

Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования.

2020

ООО «Димрус»

www.dimrus.ru

Раздел 1

Понятие частичного разряда, параметры измерения.

Частичный разряд (ЧР) - локализованный электрический разряд, частично шунтирующий изоляцию между проводниками, который может возникать как в прилегающих, так и в не прилегающих к проводнику объемах изоляции.

Частичные разряды являются в основном следствием местных электрических концентраций перенапряжений в изоляции или на поверхности изоляции. ЧР обычно происходит в местах существования либо сильно неоднородного электрического поля, как в коронном разряде, либо в ситуации, когда изоляция имеет дефект структуры, или слабое место. Частичные разряды часто сопровождается выделением звука, света, высокой температуры и химических реакций. ЧР может привести к химическому разложению в изоляционном материале, которое в итоге может привести к полному нарушению изоляции.

Частичный разряд, который возникает в изоляции, генерирует электромагнитный импульс, выражающийся в виде потенциального или токового импульса. Прибор регистрации ЧР, измеряет этот сигнал тока или напряжения (на его выходе из изоляции контролируемого объекта), пропорциональный величине частичного разряда.

Следует понимать, что **мы не можем измерить ток разряда непосредственно**, а регистрируем только его внешние проявления, поэтому при измерении ЧР практически всегда говорят об измерении кажущемся разряде (заряде).

Кажущийся заряд импульса ЧР - это заряд, при введении которого в течение очень короткого промежутка времени между выводами испытываемого объекта в установленной испытательной схеме, появилось бы то же самое показание (отсчет) на измерительном приборе, как и при непосредственном возникновении импульса тока от ЧР (МЭК 60270). Обычно величина ЧР выражается в пКл.

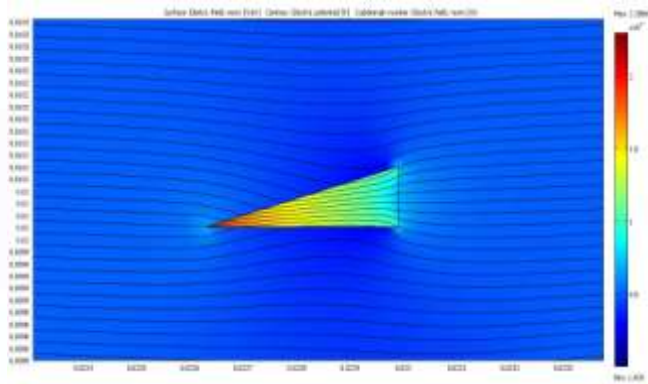
В этом определении очень важным является то, что **мы никогда не знаем точные параметры реального частичного разряда** в зоне дефекта, например, внутри газового включения. Мы всегда измеряем реакцию (заряд) контролируемого высоковольтного объекта на возникновение внутри изоляции ЧР. Разряд потому и называется «кажущимся», т. к. реально нам так только кажется, а истинное значение реального частичного разряда в изоляции нам не известно. У нас нет ни возможности, ни технических устройств, для проведения прямых измерений в зоне дефекта.

Из этого следует очень важное заключение. Регистрируемый нами импульс, который мы считаем импульсом «частичного разряда», конечно, имеет связь с параметрами произошедшего внутри частичного разряда, но во многом, а можно сказать и практически полностью, сформирован внутренними электромагнитными параметрами контролируемого объекта, особенно в зоне дефекта. На параметры регистрируемого прибором импульса оказывают влияние не только сам разряд в изоляции, но и многие другие факторы - геометрические размеры объекта, его внутренние электромагнитные связи, индуктивности, емкости, место возникновения дефекта, удаление первичного датчика от зоны дефекта, и т.д.

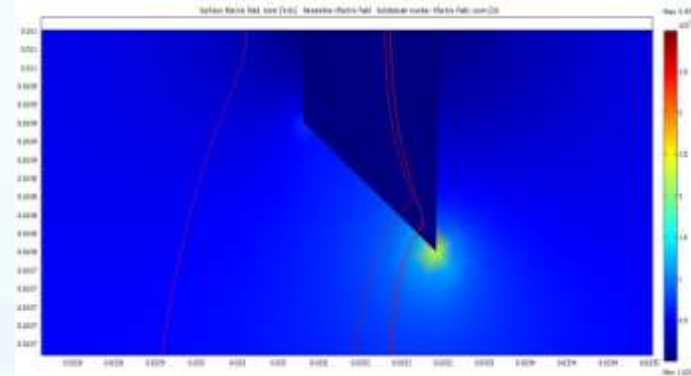
Тем не менее, поскольку определенная корреляция корректирующего заряда с параметрами самого частичного разряда есть, на практике эти понятия обычно подменяются.

Еще более сложным определением реального тока ЧР при измерении ЧР **акустическими датчиками** или электромагнитного излучения импульса **СВЧ (UHF)** антеннами. Кроме параметров объекта значительное влияние оказывает расстояние до источника ЧР, среда передачи излучения, наличие «экранирующих» элементов на пути распространения сигнала.

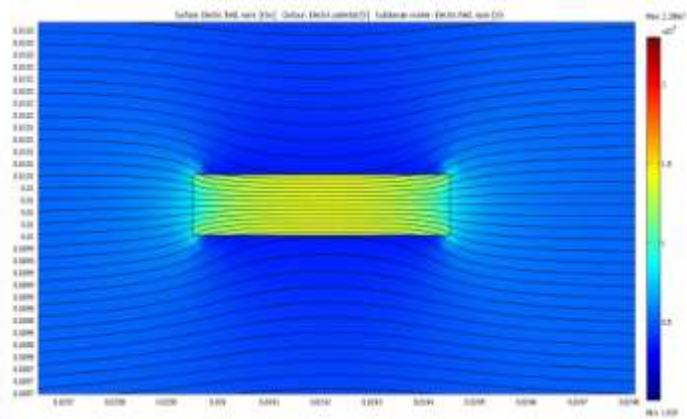
Напряженность электрического поля при дефектах (моделирование).



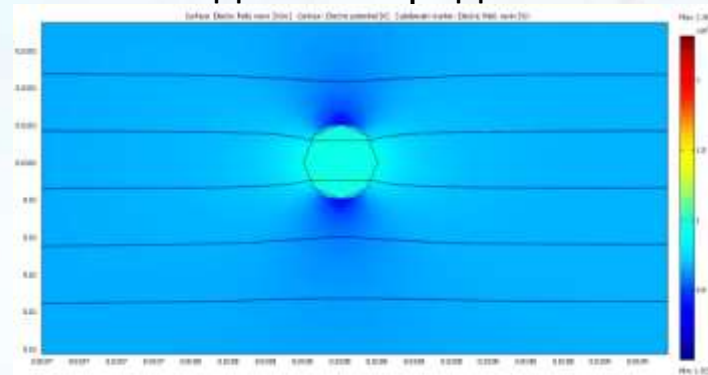
Газовый клин



Металлический заусенец на обкладке электрода



Прямоугольная полость, заполненная газом



Сферическое газовое включение

Кроме кажущегося заряда при анализе ЧР обычно используются следующие определения МЭК 60270:

- **Частота повторения импульсов** - число импульсов частичных разрядов за секунду;
- **Фазный угол и время** t_i распространения импульса ЧР $\alpha_i = 360 (t_i/T)$, где t_i - время, измеряемое между предшествующим положительным переходом испытательного напряжения через нуль и импульсом частичных разрядов и T - период испытательного напряжения. Фазный угол выражается в градусах (°).
- **Средний ток частичных разрядов I** - производная величина, являющаяся суммой абсолютных значений отдельных кажущихся зарядов q_i , взятая за выбранный контрольный интервал времени T_{ref} , деленная на этот интервал времени:

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|)$$

Средний ток частичных разрядов I обычно выражается в кулонах за секунду (Кл/сек) или в амперах (А).

- **Мощность частичных разрядов P** - производная величина, которая является средней мощностью импульса, подводимая к выводам испытываемого объекта, соответствующая значениям кажущего заряда q_i на протяжении выбранного контрольного интервала времени T_{ref} :

$$P = \frac{1}{T_{ref}} (q_1 U_1 + q_2 U_2 + \dots + q_i U_i)$$

, где $U_1, U_2 \dots U_i$ - мгновенные значения испытательного напряжения в моменты распространения t_i , отдельных значений кажущихся зарядов q_i . При расчетах мощности, в некоторых случаях, мгновенные значения приложенного напряжения U_i заменяют действующим значением. Это допустимо в системах измерения, особенно в системах мониторинга, когда используется 3-х фазная система питания контролируемого объекта.

Мощность частичных разрядов обычно выражается в ваттах (Вт).

- **Фоновый шум** - сигналы, обнаруженные во время измерения ЧР, которые не происходят в испытываемом объекте.

Частичные разряды возникают в изоляции оборудования среднего и высокого классов напряжения. Считается, что измерение частичных разрядов можно проводить при рабочем напряжении на изоляционном промежутке от 3 кВ и выше.

- ЧР имеет очень крутой фронт нарастания импульса в следствии чего имеет очень широкий частотный спектр
- ЧР имеет множество эффектов - физических, химических и электрических
- Импульс ЧР вызывает излучение, в рентгеновском, оптическом и УФ-диапазоне.
- В некоторых случаях импульс ЧР может быть зафиксирован в световом диапазоне.

На основе регистрации УФ излучения работают многие приборы регистрации ЧР.

Существуют приборы на основе рентгеновского излучения (очень дорогие на данный момент, безопасность для персонала).

Импульс ЧР приводит к возникновению различных химических реакций в месте его возникновения.

Химические реакции приводят к разложению изоляционных материалов на компоненты, которые в свою очередь могут распадаться или объединяться в другие химические элементы.

Наиболее известен и давно применяется на практике хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ) в трансформаторном оборудовании. Импульсы ЧР вызывают сложные химические реакции в результате которых углеводородная часть трансформаторного масла разлагается на углерод и водород. Углерод остается на поверхности изоляции, а водород растворяется в масле, его изменение и фиксируется при ХАРГ. Импульсы ЧР значительной энергии и искровые разряды приводят к появлению ацетилена.

Аналогичные процессы происходят в элегазовом оборудовании. Элегаз (SF_6) разлагается в SF_4 , который, в свою очередь распадается на SOF_2 и SO_2F_2 .

На практике мало применяется для диагностики ЧР. Необходимо очень длительное время для фиксации изменений в газовом составе.

Недостаток – инертность процесса, которая в некоторых случаях не позволяет своевременно выявить процесс. Не выявляет ЧР в толще твердой изоляции.

Достоинство – помехозащищенность.

Акустические сигналы возникают из волн давления, вызванных разрядной активностью.

Акустические измерения могут быть сделаны легко с помощью внешних датчиков

Акустические датчики – направленные, что является одновременно достоинством и недостатком.

Достоинство – возможность провести локацию импульсов ЧР. Применяются для постоянного мониторинга наиболее ответственных и потенциально наиболее повреждаемых элементов высоковольтного оборудования. Например, метод эффективен для мониторинга кабельных муфт.

Недостаток – для стационарных систем мало применимы. Для большого объекта (трансформатор, КРУЭ) потребуется большое количество датчиков, и соответственно приведет к значительному удорожанию системы.

Испытания производятся в соответствии с требованиями МЭК 60270

Измерения производятся через конденсаторы связи, подключенный непосредственно к высоковольтной шине или высокочастотные трансформаторы тока в цепи заземления высоковольтного оборудования.

Измерения возможно проводить в диапазоне от 300 кГц до 30 МГц.

Для локализации дефекта необходимо использовать набор датчиков для определения времени прибытия импульса.

Практически трудно использовать для мониторинга в некотором оборудовании (например в КРУЭ).

TEV (Transient Earth Voltage) – метод стекания напряжения по проводящей поверхности на землю.

Регистрируются поверхностные сигналы на корпусе оборудования в диапазоне частот от 1 МГц до 100 МГц

Используются для измерения емкостные датчики, которые прикладываются к заземленному корпусу оборудования.

Основной недостаток данного метода – низкая помехозащищенность. Требуется значительные меры и дополнительное оборудование по фильтрации шума и сигнала внешней помехи.

Применяется как экспресс метод в том случае, если провести измерения другими методами затруднено по разным причинам.

Метод нашел широкое применения для диагностики РУ 6-35кВ.

Ток ЧР вызывает электромагнитное излучение в сверхвысокочастотном диапазоне (СВЧ) частот. В англоязычной литературе - Ultra High frequency (UHF).

Измерения производятся специализированными антеннами в диапазоне частот от 200 МГц до 1,5 ГГц

Сигналы могут распространяться на значительные расстояния (зависит от наличия физических препятствий).

Можно определить место возникновения ЧР с помощью анализа времени прилета импульса к различным датчикам (TOA – Time Of Arrival).

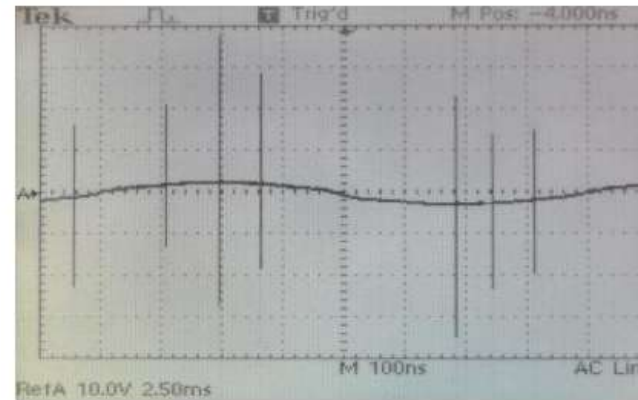
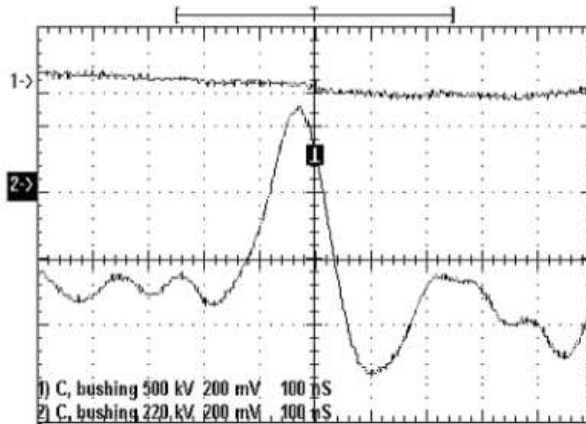
Наиболее распространен для измерения ЧР и постоянного мониторинга элегазового оборудования.

Применяется для диагностики открытых РУ, трансформаторов.

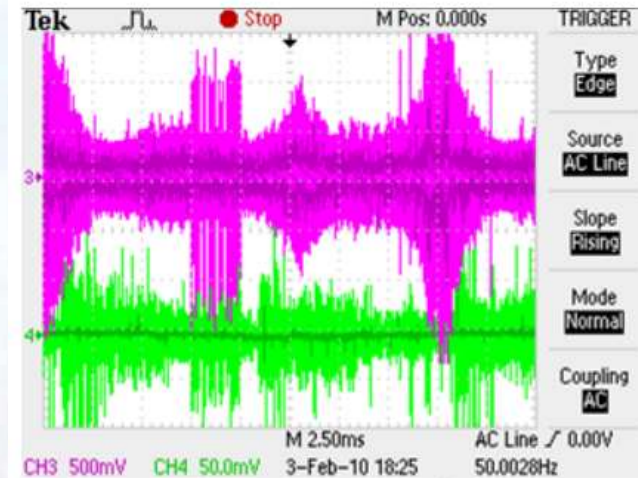
Раздел 2

Способы отображения зарегистрированных импульсов ЧР.

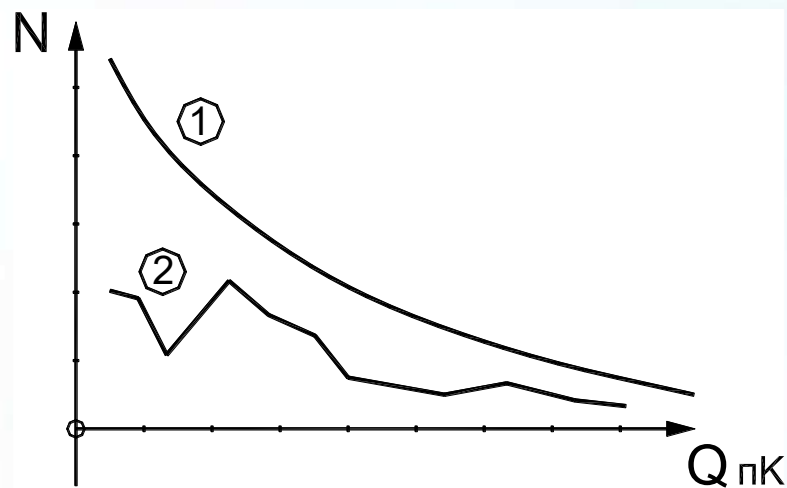
Исторически первым был метод регистрации импульсов при помощи осциллографа.



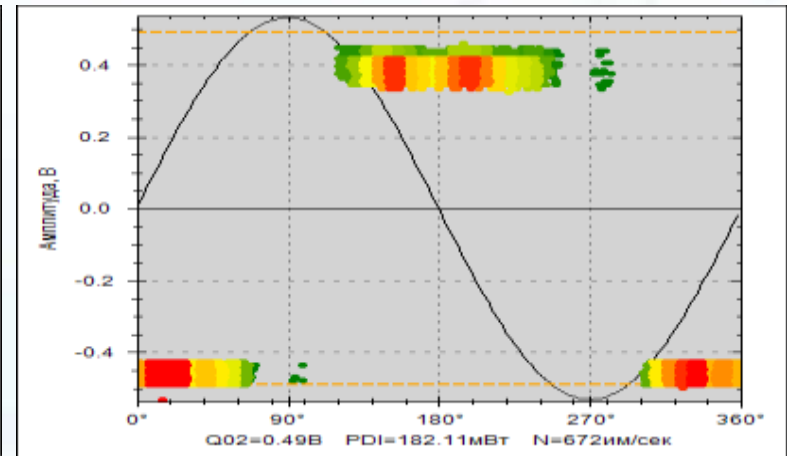
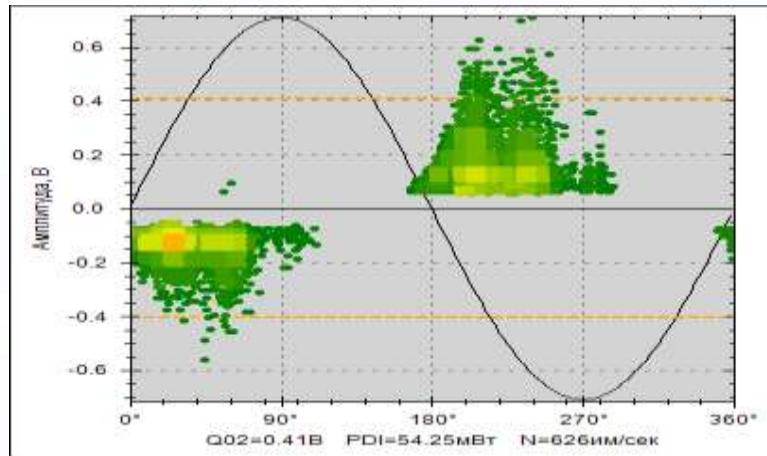
Осциллографирование – простой и понятный способ регистрации импульсов, хорошо работает в лабораторных условиях. При измерении на реальных объектах общий шум и наведенные сигналы с разных фаз значительно усложняют анализ данных и делают очень сложной определение типа ЧР.



Это распределение (график) есть распределение импульсов частичных разрядов, иллюстрирующее зависимость количества импульсов, имеющих заданную (одинаковую) амплитуду, отложенную по оси «X». На рисунке, для примера, показаны два графика, различающихся по виду (1 и 2).



Форма данных графиков дает минимум диагностической или какой-то иной информации.

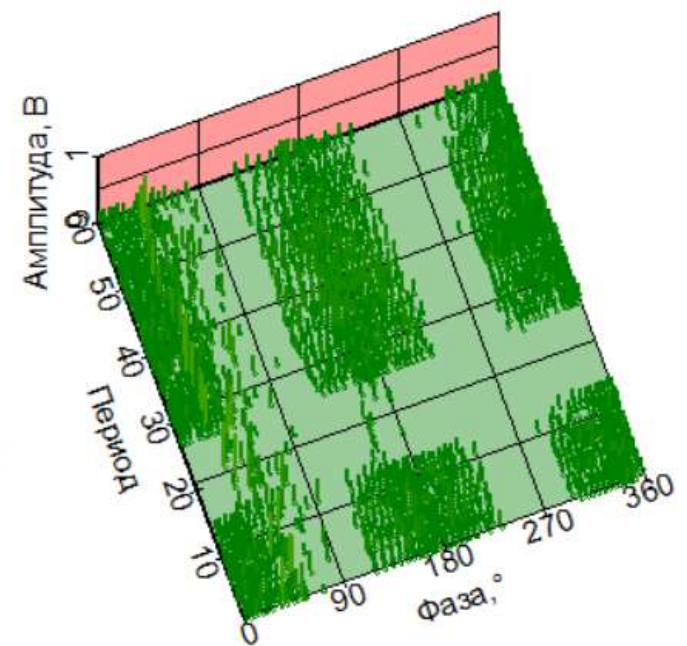
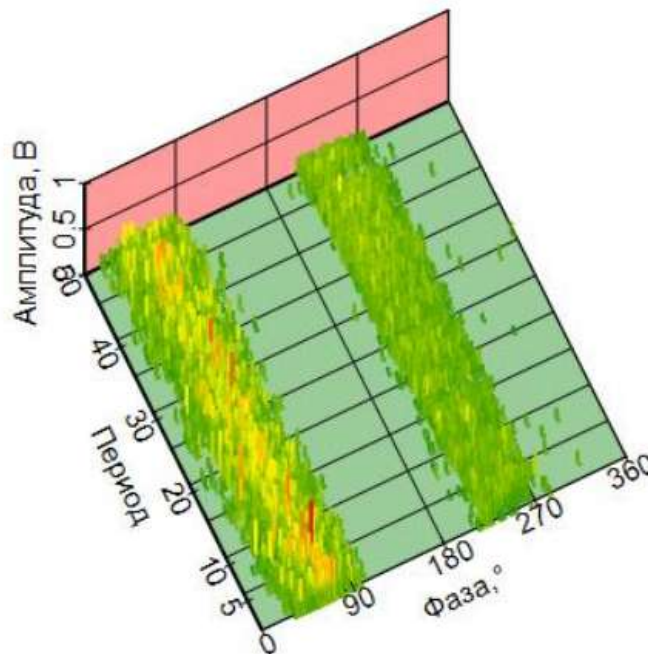
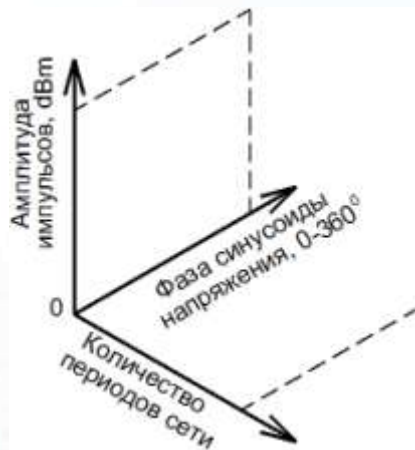


Наиболее часто для анализа разрядной активности используется амплитудно-фазовое (АФ) распределение ЧР (в английской литературе оно обычно называется «PRPD» – Phase Resolved Partial Discharges). Все импульсы частичных разрядов в PRPD распределении отображаются точками на двухмерной плоскости с координатами амплитуда – фаза питающего напряжения. Цветом, или тоном, отображается количество импульсов, частота их повторения, имеющих одинаковые параметры. Такое отображение позволяет достаточно точно выявлять тип дефекта изоляции, который вызвал появление импульсов ЧР.

Это распределение является наиболее удобным диагностическим средством для определения типа дефекта в изоляции.

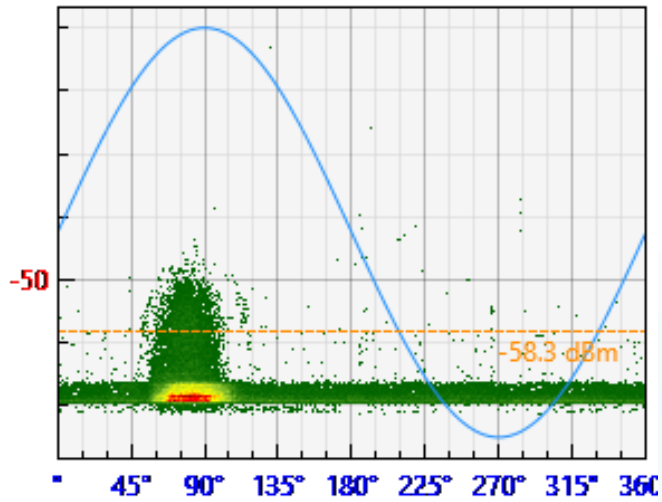
Амплитудно-фазовое распределение может быть представлено в режиме 3D, на котором импульсы отображаются в момент появления на соответствующем периоде приложенного напряжения.

Анализ 3D распределения позволяет определить являются ли ЧР постоянными и проявляются на каждом периоде приложенного напряжения или нет.

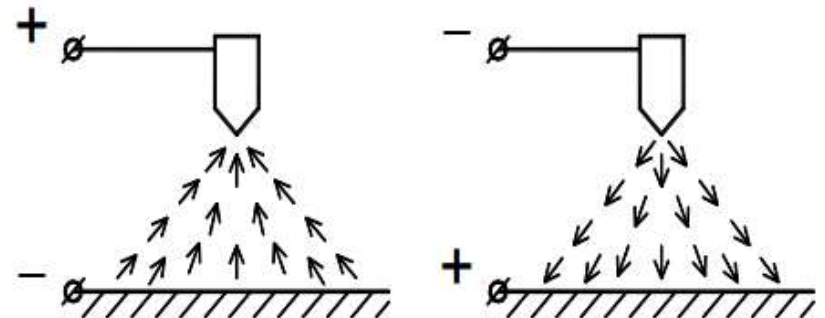


Раздел 3

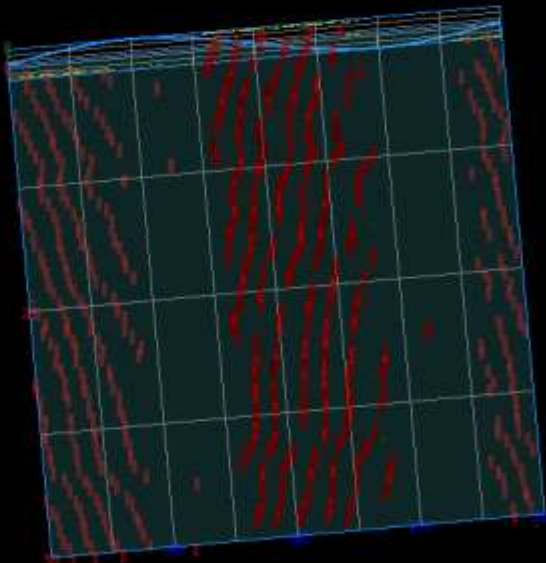
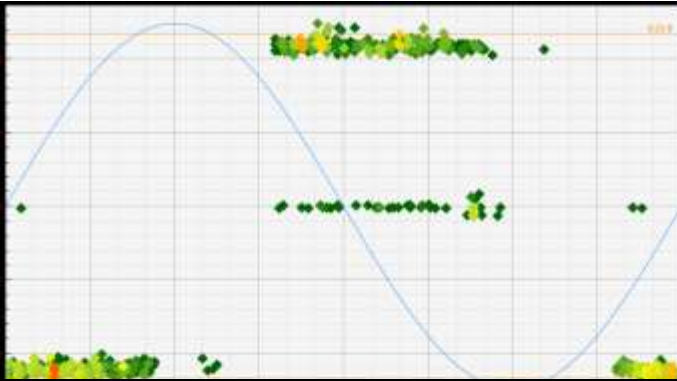
Характерные типы разрядов

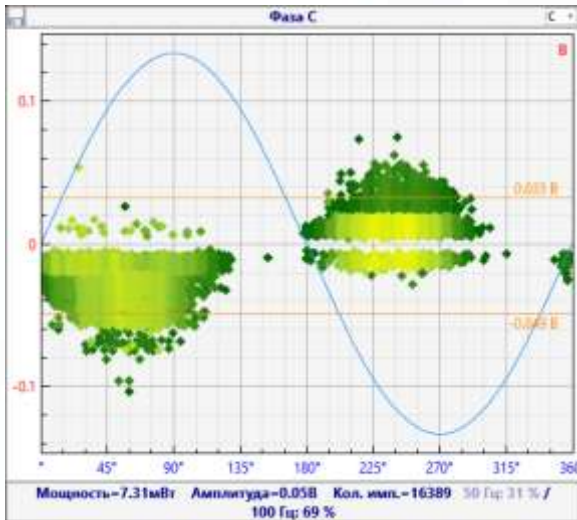


Коронные разряды - это разновидность частичных разрядов, которые происходят вокруг высоковольтного проводника. Наиболее часто встречается в газообразной среде, но может встречаться и в изоляционной жидкости, такой как трансформаторное масло. Коронные разряды, чаще всего, не опасны для изоляции контролируемого оборудования. Их отрицательное влияние заключается в том, что они, являясь шумовыми, мешают диагностике других дефектов.



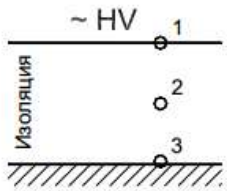
Проводник под «плавающим потенциалом» – проводник в электрическом поле, не подключенный ни к высокому, ни к земляному потенциалу. Наиболее часто разряды в виде «плавающего потенциала» происходят по следующим причинам: повреждаются элементы конструкции, поврежденные на изолирующем оборудовании, не подключенные ни к высокому напряжению, ни к низкому напряжению. Так же происходят разряды на высоковольтном оборудовании при нарушении или повреждении заземляющих проводников.



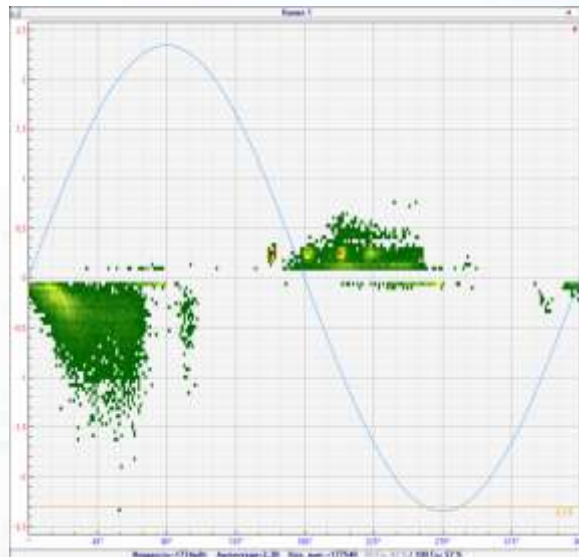
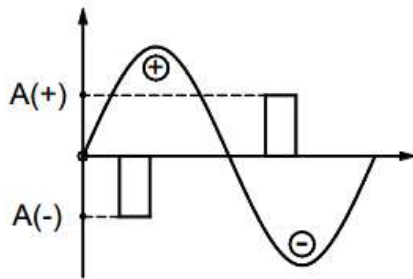


Внутренний разряд в изоляции, возникает между проводниками с высокой разностью потенциалов при недостаточной прочности изоляции между этими проводниками. ЧР данного типа происходят в «хорошей» изоляции, без явно выраженных дефектов, при превышении допустимого приложенного напряжения к данному участку изоляции или в результате общего процесса старения изоляции, который приводит к снижению изоляционных характеристик.

Характерный признак – одинаковая амплитуда на положительной и отрицательной полуволне.



- 1 : $A(+) < A(-)$
- 2 : $A(+) = A(-)$
- 3 : $A(+) > A(-)$



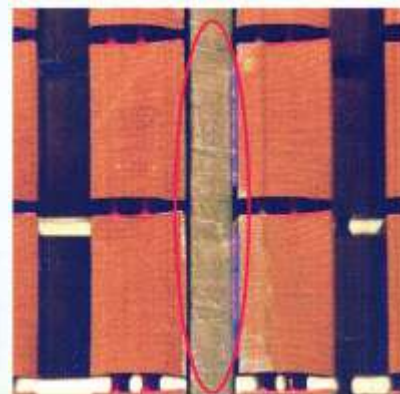
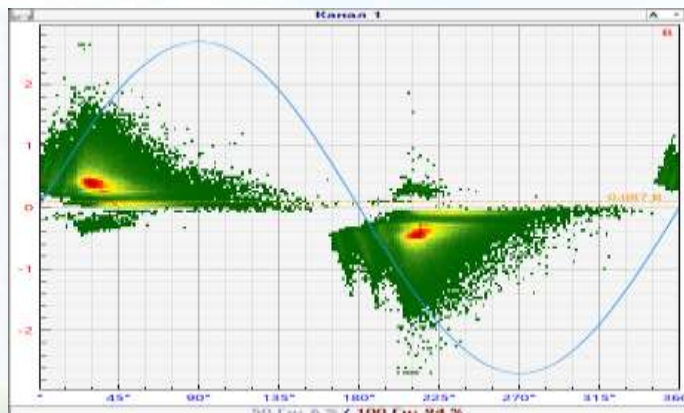
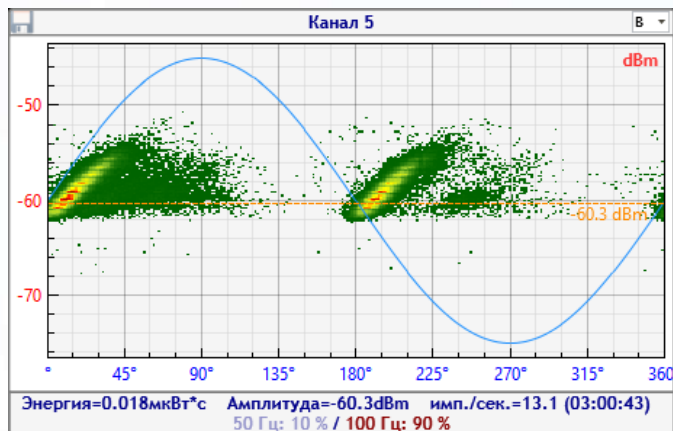
Внутренний разряд при наличии дефекта в изоляции, возникает между проводниками с высокой разностью потенциалов при наличии выраженного дефекта в изоляции. Смещение зоны дефекта в изоляции, от поверхности проводника (ВН), к земляному потенциалу (Ground), соответствует смещению фазовой зоны возникновения разрядов, относительно синусоиды питающего напряжения, из зоны положительной полуволны синусоиды, в зону отрицательной полуволны.

Характерный признак – значительное превышение амплитуды импульсов на одной из частей синусоиды приложенного напряжения.

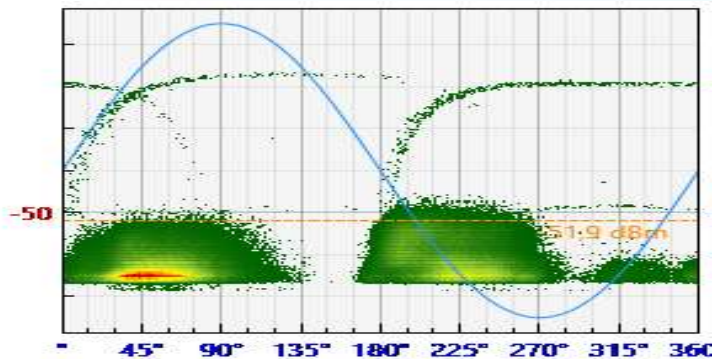
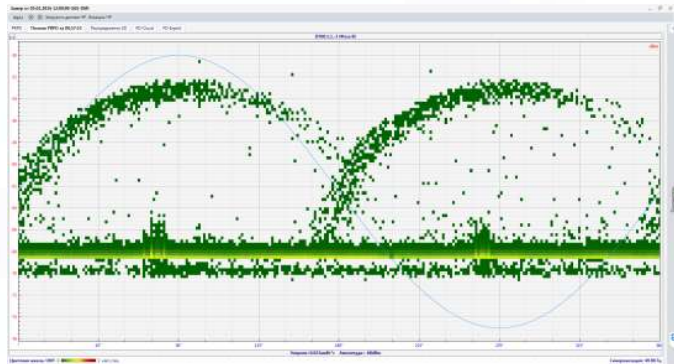
Места расположения дефекта в зависимости от соотношения амплитуд:

1. ближе к земляному электроду;
2. в середине слоя изоляции;
3. вблизи высоковольтного электрода.

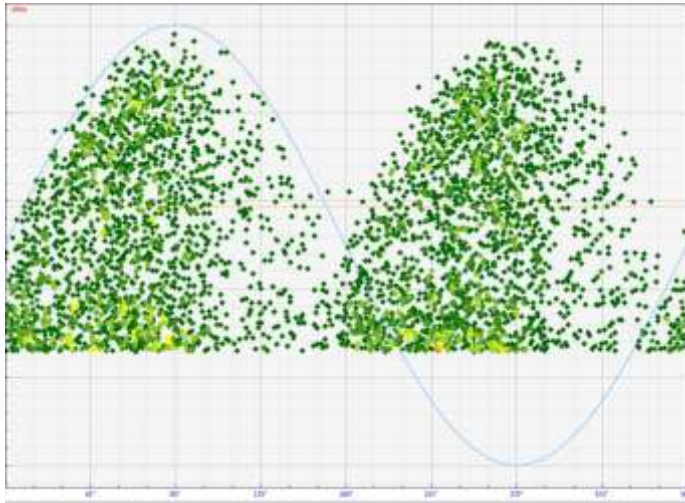
Поверхностные ЧР, происходят вдоль поверхности твердой изоляции в контакте с газообразной, жидкой или другой твердой изоляцией.



Пазовый разряд в статоре электрической машины

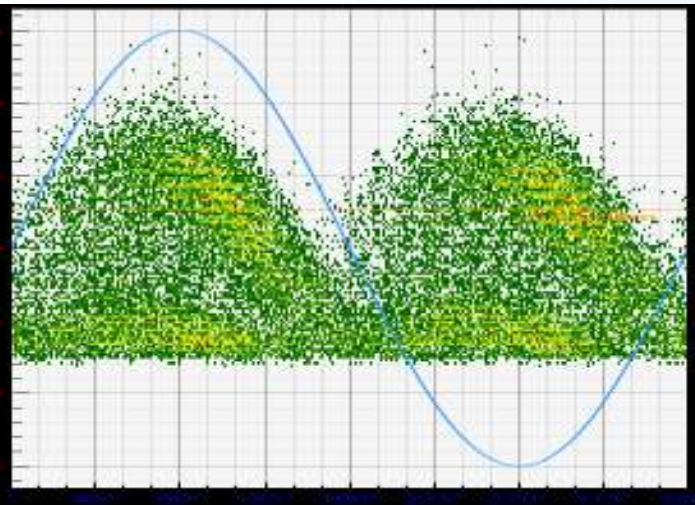


ЧР в результате образования дефекта в виде **полости, неоднородности или включений в изоляцию**. Дефекты могут быть следствием либо нарушений в технологии производства, либо возникать в процессе эксплуатации оборудования вследствие воздействия на изоляцию технологических параметров (например, нарушения температурного режима работы). Появление ЧР в зоне дефекта обусловлено неоднородностью электрического поля. Причем распределение импульсов для различных видов неоднородностей (воздушные, проводящие включения в изоляцию, отслоение и т.д.) имеют характерные, отличные друг от друга распределения импульсов на амплитудно-фазовой плоскости.



Свободные проводящие частицы в газовой среде. Наиболее часто встречаются в элегазовом оборудовании. Металлические частицы могут остаться в объеме элегаза при монтаже или образоваться в результате работы механических элементов высоковольтных выключателей, разъединителей, заземлителей.

Аналогичное распределение характерно для пузырьков газа в масле.



Раздел 4

Способы отстройки от помех

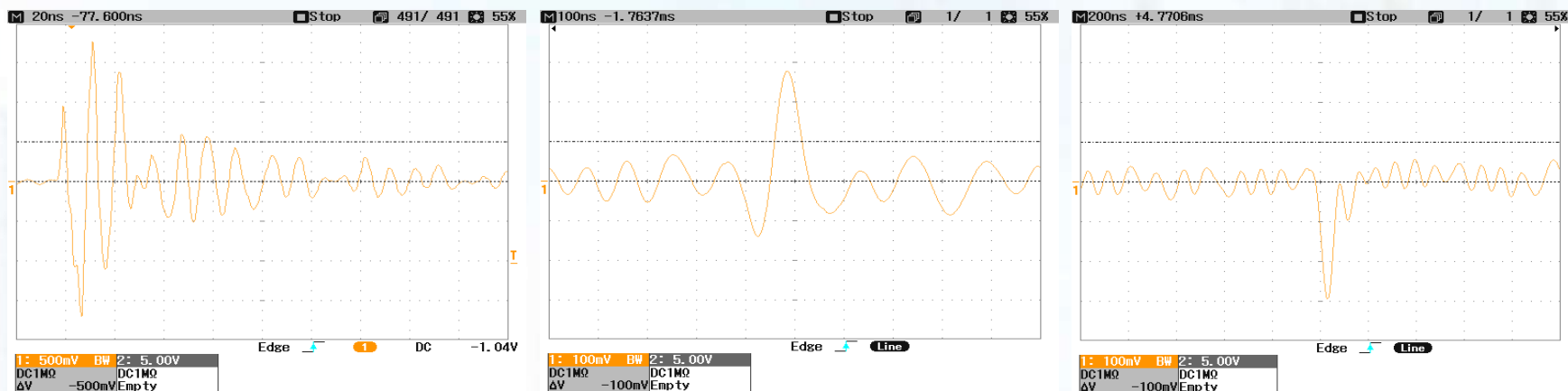
Основные средства отстройки от внешних помех и наведенных сигналов включают в себя:

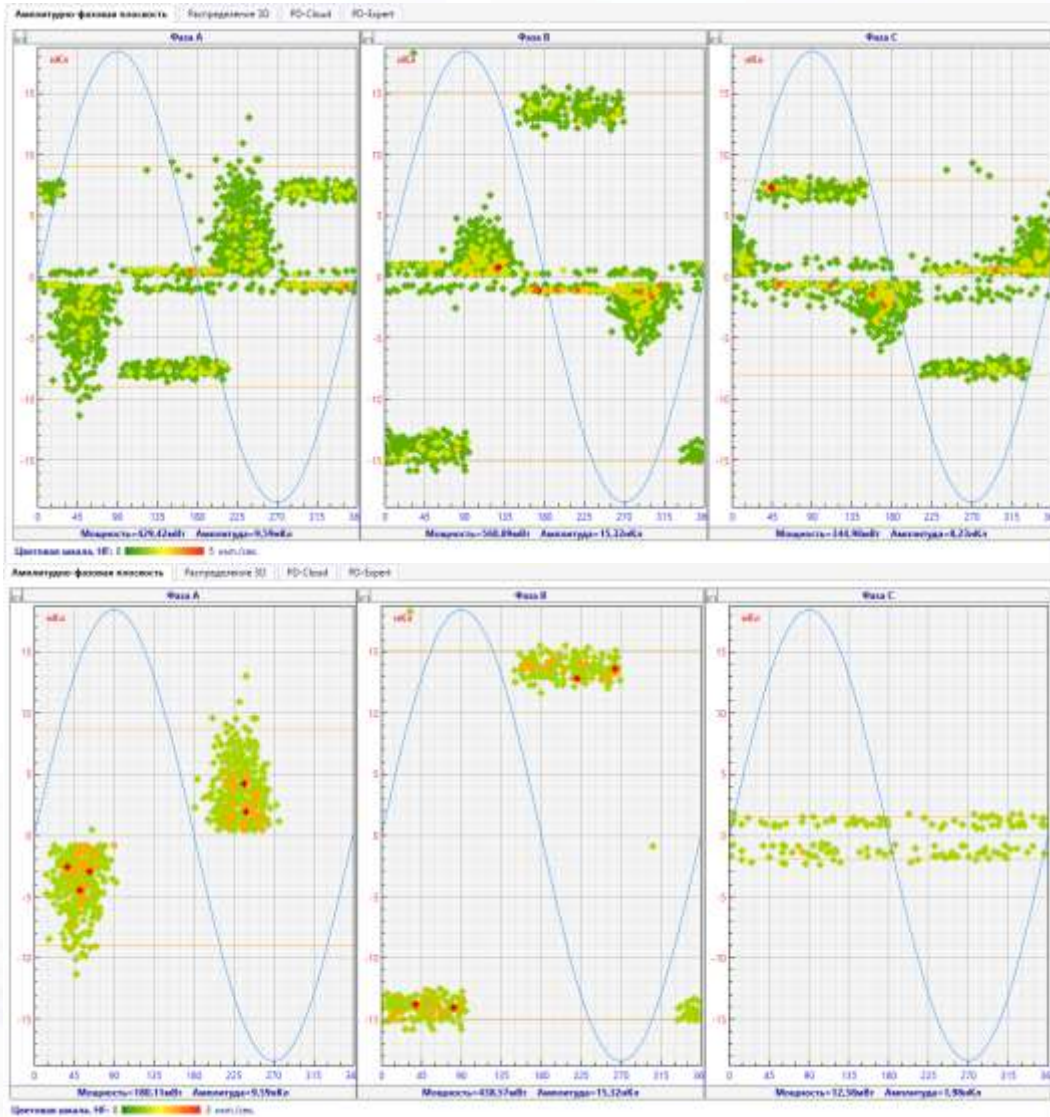
- Анализ формы импульса.
- Амплитудная фильтрация импульсов, предназначенная от удаления из рассмотрения импульсов, наведенных из соседних фаз.
- «Time of arrival» - отстройка от помех по времени прихода импульсов, с разрешением в единицы наносекунд.
- Анализ времени возникновения импульсов и фазы питающего напряжения.
- Анализ частотных свойств каждого импульса, позволяющий разделять случайные импульсы помех и повторяющиеся импульсы частичных разрядов.

Дополнительным диагностическим параметром является **форма импульса ЧР**, возникшего в зоне дефекта в высоковольтной изоляции. Форма импульса зависит не только от параметров дефекта и самого «первичного» импульса частичного разряда, но также и от свойств среды, окружающей зону дефекта, и от типа измерительного оборудования.

В наибольшей мере форма регистрируемого импульса зависит:

- от частотных резонансных свойств среды вокруг зоны дефекта.
- от частотных свойств среды, в которой распространяется импульс.
- от типа датчика ЧР и параметров линии связи к прибору.

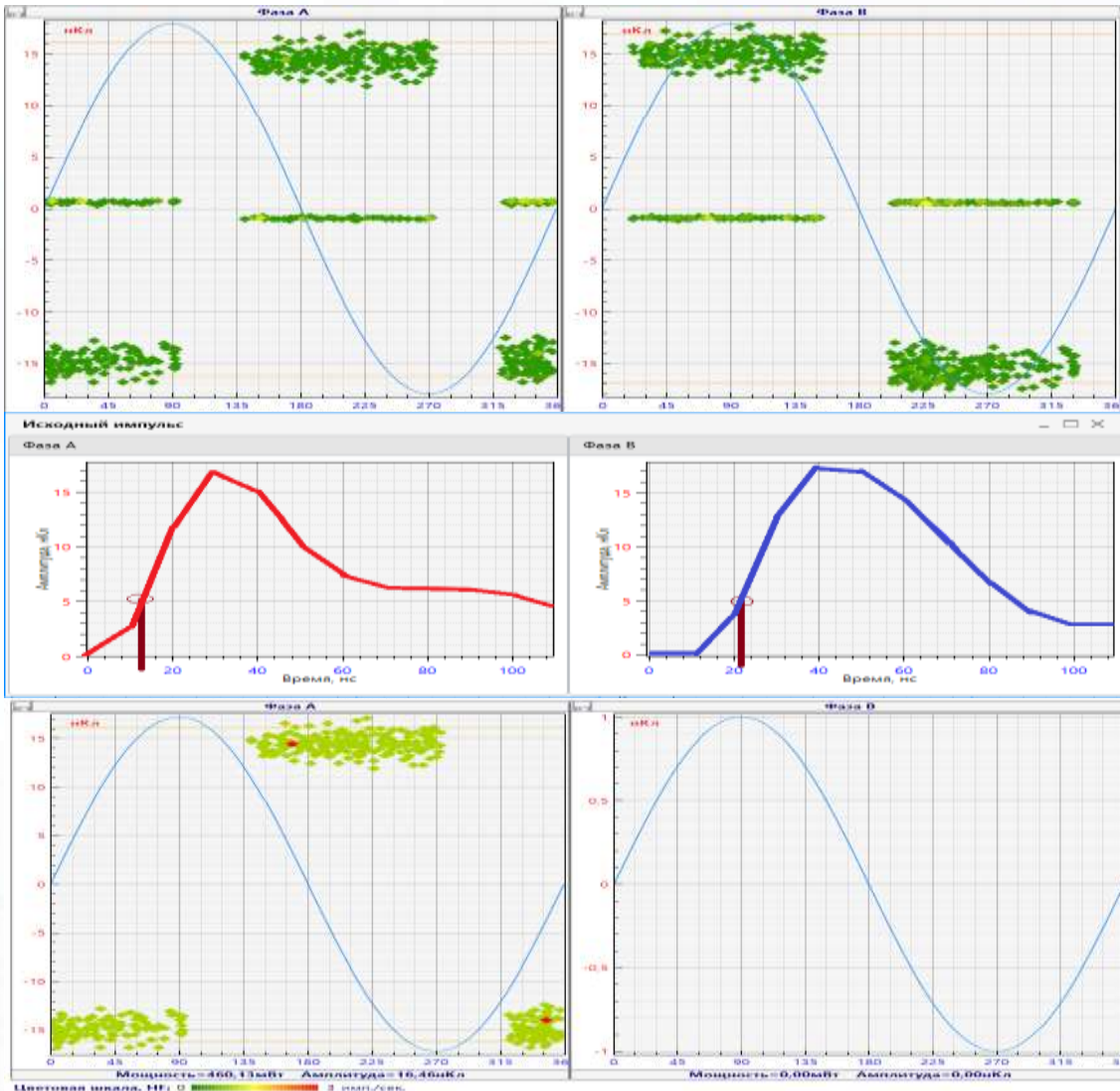




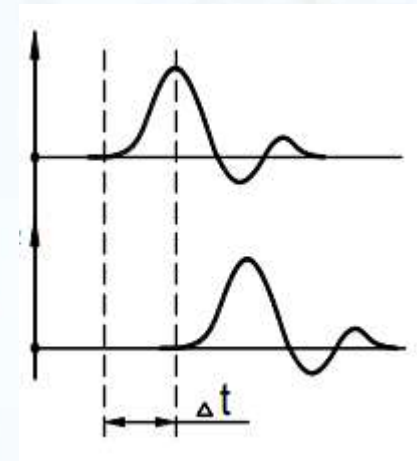
Исходные импульсы и «наведенные» с других фаз (каналов измерения).



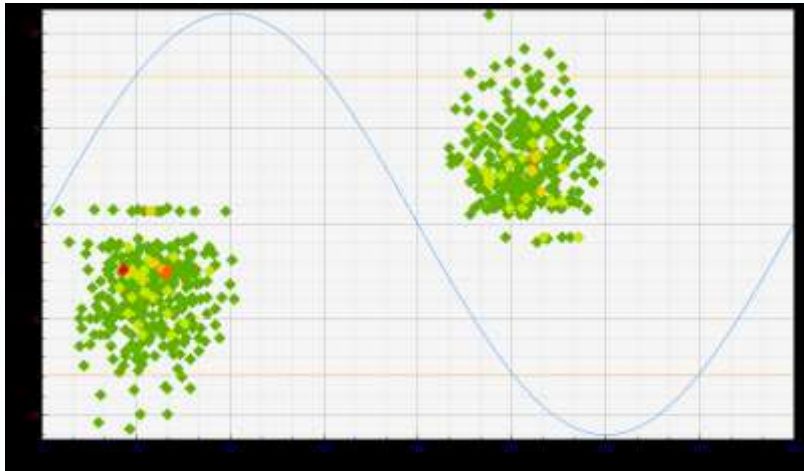
Результат работы амплитудной фильтрации импульсов.



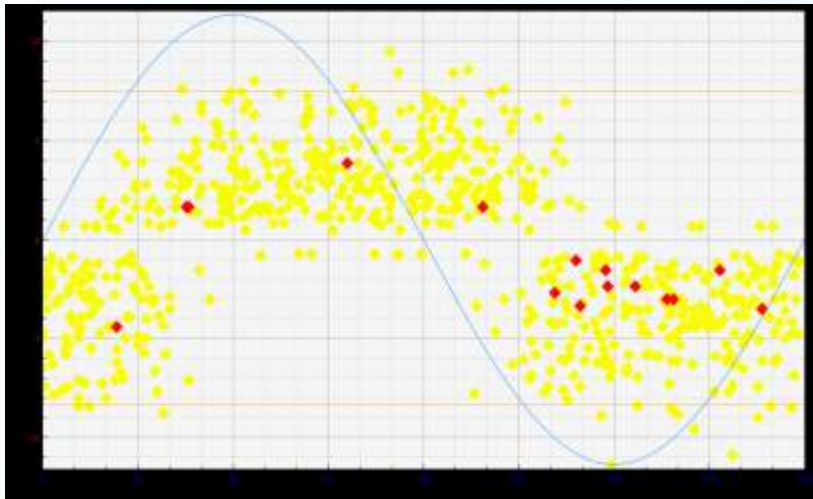
Задержка во времени прихода импульсов порядка 9нсек приводит к уверенной фильтрации «задержанных» импульсов.



Анализ времени возникновения импульсов и фазы питающего напряжения



Корректная
фазовая
синхронизация.



Некорректная
фазовая
синхронизация.

Раздел 5

**Методы и схемы измерения ЧР в различном
оборудовании.**

**Трансформаторы, КРУЭ, кабельные линии,
электрические машины**

1. Встроенные, предустановленные производителем КРУЭ
2. Накладные на изоляционный барьер
3. Накладные на смотровые окна
4. Акустические, устанавливаемые на кабельные муфты



В зависимости от типа датчиков выбираются места их установки

Однолинейные схемы

Инструменты

Свойства

Спэйсер (разделитель)

Наименование

Секция шин

Уровень

Low

Ячейка

9/AT-2

Датчик

Наименование

D110.3.6

Смещение, м

15

Позиция

Отразить Удалить

103	Канал 6	Фаза А

КРУЭ 110 кВ

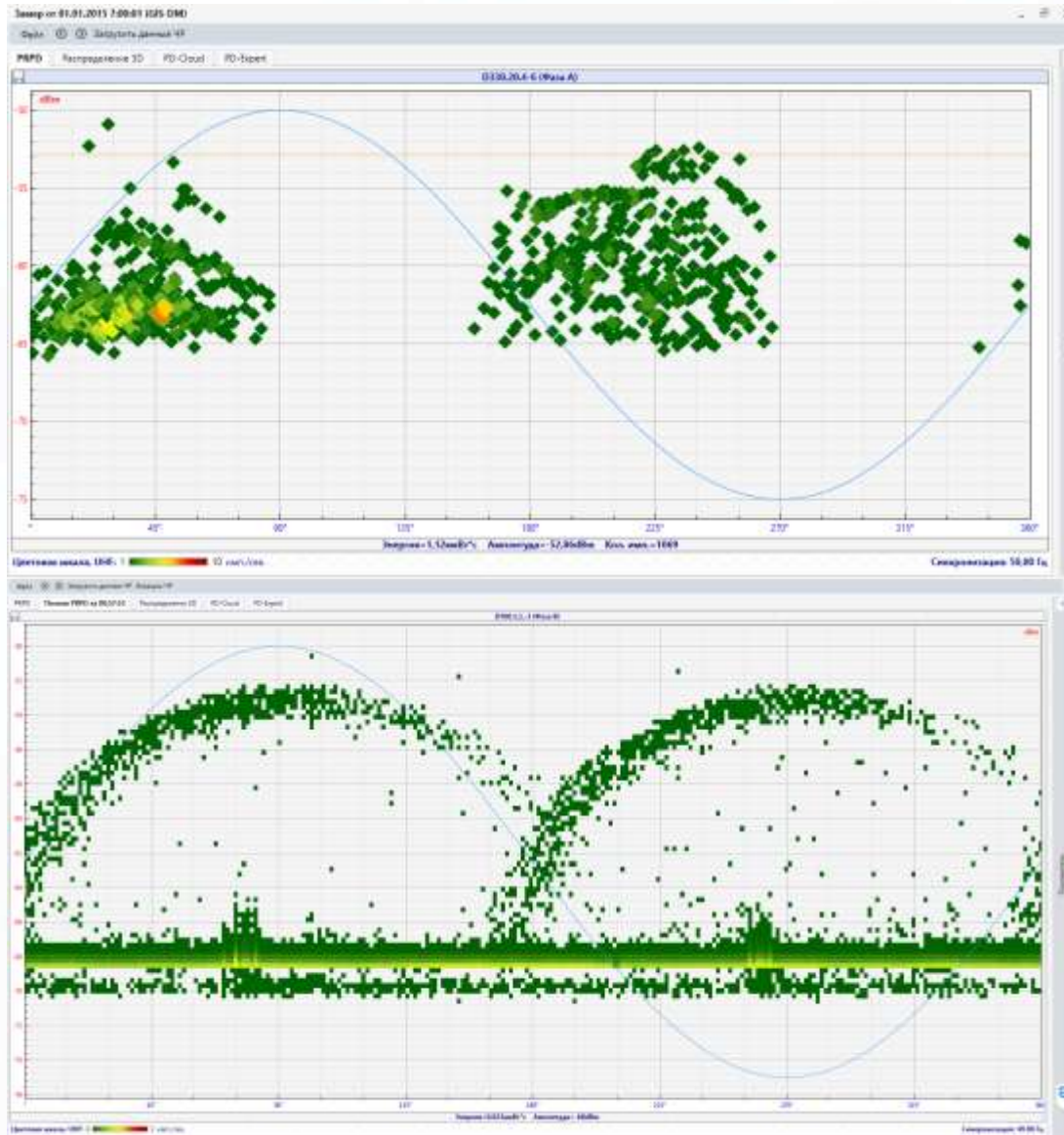
2100 X 1300

Схемы

Добавить Открыть

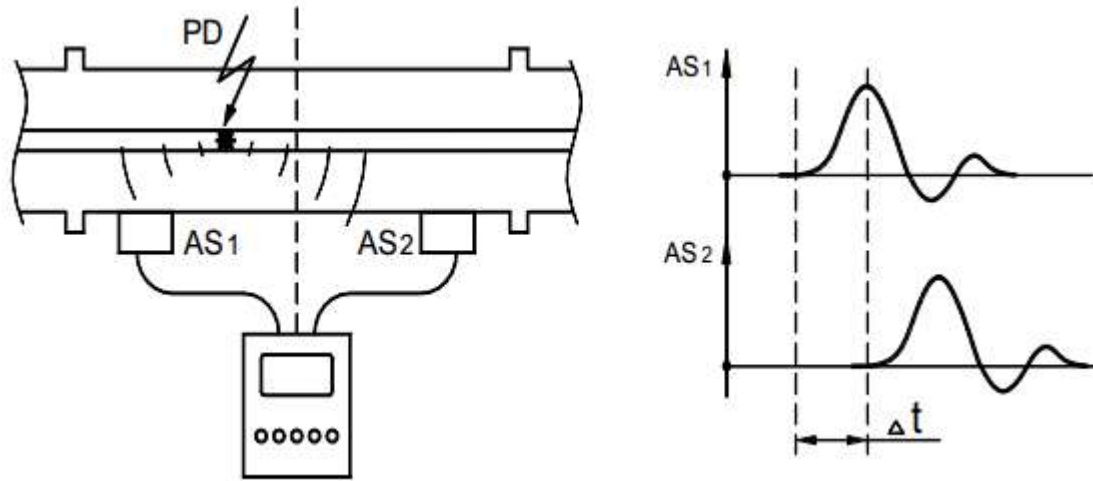
- КРУЭ 110 кВ
- КРУЭ 220 кВ

Применить Отмена

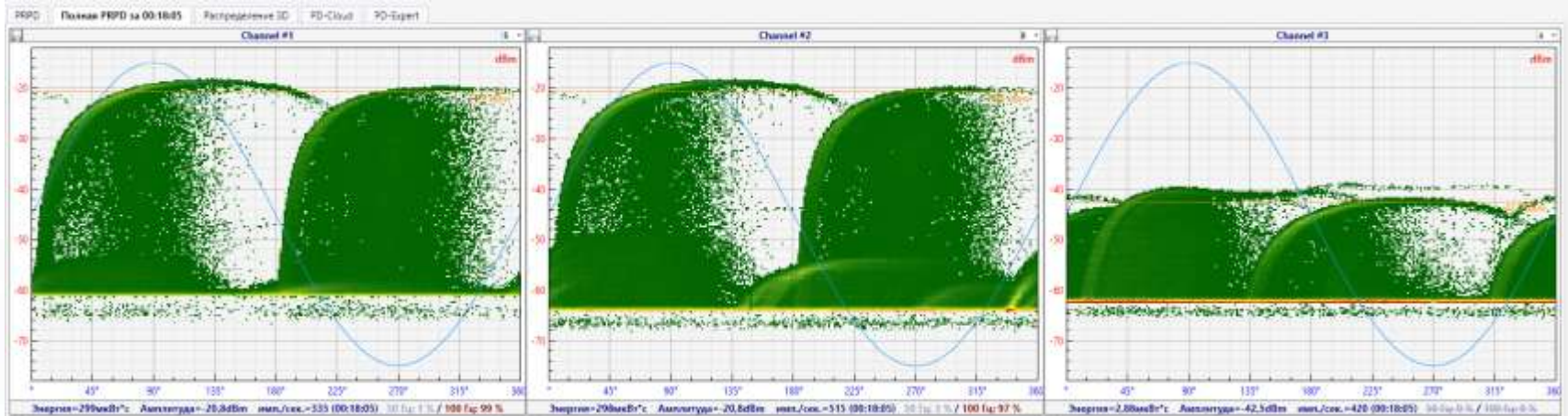


Частичные разряд

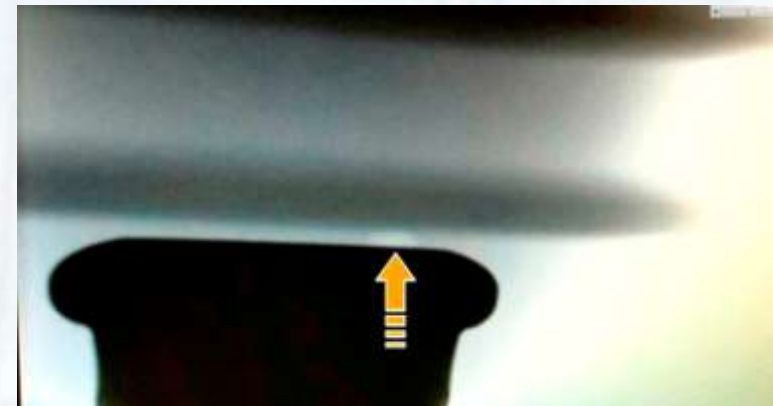
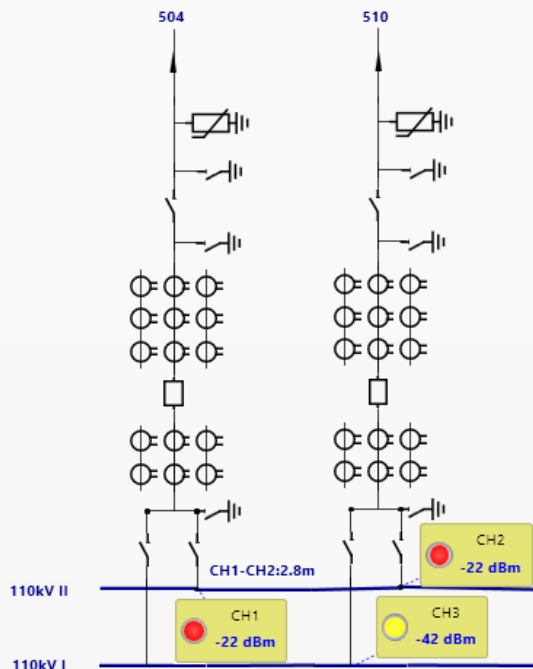
Газовое включение в твердой изоляции



Локация производится по величине разницы времени прихода импульсов к двум датчикам AS1 и AS2, установленным вдоль оборудования. Именно разница эта времени Δt показывает, на сколько, и в каком направлении, смещена зона дефекта, относительно средней линии, проходящей между двумя датчиками



ЧР в газовом опорного изолятора на системе шин
между датчиками 1 и 2

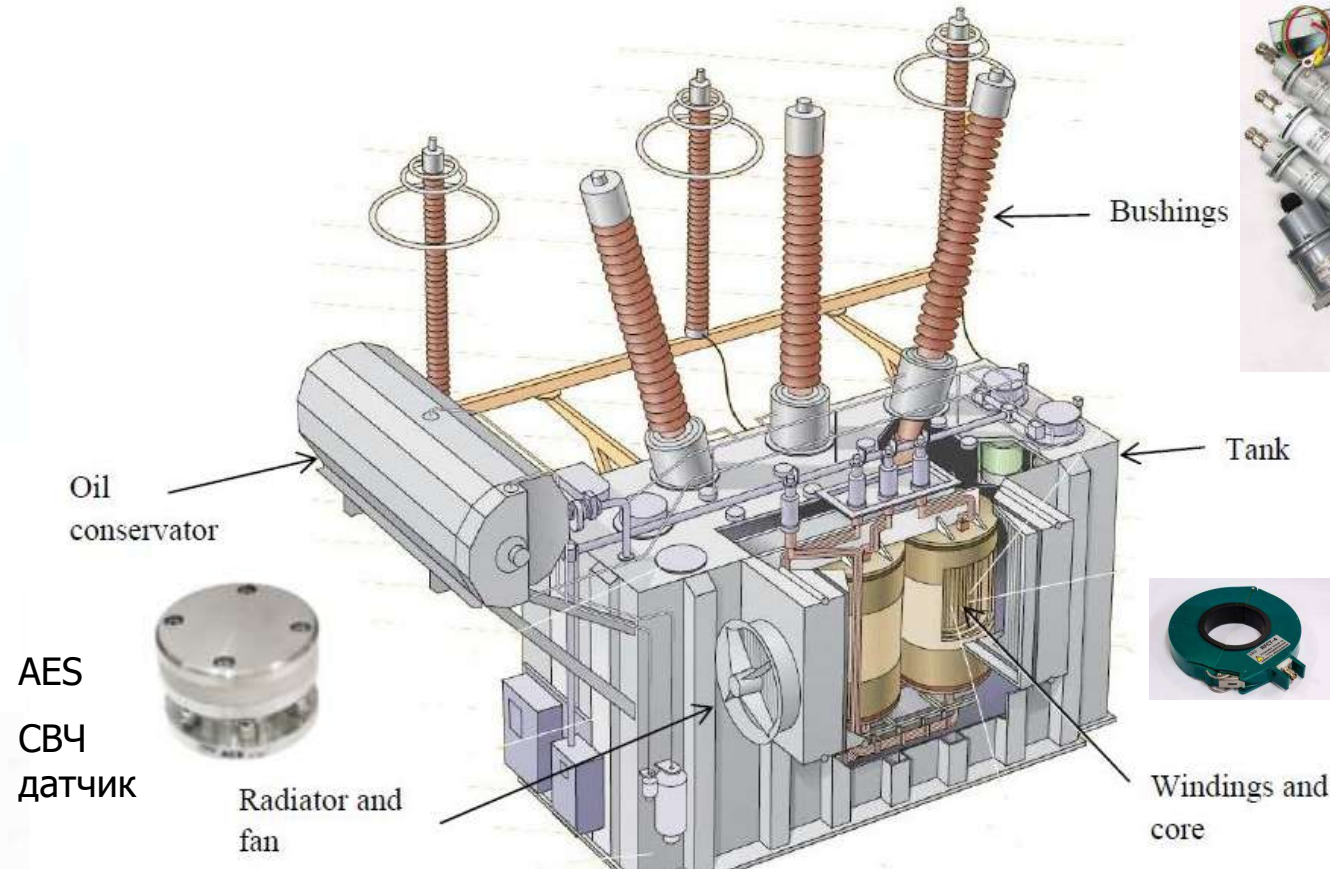


1. DV-2 для
высоковольтных
вводов
2. RFCT-4,
(глухозаземленная
нейтраль)
3. Акустические
4. AES, встроенные СВЧ
антенны

TEV датчики имеют
низкую
помехозащищенность



DB-2 для высоковольтных вводов



RFCT-4,
глухозаземленная
нейтраль,
заземление
активной части

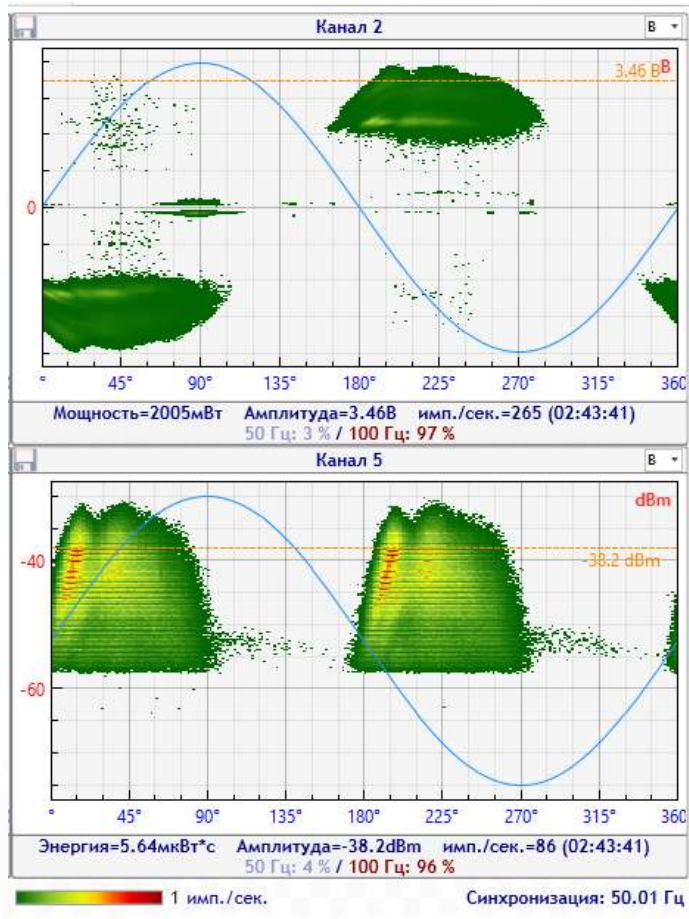


RFCT-4, заземление бака

- Помехи в виде коронных разрядов в воздухе.
- Помехи от другого оборудования подстанции.
- Сложность выделения ЧР в изоляции из множества сигналов.
- Сложность определения типа предполагаемого дефекта и степени опасности без знания конструкции.

ЧР измеряются в широком диапазоне частот. Наиболее защищенным от помех является СВЧ (UHF) диапазон частот. Использование UHF антенн позволяет проводить локацию дефекта. Сложность калибровки в данном диапазоне частот, а как следствие сравнение интенсивности ЧР для разного оборудования и наработки норм снижает эффект от использования оборудования в СВЧ диапазоне.

Синхронное измерение импульсов в 2-х диапазонах частот ВЧ (HF) и СВЧ(UHF) позволяет провести отстройку от помех (прежде всего от короны) на основе частотных параметров импульсов, при этом проводить анализ и расчет параметров сигналов в ВЧ(HF) диапазоне.



CIGRE A2.18 Brochure 227

"Life Management Techniques for Power Transformers"

- Нет дефектов 10-50 пКл
- Нормальный износ <500 пКл
- Возможный дефект 500-1000 пКл
- Наличие дефекта 1000-2500 пКл
- Необратимое изменение >2500 пКл
- Критический >100000 пКл

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ ОАО «ФСК ЕЭС»

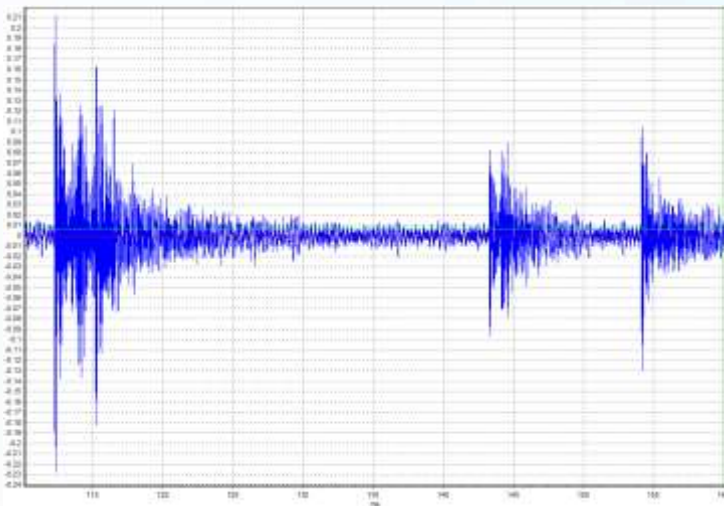
ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

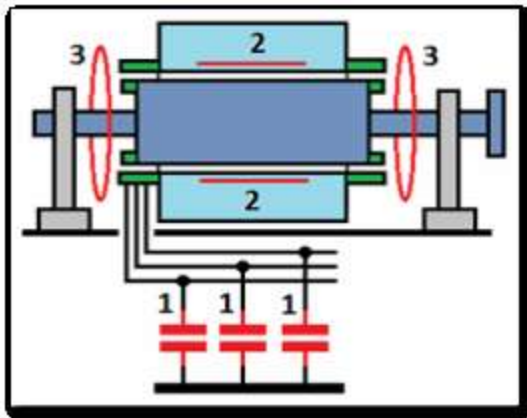
При проведении испытаний на перегрузочную способность ограничением на продолжение испытаний является появление динамики скорости нарастания интенсивности сигналов ЧР или увеличение уровня ЧР более 3000 пКл.

- Акустические сигналы возникают из волн давления, вызванных ЧР.
- Акустические измерения могут быть сделаны легко с помощью внешних датчиков.
- Акустические датчики – направленные, что является одновременно достоинством и недостатком.

Достоинство – возможность провести локацию импульсов ЧР в оборудовании.

Недостатки – сложность калибровки; распространение сигнала зависит от наличия физических препятствий; для стационарных систем применение ограничено.





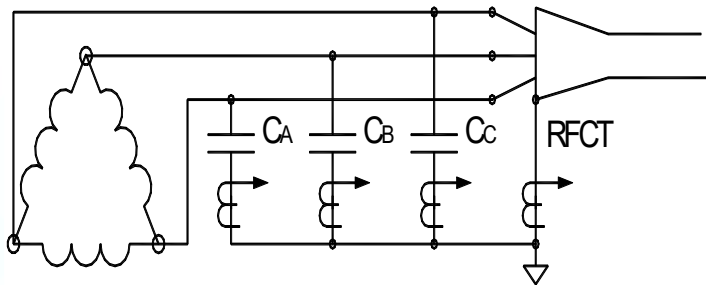
Эффективность работы систем мониторинга состояния изоляции высоковольтных моторов и генераторов по частичным разрядам во многом зависит от типов используемых первичных датчиков и мест их установки.

Наиболее часто в системах мониторинга изоляции обмотки статора применяются три типа датчиков:

1 – Конденсаторы связи с емкостью от 80 до 5000 пикофарад, подключаемые к выводам обмотки статора. Они должны быть рассчитаны на полное рабочее напряжение электрической машины, а также выдерживать испытательное напряжение.

2 – Электромагнитные антенны для регистрации частичных разрядов, устанавливаемые в пазах статора над секциями обмотки. Такие антенны обычно устанавливаются под пазовым клином при изготовлении электрической машины, или во время капитального ремонта обмотки. С некоторыми ограничениями в качестве таких антенн частичных разрядов могут быть использованы стандартные датчики температуры обмотки статора, установленные в пазу между секциями обмотки на заводе - изготовителе.

3 – Широкодиапазонные кольцевые электромагнитные антенны, устанавливаемые в зоне лобовых частей обмотки статора. Достоинством таких антенн является простота и оперативность установки, а также высокая чувствительность к частичным разрядам в обмотках статора и ротора.



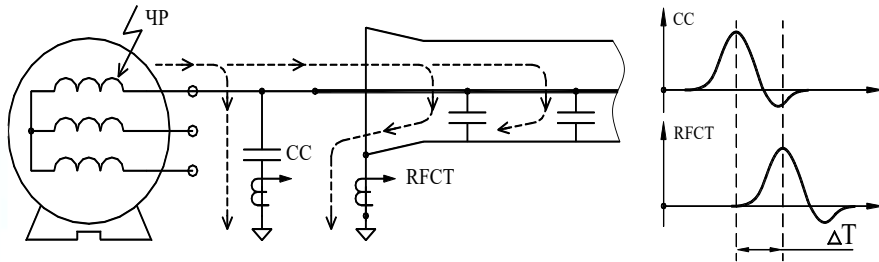
Высоковольтные конденсаторы связи с эпоксидно – слюдяной изоляцией являются наиболее часто используемым типом датчика для регистрации частичных разрядов в электрических машинах. При помощи таких датчиков обычно регистрируют импульсы в диапазоне 1 – 80 МГц.



Конденсаторы связи монтируются внутри корпуса статора электрической машины, и подключаются к входным зажимам обмотки статора. Чем ближе к входным зажимам обмотки статора будет находиться дефектная зона в изоляции, тем выше будет чувствительность схемы измерения частичных разрядов. Если частичные разряды будут возникать в секциях обмотки, значительно удаленных от входных зажимов, то чувствительность системы мониторинга к частичным разрядам будет пониженной.

Для большинства электрических моторов и генераторов с мощностью не более 5 - 10 МВт, геометрические размеры статоров которых сравнительно невелики, для измерения частичных разрядов достаточно использовать всего 3 конденсатора связи, плюс высокочастотный трансформатор тока типа RFCT в цепи заземления экрана питающего кабеля.

Если контролируемая электрическая машина будет иметь большие габариты и мощность, то необходимо применять дополнительные датчики, контролирующие частичные разряды в удаленных секциях обмотки статора.



Наибольшей проблемой при использовании для регистрации частичных разрядов конденсаторов связи является отстройка от помех, поступающих по питающему кабелю из внешней сети.

Наиболее эффективным способом отстройки от влияния таких помех является метод, основанный на определении разницы во времени прихода импульсов к различным датчикам системы мониторинга. В литературе этот метод, исходя из принципа действия, обычно называется «time off arrival».

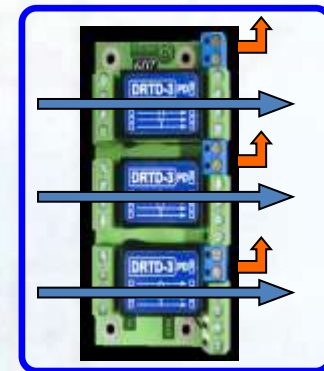
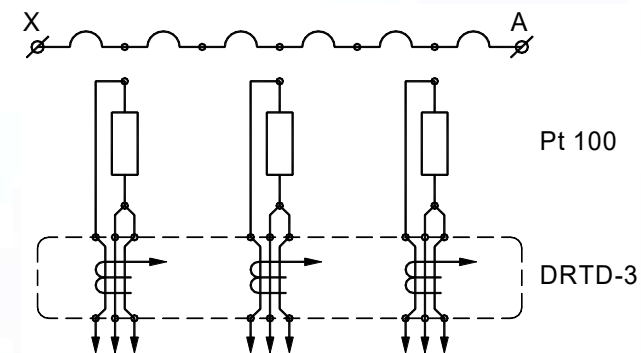
Если импульс от частичного разряда будет двигаться из обмотки статора, то он, в первую очередь, будет зарегистрирован при помощи фазного конденсатора связи CC . Импульс будет двигаться дальше и поступит в кабельную линию. Через внутреннюю емкость жилы кабеля импульс попадет на экран кабеля и будет зарегистрирован датчиком марки $RFCT$, но уже с некоторым временным запаздыванием.

Если импульс помехи будет двигаться в обмотку статора снаружи (справа налево на рисунке), то он сначала придет к датчику $RFCT$, а только потом к конденсатору связи. Временной сдвиг между приходом импульсов однозначно определяет место их возникновения: или это импульс $ЧР$, или помеха.

Системы мониторинга позволяют определять разницу во времени прихода импульсов (разницу пути движения импульса) с точностью до 0,5 м.

При мощности больше 10 МВт, габариты статора возрастают. Импульсы частичных разрядов от «удаленных дефектов», проходя последовательно по виткам секций в пазах статора, сильно затухают.

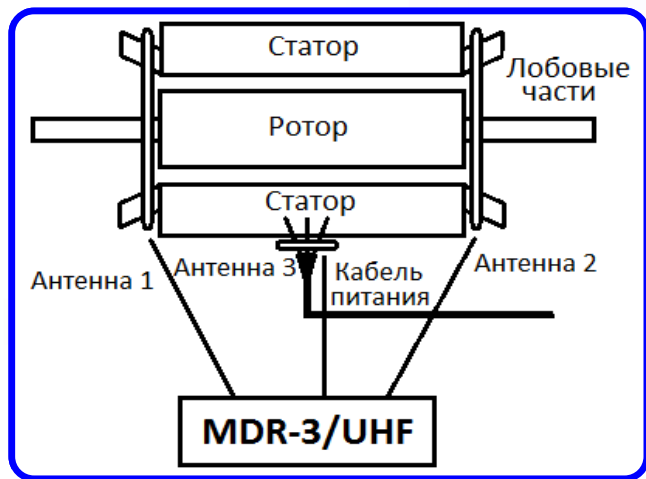
По этой причине зарегистрировать импульсы разрядов от дефекта изоляции в глубине обмотки на входных зажимах не всегда удается, дефект можно «пропустить».



Для больших электрических машин необходимо устанавливать «внутри обмотки» дополнительные датчики, регистрирующие глубинные импульсы. В качестве таких датчиков обычно используют различные электромагнитные антенны, монтируемые в соответствующих пазах статора.

Если речь идет об установке системы мониторинга состояния изоляции на новой электрической машине, то непосредственно на заводе - изготовителе можно смонтировать в пазах статора датчики поля – специализированные антенны для регистрации импульсов частичных разрядов от дефектов в изоляции.

Если же необходимо оснастить системой мониторинга уже работающий генератор, то в качестве антенн можно использовать уже имеющиеся в обмотке статора термометры сопротивления. Для уже работающего оборудования в цепи измерения температуры обмотки статора удобно устанавливать датчики частичных разрядов марки «DRTD-3», что можно сделать даже на работающем генераторе.



Для комплексного контроля разрядных процессов в статоре и роторе электрической машины удобно использовать электромагнитные антенны, монтируемые в зоне лобовых частей обмотки статора. Кольцевые антенны работают в СВЧ диапазоне, дешевле и эффективнее, чем конденсаторы связи.

Такие датчики представляют собой разомкнутые кольцевые проводники, проложенные вблизи лобовых частей, подключенные к измерительному прибору системы мониторинга при помощи защитного и согласующего устройства.

Электромагнитные датчики частичных разрядов имеют одинаковую чувствительность ко всем дефектам в изоляции вне зависимости от того, на каком удалении от входных зажимов обмотки располагается дефект в изоляции. Изменение чувствительности имеет место только для дефектов, возникших или в лобовых частях обмотки, или же непосредственно в пазу, в середине статора, но даже это различие обычно составляет не более 20%.

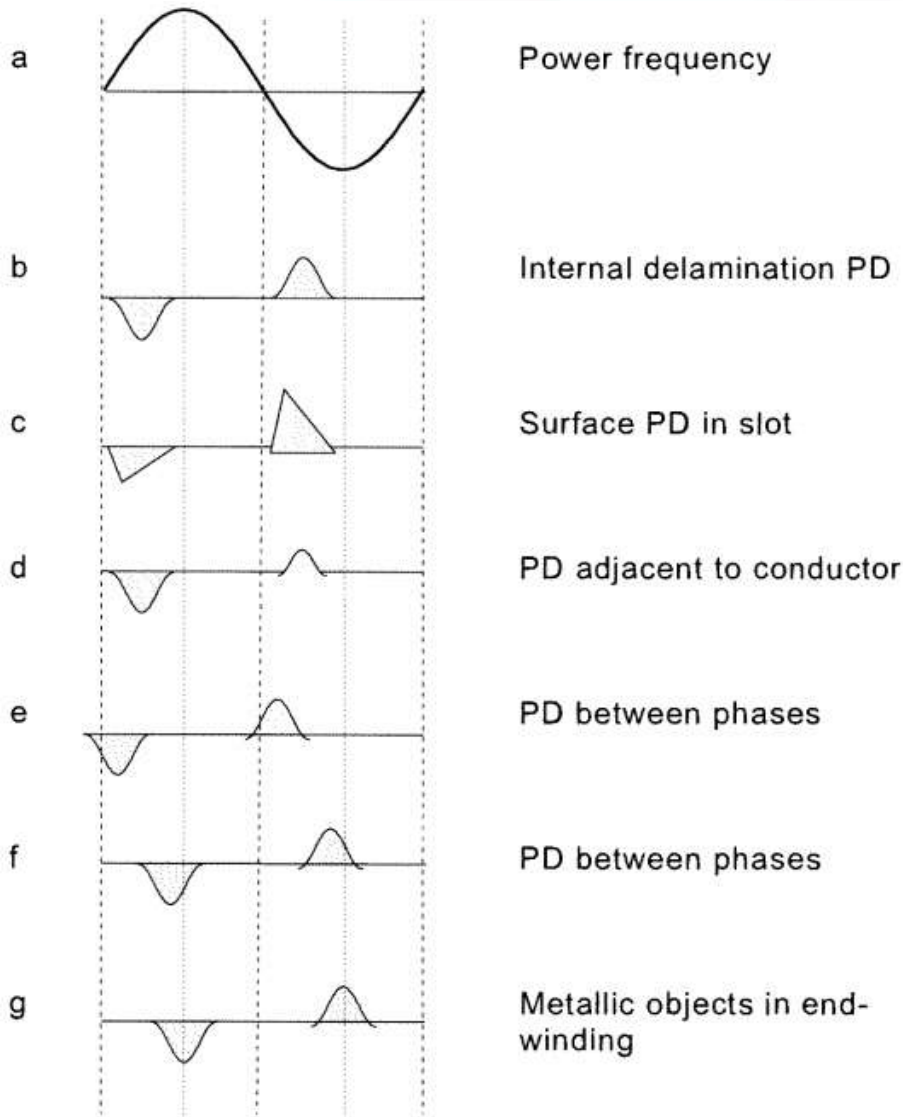
Если смонтировать третью электромагнитную антенну в зоне подключения питающего кабеля, то можно будет эффективно отстраиваться от внешних помех, используя метод «time off arrival». В любом случае измерение частичных разрядов в СВЧ диапазоне частот в большей мере защищено от влияния помех, распространение которых по питающему кабелю происходит с большим затуханием.

МЭК-60034-27 Вращающиеся электрические машины - часть 27-2: Измерение частичных разрядов в изоляции статорных обмоток электрических машин.

Допускает использовать милливольты в качестве нормативной базы при измерении в HF и VHF частотном диапазоне.

Для испытаний на отдельных витках статора рекомендуется нормирование в пКл.

Стандарт не предполагает соответствие или несоответствие определенным нормам, рекомендуется собрать собственную базу данных о результатах испытаний, чтобы определить уровень ЧР.

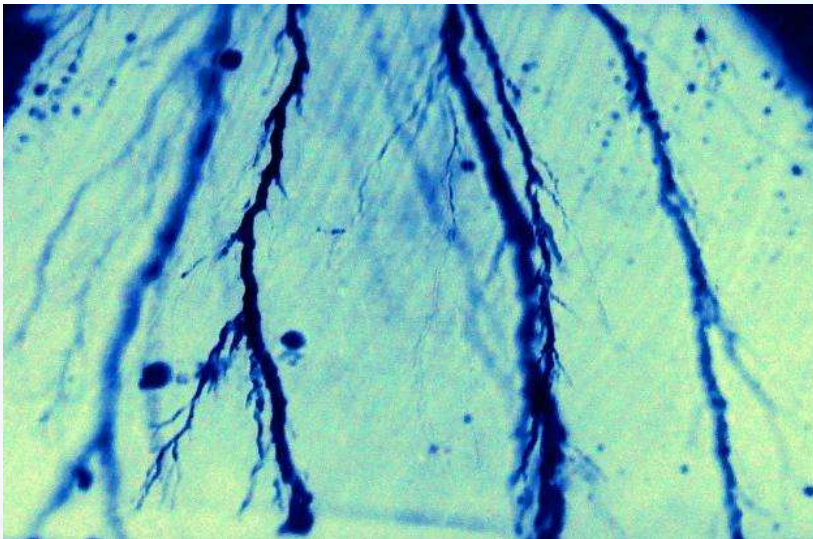
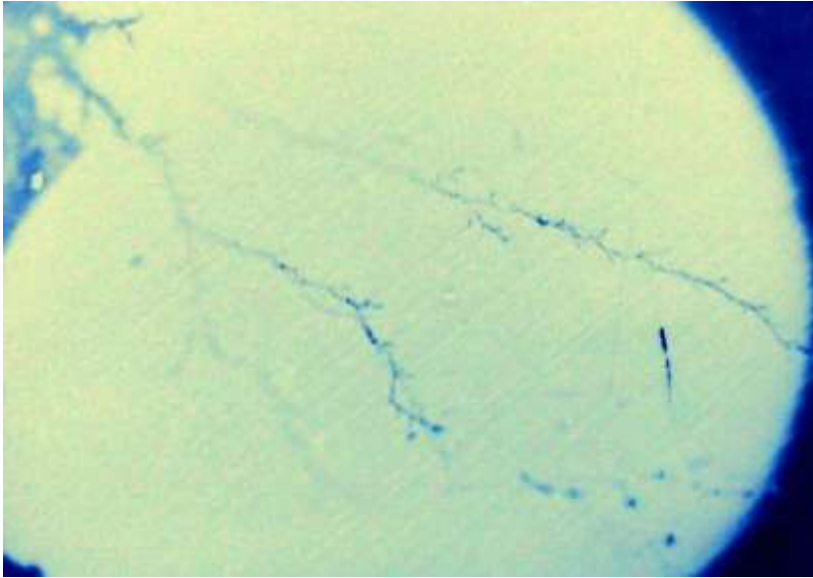


МЭК-60034-27

Вращающиеся электрические машины - часть 27-2: Измерение частичных разрядов в изоляции статорных обмоток электрических машин. Приложение А.

Типовые амплитудно-фазовые распределения ЧР для различных дефектов в статорах электрических машин.

Наиболее «подвинутый» в плане диагностики типа разрядной активности.



В резко неоднородных полях при определенных условиях полному пробое полимерных образцов предшествует развитие предпробивных каналов — так называемых дендритов (триингов).

В зависимости от напряжения, и окружающей среды в полимерах могут развиваться электрические и электрохимические, или водные дендриты.

Самым повреждаемым элементом КЛ являются муфты. Необходимо очень строгое соблюдение технологии монтажа муфт.

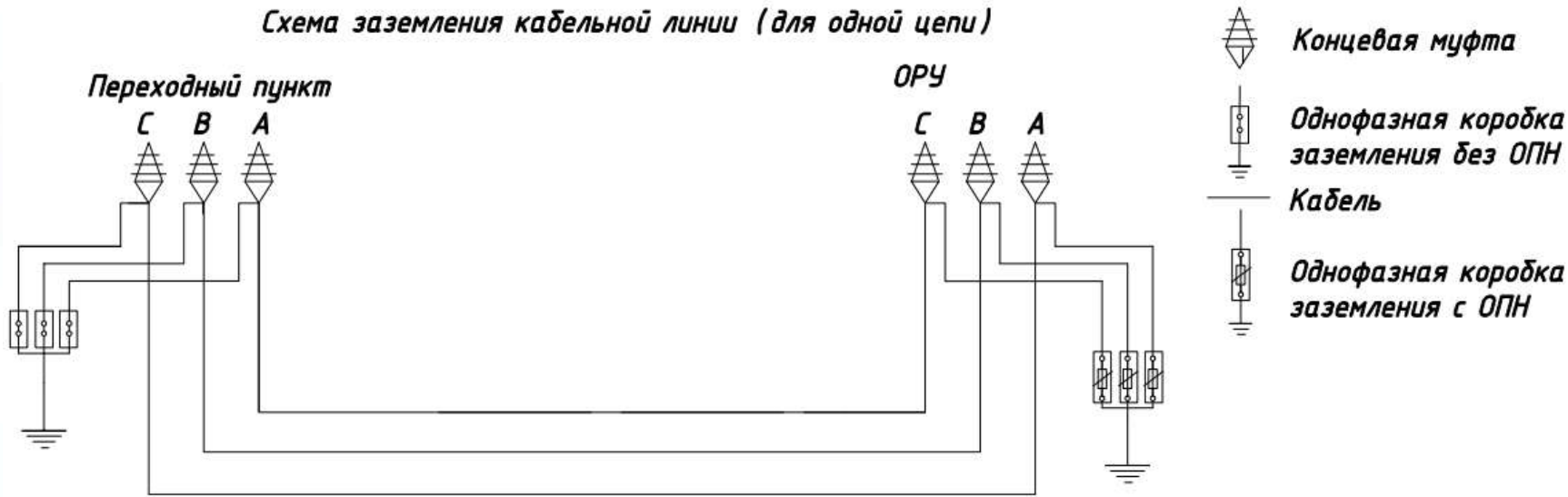
Датчики марки «RFCT-4», «RFCT-7». Это датчики трансформаторного типа, предназначенные для регистрации высокочастотных импульсов в проводе, заземляющем броню кабеля. Конструктивно датчик «RFCT» представляет собой две разъёмные половинки, которые легко монтируются на проводниках заземления экрана кабеля. Благодаря разъёмной конструкции установка датчика «RFCT» производится без разрыва цепей заземления.

Датчик работает в HF диапазоне частот (от 0,1 до 15,0 МГц), поэтому он чувствителен к дефектам, которые могут располагаться от него на удалении до нескольких км.

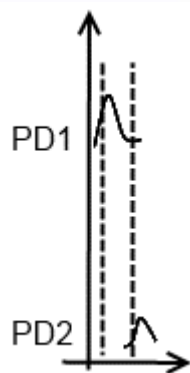
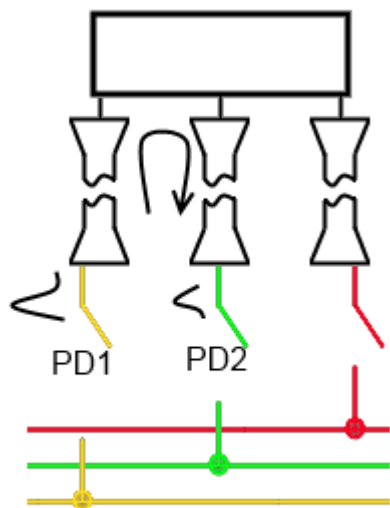
Поскольку по проводникам заземления возможно протекание больших токов, как импульсных, так и промышленной частоты, в «кабельных модификациях» датчиков типа RFCT применяются специальные меры, позволяющие избегать больших насыщений сердечника, снижающих чувствительность датчика к частичным разрядам.



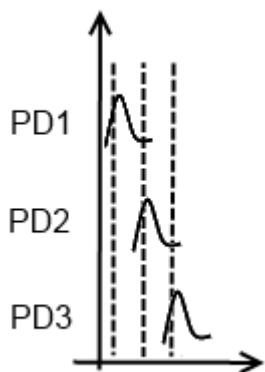
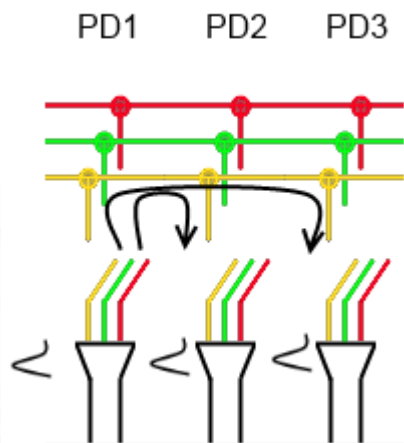
Схема заземления кабельной линии (для одной цепи)



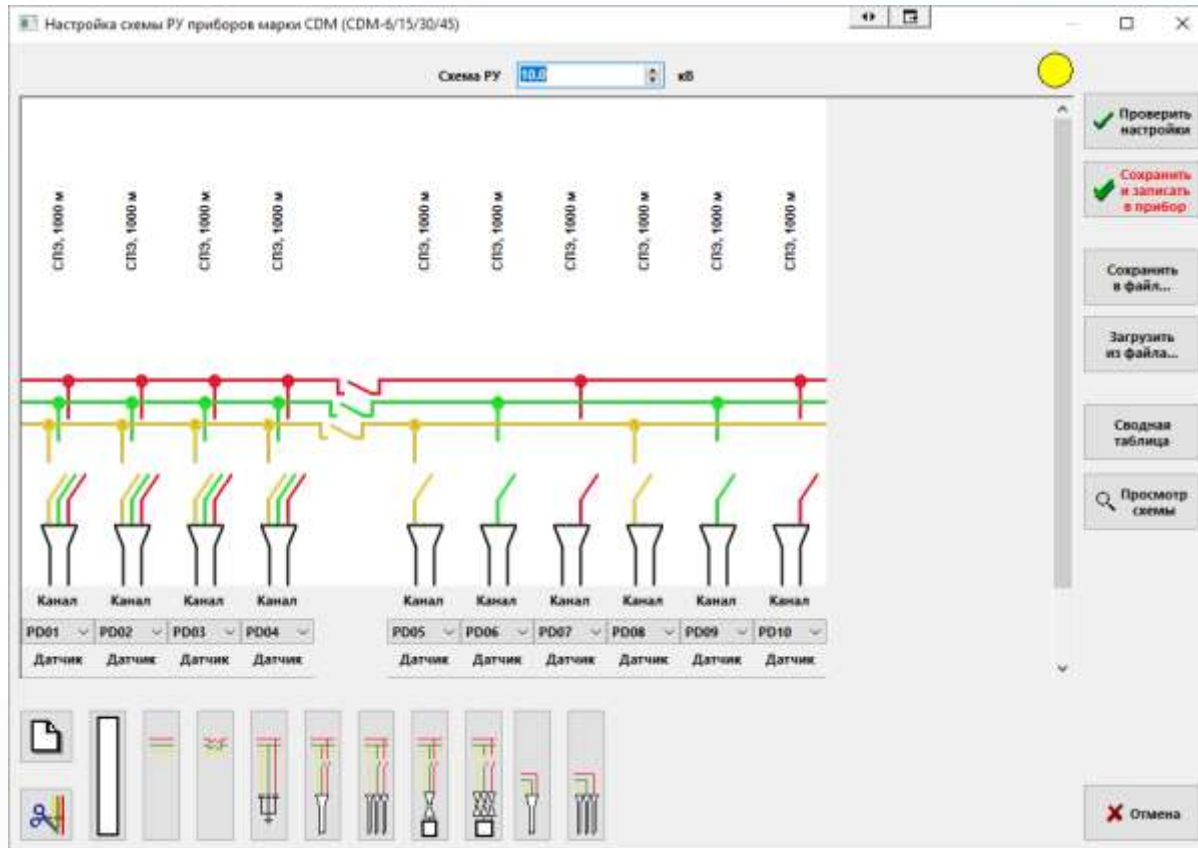
Установка датчиков ЧР в цепи заземления



Для разделения импульсов между фазами (кабелями в одной ячейке) эффективно использование амплитудной фильтрации.



Для отделения импульсов теренаведенных из кабелей в других ячейках достаточно сравнения по времени только с датчиками в ближайших ячейках



Датчики RFCT устанавливаются в ячейках РУ на заземление экранов КЛ.

При наличии дополнительных заземлений (в муфтах или с другой стороны КЛ) на них монтируется ВЧ фильтр (пассивный элемент, увеличивающий высокочастотное сопротивление).

Конфигуратор помогает быстро и легко произвести настройку прибора автоматически включить оптимальные алгоритмы фильтрации.



$$L = CL - \Delta t * V / 2$$

$\Delta t = (t_2 - t_1)$ - разница во времени прихода прямого и отраженного импульса

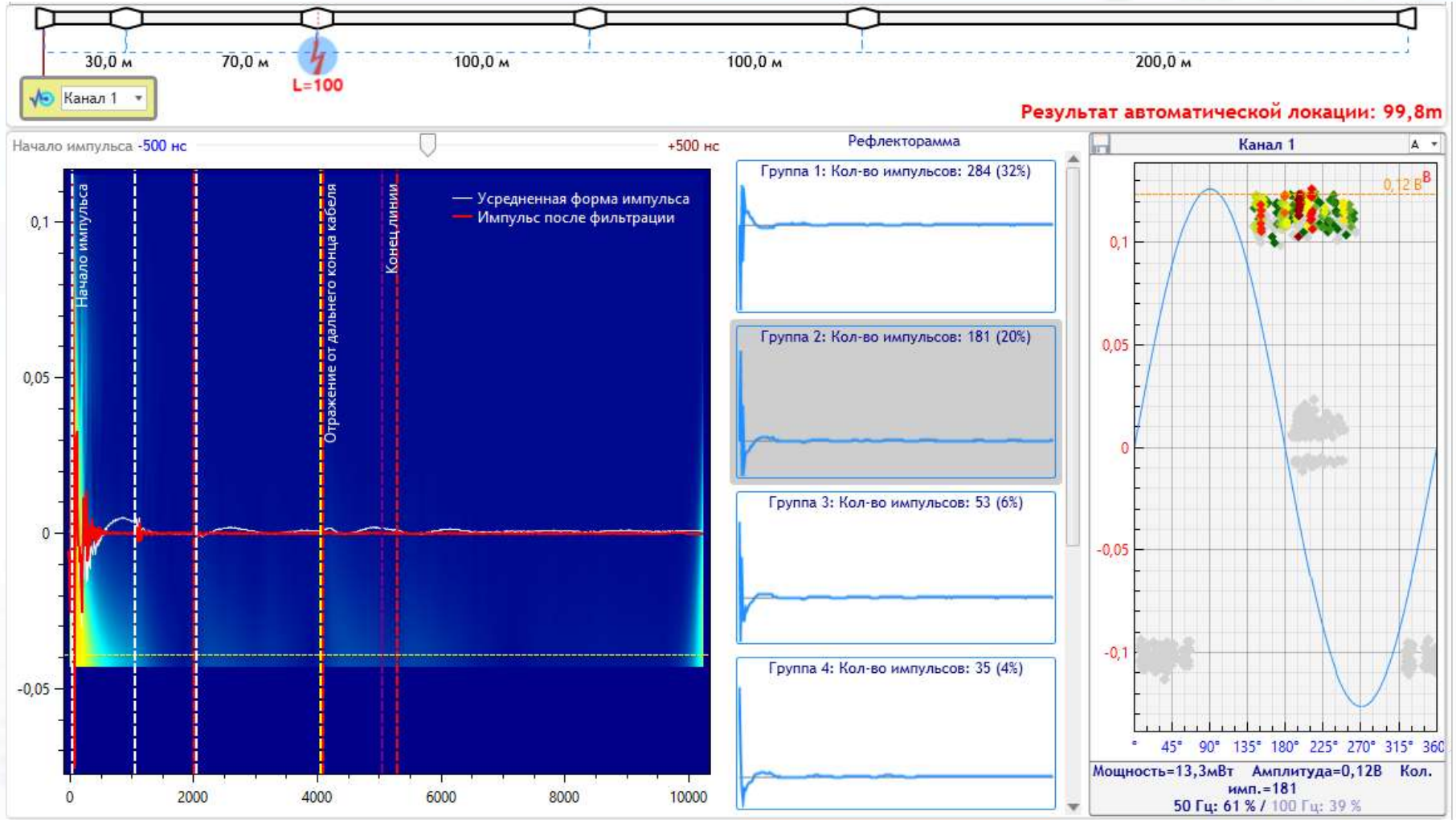
V - скорость распространения волны в кабеле;

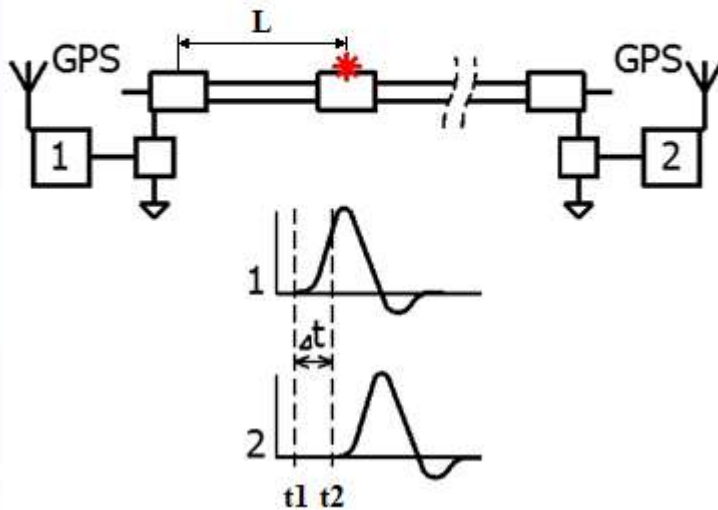
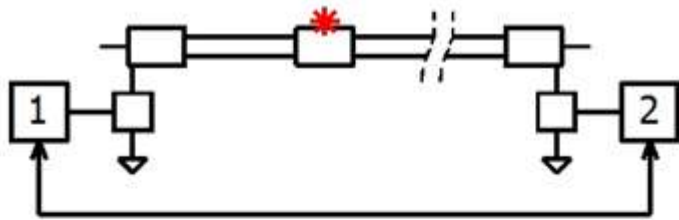
CL - длина кабельной линии;

L - расстояние до дефекта;

t_1 - момент прихода импульса ЧР от дефекта;

t_2 - момент прихода отражения импульса ЧР от конца кабеля.





$$L = (CL - \Delta t * V) / 2$$

$$\Delta t = (t_2 - t_1)$$

V - скорость волны

L - расстояние от прибора №1 до дефекта

CL – длина кабеля

На двух концах кабельной линии устанавливают два регистрирующих прибора системы мониторинга, работающих синхронно. Место возникновения дефекта рассчитывается по разнице времени прихода импульсов к измерительным приборам.

Для обеспечения необходимой точности локации места возникновения дефекта оба регистрирующих прибора должны быть синхронизированы с очень высокой точностью.

Для кабельных линий, в которых есть «свободное» встроенное оптическое волокно, синхронизацию можно осуществить при помощи этого волокна.

Если такая возможность отсутствует, то синхронизировать приборы можно по сигналам системы точного времени GPS/GLONASS. Для этого в каждом измерительном приборе должен быть соответствующий приемник сигналов.

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007- 29.060.20.170-2014. Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.

Применяемая аппаратура должна позволять определять место расположения дефекта, а так же обеспечивать снятие следующих характеристик: амплитуда ЧР (кажущийся заряд / напряжение возникновения ЧР/напряжение гашения ЧР); тип разряда (ЧР, внешний ЧР, коронный разряд и т.п.); осциллограмму разряда; фазовое распределение сигналов измерения.

Измерение ЧР производится электрическим методом на концевых кабельных муфтах на ОРУ, элегазовых вводах в КРУЭ и на муфтах в кабельных трансформаторных коробах. Измеряется уровень и интенсивность ЧР. По результатам измерений делается предварительный вывод о наличии или отсутствия дефекта в изоляции муфты и кабеля, производится построение тренда, полученные результаты сравниваются с предыдущими замерами. Исходя из полученных результатов, делается предварительный вывод о наличии или отсутствия дефекта в изоляции муфты и кабеля. Также, производится сравнение полученных результатов с предыдущими замерами.

Нормируемая величина >1000 мВ («Предавварийное» дополнительные измерения с локализацией, вывод КЛ в ремонт в течение 3 месяцев).

Для особо ответственных КЛ, рекомендуется уменьшать уровни ЧР для того, чтобы не допустить развития дефекта в междиagnostический период.

Раздел 6

Основные этапы диагностики изоляции методом ЧР

1. Определение уровня ЧР, сравнение с существующими нормами или наработками.
2. Определение типа разрядной активности и степени опасности.
3. Анализ наличия резких изменений параметров разрядной активности (резкое изменение амплитуды или интенсивности импульсов).
4. Анализ тренда амплитуды или интенсивности разрядной активности.
5. Анализ взаимосвязи с параметров импульсов с технологическими параметрами оборудования и, при необходимости, параметрами внешней среды.
6. Локация источника разрядной активности (п.4).
7. Принятие решения о состоянии изоляции оборудования.

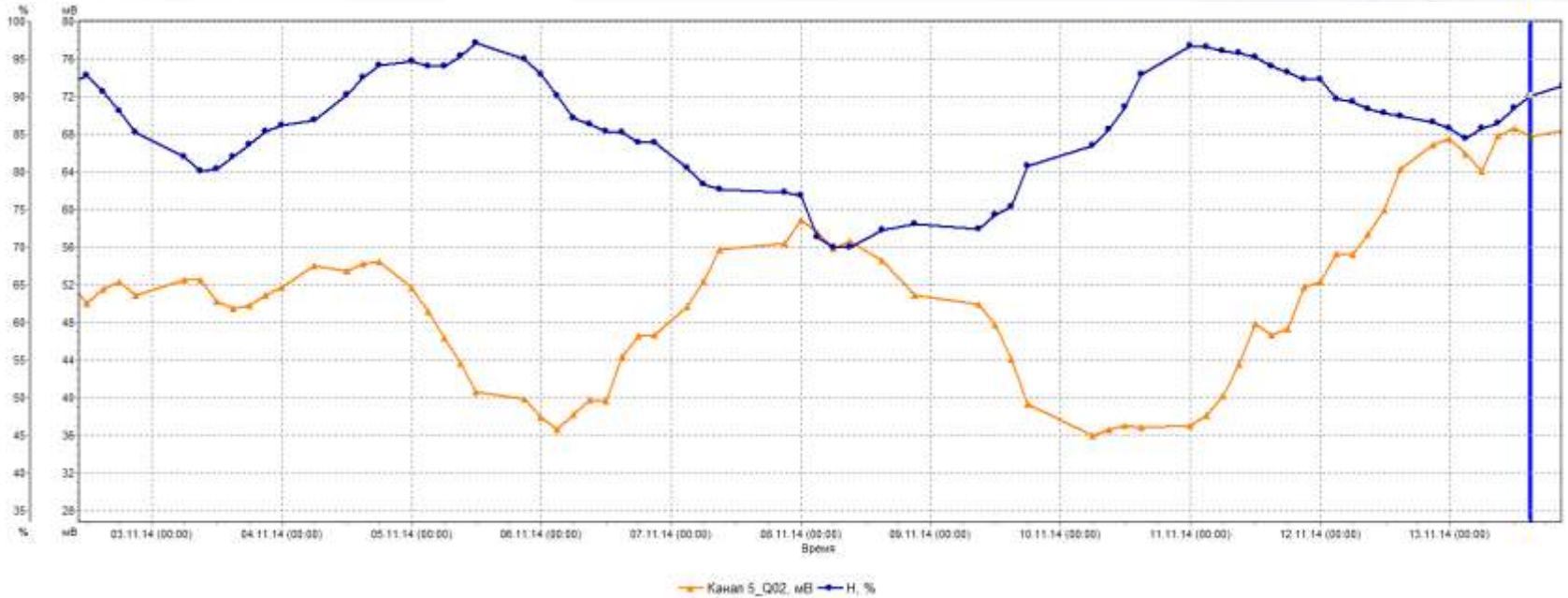
Важно при регистрации ЧР одновременно фиксировать основные параметры работы объекта:

- Параметры нагрузки.
- Режим работы и температурный режим.
- Параметры охлаждения.
- Параметры внешней среды.

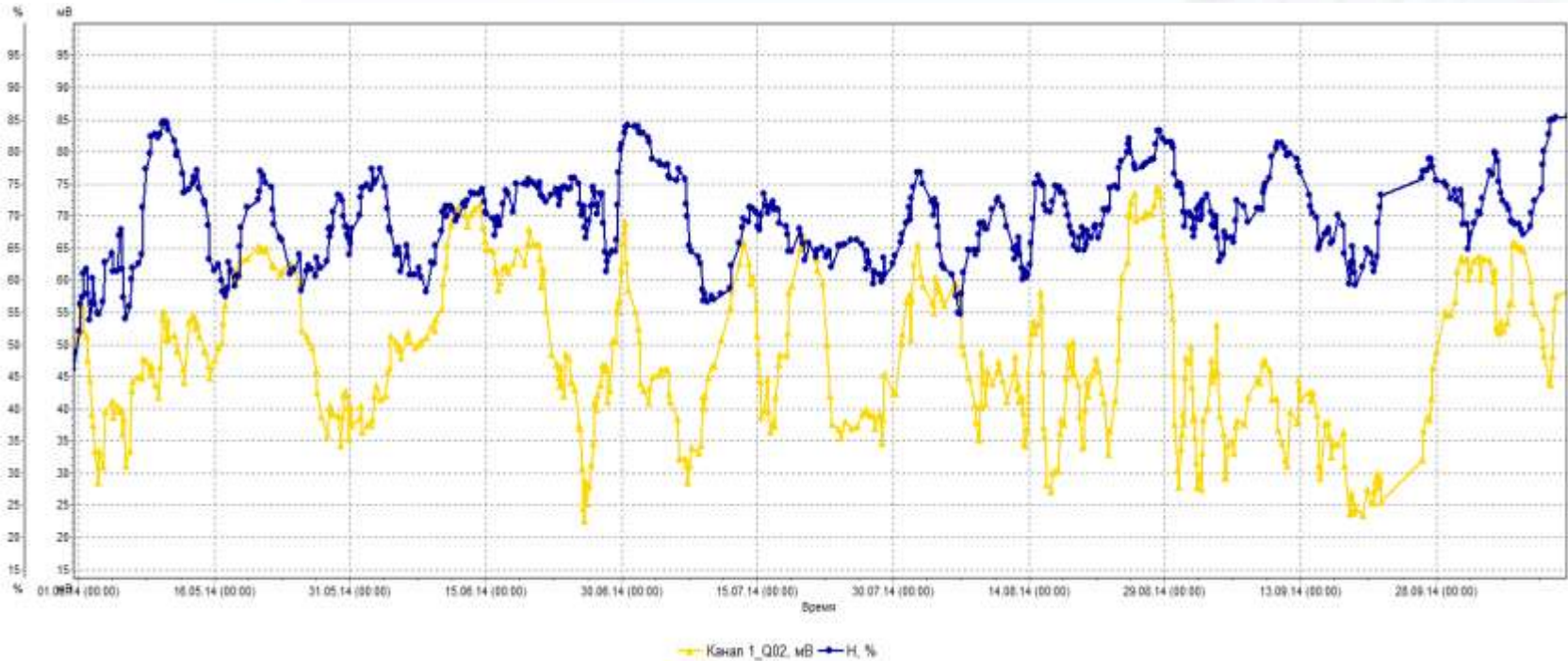
Для каждого типа оборудования этот набор параметров может индивидуален.

Для получения наиболее полной картины о состоянии изоляции рекомендуется проводить измерения при различных значениях технологических параметров оборудования.

Анализ связи изменения амплитуды и интенсивности импульсов и рабочих параметров оборудования может подтвердить и уточнить источник разрядной активности.



Амплитуда импульсов короны в воздухе имеет обратную зависимость от влажности окружающего воздуха.



При сильном внешнем загрязнении высоковольтных вводов амплитуда поверхностных ЧР имеет прямую зависимость с влажностью окружающего воздуха.

Для каждого типа оборудования и типа ЧР возможно применение различных способов локации:

1. Ультразвуковой.
2. Ультрафиолетовый.
3. При помощи СВЧ антенн.
4. Акустический.
5. Рефлектометрия.
6. По разнице во времени прибытия импульсов.
7. Пространственная локация.