

Диагностика оборудования и кабельных линий без вывода в ремонт

Однажды, это было уже году в сорок седьмом, произошла авария в начале Лиговского проспекта. Пробило кабель, и целый квартал остался без света, без энергии. Искали место повреждения до вечера — не нашли. Стояла зима, мёрзлый грунт били ломami, успели проверить одну муфту, она была в порядке. Стемнело. Работы продолжались, потому что без света сидели детская больница и фабрика...

Дело в том, что бомбы и снаряды, падая даже в стороне от кабеля, могли взрывной волной нарушить изоляцию, могли сдвинуть грунты так, что постепенно начинало кабель тянуть, рвало его из муфт. Несколько лет после блокады продолжались такого рода аварии. Убраны были развалины, заделаны все пробоины, отремонтированы фасады домов, а под землёй как бы продолжался обстрел, падали снаряды и бомбы, и в огромные воронки, давно засыпанные, залитые асфальтом, вдруг рушился электрический ток. Давний взрыв снаряда пробивал кабель. И термин был — пробой, как пробоины на корабле.

Даниил Гранин, Блокадная книга, 1977—1981 гг.

Дмитрий КОПЧЕНКОВ, руководитель
Испытательно-диагностического центра ООО ПКБ «РЭМ», Санкт-Петербург,
Наталья СИНИЦКАЯ, начальник отдела комплексной диагностики
Департамента эксплуатации ОАО «Ленэнерго», Санкт-Петербург,
Антон ПЕТРОВ, ведущий специалист ГК ИМАГ, Москва,

Сегодня, мало кто поспорит с тем, что кабельные линии столь же важны для нормальной жизни любого города, сколь важны нервы и артерии для человека. Работоспособность кабельной линии — это свет в домах, возможность приготовить еду, комфортное проведение досуга, работа и всё то, без чего нельзя представить себе сегодняшнюю жизнь человека. Каждая сетевая компания уделяет много внимания поддержанию работоспособности кабельных сетей. Немного проще обстоят дела с обслуживанием сопутствующего оборудования, но лишь из-за его локализации в границах подстанции.

Применение систем диагностики в кабельной сети уже привычное дело для крупных энергетических компаний. Одним из перспективных направлений в этой области является диагностика методом локализации и измерения частичных разрядов

(ИЧР). Метод хорошо знают постоянные читатели журнала «КАБЕЛЬ-news» и специалисты отрасли. Помимо применения диагностики методом ИЧР для оценки состояния и локализации слабых мест в изоляции кабеля, эти методы широко применяются для диагностики электрооборудования.

Попытка предсказать основную тенденцию развития диагностических систем подвела нас к мысли о необходимости применения универсального прибора, который мог бы объединить в себе систему диагностики кабельных линий и электрооборудования широких классов напряжения. Проведя совместную работу с ОАО «Ленэнерго» по выработке критериев к подобным устройствам и проанализировав линейку оборудования ряда мировых производителей, было отдано предпочтение диагностическим системам компании HVPD (Англия).

Этот выбор был обусловлен успешным опытом внедрения подобных систем в английских электрических сетях. Так, к примеру, благодаря совместной работе HVPD и Лондонских распределительных сетей, которые провели диагностику 629 кабельных линий напряжением 11 кВ, было отобрано 30 кабельных линий, подлежащих немедленному ремонту (5% всех продиагностированных). В течение 3 месяцев 11 линий из отобранных вышли из строя в предсказанных местах, в то время как из оставшихся кабельных линий, в которых дефекты не были столь критичными (95% продиагностированных), вышло из строя 5 линий. Однако в данном случае дефекты, приведшие к аварии, не были связаны с развитием дефектов в изоляции кабельных линий.

Концепция приборов HVPD основана на диагностике кабельных линий и электрооборудования под рабочим напряжением, при этом отключение напряжения или нагрузки не требуется. В данном случае на кабель или оборудование не подаётся повышенное напряжение от внешних источников, кабель диагностируется в реальных рабочих условиях, что по праву можно считать по-настоящему щадящим, неразрушающим методом.

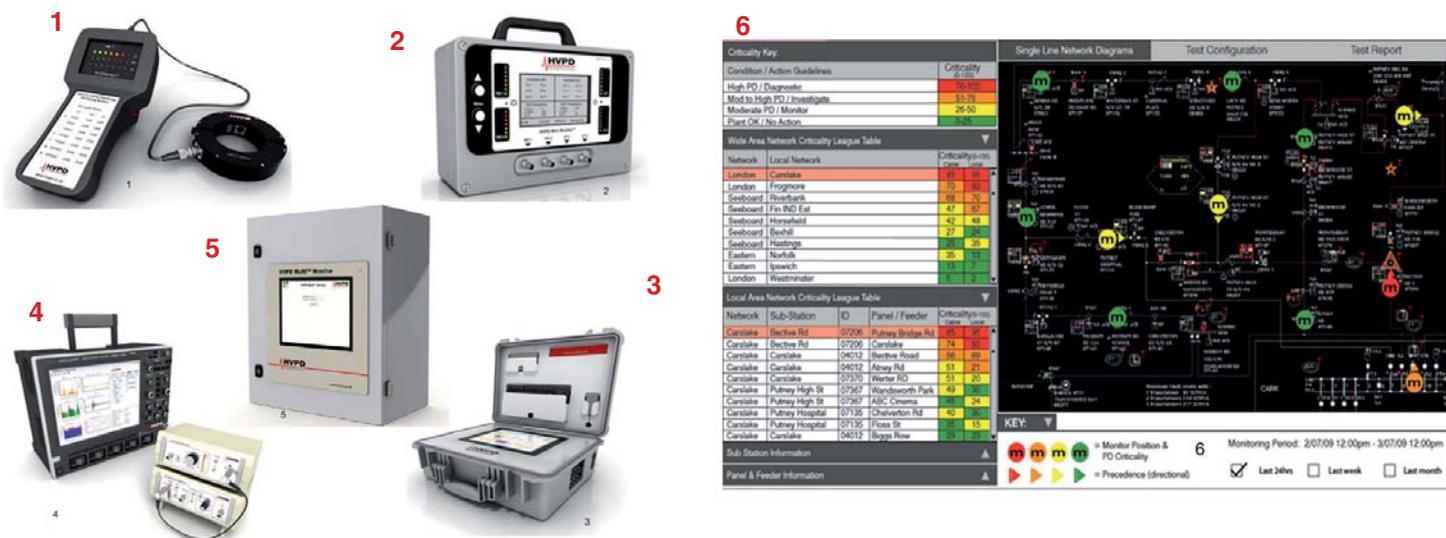
Компания HVPD предлагает широкий спектр диагностических систем. Это и компактный прибор предварительной квалификации оборудования на наличие частичных разрядов — PDSurveyor, и системы постоянного мониторинга ЧР — Mini Monitor, Multi Portable Monitor (уже представленный в России как LPD-Monitor от SebaKMT), Longshot, Multi Permanent Monitor. Данные приборы предназначены для периодического мониторинга уровней ЧР и их активности,

отличаются количеством каналов, а следовательно, и количеством оборудования, с которым можно работать одновременно (4 канала, 16 каналов, 96 каналов и более). Отдельное место в этом списке занимает прибор Longshot, объединяющий в себе систему мониторинга, рефлектометр и систему локализации мест возникновения ЧР. Благодаря возможностям расширения системы Multi Permanent Monitor возможна реализация полноценной системы диагностики всей сети (кабелей и электрооборудования) в режиме реального времени (рис. 1).

По заявлению производителя данные системы универсальны и позволяют проводить диагностику кабельных линий, трансформаторов, КРУЭ, двигателей, генераторов, разрядников и конденсаторов вплоть до 700 кВ. В России всё больший интерес приобретают системы диагностики методом ИЧР силовых кабельных линий. Это обусловлено тем, что в большинстве своём распределительные сети переходят на кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена. Как показывает огромное количество печальных примеров, проведение монтажных работ с кабельными линиями без последующего обязательного диагностирования методом ИЧР, при их вводе в эксплуатацию может обернуться развитием дефектов изоляции, которые практически не выявляются приёмо-сдаточными испытаниями повышенным напряжением.

Диагностика методом ИЧР на протяжении нескольких десятилетий оправдывает себя во многих странах мира. Как показывает опыт зарубежных производителей диагностического оборудования, в 85% случаях выходу энергетического оборудования

Рис 1. Широкий спектр диагностических систем компании HVPD



1 — PDSurveyor, 2 — Mini Monitor, 3 — Multi Portable Monitor, 4 — Longshot, 5 — Multi Permanent Monitor, 6 — система мониторинга в реальном времени.

ДИАГНОСТИКА

Рис 2. Воздействие ЧР на кабель



1 — следы ЧР в кабеле БМ 11 кВ; 2 — следы ЧР во второй фазе трансформатора 110 кВ; 3 — следы ЧР в оборудовании. Данные примеры выявлены специалистами HVPD при помощи установки Longshot.

из строя предшествовало значительное повышение уровня ЧР в месте аварии. Для кабельных линий практически все частичные разряды будут приводить к повреждению изоляции кабелей до той или иной степени. Эффект действия частичных разрядов на изоляцию можно рассматривать как эффект воздействия ионизирующего излучения на живые ткани организма человека. Возникает вопрос: какой уровень излучения опасен? Точно так же спрашивают о критичных уровнях частичных разрядов в высоковольтных системах. Правильный ответ: это отсутствие безопасного уровня. В любом случае при низком уровне воздействия ЧР на изоляцию просто пройдет больше времени, прежде чем повреждение заявит о себе (рис. 2).

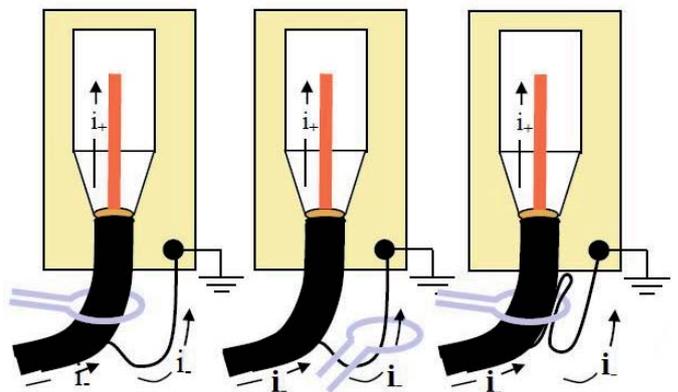
Для диагностики под напряжением используются специальные датчики, которые регистрируют импульсы ЧР за 1 период промышленной частоты 50 Гц (длительность 20 мс), а для обработки полученных результатов — специальное ПО PD Gold. Оно предназначено для измерения и записи активности ЧР за период времени от 2 до 5 минут, со сбором подробных данных за 10 циклов питания 50 Гц с 30 оцифрованными «сегментами формы сигнала», собранными за каждый цикл, для каждого подключенного датчика (240—750 сегментов для каждого датчика). Далее с информацией работает программа анали-

за PD Reader, в которой для анализа и описания характеристик импульсов, полученных для частичного разряда в кабеле, распределительном устройстве и для шума, используется программная модель распознавания событий.

Датчики универсальны для всех приборов HVPD и отличаются только своей конструкцией и принципом действия. Это связано с их использованием с различным типом оборудования.

Для измерения ЧР в кабелях среднего и высоковольтного класса напряжения применяются датчики HFCT (трансформаторы тока высокой частоты). Это индукционные датчики различных размеров, устанавливаемые вокруг вывода экрана или каждой жилы кабельной линии. Установка данных датчиков имеет некоторые особенности. Когда во внутренней структуре изоляции (между проводником и заземленным экраном) возникает частичный разряд, в обоих проводниках генерируется импульс ЧР (ток ЧР для проводника равен $i+$, ток ЧР 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, полный ток от импульсов ЧР будет нулевым. Таким образом, для измерения сигнала частичного разряда необходимо использовать любой из этих проводников по отдельности и измерять либо ток ЧР в проводнике ($i+$), либо ток ЧР в заземленном экране ($i-$). Благодаря этому различают различные варианты подключения датчиков (рис. 3, 4).

Рис 3. Варианты подключения датчиков к кабельной линии



Принцип подключения датчиков HFCT для правильного измерения ЧР в кабельной линии накладывает определённые требования к её конструкции. Так, подключение датчика HFCT невозможно в случае отсутствия изолирующей прокладки между выводом экрана кабеля и оборудованием (1), если нет доступа к экрану и жиле кабеля (2) или если на перемычке между заземлителем и выводом экрана

Рис. 4. Подключение двух датчиков HFCT: на жилы кабеля и на вывод экрана кабеля при тестировании кабельной линии при помощи установки Longshot



В данном случае продемонстрированы два варианта подключения на одном кабеле. При этом прибор отображает показания по двум независимым каналам с возможностью отдельного просмотра каждого канала или в формате наложения показаний.

кабеля отсутствует место для подключения датчика (3) [рис. 5].

Частичные разряды по месту своего возникновения следующие — ЧР между жилой и экраном и ЧР между жилой и жилой, в случаях трёхфазного исполнения кабеля. ЧР, возникающие между жилой и экраном — это наиболее критичные ЧР, так как именно они в 75% случаев приводят к пробое изоляции кабельной линии. Данный вид ЧР легко локализуется при реализации любого вида подключения датчика, описанного ранее. ЧР, возникающие между жилами кабельной линии, менее критичны для её выхода из строя. Это обусловлено самой конструкцией кабельной линии, так как жилы почти не подвергаются механическим повреждениям при прокладке кабельных линий, в отличие от слоя внешней

изоляции и разность потенциалов и напряжённость электрического поля незначительны для провокации дефекта. ЧР между жилами можно регистрировать только при непосредственном подключении датчиков на каждую жилу кабельной линии. Это связано с тем, что значения ЧР на каждой жиле будут равны по своему абсолютному значению, но противоположны по величине, и в итоге суммарное значение импульса на общем экране кабеля равно нулю. Поэтому при тестировании трёхжильных кабелей с общей изоляцией, в случае невозможности установки датчиков на каждую жилу кабельной линии и при размещении датчика на общем экране, ЧР между жилами регистрироваться не будут (рис. 6).

HFCT измеряет величину ЧР в пКл. Датчик обладает своим постоянным переходным сопротивлением $Z_{пер}$. Импульс ЧР, возникающий в изоляции кабеля, регистрируется, при этом происходит измерение его напряжения. Зная $Z_{пер}$, можно вычислить ток ЧР. Благодаря характеристикам среды высоковольтных кабелей протекающие по нему высокочастотные импульсы тока объединяются в единое целое, а это значит, что степень частичного разряда можно рассчитать без какой-либо калибровки по следующей формуле 1.

$$Q_{чп} = \frac{1}{Z_{пер}} \int_{\text{Начало импульса}}^{\text{Конец импульса}} U_{вых} dt \quad (1)$$

где $Z_{пер}$ — постоянное переходное сопротивление датчика HFCT, $U_{вых}$ — напряжение на выходе датчика HFCT в милливольтах.

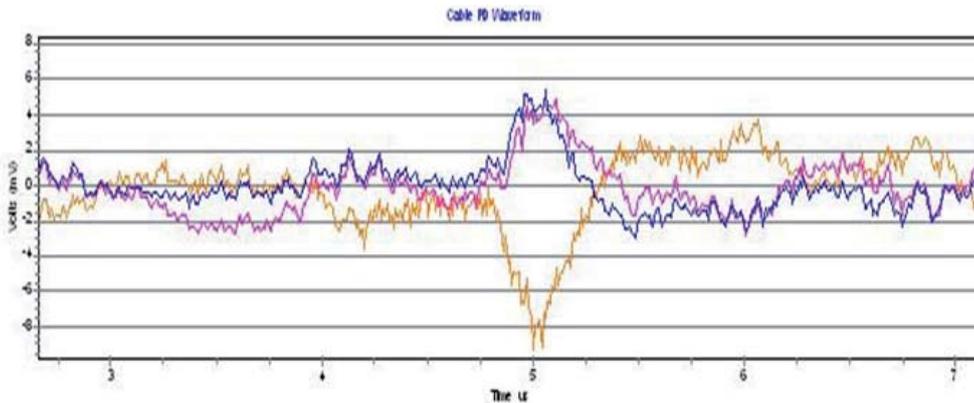
Импульсы ЧР попадают в линию электропередачи с известными характеристиками. Это означает, что однополюсная природа частичного разряда сохраняется по мере перемещения импульса ЧР по кабелю. Такие типы импульсов имеют типовую частоту от сотен кГц (для дальних точек частичного разряда) до 4 МГц (для ближних точек частичного разряда). В данном случае отдельного обсуждения заслуживают импульсы ЧР в концевых заделках.

Рис. 5. Примеры конструкций кабельных линий, на которых невозможна установка датчиков HFCT



ДИАГНОСТИКА

Рис 6. Разница между измерениями различных типов ЧР была продемонстрирована на примере измерения ЧР на кабеле ОАО «Ленэнерго» 1343Б-1369Б

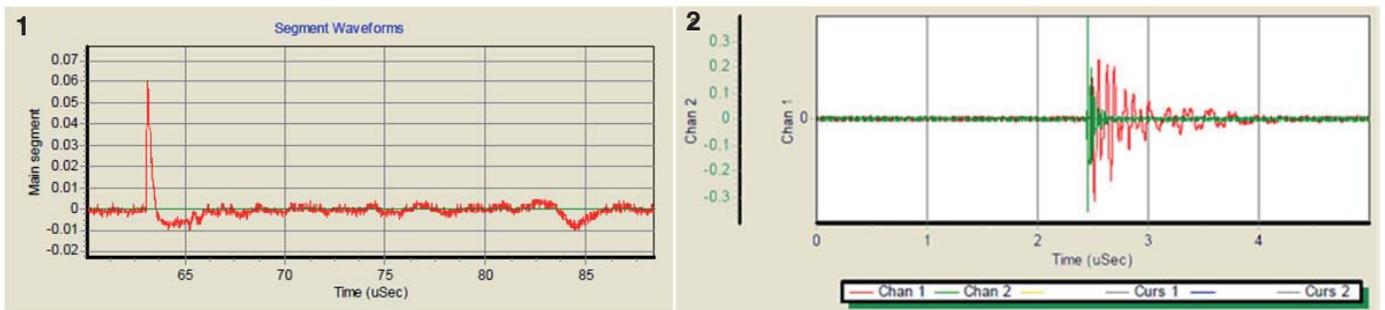


Как видно из снятых показаний, суммарное значение ЧР фаз «В» и «С» = 8 мВ, а ЧР на фазу «А» = -8 мВ. В результате в случае установки датчиков на экран кабеля и на заземления ЧР не видны.

Рис 7. Установка датчиков HFCT и TEV в ячейке



Рис 8. Измерение ЧР по двум каналам в режиме наложения



1 — вид импульса ЧР в кабельной линии; 2 — импульс ЧР в концевой заделке. Зелёный — показания датчика TEV, красный — показания датчика HFCT. ЧР регистрируется и на кабеле, и в ячейки, что указывает на его возникновение именно в концевой заделке.

Импульсы ЧР в концевых заделках идентифицируются и локализуются при помощи датчиков TEV (переходное напряжение на землю). Это устройство с ёмкостной связью, которое регистрирует импульсы ЧР в кабеле и оборудовании, протекающие на заземлённые металлической поверхности. Датчики TEV крепятся на поверхности любого электротехнического объекта при помощи магнитного корпуса или двустороннего скотча (рис. 7). Импульсы ЧР, локализуемые датчиком TEV, именуется локальными или местными. Эти импульсы имеют

более высокую частоту, нежели импульсы в кабельной линии — до 100 МГц — TEV, до 4 МГц — HFCT (рис. 8). Значение величины ЧР, рассчитанное при помощи показаний датчика TEV, указывается в Дб (формула 2).

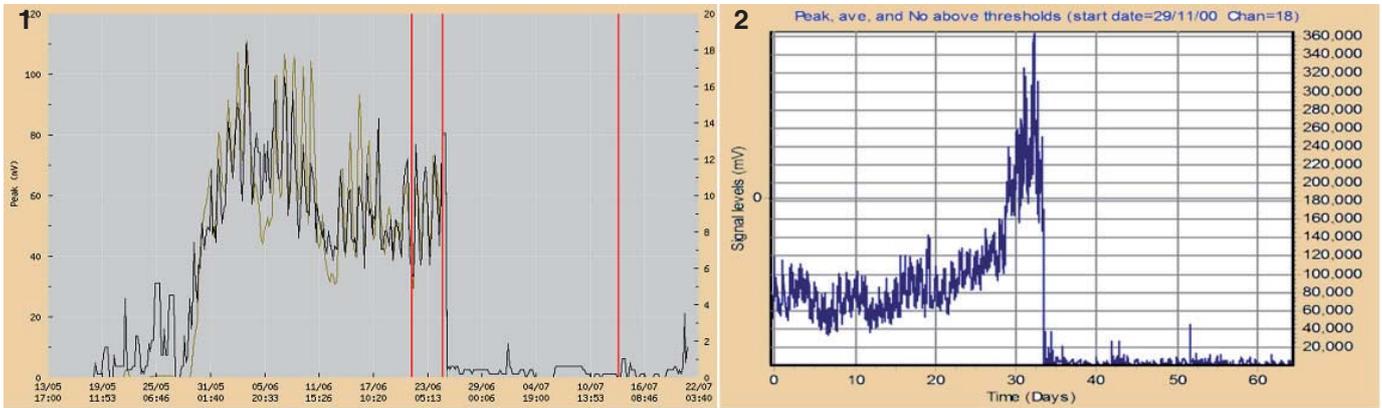
$$Q = 20 \text{Log} \cdot U_{\text{вых}} \quad (2)$$

где Q в Дб, $U_{\text{вых}}$ в мВ.

При локализации ЧР в оборудовании (трансформаторы, генераторы, КРУЭ) датчики ЧР размещаются на поверхностях объектов, и локализация места возникновения осуществляется путём перестановки датчиков и сравнения показаний. Также, в зависимости от формы импульса ЧР, его частоты, того, как он возникает в периоде 50 Гц, можно судить о его природе и месте возникновения.

Приведённое описание измерения импульсов справедливо для всех приборов HVPD, большая часть которых предназначена для измерения уровней ЧР и плотности их возникновения в течение

Рис. 9. Уровень и частота возникновения ЧР за период времени мониторинга



1 — кабель СП, активность ЧР до и после замены дефектной муфты; 2 — кабель БМ, активность ЧР, развитие дефекта до пробы.

периода времени мониторинга. Мониторинг ЧР позволяет заблаговременно получать информацию об авариях, связанных со снижением прочности изоляции кабелей и электротехнических объектов. Мониторинг важен ещё и тем, что зачастую о степени критичности дефекта следует не только судить по абсолютной величине ЧР, но и учитывать частоту, с которой ЧР возникают. Это напрямую связано с развитием дефекта и приближением времени аварийной ситуации (рис. 9).

Данные примеры выявлены специалистами HVPD при помощи установок Longshot и Mini Monitor.

Дополнительного обсуждения требует установка Longshot, которая помимо мониторинга 4 электротехнических объектов одновременно, в сочетании с программой PD Map, портативным транспондером и датчиками HFCT может использоваться для точного обнаружения местонахождения ЧР по длине кабельной линии (рис. 10). Данная технология использует принцип измерения времени прохождения сигнала. Поступающий из изоляции кабеля импульс частичного разряда проходит как по заземлённому экрану, так и по жиле кабеля. Измерение разницы во времени между приёмом прямого импульса и импульса отражённого 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 (рис. 11).

При возникновении частичного разряда импульсы перемещаются по экрану кабеля и его жиле в обоих направлениях от места разряда. Первый им-

Рис. 10. Обнаружение местонахождения ЧР по длине кабельной линии с помощью установка Longshot

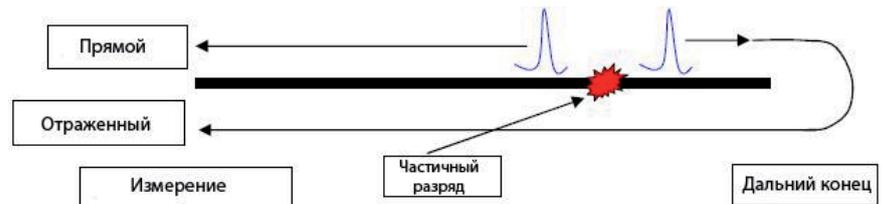
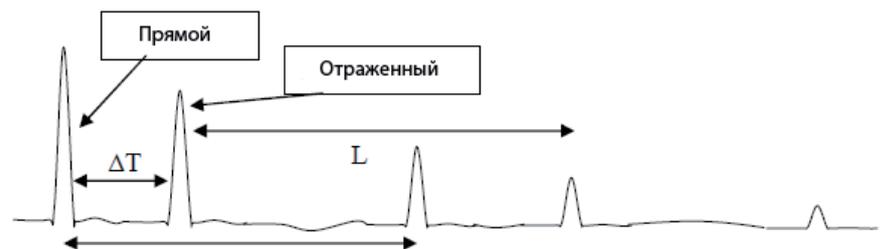


Рис. 11. Локализация ЧР в кабеле. Односторонние измерения



пульс (прямой) поступает прямо на тот конец кабеля, где проводится измерение. Вторым импульсом, позволяющим определить место частичного разряда, является импульс, отражённый от противоположного конца кабеля и достигший того конца, на котором производится измерение. Такая технология называется «одностороннее обнаружение места частичного разряда» и является наиболее простым и быстрым методом обнаружения места разряда в кабеле, находящемся под напряжением. Разница по времени между первыми двумя импульсами (прямым и отражённым) ΔT указывает на место частичного разряда. 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

ДИАГНОСТИКА

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 (формула 3):

$$\text{расстояние от стороны измерения (в \% от длины кабеля)} = 100(1 - \Delta T/L). \quad (3)$$

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 режимах) показала, что методы одностороннего измерения сложно использовать на длинных кабелях и в некоторых других случаях. Длинные кабели с высоким затуханием снижают амплитуду отражённого 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 подключён силовой кабель. Решением данной проблемы является использование портативного транспондера РТТ 2000-СТ (состоит из датчика HFCT, транспондера и импульсного генератора), специально разработанного для поиска места частичного разряда в описанных выше случаях. Общий принцип работы заключается в следующем (рис. 12). Если датчик HFCT, подключённый к транспондеру, принимает импульс, который превышает регулируемый уровень его запуска, то устройство запуска передаёт сигнал на импульсный генератор, а он подаст мощный импульс 100 В (на 50 Ом) на устройство HFCT, которое, в свою очередь, передаст этот мощный импульс в кабель. Этот процесс позволяет превратить одностороннюю систему поиска местоположения частичного разряда в двустороннюю.

О результатах применения систем HVPD в электрических сетях России, критериях оценки ЧР рекомендуемых HVPD для кабелей и оборудования под рабочим напряжением и сравнении результатов измерений off-line и on-line систем читайте в следующем номере журнала.

Рис. 12. Принципиальная схема двусторонних измерений и сравнение амплитуды отражённого импульса с использованием транспондера и без него

