

Оглавление

1. Техническое описание прибора «R2100»	4
1.1. Назначение	4
1.2. Технические характеристики прибора	4
1.3. Расположение внешних разъемов на приборе.....	5
1.4. Описание принципа действия прибора	6
1.4.1. Описание основных алгоритмов работы входных цепей прибора «R2100».....	7
1.4.2. Принцип действия основных алгоритмов «разборки» входных импульсов от датчиков частичных разрядов.....	8
1.4.3. Представление информации в приборе	13
1.4.4. Регистрация формы импульсов и рефлектограмм.....	14
2. Общие вопросы проведения измерений частичных разрядов.....	17
2.1. Параметры частичных разрядов.....	17
2.2. Способы диагностики видов дефектов в изоляции высоковольтного оборудования по частичным разрядам	19
2.2.1. Анализ параметров частичных разрядов	19
2.2.2. Оценка состояния и диагностика дефектов изоляции по распределению импульсов частичных разрядов	23
2.3. Результаты измерений частичных разрядов на натуральных моделях дефектов изоляции.....	33
3. Измерение частичных разрядов в изоляции электрических машин ...	43
3.1. Установка первичных датчиков.....	43
3.2. Схемы измерения частичных разрядов в электрических машинах с использованием дополнительных источников напряжения	46
3.3. Схемы измерения частичных разрядов в электрических машинах под рабочим напряжением.....	49
3.4. Калибровка схем измерения частичных разрядов в электрических машинах	51
4. Измерение частичных разрядов в кабельных линиях	53
4.1. Установка первичных датчиков контроля частичных разрядов в кабельных линиях	53
4.2. Схемы измерения частичных разрядов в кабельных линиях в режиме «off-line»	60
4.3. Схемы измерения частичных разрядов в кабельных линиях в процессе работы под нагрузкой.	62
4.4. Калибровка схем измерения частичных разрядов в кабельных линиях	66
5. Измерение частичных разрядов в высоковольтных распределительных устройствах - КРУ	67
5.1. Установка датчиков частичных разрядов в КРУ.....	67
5.2. Схемы измерения частичных разрядов в КРУ	68
5.3. Калибровка схем измерения частичных разрядов в КРУ.....	69
6. Измерение частичных разрядов в силовых трансформаторах.....	70
6.1. Подключение датчиков частичных разрядов к вводам	

трансформаторов	71
6.2. Схемы измерения частичных разрядов в трансформаторах	78
6.3. Схемы измерения частичных разрядов в трансформаторах с отстройкой от коронных разрядов	80
6.4. Схемы измерения частичных разрядов в трансформаторе в режиме «off-line»	85
6.5. Калибровка схем измерения частичных разрядов в трансформаторах	86
7. Датчики частичных разрядов.....	88
7.1. Датчик RFCT-1.....	89
7.2. Датчик RFCT-2.....	89
7.2. Датчик RFCT-3.....	90
7.3. Датчик RFCT-4.....	90
7.4. Датчик RFCT-5.....	90
7.5. Датчик RFCT-6.....	91
7.6. Конденсатор связи марки СС	92
7.7. Датчик DRTD-3 для измерения ЧР в электрических машинах при помощи термометров сопротивления	93
7.8. Датчик AR-1 для синхронизации измерения частичных разрядов в особых условиях	94
7.9. Датчик короны KS-60 для проведения измерений в высоковольтных трансформаторах.....	94
7.10. Датчики DB-1,2 для контроля токов проводимости вводов и частичных разрядов	95
7.11. Датчик DBT-1 для «временного» монтажа на ПИН вводов	96
8. Технические средства калибровки измерительных схем	97

1. Техническое описание прибора «R2100»

1.1. Назначение

Прибор «R2100» является современным микропроцессорным переносным устройством, позволяющим решать одну из наиболее сложных задач современной диагностики состояния высоковольтного оборудования –



Рисунок 1.1. Внешний вид прибора «R2100»

контролировать состояние изоляции по уровню частичных разрядов под рабочим напряжением.

Прибор марки «R2100» предназначен для использования подготовленным персоналом в условиях научных центров, лабораторий, производственных цехов и в полевых условиях. Прибор «R2100», с комплектом датчиков, является автономным комплектным диагностическим устройством.

Прибор может применяться в условиях воздействия повышенных электромагнитных полей промышленной частоты - на распределительных подстанциях, электростанциях. Для прибора «R2100» предусмотрено универсальное питание – от питающей сети и встроенного аккумулятора большой емкости, что также расширяет сферу его применения.

Прибор имеет металлический защитный корпус, обеспечивающий защиту от пыли и брызг. Управление прибором осуществляется при помощи пленочной герметизированной клавиатуры. Транспортировка прибора осуществляется в герметичном чемодане, с внутренней защитой от ударов.

1.2. Технические характеристики прибора

Для повышения достоверности получаемых результатов в приборе реализован набор уникальных диагностических алгоритмов анализа входных импульсов. Наиболее важным является то, что все эти алгоритмы работают в режиме реального времени, что позволяет максимально облегчить процедуру диагностики состояния изоляции по уровню частичных разрядов.

Основными, и наиболее значимыми, являются алгоритмы:

- Анализ частотных свойств и формы каждого входного импульса.
- Использование матриц перекрестной наводки импульсов с одного канала на другой. Практически это выглядит как синхронное сравнение амплитуд импульсов ЧР в контролируемом канале с амплитудой импульсов ЧР в других каналах.
- Анализ времени запаздывания, или времени опережения, прихода импульса с контролируемого канала, относительно импульсов, регистрируемых с других каналов. Технические средства прибора позволяют различать импульсы от ЧР, разделенные в пространстве участком кабеля или шины длиной 1 метр.
- Анализ и сравнение полярности импульсов, пришедших с соседних измерительных каналов. В силу особенностей применяемых датчиков ЧР и схем их включения полярность

импульса, зарегистрированного в кабеле, в котором возник импульс, противоположна полярности импульса ЧР в другом кабеле, для которого этот же импульс является внешним.

Использование этих алгоритмов анализа и «разборки» входных импульсов ЧР от датчиков ЧР позволяет разделять место возникновения частичного разряда, максимально учитывая конструктивные и эксплуатационные особенности высоковольтного оборудования различного типа. Диагностические работы могут быть выполнены в трансформаторах, электрических машинах, кабельных линиях, КРУ, высоковольтных выключателях.

Основные технические параметры прибора «R2100» приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

№	Параметр	Значение
1	Количество каналов измерения ЧР	до 12
4	Допустимая длина коаксиальных кабелей от датчиков до прибора «R2100»	до 100 м
5	Время полного цикла контроля по 12 каналам	2-30 мин
6	Частотный диапазон регистрируемых импульсов ЧР	1 ÷ 10 МГц
7	Динамический диапазон регистрируемых импульсов ЧР	70 дБ
8	Фазовая точность определения момента возникновения импульса, относительно синусоиды промышленной частоты	7,5 град
9	Погрешность определения места возникновения ЧР в кабеле при помощи встроенного рефлектометра	±2 м
10	Выносной датчик температуры окружающей среды	Pt100
11	Выносной датчик контроля влажности окружающей среды	0-100%
12	Внешний интерфейс для подключения компьютера	USB RS-232
13	Объем памяти для хранения архива выполненных измерений ЧР в кабелях	32 МВ
14	Время работы от внутреннего аккумулятора	8 часов
15	Напряжение питания зарядного устройства	~220 В
16	Диапазон допустимых внешних рабочих температур, при работе без термостата	-20 ÷ +45 градусов
17	Гарантийный срок на прибор и датчики	18 мес.
18	Время эксплуатации прибора	не менее 10 лет
19	Габаритные размеры прибора	230x170x90
20	Масса прибора	5,0

1.3. Расположение внешних разъемов на приборе

Прибор «R2100» может быть использован в двух основных режимах работы – проведении периодических измерений уровня частичных разрядов в высоковольтном оборудовании, и в режиме «временного» мониторинга, когда он устанавливается на оборудовании для проведения стационарных измерений. Для решения этих задач в приборе предусмотрены разъемы, обеспечивающие оперативное подключение и отключение первичных датчиков, смонтированных на оборудовании.

Подключение кабельных линий от измерительных датчиков в приборе «R2100» производится при помощи стандартных коаксиальных разъемов марки BNC. С верхнего торца прибора, как это показано на рисунке 1.2., расположены, в два ряда по шесть, разъемы для подключения датчиков ЧР.

Корпуса датчиков, производства фирмы «Вибро-Центр» изолированы от внутренних измерительных цепей благодаря использованию изолирующего корпуса из АВС с допол-

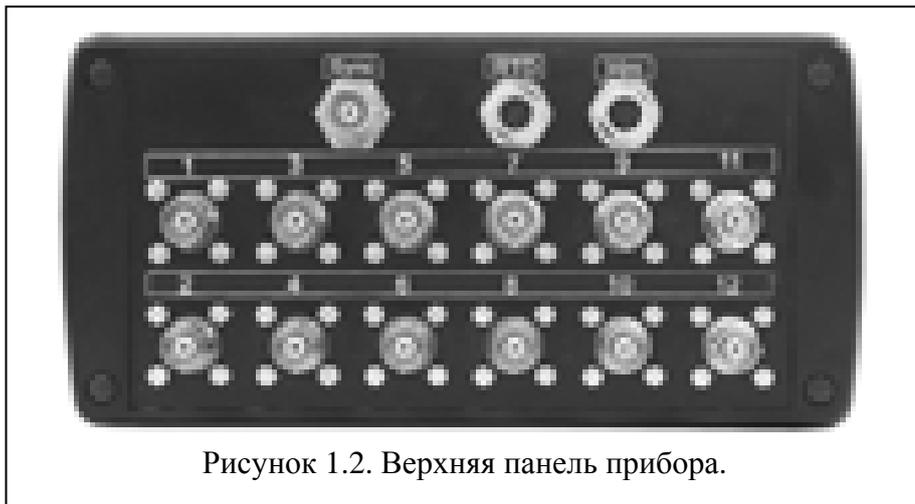


Рисунок 1.2. Верхняя панель прибора.

нением стекловолокна. Датчики подключаются к прибору при помощи коаксиальных кабелей RG-58, экраны которого соединены с корпусом разъема, и, следовательно, с корпусом прибора. По этой причине экраны всех коаксиальных кабелей соединены между собой, но изолированы от мест установки

датчиков. Это позволяет максимально снизить вероятность появления потенциала на корпусе прибора.

В целях безопасности с прибором могут быть использованы только датчики, имеющиеся в комплекте поставки прибора! При использовании измерительных датчиков производства других фирм, или собственного изготовления, необходимо убедиться, что отсутствует прямой контакт между измерительными цепями датчика (прибора) и контролируемым объектом!

В верхнем ряду верхней панели прибора располагаются: вход для внешней регистрации (Ref), вход для датчика влажности (Hm), вход для датчика температуры (RTD).

Часть разъемов располагается на нижней (торцевой) крышке прибора. Эти разъемы применяются только при работе не на объекте.



Рисунок 1.3. Нижняя панель прибора.

Внешний вид нижней крышки прибора «R2100» показан на рисунке 1.3. На ней расположены: разъем для подключения стандартного кабеля USB, RS-232, и сетевого кабеля - для работы в стационарном режиме, и подзарядки аккумулятора.

1.4. Описание принципа действия прибора

Прибор марки «R2100» имеет 12 входных разъемов для подключения до 12 датчиков частичных разрядов, предназначенных для регистрации электрических ЧР. Все входные каналы прибора равноценны и независимы друг от друга, имеют идентичное входное сопротивление 50 ом. Для повышения надежности прибора все входные каналы имеют встроенную защиту от паразитных импульсных помех и фильтры, выделяющие сигналы ЧР в диапазоне от 1 до 10 МГц.

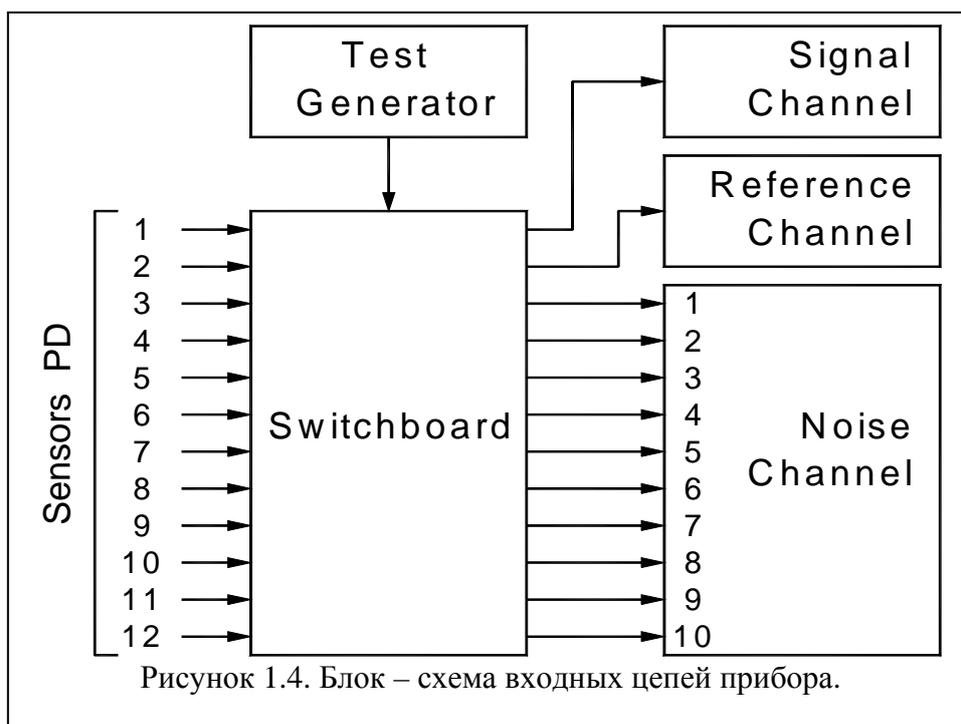
Принцип действия прибора «R2100» существенно отличается от работы стандартных осциллографов, которые также используются в практике исследования частичных разрядов. Основное различие состоит в том, что в приборе «R2100», сразу же, на аппаратном уровне, в режиме реального времени, решается вопрос о том, является ли данный импульс следствием возникновения частичных разрядов в контролируемом оборудовании, или он имеет другую природу возникновения. Для этого используются специальные алгоритмы, оценивающие параметры входных импульсов. Благодаря этому пользователь принимает участие только в процедуре анализа распределения импульсов, что оптимизирует процесс диагностики.

Второй особенностью работы прибора является то, что импульсы, которые возникают в контролируемом высоковольтном оборудовании по другим причинам, или «пришедшие» в оборудование из внешней среды по соединительной линии, из рассмотрения автоматически исключаются. Такая функция существенно повышает оперативность работы диагностического персонала, исключая рутинную работу анализа места возникновения каждого импульса. В конечном итоге, это дает возможность уменьшить время на проведение диагностических работ, повысить достоверность проводимых исследований.

Прибор предназначен для проведения измерения частичных разрядов в различном высоковольтном оборудовании. Наличие комбинированного питания, сетевого и аккумуляторного, сравнительно небольшие габариты и удобная конструкция, позволяют использовать его для проведения измерений в лабораторных и полевых условиях.

1.4.1. Описание основных алгоритмов работы входных цепей прибора «R2100»

Блок – схема входных цепей прибора «R2100» приведена на рисунке 1.2. На входной высокочастотный программно управляемый коммутатор прибора «Switchboard» поступает до 12 сигналов от первичных датчиков и один тестовый сигнал от встроенного генератора калибровочных частичных разрядов. Количество используемых первичных каналов определяется пользователем, в каждом конкретном случае в зависимости от типа контролируемого оборудования и решаемой диагностической задачи. При помощи входного коммутатора



коммутатора первичные сигналы от датчиков, в любом порядке, могут быть поданы на 12 выходных линий.

При помощи сигнала от тестового генератора, который при помощи внутреннего коммутатора может быть подан в любой измерительный канал, производится проверка и тестирование

входных цепей и измерительных каналов прибора перед каждым измерением.

Регистрация частичных разрядов по каналам всегда производится последовательно, по выбору пользователя. Сигнал с этого канала подается на измерительный канал «Signal Channel», показанный на блок – схеме прибора. Внутри измерительного канала, в режиме реального времени, анализируются временные и амплитудные параметры каждого импульса, и принимается решение, можно ли считать пришедший импульс результатом возникновения в контролируемом оборудовании частичного разряда в изоляции, или это результат воздействия помех.

Важную роль в борьбе с помехами играет использование «референсного» канала «Reference Channel». Существует много измерительных схем, в которых выявление «истинности» импульса ЧР производится сравнением параметров импульса по измеряемому каналу, с параметрами сигнала, проходящего по дополнительному, опорному, референсному каналу. При этом, обычно, датчик, подключаемый к референсному каналу, располагается, на контролируемом объекте, рядом с основным измерительным датчиком, или на фиксированном удалении от него, или имеет отличия во внутреннем устройстве.

Канал «Noise Channel» предназначен для реализации в приборе принципа «амплитудной разборки». При «синхронном» появлении на «шумовом канале» импульса, амплитуда которого равна или превышает амплитуду импульса по «измерительному каналу», на выходе шумового канала появляется импульс, который блокирует регистрацию данного импульса.

Особенностью работы прибора «R2100» является то, измерение параметров частичных разрядов по любому выбранному каналу всегда производится с учетом работы референсного и шумового каналов. Работа всех измерительных каналов происходит синхронно, в режиме реального времени. Только такой подход дает возможность максимально отстроиться от помех различного типа, количество которых в высоковольтном оборудовании очень велико.

Пользователь сам выбирает, сигналы от каких датчиков подключаются к этим «помеховым» каналам. Для правильного выбора комбинаций каналов (сигнальный, референсный и шумовые каналы) необходимо представлять внутреннее устройство контролируемого оборудования, понимая особенности возникновения, распространения и затухания в нем импульсов частичных разрядов.

1.4.2. Принцип действия основных алгоритмов «разборки» входных импульсов от датчиков частичных разрядов

Как уже указывалось выше, достоверность диагностики состояния изоляции высоковольтного оборудования во многом определяется тем, насколько эффективно в измерительном приборе работает система отстройки от помех.

Следует также очень хорошо понимать, что качественно отстроиться от помех можно только в режиме реального времени, непосредственно в процессе измерения. В дальнейшем, на основании анализа уже зарегистрированных данных, выполнить эту процедуру столь же эффективно невозможно. Это связано с тем, что импульсы частичных разрядов имеют высокую частоту и скорость распространения внутри оборудования. Разность времени прихода импульсов, пришедшим от нескольких датчиков, в несколько наносекунд, может явиться основанием для отбраковки зарегистрированного импульса. Все это предъявляет жесткие требования к частотным свойствам измерительной аппаратуры, к возможностям автоматизированной диагностики параметров импульсов в процессе регистрации.

Сложной проблемой при регистрации и «разборке» импульсов частичных разрядов является то, что амплитуды импульсов могут различаться по своей величине в сотни, и даже в тысячи раз. При этом импульс частичного разряда даже самой малой амплитуды должен быть гарантированно выше уровня шума измерительного оборудования. По этой причине динамический диапазон измерительного канала прибора регистрации частичных

разрядов должен быть не менее $60 \div 70$ db (диапазон амплитуд входных сигналов не менее $5000 : 1$), при низком уровне шума. При несоблюдении этого условия точность получаемых результатов резко снижается.

Прибор «R2100» является современным микропроцессорным устройством, в котором реализован целый набор алгоритмов отстройки от помех, которые можно объединить в три основные группы:

1 - синхронное сравнение знаков сигналов от двух датчиков частичных разрядов, регистрируемых по основному, измерительному, и референсному каналам;

2 - определение разновременности прихода импульсов от двух датчиков частичных разрядов, регистрируемых по измерительному, и референсному каналам;

3 - синхронное сравнение амплитуды импульса по измерительному каналу и всем другим каналам.

Первые два способа отстройки от помех реализованы в приборе «R2100» благодаря применению референсного канала «Reference Channel», см. рисунок 1.4., который определяет параметры опорного импульса, и сравнивает их с параметрами импульса, регистрируемого по основному каналу измерения частичных разрядов. Для реализации отстройки помех при помощи сравнения амплитуд основного и опорного импульсов в приборе «R2100» используется шумовой канал «Noise Channel».

1.4.2.1. Алгоритм «разборки» импульсов частичных разрядов при помощи сравнения полярности

В приборе запрограммирован специальный логический алгоритм отбраковки импульсов на основе сравнения полярностей, управляемый пользователем. Он позволяет, при сравнении полярностей импульсов, по измерительному каналу, и по референсному, блокировать счет импульсов. Блокировка «счета импульса» может происходить при совпадении, или же при несовпадении полярностей двух импульсов. Естественно, что при таком сравнении на референсный канал прибора должен подаваться (по выбору пользователя) сигнал от датчика частичных разрядов, который установлен на контролируемом оборудовании должным образом. При неправильном выборе сигнала, подаваемого на референсный канал, эффект от использования данного метода может быть отрицательным.

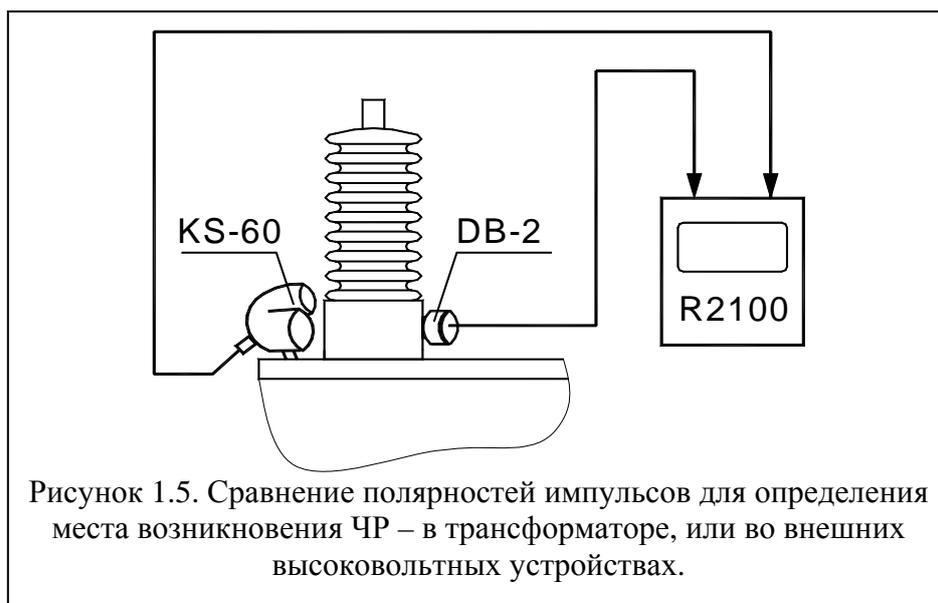


Рисунок 1.5. Сравнение полярностей импульсов для определения места возникновения ЧР – в трансформаторе, или во внешних высоковольтных устройствах.

Пример практического применения алгоритма сравнения полярностей двух импульсов для определения места возникновения дефектов в изоляции крупных генераторов показан на рисунке 1.5. Для реализации метода на вводе трансформатора устанавливают два датчика. Первый

датчик марки «DB-2» монтируется на ПИН ввода. Второй датчик коронных разрядов марки «KS-60» устанавливается рядом с вводом.

Если частичный разряд возникает в основной изоляции обмотки трансформатора, импульс от частичного разряда «выходит из трансформатора» через ввод. Если возникает

импульс коронного разряда, то он «входит в трансформатор». Вне зависимости от направления движения импульса, полярность сигнала на выходе датчика «DB-2» будет совпадать с полярностью импульса от частичного разряда, т. к. ввод является, практически идеальным, конденсатором связи.

Иначе дело будет обстоять в датчике короны. В зависимости от направления движения импульса через ввод, полярность выходного сигнала датчика «KS-60» будет совпадать, или не совпадать с полярностью импульса частичного разряда. Это связано с тем, что датчик короны регистрирует сигнал, пропорциональный электрической составляющей электромагнитного поля от импульса ЧР.

В соответствии с этим можно утверждать, что при совпадении (несовпадении) полярностей сигналов на выходе датчиков «DB-2» и «KS-60», сигнал от ЧР «входит в трансформатор», т. е. является результатом воздействия помех. При несовпадении (совпадении) полярностей импульсов сигнал «выходит из трансформатора», т. е. является результатом возникновения частичных разрядов в изоляции трансформатора.

1.4.2.2. Алгоритм отстройки от помех по времени прихода импульсов от разных датчиков

В зарубежных источниках этот алгоритм называется «time of arrival» - разница во времени прихода импульсов в прибор от разных датчиков. Он находит широкое применение при анализе пространственно распределенных объектов, например, электрических генераторов и двигателей, кабельных линий, КРУ.

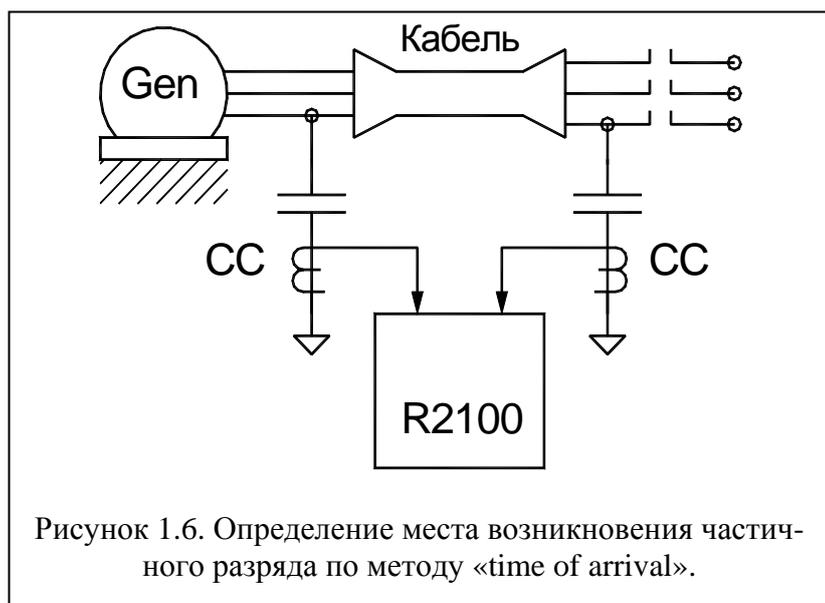
Скорость движения электромагнитной волны поля, в кабельных линиях, немного больше половины скорости света. Приблизительно можно считать, что один метр кабельной линии импульс ЧР преодолит за 6 – 7 наносекунд. Это очень малый отрезок времени, но благодаря применению современной элементной базы в приборе можно, достаточно уверенно, контролировать такие сдвиги времени.

Таким образом, можно утверждать, что если расстояние между местами установки датчиков достаточно значительно, реально не менее 1 – 2 метров, то при помощи прибора «R2100» можно определить направление движение импульса ЧР по контролируемой линии. При этом обязательно нужно помнить о том, что длины соединительных кабелей от датчиков до прибора «R2100» должны быть одинаковыми. В противном случае, в соединительных кабелях возникнут свои задержки импульсов по времени прихода, в них тоже

скорость движения импульса ЧР имеет такое же значение.

Для иллюстрации работы алгоритма «разборки» импульсов по времени прихода «time of arrival», на рисунке 1.6. показано возможное расположение датчиков при поиске места возникновения частичных разрядов или в генераторе, или во внешних цепях.

При появлении «на внешних зажимах контролируемого генератора» сигналов (от)



частичных разрядов всегда встает главный вопрос, возникли ли эти ЧР внутри генератора, или же они «пришли» извне, от выключателя, от другого оборудования, может быть и от входного трансформатора предприятия.

Неправильный ответ на этот вопрос может привести к значительным проблемам для службы эксплуатации высоковольтного оборудования. Оптимальным решением этой проблемы, определения места возникновения частичного разряда, является использование возможностей метода «разборки импульсов» по времени прихода.

Контролируемый генератор (электродвигатель) подключен к питающей сети, например, через кабель небольшой длины, при помощи высоковольтного выключателя. С двух сторон соединительного кабеля, на каждой фазе, монтируются конденсаторы связи марки «СС». Таким же образом конденсаторы могут быть установлены при использовании в генераторе шинпровода. Минимальное расстояние между конденсаторами связи (разница во времени пролета импульса от частичного разряда к разным конденсаторам связи) составляет 1 метр,

Если импульс от частичного разряда возник в генераторе, то он сначала будет зарегистрирован на конденсаторе связи, установленном на зажимах генератора. На втором конденсаторе связи, установленном на противоположном конце кабеля, импульс от частичного разряда появится с задержкой времени, обусловленной «пролетом» импульса по кабелю. Например, если длина кабеля равняется 20 метров, то задержка времени составит $6 * 20 = 120$ наносекунд.

При возникновении частичных разрядов в выключателе (например), сигнал сначала будет зарегистрирован на близко расположенном конденсаторе, и только через 120 наносекунд он появится на конденсаторе связи, установленном на генераторе.

В первом случае импульс ЧР является «полезным» (информативным) для проведения диагностики, во втором случае импульс является «шумовым», и из процедуры оценки состояния изоляции исключается.

Напомним, что при использовании такой схемы «разборки» импульсов соединительные кабели от датчиков к прибору должны иметь одинаковую длину. Это необходимо для того, чтобы не внести погрешность в определение времени прихода импульсов, т. к. и в соединительных кабелях сигнал от датчиков «задерживается». Задержка времени составляет ту же величину, 6 – 7 наносекунд на метр коаксиального кабеля.

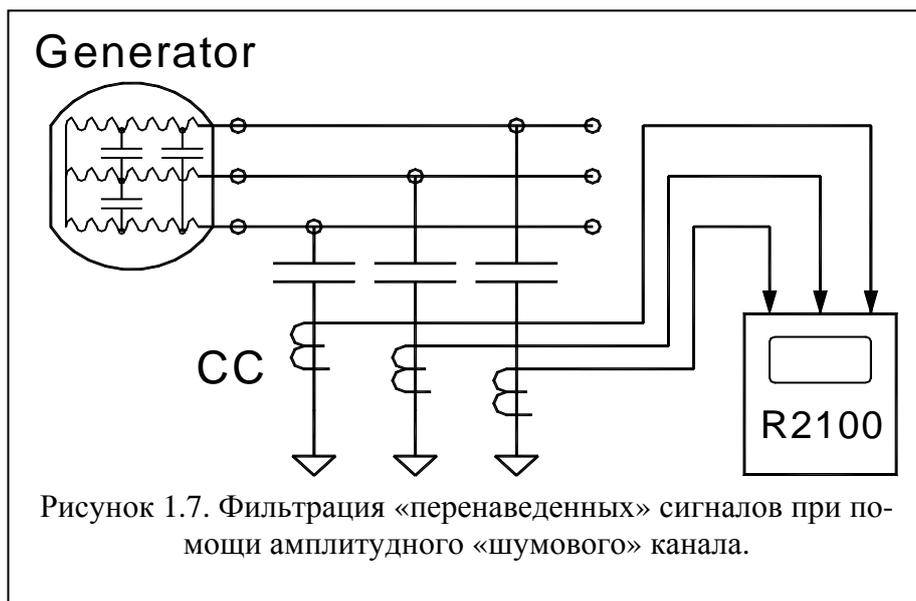
1.4.2.3. Алгоритм отстройки от помех с использованием амплитудных матриц перенаводки

Этот способ отстройки схемы измерения от помех, как уже говорилось выше, основан на сравнении амплитуд сигналов, пришедших в прибор по измерительному, основному каналу, и всем другим каналам. Он реализован на основе использования суммирующего амплитудного канала, который показан на блок – схеме входных цепей прибора на рисунке 1.4. Этот способ отстройки от помех является, сравнительно, более простым, чем два предыдущих способа, т. к. позволяет использовать более простые схемные решения в приборе. В ряде случаев данный метод оказывается наиболее действенным, т. к. помогает отстроиться от импульсов, наведенных внутри высоковольтного оборудования. В качестве примера можно рассматривать наводку импульсов с фазы на фазу внутри электрической машины, или трансформатора.

Принцип работы «разборки» импульсов при помощи сравнения амплитуд прост. Если амплитуда сигнала, контролируемого по основному измерительному каналу, меньше, чем синхронно измеряемая амплитуда по любому, или определенному, каналу, то это сигнал не относится к данному контролируемому объекту (части объекта). Данный импульс, пришедший с датчика на вход прибора, является «помеховым». Он возник в другом месте (контролируемого объекта), и «перенавелся» внутри объекта, например, с одной фазы на другую.

Для корректной работы алгоритма «разборки» импульсов по амплитуде необходимо сравниваемый сигнал подавать, внутри прибора, на дополнительный, «шумовой» канал, который показан на рисунке 1.4., в предыдущем разделе методического руководства, как канал «Noise Channel». На вход этого канала постоянно подключаются все сигналы с пер-

вичных датчиков, которые при данном измерении не подключены к измерительному, или опорному, референсному каналам.



В качестве примера можно говорить о том, что импульс тока от частичного разряда, возникающий в фазе «А» генератора, показанного на рисунке 1.7., по внутренним емкостным связям между обмотками (в лобовых частях и в пазах статора), «перенаведется» на обмотки фазы «В» и «С».

Естественно, что амплитуда сигнала ЧР на выходе датчика, установленном на фазе «В» будет меньше, а на фазе «С» еще меньше. Информация о внутренних связях между фазами объекта, влияющих на уровень перенаведенных сигналов, обычно, представляется в виде матрицы перенаводки. В ячейках такой матрицы стоят коэффициенты, которые показывают степень ослабления сигнала при наводке с одного участка оборудования на другой (например, с одной фазы на другую). Эти коэффициенты показывают, в относительных единицах, на сколько уменьшается сигнал при перенаводке из одной зоны (контролируемого оборудования) в другую зону.

\	U _A	U _B	U _C	U _N
U _A	1	0,8	0,6	0,7
U _B	0,8	1	0,8	0,5
U _C	0,6	0,8	1	0,5
U _N	0,7	0,5	0,5	1

Рисунок 1.8. Примерный вид матрицы перенаводки для схемы измерения частичных разрядов с 4 датчиками в трансформаторе.

В практических условиях, перед проведением измерений частичных разрядов, матрицы перенаводки снимают экспериментально. На отключенном оборудовании, в различные точки контролируемого оборудования, подаются тестовые сигналы от генератора – имитатора частичных разрядов, и фиксируются амплитуды на выходе всех установленных датчиков.

Пример матрицы перенаводки приведен на рисунке 1.8. Она получена для схемы измерения частичных разрядов в трансформаторе, на котором установлены 4 датчика. Три

комплексных датчика частичных разрядов и токов проводимости марки ДВ-2 смонтированы на вводах стороны ВН трансформатора, и один датчик марки RFCT-4 смонтирован на нейтрали трансформатора.

При измерении сигналов частичных разрядов на фазе «А» амплитуда сигнала будет максимальной, поэтому данный импульс будет зарегистрирован прибором. При измерении ЧР на фазе «В» импульс будет «забракован» системой разборки. Это объясняется тем, что амплитуда импульса будет меньше, чем амплитуда импульса на фазе «А», хотя и больше, чем на фазе «С». При измерении частичных разрядов на фазе «С» сигнал также будет забракован, т. к. сигналы с двух датчиков фаз «А» и «В» превышают его по амплитуде.

1.4.3. Представление информации в приборе

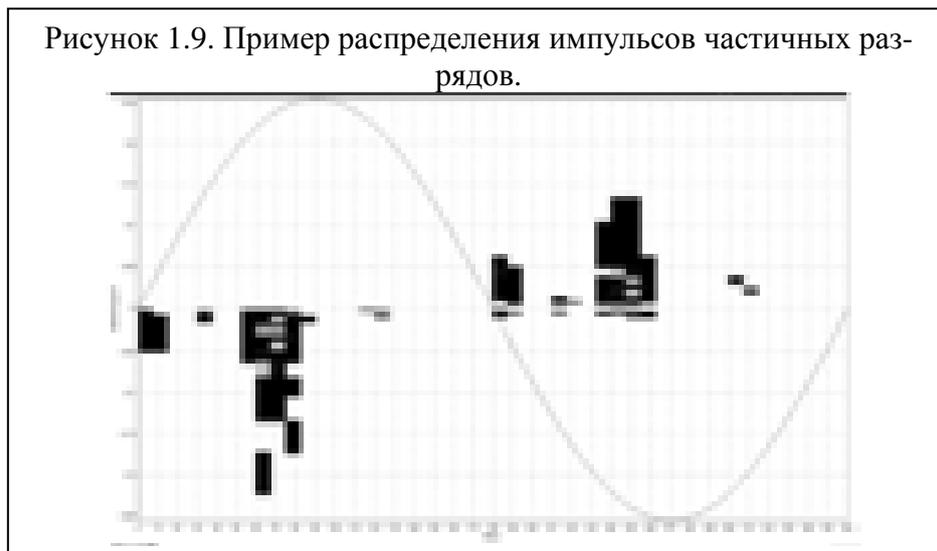
В памяти прибора «R2100» представление (и сохранение) информации о зарегистрированных импульсах частичных разрядах в каждом измерительном канале производится в виде трехмерной матрицы. Каждая ячейка матрицы имеет следующие параметры: фаза (фазовая зона) питающего напряжения, амплитуда импульса, количество импульсов данной амплитуды в данной фазовой зоне.

В матрице распределения импульсов частичных разрядов, в приборе марки «R2100», один период синусоиды питающего напряжения подразделяется на 48 зон, шириной по 7,5 градуса каждая ($360^{\circ} / 48 = 7,5^{\circ}$).

По амплитуде регистрируемых импульсов в приборе имеется 32 градации. Ширина каждой амплитудной зоны 2,2 dB. Соотношение амплитуд максимального и минимального сигналов, регистрируемых прибором, составляет 5000:1. Общее количество амплитудных зон в приборе «R2100» составляет 64, с учетом зон для учета импульсов положительной и отрицательной полярности.

Для удобства регистрации и анализа распределения импульсов в приборе «R2100», импульсы, имеющие близкие амплитуды, считаются одинаковыми. При различии менее, чем на 20%, импульсы «складываются» в общую ячейку матрицы.

В каждой ячейке матрицы распределения импульсов частичных разрядов находится число, от 0 до 255, которое соответствует количеству зарегистрированных импульсов с такими параметрами.



На рисунке 1.9. показан пример распределения импульсов частичных разрядов, зарегистрированных в кабельной линии 110 кВ. Из рисунка хорошо видно, что максимальная амплитуда и интенсивность частичных разрядов имеет место перед достижением напряжением питающей

сети максимума. Полярность импульсов противоположна полярности питающего напряжения. Интенсивность импульсов частичных разрядов повышена в моменты перехода питающего напряжения через ноль.

По каждому каналу прибором может быть зарегистрировано и показано несколько матриц. Это может быть матрица положительных импульсов, матрица отрицательных импульсов, матрица импульсов, забракованных системами разборки, и т. д.

Сохранение информации в приборе.

Зарегистрированные данные могут храниться во внутренней памяти прибора в виде трехмерных матриц и/или в сокращенной форме в виде интегрального множества извлеченного из этих матриц. Если по каналу производился запуск рефлектометра, то к замеру «дописываются» зарегистрированные рефлектограммы.

Замеры импульсов частичных разрядов сохраняются, или не сохраняются, в памяти прибора по выбору пользователя. Сохранение замеров в приборе осуществляется структурировано, по каталогам, каждый каталог соответствует какому-либо объекту.

Тренды изменения параметров частичных разрядов во времени, для конкретного оборудования, строятся в рамках одного каталога. Наибольшее число каталогов в памяти прибора – 32, один каталог, называемый по умолчанию «Базовый объект», существует всегда, его можно переименовать, но нельзя удалить.

1.4.4. Регистрация формы импульсов и рефлектограмм

1.4.4.1. Основной функцией прибора «R2100» является регистрация частотного распределения импульсов относительно синусоиды питающей сети. Дополнительно к регистрации матриц распределения импульсов в приборе имеется возможность регистрации формы импульсов частичных разрядов, что расширяет возможности диагностики изоляции высоковольтного оборудования.

На экране прибора можно просмотреть только те импульсы, которые прошли «разборку» во входных цепях на достоверность, выполненную всеми средствами, включенными пользователем в конфигурацию данной регистрации. Это существенно снижает трудоемкость диагностической процедуры, т. к. все импульсы помех из рассмотрения исключаются.

В связи с особенностями схемотехнических решений, принятых в приборе, возможно проведение регистрации до 8 импульсов частичных разрядов, следующих один за другим. Эти импульсы могут быть в течении одной синусоиды питающей сети, или возникать по одному на каждом периоде питающего напряжения. Минимальное временное расстояние между двумя регистрируемыми импульсами не может быть меньше, чем 40 микросекунд. Соответственно, такую длительность имеет каждая регистрация.

В связи с тем, что регистрация производится с очень высокой частотой, она ведется выборочно, в течение коротких интервалов времени, только в момент прохождения импульса частичного разряда. Непрерывная и длительная регистрация импульсов частичных разрядов не может происходить длительно. Кроме того, потребуются очень большие ресурсы оперативной памяти, просмотр и анализ которой занимает много времени.

Запуск прибора на регистрацию формы импульса частичного Разряда производится непосредственно в момент прихода в прибор переднего фронта импульса частичного разряда. Окончание регистрации производится по факту заполнения процессором массива памяти, выделенного для хранения формы одного импульса. Время «одной» регистрации, как уже говорилось выше, составляет 40 микросекунд.

Внутренняя память прибора, выделенная для хранения формы импульсов частичных разрядов, позволяет сохранять информацию о 8 импульсах. После заполнения такого объема прибор останавливается, и пользователь может на экране просмотреть все эти импульсы. Далее можно запускать прибор на следующую регистрацию, автоматически, или при помощи нажатия на кнопку клавиатуры.

Внимание. Следует помнить, что ограничение на просмотр информации о 8 импульсах касается только режима сохранения формы импульсов частичных разрядов. При регистрации матриц распределения импульсов, а этот режим является основным в приборе «R2100», в одном замере (по одному измерительному каналу) может быть сосредоточена информация о нескольких десятках тысячах импульсов. В этом состоит очень важное достоинство такого представления импульсов частичных разрядов.

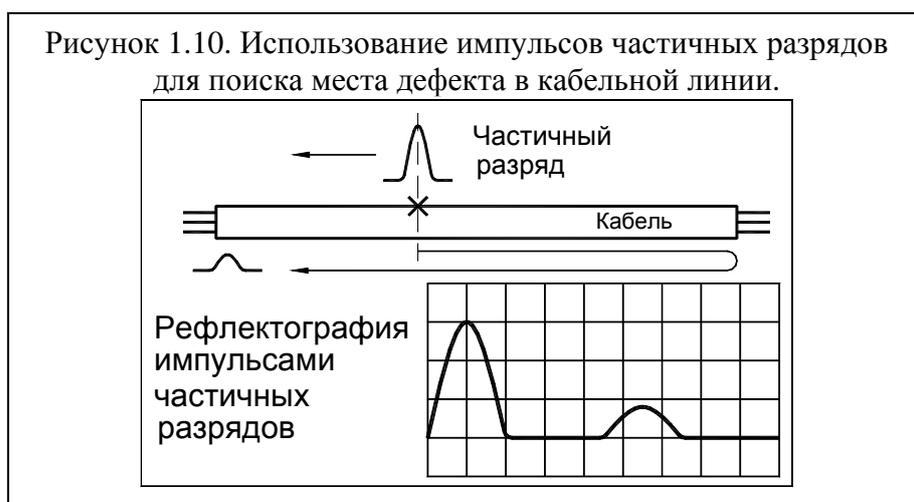
1.4.4.2. Использование прибора «R2100» для локализации места возникновения дефектов в изоляции кабельных линий

Метод рефлектографии достаточно широко применяется в практике для поиска мест возникновения дефектов в кабельных линиях. Метод достаточно прост и эффективен, но и не лишен некоторых недостатков. Основными недостатками являются два. Во-первых, диагностика может производиться только на отключенной кабельной линии. Во-вторых, диагностируемый дефект в изоляции кабельной линии должен быть «развит» до такой сте-

пени, что в его зоне волновые свойства кабельной линии были изменены, только в этом случае возможно отражение (от зоны диагностируемого дефекта) части энергии тестового импульса.

При помощи прибора «R2100», имеющего в своем составе модуль регистрации формы импульсов частичных разрядов, также возможно проведение локализации места возникновения дефектов в изоляции. Используемый при этом метод «модифицированной» рефлектографии приобретает новые свойства. Отличие данного метода рефлектографии от «стандартного» заключается в том, что в качестве тестирующего импульса используется не импульс от встроенного в прибор генератора, а импульс частичного разряда, возникающего в зоне возникшего дефекта изоляции.

На рисунке 1.10 приведен рисунок, поясняющий использование в методе рефлектографии импульсов частичных разрядов. В месте наличия дефекта кабельной линии возник



ает частичный разряд, и, соответственно, электромагнитный импульс. Из зоны возникновения он начнет, по кабельной линии, распространяться в обе стороны, в направлении концевых разделок кабельной линии. С одной стороны, на рисунке это слева,

когда импульс достигнет датчика, то он будет зарегистрирован прибором «R2100». Приблизившись к правому концу кабеля, в месте изменения волнового сопротивления, часть энергии импульса частичного разряда отразится, и отраженный импульс, меньшей амплитуды, будет двигаться в обратном направлении. В тот момент, когда импульс придет к левому концу кабеля, он также будет зарегистрирован прибором «R2100».

Если, в момент прихода первого, «прямого» импульса, начнется регистрация временной формы сигналов, то временная диаграмма по этому каналу будет иметь примерно такой вид, как это показано на рисунке 1.8. Основным интерес, для диагностики места возникновения дефекта, на этой диаграмме имеет временное запаздывание второго, отраженного импульса, от первичного импульса. Количественно, это время было затрачено «отраженным» импульсом на движение, от места возникновения, к правому концу кабеля, и возвращению обратно до зоны возникшего дефекта. Движение от зоны дефекта к левому концу кабеля у каждого импульса занимает одинаковое время, т. е. не изменяет время запаздывания.

Точная диагностика места возникновения дефекта в кабельной линии, при практическом применении метода, затрудняется по нескольким причинам.

Во-первых, скорость движения электромагнитной волны в кабельной линии различна у кабелей различной марки. Основная причина такого различия – различные свойства диэлектриков и конструктивные отличия кабельных линий. Из-за этого при одинаковом времени запаздывания прихода «второго импульса», место расположения дефекта в кабельных линиях может изменяться, в зависимости от скорости движения импульса.

Во-вторых, реальная рефлектограмма может по форме отличаться от идеальной, приведенной на рисунке 1.8. На «полезные» сигналы от дефекта накладываются отражения от соединений, муфт. Для устранения влияния этого эффекта можно, при первичной

калибровке прибора, записывать «опорную» рефлектограмму, снятую классическим способом. По этой рефлектограмме можно уточнить скорость распространения импульсов в данной кабеле, и место расположения муфт. Затем, в процессе эксплуатации прибора, при возникновении реальных импульсов в линии, запускается рефлектометр, и картины распределения импульсов сопоставляются. Зная точные расстояния до мест соединений можно даже уточнить место дефекта.

В-третьих, измерение временного распределения импульсов в кабельной линии, под рабочим напряжением, обычно, усложняется наличием большого количества помех. Для подавления случайных помех прибор «R2100» делает несколько измерений, количество которых может достигать нескольких сотен, усредняя полученную картину. После такой процедуры на временной диаграмме останутся только стабильные, повторяющиеся импульсы.

В самом общем случае, скорость распространения импульсов частичных разрядов можно принять равной один метр за время 6 – 7 наносекунд. При длительности регистрации формы импульса равной 40 микросекунд, импульс от частичного разряда «пробегает» в кабельной линии расстояние, превышающее 6 километров. Таким образом, учитывая двукратный пробег импульсом кабельной линии, прибором «R2100» может диагностироваться кабель общей длиной до двух километров.

Достоинством данного метода является:

- Возможность диагностика кабельных линий, находящихся под рабочим напряжением.
- Выявление возникающих дефектов изоляции кабельной линии на начальных этапах их развития.

2. Общие вопросы проведения измерений частичных разрядов

В данном разделе инструкции рассматриваются наиболее общие вопросы теории частичных разрядов. Все внимание в этом разделе уделяется не математическим выкладкам и формулам, которых здесь практически нет, а объяснениям сложных физических процессов, понятным специалистам, проводящим реальные измерения. Так же анализируются некоторые вопросы процессов регистрации и анализа частичных разрядов в оборудовании различного типа.

2.1. Параметры частичных разрядов

Частичный разряд – это искровой разряд очень маленькой мощности, который образуется внутри изоляции, или на ее поверхности, в оборудовании среднего и высокого классов напряжения. С течением времени, периодически повторяющиеся частичные разряды, разрушает изоляцию, приводя в конечном итоге к ее пробое. Обычно разрушение изоляции под действием частичных разрядов происходит в течение многих месяцев, и даже лет. Таким образом, регистрация частичных разрядов, оценка их мощности и повторяемости, а также локализация места их возникновения, позволяет своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения.

Чтобы правильно понимать принципы работы прибора необходимо определить основные термины и интегральные параметры, описывающие частичные разряды в высоковольтном оборудовании.

Все имеющиеся в мире стандарты по ЧР определяют некоторый набор "интегральных" величин, которые могут рассчитываться или непосредственно измеряться при тесте состояния изоляции. Стандарты разных стран могут различаться в деталях, но, в основном, в основных понятиях они совпадают. В Европе используется стандарт ИЕС-270. Расчетные параметры, получаемые в приборе «R2100», ориентированы на американский стандарт, потому, что прибор создавался для совместной продажи на рынках России и Америки. В России тоже ведутся разработки своего стандарта по ЧР, однако в настоящее время он еще не завершен.

Все стандарты по ЧР базируются на понятии "кажущийся заряд". Под "кажущимся" зарядом понимают такой заряд, который необходимо дополнительно и мгновенно "впрыснуть" в контролируемое оборудование, что бы восстановить равновесие, нарушенное возникновением «внутреннего» импульса ЧР. В этом определении очень важным является то, что мы не знаем параметры реального заряда, например, внутри газового включения, а измеряем (замеряем) реакцию контролируемого высоковольтного объекта схемы на возникший ЧР. Заряд потому и назван "кажущимся", т. к. мы так считаем, не зная истинного значения реального ЧР.

Измеряется кажущийся заряд ЧР в пКл (пико кулонах). Если сложить все заряды, зарегистрированные в оборудовании за одну секунду, то получится ток ЧР – тот ток, который протекает в той цепи, которую контролирует датчик, дополнительно за счет возникновения ЧР. В среднем этот ток является чисто активным и характеризует потери в изоляции из-за возникновения ЧР.

Исторически важной характеристикой является "максимальный измеренный заряд". Почти все изготовители высоковольтного оборудования до сих пор пользуются этой величиной (если вообще чем-то пользуются) при приемных испытаниях. Конечно, все понимают, что нужно измерять, причем что-то статистически достоверное. В старых приборах статистика задается временем усреднения, а в современных приборах это решается удалением из рассмотрения случайных одиночных выбросов. Например, в определении американского стандарта это звучит так: «амплитуда наибольшего повторяющегося разряда при

наблюдении постоянных разрядов». Следовательно, этот термин не предусматривает анализ отдельных выбросов. Чтобы сделать это определение более конкретным, ограничимся учетом только тех ЧР, которые повторяются не менее 10 раз за секунду. В нашем случае, при частоте питающей сети в 50 герц, мы получаем, что один импульс должен быть не реже, чем за 5 периодов сети. Для удобства пользования этот термин будем брать в следующей формулировке: импульс ЧР будем считать периодически повторяющимся, если частота его следования составит 0,2 импульса на один период питающей сети. Далее в тексте параметр будет отражаться как Q_{02} . Для удобства пользования будем делать это одинаково для любой частоты сети, 50 и 60 герц.

Ценность этого параметра достаточно высока. Многие методы диагностики базируются на нем, хотя как отдельно взятый параметр он скорее плохой, чем хороший, по крайней мере, при постоянном мониторинге под рабочим напряжением. Мы имеем много оборудования, где большие (по амплитуде) ЧР живут успешно годами, а малые, но с большой частотой повторения – означают реальную проблему.

Как посчитать потери вызванные ЧР. Это можно сделать достаточно просто, ведь физически при каждом импульсе ЧР, мы дополнительно впрыскиваем из источника испытательного напряжения в контролируемый объект "кажущийся" заряд. Заряд инжектируется мгновенно и связан с конкретным напряжением питающей сети. Значит энергия, которая дополнительно вводится в оборудование (из-за) единичного ЧР, равна заряду, умноженному на мгновенное напряжение на объекте. Далее нужно просуммировать все импульсы и получить полную энергию ЧР. Если полную энергию поделить на полное время суммирования, то получим мощность ЧР. Этот параметр называется "потери энергии на частичные разряды".

Формула:

$$P = \frac{1}{T} \times \sum_1^m Q_i \times V_i$$

где:

P – мощность разрядов, W,

T – время наблюдения, сек,

m – число наблюдаемых импульсов за время T , и

$Q_i V_i$ – энергия i -го импульса

Вполне очевидно, что, базирясь на фазовом распределении импульсов ЧР, можно рассчитать мгновенное значение приложенного напряжения, конечно, если фазовая привязка импульсов выполнена правильно и достоверно рассчитана мощность. Однако совсем не все приборы регистрируют фазовое распределение импульсов, а если эта функция в них реализована, то используемый датчик ЧР может регистрировать импульсы ЧР с двух или даже трех фаз объекта. Какое напряжение следует брать в таком случае, с какой фазы?

Для решения этого вопроса американский стандарт по ЧР предлагает использовать еще один диагностический параметр, который чаще всего называют PDI - "Partial Discharge Intensity". В этом параметре вместо мгновенного напряжения в момент прохождения импульса ЧР, берется его действующее значение, т.е. одинаковое напряжение для всех импульсов, а не персональное для каждого. Проводя сравнительные расчеты можно убедиться, что итоговое различие параметров, рассчитанных в первом и во втором случаях, лежит в пределах 20 %. Этого вполне достаточно, что бы корректно оценить уровень и строить тренд. Параметр PDI является одним из основных, используемых для оценки интенсивности ЧР в контролируемом объекте.

По обоим полученным параметрам, PDI и Q_{02} , прибор «R2100» рассчитывает *тренд* (во сколько раз изменится параметр за год, PDI t и Q_{02t} соответственно) и скачек (процент от предыдущего уровня, PDI j и Q_{02j}). Все эти параметры также могут быть использованы для оценки состояния любого высоковольтного оборудования.

При практической оценке активности частичных разрядов в различном оборудовании разные стандарты, особенно некоторые практические специалисты, используют и другие параметры, но их практическая ценность и пригодность для диагностики, по нашему мнению, существенно ниже. Тем не менее они, иногда достаточно успешно, применяются на практике.

2.2. Способы диагностики видов дефектов в изоляции высоковольтного оборудования по частичным разрядам

Важнейшей задачей диагностики состояния изоляции по параметрам частичных разрядов является проведение качественной оценки. Она имеет своей целью дифференцировать возможный тип дефекта, возникшего в изоляции, а в идеале и локализовать и место его возникновения.

Все известные методы и способы диагностики состояния изоляции можно объединить в две группы.

К первой группе относятся методы, базирующиеся на анализе параметров отдельных импульсов частичных разрядов. В них анализируются амплитудные и частотные параметры зарегистрированных импульсов, а также связи между импульсами, поступающими от датчиков, установленных в различных зонах контролируемого оборудования. Основное назначение методов этой группы – повышение достоверности проводимых измерений за счет более эффективной отстройки от помех.

Ко второй группе относятся методы, базирующиеся на анализе амплитудного и амплитудно – фазового распределения зарегистрированных импульсов частичных разрядов. Целью этих методов является определение типов имеющихся дефектов и оценка влияния дефектов на остаточный ресурс высоковольтной изоляции. Это методы наиболее высокого уровня диагностики, относящиеся к экспертным системам, применяемые для получения конечных заключений о состоянии изоляции.

2.2.1. Анализ параметров частичных разрядов

При помощи методов данной группы обеспечивается необходимая достоверность проведения регистрации частичных разрядов в высоковольтном оборудовании различных типов. Все эти методы, обычно, реализованы на аппаратном уровне, заложены в измерительные приборы изготовителями технических средств.

Как уже говорилось выше, отличие современных приборов регистрации частичных разрядов от осциллографов состоит в том, что выходной информацией прибора является не осциллограмма, нуждающаяся в дополнительной экспертной оценке, а итоговая информация о количестве импульсов, отвечающих определенным требованиям. Весь процесс оценки параметров импульсов происходит в приборе в режиме реального времени, в соответствии с заложенными в техническую часть прибора алгоритмами.

Чем прибор современнее, тем большее количество диагностических алгоритмов реализовано в его технической и программной части. Чем больше реализовано таких алгоритмов, большими возможностями обладает специалист. Это позволяет ему заниматься не бесконечным рутинным просмотриванием осциллограмм, а диагностикой состояния изоляции в прямом ее понимании.

Рассмотрим наиболее важные способы анализа параметров частичных разрядов.

2.2.1.1. Выбор диапазона частот частичных разрядов

Одним из наиболее важных вопросов, возникающий при проведении диагностики состояния изоляции по частичным разрядам, является выбор диапазона частот, в котором предполагается проводить измерения параметров частичных разрядов. В этом вопросе, в рекомендациях различных фирм, изготовителей диагностического оборудования, сущест-

вует очень широкий разброс в параметрах этого диапазона частот от сотен килогерц до гигагерц.

Вопрос выбора частотного диапазона неоднозначен, в нем есть несколько противоположных аспектов, которые попробуем рассмотреть.

а). Параметры «кажущегося» частичного разряда.

Чтобы ответить на один аспект этого вопроса, необходимо вспомнить, какие электрические параметры мы измеряем, что мы считаем «измеренным частичным разрядом». Естественно, что мы не можем провести «прямые» измерения параметров частичных разрядов в изоляции. Сложностью является то, что разряды обычно происходят не только внутри корпуса оборудования, но и даже внутри самой изоляции. Кроме того, напряжения, с которыми работает контролируемое оборудование, бывает настолько большим, что ни о каких «прямых» измерениях о речи не может быть.

После каждого частичного разряда внутри оборудования из питающей сети происходит импульсная «подкачка энергии», необходимая для восстановления распределения электрического поля, искаженного разрядом. Именно этот электрический импульс мы регистрируем при помощи наших датчиков, установленных «вокруг» черного ящика, которым нам представляется контролируемое оборудование.

Из этого следует очень важное заключение. Регистрируемый импульс «от частичного разряда», конечно, имеет связь с параметрами произошедшего внутри частичного разряда, но во многом (можно сказать практически полностью) он сформирован электромагнитными параметрами контролируемого объекта. На параметры регистрируемого прибором импульса оказывают влияние многие факторы - геометрические размеры объекта, его внутренние электромагнитные связи, место возникновения дефекта.

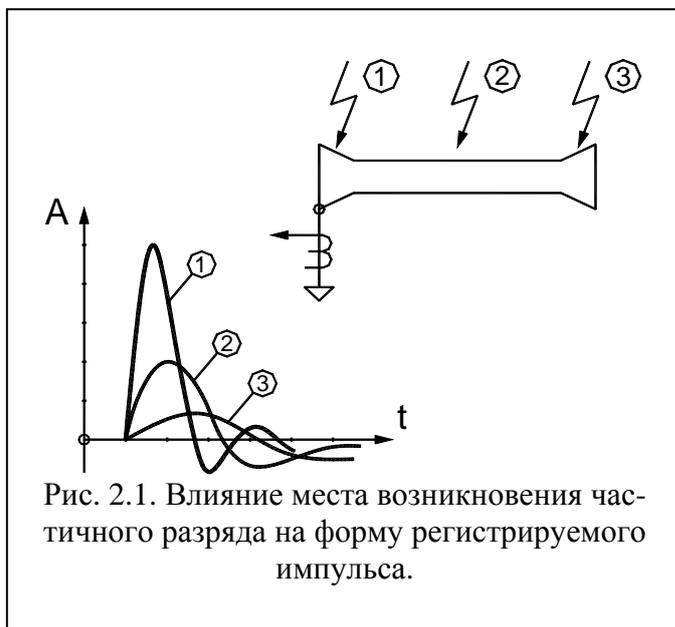
Заключая этот, весьма поверхностный, анализ особенностей измерения частичных разрядов следует сказать следующее. Измерения в самом высокочастотном диапазоне имеют смысл только при контроле «прямого» электромагнитного излучения на подстанции при помощи зонда. При выборе частотного диапазона для проведения измерений внутри оборудования практически всегда следует ориентироваться не на параметры «истинного импульса», а на параметры «трансформированного импульса», регистрируемого снаружи объекта. При этом чаще всего оказывается, что самый высокочастотный импульс, возникший в середине кабельной линии, на концевой разделке, где мы обычно устанавливаем свой датчик частичных разрядов, будет иметь частоту не более одного мегагерца. Аналогичная картина имеет место внутри крупных электрических машин и трансформаторов.

б). Связь реальной «зоны чувствительности» датчика частичных разрядов с его рабочей частотой.

Чем выше частота высокочастотного импульса, тем с большей скоростью он затухает в неоднородной комплексной среде, в виде которой удобно представлять все крупные высоковольтные машины и аппараты. Для диагностики состояния изоляции по частичным разрядам это имеет очень большое значение.

Для примера рассмотрим статор крупной электрической машины, для контроля ЧР в которых наиболее часто используют высокочастотные конденсаторы связи, подключаемые к внешним клеммам обмотки. Если частичный разряд возникает вблизи внешних клемм обмотки, то проблем с регистрацией импульса нет. Если же частичный разряд такой же интенсивности возникнет на «противоположной» части обмотки, вблизи нейтральной точки обмотки, то этот импульс будет иметь в зоне нашего датчика существенно пониженную амплитуду. Кроме того, частота импульса, за счет затухания внутри обмотки, значительно снизится. Реально это выразится в затягивании переднего фронта импульса. На практике это приведет к тому, что импульсы от одинаковых частичных разрядов, но возникших в разных частях обмотки, прибором будет интерпретироваться как импульсы различной интенсивности, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Отсюда следует простой диагностический признак, иногда оказывающийся практически полезным при оценке вероятного места возникновения дефекта в изоляции. Чем более высокочастотным является зарегистрированный импульс, тем ближе к датчику располагается зона его возникновения. Чем круче передний фронт импульса частичного разряда, тем выше его частота.



Такой диагностический подход продемонстрирован на рисунке 2.1. На нем, в качестве примера, приведена кабельная линия, в которой указаны три места возникновения частичных разрядов. Чем ближе к первичному датчику возникает частичный разряд, тем круче передний фронт регистрируемого импульса. Кроме того, по мере удаления от датчика, снижается амплитуда регистрируемого импульса.

Данный эффект легко можно проверить в процессе проведения калибровки измерительной цепи при помощи калибровочного генератора. Для этого необходимо калибровочный импульс инжектировать, поочередно, в начало обмотки, и в нейтральную точку обмотки статора, и определять при этом чувствительность измерительной схемы. При этом можно достаточно точно определить количественное значение коэффициента затухания частичных разрядов в обмотке.

Получив реальное значение коэффициента затухания импульсов в обмотке, можно принять решение, допустима ли такая погрешность измерения частичных разрядов (разница в амплитудах и есть погрешность измерения). Если разница в чувствительности составит до 20 – 30 процентов, то с такой погрешностью, наверное, можно согласиться. Если чувствительности будут различаться в несколько раз, то для практических измерений это недопустимо. Ценность таких измерений невелика.

Сразу же встает важный вопрос. Очевидно, что для каждого датчика существует зона чувствительности, в которой его использование не приводит к большой погрешности измерений, каковы размеры этой зоны? Следствием этого вопроса становится следующий вопрос, если зона чувствительности данного датчика не захватывает весь объем контролируемого оборудования, то, сколько же всего нужно таких датчиков, чтобы снять это ограничение. Понятно, что чем меньше для проведения измерений нужно датчиков, тем это лучше.

Мы подошли к самому важному вопросу, а какие же датчики, лучше, какие имеют большую зону контроля частичных разрядов в изоляции. Ответ здесь прост, чем ниже рабочая частота датчика, при прочих равных условиях, тем шире его «зона ответственности». В наибольшей мере информативны датчики серии RFCT (Radio Frequency Current Transformer), которые работают в достаточно широком диапазоне частот и позволяют контролировать частичные разряды во всем объеме высоковольтного оборудования. Конденсаторы связи марки СС (Coupling Capacitors) выделяют импульсы в более высокочастотном диапазоне. Поэтому зона их чувствительности существенно меньше.

с). Связь рабочего диапазона частот измерительной схемы регистрации частичных разрядов с диапазоном частот активных помех.

Важным параметром, определяющим желательный диапазон частот измерительной схемы, является его связь с диапазоном частот помех. Наиболее опасными, и трудно устранимыми, в трансформаторном оборудовании являются помехи от коронных разрядов.

Существует несколько различных взглядов на частотный диапазон, в котором влияние коронных разрядов наиболее сильно. Одни авторы считают, что влияние коронных разрядов максимально в диапазоне частот, меньшем, чем 5 мегагерц. Есть работы, в которых зона максимальных помех определена в частотном диапазоне от 5 до 20 мегагерц. Есть информация о том, что для того, чтобы отстроиться от помех, нужно проводить измерения в диапазоне частот, превышающем 200 мегагерц.

Сильное различие между информацией разных авторов, очевидно, обусловлено тем, что все эти исследования проводились для разных типов высоковольтного оборудования. Не существует одинаковых рекомендаций, в каждом конкретном случае необходимо проводить специальные исследования, чтобы выявить информативную частотную зону, в которой присутствуют частичные разряды, а влияние помех минимально.

Заключение по пункту.

На основании всего выше изложенного, учитывая наличие в наших приборах очень эффективных средств отстройки от помех, было принято однозначное решение по частотному диапазону наших приборов. Все приборы регистрации частичных разрядов, изготавливаемые нашей фирмой, наиболее хорошо регистрируют импульсы с частотой от 1 до 10 мегагерц. Чуть с меньшей чувствительностью они регистрируют импульсы с частотой от 0,5 до 20 мегагерц. Это обеспечивает нам максимально большую зону чувствительности датчиков, охватывающую практически весь контролируемый объект, а эффективные средства отстройки от помех дают возможность получать итоговые результаты с хорошей достоверностью.

2.2.1.2. Сравнение импульсов частичных разрядов по амплитуде

Один и тот же импульс от частичного разряда, возникшего внутри контролируемого оборудования, может быть зарегистрирован несколькими датчиками, установленными в разных точках. Например, разряд в высоковольтной обмотке фазы «А» силового трансформатора, будет зарегистрирован всеми тремя датчиками марки DB, установленными на ПИН высоковольтных вводов трансформатора. Этот же сигнал будет зарегистрирован датчиками, подключенными к обмотке СН или НН.

Эти сигналы, зарегистрированные несколькими датчиками от одного импульса частичного разряда, будут иметь некоторые отличия. В основном, эти отличия будут заключаться в двух параметрах. Во-первых, сигналы будут иметь разную амплитуду, т. к. при перенаводке в соседние фазы сигнал ослабится. Во-вторых, разными датчиками сигнал регистрируется со сдвигом во времени. Это объясняется различием во времени движения импульса от места возникновения дефекта до места установки датчика. Эта разница может составлять десятки наносекунд.

Рассмотрим особенности использования в практике различий амплитуд сигналов, возникших от одного частичного разряда, но зарегистрированных датчиками, установленными в разных местах контролируемого оборудования. При этом еще раз напомним, что анализ таких особенностей сигналов должен проводиться в приборе на аппаратном уровне, в режиме реального времени.

Очевидно, что при перенаводке сигнала (с одной фазы трансформатора на другую фазу, с одной секции обмотки на другую, с одной кабельной линии на другую), амплитуда наведенного сигнала меньше амплитуды первичного сигнала. Это является самым важным амплитудным признаком частичного разряда при многоканальной регистрации, при помощи которого можно уточнить, а иногда и указать точно, место возникновения дефекта в изоляции.

Применительно к многоканальной регистрации сигналов частичных разрядов, когда на контролируемом объекте устанавливается несколько датчиков, необходимо определять коэффициенты перенаводки сигнала из одной точки в каждый измерительный канал. Экспериментально определяемые коэффициенты перенаводки с канала на канал проще всего

представлять в виде матрицы перенаводки. В предыдущем разделе, на рисунке 1.8., приведен пример такой матрицы перенаводки, при помощи которой производится выявление места возникновения дефекта. Заполнение матриц перенаводки, в процессе проведения калибровки входных цепей с использованием калибровочного генератора, предусмотрено в приборе «R2100» в автоматизированном режиме.

В результате использования матриц перенаводки, сравнивая амплитуды импульсов с различных датчиков, пользователь может более точно выявлять место расположения дефекта изоляции в контролируемом оборудовании.

2.2.1.3. Оценка взаимного времени прихода импульсов

Применение данного метода базируется на простом физическом явлении – учете конечного значения скорости движения волны (электромагнитного поля) внутри контролируемого объекта.

С учетом того, что диэлектрическая проницаемость среды внутри контролируемого объекта отличается от диэлектрической проницаемости вакуума (воздуха), скорость движения волны в объекте всегда будет меньше скорости движения волны в вакууме. В среднем, можно считать, что скорость движения волны в объекте составляет 0,55 – 0,65 от скорости волны в вакууме. Отсюда следует, что один метр расстояния внутри объекта волна электромагнитного поля преодолевает за 6 – 7 наносекунд.

Данный метод локализации места возникновения дефекта в изоляции особенно эффективен при диагностике состояния изоляции кабельных линий и КРУ. Данные объекты имеют значительные линейные габариты, внутри которых можно контролировать разновременность прихода импульса к различным датчикам.

При использовании данного метода необходимо помнить, что длина соединительных линий от датчиков до измерительного прибора должна быть одинаковой. Это автоматически следует из того, что и в этих соединительных кабелях мы имеем такую же скорость движения волны электромагнитного поля.

Не лишен практического смысла вариант создания измерительной схемы, в которой длина измерительных кабелей от разных датчиков может специально выбираться не одинаковой. При этом можно создать такие условия, когда прибор будет сравнивать не «прямое» время между приходом импульсов от датчиков, а «относительное» время, когда в алгоритм определения времени прихода импульсов будет введена задержка. Уменьшая длину кабеля от одного или другого датчика, можно добиться задержки во времени прихода импульсов со знаком плюс, или минус.

2.2.1.4. Сравнение импульсов по полярности

Использование метода «разборки» импульсов на «полезные» и «шумовые» при помощи сравнения полярности является достаточно распространенным. Самое главное, что нужно понимать при этом, что физическая модель причин возникновения разницы в полярности импульсов от разных датчиков, должна быть достаточно обоснована. Нельзя просто использовать факт, что полярность, у сигнала и помехи, оказались различны, это не должно быть причиной применения метода. Необходимо понимать, что это соответствует физической картине распространения импульсов внутри контролируемого объекта.

2.2.2. Оценка состояния и диагностика дефектов изоляции по распределению импульсов частичных разрядов

В этом разделе мы попробуем рассмотреть два основных способа, наиболее часто используемых на практике для оценки степени влияния зарегистрированных частичных разрядов на надежную и безаварийную работу контролируемого высоковольтного оборудования.

Назначение этих двух диагностических методов различно. На основании анализа амплитудно – фазового распределения импульсов частичных разрядов чаще всего удается дифференцировать тип дефекта, имеющегося в изоляции высоковольтного оборудования. Такая информация, плюс подробная информация о внутренней конструкции изоляции в данном оборудовании, оказывается очень полезной для оценки опасности обнаруженного дефекта.

При помощи анализа тенденций, в изменении зарегистрированной интенсивности проявления частичных разрядов в изоляции, обычно оценивается состояние дефекта. Принимается очень важное решение, является ли дефект стационарным, или же развивающимся. Наиболее опасными являются дефекты развивающиеся, когда зона, или интенсивность, дефекта постепенно увеличивается. Наличие положительного тренда в интенсивности частичных разрядов является наиболее опасным признаком развития дефектов в изоляции.

Оба эти метода являются взаимодополняющими. Выводы одного метода позволяют расширить, или же наоборот, дифференцировать заключения, полученные с использованием другого метода.

2.2.2.1. Анализ амплитудно – фазового распределения импульсов в высоковольтном оборудовании – основа для определения типа дефекта в изоляции

Для анализа дефектов в изоляции можно использовать несколько типов «графического» представления распределения зарегистрированных импульсов частичных разрядов. Различают два наиболее часто применяемых на практике распределения: амплитудно - частотное, и амплитудно – фазовое (частотное) распределение импульсов частичных разрядов.

Рассмотрение начнем с амплитудно - частотного распределения импульсов.

По своему первичному определению амплитудно - частотное распределение высокочастотных импульсов должно показывать, какое количество импульсов данной амплитуды было зарегистрировано в процессе проведения измерений частичных разрядов. Пример такого амплитудно - частотного распределения импульсов приведен на рисунке 2.2. По горизонтальной оси графика отложены значения кажущихся зарядов зарегистрированных импульсов (или амплитуды импульсов в милливольтгах), а по вертикальной оси отложены количество импульсов.

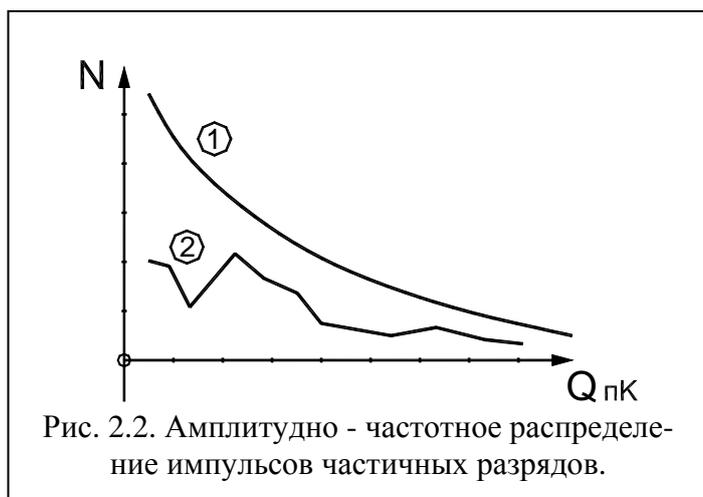


Рис. 2.2. Амплитудно - частотное распределение импульсов частичных разрядов.

Необходимо очень хорошо понимать следующую особенность принятой здесь терминологии. Наличие в этом наименовании графика термина «частотное распределение» никак не связано с частотными свойствами зарегистрированных самих импульсов частичных разрядов. Это никак не связано ни с крутизной переднего фронта реального импульса частичного разряда, ни с длительностью этого импульса. Термин «частотное распределение» используется здесь как параметр, показывающий некоторую количе-

ственную сторону результатов, а именно количество импульсов частичных разрядов. В данном конкретном случае здесь, на приведенном на рисунке амплитудно - частотном графике, рассматривается распределение импульсов, сгруппированных по принципу равенства амплитуд.

На этом рисунке показаны два, несколько различающихся графика. График 1 соответствует интегральному распределению импульсов частичных разрядов, когда происходит суммирование импульсов по мере увеличения порогового значения амплитуды. Самую малую амплитуду «преодолели» все зарегистрированные прибором импульсы. В правой части графика находятся только те импульсы, которые имеют наибольшую амплитуду, преодолели только самые большие, по амплитуде, пороги.

График 2 соответствует другому, дифференциальному представлению распределения импульсов частичных разрядов. На нем каждому значению амплитуды соответствует зарегистрированное количество только тех импульсов, которые имели соответствующую пороговую (плюс – минус) амплитуду. Оба графика достаточно часто используются в практике анализа, для некоторых задач диагностики предпочтительнее интегральное представление распределения импульсов, для других – дифференциальное.

Более информативным является амплитудно – фазовое (частотное) представление распределения импульсов частичных разрядов. Пример такого распределения показан на рисунке 1.9. На таком графике показывается распределение импульсов по амплитуде, фазовому углу напряжения питающей сети и количеству импульсов. Такое распределение полностью описывается матрицей, в которой есть строки, различающиеся по амплитуде, столбцы, соответствующие определенным фазовым зонам питающего напряжения (от 0 до 360 «электрических» градусов). В каждой ячейке матрицы стоит число, количественно показывающее, сколько импульсов частичных разрядов с такими параметрами было зарегистрировано. Слово «частотное» в наименовании таких диаграмм часто опускают, называя их просто амплитудно – фазовыми диаграммами.

Важным является вопрос, почему частичные разряды возникают в зоне нарастания напряжения питающей сети, и практически полностью отсутствуют в зоне, где напряжение, относительно амплитудного значения, уменьшается. На рисунке 2.3. приведена информация, при помощи которой мы попытаемся, хотя бы поверхностно, проанализировать это сложное физическое явление.

На рисунке, справа вверху условно показан слой высоковольтной изоляции с дефектом типа «газовое включение» в середине. Рядом с дефектом показана условная схема замещения слоя изоляции, состоящая из трех зон, каждая из которых представлена на схеме замещения в виде отдельного конденсатора. Конденсаторы C1 и C2 показывают участки нормальной изоляции, а конденсатор Cd моделирует дефект в изоляции. На графике слева внизу показана синусоида питающего напряжения. На этом же графике показано изменение напряжения на зоне дефекта, в функции времени, и частичные разряды, которые возникают в этой зоне.

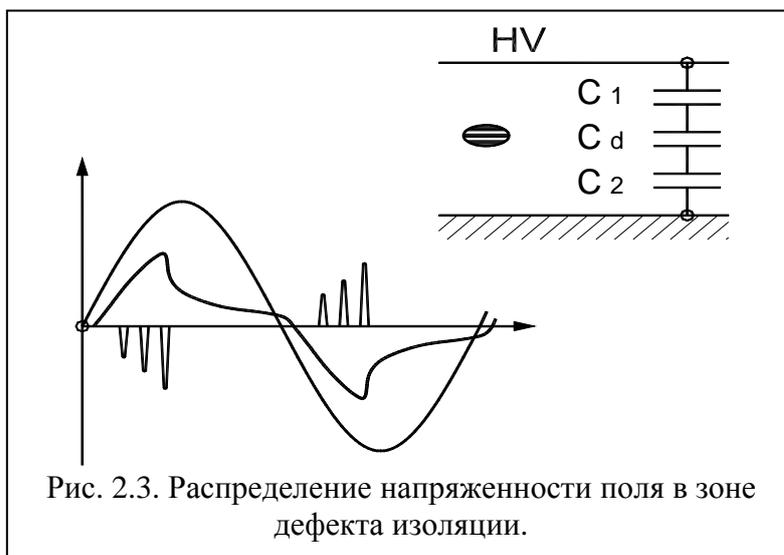


Рис. 2.3. Распределение напряженности поля в зоне дефекта изоляции.

При росте приложенного к изоляции напряжения по схеме замещения изоляции начинает протекать ток, пропорциональный мгновенному значению и скорости изменения питающего напряжения. На каждом конденсаторе схемы замещения начинает возрастать напряжение, сумма напряжений на трех конденсаторах всегда равняется приложенному напряжению.

При возрастании напряжения на газовом (воздушном) включении до пробойного значения (более 3 кВ / мм для воздуха), возникают частичные

разряды. В результате воздействия каждого частичного разряда падение напряжения на зоне дефекта уменьшится, а напряжение на конденсаторах C1 и C2 возрастает. Поскольку напряжение питающей сети еще растет, то напряжение на дефекте опять подрастает до пробойного напряжения, происходит новый разряд, и опять это приводит к росту напряжения на участках бездефектной изоляции.

Наступает такой момент времени, когда питающее напряжение еще растет, но поскольку оно практически полностью сосредотачивается на участках исправной изоляции, напряжение на зоне дефекта не может вырасти до пробойного значения. Интенсивность разрядов падает и близи 90 градусов разряды прекращаются полностью.

На участке снижения питающего напряжения, от амплитудного значения до нуля, частичных разрядов в зоне дефекта не происходит, т. к. имеет место снижение напряжения на всех трех конденсаторах схемы замещения. Напряжение на зоне дефекта так же уменьшается, предпосылок для возникновения частичных разрядов от дефектов внутри изоляции нет.

В момент перехода питающего напряжения через нулевую линию напряжение на зоне дефекта не равняется нулю. Оно имеет какое – то остаточное значение с полярностью, которая соответствует распределению напряженности электрического поля в предшествующую полуволну питающего напряжения. Необходимо, чтобы напряжение питающей сети, которое уже имеет в данный момент противоположную полярность, смогло скомпенсировать остаточный заряд на зоне дефекта. В итоге это приведет к некоторому фазовому запаздыванию импульсов относительно точки перехода напряжения через ноль.

На рисунке 2.4. приведен случай наличия трех дефектов в изоляции, расположенных достаточно близко друг от друга, или случай распределенного дефекта. При этом общая электрическая схема замещения зоны дефекта, приведенная справа, становится более сложной. Появляются горизонтальные емкостные связи между локальными зонами дефектов, обусловленные взаимным влиянием дефектов друг на друга. При наличии нескольких дефектных зон возникновение частичного разряда в одной дефектной зоне, практически всегда приводит к перераспределению напряженностей электрического поля вокруг других зон дефектов, расположенных недалеко друг от друга. Это создает еще более сложную

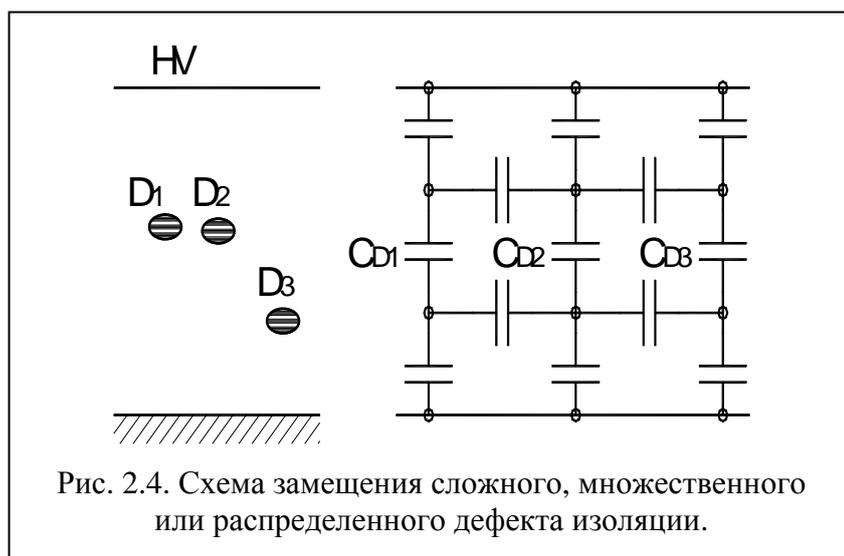
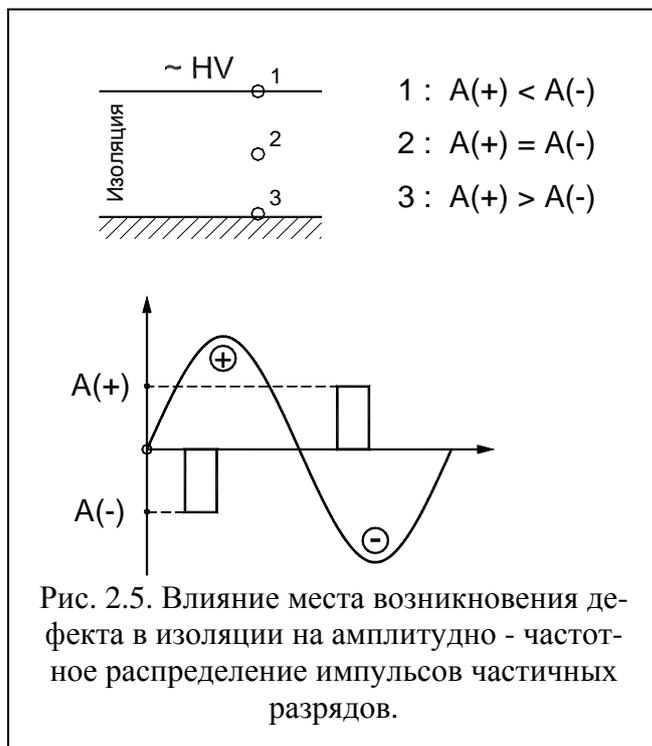


Рис. 2.4. Схема замещения сложного, множественного или распределенного дефекта изоляции.

картину распределения электромагнитного поля, и, как следствие, сложную картину возникновения разрядов. Анализ фазового распределения частичных разрядов, имеющий целью выявление типа и места возникновения дефекта, в зависимости от типа и распределения дефекта, фазового угла и амплитуды приложенного напряжения питающей сети, становится более сложным.

При необходимости можно проанализировать влияние дефектных зон друг на друга, что даст возможность оценить особенности возникновения дефектов в изоляции различного оборудования. При этом следует принимать во внимание особенности исполнения изоляции, например, возникновение дефектов в зоне выхода лобовых частей из пакета статора (при локальном распределении дефектов) отличается от физической картины множественных дефектов в протяженной кабельной линии (в случае распределенной зоны дефектов в изоляции).

Такой же «прикидочный» анализ может быть использован применительно к рисунку 2.5., приведенному ниже. На нем анализируется влияние места возникновения дефекта внутри изоляции, ближе к земляному электроду, или к высоковольтному на соотношение амплитуд положительных и отрицательных импульсов частичных разрядов. В соответствии с нашим анализом смещение места возникновения дефекта внутри изоляции эквивалентно, для схемы замещения на рисунке 2.3., изменению соотношения величин емкостей C_1 и C_2 . В результате изменяется соотношение между амплитудами положительных и отрицательных частичных разрядов.



Для примера возможностей практического применения амплитудно – фазовых диаграмм, в общем виде, рассмотрим влияние места возникновения дефекта в изоляции высоковольтного оборудования на вид амплитудно – фазового распределения импульсов частичных разрядов. Для большей наглядности проиллюстрируем этот анализ при помощи рисунка 2.5.

В слое изоляции контролируемого оборудования выделим три характерных, наиболее часто встречающихся, места возникновения дефекта:

Точка «1» – вблизи высоковольтного электрода (ввод трансформатора, жила кабеля, шина КРУ);

Точка «2» – внутри слоя высоковольтной изоляции;

Точка «3» – вблизи земляного электрода. Это может быть выравни-

вающий полупроводящий слой в изоляции, разделка кабельной линии, экран муфты, элемент под «плавающим» потенциалом, и т. д.

Не вдаваясь в физические подробности возникновения разрядов на разных участках изоляции, будем, с приемлемой для нашего оценочного анализа точностью, считать, что все частичные разряды сосредоточены в двух, достаточно узких угловых зонах. Согласно пояснению к рисунку 2.5., эти зоны располагаются на участках возрастания напряжения питающей сети.

При положительном напряжении все частичные разряды имеют отрицательную полярность и сосредоточены в одной фазовой зоне, до 90 градусов (разряды с амплитудой «А-»). При отрицательном напряжении питающей сети все частичные разряды имеют положительную полярность и сосредоточены в угловой зоне до 270 градусов, (разряды с амплитудой «А+»).

Точка «1», где возник дефект изоляции, соответствует случаю, когда разряд возникает практически на высоковольтном электроде. Это классический коронный разряд, со всеми вытекающими последствиями. На положительной полуволне питающего напряжения импульсы отрицательных разрядов «А-» имеют максимальную интенсивность. На отрицательной полуволне питающего напряжения положительные разряды «А+» имеют существенно меньшую амплитуду.

Точка «3» возникновения дефекта в изоляции, на рисунке соответствует случаю, когда частичный разряд возникает вблизи, или на самом земляном электроде. В этом случае разряды во время положительного питающего напряжения (разряды с амплитудой «А-»), будут меньше, чем разряды во время отрицательной полуволны питающего напряжения

(разряды с амплитудой «А+»). Данное распределение импульсов разрядов противоположно, чем при наличии в контролируемом оборудовании коронных разрядов на высоковольтном электроде. На практике это бывает при проблемах в полупроводящих слоях кабельных линий и обмоток, при утечках в лобовой части обмотки статора, при ослаблении крепления стержней обмотки статора в пазах.

Точка возникновения дефекта «2» является промежуточным вариантом, когда разряды возникают в глубине слоя изоляции. В этом случае амплитуды разрядов, (зарегистрированных на положительной, и отрицательной полуволне питающего напряжения), будут примерно одинаковыми. Такая картина распределения разрядов бывает при неправильной пропитке изоляции, наличии внутренних температурных разрушений. Если точка дефекта будет смещаться от центра в ту или иную сторону, будет изменяться соотношение амплитуд импульсов частичных разрядов в контролируемом оборудовании.

Данный анализ иллюстрирует тот факт, что только по соотношению интенсивности частичных разрядов (естественно, хорошо «отстроенных» от помех) на двух полупериодах питающей сети, можно оперативно и достаточно надежно оценить, на каком участке контролируемой изоляции высоковольтного оборудования происходят частичные разряды, на высоковольтном электроде, или вблизи земляного электрода.

2.2.2.2. Анализ амплитудно – фазового распределения импульсов в статоре трехфазной электрической машины

В качестве примера, иллюстрирующего диагностические возможности практического применения амплитудно – фазовых диаграмм, рассмотрим картину распределения частичных разрядов в статоре крупной электрической машины. При этом покажем, как место возникновения дефектов в изоляции статора связана с фазовым углом напряжения питающей сети, приложенного к электрической машине.

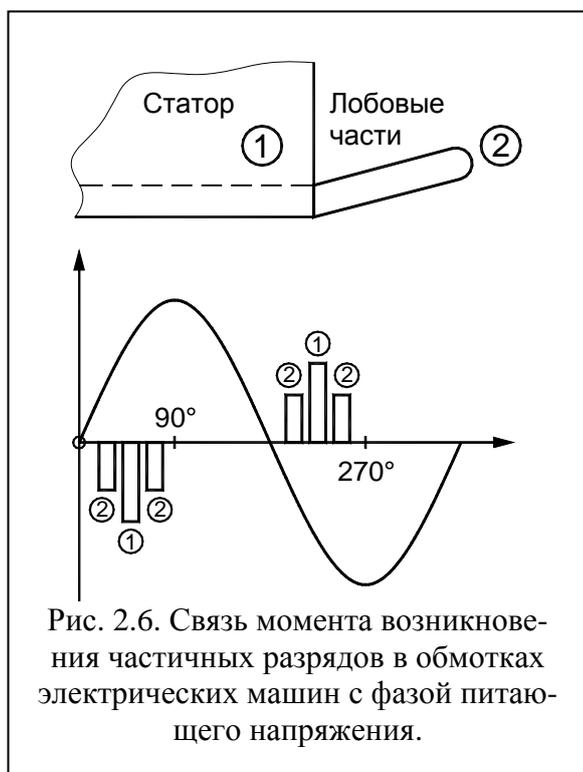


Рис. 2.6. Связь момента возникновения частичных разрядов в обмотках электрических машин с фазой питающего напряжения.

На рисунке 2.6., в верхней части, приведено схематическое изображение двух наиболее важных, элементов обмотки статора – лобовой части, и части секции обмотки, проложенной в пазу пакета статора. Рисунок с графиком, в нижней части, иллюстрирует, как при помощи амплитудно – фазового распределения импульсов можно уточнить место возникновения частичных разрядов в изоляции статора генератора.

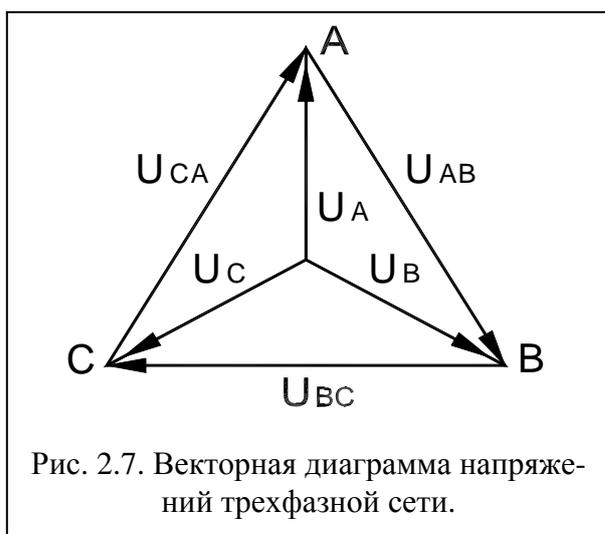
Классические импульсы частичных разрядов, которые возникают в изоляции обмотки статора в пазу электрической машины, обычно располагаются в зонах около 45 и 225° «электрических» градусов относительно питающего напряжения. Эта зона обозначена на нижнем графике цифрой «1». Она имеет место и при положительной, и при отрицательной полуволнах питающего напряжения.

Частичные разряды в лобовых частях обмоток крупных электрических машин и

генераторов располагаются в зоне ± 30 градусов относительно «классических» импульсов частичных разрядов, т. е. в зонах 15^0 , 75^0 , 195^0 и 255^0 градусов. На нашем рисунке это точка «2» и соответствующие зоны возникновения частичных разрядов на нижнем графике.

Причина такого «фазового» разброса импульсов станет вполне понятна, если вспомнить, что изоляция на участке «фаза – земля» находится под фазным напряжением трехфазной системы напряжений, а в лобовых частях обмотки статора на изоляцию действуют линейные напряжения. Несмотря на то, что вектора фазных напряжений сдвинуты относительно друг друга на 120 градусов, вектора линейных напряжений, связанные с одной фазой, сдвинуты, относительно этой фазы, на 30 градусов.

На рисунке 2.7. приведена векторная диаграмма напряжений в трехфазной сети. Из этой векторной диаграммы хорошо видно, что, например, вектора линейные напряжения U_{AB} и U_{CA} сдвинуты относительно вектора фазного напряжения U_A на 30 электрических градусов. Отсюда становится понятным наличие углового сдвига «фазового» угла возникновения частичных разрядов в лобовых частях обмотки статора электрической машины, относительно частичных разрядов в пазу статора, где действует фазное напряжение питающей сети.



Питающей сети.

При помощи векторной диаграммы можно объяснить, когда частичные разряды возникают в угловой зоне 15 и 195 градусов, а когда в зоне 75 и 255 электрических градусов.

Частичные разряды 15 и 195 градусов возникают на участке действия напряжения U_{AB} , между секциями обмоток «А» и «В», и опережают зону «фазных» разрядов на 30 градусов. Вектор линейного напряжения U_{AB} опережает вектор фазного напряжения U_A на 30 градусов, что, при условии симметрии разрядов на отрицательной и положительной полуволне питающего напряжения, эквива-

лентно опережению на 30 градусов.

Частичные разряды в лобовых частях на участке между фазами «А» и «С» возникают в угловой зоне 75 и 255 градусов, т. к. вектор линейного напряжения отстает от вектора U_A на 30 электрических градусов.

2.2.2.3. Анализ частотных свойств частичных разрядов

Много дополнительной полезной информации о природе частичных разрядов, и месте их возникновения в контролируемом оборудовании, может быть получено на основании анализа формы зарегистрированных импульсов – частотных свойств частичных разрядов в изоляции оборудования.

При этом очень важно понимать, что мы рассматриваем не свойства самого частичного разряда, а реакцию контролируемого объекта на возникший разряд. Один и тот же импульс, имеющий одинаковые параметры, но возникший в разных точках объекта, при регистрации будет иметь различные частотные параметры. Отсюда следует важное следствие, что импульсы, возникшие в одной зоне, будут иметь одни частотные свойства, а возникшие в другой зоне – другие частотные свойства. Именно это может позволить диагностам создавать диагностические правила, разделяющие импульсы по природе возникновения и локации места дефекта.

Основными частотными свойствами импульсов можно считать два параметра - частоту импульса частичного разряда, и длительность затухания колебаний.

- Частота импульса частичного разряда.

Даже в этом, на первый взгляд, простом вопросе, как и во всем практическом применении теории частичных разрядов, есть определенные сложности. Частоту импульса можно определять, следуя классической теории, по полному периоду колебания, а можно

только по первой волне импульса, используя удвоенное значение длительности этой полуволны. При этом легко можно получить частоту импульса, различающуюся на 50%. Это объясняется тем, что частотные свойства импульса, на первой полуволне, а особенно на переднем фронте, существенно изменяются.

Данное обстоятельство вносит в анализ частотных свойств импульсов частичных разрядов определенный субъективизм, но не оказывает существенного влияния на диагностические возможности этого метода. Основное – применять одинаковые правила к определению частотных свойств импульсов частичных разрядов. Для оценки частоты импульса частичного разряда мы предлагаем использовать удвоенную длительность основного, первого импульса.

Это значение умножается на два, и получается период импульса частичного разряда, по которому определяется кажущаяся частота. Понятие «кажущейся частоты» здесь введено по той простой причине, что мы имеем импульсы, различающиеся длительностью переднего и заднего фронтов. Кроме того, эти импульсы являются затухающими, причем частота, по мере затухания, обычно изменяется.

- Длительность импульса частичного разряда.

Этот параметр показывает, как долго длится реакция контролируемого объекта на возникший в изоляции импульс частичного разряда.

Временной интервал от начала, и до завершения импульса, также может определяться несколькими методами. Чаще всего используется некоторое значение коэффициента затухания, например, 0,1 или 0,05. При колебательном уменьшении контролируется амплитуды импульсов. При снижении амплитуды до такого уровня, относительно амплитуды первого импульса, сигнал частичного разряда считается затухшим.

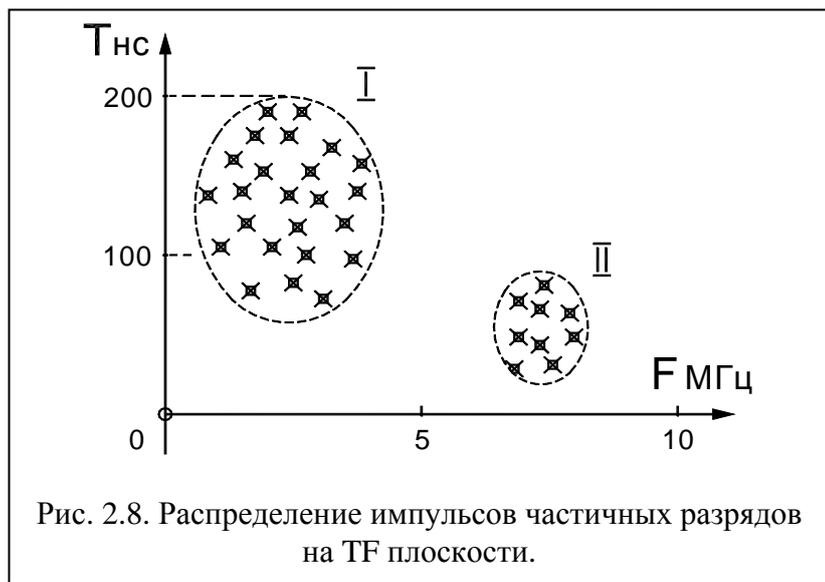
Оба частотных параметра импульсов ЧР не являются стационарными, они зависят от многих других реальных параметров. Один и тот же дефект, но возникший в различных зонах контролируемого оборудования, приводит к появлению импульсов с различными частотными свойствами. Но два различных дефекта, даже возникших на одинаковом удалении от датчика, будут иметь различные частотные свойства.

На этапе регистрации импульсов практическая ценность этих параметров не столь значительна. Необходимо «набрать» некоторое количество статистической информации, объем которой будет достаточен для обобщения свойств импульсов. Максимально эффективно частотные свойства импульсов можно использовать на этапе анализа распределения импульсов. Именно поэтому данный метод перенесен в раздел общего анализа зарегистрированных импульсов.

В этом методе все импульсы, вне зависимости от их амплитуды, необходимо разместить на статистической условной плоскости.

Осями координат этой плоскости будут: по оси Y будем откладывать, для каждого импульса, длительность (ось Y), а по оси X будем откладывать частоту импульсов.

Для удобства анализа и практического применения данного диагностического метода назовем это условную плоскость «время - частотной» плоскостью, или «TF» (Times Frequency) плоскостью.



Именно поэтому данный метод перенесен в раздел общего анализа зарегистрированных импульсов.

Импульсы одной природы и места возникновения, будут сосредоточены на ТF плоскости в одной локальной зоне. Импульсы другой природы и места возникновения, как и импульсы помех, будут сосредотачиваться в других зонах. Анализ распределения импульсов на плоскости позволит локализовать их параметры. Пример такой локализации импульсов приведен на рисунке 2.8.

Для более полного анализа нескольких параметров частичных разрядов можно перейти, от двухмерной ТF плоскости, к трехмерной, введя, дополнительно, в рассмотрение амплитуды импульсов, откладывая их по оси Z. В этом случае можно говорить уже о «ТFA» диаграммах (Times Frequency Amplitude). Эти диаграммы позволяют еще более эффективно разделять зарегистрированные импульсы частичных разрядов по природе и месту их возникновения, отделять их от помех.

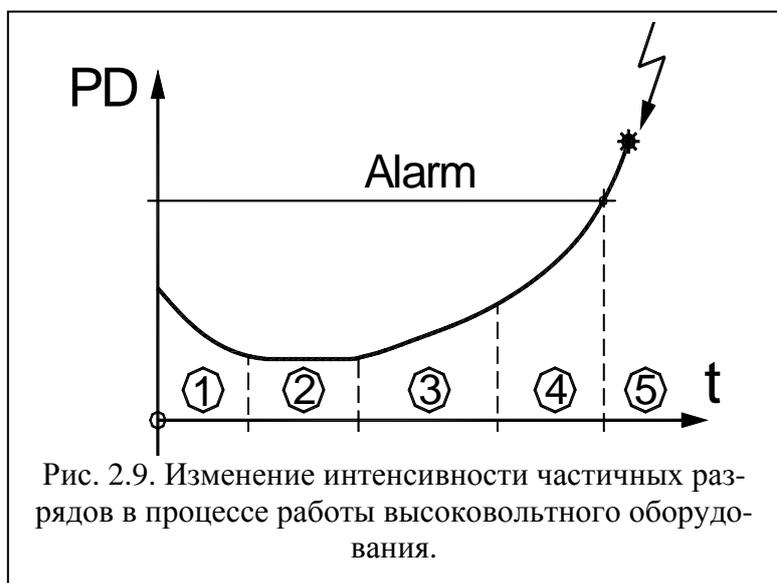
Для реализации этих диагностических функций использования ТF плоскостей и ТFA диаграмм, в приборе «R2100» необходимо воспользоваться встроенной функцией осциллографа. Эта функция позволяет просматривать на экране форму импульсов (которые прибор выделил как частичные разряды), определять их частотные параметры – длительность переднего фронта и «кажущуюся частоту» импульсов. В последующих версиях измерительных приборов функцию определения частотных свойств импульсов предполагается сделать автоматизированной.

2.2.2.4. Анализ изменения интенсивности частичных разрядов в процессе эксплуатации оборудования

На рисунке 2.8. приведена стандартизованная кривая изменения интенсивности частичных разрядов в процессе длительной работы и старения изоляции высоковольтного оборудования. Это условная «линия жизни» изоляции, справедливая для большинства высоковольтного оборудования.

На первом этапе жизни изоляции, после ее изготовления, принимаются все меры для того, чтобы улучшить состояние изоляции. На этом этапе может проводиться дополнительная сушка изоляции, очистка, устранение мелких дефектов.

Период времени «2» является основным для нормально изготовленного и эксплуатируемого высоковольтного оборудования, в идеале он имеет максимальную длительность. В течение этого времени уровень частичных разрядов невелик и практически не изменяется. Оборудование эксплуатируется без ограничений, интервалы времени между проведениями измерений частичных разрядов определяются имеющимися на предприятии нормативами. Чаще всего измерения частичных разрядов в контролируемой изоляции совпадают с проводимыми регламентными и ремонтными работами.



Период времени «3» характеризуется возникновением в контролируемой изоляции дефектов в начальных стадиях развития. Чаще всего это вызывается процессами старения изоляции, иногда механическими повреждениями верхних слоев изоляции. На этом временном этапе наблюдается устойчивый тренд в росте интенсивности частичных разрядов, от измерения к измерению количество и общая энергия частичных разрядов возрастает. Возникшие зоны дефектов расширяются. Интер-

валы времени между проведением измерений частичных разрядов существенно сокращаются. Величина этих интервалов между измерениями зависит от реальной скорости роста интенсивности частичных разрядов. Обычно граница этого этапа жизни высоковольтной изоляции соответствует увеличению интенсивности частичных разрядов в 4 – 8 раз.

Временной интервал «4» соответствует фазе, когда дефекты изоляции уже начинают развиваться «лавинообразно». Они уже настолько развились «в ширину», что имеются предпосылки для перехода на другой уровень деградации изоляции. Например, дорожки науглероживания изоляции по поверхности, называемые «треками», имеют настолько большую длину, что токи по ним интенсивно начинают возрастать. В результате дорожки начинают расширяться и углубляться, еще больше активизируя процесс общей деградации изоляции.

Интервал времени «5» начинается в тот момент времени, когда интенсивность частичных разрядов начинает превышать допустимое значение. Практически всегда, если не принимать специальных мер по устранению имеющихся дефектов в изоляции, работа высоковольтного оборудования на этом участке заканчивается аварийно.

Качественно кривая на рисунке 2.8. справедлива для любого высоковольтного оборудования. Количественные параметры интервалов времени, их длительность и значения интенсивности частичных разрядов, имеют большие отличия для различных типов и марок высоковольтного оборудования. Даже одинаковое оборудование, но имеющее разные годы выпуска, могут иметь допустимые значения интенсивности частичных разрядов, различающиеся в несколько раз. Обычно этот вопрос решается на основании скорости изменения интенсивности частичных разрядов. Чем быстрее растет интенсивность, тем более опасными являются эти разряды для изоляции контролируемого оборудования.

2.2.2.5. Связь интенсивности частичных разрядов с параметрами окружающей среды и режимами работы оборудования

Перед выявлением тенденций в изменении интенсивности частичных разрядов во времени необходимо убедиться, что эти изменения не связаны с режимом работы высоковольтного оборудования. Для этого необходимо попробовать выявить связь параметров разрядов с «внешними» параметрами, значения которых необходимо фиксировать при каждом проведенном измерении.

Важными являются следующие параметры:

- Влажность и температура окружающей среды. Особенно это важно при проведении измерений частичных разрядов в трансформаторах.

- Параметры теплоносителя в системах охлаждения генераторов. Например, при увеличении количества водорода в системе охлаждения генератора может резко измениться уровень частичных разрядов в несколько раз. Использование водорода вместо воздуха резко снижает интенсивность частичных разрядов.

- Напряжение питающей сети, которое изменяется в значительных пределах, может также повлиять на уровень частичных разрядов. Увеличение напряжения увеличивает интенсивность импульсов.

- Рабочая температура статора электродвигателя или генератора. Интересным является то, что в зависимости от типа изоляции может иметь место положительный и отрицательный коэффициент связи интенсивности частичных разрядов с температурой.

- Нагрузка контролируемого оборудования. Связь здесь, вероятнее всего, определяется внутренним нагревом изоляции, прямой связи интенсивности частичных разрядов с нагрузкой, обычно не удается обнаружить.

2.3. Результаты измерений частичных разрядов на натуральных моделях дефектов изоляции

В процессе проведения измерений параметров изоляции диагностический персонал набирает практическую информацию о связи амплитудно – фазового распределения импульсов частичных с типом дефекта. Однако, в силу объективных причин, такой процесс может занять очень длительное время.

Оптимальным вариантом, для обучения диагностического персонала и проведения оперативной диагностики различных дефектов, является сравнение информации, полученной на реальных объектах, с результатами, полученными на моделях различных дефектов.

В данном разделе приведены результаты измерений частичных разрядов в имитаторе марки ИЧР-6, имитирующих 6 наиболее распространенных дефектов изоляции высоковольтного оборудования. Этот имитатор был создан в нескольких экземплярах. Мы надеемся, что приведенная ниже информация будет достаточна для пользователей наших приборов, которые захотят его повторить.

2.3.1. Описание имитатора ИЧР-6

Внешний вид имитатора частичных разрядов приведен на рисунке 2.11.

Прибор изготовлен в виде переносного устройства, для удобства проверки работоспособности стационарных и переносных приборов. Такое исполнение имитатора также позволяет более эффективно проводить демонстрацию работы приборов, предназначенных для измерения частичных разрядов.



Рис. 2.11. Внешний вид имитатора ИЧР-6.

Прибор изготовлен в виде переносного устройства, для удобства проверки работоспособности стационарных и переносных приборов. Такое исполнение имитатора также позволяет более эффективно проводить демонстрацию работы приборов, предназначенных для измерения частичных разрядов.

При транспортировке лицевая панель имитатора закрывается защитной крышкой.

При помощи имитатора можно оценить амплитудно – фазовое распределение импульсов частичных разрядов, возникающих при 6 различных дефектах высоковольтной изоляции. Все дефекты выполнены в виде отдельных моделирующих ячеек, к каждой из которых под-

ключен свой датчик частичных разрядов, разъем которого выведен на лицевую панель прибора.

Имитатор питается от промышленной сети с напряжением 220 вольт, потребляя мощность не более 50 ватт. Ввиду того, что в нем, во время работы, присутствует высокое напряжение, до 8 киловольт, вскрывать имитатор и включать в таком виде категорически запрещается.

Электрическая схема имитатора ИЧР-6 приведена на рисунке 2.12. В качестве источника повышенного напряжения в схеме используется высоковольтный повышающий трансформатор небольшой мощности, в первичной цепи которого стоит регулируемый автотрансформатор ЛАТР.

Повышенное напряжение подается на 6 ячеек, которые имитируют различные, наиболее распространенные, дефекты высоковольтной изоляции. В цепи ячейки каждого де-

факта установлен датчик частичных разрядов. Для контроля величины приложенного к ячейкам высокого напряжения используется делитель напряжения на составных резисторах.

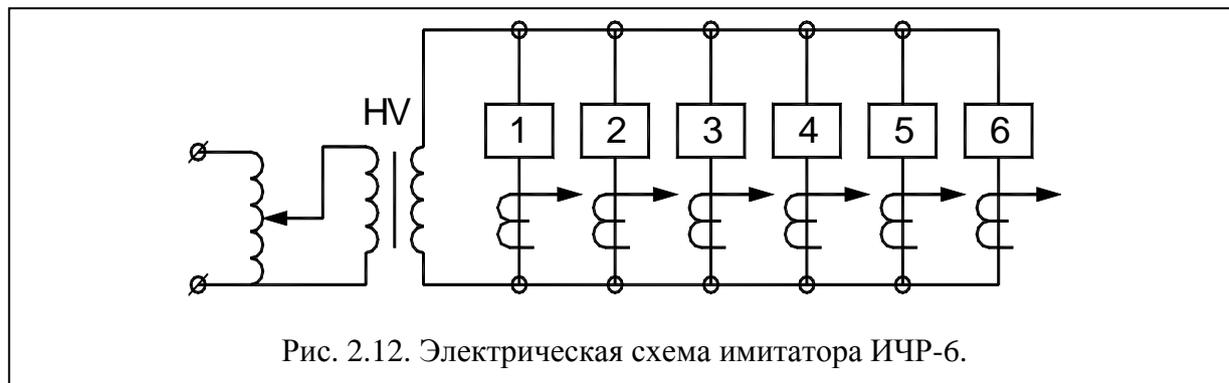


Рис. 2.12. Электрическая схема имитатора ИЧР-6.

Ниже приведены описания каждой ячейки и приводится вид амплитудно – фазового распределения частичных разрядов. Поскольку дефекты в ячейках смоделированы достаточно условно, в реальных случаях, при возникновении различных дефектов в высоковольтной изоляции, возможны существенные отличия.

Дефект № 1. Частичный разряд между двумя слоями высоковольтной изоляции, «внутренний разряд».

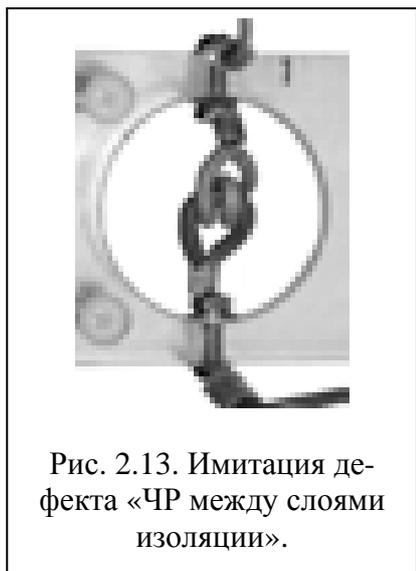


Рис. 2.13. Имитация дефекта «ЧР между слоями изоляции».

Дефект моделируется при помощи двух изолированных проводников, подключенных к разным выводам высоковольтного трансформатора. Частичный разряд возникает между изоляциями проводников, что эквивалентно разряду внутри изоляции.

На фотографии, на рисунке 2.13., приведен внешний вид ячейки с имитатором данного дефекта. В пластине прозрачного изолирующего материала сделано отверстие большого диаметра. На противоположных концах отверстия установлены токоподводящие болты, подключенные к источнику регулируемого напряжения. Земляной провод, как и во всех других ячейках, располагается рядом с цифрой, нанесенной на пластик.

К болтам подключены два изолированных проводника, которые, для получения более характерной картины, переплетены между собой, с целью увеличения площади взаимного контакта. Изоляция проводников выбрана из условия обязательного возникновения частичных разрядов при подключении к имеющемуся источнику повышенного напряжения.

На рисунке 2.14. приведено амплитудно – фазовое распределение частичных разрядов, зарегистрированное на данной ячейке. На основании анализа приведенного распределения частичных разрядов можно отметить следующее.

- При положительной полярности питающего напряжения импульсы частичных разрядов имеют отрицательную полярность, а при отрицательном напряжении питающей сети импульсы частичных разрядов имеют положительную полярность.

- Имеет место симметрия амплитуды и количества частичных разрядов в изоляции относительно нулевой линии. Интенсивность частичных разрядов одинакова в двух полупериодах питающей сети. Эта симметрия хорошо прослеживается при анализе положительной и отрицательной полувольт питающего напряжения.



- Все частичные разряды располагаются в двух (симметричных) угловых зонах напряжения питающей сети – $10 \div 20$ градусов ($190 \div 200$ градусов для отрицательного напряжения), и $40 \div 90$ градусов ($220 \div 270$ градусов для отрицательного напряжения), относительно фазы питающего напряжения. Все импульсы сосредоточены в зонах нарастания амплитуды питающего напряжения. В зонах спада амплитуды питающего напряжения импульсы, практически полностью, отсутствуют.

- Максимальную интенсивность частичные разряды имеют в угловых зонах $60 \div 75$ градусов и $240 \div 255$ градусов. В этих зонах напряжение еще не достигло максимума, но скорость его нарастания существенно уменьшилась. Очевидно, что можно предположить, что распределение потенциалов в изоляции стабилизировалось с учетом искажения поля вблизи дефектных зон.

Дефект № 2. Частичный разряд между проводником, находящимся под «плавающим потенциалом».



Дефект моделируется при помощи металлического элемента, не подключенного ни к одному электроду испытательной установки.

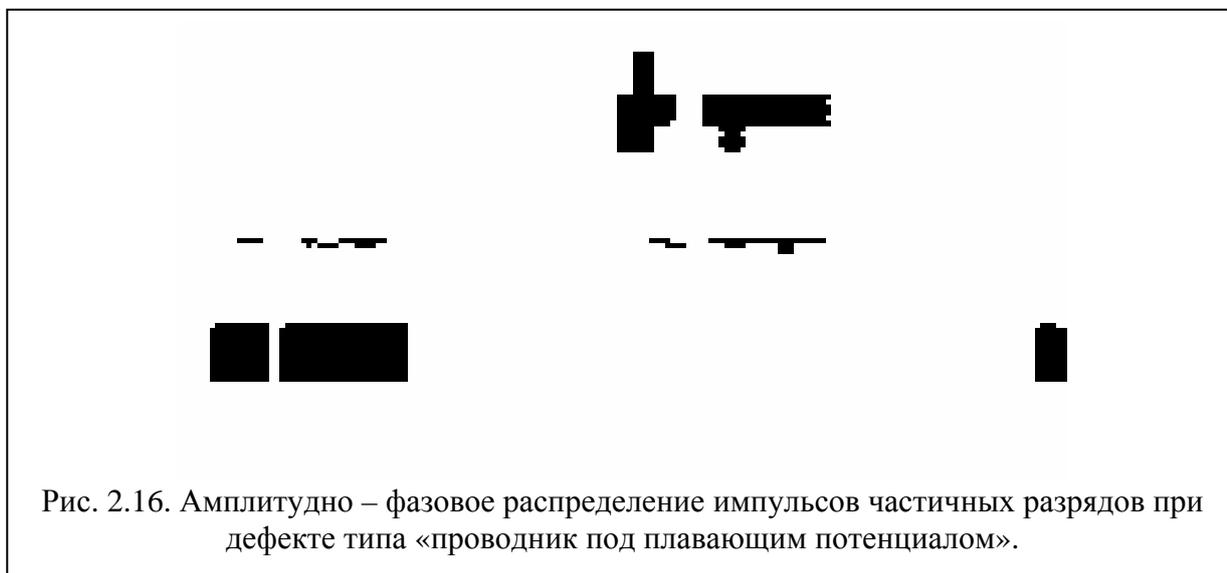
На рисунке 2.15. показан внешний вид испытательной ячейки. Она также изготовлена из прозрачного изолирующего материала. В середине ячейки располагается изолирующая пластина, на верхней поверхности которой установлен металлический элемент. Верхний электрод, к которому подключено высокое напряжение, смонтирован с небольшим зазором, который выбирается из условия обязательного возникновения частичных разрядов при выбранном напряжении.

Таким образом, в ячейке смоделирован достаточно часто встречающийся дефект изоляции. В реальных условиях это может быть проводящее включение, находящееся внутри изоляции оборудования. Это может быть металличе-

ский конструктивный элемент, установленный на изолирующем основании, не подключенный ни к земле оборудования, ни к высокому напряжению. Это может быть полупроводящий слой в изоляции, предназначенный для выравнивания потенциалов, но выбранный не совсем корректно.

В зависимости от места возникновения дефекта типа «проводник под плавающим потенциалом» его опасность для состояния изоляции очень различается. В большинстве случаев, даже несмотря на высокий уровень частичных разрядов, оборудование с таким типом дефекта может работать долго и надежно.

Будем анализировать амплитудно – фазовое распределение импульсов частичных разрядов, зарегистрированное на имитаторе дефекта «проводник под плавающим потенциалом», показанное на рисунке 2.16.



- При положительной полярности питающего напряжения импульсы частичных разрядов имеют отрицательную полярность, а при отрицательном напряжении питающей сети импульсы частичных разрядов имеют положительную полярность.

- Имеет место симметрия амплитуды и количества частичных разрядов в изоляции относительно нулевой линии. Интенсивность частичных разрядов примерно одинакова в двух полупериодах питающей сети. В идеальном случае картинка распределения импульсов при двух полярностях напряжения одинаковы, имеющиеся отклонения, в основном, обусловлены типом используемого имитатора дефекта.

- Все частичные разряды располагаются в двух (симметричных) угловых зонах напряжения питающей сети – $(-)\ 10 \div 20$ градусов ($170 \div 200$ градусов для отрицательного напряжения), и $30 \div 85$ градусов ($210 \div 265$ градусов для отрицательного напряжения), относительно фазы питающего напряжения.

- Все импульсы сосредоточены в зонах нарастания амплитуды питающего напряжения. В зонах спада амплитуды питающего напряжения импульсы. Импульсы частичных разрядов имеют место в зонах перехода питающего напряжения через нулевое значение, что для других дефектов не свойственно.

- Еще одним важным отличительным признаком дефекта «проводник под плавающим потенциалом» является то, что амплитуда импульсов частичных разрядов практически везде одинакова. На большинстве практически зарегистрированных дефектов изоляции такого типа частичные разряды сосредоточены в одной или двух амплитудных зонах, и картина дефекта представляет собой два отрезка прямой линии, в зонах $0 \div 90$ градусов и $180 \div 270$ градусов.

Физическая картина возникновения частичных разрядов при таком дефекте изоляции может быть объяснена достаточно просто. Как только напряжение на малом интервале между металлическим элементом и электродом достигает пробивного значения, происходит частичный разряд. Разряды возникают как при положительном, так и при отрицательном напряжении. Амплитуда разряда всегда примерно одинакова, т. к. разряд проис-

ходит при приложении к пробивному участку необходимого, но всегда одинакового напряжения.

Дефект № 3. Поверхностный разряд с «земляного электрода».

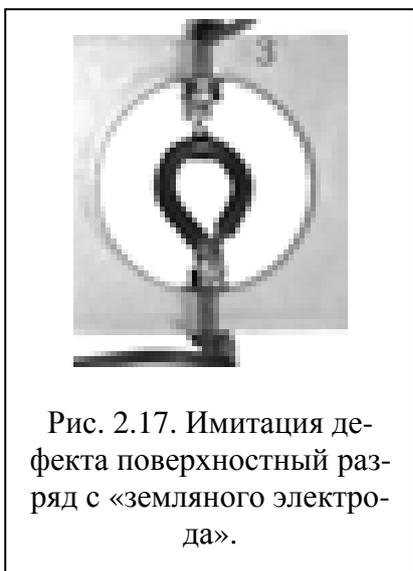


Рис. 2.17. Имитация дефекта поверхностный разряд с «земляного электрода».

Фотография ячейки, в которой моделируется такой дефект, приведена на рисунке 2.17. Высокое напряжение подключено к изолированному проводнику, смонтированному в виде петли. К «земляному электроду» (на рисунке он рядом с цифрой 3) припаян неизолированный проводник, который несколько раз, для увеличения зоны контакта, обмотан вокруг изолированного высоковольтного проводника. В качестве этого электрода можно использовать полоску фольги, намотанной на высоковольтный электрод.

Дефект такого типа также достаточно часто встречается в практике. Он может иметь место в концевых частях кабельных линий, при неправильной разделке защитного экрана, в соединительных муфтах, в зонах выхода секций обмотки статора из пакета магнитопровода.

Картина распределения импульсов частичных разрядов, зарегистрированная на ячейке имитации данного дефекта, приведена на рисунке 2.18. В ней можно выделить следующие особенности.

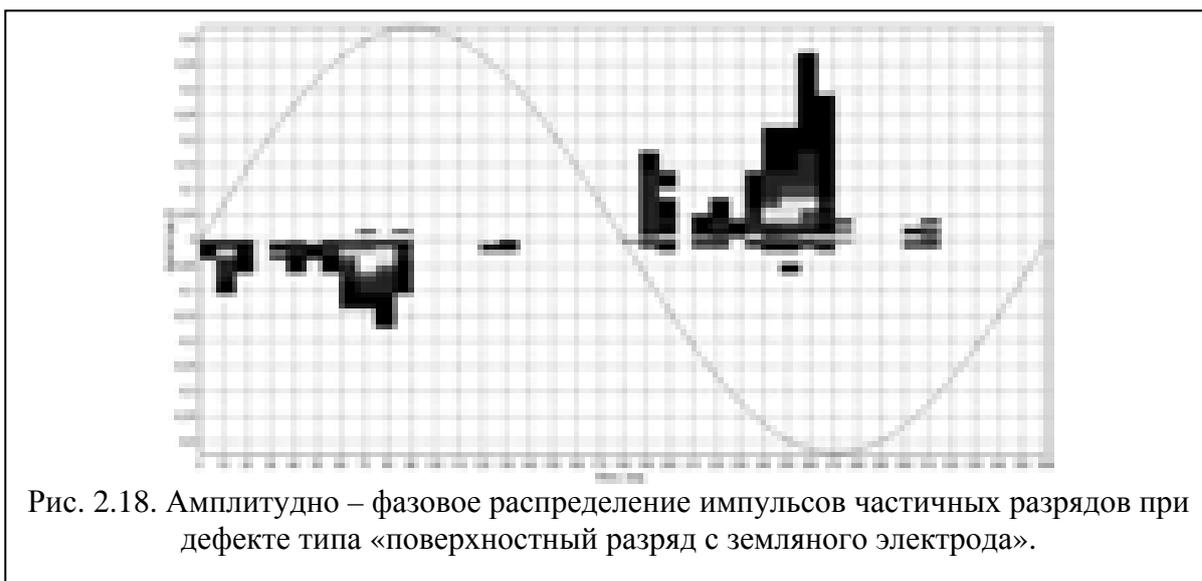


Рис. 2.18. Амплитудно – фазовое распределение импульсов частичных разрядов при дефекте типа «поверхностный разряд с земляного электрода».

- При положительной полярности питающего напряжения импульсы частичных разрядов имеют отрицательную полярность, а при отрицательном напряжении питающей сети импульсы частичных разрядов имеют положительную полярность. Имеющиеся на рисунке отклонения можно отнести к погрешности проводимых измерений.

- Фазовое распределение импульсов частичных разрядов имеет аналогичную картину, как в области положительной, так и отрицательной полярности питающего напряжения.

- Амплитудное распределение импульсов, по полупериодам питающей сети, пропорционально несимметрично. Амплитуды всех импульсов, при отрицательном напряжении питания, больше, чем амплитуды при положительном напряжении. При каждом фазовом угле импульсы при отрицательном напряжении превышают импульсы при положительном напряжении, примерно в два раза. Этот коэффициент определен параметрами нашей

ячейки имитатора. В реальных условиях он может изменяться в широких пределах, в зависимости от параметров зоны возникновения дефекта. Чем ближе разряд (зона дефекта) к земле, тем выше может быть этот коэффициент.

- Все частичные разряды располагаются в двух (симметричных) угловых зонах напряжения питающей сети – $0 \div 20$ градусов ($185 \div 200$ градусов для отрицательного напряжения), и $30 \div 90$ градусов ($210 \div 270$ градусов для отрицательного напряжения), относительно фазы питающего напряжения. Все импульсы сосредоточены в зонах нарастания амплитуды питающего напряжения. В зонах спадания амплитуды питающего напряжения имеет место возникновение импульсов небольшой амплитуды в зонах $120 \div 135$ градусов, и $300 \div 315$ градусов.

- Максимальную интенсивность частичные разряды имеют в угловых зонах $60 \div 90$ градусов и $235 \div 270$ градусов. В этих зонах питающее напряжение, еще не достигло максимума, но скорость его нарастания существенно уменьшилась.

Основной особенностью наличия такого дефекта является больший уровень частичных разрядов при отрицательном напряжении питающей сети. Кратко, физическую природу этого можно описать следующим образом. При двух возможных полярностях питающего напряжения, приложенного к зоне дефекта, интенсивность частичных разрядов будет больше в том случае, когда потоки электронов будут «стекаться из большего объема, от большей поверхности» к меньшей зоне, в идеале к точечному острию. Это соответствует такому распределению потенциалов, когда острие (меньшая зона) заряжено положительно, а большая поверхность заряжена отрицательно.

Дефект типа «поверхностный разряд с земляного электрода» возникает в том случае, когда на земляном электроде имеют место геометрические дефекты (локальные выступы, острые края, «углы»). Крайней стадией проявления этого дефекта «поверхностный разряд с земляного электрода, является дефект типа «корона с земляного электрода», описанный в нашем имитаторе под номером 6.

Дефект № 4. «Поверхностный разряд с высоковольтного электрода».

Фотография ячейки имитатора ИЧР-6, в которой моделируется такой дефект, приведена на рисунке 2.19.

Высокое напряжение от повышающего трансформатора имитатора подключено к болту, отделенному от земляного сферического электрода (на рисунке он рядом с цифрой 4), имитирующему большую поверхность, изолирующей пластиной.



Рис. 2.19. Имитация дефекта поверхностный разряд с «высоковольтного электрода».

Дефект такого типа чаще всего встречается в оборудовании с очень высоким рабочим напряжением – в силовых трансформаторах, выключателях, измерительных трансформаторах, линиях передачи.

Картина распределения импульсов частичных разрядов, зарегистрированная на ячейке имитации данного дефекта, приведена на рисунке 2.20. В ней можно выделить следующие особенности.

- При положительной полярности питающего напряжения импульсы частичных разрядов имеют отрицательную полярность, а при отрицательном напряжении питающей сети импульсы частичных разрядов имеют положительную полярность. Имеющиеся на рисунке отклонения можно отнести к погрешности проводимых измерений.

- Фазовое распределение импульсов частичных разрядов имеет примерно одинаковую картину, как в области положительной, так и отрицательной полярности питающего напряжения.

- Амплитудное распределение импульсов, по полупериодам питающей сети, имеет ярко выраженную не симметрию. Амплитуды всех импульсов, при положительном напряжении питания, больше, чем амплитуды при отрицательном напряжении. По сравнению с предыдущим дефектом все выглядит наоборот. При отрицательном напряжении импульсы значительно, примерно в три раза, меньше, чем при положительном напряжении. Этот коэффициент также определен параметрами нашей ячейки имитатора. В реальных условиях, чем ближе зона дефекта будет приближена к высоковольтному электроду, тем выше может быть этот коэффициент.



- Все импульсы частичных разрядов сосредоточены в зонах нарастания амплитуды питающего напряжения. В зонах спада напряжения импульсов частичных разрядов практически нет. Максимальную интенсивность частичные разряды имеют в угловых зонах $60 \div 90$ градусов и $235 \div 270$ градусов. В этих зонах мгновенное значение питающего напряжения еще не достигло максимума, но скорость его нарастания уже существенно уменьшилась.

Основной особенностью наличия такого дефекта является большой уровень частичных разрядов при положительном напряжении питающей сети. Этот дефект типа «поверхностный разряд с высоковольтного электрода», по картине своего проявления противоположен предыдущему дефекту «поверхностный разряд с земляного электрода».

Не повторяясь в общих описаниях, можно сказать следующее. Дефект типа «поверхностный разряд с высоковольтного электрода» возникает в том случае, когда на высоковольтном электроде имеют место геометрические дефекты (большая поверхность, локальные выступы, острые края, «углы»). Крайней стадией проявления этого дефекта является дефект типа «корона», описанный в нашем имитаторе под номером 5.

Дефект № 5. «Корона с высоковольтного электрода».

Фотография ячейки имитатора, в которой моделируется такой дефект, приведена на рисунке 2.21.

Высокое напряжение от повышающего трансформатора подключено к электроду типа «игла». Земляной проводник большой поверхности площади имитирует болт со сферической поверхностью увеличенной площади.

Дефект такого типа чаще всего встречается в оборудовании с очень высоким напряжением – в силовых трансформаторах, выключателях, измерительных трансформаторах. Чем выше рабочее напряжение контролируемого оборудования, тем в большей степени на его работу влияют коронные разряды.

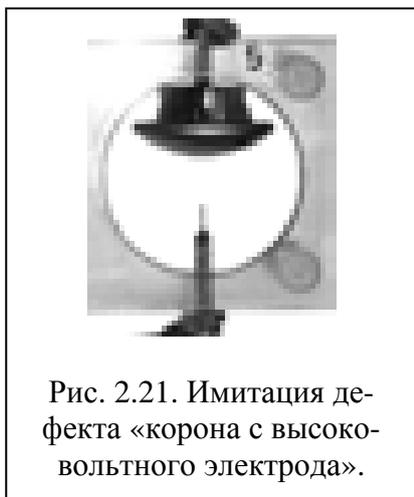


Рис. 2.21. Имитация дефекта «корона с высоковольтного электрода».

Сами по себе коронные разряды, чаще всего, не опасны для изоляции контролируемого оборудования. Их отрицательное влияние заключается в том, что они, являясь шумовыми, мешают диагностике других дефектов изоляции, влияние которых на остаточный ресурс оборудования велико.

Картина распределения импульсов частичных разрядов, зарегистрированная на ячейке имитации данного дефекта, приведена на рисунке 2.22. Эта картина не совсем характерна для обычной высоковольтной короны, но определенное сходство имеется. Реальное распределение импульсов частичных разрядов от короны, чаще всего встречаемое на практике, отличается от приведенного на рисунке 2.22. Основное отличие состоит в том, что имеющееся в имитаторе напряжение не достаточно

для полной имитации разрядов короны.

На рисунке можно выделить следующие особенности амплитудно – фазового распределения импульсов частичных разрядов.



Рис. 2.22. Амплитудно – фазовое распределение импульсов частичных разрядов при дефекте типа «корона с высоковольтного электрода».

- При положительной полярности питающего напряжения, зарегистрированные импульсы частичных разрядов имеют отрицательную полярность, как и при отрицательном напряжении питающей сети.

- Фазовое распределение импульсов частичных разрядов имеет примерно одинаковую картину, как в области положительной, так и отрицательной полярности питающего напряжения.

- Амплитудное распределение импульсов, по полупериодам питающей сети, имеет ярко выраженную не симметрию. Амплитуды всех импульсов, при положительном напряжении питания, многократно больше, чем амплитуды при отрицательном напряжении. В реальных условиях, чем ближе зона возникновения коронных разрядов будет приближена к высоковольтному электроду, тем выше будут импульсы при положительном напряжении.

- Все импульсы частичных разрядов сосредоточены в зонах максимальных значений амплитуды питающего напряжения. (На нашем имитаторе это проявилось не совсем корректно.) Максимальную интенсивность частичные разряды обычно имеют в угловых зо-

нах $60 \div 120$ градусов и $150 \div 300$ градусов. В этих зонах мгновенное значение питающего равно, или приближено к максимальному значению.

Основной особенностью наличия в контролируемом оборудовании дефекта типа «корона» является большой уровень отрицательных частичных разрядов при положительном напряжении питающей сети. Основные частичные разряды сосредоточены в области максимального значения питающего напряжения. При отрицательном напряжении питающей сети импульсов частичных разрядов много меньше и они имеют отрицательную полярность (!).

Дефект типа «корона с высоковольтного электрода» возникает в том случае, когда на высоковольтном электроде имеет место геометрический дефект типа «игла». При приложении к «игле» положительного потенциала потоки электронов устремляются от «земли» к «игле», по мере приближения эти потоки сливаются, набирают большую мощность, и проявляются в виде разрядов с высокой энергией. При противоположной полярности приложенного напряжения имеет место растекание электродов от «иглы». В процессе растекания потоки электронов делятся на все более мелкие «ручейки», энергия их падает, интенсивность уменьшается.

Дефект № 6. «Корона с земляного электрода».

Фотография ячейки имитатора, в которой моделируется такой дефект, приведена на рисунке 2.23.

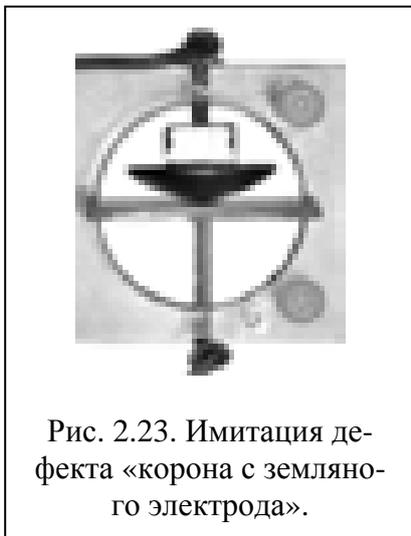


Рис. 2.23. Имитация дефекта «корона с земляного электрода».

Высокое напряжение от повышающего трансформатора имитатора подключено к сферическому электроду, имитирующему большую поверхность высоковольтного проводника. Земляной проводник малой площади (рядом с цифрой 6) имитирует обычный болт, отделенный от высоковольтного проводника изолирующей пластиной.

Картина распределения импульсов частичных разрядов, зарегистрированная на ячейке имитации данного дефекта, приведена на рисунке 2.24. В ней можно выделить следующие особенности.

- При положительной полярности питающего напряжения импульсы частичных разрядов имеют отрицательную полярность, а при отрицательном напряжении питающей сети импульсы частичных разрядов имеют положительную полярность. Имеющиеся на рисунке отклонения можно отнести к погрешности проводимых измерений.

- Фазовое распределение импульсов частичных разрядов имеет примерно одинаковую картину, как в области положительной, так и отрицательной полярности питающего напряжения.

- Амплитудное распределение импульсов, по полупериодам питающей сети, имеет ярко выраженную не симметрию. Амплитуды всех импульсов, при положительном напряжении питания, меньше, чем амплитуды при отрицательном напряжении.

- Все импульсы частичных разрядов сосредоточены в зонах нарастания амплитуды питающего напряжения. В зонах спада напряжения импульсов частичных разрядов практически нет. Максимальную интенсивность частичные разряды имеют в угловых зонах $40 \div 90$ градусов и $220 \div 270$ градусов. В этих зонах мгновенное значение питающего напряжения еще не достигло максимума, но скорость его нарастания уже существенно уменьшилась.

Основной особенностью наличия такого дефекта является большой уровень частичных разрядов при отрицательном напряжении питающей сети.

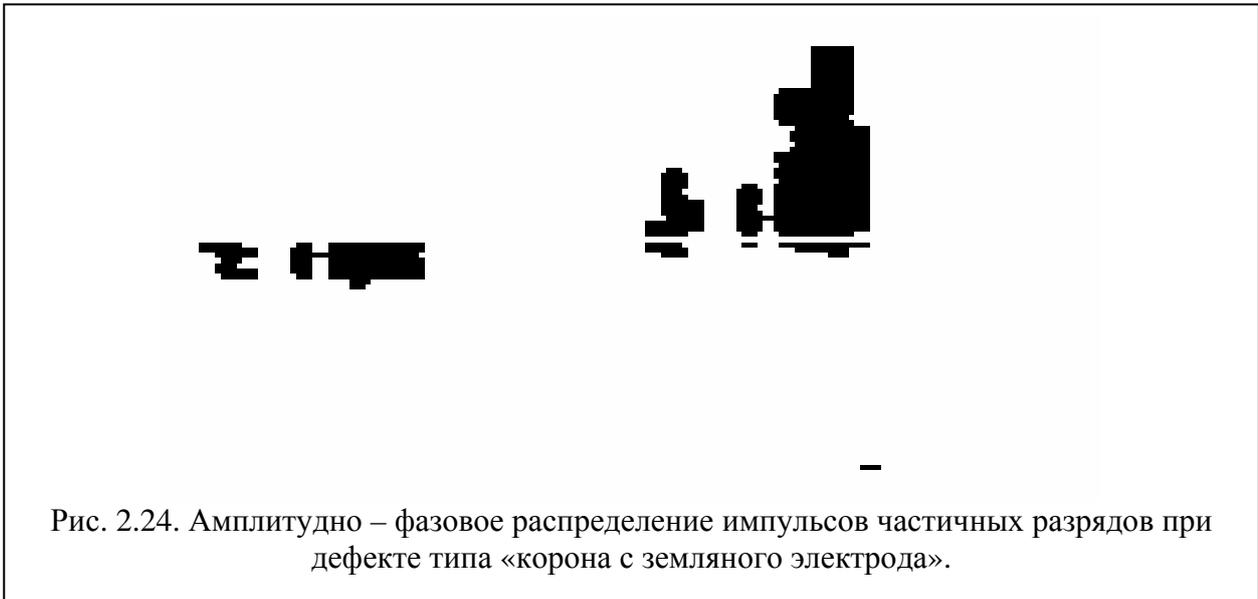


Рис. 2.24. Амплитудно – фазовое распределение импульсов частичных разрядов при дефекте типа «корона с земляного электрода».

Не повторяясь в общих описаниях, можно сказать следующее. Дефект типа «коронный разряд с земляного электрода» возникает в том случае, когда на земляном электроде имеют место геометрические дефекты (большая поверхность, локальные выступы, острые края, «углы»).

3. Измерение частичных разрядов в изоляции электрических машин

Контроль состояния изоляции статоров электрических машин, по уровню частичных разрядов, возможно для высоковольтного оборудования, рабочее напряжение которого составляет от 1000 В и выше. Для электрических машин, работающих при меньших рабочих напряжениях, возникновение дефектов в изоляции не всегда сопровождается появлением частичных разрядов.

Работы по измерению частичных разрядов в изоляции статора электрической машины могут проводиться на работающей машине, в режиме «on-line», или на выведенном из работы оборудовании, в режиме «off-line». В первом случае частичные разряды возникают под воздействием рабочего напряжения, а во втором, когда статор электрической машины подключается к источнику испытательного напряжения, под воздействием этого напряжения.

Для контроля состояния изоляции электродвигателей под рабочим напряжением могут быть использованы три, организационно разных, системы контроля и диагностики. Это:

- Система непрерывного контроля состояния изоляции при помощи стационарных систем, смонтированных на каждом контролируемом электродвигателе, проводимая в режиме «on-line». Текущая информация о состоянии изоляции оперативно отображается на главном компьютере системы управления производством. Эта система в наибольшей степени защищает оборудование от возможных повреждений, однако она имеет максимальную стоимость.

- Система периодического мониторинга состояния изоляции при помощи стационарно установленных датчиков и использования одного переносного прибора. Для получения информации в этой системе необходимо участие оперативного персонала, чтобы произвести измерения и передать полученные данные, для анализа, в компьютер с встроенной диагностической программой. Такая система также работает в режиме «on-line».

- Система выборочного контроля состояния изоляции электродвигателей, когда установка датчиков производится непосредственно перед проведением измерений. В данной системе для получения диагностической информации необходимо сначала установить первичные датчики, а затем произвести измерения. Большим недостатком такой системы является то, что, обычно, для установки датчиков частичных разрядов оборудование приходится отключать. Измерения частичных разрядов в такой схеме контроля изоляции могут проводиться в режимах «on-line» и «off-line».

3.1 Установка первичных датчиков.

Рассмотрим возможные места эффективной установки датчиков частичных разрядов в статоре электродвигателя, обеспечивающие максимальную информативность.

3.1.1. Пазы обмотки статора.

Эти места установки датчиков являются наиболее важными для диагностики, т. к. предметом диагностики, выполняемой по уровню частичных разрядов, является именно контроль состояния изоляции обмотки статора. Непосредственно в этой зоне, особенно в месте выхода секций обмотки из пазов статора, обычно и возникают частичные разряды.

Для целей контроля состояния изоляции в пазах обмотки статора (контроля уровня частичных разрядов в этой зоне) чаще всего используют датчики двух типов.

Во-первых, это плоские датчики электромагнитного поля (плоские катушки или даже полоски фольги), которые клеиваются в пазы (или вставляются под пазовые крыш-

ки обмотки) статора. Такие, конструктивно простые датчики, по принципу своего действия представляют собой антенны электромагнитного излучения, при помощи которых производится регистрация импульсов частичных разрядов, возникших в обмотке. Недостатком использования таких датчиков электромагнитного поля является высокая трудоемкость их установки в пазах статора, выполняемой на разобранной электрической машине. Существуют также и некоторые проблемы по безопасному выводу соединительного кабеля из зазора машины на наружную клеммную коробку, где подключается измерительный прибор.

Вторым типом датчиков частичных разрядов, монтируемых в пазах обмотки статора, являются стандартные термометры сопротивления, заложенные на заводе изготовителе электрической машины в обмотку, между секциями обмотки (контроль температуры меди обмотки) и на дне пазов статора (контроль температуры активной стали статора). Эти датчики температуры типа Pt100, для высокочастотных сигналов частичных разрядов, также являются электромагнитными антеннами. Использование таких датчиков, в отличие от дополнительно устанавливаемых датчиков электромагнитного поля, не требует существенного вложения средств и больших затрат на монтажные работы. Недостатком использования таких датчиков может явиться, при определенных параметрах статора и соединительных проводов, пониженная чувствительность. В основном это обусловлено применением в соединительных цепях термосопротивлений проводов, не рассчитанных на «пропускание» высокочастотных сигналов.

Оба типа «пазовых» датчиков находят применение в практических исследованиях изоляции статоров электрических машин. Выбор того или иного типа пазового датчика, в основном, определяется традициями фирмы – изготовителя оборудования для регистрации частичных разрядов. С измерительным оборудованием фирмы «Вибро-Центр» мы рекомендуем использовать выводы термометров сопротивления, для чего в нашей производственной программе существует датчик марки DRTD-3. Тем не менее, нет ограничений на использование с нашим измерительным оборудованием датчиков электромагнитного поля. Измерительные датчики марки DRTD-3, предназначенные для выделения высокочастотных импульсов из соединительных кабелей от термосопротивлений, стандартно входят в поставку прибора «R2100». Датчики контроля электромагнитного поля статора придется заказывать у других фирм, производителей оборудования измерения частичных разрядов.

3.1.2. Установка датчиков на силовых входных клеммах обмотки статора электродвигателя

Высокой информативностью, с точки зрения регистрации частичных разрядов в статоре электрической машины, обладают входные высоковольтные клеммы обмотки статора. Поскольку в этом месте всегда присутствует высокое напряжение промышленной частоты, обычно здесь устанавливают специальные, разделительные «конденсаторы связи» (coupling capacitors). Такие конденсаторы связи, предназначенные для выделения из напряжения промышленной частоты высокочастотных импульсов, монтируются внутри корпуса электрической машины, вблизи высоковольтных изоляторов, к которым подключается питающий кабель.

Емкость конденсаторов связи, чаще всего, составляет 80 пикофарад. Величина этой емкости может быть и другой, значение в 80 пикофарад просто отражает тот факт, что такую емкость имеют слюдяные конденсаторы связи фирмы «IRIS». Самым важным является только то, чтобы эта емкость была стабильной, для получения постоянных и надежных данных о величине частичных разрядов в сложных условиях эксплуатации электрических машин. Вторым важным требованием к конденсаторам связи является то, чтобы они обеспечивали необходимую стойкость изоляции к импульсным воздействиям в питающей сети, возникающих в результате коммутационных перенапряжений, и возможного влияния грозных разрядов.

В состав поставки прибора «R2100» конденсаторы связи не входят. Это обусловлено их достаточно высокой ценой и значительными габаритами. В производственной программе нашей фирмы есть 4 типоразмера конденсаторов связи марки «СС», которые мы производим совместно с фирмой «EDI», США. Различаются они номинальным рабочим напряжением, СС-5; СС-7; СС-16 и СС-27. Цифра в марке конденсатора связи показывает величину рабочего напряжения в киловольтах, на которое рассчитана внутренняя изоляция и «внешние» пути утечки по поверхности конденсатора.

Самой большой проблемой при использовании в схемах измерения частичных разрядов конденсаторов связи, монтируемых на зажимах обмотки статора, является низкая помехозащищенность. При помощи конденсаторов связи, смонтированных на внешних зажимах обмотки статора, одинаково успешно будут регистрироваться импульсы частичных разрядов, возникшие в статоре электрической машины, и импульсы, пришедшие из «внешней» питающей сети по кабелю.

В измерительном приборе «R2100», для решения этого вопроса, максимально эффективным является использования метода отстройки от помех, называемого «time of arrival». Применение этого метода для контроля изоляции статора электрических машин, иллюстрируется в данном руководстве на рисунке 1.6., приведенном в предыдущем разделе.

3.1.3. Дополнительные датчики частичных разрядов

Использование датчиков, «закладываемых» в пазы статора электрической машины, чаще всего, дает возможность достаточно корректно измерять уровень частичных разрядов в изоляции статора.

В некоторых практических случаях измерения частичных разрядов приходится использовать дополнительные датчики. Основное назначение дополнительных датчиков – повышение помехоустойчивости измерительных схем. При помощи сигналов от этих датчиков удастся дифференцировать импульсы ЧР, возникшие в изоляции обмотки статора контролируемого электродвигателя, от импульсов, наведенных от других высоковольтных объектов.

В качестве простого примера можно опять использовать схему измерения частичных разрядов, приведенную на рисунке 1.6. Она очень хорошо работает в том случае, когда «внешний» импульс возник в той фазе, в которой производится измерение ЧР. Но если этот импульс возник в другой фазе питающего кабеля, то он «пройдет» в обмотку статора, перенаведется внутри генератора на ту фазу, в которой мы производим измерения, и наш прибор зарегистрирует его как «истинный» импульс ЧР, возникший в обмотке статора. Для решения задач такого типа и нужно использовать различные дополнительные датчики частичных разрядов.

Дополнительные датчики, используемые в схемах измерения частичных разрядов в изоляции статора электрической машины, могут быть установлены в нескольких местах. Все определяется конструкцией и внутренней схемой самого датчика:

- В нейтрали обмотки электрической машины. Если у обмотки статора нейтральная точка изолирована от земли, то в этом случае используют стандартные конденсаторы связи, монтируемые внутри корпуса электрической машины. Если нейтральная точка трехфазной обмотки подключена к земле, то используют высокочастотные импульсные трансформаторы из серии «RFCT».

- Датчики электромагнитного излучения внутри корпуса статора. При помощи этих датчиков контролируются поверхностные и коронные разряды. Это могут быть различные антенны катушки с сердечниками и без сердечников.

- Конденсаторы связи внутри подводящего токопровода, если он имеет место в данном контролируемом оборудовании.

- В промежутке между корпусом токопровода, и корпусом генератора, не соединенными друг с другом, можно устанавливать датчики марки RFCT-2. При помощи этого датчика также можно повысить помехозащищенность измерительной схемы.

В каждом конкретном случае, выбор необходимого набора первичных датчиков, и определение оптимального места установки датчиков частичных разрядов, определяется специалистом, проводящим измерения.

3.2. Схемы измерения частичных разрядов в электрических машинах с использованием дополнительных источников напряжения

Измерения частичных разрядов в изоляции статоров электрических машин, проводимые с использованием дополнительных источников высокого напряжения, имеют свои достоинства и недостатки.

Важным преимуществом использования такой схемы измерения частичных разрядов является то, что при проведении измерений можно легко избавиться от «внешних» высокочастотных помех, которые, могут возникнуть, в данном случае, только в источнике высокого напряжения. От влияния таких помех можно легко отстроиться, применив высокочастотный дроссель, препятствующий поступлению помех в статор контролируемой электрической машины.

Вторым достоинством использования измерений с дополнительным источником высокого напряжения является то, что испытания можно проводить при разных значениях напряжения. Это позволяет выявить уровень напряжения, при котором начинают возникать частичные разряды в изоляции, а также связь величины испытательного напряжения с общим уровнем и распределением частичных разрядов. Такая информация полезна при оценке опасности воздействия возникших частичных разрядов в изоляции, влияющей на безаварийную и длительную эксплуатацию контролируемого оборудования.

Третьим достоинством схемы измерения частичных разрядов в режиме «off-line» является то, что при использовании двух источников испытательного напряжения, а в некоторых случаях и при помощи одного источника, можно локализовать место возникновения разрядов. Удастся выявить, на каком изоляционном промежутке происходит локальный «пробой» изоляции. Или частичные разряды возникают на участке изоляции статора «фаза – земля», или же на участке изоляции «фаза – фаза».

Наиболее существенным недостатком применения измерений частичных разрядов в электрических машинах, в режиме «off-line», является необходимость вывода оборудования из работы и использование дополнительного, часто дорогостоящего, высоковольтного источника переменного тока промышленной частоты. Проведение таких испытаний возможно только на отключенном оборудовании.

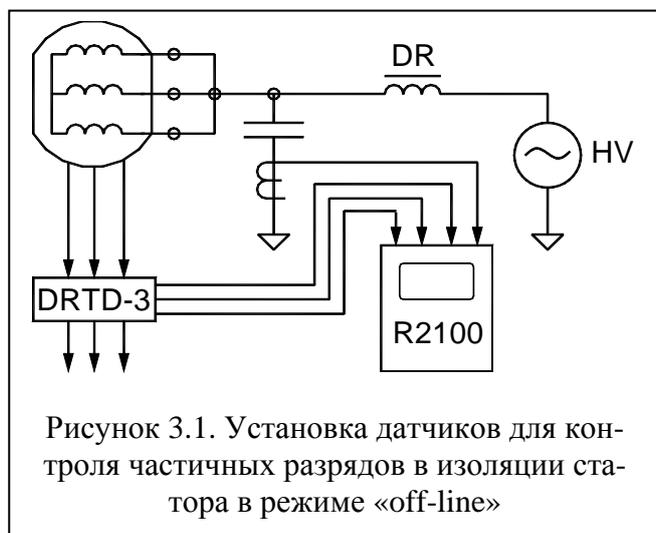


Рисунок 3.1. Установка датчиков для контроля частичных разрядов в изоляции статора в режиме «off-line»

Рассмотрим практические схемы измерения частичных разрядов в статоре электрической машины, которые основаны на использовании дополнительного источника высокого напряжения. Пример наиболее простой и распространенной схемы измерений частичных разрядов, мест, типов и способов установки первичных датчиков, показан на рисунке 3.1.

Внешние выводы фазных обмоток статора объединяются вместе и подключаются к источнику испытательного напряжения через разделительный дроссель. Этот дроссель

нужен для изоляции обмотки статора от высокочастотных импульсов, которые могут возникать в некоторых типах источников испытательного напряжения.

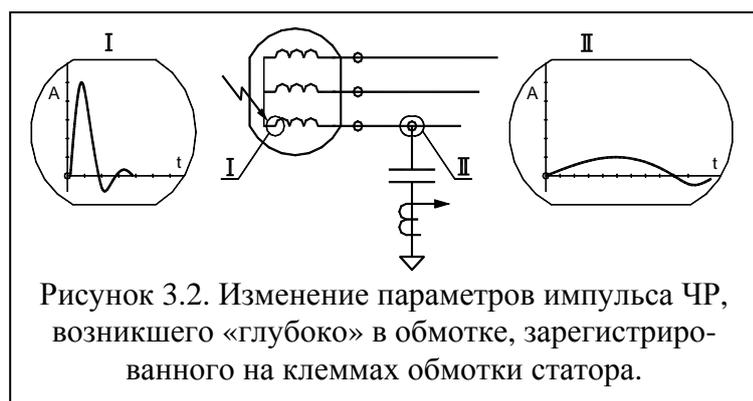
В качестве фильтрующего дросселя можно использовать ферритовое кольцо с большим внешним диаметром, не менее 50 – 70 мм. На кольцо необходимо намотать 10 – 20 витков изолированного провода. Если источник напряжения не имеет внутри частичных разрядов, то необходимость в дросселе отпадает. Для принятия решения о необходимости применения дросселя нужно провести измерение частичных разрядов на выходе источника, включив его в режиме холостого хода, без нагрузки. В качестве датчика частичных разрядов для таких измерений необходимо использовать конденсатор связи, подключаемый к выходу испытательного источника напряжения. Необходимо помнить, что весь дроссель, включая сердечник, будет находиться под повышенным испытательным напряжением, поэтому необходимо принять все необходимые меры безопасности.

Для повышения достоверности измерения частичных разрядов в изоляции статора нужно использовать дополнительные датчики, например, включенные в цепи измерения температуры обмотки статора. На рисунке 3.1. показано подключение к прибору «R2100» трех конденсаторов связи и одного трехфазного датчика марки DRTD-3. В зависимости от общего количества встроенных в обмотку статора датчиков температуры, количество датчиков марки DRTD-3 в общей схеме измерения может быть увеличено, что повысит итоговую достоверность проводимых измерений.

С физической точки зрения это объясняется следующим. Если импульс частичного разряда возникает «глубоко» в обмотке, на большом удалении от входных клемм, то его амплитуда, по мере перемещения от точки возникновения к точке подключения измерительного конденсатора связи, сильно уменьшается. Уменьшение амплитуды автоматически сопровождается снижением частотных параметров импульса, т. к. импульс становится «менее крутым», более растянутым во времени. Все это схематически показано на рисунке 3.2.

Поскольку конденсатор связи является очень высокочастотным датчиком, лучшим образом работающий в диапазоне частот в десятки и сотни мегагерц, то он плохо регистрирует такие, сравнительно, низкочастотные импульсы, возникшие в обмотке на удалении от входных клемм. Чем «глубже» в обмотке возник импульс, тем меньше шансов зарегистрировать его при помощи конденсатора связи.

В качестве общей оценки снижения чувствительности такой измерительной схемы можно сопоставить импульсы, показанные на рисунке 3.2. Пусть импульс возник в глубине обмотки, в точке 1, и на клеммах обмотки, в точке 2,



уменьшил свою амплитуду в пять раз. При этом частотные параметры импульса также изменяются, условно говоря, в пять раз, что примерно соответствует реальному процессу затухания. На рисунке видно, что в 5 раз возросла длительность импульса, и, что особенно важно, резко возросла длительность переднего фронта импульса.

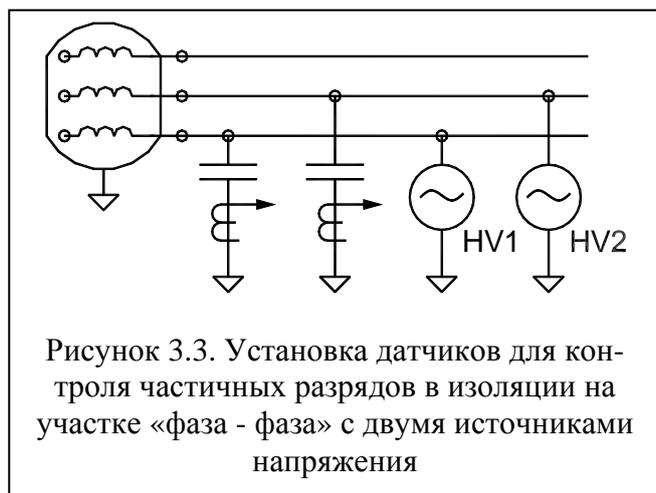
Все это приведет к тому, что на выходе конденсатора связи сигнал от «глубинного» импульса в изоляции статора электрической машины будет в 25 раз меньше амплитуды импульса, если бы он возник рядом с местом установки конденсатора. Такой разброс амплитуд не позволяет корректно контролировать общее техническое состояние изоляции статора, оценивать остаточный ресурс изоляции.

Использование термометров сопротивления в качестве антенн электромагнитного излучения, располагаемых непосредственно в пазах статора, как это показано на рисунке 3.1., повышает чувствительность проведения измерений частичных разрядов. Достовер-

ность проведения таких измерений, в комбинированной схеме регистрации импульсов частичных разрядов, получается существенно выше, т. к. дополнительная «антенна» располагается непосредственно в пазу обмотки. Таким образом, удается повысить общую чувствительность схемы измерения частичных разрядов.

Частичные разряды в изоляции обмотки статора электрической машины могут возникать на двух, наиболее опасных участках. Этими участками являются изолирующие промежутки обмотки «фаза - фаза» и «фаза - земля». Контроль каждого участка электрической изоляции электрических машин имеет свои особенности.

Для измерения частичных разрядов, возникающих в статоре на участке изоляции между обмотками, интервал «фаза – фаза», может быть использована испытательная схема с двумя источниками переменного напряжения промышленной частоты.



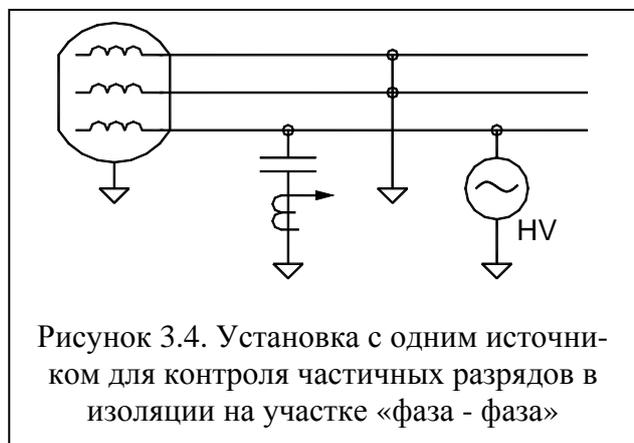
Такая схема приведена на рисунке 3.3. В этой измерительной схеме используются два одинаковых источника испытательного напряжения HV1 и HV2, вторичные выводы которых подключаются к двум фазам обмотки статора. При этом, своими первичными обмотками, эти источники подключаются к напряжениям разных фаз (трехфазной системы 0,4 кВ), например, к фазам «А» и «В». Эти напряжения сдвинуты относительно

друг друга на 120 градусов, в результате чего и выходные напряжения этих источников будут также сдвинуты относительно друг друга на угол в 120 градусов.

При подключении испытательных источников к двум фазам статора контролируемой электрической машины, к изоляции фазных обмоток на участке «фаза – земля», от обоих источников высокого напряжения, будет приложено переменное испытательное напряжение, равное номинальному, фазному значению. К участку изоляции «фаза – фаза», между фазами обмотки статора, будет приложено напряжение, равное линейному.

Такое распределение напряжений на участках изоляции обмоток соответствует рабочему режиму работы оборудования, и не оказывает отрицательного воздействия на параметры изоляции. Измерения, выполненные по такой схеме, достоверно определяют состояние изоляции, и не приведут к перенапряжениям.

Возможен и второй вариант измерения частичных разрядов в изоляции статора на участке «фаза – фаза». Такой вариант измерительной схемы измерения приведен на рисунке 3.4.



Для проведения измерений фазные обмотки статора изолируются друг от друга, разделяя их в общей точке обмотки. Далее, поочередно, по две фазные обмотки статора замыкаются на землю, а на третью обмотку, изоляция которой контролируется, подается напряжение от источника.

При таком подключении источника к обмоткам статора под испытательным напряжением оказываются не только участки изоляции «фаза – земля», но

участки «фаза – земля» той фазы обмотки, которая подключена к источнику.

Недостатком такой схемы измерения является то, что участок изоляции «фаза – фаза» находится под фазным напряжением, которое существенно меньше линейного, под которым эксплуатируется этот участок изоляции. Напряжение источника питания можно поднять до величины линейного напряжения, и испытать изоляцию под рабочим напряжением. Однако, при этом вся изоляция контролируемой фазы, в том числе и изоляции «фаза – земля», также окажется под линейным напряжением. Такое превышение напряжения на 70% (соотношение между фазным и линейным напряжениями связано значением $\sqrt{3}$) опасно для изоляции, и может привести к ее пробое, т. е. к повреждению изоляции во время проведения испытаний. Поэтому, в таком режиме изоляцию не испытывают, чтобы не искусственно сократить ресурс ее работы.

3.3. Схемы измерения частичных разрядов в электрических машинах под рабочим напряжением

3.3.1. Установка первичных датчиков ЧР

Измерения частичных разрядов в изоляции статора электрических машин, под рабочим напряжением, в режиме «on-line», выполняется по таким же схемам, как и при измерениях с использованием источника испытательного напряжения. Отличие состоит только в том, что параметры питающей сети являются неизменными, тогда как параметры испытательного источника пользователь может, в зависимости от поставленной задачи, изменять.

Второй проблемой, возникающей при проведении измерений частичных разрядов в электрических машинах в режиме «on-line», является сложность установки некоторых типов первичных датчиков. Особенно это касается условий установки конденсаторов связи, подключаемых к силовой сети, питающей электродвигатель. Подключение таких датчиков может быть произведено только на отключенном оборудовании. В результате, для подключения конденсаторов связи необходимо оборудование, хотя бы на небольшой срок, выводить из работы, или, устанавливая такие датчики заранее, во время плановых остановов оборудования.

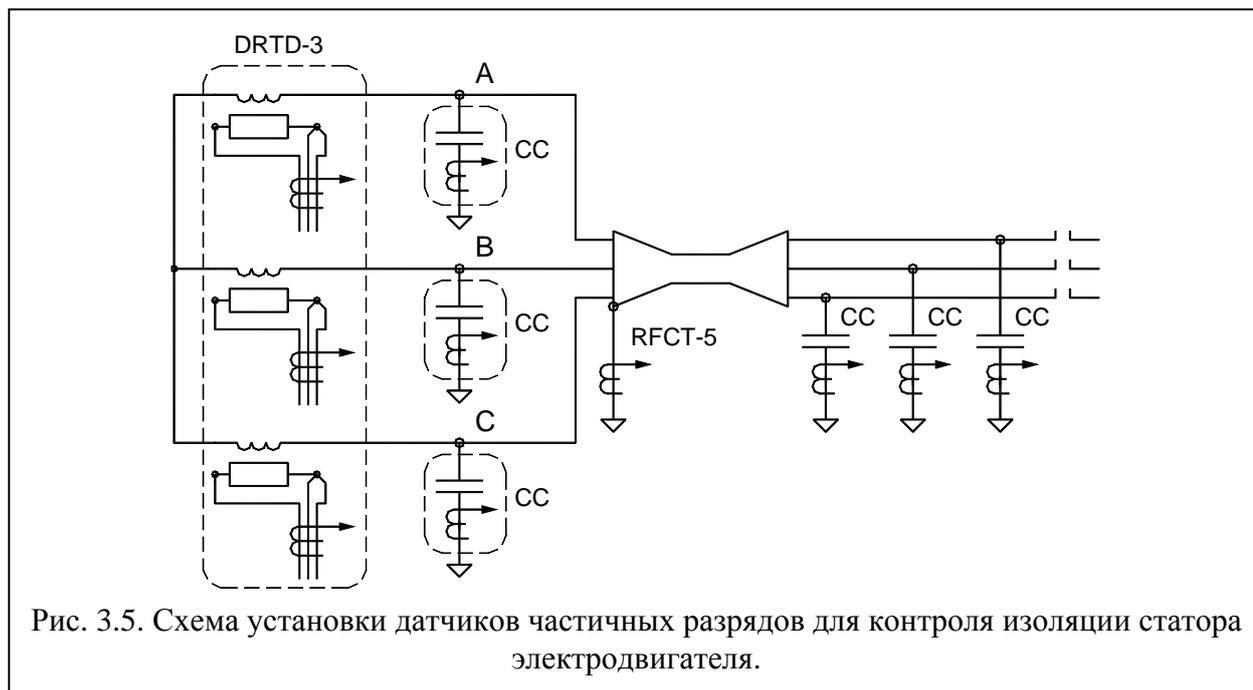
Датчики частичных разрядов марки DRTD-3, включаемые в цепи измерения температуры обмотки статора, могут быть установлены и на работающем оборудовании, при условии предварительного отключения, на период установки, системы блокировки электрической машины по превышению температуры обмотки. Датчики контроля частичных разрядов марки RFCT-4 и RFCT-5, включаемые в цепи заземления, чаще всего, также удаётся устанавливать на работающем оборудовании.

В любом случае, установку первичных датчиков частичных разрядов на статоре электрической машины лучше всего производить на отключенном оборудовании. Это позволяет повысить безопасность работ, установить необходимое количество датчиков, и качественно провести калибровку схемы измерения, с учетом затухания внутри электрической машины. На включенной машине провести калибровку измерительной схемы нельзя.

Хорошим вариантом, для оперативного проведения измерений частичных разрядов, является предварительная установка необходимого набора первичных датчиков, выполняемая на отключенном оборудовании. Это позволяет на всем оборудовании, на котором установлены датчики, проводить измерения частичных разрядов в любое, удобное для этого время. Недостатком такого подхода является увеличение стоимости, за счет установки датчиков на каждой контролируемой электрической машине.

3.3.2. Схема измерения частичных разрядов в электрической машине в режиме «on-line».

На рисунке 3.5. приведен возможный вариант схемы измерения частичных разрядов в статоре электрической машины.



Всего в этой схеме измерения частичных разрядов используется до 10 сигналов, получаемых от 8 первичных датчиков трех типов. Это 6 конденсаторов связи, один датчик марки DRTD-3 для контроля частичных разрядов в пазах, и один датчик марки RFCT-4 для контроля частичных разрядов в заземляющей жиле экрана высоковольтного кабеля.

При помощи трех конденсаторов связи, подключенных к входным зажимам обмотки статора, регистрируются импульсы частичных разрядов, возникшие в той части обмотки, которая «примыкает» к входным зажимам. Три дополнительных конденсатора связи, смонтированные на противоположном конце кабеля, предназначены для «разборки» импульсов помехи, поступающих из внешней части энергосистемы. При этом используется метод «time of arrival», реализованный в приборе «R2100».

Некоторые фирмы, изготовители оборудования для измерения частичных разрядов, рекомендуют всю схему измерения ограничивать только шестью, а иногда даже и только тремя конденсаторами связи. Такой подход допустим, но только для электрических машин, в которых затухание импульсов ЧР не очень значительно. Это справедливо только для электрических машин небольшой мощности, до 5 МВт. Причем для тихоходных двигателей и генераторов эта цифра еще меньше.

В крупных и тихоходных электрических машинах, имеющих большие габариты, затухание импульсов может быть очень большим, до 10 раз, в результате чего оценка состояния изоляции при помощи конденсаторов связи может быть выполнена некорректно. Применением для регистрации частичных разрядов только конденсаторов связи допустимо только при оценке состояния изоляции статоров небольших высоковольтных двигателей. Причины такого ограничения достаточно подробно описываются в данном руководстве выше, в комментариях к рисунку 2.6.

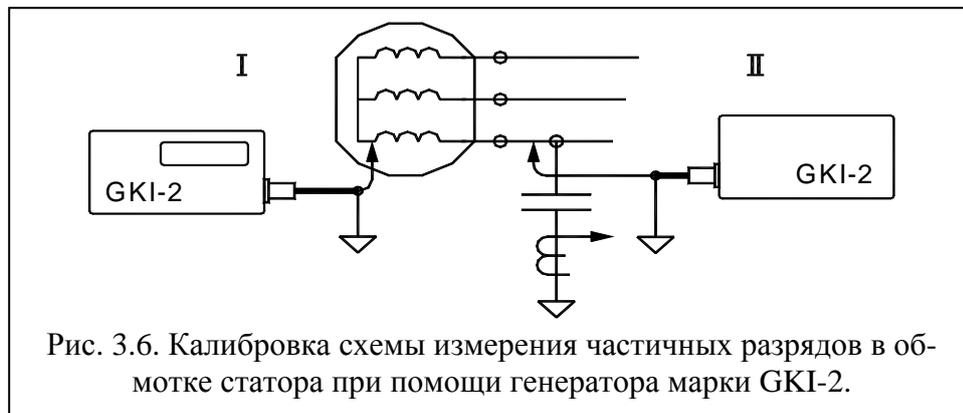
Для повышения достоверности измерений в схеме на рисунке 3.5. применен трехканальный датчик марки «DRTD-3». Он включается в разрыв цепи термометров сопротивления и монтируется внутри, или рядом с клеммной коробке выводов термосопротивлений на корпусе двигателя. Таких датчиков может быть смонтировано от одного, до четырех, в зависимости от количества термосопротивлений. В итоге, изоляции обмотки статора контролируется прямо в пазах, равномерно распределенных по расточке статора. При-

менение таких датчиков бывает достаточно для надежного выявления возникающих дефектов, и для локализации места их возникновения.

При необходимости, данная схема установки датчиков частичных разрядов может быть модернизирована при помощи установки дополнительных датчиков. Необходимость в этом возникает в случаях, когда анализируется машина большой мощности, когда электрическая машина имеет значительные конструктивные отличия, и при необходимости комплексного контроля оборудования. Примером комплексного подхода к контролю изоляции оборудования может явиться необходимость контроля изоляции высоковольтного оборудования блока ТЭЦ – генератор, шинопровод, трансформатор и высоковольтный выключатель.

3.4. Калибровка схем измерения частичных разрядов в электрических машинах

Правильная оценка уровня частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования может быть выполнена только после проведения процедуры калибровки измерительной схемы с учетом затухания внутри контролируемого объекта. Для проведения калибровки входных цепей необходимо использовать калибровочный генератор частичных разрядов марки GKI-2, входящий в состав поставки прибора «R2100».



Для проведения калибровки входных цепей необходимо использовать калибровочный генератор частичных разрядов марки GKI-2, входящий в состав поставки прибора «R2100».

Для определения уровня затухания

частичных разрядов в статоре электрической машины калибровку желательно проводить с «двух сторон» обмотки статора. В первом случае частичные разряды следует инжектировать в обмотку со стороны входных клемм обмотки, а во втором случае с другой стороны, от общей точки обмотки (чаще всего это средняя точка «звезды обмотки»). Такая двойная калибровка учитывает весь диапазон возможных мест возникновения частичных разрядов в обмотке, что позволит оценить уровень затухания импульсов внутри обмотки.

В практике измерения частичных разрядов существуют случаи, когда невозможно подключить калибровочный генератор к общей точке обмотки статора, а можно подключить только к входным зажимам обмотки. Обычно это объясняется конструктивными особенностями выполнения обмотки статора. Еще более сложным случаем для калибровки является вариант, когда фазы обмотки статора, на заводе изготовителе, были соединены не по схеме «звезда», а по схеме «треугольник». Во всех этих случаях процедуру калибровки приходится модифицировать.

В таких случаях приходится применять калибровку измерительной схемы при помощи инжектирования тестовых импульсов в лобовые части обмотки статора. Часть лобовых частей обмотки статора, поверх изоляции секций и лобовых частей, обматывают фольгой. Фольгу необходимо аккуратно «обжать» вокруг лобовых частей, обеспечивая минимальный воздушный зазор.

Центральный вывод кабеля от калибровочного генератора GKI-2 подключается к фольге, а экран кабеля от генератора заземляется, если нужно с использованием дополнительного удлиняющего провода. Далее производится инжектирование импульсов в обмот-

ку статора электрической машины через емкость, созданную при помощи фольги между генератором и обмоткой статора. Чем больше площадь соприкосновения фольги с обмоткой, тем больше будет проходная емкость такого конденсатора, тем лучше тестовые импульсы будут инжектироваться в обмотку.

Необходимую площадь фольги можно оценить при помощи простых соотношений. При зазоре в 5 мм емкость плоского конденсатора площадью один квадратный дециметр (с воздушным диэлектриком) составит, примерно, 18 пикофард, если же диэлектрик будет эпоксидный, то емкость составит около 70 пикофард. Таким образом, можно условно считать, что для нормальной передачи импульсов от тестового генератора в обмотку статора емкости, достаточно (активной) площади фольги в 5 – 10 квадратных дециметров.

4. Измерение частичных разрядов в кабельных линиях

Широкое практическое применение высоковольтных кабельных линий различного назначения, их важность в обеспечении надежной работы систем электроснабжения промышленных предприятий и населения, требует применения всего спектра методов диагностики состояния изоляции. Именно по причине возникновения проблем в изоляции происходит большая часть аварийных отключений кабельных линий.

В последнее время все большее внимание уделяется применению методов контроля состояния изоляции кабельных линий, основанных на контроле уровня и фазового распределения частичных разрядов. Это стало возможно благодаря все более широкому распространению современных приборов.

Универсальный переносный прибор контроля частичных разрядов, марки «R2100», практически идеально подходит для использования в целях оперативной диагностики состояния изоляции кабельных линий различного назначения. В приборе реализованы все необходимые современные методы регистрации высокочастотных сигналов, алгоритмы отстройки от паразитных шумов, средства локализации места возникновения дефектов. Набор датчиков, входящий в стандартную комплектацию прибора, достаточен для проведения таких работ.

Все это, интегрированное в единый программно – технический комплекс, позволяет оперативно и эффективно проводить диагностические работы с высоковольтными кабельными линиями.

4.1. Установка первичных датчиков контроля частичных разрядов в кабельных линиях

Для контроля изоляции кабельных линий по уровню частичных разрядов, как и для контроля изоляции любого другого высоковольтного оборудования, важнейшим вопросом является правильный выбор датчиков. При этом важным является выбор не только типов, но и наиболее информативных мест установки первичных датчиков. Оптимальное решение этого вопроса позволяет диагносту получать максимально информативные диагностические заключения, при минимальных затратах на проведение практических измерений, и на обработку полученных результатов.

Таких мест в кабельной линии, в силу ее особых конструктивных особенностей, не так уж много. В основном, это концевые зоны кабельных линий. Рассмотрим эти более подробно.

4.1.1. Установка датчиков частичных разрядов в цепи заземления экрана кабельной линии

Это наиболее доступное и информативное место для установки первичных датчиков, используемое при проведении измерений частичных разрядов. Важным достоинством использования этого места для установки датчиков является то, что, при соблюдении определенных правил безопасности, это место доступно для проведения работ на работающей кабеле, причем, чаще всего, нет необходимости в снятии напряжения с кабельной линии для установки первичных датчиков частичных разрядов.

Современные кабельные линии, благодаря применению высокоэффективных изоляционных материалов, имеют большую емкость на участке «проводящая жила – экран». Благодаря этому, практически все, возникающие в изоляции на интервале «фаза - экран» частичные разряды, замыкаются на землю через проводящий защитный экран, который всегда заземляется, в одной, или двух точках. Измерительная схема с включением датчи-

ков в цепь проводника заземления экрана кабельной линии применяются для исследования однофазных и трехфазных кабелей.

Для поиска частичных разрядов, которые возникают в изоляции трехфазных кабельных линий на участке изоляции «фаза – фаза», проведение измерений в режиме «on-line» невозможно. Это обусловлено тем, что цепь протекания импульсов от таких разрядов

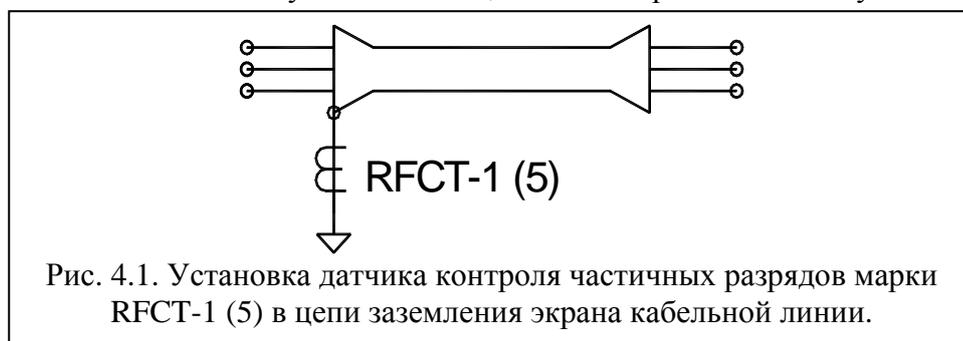


Рис. 4.1. Установка датчика контроля частичных разрядов марки RFCT-1 (5) в цепи заземления экрана кабельной линии.

ло связана с экраном контролируемой кабельной линии, разряды замыкаются с фазы на фазу. Для поиска таких дефектов изоляции

трехфазных кабельных линий, чаще всего, кабель приходится отключать от сети, а затем поочередно заземлять проводящие жилы кабеля. При этом напряжение на контролируемый кабель подается от дополнительного источника испытательного напряжения. Схема для проведения таких измерений будет показана ниже.

На рисунке 4.1. приведена схема установки датчика частичных разрядов марки RFCT-1 (RFCT-5) в цепи заземления кабельной линии. Эти датчики являются одинаковыми по принципу своей работы и чувствительности к сигналам частичных разрядов, отличие состоит в том, что датчик RFCT-5 представляет собой разъемные высокочастотные клещи.

При установке датчиков типа RFCT необходимо всегда контролировать наличие, или отсутствие, заземления экрана кабеля на противоположном конце. Если с противоположной стороны экран Контролируемой кабельной линии тоже заземлен, то чувствительность измерительной схемы существенно снижается. Для обеспечения необходимой чувствительности проводимых измерений, особенно при возникновении дефектов вблизи удаленного конца линии, придется принимать дополнительные меры.

Объяснений снижению чувствительности измерительной схемы два. Одно связано с возможным насыщением ферритового сердечника датчика, а второе обусловлено замыканием импульсов частичных разрядов по «паразитному» заземлению.

Если оба конца экрана кабельной линии заземлены, то, что случается чаще всего, по экрану кабеля будут протекать уравнивающие токи промышленной частоты, величина которых, в определенных условиях, может быть весьма значительной. Уравнивающие токи, протекая через датчик RFCT-1, приведут к насыщению внутреннего ферритового сердечника, что изменит его магнитную проницаемость. В результате амплитуда импульсов частичных разрядов на выходе датчика уменьшится, что может отрицательно сказаться на точности проводимых измерений. Самым «неприятным» является то, что нельзя заранее предполагать возможную степень насыщения сердечника в момент проведения измерений.

Уменьшить влияние этого фактора можно несколькими способами. Наиболее просто это сделать, если использовать вместо датчика



Рис. 4.2. Установка датчика контроля частичных разрядов марки RFCT-5 в цепи заземления экрана кабельной линии с двумя заземлениями.

RFCT-1 датчик марки RFCT-5, являющийся разъемным высокочастотным трансформатором тока. Между полукольцами датчика RFCT-5 вклеивается (или просто вкладывается) изолирующая немагнитная пластина толщиной $2 \div 3$ миллиметра. Благодаря этой пластине сердечник датчика перестанет насыщаться, амплитуда импульсов частичных разрядов на его выходе уменьшится, но практически не будет зависеть от величины протекающего через датчик уравнительного тока промышленной частоты. При использовании датчика с немагнитным зазором обязательно следует помнить о том, что и первичная калибровка измерительной цепи должна проводиться с использованием этой изолирующей пластины.

В случае, если заземление экрана контролируемого кабеля выполнено проводом большого сечения, или шиной, когда установка датчика марки RFCT-5 невозможно, необходимо использовать разъемный датчик марки RFCT-4, который имеет большой внутренний диаметр, позволяющий «охватывать» проводящие шины и трубы большого сечения. При наличии у контролируемого кабеля заземления с двух сторон, в датчике марки RFCT-4 также необходимо использовать изолирующие прокладки.

Использование изолирующих прокладок между полукольцами сердечников датчиков RFCT-4 и RFCT-5 не решает полностью проблемы измерения частичных разрядов в кабельной линии с заземлением экрана с двух сторон. Вторая проблема заключается в том, что в связи с наличием в линии двух цепей заземления частичные разряды будут замыкаться по обоим. Что особенно важно, что частичные разряды, возникшие в изоляции рядом с противоположным концом кабельной линии, в основном, будут замыкаться по «второй» цепи заземления, и измерены прибором не будут. Говоря иными словами, чувствительность схемы измерения к частичным разрядам, возникающим в различных участках кабельной линии, будет существенно различаться.

Уменьшить влияние второго заземления экрана кабеля можно при помощи использования устройств подавления высокочастотных помех, называемых сопрессорами.

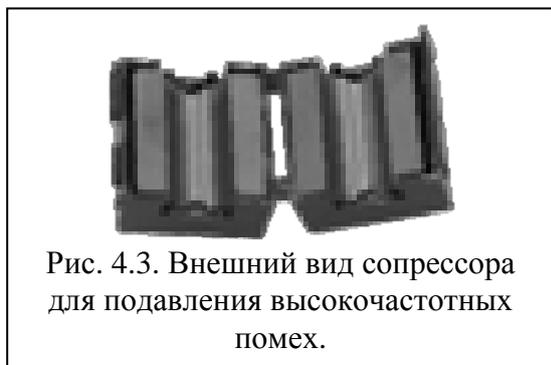


Рис. 4.3. Внешний вид сопрессора для подавления высокочастотных помех.

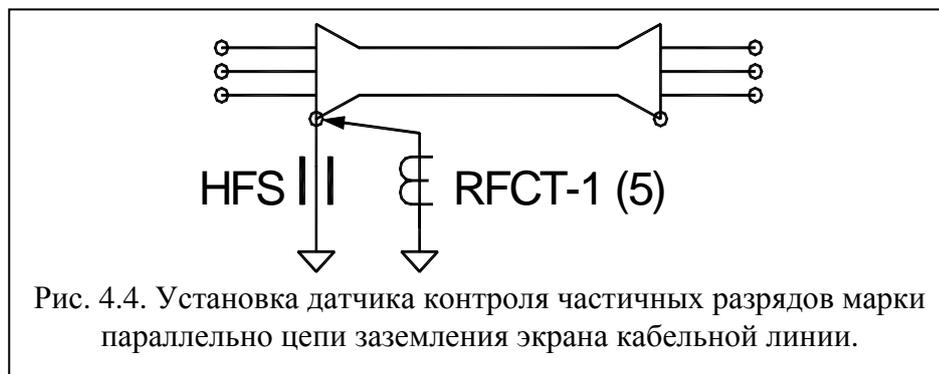
Внешний вид такого сопрессора приведен на рисунке 4.3. Он представляет собой разъемный ферритовый сердечник, который надевается на провод и «зашелкивается». При этом провод оказывается охваченным кольцевым ферромагнитным сердечником с достаточно большим объемом. Чем больше масса сердечника, тем эффективнее будет экранирование. Такие системы подавления высокочастотных помех достаточно часто используются и в бытовой электронной аппаратуре, где они монтируются непосредственно на кабеле питания.

Кольцевой сердечник выполняет функцию фильтра высокочастотных импульсных сигналов, для которых такая конструкция имеет высокое сопротивление. Токи промышленной частоты легко протекают через сопрессор, а для высокочастотных сигналов он имеет высокое проходное сопротивление. Чем выше частота импульса, тем эффективнее работает сопрессор.

Результатом использования сопрессора будет являться то, что несмотря на наличие двух заземлений экрана кабельной линии, все высокочастотные сигналы будут замыкаться на землю через наш датчик частичных разрядов, установленный с одной стороны кабеля. Все импульсы частичных разрядов будут зарегистрированы нашим измерительным прибором.

Такая схема измерения частичных разрядов в кабельной линии, которая имеет заземления экрана с двух сторон кабеля, показана на рисунке 4.2. В этой схеме, на противоположном конце кабельной линии, использован высокочастотный защитный сопрессор, который обозначен буквами «HFS».

При помощи сопрессора может быть реализована еще одна возможность установки датчиков частичных разрядов при измерении частичных разрядов в цепи заземления кабельной линии, даже при наличии двух цепей заземления. Такая схема приведена на рисунке 4.4.



На этом рисунке показано, что параллельно цепи заземления экрана кабеля создается цепь, в которую включается датчик регистрации частичных разрядов марки

RFCT-2. Конструктивно этот датчик не пропускает через себя токи промышленной частоты, через него могут протекать только высокочастотные импульсы от частичных разрядов в изоляции кабельной линии. Для того, чтобы по заземлению протекали только токи промышленной частоты, на него надевается сопрессор, который препятствует протеканию высокочастотных токов частичных разрядов.

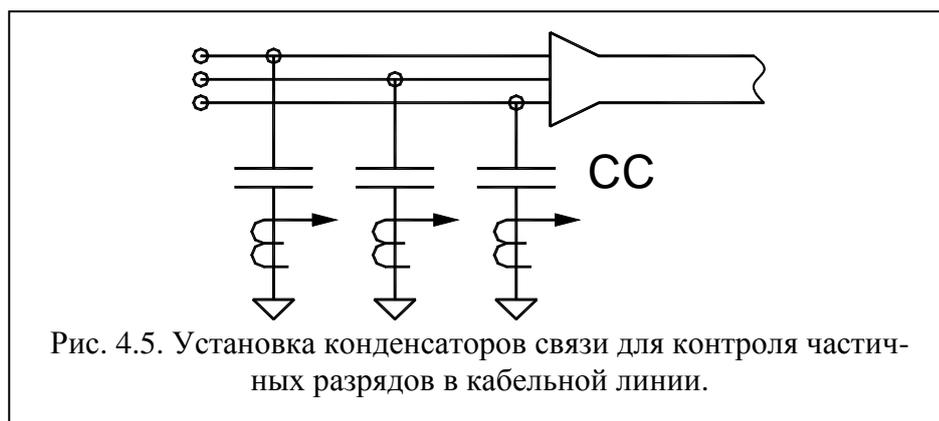
Таким образом, в такой измерительной схеме токи промышленной частоты и высокочастотные импульсы частичных разрядов протекают по разным цепям. В результате отсутствует эффект насыщения сердечника высокочастотного датчика частичных разрядов.

В случае наличия в контролируемом кабеле заземления экрана с двух сторон, на противоположном конце кабеля, на проводе заземления, необходимо, как это было показано выше, устанавливать дополнительный сопрессор HFS.

4.1.2. Использование конденсаторов связи для контроля частичных разрядов в кабельных линиях

Конденсаторы связи марки СС могут быть применены для контроля частичных разрядов в кабельных линиях. Пример использования конденсаторов показан на рисунке 4.5.

Несмотря на кажущуюся простоту, применение конденсаторов связи для контроля частичных



разрядов в кабельных линиях имеет несколько недостатков.

Наиболее существенным недостатком, препятствующим использованию в этих целях конденсаторов связи, является

несоответствие частотных свойств конденсатора и диапазона частот, который имеют реальные частичные разряды в кабельной линии. В момент возникновения частичный разряд в кабельной линии может иметь достаточно крутые фронты, что соответствует высокочастотным импульсам. Конденсатор связи хорошо применим к регистрации таких импульсов.

Однако, по мере перемещения импульса по кабельной линии, схему замещения которой можно представить в виде последовательного набора RC цепочек, параметры импульса быстро изменяются. Происходит «сглаживание» его амплитуды, и практически пропорциональное затягивание фронтов, что эквивалентно снижению частоты импульса. Чем дальше от точки установки конденсатора возник импульс, тем более ослабленным он придет к датчику. Это означает, что чувствительность измерительной схемы, при использовании конденсаторов связи, в значительной степени зависит от места возникновения дефекта в изоляции.

Не вдаваясь в физические особенности работы датчиков частичных разрядов, можно, с достаточной точностью, провести очень важное сравнение, можно оценить, какой длины кабельную линию можно контролировать при помощи датчиков типа RFCT и СС. Рассмотрим условный кабель такой длины, в котором импульс частичного разряда, возникший на противоположной от датчика стороне, затухнет в 10 раз, т. е. на 20 dB.

За базу для сравнения возьмем измерительную схему с использованием датчиков марки RFCT, включаемых в цепь заземления экрана. Будем считать, что при первичной калибровке схемы, при подключении генератора на стороне установки датчиков, выходной сигнал с датчика в 10 раз превышал уровень шума, который будет потом зарегистрирован на работающем кабеле. Говоря иными словами, мы рассматриваем ситуацию, когда зона чувствительности прибора будет равна длине кабеля. Если к прибору с датчиком RFCT подключить кабель большей длины, то мы не сможем контролировать дополнительный участок кабеля, из-за превышения уровня помех над уровнем информативного сигнала.

При использовании конденсаторов связи марки СС, включаемых рядом с разделкой с одной стороны контролируемой кабельной линии, измеряемое соотношение «сигнал – шум» будет другим, более неблагоприятным. Чем дальше от точки установки конденсаторов будет находиться дефектная зона, тем сильнее будет влияние помех. Для частичного разряда, возникшего на противоположном конце кабельной линии, сигнал на выходе конденсатора связи будет примерно в 100 раз меньше, чем в случае его возникновения рядом с датчиком. Это объясняется, с одной стороны, затуханием сигнала в кабельной линии в 10 раз, и практически таким же увеличением сопротивления конденсатора связи, возникающим за счет уменьшения частоты пришедшего импульса.

Общим выводом из этого будет то, что при помощи датчиков марки RFCT можно контролировать кабельные линии, длина которых будет примерно в три раза больше, чем при использовании конденсаторов связи типа СС.

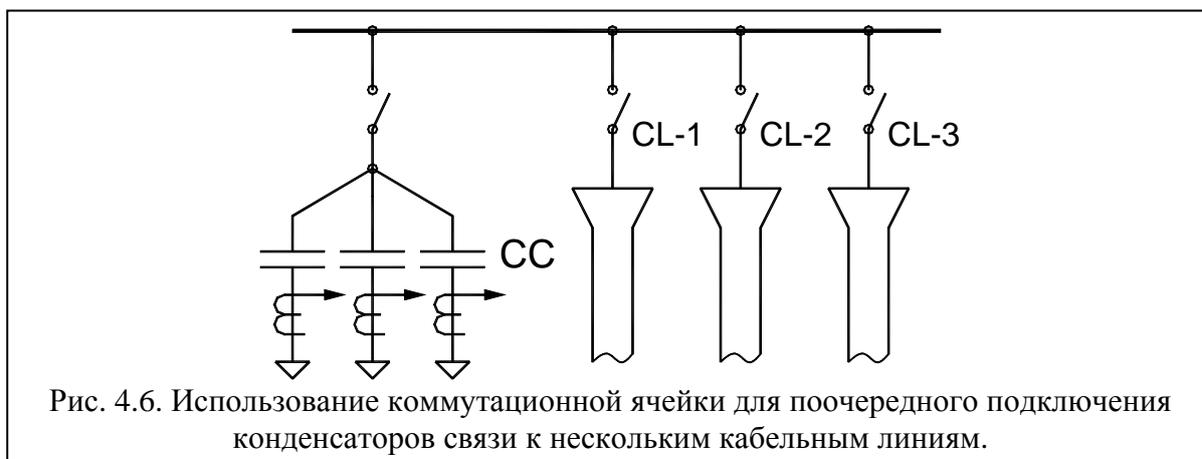


Рис. 4.6. Использование коммутационной ячейки для поочередного подключения конденсаторов связи к нескольким кабельным линиям.

Вторым недостатком применения конденсаторов связи для контроля кабельных линий является то, что практически всегда для монтажа конденсатора связи кабельную линию, в которой предполагается контролировать частичные разряды, необходимо отключать от напряжения. Причиной является то, что эти работы проводятся на высоковольт-

ных токоведущих линиях, и должны производиться заранее, с соблюдением необходимых мер безопасности. Существует вариант, показанный на рисунке 4.6., когда конденсаторы связи можно подключать к контролируемому кабелю при помощи свободной ячейки КРУ, однако этот вариант, чаще всего, является только теоретически возможным.

Подводя итог в этом вопросе можно сказать следующее. Конденсаторы связи можно применять при измерении частичных разрядов в кабельных линиях, однако сфера применения таких измерительных схем невелика. В основном, конденсаторы связи используются в системах стационарного контроля изоляции нескольких кабельных линий, подключенных к общим шинам, чаще всего это применяется при контроле изоляции КРУ. Длина контролируемых кабельных линий в этом случае обычно не очень велика.

4.1.3. Использование дополнительных датчиков для контроля частичных разрядов в кабельных линиях

В качестве датчиков, предназначенных для контроля частичных разрядов в изоляции кабельных линий, можно использовать специализированные кольцевые емкостные и индуктивные датчики, охватывающие токоведущую жилу (кабель), различной конструкции. Достаточно широкое применение для этих целей находят и акустические датчики частичных разрядов контактного типа.

4.1.3.1. Кольцевые емкостные и индуктивные датчики.

Кольцевые датчики емкостного и индуктивного типа применяются на практике достаточно редко, только в особых условиях, в системах стационарного мониторинга. Практически всегда такие датчики имеют уникальную конструкцию, различную для кабельных линий различных марок. Рассмотрим конструктивные особенности этих датчиков, и возможности применения их для контроля изоляции кабельных линий.

Емкостные кольцевые датчики представляют собой проводящие обкладки, смонтированные вокруг одной проводящей жилы кабеля, или даже вокруг всего трехфазного кабеля. Площадь пластины выбирается по условиям обеспечения необходимой емкости относительно жил контролируемого кабеля. Она должна быть не менее 60 – 100 пикофарад. По принципу своего действия они эквивалентны обычным конденсаторам связи, но в силу конструктивных особенностей, существенно дешевле их.

Кольцевые емкостные датчики выполняются в виде проводящих пластин, например из фольги, которые закладываются поверх главной изоляции концевой разделки кабельной линии. Поверх таких проводящих пластин наносится дополнительная защитная изоляция. Вывод от пластины кольцевого емкостного датчика выводится наружу проводником.

Емкостные датчики частичных разрядов могут монтироваться внутри соединительных муфт. Конструктивно они могут представлять собой просто полосу фольги, соединительный провод от которой выводится наружу, или даже просто проводник, выполняющий роль антенны. Датчики такой конструкции, в максимальной степени, контролируют изоляцию этих муфт.

Такой тип емкостного датчика частичных разрядов, когда измерительная обкладка, может попасть под воздействие высокого напряжения, по своей конструкции, напоминает вывод ПИН высоковольтного ввода трансформатора, при его использовании необходимо применять все защитные мероприятия, используемые в датчиках типа DB-1,2. Максимальная степень защищенности измерительных цепей прибора обеспечивается при использовании газонаполненных разрядников, включенных между измерительной пластиной и экраном кабельной линии, которые будут шунтировать импульсные коммутационные токи. Хорошим вариантом защиты измерительных цепей является использование дублированных полупроводниковых сопрессоров, имеющих малую проходную емкость.

Использовать для целей защиты цепей измерения частичных разрядов (от коммутационных импульсов и перенапряжений), обычные керамические варисторы нельзя. Это

объясняется тем, что из-за своей большой проходной емкости, порядка десятков нанофарад, через них на землю будут замыкать все высокочастотные импульсы частичных разрядов. В результате итоговая чувствительность таких измерений будет очень низкой.

При соблюдении всех выше перечисленных условий использование кольцевых емкостных датчиков вполне в системах стационарного контроля частичных разрядов в кабельных линиях.

Кольцевые индуктивные датчики.

Кольцевые индуктивные датчики представляют собой высокочастотные трансформаторы тока, обычно располагаемые вокруг кабельной линии в месте выхода токоведущих жил из кабельной разделки. Это, практически, наиболее доступное для этих целей место кабельной линии. В качестве материала сердечника кольцевого индуктивного датчика используется феррит, хорошо передающий высокочастотные импульсы, и слабо реагирующий на токи промышленной частоты.

По своему виду кольцевые индуктивные датчики похожи на стандартные датчики марки RFCT. Отличие состоит в том, что датчики изготавливаются «по месту», максимально ориентированы на конкретную кабельную линию. Достаточно часто корпус датчиков выполняется из металла и надежно заземляется. Это делается для того, чтобы исключить попадание высокого потенциала в измерительные цепи.

4.1.3.2. Акустические датчики частичных разрядов

Этот тип датчиков широко применяется при акустическом обследовании нагруженных конструкций и резервуаров, работающих под давлением. Частотный диапазон акустических датчиков обычно составляет от 50 до 300 кГц, что обусловлено использованием в датчике специализированных пьезоэлементов. В линейке продукции нашей фирмы имеется прибор марки AR700, позволяющий проводить акустические измерения частичных разрядов в различном высоковольтном оборудовании.

Акустические методы регистрации частичных разрядов в кабельных линиях могут быть использованы, но сфера их применения имеет существенные ограничения. Основным из них является необходимость установки акустического датчика вблизи той зоны кабельной линии, в которой предполагается контролировать наличие высокочастотных колебаний, т. к. этот датчик предполагает обязательное наличие акустического контакта с контролируемой зоной. Отсюда сразу следует основное ограничение применения таких датчиков – с их помощью можно контролировать только «доступные зоны», например, концевые разделки кабельных линий, и соединительные муфты при «открытой» прокладке кабельной линии. Если же кабельная линия имеет значительную длину, и, тем более, проложена под землей или в недоступных для оперативного контроля кабельных галереях, то применение акустических датчиков не обеспечивает надежного контроля состояния всей кабельной линии.

Вторым недостатком использования акустических датчиков является сильное затухание акустических импульсов, возникших в изоляции кабельной линии, которая представляет собой целый набор изоляционных слоев и защитного экрана. В результате сильного затухания сигналов в этом «слоеном пироге», на поверхности кабельной линии акустическая активность многократно меньше. Чем выше рабочее напряжение кабельной линии, тем больше толщина изолирующих и защитных слоев кабеля, тем в большей степени снижается чувствительность проводимых измерений.

Третий недостаток, в случае использования акустических датчиков для контроля частичных разрядов в кабельных линиях, заключается в том, что персонал, проводящий измерения акустическими датчиками, должен находиться в непосредственной близости от объекта контроля – концевой разделки или кабельной муфты. Чаще всего датчик приходится просто «надежно» прижимать к контролируемой муфте при помощи изолирующего стержня или маленькой штанги, находясь в кабельном колодце, или рядом с большим количеством кабельных линий.

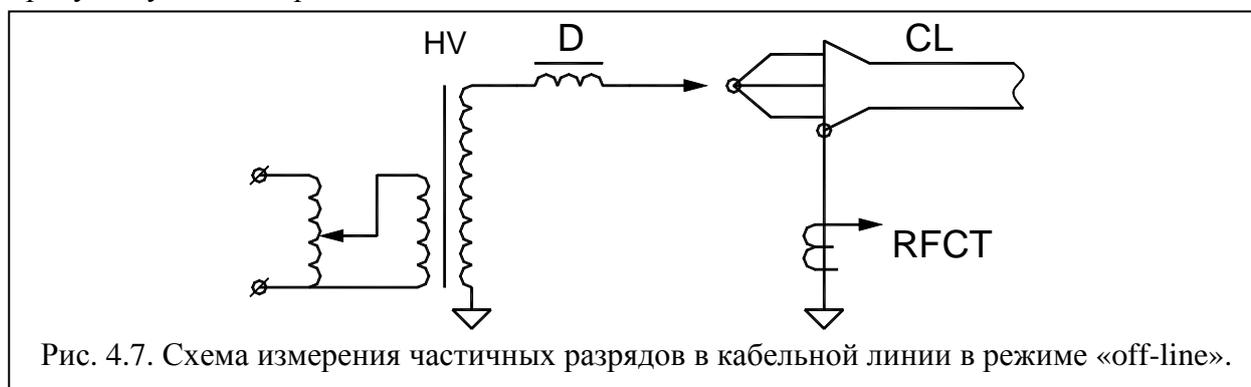
По статистике известно, что кабельные разделки и муфты в наибольшей мере подвержены необратимым изменениям в состоянии изоляции, часто сопровождаемые локальными разрушениями. Во время этих разрушений всегда наблюдается разлет осколков элементов кабеля и конструкций на значительные расстояния. Это представляет значительную опасность для диагностического персонала. Поэтому проведение таких измерений требует неукоснительного соблюдения всех необходимых мер безопасности, исключающих травмы персонала во время проведения измерений.

4.2. Схемы измерения частичных разрядов в кабельных линиях в режиме «off-line»

4.2.1. Наиболее стандартная, и часто применяемая на практике, схема измерения частичных разрядов в кабельной линии, выведенной из работы, показана на рисунке 4.7. Эта схема позволяет получать приемлемые по точности результаты практически для любых кабельных линий.

Поскольку контролируемый кабель выведен из работы, на него, чтобы выявить в нем наличие частичных разрядов, необходимо подавать испытательное напряжение. Для этих целей используется дополнительный высоковольтный источник высокого напряжения, или же испытуемый кабель на время подключается непосредственно к питающей сети. Величина приложенного напряжения обычно принимается равной номинальному значению рабочего напряжения.

Первый вариант, с подачей напряжения от дополнительного высоковольтного источника, является более предпочтительным, так как в этом случае измерительная схема меньше подвержена влиянию различных высокочастотных помех, практически постоянно присутствующих в промышленной сети.



В измерительной схеме основным датчиком регистрации частичных разрядов, является датчик типа RFCT-1(5), временно монтируемый в цепи заземления экрана кабельной линии, или же датчик типа SCM-1(2), стационарно установленный в этой же цепи заземления экрана контролируемой кабельной линии. Все эти датчики серийно производятся фирмой «Вибро-Центр». Датчики марки RFCT-1(5) входят в состав стандартной поставки прибора «R2100», а датчики марки SCM-1,2 поставляются по отдельному соглашению.

Если частичные разряды в контролируемой линии будут обнаружены при номинальном напряжении, то следующие измерения производят постепенно уменьшая напряжение до значения, когда частичные разряды перестанут возникать. Обычно, такие дополнительные измерения позволяют более точно локализовать тип, и место возникшего в изоляции дефекта.

Если измерения частичных разрядов в кабельной линии, в режиме «off-line», производятся с использованием номинального напряжения промышленной сети, то, для повышения достоверности проводимых измерений, в измерительной схеме желательно использовать дополнительные датчики частичных разрядов. Назначение этих датчиков вполне

понятно, с их помощью будет снижаться влияние на получаемые результаты высокочастотных помех, возникающих от других потребителей энергии.

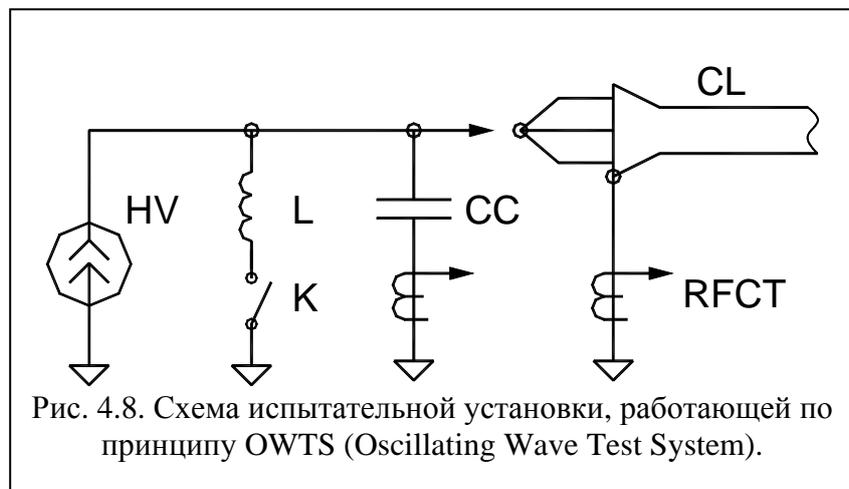
4.2.2. Метод OWTS для локализации места возникновения дефекта в изоляции кабельной линии. Этот метод находит в последнее время все более широкое применение для диагностики изоляции кабельных линий.

Сущность метода OWTS (Oscillating Wave Test System) заключается в использовании двух особенностей измерения частичных разрядов в кабельных линиях:

- Во-первых, это использование маломощного источника постоянного напряжения для зарядки емкости кабельной линии, с последующей разрядкой на землю через индуктивность большого значения. Возникающие при этом резонансные колебания имитируют переменное напряжение, частота которого определяется соотношением емкости кабельной линии и индуктивности дополнительной катушки.

- Во-вторых, это использование локации места возникновения частичного разряда в изоляции кабельной линии. В качестве метода локации используется анализ рефлектограмм, характеризующих движение электрических импульсов от частичных разрядов по контролируемой кабельной линии. Принцип этого метода иллюстрируется в данном руководстве на рисунке 1.9.

Поэтому несколько подробнее опишем суть этого метода. Первоначально метод OWTS разрабатывался применительно к диагностике кабельных линий, однако в последнее время сфера его применения все больше расширяется. Поскольку этот метод диагностики изоляции кабельных линий по частичным разрядам работает в режиме «off-line», во многом может быть, при определенных условиях, реализован с использованием прибора «R2100», с использованием его встроенного рефлектометра, рассмотрим особенности его применения.



Классическая схема установки OWTS приведена на рисунке 4.8. На этой схеме основными элементами являются высоковольтный источник HV, катушка индуктивности L, высоковольтный контактор K, и испытываемая кабельная линия CL.

Испытания могут проводиться сразу для изоляции всех трех фаз, как это показано на рисунке, или поочередно, для каждой фазы отдельно.

Работает представленная на рисунке установка OWTS следующим образом. Кабельная линия, ее емкость, заряжается от высоковольтного источника постоянным током небольшой величины, порядка нескольких миллиампер. Величина зарядного тока ограничена, зарядка кабельной линии CL продолжается до тех пор, пока напряжение на контролируемой кабельной линии достигнет величины амплитуды номинального рабочего напряжения, или иного значения, что определяется целью данного опыта.

После окончания зарядки емкости кабельной линии, и выдержки ее в этом режиме в течение некоторого интервала времени, производится замыкание высоковольтного контактора K. При этом накопленный заряд кабельной линии разряжается на землю через индуктивность L, величина которой очень велика, в большинстве используемых в практике приборов она обычно равняется 0,7 генри.

После замыкания контактора измерительная схема включения кабельной линии изменяется. Емкость кабельной линии CL , и добавочная индуктивность L , оказываются включенными параллельно, образуя классический параллельный колебательный контур. Частота колебаний определяется соотношением параметров емкости линии и индуктивности катушки, обычно она составляет до 1000 герц. В колебательном контуре возникают колебания, скорость затухания которых определяется потерями энергии в индуктивности и в изоляции кабельной линии.



Характер изменения напряжения на контролируемой кабельной линии показан на рисунке 4.9. На этом рисунке видно, что частичные разряды, возникающие в изоляции кабельной линии, по мере уменьшения напряжения, уменьшаются и исчезают полностью. Но эти данные являются не всей получаемой диагностической информацией.

Очень важной диагностической информацией является выявление места возникновения разрядов. Импульс, возникший в месте дефекта изоляции, движется по кабельной линии в разные стороны. Один импульс движется к тому концу кабеля, к которому подключен датчик и испытательная установка. Второй импульс движется в противоположном направлении, отражается от конца кабельной линии, и возвращается обратно. Разность времени прихода импульсов определяется временем движения импульса к противоположному концу кабеля, плюс время движения отраженного импульса до места дефекта.

Достоинством использования установки типа OWTS является сравнительно небольшие габариты и практическая эффективность. К недостаткам следует отнести высокую стоимость такой диагностической системы, достигающую нескольких миллионов рублей. Это делает систему OWTS недоступной для большинства российских пользователей.

Аналогичные испытания можно провести при помощи прибора «R2100» по испытательной схеме, показанной на рисунке 4.7. Для определения напряжения «зажигания» частичных разрядов необходимо провести измерения при нескольких уровнях напряжения, приложенного к контролируемой кабельной линии. Для локации места возникновения дефектов в кабельной линии нужно воспользоваться рефлектометром, который имеется в приборе «R2100». В этом случае можно получить даже более точные результаты, т. к. рефлектометр, в приборе, работает в итерационном режиме, последовательно уточняя место возникновения дефекта.

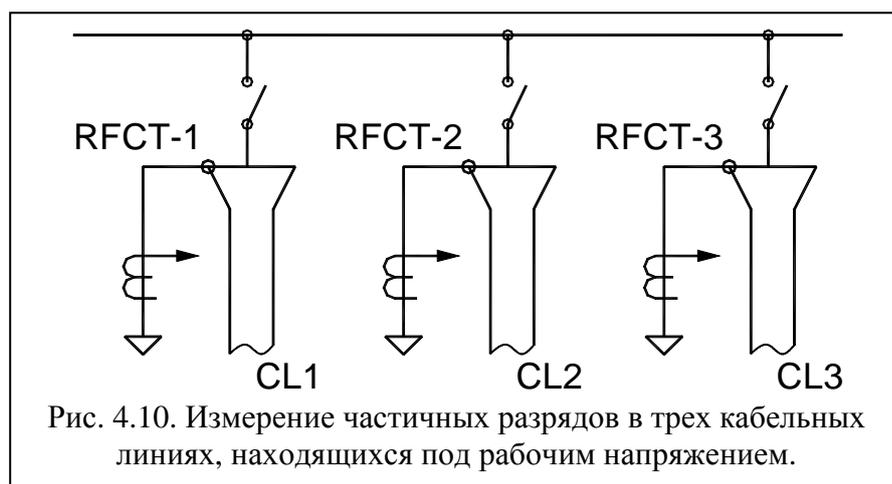
4.3. Схемы измерения частичных разрядов в кабельных линиях в процессе работы под нагрузкой.

Схемы измерения частичных разрядов в кабельных линиях, находящихся в рабочем режиме, мало отличаются от схем измерения в кабельных линиях, выведенных из работы. Контролируемый кабель находится под номинальным рабочим напряжением, а изменение величины нагрузки кабельной линии связана с уровнем регистрируемых частичных разрядов, в основном, только за счет влияния на это изменения температуры кабельной линии. Также необходимо принимать все необходимые меры безопасности, как и при проведении

измерений в режиме «off-line», даже большие, т. к. рядом располагается оборудование, также находящееся под высоким напряжением.

Вторым, более важным недостатком проведения измерений параметров кабельных линий под рабочим напряжением, является наличие более высокого уровня высокочастотных помех, практически всегда присутствующих в наших промышленных высоковольтных сетях. Это очень сильно может повлиять на достоверность получаемых диагностических заключений.

Для повышения помехоустойчивости в измерительную схему, показанную на рисунке 4.7., необходимо модифицировать. В результате получается схема измерений, показанная на рисунке 4.10.



Эта схема предназначена для проведения измерений частичных разрядов в трех кабельных линиях, подключенных к одной системе высоковольтных шин.

Совместное измерение частичных разрядов в нескольких кабельных линиях имеет важное значение

с точки зрения использования систем отстройки от внешних высокочастотных помех. В этой схеме, поочередно, каждый кабель является и контролируемым элементом, и источником опорного сигнала, позволяющего эффективно отстраиваться от внешних помех.

Схема отстройки от помех работает следующим образом. Например, мы производим измерения частичных разрядов в кабельной линии «CL2», используя датчик RFCT-2. Сигнал от этого датчика мы подключаем к сигнальному каналу «Signal Channel» прибора «R2100». Сигналы от датчиков RFCT-1 и RFCT-3 мы подключаем к референсному каналу «Reference Channel» прибора. При помощи установок режима регистрации включается в работу разборка сигналов по времени «time off arrival». Проводится регистрация сигналов, причем учитываются только те сигналы частичных разрядов, которые пришли из контролируемого кабеля. На практике это означает, что регистрируются только те сигналы, которые сначала «пришли» с выхода датчика RFCT-2, а только потом появились на выходах датчиков RFCT-1 и RFCT-3.

На следующих этапах контроля состояния изоляции производится переключение сигналов с датчиков. На вход канала «Signal Channel» подается сигнал с другого кабеля, например с датчика RFCT-1, и измерения частичных разрядов повторяются. При этом сигнал с датчика RFCT-2, как и сигнал с датчика RFCT-3, будет являться опорным. Для справки можно напомнить, что все эти переключения сигналов с датчиков, установленных на различных кабельных линиях, производятся внутри прибора при помощи платы коммутации, по программе, задаваемой пользователем при настройке прибора перед измерениями. Коммутировать кабели «вручную», при помощи переключения на входных разъемах прибора, не нужно.

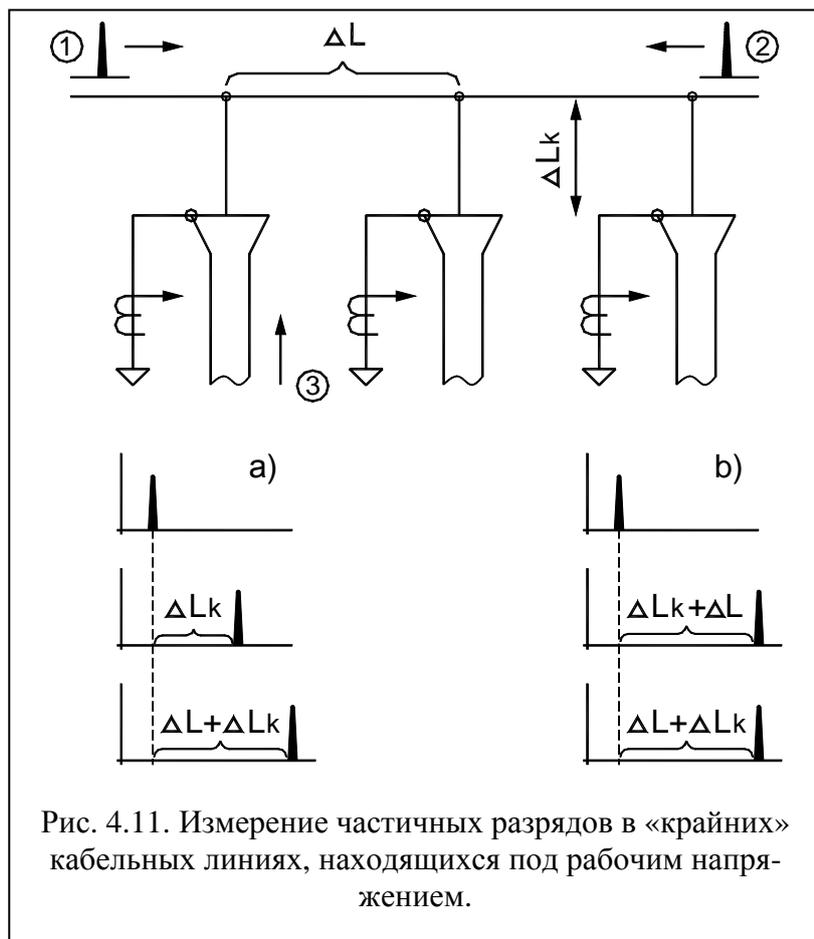
Таким образом, подключив 12 датчиков, можно поочередно контролировать состояние до 12 кабельных линий, по числу измерительных каналов прибора. Основным методическим правилом, при проведении таких измерений частичных разрядов, является использование, в качестве опорного сигнала, сигналов с кабельных линий, установленных на данной шинной сборке «слева» и «справа» от контролируемого кабеля. В этом случае бу-

дут достаточно точно выявлены и отбракованы импульсы частичных разрядов, пришедшие на контролируемую кабельную линию, по шине.

Определенную сложность будет представлять регистрация частичных разрядов в кабельных линиях, подключенных «на краях» шинной сборки. Для таких кабельных линий будет представлять сложность отстройка от импульсов, пришедших на шину «снаружи», где уже нет датчиков опорных сигналов, т. к. нет подключенных кабельных линий. На рисунке 4.10. такая сложность возникнет при измерении частичных разрядов в кабельных линиях CL1 и CL3. Высокочастотные импульсы помех, пришедшие на шину «слева», например, при регистрации частичных разрядов в кабельной линии CL1, будут «сосчитаны» прибором как импульсы частичных разрядов в кабеле.

Возможно несколько вариантов решения этой проблемы.

Вариант 1. Если кабельные линии CL1 и CL2 подключены к шине на некотором расстоянии друг от друга, большем, чем 1 метр, то можно воспользоваться специальной конфигурацией схемы измерения, принцип действия которой может быть пояснен при помощи рисунка 4.11. На рисунке показан участок шинной сборки с указанием линейных параметров, важных для проведения регистрации частичных разрядов. Этими параметрами является расстояние между точками подключения кабельных линий ΔL и длина «разделки» кабельных линий ΔLk , которую будем считать одинаковой у всех кабелей.



Как уже было сказано выше, наибольшей сложностью является отстройка от импульса «1», который пришел в нашу систему кабельных линий «слева», и является помехой. На рисунке 4.11., ниже схемы подключения датчиков к кабельным линиям, показаны графики временных сдвигов импульсов, зарегистрированных датчиками от этого импульса. Импульс помехи «1», в точке подключения кабельной линии CL1, верхний график слева, появится в выходных сигналах датчиков RFCT-1 и RFCT-1 (второй и третий графики), с задержкой. Это же временное соотношение будет соблюдаться на входе в измерительный прибор. Для датчика

RFCT-1 задержка будет вызвано прохождением импульса по разделке кабеля длиной ΔLk , а для датчика RFCT-2 задержка будет вызвана прохождением импульса по шине ΔL , плюс по разделке кабельной линии, также равной ΔLk .

Система разборки импульсов в приборе данный импульс регистрирует как импульс частичного разряда, возникшего в кабельной линии CL1. Предпосылками к этому будут: примерное равенство амплитуд импульсов, и то, что сигнал сначала появился на

выходе датчика RFCT-1, а на выходе датчика RFCT-2 он появился с временным отставанием. Время прихода сигнала помехи мы не контролируем, т. к. у нас «слева» от CL1 на шинной сборке датчиков нет.

Возможно, в условиях такой схемы подключения кабельных линии к шинной сборке, очень простое и интересное решение проблемы отстройки от помех. Оно заключается в том, что соединительный кабель от датчика RFCT-1 берется длиннее соединительного кабеля от датчика RFCT-2, на величину, равную ΔL . Для справки, выше мы говорили, что для правильной работы системы разборки импульсов типа «time of arrival» необходимо, чтобы все соединительные кабели от датчиков имели одинаковую длину. Конструктивно, не всегда обязательно «резать» штатные соединительные кабели, входящие в состав поставки прибора. В данном случае необходимо сделать дополнительный кабель нужной длины с двумя разъемами, позволяющий удлинить штатный соединительный кабель.

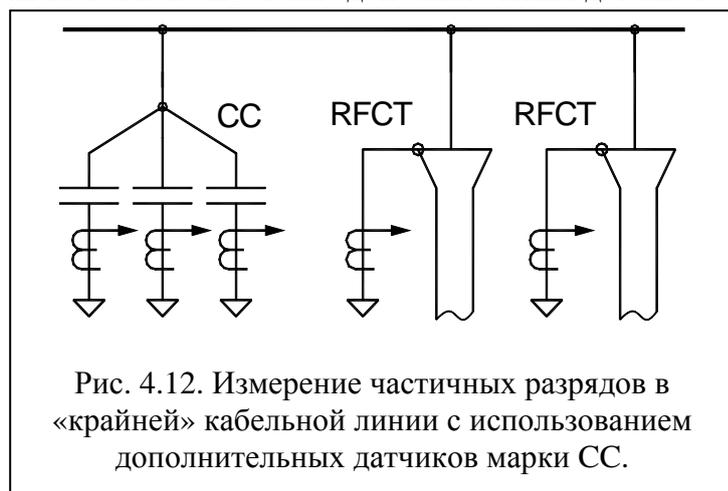
Что же произойдет при использовании удлиненного соединительного кабеля от датчика RFCT-1. На рисунке 4.11., также справа, под цифрой «2», показаны еще три временных графика, которые будут иметь место в этом случае. Из этих графиков видно, что хотя сигнал «1» появиться на выходе датчиков RFCT-1 и RFCT-2 не одновременно, но на входе в измерительный прибор «R2100» время прихода будет скомпенсировано различной длиной соединительных кабелей. В результате внутренние алгоритмы прибора посчитают этот импульс помехой и забракуют его. Именно этой цели мы и добивались.

При регистрации частичных разрядов в кабельной линии CL2 увеличенная длина соединительного кабеля от датчика RFCT-1 будет только способствовать увеличению точности работы системы отстройки от помех типа «time of arrival».

Для того, чтобы работа отстройка от помех, описанная выше, необходимо, чтобы расстояние ΔL , равное расстоянию между точками подключения кабельных линий к шине, было не меньше, чем $0,8 \div 1,0$ метр. Если это условие не соблюдается, то такая система отстройки от помех работать не будет.

Вариант 2. Расстояние между точками подключения двух кабельных линий к шинной сборке меньше, чем 0,8 метра.

В этом случае единственно возможным техническим решением, позволяющим избавиться от импульсов помех, пришедших на шину извне (для крайней кабельной линии), является использование дополнительных датчиков частичных разрядов.



На рисунке 4.12. приведена схема измерения частичных разрядов в кабельной линии, подключенной к краю шинной сборки.

В качестве дополнительного датчика здесь использованы три стандартных конденсатора связи марки СС. Для обеспечения отстройки от помех они должны монтироваться с нужного края шинной сборки, к которой они и подключаются. Расстояние от места подключения «крайней» кабельной

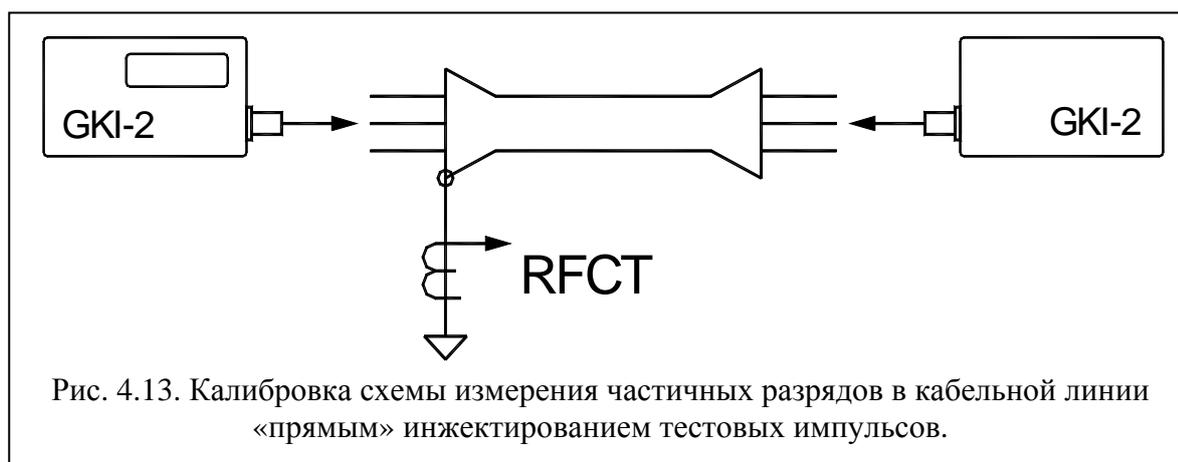
линии, до места подключения конденсаторов связи, для обеспечения работы разборки импульсов, должно быть не менее одного метра.

В приведенной измерительной схеме, сигналы от конденсаторов связи лучше всего использовать в разборке от помех типа «time of arrival», реализованной на аппаратном уровне в приборе «R2100». Сравнивая измерительную схему, приведенную на рисунке 4.12., с другими схемами, приведенными выше, можно сказать следующее. В этой схеме

при помощи дополнительных конденсаторов связи марки «СС» имитируется наличие еще одной кабельной линии, расположенной на «краю» шинной сборки. В соответствии с этим производится настройка конфигурации прибора, которая должна использовать информацию этих дополнительных сигналов. Все эти сигналы, вместе (от всех трех конденсаторов связи), должны подаваться на референсный канал.

4.4. Калибровка схем измерения частичных разрядов в кабельных линиях

Калибровка кабельных линий может производиться при помощи калибровочного генератора GKI-2 двумя способами. Наиболее простым способом является «прямое» инжектирование калибровочных импульсов в жилы контролируемого кабеля. Такая схема калибровки показана на рисунке 4.13.



Импульсы с калибровочного генератора марки GKI-2, или любого другого, подаются в одну, или сразу во все, фазы контролируемой кабельной линии. На основании анализа выходного напряжения датчика марки RFCT, измеренного в мВ, рассчитывается чувствительность измерительной схемы в пКл. Порядок расчета коэффициента чувствительности измерительной схемы приведен в главе 8 настоящего руководства.

На рисунке 4.13. показано, что калибровочный генератор может быть подключен с двух сторон контролируемой кабельной линии. Такая двойная калибровка чувствительности измерительной схемы имеет практический смысл. Во-первых, становится видно, что вне зависимости от места возникновения дефекта мы регистрируем частичные разряды при помощи датчика, установленного с одной стороны кабельной линии. Во-вторых, можно определить амплитудный коэффициент затухания импульсов в кабельной линии. Это позволит более правильно определить пороговые значения амплитуд частичных разрядов, соответствующих тревожному и аварийному уровням.

Вторым способом подачи калибровочного импульса в контролируемую кабельную линию является использование дополнительной «искусственной» емкости. В качестве емкости обычно используется фольга, которой сверху обматывается жила (жилы) контролируемого кабеля. Тестовые импульсы поступают от калибровочного генератора в кабель через емкость, образуемую фольгой и жилой кабельной линии. Чувствительность измерительной схемы рассчитывается так же, как и в предыдущем случае.

5. Измерение частичных разрядов в высоковольтных распределительных устройствах - КРУ

Контролировать состояние изоляции комплексных распределительных высоковольтных устройств (КРУ) практическим диагностам приходится достаточно часто. Особенно важным это становится в связи с все более широким распространением КРУ с изолированными шинами.

Контроль изоляции КРУ под рабочим напряжением заключается не только в контроле состояния изоляции шинопроводов. Одновременно проводится контроль состояния находящихся в КРУ высоковольтных выключателей, измерительных трансформаторов, и даже подключенных кабельных линий, и даже подключенных к ним высоковольтных электродвигателей и силовых трансформаторов. Все это оборудование электрически объединено в один комплекс, поэтому контролируется совместно.

5.1. Установка датчиков частичных разрядов в КРУ

В зависимости от поставленной диагностической задачи, в КРУ возможно использование датчиков частичных разрядов нескольких типов. Наиболее часто диагностические работы производятся в двух целях.

- Контроль состояния изоляции отдельной ячейки КРУ (высоковольтного выключателя) с присоединенной кабельной линией или трансформатором.
- Комплексный контроль состояния изоляции, или постоянный мониторинг, всего оборудования КРУ.

5.1.1. Контроль состояния изоляции ячейки КРУ

Способы измерения частичных разрядов, описанные выше применительно к контролю состояния изоляции кабельных линий, полностью подходят для контроля состояния изоляции высоковольтных ячеек КРУ. Причин этому две. Во-первых, практически всегда подключение оборудования к КРУ производится при помощи кабельных линий или перемычек. Во-вторых, других мест, пригодных для установки датчиков частичных разрядов, внутри высоковольтной ячейки практически нет.

Датчики частичных разрядов марки RFCT монтируются на заземляющих шинах и проводах, при помощи которых экраны кабельных линий подключаются к земле внутри ячеек КРУ. Для подключения датчиков необходимо отключение контролируемой ячейки от напряжения, что должно обязательно сопровождаться выкатыванием высоковольтного выключателя, и принятием всех необходимых мер безопасности.

Все особенности монтажа датчиков RFCT на кабельных линиях подробно рассмотрены в предыдущем разделе, здесь мы повторяться не будем.

5.1.2. Комплексный контроль состояния изоляции КРУ

Для целей комплексного контроля состояния изоляции КРУ практически единственными приемлемыми датчиками являются конденсаторы связи марки СС. Они устанавливаются рядом с шинопроводами, и подключаются к ним при помощи изолированных кабельных перемычек. Конденсаторы связи некоторых фирм, имеющих те же габаритные размеры, как и соответствующие опорные изоляторы, могут быть установлены вместо опорных изоляторов. При этом необходимо, чтобы в паспорте на конденсатор связи было указано, что он может использоваться для этих целей. Он должен выдерживать необходимые боковые и вертикальные нагрузки.

Датчики других типов конструктивно не могут быть смонтированы для контроля частичных разрядов в изоляции КРУ.

Поскольку для монтажа конденсаторов связи на шинах КРУ необходимо полное снятие напряжения, эта процедура является трудоемкой и не может быть выполнена оперативно. По этой причине контроль состояния изоляции КРУ обычно производится или в режиме непрерывного контроля, или периодически. Но во всех этих случаях датчики контроля частичных разрядов должны быть смонтированы стационарно.

В режиме постоянного мониторинга к датчикам подключается стационарный прибор контроля частичных разрядов. При проведении периодических измерений частичных разрядов соединительные кабели от датчиков выведены на промежуточные разъемы, устанавливаемые в безопасном месте, удобном для подключения переносного измерительного прибора, типа «R2100».

Необходимо также напомнить, что конденсатор связи является наиболее дорогим датчиком частичных разрядов. Стоимость шести конденсаторов связи равняется стоимости стационарного прибора контроля частичных разрядов. По этой причине контроль состояния изоляции КРУ стараются проводить в режиме постоянного мониторинга. Экономические затраты на проведение периодических измерений частичных разрядов при помощи переносных приборов, и на создание системы мониторинга, в конечном итоге, будут примерно одинаковыми.

5.2. Схемы измерения частичных разрядов в КРУ

На рисунке 5.1. показаны крайние фрагменты электрической схемы КРУ, на которых смонтированы конденсаторы связи марки СС.

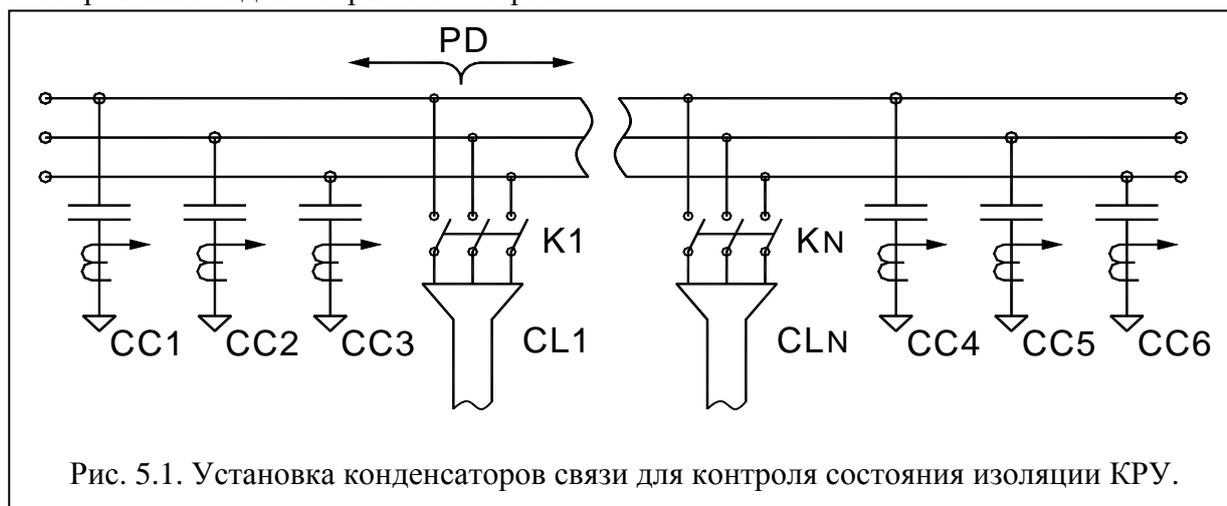


Рис. 5.1. Установка конденсаторов связи для контроля состояния изоляции КРУ.

На данной схеме измерительные конденсаторы связи установлены с двух сторон внутренней шины КРУ. Если рассматривать данный вопрос только с точки зрения определения наличия на контролируемых шинах частичных разрядов, то для этого было бы достаточно трех конденсаторов связи с одной стороны КРУ. Шесть конденсаторов связи в данной измерительной схеме установлено с целью реализации дополнительной функции — локализации места возникновения дефекта в изоляции.

Будем считать, что частичный разряд возник в КРУ в зоне подключения кабельной линии CL_1 . Под этим понимается, что разряд мог возникнуть в электродвигателе, подключенном кабелем CL_1 , мог возникнуть в самой кабельной линии, в соответствующем выключателе K_1 , или в точке подключения к общей шине КРУ. В любом из этих случаев импульс от частичного разряда, попав в общую шину, начнет двигаться в разные стороны, как это показано на рисунке 5.1. стрелками.

Если импульс от частичного разряда будет двигаться в КРУ по шине фазы «А», как это показано на рисунке, то он будет зарегистрирован в выходных сигналах конденсаторов связи CC_1 и CC_4 . Примем дополнительное условие, что длины соединительных кабе-

лей от всех конденсаторов связи до измерительного прибора одинаковы. В этом случае мы получим, что импульс от конденсатора связи CC_1 поступит в прибор раньше, чем от конденсатора CC_4 . Разница во времени прихода импульсов в прибор будет определяться различием в расстоянии от точки «появления» импульса от частичного разряда в шине, до мест установки конденсаторов связи. Если бы импульс от частичного разряда возник в центре шин КРУ, то он бы поступил в прибор от конденсаторов связи одновременно.

В количественном отношении можно ориентироваться на уже упоминаемую скорость движения импульсов по кабельным линиям, равную $6 \div 7$ наносекунд на метр. Более точно эту скорость можно определить во время калибровки измерительной схемы, подавая тестовые импульсы с одной стороны шины КРУ. В этом случае скорость движения волны будет определяться отношением длины шины, между точками установки конденсаторов связи, к зарегистрированной прибором разнице времени прихода импульсов от конденсаторов связи.

На практике место возникновения частичных разрядов можно при помощи многоканального цифрового осциллографа. Для этих целей можно использовать и прибор «R2100», включив функцию рефлектометра. На полученной рефлектограмме можно определить, какова разница во времени прихода импульсов. Зная этот параметр, можно рассчитать место возникновения частичных разрядов в шине КРУ.

Очевидно, что, определив место возникновения частичных разрядов в шине КРУ, мы только локализуем группу высоковольтных объектов, подключенных к шине в этой точке. Дефект изоляции может быть как в шинном ответвлении, так и в высоковольтном выключателе, кабельной линии, и в подключенном к линии оборудовании. Практические работы по выявлению места возникновения диагностируемого дефекта в изоляции оборудования только начнутся.

5.3. Калибровка схем измерения частичных разрядов в КРУ

Калибровка шинопровода КРУ производится подачей тестовых импульсов с двух сторон. Отличий от калибровки кабельных линий нет, поэтому дополнительных схем приводить не будем.

6. Измерение частичных разрядов в силовых трансформаторах

Практическая оценка состояния изоляции маслонаполненных трансформаторов по уровню и распределению частичных разрядов является одной из наиболее сложных задач, которая может быть решена при использовании прибора марки «R2100».

Основной проблемой, возникающей при проведении измерений частичных разрядов в изоляции высоковольтных трансформаторов, является сложность отстройки от помех. Причин этому несколько:

Во-первых, мощные силовые трансформаторы, по своему назначению, являются ответственными узлами энергосистем, непосредственно вокруг которых устанавливается достаточно много другого, вспомогательного и измерительного высоковольтного оборудования, в котором также могут возникать частичные разряды. Все эти высокочастотные импульсы, в той или иной мере, по соединительным линиям или путем электромагнитного излучения, наводятся в контролируемом трансформаторе.

Во-вторых, практически к каждому трансформатору подключены одна или несколько воздушных линий электропередачи, собирающие с большой территории грозовые, и иные высокочастотные импульсы. Эти импульсы часто имеют большую амплитуду, регистрируются измерительными приборами, и существенно затрудняют анализ «внутренних» частичных разрядов, возникающих в изоляции самого трансформатора.

В-третьих, чаще всего, высоковольтные трансформаторы располагаются на открытых подстанциях, поэтому их работу всегда сопровождает большое количество коронных разрядов, интенсивность которых зависит от многих параметров – температуры и влажности воздуха, состояния поверхностей изоляторов и т. д. Чем выше рабочее напряжение трансформатора, тем больше проблем от коронных Разрядов возникает при проведении измерений.

В-четвертых, работа трансформаторов часто сопровождается существенными изменениями нагрузочных и тепловых режимов. В трансформаторах присутствуют устройства, изменяющие их параметры в процессе работы, например РПН. В результате частичные разряды в изоляции могут иметь нестационарный характер, появляться и исчезать, причем параметры самой изоляции трансформатора могут быть при этом стационарными.

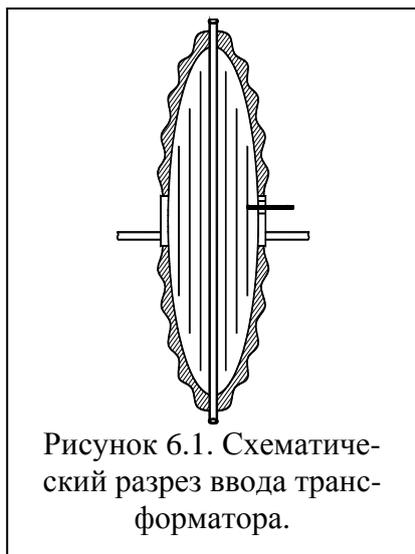
Все это приводит к тому, что большое количество практических измерений частичных разрядов в трансформаторах, выполненное разными специалистами, не являются корректными. Чаще всего, из-за низкой избирательной способности применяемой аппаратуры, реже из-за недостаточной квалификации экспертного персонала. В результате за «зарегистрированные в трансформаторе частичные разряды», выдаются импульсы помех, от которых просто не удалось отстроиться. Естественно, что регистрация, а тем более и выполненный анализ таких измерений, не имеют практической пользы, если не сказать даже о получаемом вреде.

Все вышеперечисленное написано для специалистов, проводящих измерения частичных разрядов в трансформаторном оборудовании в качестве напоминания. Только правильно собранные измерительные схемы, позволяющие, в максимальной степени, отстроиться от помех, могут быть рекомендованы для проведения измерений. Если в результате измерений удастся зарегистрировать частичные разряды, то в этом случае, желательно, провести дополнительные измерения и исследования, включая в новый анализ техническое состояние рядом расположенного высоковольтного оборудования. Только после подтверждения первичных измерений можно будет уверенно говорить о наличии в трансформаторе частичных разрядов.

6.1. Подключение датчиков частичных разрядов к вводам трансформаторов

6.1.1. При исследовании частичных разрядов в трансформаторах, как и в любом другом высоковольтном оборудовании, в первую очередь необходимо правильно выбрать места для установки первичных датчиков. Для этой цели наиболее информативными элементами трансформатора являются высоковольтные вводы, как маслонаполненные, так и с твердой изоляцией.

Конструктивно, ввод представляет собой проводящий стержень, или трубу, по которой протекает ток, заключенный в изолирующий корпус из керамики или другого диэлектрика.



Внутри ввода находится изолирующее масло, или он заполнен твердой изоляцией. Наибольшую опасность для ввода представляет разность потенциалов между стержнем и корпусом трансформатора. Для снижения напряженности поля внутри ввода, его распределяют, «выравнивают» по высоте ввода, от верхней точки, до металлического узла крепления на баке трансформатора. С этой целью вокруг проводящего стержня, располагаются изолированные друг от друга слои фольги, имеющие различную ширину. В результате весь потенциал внутри ввода равномерно распределяется, и максимальная удельная напряженность электрического поля внутри ввода уменьшается.

Последняя, внешняя обкладка фольги, при помощи специального стержня с пружиной, выводится на внешнюю поверхность ввода, где принудительно замыкается на корпус ввода (бака трансформатора).

Количество взаимно изолированных обкладок во вводе зависит от величины рабочего напряжения, может быть до нескольких десятков. Суммарная емкость ввода, измеренная между проводящим стержнем и последней обкладкой, выведенной на ПИН (PIN), составляет около 500 пикофард. Величина этой емкости является важным параметром каждого ввода, обозначается как «С1», величина ее периодически контролируется во время испытаний.

Ввод трансформатора, через который протекают все токи трансформатора, включая импульсы частичных разрядов, для высокочастотных импульсов является достаточно малым сопротивлением, через которое они замыкаются на корпус трансформатора. В результате через это сопротивление можно легко регистрировать частичные разряды в трансформаторе. Для этого необходимо датчик частичных разрядов включить в электрическую цепь ПИН, обязательно сохранив, в целях безопасности, короткое замыкание последней обкладки ввода на корпус.

Подключение датчиков частичных разрядов к ПИН вводов трансформатора производится только на отключенном оборудовании. Различных конструкций ПИН, способа его заземления и типа крепления защитного колпачка у разных фирм – изготовителей вводов существует достаточно много, не менее 10 модификаций. При всем внешнем конструктивном многообразии назначение у всех одно – обеспечить надежное замыкание на землю и защиту от воздействия окружающей среды. Наиболее важное для нас отличие заключается в том, как производится замыкание ПИН на землю – при помощи заземляющего провода, или контактным путем.

Если заземление ПИН ввода выполнено стационарным проводом, то это самый простой вариант для установки датчика частичных разрядов марки RFCT-1, входящий в состав поставки прибора «R2100». С вывода ПИН демонтируется защитный колпачок. Заземляющий провод отключается от самого ПИН, на провод надевается датчик RFCT-1, и

цепь заземления вывода ПИН восстанавливается. Схематически установку датчика на ПИН иллюстрирует рисунок 6.2.

Поскольку, для измерения частичных разрядов, предполагается, как минимум, подача на трансформатор рабочего напряжения, а защитную крышку на ПИН установить, из-за датчика, невозможно, необходимо принять все меры по защите ПИН от влияния атмосферных воздействий. При обеспечении надежного заземления ПИН проблем при таком способе установки датчиков частичных разрядов не возникает.



Для временного монтажа датчиков частичных разрядов на ПИН, более сложным является случай, когда заземление вывода ПИН осуществляется пружинным контактом, установленным на защитном колпачке. При монтаже колпачка пружинным контактом он присоединяется к ПИН, а монтажными болтами соединяется с корпусом ввода (бака трансформатора). Снятие колпачка автоматически отсоединяет ПИН от корпуса трансформатора.

В этом случае необходимо применить специальный заземляющий провод, сечением не менее 3 – 6 мм². Одним концом провод надежно присоединяется к корпусу трансформатора (ввода), а другим фиксируется на ПИН. Учитывая все многообразие конструкций ПИН, устройство фиксации провода, в каждом конкретном случае, может иметь различную конструкцию, которая

всегда должна обеспечивать надежное подключение заземляющего провода к ПИН. На провод созданного заземления надевается датчик марки RFCT-1, открытый ПИН временно, на время проведения измерений, защищается от атмосферных воздействий.

Недостатком использования датчиков марки RFCT для контроля частичных разрядов является отсутствие в их выходном сигнале опорного напряжения, позволяющего синхронизировать фазовое распределение импульсов ЧР относительно питающего напряжения. Естественно, что синхронизирующий сигнал можно получить и другими способами (от питающего напряжения, от других датчиков), но это не всегда удобно.



Оптимальным вариантом для временной установки на ПИН датчиков контроля частичных разрядов, имеющих в выходном сигнале импульсы ЧР и опорное напряжение, являются датчики марки DBT-1. Эти датчики имеют внутреннюю электрическую схему, аналогичную стационарным датчикам марки DB, но могут быть легко (временно!) установлены на ПИН практически любой конструкции. Достаточно устанавливать один датчик DBT-1, два других могут быть марки RFCT-1.

При «временном» монтаже датчиков марки DBT-1 на ПИН вводов необходимо очень внимательно отнестись к проведению работ. Необходимо помнить, что при «обрыве» одного провода от ПИН к датчику возможны аварийные ситуации. Или ПИН может оказаться без защиты, и тогда возможен пробой изоляции ввода. Или возможно поступление высокого напряжения, до 20 кВ, на измери-

тельный прибор! Поэтому особо тщательно должны быть подключены провода к ПИН и дополнительное заземление датчика.

6.1.2. Наиболее эффективным и безопасным способом установки датчиков и регистрации частичных разрядов во вводах силовых трансформаторов (следовательно, и в самих трансформаторах), является использование датчиков стационарной конструкции. Фирма «Вибро-Центр» серийно выпускает более 10 модификаций датчиков марки ДВ-1,2, монтируемых на ПИН вводов. Описание этих датчиков приведено в разделе 7.10.

Эти датчики, по принципу своего действия, являются комплексными, позволяющими измерять как токи проводимости вводов, так и частичные разряды во вводе и в самом трансформаторе. Датчики стационарной конструкции предварительно, во время планового вывода трансформатора из работы, монтируются на вводах, выводы датчиков находятся в защитном шкафу, устанавливаемом рядом с трансформатором. Это дает возможность проводить измерения в любой момент времени, не связывая это с необходимостью отключения трансформатора. Прибор «R2100» подключается к разъемам на коммутационной плате, расположенной в шкафу, и проводятся измерения.

Датчики такого типа не входят в состав поставки прибора «R2100». Проблема заключается не только в увеличении цены, но и в неопределенности необходимого типа датчиков. Для сборки схемы измерения частичных разрядов в трансформаторе необходимо, как минимум, наличие трех, а чаще всего и шести стационарных датчиков марки ДВ-1,2. Если принять, что в «зоне ответственности» одного диагноста могут быть трансформаторы с вводами, имеющими 5 модификаций ПИН, то ему уже необходимо иметь с собой комплект из 30 датчиков. Наличие 5 модификаций трансформаторных вводов на одном предприятии вполне реально, т. к. даже на одном трансформаторе могут быть вводы двух модификаций ПИН. В этом случае, по своей суммарной цене, стоимость 30 датчиков будет соизмерима со стоимостью всего прибора, а по габаритам этот комплект может потребовать для транспортировки автомобиль.

Стационарные датчики марки ДВ-1,2 необходимо устанавливать на наиболее ответственном оборудовании, нуждающемся в периодическом контроле состояния изоляции. Эти датчики могут так же монтироваться на оборудовании, вывод которого из эксплуатации, для установки и снятия датчиков, затруднен по условиям его эксплуатации. С учетом того, что все стационарные датчики ДВ-1,2 производства фирмы «Вибро-Центр» являются комплексными, позволяющими контролировать потери в изоляции ввода, эти датчики монтируются достаточно часто.

6.1.3. При использовании для контроля частичных разрядов в трансформаторах датчиков марки RFCT-1 встает проблема «поиска» референсного, опорного сигнала. Этот сигнал нужен для того, чтобы синхронизировать момент регистрации частичных разрядов с периодом синусоиды питающей сети. В зависимости от того, как связаны между собой момент возникновения частичного разряда с мгновенным значением сетевого напряжения, возможно диагностирование того, или иного типа дефекта в изоляции трансформатора.

Если посмотреть на наиболее широко используемую измерительную схему, показанную на рисунке 6.6., то видно, что все датчики на ней марки RFCT, которые не являются комплексными, они содержат в своем выходном сигнале только импульсы частичных разрядов. Сигнал для синхронизации измерений приходится «брать» с других, специализированных датчиков.

Возможно использование трех способов получения референсного сигнала для синхронизации измерений частичных разрядов.

Во-первых, на ПИН ввода можно устанавливать датчики марки ДВТ-1. Такого датчика достаточно одного, который нужно устанавливать на ПИН ввода фазы «А», откуда, чаще всего, берется опорный сигнал.

Во-вторых, можно использовать внутренний канал синхронизации прибора «R2100». для этого прибор должен быть подключен к питающей сети при помощи сетевого кабеля, а в настройках прибора необходимо выбрать синхронизацию «от питания». При этом процесс измерения будет связан с частотой питающей сети. После включения синхронизации от питания необходимо определить фазовый сдвиг напряжения питания прибора относительно фаз контролируемого трансформатора, и занести эти значения в память прибора. Определение этого сдвига фаз оперативно, и лучше всего, сделать при помощи осциллографа.

В-третьих, можно использовать специализированный коаксиальный разъем для референсного сигнала «Ref», имеющийся в приборе «R2100». К этому входу можно подключить внешнее синусоидальное напряжение. Величина внешнего напряжения может быть от 1 до 220 вольт. Напряжение 220 вольт нужно подключать очень внимательно. «Фазу» внешнего напряжения нужно подключать к средней точке разъема, а «землю» - к корпусу разъема, этого требуют условия безопасности персонала. После такого подключения необходимо определить фазовый сдвиг референсного сигнала относительно фаз питающего напряжения, и занести эти значения в память прибора.

При использовании датчиков марки DB-1,2 проблемы «поиска» референсного сигнала для синхронизации измерений нет, т. к. выходной сигнал такого датчика является комплексным. Он содержит в себе ток проводимости ввода, имеющий промышленную частоту, опережающий по фазе напряжение на вводе на 90 электрических градусов. Этот сдвиг фазы обусловлен тем, что ток проводимости является, практически идеально, емкостным. При использовании таких датчиков в качестве референсного сигнала в приборе «R2100», обычно, используется сигнал с фазы «А».

Поэтому дополнительным вариантом синхронизации измерений является использование, в комплекте с датчиками RFCT, хотя бы одного датчика марки DB-1,2.

Для повышения надежности регистрации частичных разрядов в изоляции трансформаторов, лучшей отстройки от помех, практически всегда, в дополнение к датчикам, смонтированным на ПИН вводов, приходится использовать дополнительные датчики. Эти датчики не всегда могут не являться информативными для контроля уровня частичных разрядов, но выходной сигнал с них может быть использован в качестве опорного, референсного, для систем разборки. Без использования таких датчиков, на наш взгляд, практически невозможно правильно оценить уровень частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов.

С учетом особенностей конструкции и эксплуатации высоковольтных трансформаторов, количество мест для безопасной и эффективной установки датчиков частичных разрядов ограничено. Реально можно говорить только об установке, рядом с вводами, датчиков короны, датчиков частичных разрядов в цепи нейтрали, и в цепи заземления трансформатора.

Все выше сказанное относится к установке датчиков частичных разрядов, регистрирующих электрическую составляющую импульсов. Существует второй тип датчиков частичных разрядов - акустические датчики. Они стационарно или временно монтируются на поверхности бака трансформатора и регистрируют акустическую волну от импульсов ЧР, проникающие от зоны дефекта через масло. Такие датчики используются в приборе нашего производства AR700. Применение акустических датчиков имеет некоторые преимущества перед «электрическими» датчиками, но и имеет существенные недостатки. В данном руководстве мы не будем их рассматривать и сравнивать, сказав только, что в некоторых случаях (но не всегда!), эти датчики, по своим функциям, могут дополнять друг друга.

6.1.4. Установка датчиков марки RFCT-4 в нейтрали силовых трансформаторов

Установка датчиков частичных разрядов RFCT-4 в нейтрали, и в заземлении, возможна для силовых трехфазных трансформаторов, выполненных на одном сердечнике. Для групповых трансформаторов такие датчики можно установить только в цепях заземления фаз трансформатора.

Датчик марки RFCT-4 специально разрабатывался для такой цели. Он имеет разъемную конструкцию и внутреннее отверстие большого диаметра. Благодаря такому конструктивному исполнению он может быть легко смонтирован на нейтрали трансформатора (трубе, шине, проводе). Большое внутреннее отверстие позволяет монтировать его даже на трубах и шинопроводах большого сечения.

Существует определенная особенность монтажа датчика RFCT-4 на проводах и жилах, по которым протекает ток промышленной частоты, имеющий значение от десятков ампер и больше. В этом случае в зазоре датчика необходимо устанавливать изолирующую прокладку из любого, не проводящего материала. Это может быть пластмасса, сухое дере-

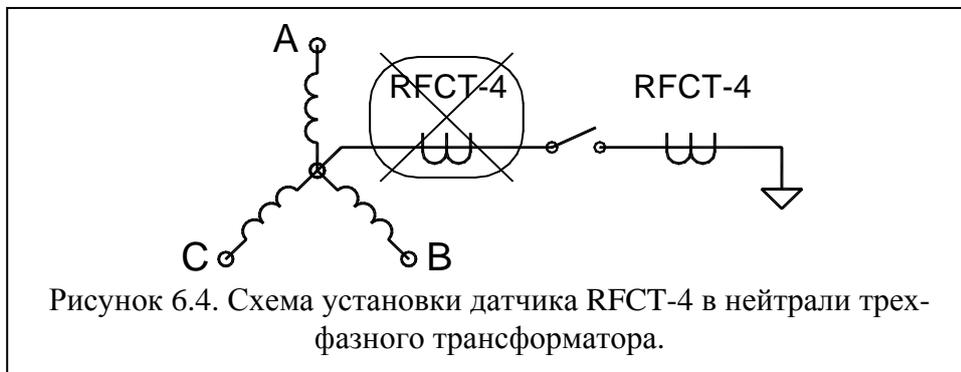


Рисунок 6.4. Схема установки датчика RFCT-4 в нейтрали трехфазного трансформатора.

во и т. д.

Оптимальная толщина прокладки должна составлять 3 – 5 мм. В самом простом случае это могут быть две – три шайбы, подложенные между

половинками датчика под соединяющие болты. Назначение изолирующей прокладки – разомкнуть магнитопровод, чтобы не было его насыщения токами промышленной частоты. Если это происходит, то уменьшается магнитная проницаемость сердечника, уменьшается коэффициент передачи сигнала частичных разрядов через датчик.

В реальных условиях эксплуатации трехфазных трансформаторов возможны два режима работы, с изолированной нейтралью, или с заземленной. На рисунке 6.4. приведена схема включения обмоток и нейтрали трансформатора 110 кВ. На рисунке показано, что датчик частичных разрядов марки RFCT-4 может быть установлен в двух точках, до заземляющего рубильника, и после него, причем чаще всего, его удобнее монтировать до рубильника, слева.

По условиям эксплуатации установка датчика частичных разрядов слева от рубильника категорически запрещена. Это объясняется тем, что при разомкнутом рубильнике, в цепи нейтрали трансформатора, возможно появление кратковременных, импульсных напряжений большой величины. Они могут достигать фазного значения, и даже быть больше. В основном это бывает при включении трансформатора, и при различных коммутационных процессах внутри энергосистемы.

Следует всегда помнить, что внутренняя изоляция датчика RFCT-4, как и всех остальных датчиков из этой серии, рассчитана на безопасную работу в цепях с рабочим напряжением до 1000 В. Наилучшим вариантом является установка этого датчика на заземленных элементах Контролируемого объекта. При возникновении больших перенапряжений происходит пробой внутренней изоляции, выход датчика из строя, повреждение измерительного прибора, и даже возможно поражение обслуживающего персонала!

Датчик частичных разрядов марки RFCT-4 может устанавливаться в цепи нейтрали трехфазного трансформатора только на заземленной части цепи, после рубильника, как это показано на схеме рисунка 6.3. Все другие варианты неприемлемы по условиям со-

блюдения правил безопасности, действующих при проведении измерительных работ на высоковольтном оборудовании.

Использование датчика частичных разрядов RFCT-4 в нейтрали трехфазного трансформатора позволяет лучше отстраиваться от помех, приходящих в контролируемый трансформатор по питающей сети. При этом, в приборе «R2100», необходимо использовать разборку импульсов по степени затухания амплитуды и по полярности, которые наиболее эффективны в таких схемах.

6.1.5. Установка датчиков короны

Отстройка от помех коронных разрядов, проводимая при помощи датчика корны KS-60, применяется в силовых трансформаторах с рабочим напряжением от 330 кВ и выше, где влияние этих помех очень велико. На сегодня это самый эффективный способ, но и самый трудоемкий.

Датчики короны марки KS-60 монтируются рядом с каждым высоковольтным вводом трансформатора. Габариты датчика KS-60 достаточно значительны: длина 500 мм, диаметр трубы 120 мм. Смонтировать такой датчик по временной схеме достаточно сложно, поэтому при разовых измерениях его используют достаточно редко. Основное применение датчика KS-60 – в стационарных системах контроля изоляции трансформаторов.

Принцип работы и использования датчика короны можно пояснить достаточно просто. Датчик представляет собой катушку без сердечника, охватывающую часть окружности изолятора ввода. При протекании высокочастотного импульса по сердечнику ввода, вокруг ввода образуется волна электромагнитного поля. Это поле характеризуется кольцевыми силовыми линиями, направление вращения которых определяется по правилу «буравчика». Если импульс протекает «внутри» трансформатора (например, это импульс от коронного разряда), направление круговых силовых линий будет по часовой стрелке, если смотреть на трансформатор сверху. Если импульс будет выходить из трансформатора, т. е. он возник внутри, то направление вращения силовых линий будет против часовой стрелки.

При изменении направления вращения силовых линий поля, вокруг ввода, будет изменяться направление вектора ЭДС, который будет наводиться в катушке датчика KS-60. Если сопоставлять знак выходного сигнала от датчика DB-1,2, смонтированного на ПИН высоковольтного ввода, со знаком выходного сигнала от датчика KS-60, смонтированного рядом с этим же вводом, то можно очень точно определять направление движения импульса по вводу, «в трансформатор», или «из трансформатора». Это объясняется тем, что полярность сигнала с датчика DB-1 не зависит от направления движения импульса, а полярность сигнала с KS-60 зависит. Вне зависимости от того, какую полярность имеет импульс частичного разряда, положительную или отрицательную, диагностическим фактором является совпадение, или несовпадение полярностей сигналов с двух датчиков.

Данная функция разборки, по совпадению полярностей, реализуется в приборе «R2100» при помощи референсного канала. На измерительный канал прибора подается сигнал от датчика DB-1,2, а на референсный канал подается сигнал от датчика короны. Сравнение полярностей одного и того же сигнала, зарегистрированного двумя различными датчиками, позволяет выделять сигналы частичных разрядов от сигналов коронного разряда.

Датчик короны марки KS-60 не входит в состав поставки прибора «R2100», поставляется заказчику только на основании дополнительных соглашений, применяется чаще всего в стационарных системах контроля изоляции трансформаторов.

6.1.6. Использование конденсаторов связи для измерений частичных разрядов в силовых трансформаторах

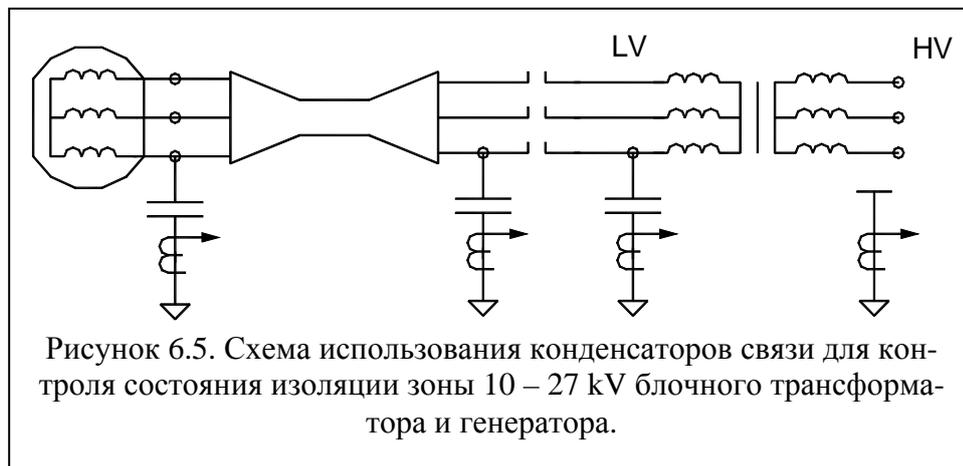
Как уже говорилось выше, основным, наиболее информативным местом, для установки датчиков измерения частичных разрядов в трансформаторах являются три вывода ПИН высоковольтных вводов на стороне ВН. Промышленностью выпускается много марок высоковольтных вводов, на вывод ПИН устанавливается только на вводах с рабочим напряжением от 110 кВ и выше.

На вводах с меньшим рабочим напряжением, вывод от последней обкладки фольги (внутри ввода) обычно отсутствует, на них ПИН даже конструктивно не предусмотрен. Поэтому устанавливать датчик частичных разрядов, использующий емкость ввода «С1», на таких трансформаторах (на обмотке такого напряжения), конструктивно невозможно.

Мощные силовые трансформаторы, у которых одно из напряжений составляет от 6 до 27 кВ, встречаются в практике очень часто. Наиболее важными для проведения диагностических работ являются силовые трансформаторы, к которым подключаются турбо, или гидрогенераторы. Такие трансформаторы обычно называемые блочными трансформаторами.

Проведение диагностических работ с целью оценки состояния изоляции по уровню частичных разрядов на «низкой» стороне трансформатора (конструктивно она может быть и первичной, и вторичной) просто обязательно. Это объясняется тем, что под таким рабочим напряжением, кроме первичной обмотки блочного трансформатора, находится выключатель, соединительный кабель или шинопровод, а также обмотка статора самого генератора. Поэтому это не только вопрос оценки состояния только трансформатора, а одновременный анализ состояния всего оборудования энергетического блока, находящегося под этим напряжением.

В качестве датчика частичных разрядов, предназначенного для контроля частичных разрядов на стороне низкого напряжения блочного трансформатора, в этом случае лучше всего использовать обычный конденсатор связи марки СС, рассчитанный на необходимое рабочее напряжение.



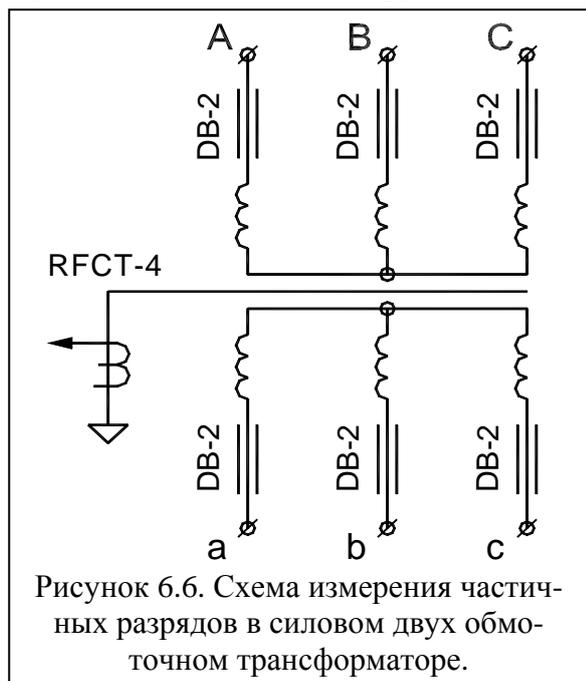
На рисунке 6.5. приведена схема установки на каждой фазе блока 3 конденсаторов связи, и одного датчика марки ДВ-1,2 на стороне высокого напряжения. Всего такая схема комплексного

измерения частичных разрядов в блоке электростанции предусматривает установку на трех фазах 9 конденсаторов связи и трех датчиков марки ДВ-1,2. Использование 12 датчиков, подключенных к прибору «R2100», позволяет надежно локализовать место возникновения и уровень частичных разрядов.

6.2. Схемы измерения частичных разрядов в трансформаторах

6.2.1. Наиболее распространенная схема измерения частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов, чаще всего применяемая на практике, приведена на рисунке 6.6. На ней показан обычный двух обмоточный трехфазный трансформатор, на котором установлено 7 датчиков частичных разрядов.

Поскольку такая измерительная схема обычно собирается по временной схеме, т. е. монтируется только на период проведения измерений частичных разрядов, на ПИН вводов напряжений ВН и НН монтируются датчики марки RFCT-1. Датчики марки DB-1,2 также могут быть смонтированы, но они дороже и имеют много конструктивных модификаций. Датчики RFCT-1 устанавливаются на заземляющем проводе, как это показано выше, на рисунке 6.2.



В цепи заземления корпуса трансформатора, на заземляющей шине, смонтирован датчик частичных разрядов марки RFCT-4. Поскольку в цепи заземления трансформатора обычно всегда протекает ток промышленной частоты, датчик RFCT-4 должен быть собран с немагнитным зазором в 3 – 5 мм, чтобы не было насыщения сердечника.

В зависимости от типа трансформатора датчик такого же типа может быть смонтирован (и / или) в нейтрали трансформатора, со стороны ВН. Итоговая информативность схемы измерения с двумя датчиками марки RFCT-4, в нейтрали стороны ВН и в заземлении, может быть в этом случае немного больше. На стороне НН в нейтрали датчик частичных разрядов установить удастся очень редко.

Для повышения информативности и отстройки от помех различного происхождения, в схеме измерения частичных разрядов в трансформаторе, приведенной на рисунке 6.5., необходимо использовать следующие варианты разборки импульсов (реализованные в приборе «R2100»):

При измерении частичных разрядов во всех фазах обмотки трансформатора большое значение имеет использование матриц перенаводки импульсов внутри трансформатора. При помощи этой матрицы удастся значительно увеличить точность определения места возникновения частичных разрядов в обмотке. Пример матрицы перенаводки приведен в данном руководстве на рисунке 1.8. Для каждого нового трансформатора матрица перенаводки снимается экспериментально в процессе калибровки измерительной схемы.

Полученные при калибровке измерительной схемы коэффициенты перенаводки используются при настройке порога срабатывания шумового канала. Это выполняется при конфигурировании прибора «R2100» перед измерениями.

6.2.2. Измерение частичных разрядов в силовых автотрансформаторах

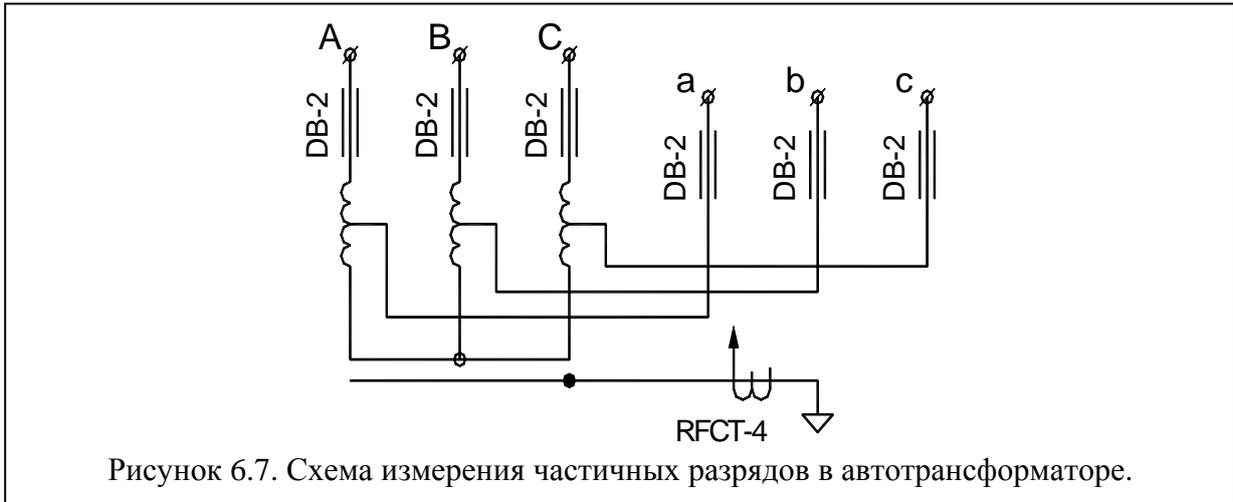


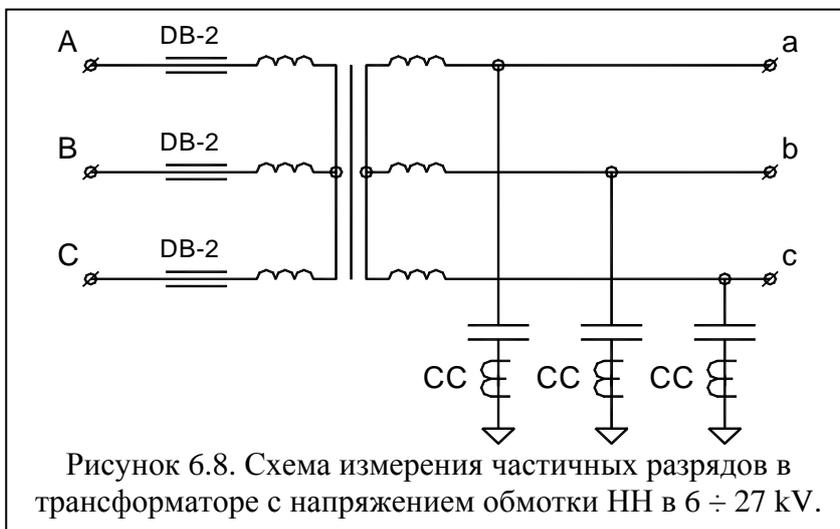
Схема измерения частичных разрядов в мощных силовых автотрансформаторах, составляющих основу большинства систем передачи энергии большой мощности, не имеет существенных отличий от измерительной схемы, приведенной на рисунке 6.7.

На рисунке 6.7. приведен наиболее распространенный вариант измерения частичных разрядов, и установки первичных датчиков, в силовом автотрансформаторе. На ПИН вводов ВН и НН стандартным образом установлены датчики марки RFCT-1, а в цепи нейтрали (или в цепи заземления бака трансформатора) включен датчик марки RFCT-4, в котором, с целью предотвращения насыщения сердечника токами промышленной частоты, сделан увеличенный немагнитный зазор между половинками датчика.

Различное позиционирование двух датчиков марки RFCT-1, установленных на одной фазной обмотке, например, на ПИН вводов фаз «А» и «а», позволяет более точно проводить выявление места возникновения дефекта в изоляции фазы. Для этого можно использовать дополнительные способы разборки импульсов, имеющиеся в приборе «R2100». В качестве примера можно сказать, что при помощи использования разборки импульсов типа «time of arrival», можно выявить, в какой части фазной обмотки возник дефект, в высоковольтной, или в низковольтной.

Поскольку автотрансформаторы в системах передачи энергии практически всегда имеют высокое рабочее напряжение, при таких измерениях всегда необходимо уделять особое внимание отстройке от импульсов коронных разрядов.

6.2.3. Схема измерения частичных разрядов в трансформаторах с напряжением обмотки НН, равным 6 – 27 кВ



Большой парк эксплуатируемых в настоящее время трансформаторов составляют силовые трансформаторы, напряжение обмотки НН которых составляет менее 30 киловольт. У вводов трансформатора, установленных на таком напряжении, конструктивно отсутствуют ПИН, поэтому устанавливать датчики марки RFCT-1 нет

возможности.

Особенных отличий в установке первичных датчиков здесь нет. Отличием является то, что на выводах обмотки низкого напряжения установлены конденсаторы связи марки СС, которые выпускаются нашей фирмой на рабочее напряжение до 27 кВ. Если вторичное напряжение трансформатора будет равняться 35 кВ, то необходимо искать конденсаторы связи на нужное напряжение у других производителей оборудования для контроля частичных разрядов.

Регистрация частичных разрядов в такой схеме измерения, как и используемые способы отстройки от помех, производится аналогично схеме, показанной на рисунке 6.8.

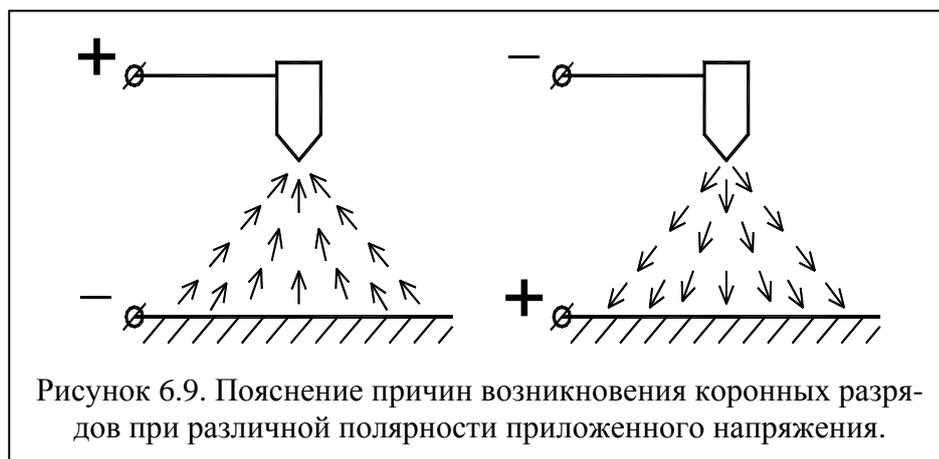
6.3. Схемы измерения частичных разрядов в трансформаторах с отстройкой от коронных разрядов

6.3.1. При измерении частичных разрядов в силовых трансформаторах очень важным, для отстройки от коронных разрядов, является понимание особенностей причины возникновения таких разрядов на поверхности изоляторов и в воздухе.

Коронный разряд в высоковольтном оборудовании обычно возникает на воздушном (изоляционном) промежутке типа «игла – плоскость» при приложении высокого напряжения. При различной полярности приложенного напряжения коронные разряды возникают по-разному. На рисунке 6.9. условно показан воздушный промежуток между иглой и заземленной плоскостью.

Игла, на нашем упрощенном рисунке имитирует выступ, на котором происходит концентрация силовых линий электромагнитного поля. Этот выступ может быть как на самой обмотке, так и на заземленной поверхности, например, внутри бака трансформатора. Смысл картины происходящих при этом физических явлений в изоляции трансформатора не меняется.

Рассмотрим левый рисунок. При приложении к игле высокого положительного потенциала, в момент положительной полуволны питающего напряжения, электроны, отрицательные заряды,



начнут двигаться от плоскости к игле, к электроду с положительным потенциалом. По мере приближения к игле отдельные электроны будут объединяться в потоки, потоки электронов будут укрупняться,

«стекаться как ручьи», создавать в воздухе каналы, которые начнут нагреваться, по которым будут происходить импульсные разряды с все более увеличивающейся энергией. По мере роста внешнего напряжения потоки электронов будут увеличиваться, а при снижении напряжения поток электронов будет уменьшаться.

Если в цепь питающего напряжения (к цепи иглы) будет включен прибор, регистрирующий импульсы частичных разрядов, то он покажет достаточно большую интенсивность частичных разрядов в положительной полярности, связанной с мгновенной амплитудой питающего напряжения.

При приложении к игле отрицательного внешнего потенциала (в момент воздействия отрицательной полуволны питающего напряжения), как это показано на втором рисунке, электроны начнут двигаться в обратном направлении. Это движение будет происходить от иглы к плоскости, отрицательных зарядов к электроду с положительным потенциалом. По мере удаления электронов от иглы будет происходить процесс «растекания», снижения напряженности движения. Каналы протекания зарядов будут распадаться, охлаждаться, интенсивность движения будет уменьшаться, заряды будут тормозиться. Электроны будут, образно говоря «уходить в песок», итоговая интенсивность коронных разрядов будет много меньше, чем в первом случае. Прибор «R2100» в режиме измерения, при такой полярности внешнего питающего напряжения, регистрирует гораздо меньшую интенсивность частичных разрядов.

В результате, мы будем иметь такую картину распределения частичных разрядов, когда при разных полярностях питающего напряжения интенсивность частичных разрядов будет значительно различаться. На диаграмме амплитудно – фазового распределения импульсов, которая всегда строится для «полной» синусоиды питающей сети, включающей обе полуволны, это будет хорошо видно. Это является важным признаком влияния коронных разрядов, которые необходимо убирать из рассмотрения возможных проблем в изоляции трансформатора.

Способ отстройки от коронных разрядов по фазе питающего напряжения достаточно прост и понятен, но не лишен существенных недостатков. Во-первых, и на отрицательной полуволне питающего напряжения присутствуют импульсы коронных разрядов, просто их интенсивность меньше. Во-вторых, в трехфазном трансформаторе происходит наложение коронных разрядов одной фазы на другую, в результате чего «классическая отстройка» от импульсов коронных разрядов существенно затрудняется.

6.3.2. Схема контроля частичных разрядов в трансформаторе с использованием датчиков короны

Схема измерения приведена на рисунке 6.10. Данная схема измерения предполагает стационарную установку всех первичных датчиков частичных разрядов, и прокладку соединительных кабельных

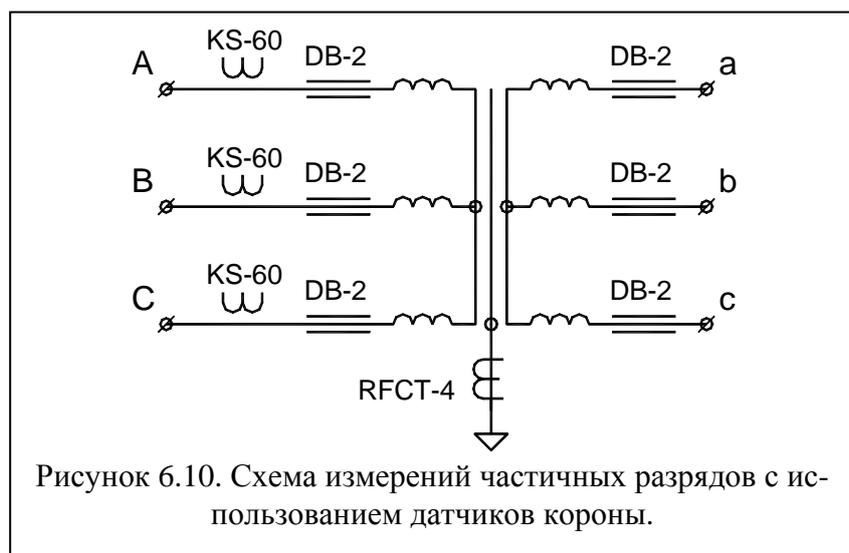


Рисунок 6.10. Схема измерений частичных разрядов с использованием датчиков короны.

линий от датчиков в защитном металлорукаве. При периодическом мониторинге, предполагающем периодическое измерение частичных разрядов, переносный прибор подключается к разъемам на коммутационной плате.

Для обеспечения непрерывного мониторинга состояния изоляции трансформатора к первичным датчикам

подключается стационарный прибор контроля частичных разрядов. На небольшой промежуток времени, например, на время пуска, в качестве прибора мониторинга может быть использован прибор марки «R2100».

Отличие схемы стационарного измерения частичных разрядов в трансформаторах, от разовых измерений, заключается в использовании специализированных комплексных датчиков марки DB-1,2, монтируемых на ПИН вводов. Эти датчики герметически защи-

щают ПИН от атмосферных воздействий, и могут эксплуатироваться на трансформаторах постоянно.

Как уже говорилось выше, при заказе системы мониторинга изоляции трансформатора по частичным разрядам, пользователь должен заранее сообщить параметры вводов, установленных на трансформаторе. Это позволит включить в поставку датчики такого конструктивного исполнения, которое необходимо для данной конструкции посадочного места на вводе.

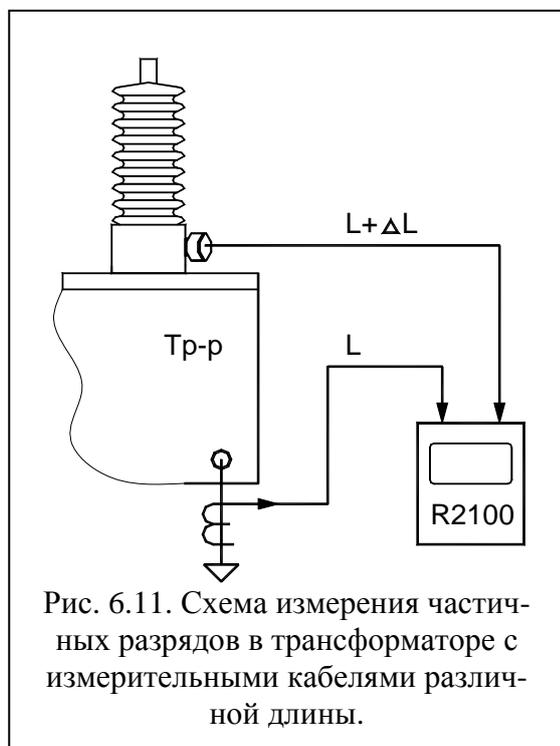
Отличий в конфигурации прибора, в использовании методов отстройки от помех, в данной схеме измерений, относительно предыдущей, нет.

6.3.3. Использование метода разборки импульсов «time of arrival» для отстройки от коронных разрядов

Известно, что коронный разряд создается в зоне верхней части ввода. Если установить один датчик частичных разрядов на ПИН ввода, и другой датчик частичных разрядов на нейтраль трансформатора, то можно реализовать алгоритм «разборки» импульсов на «внешние» и «внутренние». При проведении калибровки от внешнего генератора мы, например, определяем, что время пролета импульса через трансформатор, от ввода до нейтрали, составляет 20 наносекунд. Это время мы определяем осциллографом при помощи сравнения двух сигналов.

Очевидно, что для частичного разряда, возникшего внутри трансформатора, разновременность прихода импульсов к двум нашим датчикам всегда будет меньше 20 наносекунд. Причем, при равенстве длин измерительных кабелей от датчиков, реальный импульс может прийти вперед и к датчику в нейтрали, и к датчику на ПИН ввода. Это зависит от места его возникновения, к какому датчику он будет ближе.

Если же задержка времени прихода импульса к датчику в нейтрали, относительно датчика, установленного на ПИН ввода, составит 20 и более наносекунд, то это всегда будет «внешний импульс», пришедший в контролируемый трансформатор извне, «пролетевший» через трансформатор.



Реализация данного метода на практике иллюстрируется на рисунке 6.11. Измерительный кабель от датчика на ПИН ввода делается на три метра длиннее ($L + \Delta L$), чем кабель от датчика в нейтрали трансформатора (L). Далее в приборе делается установка начальных параметров регистрации частичных разрядов таким образом, чтобы истинными считались только те импульсы, которые первыми пришли к датчику в нейтрали трансформатора. Если импульс пришел сначала от датчика, установленного на ПИН ввода (или он пришел одновременно с ПИН и с нейтралю), то такие импульсы нашей измерительной схемой будут считаться шумовыми, пришедшими в трансформатор извне, в основном от коронных разрядов.

Достоинством измерительной схемы является ее простота. Данная схема не лишена некоторых очевидных недостатков. В основном это касается того, что верхняя часть высо-

ковольтного ввода трансформатора, в данной измерительной схеме, не защищена. Импульсы, возникшие в верхней части ввода, выше датчика, установленного на ПИН ввода, будут измерительной схемой браковаться.

Использование метода, называемого «time of arrival», основанного на контроле разновременности прихода импульсов в кабельных линиях и в КРУ, более подробно описано в соответствующих разделах данного пособия.

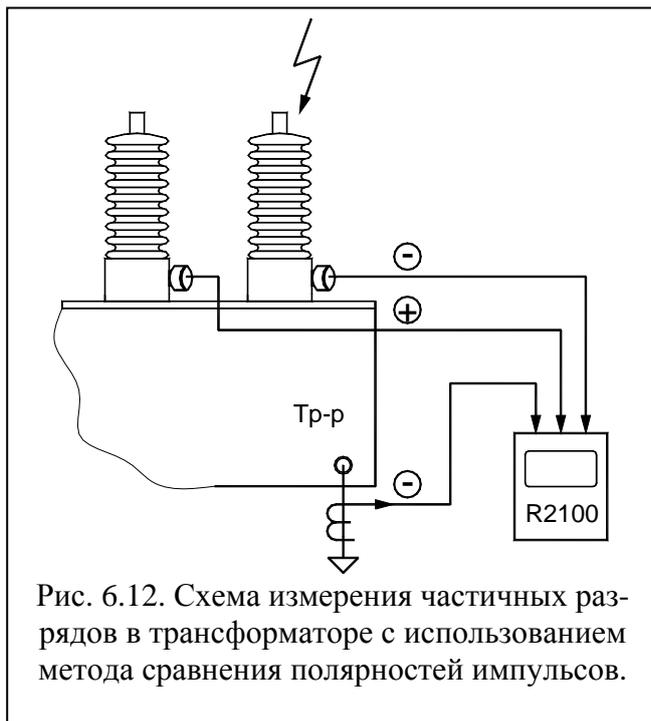
6.3.4. Использование метода разборки импульсов по полярности для отстройки от коронных разрядов

Один и тот импульс от частичного разряда в изоляции высоковольтного оборудования, имеющий одну полярность, может быть представлен, на выходе разных датчиков, установленных на одном и том же оборудовании, сигналами отрицательной и положительной полярности. Особенностью распределения частичных разрядов в силовом трансформаторе является то, что полярность сигнала может различаться даже на выходе даже датчиков одинаковой конструкции. Все определяется особенностями распространения сигналов внутри контролируемого оборудования.

Сравнение полярностей двух импульсов, как элемент системы диагностики, широко используется в практических измерениях. Этот метод применяется в диагностических измерениях в кабельных линиях, шинопроводах, КРУ. Практические схемы применения этого метода приведены в соответствующих разделах данного руководства.

В качестве примера рассмотрим применение метода «разборки» по полярности импульсов для отстройки измерительной схемы от импульсов коронных разрядов, имеющих большое значение при измерениях частичных разрядов в силовых трансформаторах. Как уже говорилось, это наиболее сложный случай измерения частичных разрядов в высоковольтном оборудовании.

На рисунке 6.12. показана стандартная схема установки датчиков частичных разрядов на трансформаторе, включающая три датчика типа DB-1, установленных на ПИН вводов, и одного датчика типа RFCT, установленного в цепи нейтрали (заземления) трансформатора. Такая схема, если максимально использовать ее потенциальные возможности, может обеспечить высокую достоверность получаемых результатов при использовании минимального количества первичных датчиков.



Физически достаточно хорошо обоснован тот факт, что максимальный уровень коронных разрядов имеет место в силовых трансформаторах при положительном значении напряжения питающей сети, при этом сами импульсы частичных разрядов имеют отрицательную полярность. Также хорошо известно, что максимальная интенсивность коронных разрядов имеет место при значении питающего напряжения, близком к амплитудному значению, т. е. при угле 90 градусов. При отрицательном значении питающего напряжения, интенсивность импульсов частичных разрядов бывает существенно ниже, и даже, как считают некоторые авторы, они отсутствуют полностью. Именно на это надеются многие исследователи, которые регистрируют импульсы частичных разрядов только во

время отрицательной полуволны питающего напряжения.

Реально же с отстройкой от коронных разрядов все обстоит гораздо хуже, особенно в трансформаторах, у которых все три фазы располагаются в общем баке. В момент приложения к контролируемой фазе (вводу) отрицательного напряжения, когда предполагается отсутствие коронных разрядов (что, кстати, справедливо не полностью, а только частично), будет происходить интенсивная перенаводка импульсов коронных разрядов с двух других фаз, на которых, в данный момент времени, приложенное напряжение питающей сети будет положительным.

Одним из возможных способов отстройки от коронных разрядов является использование «разборки» импульсов, зарегистрированных с разных датчиков, по полярности. Рассмотрим это на примере стандартной измерительной схемы, показанной на рисунке 6.10.

Представим, что коронный разряд возник на вводе фазы «А» (на рисунке она условно показана справа), в которой мы производим регистрацию частичных разрядов. В соответствии с классической теорией на выходе датчика DB-1 ввода фазы «А» импульсный сигнал будет иметь отрицательную полярность. Это связано с компенсацией изменения распределения потенциалов внутри трансформатора, обусловленное частичным разрядом. Энергия на компенсацию коронного разряда будет «выходить» из трансформатора, импульс будет двигаться вверх по трубе ввода.

На выходе датчика DB фазы «В» выходной сигнал будет иметь положительную полярность. Это обусловлено тем, что импульс коронного разряда, возникший на вводе фазы «А», перенаведется на ввод фазы «В» по воздуху. В результате импульс будет «идти вниз» по трубе ввода «В». Амплитуда сигнала с фазы «В» будет существенно меньше, так как сам сигнал перенаводится по большому воздушному промежутку, но его полярность обязательно будет противоположной, относительно сигнала с фазы «А». Реальная физическая картина данного явления является очень сложной, но так как мы занимаемся только внешним проявлением данного эффекта, то удовлетворимся данным упрощенным толкованием разницы в полярностях сигналов.

Определившись с некоторыми физическими основами возникновения разных полярностей импульсов на выходе датчиков, устанавливаемых на ПИН вводов разных фаз трансформатора, мы можем достаточно просто, используя прибор «R2100» реализовать достаточно эффективную схему отстройки от импульсов коронных разрядов. Необходимо реализовать алгоритм, который предполагает, что импульс короны в месте возникновения не совпадает по полярности с импульсами на других двух фазах трансформатора.

6.3.5. Отстройка от коронных разрядов по частотным свойствам импульсов при помощи TF и TFA диаграмм (см. пункт 2.2.2.3. настоящего руководства)

Большую помощь при отстройке от импульсов коронных разрядов может принести анализ частотных свойств импульсов. Предпосылками к этому служат следующие начальные установки:

- Трансформатор, в отличие от кабельных линий, является достаточно компактным объектом. По этой причине импульсы частичных разрядов, возникающие в нем, будут иметь достаточно высокую частоту, и крутой передний фронт.

- Импульсы коронных разрядов в трансформаторах имеют меньшую частоту, передний фронт этих импульсов обычно больше, и составляет не менее 50 нс. Из возможных дефектов изоляции трансформатора такие параметры имеют только импульсы, возникающие при ползучих разрядах по изоляции. Такие дефекты встречаются достаточно редко, и по частотным свойствам отличаются от импульсов короны.

- Основными датчиками, используемыми при регистрации частичных разрядов в трансформаторах, являются датчики, монтируемые на ПИН вводов. По своей физической сути ввод является обычным конденсатором связи, наиболее эффективно регистрирующим высокочастотные импульсы.

Все зарегистрированные импульсы «раскладываются» на ТФ плоскости. Далее нужно просто выбирать группы импульсов, имеющих одинаковые частотные свойства. Выбранные группы импульсов «возвращаются» на фазовую – амплитудную плоскость, на которой и производится анализ дефектов, выявленных в изоляции контролируемого трансформатора.

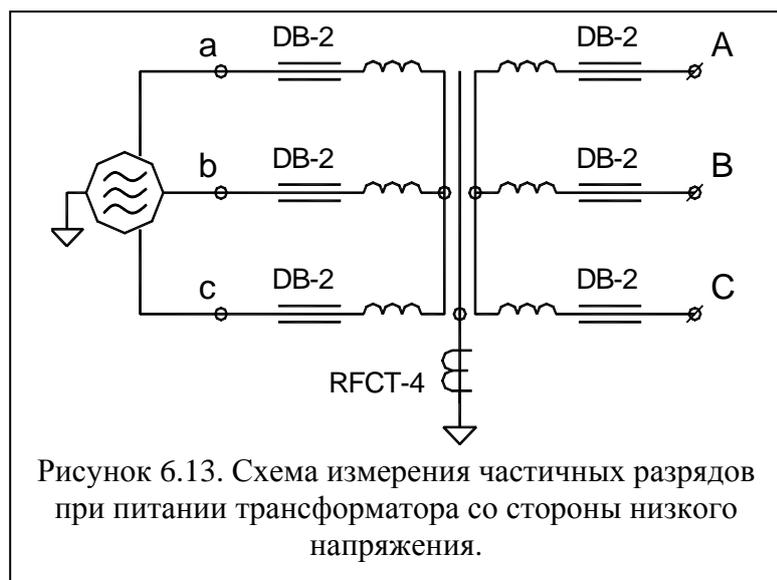
6.4. Схемы измерения частичных разрядов в трансформаторе в режиме «off-line»

В тех случаях, когда не удастся качественно отстроиться от внешних помех, в основном от коронных разрядов и разрядов, наведенных в контролируемом трансформаторе от другого оборудования, можно провести измерение частичных разрядов на выведенном из работы оборудовании. Такие измерения, по своему определению, являются более трудоемкими, но, теоретически, а иногда и практически, позволяют получать более достоверные результаты.

Для проведения измерений частичных разрядов в режиме «off-line» трансформатор необходимо вывести из работы. Поскольку частичные разряды возникают в изоляции трансформатора только под рабочим напряжением, на его обмотки обязательно должно быть подано напряжение, близкое, или равное по величине, номинальному значению. Необходимости в обеспечении режима нагрузки контролируемого трансформатора нет, так как прямой связи между уровнем нагрузки и уровнем частичных разрядов нет, есть только связи через другие параметры, например, через нагрев и т. д. По этой причине трансформатор может, в процессе измерений, находиться в режиме холостого хода.

Возможны два варианта организации такого режима опытного холостого хода.

Во-первых, это можно реализовать при использовании трехфазного источника испытательного напряжения. Его необходимо подключить к одной «стороне» трехфазного трансформатора, обычно к стороне низкого напряжения. На практике это сделать маловероятно, т. к. такой высоковольтный трехфазный источник является громоздким, и не всегда присутствует на подстанции.



Более простым является случай, когда у контролируемого трансформатора только отключается обмотка высокого напряжения, а питание на трансформатор подается со стороны обмотки низкого напряжения. В этом случае удастся значительно уменьшить количество помех, наведенных в контролируемом трансформаторе «извне», т. к. большая часть их поступает по линиям высокого напряжения. Схема для проведения таких измерений частичных разрядов, при

питании трансформатора со стороны низкого напряжения, приведена на рисунке 6.13.

Такая схема измерения не имеет каких-либо принципиальных отличий, с точки зрения размещения на трансформаторе первичных датчиков, но является более эффективной, с точки зрения уменьшения количества помех от наведенных разрядов.

Следует хорошо понимать, что если контролируемый в таком режиме трансформатор располагается на подстанции близко от оборудования, которое не выведено из работы, то на него все равно будут наводиться импульсы помех. Чем ближе будет располагаться такое оборудование, тем выше будет уровень помех, тем ближе эта схема будет к стандартной, проводимой в режиме «on-line».

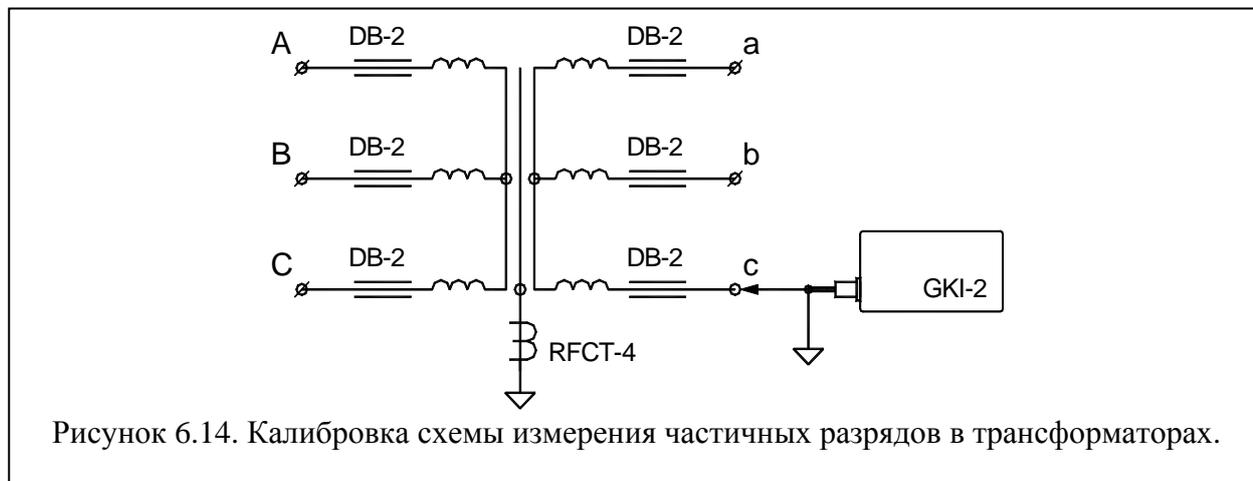
6.5. Калибровка схем измерения частичных разрядов в трансформаторах

Калибровка схем измерения частичных разрядов в трансформаторах производится, обычно, подачей тестовых импульсов на вводы первичной и вторичной стороны обмотки. Для этого выход генератора подключается непосредственно к верхней части ввода, куда подается высокое напряжение, второй провод от генератора, провод заземления, подключается к корпусу трансформатора. Других мест, удобных для инжектирования тестовых импульсов, в трансформаторе нет.

Пример калибровки схемы измерения частичных разрядов в трансформаторе, выполняемой при помощи генератора GKI-2, показан на рисунке 6.14.

Если пользователь предполагает, при дальнейших измерениях частичных разрядов, использовать для отстройки от помеховых сигналов разборку импульсов по амплитуде, то в процессе калибровки схемы необходимо определить параметры матрицы перенаводки импульсов.

Делается это следующим образом. Тестовый импульс от генератора подается поочередно во все вводы трансформатора. Регистрация сигналов производится по всем каналам прибора, к которым подключены первичные датчики частичных разрядов. Для того датчика, в зону которого импульс инжектируется, определяется чувствительность измери-



тельного канала. Для всех остальных каналов определяется коэффициент затухания, равный отношению сигнала на входе дополнительного канала, по отношению к амплитуде входного сигнала калибруемого канала.

Пример. Если калибруется канал «С», как это показано на рисунке 6.14., то коэффициент перенаводки на канал «с», сторона НН, равняется отношению амплитуды U_{LV} к амплитуде U_{HV} . Все амплитуды берутся в милливольтгах, поэтому величина коэффициента перенаводки измеряется в относительных единицах. Аналогично считается коэффициент перенаводки для всех других каналов измерительной схемы. Далее тестовый генератор переключается на другую фазу, и все операции повторяются.

На первом этапе, когда не все каналы откалиброваны, возможно, что будет получено значение коэффициента перенаводки и меньше, и больше единицы. Это, чаще всего, бывает из-за разной чувствительности первичных датчиков. После приведения каналов по

чувствительности, т. е. после пересчета коэффициента перенаводки к размерности «пКл/пКл», коэффициенты перенаводки должны быть меньше единицы. Если этого не получается, это значит, что калибровку необходимо повторить заново, можно уже с использованием рассчитанных значений чувствительности каналов.

7. Датчики частичных разрядов

Важной частью поставки прибора «R2100» является набор датчиков, предназначенный для регистрации частичных разрядов в различном высоковольтном энергетическом оборудовании. В стандартный состав поставки прибора входят только те типы датчиков, которые производятся фирмой «Вибро-Центр».

Стандартного набора первичных датчиков, входящего в состав поставки прибора «R2100», обычно достаточно для сборки наиболее часто встречающихся схем измерения частичных разрядов в различном высоковольтном оборудовании. При проведении более сложных экспериментов и измерений, пользователю необходимо приобретать дополнительные датчики частичных разрядов, производства или нашей фирмы, или других производителей. Такие датчики, чтобы их было можно подключать к прибору «R2100», должны соответствовать определенным требованиям. Основными из них является то, что они должны быть предназначены для работы на внутреннее сопротивление прибора, равное 50 Ом, и быть рассчитаны на регистрацию частичных разрядов в диапазоне частот $1 \div 20$ МГц.

По принципу своего действия все поставляемые с прибором датчики, различаются на следующие группы:

- Высокочастотные трансформаторы марки RFCT (Radio Frequency Current Transformer);
- Измерительные конденсаторы связи марки CC (Coupling Capacitor);
- Индуктивные датчики для «снятия» высокочастотных сигналов в измерительных цепях, марки DRTD-3;
- Датчики коронных разрядов марки KS-60;
- Датчики опорных сигналов марки AR-1,2.
- Комплексные стационарные датчики частичных разрядов и опорных сигналов марки DB-1,2. В состав поставки с прибором они не включаются, т. к. имеют много конструктивных разновидностей, обусловленных различием в конструкции ПИН вводов.
- В состав поставки могут включаться комплексные датчики частичных разрядов и опорных сигналов марки DBT-1.

Датчики серии RFCT (Radio Frequency Current Transformer) являются высокочастотным трансформатором тока. В отличие от обычных трансформаторов тока, данный датчик выделяет только высокочастотные импульсы в диапазоне от 0,5 до 50 МГц. Колебания тока промышленной частоты этим датчиком не регистрируются.

Датчики серии RFCT могут быть установлены:

- в заземляющих проводниках;
- нейтрали трансформатора;
- в заземлении бака трансформатора;
- в заземлении оплетки силового кабеля;
- в заземлении конденсатора связи и в уравнивательных контурах.

Выбор места монтажа датчика зависит от типа контролируемого оборудования и задачи, для решения которой создается конкретная система регистрации ЧР. Поэтому конструктивное исполнение датчиков RFCT различается, в зависимости от назначения и типа посадочного места для датчика.

Специальной защитной изоляции, предназначенной для защиты измерительных цепей приборов от внешнего напряжения, в конструкции датчиков не предусмотрено. Единственной изоляцией датчиков является пластмасса литых корпусов. По этой причине, датчики марки RFCT могут быть смонтированы только на тех элементах оборудования, кото-

рые сами являются элементами заземления или надежно присоединены к земле. Во всех других случаях необходимо предусматривать использование дополнительной, и гарантированной, изоляции между корпусом датчика и токоведущей шиной, в которой предполагается наличие импульсов от частичных разрядов.

7.1. Датчик RFCT-1

Этот датчик является неразъемным высокочастотным трансформатором тока.

Внутренний сердечник датчика выполнен в виде цельного кольца, что приносит некоторые неудобства при монтаже датчика. Поэтому датчики этого типа, обычно, монтируются стационарно.

Центральное отверстие датчика, через которое проходит токоведущая жила, изолирована и допускает надежно изолировать измерительную цепь от напряжений до 500 вольт.



Рисунок 7.1. Датчик частичных разрядов марки RFCT-1.

Основное назначение датчика – контроль импульсов от частичных разрядов в заземляющих проводниках и в уравнивающих контурах. Чаще всего это заземляющие цепи шинопроводов, экранов, цепь заземления нейтрали трансформатора, и т. д.

Для специальных условий измерений выпускается модификация датчика марки RFCT-1, заключенная в металлический корпус. В таком виде его можно использовать совместно с конденсаторами связи, «подкладывая» его под корпус конденсатора.

Датчик RFCT-1 подключается к прибору «R2100» при помощи стандартного коаксиального разъема и кабеля, с максимальной длиной до 50 метров.

7.2. Датчик RFCT-2

Датчик RFCT-2 предназначен для регистрации импульсов от частичных разрядов в выключателях, ячейках КРУ и подходящих к ним кабельных линий или другом высоковольтном оборудовании. Датчик может быть применен для регистрации частичных разрядов в шинопроводах. Чаще всего он устанавливается в разрыве экрана шинопровода, или в месте подхода шинопровода к корпусу генератора.



Рисунок 7.2. Датчик частичных разрядов марки RFCT-2

Конструктивно датчик имеет внутри два последовательно включенных элемента. Это разделительный высоковольтный конденсатор, и импульсный трансформатор для выделения частичных разрядов. К вторичной обмотке трансформатора подключается измерительный прибор.

Подключение датчика к контролируемому объекту производится при помощи соединительных проводов, выбираемых по месту установки датчика.

Провода в состав поставки датчика не входят.

К прибору «R2100» датчик RFCT-2, как и все датчики других типов, подключается при помощи стандартного коаксиального кабеля.

7.2. Датчик RFCT-3



Рисунок 7.3. Датчик частичных разрядов марки RFCT-3

Датчик RFCT-3 представляет собой высокочастотный разделительный трансформатор. В соответствии с этим он используется в качестве изолирующего и разделительного устройства там, где необходимо исключить гальваническую связь между цепями первичных датчиков и измерительного прибора.

Конструктивно, датчик имеет внутри себя один изолирующий высокочастотный, импульсный трансформатор, с коэффициентом передачи токов, равным единице. Защитных и корректирующих цепей внутри датчика нет.

Подключение датчика производится при помощи стандартных разъемов, и ни каких трудностей не представляет.

7.3. Датчик RFCT-4

Этот высокочастотный датчик отличается большим внутренним диаметром и разъемной конструкцией. С целью обеспечения безопасности измерительных цепей, из-за большого сечения внутреннего сердечника, во вторичную обмотку датчика включены ограничители перенапряжений.



Рисунок 7.4. Датчик частичных разрядов марки RFCT-4.

Датчик предназначен для монтажа на нейтрали трансформатора и шинах заземления оборудования. Корпус датчика разъемный - из 2-х частей, для удобства монтажа на элементах, имеющих жесткое крепление. Внутренний диаметр датчика, через который может проходить токоведущий элемент конструкции контролируемого оборудования, составляет 68 мм.

При монтаже на элементах оборудования, по которым протекает ток промышленной частоты, соединять половинки датчика нужно с изолирующей прокладкой толщиной до 3 мм. Это нужно делать для того, чтобы избежать насыщения сердечника. Чем больше будет ток промышленной частоты, который протекает по элементу конструкции оборудования, на котором смонтирован датчик, тем больше должен быть немагнитный и не проводящий зазор.

Рабочее напряжение на конструкции оборудования, которое допускается в месте установки датчика, по условиям безопасности не может быть больше 500 вольт.

7.4. Датчик RFCT-5

Этот высокочастотный датчик, по своей конструкции, представляет собой «разъемные» высокочастотные измерительные клещи для оперативного измерения частичных

разрядов в токопроводящих проводах и жилах. Достоинством такой конструкции является возможность оперативного подключения датчика на работающем оборудовании.

Отличие данного высокочастотного датчика от «обычных» токоизмерительных клещей заключается в конструкции сердечника и параметрах измерительной обмотки. Отличие также имеется и в способе подключения измерительной обмотки к прибору.



Рисунок 7.5. Датчик частичных разрядов марки RFCT-5.

При помощи датчика RFCT-5 производятся измерения интенсивности частичных разрядов в любых цепях с рабочим напряжением до 1000 вольт.

Калибровка чувствительности датчика RFCT-5 производится не отдельно, как это делается для обычных токоизмерительных клещей, а только в составе всей измерительной цепи – объект, емкостная связь, датчик и входные цепи прибора.

Калибровочный генератор подключается, например, к жиле (жилам) контролируемого кабеля, а «полезный»

сигнал частичных разрядов снимается с заземляющего провода экрана кабеля. Для оперативных измерений допускается использование усредненной чувствительности системы применительно к примерно одинаковым объектам контроля состояния изоляции.

7.5. Датчик RFCT-6

Датчик RFCT-6 предназначен для оперативного обхода электрооборудования (кабелей, муфт и т.д.) с целью выявления наличия частичных разрядов в оборудовании.



Рисунок 7.6. Датчик частичных разрядов марки RFCT-6.

Датчик RFCT-6 является только "индикатором" ЧР, данные с него не могут быть использованы для оценки степени дефекта.

Датчик подключается к прибору. Датчик подводится как можно ближе к токоведущему проводу, в котором планируется выявление ЧР. Направление тока в проводе должно или совпадать со стрелкой на датчике, или быть противоположным. Если датчик повернуть на 90 градусов, то зарегистрировать ЧР не удастся.

В приборе запускается спец. функция "Режим индикатора". В этом режиме происходит постоянная регистрация данных по первому каналу. Затем будет производиться отображение матриц распределения ЧР и амплитуды ЧР Q02. В память прибора эти замеры не сохраняются. Режим можно не запускать, но в этом случае каждая регистрация должна

запускаться вручную и будут использоваться установленные Вами параметры регистрации.

При регистрации в режиме индикатора будут изменены следующие параметры:

- Количество синусоид для регистрации будет равно пяти;
- Фильтры (амплитудный, по времени и по полярности) будут отключены.

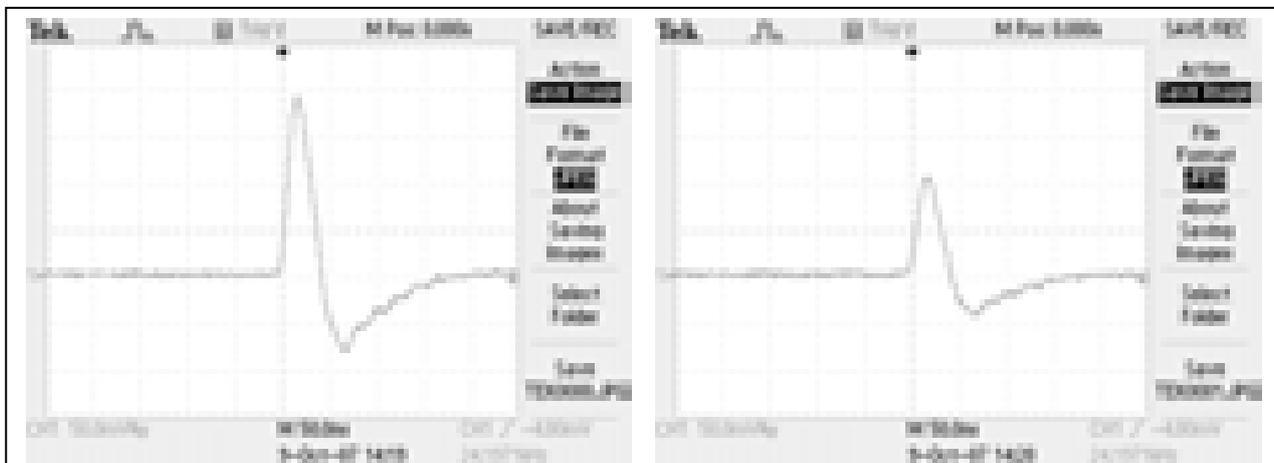


Рисунок 7.7. Затухание импульса при удалении датчика на 20мм

Чем ближе датчик будет к токоведущему проводу, тем больше будет амплитуда на его выходе. На рисунке 7.7 изображено затухание импульса ЧР при установке датчика на поверхности провода, и при удалении датчика от токоведущей жилы на 20 мм. При этом амплитуда уменьшается в два раза.

7.6. Конденсатор связи марки СС

Конденсаторы связи марки СС предназначены для регистрации частичных разрядов в элементах высоковольтного оборудования, находящихся под рабочим напряжением. Это могут быть входные клеммы обмоток статоров электрических машин различного типа, шины КРУ, кабельные линии.

Величина внутренней емкости конденсатора составляет, обычно, 80 пикофарад, хотя это значение и не является принципиальным, просто такую емкость имеют большинство конденсаторов, продаваемых на мировом рынке. Наиболее важным параметром конденсатора связи является стабильность его параметров.

Конденсатор связи монтируется на «заземленном» основании, а верхняя точка его подключается к токоведущей линии, в которой предполагается проводить измерения частичных разрядов.

Особенностью использования трансформаторов связи является необходимость монтажа специальных плат или «проходных» датчиков типа RFCT. Если конденсатор просто смонтировать на металлическом заземленном основании, то импульсы частичных разрядов просто замкнутся на землю.

Существуют два способа монтажа конденса-



Рисунок 7.8. Конденсатор связи марки СС.

торов связи. В первом случае, прямо под конденсатором, на крепежном болте, устанавливается датчик RFCT-1, заключенный в металлический корпус. Во втором варианте под датчиком монтируется переходная плата с необходимой электроникой, через которую конденсатор соединяется с «землей». В этом случае необходимо устанавливать специальное изолирующее основание.

7.7. Датчик DRTD-3 для измерения ЧР в электрических машинах при помощи термометров сопротивления

Датчик DRTD-3 предназначен для регистрации частичных разрядов в обмотках статоров электрических машин различного типа. В качестве своеобразной антенны для сбора сигналов ЧР внутри обмотки электрической машины используется термосопротивления, заложённые в обмотку при изготовлении электрической машины, и соединительные провода, проложенные к этим термосопротивлениям.

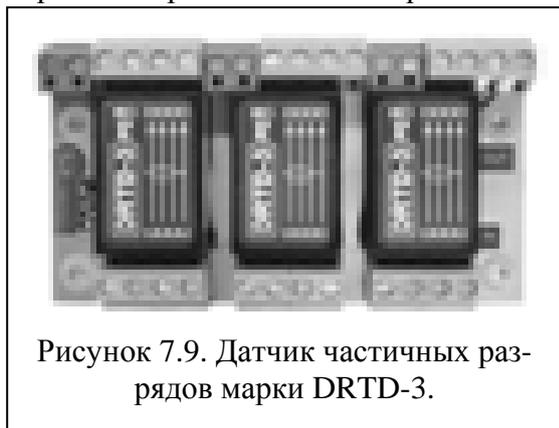


Рисунок 7.9. Датчик частичных разрядов марки DRTD-3.

Датчик DRTD-3 включается в разрыв трех или четырех проводной линии, при помощи которой термосопротивление подключается к измерительному прибору контроля температуры обмотки статора электрической машины. Ограничений на величину сопротивления датчика не накладывается, это может быть 100 или 10 Ом.

Датчик DRTD-3 включается в разрыв трех или четырех проводной линии, при помощи которой термосопротивление подключается к измерительному прибору контроля температуры обмотки статора электрической машины. Ограничений на величину сопротивления датчика не накладывается, это может быть 100 или 10 Ом.

Монтировать датчик желательно максимально близко к месту выхода кабеля из корпуса статора электрической машины, что бы максимально избежать затухания сигналов от частичных разрядов в соединительном кабеле.

Конструктивно датчик DRTD-3 состоит из трех одинаковых модулей, каждый из которых предназначен для подключения к одному термосопротивлению. Такая конструкция датчика обусловлена преимущественным измерением частичных разрядов в трехфазных электрических машинах. На фотографии иллюстрируется подключение датчика. Слева подходят три четырех жильных кабеля от термосопротивлений. Справа, на фотографии, к плате датчика подключены три аналогичных кабеля, которые идут к прибору измерения температуры, штатно имеющемуся для данного двигателя. Если термосопротивление подключено по трех проводной схеме, то нужно не задействовать нижние зажимы клеммников. Необходимо только помнить, что нельзя изменять последовательность жил кабеля на входе и выходе датчика, чтобы не нарушить работу прибора измерения температуры.

Справа, к двойным клеммам выходов датчиков, расположенным выше счетверенных клеммников для подключения прибора измерения температуры, подключаются коаксиальные кабели для передачи сигналов от частичных разрядов в прибор «R2100». Конструкция датчика такова, что экран коаксиального кабеля и его центральную жилу можно подключать к выходным зажимам датчика в любой последовательности. Тем не менее, для реализации системного подхода, жилу коаксиального кабеля желательно подключать к верхней клемме, а его экран - к нижней клемме.

Для проведения калибровки датчиков типа DRTD-3 необходимо использовать отключенный режим работы электрической машины. Само подключение датчика в цепи измерения температуры можно производить в процессе работы оборудования.

Самый простой способ калибровки цепей датчиков описан в разделе настоящего руководства, посвященном диагностике электрических машин.



Рисунок 7.10. Датчик синхронизации измерений частичных разрядов марки AR-1.

7.8. Датчик AR-1 для синхронизации измерения частичных разрядов в особых условиях

Этот датчик служит для формирования опорного сигнала, необходимого для фазовой привязки измерений. На вход датчика AR-1 можно подавать сигналы очень широкого диапазона амплитуд, от десятков милливольт до напряжения питания в 220 вольт. На выходе датчика формируется прямоугольный импульс с периодом напряжения питающей сети.

Для удобства пользования, входная цепь и выходная цепь датчика имеют гальваническую развязку на напряжение до 1500 вольт, позволяющая

исключить взаимное влияние цепей между собой и между объектом контроля и измерительным прибором. Особенно это важно тогда, когда опорное напряжение для фазовой привязки берется, в условиях высоковольтной подстанции, от другого объекта.

Малый входной ток датчика, равный долям микроампера, расширяет диапазон применения датчика. Например, при измерении на вводах трансформатора датчик можно подключать параллельно датчику DB-1, не внося в измерения частичных разрядов существенной погрешности.

Датчик имеет внутренне питание от двух батарей размером AA. Одного комплекта батарей хватает примерно на 10 часов работы. Основным потребителем энергии является узел гальванической развязки входных и выходных цепей, особенно существенны потери во внутреннем DC/DC конвертере напряжения. Конвертер нужен для разделения первичных и вторичных цепей. Включение и отключение датчика производится переключателем питания.



Рисунок 7.11. Датчик регистрации сигналов коронных импульсов марки KS-60.

7.9. Датчик короны KS-60 для проведения измерений в высоковольтных трансформаторах

Этот датчик служит для отстройки измерительной схемы от импульсов коронных разрядов. Датчики короны марки KS-60 монтируются рядом с каждым высоковольтным вводом трансформатора. Основное применение датчика KS-60 – в стационарных системах контроля изоляции силовых трансформаторов.

Принцип работы и использования датчика короны можно пояснить достаточно просто. Датчик представляет собой катушку без сердечника, охватывающую часть окружности изолятора ввода. При протекании высокочастотного импульса по сердечнику ввода, вокруг ввода образуется волна электромагнитного поля. Это поле характеризуется кольцевыми силовыми линиями, направление вращения которых определяется по правилу «буравчика». Если импульс протекает «внутри» трансформатора (например, это импульс от коронного разряда), направление

круговых силовых линий будет по часовой стрелке, если смотреть на трансформатор сверху. Если импульс будет выходить из трансформатора, т. е. он возник внутри, то направление вращения силовых линий будет против часовой стрелки.

При изменении направления вращения силовых линий поля, вокруг ввода, будет изменяться направление вектора ЭДС, который будет наводиться в катушке датчика KS-60. Если сопоставлять знак выходного сигнала от датчика DB-1,2, смонтированного на ПИН высоковольтного ввода, со знаком выходного сигнала от датчика KS-60, смонтированного рядом с этим же вводом, то можно очень точно определять направление движения импульса по вводу, «в трансформатор», или «из трансформатора». Это объясняется тем, что полярность сигнала с датчика DB-1 не зависит от направления движения импульса, а полярность сигнала с KS-60 зависит. Вне зависимости от того, какую полярность имеет импульс частичного разряда, положительную или отрицательную, диагностическим фактором является совпадение, или несовпадение полярностей сигналов с двух датчиков.

Данная функция разборки, по совпадению полярностей, реализуется в приборе «R2100» при помощи референсного канала. На измерительный канал прибора подается сигнал от датчика DB-1,2, а на референсный канал подается сигнал от датчика короны. Сравнение полярностей одного и того же сигнала, зарегистрированного двумя различными датчиками, позволяет выделять сигналы частичных разрядов от сигналов коронного разряда.

7.10. Датчики DB-1,2 для контроля токов проводимости вводов и частичных разрядов

Датчики тока проводимости марки DB-1,2 используются со всеми приборами фирмы «Вибро-Центр», и предназначены для измерения токов проводимости и импульсов частичных разрядов, снимаемых с ПИН маслонаполненных вводов трансформаторов.

Конструктивно датчики DB-1,2 представлены в выпускаемой фирмой продукцией набором нескольких разновидностей и исполнений. Необходимость этого обусловлена ис-



Рисунок 7.12. Датчики тока проводимости и частичных разрядов для монтажа на вводах трансформаторов.

пользованием в эксплуатации вводов производства различных фирм производителей и нескольких уровней рабочего напряжения.

При всем внешнем многообразии конструкций, набор и схема соединения элементов внутри датчика марки DB-1 практически одинакова, некоторые отличия обусловлены различными уровнями контролируемого тока проводимости вводов. Уровень обеспечения безопасности работы с датчиком защиты ПИН ввода от возможных перенапряжений одинаков для всех модификаций выпускаемых датчиков.

Для ограничения импульсных перенапряжений, которые могут возникнуть во вводе при грозовых разрядах на линии (оценочная величина импульса до 1,5 кА), или во время коммутаций в линии (оценочная величина импульса до 0,8 кА) в датчике используются параллельно включенные варистор (ОПН) и газовый разрядник. В конструкции датчика DB-2 используются специализированные электронные сопрессоры и газовые разрядники, что также обеспечивает необходимый уровень защиты ПИН ввода.

7.11. Датчик DBT-1 для «временного» монтажа на ПИН вводов

Для временной установки на ПИН вводов датчиков, измеряющих частичные разряды и имеющие в выходном сигнале опорное напряжение, могут быть использованы универсальные датчики марки DBT-1. Они предназначены для «временного» подключения измерительных приборов к ПИН вводов. При этом, для трехфазного трансформатора, достаточно использовать один датчик, включаемый к ПИН ввода фазы «А».



Рисунок 7.13. Комплексный датчик марки DBT-1 для Контроля частичных разрядов и опорного напряжения

Датчик DBT-1 имеет внутреннюю электронную схему, аналогичную датчику марки DB-1, включая элементы защиты от перенапряжений и импульсных токов. При помощи двух проводников, сечением 1 – 2 мм², он подключается к ПИН ввода и к «земле» трансформатора (ввода).

Подключение этих проводников должно проводиться с особой тщательностью. Корпус датчика, и кабель от датчика к прибору, необходимо зафиксировать, чтобы не произошло размыкание цепей к ПИН контролируемого ввода. Провод дополнительного заземления, показанный на рисунке справа, для обеспечения безопасности персонала, должен быть надежно подключен к корпусу трансформатора.

тального заземления, показанный на рисунке справа, для обеспечения безопасности персонала, должен быть надежно подключен к корпусу трансформатора.

8. Технические средства калибровки измерительных схем

Важной проблемой, которую приходится решать при практическом применении приборов контроля частичных разрядов, является вопрос калибровки (поверки) приборов.

В отличие от стандартных измерений параметров электрических цепей, например, токов, напряжений, необходимо четко понимать, что прибор контроля частичных разрядов не может быть откалиброван, а тем более поверен, в условиях предприятия изготовителя, или в какой – либо метрологической службе.

Это обусловлено тем, что, как уже говорилось выше, измеряются не сами параметры импульса частичного разряда, а вторичные признаки импульса - реакция контролируемого объекта на перераспределение потенциалов. При этом получается так, что один и тот же разряд в изоляции будет измеряться нашим прибором в разных объектах по-разному. Например, разряд, возникший внутри разного оборудования, с одинаковой величиной в 100 пКл, будет наводить в одинаковом датчике сигнал, отличающийся по амплитуде в десятки, и даже в сотни раз. Так будет, например, при измерении ЧР в трансформаторе и в небольшой электрической машине. Во втором случае, обычно, сигнал импульса частичного разряда будет много больше.

Реальная чувствительность прибора, а это и есть потенциальный метрологический параметр, который влияет на измеряемые параметры, не является величиной постоянной. Она в значительной степени зависит от условий проведения измерений.

На чувствительность прибора оказывает влияние:

- тип и марка контролируемого высоковольтного оборудования, трансформаторы, генераторы, кабельные линии;
- типа и места установки датчика, предназначенного для измерения параметров частичных разрядов;
- места возникновения дефекта в изоляции оборудования, разряды, возникшие на разном удалении от датчика, наведут в датчике сигналы разной амплитуды;
- длины соединительного кабеля от датчика и т. д.

Каким – то образом заранее учесть «набор» этих возмущающих факторов, влияющих на чувствительность измерительной схемы, не удастся никогда. Вполне очевидным является то, что единственно возможным способом проведения достоверных измерений частичных разрядов в высоковольтном оборудовании является проведение калибровки измерительной схемы прямо на месте. Любое изменение параметров схемы измерения, перемещение датчиков по контролируемому оборудованию и т. д. требует проведения повторной процедуры калибровки измерительной схемы.

Процедура калибровки измерительных цепей перед измерением частичных разрядов предполагает следующее:

- Собирается конкретная измерительная схема на отключенном высоковольтном объекте, состояние изоляции которого предполагается контролировать.
- В конкретную зону объекта, которую предполагается контролировать, необходимо ввести, «инжектировать», искусственные частичные разряды, амплитуда которых известна.
- Проводится измерение выходных сигналов со всех датчиков, установленных на оборудовании.
- На основании известного уровня тестового импульса, инжектируемого в оборудование, рассчитывается реальный коэффициент чувствительности каждого измерительного канала собранной измерительной схемы.
- Полученные расчетные коэффициенты чувствительности каналов используются во всех последующих измерениях частичных разрядов, проводимых под рабочим, или испытательным, напряжением.

Вполне очевидно, что единственным способом обеспечения необходимой метрологической достоверности измерения частичных разрядов является обязательное наличие в составе оборудования тестового генератора. Это генератор должен выдавать на выходе импульсы, соответствующие импульсам частичных разрядов, иметь небольшие габариты и аккумуляторное питание.

В соответствии с этим в состав всех приборов производства фирмы «Вибро-Центр» включается генератор GKI-2, имитирующий импульсы ЧР. Благодаря этому пользователи приборов могут самостоятельно проводить калибровку измерительных цепей в полевых и лабораторных условиях.

8.1. Импульсный генератор GKI-2

Малогабаритный калибровочный генератор GKI-2 предназначен для калибровки цепей регистрации частичных разрядов перед проведением измерений. Он может быть использован в полевых и лабораторных условиях. Допускается работа генератора при температуре окружающей среды до минус 20 градусов.



Рисунок 8.1. Генератор GKI-2

Управление всеми функциями генератора осуществляется при помощи пленочной клавиатуры, необходимая информация о работе прибора отражается на миниатюрном ЖКИ индикаторе.

Питание генератора осуществляется от двух батарей формата «AA», или аккумуляторов такого же размера. Одного заряда аккумуляторов достаточно для непрерывной работы в течение не менее 10 часов. В комплекте генератора имеется зарядное устройство, от которого можно также питать генератор во время работы.

Генератор GKI-2, обычно, инжектирует в контролируемый объект, и в измерительные цепи, заряд 3000 пКл. Это позволяет проводить калибровку измерительных цепей, с учетом затухания в объекте, перед проведением измерений. Выпускаются версии генератора с регулировкой инжектируемого заряда, величина которого может, по выбору пользователя, составлять 2000 и 5000 пКл.

На лицевой панели генератора находится экран и пленочная клавиатура. Вверху слева нанесена надпись с наименованием прибора. Справа вверху эмблема фирмы "Вибро-Центр".

Внешний вид клавиатуры генератора показан на рисунке 2.2. Для управления всеми функциями прибора используются четыре функциональные клавиши.

Назначение клавиш:



Рисунок 8.2.

"On" - кнопка включения – отключения прибора.

"☀" - кнопка включения подсветки экрана.

"Set" - кнопка предназначена для остановки генератора и перевода его в режим настроек параметров и режимов работы.

"Mod" - кнопка предназначена для модификации параметров работы генератора.

Разъем прибора предназначен для подключения измерительной цепи, имеющей стандартное сопротивление 50 Ом. При отсутствии такого нагрузочного сопротивления показания прибора недействительны.

В приборе предусмотрены 2 режима работы:

- автономная генерация импульсов;
- установка параметров прибора.

При нажатии на клавишу прибора "On" происходит включение прибора. После подачи напряжения питания, тестирования и загрузки программного обеспечения, прибор сразу же переходит в режим автономной генерации импульсов с теми настройками, с которыми закончилось предыдущее выключение.

Прибор генерирует импульсы заряда 3000пК (на 50 Ом) с частотой 25 кГц.

Изменение текущих параметров генератора производится в режиме настройки. Переход в режим настроек прибора, осуществляется при нажатии клавиши "Set". В этом режиме проводится настройка служебных параметров. Каждое нажатие клавиши "Set" приводит к смене текущего параметра установок. Нажатие "Mod" изменяет текущий параметр. При последнем нажатии на "Set" прибор переходит в режим регистрации. Всего для настройки доступно 3 параметра.

Пользователь может установить:

- Время работы прибора до автоматического отключения после последнего нажатия клавиш. Оно может равняться 1, 10, 20 и 60 минут или этот режим отключается. На экране показывается надпись "ВЫКЛ. ПРИБОР – 10 мин". Данная функция предназначена для сохранения заряда аккумуляторов.

- Время отключения подсветки экрана. Оно может равняться 1, 5 и 10 минут. На экране показывается надпись "ВЫКЛ. ПОДСВ. – 1 мин". Подсветка нужна при настройке генератора, в процессе инжестирования импульсов, когда пользователь работает с прибором, это не нужно.

- Контрастность экрана. Изменяется от 0% до 100% с шагом 10%. На экране показывается надпись "КОНТРАСТ – 20 %".

У некоторых модификаций генератора имеется возможность установки величины инжестрируемого в контролируемый высоковольтный объект нормированного заряда.

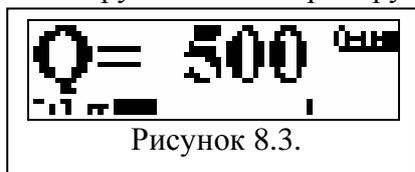


Рисунок 8.3.

Экран тестового генератора GKI-2, в основном режиме работы, во время генерации импульсов, выглядит так, как это показано на рисунке 8.3.

Справа сверху условно показывается уровень зарядки аккумулятора – по 20 % зарядки на одну линию

условной батарейки. В основном поле экрана показывается инжестрируемый прибором во внешнюю цепь заряд (3000пК).

В нижней части экрана, в виде «движущейся линейки», показывается время, оставшееся до момента автоматического отключения генератора. Это время на бегунке показывается в условных единицах от заданного пользователем максимального значения. Если автоматическое отключение отключено, то движения бегунка в нижнем поле не происходит. Слева от «линейки» остаток времени показывается в цифровом виде.

Форма тестового импульса частичного разряда, генерируемого на выходе GKI-2, показана на рисунке 8.4. Длительность переднего фронта тестового импульса составляет около 5 ns. Задний фронт импульса более затянут, но для самой процедуры калибровки измерительной схемы это менее важно. Реальные импульсы частичных разрядов, достаточно часто, имеют такую же форму импульса.

Выходная цепь генератора всегда должна быть нагружена на сопротивление, не превышающее значение в 50 Ом. Режим короткого замыкания выходной цепи генератора не представляет опасности для работоспособности прибора. Он может находиться в таком состоянии любое время, и генерировать в объект импульсы частичных разрядов, с амплитудой, показываемой на его экране.

Если контролируемый объект, относительно точек подключения генератора, имеет сопротивления, значительно превышающее 50 Ом, то форма импульса от тестового генератора начинает искажаться. Изменяются волновые свойства контролируемого объекта, и процедура калибровки будет проходить некорректно.

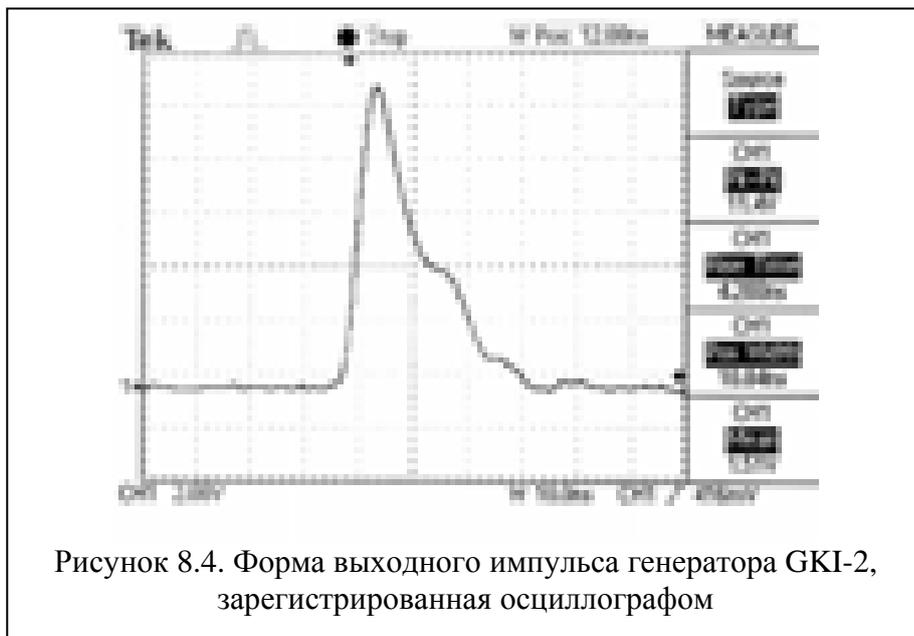


Рисунок 8.4. Форма выходного импульса генератора GKI-2, зарегистрированная осциллографом

Для исключения этого необходимо параллельно контролируемому объекту включить «терминатор», входящий в состав поставки генератора, внутри которого смонтировано сопротивление с величиной 50 Ом. Для этого к выходу генератора подключается стандартный «T-Connector»,

входящий в состав поставки генератора. К одному плечу этого «тройника» подключается нагрузочный «терминатор», а к другому подключается кабель, по которому импульсы передаются к калибруемому объекту. В результате форма и амплитуда тестового импульса будут иметь стандартные параметры.

8.2 Расчет чувствительности измерительного канала

Расчет чувствительности канала прибора может производиться автоматически, при помощи встроенной в прибор «R2100» функции "калибровка", описанной в данной инструкции, или в ручном режиме.

Для ручного расчета коэффициентов чувствительности, после регистрации замера с инжектированным зарядом с генератора, необходимо определить уровень сигнала (мВ) который зарегистрировал прибор на калибруемом канале. Это возможно в приборе при помощи функции просмотра замера, или после перекачки данных калибровочного замера в компьютер, и анализа его при помощи программы "СКИ", поставляемой вместе с прибором.

Порядок расчета коэффициентов чувствительности следующий. Необходимо загрузить замер из архива прибора в компьютер, и посмотрите уровень сигнала (Q02) по калибруемому каналу.

При использовании программного обеспечения "СКИ" уровень сигнала можно определить при графическом просмотре данных в шкале мВ.

Далее чувствительность каждого измерительного канала прибора можно легко рассчитать по простой формуле:

$$K_{чк} = \frac{Q_{ГЕН}}{U_{ВХ.КАН}}$$

где:

$K_{чк}$ - коэффициент чувствительности измерительного канала, в условиях данной схемы измерения частичных разрядов, рассчитываемый в размерности (нКл / В);

$Q_{ГЕН}$ - амплитуда импульса на выходе калибровочного генератора, измеренная в размерности «нанокулон» (нКл), считываемая с экрана генератора, или контролируемая осциллографом;

$U_{ВХ.КАН}$ - амплитуда напряжения от датчика, измеренная на входе измерительного канала, в размерности «вольт» (В).

Пример. При подаче в контролируемый объект тестового импульса с амплитудой 3 нКл на входе измерительного канала прибора был зарегистрирован импульс с амплитудой 300 милливольт, или 0,3 вольта. Итоговая расчетная чувствительность измерительного канала прибора, в данной измерительной схеме, равняется 30 «нанокулон/вольт» (нКл/В).

Внимание: чувствительность в прибор вносится в размерности наноКулон/Вольт, поэтому в формуле стоит ЗнК, инжектируемые генератором и уровень сигнала приводится к Вольтам.