом является и широкая номенклатура сечений выпускаемых кабелей, а также меньшие минимально допустимые радиусы изгиба, составляющие до 7,5 Dh.

Минимальный радиус изгиба кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при прокладке должен быть не менее $15 D_h$ для одножильных и трехжильных кабелей и $12 D_h$ для трех скрученных вместе одножильных кабелей, где D_h - наружный диаметр кабеля или диаметр по скрутке для трех скрученных вместе одножильных кабелей.

Одножильные кабели из сшитого полиэтилена выпускаются сечениями от 50 до 1000 мм², а трехжильные сечением от 10 до 240 мм².

Основными недостатками кабелей из сшитого полиэтилена являются:

- завышенные производителем значения допустимой температуры токопроводящей жилы до 90 °С, что увеличивает рост потерь электроэнергии в электрических сетях из-за увеличения активного сопротивления жил, и, при прокладке в земле, возможен термический пробой оболочки кабеля;

- способность впитывать влагу в осевом направлении межпроводочными зазорами токоведущей жилы со скоростью 60-100 метров в час, при пробое оболочки и изоляции из СПЭ;

- низкая механическая прочность оболочки из-за отсутствия продольных ребер жесткости для кабелей напряжением 6, 10, 35 кВ, что приводит к ее разрыву при прокладке кабеля и требует испытания на целостность оболочек при монтаже и в процессе эксплуатации;

- частые внешние повреждения изоляции, вызванные нарушением технологии прокладки, - около 70 % от общего количества повреждений;

- внутренние повреждения изоляции, вызванные неправильной эксплуатацией, например, испытание постоянным напряжением или естественное старение – образование трингов или «водных деревьев»;

- частые повреждение экрана и жил кабеля;

- индуктивные сопротивления одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ выше, чем у жил того же сечения кабелей с БПИ (в среднем на 35 % - при расположении кабелей треугольником, и на 106 % - при прокладке рядом в одной плоскости). При прокладке одножильных кабелей в одной плоскости индуктивное сопротивление жил примерно в 1,6 раза больше, чем при расположении треугольником. Следовательно, при наличии реактивных

нагрузок, потери напряжения в одножильных кабелях будут выше, чем в трехжильных.

- отсутствие нормативно-технической документации по испытанию кабелей с изоляцией из СПЭ.

Один из рассматриваемых вариантов снижения аварийной работы КЛ – это использование систем мониторинга, которые способны контролировать состояние кабельной линии в режиме "On-Line". Данная система позволяет вовремя выявлять быстро развивающиеся дефекты на самых ранних стадиях, что позволяет оперативно предотвратить аварийную ситуацию с кабельными линиями высокого напряжения.

Другой более экономичный вариант контроля изоляции – это использование системы периодического мониторинга, в которой контроль изоляции осуществляется также, как и при непрерывном мониторинге, когда линия находится в работе и система осуществляет контроль в постоянном режиме, но не непрерывно, а через определенные промежутки времени. Следовательно, такой контроль называют периодическим. При проведении данного мониторинга обязательно должно соблюдаться условие, что интервал времени между проведением замеров должен быть, минимум, в два – три раза меньше стандартного времени развития дефекта, от момента его возникновения до достижения критического уровня. Лишь при соблюдении этого условия сводится до минимума возможность допущения быстро развивающихся дефектов.

В изоляции кабельных линий при эксплуатации могут возникнуть газовые включения, воздушные карманы, или трещины. Так как диэлектрическая проницаемость воздуха в несколько раз ниже, чем у твердых диэлектриков, напряженность поля в газовой среде существенно выше напряженности поля в основной твердой изоляции при поступлении по изоляции рабочего напряжения. Низкая диэлектрическая прочность газового включения по сравнению с твердой изоляцией, создает благоприятные условия для возникновения ионизации и разрядных процессов. Последние называются частичными потому как получению сквозного сплошного разряда препятствует

наличие участков полноценного твердого диэлектрика. Причиной возникновения частичных разрядов также может быть воздействие приложенного высокого напряжения (внутренние индукционные перенапряжения при ударах молнии вблизи кабельной линии); механические воздействия (проседание грунта, крутой перегиб кабеля); тепловая нагрузка (перегрев кабеля в случае перегрузки); химическая коррозия (солевого эффекта, воды и газа). Это приводит к увеличению пространства между проводником и экраном, которое со временем может привести к пробоем кабельной линии на дефектном участке (рисунок 3).

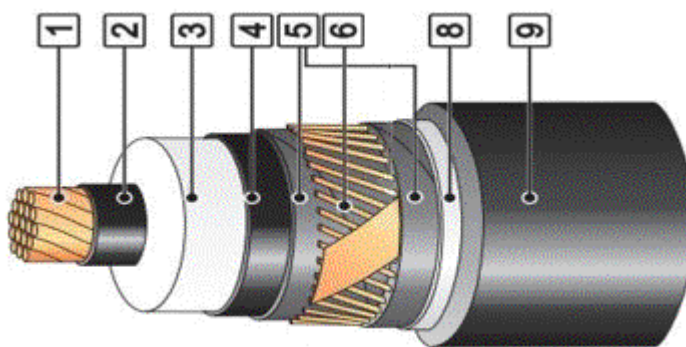


Рисунок 3 - Конструкция одножильного кабеля с изоляцией из СПЭ напряжением 10 кВ:

1-токопроводящая многопроволочная жила; 2 – внутренний электропроводящий экран по жиле; 3 – изоляции из сшитого полиэтилена; 4 – внешний электропроводящий экран по изоляции; 5 - разделительный слой; 6 – проволочный экран; 8 - поперечная герметизация; 9 – внешняя оболочка.

Следует отметить, что при эксплуатации кабельных линий в энергосистемах России до уровня её предельного физического состояния уровень частичных разрядов может быть более 10000 пКл. Количество КЛ, которые имеют дефекты с уровнем частичных разрядов с уровнем 5000 пКл, составляет более 65%. На некоторых предприятиях количество КЛ с неудовлетворительным состоянием более чем 80%. Для сравнения, в Германии предельный уровень ЧР в кабельных линиях считается до 1000 пКл.

Метод частичных разрядов широко используются для контроля бумажно-пропитанной изоляции и изоляции из сшитого полиэтилена. Этот метод позволяет определить наличие дефекта на ранней стадии. Частичный разряд представляет собой искровой заряд очень малой мощности и формируется или внутри, или на поверхности изоляции в установках среднего и высокого напряжения. Эти заряды, со временем, постепенно разрушают изоляцию, что в конечном итоге приводит к ее пробое. Поэтому для выявления и оценки частичных разрядов, их частоты и мощности, мы можем получить информацию о текущем состоянии изоляции. Но в данный момент техника не позволяет узнать объем частичного разряда, например, в газовом включении изоляции. Поэтому введено понятие "кажущегося заряда" - заряда, который должен быть немедленно введен в данное оборудование с целью восстановления равновесия, нарушенного образованным частичным разрядом. В среднем ток ЧР является чисто активным.

На момент появления частичного разряда в кабеле есть две короткие выдержки импульсного сигнала длительностью десятков или сотен наносекунд. Эти импульсы распространяются в разных концах кабельной линии. Поскольку скорость распространения заряда известна, расстояние между устройствами также известно, можем найти и разницу во времени между приходом двух зарядов, на основе этих данных мы сможем найти расстояние до места их возникновения. После наносим все точки возникновения частичных разрядов на схему кабельной линии, получаем карту КЛ, по которой можем оценить состояние изоляции всей кабельной линии. Карта кабельной линии представляет из себя план-схему расположения КЛ.

Частичные разряды разрушают изоляцию кабеля, медленно и незаметно приводят кабельную линию к выходу из строя. Полное разрушение кабеля только вопрос времени, он может занять несколько часов, несколько дней или даже несколько лет. Наиболее частые источники частичных разрядов - это разделка концевых и соединительных муфт. Измерения частичного разряда и определения их источника позволяет повысить точность диагностики изоляции кабельных линий, определить места и участки с наиболее поврежденной

изоляция. Процедура измерения ЧР, в свою очередь, предоставляет информацию об ошибках монтажа, или изменения электрических свойств какого либо участка изоляции кабеля, которые еще не привели к пробое.

1.1 Существующие методы диагностики кабельных линий

В настоящее время существуют два способа измерения ЧР:

1. Контактный способ диагностирования.
2. Бесконтактный способ диагностирования.

Контактный метод диагностики, использует два способа подключения с отключением («Off-Line») и без отключения («On-Line») оборудования. В первом случае, объект необходимо отключить от потребителей. Основным преимуществом данной процедуры является повышенная точность измерения из-за низкого уровня помех. Однако, этот метод является дорогостоящим и его использование не является экономически целесообразным для малых предприятий.

Во втором случае, измерительный прибор подключается к объекту под напряжением. Существенным недостатком этого метода является влияние внешних электромагнитных полей на результаты измерения, а также значительные различия в стандартах оценки степени частичных разрядов и различные методы измерений. Существующая система регистрации частичных разрядов требует обхода кабельных линий по трассе. Используя портативные устройства – PD-локатор, с помощью которого оператор по трассе выявляет очаги возникновения частичных разрядов. Таким образом, использование этого метода в условиях эксплуатации затруднительно. На данный момент, встает вопрос, о разработке новых методов для диагностики кабелей из сшитого полиэтилена.

При оценке технического состояния кабельных линий используют технические средства контроля, которые основываются в своей работе на следующих параметрах контроля физических процессов, протекающих в них. На данный момент технические средства контроля состояния кабельных линий можно разделить на два основных вида: устройства дистанционного контроля, а

также средства трассового контроля. К устройствам дистанционного контроля относятся устройства для испытания изоляции, приборы для проведения измерений сопротивления кабельной изоляции, шлейфа, омической асимметрии, емкости линии, оборудование для импульсной рефлектометрии, оборудование для проведения импульсно-дугового контроля.

Оборудование испытания изоляции кабельных линий в свою очередь также подразделяется на 3 группы: оборудование для испытаний изоляции кабелей повышенным переменным напряжением, оборудование для испытаний изоляции кабелей повышенным выпрямленным напряжением и оборудование для испытаний изоляции кабелей напряжением сверхнизкой частоты.

1.2 Испытания изоляции кабельных линий повышенным переменным напряжением.

Данное испытание обычно проводят согласно схеме, представленной на рисунке 4. Для проведения испытаний, как правило, используют напряжение промышленной частоты. Согласно методике, изоляция кабельной линии подвергается воздействию испытательного напряжения 1 мин. Данное время воздействия приложенного испытательного напряжения не оказывает влияния на состоянии изоляции, которая не имеет дефектов, отрицательных воздействий, и приемлемо для проведения осмотра находящейся под напряжением изоляции.

Время, за которое повышается напряжение до одной трети испытательного значения, можно брать произвольно, но в дальнейшем испытательное напряжение необходимо повышать плавно, с той скоростью, которая необходима для того, чтобы можно было визуально произвести отсчет на измерительных приборах.

После проведения испытаний, продолжительность которых регламентируется, испытательное напряжение следует плавно снижать до значения, которое не превышает одной трети испытательного, и отключить. Допускается резкое снятие напряжения исключительно в тех случаях, когда данная мера необходима, если подвергается риску жизнь человека или

целостность оборудования. Продолжительность испытаний подразумевает время приложения полного испытательного напряжения.

Для того, чтобы предотвратить перенапряжения (из-за высших гармоник), при испытаниях испытательную установку по возможности необходимо подключать к линейному напряжению сети. Форму кривой напряжения контролируют при помощи электронного осциллографа.

Измерения испытательного напряжения обычно проводят на стороне низкого напряжения. В качестве исключений могут быть ответственные испытания изоляции генераторов и крупных электродвигателей и т. д.

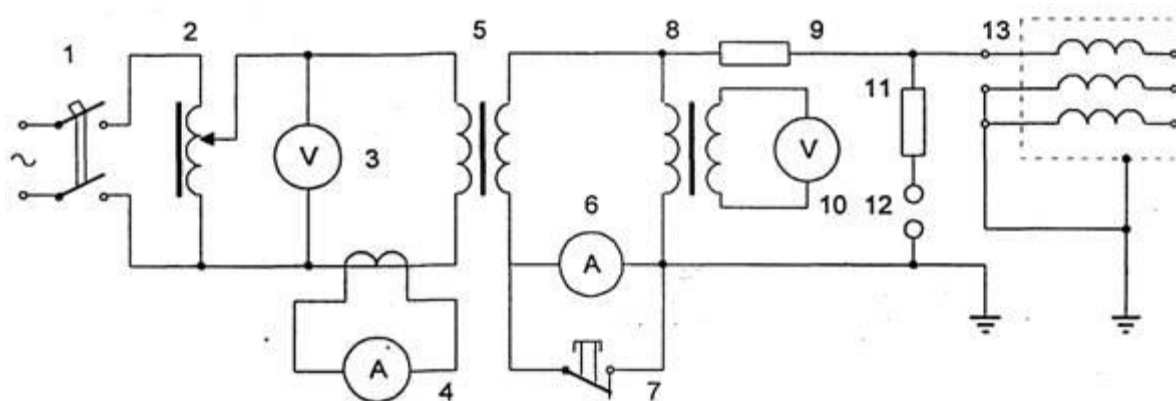


Рисунок 4 - Схема испытания изоляции электрооборудования, повышенным напряжением переменного тока:

1 - автоматический выключатель; 2 - регулировочная колонка; 3, 10 - вольтметры; 4 - амперметр для измерения тока на стороне низкого напряжения; 5 - испытательный трансформатор ; 6 - миллиамперметр для замеров тока утечки на испытуемой изоляции; 7 - шунтирующая кнопка для защиты миллиамперметра от перегрузки; 8 - трансформатор напряжения; 9 - резистор служащий ограничителем тока в испытательном трансформаторе при пробоях испытуемой изоляции (1-2 Ом на 1 В испытательного напряжения); 11 - резистор служащий ограничителем перенапряжений в испытуемой изоляции при пробое разрядника (1 Ом на 1 В испытательного напряжения); 12- разрядник; 13 - испытуемый объект.

Большое воздействие на испытания может оказать емкость испытуемого

объекта. На объектах с большой емкостью испытательное напряжение может превысить нормированное из-за "емкостной вольтодобавки". Емкость также оказывает большое воздействие на мощность испытательной установки, которую находят выражением

$$S_{исп} = \omega C U_{исп}^2 \cdot 10^{-9}, \text{кВ} \cdot \text{А}$$

где С - емкость испытываемой изоляции, пФ; $U_{исп}$ - испытательное напряжение, кВ; ω - угловая частота испытательного напряжения ($\omega = 2\pi f$). Мощность испытательной установки корректируют, учитывая номинальное напряжение испытательного трансформатора:

$$S_{исп.тр} = S_{исп} \frac{U_{ном.тр}}{U_{исп.}}$$

Недостатки данных устройств:

-Не предусмотрена возможность учитывать характеристики переходных процессов в кабельных линиях во время их работы (гармонические составляющие тока и напряжения, грозовые и коммутационные перенапряжения);

-Вывод испытываемой кабельной линии из работы;

-Способствует появлению новых дефектов в изоляции кабельной линии.

1.3 Испытание изоляции повышенным выпрямленным напряжением

Использование выпрямленного испытательного напряжения дает возможность уменьшить мощность испытательной установки, позволяет проводить испытания установок с большой емкостью (кабелей конденсаторов и др.), дает возможность контроля состояния изоляции по измеренным токам утечки.

Для проведения испытаний изоляции выпрямленным напряжением, обычно применяют схему однополупериодного выпрямления.

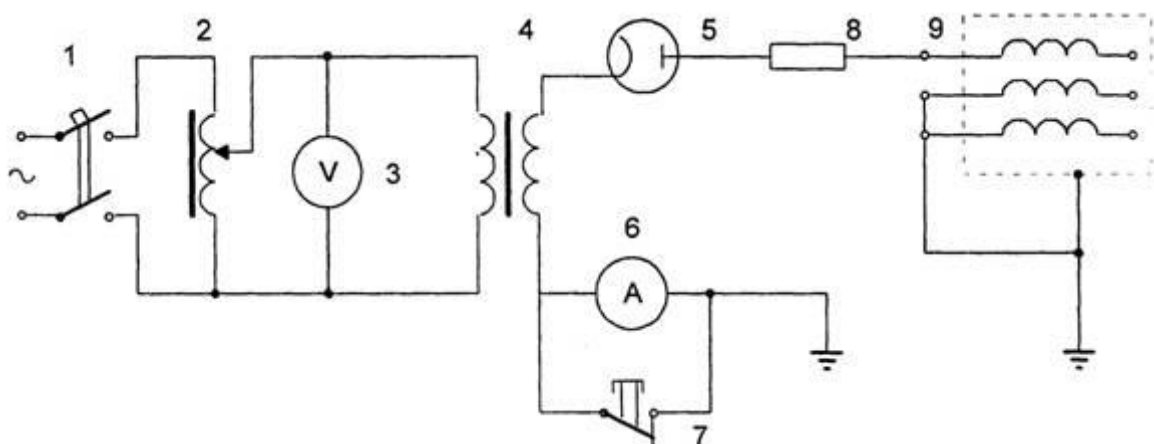


Рисунок 5 - Схема испытания изоляции электрооборудования выпрямленным напряжением: 1 - автоматический выключатель; 2 - кнопка для регулирования; 3 - вольтметр; 4-испытательный трансформатор; 5 - выпрямитель; 6 - миллиамперметр для замеров токов утечки в испытываемой изоляции; 7 - шунтирующая кнопка, для защиты миллиамперметра от перегрузки; 8 - ограничительный резистор; 9 - испытываемый объект.

Порядок проведения испытаний такой же, что и при испытаниях на переменном токе, разница лишь в том, что дополнительно проводят контроль за током утечки. Нагрузка на испытательном трансформаторе не высокая, т. к. она зависит от потерь в сопротивлении изоляции постоянному току, из-за чего при проведении испытаний допускается применять измерительный трансформатор напряжения. В отличие от испытаний переменным напряжением время воздействия на изоляцию выпрямленного напряжения более продолжительное, и в зависимости от испытываемого оборудования может быть в пределах от 10 до 15 мин. Проведение замеров испытательного напряжения по правилам осуществляется на стороне низкого напряжения испытательного трансформатора с помощью вольтметра, из-за чего при замерах нужно учесть коэффициент трансформации трансформатора. Выпрямленное напряжение определяется амплитудным значением, поэтому показания, которые получаются на вольтметре, нужно умножить на значение внутреннего сопротивления выпрямительной лампы, которое уменьшено при нормальном накале катода и резко возрастает при недостаточном токе накала. В результате чего падение напряжения в лампе выпрямителя увеличивается, а на

испытываемой изоляции уменьшается. Поэтому при проведении испытаний нужно вести контроль за напряжением питания испытательной установки. При проведении измерений в комплексе вольтметра должно быть большое добавочное сопротивление для измерения напряжения на высокой стороне.

Как и при проведении испытаний переменным напряжением, для защиты важных установок от случайных скачков перенапряжения необходимо параллельно испытываемому объекту через сопротивление (2 - 5 Ом на каждый вольт испытательного напряжения) в цепь включить разрядник с пробивным напряжением, значение которого 110 - 120 % от испытательного. Ток, который проходит через изоляцию при проведении испытаний выпрямленным напряжением, как правило, не превышает 5 - 10 мА из-за небольшой мощности испытательного трансформатора.

Недостатки данных устройств:

- Не предусмотрена возможность учитывать характеристики переходных процессов в кабельных линиях во время их работы (гармонические составляющие тока и напряжения, грозовые и коммутационные перенапряжения);

- Вывод испытываемой кабельной линии из работы;

- Способствует появлению новых дефектов в изоляции кабельной линии.

После проведения испытаний выпрямленным напряжением нужно тщательно разрядить испытываемый объект. Для того, чтобы снять заряд с испытываемого объекта, необходимо применить заземляющую штангу, в цепи которой присутствует сопротивление 5-50 кОм. Для установок, обладающих большой емкостью, применяют резиновые трубки, наполненные водой. После разряда объект испытаний должен быть наглухо заземлен.

Испытание изоляции напряжением сверхнизкой частоты. Данное испытание основывается на применении к изоляции пониженного испытательного напряжения частотой 0,1 Гц. Схема устройства испытаний изоляции напряжением сверхнизкой частоты показана на рисунке 6. При такой форме напряжение частотой 0,1 Гц меняет свою полярность на синусоиде

также, как и при напряжении промышленной частоты 50 Гц. То есть испытания кабельной изоляции схожи с испытаниями при промышленной частоте 50 Гц.

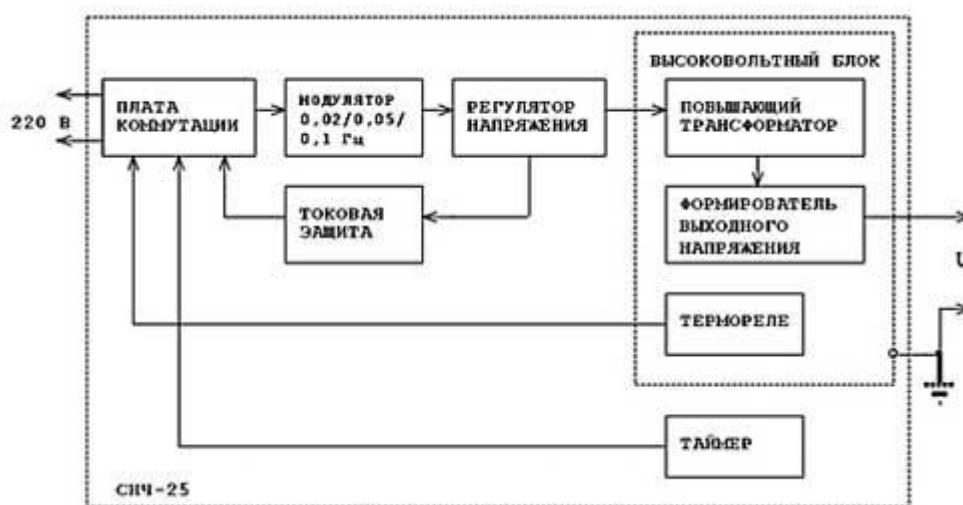


Рисунок 6 - Схема испытания изоляции напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц установка (СНЧ-25)

Испытания изоляции при низких частотах со сменой полярности дают возможность выявить дефекты в изоляции без остаточных объемных зарядов, которые формируются после испытаний, в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена, в отличие от испытаний постоянным напряжением. Объемные заряды, которые накоплены в газовых промежутках и включениях изоляции из сшитого полиэтилена, при воздействии постоянного напряжения приводят к снижению сопротивления и пробоем изоляции. В то время как испытания напряжением сверхнизкой частоты не оказывают вредного влияния на состояние изоляции. Из-за чего за границей чаще всего испытания кабелей с полиэтиленовой изоляцией проводят исключительно напряжением сверхнизкой частоты.

Недостатки данных устройств:

- Не предусмотрена возможность учитывать характеристики переходных процессов в кабельных линиях во время их работы (гармонические составляющие тока и напряжения, грозовые и коммутационные перенапряжения);

- Вывод испытываемой кабельной линии из работы;

-Способствует появлению новых дефектов в изоляции кабельной линии.

Средства измерения сопротивления изоляции кабельной линии, сопротивления шлейфа, омической асимметрии, емкости линии, а также расстояния до места повреждения или обрыва линии. В настоящее время существуют два варианта волнового метода которые приблизительно определяют расстояние до места повреждения: метод бегущей волны напряжения и метод импульсного тока.

1.4 Использование метода бегущей волны

При использовании метода бегущей волны в кабельную линию подают напряжение отрицательной полярности от источника постоянного напряжения, соединенного через сопротивление, величина которого гораздо выше волнового сопротивления линии (W), которое медленно повышают до пробоя. Схема по реализации метода бегущей волны смотри на рисунке 7.



Рисунок 7 - Схема реализации волнового метода бегущей волны напряжения

В поврежденном месте начинают формироваться электромагнитные волны положительной полярности, потому как испытательное напряжение имеет отрицательную полярность, а коэффициент отражения по напряжению в месте повреждения также отрицателен ($K_n = -1$). В результате чего одна волна от места пробоя распространяется к одной стороне кабеля, а другая к другой. Достигнув начала кабеля, первая волна отражается от большого сопротивления источника, после чего, не изменяя полярности, распространяется к месту повреждения. В месте повреждения вновь возникает пробой, и волна

отражается с обратным знаком, после чего процесс повторяется. Затухая, волновой процесс будет продолжаться до тех пор, пока волна сохраняет свою энергию для пробоя в месте повреждения. Данный процесс фиксируется регистратором, после чего регистратор анализирует полученную информацию и определяет расстояние до места повреждения.

1.5 Использование метода импульсного тока

Метод импульсного тока в отличие от метода бегущей волны используют в тех случаях, когда высокоомные повреждения (высокоомное замыкание жилы на землю, малое расстояние между проводниками в муфтах, снижение сопротивления изоляции) не удастся преобразовать с помощью прожига в низкоомные повреждения. Схема по реализации волнового метода импульсного тока смотри на рисунке 8. Разница при использовании метода импульсного тока заключается в том, что выходное сопротивление высоковольтного импульсного генератора должно быть значительно меньше волнового сопротивления кабельной линии (W), а коэффициент отражения по току положителен ($K = 1$).



Рисунок 8 - Схема реализации волнового метода импульсного тока

В общих чертах высоковольтный импульсный генератор представляет из себя источник высокого напряжения, на выходе у которого в цепь включен специальный разрядник и высоковольтный конденсатор, с которого высоковольтные импульсы поступают в кабель.

Волна, поступающая от высоковольтного импульсного генератора, достигая места повреждения, вызывает в нем пробой. В ходе этого часть

энергии импульса отражается от места повреждения и возвращается к началу линии. Высоковольтный конденсатор, включенный в начало линии, пробивается, после чего импульс снова отражается. После чего процесс повторяется и фиксируется регистратором волновых процессов. Специальное присоединительное устройство по току (импульсный токопреобразователь) обеспечивает связь измерителя волновых процессов с кабельной линией.

Недостатки данных устройств:

- Не предусмотрена возможность учитывать характеристики переходных процессов в кабельных линиях во время их работы (гармонические составляющие тока и напряжения, грозовые и коммутационные перенапряжения);

- Вывод испытываемой кабельной линии из работы;

- Невозможность нахождения объёмных зарядов в изоляции кабеля.

1.6 Использование метода импульсной рефлектометрии

Метод импульсной рефлектометрии, или, по-другому, метод отраженных импульсов, основывается на распространении импульсных сигналов вдоль изоляции кабельной линии в двух и многопроводных системах.

Оборудование, которое осуществляет данный метод, называется импульсным рефлектометром. Метод импульсной рефлектометрии основывается на выполнении следующих операций:

- "Зондировании кабеля" (двухпроводной линии) импульсами напряжения.

- Обработка отраженных импульсов от места дефекта и неоднородностей волнового сопротивления.

- Фильтрация, отраженных импульсов от места дефекта, от помех (электромагнитных от неоднородности линий).

- Определение расстояния до места повреждения путем расчета разности во времени прихода отраженного импульса относительно зондирующего.

Данный метод позволяет определить локацию повреждения и применить отдельные трассовые методы обнаружения только на небольших участках

трассы, в следствие чего существенно сокращается время обнаружения дефекта.

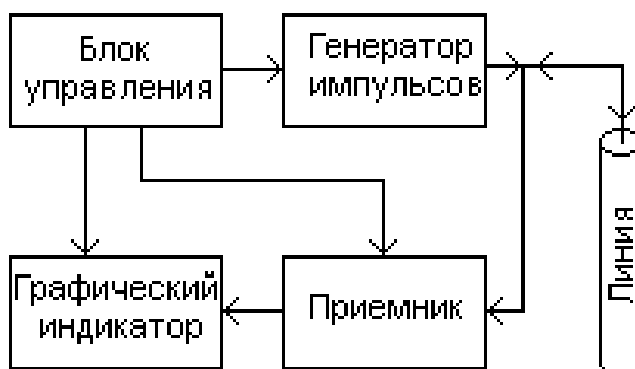


Рисунок 9 - Схема импульсной рефлектометрии

Плюсами использования данного метода контроля является:

- возможность выявления мест зарождающегося дефекта в изоляции кабельной линии.

Минусами использования данного метода контроля является:

- плохая точность выявления локации дефекта;
- неприменимость для локализации мест зарождающихся дефектов без вывода из рабочего режима.

Трассовые средства контроля состояния кабельных линий. На данный момент можно выделить два основных средства трассировки кабельных линий- это индукционные средства трассировки и акустические средства трассировки.

1.7 Использование акустического метода

Акустические средства основаны на прослушивании звуковых колебаний над местом повреждения линии, которые могут быть вызваны искровым разрядом в канале повреждения.

Данные средства трассировки используют для того что бы точно определить локализацию, по трассе кабельной линии, обрыва жили или дефекта в силовых кабелях и муфтах с использованием источника ударных волн (генератора) и переносного приемника ударных волн. Схема использования акустических средств трассировки показана на рисунке 10.

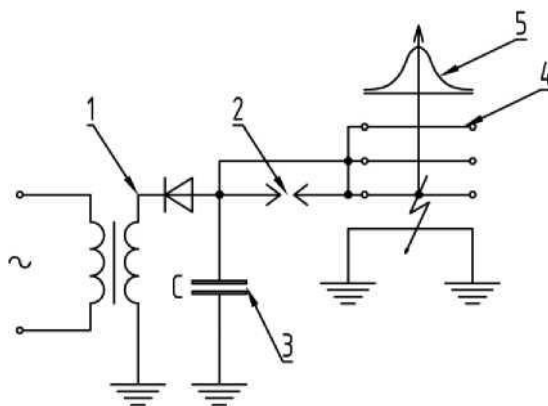


Рисунок 10 - Схема использования акустических средств трассировки 1- выпрямитель, 2-разрядник, 3-конденсатор, 4-уцелевшие жилы кабеля,5-место прослушивания звуковых колебаний поврежденной кабельной линии

Плюсами применения данных систем является:

- высокая точность определения локализации дефекта в кабельной линии;

Минусами применения данных систем является:

- возможность определения дефекта на кабельной линии при её выходе из строя.

1.8 Использование индукционных средств контроля

Индукционные средства основаны на принципе поиска мест пробоя изоляции жил между соседней жилой, а также при обрыве линии с одновременным замыканием жил между собой.

Данные средства трассировки используют для того, чтобы точно определить локализацию по трассе кабельной линии обрыва жили или дефекта в силовых кабелях и муфтах, используя генераторы звуковой частоты и звуочастотные приемники. Их достоинства заключаются в простоте поиска локации повреждений жил силового кабеля, а также в простоте трассировки кабельных линий, которая широко применяется как для высоковольтных кабелей, так и для низковольтных кабельных линий. Схема использования индукционных средств трассировки показана на рисунке 11.

Когда по кабельной линии пропускают однофазный переменный ток, вокруг него начинает образовываться магнитное поле, величина которого зависит от величины тока. Если в зону действия данного поля внести рамку (антенну) из проволоки, то магнитное поле будет наводить в ней ЭДС и при замыкании ЭДС на контуре в телефоне возникнет ток и на всем не поврежденном участке кабельной линии начинает появляться звучание; когда рамка доходит до предположительного места дефекта, звук в телефоне пропадает. Чем выше частота тока, тем отчетливее звук. Чтобы звук от испытуемого кабеля не совпадал со звуком других кабелей, по нему от частотного генератора пропускают ток частотой 800-1200 Гц.

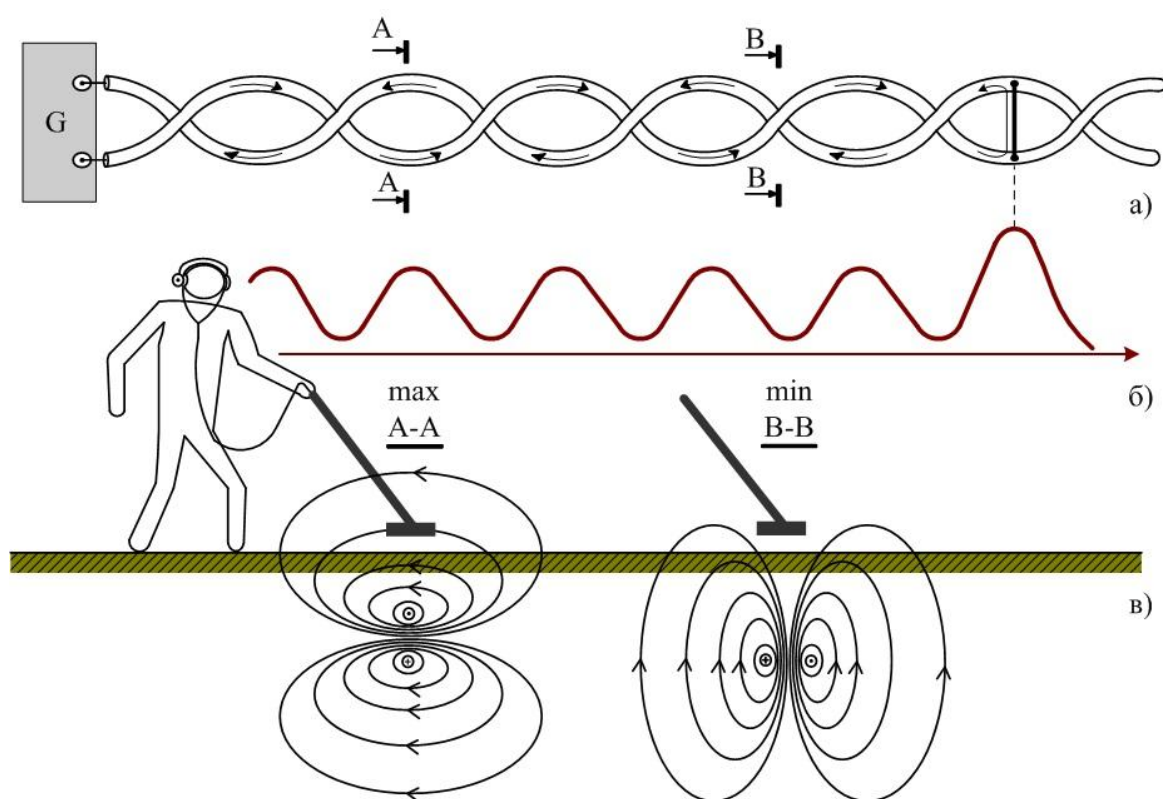


Рисунок 11 - Схема применения индукционных средств контроля

При проведении замеров магнитного поля определяют наличие и местоположение кабельной линии, а также локацию места дефекта. Измерения как правило проводят с помощью специальной поисковой катушки, внутри которой находится сердечник для концентрации электрического поля.

Плюсами использования данных систем является:

- высокая точность локализации мест выхода кабельных линий из строя,
- позволяет проводить диагностику кабельной линии без её отключения.

Минусами использования данных систем является:

- невозможность локализации остаточных зарядов в изоляции кабельных линий.

1.9 Использование метода импульсно-дугового контроля

Импульсно-дуговой метод применяется при расчете расстояния до места пробоя или дефекта кабельной линии. Данный метод основан на воздействии на кабельную линию высоковольтным импульсом и осуществление измерений методом импульсной рефлектометрии. Во время проведения измерений, пока в месте пробоя горит стабилизированная дуга, расстояние до места пробоя или повреждения определяется при помощи запущенного рефлектометра. Структурная схема подключения при реализации импульсно-дугового метода приведена на рисунке 12.

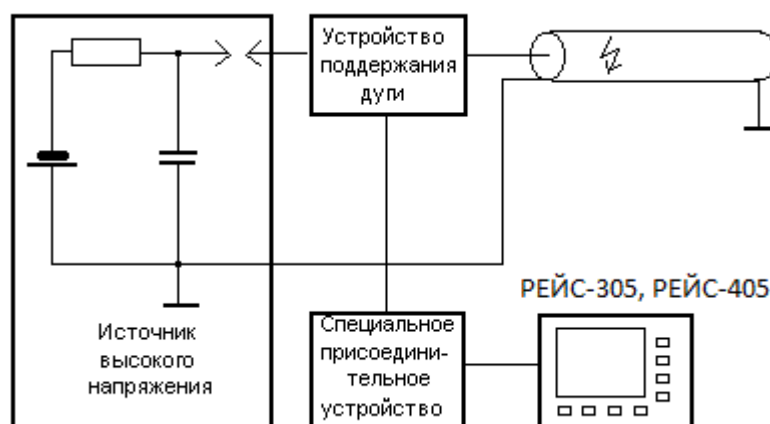


Рисунок 12 - Схема реализации импульсно-дугового метода

Импульсный генератор представляет из себя источник высокого напряжения, в цепь которого на выходе включен высоковольтный конденсатор со специальным разрядником, подключение к кабельной линии осуществляется при помощи устройства поддержания дуги. При подаче импульса от импульсного генератора напряжения в месте повреждения возникает пробой,

через устройство поддержания дуги начинает протекать ток и дуга гаснет, образуя дуговой разряд. При помощи индуктивности, которая имеется в устройстве поддержания дуги, ток в дуге поддерживается в течении короткого промежутка времени (менее секунды). А электрическое сопротивление дуги приближено к нулю, что эквивалентно короткому замыканию.

Подключение импульсного рефлектометра осуществляется при помощи специального устройства (фильтра). Зондирующие импульсы от рефлектометра через фильтр поступают в кабельную линию, а отраженные импульсы - возвращаются в рефлектометр.

Недостатки данных устройств:

-Не предусмотрена возможность учитывать характеристики переходных процессов в кабельных линиях во время их работы (гармонические составляющие тока и напряжения, грозовые и коммутационные перенапряжения);

-Вывод испытываемой кабельной линии из работы.

Проведя анализ существующих конструктивных схем средств технического контроля можно сделать вывод, что существующие средства технического контроля не предусматривают возможность учитывать характеристики переходных процессов в кабельных линиях во время их работы (гармонические составляющие тока и напряжения, грозовые и коммутационные перенапряжения. Соответственно, возникает необходимость применения устройств, которые объединяют в себе контроль технического состояния и трассировку кабельной линий.

Выводы по главе 1

В данной главе были затронуты такие вопросы, как проблема надежности электроэнергетических сетей из-за выхода силовых кабельных линий из строя. Один из множества путей решения проблемы надежности кабельных линий – это разработка систем диагностики изоляции. Также были рассмотрены определенные требования, которые предъявляются перед данными системами, такие как:

- безопасность проведения испытания для изоляции КЛ;
- определение величины распределенного дефекта (дефектов);
- определение величины локального дефекта (дефектов);
- определение вида дефекта;
- определение местонахождения дефекта в изоляции КЛ;
- электробезопасность проведения испытания;
- низкая стоимость аппаратуры контроля изоляции КЛ;
- наименьшее время проведения испытания;
- проведение испытания без отключения КЛ;
- информативность полученных данных.

На данный момент в России внедряются силовые кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена, поэтому выбор и исследование систем мониторинга были проведены с учетом данных нововведений.

Помимо указания проблемы и рассмотрения требований, также были рассмотрены системы диагностики, которые используют на данный момент: Испытание изоляции повышенным выпрямленным и переменным напряжением, метод бегущей волны, метод импульсного тока, метод импульсной рефлектометрии, акустический метод, импульсно-дуговой контроль.

Все вышеперечисленные методы имеют свои преимущества и недостатки, методика применения данных средств разработана и на практике показала себя с хорошей стороны.

Но данные средства имеют один общий недостаток – это невозможность учета характеристик переходных процессов в КЛ во время их работы.

2. Методы диагностики изоляции предлагаемые для замены существующих средств контроля

В наше время для обеспечения надёжной и безаварийной работы высоковольтных кабельных линий самыми популярными являются два главных метода диагностики, применяющиеся в системах непрерывного мониторинга состояния изоляции кабельных линий.

2.1 Метод контроля и мониторинга технического состояния кабельной линии на основе непрерывного измерения температуры изоляции КЛ с использованием встроенных оптических линий

Осуществляет мониторинг температуры изоляции высоковольтной кабельной линии, проводит измерения температуры изоляции кабельной линии в областях с точностью до метра. Эта информация дает возможность эксплуатационному персоналу вести контроль за работой кабельной линии по всей её длине, измерять температуру для обнаружения поврежденных участков в области повышенных температур.

Температура кабельной линии не может изменяться быстро, самое большое время для изменения температуры может составлять до нескольких минут, поэтому один прибор-регистратор вполне можно использовать для контроля температуры нескольких кабельных линий (фаз одной кабельной линии). Для этой цели в систему мониторинга добавляется оптический мультиплексор переключатель, который последовательно коммутирует оптические измерители и позволяет к одному выходу подключать несколько оптоволоконных линий. С помощью использования одного мультиплексора можно отказаться от использования нескольких устройств регистраторов оптических сигналов, что позволяет снизить общую стоимость системы температурного мониторинга.

Параметры систем температурного мониторинга во многом зависят от типа используемого оптического волокна. При применении многомодового оптического волокна достигается наилучшее контрастное разрешение и возможность более точного измерения температуры. Использование

одномодового оптического кабеля дает возможность контролировать линии гораздо большей длины, но при этом пространственное разрешение и точность измерения температуры в несколько раз хуже. Для систем температурного мониторинга кабельной линии с одномодовым оптическим волокном требуются более дорогие лазерные источники.

Система температурного мониторинга в основном предназначена для контроля технологических режимов работы кабельной линии, так как точное знание текущей температуры кабеля позволяет быстро изменить нагрузки линии, если система мониторинга показывает, что она перегружена. Но оптическое волокно в качестве основного средства для диагностики считается недостаточно информативным. Это связано с тем, что возникновение и развитие дефектов в изоляции высоковольтных кабельных линий до момента пробоя очень редко сопровождается заметным повышением температуры.

Все основные дефекты в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена при своем зарождении имеют локальный характер, следовательно, процессы разрушения в этих поврежденных зонах приводят лишь к уменьшению эффективного слоя изоляции в соединительных муфтах или самом кабеле. Развитие дефектов в высоковольтных кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена завершается не повышением температуры с дальнейшим пробоем, как это происходит в кабелях низкого напряжения, а полноценным полевым высоковольтным пробоем. Это происходит в тот момент, когда толщина изоляции дефектного участка в промежутке между жилой и экраном сокращается до недопустимого значения. При этом температура в зоне дефекта в изоляции во время развития дефекта практически не изменилась, но резко увеличилась в момент непосредственно дугового пробоя и выходу кабельной линии из строя.

Положительным аспектом использования системы мониторинга распределения температуры вдоль кабельной линии является возможность точно определять место после аварийного выхода кабельной линии из строя. На окончательной схеме распределения температуры аварийной кабельной линии будет видно, что после зоны пробоя полностью отсутствует информация о

температуре кабельной линии, потому как на данном участке, вместе с силовым кабелем, произошло разрушение и оптического волокна - распределенного датчика температуры.

Важным фактором надежности изоляции кабельной линии является её тепловой режим работы. Из наблюдений параметров в КЛ известно, что существует зависимость сопротивления изоляции кабельной линии, уровня частичных разрядов от температуры КЛ. Практическое применение систем температурного мониторинга показывает, что она является важным источником информации для надежной эксплуатации кабельной линии.

Принцип работы системы. Работа системы температурного мониторинга контроля изоляции, основывается на действии оптической рефлектометрии (Fiber Optic Distributed Temperature Sensing). Система состоит из источника поляризованного света, оптических волокна, помещенного в поперечное сечение кабельной линии или прикрепленного к кабельной линии снаружи и приемника светового луча. Анализ спектра отраженного света от неоднородностей волокна.

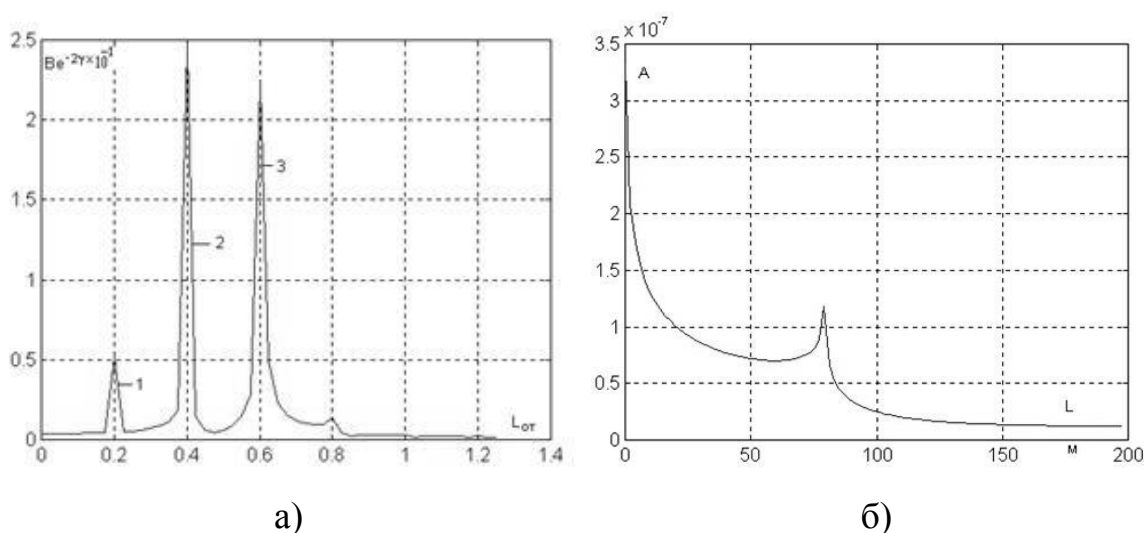


Рисунок 13 - Графики спектров плотности

На рисунке 13 а) под номерами 1, 2, 3 изображены амплитуды, которые соответствуют локальным дефектам, на рисунке 13 б) спектр плотности для кабельной линии с распределенными дефектами. Обратное рассеивание предоставляет информацию о температуре в изоляции КЛ в любом месте на

линии с разрешением 1 м и точностью до 1°C. Так как система измерения выполняется на основе сигналов, передающихся по оптическим волокнам, наличие электромагнитного воздействия для блока контроля системы не имеет значения.

Информация о температуре изоляции кабельной линии позволяет адекватно оценивать тепловой режим КЛ и определить характер дефекта, который развивается в изоляции (тепловой или электрический), что, в свою очередь, дает необходимую информацию для принятия решения о дальнейшей эксплуатации КЛ.

Распределенные системы измерения температуры (DTS) - это несколько оптоэлектронных устройств, которые измеряют температуру при помощи оптических волокон, функционирующих в качестве линейных датчиков.

Температура регистрируется вдоль оптического кабель датчика, по всему непрерывному профилю. Высокая точность определения температуры достигается на больших расстояниях. Как правило, в системах ДЦ можно найти температуру с пространственным разрешением 1 м с точностью в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$ разрешением 0.01 °C.

Физические измерения таких величин, как температура или давление, влияют на стекловолокно и локально изменяют характеристики пропускания света в волокне. В результате гашения света в кварцевых стеклянных волокнах за счет рассеяния место внешнего физического воздействия может быть определено таким образом, что оптические волокна используются в качестве линейного датчика. Оптические волокна изготовлены из легированного кварцевого стекла. Кварцевое стекло - это форма диоксида кремния (SiO_2) с аморфной твердой структурой. Тепловые эффекты вызывают решетчатые колебания в твердых структурах. Когда свет падает на эти термически возбужденные колеблющиеся молекулы, происходит взаимодействие между легкими частицами (фотонами) и электронными молекулами. Рассеяние света, также известно, как комбинационное рассеяние света, происходит в оптическом волокне. Комбинационное рассеяние света обусловлено термическим влиянием молекулярных колебаний. Следовательно, рассеяние света несет информацию о

локальной температуре, где произошло рассеяние. На самом деле комбинационное рассеяние света имеет две частоты смещения компонентов: стоксовую и антистоксовую компоненты. Амплитуда антистоксовой компоненты сильно зависит от температуры, тогда как амплитуда компонент Стокса нет. Поэтому метод зондирования Raman требует фильтрации для изоляции соответствующих частотных составляющих и состоит в записи соотношения между амплитудой Анти-Стокса, которая содержит информация о температуре. На рисунке 14 показан спектр рассеянного света в оптических волокнах, предполагая, что с одной длиной волны λ_0 запускается в волокне. Brillouin-based - метод зондирования полагается на измерение частоты, в отличие от метода Raman-based; это их главное отличие.

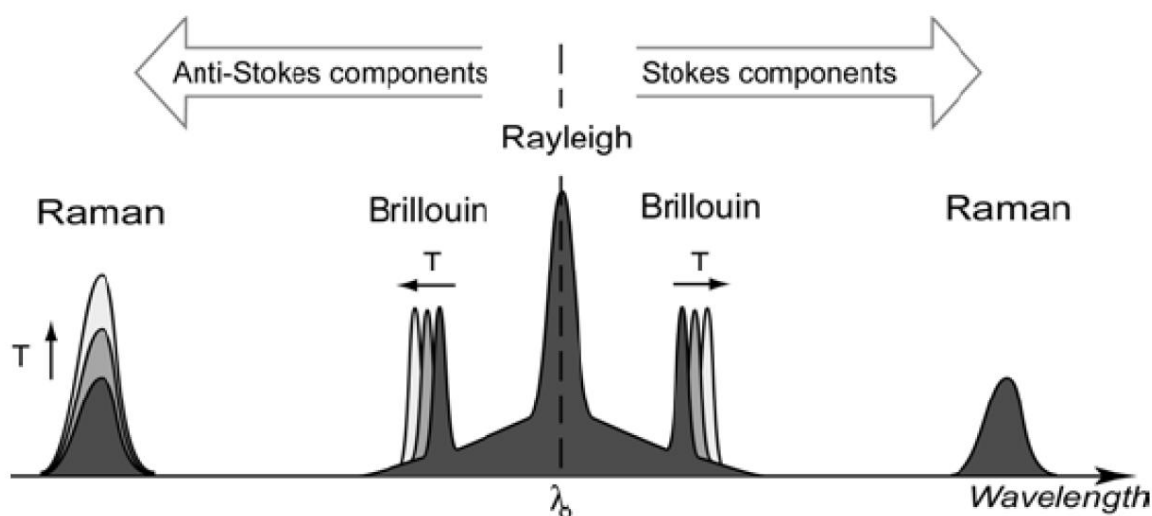


Рисунок 14 - Схематическое изображение спектра рассеянного света с одной длиной волны сигнала, распространяющегося в волоконных датчиках. Увеличение температуры волокна оказывает влияние на обе Raman и Brillouin компоненты

Система измерения температуры состоит из регулятора (источника лазера, оптического модуля, ВЧ смесителя, приемника и микропроцессора) и кварцевого стекловолокна в качестве линии, датчик температуры (рисунок 15). Волоконно-оптический кабель является пассивным и не имеет отдельных точек зондирования, и потому может быть изготовлен на основе стандартов

телекоммуникационных кабелей. При этом разработчику системы-интегратора не придется беспокоиться о точном местоположение каждой точки зондирования, стоимость проектирования и установки системы зондирования на основе распределенных волоконно-оптических датчиков меньше, чем при использовании традиционных датчиков. Кроме того, поскольку сенсорный кабель не имеет движущихся частей, его срок службы более 30 лет, планируемые расходы на содержание и эксплуатацию значительно меньше, чем для обычных датчиков. Преимущества волоконно-оптических технологий зондирования включают в себя большое количество контролируемых точек по всему волоконно-оптическому датчику, устойчивость к электромагнитным помехам, вибрации, устойчивость к влажности и коррозии, без активных электронных цепей вдоль кабеля, хорошую надежность и безопасность для использования во взрывоопасных зонах (мощность лазера проходит ниже уровня, который может вызвать возгорание), таким образом делая эти датчики идеальными для использования в промышленном зондировании.

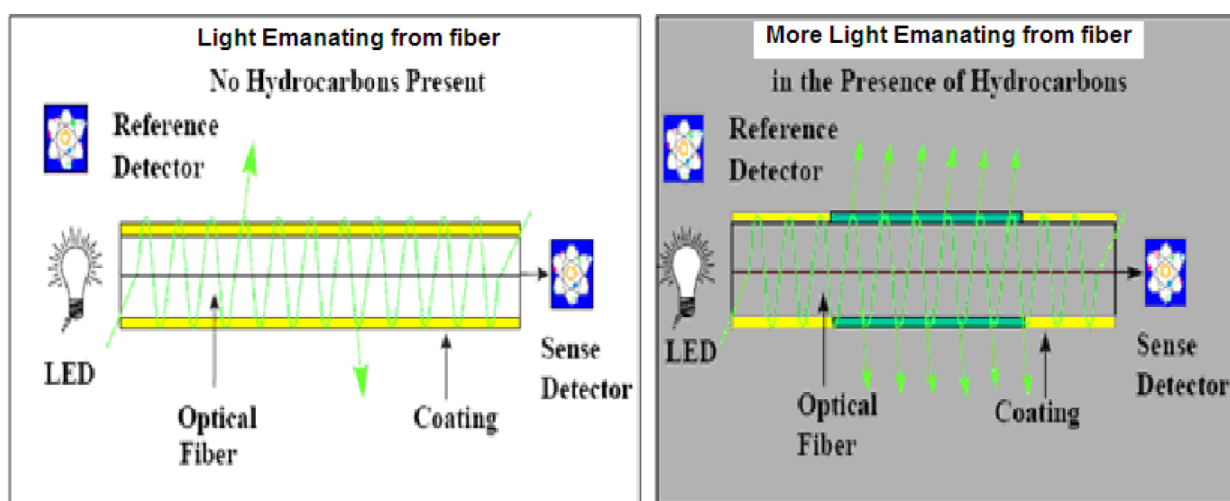


Рисунок 15 - Схематическое изображение света при прохождении через оптоволокно

Каждый участок системы состоит из одного оптоволоконного кабеля (датчика температуры) с четырьмя одиночными волокнами и может крепиться выше или ниже кабельной линии. Каждый участок может быть подключен

через оптический разъем или склеиваться вместе. Проект концентрируется на непрерывном мониторинге. Здесь система мониторинга базируется на технологии комбинационного рассеяния света, которая выбрана для распределенного мониторинга температуры. Как описано выше, распределенные волоконно-оптические датчики должны выявлять изменения температуры с пространственным разрешением $0,05^{\circ}\text{C}$. Пространственное разрешение зависит от датчика длины кабеля, и обычно эта длина составляет от метра до 10 км.

2.2 Состав системы и результаты измерений

Система состоит из считывающего блока, сенсорного кабеля и аксессуаров (соединительных коробок, удлинителей, клеящего покрова и т. д.). Оптические волокна интегрированы в надежные провода и позволяют проводить измерения в произвольные моменты времени, квазинепрерывно с высоким пространственным разрешением вдоль кабеля.

Параметры, контролируемые при помощи оптического кабеля:

- Средняя температура по датчику с пространственным разрешением 1-2 м;
- Средний порог обнаружения температуры по датчику (оптоволокну);
- Измерения изменения температуры по датчику (оптоволокну);
- Обнаружение утечки.

Нынешняя стратегия мониторинга предусматривает определенные резервные датчики, которые необходимы для тех случаев, когда основные датчики повреждены во время монтажа или позже. Следовательно, даже если один датчик в одном кабеле поврежден после определенного времени, производительность всей системы не уменьшаться.

Происхождение возмущений температуры вокруг кабельной линии зависит от типа кабеля и его класса напряжения. Наиболее типичными последствиями являются следующие:

- Дефекты при монтаже или во время эксплуатации в изоляции высоковольтной кабельной линии;
- Износ изоляции кабельной линии.

Основные требования к системе включают блок с программным обеспечением для сбора данных, чтобы показывать результаты локально и удаленно и в виде предупреждений в зависимости от измерений.

Распределенное управление данными и анализ программного обеспечения - неотъемлемые и полностью совместимые части распределенной системы мониторинга для хранения данных, обработки, представления и анализа, а также для контроля одного или нескольких значений. Основные функции программного обеспечения предназначены для автоматического измерения на датчиках. Оператор должен просматривать в реальном времени результаты измерений на датчиках в графической форме. Программное обеспечение высвечивает информацию на мониторе различных отклонений в виде графика по всей длине кабельной линии.

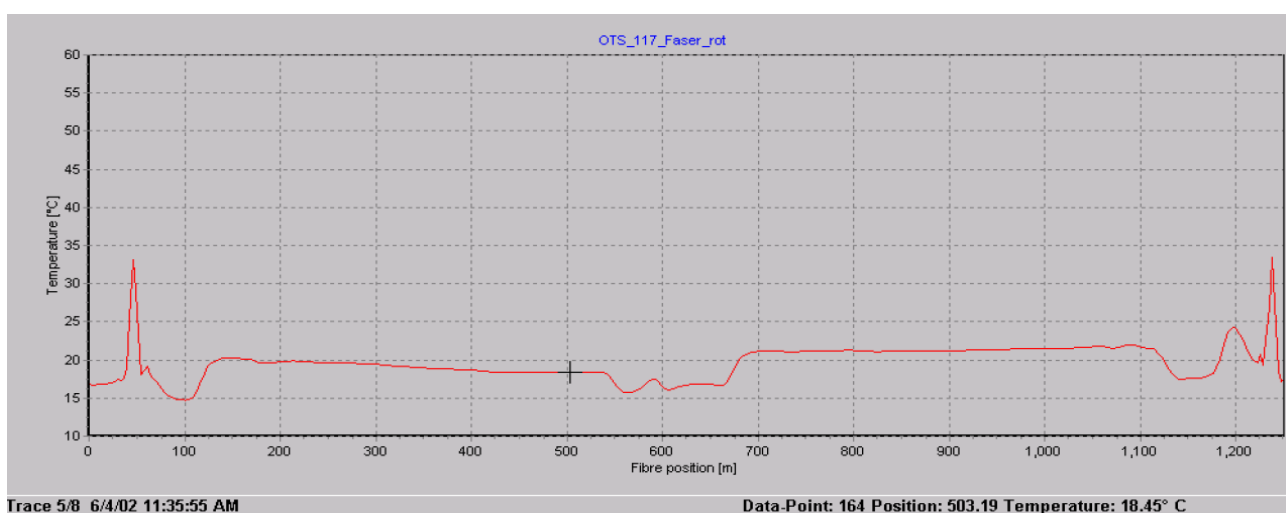


Рисунок 16 - Результаты измерений температуры изоляции

На рисунке 16, показаны результаты измерений температуры кабельной линии системой OTS в режиме реального времени. Вдоль оси X (горизонтальная) в метрах отложена длина кабельной линии, по оси Y (вертикальная) в градусах Цельсия отложены значения температуры. Анализируя график, можем увидеть единичные скачки температуры изоляции на определенных участках кабельной линии. Данные скачки температуры могут возникнуть из за внешних температурных воздействий на изоляцию кабельной

линии или в момент протекания по кабелю повышенной токовой нагрузки, что вызывает скачки температуры на наиболее изношенных участках изоляции.

Программное обеспечение обрабатывает результаты измерений от всех кабелей, подключенных к системе. Программа хранит всю информацию, которая приходит от датчика в одной структурированной базе данных. Все данные могут быть экспортированы в любое другое программное обеспечение, включая MS Excel и MS Access. Также система позволяет нескольким пользователям одновременно получить доступ к программному обеспечению с разных ПК (локально или удаленно через модем или локальную сеть).

Блок RTTR, который дополнительно встроен в данную систему, дает возможность рассчитать температуру кабельной линии, ее токовую нагрузку, а также дает возможность выявлять дефекты в КЛ. Параметры входных сигналов для блока RTTR:

- Температура изоляции (измеряется контроллером);
- Температура окружающего воздуха (также измеряется контроллером, дополнительная трасса оптоволоконного кабеля прокладывается вдоль кабельной линии на расстояние 0,5-1 м от кабельной изоляции);
- Характеристики КЛ (сечение, толщина изоляции, местоположение оптоволоконного кабеля);
- Условия монтажа. (В блок программируются данные об условиях прокладки каждого участка с точностью от 5 до 10 м);

Плюсы расчетов при помощи модуля RTTR:

- Определение реальной температуры окружающей среды;
- Определение температуры изоляции;
- Дает возможность спрогнозировать аварийную ситуацию (рассчитывает аварийные процессы по времени, току, температуре).

Блок RTTR позволяет более точно оценить реальную ситуацию. На рисунке 17 мы видим два отдельных графика, температуры оболочки и температуры проводника. В установившемся режиме график температуры оболочки не сильно отличается от графика температуры проводника, но спустя какое-то время при переходном режиме данное отличие существенно. Далее

после перехода точки начала аварийного режима можно наблюдать резкое повышение температуры оболочки и проводника, что приводит к неизбежному износу изоляции и уменьшению электрической прочности. Дальнейшее повышение температуры приводит к высоковольтному пробое изоляции и выходу кабельной линии из строя.

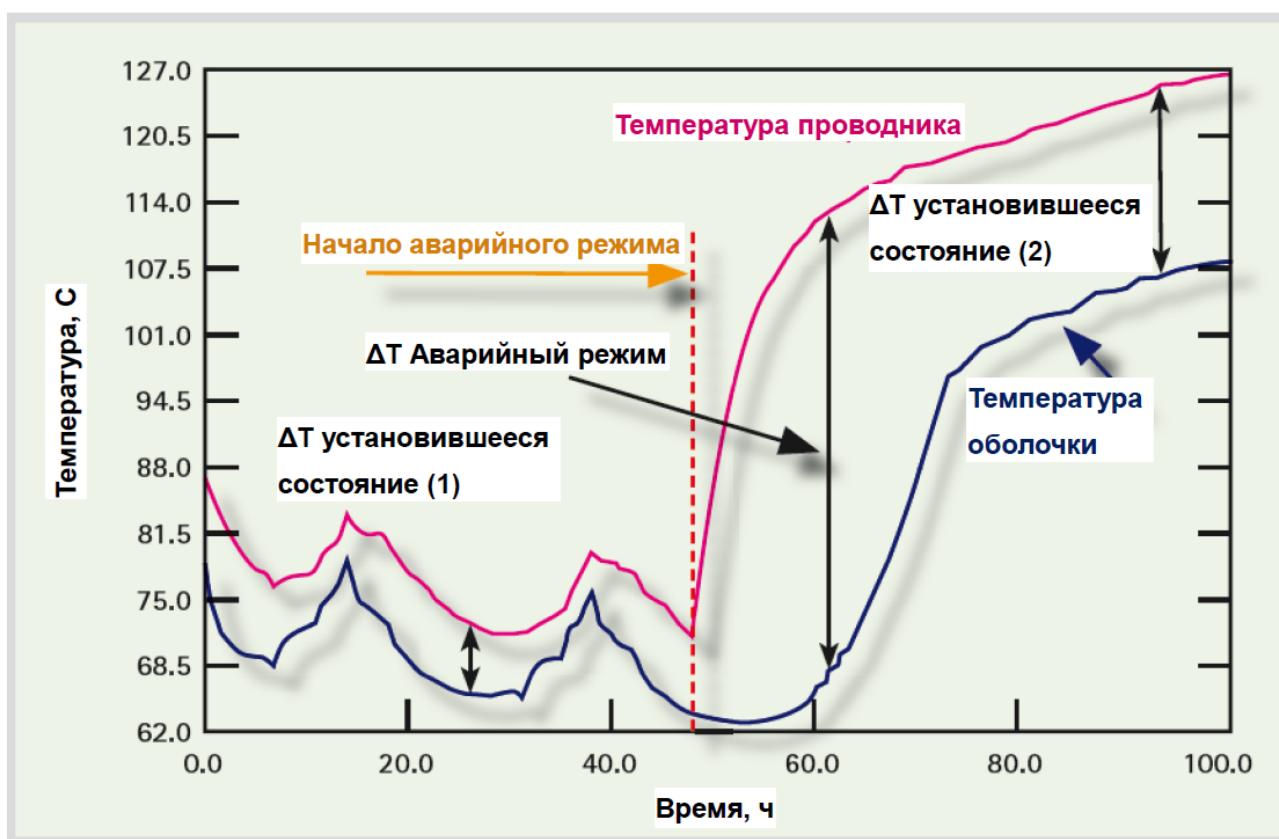


Рисунок 17 - Анализ графиков температуры проводника и температуры оболочки КЛ, системой RTTR

Непрерывный мониторинг жизненно важен для данного проекта, сигналы должны быть классифицированы как угрозы, предавария / авария. Каждая угроза классифицируется по цвету (например, зеленым — никаких угроз, желтый — пред авария, красный - авария) для легкой идентификации. Умные сигнализаторы также указывают назначение зон для каждого кабеля разной длины. Должна быть предусмотрена возможность изменения чувствительности или независимости системы сигнализации от других систем, которые подключены к кабельной линии. Каждая система может быть индивидуально настроена под местные климатические условия окружающей среды.

2.3 Метод оперативного контроля и мониторинга технического состояния кабельной линии на основе измерения и анализа частичных разрядов в изоляции муфт и кабеля

Контроль наличия повреждений в изоляции концевых и соединительных муфт по частичным разрядам. Чаще всего до 80% дефектов и аварий на высоковольтных кабельных линиях происходит в данных элементах. Как правило, возникновение данного дефекта происходит из-за ошибки при выполнении монтажных работ. Нарушение в работе соединительной муфты проявляется либо сразу после ввода в эксплуатацию, либо через определенное время, и всегда сопровождается появлением частичных разрядов в изоляции (до 95% случаев неисправностей в кабеле). Реже всего дефекты в муфтах вызывают повышение температуры муфты (по статистике это 20 – 30%). Исходя из этого, мы делаем вывод, что использование систем мониторинга по контролю частичных разрядов является самым разумным решением.

Диагностика наличия дефектов в изоляции самого кабеля. Дефекты в самом высоковольтном кабеле встречаются гораздо реже, чем дефекты в муфтах. Появлению дефектов предшествует или появление повреждений в оболочке кабеля, или негерметичность при монтаже муфты, что приводит к проникновению влаги в изоляцию кабеля. Влага часто является основной причиной повреждений изоляции кабелей высокого напряжения, производственные дефекты хотя и встречаются на практике, но очень редко.

Определение вида и степени развития дефекта как в муфтах, так и в самом кабеле. Большое влияние на дальнейшую эксплуатацию кабельной линии с выявленными дефектами оказывает наличие информации о типе возникшего дефекта и степени его развития. Знание этой информации дает возможность для обслуживающего персонала правильно оценить оставшееся время работы кабельной линии, планировать время и оптимальный объем необходимых мер для ремонта.

Точная информация о месте нахождения неисправности в кабеле. Эта информация наиболее полезна, когда вы проводите ремонт в подземных кабельных линиях, где самую большую проблему доставляет проведение

подготовительных работ по поиску места для проведения работ по устранению дефекта.

Одним из приборов для мониторинга состояния изоляции и места аварии, который работает по этому методу, является CDM-30 (Cables Diagnostics Monitor 30 Channels). Кабельные линии должны быть подключены к одному комплектному распределительные устройства (КРУ). Исходя из полученных данных, системой предоставляются рекомендации по эксплуатации данных линий. Это устройство также позволяет указать место пробоя, что позволяет легко отправлять ремонтную бригаду для устранения неполадок, не тратя время на поиск утечки. Этот прибор может быть установлен на линии от 3 кВ, определить местоположение дефекта с погрешностью 1% от длины линии. Интерфейс связи с компьютером RS-485 или Ethernet.

Метод контроля состояния изоляции по частичным разрядам имеет ряд преимуществ, например:

- Этот метод может использоваться для контроля, как кабелей с бумажно-масляной изоляцией, так и с изоляцией из сшитого полиэтилена;
- В России есть предприятия, выпускающие оборудование для контроля изоляции на основе данного метода;
- Проверка кабельной линии до ввода в эксплуатацию – наличие частичных разрядов может выявить дефекты в линии, такие как плохое соединение муфт, чтобы предотвратить аварию до того момента, пока линия не начала работать в штатном режиме.

В последние годы в России наблюдается тенденция к замене кабелей с бумажно-масляной изоляцией на изоляцию из сшитого полиэтилена. Учитывая преимущества метода частичных разрядов, можно сказать, что перспективы для этого метода очень широки.

Данный метод диагностики используется в режиме «on-line» в процессе эксплуатации кабельной линии по рабочим напряжениям, т. е. процедура хорошо подходит для применения в системах непрерывного мониторинга. При отсутствии высокого напряжения в кабельной линии частичных разрядов также нет. При регистрации частичных разрядов применяются первичные датчики и

регистрирующая аппаратура, которые работают в трех различных частотных диапазонах могут быть использованы в различных типах высоковольтного оборудования:

- Акустические и ультразвуковые диапазоны частот US до 300 кГц.
- Высокочастотный диапазон HF (ВЧ), от 150 кГц до 30 МГц.
- Сверхвысокий диапазон частот УВЧ (МВт) от 100 до 1500 МГц.

Измерительный прибор, который работает в каждом из трех диапазонов частот, отличается различными техническими характеристиками, а также технологией монтажа. При измерении частичного разряда в кабельной линии высокого напряжения решающим фактором является длина кабельной линии, на которой можно вести контроль с помощью одного датчика.

Таблица 1- Типы датчиков для измерения частичных разрядов

Диапазон частот	Тип датчиков ЧР	Способ монтажа	Зона контроля	Объект контроля
US (ультразвук)	Пьезодатчики, микрофоны	Контактно и бесконтактно	± 1 м	Муфты
HF (ВЧ)	HF трансформаторы Конденсаторы связи	На земляных и токоведущих шинах	± 2000 м	Муфты, кабель
UHF (СВЧ)	Электромагнитные антенны	Бесконтактно	± 20 м	Муфты

По данным таблицы 1 видно, что для использования в системах мониторинга частичных разрядов в кабельных линиях предпочтительно использовать HF трансформаторы и конденсаторы связи, которые работают в двух частотных диапазонах:

- Акустические и ультразвуковые приборы и датчики, которые используются для регистрации частичных разрядов в концевых и соединительных муфтах.
- Высокочастотные трансформаторы тока и измерительные приборы для регистрации частичных разрядов как в концевых и соединительных муфтах так и в самом кабеле.

Наиболее эффективным показало себя диагностическое оборудование, работающие в высокочастотном диапазоне (HF). Он одинаково хорошо подходит для контроля концевых и соединительных муфт, а также для проверки кабельной изоляции.

Системы мониторинга, которая используют пьезодатчики и акустические микрофоны, могут быть использованы только для контроля технического состояния концевых и соединительных муфт.

Диагностическое оборудование, которое работает в UHF диапазоне частот, также может быть использовано для мониторинга состояния изоляции муфт, но оно обходится дороже, чем оборудование с пьезодатчиками и акустическими микрофонами (US-диапазон) и оборудования, которое использует трансформаторы тока и конденсаторы связи (HF-диапазон).

Современные системы мониторинга силовых кабельных линий, основным методом которых является регистрация и анализ частичных разрядов, которые работают в частотном диапазоне HF, позволяют:

- Выявлять наличие дефектов в изоляции кабельных линий, эффективно отстраиваясь от внешних возмущений, с помощью метода - «time of arrival» (определение положения импульсов на основе разницы во времени регистрации импульсов, по двум или более измерительным каналам).

- Точно определить неисправный кабель на основе анализа амплитуды основных импульсов и импульсов, которые наводятся в контрольный кабель от соседних кабельных линий.

- На основе экспертного анализа фазового и количественного распределения импульсов частичных разрядов от дефекта диагностировать тип дефекта, который произошел в изоляции, определить его степень развития и опасность для дальнейшей эксплуатации кабельной линии.

- С помощью зарегистрированного на конце линии графика распределения во времени прямого и отраженного импульсов частичных разрядов (с противоположного конца кабельной линии и муфт) может быть обнаружено место дефекта в изоляции.

- После экспертной оценки обнаруженных импульсов частичных разрядов можно сформулировать рекомендации для дальнейшей эксплуатации кабельной линии, заранее планировать время и объем работ по обслуживанию и ремонту.

В целом можно сказать, что для кабельных линий с СПЭ изоляцией основным диагностическим методом для поиска дефектов в изоляции является регистрация и анализ частичных разрядов в кабельной линии и в муфтах.

Преимущества использования систем «on-line» мониторинга кабельных линий (под рабочим напряжением), по сравнению с периодическими испытаниями в режиме «off-line» (на отключенном оборудовании), общеизвестны. Это высокая эффективность и оперативность получения диагностических заключений, что особо важно для эксплуатации кабелей и муфт с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), в которых время развития дефекта обычно меньше, чем стандартный интервал времени между двумя испытаниями.

Одномоментно оснастить большое количество распределительных подстанций системами непрерывного мониторинга кабельных линий 6-10 кВ часто представляет большую проблему, в основном экономического характера - это требует достаточно больших материальных вложений.

2.4 Природа возникновения частичных разрядов

Анализ современных методов и средств диагностики изоляции кабельных линий под напряжением показывает высокую эффективность систем мониторинга, основанных на измерении частичных разрядов (ЧР). Отношения между количеством частичных разрядов и состоянием электрической изоляции уже давно известно. Разработка и внедрение новых методов расчета электрической изоляции силовых кабельных линий по продолжительности электрического сопротивления изоляции является сложной задачей. Этот метод базируется на математических моделях старения и разрушения электрической изоляции (ЭИ). Изучение процесса старения и конечного состояния изоляции КЛ, необходим как для развития методов электрического расчета, так и для

диагностики оценки остаточного ресурса. Метод расчета включает в себя подход, основанный на соотношении - степенном законе старения:

$$E^n \tau = const, \quad (2.1)$$

и двух или трехметрическом распределении Вейбула:

$$F(E) = 1 - \exp\left(-\frac{E - E_j}{E_0 - E_j}\right)^b, \quad (2.2)$$

где $F(E)$ – вероятность отказа, b – параметр формы, E_0 – параметр масштаба, E_j – параметр сдвига распределения.

Выражение (2.1) справедливо для очень серьезных дефектов, таких как газовые включения. При таком дефекте основным разрушающим механизмом электрической изоляции является частичный разряд, а это выражение определяют методику электрического расчета. Исследования старения изоляции кабельных линий показали, что необходима разработка модели старения, которая учитывает качество изоляции и может быть получена при измерении совокупности характеристик частичных разрядов.

Механизм появления частичного разряда. Пусть к изоляции, которая находится между электродами (рисунок 18, где C_v - емкость включения, C_d - емкость диэлектрика, установленного последовательно с включением, C_a емкость диэлектрика) приложено синусоидальное напряжение $U = U_m \sin \omega t$. При отсутствии частичного разряда напряжение на емкости включения C_v будет синусоидальным, $U_v = U_{vm} \sin \omega t$ где U_{vm} - амплитуда напряжения на включении:

$$U_{vm} = \frac{U_m C_d}{(C_v + C_d)} = U_m \eta, \quad (2.3)$$

где $\eta = C_{\text{Д}}/(C_{\text{Д}} + C_{\text{В}})$.

Представим включение в виде прослойки толщиной $d_{\text{в}}$, вытянутой поперек силовых линий поля:

$$U_{\text{вм}} = \frac{U_m \varepsilon_{\text{д}} (d - d_{\text{д}})}{\left(\frac{\varepsilon_{\text{в}}}{d_{\text{в}}} + \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{d - d_{\text{в}}}\right)} = U_m \frac{\varepsilon_{\text{д}} d_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{в}} (d - d_{\text{в}}) + \varepsilon_{\text{д}} d_{\text{в}}} \tag{2.4}$$

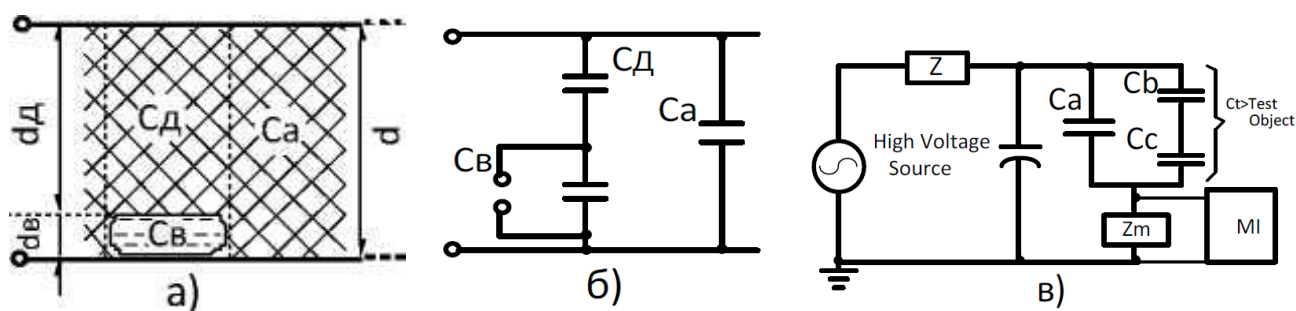


Рисунок 18 - Структура изоляции (а), эквивалентная схема (б), схема для обнаружения ЧР в изоляции (в)

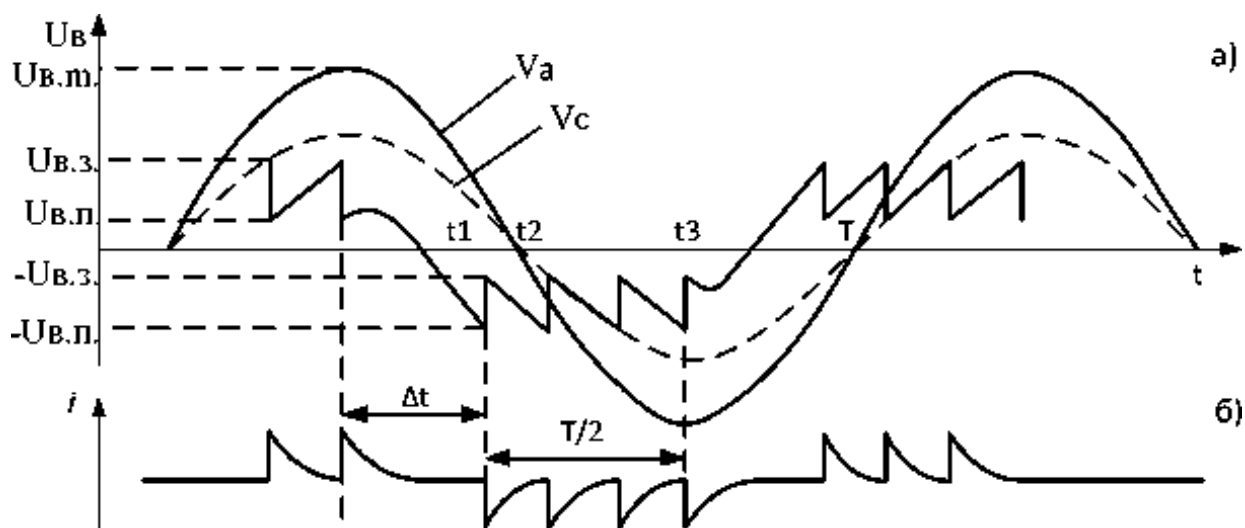


Рисунок 19 - Развитие во времени ЧР: а - напряжение и б - ток в полости

Во время воздействия на структуру изоляции напряжения первого полупериода (рисунок 19) частичный разряд возникает тогда, когда напряжение на включении (емкость $C_{\text{В}}$, рисунок 18) становится равным $U_{\text{вз}}$ (напряжение зажигания заряда во включении). Когда происходит пробой изоляции,

напряжение на включении уменьшается до значения U_{en} (напряжение погасания разряда во включении), после чего разряд затухает. После затухания разряда напряжение на включении увеличивается от значения U_{en} по кривой, соответствующей изменению напряжения, сдвинутого по вертикали по значению постоянной составляющей, которая появляется за счет появления зарядов на поверхности включения (на емкости C_B). Когда напряжение U_e на емкости C_B становится равным значению напряжения U_{e3} , процесс повторяется.

Следовательно, разряды в форме диэлектрика повторяются с интервалом, что соответствует изменению напряжения на C_B на значение равное $\Delta U_e = U_{e3} - U_{en}$. При прохождении напряжения через максимум включение находится под напряжением, значение которого находится в области между U_{e3} и U_{en} . После чего происходит снижение напряжения на включении до 0 и дальнейшее увеличение до значения U_{e3} . В первом приближении можно предположить, что при обеих полярностях пробивное напряжение включения U_{en} одинаково. Когда напряжение на включении достигает значения U_{e3} , происходит пробой включения и процесс продолжается (рисунок 19, где V_a - Напряжение на целой части и V_c напряжение на включении).

С помощью такого механизма частичный разряд должен гаснуть после прохождения напряжения через максимум, а затем снова возникать, когда напряжение на клеммах испытуемого объекта, станет равным значению U_1 , соответствующее изменению напряжения на включении на $U_{el} \approx U_{e3} + U_{en}$:

$$U_{el} = \frac{U_{B.3} + U_{B.П}}{\eta} = \frac{U_{B1}}{\eta} \quad (2.5)$$

Затем, после возобновления частичного разряда процесс в области диэлектрика по-прежнему повторяется через определенные интервалы времени, которые соответствуют изменению напряжения на емкости C_B на ΔU_B :

$$\Delta U = \frac{\Delta U_B}{\eta} \quad (2.6)$$

Таким образом, количество разрядов во включении за один полупериод:

$$m_{ч.р.} = \frac{2U_{\text{em}} - (U_{\text{в.з.}} + U_{\text{в.н.}})}{U_{\text{в.з.}} - U_{\text{в.н.}}} + 1 = \frac{2(U_{\text{em}} - U_{\text{в.н.}})}{\Delta U_{\text{в}}} = \frac{2(U_m - U'_{\Pi})}{\Delta U}, \quad (2.7)$$

где $U'_{\Pi} = \frac{U_{\text{в.п.}}}{\eta}$. При $U_{\text{в.з.}} \approx U_{\text{в.п.}}$ и $\frac{U_{\text{в.з.}}}{\eta} = U_3 = U_{ч.р.}$ имеем:

$$m_{ч.р.} \approx \frac{2(U_{\text{в.м.}} - U_{\text{в.з.}})}{\Delta U_{\text{в}}} = \frac{2(U_m - U_{ч.р.})}{\Delta U}. \quad (2.8)$$

При $U_{\text{в.п.}} \ll U_{\text{в.з.}}$:

$$m_{ч.р.} \approx \frac{2(U_{\text{в.м.}} - U_{\text{в.з.}})}{\Delta U_{\text{в}}} = \frac{2(U_m - U_{ч.р.})}{\Delta U}. \quad (2.9)$$

При этом число разрядов во включении $n_{ч.р.}$ за 1с будет

$$n_{ч.р.} = 2f \cdot m_{ч.р.}, \quad (2.10)$$

где f – частота приложенного напряжения.

$$\text{Учитывая } W_{ч.р.} = W_H - W_K = \frac{(C_B + C_{\partial})(U_{\text{в.з.}}^2 - U_{\text{в.н.}}^2)}{2}, P_{ч.р.} = n_{ч.р.} W_{ч.р.},$$

мощность ЧР $P_{ч.р.}$ в одном включении может быть представлена в виде:

$$P_{ч.р.} = W_{ч.р.} n_{ч.р.} = 2f(C_B + C_{\partial})(U_{\text{в.з.}} + U_{\text{в.н.}})(U_{\text{в.м.}} - U_{\text{в.н.}}). \quad (2.11)$$

Если $U_{\text{в.з.}} \approx U_{\text{в.н.}}$, то:

$$P_{ч.р.} = 4f(C_B + C_{\partial})U_{\text{в.з.}}(U_{\text{em}} - U_{\text{в.з.}}) = 4fC_{\partial}U_{\text{в.з.}}(U_m - U_{ч.р.}), \quad (2.12)$$

если $U_{в.н.} = 0$ то:

$$P_{ч.р.} = 2f(C_B + C_D)U_{в.з.}U_{в.м.} = 2fC_D U_{в.з.}U_m. \quad (2.13)$$

Из выражений (2.11)–(2.13) можно сделать вывод, что для одного включения или при определенном количестве одинаковых включений, если растет мощность приложенного напряжения, мощность частичного разряда также линейно возрастает. При $U_{в.з.} \approx U_{в.н.}$, учитывая $W_{ч.р.} = q_{ч.р.}U_{ч.р.}$ и $P_{ч.р.} = n_{ч.р.}W_{ч.р.}$, мощность частичного разряда может быть также представлена в следующем виде:

$$P_{ч.р.} = q_{ч.р.}U_{ч.р.}n_{ч.р.} = I_{ч.р.}U_{ч.р.}. \quad (2.14)$$

Соответственно при $U_{в.з.} \geq U_{в.н.}$, учитывая (2.14):

$$P_{ч.р.} = \frac{q_{ч.р.}U_{ч.р.}n_{ч.р.}}{2} = \frac{I_{ч.р.}U_{ч.р.}}{2}. \quad (2.15)$$

На основании $P_{ч.р.} = 1/(q_{ч.р.1}U_1 + q_{ч.р.2}U_2 + \dots + q_{ч.р.m}U_m)t_1$, мощность частичного разряда $P_{ч.р.}$, выделяемая при единичном включении, может быть представлена в виде:

$$P_{ч.р.} = \frac{2}{T} \sum_{j=1}^{m_{ч.р.}} q_{ч.р.i}u_i, \quad (2.16)$$

где U_i – мгновенное значение напряжения на диэлектрике в момент времени разряда с кажущимся зарядом $q_{ч.р.i}$; $m_{ч.р.}$ – общее количество разрядов в единичном включении за полупериод $T/2$. Используя выражение (2.16) нужно учитывать знаки при $q_{ч.р.i}$ и u_i .

Рассмотрим полупериод (рисунок 19) от пика напряжения одной до пика напряжений противоположной полярностей и найдем энергию $W_{T/2}$, подходящую к клеммам изоляционной структуры (рисунок 18,а) за полпериода $T/2$, для компенсации энергии, которая выделилась на включении из за частичного разряда. Энергия частичного разряда, которая возникает в интервалах времени от t_1 до t_2 , которые соответствует переходу напряжения через ноль, должны быть взяты с одним знаком, и энергия частичного разряда, которая происходит в интервалах времени от t_2 до t_3 , которое соответствует переходу напряжения через максимум– с другим.

Если принять $q_{ч.р.i} = q_{ч.р.} = const$, то формула

$P_{ч.р.} = \frac{1}{(q_{ч.р.1}U_1 + q_{ч.р.2}U_2 + \dots + q_{ч.р.m}U_m)t_1}$ может быть представлена в следующем виде:

$$P_{ч.р.} = \frac{2}{T} q_{ч.р.} \{ -[\Delta U + 2\Delta U + \dots + (m-1)\Delta U + (U_m - U_1)] + [\Delta U + 2\Delta U + \dots + m_2 - 1\Delta U + U_m] \}, \quad (2.16)$$

где $m_1 = (U_m - U_1) / \Delta U$; $m_2 = U_m / \Delta U$; $m_3 = m_2 - m_1 = U_1 / \Delta U$.

Формула (2.16) может быть преобразована к виду:

$$P_{ч.р.} = q_{ч.р.} m_3 f(2U_m - U_1 + \Delta U) = \frac{q_{ч.р.} f U_1 (2U_m - U_1 + \Delta U)}{\Delta U}. \quad (2.17)$$

Учитывая (2.16) и (2.17), имеем:

$$P_{ч.р.} = \frac{q_{ч.р.} U_1 n_{ч.р.}}{2} = \frac{I_{ч.р.} U_1}{2}. \quad (2.18)$$

При $U_{в.з.} = U_{в.н.}$ имеем $U_1 \approx 2U_{ч.р.}$ и

$$P_{ч.р.} = I_{ч.р.} U_{ч.р.}, \quad (2.19)$$

При $U_{в.н.} \leq U_{в.з.}$

$$P_{ч.р.} = I_{ч.р.} U_{ч.р.} / 2 = 2 f q_{ч.р.} U_m. \quad (2.20)$$

Мощность, расходуемая во включении (2.13, 2.14) и подводимая к изоляционной структуре (2.19, 2.20), одинакова.

2.5 Общие параметры регистрации частичных разрядов в системе CDM 30

Чтобы установить общие параметры регистрации замеров, нужно выбрать в меню прибора пункт 2 – "Установка параметров измерения". Для того, чтобы установить параметры каналов, необходимо выбрать второй пункт – "Общие параметры регистрации". Появится окно с общими настройками регистрации.

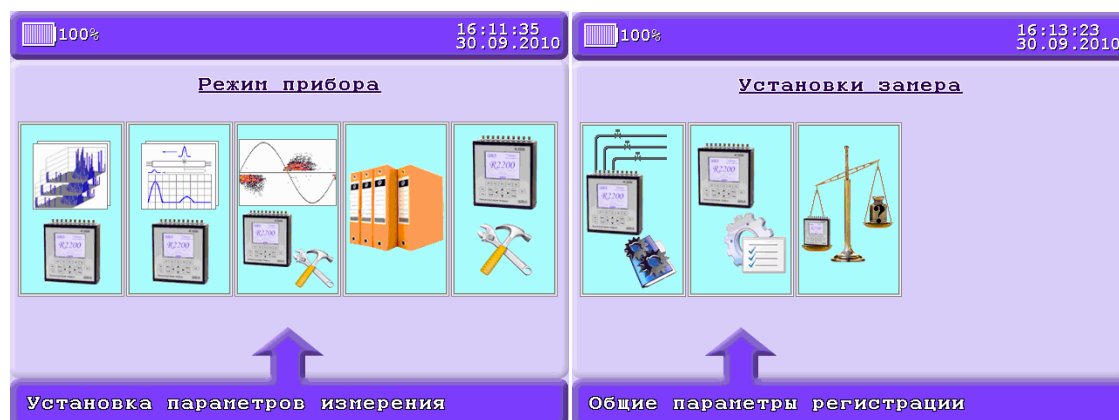


Рисунок 20 - Выбор установки параметров

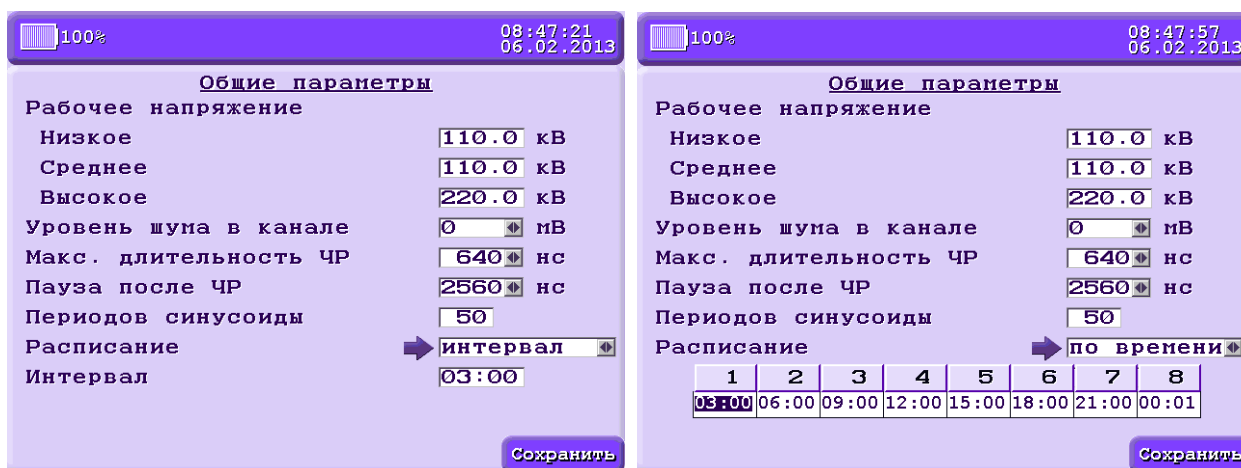


Рисунок 21 - Общие параметры регистрации

В нем необходимо задать:

- Рабочее напряжение (низкое, среднее, высокое) в кВ, оказывает влияние на интенсивность импульсов PDI;

- Уровень шума в канале; данный уровень показывает, до которого значения необходимо считать PDI для того, чтобы исключить шум при расчете PDI; в информационном поле будет отображаться середина амплитуды в мВ. (Амплитудные окна, начиная с середины, в расчет включаться не будут). Если выставить значение уровня шума в режим «Авто», то включится режим автоматического определения уровня шума;

- Максимальная длительность частичного разряда и пауза после него;

- Периоды синусоид, их количество – усреднение значений замера частичного разряда (на каждое амплитудное окно регистрируется определенное количество периодов сети). После проведения замеров значения импульсов приводятся к секунде;

- Провести установку типа расписания для проведения регистрации сигналов. Регистрировать сигналы в ручном режиме можно зайдя в меню «Запуск регистрации» и по расписанию. Выбор типа расписания «по времени», позволяет вводить до 50 временных значений, согласно которых будет вестись регистрация. Выбор типа расписания «интервал», позволяет ввести значения интервала времени, согласно которого проходит регистрация сигналов. Чтобы отключить регистрацию по расписанию, нужно выбрать тип расписания «никогда».

2.6 Дополнительные параметры программирования

Дополнительные параметры включают в себя: температуру и влажность воздуха, ток нагрузки, активные и реактивные мощности. Данные параметры включают в себя общую информацию и не оказывают влияния на проведение измерений и расчетные параметры.

На рисунке 22 изображен пример всплывающего окна, которое выдает система прибора, если подключиться к её интерфейсу при помощи компьютера.

Ток нагрузки - тот ток, при котором кабельная линия работает в номинальном режиме. Активная мощность – та часть полной мощности, которую удалось передать за период переменного тока. Реактивная мощность – та мощность, которая не была передана на нагрузку, а привела к потерям на нагрев и излучение.

100%		15:40:12 05.02.2013
<u>Дополнительные параметры</u>		
Температура воздуха		30°
Влажность воздуха		40%
Ток нагрузки		1000 А
Активная мощность		11000 МВт
Реактивная мощность	➡	1000 МВт
Сохранить		

Рисунок 22 - Дополнительные параметры регистрации

2.7 Работа с рефлектометром

После проведения замеров и их регистрации в меню проведения замеров рефлектометром появится окно просмотра рефлектограммы.

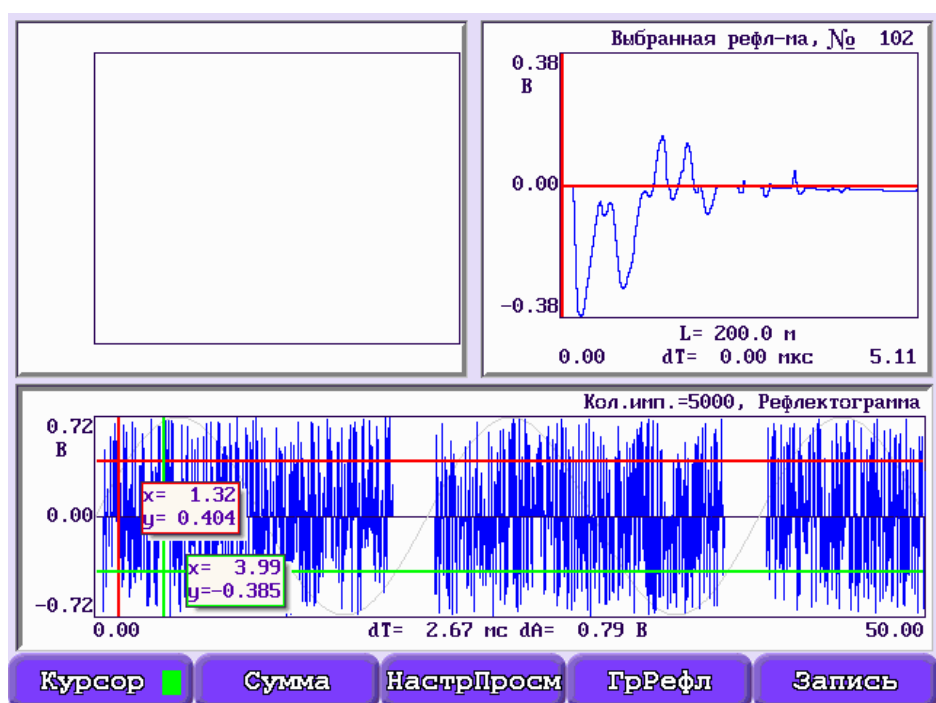


Рисунок 23 - Просмотр замеров рефлектометра

В окне просмотра замеров отображаются 3 графика – первый график – распределения замеров рефлектометра во времени (Гр Рефл.), второй – график конкретной рефлектограммы (Гр Выбран) и третий – график суммарной рефлектограммы (Гр Суммы).

Внизу экрана расположен сам график рефлектограммы, с самого начала активен данный график, чему соответствует надпись «ГрРефл». На данной рефлектограмме изображены импульсы в виде скачков, максимальное значение этих скачков соответствует амплитуде зарегистрированного сигнала.

Чтобы подробнее рассмотреть импульс, его нужно выделить активным (красным или зеленым) курсором, который перемещается по оси абсциссы. Выделенный импульс отобразится в правом верхнем окне «Выбранная рефлектограмма». Выбранная рефлектограмма также включают в себя 2 курсора, перемещающиеся по временной оси. Расстояние между курсорами рассчитывается по установленной длине кабеля в опциях рефлектометра и коэффициенту укорочения.

Программа расчета возможных мест дефектов выявляет в суммарном (усредненном) сигнале максимальные скачки, представляющие из себя

зарегистрированные импульсы частичных разрядов и их отражения от неоднородностей. Рассчитанные данные можно увидеть в таблице дефектов.

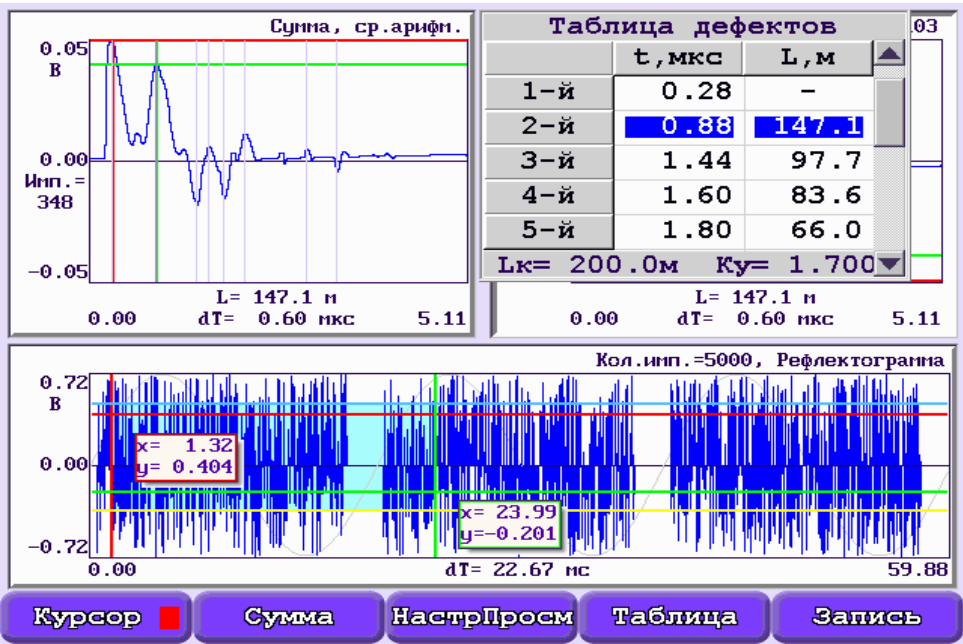


Рисунок 24 - Таблица дефектов.

В таблице дефектов отображается информация по найденным импульсам. Время t - время регистрации импульса от момента регистрации, L – участок линии с возможным местом возникновения дефекта, если считать, что 1-й импульс – это непосредственно импульс ЧР, а все последующие – это его отражения от мест возникновения дефектов, с условием, что длина кабельной линии и коэффициент укорочения выбраны корректно.

В окне просмотра замеров отображаются рассчитанные значения: количество положительных и отрицательных импульсов, суммарная мощность частичного разряда (PDI) и максимальный измеренный заряд (Q_{max}) как по положительным, так и по отрицательным импульсам. Данные величины отображаются уже после проведения замеров и могут обновляться, так как система мониторинга ведет свою диагностику в непрерывном режиме.



Рисунок 25 - Просмотр замеров

Меню отображения измеренных данных разделяют на 4 зоны: первая – амплитудно-частотное распределение, далее TF– распределение, следом расчетные параметры и справочная информация о схеме измерения. Амплитудно-частотное распределение включает распределения импульсов, график амплитудного распределения мощности, график распределения мощности по фазам.

График TF – распределения (карта PD). Каждая ячейка его имеет следующие опции: длительность импульса первого полупериода, количество импульсов конкретной ячейки, т.е количество зарегистрированных импульсов с требуемыми параметрами. В зависимости от соответствующего цвета палитры определяется количество импульсов в конкретной ячейке. Наиболее важную роль TF-распределение имеет для диагностики дефектов, связанных с ЧР.

График амплитудно-частотного распределения располагается ниже графика TF-распределения. Ячейки амплитудно-фазового распределения включают в себя следующие параметры: фаза питающего напряжения, амплитуда импульса, количество импульсов конкретной амплитуды в данной фазовой зоне. Матрица распределения импульсов частичных разрядов включает в себя синусоиду, один период питающего напряжения которой подразделяется на 48 зон, шириной по 7,5 градуса каждая ($3600 / 48 = 7,50$). В целях упрощения

регистрации и анализа распределения импульсов, импульсы, которые примерно совпадают по амплитуде, считаются одинаковыми, с условием того, что их различие не превышает 20%, если данное условие соблюдается, то импульсы «складываются» в общую ячейку матрицы. По амплитуде регистрируемых импульсов в приборе имеется 32 градации. Ширина каждой амплитудной зоны 2,2 dB. Соотношение амплитуд максимального и минимального сигналов, регистрируемых прибором, составляет 5000:1. Количество амплитудных зон в приборе 64, включая зоны для учета импульсов положительной и отрицательной полярности. В каждой ячейке матрицы распределения импульсов частичных разрядов находится число от 0 до 65535, которое соответствует количеству зарегистрированных импульсов с такими параметрами, приведенное к секунде.

При выборе данной опции в приборе, высвечивается меню для работы с встроенным рефлектометром. Порядок работы с рефлектометром следующий: прибор после того, как на его вход пришел импульс частичного разряда, начинает записывать сигнал с шагом 10 наносекунд, который продолжается согласно выбранному интервалу времени. Количество зарегистрированных сигналов может достигать до 64 тыс. Время регистрации зависит от выбранного количества синусоид питающей сети.

Для проведения анализа кабельных линий в приборе реализовано подобие осциллографа, то есть регистрация и просмотр всех интервалов, без усреднения, данный процесс из себя представляет просмотр всех амплитудных и временных электрических параметров в электронной системе прибора. С помощью этой функции можно оценить не только частоту колебаний, но также найти помехи и искажения для прохождения электрического импульса в узле схемы. По своей сути осциллограф является вольтметром, показывающим график напряжения, так же встроенные системы позволяют исследовать импульсы на уровне гигагерцевых частот.

100%

14:29:39
05.02.2013

Параметры рефлектометра

Канал	➡ 1
Периодов синусоиды	50
Длина кабеля, м	200.0
Коэффициент укорочения	1.700
Коэффициент усиления, дБ	5 дБ
Фаза напряжения сети	A
Тип синхронизации	По каналу 1
Режим запуска	Свободный запуск
Порог запуска рефл.	120 мВ

Старт

Своб./Зоны

ТипСинхр

Сохранить

Рисунок 26 - Параметры рефлектометра

В данном окне указывают:

1. Канал регистрации
2. Количество периодов синусоиды
3. Длину кабельной линии для фильтрации заведомо неверных результатов.
4. Коэффициент укорочения. По возможности, необходимо уточнить скорость распространения импульсов частичного разряда в испытуемом кабеле. Ее рассчитывают при помощи генератора частичных разрядов, заведомо зная расстояние между импульсом и отражением (например, до муфты, или до края кабельной линии).
5. Выбрать режим запуска. Режим запуска необходим для определения максимального порога и фазовых окон регистрации импульсов.
6. Порог запуска рефлектометра - регистрация импульсов, превышающих заданное значение.

2.8 Разделы для просмотра замеров

В зависимости от типа проведенного замера в окне прибора имеется 5 разделов:

- Матрица частичного разряда.

- Тренд.
- 3D.
- PHD – «Спектр частичного разряда».
- «TF-плоскость» (Карта частичного разряда).
- Рефлектограммы.

Матрицы частичных разрядов.

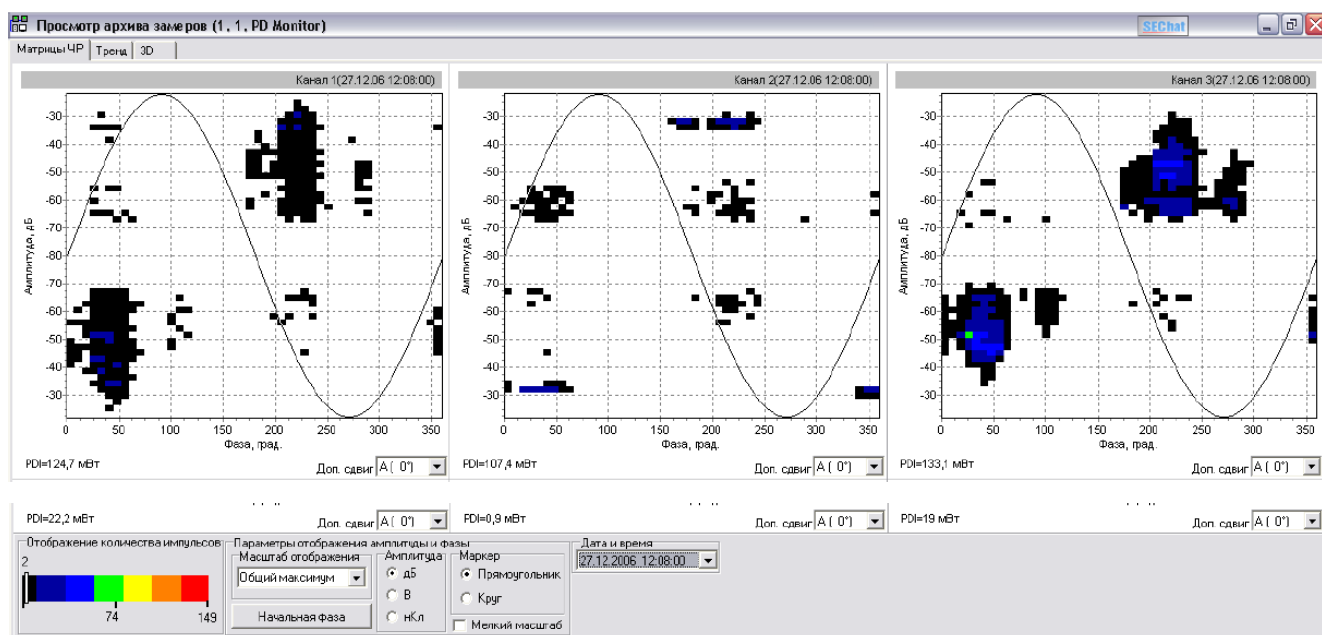


Рисунок 27 - Матрицы частичных разрядов с изображением импульсов на синусоиде

Данный раздел содержит двумерные графики (на каждый включенный канал) распределения объема импульсов в секунду. Количество импульсов определяется цветом маркера, находящегося в левом нижнем углу.

После отметки курсором мыши на какой-либо точке графика появляется подсказка с указанием точки и на цветном маркере, находящемся в левом нижнем углу экрана, бегунок установится на текущее значение количества импульсов в данной точке.

Графики можно перемещать в любом направлении, удерживая правую кнопку мыши. Удерживая левую кнопку мыши и выделяя участок графика слева направо, можно увеличить масштаб. Чтобы график принял первоначальный масштаб, требуется выделить прямоугольник справа налево.

Каждый из графиков имеет заголовок, в котором указывается название канала и время замера.

Под каждым графиком видно значение интенсивности мощности импульсов частичных разрядов, рассчитанных по данной матрице. Каждый график может быть включен в отчет вызовом всплывающего по правой кнопке мыши меню. Составление отчета производится автоматически, далее он может редактироваться в программном пакете Word, который должен быть установлен на компьютере. Из этого же раздела можно экспортировать таблицу частичных разрядов в Excel.

Ниже графиков располагаются следующие параметры управления:

«Отображение количества импульсов» – в них входит:

- цветной маркер.

«Параметры отображения амплитуды и фазы» в нее входит:

- единицы измерения по амплитуде (дБ-мВ-нКл);

- настройки масштаба по оси амплитуд (Полный-Локальный максимум-Общий максимум). Полный масштаб отображает все зоны по оси амплитуд. Локальный максимум – показывает в графике максимальные значения. Общий максимум – усредняет масштабы графиков по максимальному амплитудному значению в одном из графиков;

- параметр «Начальная фаза». Выводит окно настройки начальной фазы.

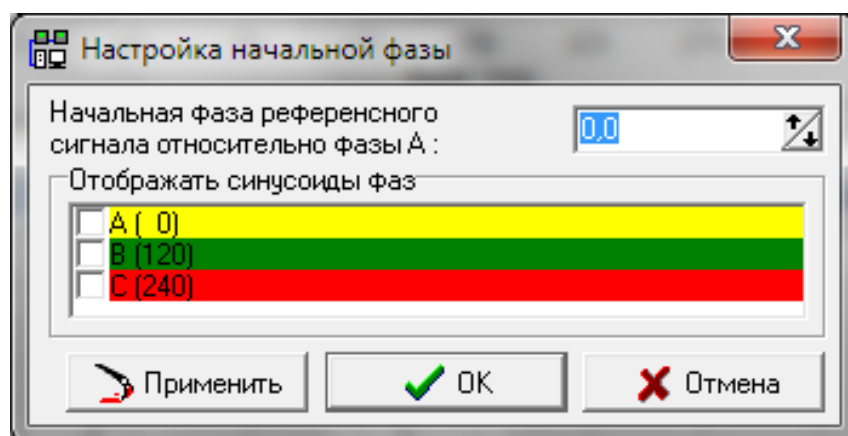


Рисунок 28 - Окно настройки начальной фазы

В окне можно задать: сдвиг опорного сигнала и отображение синусоид разных фаз. Установить сдвиг фазы конкретного канала относительно опорного сигнала. Также по умолчанию можно выставить конфигурацию модуля:

- «Маркер» – тип отображения данных на экране.
- «Текущий замер» - хранит список замеров, которые попали в запараметрированный для просмотра временной диапазон содержащий матрицы частичного разряда. Выбранный замер можно увидеть на графике.

Тренд.

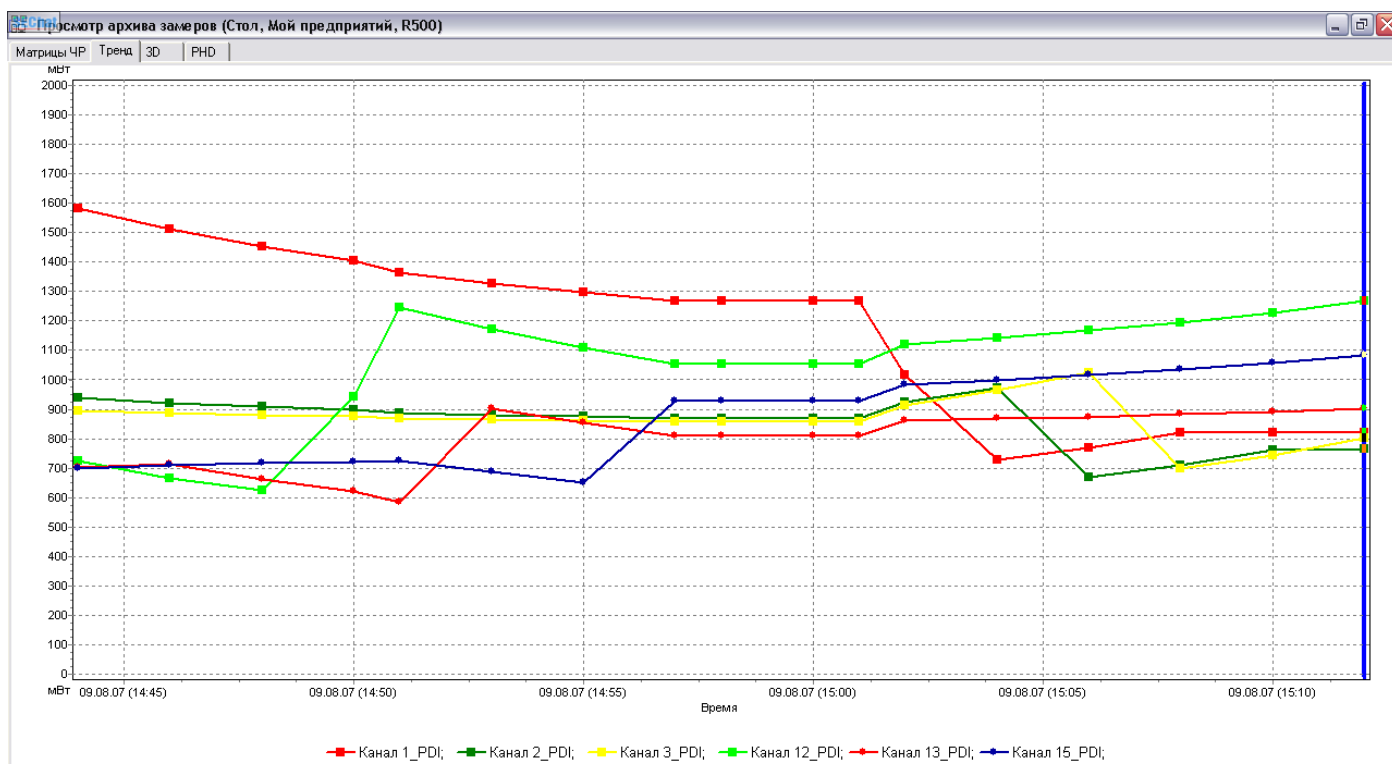


Рисунок 29 - Графики зависимостей измеренных значений от времени

Раздел Тренд содержит графики зависимости измеренных значений от времени (Тренд) и их распределение по каналам текущего замера (график замера).

Чтобы вывести график на экран, необходимо отметить курсором мыши интересующий канал, а также параметр, который необходим для этого канала.

Чтобы выбрать необходимый замер на графике тренда, требуется отметить левой кнопкой мыши интересующую точку. Если навести курсор

мышь на конкретную точку графика, то появляется подсказка с указанием параметров данной точки.

Для того, чтобы перемещать курсор по точкам графика, допускается использование кнопок «←» и «→» на клавиатуре. Чтобы переместить графики в каком-либо из направлений, необходимо удерживать правую кнопку мыши. Увеличение масштаба возможно при удержании левой кнопки мыши и выделением интересующего прямоугольного участка графика слева направо. Если выделить график прямоугольником справа налево, то график примет первоначальный масштаб.

Если есть необходимость, то график может быть включен в отчет путем вызова всплывающего окна нажатием правой кнопки мыши в меню. Отчет создается автоматически и может редактироваться в программе Word, она должна быть заранее установлена на компьютере.

Ниже графиков располагаются следующие элементы управления:

- «Измерительные каналы»: список включенных каналов.
- «Параметры для просмотра»: список параметров каналов.
- «Общие параметры»: параметры которые не относятся ни к одному из каналов.
- «Вывод названий графиков»: местоположение подписей под графиками.
- «Позиция курсора»: позволяет увидеть текущий замер и дает возможность выбора замера из всего списка.
- «Замеры с матрицами»: позволяет увидеть списки замеров – содержащих матрицы распределения частичных разрядов.
- «Замеры с сигналами»: позволяет увидеть списки замеров, которые содержат различные сигналы (акустические, сигналы токов, напряжений, и т.п.).
- «Усреднение»: возможность вывода усредненных графиков и выбор числа усредненных точек.
- «Отрисовка»: Когда имеется большое количество просматриваемых замеров, при работе с усреднениями, программа начинает очень медленно перерисовывать графики, а также при включении или выключении каналов,

поэтому для того, чтобы ускорить процесс, можно перерисовывать графики вручную. По точности данная процедура не будет уступать программному методу, так как системой предусмотрены специальные инструменты для рисования.

- «Отчет»: Этот раздел позволяет программе создавать документ, содержащий данные по текущему замеру, в формате Word.

Раздел 3D.

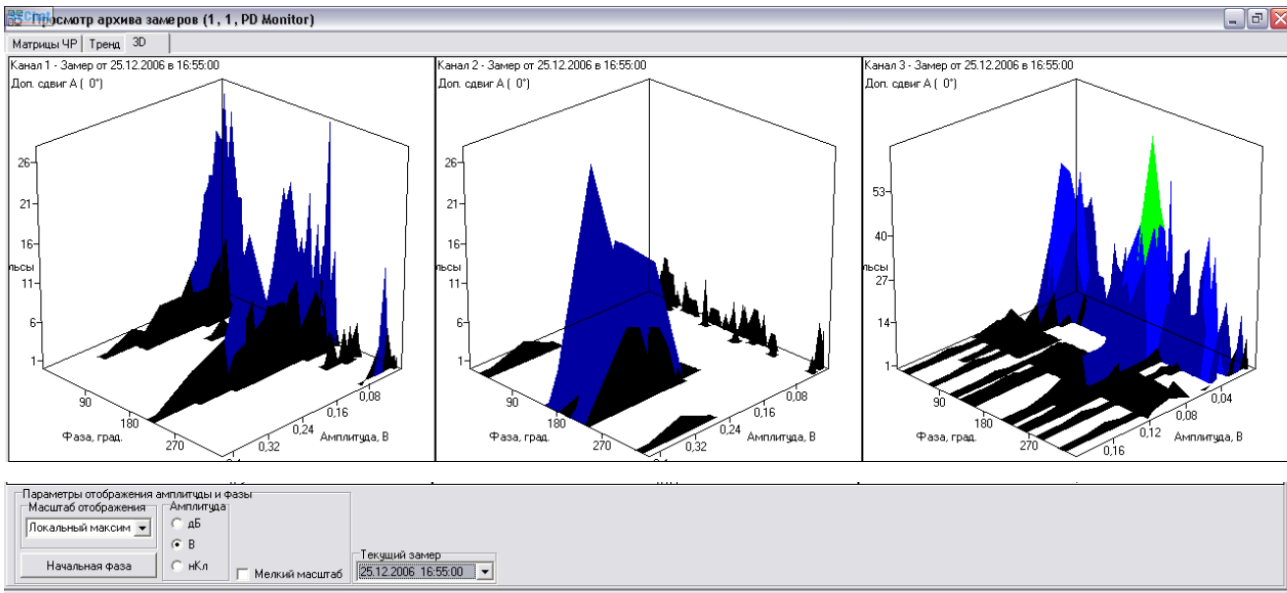


Рисунок 30 - Трехмерные графики распределения импульсов в секунду по амплитудным зонам

Данная вкладка включает в себя трехмерные графики (на каждый включенный канал) распределения величины импульсов в секунду по амплитудным зонам. По оси икс (горизонтальная) откладывается фаза в градусах, по оси зет амплитуда измеряемая в дБ или нКл, а по вертикальной оси игрек – число импульсов в секунду.

Если есть необходимость рассмотреть график в горизонтальной плоскости, то данная функция осуществляется удержанием левой кнопки мыши в левом углу графика (для вращения влево) или в правом углу (для вращения вправо).

Если есть необходимость рассмотреть график в вертикальной плоскости, то данная функция осуществляется удержанием левой кнопки «мыши» в

верхнем углу графика (для вращения «от себя») или в нижнем углу (для вращения «на себя»). Выполнение масштабирования графика осуществляется удержанием правой кнопки «мыши» в нижнем углу графика (для уменьшения) или в верхнем углу (для увеличения).

Чтобы внести график в отчет необходимо, отметить правой кнопкой «мыши» в левом или правом секторах графика.

Раздел PHD –«Спектр ЧР».

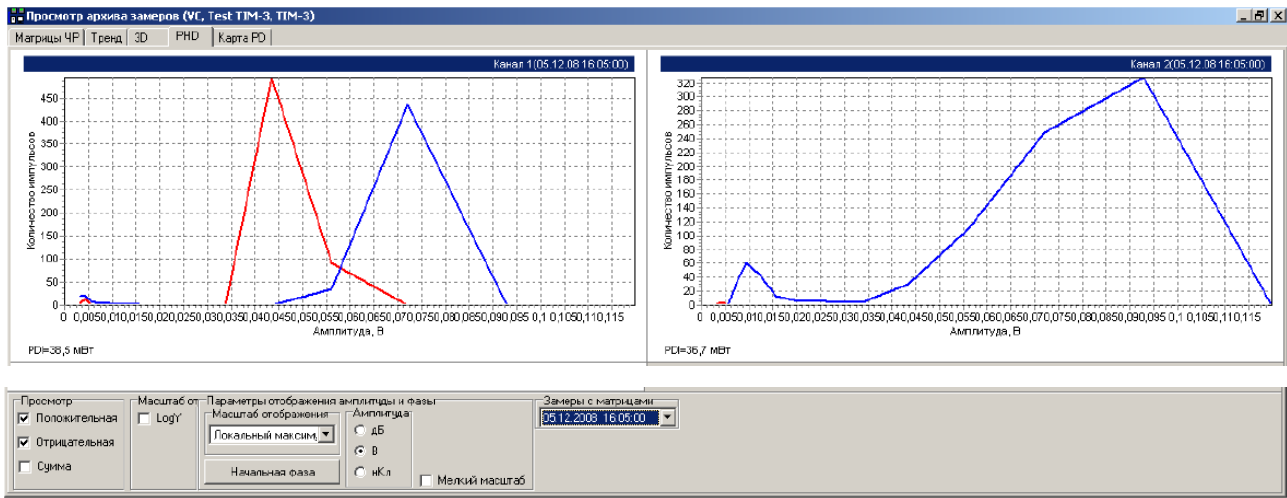


Рисунок 31 - Амплитудно-количественное распределение частичных разрядов

Данный раздел включает в себя амплитудно-количественное распределение импульсов частичных разрядов, по другому его называют «Спектр ЧР». По оси Y (вертикальная) берется количество импульсов, а на X (горизонтальная) – амплитуда импульсов. Если обратить внимание на график, то там хорошо видно распределение импульсов по амплитуде.

Исходя из опыта, по анализу распределения импульсов частичного разряда можно провести исследование дефекта, связанного с данным распределением. Внесение графика в отчет осуществляется правой кнопкой «мыши».

Раздел «TF- плоскость» (Карта PD).

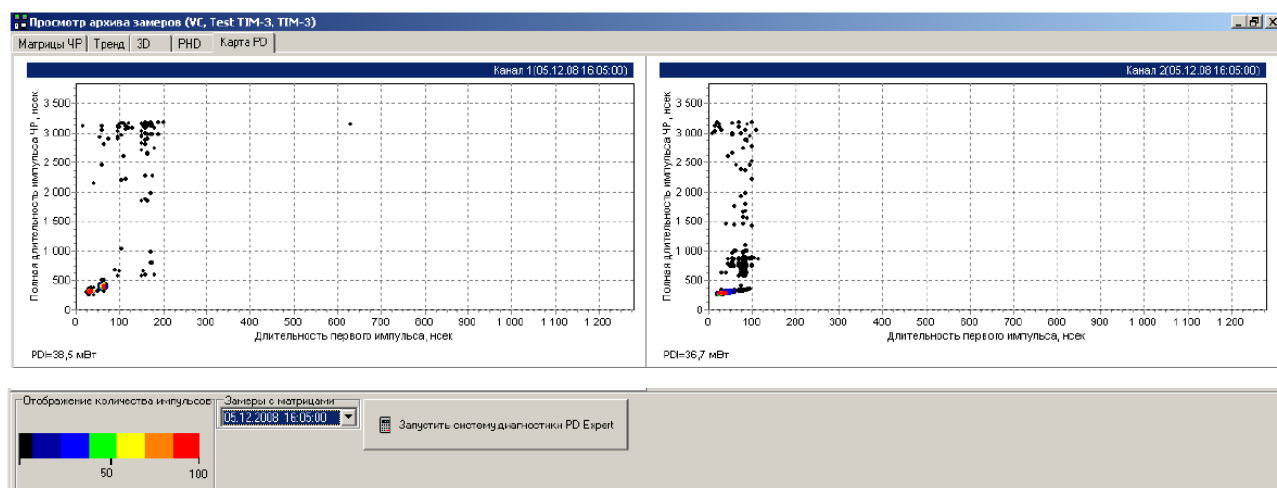


Рисунок 32- изображение TF плоскости

Раздел можно увидеть только в том случае, если замеры частичных разрядов были зарегистрированы прибором, который дает возможность измерять длительности первого импульса и всей длительности сигнала частичного разряда.

Эти параметры связаны с типом дефекта, локацией его возникновения, средой и путем распространения импульса.

«TF-плоскость» Данный раздел необходим для того что бы можно было разделять различные типы дефектов и шума. Отметив зоны где необходима диагностика на TF-плоскости, далее производится анализ типа дефекта, основанный на амплитудно-фазовом распределении импульсов частичных разрядов.

Значения импульсов с определенными параметрами определяются цветовой линейкой. Цветовая линейка отображается в левом нижнем углу окна.

Если навести курсор «мыши» на любой из элементов «TF-плоскости», можно наблюдать данные по длительности импульсов частичных разрядов, их частоте, количестве (N).

Основной задачей TF-плоскости является диагностика дефектов, связанных с частичными разрядами. Для этого в программу прибора включена система «PD-Expert». Активизировать систему диагностики можно путем нажатия кнопки «Запустить систему диагностики «PD-Expert».

2.9 Распределение частичного разряда на амплитудно-фазовой плоскости для различного типа дефектов

Одной из главных задач диагностики состояния изоляции по импульсам частичных разрядов является возможность определить тип дефекта, который возник в изоляции, а в лучшем случае и место его возникновения.

Обычно такая диагностика ведется тремя методами.

Первый – анализ амплитудно-частотного распределения импульсов.

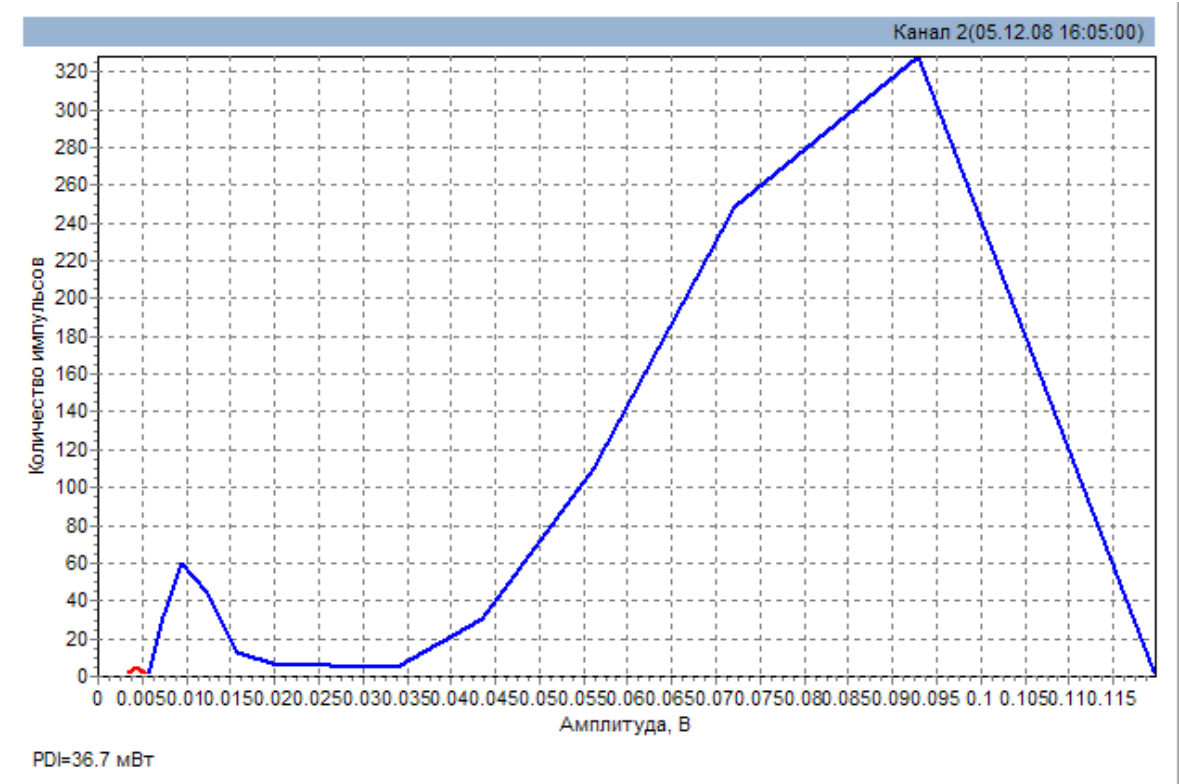


Рисунок 33 - Амплитудно-частотное распределение импульсов

По своему первичному определению амплитудно-частотное распределение импульсов должно показывать, какое количество импульсов данной амплитуды было зарегистрировано в процессе проведения измерений частичных разрядов. Пример такого амплитудно-частотного распределения импульсов приведен на графике. По горизонтальной оси графика отложены значения кажущихся зарядов зарегистрированных импульсов (или амплитуды

импульсов в милливольтках), а по вертикальной оси отложены количество импульсов.

Наличие в этом наименовании графика термина «частотное распределение» никак не связано с частотными свойствами зарегистрированных самих импульсов частичных разрядов. Термин «частотное распределение» используется здесь как параметр, показывающий некоторую количественную сторону результатов, а именно количество импульсов частичных разрядов.

Второй - анализ параметров отдельных импульсов частичных разрядов. В них анализируются амплитудные и частотные параметры зарегистрированных импульсов. Основное назначение данного метода – повышение достоверности проводимых измерений за счет более эффективной отстройки от помех. Определение типа дефекта таким методом возможно только при наличии «базы» дефектов, которая будет привязана к конкретному измерительному прибору и датчику.

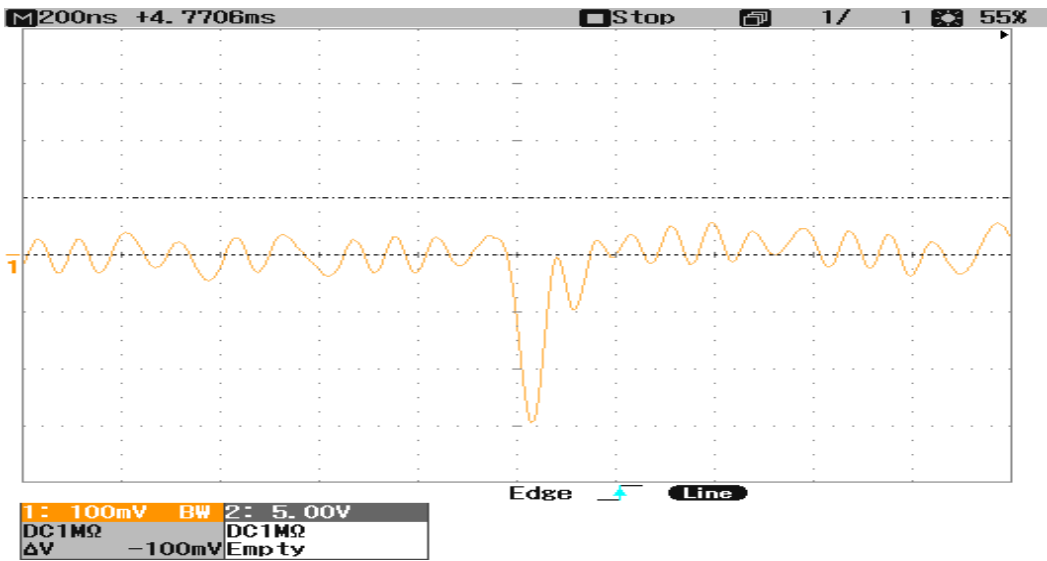


Рисунок 34-Анализ параметров отдельных импульсов

Третий метод базируется на анализе амплитудного и амплитудно–фазового распределения зарегистрированных импульсов частичных разрядов. Целью этого метода является определение типов имеющихся дефектов.

Различные типы дефектов в изоляции имеют «характерное» распределение импульсов. Для примера приведем несколько характерных распределений:

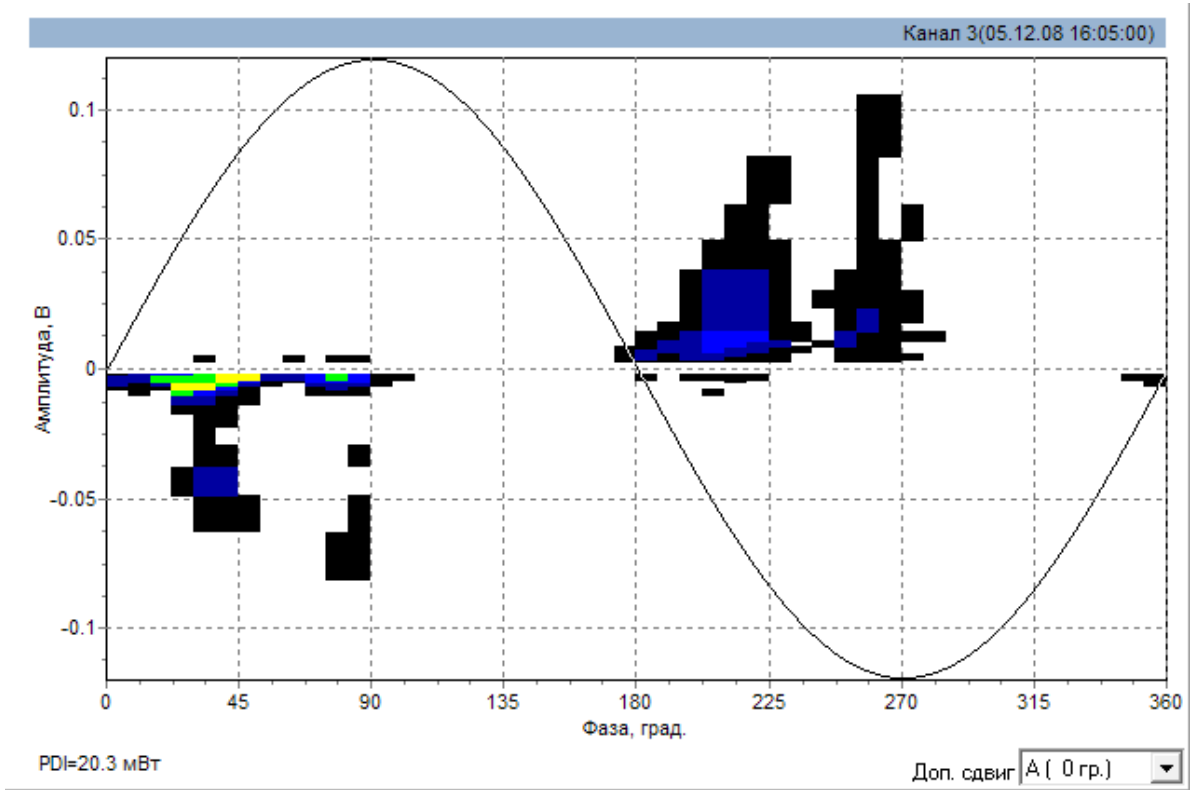


Рисунок 35-Частичный разряд в изоляции

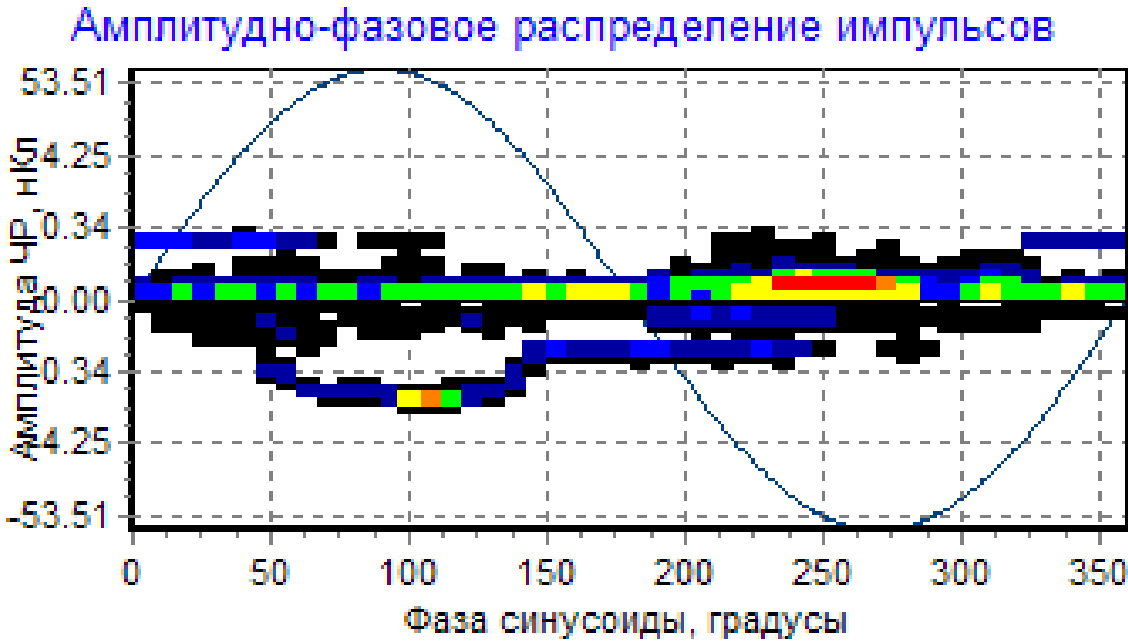


Рисунок 36- Анализ типа дефекта

Наиболее эффективным способом диагностики дефектов изоляции, связанных с ЧР, является комбинация 2-х методов: анализ параметров отдельных импульсов и амплитудно-фазового распределения импульсов частичных разрядов. Определение формы отдельного оптического импульса заключается в регистрации процесса изменения мощности импульса, который выражается в относительных или в именованных единицах во времени. Во многих случаях данная процедура включает в себя экспериментальное определение зависимости относительных значений мощности импульса и последующей аппроксимацией проходящей функции. Амплитудно-фазовое распределение представляет из себя использование значения вектора ТНП присоединения с повреждением и угла между этим вектором и вектором междупазного напряжения для известного режима распределительной сети.

Основными частотными свойствами импульсов можно считать два параметра:

Время (частота) первого импульса (T_1). Частоту импульса можно определять, следуя классической теории, по полному периоду колебания, а можно только по первой волне импульса, используя удвоенное значение длительности этой полуволны. При этом легко можно получить частоту импульса, различающуюся на 50%. Это объясняется тем, что частотные свойства импульса, на первой полуволне, а особенно на переднем фронте, существенно изменяются. Данное обстоятельство вносит в анализ частотных свойств импульсов частичных разрядов определенный субъективизм, но не оказывает существенного влияния на диагностические возможности этого метода. Главное – применять одинаковые правила к определению частотных свойств импульсов частичных разрядов.

Время затухания импульса ЧР (T_2). Этот параметр показывает, как долго длится реакция контролируемого объекта на возникший в изоляции импульс частичного разряда. Временной интервал от начала и до завершения импульса также может определяться несколькими методами. Чаще всего используется некоторое значение коэффициента затухания, например, 0,1 или 0,05. При колебательном уменьшении контролируется амплитуды импульсов. При

снижении амплитуды до такого уровня, относительно амплитуды первого импульса, сигнал частичного разряда считается затухшим.

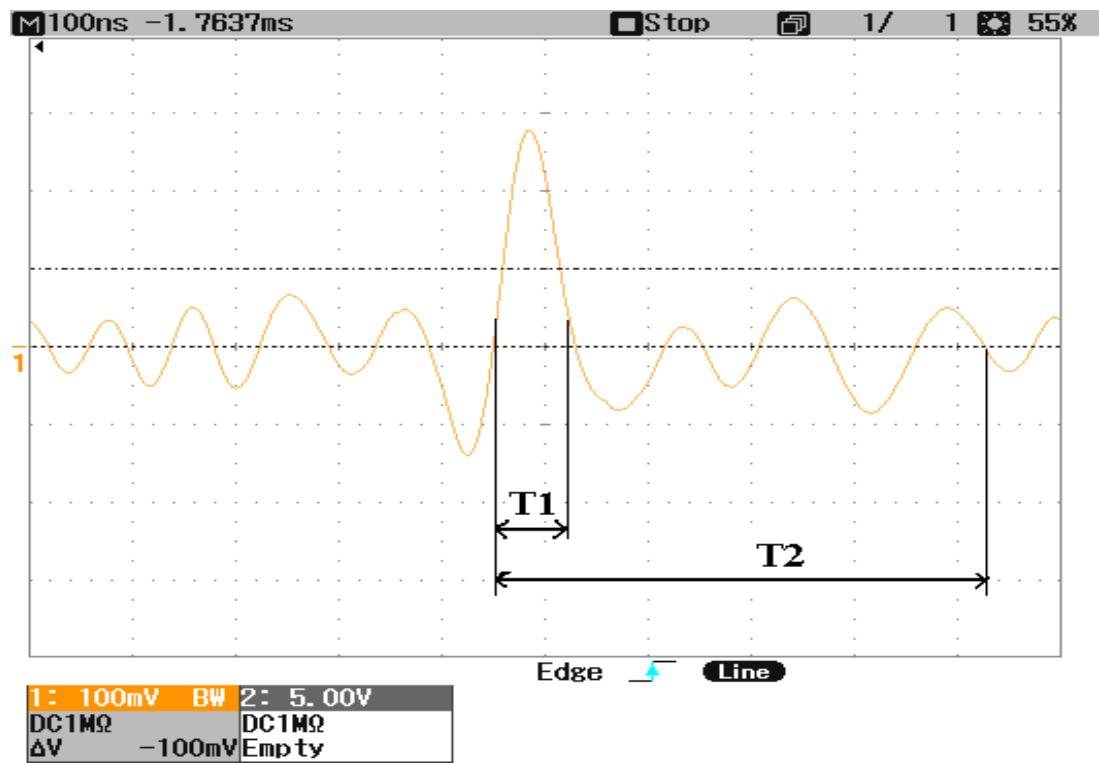


Рисунок 37-Анализ параметров отрицательных импульсов

Данные параметры связаны с типом дефекта, местом его возникновения, средой и путем распространения импульса. На этапе регистрации импульсов практическая ценность этих параметров не столь значительна. Необходимо «набрать» некоторое количество статистической информации, объем которой будет достаточен для обобщения свойств импульсов. Максимально эффективно частотные свойства импульсов можно использовать на этапе анализа распределения импульсов.

Для обобщения свойств импульса, вне зависимости от их амплитуды, его удобнее всего разместить на условной плоскости. Осями координат этой плоскости будут: по оси Y - длительность, для каждого импульса, а по оси X будем откладывать частоту импульсов. Для удобства анализа и практического применения данного диагностического метода назовем это условную плоскость «время - частотной» плоскостью, или «TF плоскостью» (Times Frequency map) плоскостью.

Импульсы одной природы и места возникновения будут сосредоточены на TF плоскости в одной локальной зоне. Импульсы другой природы и места возникновения, как и импульсы помех, будут сосредотачиваться в других зонах.

Для более полного анализа нескольких параметров частичных разрядов можно перейти, от двухмерной TF плоскости, к трехмерной, введя, дополнительно, в рассмотрение амплитуды импульсов, откладывая их по оси Z. В этом случае можно говорить уже о «TFA» диаграммах (Times Frequency Amplitude). Эти диаграммы позволяют еще более эффективно разделять зарегистрированные импульсы частичных разрядов по природе и месту их возникновения, отделять их от помех.

Выделение отдельных групп импульсов с близкими параметрами и анализ каждой группы в отдельности на амплитудно-фазовом распределении позволяет:

- эффективно отделять различные виды дефекта и шум;
- проводить анализ каждой группы импульсов;
- рассчитывать мощность каждой группы и вклад каждого дефекта;
- проводить «ранжирование» дефектов по степени опасности.

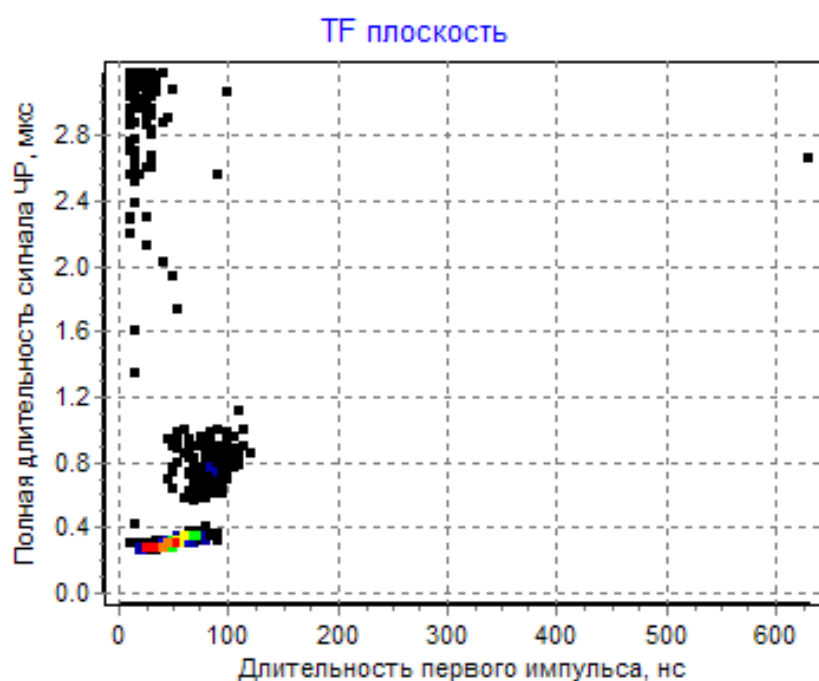


Рисунок 38 - Время- частотная плоскость

2.10 Диагностическое правило

Диагностическое правило – набор параметров амплитудно-фазового распределения импульсов и условий для этого параметра, однозначно описывающий конкретный тип дефекта или помехи.

При выполнении всех условий правила рассчитывается достоверность, с которой правило выполняется и мощность дефекта.

«Центр мощности» импульсов ЧР.

Кроме стандартных параметров ЧР – амплитуда (Q02), мощность (PDI), количество импульсов (N) ЧР вводится понятие «центра мощности» группы импульсов (РС). «Центром мощности» группы импульсов называется точка на амплитудно-фазовой плоскости. Относительно данной точки слева и справа на фазовом распределении суммарная мощность импульсов равна. Аналогично сверху и снизу суммарная мощность импульсов равна. Данную точку можно сравнить с центром масс в физике.

Примеры расчета «центра мощности» для различного амплитудно-фазового распределения импульсов. «Центр мощности» на примерах отмечен синей точкой для отрицательных и красной – для положительных импульсов ЧР:

1. ЧР в изоляции

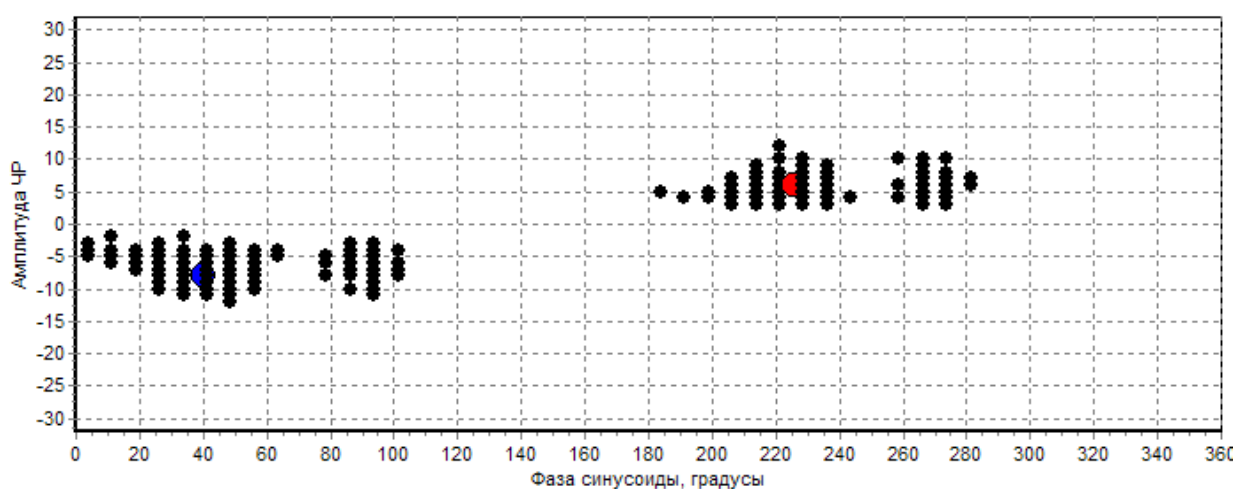


Рисунок 39-Пример расчета центра мощности частичного разряда в изоляции

Центр мощности имеет 2 координаты: амплитуда центра мощности (Y) и фаза центра мощности (X). Использование параметра «центра мощности» в условиях диагностических правил позволяет просто и точно разделить виды дефектов, различающиеся по фазе проявления, что не всегда однозначно, при использовании максимальной амплитуды импульсов.

Например, ЧР в изоляции относительно земли имеют максимум вблизи 45 градусов на положительной полувольтне и 225 градусов на отрицательной. Межфазные ЧР в изоляции имеют максимум вблизи 15 (75 в зависимости от сочетания фаз) градусов на положительной полувольтне и 195 (155 в зависимости от сочетания фаз) градусов на отрицательной полувольтне испытательного напряжения. «Центр мощности» является интегральным параметром, использование, которого вместо фазы импульсов с максимальной амплитудой позволяет исключить учет случайных импульсов (помех) и значительно повысить достоверность диагностики.

Для описания диагностического правила и ведения архива правил в программе создан специальный инструмент. Окно создания (редактирования) диагностического правила имеет следующие поля:

Наименование дефекта. В данное поле вводится наименование, которое будет выводиться в отчете, при выполнении всех условий данного правила. Место возникновения. Тип оборудования, для которого будет возможность применять данное правило. Необходимо отметить один или несколько типов оборудования из предложенных: трансформаторы, кабельные или воздушные линии, электрические машины или другое высоковольтное оборудование.

AFFP (амплитудно-фазовая) диаграмма. Данный шаблон амплитудно-фазовой диаграммы позволяет выбрать 2 зоны ЧР, параметры которых будут использоваться в диагностическом правиле. Каждая зона для удобства имеет свой цвет – красная и синяя. Удобнее всего использовать красную зону для описания импульсов на положительной полувольтне питающего напряжения, синюю зону – для импульсов на отрицательной полувольтне. Изменение параметров тревожной зоны возможно при помощи «мыши», зажав левую кнопку мыши на границе зоны и перетаскивая эту границу или задавая

параметры непосредственно в поле описания параметров соответствующей зоны ЧР.

Наибольшая по площади красная или синяя зона называется – предупредительной. Она предназначена для определения амплитудных и фазовых границ импульсов, параметры которых будут участвовать в описании правила. Все импульсы за границами этих зон – игнорируются.

Каждая тревожная зона имеет внутри себя еще одну зону, называемую «аварийной». Аварийная зона описывает наиболее характерную зону для данного правила, например, зону с максимальной интенсивностью или амплитудой ЧР.

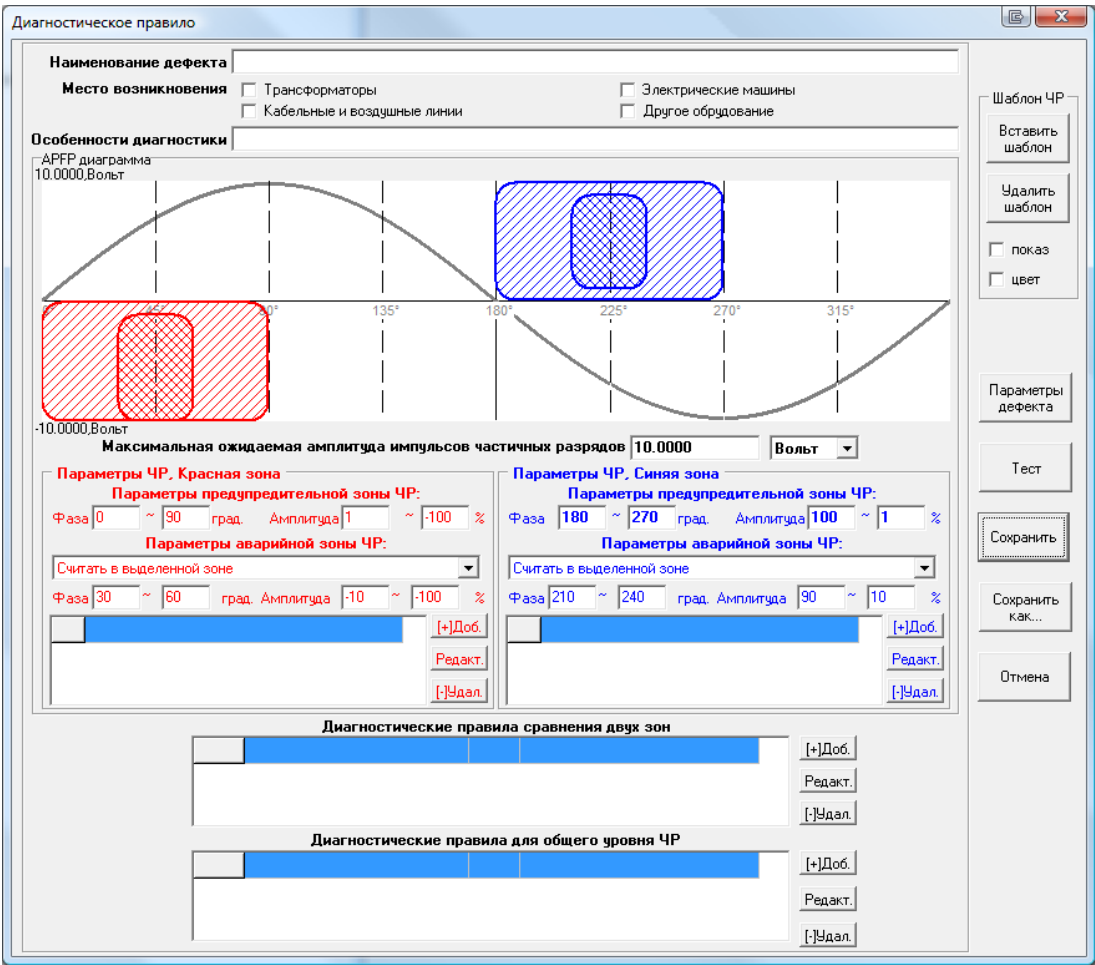


Рисунок 40-APFR диаграмма.

Изменение параметров аварийной зоны аналогично параметрам тревожной, но кроме задания параметров зоны в виде конкретных значений, есть возможность задать относительные значения, относительно рассчитанного

для каждого конкретного случая «центра мощности». Выбор относительного типа аварийной зоны производится с помощью выбора параметра «Считать в зоне вокруг «Центра мощности».

Максимальная ожидаемая амплитуда импульсов ЧР. Данный параметр определяет максимальную ожидаемую амплитуду для данного типа дефекта. Эта амплитуда будет считаться максимальным порогом (100%), выше которого импульсы анализироваться не будут. Порог можно задавать в Вольтах или нКл. Не рекомендуется задавать очень большое значение порога (с большим запасом), т.к. анализ импульсов малой амплитуды будет затруднен, хотя они хорошо видны на при использования логарифмической шкалы.

Параметры ЧР (красная и синяя зоны). Данные параметры определяют размеры предупредительной и аварийной зон, а также задают условия для каждой из этих зон. Размеры зон изменяются при помощи «мыши» или явным заданием значений в поле ввода. Добавить, редактировать или удалить условия можно с помощью соответствующих кнопок управления.

Диагностические правила сравнения 2-х зон. Данные правила задают условия, по которым сравниваются 2 зоны. Сравнение может быть по амплитуде, мощности, количеству импульсов, центру мощности и т.д. Добавить, редактировать или удалить условия можно с помощью соответствующих кнопок управления.

Диагностические правила для общего ЧР. Данные правила задают условия, по которым каждая из зон сравнивается со всеми импульсами в группе или со всеми зарегистрированными импульсами. Добавить, редактировать или удалить условия можно с помощью соответствующих кнопок управления.

Выводы по главе 2

Во второй главе рассмотрены системы диагностики, которые необходимы для замены существующих средств контроля изоляции кабельных линий.

В данной главе предложены 2 метода по контролю изоляции.

Первый – это метод контроля и мониторинга технического состояния кабельной линии на основе непрерывного изменения температуры при помощи

оптических кабельных линий. Глава включает в себя описание принципа работы данной системы, в качестве примера приведены графики с результатами измерений и описание к ним.

Второй метод контроля основан на измерении частичных разрядов в изоляции силовых кабельных линий. При рассмотрении данного метода за основу взята система мониторинга CDM 30 для которой приведены технические характеристики и оборудование, при помощи которого проводятся технические замеры.

Приведен материал, в котором рассказывается о природе возникновения частичных разрядов и основные формулы по расчету их основных параметров.

Далее представлен анализ графиков и результатов измерений системы, под графиками изложено их подробное описание. Для того, чтобы лучше понять, как правильно проверять результаты измерений, в разделе представлена методика распределения частичного разряда на амплитудно-фазовой плоскости для различного типа дефектов, которая позволяет увидеть дефект на стадии зарождения и на основе анализа полученных результатов, реализовать ряд мероприятий по его устранению.

3 Анализ результатов измерений системой CDM 30, полученных экспериментальным путем

В данном пункте представлены результаты измерений, которые проводились на предприятии ООО "Сибур Тольятти". Предприятие расположено в городе Тольятти, его строительство началось в 1958 и закончилось в 1964 году.

Основным видом деятельности является производство синтетических каучуков различных марок. Также предприятие занимается производством различных углеводородных фракций, продуктов органического и неорганического синтеза, полимеров, присадок для бензина.

Объектом, на котором проводились измерения, является ГПП-1, кабельные линии напряжением 6 кВ на первой секции шин, с номерами фидеров В-300-II и В-2-30. Система, с помощью которой проводились измерения, называется CDM-30 (Cables Diagnostic Monitor), смонтированная на подстанции в 2016 г.

Анализ результатов измеренных импульсов частичных разрядов

Анализ результатов начинаем с матрицы распределения частичного разряда. На рисунках 40, 41 изображены полученные матрицы для кабельных линий В-300-II и В-2-30 соответственно

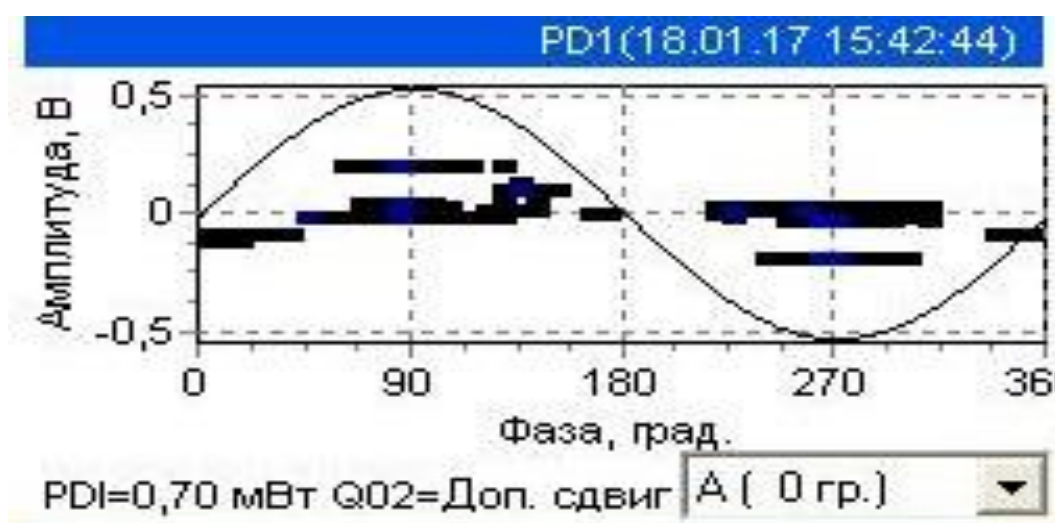


Рисунок 40 - Матрица распределения импульсов частичного разряда для кабельной линии В-300-II

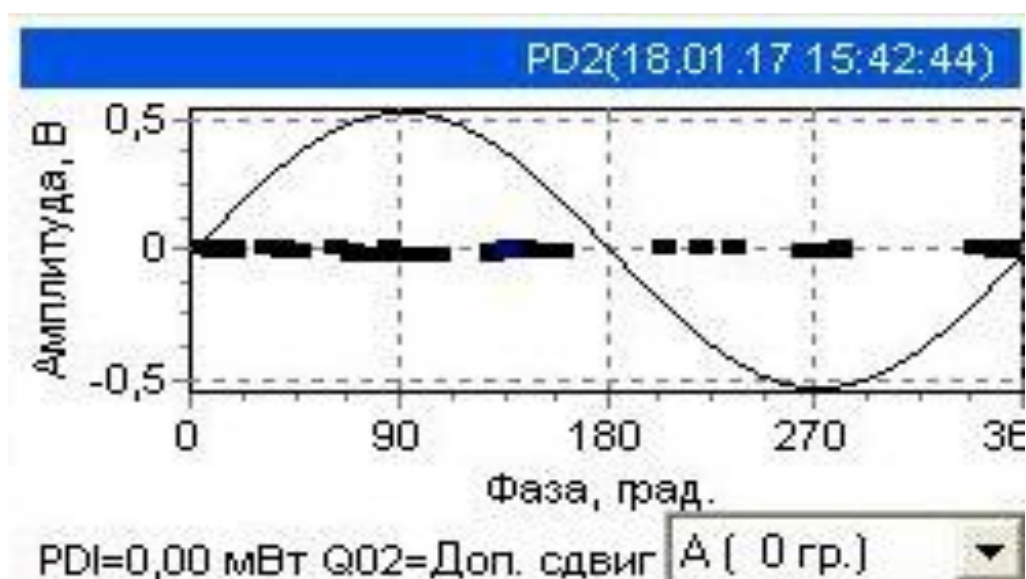


Рисунок 41 - Матрица распределения импульсов частичного разряда для кабельной линии В-2-30

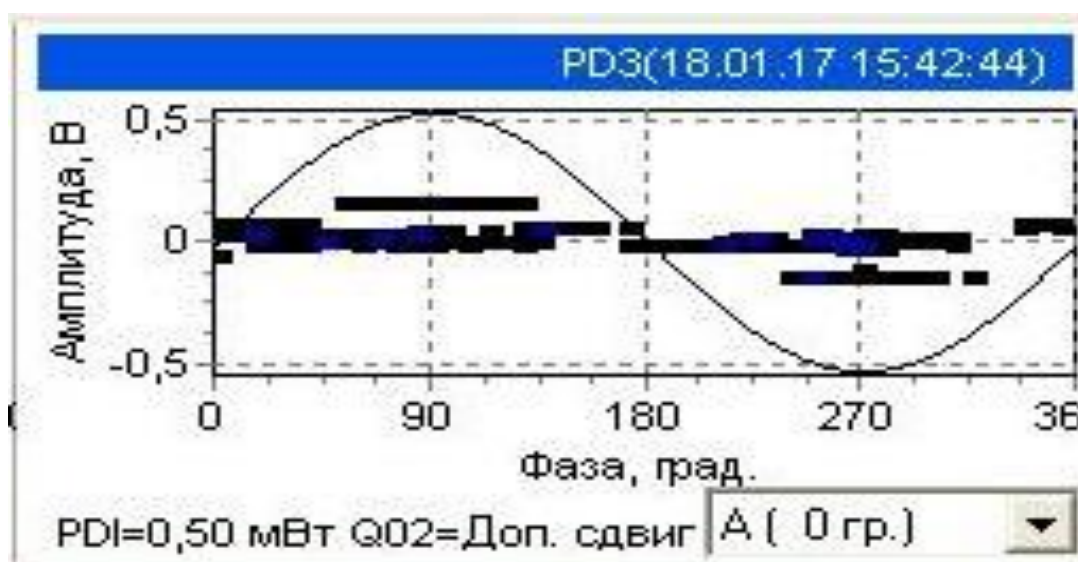


Рисунок 42 - Матрица распределения ЧР для линии КС-1-53

Как видно на рисунке 40, мощность частичного разряда на линии В-300-II, составляет 0,70 мВт. Согласно цветовой маркировке, описанной во втором разделе, можно сделать вывод о том, что кабельная линия имеет мелкие дефекты в зонах с частичными разрядами, но дефекты не настолько существенны для того, чтобы кабельную линию можно было отнести к предаварийной. На рисунке 41 показана матрица ЧР кабельной линии В-2-30. Мощность частичных разрядов на линии составляет 0 мВт, на основании чего

можно сделать вывод о том, что кабельная линия находится в хорошем состоянии.

На рисунке 42 изображена матрица распределения ЧР кабельной линии КС-1-53, значение суммарной мощности частичных разрядов в 0,5мВт говорит о незначительном износе изоляции, кабельную линию можно считать пригодной для работы.

Исходя из графиков видно, что импульсы присутствуют во всех зонах на кабельной линии, черный цвет маркера на импульсе обозначает, что количество импульсов на кабельной линии незначительно. Срок службы у кабельных линий, которые применялись при проведении измерений составляет более 9 лет, чем обусловлено наличие мелких импульсов частичных разрядов в изоляции, так как в процессе эксплуатации кабеля через его изоляцию всегда проходит токовая нагрузка, которая со временем изнашивает изоляцию, что в последствии приводит к возникновению импульсов. Данные импульсы не говорят о том, что изоляция кабелей изношена и линия находится в аварийном режиме, напротив для КЛ с таким сроком службы это нормальное явление.

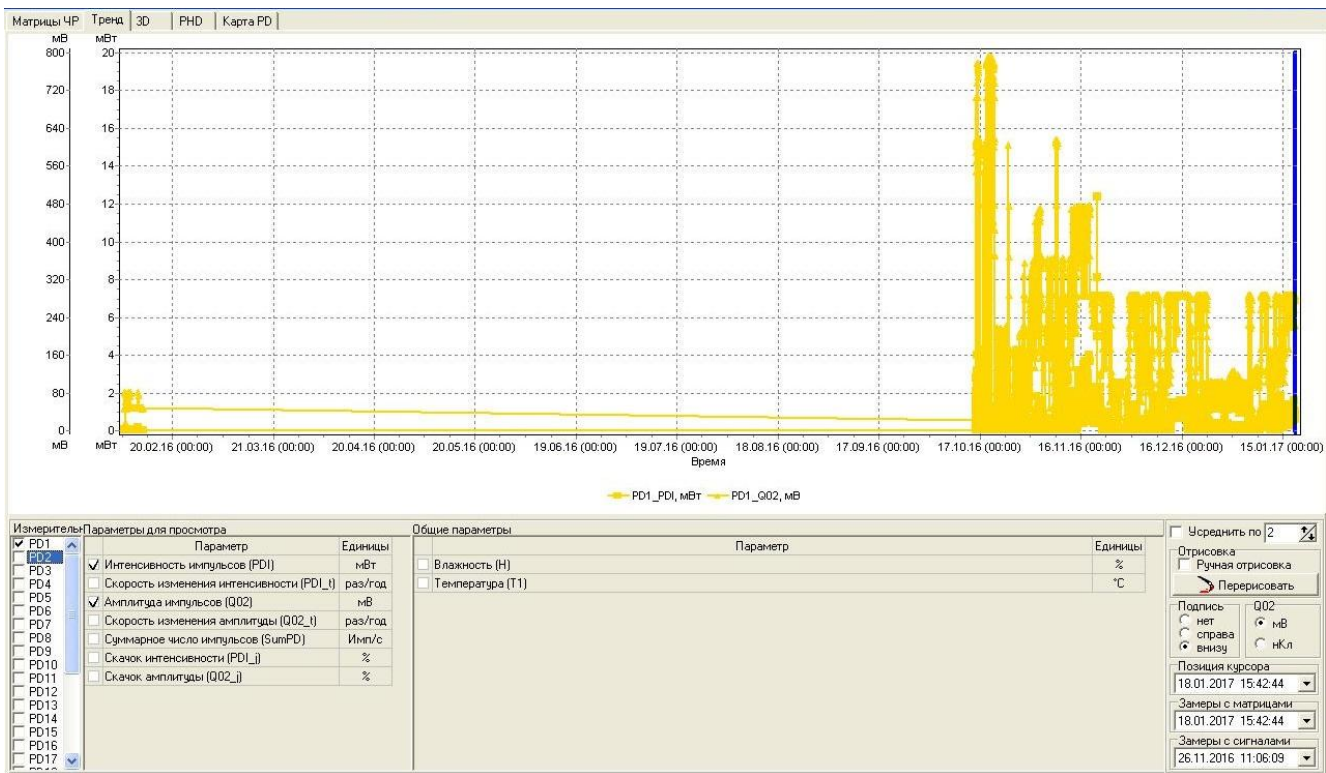


Рисунок 43 - Распределение тренда импульсов частичных разрядов на линии В-300-II

На рисунке 43 приведен график зависимости мощности импульса частичного разряда от времени проведения замеров. На шкале замеров по времени видно, что измерения проводились с 20.02.16 по 15.01.17. Исходя из графика видно, что в период с 21.03.16 по 17.10.16 линия была выведена из работы, так как амплитудных скачков импульсов частичных разрядов не наблюдается. С 17.10.16 линию ввели в работу, можно наблюдать самые сильные амплитудные скачки до 20 мВт, данное явление вызвано сильной токовой нагрузкой линии.

В отличие от матрицы частичных разрядов график тренда способен показывать распределение амплитуд импульсов и напряжений на определенном промежутке времени.

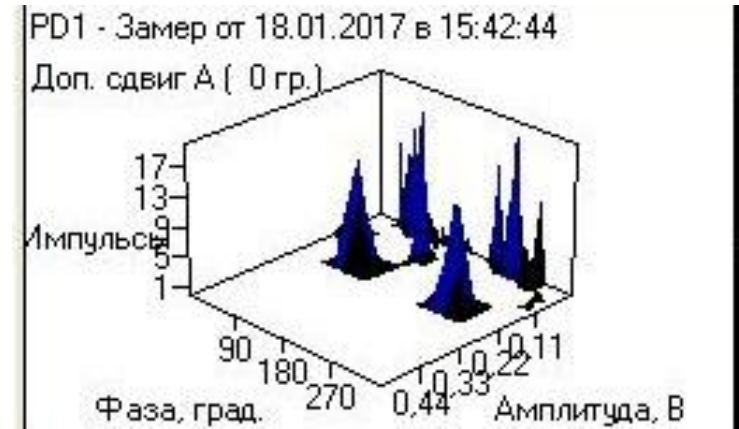


Рисунок 44 - 3D модель распределения импульсов частичных разрядов на кабельной линии В-300-II

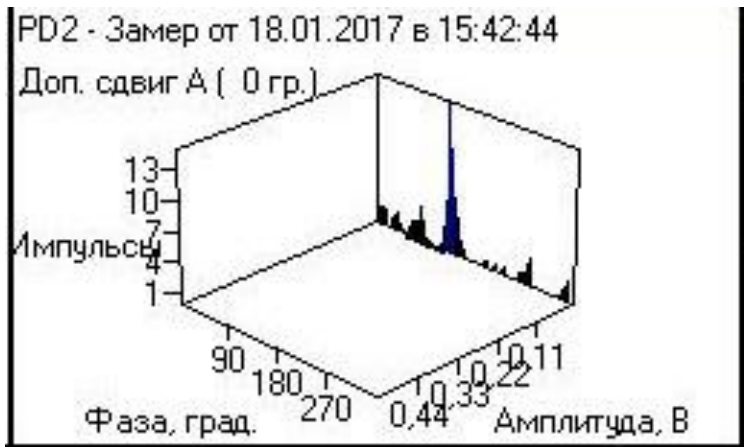


Рисунок 45 - 3D модель распределения импульсов частичных разрядов на кабельной линии В-2-30.

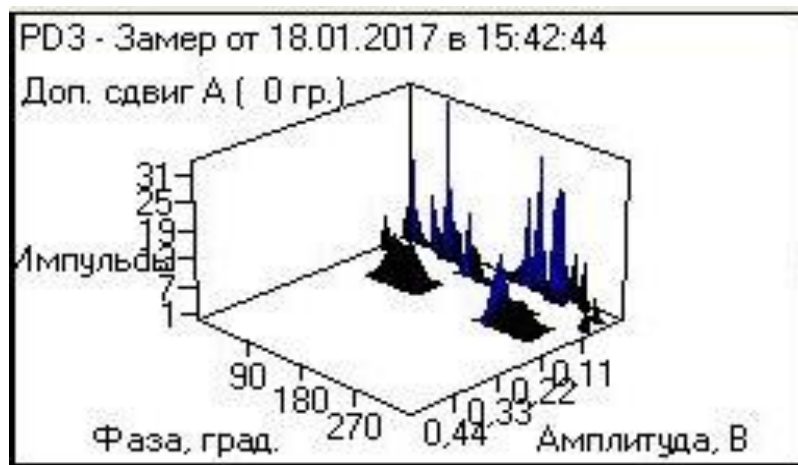


Рисунок 46 - 3D модель распределения частичных разрядов КС-1-53

На рисунках 44, 45, 46 изображены графики 3D плоскостей, на которых показано распределение импульсов частичных разрядов в изоляции кабеля. Рисунки 44, 46 отображают графики импульсов кабельных линий В-300-II, КС-1-53 с наиболее изношенной изоляцией.

Данные графики отображают количественное распределение импульсов в секунду. По горизонтальной оси откладывается фаза в градусах, перпендикулярная к ней ось отображает амплитуду, измеряемую в дБ или нКл, а по вертикальной оси – количество импульсов в секунду.

Рассмотрев график на рисунке 44, можно сделать вывод о том, что самое большое количество импульсов в секунду достигает 17 единиц, такой показатель можно отнести к норме.

Сравнивая показатели графиков В-300-II, КС-1-53 и В-2-30 видим, что на линиях В-300-II, КС-1-53 амплитудные значения импульсов частичных разрядов в разных фазах, превышают показатели графика В-2-30, на основании чего можно сделать вывод что состояние изоляции линий В-300-II, КС-1-53 хуже, чем у линии В-2-30.

Рассмотрим спектр PHD. Раздел включает в себя амплитудно-количественное распределение импульсов частичных разрядов, по другому его называют «Спектр ЧР». По вертикальной оси откладывается количество импульсов, а на горизонтальной – амплитуда импульсов. Если обратить

внимание на график то там хорошо видно распределение импульсов по амплитуде.

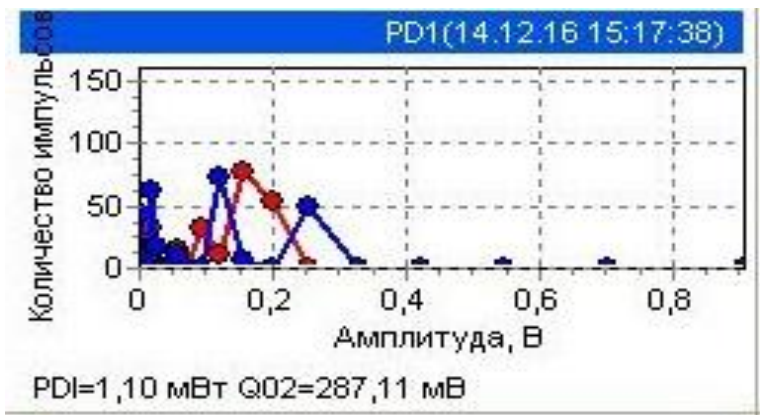


Рисунок 47 - Спектр распределения PHD для кабельной линии В-300-II

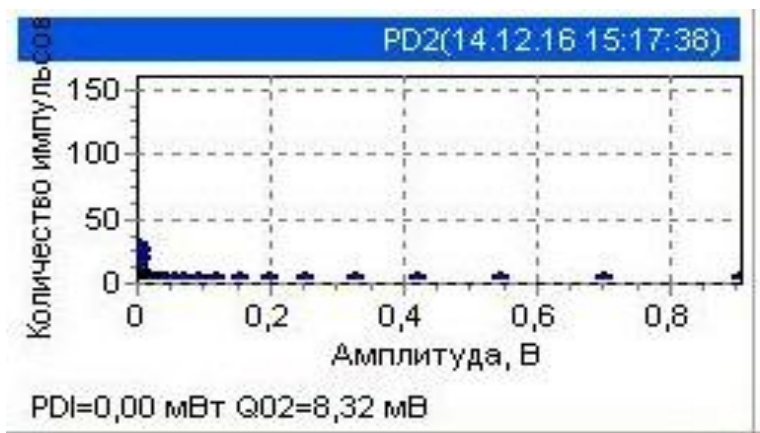


Рисунок 48 -Спектр распределения PHD для кабельной линии В-2-30

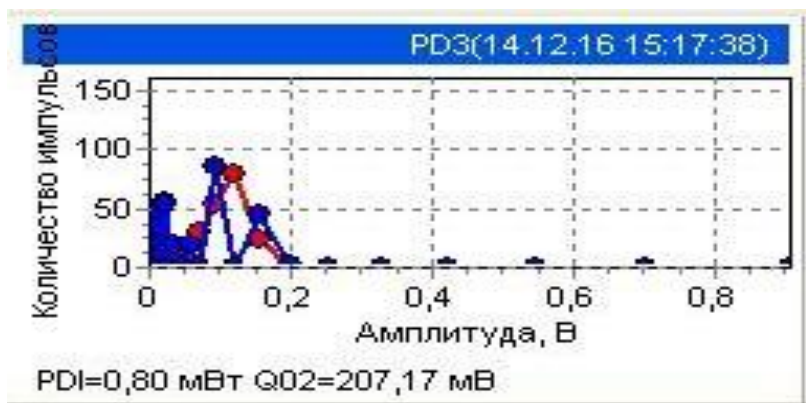


Рисунок 49- Спектр распределения PHD на линии КС-1-53

На данных графиках видно амплитудно-количественное распределение импульсов частичных разрядов. В отличие от выше перечисленных на этих графиках видно, что измерения проводились 14.12.16, а не 18.01.17. Рассмотрев

график на рисунке 47 (кабельная линия В-300-II), можно увидеть суммарную мощность частичных разрядов PDI, которая равняется 1,1 мВт, что говорит о незначительном износе КЛ, данный показатель является нормативным. Далее переходим к графику на рисунке 48 (кабельная линия В-2-30). Суммарная мощность частичных разрядов PDI равняется 0 мВт, данный показатель является отличным, так как импульсы частичных разрядов в изоляции отсутствуют; исходя из этого, можно сделать вывод о том, что линия находится в исправном техническом состоянии. Проведем анализ графика на рисунке 49 (кабельная линия КС-1-53). Мощность частичных разрядов PDI равняется 0,8 мВт что говорит о незначительном износе изоляции, что позволяет считать состояние изоляции КЛ удовлетворительным.

Проведем анализ TF-плоскости. Данные графики необходимы для разделения различных типов дефектов. На рисунках ниже приведены графики распределения частичных разрядов по TF-плоскости.



Рисунок 50 - TF-плоскость для кабельной линии В-300-II

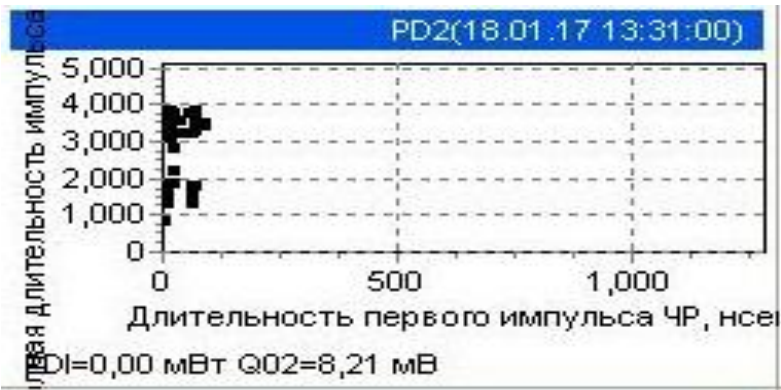


Рисунок 51 - TF-плоскость для кабельной линии В-2-30



Рисунок 52 - TF-плоскость для кабельной линии КС-1-53

На рисунках 50, 51, 52 можно увидеть плоскость распределения частичных разрядов; данные графики являются зависимостью длительности каждого импульса от частоты его появления. Разное количество импульсов располагается в разных локальных зонах, в зависимости от природы возникновения импульса.

В КЛ под номером В-300-II в зонах с длительностью сигнала ЧР 0,5 и 1,9 мкс можно наблюдать зеленый индикатор импульсов, данное значение импульсов входит в зону нормативной интенсивности, но может говорить о незначительном износе изоляции, поэтому система не сигнализирует о предаварийном режиме, исходя из чего, можно считать, что изоляция линии находится в удовлетворительном состоянии.

В КЛ под номером В-2-30 присутствуют маркировки только черного цвета, это говорит о незначительных импульсах, которые вполне могут быть вызваны электромагнитными помехами. В целом состояние изоляции можно считать хорошим.

В КЛ под номером КС-1-53 в зонах с длительностью сигнала 0,5 и 1,2 мкс можно наблюдать импульсы с зеленым и желтым индикаторами, данные показатели относятся к нормативным, но желтая маркировка импульса свидетельствует о том, что изоляция, по сравнению с другими находится в наиболее изношенном состоянии. Если брать в учет, что линия находится в эксплуатации более 7 лет, состояние её изоляции можно считать удовлетворительным.

Выводы по главе 3

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований, которые проводились на территории завода ООО "Сибур Тольятти" на подстанции ГПП-1; объектами измерений являлись 3 кабельные линии номинальным напряжением 6 кВ. Линии, которые питают фидеры производственных зданий изобутилена, идут под номером В-300-II и В-2-30. Фидер под номером КС-1-53 питает здания вспомогательных производств.

Проведя анализ результатов измерений, можно сделать вывод о том, что техническое состояние кабельной линии под номером В-2-30 находится в более хорошем техническом состоянии по сравнению с линиями В-300-II и КС-1-53.

В главе приведены результаты измерений, а также подробный анализ и описание к ним.

Результаты измерений предоставлены персоналом электротехнической лаборатории "Цеха Электроснабжения" предприятия ООО "Сибур Тольятти", на подстанции которого смонтирована и эксплуатируется система мониторинга CDM-30.

Заключение

Проведя анализ методов диагностики изоляции кабельных линий, можно сделать вывод о том, что существующие на данный момент мероприятия по диагностики, основаны на давно разработанных методиках, которые все это время хорошо показывали себя на практике, но на сегодняшний день для эксплуатации кабельных линий они не совсем отвечают возложенным на них требованиям.

Сравнивая методы диагностики, которые были указаны в главе 1, можно сказать, что испытания изоляции повышенным напряжением промышленной частоты как переменным, так и постоянным, позволяют выявить дефекты в изоляции, но в свою очередь при проведении испытаний, пагубно влияют на целостность изоляции; также данные системы проводят испытания на кабельных линиях при условии, что их вывели из работы. Методы импульсного тока и бегущей волны также оказывают отрицательное воздействие на изоляцию кабельной линии, для них характерна невозможность нахождения объемных зарядов в изоляции кабеля.

Импульсный рефлектометр и акустические средств во время своей работы не оказывают воздействия на изоляцию кабеля. К плюсам рефлектометра можно отнести то, что данное оборудование способно выявлять зарождающиеся дефекты в изоляции, а также локацию места повреждения, но при условии, что линия отключена. К минусам можно отнести низкую точность определения локации места дефекта. Акустический метод также дает возможность выявления локации места дефекта, но после выхода кабельной линии из строя.

Импульсно-дуговой метод позволяет точно определять места возникновения дефектов в кабельных линиях, а также может вести работу на линии под напряжением. Минусами данного оборудования является то, что при использовании данного метода необходимо идти вдоль кабельной линии с антенной из проволоки и переносным телефоном, в котором при прохождении

вдоль неповрежденных участков издается характерный звук, а в зоне дефекта звук резко пропадает.

Проведя анализ существующих средств технического контроля можно сделать вывод, что на данный момент средства технического контроля не предусматривают возможность учитывать характеристики переходных процессов в кабельных линиях во время их работы (гармонические составляющие тока и напряжения, грозовые и коммутационные перенапряжения).

Методы, которые предлагаются в диссертационной работе отличаются тем, что в процессе эксплуатации не оказывают пагубного влияния на состояние изоляции и могут вести работу на кабельной линии под напряжением.

По официальным данным, предоставленным фирмой ООО "DIMRUS" г. Пермь, Россия, стоимость комплекта системы контроля технического состояния кабельной линии CDM 30, составляет около 400 тыс. руб. в ценах 2015 года (без учета стоимости монтажа и пуско-наладки). Согласно данным предоставленным компанией Lios Technology, стоимость комплекта системы контроля за температурой изоляции OTS2000 составляет около 390 тыс. руб. в ценах 2016 года.

Системы расширенного стационарного мониторинга основываются на комплексных результатах проведения «on-line» тестов, выполняемых на работающем оборудовании в автоматизированном режиме. Результаты тестов, выполняемых в режиме «off-line» могут быть использованы встроенными алгоритмами системы мониторинга, однако актуальность таких тестов невелика, т.к. они проводятся обычно раз в несколько лет.

Данные методы показывают хорошую эффективность при выявлении зарождающихся дефектов что позволяет его устранить до выхода КЛ из строя. Применение и внедрение систем диагностического мониторинга изоляции силовых кабельных линий является не только перспективным, но и одним из самых оптимальных вариантов по решению проблемы надежности систем электроснабжения.

Список использованных источников

1. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г.М. Шалыт. - М.: Энергоатомиздат, 1982. - 312 с.
2. Шипицын, В.В. Исследование метода определения места повреждения в кабелях, основанного на улавливании магнитного поля / В.В. Шипицын, В.А. Шабанов, Д.А. Хлюпик // Сб. докл. 5 Международного симпозиума «Электротехника 2010». – 1999. – С.181-184.
3. Stattuck, G.B. New technique saves cable (neutral corrosion test determines strategy for replacement or enhancement) / G.B. Stattuck // Transmission and distribution world. – 1995, August. – P.38-41.
4. Gurnlack, B. Neutral corrosion - problem overstated / B. Gurnlack // Transmission distribution world. – 1996, August. – P.152-158.
5. Дементьев, В.С. Как определить место повреждения в силовом кабеле. Третье издание, переработанное / В.С. Дементьев. - М.: «Энергия», 1980.
6. Лыкин, А.В. Электрические системы и сети. Учебное пособие / А.В. Лыкин.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 248 с.
7. Файбисович, Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей. / Под ред. Д.Л. Файбисовича. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. - 320 с.
8. Лычев, П.В. Электрические системы и сети. Решение практических задач. Учебное пособие / П.В. Лычев, В.Т. Федин. – Минск: Дизайн Про, 1997. - 191 с.
9. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. / Л.А. Бессонов. М.: Высш. Школа, 1978. – 528 с.
10. Саркисян, С.А. Анализ и прогноз развития больших технических систем / С. А. Саркисян. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
11. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: учеб. для вузов / Б.Н. Неклепаев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
12. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник: в 3-х т. Т.2. Электротехнические устройства / под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 640 с.

13. Альтшуллер, Г.С. Алгоритм изобретения / Г.С. Альтшуллер. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Моск. рабочий, 1973. - 296 с.
14. Альтшуллер, Г.С. Поиск новых идей: от озарения к технологии: (Теория и практика решения изобретательских задач) / Г.С. Альтшуллер, Б.Л. Злотин, А.В. Зусман, В.И. Филатов. - М.: Энергоиздат, 2003.- 382 с.
15. Петров, В.М. Фундаментальные основы Теории решения изобретательских задач. Учебное пособие. / В.М. Петров.- Тель-Авив, 2003 - 583 с.
16. Решение проблем с позиций ОТСМ-ТРИЗ [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://otsm-triz.org>.
17. Леонов, В.М. Основы кабельной техники: учебник для студентов высших учебных заведений/ В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
18. Степанов, В.М. Методы местонахождения повреждённых участков кабельных линий напряжением 35-500кВ / В.М. Степанов, П.А. Борисов. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып.3. – Ч.5. – С.94-97.
19. Борисов, П.А. Устройства трассировки кабельных линий напряжением 35-500кВ / П.А.Борисов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып.3. – Ч.5. – С.97-98.
20. Степанов, В.М. Диагностика технического состояния силовых кабельных линий напряжением 35-500кВ / В.М. Степанов, П.А. Борисов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – Вып.6. – Ч.1. – С.66-71.
21. Борисов, П.А. Модель электротехнического комплекса диагностики технического состояния силовых кабельных линий / В.М. Степанов, П.А. Борисов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып.12. – Ч.2. – С.171-176.
22. Дубяго, М.Н. Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследовании изоляции кабельных линий / М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 200-205.

23. Дубяго, М.Н. Метод селекции сигналов ЧР с помощью Вейвлет преобразований / М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 99-104.
24. Vercauteren, N. Evolution of superficial lake water temperature profile under diurnal radiative forcing / N. Vercauteren, H. Huwald, E. Bou-Zeid, J.Selker, U. Lemmin, B. Parlange and I. Lunati // Water Resour. Res. – 2011. – 47, W09522.
25. Vogt, T. Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiberoptic high-resolution vertical temperature profiling / T. Vogt, P. Schneider, L. Hahn-Woernle, O. Cirpka // doi:10.1016/j.jhydrol.2009.10.033, 2010.
26. Westhoff, M.C. distributed stream temperature model using high resolution temperature observations / M.C. Westhoff, H.H. Savenije, W.M. Luxemburg, G.S. Stelling, N. C., Selker, J.S. Pfister and S.Uhlenbrook // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2007. – № 11. –P. 1469–1480.
27. Westhoff, M.C. Quantifying hyporheic exchange at high spatial resolution using natural temperature variations along a first-order stream / M.C. Westhoff, M.N. Gooseff, T.A. Bogaard, H.H. Savenije // Water Resour. Res. – 2011. – 47, W10508.
28. Petrides, A. C. Shade estimation over streams using distributed temperature sensing / A.C. Petrides, J. Huff, A. Arik, A.M. Kennedy, C.K. Thomas, J.S. Selker // Water Resour. Res. – 2011. – 47, W07601.
29. Петрова, Е.В. Расчет погрешностей определения потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за не учета атмосферных и режимных факторов / под ред. Е. В. Петрова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2013. – № 2 (120). – С. 191–197.
30. Гиршин, С. С. Учет температуры элементов сети при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / С. С. Гиршин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2013. – № 1 (117). – С. 137–142.
31. Бигун, А.Я. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере

- компенсации реактивной мощности / А. Я. Бигун // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1. – С. 212.
32. Петрова, Е.В. Учет температурной зависимости сопротивления неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / Е. В. Петрова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 284–291.
33. Степанов А.Г. Оценка и прогнозирование состояния изоляционной системы силовых трансформаторов магистральных электрических сетей: дис. канд. технич. наук / А.Г. Степанов. – Красноярск, 2005.
34. Харечко, В.Н. Техническая документация на муфты для силовых кабелей с бумажной и пластмассовой изоляцией до 35 кВ / В.Н. Харечко, Н.С. Толиков. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
35. Иванов, Д.А. Повышение эффективности функционирования концевых муфт кабельных линий и электротехнических устройств контроля их технического состояния: дис. канд. технич. наук / Д.А. Иванов. – Тула, 2014. – 100 с.
36. Шидловский, А. К. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения / А. К. Шидловский, А. А. Щерба, В. М. Золотарев, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. – 2013. – 550 с.
37. Поиск трасс и точное определение мест повреждения кабельных линий индукционными трассоискателями фирмы «Стэлл». Методические материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Reis205.narod.ru.
38. Шидловский, А. К. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из 61 ISSN 2224-0349 № 59 (1032) сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ / А. К. Шидловский, В. М. Золотарев. –Х.: Майдан. – 2007. – 62 с.

39. Лебедев, Г.М. Определение дефектов изоляции кабельных линий высокочастотным методом контроля / Г.М. Лебедев, Н.А. Бахтин, В.И. Брагинский. // Электрика, 2003. – №7. – С. 37 – 40.
40. Беляков, В.В. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени / В.В. Беляков, А.В. Малышев // Электро, 2008. – №5. – С. 38 – 40.
41. Гильманов, Э.А. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий электропередачи на основе диагностики методом импульсной рефлектометрии : Автореф. дис. канд. техн. наук / Э.А. Гильманов // Уфим-ский гос. авиационный технич. университет. Уфа, 2009. – 17 с.
42. Лебедев, Г.М. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий 6-10 кВ в системах электроснабжения на основе неразрушающей диагностики: дис. докт. техн. наук / Г.М. Лебедев // Московский энергетический институт. – М., 2007.- 408 с.