

Современные методики измерения частичных разрядов (ЧР) в силовых трансформаторах в условиях подстанции

1. Введение

Долгое время измерение частичных разрядов (ЧР) в силовых трансформаторах в условиях действующих подстанций было малоинформативным из-за отсутствия методики по преодолению влияния внешних источников шума на измерения. Зачастую амплитуда этих сигналов превышала амплитуду сигналов ЧР внутри бака трансформатора, что чрезвычайно затрудняло анализ ЧР. С другой стороны, место ЧР нелегко определить даже при визуальном осмотре. Несмотря на это возникновение ЧР может быть очень опасным для трансформатора. На Рисунке 1 показаны фотографии повреждений в трансформаторе, вызванных частичными разрядами. В реальном примере воздействия ЧР на изоляцию видно начало процесса разрушения картона слева и сильное разрушение изоляционного слоя справа.

Технический прогресс и повсеместное распространение микропроцессорной техники внесли свой вклад в развитие систем измерения ЧР. Улучшились методики подавления шумов, а также накопился значительный опыт в этой области. Кроме того, стали доступны портативные испытательные системы для подачи высокого испытательного напряжения. На сегодняшний день довольно часто используются измерения ЧР в трансформаторах на местах эксплуатации.

Для достоверного измерения ЧР, идентификации, локализации и, в конце концов, для оценки степени риска продолжения эксплуатации, обычно требуется экспертный анализ модели ЧР, обрабатывающий наложенные внешние сигналы для последующего удаления их из

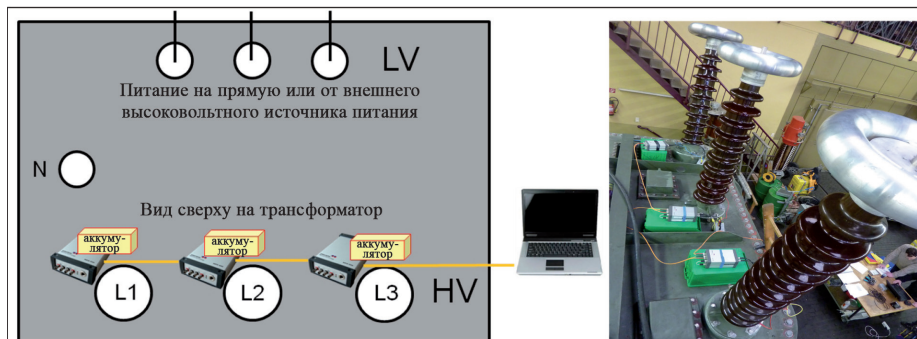


Рисунок 2: Синхронное многоканальное измерение ЧР при испытаниях индуктированным

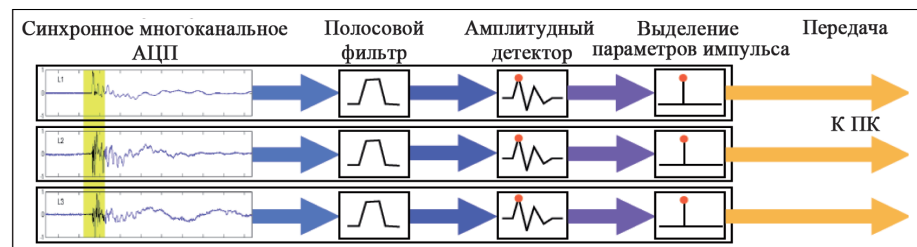


Рисунок 3: Синхронное обнаружение сигнала ЧР и обработка данных

показаний, что позволяет отображать только наиболее важные измерения. Далее рассмотрены четыре средства для выполнения этого.

2. Синхронные многоканальные измерения и диаграмма 3PARD

Данный метод был предложен в 2002 г. [2] и применим, когда для разделения ЧР проводится измерение в нескольких точках. Например, при испытании индуктированным напряжением трехфазного трансформатора. На Рисунке 2 изображена схема расположения измерительных терминалов многоканального комплекта оборудования (слева) и реальные испытания силового трансформатора (справа). Измерительные выводы высоковольтных вводов ис-

пользуются для развязки сигналов. Ввиду наличия гальванической, емкостной и электромагнитной взаимосвязи 3-х фаз трансформатора одиночный ЧР, возникающий в определенной фазе, фиксируется измерительным блоком на всех фазах трансформатора. Для достоверной идентификации отражения исходных импульсов большое значение имеет точная синхронизация всех измерительных каналов.

Каждый единичный импульс ЧР, обнаруженный терминалами, оцифровывается в соответствии с меткой времени и передается по оптоволокну к ноутбуку оператора для анализа ЧР в режиме реального времени с помощью соответствующего ПО. Рисунок 3 объясняет данный принцип.

Помимо отображения значения ЧР, полученных с измерительных каналов и формирования PRPD для каждой фазы, многоканальный метод может быть использован как средство подавления шума и как опция для разделения наложенных сигналов ЧР друг от друга. Это делается с помощью диаграммы 3PARD (3 Phase Amplitude Relation Diagram). При построении такой двумерной цветной диаграммы векторы амплитуды всех трех фаз (как показано на рис. 4) откладываются со сдвигом 120 градусов в соответствии с фазовым сдвигом испытательного напряжения. Каждый импульс ЧР, измеренный на трех фазах приводит в одну и ту же точку на схеме.



Рисунок 1: Результат воздействия ЧР на внутреннюю изоляцию силового трансформатора

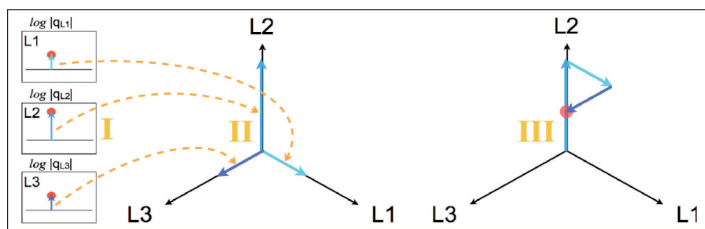


Рисунок 4: Расположение векторов амплитуд на диаграмме, их сложение и отображение импульсов

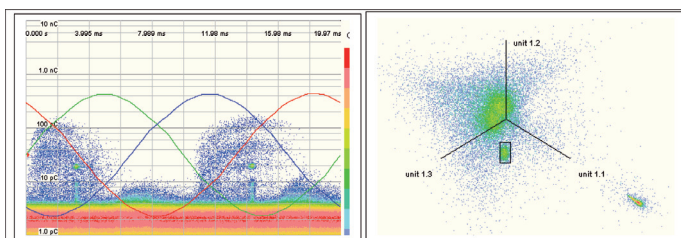


Рисунок 5: PRPD и ZPARD, показывающие различие внутренних ЧР и внешних помех

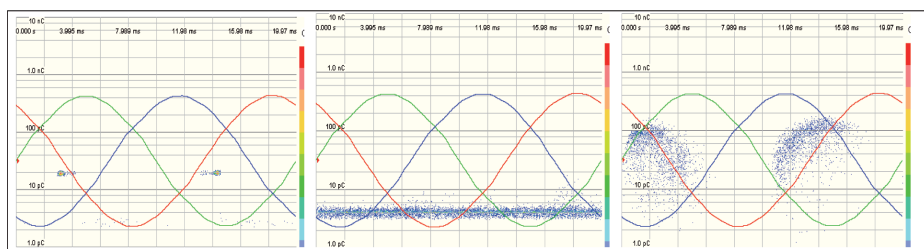


Рисунок 6: Диаграммы PRPD, показывающая внешние помехи (слева), фоновый шум (в центре) и внутренние ЧР (справа) – полученные с помощью диаграммы ZPARD

Рисунок 4 описывает вычисление и построение такой диаграммы ZPARD.

Цветовое кодирование на диаграмме зависит от плотности зарегистрированных импульсов. Внутренние импульсы ЧР в основном расположены в скоплениях рядом с осью на диаграмме. Импульсы шума в основном располагаются близко к оси координат в центре. Программное обеспечение для анализа ЧР позволяет выбрать одну группу и выполнить ее преобразование в режиме реального времени. Таким образом, на экране будут отображаться импульсы только выделенных групп, что позволяет обрабатывать их без влияния наложения других сигналов. В качестве примера приведены результаты измерения ЧР на отремонтированном трансформаторе мощностью 40 МВА. На Рисунке 5 изображена диаграмма PRPD и соответствующая диаграмма ZPARD. Курсором мыши выбрана одна группа в нижней части диаграммы.

На Рисунке 6 сравниваются группы фоновых шумов, полученных с помощью диаграммы ZPARD. Группа, выделенная в правой части Рисунка 5, представлена на Рисунке 6 слева и представляет собой сигналы от внешних источников помех. В центре Рисунка 6 изображен фоновый шум, полученный из диаграммы ZPARD. Правый кадр Рисунка 6 отображает внутренние ЧР на 1 фазе. Таким образом, интенсивность (амплитуда ЧР) и тип ЧР (анализ образов) могут быть использованы для оценки состояния трансформатора и принятия решения о дальнейших действиях. В рассмотренном примере повторная вакуумизация бака трансформатора привела к исчезновению ЧР.

3. Синхронизированные многополосные измерения и ЗСРFD.

Для расширения технических возможностей ZPARD была создана ЗСРFD (совмещенная диаграмма по трем центральным частотам), дополнительный инструмент для случаев, когда невозможно провести измерения в трех местах, соответствующих трем фазам, например при проведении испытаний на ЧР в измерительных трансформаторах или элементе однофазного устройства. Этот метод требует организации трех полосовых фильтров ЧР, одновременно измеряющих каждое событие ЧР в предустановленной полосе частот (в центре полосы). Одновременное рассмотрение различных частотных участков спектра ЧР предоставляет информацию о природе единичного ЧР, распространении сигнала и затуханий канала. Ключевым фактором для достижения оптимального эффекта является правильный выбор частотной области для этих трех полос пропускания. Три фильтра должны быть установлены таким способом, чтоб изменения спектра импульсов различных типов или источников принимали максимальные значения относительно друг друга. Рисунок 7 иллюстрирует этот принцип показывая спектр трех различных импульсов ЧР и три фильтра,

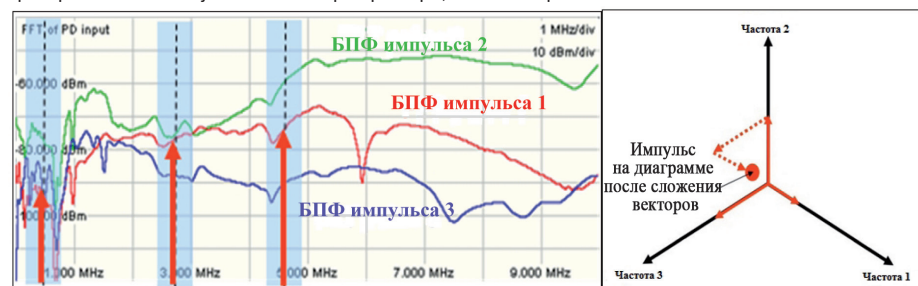


Рисунок 7. БПФ трех импульсов ЧР, показания частоты

размещенные в частях спектра, имеющих значительную разницу.

Красные стрелки указывают абсолютную величину заряда импульса 1 на частоте дискретного фильтра. Эти векторы переносятся в трехлучевую диаграмму, как показано в правой части рисунка 7. Каждая ось представляет один фильтр и соответствует его центральной частоте – контрастируя с ZPARD, где каждая ось означает один измерительный терминал – хотя длина векторов определяется измеренной амплитудой в каждом фильтре. Геометрическое сложение векторов в одну единственную точку является окончательным представлением импульса 1 на диаграмме. Подобная процедура может быть применена для импульса 2 и 3, как показано на Рисунке 8 слева. После сложения векторов, видны четкие разделения областей (см. Рисунок 8 справа). Это результат был ожидаемым благодаря различным спектральным составляющим сравниваемых импульсов. На основе результирующей диаграммы можно оценить каждую область отдельно. Сейчас рисунок пофазно разложенных частичных рядов содержит только импульсы с подобным спектром. В итоге это приводит к очищенным от шумов и понятным результатам ЧР. Этот метод разделения позволяет сфокусировать различные источники ЧР и источники шума в отдельных областях ЗСРFD. Важно отметить, что вся описанная процедура происходит в реальном времени.

Этот метод был использован при испытаниях на ЧР нескольких измерительных трансформаторов под воздействием шумов на действующей подстанции, начатых после обнаружения неисправного ТТ.

Рисунок 9 показывает неисправный ТТ (слева) и пример подключения тестового оборудования для последующего измерения ЧР на подобных устройствах на подстанции (справа). Во время измерений был обнаружен фоновый шум примерно 1 нС – как правило, это слишком высокий уровень для чувствительных измерений при оценке изоляции на основе эпоксидной смолы. Рисунок 10 показывает оригинальный PRPD слева, PRPD очищенный от шумов в центре и соответствующий ЗCFDR справа. Оригинальный PRPD не дает обнаружить ЧР, в то же время на ЗCFDR наблюдаются 2 области.

Большая область представляет фоновый шум, а отдельно стоящая маленькая область – ЧР внутри испытуемого ТТ, который виден на очищенном от шумов рисунке, показанным в центре Рисунка 10. Несмотря на то, что это серьезное проявление ЧР, его невозможно было бы увидеть без эффективного подавления шумов. В результате проведенных измерений дефектный ТТ был заменен во избежание непредвиденного выхода из строя и предотвращения возможного взрыва или возгорания на подстанции.

4. Работа с использованием синхронизированного канала внешнего порта (антенный порт).

Возможность синхронизированного обнаружения ЧР вторым измерительным каналом может быть использована для обнаружения внешних мешающих импульсов, не генерируемых испытуемым устройством. Однако это дополнительное измерительное устройство должно быть полностью развязано от объекта испытания для обеспечения того, что бы импульсы от объекта испытаний не попадали внутрь или наружу размещенного поблизости известного источника помех. Обычно статический преобразователь частоты или мотор-генератор установленным для испытаний индуктированным напряжением находится рядом с объектом испытания. Типичным способом подключения порта устройства является индуктивная развязка от заземления или антенна для приема шумов радиозофира. Во время обнаружения ЧР устройство, подсоединенное к измерительному отводу высоковольтного ввода, определяет ЧР внутри трансформатора, а также сигналы внешних помех, в то же время, канал, подключенный к внешнему порту, обнаруживает только помехи. Импульсы, которые регистрируются одновременно на высоковольтных вводах и в канале внешнего порта, классифицируются как внешние. Для проведения измерений ПО выбирает только те импульсы, которые регистрируются на измерительном отводе высоковольтного ввода и отсутствуют на

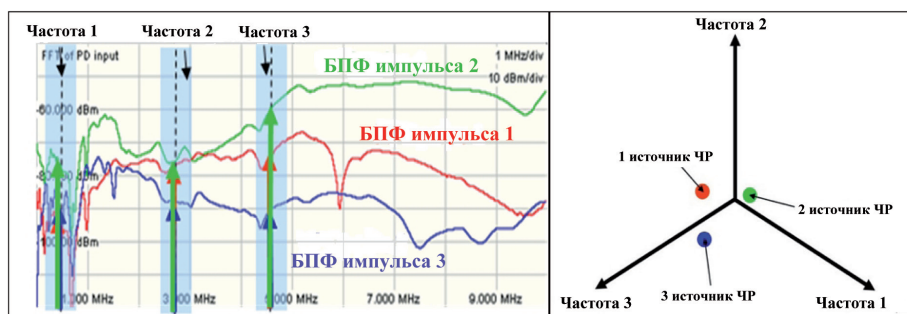


Рисунок 8. Представление всех трех импульсов в виде спектра и в ЗCFDR



Рисунок 9. Неисправный ТТ и испытания на ЧР на аналогичном ТТ

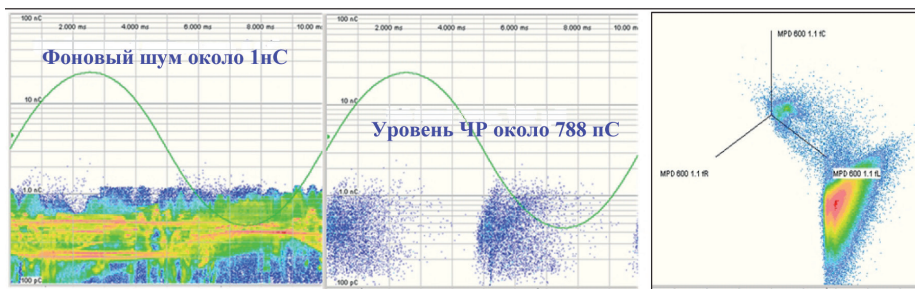


Рисунок 10. Сильно зашумленный PRPD, очищенный от шумов PRPD и соответствующий ЗCFDR

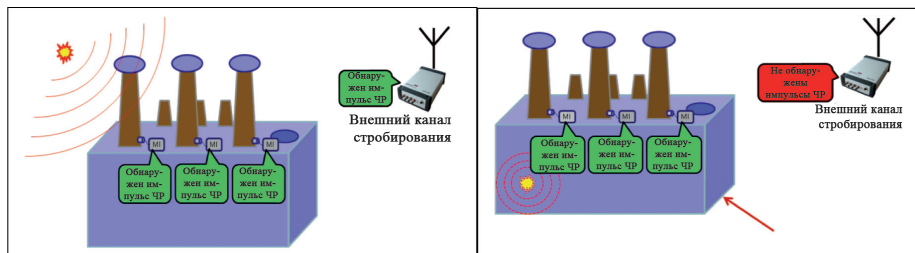


Рисунок 11. Принцип использования порта для внешних воздействий

входе терминала, подключенного к внешнему порту. Рисунок 11 объясняет этот принцип.

Этот метод использовался во время теста ЧР при высоковольтных испытаниях силового трансформатора на подстанции. Трансформатор был подключен к мотор-генератору, который был ис-

точником несинхронизированных по фазе помех. Провод коронирования был подключен к выводу одного из высоковольтных вводов. Рисунок 12 показывает оригинальный вид PRPD (слева), сигналы, обнаруженные портом, подсоединенным к земле мотор-генератора (в центре) и очищенный

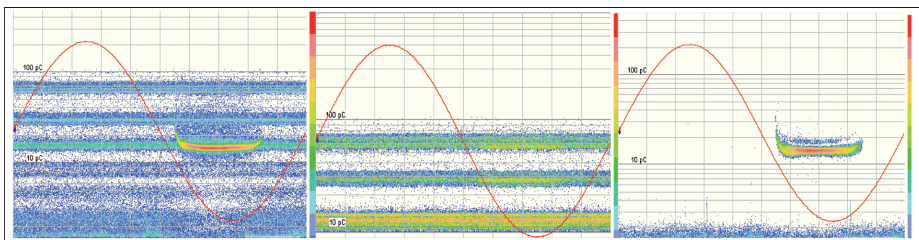


Рис. 12: PRPD, на которой изображена корона и помехи (слева); сигналы, обнаруженные блоком стробирования (в центре) и PRPD с подавлением шума, на которой все еще четко видна корона (справа)

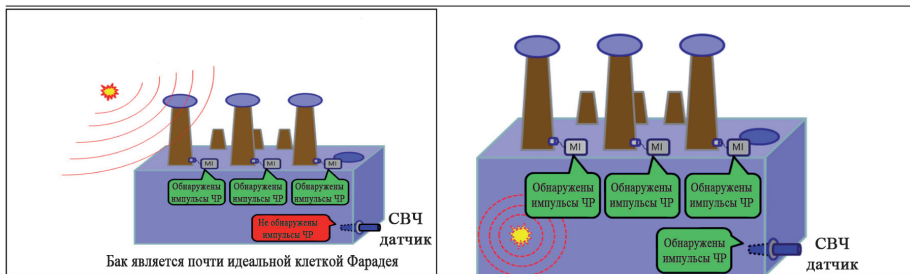


Рис. 13: Принцип СВЧ стробирования



Рис. 14: Практическое применение СВЧ стробирования – СВЧ датчик на трансформаторе в лаборатории и в полевых условиях

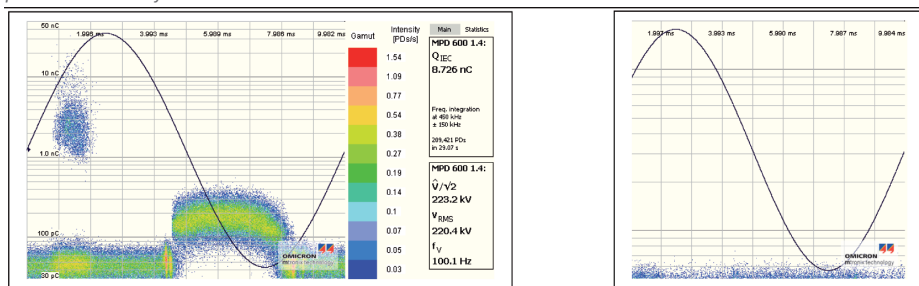


Рис. 15: Картина внешней короны на трансформаторе и соответствующие синхронные СВЧ результаты

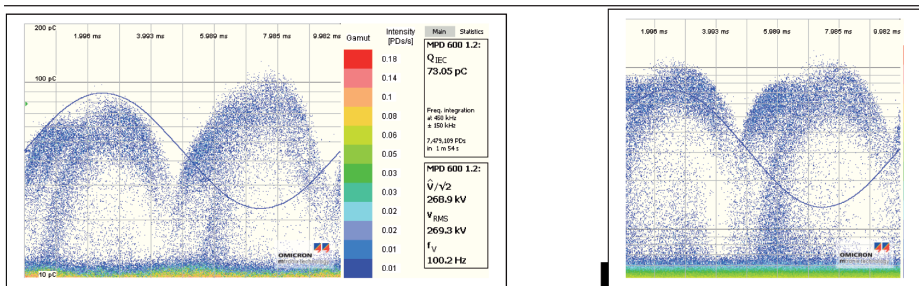


Рис. 16: Картина внутренних ЧР внутри трансформатора и соответствующие синхронные СВЧ результаты

от шумов образец (справа). Нужно отметить, что отображаемая величина ЧР, полученная портом, должна быть проигнорирована, потому что этот канал не был откалиброван, что не существенно, поскольку только временные параметры важны для этой функции. Рисунок 12 справа ясно показывает что корона, симулирующая реальный ЧР, не подвержена влиянию помех, принятых портом. Поэтому стало возможным проведение высокочувствительных измерений ЧР, несмотря на высокий уровень шума, генерируемый мотор-генератором.

5. Комбинация электрического и ультра-высокочастотного измерения (СВЧ порт)

В то время как в ранее описанном методе используется внешняя антенна и анализируются только те импульсы, которые зарегистрированы на измерительных каналах, а не на внешней антенне, то в комбинированном методе электрического и ультравысокочастотного измерений используется СВЧ антенна, расположенная внутри трансформаторного бака. На Рисунке 13 поясняется данный принцип.

В этом случае рассматриваются импульсы, которые были зарегистрированы на измерительных входах ВВ и на внутренней антенне. В данном методе применяется СВЧ антенна, которая устанавливается в бак трансформатора, как правило, через сливной кран. Такие краны располагаются в местах с низкой напряженностью поля, таким образом, датчик можно установить без опасности пробоя. На Рисунке 14 показаны два примера практического применения СВЧ датчиков на силовых трансформаторах. На фотографии слева изображен СВЧ датчик, прикрепленный близко к верхней части трансформатора при заводских испытаниях, на фотографии справа показан датчик, прикрепленный к сливному крану на месте эксплуатации генераторного повышающего трансформатора мощностью >1100МВА. В ходе теста на устойчивость к помехам комбинированного метода было проверено, что внешние шумы не влияют на внутреннюю СВЧ антенну, хотя коронирующий провод был соединен с одним из 400 кВ ВВ. На Рисунке 15 сравнивается проявление ЧР, полученное на измерительном выводе ВВ фазы с коронирующим проводом (слева) и синхронное считывание данных внутри бака с помощью СВЧ системы, использующий фильтр 1,5 МГц на средней частоте 490 МГц (справа). Как показано, самые интенсивные сигналы короны (около 8,7 нС) не достигли СВЧ антенны. Внутренние ЧР появившееся в том же самом трансформаторе, могут быть легко измерены при помощи обычной измерительной системы ЧР, а так же обнаружены с помощью СВЧ измерительной системы. На рисунке 16 показана картина измерения ЧР на измерительных

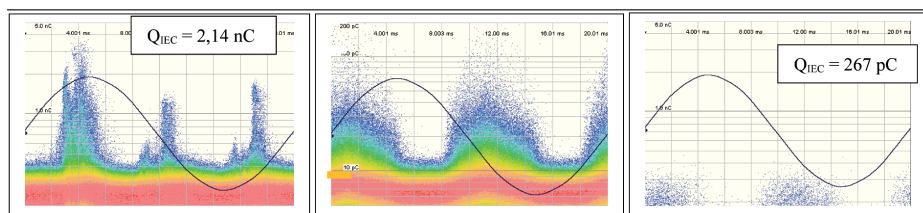


Рис. 17: Обычное измерение ЧР (слева), сигналы, полученные с СВЧ датчиком (в центре) и отображенные внутренних ЧР после удаления шума с помощью СВЧ стробирования (справа)

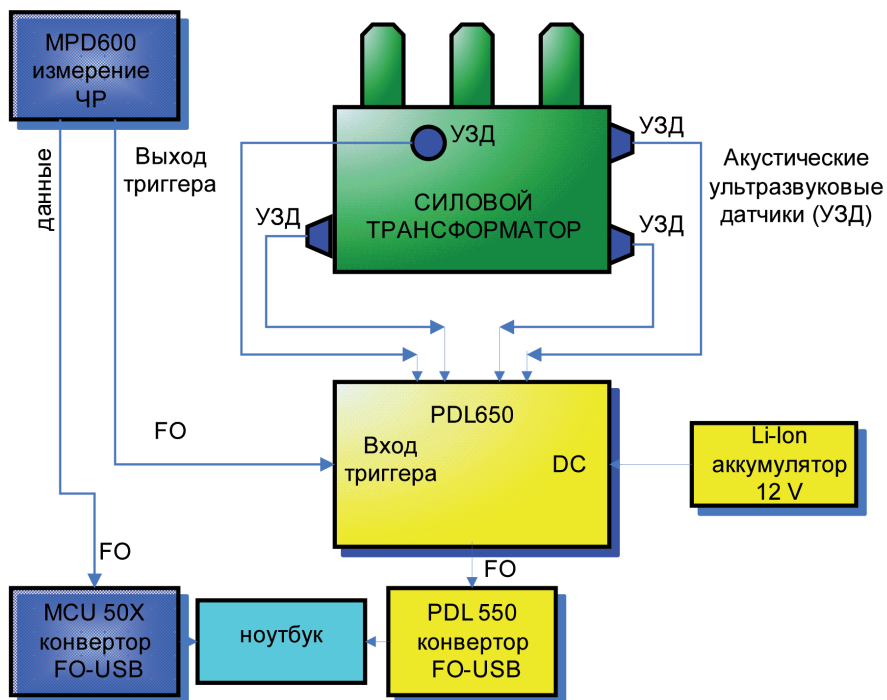


Рис. 18. Синхронизация ультразвуковой акустической локационной системы PDL650 от MPD600

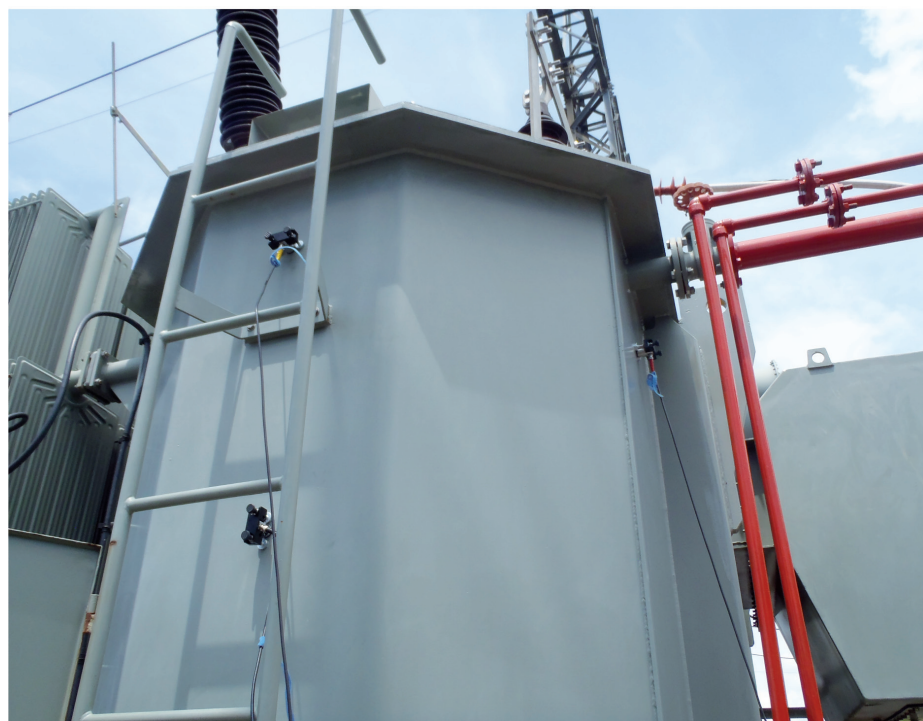


Рис. 19. Крепление ультразвуковых акустических датчиков к баку трансформатора

отводах (слева) и синхронные обнаруженные сигналы на СВЧ датчике (справа). На представленных диаграммах видно, что поведение ЧР схожее. Эти результаты доказывают главный принцип СВЧ стробирования – внешние сигналы не способны достичь внутренней антенны, в то время как внутренние ЧР обнаруживаются с высокой чувствительностью.

Практический пример СВЧ стробирования приведен в литературе [3]. Во время онлайн измерений на однофазном трансформаторе мощностью 333 МВА электрические измерения на ВВ не возможно было считать из-за сильных помех от 400 кВ шин трансформатора (рисунок 17, слева). Датчик СВЧ обнаружил один из внутренних источников ЧР, показано на рисунке 17 в центре. В правой части рисунка 17 показаны электрические измерения после СВЧ стробирования. Здесь показаны только импульсы, обнаруженные обычной системой измерения на ВВ и СВЧ датчиком в течение определенного времени. Очевидно, что чувствительность измерений значительно возросла.

В довершении к перечисленным подходам, сигнал от УВЧ измерительной системы был использован для синхронизации акустической локационной системы в соответствии со схемой, показанной на Рисунке 18.

Подключение ультразвуковых датчиков к силовому трансформатору показано на Рисунке 19.

Локализация места повреждения выявила проблему рядом с РПН, подтвержденную в процессе последующего визуального осмотра. Было обнаружено повреждение бумажной изоляции на проводке отвода, идущего к РПН. К настоящему времени трансформатор отремонтировали и ввели в эксплуатацию.

Михаил Соловьев,
Заведующий отделом систем связи
НПП «ЭКРА»

Библиография

1. A. Kraetge, K. Rethmeier, S. Hoek, M. Krueger, "Modern de-noising strategies for PD measurements on transformers under challenging on-site conditions", OMICRON, CIGRE SC A2 & D1 JOINT COLLOQUIUM 2011, KYOTO JAPAN
2. K.-D. Plath, R. Plath, H. Emanuel, W. Kalkner, "Synchrone dreiphasige Teilentladungsmessung an Leistungstransformatoren vor Ort and im Labor", ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin, Germany, Paper 0-11, 2002.
3. S. Tenbohlen, A. Pfeffer, S. Coenen, «On-site Partial Discharge Measurement in Power Transformers by UHF Sensors», Highvolt Kolloquium, Dresden, Germany, May 2011

на правах рекламы