
ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»



**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ
ПАО «ФСК ЕЭС»**

**СТО 56947007-
29.180.01.207-2015**

**Методика измерения частичных разрядов
в маслобарьерной изоляции силового трансформаторного оборудования**

Стандарт организации

Дата введения: 18.12.2015

ПАО «ФСК ЕЭС»

2015

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», объекты стандартизации и общие положения при разработке и применении стандартов организаций Российской Федерации - ГОСТ Р 1.4-2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения», общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению межгосударственных стандартов, правил и рекомендаций по межгосударственной стандартизации и изменений к ним - ГОСТ 1.5-2001, правила построения, изложения, оформления и обозначения национальных стандартов Российской Федерации, общие требования к их содержанию, а также правила оформления и изложения изменений к национальным стандартам Российской Федерации - ГОСТ Р 1.5-2012.

Сведения о стандарте организации

1. РАЗРАБОТАН: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».
2. ВНЕСЁН: Департаментом инновационного развития.
3. УТВЕРЖДЁН И ВВЕДЁН В ДЕЙСТВИЕ:
Приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 18.12.2015 № 507.
4. ВВЕДЁН: ВПЕРВЫЕ.

Замечания и предложения по стандарту организации следует направлять в Департамент инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» по адресу 117630, Москва, ул. Ак. Челомея, д. 5А, электронной почтой по адресу: vaga-na@fsk-ees.ru.

Настоящий документ не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения ПАО «ФСК ЕЭС».

Содержание

1 Область применения	4
2 Нормативные ссылки	4
3 Термины и определения.....	5
4 Общие положения	6
5 Схемы электрического метода измерения ЧР	7
6 Измерительная система.....	9
6.1 Состав измерительной системы.....	9
6.2 Испытания измерительной системы.....	15
6.3 Метрологическое обеспечение измерительной системы	16
7 Методика измерения частичных разрядов в маслобарьерной изоляции силового трансформаторного оборудования	17
7.1 Подготовительные работы	17
7.2 Сборка и подключение к контролируемому объекту измерительной системы	17
7.3 Градуировка измерительной системы	18
7.4 Определение уровня и вида помех в испытательной схеме	19
7.5 Измерение и регистрация ЧР	20
8 Обработка результатов, оформление протокола измерений ЧР.....	20
8.1 Обработка результатов измерения ЧР	20
8.2 Оформление протокола измерения ЧР	21
Приложение А	22
(рекомендуемое).....	22
Акустический метод регистрации ЧР	22
Приложение Б.....	24
(обязательное).....	24
Способы отстройки от мешающего действия помех	24
Приложение В	25
(рекомендуемое).....	25
Визуализация и интерпретация результатов измерения ЧР	25
Приложение Г	29
(обязательное).....	29
Требования к протоколу измерения характеристик ЧР	29
Библиография	30

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт распространяется на силовые трансформаторы, автотрансформаторы и шунтирующие реакторы напряжением 110 кВ и выше (далее силовые трансформаторы). В стандарте приведена методика измерения частичных разрядов в маслобарьерной изоляции силовых трансформаторов в условиях их эксплуатации.

1.2 Настоящий стандарт применяется для контроля технического состояния силовых трансформаторов.

2 Нормативные ссылки

ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

ГОСТ 8.401-80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.

ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.

ГОСТ 14254-96 (МЭК 529-89) Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP).

ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с Изменениями № 1 – 5).

ГОСТ 15543.1-89 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам.

ГОСТ 17516.1-90 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам.

ГОСТ 20074-83 (СТ СЭВ 20074-83) Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов.

ГОСТ 21023-75 Трансформаторы силовые. Методы измерений характеристик частичных разрядов при испытаниях напряжением промышленной частоты (с Изменениями № 1 – 4).

ГОСТ 22756-77 (СТ СЭВ 3150-81, СТ СЭВ 4446-83, СТ СЭВ 5018-85, МЭК 722-86) Трансформаторы (силовые и напряжения) и реакторы. Методы испытаний электрической прочности изоляции (с Изменениями № 1 – 4).

ГОСТ 32144-13 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

ГОСТ Р 8.654-09 ГСИ. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения.

ГОСТ Р 52719-07 Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями.

3.1 **Частичный разряд; ЧР**: локальный электрический разряд, который шунтирует часть изоляции в электроизоляционной системе.

3.2 **Кажущийся заряд ЧР q , Кл**: заряд, при мгновенном введении которого между электродами испытуемого объекта в испытательной схеме напряжение между электродами кратковременно изменится на такое же значение, на какое изменилось бы при ЧР.

3.3 **Время возникновения импульса ЧР t_i , мс**: время, измеряемое между предшествующим переходом положительной полуволны воздействующего на изоляцию переменного напряжения через нуль и импульсом ЧР.

3.4 **Фазный угол импульса ЧР ϕ_i , градусы**: угол между предшествующим переходом положительной полуволны воздействующего на изоляцию переменного напряжения через нуль и импульсом ЧР.

3.5 **Длительность одного цикла регистрации ЧР $t_{1ц}$, с**: время в непрерывной группе периодов воздействующего напряжения, в течение которого регистрируются ЧР.

3.6 **Регулярность ЧР Re** : отношение числа периодов воздействующего напряжения, в которых зарегистрированы кажущиеся заряды ЧР одного и того же значения q , к общему числу периодов за длительность одного цикла регистрации ЧР.

3.7 **Кажущийся заряд неоднократно повторяющихся ЧР q_{Re} , Кл**: значение кажущегося заряда ЧР, возникающих в различных периодах воздействующего напряжения за длительность одного цикла регистрации ЧР.

3.8 **Помехи**: импульсные сигналы посторонних воздействий на измерительную систему, выраженные в единицах кажущегося заряда.

3.9 Разрешающее время регистрации импульсов ЧР T_R , мкс: минимальный интервал времени между двумя последовательными импульсами ЧР при одинаковой форме, полярности и значении заряда, при котором амплитудные значения сигналов отличаются не более чем на 10 %.

3.10 Градуировочный коэффициент K_q , Кл/В: отношение вводимого в контролируемый объект заряда имитирующего ЧР к выходному напряжению регистрируемого сигнала.

3.11 Нижние и верхние граничные частоты измерения ЧР f_1 и f_2 , МГц: частоты, в которых отношение амплитуды выходного сигнала к неизменной амплитуде входного синусоидального сигнала уменьшается не более чем на 6 дБ от его пикового значения в полосе пропускания.

4 Общие положения

Частичные разряды (далее ЧР) в маслобарьерной изоляции силового трансформаторного оборудования в эксплуатации измеряются под рабочим напряжением или при возбуждении силового трансформатора от отдельного генератора или трансформатора акустическим, электрическим и электромагнитным методами при условиях работы силового трансформатора с учетом требований ГОСТ Р 52719, п. 4.2 «Условия работы».

Регистрация ЧР должна выполняться на силовых трансформаторах только в работоспособном состоянии, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует всем требованиям нормативной документации.

4.1. Акустический метод.

Акустические волны ЧР распространяются с различной скоростью в зависимости от среды: в масле ≈ 1445 м/с при 20 °С; в SF₆ ≈ 133 м/с; в воздухе ≈ 342 м/с; в стали ≈ 5900 м/с; в фарфоре ≈ 5340 м/с; в эпоксидном компаунде ≈ 2580 м/с.

Затухание акустических волн в диапазоне частот от 100 до 300 кГц составляет до 12 дБ.

Регистрацию ЧР производят устройствами, состоящими из следующих элементов: датчики, линия связи и измеритель импульсных сигналов.

Применяются пассивные или активные датчики. Пассивные датчики не имеют электронных устройств для усиления сигнала или его преобразования, выходы их измерительных элементов непосредственно соединены с передающим трактом (линией связи). Активные датчики имеют электронные устройства для усиления измеренных сигналов и их преобразования.

Чувствительность датчика (В/Па) определяется отношением напряжения импульсного сигнала на выходе датчика к импульсу акустического давления, воздействующего на датчик. Чувствительность должна быть не ниже 10^{-2} В/Па, диапазон частот – от 100 кГц до 300 кГц.

Недостатки акустического метода согласно [1] п. В.2:

- низкая чувствительность;
- невозможна количественная оценка интенсивности ЧР;
- отсутствует возможность калибровки акустических сигналов.

Акустический метод регистрации ЧР приведен в приложении А.

4.2 Электромагнитный метод.

Импульсы ЧР вызывают высокочастотные токи, являющиеся источниками электромагнитных волн в диапазоне от 3 МГц до 3 ГГц.

Фиксация ЧР выполняется с использованием специализированных антенн.

Недостатки электромагнитного метода согласно [1] п. А.2:

- отсутствует возможность калибровки ЧР в кажущихся зарядах (пКл);
- высокая стоимость измерительного оборудования;
- отсутствуют унифицированные средства измерения.
- для силовых трансформаторов этот метод регистрации ЧР не эффективен.

4.3 Электрический метод.

В соответствии с ГОСТ 20074, ГОСТ 21023 и МЭК 60270 [2] измерение ЧР в маслобарьерной изоляции силовых трансформаторов производится электрическим методом. Измерение частичных разрядов электрическим методом даёт возможность определять интенсивность ЧР.

4.4 Нормальные условия выполнения измерений в соответствии с ГОСТ Р 52719:

- температура окружающего воздуха и охлаждающей среды - климатическое исполнение У по ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543.1; среднесуточная температура воздуха - не выше 30 °С; среднегодовая температура воздуха - не выше 20 °С;

- отклонение питающего напряжения от номинального, а также форма кривой напряжения, несимметрия фаз, отклонение частоты от номинальной должны соответствовать требованиям ГОСТ 32144;

- степень загрязнения окружающей среды - по ГОСТ 15150 (все типы атмосферы);

- внешние механические воздействия, в том числе для сейсмоопасных районов - по ГОСТ 17516.1;

- категории размещения силовых масляных трансформаторов - от 1 до 4, по ГОСТ 15150.

5 Схемы электрического метода измерения ЧР

На рисунках 1–3 представлены рекомендуемые схемы измерений ЧР в соответствии с ГОСТ 20074, ГОСТ 21023 и МЭК 60270.

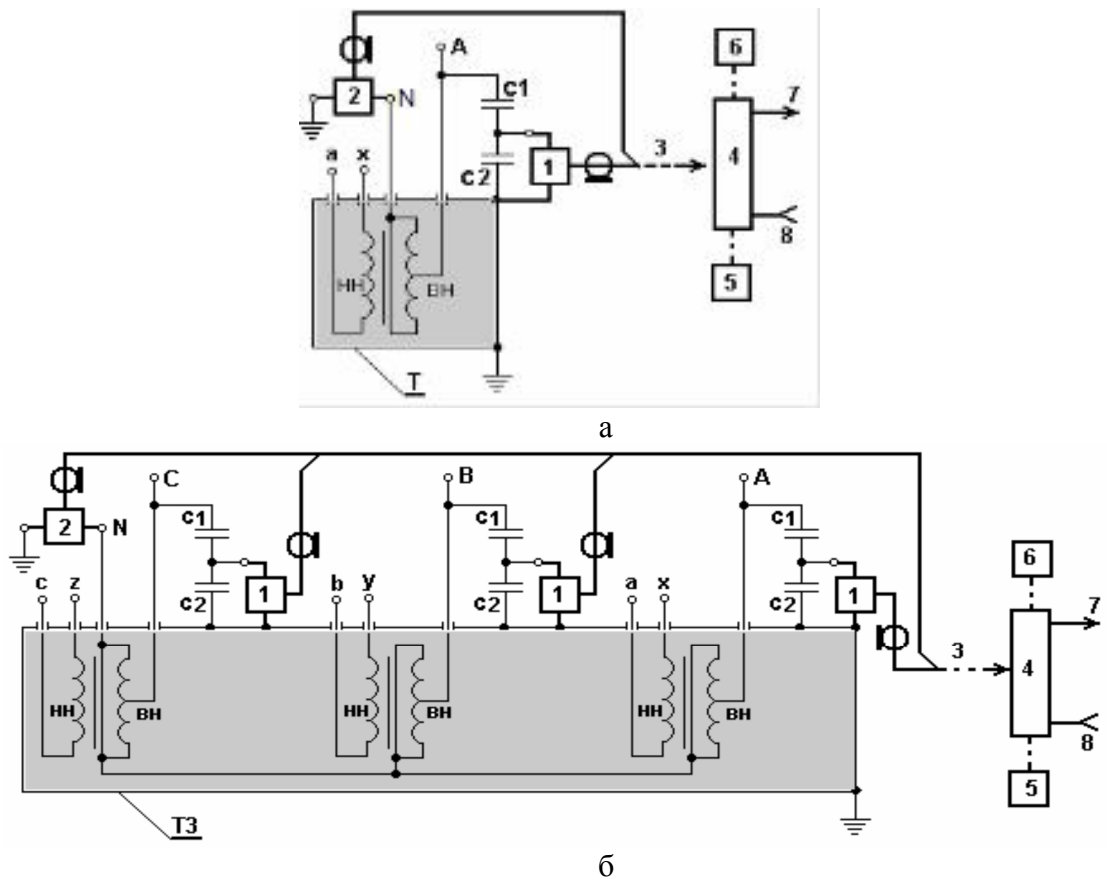
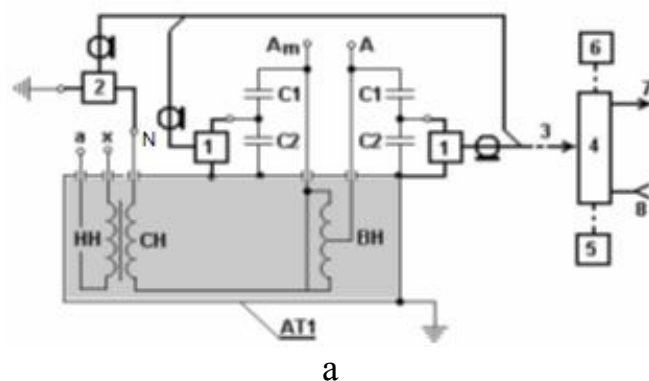


Рисунок 1 Схемы измерений ЧР силовых трансформаторов с измерительной системой

а – однофазный силовой трансформатор; б – трехфазный силовой трансформатор; Т, Т3 – контролируемые объекты (выделены серым цветом); ВН, НН – обмотки соответственно высшего и низшего напряжений; А, В, С – линейные выводы обмотки ВН; N – вывод нейтрали обмотки ВН; а, х, b, у, с, z – выводы обмоток НН; С1 – емкость основной изоляции ввода; С2 – емкость изоляции измерительной обкладки относительно фланца ввода; 1, 2 – устройства присоединения; 3 – линия связи; 4 – измеритель ЧР; 5 – принтер; 6 – осциллограф; 7 – сигнальный кабель для оповещения превышения допустимого значения характеристик ЧР; 8 – вход сигнала синхронизации.



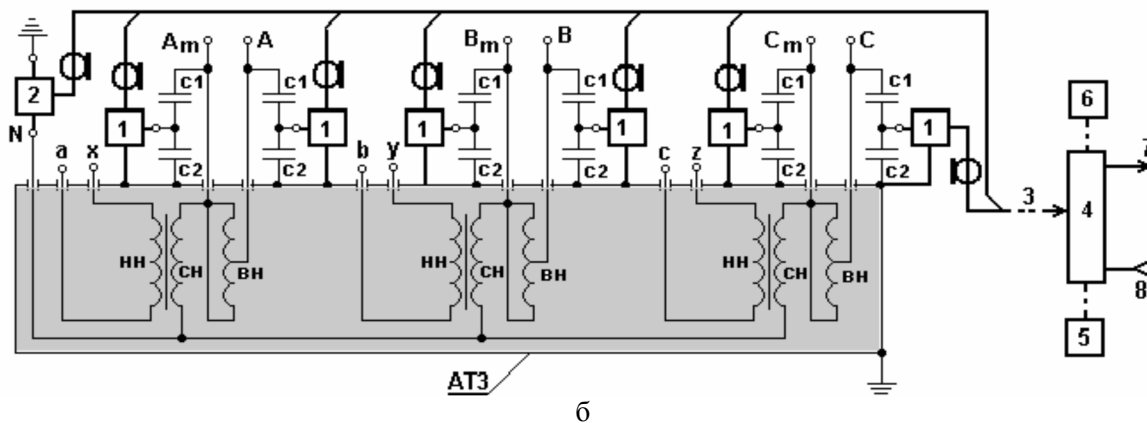


Рисунок 2 Схемы измерений ЧР автотрансформаторов с измерительной системой
 а – однофазный автотрансформатор; б – трехфазный автотрансформатор
 АТ1, АТ3 – контролируемые объекты (выделены серым цветом);
 ВН, СН, НН – обмотки соответственно высшего среднего и низшего напряжений.
 Остальные обозначения аналогичны обозначениям на рисунке 1.

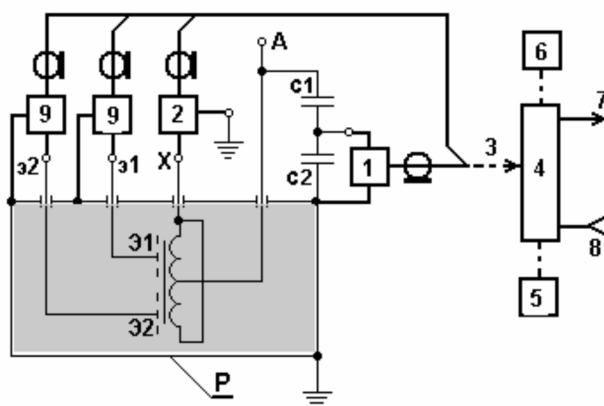


Рисунок 3 Схема измерений ЧР шунтирующего реактора с измерительной системой
 P - контролируемый объект (выделен серым цветом); Э1, Э2 – экраны полуобмотки; 9 –
 устройства присоединения экранов.
 Остальные обозначения аналогичны обозначениям на рисунке 1.

Допускается применение других схем измерения ЧР.

6 Измерительная система

Измерительная система для измерения ЧР представляет собой совокупность средств измерительной и вычислительной техники.

6.1 Состав измерительной системы

- устройство присоединения измерительной части системы к контролируемому объекту;
- линия связи;
- измеритель ЧР;
- градуировочное устройство;
- периферийные устройства;
- руководство по эксплуатации.

6.1.1 Устройство присоединения измерительной части системы к контролируемому объекту

6.1.1.1 Электрическая схема устройства присоединения представлена на рисунке 4.

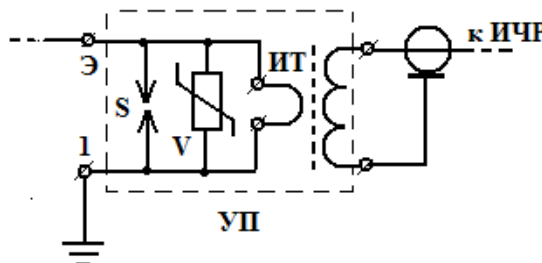


Рисунок 4 Электрическая схема устройства присоединения (УП)

Э – контакт вывода измерительного экрана ввода ВН (СН); 1 – контакт вывода обмотки импульсного трансформатора (ИТ), соединенного с фланцем ввода ВН, СН или баком контролируемого объекта; V – ограничитель перенапряжения; S – искровой разрядник; ИЧР - измеритель ЧР.

6.1.1.2 Устройства присоединения могут применяться двух типов: активные и пассивные.

Активные устройства присоединения имеют электронные устройства для преобразования сигналов, усиления сигналов, кодирования сигналов, согласования выхода устройства присоединения с каналами связи и передачи их на вход канала связи.

Пассивные устройства присоединения характеризуются отсутствием электронных устройств.

6.1.1.3 Устройства присоединения должны располагаться непосредственно на защитном корпусе вывода измерительного экрана ввода обмотки ВН или СН.

6.1.1.4 Входные и выходные цепи устройства присоединения должны иметь защиту от перенапряжений при коммутациях оборудования подстанций.

В качестве средств защиты от перенапряжений рекомендуется применять ОПН, имеющие собственную емкость не более 100 пФ, или искровые разрядники.

6.1.1.5 Устройства присоединения должны обеспечивать достаточную чувствительность к сигналам ЧР и эффективно подавлять напряжение на частотах ниже f_1 и выше f_2 (рисунок 5).

Рекомендуемые значения нижних и верхних граничных частот f_1, f_2 и полосы пропускания Δf следующие:

$$500 \text{ кГц} \leq f_1 \leq 1 \text{ МГц};$$

$$f_1 < f_2 \leq 15 \text{ МГц};$$

$$\Delta f \approx 15 \text{ МГц}.$$

Нижний и верхний предел частот f_1 и f_2 выбирается из условия, при котором проходное полное сопротивление устройства присоединения $Z(f)$ падает не более чем на 6 дБ при максимальном значении полосы пропускания.

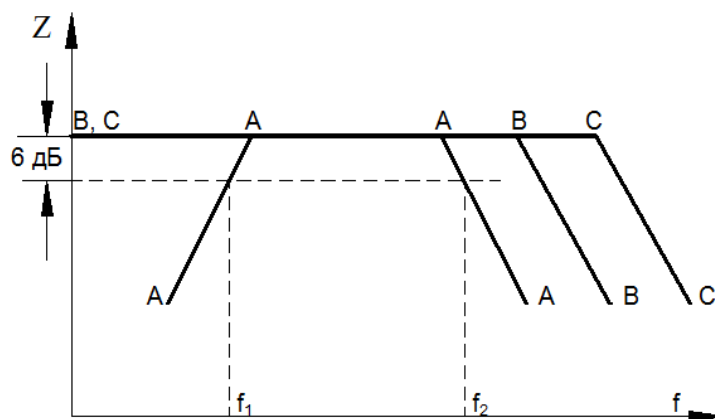


Рисунок 5 Частотная характеристика устройства присоединения

A – полоса пропускания измерительной системы; B – амплитудно-частотный спектр импульса ЧР; C – амплитудно-частотный спектр калибровочного импульса; f_1 – нижняя граничная частота; f_2 – верхняя граничная частота.

6.1.1.6 Изоляция входа устройств присоединения должна испытываться напряжением, значение которого соответствует требованиям, предъявляемым к измерительному выводу вводов ВН и СН силовых трансформаторов в условиях их штатного подсоединения.

6.1.1.7 Климатическое исполнение устройства присоединения должно соответствовать категории УХЛ1 согласно ГОСТ 15150.

6.1.1.8 Степень защиты от внешних атмосферных воздействий должна быть IP63N согласно ГОСТ 14254.

6.1.2 Линия связи

6.1.2.1 Линия связи предназначена для передачи сигналов от устройства присоединения к измерителю ЧР.

6.1.2.2 Линия связи может быть выполнена:

- коаксиальным кабелем;
- экранированным кабелем с «витой парой»;
- оптоволоконным кабелем с устройствами преобразования электрического сигнала в оптический сигнал на входе линии связи и преобразования оптического сигнала в электрический на выходе линии связи.

6.1.2.3 Экраны линии связи и входные элементы измерителя ЧР должны заземляться в одной точке.

6.1.2.4 Климатическое исполнение линии связи должно соответствовать категории УХЛ1 согласно ГОСТ 15150.

6.1.3 Измеритель ЧР

6.1.3.1 Измеритель ЧР производит измерение кажущегося заряда ЧР и время возникновения импульса ЧР. Время возникновения импульса ЧР или фазный угол импульса ЧР используются для определения амплитудно-фазовой характеристики процесса ЧР.

6.1.3.2 Измеритель ЧР должен обеспечивать:

- измерение сигналов ЧР;
- заполнение информационной базы.

6.1.3.3 Измеритель ЧР должен иметь следующие характеристики:

- диапазон измеряемых значений кажущегося заряда q , пКл	от 50 до 20000
- относительная погрешность измерения кажущегося заряда q , %, не более	± 30
- длительность одного цикла регистрации ЧР, $t_{Ц}$, с	от 1 и более
- общая длительность измерения ЧР	не ограничивается
- разрешающее время регистрации импульсов ЧР T_R , мкс, не более	10
- число каналов для одновременного измерения ЧР, не менее	3
- относительная погрешность измерения фазного угла импульса ЧР, %, не более	± 3
- единицы измерения фазного угла импульса ЧР	градусы
- единицы измерения времени возникновения импульса ЧР	мс

6.1.3.4 Программное обеспечение измерителя ЧР должно выполнять функции сбора, обработки результатов измерения, заполнения базы данных в соответствии ГОСТ Р 8.654.

6.1.3.5 Измеритель ЧР должен иметь частотную характеристику, соответствующую п. 6.1.1.5.

6.1.3.6 Питание измерителя ЧР осуществляется от сети 220 В, 127 В или аккумуляторной батареи.

6.1.3.7 Регистрация неоднократно повторяющихся ЧР должна быть выполнена по аналоговой схеме пикового детектирования сигнала ЧР с постоянной времени разряда не более 30 мкс.

Измеритель ЧР должен иметь минимальную разрешающую способность 12 бит. За период напряжения промышленной частоты частота дискретизации ЧР должна быть порядка 600.

Частота повторения импульсов ЧР должна быть не менее 0,2 МГц.

Метрологические характеристики измерителя ЧР должны быть:

- при измерении напряжения – предел относительной погрешности, не более 10 %;
- при измерении фазы напряжения – предел абсолютной погрешности, не более 5 градусов промышленной частоты.

6.1.3.8 Климатическое исполнение измерителя ЧР согласно ГОСТ 15150 должно быть УХЛ1 при установке на открытом воздухе или УХЛ 4.1. при установке в помещениях (шкафу) с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом.

6.1.3.9 Степень защиты оболочки измерителя ЧР согласно ГОСТ 14254 должна быть не менее IP53 при установке на открытом воздухе, или не менее IP40 при установке в помещениях (шкафу). Шкаф должен иметь степень защиты не менее IP 53.

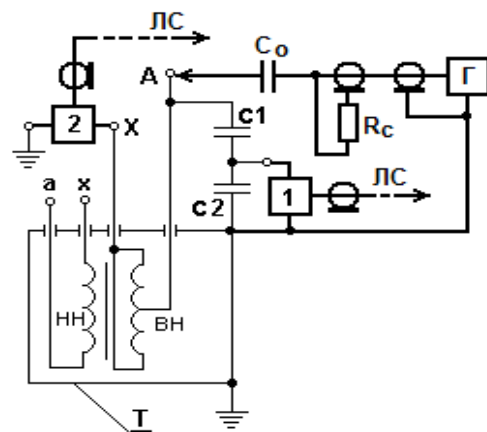
6.1.3.10 Подключение корпуса измерителя ЧР к контуру заземления должно производиться отдельным проводом.

6.1.4 Градуировочное устройство

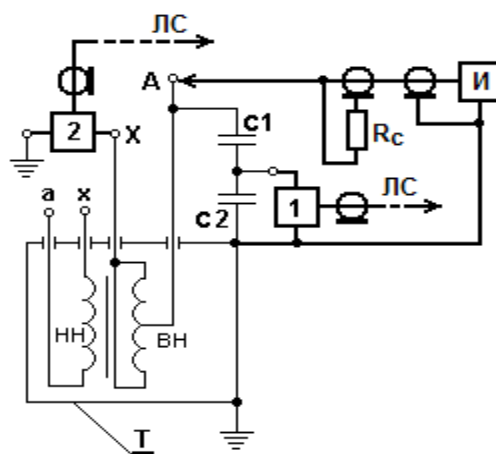
6.1.4.1 Градуировочное устройство предназначено для градуировки измерительной системы.

6.1.4.2 Градуировочные импульсы создаются генератором прямоугольных или экспоненциальных импульсов.

6.1.4.3 Схемы градуировки измерительной системы представлены на рисунке 6.



а



б

Рисунок 6 Схема градуировки измерительной системы

- а – при использовании ступенчатого генератора прямоугольных импульсов;
 - б – при использовании генератора экспоненциальных импульсов.
 - Г – генератор прямоугольных импульсов; Со – градуировочный конденсатор;
 - Rс – согласующее сопротивление; И – генератор экспоненциальных импульсов.
- Остальные обозначения аналогичны обозначениям на рисунке 1.

6.1.4.4 Генератор прямоугольных импульсов должен иметь следующие характеристики:

- амплитудное значение выходного напряжения в режиме нагрузки на согласованный кабель и параллельной емкостной нагрузки до 100 пФ, В от 10 до 300
- длительность фронта импульса, нс, не более 100
- длительность импульса, мкс, не менее 30
- частота следования импульсов, кГц от 1,5 до 20
- относительная погрешность амплитудных значений генерируемых импульсов напряжения, %, не более 15
- питание генератора от сети 220 В, 127 В или аккумуляторной батареи.

Примечание. Предпочтительно применять аккумуляторное питание. При питании генератора от сети целесообразно использовать разделительный трансформатор, обладающий малой паразитной емкостью между обмотками (не более 50 пФ).

6.1.4.5 Генератор экспоненциальных импульсов должен иметь следующие характеристики:

- амплитудное значение выходного напряжения при емкостной нагрузке до 100 пФ, В от 10 до 300
- длительность переднего фронта импульса, $t_{и}$, нс, не более 100
- длительность заднего фронта импульса, нс, не менее 10 $t_{и}$
- частота следования импульсов, кГц от 1,5 до 20.

6.1.5 Периферийные устройства

К периферийным устройствам относятся:

- осциллограф;
- автоматизированное рабочее место;
- принтер.

6.1.5.1 Осциллограф.

Для наблюдения регистрируемых явлений в каждой фазе контролируемого объекта рекомендуется применять четырехканальный цифровой осциллограф с функциями запоминания явлений, сохранения осциллограмм в файл для последующей обработки и вывода на принтер.

Основные характеристики используемого осциллографа:

- полоса измерительных частот, МГц от 0 до 60
- чувствительность, мВ/деление, не менее 10
- относительная погрешность, % $\pm 0,5$

6.1.5.2 Автоматизированное рабочее место

Автоматизированное рабочее место является верхним уровнем стационарной измерительной системы при контроле технического состояния силового трансформаторного оборудования в режиме мониторинга и предназначено для анализа характеристик ЧР, управления режимом измерения, выдачи заключения о состоянии силового трансформаторного оборудования и хранения результатов измерений.

Автоматизированное рабочее место располагается на щите управления и представляет собой компьютер Intel с тактовой частотой не менее 1 ГГц, ОС – Windows 7 Professional, ОЗУ – не менее 2ГБ, HD (жесткий диск) – не менее 200 ГБ, порты – USB-2.

При временной установке измерительной системы на контролируемом объекте может быть использован ноутбук с аналогичными параметрами.

6.1.6 Руководство по эксплуатации измерительной системы

В руководстве по эксплуатации измерительной системы должны быть указаны:

- режимы работы;
- порядок работы.

6.2 Испытания измерительной системы

6.2.1 Испытания измерительной системы включают:

- определение проходного полного сопротивления $Z(f)$ в диапазоне частот ниже f_1 и выше f_2 ;
- определение масштабного коэффициента измерительной системы.

Масштабный коэффициент может регистрироваться измерителем ЧР. Масштабный коэффициент определяется путем подачи от градуировочного устройства на вход измерительной системы различного значения кажущегося заряда ЧР. Величина масштабного коэффициента должна быть установлена в диапазоне от 50 % самых малых до 200 % самых больших значений ЧР за длительность одного цикла регистрации ЧР.

Вариации масштабного коэффициента V измерительной системы вычисляется по формуле:

$$V = \frac{\sigma_{cp}}{X_{cp}} \times 100 \%,$$

где σ_{cp} – среднее квадратичное отклонение измеренных параметров ЧР x_i ,

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - X_{cp})^2},$$

X_{cp} – средняя величина измеренных параметров ЧР x_i ,

$$X_{cp} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/N,$$
$$n = 1, 2, \dots, N.$$

Вариация масштабного коэффициента V измерительной системы не должна превышать $\pm 10 \%$.

6.2.2 Испытания измерительной системы производится не реже одного раза в год.

6.3 Метрологическое обеспечение измерительной системы

Все средства измерения, применяемые в измерительной системе, должны отвечать следующим требованиям в соответствии с [3] п. 6.6.

6.3.1 Средства измерений должны быть внесены в Государственный реестр средств измерений и иметь сертификат об утверждении типа (с приложением – описание типа).

6.3.2 Средства измерений должны находиться в исправном состоянии и условия их эксплуатации должны соответствовать описанию типа и требованиям документации завода-изготовителя на средства измерений.

6.3.3 Метрологические характеристики средств измерений должны быть установлены в соответствии с ГОСТ 8.009, ГОСТ 8.401 и должны в реальных условиях эксплуатации соответствовать нормам точности измерений, установленным в соответствии с требованиями [3] п. 6.2. Методы расчета характеристик погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации приведены в [4].

6.3.4 Конструктивное исполнение средств измерений должно позволять проводить в процессе всего срока их эксплуатации поверку и калибровку.

6.3.5 Определение межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений производится в соответствии с [5 и 6].

6.3.6 Средства измерений, применяемые для измерения параметров, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны быть поверены в установленном в области обеспечения единства измерений порядке (Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений») и иметь действующее свидетельство о поверке и/или оттиск поверительного клейма.

6.3.7 Средства измерений, применяемые для измерения параметров, не относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны:

- для средства измерений, применяемых для измерения параметров, точность измерения которых нормирована в соответствии с [3], п. 6.2;

- быть откалиброваны в установленном в ОАО «ФСК ЕЭС» порядке [7], [8], [9]. В случае идентичности затрат на поверку и калибровку СИ могут быть поверены;

- иметь действующее свидетельство (сертификат) о поверке/калибровке и/или оттиск клейма. Работы по калибровке средств измерений должны быть выполнены аккредитованными в установленном в ОАО «ФСК ЕЭС» порядке ([8], [9], [10]).

6.3.8 При вводе в эксплуатацию на каждое средства измерений составляется эксплуатационный паспорт или карточка учета средства измерений, содержащие основные характеристики средства измерений.

Порядок учета и хранения средств измерений, находящихся в эксплуатации, установлен в [11].

6.3.9 В случае если средства измерений включены в измерительный канал (входящие или не входящие в информационно-измерительную систему), для каждого измерительного канала должен быть оформлен паспорт-протокол. Паспорт - протокол должен отражать основные технические и метрологические характеристики измерительного канала и всех его измерительных компонентов, а также содержать сведения о вторичных цепях и иных устройствах, включенных в измерительные цепи.

Порядок метрологического обеспечения информационно-измерительной системы в ОАО «ФСК ЕЭС» устанавливается в соответствии с [12].

6.3.10 Для средств измерения предоставляется комплект технической документации по метрологическому обеспечению, в который входит:

- действующее свидетельство об утверждении типа средств измерений с приложением (описание типа) - 1 экземпляр на партию однотипных средств измерений;
- действующее свидетельство (сертификат) о поверке/калибровке (не менее половины межповерочного интервала) - для каждого средства измерений;
- заводской паспорт или паспорт-формуляр - для каждого средства измерений.

7 Методика измерения частичных разрядов в маслобарьерной изоляции силового трансформаторного оборудования

7.1 Подготовительные работы

К подготовительным работам относятся:

- определение мест размещения измерительной системы;
- определение фактических условий выполнения измерений, влияющих факторов;
- проверка функционирования измерительной системы без подключения к контролируемому объекту.

7.2 Сборка и подключение к контролируемому объекту измерительной системы

Сборка и подключение к контролируемому объекту измерительной системы производится на отключенном оборудовании и включает:

- подключение проводника заземляющей штанги к баку силового трансформатора и наложение заземляющей штанги на экраны или контактные клеммы вводов ВН и СН;
- подготовку рабочего места для подключения устройств присоединения;
- прокладку измерительных кабелей линии связи;

- установку измерителя ЧР;
- визуальную проверку правильности присоединения составных частей измерительной системы.

7.3 Градуировка измерительной системы

7.3.1 Градуировка измерительной системы производится с целью проверки ее функционирования и установления зависимости амплитуд регистрируемых сигналов от значения кажущегося заряда имитируемых ЧР и определения чувствительности каждого канала регистрации ЧР. Градуировка проводится на полностью собранной схеме измерений согласно требованиям ГОСТ 20074 и стандарту МЭК 60270 [2].

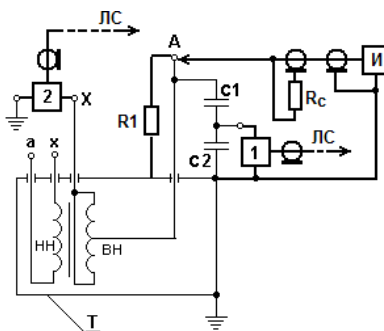
Градуировка проводится путем ввода импульсов тока генератора между выводами обмоток и баком контролируемого объекта.

7.3.2 Градуировка измерительной системы в составе собранной схемы измерений выполняется при отключении контролируемого объекта от напряжения.

7.3.3 Градуировка должна выполняться при одном значении кажущегося заряда имитирующего ЧР в диапазоне ожидаемых величин кажущегося заряда q . Требуемые величины кажущегося заряда должны составлять от 100 пКл до 10 нКл и подаваться ступенями, например, 1 пКл, 10 пКл, 100 пКл. Емкость эталонного конденсатора C_0 не должна быть больше 0,1 входной емкости контролируемого объекта $C_{вх}$. Конденсатор C_0 должен быть расположен близко к высоковольтной клемме контролируемого объекта (не более 200 мм), поскольку паразитная емкость может приводить к недопустимой погрешности.

При использовании генератора ступенчатого напряжения кабель, соединяющий его с конденсатором C_0 , должен иметь нагрузку, равную волновому сопротивлению кабеля, чтобы избежать искажения ступени напряжения. Спуск заземляющего проводника от генератора к баку контролируемого объекта предпочтительно выполнять изолированной металлической лентой.

7.3.4 Перед началом градуировки и измерения уровня помех на экранах вводов ВН и СН производится замена заземляющей штанги на заземлитель с резистором 1 кОм мощностью 10 Вт (рисунок 7).



Обозначения аналогичны обозначениям на рисунке 6б.

Рисунок 7 Схема градуировки измерительной системы на примере однофазного силового трансформатора при использовании резистора R1, имеющего сопротивление 1 кОм и мощность 10 Вт.

7.3.6 Проверка функционирования измерительной системы производится одновременно с процедурой градуировки и заключается в сопоставлении форм сигналов на входе измерителя ЧР и импульсов колебательной формы с частотой их повторения, равной установленной частоте сигналов градуировочного устройства.

7.3.7 Порядок выполнения градуировки:

- поочередно подключить выход градуировочного устройства ко всем вводам обмоток ВН и СН;

- установить выбранное значение напряжения на выходе градуировочного устройства и произвести одновременное измерение сигналов всех устройств присоединения измерителем ЧР и осциллографом, подключенным к входам измерителя ЧР;

- произвести запись полученного градуировочного коэффициента Kq . Градуировочная матрица должна составляться автоматически измерителем ЧР согласно ГОСТ 22756.

7.3.8 После выполнения градуировки отключить от вводов ВН и СН заземляющую штангу и заземлитель с резистором 1 кОм.

7.4 Определение уровня и вида помех в испытательной схеме

7.4.1 Уровень и вид помех определяются на отключенном контролируемом объекте и после включения его под рабочее напряжение.

7.4.2 Регистрация уровня и определение вида помех производятся с помощью осциллографа, подключаемого к входу измерителя ЧР. Амплитуда сигналов помех определяется в кулонах.

Примечание. При работе на отключенном контролируемом объекте определяются наведенные помехи от близко расположенных действующих электроустановок и других источников помех. После включения контролируемого объекта под напряжение определяется суммарный уровень помех от самого объекта (корона на экранах и помехи, приходящие по шинам питания) и помехи от близко расположенных действующих электроустановок и других источников помех.

7.4.3 Определение уровня и вида помех необходимо проводить в режиме мониторинга и в кратковременном режиме комплексных испытаний каждый раз при отключении контролируемого объекта от сети и в тех случаях, когда в контролируемом объекте зарегистрированы ЧР, значения которых превышают на один и более порядок нормированные значения согласно ГОСТ 1516.3, а также, если в процессе измерений изменялись характеристики измерительной системы или существенно изменялись условия измерений (климатические условия, температура контролируемого объекта и др.).

7.5 Измерение и регистрация ЧР

7.5.1 Условия регистрации ЧР:

- минимальное значение регистрируемого кажущегося заряда;
- время регистрации в каждом периоде рабочего напряжения в диапазоне от t_1 до t_2 ;
- длительность одного цикла регистрации, $t_{1ц}$.
- предел относительной погрешности метода измерения ЧР не более $\pm 30\%$.

7.5.2 Измерение и регистрация ЧР может выполняться в следующих режимах:

- кратковременный режим;
- режим мониторинга.

7.5.3 При кратковременном режиме измерения и регистрации ЧР длительность одного цикла $t_{1ц}$ намного меньше интервала времени между циклами измерений ЧР; число циклов измерения ЧР не ограничивается.

7.5.4 В режиме мониторинга регистрация ЧР проводится непрерывно. Возможны паузы. Интервал между измерениями в режиме мониторинга не должен превышать 24 часа.

7.5.5 Рекомендуется одновременное наблюдение на осциллографе формы, частоты и фазы повторения сигналов ЧР с целью экспресс-оценки вида регистрируемых сигналов для принятия решений о возможных изменениях режима регистрации измерителя ЧР.

7.5.6 В случае замены какой-либо части объекта контроля или какого-либо элемента измерительной системы (кроме периферийных устройств) требуется ее испытания согласно п. 6.2. В случае замены какой-либо составной части объекта контроля, измерения ЧР проводятся согласно раздела 7.

8 Обработка результатов, оформление протокола измерений ЧР

8.1 Обработка результатов измерения ЧР

8.1.1 Обработка результатов измерения заключается в:

- отделении ЧР от сигналов помех с использованием способов, изложенных в приложении Б;
- составлении таблицы значений кажущегося заряда q_i и времени его возникновения t_i .

8.1.2 Для определения степени опасности зарегистрированных ЧР используются параметры:

- регулярность ЧР, R_e ;
- кажущийся заряд неоднократно повторяющихся ЧР, q_{Re} .

Примечания.

1 Параметр регулярности R_e используется в определении степени опасности ЧР для изоляции конкретного типа оборудования и находится в диапазоне от 0,01 до 1,0.

2 Нормированные значения кажущегося заряда неоднократно повторяющихся ЧР устанавливаются в нормативно-технической документации на соответствующие типы оборудования.

3 Для неоднократно повторяющихся ЧР параметр R_e устанавливается равным 0,5.

4. Длительность одного цикла регистрации от 1с до 1мин.

8.1.3 Визуализация и интерпретация результатов измерения ЧР приведены в приложении В.

8.2 Оформление протокола измерения ЧР

8.2.1 Рекомендуется оформление результатов измерения производить автоматизировано (путем набора вручную исходных данных условий испытаний или режима работы контролируемого оборудования) или автоматически.

8.2.2 Результаты измерения ЧР должны быть приведены в протоколе в соответствии с требованиями приложения Г.

Акустический метод регистрации ЧР

Для регистрации ЧР применяются датчики преимущественно контактного типа. Датчики устанавливаются на поверхности бака испытуемого силового трансформатора в предполагаемой зоне возникновения ЧР. Участок поверхности бака испытуемого трансформатора перед установкой датчика должен быть тщательно очищен. Датчики должны иметь прижимные устройства, обеспечивающие постоянное усилие прижима контактной поверхности измерительного элемента датчика к поверхности бака испытуемого трансформатора. Измерительные элементы датчиков обладают пьезоэлектрическим или акустооптическим эффектом. Количество датчиков контактного типа, одновременно используемых при измерении, не менее 3.

В качестве линии связи датчиков с измерителем импульсных сигналов используют проводные кабели или оптоволоконные кабели с соответствующими преобразователями электрических сигналов в оптические и оптических сигналов в электрические.

Измеритель импульсных сигналов (регистратор) содержит устройство синхронизации измеренных сигналов с напряжением испытуемого трансформатора.

Методика обнаружения зоны образования ЧР заключается в следующем. Первоначально с помощью одного датчика, располагая его последовательно в разных местах на стенках бака трансформатора, определяется зона повышенной акустической активности (рисунок А.1).

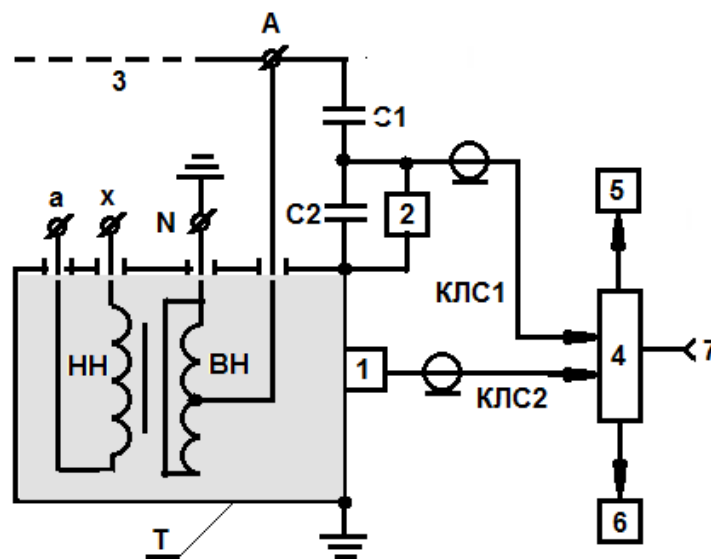


Рисунок А.1

Схемы измерений акустических сигналов ЧР

Т – однофазный силовой трансформатор; ВН, НН – обмотки соответственно высшего и низшего напряжений; А – линейный вывод обмотки ВН; N – вывод нейтрали обмотки ВН; а, х - выводы обмоток НН; С1 – емкость основной изоляции ввода; С2 – емкость изоляции измерительной обкладки относительно фланца ввода; 1 – устройство присоединения (датчик акустических сигналов); 2 – устройство присоединения для синхронизации; КЛС1 и КЛС2 – линия связи; 4 – измеритель ЧР; 5 – принтер; 6 – осциллограф; 7 – сигнальный кабель для оповещения превышения допустимого значения характеристик ЧР.

При нахождении такой зоны в этом месте устанавливаются не менее 3 датчиков одинаковой чувствительности на расстоянии не менее 50 см друг от друга. Измерение уровня акустических сигналов ЧР осуществляется с применением метода трёхмерной акустической локации (с помощью метода триангуляции).

Для решения триангуляционной задачи применяют ЭВМ с соответствующим программным обеспечением. Для практического применения метода акустической диагностики предпочтительно применять специализированные регистраторы, например, «ADM-9», компании ОРИОН, «AR700» компании DIMRUS.

Для измерения акустических сигналов возможно применение схемы с высокочастотной связью датчика с измерителем (рисунок А.2).

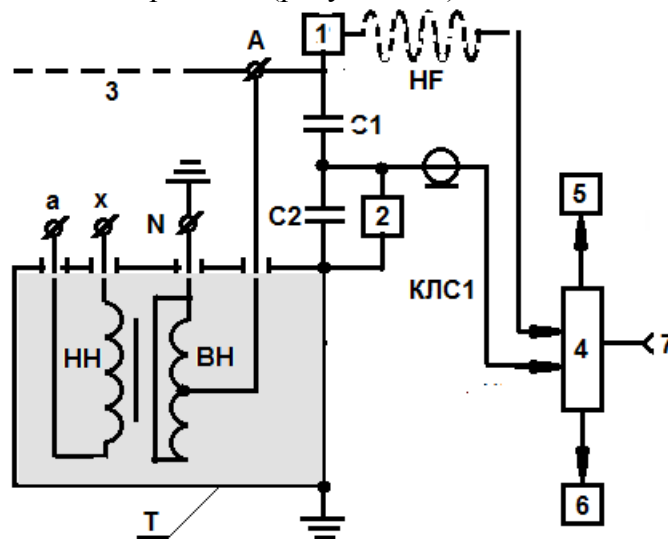


Рисунок А.2

Схемы измерений акустических сигналов ЧР с использованием высокочастотной линии связи

HF – высокочастотная линия связи.

Остальные обозначения соответствуют обозначениям рис. А.1.

Способы отстройки от мешающего действия помех

Б.1 Частотный способ

Частотный способ основан на запрете измерения ЧР в полосах частот, характерных для сигналов, например, тиристорных преобразователей, ВЧ-связи и др.

Данный способ реализуется применением фильтров верхних частот или полосовых фильтров в устройствах присоединения или входных каналах измерителя ЧР.

Б.2 Амплитудно-дифференциальный способ

Способ основан на сравнении амплитудных значений сигналов всех фаз трехфазного контролируемого объекта, измеренных в один и тот же момент времени, и выделением сигнала, имеющего наибольшую амплитуду. Если в изоляции какой-либо фазы возникнет ЧР, то сигнал ЧР в то же время создаст помехи в других фазах, но амплитуда их будет иметь меньшее значение из-за затухания сигнала. Это позволяет учитывать наведенные сигналы.

Б.3 Фазовый способ

Фазовый способ основан на регистрации сигналов в определенных интервалах периода переменного напряжения промышленной частоты. Фазовый способ предусматривает регистрацию ЧР в фазовых «окнах», свободных от помех. Способ наиболее эффективен при селекции помех от короны и тиристорных регуляторов возбуждения генераторов.

Б.4 Селекция по повторяемости ЧР

Селекция по повторяемости ЧР основана на регистрации повторяющихся с определенной последовательностью сигналов. Способ применяется при регистрации неоднократно повторяющихся максимальных значений кажущегося заряда ЧР и исключает регистрацию единичных (или редких) сигналов.

Приложение В (рекомендуемое)

Визуализация и интерпретация результатов измерения ЧР

Визуализация результатов измерения характеристик ЧР производится с помощью осциллографирования или с экрана монитора измерителя ЧР.

В.1 «Нормальный» уровень сигналов помех в измерительной системе, подключенной к контролируемому объекту

На рис. В.1 приведены сигналы помех, имеющие наибольшее амплитудное значение, соответствующее кажущемуся заряду 50 пКл на отключенном силовом трансформаторе в ОРУ 220-500 кВ при отсутствии источников регулярных интенсивных помех.

Сигналы помех чаще всего носят стохастический характер.

Значение сигналов помех $q_{п}$ в виде кажущегося заряда, как правило, составляет 30 – 100 пКл. Минимальный регистрируемый заряд ЧР должен быть $\geq (2\div3) q_{п}$.

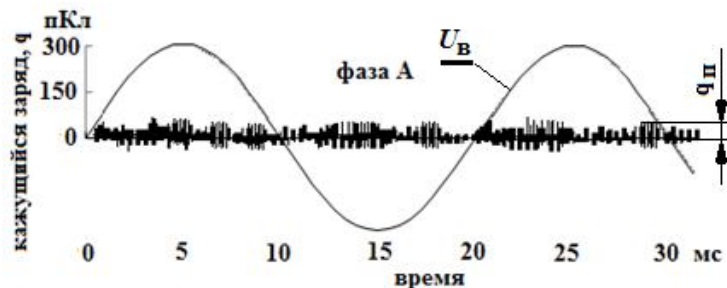


Рисунок В.1

$U_{в}$ - воздействующее на контролируемый объект напряжение

В.2 Внешний вид сигналов ЧР при отсутствии помех

При измерении характеристик ЧР, значение кажущегося заряда которого q_i превышает минимальное значение регистрируемого кажущегося заряда, амплитудно-фазовая характеристика имеет вид, представленный на рисунок В.2.

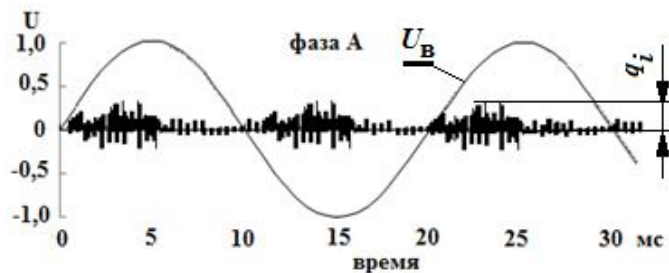


Рисунок В.2

$U_{в}$ - воздействующее на контролируемый объект напряжение;
 q_i - измеренное значение кажущегося заряда ЧР.

Сигналы ЧР сгруппированы во временных интервалах от 1÷2 мс до 5÷6 мс в положительной полуволне воздействующего на контролируемый объект напряжения $U_{в}$ и от 10÷11 мс до 15-16 мс в периоде воздействующего напряжения отрицательной полуволны. Сигналы ЧР, сгруппированные на отрицательной полуволне, могут иметь бóльшие значения по сравнению с сигналами на положительной полуволне.

В.3 Внешний вид сигналов помех от коронных разрядов

Коронные разряды образуются на ошиновке ОРУ 220-500 кВ и экранах вводов силовых трансформаторов. Длительность единичных импульсных сигналов коронных разрядов близки к длительности единичных импульсов ЧР, а амплитудные значения сигналов коронных разрядов могут на один – два порядка превышать амплитудные значения сигналов ЧР. При этом на положительной полуволне воздействующего на изоляцию напряжения U_B сигналы коронных разрядов q_n^+ на один-два порядка больше, чем на отрицательной полуволне q_n^- , рисунок В.3.

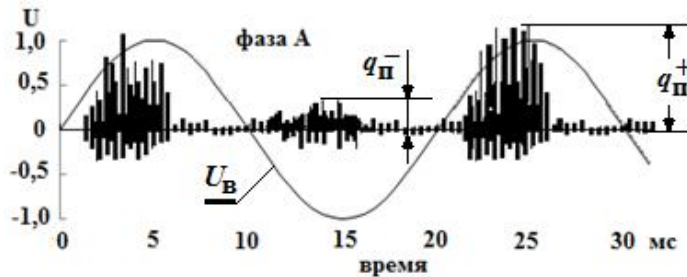


Рисунок В.3

Сигналы помех от коронных разрядов большой интенсивности, так же как и ЧР, наблюдаются на положительных и отрицательных полуволнах вблизи максимального значения напряжения

В.4 Помехи от коронных разрядов на 3-х фазном силовом трансформаторе или группе однофазных силовых трансформаторов

Особенность измеряемых ЧР устройством присоединения ввода, например, фазы А трехфазного силового трансформатора или фазы А группы однофазных трансформаторов при регистрации коронных разрядов заключается в том, что на линейный ввод каждой фазы наводятся сигналы помех от коронных разрядов соседних фаз. В связи с этим происходит регистрация сигналов как коронных разрядов собственной фазы, так и наведенных сигналов коронных разрядов соседних фаз, рисунок В.4.

При одинаковой интенсивности коронных разрядов всех фаз наведенные сигналы от коронных разрядов меньше импульсов короны рассматриваемой фазы в 3 – 5 раз и зависят от конструкции силового трансформатора и расположения его в ОРУ.

Применение измерителя ЧР, использующего пиковое детектирование и реализующего амплитудно-дифференциальный способ, позволяет отстроиться от наведенных сигналов короны и обеспечить измерение ЧР на отрицательной полуволне воздействующего напряжения в интервале $\Delta\varphi$, (Δt).

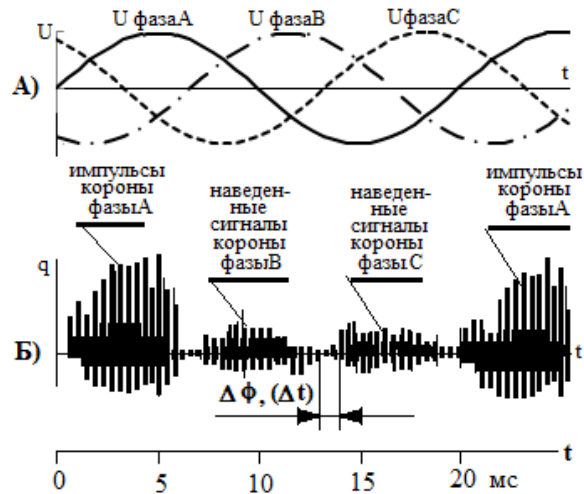


Рисунок В.4

- А) - относительное расположение воздействующего на контролируемый объект трехфазного исполнения напряжения различных фаз;
 Б) - сигналы коронных разрядов, измеряемых устройством присоединения, подключенного к вводу фазы А

В.5. Помехи от тиристорного преобразователя напряжения

Помехи от тиристорных преобразователей, U_{Π} , относятся к виду регулярных помех, практически не меняющих свое фазовое положение на периоде воздействующего на трансформатор напряжения. Обычно тиристорные преобразователи основываются на «схеме Ларионова» и значение временных интервалов между ними составляет $20/6$ мс. Сигналы помех от тиристорного регулятора могут быть сдвинуты на периоде напряжения, но структура их сохраняется, рисунок В.5.

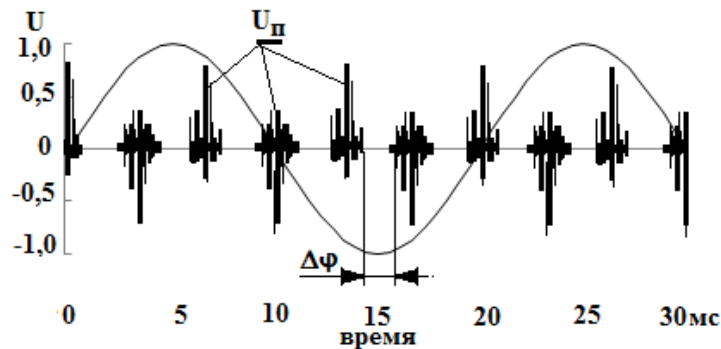


Рисунок В.5

Так как амплитудное значение импульсов помех достаточно велики (в некоторых случаях значения их соответствуют десяткам нанокюлон), измерение ЧР необходимо производить в «фазовом окне» между сигналами помех. «Фазовое окно» $\Delta\phi$ выбирается оператором при определении условий измерения ЧР

В.6 Помехи от высокочастотной связи, радиостанций и радиолокационных устройств

Наиболее распространенными помехами являются сигналы высокочастотной связи. Отстройка от сигналов этих помех производится с помощью частотного способа, реализуемого, как правило, аппаратным путем.

При работе устройств высокочастотной связи вблизи расположенных радиостанций и радиолокационных устройств могут наблюдаться интенсивные сигналы помех.

Эти сигналы носят, как правило, кратковременный характер. Интенсивность их достаточно велика и измерительная система регистрирует их как сигналы в области $(10 \div 100)$ пКл, рисунок В.6.

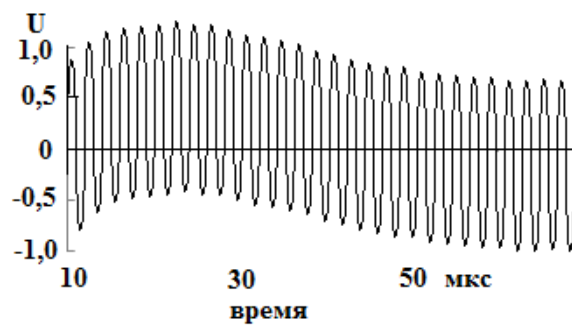


Рисунок В.6

Фрагмент осциллограммы сигналов помех от высокочастотной связи

Требования к протоколу измерения характеристик ЧР

В протокол измерения ЧР должны быть включены:

- наименование и тип контролируемого объекта, заводской номер, общее время нахождения в эксплуатации, завод-изготовитель, диспетчерское наименование. Наименование и типы вводов, заводские номера, значения емкостей основной изоляции вводов и емкостей измерительной обкладок вводов относительно фланца ввода (бака контролируемого объекта), наблюдаемые отклонения значений емкостей за период эксплуатации;
- место проведения измерения (наименование ПС, ОРУ и др.);
- дата проведения измерения ЧР;
- схема измерения ЧР;
- схема установки датчиков измерения ЧР;
- тип измерителя ЧР или его основные характеристики, в том числе полоса пропускания частот;
- градуировочное устройство или генератор импульсов (тип, основные технические и метрологические характеристики, дата последней поверки/калибровки), схема градуировки контролируемого объекта и матрица градуировочных коэффициентов;
- условия в начале и конце измерения ЧР, в том числе климатические (температура, атмосферное давление, относительная влажность) и температура верхних слоев масла контролируемого объекта;
- отклонение питающего напряжения от номинального, а также форма кривой напряжения, несимметрия фаз, отклонение частоты от номинальной;
- степень загрязнения окружающей среды;
- уровень вибрационных воздействий;
- уровень помех в схеме измерения ЧР и вид помех, определенный до начала и после окончания измерения ЧР;
- способы снижения влияния помех на измерения ЧР;
- режим измерения ЧР (кратковременный, мониторинга);
- другие данные, учет которых представляется важным при анализе и формировании заключения о состоянии контролируемого объекта;
- подпись лица, проводившего измерения ЧР.

Библиография

1. МЭК 62478 (2009) Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов электромагнитным и акустическими методами (IEC 62478 High-voltage test techniques: Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods).
2. МЭК 60270 (2000) Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов (IEC 60270 (2000) High-voltage test techniques. Partial discharge measurements).
3. СТО 56947007-29.240.01.195-2014 Типовые технические требования к измерениям, средствам измерений и их метрологическому обеспечению, ОАО «ФСК ЕЭС».
4. РД 50-453-84 МУ Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета.
5. РМГ 74-04 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
6. РД 153-34.0-11.414-98 МУ. Определение оптимальных межкалибровочных интервалов средств измерений, находящихся в эксплуатации на энергопредприятиях. Организация и порядок проведения.
7. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Приказ Минэнерго России от 19.06.2003 № 229.
8. Положение о метрологической службе ОАО «ФСК ЕЭС». Приказ ОАО «ФСК ЕЭС» от 31.10.2014 № 502.
9. Порядок взаимодействия структурных подразделений исполнительного аппарата, филиалов и ДЗО ОАО «ФСК ЕЭС» по метрологическому обеспечению в ЕНЭС. Распоряжение ОАО «ФСК ЕЭС» от 13.04.2010 № 193р.
10. РД 34.11.106-95 Положение о порядке аккредитации метрологических служб энергопредприятий на право проведения калибровочных работ.
11. РД 153-34.0-11.119-01 МУ. Учет и хранение средств измерений, находящихся в эксплуатации на энергопредприятиях электроэнергетики.
12. Положение о порядке проведения метрологического обеспечения в ОАО «ФСК ЕЭС». Общие требования. Приказ ОАО «ФСК ЕЭС» от 14.01.2009 № 2.
13. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями на 13.07.2015).