

Частичные разряды в силовых трансформаторах, используемое диагностическое оборудование, ожидаемые результаты

Русов В. А., главный инженер ООО ДИМРУС, г. Пермь

Эксплуатация систем контроля частичных разрядов в силовых трансформаторах, разработанных два десятка лет назад и ранее, сформировала у эксплуатационного персонала преимущественно низкое доверие к получаемым диагностическим заключениям. Критическим считается аргумент, что высокий уровень электромагнитных помех не позволяет проводить достоверные измерения частичных разрядов в трансформаторах, являющихся узловыми элементами энергосистемы. Существовали даже еще более «продвинутое суждения», утверждающие, что частичных разрядов в трансформаторах не бывает, хотя общеизвестные результаты хроматографических исследований, а что более важно практические вскрытия, подтверждали их наличие.

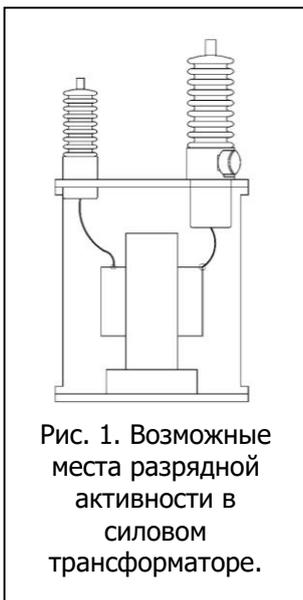
Основной причиной недоверия к этому современному диагностическому методу было то, что на практике применялось измерительное оборудование, которое проводило регистрацию частичных разрядов в баках силовых трансформаторов в сравнительно низкочастотных диапазонах, начиная от сотен кГц и заканчивая единицами МГц. Это объясняется в основном техническими сложностями, возникающими при создании и использовании необходимой измерительной аппаратуры, так как чем выше частота регистрируемых импульсов, тем сложнее и дороже аппаратура. Кроме того, используемые в этих приборах технические и алгоритмические средства отстройки от помех имели низкую эффективность.

Фирмой ДИМРУС за последние 15 лет были поставлены и внедрены в эксплуатацию более 1500 современных систем стационарного мониторинга силовых трансформаторов, которые включали в себя подсистемы контроля частичных разрядов в ВЧ (HF) диапазоне частот до 20,0 МГц. Используемые в них датчики и измерительное оборудование, в котором реализован набор самых эффективных методов отстройки от высокочастотных помех, позволяют надежно выявлять частичные разряды от 100 pК и обеспечивают достоверность получаемых диагностических заключений на уровне в 70÷80%.

Еще выше чувствительность измерительной аппаратуры и достоверность получаемых диагностических результатов были получены при использовании датчиков и приборов сверхвысокочастотного диапазона частот (UHF), до 2 ГГц. Такое оборудование рекомендовано к применению всеми современными стандартами. Практическая эксплуатация таких систем нашей разработки, работающих в СВЧ диапазоне частот, полностью подтверждает их эффективность.

В настоящее время вопрос о необходимости применения измерений частичных разрядов для оценки технического состояния силовых трансформаторов решен однозначно – такие измерения проводить нужно, а в трансформаторах, оснащенных современными высоковольтными вводами с твердой изоляцией, это нужно делать уже обязательно.

1. Возможные места возникновения разрядной активности в силовых трансформаторах и основные типы дефектов, являющихся их источниками.



1.1. Существует несколько подсистем и элементов силового трансформатора, дефекты в изоляции которых могут явиться источниками разрядной активности. Это:

- Высоковольтные вводы. В них достаточно часто возникают частичные разряды, уровень и степень опасности которых зависит от типа изоляции обкладок ввода.

- Проводники подключения вводов к обмоткам. Эти гибкие элементы трансформатора находятся в баке в среде изоляционного масла. Возникновение частичных разрядов возможно при их смещении относительно конструкции трансформатора и экранов.

- Обмотки трансформатора. Если геометрия обмоток не нарушена, то в изоляции обмоток частичных разрядов обычно не бывает. Это связано с тем, что напряжение между рядом расположенными витками обмотки недостаточно для возникновения частичных разрядов.

- РПН трансформатора. В зависимости от конструкции переключателя разрядная активность может регистрироваться непосредственно в момент коммутации или в стационарных режимах на ослабленных контактных соединениях, по которым протекает рабочий ток. Классических частичных разрядов в РПН обычно не бывает.

- Сердечник трансформатора, магнитные шунты и конструкционные элементы. Разряды, возникающие в этих элементах, правильнее считать искровыми, а не частичными, так как приложенное к ним напряжение недостаточно для возникновения частичных разрядов. По определению частичный разряд в изоляции перекрывает только часть общего изоляционного промежутка и возникает при напряжении не менее $4 \div 6$ кВ. Искровые разряды в конструкции трансформатора входят в текущее рассмотрение только потому, что и они регистрируются приборами контроля частичных разрядов.

- Место крепления шины заземления сердечника на бак трансформатора. Достаточно часто встречающийся источник разрядной активности внутри бака трансформатора.

- В масле бака в рабочих режимах разрядов обычно не бывает. Исключение составляет случай, когда в масле бака трансформатора присутствует дисперсная влага, что возможно при включении холодного трансформатора, и тогда между ее капельками могут возникнуть разряды. Надо понимать, что такие разряды в масляных каналах охлаждения между элементарными катушками обмотки трансформатора почти мгновенно приводят к критической аварии.

1.2. Особенности возникновения частичных разрядов от дефектов в изоляции.

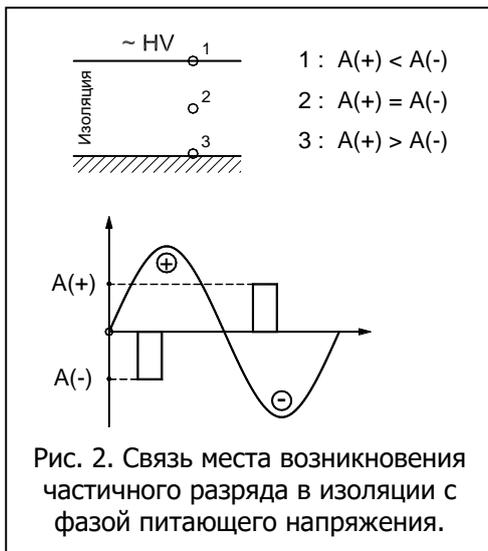
Если рассматривать поперечный разрез высоковольтной изоляции, то частичные разряды могут возникнуть в трех ее зонах, показанных на схематическом рисунке 2:

- На внешней поверхности высоковольтного проводника, которая граничит с воздухом или маслом (точка 1).

- Внутри слоя высоковольтной изоляции, в центре или ближе к высоковольтному или земляному потенциалу (точка 2).

- На поверхности «земляного» проводника или элемента конструкции трансформатора (точка 3).

С точки зрения физических процессов в изоляции частичный разряд уменьшает напряженность поля в точке дефекта, поэтому его полярность всегда противоположна приложенному внешнему полю. На



положительной полуволне питающего напряжения полярность частичного разряда всегда отрицательная, а на отрицательной полуволне она является положительной.

Классические частичные разряды возникают только на тех участках синусоиды, где происходит рост напряженности поля в зоне дефекта. Логическая цепочка возникновения разрядной активности при этом имеет следующий вид:

- рост напряженности в общем объеме изоляции;
- разряд со снижением напряженности в зоне дефекта;
- продолжающийся рост напряженности в связи с увеличением величины приложенного напряжения;
- снова разряд, и так далее.

Участками роста напряженности поля являются фазовые зоны синусоиды питающей сети $0 \div 90$ и $180 \div 270$ электрических градусов. Количество разрядов на одном участке роста приложенного напряжения зависит от параметров изоляции и особенностей дефектной зоны. Оно может колебаться от единиц до сотен единичных разрядов.

1.3. Основные типы дефектов в изоляции, которые могут являться источниками частичных разрядов.

Согласно рисунку 2 в высоковольтной изоляции могут возникать частичные разряды трех типов, определяемых их локализацией: «коронный разряд с высоковольтного электрода», «разряд внутри изоляции» и «разряд с земляного электрода».

Четвертым типом классического частичного разряда является поверхностный разряд, который по PRPD распределению импульсов относительно синусоиды питающей сети очень похож на искровой разряд, который возникает между элементарными проводниками в витке обмотки при их расслоении.

Возникновению поверхностных частичных разрядов достаточно часто предшествует дефект, который обычно называется специальным термином «плавающий потенциал». На практике бывает и наоборот, когда дефект типа поверхностный разряд перерастает в плавающий потенциал.

Таким образом для диагностики и оценки технического состояния изоляции в силовых трансформаторах достаточно уметь диагностировать следующие дефекты, импульсы от которых регистрируются приборами контроля частичных разрядов:

- разряды на поверхности изоляции: коронный разряд, поверхностный разряд, плавающий потенциал, разряды между элементарными проводниками при расслоении проводника (это тоже поверхностный разряд, хотя он происходит «внутри составного проводника»);

- разряды внутри изоляции;

- разряды с земляного электрода.

Рассмотрим эти разряды немного подробнее.

- Коронный разряд с высоковольтного электрода.

Классические коронные разряды возникают на поверхности высоковольтного проводника (в зоне максимума питающего напряжения) и являются наиболее часто встречающимися импульсами разрядной активности на подстанциях.

Они имеют полярность, противоположную напряжению сети: на положительной полуволне напряжения возникают отрицательные импульсы, а на отрицательной полуволне - положительные.



Согласно рисунку 3 на положительной полуволне сетевого напряжения электроны с земляного потенциала стекают к выступу на высоковольтном электроде, многократно усиливая свою энергию. При отрицательной полуволне напряжения электроны растекаются от высоковольтного электрода, по пути теряя свою энергию.

Отличие коронных разрядов от классических частичных разрядов заключается в том, что они возникают вблизи максимума напряжения питания при каждой полярности, а не на участках роста напряжения.

Наибольшая энергия импульсов у положительной короны (на положительной полуволне). Частотный диапазон генерируемых импульсов таких разрядов очень велик, от частот

звукового диапазона (килоггерцы) и до 100 МГц, в зависимости от участка коронного разряда.

Энергия положительной короны (на отрицательной полуволне приложенного напряжения), значительно меньше, поэтому частота генерируемых импульсов выше, и может достигать 300 МГц.

Диагностическая значимость коронных разрядов для оценки технического состояния трансформаторов обычно невелика, чаще всего при проведении диагностических измерений это только сильная высокочастотная помеха.

- Разряд внутри высоковольтной изоляции.

Частичные разряды внутри высоковольтной изоляции наиболее опасны для дальнейшей работы силового трансформатора. Они могут возникать из-за наличия различных нарушений структуры и качества изоляции: наличия газовых и жидкостных включений, трещин, а также при общем увлажнении изоляции.

Поскольку этот дефект находится внутри изоляции, он «генерирует» частичные разряды на обеих полуволнах питающего напряжения на участках роста амплитуды питающего напряжения. На участках спада амплитуды напряжения частичных разрядов от этого дефекта не возникает.

Для примера на рисунке 4 приведены два PRPD распределения синхронно зарегистрированных импульсов частичных разрядов от одного и того же дефекта внутри изоляции трансформатора. Различие графиков распределения импульсов состоит в использовании диагностического оборудования, работающего в различных диапазонах частот: высокочастотном ВЧ и сверхвысокочастотном СВЧ.

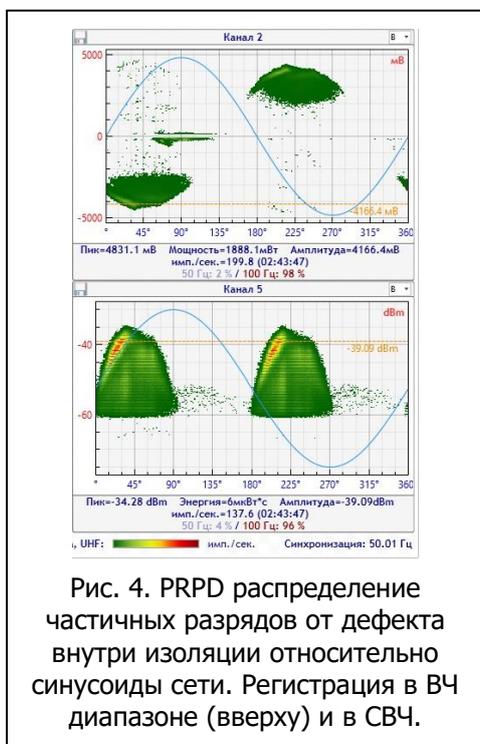
В ВЧ диапазоне частот полярность импульсов определяется точно (они отрицательные на положительной полуволне питающего напряжения и положительные на отрицательной полуволне). В СВЧ диапазоне это сделать достаточно сложно из-за колебательной формы импульса и особенностей используемых датчиков – электромагнитных антенн, поэтому импульсы не разделены по полярности.

Для справки: на обоих зарегистрированных PRPD распределениях присутствуют импульсы от трех дефектов: дефекта в изоляции, поверхностного загрязнения и помехи от импульсов короны, которые не удалось полностью подавить. При

внимательном рассмотрении эти дефекты можно разделить достаточно просто.

- Поверхностный разряд или расслоение элементарных проводников в обмотке.

Очень «красивый» вид имеют PRPD распределения импульсов частичных разрядов, которые генерируют дефекты типа «расслоение параллельных проводников в обмотке», или «поверхностный



разряд». Распределение импульсов частичных разрядов при таких разных по названию дефектах очень похоже, поэтому чтобы их разделить между собой практическому диагносту нужно хорошо знать физические особенности их возникновения, а также конструкцию изоляционной системы контролируемого высоковольтного оборудования.

У дефектов такого типа энергия частичных разрядов является переменной величиной, она пропорционально (практически однозначно) возрастает с ростом напряжения питающей сети, причем

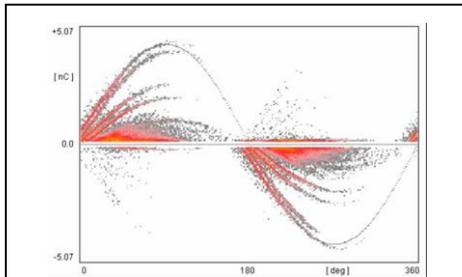


Рис. 5. PRPD распределение импульсов частичных разрядов при поверхностном загрязнении, расслоении элементарных проводников в обмотке.

разряды могут возникать даже при небольших приложенных напряжениях. Поэтому разряды от каждой зоны дефекта на PRPD распределении обычно представляются «лучиком», выходящим из нулевой точки синусоиды, по форме (пропорционально) повторяющим синусоиду приложенного напряжения. Каждый лучик из разрядов доходит до амплитудного значения питающего напряжения и исчезает.

Начальный участок лучика обычно присутствует при дефекте «расслоение внутри элементарных проводников обмотки», когда искровые разряды (не путать с частичными!) возникают даже при малых приложенных напряжениях. Если это дефект типа «поверхностный разряд», то начального участка у лучика обычно нет, так как при таком дефекте возникают классические частичные разряды, а они могут возникнуть только при достаточно большом напряжении.

При дефекте в изоляции типа плавающий потенциал лучик деформируется еще сильнее, при этом не только исчезает его начальный участок, но и он сам из участка синусоиды превращается в прямую горизонтальную линию, так как амплитуда возникающих частичных разрядов становится одинаковой при любой величине приложенного напряжения. Примеры и причины этого приведены ниже на рисунке 6.

На рисунке 5 выделяются 4 лучика, соответствующие наиболее сильно развитым дефектным зонам на поверхности изоляции между элементарными проводниками. Все импульсы разрядов от остальных дефектных зон сливаются в обобщенный дефект, который более всего соответствует наименованию «дефект внутри высоковольтной изоляции», что соответствует выше описанной природе возникновения этого дефекта.

- Разряд типа «плавающий потенциал».

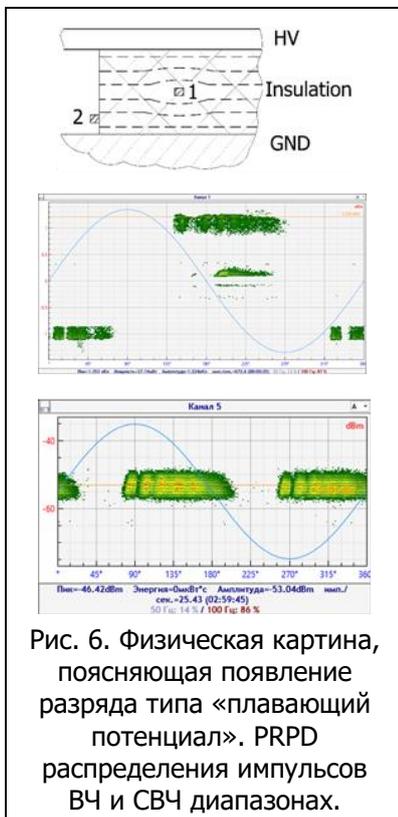


Рис. 6. Физическая картина, поясняющая появление разряда типа «плавающий потенциал». PRPD распределения импульсов ВЧ и СВЧ диапазонах.

Источником частичных разрядов в изоляции часто бывают различные дефекты структуры, особенно газовые и жидкостные «пузырьки». Проводящие металлические включения в изоляцию (частица 1 на верхнем рисунке 6) не могут быть источниками частичных разрядов по определению. Они могут только исказить структуру внутреннего распределения потенциала внутри изоляции.

Металлические включения и конструкционные элементы могут создавать специфический дефект изоляции, который называется «плавающий потенциал». Такой дефект генерирует частичные разряды сравнительно большой энергии, но обычно он не опасен для дальнейшей эксплуатации трансформатора.

При дефекте типа плавающий потенциал металлический элемент (частица 2 на верхней части рисунка 6) должен находиться на поверхности изоляции вблизи высоковольтного или земляного электрода, но гальванически он должен быть не связан с ними. Величина изоляционного зазора между включением и рядом расположенным электродом должна быть такой, чтобы он пробивался при напряжении, меньшем, чем амплитудное значение питающей сети.

Частичные разряды при дефекте типа плавающий потенциал возникают на обеих полярностях питающего напряжения. Энергия разрядов в этом случае постоянна, т. к. пробивается зазор постоянной величины, а величина энергии возникающих частичных разрядов всегда связана с параметрами изоляционного промежутка, ну и конечно же с размерами металлического включения.

PRPD распределение импульсов частичных разрядов, показанное на среднем рисунке 6, было зарегистрировано в ВЧ диапазоне частот. Нижний рисунок показывает PRPD распределение импульсов при

дефекте типа плавающий потенциал, зарегистрированном в СВЧ диапазоне частот. Здесь также не

определена полярность импульсов на разных полу волнах питающего напряжения, что свойственно СВЧ измерениям.

Если за счет энергии возникающих частичных разрядов произойдет науглероживание треков на участке от металлической частицы 2 до земляного электрода (верхняя часть рисунка 6), то плавающий потенциал трансформируется в дефект типа поверхностный разряд, при этом PRPD распределение импульсов будет больше похоже на распределение, показанное на предыдущем рисунке 5.

Это является наиболее опасным вариантом развития и преобразования дефекта типа плавающий потенциал, но чаще всего и это не будет критическим для дальнейшей работы контролируемого силового трансформатора. Определяющим является то, что возникающие науглероженные треки будут иметь ограниченные локальные размеры: от ближайшего электрода (высоковольтного или земляного) до металлического включения в изоляцию, и не захватят весь изоляционный промежуток. Даже если произойдет пробой локального науглероженного участка от металлической частицы до земляного электрода оставшийся изоляционный промежуток, вероятнее всего, сохранит свои свойства.

2. Датчики и измерительное оборудование для контроля частичных разрядов.

2.1. Первичные датчики, используемые для регистрации разрядной активности в силовых трансформаторах.

- Акустические датчики и датчики контроля поверхностных высокочастотных токов растекания.

Наиболее простым и оперативным способом регистрации частичных разрядов в силовых трансформаторах является использование акустических и акустико-эмиссионных датчиков. Такие датчики монтируются на боковых стенках бака контактным способом, обычно при помощи магнитов. Частота регистрируемых такими датчиками импульсов разрядов – до 500 кГц.



Рис. 7. Акустический датчик и датчик контроля токов растекания.

Сравнительная дешевизна и простота установки акустических датчиков значительно нивелируется их низкой помехозащищенностью. Также, поскольку акустические сигналы от частичных разрядов быстро затухают внутри бака, вторым недостатком использования акустических датчиков является малая зона контроля, особенно внутри бака с многими конструктивными элементами.

В настоящее время акустические датчики применяются только в переносных приборах, предназначенных для поиска и локализации мест разрядной активности внутри бака трансформатора.

Еще одним типом датчиков частичных разрядов, которые могут монтироваться на внешней поверхности бака силового трансформатора, являются датчики растекания высокочастотных поверхностных токов, которые в литературе принято обозначать как датчики TEV типа. Эти датчики регистрируют различные высокочастотные импульсы в диапазоне до 150 МГц.

Недостатком датчиков типа TEV, как и акустических, является их низкая помехозащищенность. Это происходит потому, что на поверхность корпуса бака наводятся токи не только от внутренних частичных разрядов в элементах изоляции силового трансформатора, но и от многочисленных высокочастотных «помеховых» импульсов, распространяющихся снаружи. Эти внешние высокочастотные импульсы обычно имеют большую

амплитуду, и их количество значительно больше.

Поэтому датчики типа TEV лучше вообще не применять при контроле разрядной активности внутри бакового высоковольтного оборудования.

- Высокочастотные трансформаторы тока для регистрации высокочастотных импульсов в силовых трансформаторах.

Высокочастотные трансформаторы токов марки RFCT (в зарубежной литературе для них используется обозначение HFCT) предназначены для регистрации высокочастотных импульсов и сигналов. Поэтому они часто используются в системах регистрации частичных разрядов и других импульсных сигналов в силовых трансформаторах.

Высокочастотные трансформаторы RFCT отличаются от обычных измерительных трансформаторов тока промышленной частоты использованием в них сердечников высокочастотных ферритовых материалов.

Принцип работы датчиков типа RFCT можно описать следующим образом. После возникновения частичного разряда в изоляции происходит деформация электрических или магнитных полей в изоляции в зоне дефекта. Для восстановления этих полей в первоначальное состояние происходит импульсная подкачка энергии извне, возникает высокочастотный импульс тока из питающей сети, который мы и

измеряем при помощи датчика. По этой причине датчики RFCT могут быть расположены на достаточно большом удалении от места возникновения частичных разрядов в изоляции.



Рис. 8. Высокочастотные трансформаторы тока марки RFCT.

Частотный диапазон импульсов частичных разрядов, регистрируемых при помощи датчика типа RFCT, зависит от ферромагнитных свойств сердечника, верхняя граница диапазона обычно не превышает 30 МГц. Чувствительность и помехозащищенность этих датчиков можно характеризовать как средние.

Датчики контроля частичных и искровых разрядов марки RFCT в силу своего конструктивного исполнения могут монтироваться только на проводниках, на которых невозможно появление повышенного напряжения более 1000 В. В трансформаторах и в другом высоковольтном оборудовании это обычно проводники заземления бака трансформатора, различных экранов, нейтрали первичной и вторичной обмоток.

Фирмой ДИМУРУС производится несколько видов датчиков серии RFCT, около 15 типоразмеров и конструкций. Эти датчики имеют различные

геометрические размеры, разъемную или неразъемную конструкцию, пластиковый или металлический корпус и могут быть предназначены для монтажа на круглых проводниках или плоских шинах.

Все эти особенности конструкции датчиков определяются местом и размерами проводника, на которых предполагается их монтировать, а также условиями будущей эксплуатации.

- Использование высоковольтных вводов силовых трансформаторов в качестве измерительных конденсаторов – емкостных делителей напряжения.

Для измерения частичных разрядов в высоковольтном оборудовании часто используются конденсаторы связи – емкостные делители напряжения, выделяющие из питающего напряжения промышленной частоты большого напряжения высокочастотные импульсы малой амплитуды.

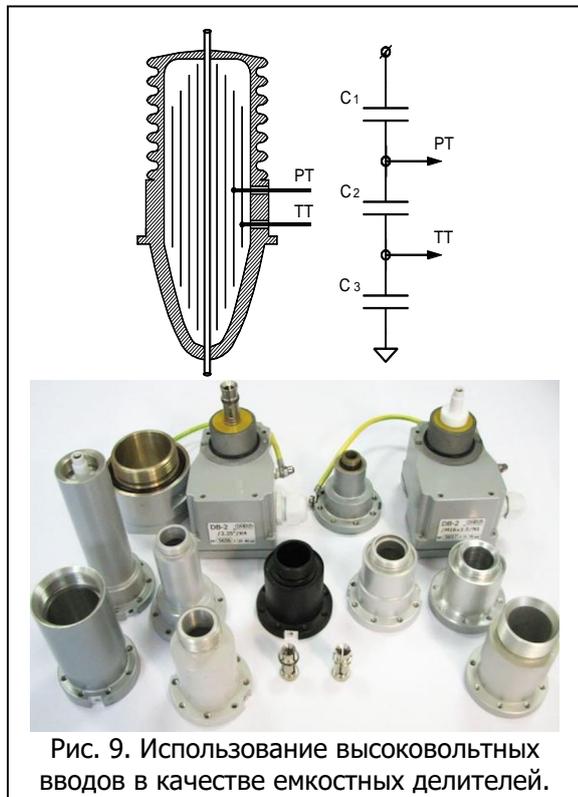


Рис. 9. Использование высоковольтных вводов в качестве емкостных делителей.

Высоковольтный ввод силового трансформатора представляет собой классический конденсатор связи, у которого верхнее плечо делителя состоит из нескольких последовательно включенных конденсаторов – изолирующих обкладок ввода. Задачей диагноста является осуществление правильного и безопасного подключения измерительного прибора.

Для подключения переносных и стационарных приборов для измерения частичных разрядов обычно используется измерительный вывод от последней обкладки ввода (конденсатора C3), который называется Test-Tap (ТТ) или ПИН.

Второй вывод от предпоследней обкладки, который показан на рисунке 9, обычно называется Potential-Tap (РТ). Он служит для отбора мощности для питания собственных нужд трансформатора, для этого вводы должны иметь специальное конструктивное исполнение. Он присутствует на используемых в практике вводах достаточно редко.

К ПИН высоковольтного ввода также подключаются защитные устройства, которые контролируют токи проводимости вводов и обеспечивают отключение трансформатора при пробое нескольких изолирующих обкладок. Поэтому на ПИН вводов

устанавливаются комплексные датчики, позволяющие измерять и токи проводимости изоляции промышленной частоты, и высокочастотные импульсы частичных разрядов.

Ввиду наличия большого многообразия фирм, выпускающих высоковольтные вводы, существует еще большее многообразие конструкций ПИН, на которые должны надежно и достаточно герметично

устанавливаются датчики частичных разрядов. Для примера на фотографии приведены варианты конструкции датчиков DB-2, выпускаемых фирмой ДИМРУС.

- Электромагнитные антенны для регистрации высокочастотных импульсов в СВЧ диапазоне частот.

В качестве датчиков частичных разрядов в силовых маслонаполненных трансформаторах в последнее время все чаще используются электромагнитные антенны различной конструкции. Во всех последних литературных источниках и стандартах приводится информация, что электромагнитные антенны максимально эффективны для измерения частичных разрядов в силовых трансформаторах.



Рис. 10. Электромагнитные антенны СВЧ диапазона частот.

Такие датчики имеют существенные достоинства:

- Электромагнитные антенны встраиваются внутрь трансформатора, благодаря чему они экранируются от внешних электромагнитных импульсов металлическим баком трансформатора.

- Благодаря тому, что антенны регистрируют импульсы частичных разрядов в сверхвысокочастотном СВЧ диапазоне от 0,5 до 2,0 ГГц (UHF), они полностью нечувствительны к импульсам коронных разрядов.

На верхнем рисунке (рисунок 10) показана конструкция разъемной антенны, правая часть которой устанавливается в бак трансформатора на заводе изготовителе. Сама антенна, показанная слева, может монтироваться и демонтироваться в условиях эксплуатации. На нижнем рисунке показана неразъемная электромагнитная антенна, встраиваемая в бак трансформатора на заводе.

Как вариант для оперативного измерения частичных разрядов в СВЧ диапазоне частот в трансформаторах вполне достаточно иметь на баке трансформатора радиопрозрачную вставку, к которой можно снаружи приложить любую электромагнитную антенну СВЧ диапазона частот, защитив ее от внешних помех ферромагнитным экраном.

- Интеллектуальные датчики для регистрации и анализа частичных разрядов в маслонаполненном высоковольтном оборудовании.

Поскольку в настоящее время при проведении диагностических работ на первый план выходят вопросы управления эксплуатацией высоковольтным оборудованием по техническому состоянию с определением оптимальных сроков проведения ремонтных работ, то для регистрации частичных разрядов все чаще используются интеллектуальные датчики частичных разрядов. Эти датчики не только регистрируют разрядную активность в баке трансформатора, но и благодаря наличию встроенной экспертной системы производят определение типа дефекта и анализ скорости его развития.



Рис. 11. Интеллектуальный датчик частичных разрядов марки Smart-PD/2, работающий в СВЧ диапазоне частот.

В качестве примера такого датчика можно привести датчик марки Smart-PD/2 производства фирмы ДИМРУС. Он предназначен для проведения измерения СВЧ частичных разрядов в изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов.

Основным конструктивным отличием датчика Smart-PD/2 является использование в нем двух одинаковых электромагнитных антенн (двух каналов измерения), включенных по дифференциальной схеме. Одна антенна конструктивно располагается внутри бака трансформатора, а вторая снаружи.

Вторым, алгоритмическим отличием датчика является наличие встроенной экспертной системы.

Назначением интеллектуального датчика марки Smart-PD/2 является определение текущего технического состояния изоляции трансформаторов в режиме мониторинга.

Итоговым заключением работы интеллектуального датчика частичных разрядов является информация о допустимом сроке безопасной эксплуатации контролируемого трансформатора, рассчитанном при помощи встроенной экспертной системы после

определения типа дефекта и оценки степени его опасности, а также на основании построения и анализа параметров адаптивной цифровой модели изоляционной системы трансформатора.

Интеллектуальный датчик марки Smart-PD/2 является современной, эффективной и сравнительно дешевой заменой «больших» систем мониторинга частичных разрядов, обычно используемых для контроля технического состояния изоляции силовых трансформаторов.

Наличие в программном обеспечении датчика встроенной экспертной системы максимально повышает информативность получаемых диагностических заключений и, как следствие, кратно снижает стоимость поставки диагностического оборудования.

2.2. Измерительные приборы и системы мониторинга частичных разрядов в силовых трансформаторах.

Описать все многообразие диагностического оборудования отечественного и зарубежного производства, которое можно использовать для регистрации и анализа частичных разрядов в силовых трансформаторах и которое представлено на нашем рынке, практически невозможно, но это и не является целью данной работы. Основным определяющим параметром при выборе диагностического оборудования для измерения частичных разрядов, как обычно, является соотношение параметров и цены.

Отечественным лидером на рынке приборов и программ контроля и анализа частичных разрядов является фирма ДИМРУС. С диагностическим оборудованием производства фирмы ДИМРУС можно ознакомиться на нашем сайте [www/dimrus.ru](http://www.dimrus.ru).

Классифицировать это измерительное оборудование можно по нескольким основным параметрам:

- По диапазону частот, в котором производится измерение частичных разрядов: акустика, ВЧ, СВЧ.
- По количеству измерительных каналов: одноканальные и многоканальные приборы.
- По принципу применения: стационарное и переносное измерительное оборудование.
- По наличию или отсутствию экспертной диагностической системы, автоматически определяющей тип дефекта в изоляции, выдающей рекомендации по эксплуатации трансформатора.
- По наличию или отсутствию алгоритмов формирования критериев управления эксплуатацией изоляции силовых трансформаторов и т.д.

Измерение и анализ частичных разрядов в высоковольтной изоляции эффективно может проводить только подготовленный диагностический персонал, который, как мы считаем, уже определился с выбором необходимого ему измерительного и диагностического оборудования.

Если используемое измерительное оборудование имеет встроенную экспертную программу, в автоматическом режиме формирующую необходимые отчетные документы, то уровень специальной подготовки диагностического персонала может быть ниже.

3. Определение типа дефекта и степени его опасности для дальнейшей эксплуатации трансформатора. Оценка текущего технического состояния изоляционной системы силового трансформатора.

3.1. Определение типа дефекта.

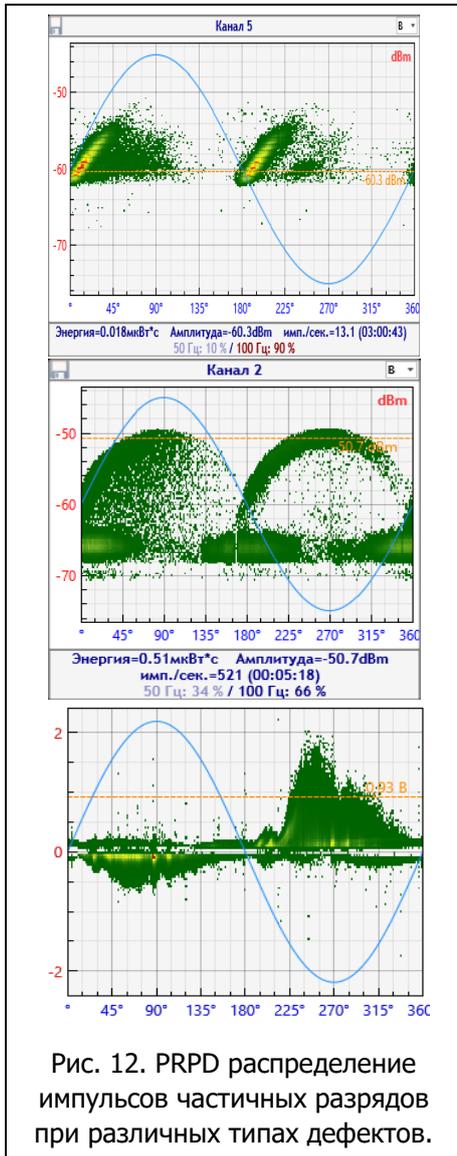
Каждый дефект в высоковольтной изоляции, генерирующий частичные разряды, имеет свое характерное распределение импульсов частичных разрядов на PRPD плоскости (Phase Resolved Partial Discharges) - фазовом распределении импульсов частичных разрядов относительно синусоиды питающей сети. Это распределение импульсов частичных разрядов в зарубежной литературе, из-за его большой значимости и информативности, часто называют «отпечатком пальца» дефекта в высоковольтной изоляции, его уникальным образом.

Практическое построение PRPD распределения импульсов частичных разрядов достаточно просто. Для этого используется плоскость с координатами: «фазовый угол синусоиды – амплитуда импульса частичного разряда». Для облегчения дальнейшего процесса определения типа дефекта на графике распределения наносится стилизованная синусоида питающей сети с безразмерной амплитудой, но фиксированной фазовой привязкой.

На этой PRPD плоскости точками отражаются все зарегистрированные импульсы: время возникновения и максимальная амплитуда зарегистрированного высокочастотного импульса. Увеличение количества импульсов в данной точке плоскости отображается цветом.

Различие в PRPD образах различных дефектов обусловлено тем, что частичные разряды при разных дефектах изоляции возникают на разных фазовых углах синусоиды сети, имеют разную полярность и максимальную амплитуду. Также они имеют различную зависимость от изменения амплитуды приложенного напряжения. В результате после группирования импульсов дефект имеет характерную уникальную картинку.

Конечно, для различных типов высоковольтной изоляции (различного высоковольтного оборудования) имеются специфические модификации PRPD распределений. Но их отличия никогда не



являются критическими, основные физические основы возникновения того или иного типа частичного разряда или его модификации сохраняются.

Количество оригинальных, основополагающих PRPD распределений от классических дефектов в высоковольтной изоляции, реально существующих на практике, не превышает 4-5, и все они приведены в предыдущем разделе, где описывались оригинальные дефекты в изоляции силовых трансформаторов.

Если дополнительно учесть все достаточно часто встречающиеся модификации дефектов, которые возникают в различных типах высоковольтного оборудования, то можно говорить, в максимальном случае, не более чем о 30 PRPD оригинальных или модифицированных дефектах.

Каждому оригинальному или модифицированному дефекту в изоляции всегда и однозначно соответствует PRPD распределение, которое в диагностике называется образом дефекта. В реальных условиях в оборудовании может быть несколько дефектов в изоляции, образы которых накладываются друг на друга на общем PRPD распределении. Это создает более сложную картину распределения импульсов и затрудняют процесс определения типа каждого из дефектов.

Еще сложнее дело обстоит в трехфазном оборудовании, в котором в общем баке находятся все три фазы. В этом случае происходит наложение образов дефектов в разных фазах как по амплитуде, так и с учетом фазных сдвигов на 120 градусов. В результате процесс диагностики значительно усложняется.

Тем не менее, другого практически применимого способа определения типа дефекта, кроме использования PRPD образов элементарных дефектов в высоковольтной изоляции, на практике не существует. Это единственно правильный диагностический путь, потому что он основан на знании физических процессов возникновения разрядов в изоляции.

Если в распоряжении диагноста находится база данных образов дефектов в изоляции, точнее говоря, он умеет отделять эти образы дефектов друг от друга, то определение типа реального дефекта в изоляции, являющегося источником разрядов, не является очень сложной задачей.

Эту же задачу может более или менее успешно решать автоматизированная экспертная система, которая некоторыми производителями диагностического оборудования включается в состав программного обеспечения диагностики и мониторинга.

3.2. Особенности разделения импульсов частичных разрядов от двух и более дефектов, имеющих разный тип и локализацию.

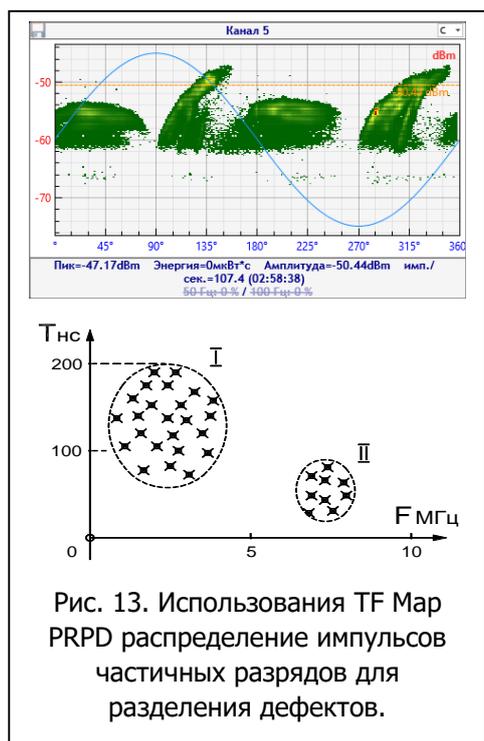
Одновременно в изоляции силового трансформатора одним датчиком могут быть зарегистрированы импульсы частичных разрядов от нескольких дефектов, которые могут различаться несколькими параметрами:

- Типом дефекта, возникшего в изоляции.
- Степенью развития дефекта, т. е. уровнем регистрируемых частичных разрядов. Чем сильнее развит дефект, тем больше уровень разрядов.
- Удалением дефекта от измерительного датчика. Из-за затухания высокочастотных импульсов внутри трансформатора уровень частичных разрядов от удаленного дефекта будет меньшим.
- Наложением разрядов от разных фаз. Датчик, установленный, например, в фазе А трансформатора, может регистрировать импульсы от дефекта в фазе В, что усложнит процесс идентификации дефекта.

Для разделения нескольких типов дефектов, которые будут одновременно зарегистрированы в баке трансформатора при помощи одного датчика частичных разрядов и «наложены друг на друга» на общем PRPD распределении импульсов разрядов, в некоторых случаях может быть полезным использование еще одного представления импульсов, которое называется «TF Map» распределением (Время Частотная Карта).

На приведенном в качестве примера на рисунке 13 PRPD распределении импульсов частичных разрядов, зарегистрированных одним датчиком в баке трехфазного силового трансформатора в СВЧ

диапазоне частот (датчик установлен на фазе А), опытный диагност может достаточно быстро дифференцировать и разделить между собой 4 дефекта в изоляции трансформатора.



Эти дефекты различаются интенсивностью генерируемых частичных разрядов, своим типом и местом возникновения.

Если говорить кратко, то это:

- Плавающий потенциал в обмотке фазы С.
- Дефект внутри изоляции в обмотке фазы С.
- Два вида поверхностного загрязнения изоляции (или же расслоения элементарных проводников в обмотке) в фазе В.

Если же диагност не имеет достаточно серьезной подготовки и практического опыта, то разделить эти дефекты на PRPD между собой будет для него достаточно сложно.

Для формализации процедуры разделения нескольких импульсов от нескольких дефектов, регистрируемых одним датчиком, может быть полезным использование специализированного так называемого «TF Мар» распределения импульсов частичных разрядов.

Для построения TF Мар распределения импульсов частичных разрядов используются два параметра импульса:

- Частота импульса частичного разряда, определенная по параметрам первого фронта, в МГц.
- Полная длительность импульса частичного разряда, обычно имеющего вид затухающих колебаний НС.

Импульсы от разных типов дефектов или дефектов, имеющих различную локализацию, с большой долей вероятности,

будут автоматически группироваться в отдельных зонах TF Мар представления распределения импульсов частичных разрядов. После этого выделившиеся группы импульсов по отдельности переносятся на PRPD распределение и эти импульсы локально идентифицируются по типу дефекта.

3.3. Нормирование состояния изоляции силового трансформатора по типу дефекта и интенсивности частичных разрядов, оценка текущего технического состояния.

Вопрос нормирования результатов измерения и анализа частичных разрядов в силовых трансформаторах, как и для всех других диагностических методов, является максимально важным, но в настоящее время он не имеет однозначного, общепринятого решения.

Это обусловлено практическим наличием нескольких важных технических, технологических и конструктивных особенностей используемой в трансформаторах высоковольтной изоляции, количество которых не менее пяти:

- Реально существующее многообразие типов высоковольтной изоляции не позволяет создать единые и целостные критерии категорий качества изоляции обобщенного типа.
- Конструкция изоляционных элементов высоковольтного оборудования оказывает сильное влияние на пороги технического состояния всей изоляции силового трансформатора.
- Различные дефекты в изоляции, имеющие даже одинаковый уровень генерируемых частичных разрядов, имеют различную опасность для эксплуатации силовых трансформаторов.
- Интенсивность регистрируемых частичных разрядов от дефектов очень сильно зависит от удаления дефектной зоны от измерительного датчика.
- Скорость развития дефектов в изоляции зависит от многих параметров, включая тип изоляции контролируемого высоковольтного оборудования.

По этой причине оперативная диагностика технического состояния изоляции трансформаторов строится, в основном, не на количественных критериях, а на основе сравнительных качественных категориях технического состояния, типа:

- Наличие или отсутствие в контролируемом силовом трансформаторе частичных разрядов.
- Возникновение частичных разрядов за время наблюдения, наличие скачков в интенсивности частичных разрядов.
- Тип дефекта, являющегося источником частичных разрядов. При этом основным параметром для этой категории диагностики является оценка степени опасности выявленного дефекта.
- Наличие временного тренда в увеличении уровня частичных разрядов, особенно генерируемых наиболее опасным дефектом.

4. Текущее техническое состояние изоляционной системы трансформатора. Прогнозирование и управление эксплуатацией силовых трансформаторов.

Силовой трансформатор является сложным электротехническим оборудованием, состоящим из нескольких взаимосвязанных подсистем: вводов, обмоток, магнитопровода, устройства РПН, конструктивных элементов, системы охлаждения и т. д. Каждая из этих подсистем трансформатора контролируется определенным набором датчиков и оценивается специализированной экспертной системой. Итоговое техническое состояние трансформатора является результатом интегрирования частных диагностических заключений, получаемых отдельными экспертными системами.

Основными результатами работы (локальной) экспертной диагностической системы, работающей на основе регистрации и анализа частичных разрядов в изоляции, являются два аспекта:

- Заключение о текущем техническом состоянии изоляционной системы трансформатора. Оно включает в себя обобщенную информацию о зарегистрированных частичных разрядах, выявленных дефектах и степени их опасности для эксплуатации трансформатора.

- Прогноз изменения технического состояния изоляции на будущих этапах эксплуатации трансформатора, оптимальные сроки и объемы необходимых ремонтных и сервисных воздействий.

Для цели прогнозирования используется цифровой двойник изоляционной системы трансформатора, максимально достоверно описывающий реальные физические процессы как при бездефектном состоянии изоляции, так и при наличии саморазвивающихся дефектных состояний.

Параметры цифрового двойника должны быть адаптивными, автоматически корректируемыми в процессе эксплуатации из-за воздействия различных параметров эксплуатации трансформатора, нагрузки, при возникновении признаков первичных дефектных состояний и т. д.

Наиболее корректно цифровой двойник изоляции трансформатора описывается самонастраивающейся моделью, коэффициенты которой автоматически корректируются:

- С учетом реальных условий эксплуатации контролируемого трансформатора, параметров нагрузки, режимов, особенностей работы питаемых объектов.

- При наличии в изоляции силового трансформатора признаков дефектных состояний, выявленных встроенной экспертной системой.

- С учетом изменяющейся скорости саморазвития дефектных состояний, возможной вторичной генерации и самогенерации новых дефектных признаков.

Использование математической модели адаптивного цифрового двойника изоляционной системы трансформатора является обязательным условием для решения вопросов управления эксплуатацией.

5. Плюсы и минусы контроля разрядных процессов в силовом трансформаторе методом частичных разрядов по сравнению с хроматографическим контролем растворенных в масле газов.

Появление и развитие частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов (внутри бака трансформатора) можно контролировать двумя методами: при помощи хроматографического анализа растворенных газов в масле бака трансформатора и измерением (прямым и косвенным) параметров разрядной активности в баке трансформатора.

Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки.

Хроматографический анализ растворенных газов:

- Достоинство: возможность дополнительного контроля термических перегревов элементов в баке силового трансформатора.

- Недостатки: большой интервал времени между появлением разрядов и насыщением масла в баке характерными растворенными газами, невозможность контроля состояния изоляции вводов.

Регистрация частичных разрядов.

- Достоинства: Оперативность измерений. Возможность контроля элементов трансформатора, не связанных с общим объемом бака трансформатора, а именно, высоковольтных вводов и, в ряде случаев, устройств РПН.

- Недостатки: невозможность контроля температурных перегревов элементов трансформатора.

С точки зрения экономической эффективности, оборудование контроля (измерения) частичных разрядов обычно дешевле устройств контроля растворенных газов в масле бака.

С точки зрения безопасности работы трансформатора большинство стандартных датчиков частичных разрядов не требуют их установки во внутреннем объеме бака трансформатора, тогда как все устройства контроля растворенных газов в масле должны иметь непосредственную связь с баком трансформатора.