



Определение остаточного ресурса КЛ методом измерения ЧР под рабочим напряжением

D. Clark¹ R. Mackinlay² M. Seltzer-Grant² S. Goodfellow² Lee Renforth² Jamie McWilliam³ и Roger Shuttleworth¹
¹University of Manchester, UK, ²HVPD Ltd, UK, ³Scottish Power, UK

Введение

Эксплуатационные характеристики силовых кабелей зависят от ряда факторов. Но до сих пор не установлена количественная зависимость от наиболее очевидных из них, что является явным пробелом в исследованиях. Однако в защиту исследователей следует сказать, что определение зависимости срока службы кабелей от различных факторов не является итогом простого накопления результатов. Другой немалой трудностью является то, что временные рамки деградации кабелей и появления в них неисправностей, как правило, очень длительные. Зачастую кабели живут дольше самих исследователей. В данной работе мы ищем взаимосвязь между отказами в работе и частичным разрядом (PD) на силовых кабелях. Кроме того, мы собираемся сообщить о прогрессе в определении мест частичного разряда по форме импульсов. Это позволяет путем проведения простых измерений выявить места возникновения частичных разрядов. И хотя этот метод не настолько точен, как методы измерения кабеля с двух сторон (например, с использованием транспондеров и т.д.), тем не менее, он является достойным дополнением к спектру средств диагностики высоковольтных кабелей.

При проведении сравнения эксплуатационных характеристик силовых кабелей и активности частичного разряда существует несколько моментов, которые следует принять во внимание. Во-первых, частичный разряд (особенно на кабелях с бумажной изоляцией) является основной причиной долгосрочного ухудшения изоляции силовых кабелей. Конечно, возникают и химические изменения, но они обычно связаны с попаданием влаги или окислителей, и, как правило, списываются на механические повреждения. Трещины во внешней свинцовой оболочке кабелей с бумажной изоляцией обычно не рассматриваются как повреждения изоляции (хотя очевидно, каким будет конец), и это действительно механическое повреждение структуры кабеля. Таким образом, подавляющее большинство повреждений изоляции в кабелях с бумажной изоляцией (и в меньшей степени в кабелях с полимерной изоляцией) связано с ухудшением из-за частичного разряда.

Поиск мест активности частичного разряда по существу является предотвращением «смерти» тех компонентов структуры кабеля, которые ответственны за возникновение частичного разряда. Однако записи об обслуживании «оглядываются» назад на предыдущие характеристики кабелей, причем только с точки зрения статистики. Будет ли это связано с оценкой возможности неисправности в будущем? Имеющиеся (и распределенные вдоль кабеля) производственные дефекты могли бы быть причиной таких неисправностей, и рабочие характеристики кабелей с неисправностью могут также служить в качестве предсказания возможных характеристик в будущем. Но, в общем, такой связи нет, и это делает данное исследование немного похожим на экономические прогнозы, когда мы знаем почти все о прошлом, и не готовы сказать практически ничего о будущем. Эта статья является попыткой примирения двух взглядов на рабочие характеристики кабеля, с описанием возможности использования прогнозирования для дополнения «экономического» взгляда на проблему.

Частичный разряд и линии с худшими рабочими характеристиками

Один из наших авторов помогал в создании значений параметров для кабелей с бумажной изоляцией и свинцовой оболочкой (PILC), имеющих наихудшие рабочие характеристики. Это записи о неисправностях, полученные последовательно за ряд лет. Они относятся как к кабелям 11 кВ, так и к кабелям 33 кВ. В этой программе некоторые из линий с наихудшими характеристиками тестировались с использованием онлайн-методов определения частичного разряда, предлагаемых компанией HVPD. Тестирование всех линий в режиме онлайн для любой подстанции позволяет изучать как кабели с худшими характеристиками (т.е. наши целевые кабели), так и кабели с «нехудшими» характеристиками. В результате получается сочетание обоих типов кабелей, что и является предметом данного исследования.

Таблица 1: Статистика отказов для 113 линий за семь лет

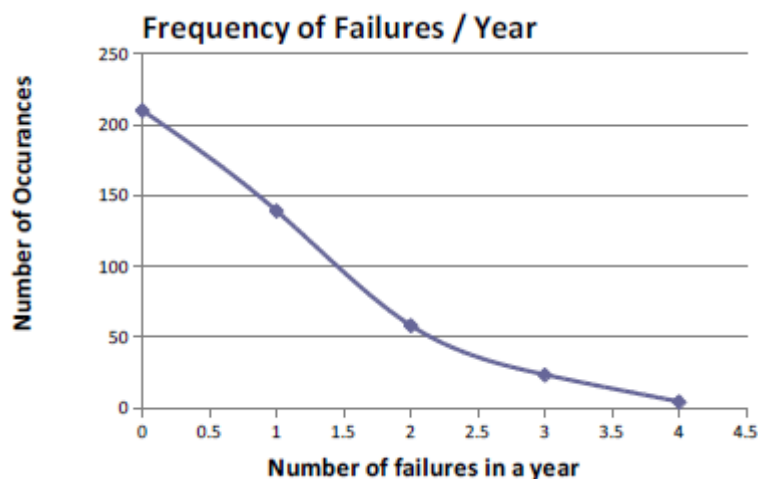
Общая длина линий (км)	Средняя длина линии (км)	Среднее количество отказов в год	Среднее количество отказов на 100 км в год
791	7,0	90,7	11,47

В таблице 1 показана статистика отказов для набора из 113 линий за семь лет. Обратите внимание, что среднее количество отказов составляет более 11 отказов на 100 км в год. Для «нормальных» линий коэффициент отказов, вероятно, будет в 10 раз меньше, но эти кабели представляют собой линии с наихудшими характеристиками.

Мы представили более «статистическую» идею вероятности выхода линии из строя, к примеру, P_i для любой линии i . Она просто связана с коэффициентом отказов на 100 км в год в соответствии с уравнением (i).

$$P_i = \frac{F_i L_i}{100} \quad (i)$$

Где F_i и L_i являются коэффициентом отказа линии на 100 км в год и длиной линии (в км), соответственно. Из статистики отказов, т.е. количества отказов, происходящих в любой конкретный год, мы можем вывести вероятность отказа линии ноль, один, два, три раза и т.д. Это непосредственно связано с P_i .



Frequency of Failures/Year	Частота отказов в год
Number of Occurances	Количество случаев
Number of failures in a year	Количество отказов в год

Рисунок 1: Количество повреждений для 61 кабеля с худшими характеристиками в течение семи лет.

На рисунке 1 показана подобная картина для 61 линий за семь лет подряд. Соотношение отсутствия отказов к одному отказу приводится в уравнении ii.

$$P(F, 1) = \frac{1 - P_i}{P_i} \quad (ii)$$

По этой формуле можно рассчитать вероятность отказа, и, следовательно, количество отказов на 100 км в год. Для данных на рисунке 1 рассчитанная вероятность отказа $P_i = 0,398$. С учетом средней длины линии в 7,0 км, это дает $F_i = 5,7$ отказов на 100 км в год. Имейте в виду, что данные на рисунке 1 отличаются от усредненных данных в Таблице 1, и средняя длина линии для данных на рисунке 1 неизвестна. Самым интересным на рисунке 1 является то, что даже в случае линии с наихудшими характеристиками, наиболее вероятным результатом является то, что в том или ином году линии не выходят из строя. Такое просто невозможно ожидать для худших линий на распределительной сети.



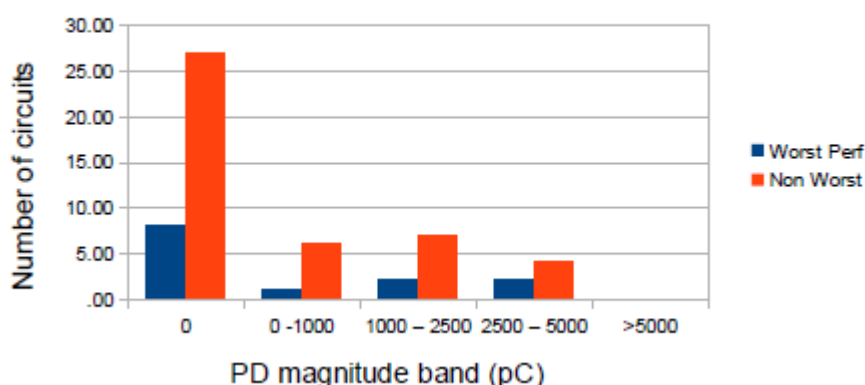
При установке взаимосвязи между записями о неисправностях линий и выполненными в режиме онлайн измерениями частичного разряда должна быть установлена определенная связь между данными о прошлых отказах и будущими характеристиками по результатам измерения частичного разряда. В этой работе 56 линий, 13 из которых входили в список «наихудших характеристик», а 43 не входили, были протестированы в режиме онлайн на наличие частичного разряда.



Рисунок 2: Установка датчика HFCT (высокочастотный трансформатор тока).

Измерения частичного разряда в режиме онлайн выполнялись с использованием высокочастотных трансформаторов тока (HFCT), устанавливаемых на заземлители кабеля или сами кабели над точкой подсоединения заземлителя. На рисунке 2 показано типовое закрепление датчика HFCT на установке 11 кВ. Для получения качественных данных частичного разряда обратите внимание на требование к изолирующему уплотнению. Данные тестирования частичного разряда суммированы на рисунке 3, где для групп с различной величиной частичного разряда показаны пиковые уровни.

Distribution of PD magnitudes



Distribution of PD magnitudes	Распределение величин частичного разряда
Number of circuits	Количество линий
Worst Perf	Худшие характеристики
Non Worst	Не относящиеся к худшим характеристикам
PD magnitude band (pC)	Диапазон величин частичного разряда (пКл)

Рисунок 3: Распределение величин частичного разряда для измерения в режиме онлайн 56 кабелей напряжением 11 кВ и 33 кВ.



Кабели, относящиеся к линиям с худшими характеристиками, вполне понятны, но те кабели, которые не относятся к этому классу, являются просто случайным набором линий. Ни в каком смысле они не являются «лучшими по характеристикам».

Чтобы понять смысл данных на рисунке 3, следует установить, существует ли какая-либо статистическая разница между двумя классами линий (т.е. с худшими и не с худшими характеристиками). Для этого можно использовать отношение количества линий с разрядами к количеству линий без разрядов, и сравнить эти значения между двумя классами линий. Разработанные компанией HVPD Ltd для силовых кабелей PILC практические правила указывают, что любой кабель с частичным разрядом менее 2500 пКл считается находящимся в допустимых пределах (с точки зрения активности частичных разрядов). Для своих целей мы использовали меньшее значение, например, 1000 пКл, на том основании, что это должно обеспечивать получение результатов с большей чувствительностью. Следовательно, если мы сравним количество линий с частичным разрядом менее 1000 пКл с количеством линий с частичным разрядом более 1000 пКл, то два класса линий должны быть прямо сопоставимы; это соотношение обозначено в уравнении iii как Rp.

$$Rp = \text{Количество линий} < 1000 \text{ пКл} / \text{Количество линий} > 1000 \text{ пКл} \text{ (iii)}$$

Таблица 2: Сравнение линий с худшими характеристиками с линиями с «нехудшими» характеристиками.

Обозначение линии	Rp
Линии с худшими характеристиками	1,8
Линии с «нехудшими» характеристиками	5,14

В таблице 2 показаны два соотношения. Хотя ясно, что смысл названия линий с худшими характеристиками явно демонстрирует результаты онлайн-тестирования частичного разряда. Сделав некоторые простые выводы по данным частичного разряда, следует выдвинуть определенные соображения по наработке на отказ и возникновению частичного разряда.

Давно утверждается, что частичный разряд является только долгосрочным механизмом ухудшения состояния изоляции кабеля. (Сюда не входит износ оболочки кабеля и попадание воды, которые являются отдельными причинами и слабо связаны с долгосрочным ухудшением изоляции.) Можно сделать предположение о скорости возникновения, скажем, Mk (где k является своеобразным индексом позиции кабеля) как скорости появления мест отказов в кабеле. Если время до появления неисправностей в этих местах Tk (и, конечно же, мы не упоминаем о скоростях или градиентах Tk относительно времени), то простые эксперименты позволяют сделать вывод, что введение Tk только задерживает появление неисправности, откладывая ее на более поздний срок. Если все значения Tk были короткими или мгновенными, то неисправности будут распределяться в соответствии со скоростью образования Mk. Глядя на данные частичного разряда для линий с «нехудшими» характеристиками (а фактически также и на некоторое количество линий с худшими характеристиками), подавляющее большинство линий не покажут никакой активности частичного разряда. Это имеет мгновенное воздействие, то есть, если в долгосрочной перспективе ухудшение и неисправность связаны с частичным разрядом, наработка на неисправность Tk должна иметь короткое значение времени. Если, скажем, Tk = 10 лет, то все линии с худшими характеристиками будут показывать частичный разряд на протяжении всех семи лет сбора данных о неисправностях, но это явно не так, так как более половины не показывают частичного разряда вообще. Это означает, что время наработки на отказ должно быть коротким, статистически менее двух лет, чтобы дать подавляющее большинство наблюдаемых результатов с низким или нулевым частичным разрядом. Реально это будет подтверждено только, если кабели отслеживаются и в будущем проводятся измерения частичного разряда, подтверждающие такое поведение. Занимательно, что имеются некоторые свидетельства того, что в кабелях PILC в течение длительного времени происходит ухудшение небольшого уровня, после которого следует гораздо более быстрый рост до неисправности. Подтверждение (или опровержение) этого сыграет большую роль в понимании функционирования линии.

В следующем разделе основное внимание уделяется поиску местоположения частичного разряда в режиме онлайн с помощью только одного датчика.



Распространение импульса в силовых кабелях

Переходные процессы в системе электропитания, например, импульсы частичного разряда, часто имеют широкий частотный спектр, обычно в диапазоне от постоянного тока до МГц. Процессы разряда создают короткие импульсы с крутым фронтом, которые распространяются с некой, зависящей от частоты, скоростью $v(\omega)$ по проводнику кабеля и земле. Понимание распространения импульсов от места разряда до точки измерения играет важную роль в обнаружении дефектных участков изоляции кабеля, а также в оценке степени пробоя изоляции. Уменьшение амплитуды и увеличение длительности импульса свидетельствуют о том, что при перемещении по кабелю к точке измерения импульс частичного разряда искажается и теряет свою первоначальную форму. Изменения формы сигнала частичного разряда зависят от частоты и преимущественно возникают за счет потерь от поверхностного эффекта из-за наличия в кабеле полупроводниковых слоев, которые в большей мере ослабляют высокочастотные компоненты импульсов частичного разряда.

Для описания изменений, которые претерпевает отдельный импульс частичного разряда, можно использовать форму частотно-зависимой постоянной распространения, приведенной в уравнении iv.

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (\text{iv})$$

$$= \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \quad (\text{v})$$

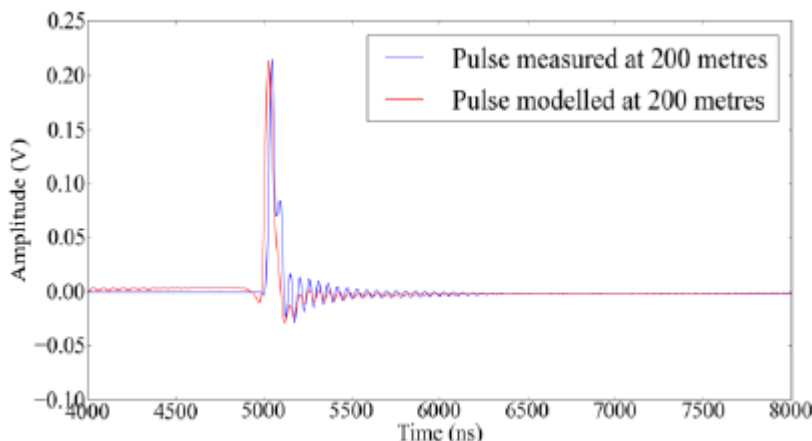
Уравнение v является еще одной формой выражения частотно-зависимого затухания (α) и фазовой постоянной (β). Включение основных параметров кабеля, т.е. сопротивления (R), индуктивности (L), проводимости (G) и емкости (C), если такие параметры известны, в формулу позволяет рассчитать затухание и удлинение импульса. Для многих кабелей эти параметры можно определить путем измерения, если они не объявляются производителями. Вместо этого для описания искажения импульса применяется метод, заключающийся в использовании частотно-зависимой передаточной функции, приведенной в уравнении vi.

$$H(\omega) = e^{-\gamma(\omega)l} \quad (\text{vi})$$

$$= \frac{v(\omega)_l}{v(\omega)_0} \quad (\text{vii})$$

Уравнение vii представляет собой отношение импульсов на некотором расстоянии l и на 0 (u источника), оба выраженные в частотной области. Затухание и удлинение импульса определяется поведением действительной и мнимой частей передаточной функции, приведенной в уравнении ii, и напрямую связаны с геометрией кабеля и диэлектрическими свойствами изоляции. Разделение передаточной функции на действительную и мнимую части является применением метода Леви, и может помочь понять поведение параметров в зависимости от частоты. Прохождение импульсов частичного разряда по кабелю приводит к изменению таких параметров, как время нарастания импульса, время спада импульса, длительность, амплитуда и энергия импульса, за счет эффекта рассеяния линии передачи, в данном случае силового кабеля. Точное изменение параметров импульса в зависимости от расстояния распространения является основополагающим фактором для поиска мест частичного разряда при одностороннем измерении на основе анализа формы импульса.

Применение постоянной распространения в частотной области позволяет оценить форму импульса частичного разряда и получить приблизительные характеристики на различных расстояниях вдоль силового кабеля. Такое моделирование распространения импульса может помочь при одностороннем поиске мест частичного разряда, а также оценке степени разряда в месте его источника. Первоначально для определения достоверности технологии моделирования распространения импульса эксперименты с подачей импульсов проводились на кабелях коаксиального типа RG223. С помощью подачи импульса можно было моделировать импульс на расстоянии 200 метров, как показано на рисунке 4.



Pulse measured at 200 meters	Импульс, измеренный на расстоянии 200 метров
Pulse modeled at 200 meters	Импульс, смоделированный на расстоянии 200 метров
Amplitude (V)	Амплитуда (В)
Time (ns)	Время (нс)

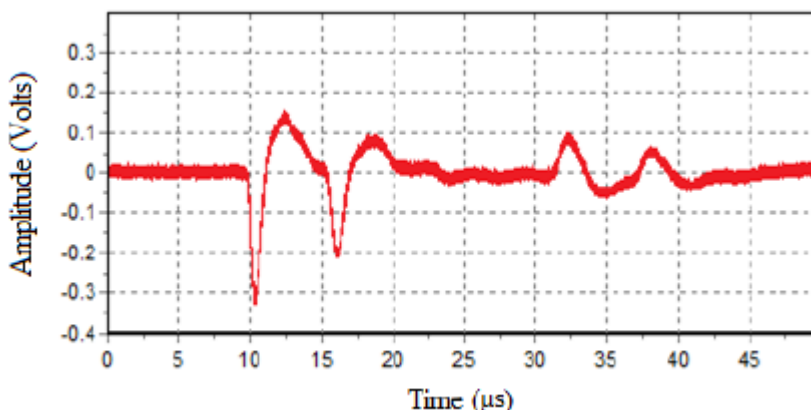
Рисунок 4: Измеренный и предсказанный импульсы на расстоянии 200 метров.

Учитывая коаксиальную структуру высоковольтных силовых кабелей, можно было расширить технологию моделирования распространения импульса на фактические силовые кабели. В следующем разделе представлены два практических примера онлайн-тестирования частичного разряда на распределительных сетях напряжением 33 кВ в Великобритании, где места разряда определяются с помощью рефлектометра (TDR) и подтверждаются с помощью описанного выше теоретического подхода.

Практические примеры

Пример 1: Тестирование частичного разряда и определение его местоположения на распределительной сети напряжением 33 кВ в Великобритании.

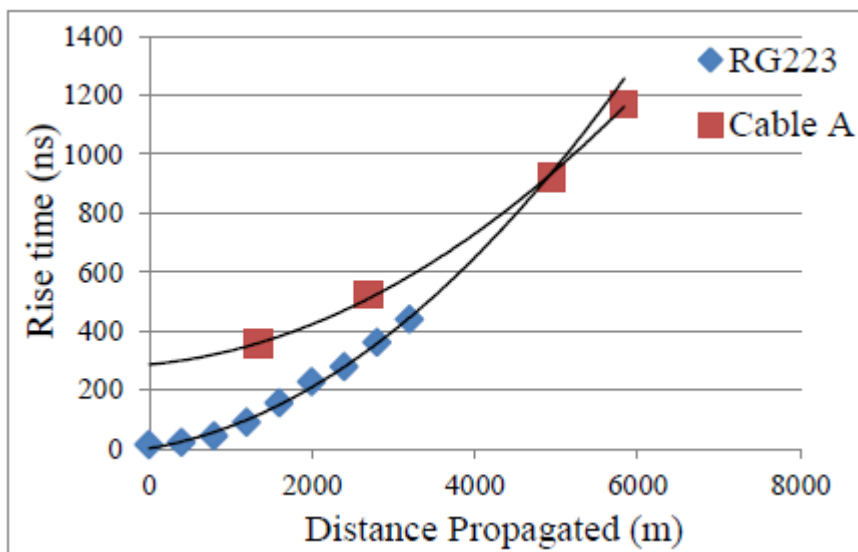
Измерения частичного разряда проводились в режиме онлайн на двух кабелях 33 кВ, кабеле А и кабеле В, по которым питание подается на понижающие трансформаторы, Тх А. Кабель А имеет длину приблизительно 1762 метра. Возникновение неисправностей в кабелях на протяжении многих лет означало, что участки кабелей типа PILC заменялись 25-метровыми участками кабеля XLPE. Измерение импульсов частичного разряда на кабеле А показано на рисунке 5.



Amplitude (Volts)	Амплитуда (В)
Time (µs)	Время (мкс)

Рисунок 5: Импульсы частичного разряда, измеренные на фидере 33 кВ – кабель А.

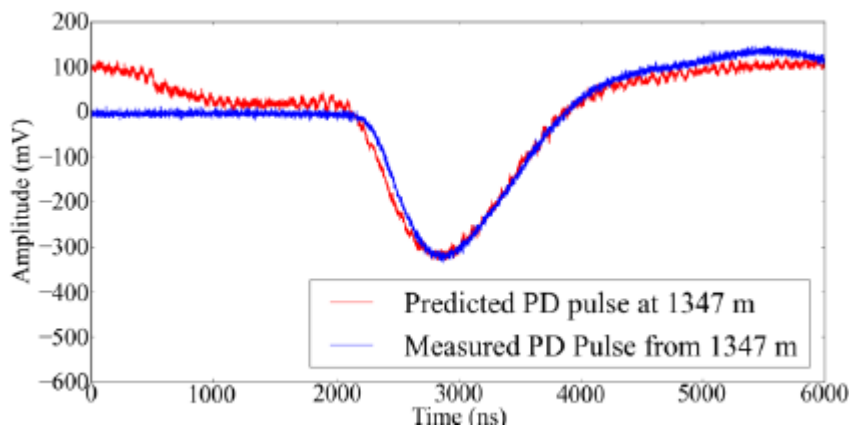
Использование комбинации программного обеспечения отображения частичного разряда и анализа формы сигнала позволило по отдельности определить параметры прямого и отраженного импульсов частичного разряда, показанных на рисунке 5, а также приблизительное местоположение разряда, и, следовательно, узнать приблизительное расстояние распространения импульсов. По рисунку 5 можно было рассчитать параметры каждого из четырех импульсов, что позволяет сделать расчет параметров импульсов в зависимости от расстояния распространения. Хотя коэффициенты отражения и передачи (Γ и T , соответственно) могут искажать форму импульса частичного разряда и изменять его параметры, значительный импеданс трансформатора гарантирует, что на трансформаторной стороне линии импульс встречается с тем, что можно рассматривать как виртуально разомкнутую цепь, и, следовательно, отражается и сохраняет большую часть своей энергии. Чтобы проиллюстрировать изменение формы импульса частичного разряда с пройденным расстоянием, на рисунке 6 в увеличенном виде показано время нарастания измеренного и имитирующего импульса частичного разряда.



Cable A	Кабель А
Rise time (ns)	Время нарастания (нс)
Distance Propagated (m)	Расстояние распространения (м)

Рисунок 6: Время нарастания имитирующего импульса и импульса частичного разряда в зависимости от расстояния распространения.

Показанные на рисунке 6 полиномиальные кривые были наложены на графики имитирующего импульса (передаваемого по коаксиальному кабелю RG223) и измеренного импульса частичного разряда, чтобы показать нелинейную зависимость времени нарастания импульса от расстояния. Увеличение времени нарастания импульса с расстоянием происходит за счет ослабления его высокочастотной составляющей, которая составляет быстро нарастающий фронт импульса.



Amplitude (mV)	Амплитуда (мВ)
Predicted PD pulse at 1347 m	Прогнозируемый импульс частичного разряда на расстоянии 1347 метров
Measured PD pulse from 1347 m	Измеренный импульс частичного разряда на расстоянии 1347 метров
Time (ns)	Время (нс)

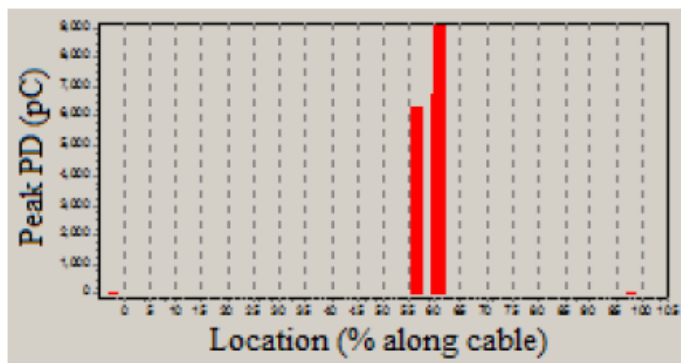
Рисунок 7: Измеренный и прогнозируемый импульсы частичного разряда на 1347 метров от питающего кабеля 33 кВ.

Выше на рисунке 7 показан прямой импульс частичного разряда, измеренный с помощью датчика HFCT (высокочастотный трансформатор тока), и идентичный импульс частичного разряда, созданный для кабеля с помощью передаточной функции. С помощью описывающих затухание и удлинение импульса уравнений появилась возможность воспроизвести импульс частичного разряда, измеренный на расстоянии 1347 метров, основываясь на отражении от дальнего конца кабеля. Прогнозирование формы импульса частичного разряда на различных расстояниях способно помочь в поиске мест разряда на силовых кабелях с односторонним измерением, так как параметры отдельных импульсов можно рассматривать в зависимости от расстояния распространения.

Пример 2: Линии напряжением 33 кВ с кабелями разного типа

Два распределительных трансформатора 33/6,6 кВ, 14 МВА Т1 и Т2 питаются от линии с Т-образным соединением кабелей. Линия 1 имеет длину 2677 метров с 28 муфтами, и состоит из комбинации кабелей PILC, XLPE и EPR сечением 185 мм² и длиной от 150 до 3 метров, некоторые из которых проложены еще 1930 году. Линия 2 имеет длину 926 метров, пять муфт, и представляет собой медный кабель XLPE сечением 240 мм², введенный в эксплуатацию в 2001 году. С помощью предустановленного модуля мониторинга частичного разряда была обнаружена активность частичного разряда высокого уровня, что явилось поводом для поиска места частичного разряда, результаты которого представлены здесь.

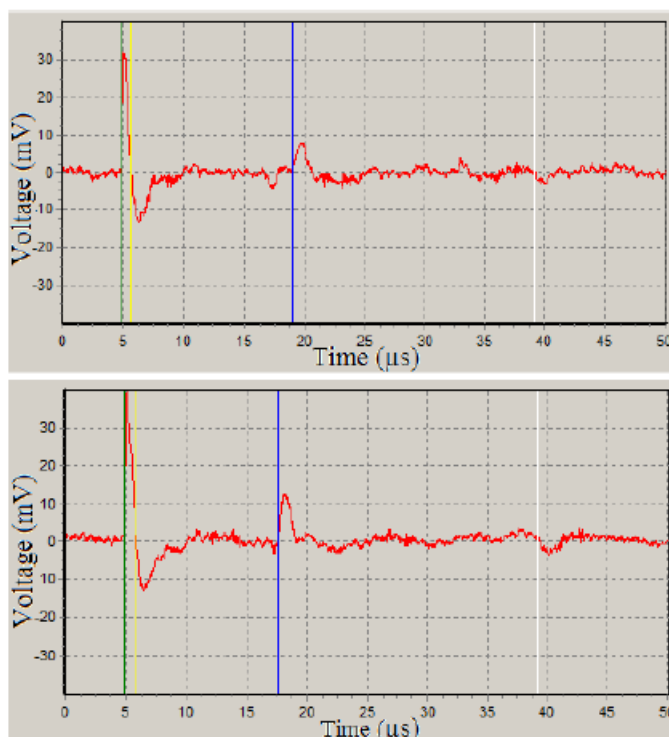
Работа по поиску местоположения частичного разряда показывает две точки активности частичного разряда на линии 1 приблизительно в следующих местах: первое место на расстоянии 1564 метра от первичной подстанции, а второе место на расстоянии 1681 метр. Эти места могут соответствовать разветвительной муфте в точках 1575 метров (SJ8699/27) от первичной подстанции 33 кВ и следующей разветвительной муфте в точке 1695 метров (SJ8699/18). На рисунке 8 показано расположение мест частичного разряда с указанием двух различных точек активности частичного разряда в форме процента расстояния вдоль кабеля.



Peak PD (pC)	Пиковое значение частичного разряда (пКл)
Location (% along cable)	Местоположение (% длины кабеля)

Рисунок 8: Места частичного разряда для линии 1.

Красные гистограммы на рисунке 8 показывают уровень активности частичного разряда (пКл) на соответствующих участках. Проведение работ по определению местонахождения показало, что места частичного разряда в кабеле вполне соответствуют местам муфт. По отдельности формы сигналов от двух мест частичного разряда показаны на рисунке 9. Разница по времени между прямым и отраженным импульсами частичного разряда (соответственно зеленая и синяя линии на рисунке 9) подтверждает, что в кабеле на самом деле имеются два различных источника частичного разряда. Примеры импульсов частичного разряда для двух источников приведены на рисунке 9. Разница во времени между прямым и отраженным импульсами отличается для двух мест разряда, так как они имеют разное расстояние распространения.



Voltage (mV)	Напряжение (мВ)
Time (us)	Время (мкс)

Рисунок 9: Импульсы частичного разряда от двух разных источников на линии 1.

Если руководствоваться рисунком 9, верхняя кривая соответствует, как было установлено, муфте 27 на расстоянии 1575 метров, а нижняя кривая соответствует муфте 18 на расстоянии 1695 метров. Этот



пример показывает применимость метода поиска местоположения частичного разряда в режиме онлайн для определения мест разряда на силовые кабели 33 кВ, используемых на распределительных электрических сетях.

Выводы

Были изучены некоторые линии с худшими характеристиками на распределительных сетях. Для оценки линий использовались методы измерения частичного разряда в режиме онлайн, были проведены сравнения и анализ статистики и были получены данные частичного разряда. Также использовались методы поиска мест активности частичного разряда в режиме онлайн с помощью рефлектометра (TDR), поддерживаемые анализом формы импульса при измерении с одной стороны.

Сделаны следующие выводы:

- Представлена статистика выхода из строя линий с наихудшими рабочими характеристиками, показывающая, что даже для линий этого класса наиболее вероятным результатом в той или иной год является отсутствие повреждений.
- Показана взаимосвязь между вероятностью отказа и количеством отказов на 100 км в год. В статистическом анализе вероятность выхода из строя зачастую является более полезным показателем.
- Показана разница между результатами измерения частичного разряда в режиме онлайн для линий с худшим и «нехудшими» параметрами. Она демонстрирует существенные различия, что подразумевает действительное различие результатов измерения частичного разряда между кабелями с худшими и «нехудшими» характеристиками.
- Из большого количества измерений частичного разряда, которые были нулевыми или меньшими, чем 1000 пКл, понятно, что время выхода из строя линий с частичным разрядом должно быть относительно коротким, и, как правило, оно составляет менее двух лет с зарождения большого частичного разряда в кабеле.
- Форму сигнала для событий частичного разряда на кабелях PILC можно рассчитать, исходя из параметров кабеля, и использовать эти данные для расчета местоположения частичного разряда. Этот метод не настолько точен, как при использовании транспондера, но его можно использовать при одностороннем измерении.