

УДК
621.315
А 443

МОИ



М.А. Кошелев, М.Д. Рощупкин,
С.И. Хренов, С.К. Цветаев

Акустический контроль разрядных процессов в изоляции

Учебное пособие

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

М.А. Кошелев, М.Д. Рошупкин, С.И. Хренов, С.К. Цветаев

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗОЛЯЦИИ

Учебное пособие
для студентов, обучающихся по направлению
«Электроэнергетика и электротехника»

Под редакцией С.И.Хренова



Москва

Издательский дом



2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время в российской энергетике почти половина генерирующих мощностей выработала свой ресурс. Для обеспечения бесперебойного электроснабжения возрастает роль диагностики энергетического оборудования. Только на основе достоверной оценки состояния оборудования может быть принято решение о возможности его дальнейшей эксплуатации.

В этих условиях важную роль играют оперативные методы определения состояния электрооборудования в месте его установки в рабочем режиме. К числу таких методов относится акустический метод контроля частичных разрядов в изоляции электрооборудования. Благодаря устойчивости к воздействию электромагнитных помех акустический метод получает все большее распространение. Повсеместное внедрение этого метода сдерживается недостатком или отсутствием нормативных документов.

Для практического использования акустического метода необходимо обладать знаниями о звуковых волнах и условиях их распространения в электрооборудовании, о спектральном представлении импульсных сигналов, а также отличать звуки частичных разрядов от механических шумов, которые сопровождают работу электроаппаратов. К сожалению, в настоящее время учебная литература по акустическому методу контроля частичных разрядов в изоляции отсутствует, имеются лишь краткие упоминания в журнальных статьях. Настоящая работа исправляет указанный недостаток.

Материал, изложенный в учебном пособии, предназначен для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика» и входит в курс лекций «Диагностика изоляции оборудования и установок высокого напряжения», а также для специалистов, желающих повысить квалификацию в области диагностики электрооборудования.

Частичными разрядами называют разрядные процессы в изоляции, которые развиваются под действием приложенного напряжения и распространяются лишь на часть изоляционного промежутка [1]. Частичные разряды могут возникать в ослабленных местах изоляции, например в газовых включениях, или в местах резкого усиления электрического поля, в частности у острых краев электродов.

Частичные разряды оказывают разрушающее действие на изоляцию. Под их влиянием происходит эрозия изоляционного материала, изменение и разрушение его структуры, что приводит к старению изоляции, ухудшению ее электрических характеристик. Поэтому необходимо контролировать наличие разрядных процессов в изоляции в течение всего срока эксплуатации оборудования, начиная с заводских испытаний.

Частичные разряды в изоляции сопровождаются разнообразными физическими и химическими явлениями — акустическими волнами, электромагнитным излучением в широкой области частотного спектра, образованием газов из-за химических реакций в канале разряда. Если к изоляции, в которой происходят частичные разряды, подключен измерительный контур, то частичный разряд вызовет переходной процесс в этом контуре. Соответственно, методы обнаружения частичных разрядов базируются на регистрации явлений, которые сопутствуют частичным разрядам.

В настоящей работе рассматривается акустический метод обнаружения частичных разрядов во внутренней изоляции электрооборудования. Акустический метод основан на регистрации и анализе акустических волн, генерируемых частичными разрядами в изоляции электрооборудования в условиях его эксплуатации. Метод позволяет не только обнаружить частичные разряды, но и оценить местоположение их эпицентра. Достоинством акустического метода является то, что он не чувствителен к электромагнитным помехам.

1. АКУСТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ПРИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДАХ

Рассмотрим механизм образования акустического сигнала от частичного разряда в трансформаторном масле.

При протекании тока по каналу частичного разряда происходит выделение энергии, которое приводит к росту давления в канале (рис. 1). Теплообмен между каналом частичного разряда и маслом из-за малой длительности частичного разряда незначителен, поэтому про-

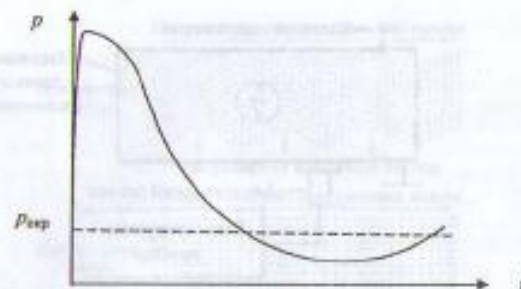


Рис. 1. Характер изменения во времени давления в канале частичного разряда в трансформаторном масле

исходит адиабатическое расширение канала под влиянием внутреннего давления. Расширение канала частичного разряда создает в окружающей несжимаемой среде (трансформаторное масло) волну сжатия. При интенсивном выделении энергии в канале частичного разряда скорость расширения канала может превысить скорость звука в трансформаторном масле. В этом случае волна сжатия превращается в ударную волну.

На послеразрядной стадии, когда прекращается протекание тока в канале частичного разряда, канал превращается в газовый пузырь. Расширение канала при этом продолжается сначала под действием давления, которое повышено по сравнению с давлением в окружающей жидкости, а затем благодаря инерции растекающегося потока трансформаторного масла.

Расширение газового пузыря прекратится, когда давление в нем станет меньше, чем давление в окружающей жидкости $p_{окр}$. С этого момента происходит обратное движение жидкости, давление газа в пузыре вновь возрастает и процесс многократно повторяется, постепенно затухая.

Таким образом, расширение канала на стадии протекания тока частичного разряда и последующие пульсации газового пузыря сопровождаются излучением волн сжатия и разрежения. Период пульсаций газового пузыря при электрических разрядах лежит в пределах от 10^{-4} до 10^{-6} с [2].

Около 50 % энергии, выделяющейся в канале разряда, расходуется на работу, совершаемую каналом при первой волне сжатия [2].

Звук называются механические волны, которые распространяются в упругих средах (твердых, жидких, газообразных) в виде коле-



Рис. 2. Акустический контроль частичных разрядов во внутренней изоляции электроаппарата

баний давления. Канал частичного разряда излучает волны сжатия и разрежения, что приводит к образованию звукового сигнала.

Акустический контроль частичных разрядов во внутренней изоляции основан на регистрации звуковых сигналов от частичных разрядов с помощью акустического датчика, установленного на поверхности электроаппарата (рис. 2). Акустический контроль проводят для силовых трансформаторов и автотрансформаторов, реакторов, измерительных трансформаторов, а также для элегазовых распределителей и кабельных муфт.

Акустический датчик устанавливается на заземленных частях электроаппарата, например на баке силового трансформатора. Измерения проводят в режиме нагрузки и в режиме холостого хода. Сигнал с акустического датчика передается на регистрирующий прибор по соединительному кабелю.

У некоторых электроаппаратов, например трансформаторов тока типа ТФРМ 330—750 кВ, бак находится под высоким напряжением. В этом случае для акустического контроля следует использовать специальные акустические датчики [3], которые работают под высоким потенциалом и передают данные измерений звуковых сигналов по радиоканалу.

Прежде чем перейти к описанию сути акустического контроля, рассмотрим понятия и термины акустики, которые используются в данной работе.

2. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АКУСТИКЕ

Звуковые волны классифицируются в соответствии с их частотой: волны с частотой менее 20 Гц называются инфразвуком;



Рис. 3. Продольные и поперечные звуковые волны

волны, обладающие частотой от 20 Гц до 20 кГц, относятся к области слышимого звука;

звуковые волны с частотой, превышающей 20 кГц, называются ультразвуком;

с частотой более 10 ГГц, — гиперзвуком.

Звуковые волны подразделяются по типам в зависимости от условий возбуждения и распространения.

Продольные волны — это волны, в которых смещение частиц среды происходит вдоль линии, которая совпадает с направлением распространения волны (рис. 3). Продольные волны могут распространяться в твердых, жидких и газообразных телах. Например, вибрация полости канала частичного разряда порождает в трансформаторном масле продольную волну, состоящую из участков разрежения и сжатия.

В поперечной волне частицы среды совершают колебания перпендикулярно направлению движения волны. К поперечным волнам относятся, например, волны, возникающие в натянутой струне при воздействии на струну в направлении, перпендикулярном ее оси. Следует отметить, что поперечные волны существуют только в твердых телах. В газах и жидкостях поперечные волны отсутствуют — исключение составляют вязкие смазочные масла, в которых поперечная волна способна пройти расстояние около одного миллиметра.

В одном и том же веществе скорость поперечных волн примерно в два раза меньше, чем у продольных волн (табл. 1).

Поскольку звук представляет собой процесс механических колебаний и волн, многие акустические величины измеряются в соответствующих «механических» единицах: длина волны, амплитуда, частота, период, скорость и т.п.

Таблица 1

Скорость звуковых волн в некоторых средах

Материал	Плотность, кг/м ³	Скорость продольной волны, м/с	Скорость поперечной волны, м/с
Воздух	0,1	330	-
Вода	1000	1480	-
Моторное масло	870	1740	-
Оргстекло	1180	2730	1430
Полиэтилен	940	2340	925
Фарфор	2460	5600	3500
Алюминий	2700	6320	3130
Латунь	8100	4430	2120
Сталь низколегированная	7850	5940	3250

Звуковое давление — это переменная часть давления, которая возникает в среде при прохождении звуковой волны [4]. Звуковое давление измеряется в паскалях (Па). Один паскаль соответствует единице давления один ньютон на квадратный метр (Н/м²).

Интенсивность (сила) звука измеряется в ваттах на квадратный метр и представляет собой среднюю по времени энергию, переносимую звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению движения волны, в единицу времени.

Кроме системных единиц в акустике употребляется внесистемная единица — децибел (дБ). Например, в децибелах можно измерять уровень интенсивности звука в воздухе относительно интенсивности I_0 , которая соответствует порогу слышимости человеческого уха

$$I_{\text{дБ}} = 10 \cdot \lg(I/I_0)$$

где $I_{\text{дБ}}$ — уровень интенсивности звука в дБ, I — интенсивность звука в Вт/м².

Так, человеческому шепоту ($I = 10^{-12}$ Вт/м²) соответствует уровень интенсивности звука равный ноль децибел, а шуму мотора самолета ($I = 10^{-2}$ Вт/м²) — сто децибел.

Колебания, при которых физическая величина изменяется с течением времени по синусоидальному закону, называются **гармоническими колебаниями**

$$x = A \sin(\omega t + \phi),$$

где x — значение колеблющейся величины в момент времени t (например, скорость частиц среды), A — амплитуда колебаний, ω — круговая частота колебаний, $(\omega t + \phi)$ — фаза колебаний, ϕ — начальная фаза колебаний.

Любое негармоническое колебание можно представить в виде спектра гармонических колебаний.

Спектр колебаний — это совокупность гармонических колебаний (гармоник) различных частот и амплитуд, на которые может быть разложено сложное колебательное движение.

Если колебательное волновое движение описывается периодической функцией $x_{\text{период}}(t)$ с частотой ω , то эту функцию можно представить в виде ряда гармонических функций с частотами $k\omega$, кратными основной частоте. Этот ряд называется рядом Фурье

$$x_{\text{период}}(t) = x_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega t + \phi_k),$$

где x_0 — постоянная составляющая, A_k — амплитуды гармонических функций, t — время, ω — круговая частота, k — номер гармоники, ϕ_k — начальная фаза гармоники с номером k .

В общем случае спектр колебаний содержит бесконечный ряд гармоник, амплитуды которых убывают с увеличением номера гармоники.

Спектр колебаний может быть представлен в виде амплитудно-частотной диаграммы, на которой наносят амплитуду A_k членов ряда Фурье на соответствующих частотах в виде вертикальных линий. Спектр периодического волнового процесса является линейчатый (рис. 4).

Ряд Фурье позволяет представить в частотной области периодические функции времени. Однако часто приходится иметь дело с непериодическими функциями, которые характерны, например, для импульсов давления, электрических разрядов, переходных процессов. Непериодические процессы также могут быть представлены совокупностью гармонических колебаний. Для вычисления спектра непериодической функции времени $x_{\text{непер}}(t)$ используют **интегральное преобразование Фурье**

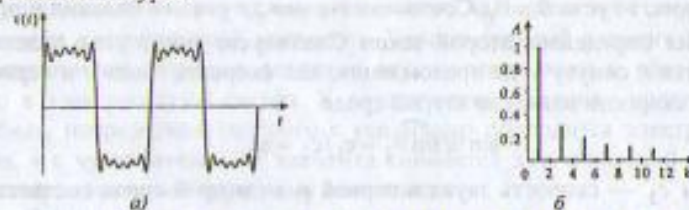


Рис. 4. График периодической функции (а) и ее линейчатый спектр (б)

$$x_{\text{непер}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где $A(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_{\text{непер}}(t) e^{-j\omega t} dt.$

Как видно из интегрального преобразования Фурье, спектр непериодической функции содержит все частоты от $-\infty$ до $+\infty$, т.е. является сплошным. В качестве примера сплошного спектра на рис. 5 представлен спектр одиночного прямоугольного импульса.

Волна при падении на плоскую границу раздела двух разных сред частично отражается, частично проходит в другую среду, но меняет при этом направление распространения — преломляется (рис. 6).

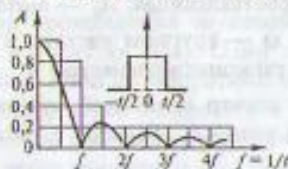


Рис. 5. Спектр одиночного прямоугольного импульса



Рис. 6. Отражение и преломление волн на плоской границе двух сред

Согласно первому закону Снеллиуса, угол падения равен углу отражения, то есть $\theta = \theta_1$. Соотношение между углами падения и преломления определяет второй закон Снеллиуса: синус угла падения относится к синусу угла преломления, как скорость волны в первой среде к скорости волны во второй среде

$$\sin \theta / \sin \theta_2 = c_1 / c_2 = n,$$

где c_1 и c_2 — скорость звука в первой и во второй среде соответственно, n — показатель преломления.

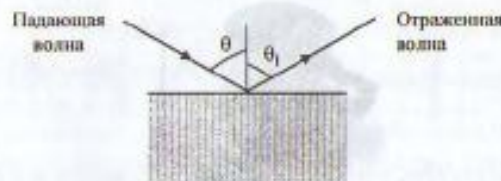


Рис. 7. Полное внутреннее отражение волны

С увеличением угла падения θ происходит увеличение угла преломления θ_2 . Если скорость звука в первой среде c_1 меньше, чем скорость звука во второй среде c_2 , то при определенном угле падения угол преломления становится равным 90° (критический угол). Если угол преломления превышает 90° , то падающая волна полностью отражается и перехода энергии во вторую среду не происходит (рис. 7).

Это явление называется *полным внутренним отражением*. Полное внутреннее отражение происходит при выполнении условия $(c_2/c_1) \sin \theta = 1$.

3. ОБНАРУЖЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ ЧАСТИЧНОГО РАЗРЯДА

Как было упомянуто выше, период пульсаций газовой полости при электрических разрядах составляет от 10^{-4} до 10^{-6} с. Это указывает на то, что для обнаружения акустических сигналов от частичных разрядов целесообразно использовать акустические датчики, работающие в ультразвуковом диапазоне частот.

Акустический датчик должен воспринимать звуковое давление акустических волн, генерируемых частичными разрядами, и преобразовывать его в электрический сигнал.

Ультразвуковой акустический датчик (рис. 8) состоит из стального герметичного корпуса, внутри которого находится чувствительный элемент и электронный усилитель. Чувствительный элемент датчика воспринимает звуковое давление акустических волн и преобразует его в электрический сигнал. К акустическому датчику подключают кабель, посредством которого к усилителю подводится электропитание, а с чувствительного элемента снимается электрический сигнал, пропорциональный звуковому давлению.

Принцип действия чувствительного элемента акустического датчика основан на пьезоэффекте. Сущность пьезоэффекта заключается в



Рис. 8. Ультразвуковой акустический датчик

следующем. Если деформировать некоторые кристаллы (кварц, сегнетова соль, турмалин), то на их гранях появляются электрические заряды, что связано с изменением дипольного момента элементарной ячейки кристаллической решетки в результате смещения зарядов под действием механического напряжения. Это явление называется прямым пьезоэффектом.

Встречающиеся в природных условиях пьезоэлектрические кристаллы дороги, поэтому кристаллы выращивают искусственно. Современные пьезоматериалы на основе титаната бария и цирконата титаната свинца гораздо дешевле и эффективнее природных пьезоэлектрических кристаллов. Из искусственных пьезокерамических материалов изготавливают пьезоэлементы — плоские пластины, покрытые с обеих сторон металлическими электродами, которые используются в качестве чувствительного элемента в акустических датчиках.

Современные ультразвуковые акустические датчики для контроля разрядных процессов в изоляции обладают высокой чувствительностью, они способны регистрировать звуковое давление порядка 10^{-2} Па. Этого достаточно для обнаружения частичных разрядов интенсивностью, измеряемой единицами пКл. Акустические датчики нечувствительны к высокочастотным электромагнитным помехам, возникающим при коронных разрядах на ошиновке и элементах конструкций электрооборудования. Рабочий частотный диапазон датчиков находится, как правило, в пределах от 20 кГц до 350 кГц.

Звуковые волны в электроаппаратах могут иметь происхождение, не связанное с частичными разрядами. Будем называть эти волны шумами. Шум трансформатора вызывается вибрацией активной части, а также вентиляторами и маслонасосами. Другим источником шума трансформатора является обмотка, проводники которой вибрируют под действием сил взаимного притяжения при протекании в них переменного тока в режиме нагрузки. Магнитопровод и катушки силового трансформатора в основном вибрируют на частоте 100 Гц, но

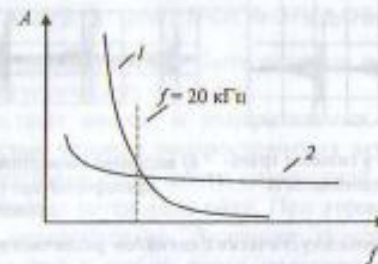


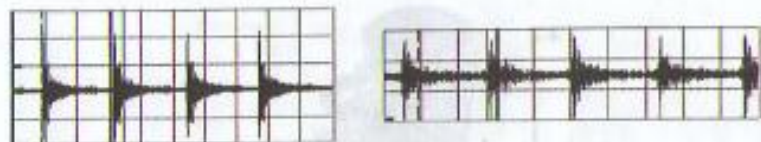
Рис. 9. Спектр акустического сигнала механического шума 1 и акустического сигнала частичного разряда 2

процессы взаимного перемещения соседних элементов с трением создают звуковые волны и на более высоких частотах вплоть до ультразвука. Характерным признаком таких звуков является их спектр, в котором преобладают низкие частоты от 10 до 60 кГц.

Следует отметить, что акустические сигналы шумов и акустические сигналы от частичных разрядов синхронизированы с частотой рабочего напряжения. Отличить акустические сигналы частичных разрядов от механических шумов можно по спектральным характеристикам [5]. Стилизованная амплитудно-частотная характеристика механического шума и акустического сигнала от частичного разряда приведена на рис. 9.

В области слышимых человеческим ухом звуковых частот от 20 Гц до 20 кГц амплитуда звуковых помех больше амплитуды акустических сигналов частичных разрядов. В ближнем ультразвуковом диапазоне — от 20 до 100 кГц — с ростом частоты акустические сигналы механических шумов резко затухают и становятся меньше акустических сигналов частичных разрядов. Этот факт и позволяет различать акустические сигналы по их частотному спектру.

На рис. 10 представлены осциллограммы двух акустических сигналов, которые получены при обследовании силового трансформатора. Измерения проводились акустическим датчиком, имеющим диапазон рабочих частот от 60 до 130 кГц. Одна осциллограмма соответствует частичным разрядам в изоляции силового трансформатора, другая акустическому сигналу механического происхождения — вибрации незакрепленной гайки. По виду осциллограмм невозможно определить происхождение акустического сигнала.



а) частичные разряды в силовом трансформаторе (чувствительность 500 мВ/дел) б) вибрация незакрепленной гайки в силовом трансформаторе (чувствительность 20 мВ/дел)

Рис. 10. Осциллограммы акустических сигналов различного происхождения, развертка 4 мс/дел

Идентифицировать происхождение акустических сигналов можно по их спектрам, которые представлены на рис. 11.

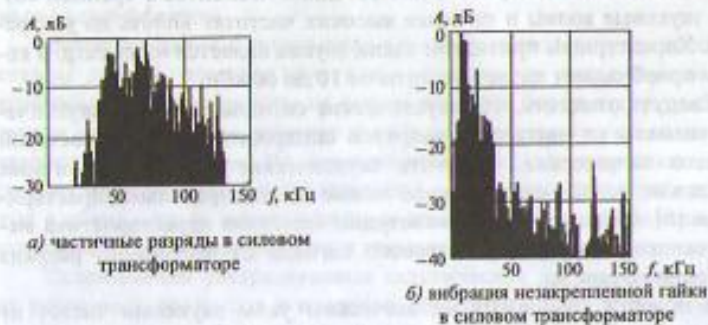


Рис. 11. Спектральные характеристики сигналов, представленных на рис. 10

Поскольку в ближнем ультразвуковом диапазоне с ростом частоты амплитуда акустического сигнала механического шума резко затухает, то спектр этого сигнала будет низкочастотным. То есть амплитуда спектра смещена в сторону более низких частот по отношению к диапазону рабочих частот акустического датчика (рис. 11, б). Спектр акустического сигнала частичного разряда по сравнению со спектром сигнала механического происхождения будет высокочастотным. То есть амплитуда частотного спектра соответствующая максимуму, будет находиться внутри диапазона рабочих частот акустического датчика (рис. 11, а).

4. УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

В электрооборудовании могут быть простые и сложные условия распространения акустических сигналов.

В высоковольтных вводах и измерительных трансформаторах имеют место простые условия распространения акустических сигналов — звук распространяется в почти однородной среде на расстояния порядка нескольких сотен длин волн. При этом затухание акустического сигнала незначительно. Значение акустического сигнала практически одинаково в любой точке поверхности. Поэтому для контроля частичных разрядов в изоляции достаточно провести измерения в одном месте, например, на фланце ввода или в любой точке поверхности бака измерительного трансформатора.

В силовых трансформаторах, элегазовом оборудовании — сложные условия распространения акустического сигнала. На показания акустического датчика большое влияние оказывает место возникновения частичных разрядов и условия прохождения звуковых сигналов. Источник акустического сигнала может находиться в глубине оборудования. В этом случае ультразвук проходит ряд преград и значительно затухает. При акустическом контроле электрооборудования со сложными условиями распространения звука необходимо перемещать датчик по поверхности электроаппарата для поиска области с максимальным сигналом. Так, при обследовании силового трансформатора [6] его бак по периметру и высоте разбивается на участки площадью 0,3—0,5 м². В центр каждого участка устанавливается переносной акустический датчик.

При прохождении акустической волны из одной среды в другую через плоскую границу часть энергии волны проходит через границу, а часть отражается обратно, как показано на рис. 13.

Для количественной оценки интенсивности отраженной волны используют коэффициент отражения — отношение интенсивности отраженной волны к интенсивности падающей волны. В табл. 2 приведены значения коэффициента отражения звуковых волн на границе раздела трансформаторного масла с различными материалами.

Из приведенных данных видно, что при прохождении звуковой волны из трансформаторного масла в стальную стенку бака трансформатора 89 % звуковой энергии отражается от стенки бака и только 11 % энергии падающей волны проходит в стенку бака.



Рис. 13 Прохождение акустической волны через плоскую границу двух сред

Рассмотрим, как влияет траектория распространения звуковой волны от частичного разряда в трансформаторном масле на показания акустического датчика, расположенного на стенке бака трансформатора рис. 14. Акустический сигнал от частичного разряда в точке В приходит к датчику разными путями — прямой волной в масле ВС, а также по маслу до ближайшей точки бака ВD, а затем в стенке бака DC продольными и поперечными волнами.

Таблица 2
Коэффициент отражения звуковых волн на границе раздела трансформаторного масла с различными материалами

Материал	Коэффициент отражения
Сталь	0.89
Алюминий	0.74
Медь	0.88
Латунь	0.97
Бакелит	0.23
Кварц	0.71
Вода	0.006

В общем случае сигнал акустического датчика (рис. 15) будет содержать помимо сигнала прямой волны 3 сигнала продольной 1 и поперечной 2 волн. Причем волны, распространяющихся в металлической стенке бака, достигнут акустического датчика раньше, чем сигнал прямой волны, поскольку звуковые волны в металлической стенке бака распространяются быстрее, чем в трансформаторном масле.

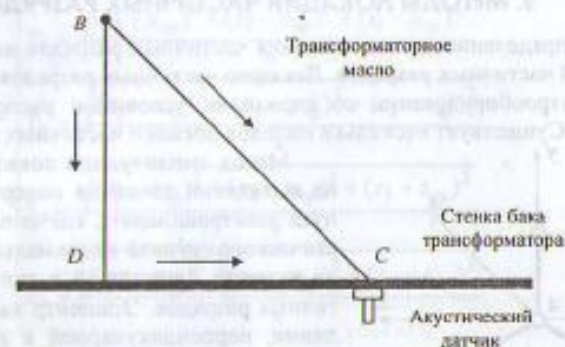


Рис. 14. Распространение акустических волн от частичного разряда в трансформаторе

Кроме того, в акустическом сигнале могут появиться составляющие, обусловленные отражением акустических волн от различных элементов конструкций [5].

Осциллограмма акустического сигнала от частичного разряда в трансформаторе приведена на рис. 16.

Элементы акустического сигнала на стилизованной осциллограмме рис. 15 можно обнаружить и на осциллограмме акустического сигнала, зарегистрированного на баке работающего трансформатора рис. 16.

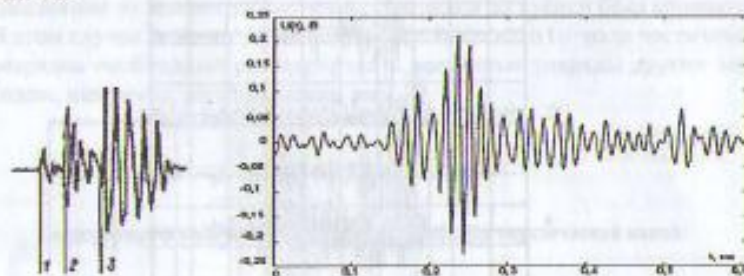


Рис. 15. Составляющие акустического сигнала частичного разряда: 1 — начало продольной волны, 2 — начало поперечной волны, 3 — начало прямой волны

Рис. 16. Акустический сигнал частичного разряда в трансформаторе

5. МЕТОДЫ ЛОКАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Определение местоположения частичных разрядов называют локацией частичных разрядов. Локацию частичных разрядов производят в электрооборудовании со сложными условиями распространения звука. Существует несколько методов локации частичных разрядов.

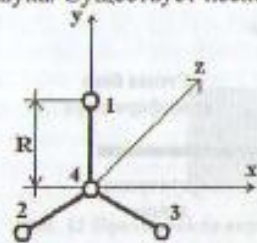


Рис. 17. Расположение датчиков 1, 2, 3, 4 в акустической антенне

Метод амплитудной локации основан на выявлении точки на поверхности корпуса электроаппарата, где амплитуда акустического сигнала максимальна. Эта точка является ближайшей к эпицентру частичных разрядов. Эпицентр находится на линии, перпендикулярной к поверхности корпуса в найденной точке. Приблизительно оценить местоположение дефекта можно исходя из конструкции объекта.

В методе трехмерной акустической локации для определения эпицентра частичных разрядов используется акустическая антенна, состоящая из четырех датчиков рис. 17.

Положение центрального датчика 4 в акустической антенне определяют методом амплитудной локации. Расстояние от центрального датчика до соседних датчиков составляет около 10 см. Осциллограммы сигналов датчиков в акустической антенне представлены на рис. 18.

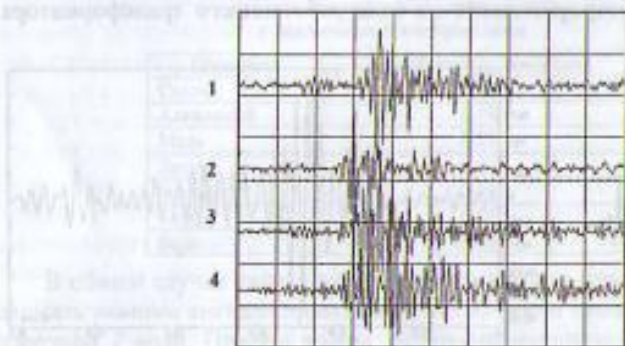


Рис. 18. Осциллограммы сигналов датчиков акустической антенны (развертка 100 мкс/дел, чувствительность 100 мВ/дел для датчиков 1, 2, 3 и 300 мВ/дел для датчика 4)

Система уравнений для определения координат эпицентра частичных разрядов ($x_{чр}$, $y_{чр}$, $z_{чр}$) имеет вид:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\sqrt{(x_1 - x_{чр})^2 + (y_1 - y_{чр})^2 + (z_1 - z_{чр})^2}}{v} \\ T_2 = \frac{\sqrt{(x_2 - x_{чр})^2 + (y_2 - y_{чр})^2 + (z_2 - z_{чр})^2}}{v} \\ T_3 = \frac{\sqrt{(x_3 - x_{чр})^2 + (y_3 - y_{чр})^2 + (z_3 - z_{чр})^2}}{v} \\ T_4 = \frac{\sqrt{(x_4 - x_{чр})^2 + (y_4 - y_{чр})^2 + (z_4 - z_{чр})^2}}{v} \end{cases}$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 — времена распространения акустической волны от эпицентра до датчиков 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Исключим неизвестные T_1, T_2, T_3, T_4 путем вычитания уравнений. Получим систему трех уравнений с тремя неизвестными $x_{чр}, y_{чр}, z_{чр}$:

$$\begin{cases} \Delta T_{21} = T_2 - T_1 \\ \Delta T_{23} = T_2 - T_3 \\ \Delta T_{24} = T_2 - T_4 \end{cases}$$

Решив эту систему уравнений получим координаты эпицентра частичных разрядов.

Существует еще один метод локации, который позволяет оценить расстояние от эпицентра частичных разрядов до стенки бака аппарата. В этом случае помимо регистрации акустического сигнала частичных разрядов необходимо регистрировать частичные разряды другим методом, например, электрическим рис. 19.

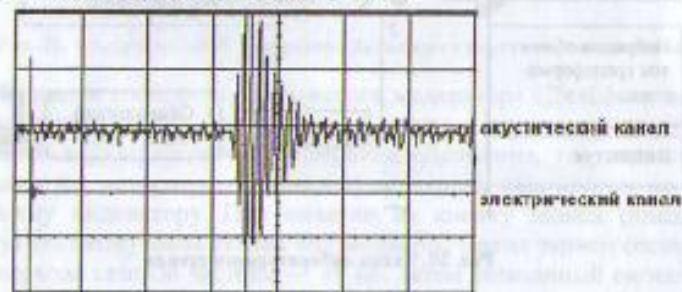


Рис. 19. Осциллограммы электрического и акустического сигнала от частичного разряда (развертка 4 мс/дел, чувствительность 100 мВ/дел)

Определяют время Δt от момента возникновения электрического импульса до момента возникновения акустического импульса. Расстояние от акустического датчика до эпицентра частичных разрядов равно произведению времени Δt на скорость звука.

6. ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД

Описание стенда

Схема лабораторного стенда представлена на рис. 20.

На ограждении испытательного поля стенда установлена заземленная металлическая плоскость размером 60×80 см, которая имитирует часть боковой поверхности бака силового трансформатора. На плоскости со стороны испытательного поля стенда расположены источники акустических сигналов — электрический разряд, вибростук, шум двигателя, вибрацию обмоток трансформатора.

Включение того или иного акустического сигнала производится соответствующим тумблером на пульте управления. Прием звуковых сигналов в ультразвуковом диапазоне частот осуществляется акустическим датчиком, который может быть установлен в разных точках на внешней поверхности плоскости. Технические характеристики акустического датчика представлены в табл. 3.



Рис. 20. Схема лабораторного стенда

Таблица 3

Технические характеристики акустического датчика

Диапазон рабочих частот	60—130 кГц
Пороговая чувствительность (минимально обнаружимый сигнал)	не менее 0,04 Па
Шум усилителя, приведенный ко входу	менее 2 мкВ

Акустический датчик герметичен, не чувствителен к вибрации и высокочастотным электромагнитным помехам, функционирует в диапазоне температур от -10 до 80 °С.

Электрический сигнал с акустического датчика может передаваться либо на ультразвуковой модератор «Дельфин» (положение переключателя 1), либо через усилитель к осциллографу АСК-3117 (положение переключателя 2).

На рис. 21 представлен ультразвуковой модератор «Дельфин» с наушниками и акустический датчик с магнитным креплением.



Рис. 21. Ультразвуковой модератор «Дельфин» с акустическим датчиком

Принцип работы ультразвукового модератора «Дельфин» заключается в следующем. Электрический сигнал с акустического датчика подается в ультразвуковой модератор «Дельфин», где этот сигнал усиливается, детектируется, амплитуда сигнала оценивается по пятиуровневому индикатору. При нажатии на кнопку записи (находится сбоку) ультразвуковой сигнал запоминается. Время записи составляет два периода сетевой частоты — 40 мс. Затем записанный сигнал воспроизводится с замедлением в сто раз. При таком преобразовании ультразвуковой диапазон рабочих частот акустического датчика 60—

130 кГц переводится в слышимый диапазон 0,6—1,3 кГц. Сигнал можно прослушать с помощью наушников, время воспроизведения записи — 4 секунды. Воспроизведение повторяется циклически до следующего нажатия кнопки записи, либо до отключения.

Ультразвуковой сигнал, который благодаря замедлению становится воспринимаемым на слух, получил название слухового образа ультразвукового акустического сигнала. Слуховой образ акустического сигнала от частичного разряда существенно отличается от слухового образа акустического шума. Эти сигналы можно различить на слух.

В ультразвуковом модераторе «Дельфин» предусмотрена возможность передачи записанной информации на компьютер или магнитофон для ее хранения, дальнейшей обработки и документирования.

Работоспособность акустического датчика и ультразвукового модератора следует проверять до и после проведения измерений. Для этого рекомендуется использовать пьезозажигалку. Расстояние между пьезозажигалкой и акустическим датчиком должна составлять десять метров, при этом рабочая поверхность акустического датчика должна быть обращена к пьезозажигалке. При электрических разрядах в пьезозажигалке на ультразвуковом модераторе «Дельфин» должен светиться первый индикатор при положении регулятора усиления в зеленом секторе.

Электрический сигнал с акустического датчика может быть подан через усилитель на измерительный канал осциллографа АСК-3107 (рис. 22).

Технические данные осциллографа АСК-3107 приведены в табл. 4.

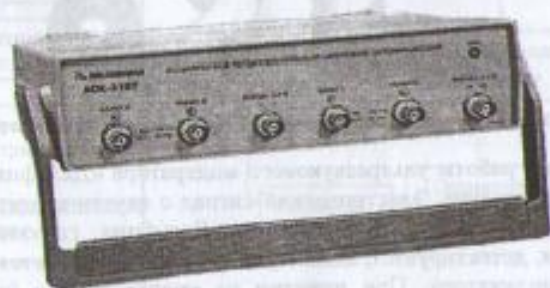


Рис. 22. Осциллограф цифровой запоминающий четырехканальный АСК-3107

Таблица 4

Технические характеристики осциллографа АСК-3107

Количество каналов с независимым АЦП	4
Максимальное число выборок на канал	131072
Максимальная частота дискретизации	100 МГц
Число отображаемых точек на экране	100 ... 131072
Напряжение питания	220 В ± 10%, 50 Гц
Условия эксплуатации:	
температура	+5... +40 °С
относительная влажность воздуха	не более 80 % при 25 °С
атмосферное давление	от 630 до 800 мм рт. ст.

Осциллограф АСК-3107 работает только совместно с компьютером. Он снабжен программным обеспечением для математической обработки сигналов. Имеющееся программное обеспечение позволяет на основе быстрого преобразования Фурье рассчитывать спектр измеренного акустического сигнала.

Задание на измерения

1. С помощью ультразвукового модератора «Дельфин» прослушать слуховые образы акустических сигналов.
2. Провести локацию электрического разряда по амплитуде акустического сигнала.
3. Снять осциллограмму акустического сигнала от электрического разряда совместно с электрическим сигналом от антенны. Определить расстояние от источника электрических разрядов до плоскости.
4. Снять осциллограммы акустических сигналов от различных акустических источников, определить их частотный спектр. Сделать вывод о происхождении акустического сигнала.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое частичный разряд?
2. Какими физическими и химическими явлениями сопровождается частичный разряд?
3. Назовите методы измерения частичных разрядов.
4. Какими преимуществами обладает акустический метод по сравнению с другими методами?
5. Какие недостатки свойственны акустическому методу?
6. Плоская звуковая волна в трансформаторном масле падает под некоторым углом на стальную стенку бака трансформатора. При каких углах падения в стенке бака не будут возникать продольные и поперечные волны?
7. Дайте характеристику методам локации частичных разрядов.

8. Сигнал от частичного разряда фиксируется акустическим датчиком и антенной. Разность времени прихода акустической волны и электрического сигнала составляет 20 мкс. Найти расстояние от места частичного разряда до акустического датчика при условии, что а) разряд распространяется в трансформаторном масле, б) разряд распространяется в воздухе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И.М. Бортыш и др.; отв. ред. И.П. Верещагин. - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — 703 с.
2. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде / М.: Наука, 1971. — 325 с.
3. Сماعيلов В.В., Рощупкин М.Д., Цветаев С.К. Акустические регистраторы разрядных процессов в изоляции трансформаторов тока с радиоканалом // ЭЛЕКТРО. 2007. №2. С. 34—37.
4. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / отв. ред. И.П. Галамина. — М.: Советская энциклопедия, 1979. — 400 с.
5. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П.М. Сви. — М.: Энергоиздат, 1992. — 235 с.
6. Хренов С.И., Цветаев С.К., Рощупкин М.Д. Акустическая диагностика электрооборудования на наличие разрядных процессов: статья // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем». 2010. Т. 2. С. 58—61.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
1. Акустическая активность при частичных разрядах	4
2. Некоторые понятия и термины, используемые в акустике	6
3. Обнаружение акустических сигналов от частичного разряда	11
4. Условия распространения акустических сигналов в электрооборудовании	15
5. Методы локализации частичных разрядов	18
6. Лабораторный стенд	20
7. Контрольные вопросы	23
Библиографический список	24