

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

*А.С. Карандаев, С. А. Евдокимов, О.И. Карандаева,
С.Е. Мостовой, А.А. Чертоусов
г. Магнитогорск, МГТУ*

MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF POWER TRANSFORMERS WITH THE METHOD OF ACOUSTICAL DIAGNOSING

*A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, O.I. Karandaeva,
S.E. Mostovoy, A.A. Chertousov
Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University*

Дана краткая характеристика частичных разрядов (ЧР) и причин их возникновения в силовых маслонаполненных трансформаторах. Показаны характерные неисправности силовых трансформаторов 110 кВ центральной электростанции (ЦЭС) ОАО «ММК». Представлены результаты локации ЧР акустическим методом с помощью портативного прибора «АР-700». Сделан вывод о целесообразности проведения дальнейших диагностических обследований трансформаторов ЦЭС с применением стационарных приборов анализа ЧР. Целью является сбор статистической информации и создание базы данных о техническом состоянии, характере и местах возникновения дефектов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, техническое состояние, диагностирование, частичные разряды, экспериментальные исследования.

The brief performance of partial discharges (PD) and reasons of their origin in power oil-filled transformers are given. Characteristic inaccuracies of power transformers 110 kV are shown. Results of location of PD with the acoustical method with help of the portable device "AR - 700" are presented. The conclusion of expediency of further diagnostic observations of Central Electric Station transformers with application of fixed instruments of PD analysis is made.

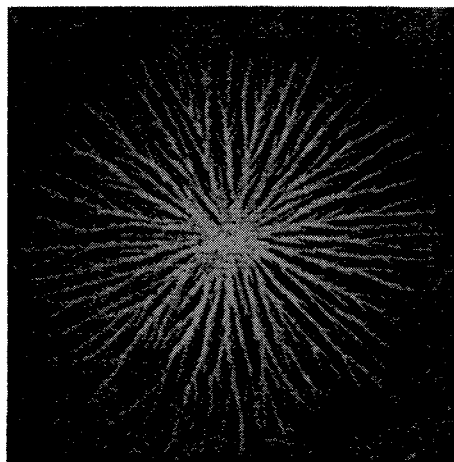
Keywords: power transformer, technical condition, diagnosing, partial discharges, experimental researches.

В последние годы в энергетических цехах предприятий, как и в энергетике в целом, наметилась тенденция к последовательному переходу от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по действительному техническому состоянию оборудования, принятому в развитых странах. Такой переход предопределяет внедрение и развитие различных методов диагностирования состояния электрооборудования.

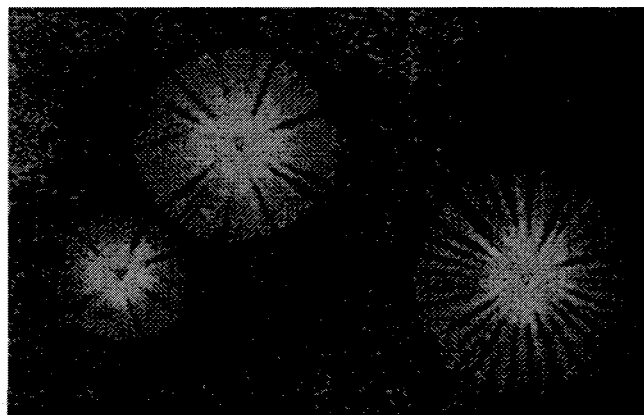
Одним из наиболее развивающихся диагностических методов маслонаполненного оборудования, и в первую очередь силовых трансформаторов, является метод локации и измерения уровня частичных разрядов.

Причины возникновения частичных разрядов

Частичным разрядом называется электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляционного промежутка [1]. ЧР возникают в локальных дефектах, т.е. в местах, где изоляция ослаблена из-за наличия газовых включений (полостей) или острых кромок металлических элементов изоляционных конструкций (электродов) (рис. 1) [2]. Газовые включения в жидкой или твердой изоляции - это слабые места, так как из-за различия диэлектрических проницаемостей газа и окружающих включения диэлектриков напряженность электрического поля во включениях в несколько раз выше, чем в остальной изоляции и, кроме того,



а)



б)

Рис. 1. Запись ЧР высокоскоростной камерой: а) поверхностный разряд с положительного электрода; б) поверхностный разряд с отрицательного электрода

электрическая прочность газа существенно ниже, чем прочность жидких и твердых диэлектриков. ЧР могут возникать и непосредственно в масле около острых краев электродов, где напряженность электрического поля резко увеличена.

Частичные разряды в масляных прослойках, контактирующих с твердой изоляцией, как правило, приводят к повреждению твердой изоляции и образованию на ее поверхности устойчивых проводящих следов. В зоне этих следов при воздействии перенапряжений или даже рабочего напряжения могут возникать условия для непрерывного развития поверхностных разрядов, которые завершаются полным пробоем изоляции. Таким образом, ЧР представляют большую опасность для изоляции из-за быстрого ее разрушения в локальных зонах и последующего пробоя изоляционных промежутков.

Проблема образования и развития ЧР в изоляции маслонаполненного оборудования высокого и сверхвысокого напряжений в условиях его эксплуатации представляет большой практический

интерес для персонала, эксплуатирующего оборудование. В связи с этим в настоящее время на силовых трансформаторах 110 кВ центральной электростанции ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») проводятся исследования, основной технической задачей которых являются:

- оценка технического состояния маслонаполненного оборудования на основе мониторинга частичных разрядов;
- промышленное внедрение измерительного диагностического комплекса анализа ЧР и локализации зоны дефектов в изоляции трансформаторов;
- экспериментальные исследования разработанных методов диагностирования и программного обеспечения на действующем оборудовании ЦЭС.

Характерные повреждения силовых трансформаторов ЦЭС

На первом этапе проведено исследование причин и условий возникновения повреждений в силовых трансформаторах ЦЭС (табл. 1) за период с

Таблица 1

Силовые трансформаторы ЦЭС

Расположение и назначение	Станционный номер	Тип и завод изготовитель	Заводской номер	Год выпуска /срок эксплуатации (лет)
П/ст-110кВ энерго-блок	Тр-р №1	ТРДН - 40000 / 110-76У1, г. Гольягти	9835	1978 / 28
П/ст-110кВ система	Тр-р №2	ТРДЦН - 63000 / 110-76У1, г. Гольягти	13580	1983 / 23
П/ст-110кВ система	Тр-р №3	ТРДЦН - 63000 / 110-76У1, г. Гольягти	11964	1981 / 25
П/ст-110кВ энерго-блок	Тр-р №4	ТДЦНГУ- 80000, г. Москва	927673	1968 / 38
П/ст-110кВ система	Тр-р №5	ТРДН - 63000 / 110 У1, г. Москва	1482839	2000 / 6
П/ст-110кВ система	Тр-р №6	ТРДН - 63000 / 110 У1, г. Москва	1573104	1998 / 8

2002 года по 2006 год. Для оценки распределения поврежденных по классам напряжений использовались данные Департамента генеральной инспекции по эксплуатации электрических станций и сетей РАО «ЕЭС России» табл. 2 [3].

Из табл. 2 следует, что силовые трансформаторы 110 кВ относятся к группе, имеющей самую высокую частоту появления повреждений. Анализ их распределения по основным узлам трансформаторов показал, что наибольшую повреждаемость имеют: высоковольтные вводы - 22 %, обмотки - 16%, устройства РПН - 13,5 %. Данные распределения повреждений по основным узлам трансформаторов с учетом срока эксплуатации представлены в табл. 3 [4]. Как видно из таблицы, повреждения обмоток имеют место у трансформаторов с любыми сроками эксплуатации, для РПН наибольшее число повреждений возникает у трансформаторов со сроками эксплуатации 10-30 лет, для высоковольтных вводов - после 10 лет эксплуатации.

Наиболее тяжелым повреждением трансформатора является внутреннее короткое замыкание. Как показал анализ, при повреждениях обмоток внутренние КЗ имели место в 80 % случаев общего числа повреждений обмоток, при повреждениях высоковольтных вводов - 89 %, при повреждениях РПН - 25 % и при повреждениях прочих узлов - 36 %, включая ошибки при монтаже, ремонте и эксплуатации.

Локация частичных разрядов акустическим методом

Регистрация ЧР в высоковольтном оборудовании энергосистем в условиях эксплуатации используется для целей диагностики в течение последних 10-15 лет. Контроль состояния трансфор-

маторного оборудования по характеристикам ЧР показал, что он может быть весьма эффективным.

Известны следующие методы регистрации ЧР[5]:

- электрический метод, основанный на измерении сигналов в электрических цепях, связанных с контролируемым объектом;
- электромагнитный метод, основанный на дистанционной регистрации электромагнитного излучения ЧР в СВЧ-диапазоне;
- оптический метод, основанный на дистанционной регистрации оптического излучения ЧР;
- акустический метод, основанный на измерении акустических колебаний, образующихся при ЧР, с помощью устройств контактного или дистанционного типа.

Большие возможности обеспечивает метод локализации зон электромагнитной активности на поверхности трансформатора с использованием устанавливаемых на момент измерений датчиков и измерительных устройств [6]. Это позволяет делать надежное заключение о техническом состоянии дефектного узла, включая: изоляцию, барьеры, дугу в магнитопроводе, искрения в РПН. Подобная информация, включающая тип разрядного явления и его место, может быть отождествлена с конструкцией активной части трансформатора. Это позволяет более достоверно прогнозировать надежность трансформатора, так как заключение делается не по общим оценкам характеристик ЧР, а с учетом их конкретного месторасположения. Например, наличие даже очень интенсивных разрядов в элементах крепления магнитопровода не так важно, как довольно слабые ЧР в витковой изоляции.

Исследования ЧР в изоляции силовых трансформаторов ЦЭС осуществлялись с помощью

Таблица 2

Распределения повреждений силовых трансформаторов по классам напряжений

Классы напряжений	35 кВ	110 кВ	220 кВ	330 кВ	500 кВ	750 кВ
Распределение повреждений, %	29	47	19	2	3	0

Таблица 3

Распределения повреждений силовых трансформаторов по основным узлам с учетом срока эксплуатации

Узел	Распределения повреждений с учетом срока эксплуатации, %			
	10 лет	10-20 лет	20-30 лет	более 30 лет
Обмотка	14,7	15,9	14,7	18
Магнитопровод	3,6	0	0	0
Система охлаждения	1,2	9	8	0
РПН	7,5	18	13,5	6
Течь масла	7,8	10,2	12	6,9
Высоковольтные вводы	9,6	23,4	24	19,8

прибора типа «AR700», изготавливаемого ПФФ «ВИБРО-ЦЕНТР» (г. Пермь). Прибор применяется для регистрации и анализа акустических сигналов, а также для локации зоны дефектов в изоляции высоковольтного оборудования с возможностью записи результатов измерений в долгосрочную энергонезависимую память с последующим их просмотром и сохранением в базе данных персонального компьютера.

Прибор имеет жидкокристаллический низкотемпературный дисплей с разрешением 240 x128 точек. Комплектуется четырьмя акустическими датчиками частичных разрядов и одним высокочастотным датчиком типа RFCT. Может эксплуатироваться при температуре окружающего воздуха от минус 20 до плюс 50 °С и относительной влажности воздуха до 98 % без конденсации влаги. Составляет из акустического преобразователя и измерительного устройства, соединенных между собой коаксиальным кабелем.

Экспериментальные исследования трансформаторов ЦЭС

Экспериментальные исследования выполнялись на 6 трансформаторах ЦЭС, перечень которых представлен в табл. 1. С этой целью на внешних сторонах бака трансформатора устанавливались акустические датчики прибора «AR700». Выбор места их расположения осуществлялся по следующей методике.

1. Перед началом работы к прибору подключается один акустический датчик и проводится анализ на возникновение акустических сигналов частичных разрядов. При обнаружении зоны возникновения ЧР выставляются четыре акустических датчика на расстоянии не менее 50 см друг от друга. Далее в приборе задается размер бака трансформатора, и выставляются координаты датчиков. Проводится однократная регистрация и по полученным сигналам выставляется порог для обработки.

2. Задается порог сигнала, т.е. величина, принимаемая для обработки (в процентах от максимального значения, на уровне 50% для всех трансформаторов).

3. Устанавливаются настройки шума (в расчетах зоны дефекта принимаются только сигналы выше установленного порога). Пороговые значения варьировались в зависимости от конкретного трансформатора и подбирались экспериментально.

4. Для расчета зоны дефекта все замеры производились в течение 60 секунд.

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты замеров частичных разрядов, выполненных на трансформаторе №1 энергоблока ЦЭС. Точки, схематично показанные внутри объемной зоны трансформатора (рис. 2, а), наглядно характеризуют количество и месторасположение разрядов. Акустические всплески, зафиксированные в

исходных сигналах, поступающих с датчиков (рис. 2, б), характеризуют амплитуду, частоту и длительность ЧР.

В результате эксперимента при относительно высоких порогах шумов (0,45 В) зафиксировано значительное количество разрядов, распределенных практически по всему объему бака. Обслуживающему персоналу рекомендовано провести дополнительные диагностические обследования технического состояния на предмет развития дефектов.

Аналогичные эксперименты выполнены на остальных пяти трансформаторах, представленных в табл. 1. Подтверждена прямая взаимосвязь частоты возникновения ЧР и длительности эксплуатации трансформатора после капитального ремонта. Накопление информации и обработка сигналов позволят определить количественные характеристики ЧР, перечень которых представлен в [1]. С этой целью даны рекомендации по приобретению и установке на трансформаторах №1-№4 (с наиболее продолжительными сроками эксплуатации) стационарных приборов с целью постоянного контроля за развитием ЧР. Для остальных трансформаторов рекомендовано проведение периодических замеров с частотой не реже одного раза в месяц.

Технико-экономический эффект от проведенных работ заключается в предотвращении аварий силовых трансформаторов за счет повышения эффективности обнаружения неисправностей на ранней стадии их развития.

Выводы

1. Результаты локации частичных разрядов в трансформаторах ЦЭС подтвердили основные достоинства акустического метода:

- оперативность - измерение, контроль и последующий анализ результатов проводятся без снятия силового напряжения;

- высокую эффективность диагностирования нарушений технического состояния трансформатора и локализации участков возникновения повреждений.

2. Целесообразно внедрение в эксплуатацию аппаратно-программного комплекса «АР-700», реализующего акустический метод регистрации ЧР и обеспечивающего оперативный контроль и диагностирование технического состояния силовых трансформаторов.

3. Целесообразно проведение дальнейших диагностических обследований трансформаторов ЦЭС с применением стационарных приборов анализа частичных разрядов и локации зоны дефектов в изоляции. Целью таких исследований является сбор статистической информации и создание базы данных о техническом состоянии, характере неисправностей и местах возникновения дефектов.

Трансформатор № 1

Размеры бака:

X=550 см;

Y=500 см;

Z=200 см.

Координаты датчиков (см):

Канал	X	Y	Z
1 (7)	550	50	130
2 (8)	550	50	180
3 (9)	550	100	180
4 (10)	550	100	130

Порог сигнала: 50%

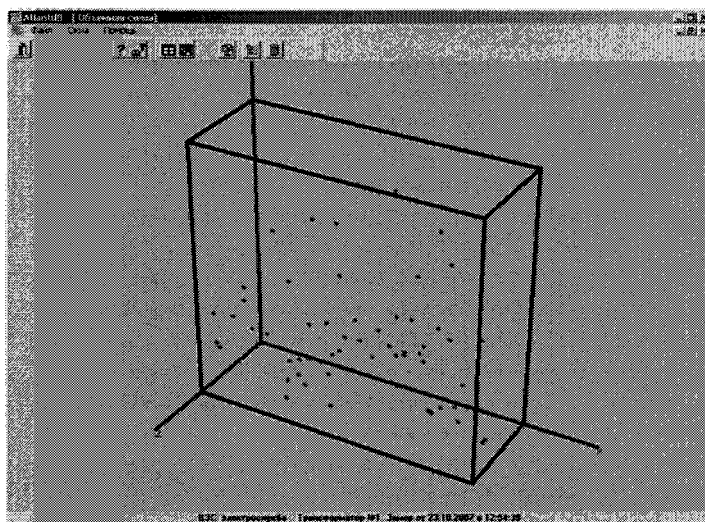
Настройки шума:

Канал 1: 0,45 В;

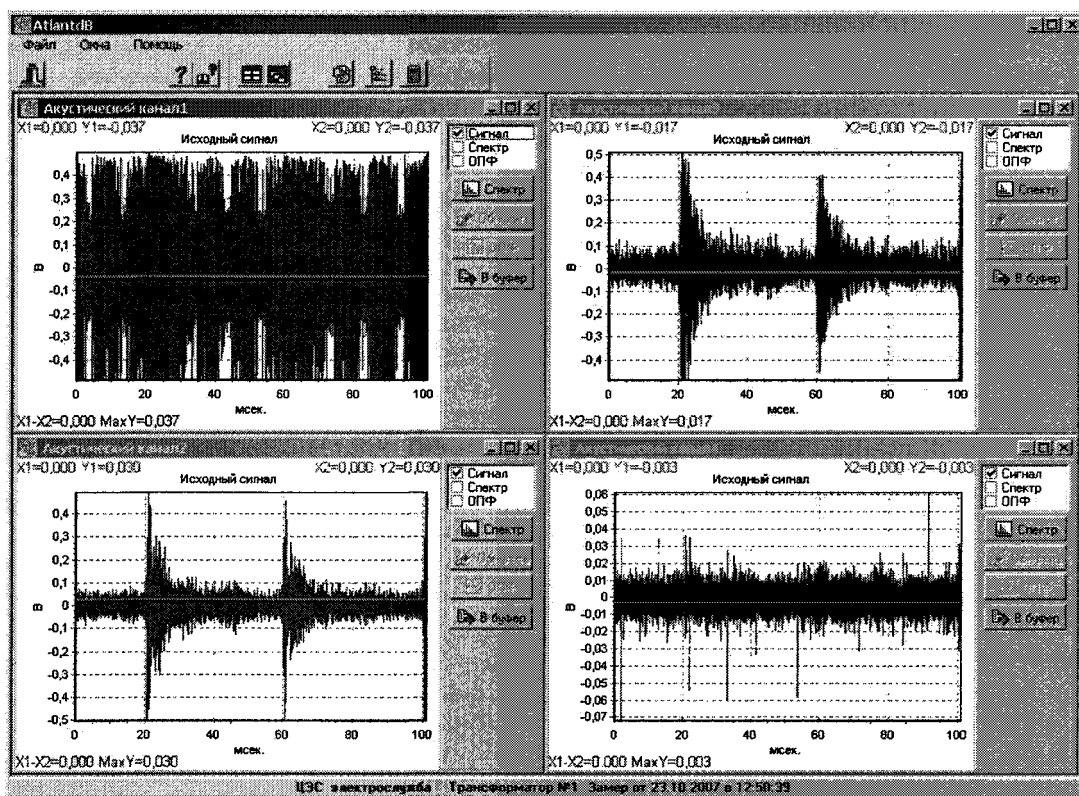
Канал 2: 0,45 В;

Канал 3: 0,45 В;

Канал 4: 0,05 В.



а)



б)

Рис. 2. Результаты мониторинга частичных разрядов трансформатора № 1:
а) объемная схема бака; б) осциллограммы акустических сигналов

Литература

1. *International Standard «High-voltage test techniques - Partial discharge measurements» - IEC 60270, Third edition, 2000-12.*

2. *Применение технологии ЧР в диагностике изоляции / Claude Kane, Alexander Golubev. - <http://www.partial-discharge.com>*

3. *О повреждении силовых трансформаторов / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов и др. // Электрические станции. — 2001. — № 9. - С. 53—58.*

4. *Львов, М.Ю. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов*

электрических сетей / М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов, Ю.А. Дементьев // Электрические станции. - 2005. - №11. - С. 69-75.

5. *Электрооборудование и электроустановки. Методы измерения характеристик частичных разрядов. - ГОСТ 20074-83.*

6. *Аксенов, Ю.П. Использование усовершенствованных методов электромагнитной локализации разрядных явлений для определения объема ремонта трансформаторов / Ю.П. Аксенов, В.И. Завидей, И.В. Ярошенко // Электро. - 2004. - №5. - С. 19-24.*

Поступила в редакцию 11.01.2008 г.

Карандаев Александр Сергеевич. Доктор техн. наук, профессор, декан энергетического факультета, заведующий кафедрой электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет» (ГОУ ВПО «МГТУ»).

Karandaev Alexander Sergeevich. Doctor of technical sciences, professor, head of Electrical Engineers and Electrotechnical Systems department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: automatic electric drive, reliability of electric equipment.

Евдокимов Сергей Алексеевич. Кандидат техн. наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «МГТУ».

Evdokimov Sergey Alexeevich. Candidate of technical science, associate professor of Electronics and Microelectronics department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: reliability, diagnostic of technical conditions of electrotechnical and energy equipment.

Карандаева Ольга Ивановна. Доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «МГТУ».

Karandaeva Olga Ivanovna. Associate professor of Electrical Engineers and Electrotechnical Systems department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: reliability of electric equipment.

Мостовой Сергей Евгеньевич. Аспирант кафедры электротехники и электротехнических систем, ГОУ ВПО «МГТУ».

Mostovoy Sergey Evgenievich. Post-graduate student of Electrical Engineers and Electrotechnical Systems department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: reliability of electric equipment.

Чертоусов Антон Александрович. Кандидат техн. наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «МГТУ».

Chertousov Anton Alexandrovich. Candidate of technical science, associate professor of Electronics and Microelectronics department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: automatic electric drive, control systems.