



**Комментарии к применению тестирования On-line Partial Discharge (PD, частичный разряд в рабочем режиме) и поиску места частичного разряда (отображение схемы разводки) на высоковольтных (MV и HV) кабелях**



**Издание 4 – май 2009  
Подготовлено: HVPD Ltd**

## Представление тестирования On-Line PD (частичный разряд в рабочем режиме) на высоковольтных (MV и HV) кабелях

### Обнаружение частичного разряда в рабочем режиме на высоковольтных (MV и HV) кабелях

#### Общая информация

Тестирование On-line Partial Discharge (PD) (частичный разряд в рабочем режиме) на высоковольтных (MV от 6,6 кВ до 36 кВ и HV от 66 кВ до 400 кВ) кабелях впервые было использовано в Великобритании в конце 1990-х. Тогда использовался трансформатор HFCT (High Frequency Current Transformer – высокочастотный трансформатор тока) с разъемным сердечником и датчики TEV, которые закреплялись вокруг шины заземления или жилы кабеля на распределительном устройстве/трансформаторе без снятия напряжения с оборудования. Используемые в новом тестировании On-Line PD технологии позаимствованы из тестирования Off-Line PD (частичный разряд в нерабочем режиме) (с оборудованием VLF или другим внешним высоковольтным источником питания), которое впервые было использовано в 1980-е в Великобритании, Германии и Нидерландах. Переход к тестированию частичного разряда в рабочем режиме произошел за последние несколько лет из-за потребности заказчиков избегать отключения кабеля для тестирования состояния изоляции (тестирование в нерабочем режиме требует изоляции кабеля на обоих концах и использования переносного высоковольтного источника электропитания).

Подготовка к тестированию полностью безопасна, так как датчик HFCT подсоединяется либо вокруг шины заземления после того, как она «отходит» от кабеля (как показано ниже на рисунке 1), или вокруг жилы кабеля (после «снятия» заземленного экрана).

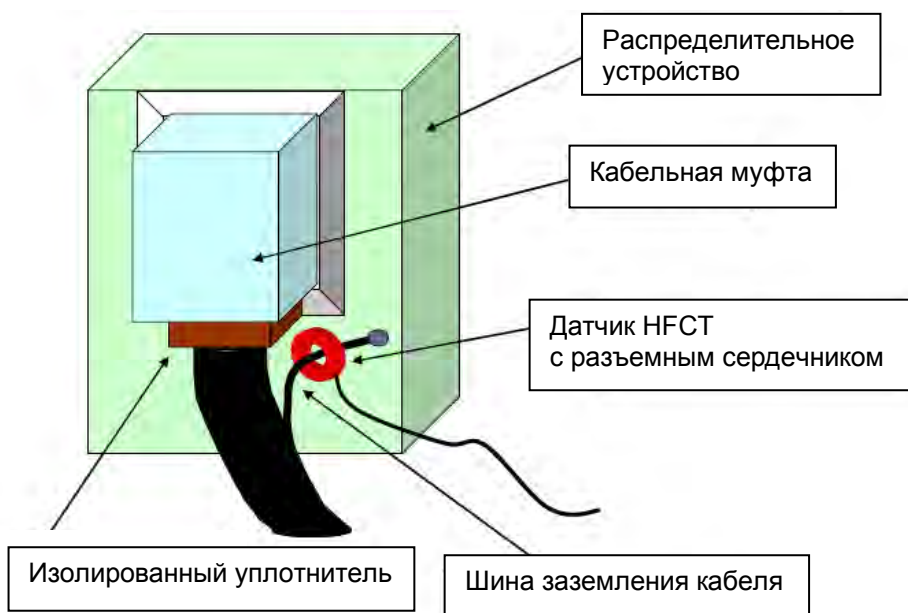


Рисунок 1: Подсоединение датчика HFCT для проведения тестирования On-Line PD на высоковольтных кабелях.

Требования к заземлению при проведении тестирования On-Line PD включают обеспечение доступа к шине заземления кабеля и изоляции между заземлением кабеля и заземлением распределительного устройства (полосовая изоляция), как показано на рисунке 1. В случае кабелей XLPE (силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена) доступ с помощью датчика HFCT с разъемным сердечником обычно можно получить либо к шине заземления кабеля, изолированной от распределительного устройства, или к жиле кабеля после «отвода» шины заземления.

В некоторых случаях имеются определенные ограничения, касающиеся закрепления датчика





HFCT в подходящей точке (обычно в случае старых кабелей со свинцовой оболочкой и бумажной изоляцией с кабельной муфтой, заполненной кабельной массой (имеющей твердую изоляцию)). В этих случаях заземление кабеля и заземление распределительного устройства соединены друг с другом. Ниже на рисунке 2 показан пример концевой заделки PILC (Paper Insulated Lead Cable - кабель со свинцовой оболочкой и бумажной изоляцией) с изолирующими уплотнителями, когда имеется возможность проводить измерения частичного разряда в рабочем состоянии (рис. 2а), и два примера, когда это невозможно из-за жестко связанных заземлений (рис. 2б).

Рисунок 2: Примеры концевой заделки кабеля PILC для тестирования частичного разряда в рабочем режиме.

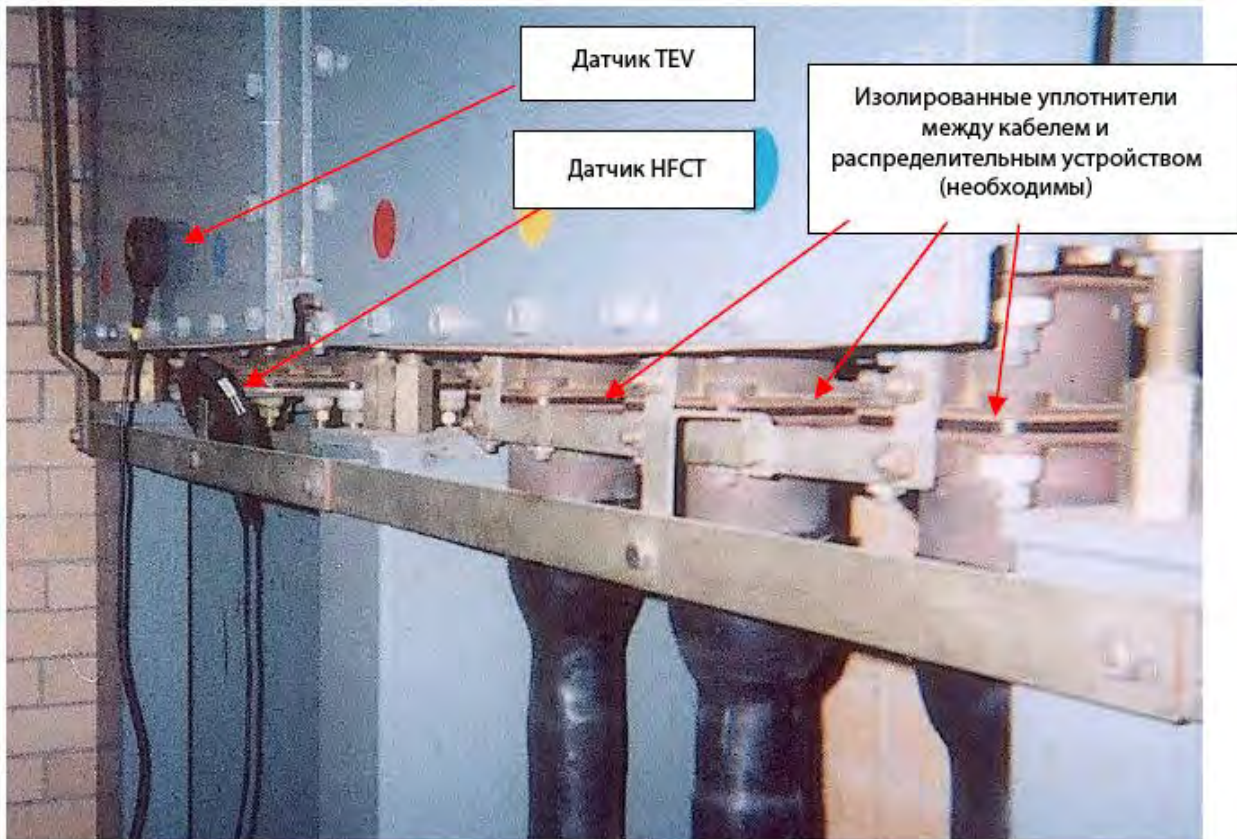


Рис. 2а. Концевая заделка кабеля PILC, подходящая для тестирования частичного разряда в рабочем режиме.



Рис. 2б. Концевая заделка кабеля PILC, не подходящая для тестирования частичного разряда в рабочем режиме. (Слева жесткое соединение между землей кабеля и распределительным устройством, справа – уплотнитель, покрытый свинцом.)

В то время как при доступе к изолированным шинам заземления могут возникать проблемы, как в случае некоторых старых кабельных систем (как показано на рисунке 2b), следует заметить, что можно относительно просто и быстро изменять подсоединение земли на кабельных установках, что позволит выполнять на них тестирование частичного разряда в рабочем режиме (практически так же, как в случае концевой заделки кабелей XLPE, когда шину заземления можно вывести из муфты концевой заделки).

### Тестирование PD с подсоединением HFCT вокруг жилы кабеля

Во многих случаях, в частности для кабелей XLPE, токи частичного разряда проводника ( $i_+$ ) измеряются путем закрепления датчика HFCT поверх изоляции вокруг жилы кабеля уже после «отвода» заземленного экрана. Пример для кабелей XLPE 33 кВ приводится ниже на рисунке 3.



Рисунок 3: Примеры подсоединения датчика HFCT с разъемным сердечником к жиле кабеля XLPE.

При прокладке кабелей в распределительное устройство с металлической оболочкой иногда для подсоединения необходимо датчиков HFCT с разъемным сердечником потребуются получить доступ внутрь кабельной муфты. В подобных случаях перед подсоединением датчиков необходимо обесточивать распределительное устройство и обеспечивать полную безопасность. После безопасного подсоединения датчиков можно снова подать напряжение на оборудование и провести измерение. Ни при каких обстоятельствах не следует пытаться установить датчики на жилы кабеля, находящиеся под напряжением; следует всегда придерживаться правил, устанавливаемых владельцем кабельной сети. Ниже на рисунке 4 показаны три датчика HFCT, установленные на каждую из жил кабеля XLPE 11 кВ после снятия экрана внутри корпуса распределительного устройства.



Рисунок 4: Установка трех датчиков HFCT вокруг каждой из фаз кабеля XLPE 11 кВ после снятия напряжения и обеспечения безопасности распределительного устройства.



## Техническое описание

Заземление путем шины важно для сбора данных частичного разряда в рабочем режиме, так как силовые кабели следует рассматривать как очень большие коаксиальные кабели. Когда во внутренней структуре изоляции (между проводником и заземленным экраном) возникает частичный разряд, в обоих проводниках генерируется импульс PD (частичного разряда) (ток PD для проводника =  $i_+$ , ток PD в заземленном экране =  $i_-$ ). Эти импульсные сигналы имеют одинаковую величину, но противоположную полярность. В результате, если вокруг всего кабеля (включающего проводник и заземленный экран) установлен датчик HFCT (высокочастотный трансформатор тока) с разъемным сердечником, полный ток от импульсов PD будет нулевым. Таким образом, для измерения сигнала частичного разряда необходимо использовать любой из этих проводников по отдельности и измерять либо ток PD в проводнике ( $i_+$ ) или ток PD в заземленном экране ( $i_-$ ). Именно поэтому каждая шина заземления играет такую важную роль в обнаружении частичного разряда, так как позволяет измерять токи заземления (экрана) отдельно от токов в проводнике. Смотрите рисунок 5 ниже.

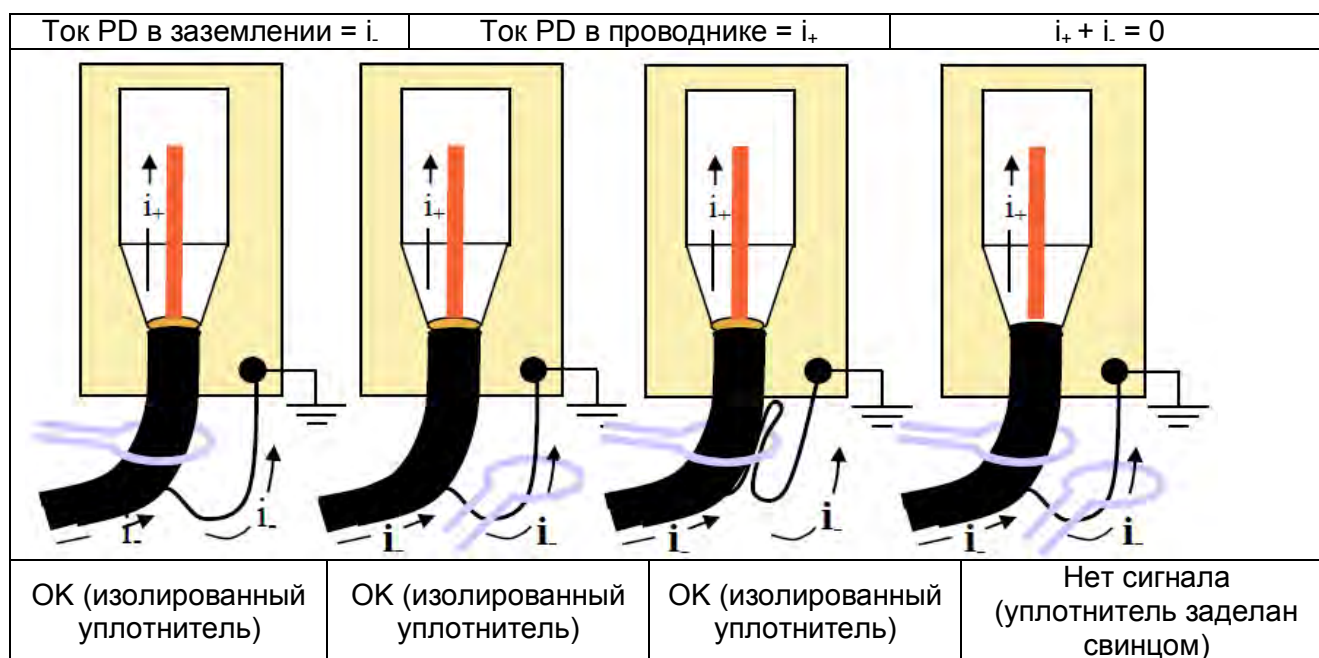


Рисунок 5: Варианты подсоединения датчика HFCT с разъемным сердечником к шине заземления или жиле кабеля.

## Тестирование частичного разряда на трехфазном кабеле с поясной изоляцией



Кабели с поясной изоляцией 6,6 кВ – 11 кВ (три жилы, заземленный экран вокруг всех трех жил) (смотрите рисунок 6 ниже) конструктивно не имеют отдельного экрана для каждой жилы. Таким образом, на каждой фазе можно обнаружить напряжение другой фазы (то есть, изоляция между фазами является общей). Для подобных кабелей частичный разряд между фазами не будет приводить к созданию какого-либо сигнала в шине заземления. Обычный и обратный импульсы появляются в двух (или более) проводниках, в зависимости от расположения полости разряда.

Рисунок 6: Слева: кабель PILC 11 кВ с поясной изоляцией, справа: трехжильный кабель PILC 33 кВ



Конструкция кабелей с поясной изоляцией играет важную роль в выполнении тестирования PD в рабочем режиме. Если единственным доступным методом является использование шин заземления, то на кабелях с поясной изоляцией можно обнаружить только события «фаза/земля», а события «фаза/фаза» регистрироваться не будут. Понятно, что таким образом при измерении кабелей с поясной изоляцией одним ударом выбирается целый класс событий PD. Чтобы включить в измерение события типа «фаза/фаза», необходимо предложить некий способ измерения токов в каждом из проводников. И то, что очень сложно для традиционных, заполненных кабельной массой муфт кабелей POLC, значительно легче для концевой заделки кабелей XLPE, так как обычно возможен доступ к жилам кабеля ниже точки заземления (в зависимости от правил безопасности, устанавливаемых владельцем сети). В таком случае легче всего получить доступ к отдельным жилам кабеля, устанавливая на каждую фазу датчик HFCT. При таком подсоединении датчиков можно обнаруживать частичные разряды не только между фазой и землей, но и между фазами.

## **Тестирование частичного разряда на кабелях в рабочем режиме с использованием устройства HVPD Longshot™**

Тестирование частичного разряда на кабелях в рабочем режиме выполняется с использованием устройства HVPD Longshot© и следующих эксклюзивных программ:

PD Gold © - Данная программа используется для измерения и записи активности PD за период времени от 2 до 5 минут, со сбором подробных данных за приблизительно 10 циклов питания 50/60 Гц с 30-ю оцифрованными «сегментами формы сигнала», собранными за каждый цикл, для каждого подключенного датчика (240 – 750 сегментов для каждого датчика).

PD Reader © - Это программа анализа, в которой для анализа и описания характеристик импульсов, полученных для частичного разряда в кабеле (Cable PD), частичного разряда в распределительном устройстве/локального частичного разряда (Switchgear/Local PD) и шума (Noise), используется уникальный программный модель распознавания событий (Event Recogniser). Изображение экрана страницы PD Reader© Segment Analysis показано ниже на рисунке 7.

Программа ScopeControl© используется совместно с приложением PD Gold© для измерения активности PD за один цикл питания 50 Гц с общим количеством в 200 оцифрованных «сегментов формы сигнала», собранных за цикл (всего 200 сегментов). Эта программа также может использовать программный модуль Event Recogniser для автоматического анализа и получения характеристики для полученных импульсов для частичного разряда в кабеле (Cable PD), частичного разряда в распределительном устройстве/локального частичного разряда (Switchgear/Local PD) и шума (Noise).

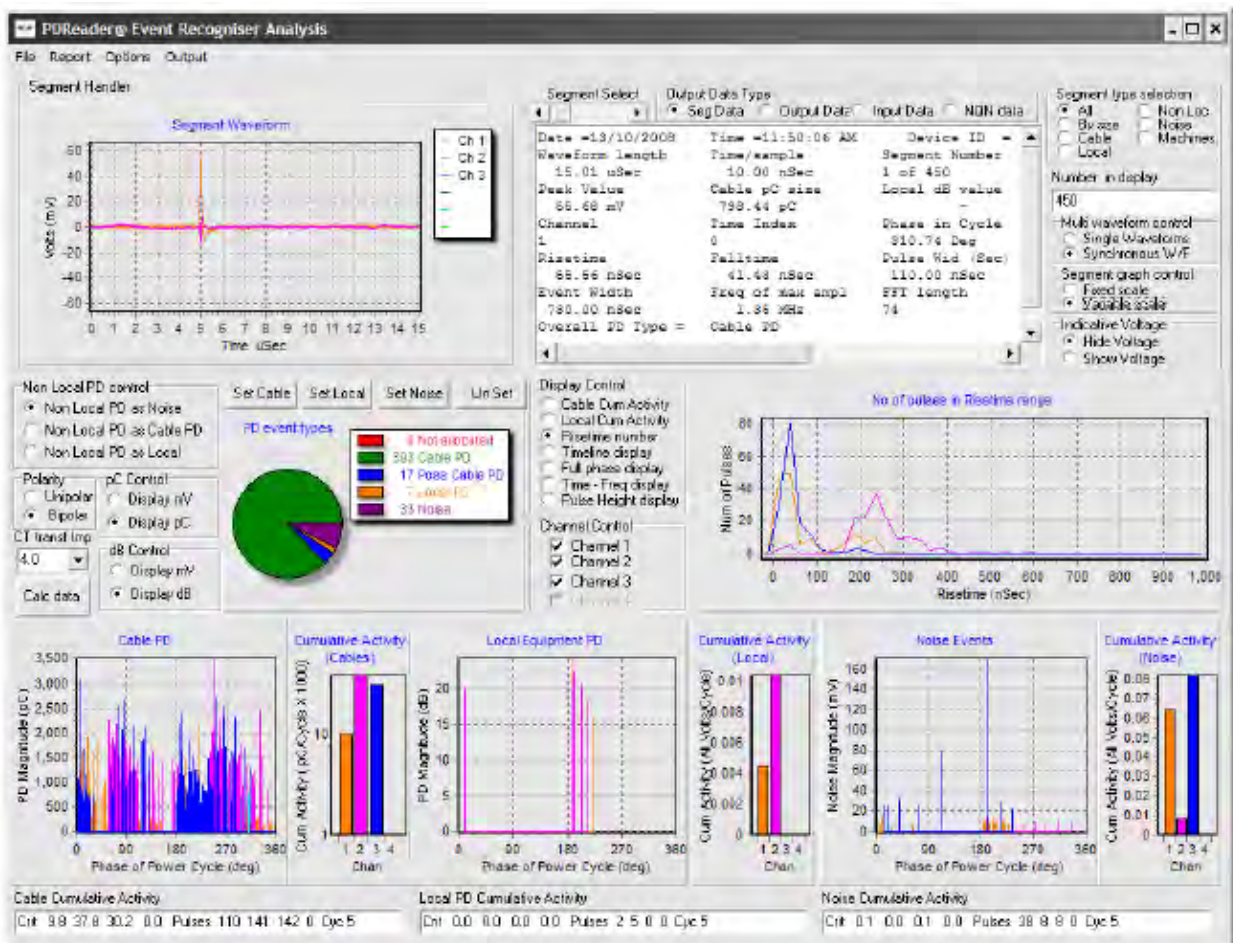


Рисунок 7: На странице программы PD Gold© Event Recogniser показан частичный разряд и шумы в кабеле.

## Тестирование частичного разряда с помощью HVPD Longshot™ на высоковольтных кабелях (MV и HV), уровни частичного разряда для диагностики

Благодаря проведенной за прошедшие десять лет компанией HVPD работе с энергетическими компаниями в Великобритании, Европе и остальном мире была накоплена большая база данных результатов. На основании этих данных удалось создать базу знаний (Cable Insulation Condition Knowledge Rules), которая позволяет владельцам кабельных сетей оценивать состояние высоковольтных кабелей и кабельного оборудования по результатам тестирования частичного разряда в рабочем режиме.

В Приложении 1 представлены действия по обслуживанию и управлению оценками в соответствии с уровнем частичного разряда.

Приведенную в Приложении 1 базу знаний (Knowledge Rules) можно использовать вместе с HVPD Longshot© PD Spot Tester для проведения быстрого и простого тестирования точки частичного разряда в рабочем режиме и оценки состояния для высокочастотных кабелей с бумажной и полимерной изоляцией в диапазоне напряжений от 6,6 кВ до 66 кВ.

Тестирование On-Line Partial Discharge (PD) для высоковольтных (от 132 кВ до 400 кВ) кабелей, кабельных аксессуаров и концевой заделки кабелей является относительно новым приложением, разработанным компанией HVPD за последние четыре года за счет использования технологии тестирования HVPD Longshot© PD Test Technology. В то время как используемые технологии похожи на те, что разработаны для высоковольтных кабелей и оборудования MV, между тестированием этих кабелей и высоковольтных кабелей HV имеются некоторые различия, которые разъясняются в этом документе.





## Какова роль частичного разряда в кабельных системах?

Ответ на простой вопрос «Какова роль частичного разряда в кабельных системах?» также просто и предвидеть. Это плохо!

Возможно, за исключением поверхностного частичного разряда, возникающего на внешней поверхности концевой заделки уличных кабелей (где такой тип частичного разряда ожидается и учитывается в конструкции), практически все частичные разряды в кабельных системах будут приводить к повреждению изоляции кабелей до той или иной степени. Эффект частичного разряда можно рассматривать до определенной степени как эффект воздействия на живые ткани ионизирующего излучения. Кто-то может спросить «какой уровень излучения опасен?», точно так же, как спрашивают об уровнях частичного разряда в высоковольтных системах. Правильным ответом является отсутствие безопасного уровня. В обоих случаях при низком уровне воздействия просто пройдет больше времени, прежде чем повреждение заявит о себе. Можно оценить общий срок службы определенной части сети, а затем сказать, что если образование неисправности занимает время, превышающее срок службы, то такой уровень можно считать безопасным. Однако так как текущая информация об уровнях частичного разряда и соответствующем сроке службы для высоковольтной сети в целом, и для высоковольтных кабелей в частности, недоступна, такое утверждение делать преждевременно. Владельцы высоковольтных кабелей часто задают компании HVPD один и тот же вопрос: «каков опасный уровень частичного разряда для моих кабелей?».

Единственным ответом является: «для внутренних разрядов в кабельных системах нет никакого безопасного уровня». Все внутренние разряды наносят вред и приводят к медленному разрушению изоляции, что, в свою очередь, приводит к повреждению кабеля. Пожалуй, единственным исключением из правила являются уличная высоковольтная изоляция, когда фарфоровые конструкции не теряют своих свойств при поверхностных частичных разрядах (однако на них может происходить поверхностный пробой из-за накопившейся грязи; именно поэтому в зонах высокой вероятности загрязнения такие конструкции заменяются силиконовыми материалами, например, EPDM).

Следовательно, от высоковольтных кабелей XLPE, концевой заделки, соединений и разъёмов следовало бы ожидать отсутствия разряда во время работы. Уровни поверхностных разрядов в тех случаях, когда концевая заделка кабеля выполнена неправильно, сложно прогнозировать, так как такие случаи нередки. Однако обычно на рабочих напряжениях внутреннего частичного разряда даже очень низкого уровня (например, нескольких десятых пикокуллона) возможно будет достаточно для развития неисправности. С одним только вопросом, когда эта неисправность себя проявит. Следовательно, при вводе в эксплуатацию подобных установок важно тестировать их на отсутствие частичных разрядов, а затем в течение всего срока службы регулярно проводить повторные проверки.

Исторически считается, что тестирование частичного разряда сложно провести на месте установки кабелей, в основном из-за низкого уровня этого разряда, а также из-за сильных помех и шумов. Так как одножильные кабели XLPE тестируются на частичный разряд на фабрике перед отправкой, сами по себе они с малой долей вероятности могут стать источниками частичного разряда. В системах XLPE компонентами, которые могут стать источником частичного разряда, с большой вероятностью становятся муфты и концевая заделка кабеля, которые выполняются на месте прокладки. Именно на проверке этих компонентов следует сосредоточиться при тестировании частичного разряда в высоковольтных кабелях в рабочем режиме.

Созданный компанией HVPD метод тестирования базируется на накопленных компанией знаниях в области тестирования высоковольтных кабелей; при тестировании используются описанные ниже датчики трех типов.

Для проведения тестирования частичных разрядов в рабочем режиме необходимо обеспечить удобный и безопасный доступ к тестируемым высоковольтным кабелям для подсоединения датчиков. Для проведения данного типа тестирования подходят различные датчики: TEV (Transient Earth Voltage), HFCT (High Frequency Current Transformer), а также радиочастотные датчики или пробники (RF Antennae Sensor/Probe).

При этом в качестве преимущественных рассматриваются датчики TEV и HFCT, так как они позволяют напрямую подсоединяться к тестируемому оборудованию для обнаружения внутренних разрядов. Радиочастотные пробники используются совместно с датчиками TEV/HFCT





для обнаружения и исключения внешних сигналов, которые могут отрицательно повлиять на измерения.

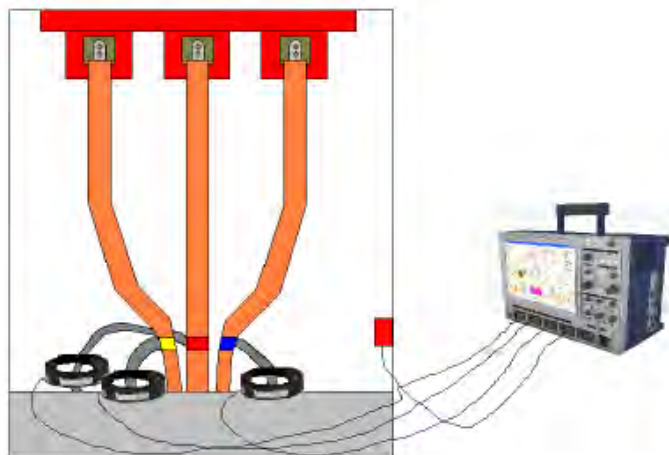


Рисунок 8: Подсоединение датчиков HFCT и TEV внутри корпуса распределительного устройства.

### Подсоединение датчиков On-line PD к высоковольтным кабелям

В то время как соединение HFCT вокруг шины заземления кабеля является безопасным и может быть выполнено практически на всех установленных высоковольтных кабелях, соединение TEV на боковой панели зависит от правил безопасности, принятых владельцем сети. Датчик TEV при необходимости можно установить с внешней стороны корпуса распределительного устройства. При работе на высоковольтном оборудовании или около него следует всегда использовать средства персональной защиты.

### Датчик TEV (Transient Earth Voltage)

Наиболее эффективным датчиком для измерения «местного частичного разряда» в концевой заделке кабелей, в разводке кабелей и кабельных муфтах является датчик TEV (Transient Earth Voltage), который представляет собой устанавливаемое снаружи устройство с емкостной связью. Датчик работает как элемент емкостной связи, обнаруживающий импульсы частичного разряда, протекающие от концевой заделки кабеля на заземленные металлические поверхности. Полоса частот датчика TEV превышает 100 МГц. Для измерения любого частичного разряда в распределительном устройстве необходимо закрепить датчик TEV на заземленной металлической поверхности; для этого можно использовать магнитные штифты в корпусе. Также датчик TEV можно закреплять на немагнитных поверхностях с помощью изоляционной ленты.



Рисунок 9: Закрепление датчика внутри корпуса распределительного устройства.

ока



Для тестирования лучше всего использовать калиброванные датчики HFCT в сочетании с датчиком TEV (схема такого соединения показана выше на рисунке 8). Для обнаружения протекающих на землю импульсов частичного разряда в HFCT используется индуктивная связь, преобразующая высокочастотные импульсы тока от разрядов в высокочастотные импульсы напряжения.

Датчик HFCT с разъемным сердечником охватывает шину заземления кабеля внизу его заделки. Датчик HFCT (полоса частот  $> 50$  МГц) способен воспринимать как «локальный» разряд на концевой заделке кабеля (как датчик TEV), так и низкочастотные импульсы частичного разряда, идущие по кабелю. Некоторые фотографии установки портативного датчика на концевой заделке кабеля показаны на рисунке 10.



Датчик HFCT вокруг шины заземления высоковольтного кабеля на GIS 132 кВ.



Закрепление датчика HFCT на заделанных концах уличного кабеля.

Рисунок 10: Фотографии подсоединения датчика HFCT к высоковольтным кабелям.

Если более длинные высоковольтные кабели имеют перемычки заземления, для обнаружения сигналов частичного разряда можно установить датчики HFCT на эти перемычки. Фотография установки портативного датчика HFCT на перемычку высоковольтного кабеля приводится на



рисунке 11.

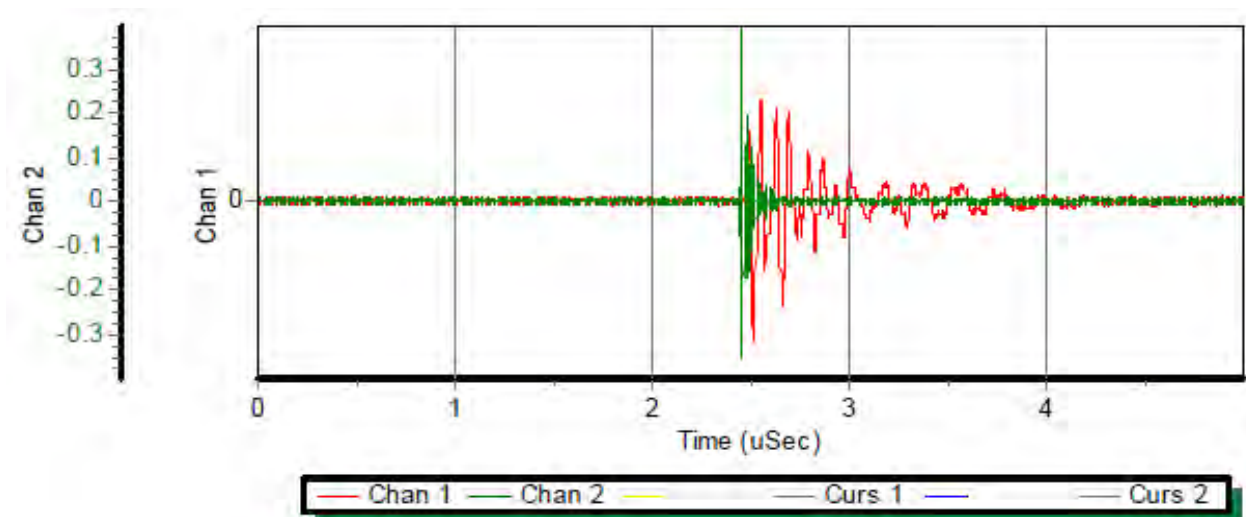


Рисунок 11: Фотография подсоединения датчика HFCT к точке перемычки на кабеле 132 кВ.

### На что похожи импульсы частичного разряда при тестировании высоковольтных кабелей?

Форма импульсов частичного разряда зависит от их источника. Если, к примеру, сигнал частичного разряда идет из пределов концевой заделки кабеля, то импульс частичного разряда будет высокочастотным (более 4 МГц) и по природе своей будет представлять колебательный сигнал. На рисунке 12 показан пример типового импульса частичного разряда, измеренного датчиками HFCT и TEV в точке оконечной заделки высоковольтного кабеля. Импульсы хорошо сопоставимы, сигналы более высокой частоты обнаруживаются датчиком TEV (зеленый график), а более низкой частоты – датчиком HFCT (красный график). Форма и соотношение импульсов двух датчиков указывает на внутренний частичный разряд в концевой заделке высоковольтного кабеля.

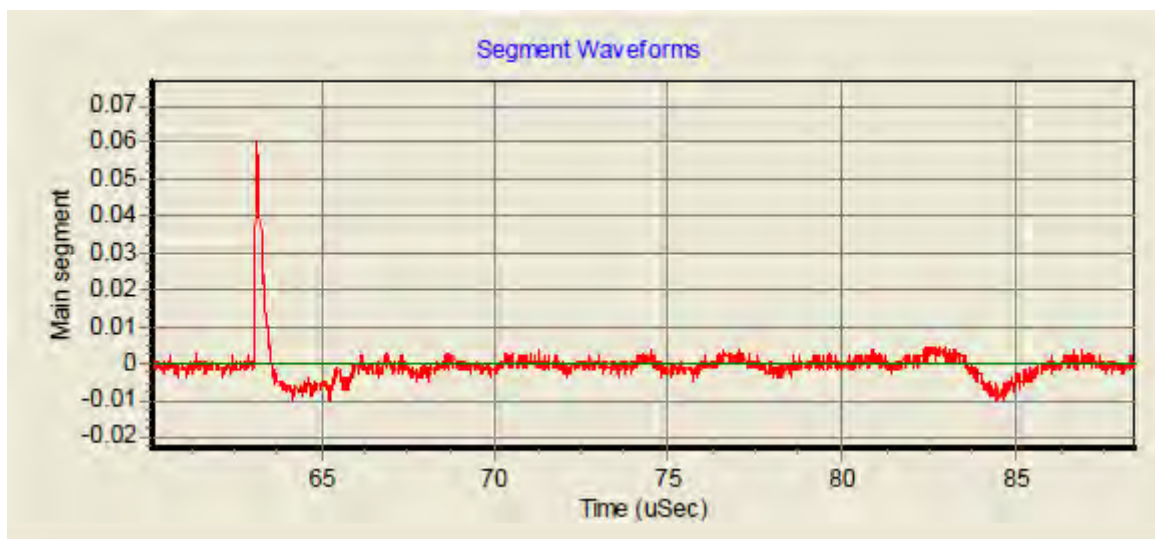




Chan 1 (2) = Канал 1 (2); Curs 1 (2) = Курсор 1 (2); Time (uSec) = Время (мксек)

Рисунок 12: Импульсы PD от внутреннего разряда на концевой заделке высоковольтного кабеля. HFCT (канал 1, красный) и TEV (канал 2, зеленый).

Для частичных разрядов, располагающихся вдоль длины кабеля (обычно частичные разряды находятся в местах сращивания кабеля вдоль его длины, так как сами кабели редко являются источниками разряда), частота и форма импульсов PD будет значительно отличаться от того, что демонстрируется для концевой заделки кабеля. Так как эти импульсы попадают в линию электропередачи с известными характеристиками, это означает, что однополюсная природа частичного разряда сохраняется по мере перемещения импульса PD по кабелю. Такие типы импульсов имеют типовую частоту от сотен кГц (для дальних точек частичного разряда) до 4 МГц (для ближних точек частичного разряда). Пример импульса PD, измеренного на высоковольтном кабеле с использованием датчика HFCT, установленного на шину заземления, приводится ниже на рисунке 13. Следует заметить, что показанный на рисунке 13 импульс является однополюсным; отличающийся по форме колебательный импульс от концевой заделки кабеля приводится выше на рисунке 12.



На рисунке:

Segment Waveforms = Формы сигналов сегментов; Main Segment = Главный сегмент; Time (uSec) = Время (мксек)

Рисунок 13: Форма сигнала для импульса частичного разряда для высоковольтного кабеля XLPE.

Характеристики среды передачи в высоковольтных кабелях означают, что если протекающие по кабелю высокочастотные импульсы тока объединяются в единое целое, можно измерить

заряд и прямо, без какой-либо калибровки, рассчитать степень частичного разряда (в пикокулонах – pCs/pКл). Это выражается формулой:

$$Charge = \int current * dt$$

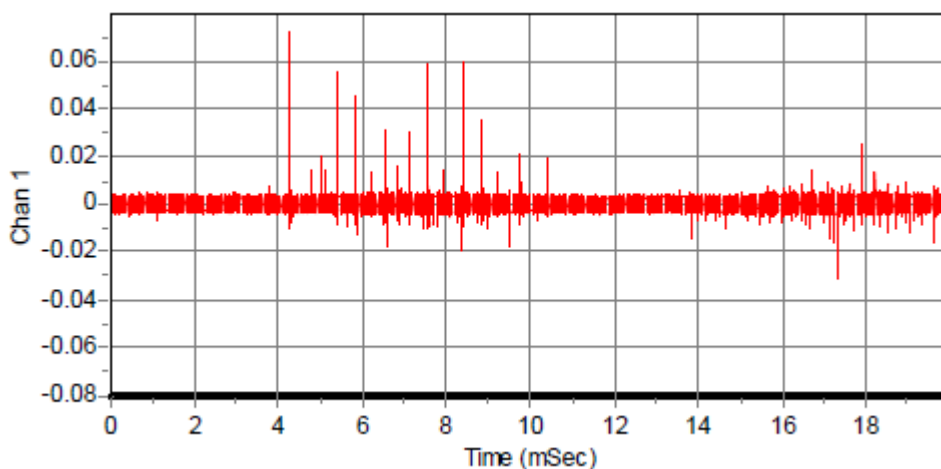
Когда ток измеряется с помощью откалиброванного датчика HFCT по методу HVPD, применение такого расчета позволяет получить заряд в кулонах прямо из измерения импульса PD в милливольтках. Если на выходе датчика HFCT имеется напряжение  $V_{hf}$ , а передаточный импеданс HFCT равен  $Z_{hf}$ , то заряд импульса PD, измеренный в месте концевой заделки кабеля (в пКл), будет равен:

$$Charge = \frac{1}{Z_{hf}} \int V_{hf} * dt$$

Это измерение в области под однополярным импульсом PD в кабеле, который показан выше на рисунке 11.

Подобные импульсы PD могут появляться больше раза за цикл питания, в зависимости от степени активности места разряда. На рисунке 14 показана активность PD в течение цикла 50 Гц (длительностью 20 мсек). Можно заметить, что импульсы PD имеют большую величину в первой половине цикла по сравнению со второй половиной цикла. Такая картина типична, если импульсы исходят от металлоконструкции, контактирующей с высоким напряжением или землей. Импульсы с подобной характеристикой в течение цикла источника питания в течение многих лет использовались при лабораторном тестировании для изучения источника частичного разряда. Например, если частичный разряд полностью является коронным разрядом, то все частичные разряды будут иметь одинаковую высоту, и все будут начинаться на пике цикла питания 50 Гц.

Измерение значений частичных разрядов, подобных тем, что показаны на рисунке 14, можно сделать, просто измерив пиковые значения импульсов и подсчитав количество импульсов над пороговым значением. Этот простой метод измерения, используемый в течение многих лет, теперь позволяет характеризовать активность частичных разрядов в высоковольтных кабелях MV и распределительных устройствах, имеющих низкий уровень шумов. Однако в высоковольтных кабелях HV и их концевой заделке в уличных распределительных устройствах данный метод не дает полностью надежного результата из-за воздействия на измерение шумов (радиочастотных и коммутационных).



На рисунке: Chan 1 = Канал 1; Time (uSec) = Время (мксек)

Рисунок 14: Форма сигнала для частичных разрядов за цикл источника питания.



## **Факторы, влияющие на тестирование частичных разрядов в высоковольтных кабелях в рабочем режиме**

Тестирование высоковольтных кабелей может сопровождаться большим количеством внешних радиочастотных помех, воспринимаемых датчиком PD. При измерении на уличных распределительных устройствах уровень этих помех может быть выше уровня частичного разряда, так как мачты и соединения с воздушными высоковольтными линиями служат антеннами, принимающими радиосигналы. В подобных обстоятельствах любые сигналы частичного разряда будут смешиваться с большим количеством импульсных помех, и при проведении измерения по традиционному методу измерения пиковых значений и подсчета шумы будут приниматься за частичные разряды. Это приведет к появлению ложных результатов и к ошибочным выводам по результатам тестирования.

Следовательно, одной из основных задач при выполнении тестирования частичного разряда на высоковольтных кабелях и в уличных условиях является идентификация и обнаружение любых импульсов внутренних частичных разрядов (которые потенциально опасны для кабеля), с одновременным подавлением радиочастотных помех.

### **Влияние коронного и поверхностного разряда**

При измерении в уличных условиях источником сигналов разряда, похожих на поверхностный разряд, не всегда является тестируемая высоковольтная кабельная сеть. Источником подобных внешних сигналов может быть некритичный коронный или поверхностный разряд на концевой заделке тестируемого кабеля или другим, располагающемся поблизости высоковольтном оборудовании, а также разряды на поверхности влажных изоляторов.

### **Радиочастотные помехи**

Радиочастотные помехи могут создавать проблемы при измерении частичного разряда на уличных распределительных устройствах, так как мачты и соединения с воздушными высоковольтными линиями служат антеннами, принимающими радиосигналы. В подобных обстоятельствах любые сигналы частичного разряда будут смешиваться с большим количеством импульсных помех, и при проведении измерения по традиционному методу измерения пиковых значений и подсчета шумы результаты будут неудовлетворительными.

### **Анализ интерференции сигналов разряда**

При обнаружении сигналов разряда очень важно определить, где располагается их источник – рядом или вдалеке. Одним из критериев является использование нескольких датчиков и анализ времени прохождения сигнала. С помощью датчиков TEV было обнаружено, что прошедшие значительное расстояние сигналы имеют более протяженную «предварительную часть» и более длительное нарастание импульса до пикового значения по сравнению с теми сигналами, источник которых располагается около датчика. Это похоже на звук грома при ударе молнии. Чем дальше гроза, тем более размытым и менее похожим на импульс будет удар грома, вплоть до низкочастотного «рокота». И, наоборот, при близком ударе молнии звук грома будет больше похож на импульс, то есть будет иметь меньшую продолжительность, более высокую громкость и частоту.

Также следует упомянуть, что для разных источников форма сигнала также будет разной. Этому есть несколько причин.

- Источник импульсов находится рядом с датчиком, и в начале импульса сигнал имеет большую амплитуду.
- Сигналы частичного разряда, прошедшие некоторое расстояние, часто имеют пиковую амплитуду посередине.
- Импульсы от мест частичного разряда, располагающихся в кабеле, часто имеют однополярную форму.
- Проходящие по кабелю сигналы теряют часть своей высокочастотной составляющей, и имеют большее время нарастания и большую низкочастотную составляющую.



- Если источником частичного разряда является поверхность изоляторов, такие импульсы часто имеют большую длительность по сравнению с внутренним частичным разрядом в кабеле.
- Форма импульсов часто может определяться геометрией высоковольтной сети, являющейся источником их возникновения. Следовательно, для концевой заделки больших уличных кабелей и маленьких компонентов в небольших шкафах будут создаваться импульсы разного типа.

### Трассировка кабеля при частичном разряде в рабочем режиме (поиск места частичного разряда)

Прибор HVPD Longshot™ PD Spot Tester в сочетании с программой PD Map©, портативным транспондером и датчиками HFCT можно использовать для точного обнаружения местонахождения точки частичного разряда на участке высоковольтного кабеля. Данная технология использует принцип измерения TOF (Time-Of-Flight – время прохождения сигнала) для импульсов PD, проходящих по кабелю. Поступающий из изоляции кабеля импульс частичного разряда проходит как по заземленному экрану, так и по жиле кабеля. Измерение разницы во времени между приемом прямого импульса и импульса, отраженного от дальнего конца кабеля, позволяет определить место частичного разряда в кабеле с точностью менее 1% от его длины. Оборудование HVPD с помощью данного метода успешно обнаруживает места частичного разряда в кабеле с точностью менее 0,5% от длины кабеля (для кабелей до 5 км длиной, обратитесь к Приложению 2). Метод поиска места частичного разряда основывается на концепции, показанной ниже на рисунке 15. Как показано на рисунке, при возникновении частичного разряда импульсы PD перемещаются по экрану кабеля (и жиле кабеля) в обоих направлениях от места разряда. Первый импульс (прямой) поступает прямо на тот конец кабеля, где проводится измерение. Вторым импульсом, позволяющим определить место частичного разряда, является импульс, отраженный от противоположного конца кабеля и достигший того конца, на котором производится измерение. Такая технология называется «одностороннее обнаружение места частичного разряда» (Single-Ended PD Location) и является наиболее простым и быстрым методом обнаружения места разряда в кабеле, находящемся под напряжением.



Рисунок 15: Метод одностороннего обнаружения места частичного разряда.

Если прямой импульс и отраженный импульс идентифицировать невозможно, то найти место частичного разряда можно относительно легко с помощью метода одностороннего поиска (Single-Ended Location Method). Результаты выглядят следующим образом.

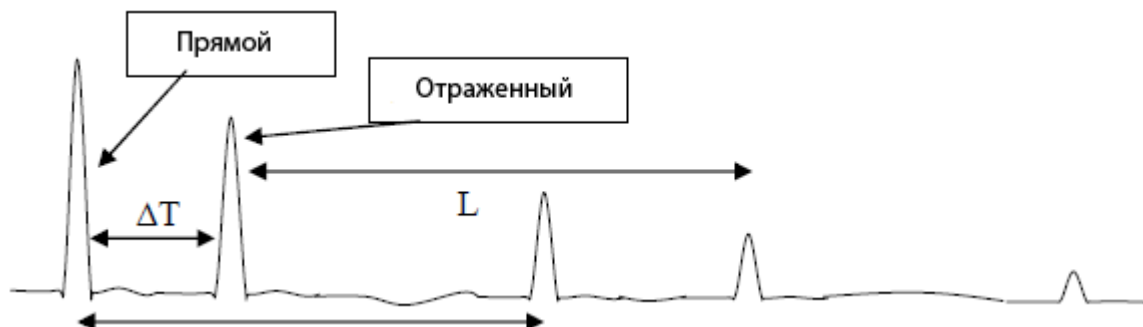


Рисунок 16: Последовательность импульсов PD со стороны проведения измерения.

Как показано на рисунке 16, разница по времени между первыми двумя импульсами (прямым импульсом и отраженным импульсом)  $\Delta T$  указывает на место частичного разряда. Как видно на рисунке, оба импульса продолжают перемещаться по кабелю, пока их уровень не сравняется с уровнем шумов. В течение этого времени импульсы отражаются точно на расстоянии  $L$  (время возврата импульса по кабелю) от предыдущего появления на той стороне кабеля, где проводится измерение. Это приводит к появлению серии импульсов уменьшающейся амплитуды, располагающихся друг от друга на расстоянии  $L$ . Если  $L$  - это время возврата по кабелю (что можно легко измерить с помощью устройства HVPD Longshot™ с программой PD Map©), то местоположение частичного разряда будет следующим:

Расстояние от стороны измерения (в % от длины кабеля) =  $100 \times (1 - \Delta T/L)$

Или:

Расстояние от дальнего конца кабеля (в %) =  $100 \times \Delta T/L$

### Требования к портативному транспондеру (пусковое устройство и импульсный усилитель)

В то время как метод одностороннего поиска места частичного разряда можно использовать в идеальных условиях, практика поиска местоположения частичного разряда в высоковольтных кабелях (как в рабочем, так и в нерабочем режиме) показала, что методы измерения с одной стороны кабеля сложно использовать на длинных кабелях и в некоторых других случаях. Можно столкнуться со следующими сложностями.

- Слишком большое затухание сигнала. Длинные кабели с высоким затуханием снижают амплитуду отраженного импульса до такой степени, что он теряется в фоновом шуме.
- Формы сигналов, полученные при измерении частичного разряда, сложно интерпретировать из-за помех, например, импульсных шумов электродвигателей, к которым подключен силовой кабель.
- Кабели, имеющие Т-образное соединение или составленные из нескольких длин, вносят более высокое затухание и отражения.
- Кабели с большим числом устройств RMU (Ring Main Unit) вносят затухание и (частично) отраженные импульсы.
- Кабели, не имеющие изменения импеданса на дальнем конце.

Решением данной проблемы является использование портативного транспондера РТТ 2000-СТ (смотрите рис. 17), который был специально разработан для поиска места частичного разряда в описанных выше случаях.



Рисунок 17: Портативный транспондер типа РТТ 2000-СТ Слева импульсный генератор, справа устройство запуска разряда.

Общий принцип работы заключается в следующем. Если датчик Signal HFCT (обнаружение сигнала), подключенный к устройству Transponder Trigger Unit, принимает импульс, который превышает регулируемый уровень запуска транспондера, то устройство запуска (Trigger Unit) подаст сигнал на импульсный генератор (Pulse Generator Unit), который подаст мощный импульс 100 В (на 50 Ом) на устройство Pulse Injection HFCT (подача импульса), которое передаст этот мощный импульс в кабель. Этот процесс позволяет превратить одностороннюю систему поиска местоположения частичного разряда в двустороннюю систему поиска.

Схема тестирования для двусторонней системы (Double-Ended PD Mapping Test) (с портативным транспондером) показана ниже на рисунке 18.

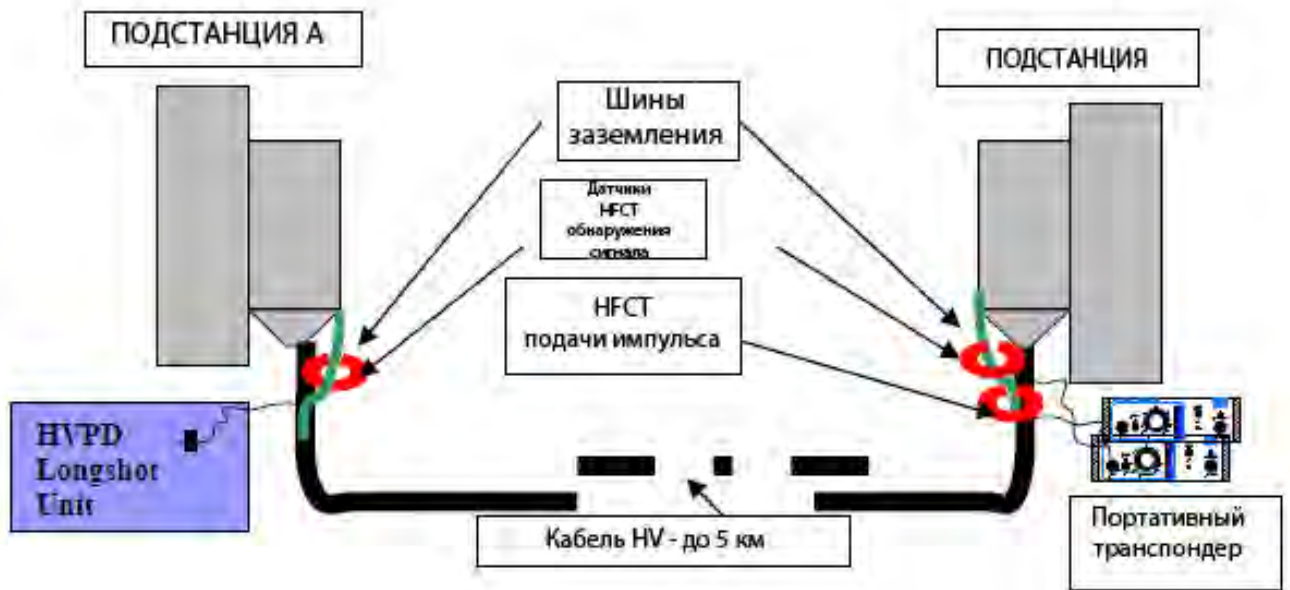


Рисунок 18: Двустороннее тестирование Double-Ended PD Mapping Test (с портативным транспондером).

Как видно на рисунке 18, доступ к шине заземления для проведения двустороннего измерения должен быть обеспечен с обоих концов кабеля. Главное преимущество двусторонней системы поиска места частичного разряда над односторонней системой заключается в том, что пользователю не нужно заниматься интерпретацией характеристики, полученной во время тестирования, так как это выполняется модулем Discharge Trigger Unit транспондера. Следовательно, возможность сделать второй импульс более заметным значительно упрощает поиск места разряда и делает процедуру более эффективной. В этом и заключается основная задача транспондера, который усиливает отраженный импульс, чтобы его было легко обнаружить (смотрите рис. 19).

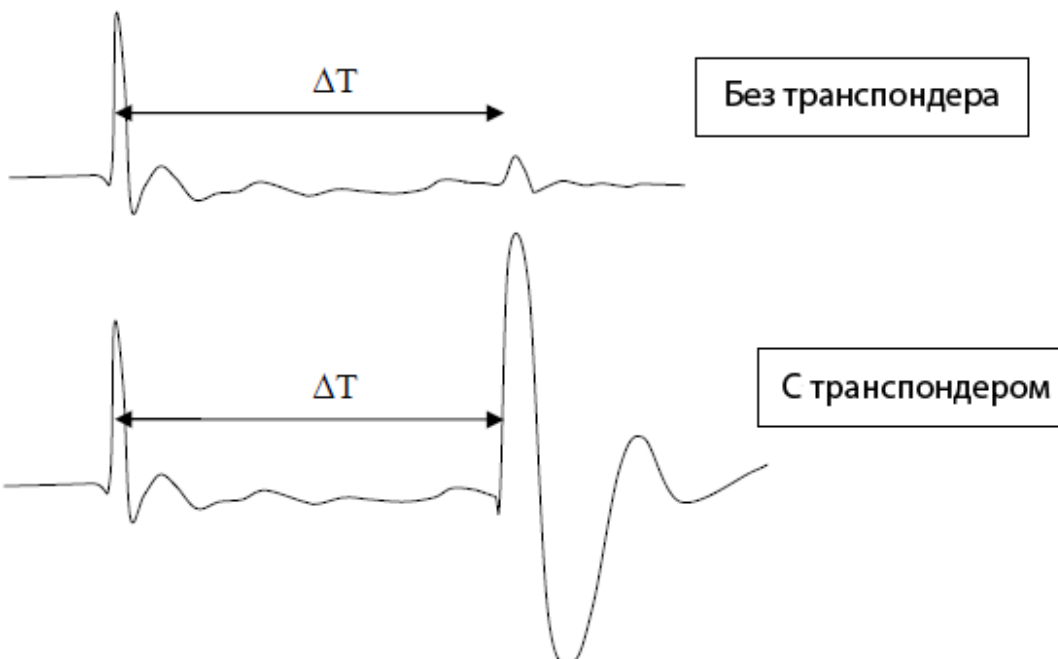


Рисунок 19: Обнаруживаемые датчиком HFCT импульсы PD с использованием и без использования транспондера;  $\Delta T$  = разница по времени между прямым и отраженным импульсами.



## PDMap© - Программа поиска места частичного разряда в рабочем режиме

Типовое изображение полученной при двустороннем тестировании (с использованием транспондера) с использованием программы PDMap© формы сигнала приводится ниже на рисунке 20. Показан прямой импульс PD (помеченный зеленым и желтым курсорами) и отраженный и переданный с транспондера импульс (помеченный левым синим курсором).

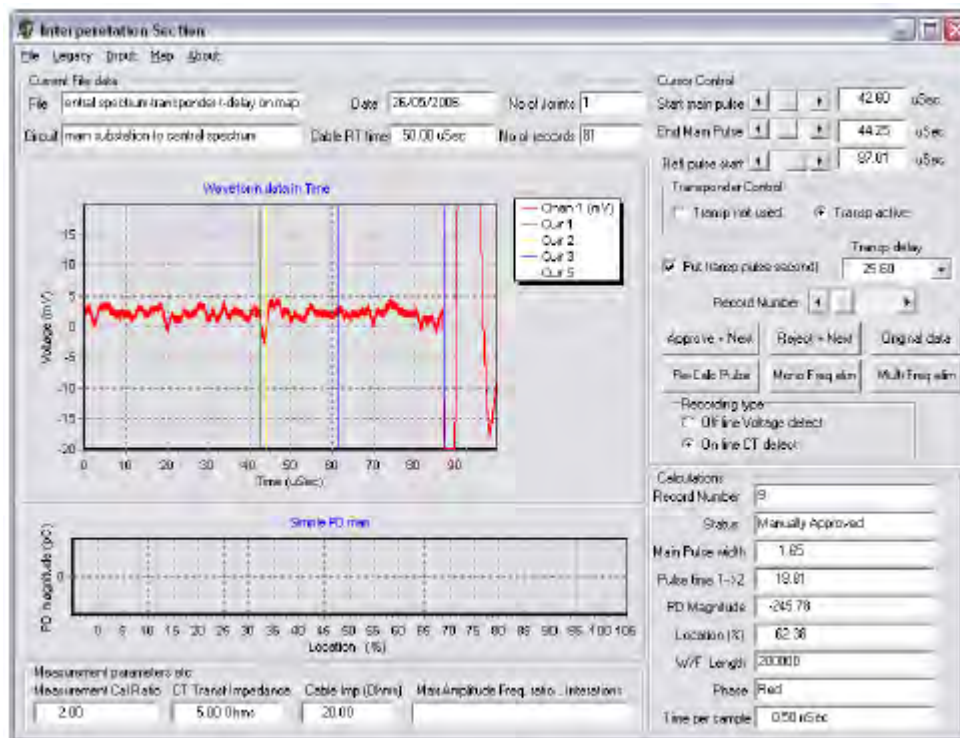


Рисунок 20: Пример главной страницы программы PDMap© (с транспондером)

Изучение двустороннего тестирования частичного разряда на примере энергоснабжающей компании в Великобритании приводится в Приложении 2. Там наглядно приводится пример результатов, полученных с использованием данной технологии. Более подробную информацию по разработанным компанией HVPD тестированию On-Line PD Test и технологии поиска места неисправности можно получить по электронной почте info@hvpd.co.uk.

\*\*\*Конец основной части документа\*\*\*

## Приложение 1: Тестирование частичного разряда в высоковольтных кабелях (MV), пороговые уровни для диагностики

Для того чтобы поместить результаты тестирования частичного разряда, полученные при проверке высоковольтных кабелей с помощью устройства HVPD Longshot© и датчика HFCT с разъемным сердечником, в контекст последующих инструкций, пользователю следует рассматривать пороговые уровни частичного разряда для высоковольтных кабелей напряжением от 6,6 кВ до 33 кВ (уровни пКл).

Следует заметить, что эти уровни PD базируются на опыте компании HVPD в тестировании частичного разряда (в основном на территории Великобритании) и не являются окончательными значениями. Приведенные уровни следует учитывать только для справки и в некоторых случаях рассматривать как завышенные. Не при каких обстоятельствах эти значения не должны быть основанием для составления отчетов (типа оценки состояния изоляции введенных в эксплуатацию высоковольтных кабелей), на основании которых принимаются какие-либо решения.



Пользователю/клиенту рекомендуется разработать свои собственные уровни частичного разряда в высоковольтных кабелях, как часть консультаций по диагностике с компанией HVPD и учебного курса по диагностике частичного разряда. Это позволит определить уровни частичного разряда для предприятий или действий различного уровня в сочетании с общим состоянием оборудования на сети, а также расписанием и бюджетом его обслуживания.

Оценка состояния изоляции	Цветовая кодировка	Частичный разряд в XLPE	Частичный разряд в PILC
Разряд в допустимых пределах		0 пКл – 250 пКл	0 пКл – 2500 пКл
Рекомендуется контроль		250 пКл – 350 пКл	2500 пКл – 5000 пКл
Рекомендуется регулярный контроль		350 пКл – 500 пКл	5000 пКл – 7000 пКл
Найдите место частичного разряда, проведите ремонт или замену		> 500 пКл	> 7000 пКл

Рисунок А1: Ориентировочные уровни PD для кабелей и муфт PILC и XLPE 11 кВ.

## Обсуждение

Ориентировочные значения значений частичного разряда для различных условий приводятся на рисунке А1. Из этого следует, что для кабелей PILC (кабелей в свинцовой оболочке с бумажной изоляцией) допустим разряд ниже 3000 пКл (зеленый сектор), значения от 3000 пКл до 10000 пКл должны вызывать тревогу (оранжевый сектор), а любые значения выше 10000 пКл (красный сектор) можно рассматривать, как потенциально ведущие к повреждению. В последнем случае проблему необходимо исследовать более внимательно (протестировать кабель, найти место неисправности и устранить ее).

Для кабелей XLPE (силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена) имеют значительно меньшие ориентировочные значения – для зеленого сектора это не более 250 пКл, для оранжевого от 250 до 500 пКл, а для красного (когда неисправностью необходимо заниматься вплотную) выше 500 пКл.

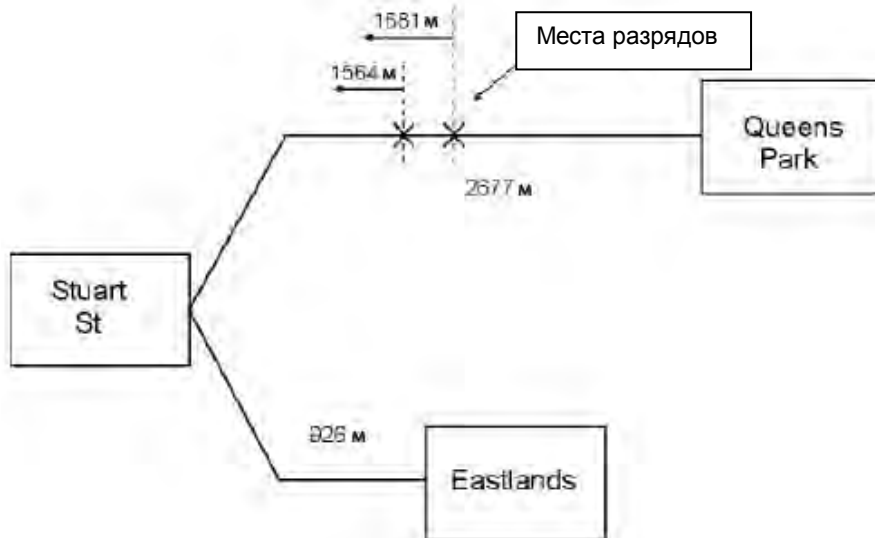
В случае использования кабелей разного типа (XLPE, PILC, EPR или других) необходимо найти источник разряда (место в кабеле), и только после этого принимать окончательное решение. Для поиска места частичного разряда используется специальная технология (разработанная компанией HVPD технология On-Line Cable PD Mapping Technology).

Значения уровней частичного разряда для различных условий (рисунок А1) для муфт и концевой заделки кабелей PILC и XLPE немного выше, чем для самих кабелей, так как подобные конструкции имеют больший объем изоляции по сравнению с самим кабелем, и обычно более стойкие к разрушениям, связанным с частичным разрядом.

## Приложение 2: Изучение конкретного случая: Поиск места возможного повреждения (начальной стадии неисправности) с использованием системы отображения частичного разряда в кабеле в рабочем режиме (On-Line PD Mapping System)

### Введение

На подстанции Grid/Primary (132 кВ/33 кВ) компании UK Electricity Distribution Company в июле 2002 года был установлен постоянный монитор частичного разряда HVPDOSM-F64. Это устройство постоянно контролирует четырнадцать распределительных панелей с питающими кабелями, так как они играют очень важную роль в системе, подавая питание в комплекс Manchester Commonwealth Games.



9 апреля 2003 года монитор HVPD передал пользователю и в компанию HVPD сигнал тревоги о наличии частичного разряда чрезмерно высокого уровня в линии Queens Park/Eastlands. На место прибыли представители компании HVPD Dr Lee Renforth и Dr Ross Mackinlay, которые использовали для тестирования прибор HVPD Longshot™ PD Spot Tester. Тестирование подтвердило высокий уровень разряда в проблемной линии, о чем был предупрежден владелец.

После совещания представителей владельца и инженеров HVPD 23 мая 2003 года было проведено тестирование с использованием программы PDMap© и портативного транспондера,



целью которого был поиск источника разряда.

От панели, на которой был обнаружен частичный разряд, кабели идут на два трансформатора на подстанциях Queens Park и Eastlands. С помощью технологии On-Line Cable Mapping в кабеле Queens Park на расстоянии приблизительно 1564 метра и 1681 метр от подстанции Stuart St были обнаружены два места частичного разряда. Величина разрядов составляла, соответственно около 6000 пКл и 9000 пКл, то есть, оба разряда соответствовали красному сегменту.

Рисунок А2: Места разрядов в кабеле Queens Park.

26 июня 2003 года были заменены муфты и кабель между ними. Следующее тестирование частичного разряда проводилось с подстанции Stuart St 4 июля, и показало, что частичный разряд исчез. На данном примере было кратко представлено использование устройства HVPD Longshot© и программы PDMap© для поиска мест частичного разряда.

### Поиск места частичного разряда: прибор HVPD Longshot© PD Spot Tester, портативный транспондер и программа PD Map©

Для поиска источника разряда использовалась система PD Map© On-Line Mapping System. Датчики HFCT портативного транспондера были установлены на стороне Stuart St на заземление кабеля Queens Park. Система была настроена на подачу высокочастотного импульса большой амплитуды (100 В) в заземление при обнаружении сигнала разряда. Измерение разницы во времени между сигналом транспондера и его отражением от конца кабеля позволило проверить длину кабеля и сверить ее с данными схемы кабельной сети владельца.

После этого на удаленных трансформаторах Queens Park и Eastlands снова были проведены измерения с использованием датчика HFCT, которые позволили получить значение интервала времени между разрядом и сигналом транспондера в заземлении кабеля.

### Результаты

Результаты показаны на рисунке А3. Полученные результаты измерений имеют максимальное значение около 6000 пКл и 9000 пКл. Следует заметить, что из-за импеданса кабеля импульсы разряда затухают в процессе перемещения по кабелю.

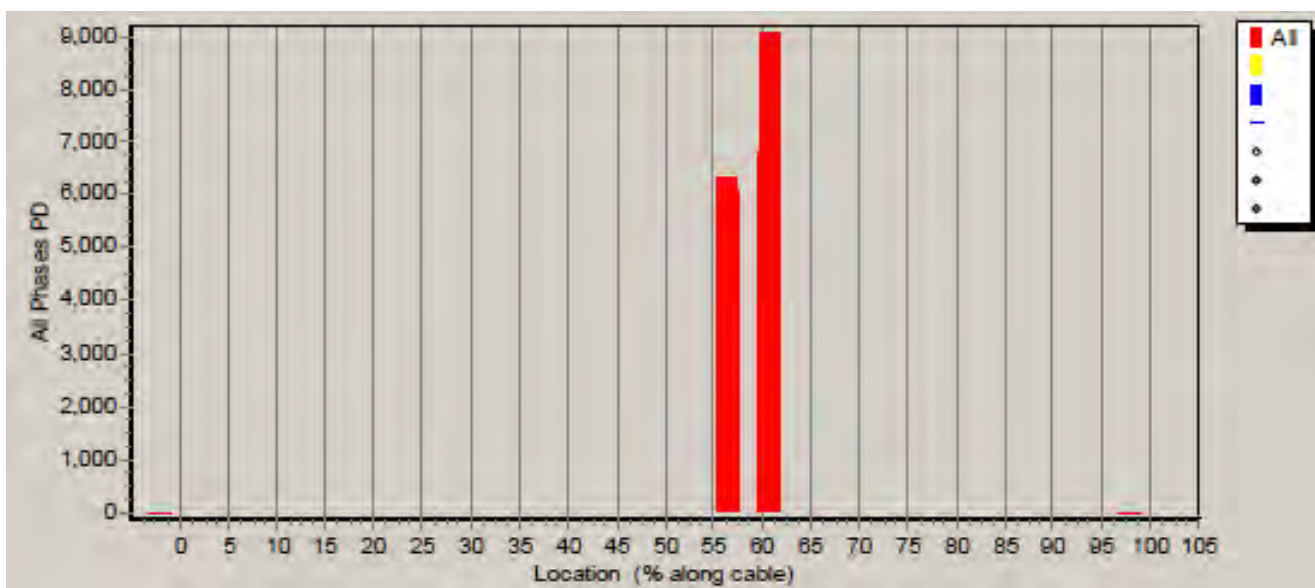


Рисунок А3: График для кабеля при измерении со стороны Stuart St. На рисунке: All Phases PD = Частичный разряд для всех фаз; All = Все; Location (% along cable) = Местоположение (в % от длины кабеля)

По результатам тестирования видно, что силовой кабель имеет два места частичного разряда. Характеристики PD Мар для этих точек показаны на рисунках А4 и А5.

На графике показаны следующие места частичного разряда:

Первая точка находится на расстоянии 58,4% (1564 метра) от Stuart St.

Вторая точка находится на расстоянии 62,8% (1681 метр) от Stuart St.

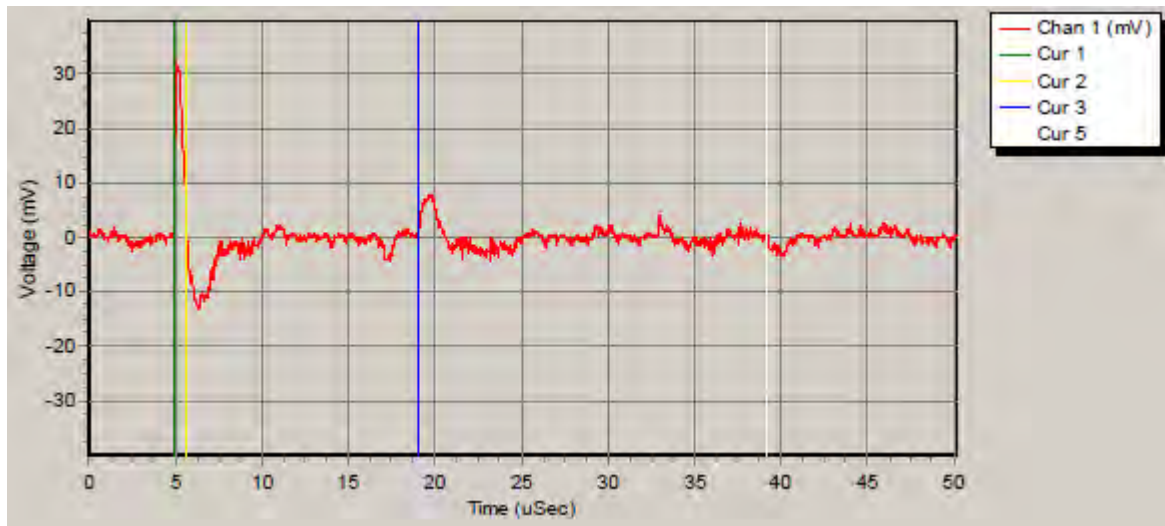


Рисунок А4: Характеристика тестирования частичного разряда в рабочем режиме (местоположение 58,4% от стороны Stuart St).

На рисунке: Voltage (mV) = Напряжение (мВ); Time (uSec) = Время (мксек);

Chan 1 (mV) = Канал 1 (мВ); Cur = Курсор

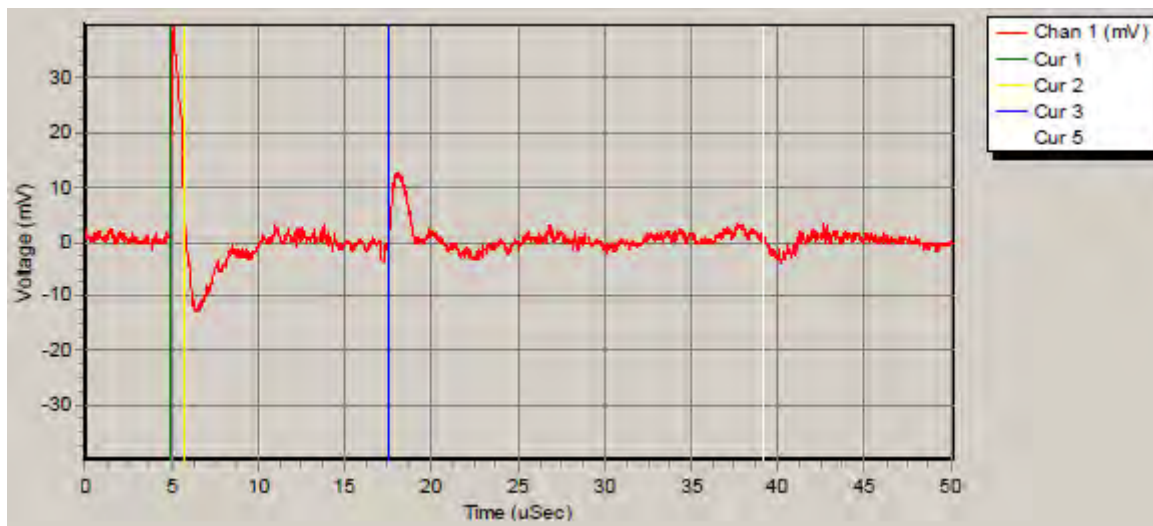


Рисунок А5: Характеристика тестирования частичного разряда в рабочем режиме (местоположение 62,8% от стороны Stuart St).

На рисунке: Voltage (mV) = Напряжение (мВ); Time (uSec) = Время (мксек);

Chan 1 (mV) = Канал 1 (мВ); Cur = Курсор

Полученные результаты были сравнены с трассой прокладки кабеля, местоположения частичных разрядов соответствуют тройниковой соединительной муфте на расстоянии 1575 метров (SJ8699/27) от Stuart St и следующей тройниковой соединительной муфте на

расстоянии 1695 метров (SJ8699/18) от Stuart St.

Осуществление поиска с использованием данной технологии позволяет получать результаты измерения с точностью 1% от длины кабеля. В приведенном примере точность измерения выше 1%, так как данные были получены при тестировании с обоих концов линии.

Хотя измерения и осуществлялись на шинах заземления кабелей на подстанции Stuart St, самые большие сигналы были получены на красной фазе.

## Заключение и выводы

Установленное на подстанции Stuart St устройство HVPD Longshot благодаря дистанционному анализу получаемых данных обнаружило частичный разряд на линии Queens Park. Уровень этого частичного разряда превышал пороговое значение, что привело к подаче сигнала тревоги. Данные для этой линии с высоким разрешением были загружены на сервер HVPD; анализ данных подтвердил наличие частичного разряда в кабеле.

Был предупрежден владелец сети и подготовлена серия тестов данной линии.

Тестирование выполнялось с подстанций Stuart St и Queens Park. Использование устройства HVPD Spot Tester с программами PD Gold© и PD Map© позволило установить два источника частичного разряда с похожей величиной на красной фазе кабеля. Расчет позволил получить расстояние соответственно 1564 метра и 1681 метр от подстанции Stuart St.

При проведении земляных работ в предполагаемых местах были обнаружены тройниковые соединительные муфты, которые с помощью измерения сигнала с помощью датчика TEV были идентифицированы как источники разряда. Точность обнаружения места неисправности составила приблизительно 0,4% и 0,7% от длины кабеля для соответствующих точек неисправности.

Последующие тесты были проведены с подстанции Stuart St после замены муфты и кабеля. Они показали, что частичный разряд полностью исчез, а поиск и замена муфт были проведены правильно. Это показано на рисунке А6.

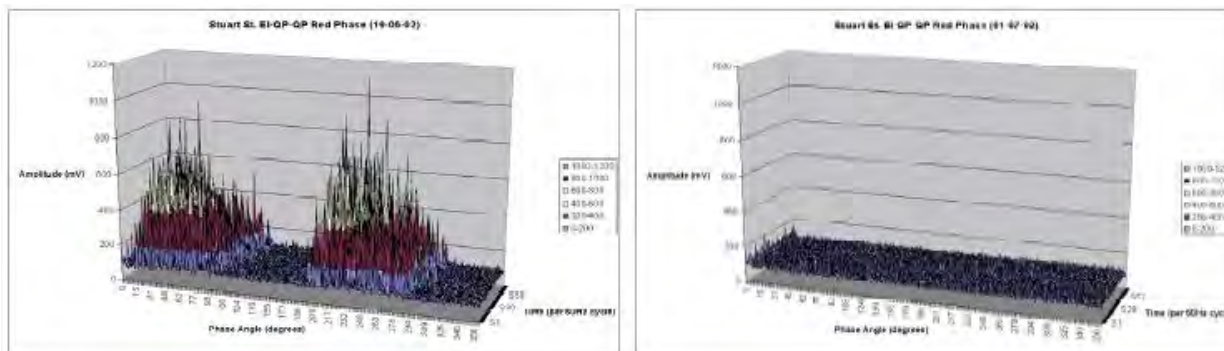


Рисунок А6: Частичные разряды до и после замены муфт.

А: Сигналы частичного разряда, обнаруженные в силовом кабеле прибором HVPD-P32 в течение одного часа при тестировании до замены двух неисправных муфт.

В: Сигналы, записанные для того же кабеля прибором HVPD-P32 в течение одного часа при тестировании после замены двух неисправных муфт.