

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЛОКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Долин А.П., канд. техн. наук,  
Цветаев С.К., канд. физ.-мат. наук  
НПО «Техносервис-Электро» (Россия)  
Поночко Ч., Попович А.,  
Энергетическая компания «Электроисток» (Сербия)

Акустическое обследование высоковольтного оборудования позволяет обнаружить источники частичных и других электрических разрядов. Электрические разряды в оборудовании выявляются также электрическими измерениями. Достаточно точное заключение о наличии ЧР в бумажно-масляной изоляции позволяет получить хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ), который проводится в соответствии с рекомендациями МЭК 599 (IEC 60599) [1] и РД 153-34.0-46.302-00 [2]. Акустическая диагностика отличается от последних двух методов большей оперативностью и, как правило, проводится без отключения оборудования. Кроме того, на основании этого метода разработаны весьма экономичные системы мониторинга энергооборудования.

Метод основан на локации акустических сигналов от электрических разрядов с помощью ультразвуковых датчиков, регистрирующих приборов и компьютера. Датчики устанавливаются на заземленные части оборудования, например, на поверхность бака или опорную плиту трансформаторов тока и напряжения (рис. 1). Для установки датчиков на стальные поверхности удобно использовать магнитные крепления. Датчик также можно устанавливать на нижний фланец фарфоровой крышки или на нижнюю поверхность дна с помощью резинового крепления. Важно, чтобы внутренняя часть поверхности, на которую установлен датчик, соприкасалась с маслом или элегазом, в которых хорошо распространяется ультразвук.

Ультразвук, вызванный частичным, искровым или другим электрическим разрядом в жидкости или газе, представляет собой быстро затухающие колебания сжатия-растяжения среды. Слуховой образ такого звука — резкий щелчок. Если источников разрядов много, слуховой образ напоминает звук прибора или аплодисменты в зале.

Распространяясь в бумажно-масляной или элегазовой изоляции электрооборудования, исходный звук разряда отражается от различных твердых преград и,



Рис. 1. Трансформаторы тока типа ТРЕ 11-С (на переднем плане) и напряжения типа УН 11-15 в ОРУ 110 кВ

постепенно затухая, создает послезвучание (реверберацию). Проходя через стенку оборудования, звуковая волна сжатия-растяжения превращается в целый спектр волн (сдвиговых, изгибных, поверхностных и др.). Ультразвуковой датчик преобразует спектр входящих волн в электрический сигнал. Для повышения чувствительности размеры датчика делаются соизмеримыми с длиной волны принимаемого звука. Амплитудно-частотная характеристика датчика определяется при калибровке по ультразвуковому давлению или по колебательной скорости плоской волны. Однако принимаемые датчиком на стенке электрооборудования ультразвуковые волны не являются плоскими. Тем не менее, при обработке сигналов предполагается, что датчик сохраняет свои характеристики и для преобразования этих волн.

В электрооборудовании могут быть простые и сложные условия распространения ультразвука. В высоковольтных вводах, измерительных трансформаторах, токопроводах обычно имеются простые условия распространения ультразвука, при которых звук от разряда распространяется в почти однородной среде на расстояния порядка сотни длин волн и поэтому, затухает незначительно. В силовых трансформаторах, в элегазовом оборудовании источник электрического разряда может находиться в глубине оборудования. В этом случае ультразвук проходит ряд преград и значительно затухает. Если у небольших маслонаполненных объектов величина акустического сигнала практически одинакова в любой точке поверхности, то при обследовании, например, силового трансформатора это отличие более значительно, и необходимо, перемещая датчик, искать область поверхности с максимальным сигналом.

Для регистрации и анализа сигналов НПО «Техносервис-Электро» использует три различных взаимодополняющих типа приборов, отличающихся способами обработки и регистрации сигналов. Первый тип — цифровые осциллографы, например, «Tektronix» (США) или «Актаком» (Россия), позволяющие регистрировать осциллограмму сигнала и его спектр. Второй тип — распространенный в энергетике ультразвуковой зонд типа «Ultraprobe» (США), в котором используется гетеродинирование сигнала и прослушивание преобразованного спектра сигнала через наушники. Третий тип — разработанный НПО «Техносервис-Электро» ультразвуковой модератор «Дельфин» (рис. 2), который позволяет записать, замедлить и услышать ультразвуковой сигнал.



**Рис. 2. Ультразвуковой модератор «Дельфин»:**  
блок прибора, ультразвуковой датчик  
типа РЧР с кабелем, наушники  
и магнитное крепление

Как известно, осциллограммы не выявляют многих особенностей сигнала, позволяющих распознать образ источников звука. Поэтому в настоящее время ведущий производитель осциллографов фирма Tektronix в последних разработках дополняет осциллограммы, например, цветовыми представлениями текущих спектров и т.п. Наряду с цифровыми осциллографами оказалось весьма эффективно использовать замедление (модерацию) звука и его прослушивание для распознавания слухового образа источника разрядов. Это линейное преобразование сигнала значительно более

информативно, чем гетеродинирование, применяемое в приборах типа «Ultraprobe». Кроме того, при использовании ультразвукового модератора «Дельфин» появляется оперативная возможность применения распространенных компьютерных программ обработки и редактирования цифрового звука, таких как «Sound forge», «проигрыватель Windows Media».

Применяемые при обследованиях НПО «Техносервис-Электро» чувствительные ультразвуковые датчики 3 (см. рис. 2) типа РЧР (регистратор частичных разрядов) описаны в [3]. Диапазон рабочих частот РЧР составляет 60-130 кГц. В полосе этих частот датчики имеют чувствительность не менее 30 мВ/Па. Датчик состоит из стального герметичного корпуса, преобразующего элемента из пьезокерамики и усилителя электрического сигнала.

Сигнал от датчика передается в ультразвуковой модератор 1 (см. рис. 2) по соединяющему их кабелю 2. Имеется магнитное крепление для установки датчика на стальной стенке трансформатора 4. Ультразвуковой модератор содержит усилитель с регулятором усиления, индикацию амплитуды сигнала пятью светодиодами, аналогово-цифровой преобразователь, память, цифро-аналоговый преобразователь и аккумуляторы питания. Масса прибора — 0,3 кг, габаритные размеры — 80x140x40 мм. При работе ультразвук преобразуется в электрический сигнал. Этот сигнал усиливается, детектируется, амплитуда его оценивается пятиуровневым индикатором. При нажатии на кнопку записи сигнал переводится в цифровую форму, запоминается и затем замедленно воспроизводится через наушники 5 (рис. 2). Время записи — два периода сетевой частоты — 40 мс. Время воспроизведения записи — 4 с. Воспроизведение повторяется циклически до следующего нажатия кнопки записи. При таком преобразовании ультразвуковой диапазон чувствительности РЧР 60-130 кГц переводится в одну октаву слышимого диапазона 600 Гц-1,3 кГц. Через разъем подключения наушников можно передать записанную информацию на компьютер или магнитофон для хранения, дальнейшей обработки и документирования. Для обучения, а также для тестового сравнения звуков от различных источников к прибору прилагаются аудиозаписи реальных сигналов электрических разрядов, обнаруженных во втычном контакте ввода 220 кВ силового трансформатора, в изоляции ввода 220 кВ, в КРУЭ 220 кВ при попадании металлической стружки на изолятор, в элегазовом выключателе 110 кВ с трещиной изолятора, в концевой муфте кабельной линии 110 кВ с полиэтиленовой изоляцией, в переходной стопорной муфте 110 кВ с увлажненным маслом, в трансформаторах тока и напряжения 110-500 кВ с частичными разрядами в бумажно-масляной изоляции и др. Акустические сигналы в оборудовании, вызванные электрическими разрядами, можно обнаружить даже на фоне помех: вибростука, шума маслонасосов и вентиляторов и т.п. Для этого оператор должен отличать звонкие звуки, характерные для электрических разрядов, от глухих звуков, имеющих механическую природу.

Значительный опыт использования акустического метода накоплен при диагностическом обследовании измерительных трансформаторов напряжением 110-400 кВ с длительным сроком службы, которое проводилось на подстанциях в Сербии. Количество обследованных российскими и сербскими специалистами трансформаторов компании «Электроисток» приведено в табл. 1. Все обследованные в Сербии трансформаторы с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа имеют в нижней части заполненный маслом стальной бак, на который устанавливался ультразвуковой датчик (см. рис. 1).

Таблица 1

Оборудование	Количество обследованных трансформаторов напряжением, кВ			
	110	220	400	Всего
Трансформаторы тока	102	36	21	159
Трансформаторы напряжения	73	23	11	107

Обследования подтвердили, что при разрядах в основной изоляции на уровне верхней части бака регистрируемый уровень ультразвукового давления в различных точках поверхности бака отличается не более, чем в два раза. Этот факт позволяет проводить акустические обследования подобных измерительных трансформаторов, устанавливая датчик в произвольной точке поверхности. При этом измеренная амплитуда ультразвукового сигнала практически определяется энергией разряда.

Как указано в [4], анализ повреждаемости и результаты стендовых испытаний маслонаполненных трансформаторов тока 110-750 кВ показывают, что объем испытаний, нормированный РД 34.45-51.300-97 [5] на отключенном трансформаторе, практически не позволяет своевременно обнаружить дефекты электрического характера, приводящие к повреждениям, а также признаки аномального старения их изоляции. Это связано с тем, что контролируемые показатели качества масла (пробивное напряжение, кислотное число, температура вспышки масла, а также сопротивление изоляции и  $\tan \delta$ ), являясь интегральными показателями, слабо отражают наличие локальных дефектов и, кроме того, контролируются они сравнительно редко.

Поэтому, НПО «Техносервис-Электро» (Россия) и энергетическая компания «Электроисток» (Сербия) выполняют сначала диагностическое акустическое обследование, а затем для подозрительных объектов проводится отбор проб масла и хроматографический анализ растворенных газов. Акустическое обследование, как правило, проводится с помощью ультразвукового модератора «Дельфин». Если индикаторы «Дельфина» указывают на наличие ультразвукового сигнала, проводится прослушивание замедленного сигнала, его предварительная классификация и запись в магнитофон или компьютер. Запись сигнала можно производить также цифровым осциллографом. Затем с помощью компьютера анализируется спектр сигнала. Сигнал

классифицируется как сигнал от разрядов по следующим признакам: 1) звуковые импульсы синхронизованы с частотой сети; 2) наличие сигнала на двух полуволнах сетевого напряжения, что в записи ультразвукового модератора проявляется как четыре повторения звука примерно раз в секунду каждое, а на осциллограмме с разверткой 4 мс/деление проявляется как четыре повторения сигнала; 3) высокочастотный спектр сигнала, что оценивается на слух при использовании ультразвукового модератора или определяется спектральными характеристиками сигналов при анализе осциллограмм. Если сигналы соответствуют разрядам, степень их опасности оценивается по амплитуде сигналов. К сигналам аварийного уровня для маслонаполненного оборудования с простыми условиями распространения ультразвука и без принудительной циркуляции масла относятся сигналы РЧР с амплитудой более 30 мВ по осциллографу (звуковое давление около 1 Па) или загорание хотя бы одного индикатора при указателе регулятора усиления ультразвукового модератора в красном секторе.

На подстанциях Сербии обследовались измерительные трансформаторы тока напряжением 110 кВ типов TPE-11A (а также модификации В, С и Е), 4APU-123, AGU-123, IOSK-123; 220 кВ — AGU-245, TPE-14B, 4APV-245; 400 кВ — TPE-16H, IOSK-420, AGU-420. В результате обследования 159 трансформаторов тока (см. табл. 1) было выявлено 12 трансформаторов с акустическими сигналами различного уровня. В шести из них уровень сигнала и характер звука указывали на высокий уровень разрядных процессов в изоляции и предаварийное состояние трансформаторов.

На рис. 3 приведена осциллограмма предаварийного акустического сигнала на баке трансформатора тока № 1 (табл. 2) за два периода сетевой частоты. Спектр этого сигнала (рис. 4) имеет максимальную амплитуду  $A_m$  на частоте 73 кГц, которая принимается за 0 дБ, остальные амплитуды пересчитываются из милливольт в децибелы по формуле:  $A_i = 20 \lg [A_i/A_m]$ . Спектр высокочастотный и в основном повторяет частотную характеристику датчика.

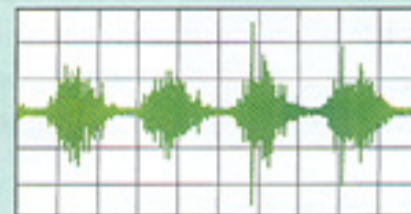


Рис. 3. Осциллограмма акустического сигнала на баке трансформатора тока. Развертка 4 мс/деление, чувствительность 100 мВ/дел.

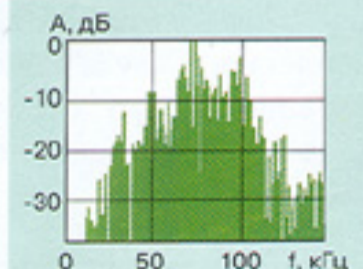
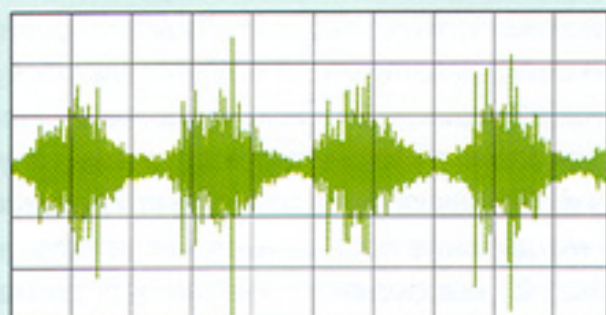


Рис. 4. Спектр акустического сигнала на баке трансформатора тока

Известно из [6], что уровень частичных разрядов в изоляции возрастает после перенапряжений, возникающих, например, при коммутациях. Так, после отключения и повторного включения трансформатора тока № 1 характер акустических сигналов не изменился, однако возросло количество пиков большой амплитуды (рис. 5).



**Рис. 5. Осциллограмма акустического сигнала на баке трансформатора тока после коммутаций. Развертка 4 мс/деление, чувствительность 100 мВ/деление**

Из пяти трансформаторов тока № 1-5 (см. табл. 2) с предаварийными акустическими сигналами оперативно было отобрано масло для проведения хроматографического анализа растворенных газов (ХАРГ). Шестой трансформатор был сразу выведен из эксплуатации, так как разряды в нем были слышны даже без специальных приборов. Результаты анализов показали, что в масле этих трансформаторов тока концентрации водорода  $H_2$  достигают 12000-41000 ppm, метана  $CH_4$  — 754-6900 ppm, что значительно превышает не только норму согласно IEC 60599 [1], но и предельно допустимые значения, рекомендованные рабочей группой 12-16 СИГРЭ 2000 [7]. В масле всех этих трансформаторов тока обнаружены также повышенные концентрации этана  $C_2H_6$ , которые в масле трансформаторов № 4 и 5 превышают 500 ppm, а в № 1 — практически достигают этого значения. Кроме того, в трансформаторах № 1, 2 и 4 обнаружены незначительные концентрации ацетилена  $C_2H_2$ .

Таким образом, результаты ХАРГ подтвердили наличие дефектов электрического характера, сопровождающихся частичными разрядами достаточно высокого уровня энергии. Этот вывод полностью согласуется с результатами разборки ряда трансформаторов.

В качестве примера на рис. 6 приведена фотография следов частичных разрядов в бумажной изоляции трансформатора тока № 1. Слуховые образы замедленного звука (звук приобоя) и осциллограммы сигналов у всех отбракованных трансформаторов подобны. Кроме того, состав растворенных в масле



**Рис. 6. Следы частичных разрядов в бумажно-масляной изоляции**

газов у них тоже схож. Поэтому характер дефектов этих трансформаторов идентичен.

При отсутствии источников акустической активности существенно изменяется и состав растворенных газов в масле трансформаторов тока. Для сравнения в табл. 2 приводятся результаты ХАРГ в масле трансформаторов № 6 и № 7, в которых не были обнаружены источники ультразвуковых сигналов. Концентрации всех газов здесь остаются ниже нормы [1].

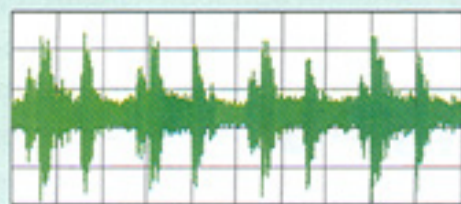
Следует отметить, что граничные концентрации и рекомендации по определению предельно допустимых значений содержания газов в масле трансформаторов [2] существенно отличаются от значений, рекомендованных для трансформаторов тока в [1] и [7]. Эти выводы подтверждаются полученными результатами настоящей работы (см. табл.2).

Несколько сложнее акустическая диагностика трансформаторов напряжения, так как кроме ультразвуковых сигналов, обусловленных электрическими разрядами, могут быть сигналы, вызванные вибрациями (вибростуками) магнитопровода. При обследовании более 100 измерительных трансформаторов напряжения в Сербии (см. табл. 1) типов УН 11-15, МВН-123, 2VPU-123, 5VPU-123 (напряжением 110 кВ), VCU-245, KNT-245 (220 кВ) и 3VCU-420, KNT-420, МВН-420 (400 кВ) было выявлено 10 объектов с акустической активностью. Однако у всех трансформаторов акустические сигналы имели прежде всего механическую природу.

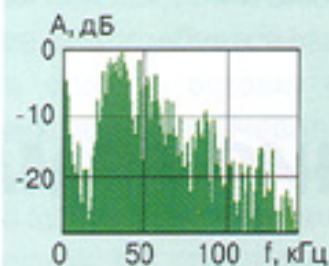
В качестве примера на рис. 7 приведена осциллограмма акустического сигнала, зафиксированного на баке трансформатора напряжения типа 2VPU-123 (58 лет эксплуатации), а на рис. 8 частотный спектр этого сигнала. Спектр вибростука содержит частоты ниже 30 кГц, а на слух с помощью ультразвукового модератора «Дельфин» слышно четырехкратное

Таблица 2

№ п/п	Год изготовления трансформаторов тоска	Концентрация растворенных в масле газов, ppm								
		$H_2$	$O_2$	$N_2$	$CH_4$	CO	$CO_2$	$C_2H_2$	$C_2H_6$	$C_2H_4$
1	1986	40970	1600	21317	3702	57	1551	12	493	1
2	1986	12000	12808	54297	754	21	1057	2	230	1
3	1986	23104	5093	32401	2558	-	838	6	160	0
4	неизвестен	31831	2429	17247	6910	200	2621	10	522	2
5	неизвестен	13007	741	39336	2007	468	1686	12	553	0
6	1986	68	14721	68699	8	8	328	11	48	0
7	неизвестен	212	18037	62952	5	507	1745	12	10	0
Норма (IEC60599)		300	-	-	30	300	900	10	50	2
Предельно допустимое значение [7]		1000	-	-	200	-	-	100	500	10
Граничная концентрация [2]		100	-	-	100	600	8000	100	50	10



**Рис. 7. Осциллограмма акустического сигнала на баке трансформатора напряжения типа 2VPU-123.**  
Развертка 4 мс/деление, чувствительность 30 мВ/дел.



**Рис. 8. Спектр акустического сигнала на баке трансформатора напряжения**

повторение глухого звука. Следует отметить, что на фоне вибростука можно не заметить разрядных явлений. В этих случаях оправдан контрольный хроматографический анализ масла.

Обследования показали, что примерно 25 % трансформаторов напряжения, в которых обнаружена акустическая активность, имели дефекты электрического характера. При этом почти во всех случаях доминирующим был низкочастотный сигнал, то есть сигнал, имеющий механическую природу. Тем не менее, подробный анализ спектра не исключал вероятности не только вибростуков, но и электрических разрядов относительно невысокой интенсивности. Например, у трансформатора напряжения типа 2VPU-123 при максимуме амплитуды акустического сигнала на частоте 30 кГц при хроматографическом анализе были обнаружены следующие концентрации газов, растворенных в масле:  $H_2$  – 872 ppm,  $CH_4$  – 554 ppm,  $C_2H_2$  – 0 ppm,  $C_2H_4$  – 10 ppm,  $C_2H_6$  – 137 ppm,  $CO$  – 1042 ppm,  $CO_2$  – 3111 ppm. То есть, в этом трансформаторе имеют место частичные разряды. Однако интенсивность разрядов не достигла критического уровня.

Таким образом, акустическим методом выявляется подавляющее большинство трансформаторов тока с ЧР в основной изоляции, а для трансформаторов напряжения требуется проведение контрольного хроматографического анализа масла для заключения о состоянии изоляции. Настоящую работу можно рассматривать как испытания акустического метода диагностики измерительных трансформаторов. В настоящее время проводится более широкое внедрение этого метода на подстанциях Сербии.

В заключение следует заметить, что акустический метод применим только к нижним модулям каскадных трансформаторов тока или напряжения, так как между каскадами имеется воздушный промежуток, препятствующий прохождению звука из одного каскада в другой.

Субъективную оценку звуков на слух в будущем можно исключить, применив компьютерную обработку звуков с помощью адаптивного метода максимального правдоподобия по эталонным звукам различных дефектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Standard, Mineral oil-impregnated electrical equipment in service — Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. IEC 60599.
2. РД 153-34.0-46.302-00 Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. — М.: РАО «ЕЭС России», 2000.
3. Пинталь Ю.С., Тарасов Н.А., Цветаев С.К. и др. Компьютерная система диагностики изоляции силовых трансформаторов по акустическим сигналам частичных разрядов, Тр. IV междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-98, Новосибирск, 1998, т. 8, с.52, ISBN 0-7803-4938 1998 IEEE.
4. Гречко О.Н., Курбатова А.Ф. Современная система контроля и диагностики состояния изоляции трансформаторов тока в эксплуатации, 2-ой науч.-технич. семинар «Современные методы и средства оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации высоковольтного оборудования энергосистем» — М.: «АскоН», 2001.
5. РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования. — М.: ЭНАС, 2001.
6. Банщиков А.И., Вдовико В.П., Гузанов В.И. и др. Автоматизированная система мониторинга частичных разрядов в изоляции трансформаторов тока 500 кВ под рабочим напряжением, VII Симп. «Электротехника 2010», Московская обл., 2003, т. 3, с. 160.
7. Гречко О.Н., Курбатова А.Ф. Граничные значения характеристик изоляции нормально работающих маслонаполненных трансформаторов тока, 2-ой науч.-технич. семинар «Современные методы и средства оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации высоковольтного оборудования энергосистем». — М.: «АскоН», 2001.