

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДАМИ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

В статье приведены теоретические сведения диагностирования параметров изоляции высоковольтных трансформаторов. Показаны результаты экспериментальных исследований на высоковольтных трансформаторах в нормальном, предаварийном и аварийном состояниях. Для определения пороговых значений по результатам акустического контроля проведено сравнение с данными хроматографического анализа.

**Ключевые слова:** высоковольтные трансформаторы, тяговое электро-снабжение, диагностирование параметров изоляции высоковольтных трансформаторов, акустический метод, частичные разряды.

Достаточно часто система диагностического мониторинга трансформаторов создается на основе приборов, основанных на различных физических принципах, обычно эти приборы контролируют отдельные подсистемы трансформатора [1–3].

Например, система диагностического мониторинга трансформатора может быть создана на основе прибора контроля растворенных газов, прибора контроля высоковольтных вводов и прибора мониторинга частичных разрядов. Все эти приборы контролируют различные параметры трансформатора, но на итоговое диагностическое заключение о техническом состоянии трансформатора и на диагностику дефектов они оказывают совместное влияние.

В этом случае очень важно, чтобы частная диагностическая информация от этих отдельных приборов обрабатывалась в экспертной системе совместно, так как приведенные выше три прибора являются взаимно уточняющими друг для друга.

Целью работы системы диагностирования является оценка технического состояния контролируемого трансформатора, выявление опасных и развивающихся дефектов. Важным является не только регистрация набора параметров, но и оценка их опасности. Только по положительным результатам работы таких систем удастся оптимизировать затраты на эксплуатацию трансформаторов, выполняя их обслуживание по техническому состоянию (рис. 1).

При частичных разрядах в масле трансформатора основным газом, регистрируемым газовым хроматографом, является  $H_2$  (водород), характерными газами с малым содержанием —  $CH_4$  (метан) и  $C_2H_2$  (ацетилен). При искровых и дуговых разрядах основными газами являются  $H_2$  (водород) или  $C_2H_2$  (ацетилен), характерными газами с любым содержанием —  $CH_4$  (метан) и  $C_2H_4$  (этилен).

Для уменьшения времени измерений, повышения достоверности контроля предлагается использовать дополнительно к существующему — акустический метод контроля высоковольтного оборудования. Кроме того, предлагаемый метод может интегрироваться в состав оборудования «цифровой тяговой подстанции».

Измерение частичных разрядов трансформатора акустическим методом позволяет своевременно выявлять проблемы в изоляции трансформатора и, по сравнению с обычной системой контроля растворенных газов в масле, более оперативно реагировать на возникновение дефектов [4–6].

По этой причине регистрация частичных разрядов, оценка их амплитуды и повторяемости, что эквивалентно определению мощности частичных разрядов, является эффективным способом выявления дефектов в высоковольтной изоляции на ранних стадиях развития. По своей чувствительности этот метод диагностики состояния изоляции силовых трансформаторов не имеет себе равных. Максимальной



Рис. 1. Состав системы диагностирования силового трансформатора

сложностью, возникающей при практическом использовании данного диагностического метода, заключается в обеспечении надежной отстройки измерительных цепей от воздействия высокочастотных помех, которых очень много в высоковольтных цепях.

В то же время разрядные процессы внутри бака трансформатора, как на начальной стадии частичных разрядов, так и в фазе искровых и дуговых разрядов, могут быть достаточно просто зафиксированы внутри бака при помощи системы регистрации высокочастотных импульсов. Эта система является даже более чувствительной, чем контроль растворенных газов, так как сначала в зоне дефекта появляются разряды, которые потом постепенно насыщают масло продуктами своей деятельности, т.е. приводят к появлению газов в масле. Естественно, что речь идет о такой системе регистрации частичных разрядов, которая хорошо отстроена от высокочастотных помех, особенно коронных разрядов, которых очень много в высоковольтных силовых трансформаторах.

Поскольку нам неизвестно реальное место возникновения дефекта внутри изоляции, то невозможно определить сколько-нибудь точное значение амплитуды разряда. Это происходит по той причине, что нам неизвестно, каков коэффициент затухания акустического или электромагнитного сигнала на пути от места возникновения до места установки первичного датчика. Эффективных (прямых) способов калибровки акустических и электромагнитных приборов измерения частичных разрядов в настоящее время не существует. Очень важными являются еще два параметра единичного частичного разряда, которыми оперируют практически все разработчики диагностического оборудования и практические пользователи этого оборудования. Это частота и длительность импульса частичного разряда. Определим смысл этих параметров (рис. 2).

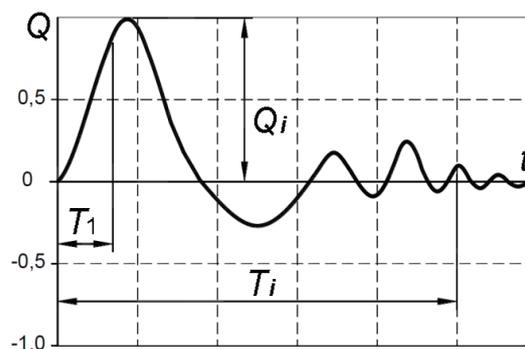


Рис. 2. Основные параметры частичного разряда

Видно, что первый фронт зарегистрированного импульса достаточно крутой, но уже после первого максимума сигнал «спадает» по более пологой кривой, которая постоянно меняет свою форму (рис. 2). В самом же конце импульса мы имеем затухающие колебания с более высокой частотой.

Очевидно, что первоначально импульс частичного разряда возникает непосредственно в зоне дефекта. Далее импульс распространяется электромагнитным или электрическим способом в окружающий объем, который также имеет свои электромагнитные свойства, отличные от свойств зоны дефекта. Различие свойств этой окружающей зоны приводит к появлению в регистрируемом сигнале колебаний с другой резонансной частотой. В конечном итоге импульс может затухнуть на еще большем удалении от места возникновения от зоны дефекта, например, это может произойти уже в элементах конструкции оборудования [7–9].

Действительная частота импульса частичного разряда максимально достоверно может быть

определена только параметрами переднего фронта импульса, что полностью соответствует использованию математического выражения:

$$F = \frac{1}{4T_1}, \quad (1)$$

где  $T_1$  — время нарастания переднего фронта импульса до значения 90 % амплитудного значения  $Q_i$  (рис. 2).

Таким образом, можно сказать, что каждый импульс частичного разряда характеризуется тремя параметрами. Это  $Q$  — величина кажущегося заряда, количественно пропорциональная максимальной амплитуде импульса;  $F$  — частота импульса частичного разряда;  $T_1$  — длительность импульса частичного разряда, определенная по уровню 90 % от максимального значения импульса.

Параметры разряда, которые инжектируются в объект из питающей сети и которые мы измеряем, отличаются от параметров «истинного» частичного разряда, возникающего в изоляции. Однако, с энергетической точки зрения, инжектируемая извне энергия количественно равна реальной энергии, выделяемой в зоне дефекта. Это не «кажущаяся» энергия, а «почти честная» энергия, количественно равная энергии разрушения в зоне дефекта.

Заряд в контролируемый объект инжектируется мгновенно и непосредственно связан с конкретным мгновенным напряжением питающей сети. Таким образом, величина энергии, которая дополнительно вводится в оборудование и выделяется в зоне дефекта, равна заряду, умноженному на мгновенное значение приложенного напряжения.

Если полную энергию поделить на полное время суммирования, то получим мощность частичных разрядов. Он определяется выражением:

$$P = \frac{1}{T} \sum_i^m Q_i V_i, \quad (2)$$

где  $P$  — мощность разрядов, Вт;  $T$  — время наблюдения, сек;  $m$  — число наблюдаемых импульсов за время  $T$ ;  $Q_i V_i$  — энергия  $i$ -го импульса.

При диагностировании встают вопросы: какое количественное значение интенсивности частичных разрядов соответствует хорошему состоянию изоляции? Какова величина тревожного порога, а какое значение соответствует критическому состоянию изоляции?

Точного и всегда однозначного ответа о допустимых количественных значениях параметров частичных разрядов не существует. Точно можно ответить на этот вопрос только при регистрации очень больших уровней высокочастотных импульсов, когда уже на самом деле состояние изоляции очень плохое. Причем даже это значение у различных типов изоляции (у различных типов оборудования) может различаться в десятки раз.

При исследовании частичных разрядов в трансформаторах, как и в любом другом высоковольтном оборудовании, в первую очередь необходимо правильно выбрать места для установки первичных преобразователей. Насколько корректно это будет сделано, настолько возможно эффективными будут последующие измерения частичных разрядов в изоляции [10, 11].

Приведем примеры экспериментальных исследований, проведенных на высоковольтных трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока Западно-Сибирской железной дороги.

Таблица 1

Результаты акустических измерений ЧР на высоковольтных трансформаторах

Номер ЭЧЭ, обозначение трансформатора	Тип, мощность, напряжение	$Um$ , ед. АЦП			Событий/сек	Примечания
		min	avg	max		
136 Т2	ТМПУ-16000/110	34	170	3961	0,53	Металлический стук по корпусу (ЧР отсутствуют) <b>Среднее</b>
		37	393	3112	0,67	
		<b>35</b>	<b>291</b>	<b>3540</b>	<b>0,60</b>	
148 ТП	ТДРУНГ-20000/110	140	170	198	39	ЧР восточная сторона ЧР восточная сторона ЧР восточная сторона, поезд ЧР восточная сторона ЧР полевая сторона ЧР полевая сторона, поезд ЧР полевая сторона, поезд, вибрация <b>Среднее</b>
		165	170	250	64	
		165	212	360	11	
		175	250	363	73	
		221	215	337	93	
		212	270	340	3,3	
		140	270	340	66	
<b>178,5</b>	<b>197,7</b>	<b>290,2</b>	<b>62,4</b>			
210 ТП	ТДРУНГ-20000/110	180	440	2357	0,5	ЧР восточная сторона ЧР восточная сторона, вибрация ЧР восточная сторона, вибрация ЧР восточная сторона верх ЧР восточная сторона верх ЧР восточная сторона верх ЧР северная сторона низ ЧР северная сторона низ <b>Среднее</b>
		185	370	685	2,83	
		168	240	1300	4,24	
		190	180	1100	0,1	
		180	400	800	0,2	
		180	400	1300	0,38	
		430	1100	2878	0,67	
		150	450	1400	0,67	
<b>179,0</b>	<b>439,0</b>	<b>1348,0</b>	<b>1,20</b>			

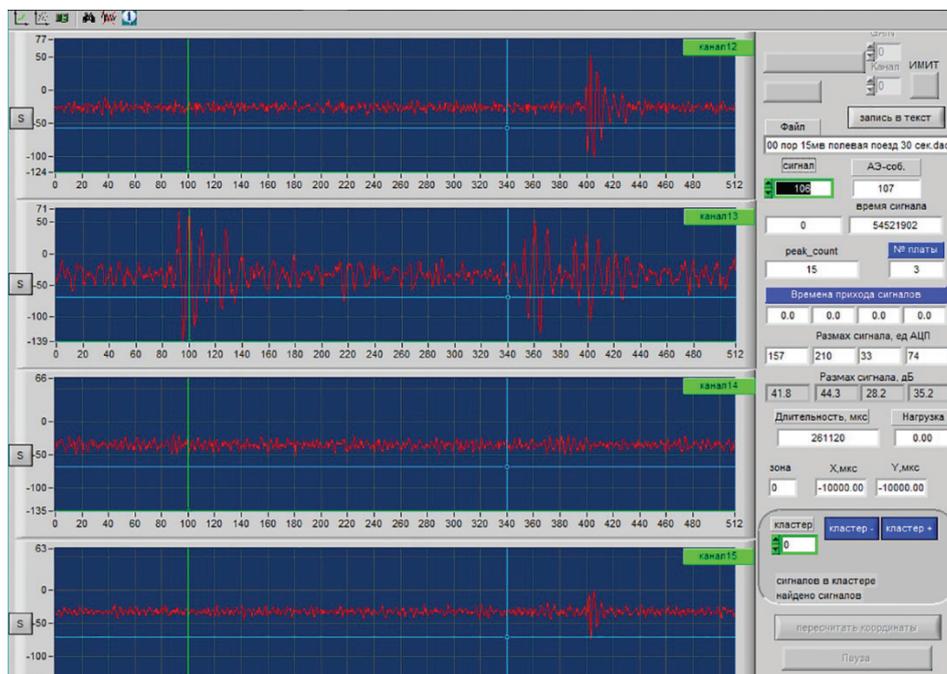


Рис. 3. Временные диаграммы сигналов от четырех преобразователей

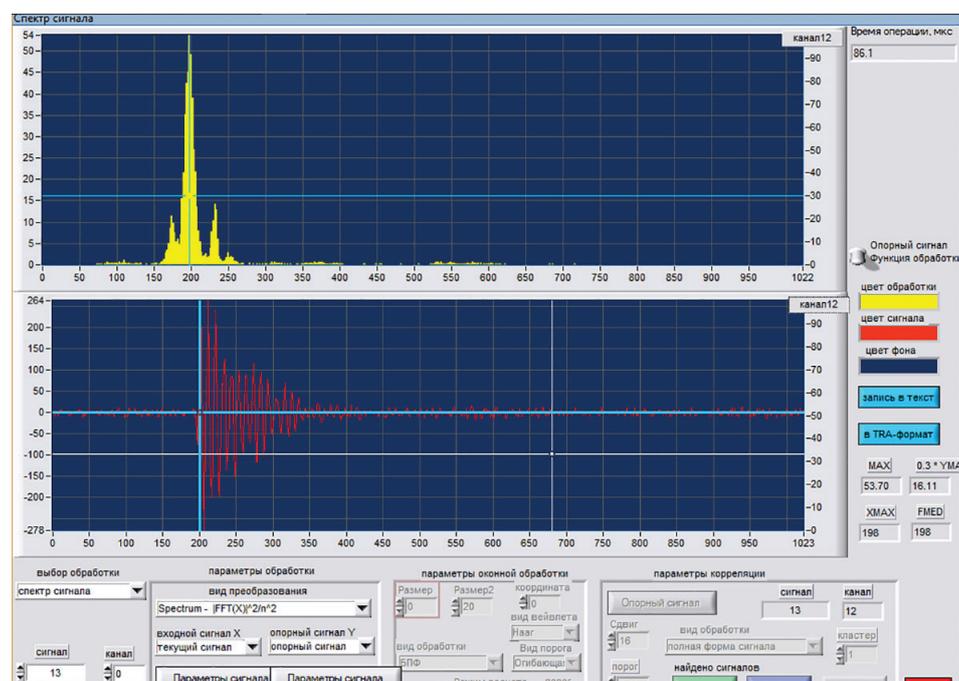


Рис. 4. Форма и спектр сигнала «Измерение 10»

В табл. 1 приведены сравнительные данные многократных измерений на трех трансформаторах при нормальном режиме работы (ЭЧЭ-136), «на особом контроле» (ЭЧЭ-148) и после аварийного отключения, сопровождавшегося дуговым разрядом (ЭЧЭ-210).

На вводном трансформаторе Т2 (16 МВА) тяговой подстанции ЭЧЭ-136 сигналов акустической эмиссии на частоте возникновения частичных разрядов не обнаружено как на холостом ходу, так и при прохождении поезда. Это соответствует нормальному режиму работы вводного трансформатора. Дефектов изоляции, сопровождающихся возникновением частичных разрядов на высоком напряжении, нет.

Для проверки работоспособности установки СЦАД-16 производили возбуждение акустических волн при помощи стука металлическим бойком по корпусу трансформатора с разных сторон от места установки измерительных преобразователей. Четыре измерительных преобразователя устанавливались на стенку трансформатора, образуя собой акустическую антенну. По разности времен прихода сигнала возможно определение координат источника частичных разрядов [4].

Акустический контроль на предмет наличия частичных разрядов выполнен на тяговом трансформаторе ЭЧЭ-148. Тяговый трансформатор ТП типа ТДРУНГ мощностью 20 МВА постоянно находится в работе. По данным хроматографиче-

ского анализа в трансформаторном масле определено превышение граничных концентраций:  $H_2$  — в 4,5 раза;  $C_2H_2$  — в 7,6 раза, что соответствует наличию частичных разрядов искровых и дуговых разрядов.

Акустический контроль на предмет наличия частичных разрядов выполнен на тяговом трансформаторе ЭЧЭ-210. Тяговый трансформатор ТП типа ТДРУНГ мощностью 20 МВА находится под высоким напряжением, выходные шины низкого напряжения отключены и закорочены (режим холостого хода). После технического обслуживания вводов при последующем включении произошло аварийное отключение трансформатора, сопровождавшееся дуговым разрядом. При вскрытии видимых мест повреждения не обнаружено. После этого трансформатор переведен в режим холостого хода и находился в нем более месяца. По данным хроматографического анализа в трансформаторном масле определено превышение граничных концентраций:  $H_2$  — в 6,3 раза;  $CH_4$  — в 1,3 раза,  $CO$  — в 1,1 раза, что соответствует наличию частичных разрядов, искровых, дуговых разрядов, повреждением затронута твердая изоляция.

Так же как при измерениях на ЭЧЭ-148 «Забулга», присутствуют низкочастотные колебания, которые можно объяснить вибрацией корпуса трансформатора и металлического стука незакрепленных конструкций снаружи при воздействии ветра. Амплитудное значение частичных разрядов находится в диапазоне от 140 до 360 (ед. АЦП). Представлены данные, полученные из программного обеспечения AES51 (рис. 3, 4).

Сравнение параметров частичных разрядов (ЧР) выполним по данным табл. 1. На трансформаторе ЭЧЭ-136 ЧР отсутствуют, установка СЦАД-16 не регистрирует сигналы ниже порогового значения (5 ед. АЦП). Для проверки работоспособности осуществлялся стук металлическим бойком по корпусу трансформатора с разных сторон от места установки измерительных преобразователей. Амплитудные значения, при силе удара 500 Н, существенно превышают значения от ЧР. При состоянии трансформатора, условно принятым за предаварийное состояние (ЭЧЭ-148), амплитудные значения составляют в среднем 197,7 (максимум 290,2).

В аварийном режиме трансформатор находится в режиме холостого хода, под действием высокого напряжения (ЭЧЭ-210), амплитудные значения составляют в среднем 439,0 (максимум 1348,0).

#### Выводы.

1. Использование методики, переносного прибора, автоматизированной системы сбора и передачи данных средствами акустического контроля позволяют существенно повысить достоверность диагностирования состояния высоковольтных трансформаторов, выполняемых в настоящее время методом газовой хроматографии.

2. Установка регистрации акустических сигналов СЦАД-16 с штатным программным обеспечением позволяет регистрировать частичные разряды (ЧР), колебания корпуса трансформатора и определять количественные характеристики ЧР и колебаний.

3. При прохождении поезда амплитуда частичных разрядов увеличивается, а частота их следования уменьшается.

4. Определены пороговые значения для трансформаторов, находящихся на особом контроле и в аварийном состоянии по серии многократных измерений. Анализ данных ЭЧЭ-210 по сравнению с измерениями на ЭЧЭ-148 говорит, что снизилось число частичных разрядов в единицу времени в среднем до одного против 62 за одну секунду. Однако существенно повысилась мощность частичных разрядов, определяемая их амплитудой, которая составила в среднем 439 ед. АЦП (максимальное значение 1348) против 198 (максимальное значение 290) на ЭЧЭ-148.

5. Применение комплексных методов контроля позволит избежать аварийных ситуаций с тяговыми трансформаторами, имевших место на Западно-Сибирской железной дороге в 2018 г., которые находились на особом контроле с использованием только одного метода диагностирования (газовая хроматография).

#### Библиографический список

1. Русов В. А. Диагностический мониторинг высоковольтных силовых трансформаторов: моногр. Пермь: Компромисс, 2012. 160 с.
2. Шахнин В. А. Применение метода частичных разрядов для оценки концентрации растворенных газов в трансформаторном масле // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / ОмГУПС. Омск, 2018. С. 194–198.
3. Карандаев А. С., Евдокимов С. А., Девятов Д. Х., Парсункин Б. Н., Сарлыбаев А. А. Диагностирование силовых трансформаторов методом локации частичных разрядов // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2012. № 1. С. 105–108.
4. Ивлиев В. В., Кабанов С. И., Бехер С. А [и др.]. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций: моногр. / под ред. А. Н. Серьезнова, Л. Н. Степановой. Новосибирск: Наука, 2011. 272 с. ISBN 978-5-02-018973-7.
5. Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю., Кузнецова М. А. Повышение эффективности методов диагностирования тяговых трансформаторов при увеличении массы поездов // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф. / ОмГУПС. Омск, 2018. С. 20–27. ISBN 978-5-949-41193-3.
6. He X., Xie G., Jiang Y. Online partial discharge detection and location system using wireless sensor network // Energy Procedia. 2011. Vol. 12. P. 420–428. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.10.056.
7. Ким К. К., Полуниин И. С. Электроимпульсные технологии на железнодорожном транспорте: моногр. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2018. 200 с. ISBN 978-5-906938-76-3.
8. Deshpande A. S., Mangalvedekar H. A., Cheeran A. N. Partial discharge analysis using energy patterns // Electrical Power and Energy Systems. 2013. Vol. 53. P. 184–195. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.04.015.
9. Nafar M., Niknam T., Gheisari A. Using correlation coefficients for locating partial discharge in power transformer // Electrical Power and Energy Systems. 2011. Vol. 33 (3). P. 493–499. DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.11.003.

10. Чуличков А. И., Цыбульская Н. Д., Цветаев С. К. [и др.]. Классификация акустических сигналов разрядных процессов в изоляции на основе формы их вейвлет-спектров // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2009. № 2. С. 103–105.

11. Biswas S., Dey D., Chatterjee B. [et al.]. An approach based on rough set theory for identification of single and multiple partial discharge source // Electrical Power and Energy Systems. 2013. Vol. 46. P. 163–174. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.10.050.

---

**КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Адрес для переписки: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

**КУЗЬМЕНКО Антон Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 1013551

Адрес для переписки: KuzmenkoAU@omgups.ru  
**КУЗНЕЦОВА Мария Андреевна**, аспирантка кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог».

AuthorID (SCOPUS): 56825357500

Адрес для переписки: kuznetcova994@gmail.com

**СИМАКОВ Александр Владимирович**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 3865-0506

AuthorID (РИНЦ): 894651

Адрес для переписки: a\_v\_simakov@rambler.ru

#### Для цитирования

Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю., Кузнецова М. А., Симаков А. В. Определение пороговых значений при диагностировании изоляции высоковольтного оборудования методами регистрации частичных разрядов // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 30–35. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-30-35.

Статья поступила в редакцию 01.03.2019 г.

© А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, М. А. Кузнецова,  
А. В. Симаков