

УДК 621.315.615

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДЕФЕКТНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЖИДКОЙ ИЗОЛЯЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СО СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ

С.Н. Трофимова, Е.В. Шведова, О.В. Терентьев

По результатам обработки экспериментальных данных показана возможность обнаружения дефектов в жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электротехнического оборудования на ранней стадии их развития. Показано, что жидкий диэлектрик с микровключениями обладает различительными акустическими характеристиками, не использованными сегодня в диагностировании.

Ключевые слова: газовые включения в жидкой изоляции, микровключения, диагностика оборудования, параметрический сигнал разностной частоты.

Надежность работы высоковольтного маслонаполненного электрооборудования во многом определяется качеством жидкой изоляции. Наиболее тяжелым следствием повреждения т являются

Внутренние короткие замыкания трансформаторов являются наиболее тяжелым повреждением, при этом повреждения основных узлов трансформаторов заканчиваются короткими замыканиями в 89 % случаев [1].

Исследованию дефектов в высоковольтном маслонаполненном электрооборудовании, а также причин их возникновения, посвящены работы [2–13], а опыт исследований показывает, что более 70 % дефектов жидкой изоляции может быть выявлено без отключения трансформаторного оборудования [14]. Анализ технического состояния изоляции маслонаполненного оборудования является чрезвычайно сложной задачей, так как оценка изоляции включает в себя большое число параметров. При этом возникают проблемы по оценке степени опасности обнаруженного дефекта изоляции по причине многофакторности задачи. В такой ситуации диагностика состояния изоляции маслонаполненного высоковольтного оборудования является весьма актуальной задачей.

Известно, что одной из проблем поддержания трансформаторного масла в электроизоляционном состоянии является содержание в масле газовых микровключений как предвестников частичных разрядов [15].

От количества и свойств микровключений в трансформаторном масле в значительной мере зависят не только кавитационная прочность, сжимаемость, но и электрическая прочность масла. Особенно важно знать влияние микронеоднородностей на свойства изолирующих жидкостей вблизи точек

фазовых переходов (высокая температура, кипение), поскольку происходящие при этом явления могут существенно влиять на работу высоковольтного маслонаполненного электрооборудования.

Анализ причинно-следственной связи образования газовых микровключений в жидкой изоляции, развитие в них частичных разрядов под действием сильного электромагнитного поля, влияния данных процессов на деградацию трансформаторного масла показывает, что комплексное исследование нелинейности среды жидкого диэлектрика и резонансных свойств газового пузырька в трансформаторном масле позволит выявить зависимость акустических свойств трансформаторного масла и определить изменяющиеся параметры его состояния до наступления пробоя. Рассматривая зависимость нелинейного акустического параметра изоляционной среды от размера микровключений как акустическую характеристику жидкой изоляции, можно контролировать количество и размеры этих микровключений.

Разработана методика обнаружения газовых микровключений и методика оценки технического состояния высоковольтного маслонаполненного электрооборудования по напряжению пробоя, позволяющая получить информацию о состоянии жидкой изоляции электрооборудования без вывода его из работы. Диагностика выполняется неразрушающими методами контроля и позволяет оценить изменение технического состояния изоляции на начальном этапе.

До настоящего времени не создано полностью адекватной физической модели процессов, сопровождающих пульсации кавитационного пузырька. Трудности интерпретации во многом связаны с чрезвычайно широким диапазоном изменений объема пузырька, плотности и температуры газа, а также малыми характерными интервалами времени [16].

Можно предположить, что в этих условиях практически невозможно описать весь комплекс происходящих процессов в рамках какой-либо одной модели. Уравнение состояния газа при плотности, превышающей плотность жидкости, и при температуре в десятки тысяч градусов не может быть описано с точностью, достаточной для количественных оценок термодинамических параметров газа в конце сжатия. Положение еще более осложняется, если принять во внимание процессы тепломассообмена между газом и жидкостью, а также сжимаемость жидкости, которая приводит к потерям энергии пузырьком с ударными волнами.

Поведение газового пузырька в жидкости может быть различным - чисто сферические пульсации, возникновение колебаний поверхности пузырька, при которых происходит нарушение сферической симметрии движения, трансляционное движение, взаимодействие и дробление пузырьков на более мелкие, возникновение кумулятивных микроструй и т. д.

Анализ уравнений для вязкой жидкости и связи между расстоянием разрыва и параметром нелинейности [17] показывает, что форма волны

меняется практически так же, как в случае идеальной жидкости, но дальнейший анализ эволюции формы волны требует учёта вязкости среды. Факт появления разрывов говорит о наличии нелинейной среды. Разработка экспериментального метода по измерению расстояния разрыва предоставляет информацию о степени нелинейности данной среды, то есть качественной и количественной оценки микропузырьков.

Для изучения влияния микровключений на акустические характеристики трансформаторного масла при изменении его температуры в диапазоне от 20 °С до 60 °С были проведены две серии экспериментов. Целью первой серии экспериментов было исследование температурной зависимости нелинейного акустического параметра трансформаторного масла при малой концентрации пузырьков и на одной волне накачки. Исследование температурной зависимости акустической нелинейности при излучении монохроматического сигнала проводилось на частоте 150 кГц.

Масло нагревалось до необходимой температуры, генерация пузырьков производилась компрессором через диспергатор с отверстиями различных сечений от 1 мкм до 1 мм в контролируемую область бассейна.

Измерения амплитуды акустических сигналов накачки проводились при непрерывном перемещении гидрофона вдоль оси излучателя от одной до другой стенки бассейна. По мере передвижения каретки гидрофона вдоль оси распространения звука фиксировалась амплитуда и форма гармонического сигнала на частоте накачки. Как только синусоидальная форма сигнала искажалась и менялась на пилообразную, фиксировались расстояние от излучателя до гидрофона и амплитуда сигнала на осциллографе.

Для получения более однородной пространственной картины изменения формы сигнала измерения так же проводились в два этапа для каждого измерения. На первом этапе каретка с гидрофоном перемещалась от излучателя к противоположной стенке бассейна, на втором – от противоположной стенки бассейна к излучателю. Такая процедура позволяла получить более однородные данные об амплитуде волны накачки.

В результате проведенных экспериментов по исследованию влияния микропузырьков в трансформаторном масле на его акустическую нелинейность первоначально были определены расстояния разрыва для монохроматической волны (табл. 1).

Таблица 1

Среднее значение расстояния разрыва
для волны с частотой 150 кГц

Температура нагрева масла, °С	20	30	40	50	60
Расстояние разрыва, см	26,9	27,0	25,7	26,2	24,1

В ходе проведения экспериментов обнаружено, что с повышением температуры трансформаторного масла с микровключениями уменьшается расстояние разрыва ультразвуковой моноволны, что в соответствии с формулой [18] приводит к росту нелинейного акустического параметра.

Установлено, что с увеличением температуры масла и ростом нелинейных эффектов в нем уменьшалась амплитуда сигнала на входе приемного тракта модельной установки. Следовательно, с ростом акустической нелинейности среды сигнал накачки подвержен сильному рассеянию на неоднородностях в ней и поглощению. Такие результаты хорошо согласуются с выводами в литературных источниках [19, 20].

Характер изменения зависимости акустического нелинейного параметра от температуры показывает, что нелинейные эффекты резко возрастают при температуре около 50 °С, что связано с фазовыми переходами в пузырьках, частицы воды превращаются в пар, который конкурирует с газом, содержащимся в масле.

Для уточнения результатов первой серии экспериментов проведено измерение расстояния разрыва другим способом, с использованием параметрической излучающей антенны. В трансформаторное масло с пузырьками излучалось два сигнала накачки на частотах $\omega_1 = 350$ кГц и $\omega_2 = 370$ кГц. В среде с пузырьками будет происходить нелинейное взаимодействие этих волн. Результатом данного взаимодействия будет являться генерирование волн комбинационных частот: вторых гармоник, волн суммарной ($\omega_1 + \omega_2$) и разностной ($\omega_1 - \omega_2$) частот. Вследствие значительного поглощения все волны, за исключением волны разностной частоты (ВРЧ) $\Omega = \omega_1 - \omega_2$, будут подвержены сильному затуханию. Это явление приводит к тому, что за пределами области взаимодействия будут в основном существовать лишь волна разностной частоты.

Каретка с гидрофоном перемещалась вдоль оси излучения волн накачек. В приемном тракте выделяется сигнал волны разностной частоты $\Omega = 20$ кГц. По мере удаления гидрофона от излучателя сначала наблюдался рост амплитуды ВРЧ, а затем ее затухание.

Расчеты нелинейного акустического параметра проводились по [18] с учетом уточненных значений скорости распространения ультразвука в трансформаторном масле в зависимости от его температуры. Полученные данные во второй серии экспериментов повторили характер тренда зависимости нелинейного акустического параметра от температуры, полученным в первой серии при другой схеме эксперимента. Для получения объективных данных о параметрах волны разностной частоты и нелинейной характеристики среды в экспериментах применялся спектральный анализ огибающей сигналов волны разностной частоты.

Эксперименты проводились на модельной измерительной установке, функциональная схема которой показана на рис. 1. Для создания в транс-

форматорном масле нелинейной среды в него генерировались пузырьки.

Проходя среду с пузырьками, волны частично рассеиваются на неоднородностях и частично взаимодействуют друг с другом. В результате среда генерирует волну разностной частоты $\Omega = 20$ кГц. Осциллограмма волны разностной частоты показана на рис. 2.

Для приема относительно слабых сигналов несущей волны разностной частоты в приемном тракте производится усиление, детектирование его и выделение огибающей узкополосного спектра (рис. 3).

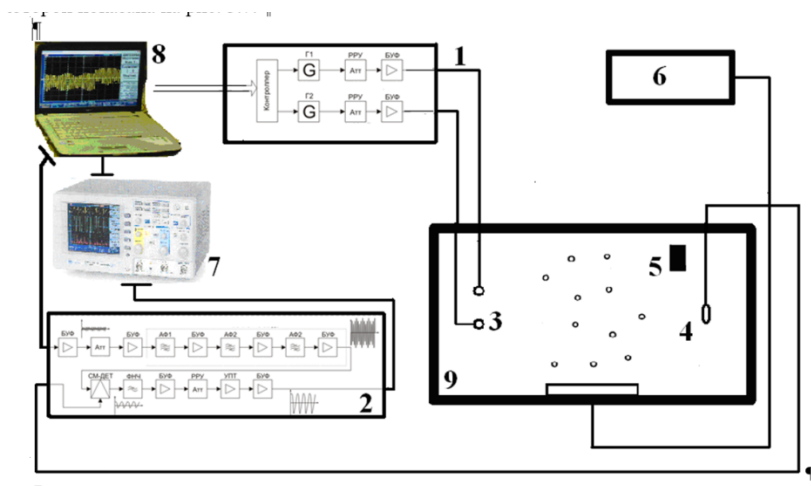


Рис. 1. Функциональная схема модельной установки:

1 – двухканальный генератор гармонических сигналов; 2 – усилители и детектор; 3 – пьезоизлучатели; 4 – гидрофон; 5 – датчик температуры; 6 – прибор управления установкой формирования пузырей и нагревания; 7 – осциллограф-спектроанализатор; 8 – компьютер; 9 – металлический бак с трансформаторным маслом

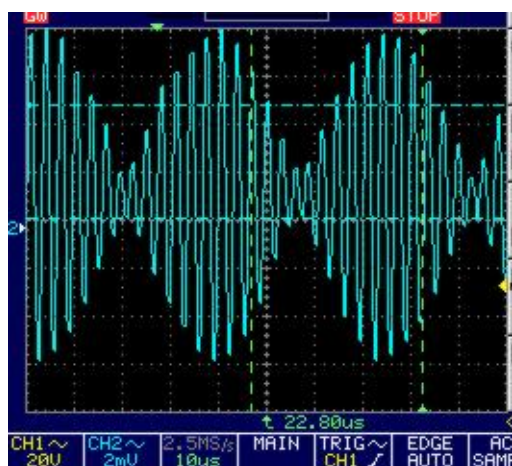


Рис. 2. Осциллограмма волны разностной частоты $\Omega = 20$ кГц.



Рис. 3. Спектрограмма огибающей волны разностной частоты

Данный спектр волны разностной частоты четко реагирует на изменение параметров нелинейной среды. Основываясь на показаниях именно

этого спектра, осуществлялось экспериментальное определение расстояние разрыва.

Анализ звукоряда спектра огибающей сигнала волны разностной частоты производился на ПК в пакете audio Tester V2.2. На спектрограмме (рис. 4) выделяется дискретная составляющая звукоряда на частоте 20 кГц – волна разностной частоты. Другие характерные дискретные составляющие на частоте 4,2 кГц, 8,4 кГц, 12,8 кГц, 17 кГц относятся к сигналам, генерируемым микропузырьками на их резонансных частотах.

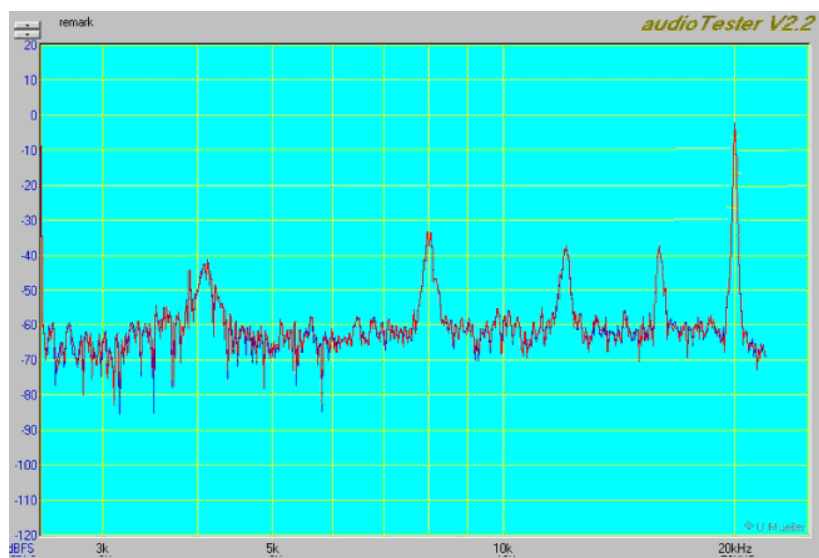


Рис. 4. Звукоряд огибающей сигнала волны разностной частоты с дискретной составляющей волны разностной частоты и гармониками генерируемыми пузырьками

В результате использования спектрального анализа огибающей сигнала волны разностной частоты были установлены характеристики сигналов комбинационных частот и акустические параметры трансформаторного масла с пузырьками.

Результаты измерения по экспериментальному определению расстояние разрыва по величине спектра волны разностной частоты были оценены на величину границы погрешности. Для этого было проведено 41 измерение величины спектра волны разностной частоты (табл. 2).

При уменьшении излучаемой частоты волн накачек увеличивается давление волны разностной частоты, но также увеличивается радиус микропузырьков, которые можно зафиксировать. В экспериментах для волн накачек чаще всего использовался рабочий диапазон частот.

Максимальное давление волны разностной частоты будет соответствовать только одному определенному радиусу микропузырька. Уменьшение частоты волны разностной частоты приводит к смещению этого максимума в сторону увеличения радиуса микропузырьков, а также уменьшению давления волны разностной частоты.

Таблица 2

Результаты наблюдений по определению расстояния разрыва

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Расстояние разрыва, мм	209	209	211	213	210	208	211	206	212	213	211
Номер опыта	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Расстояние разрыва, мм	205	210	209	211	210	204	211	209	212	208	203
Расстояние разрыва, мм	214	207	209	210	209	211	212	206	207	206	208
Номер опыта	34	35	36	37	38	39	40	41	–	–	–
Расстояние разрыва, мм	210	212	211	210	211	213	211	213	–	–	–

На основании результатов исследований показано, что жидкий диэлектрик с микровключениями обладает различительными акустическими характеристиками, не использованными сегодня в диагностировании.

Установленная взаимосвязь акустических и температурных параметров трансформаторного масла позволяет полученные в ходе экспериментов результаты исследования использовать для диагностирования дефектных областей жидкой изоляции со структурной неоднородностью – микровключениями и выявлять дефекты изоляции на ранней стадии их развития.

Библиографический список

1. Сазыкин, В.Г. Системный подход к проблеме изношенного электрооборудования / В.Г. Сазыкин // Электрика. – 2001. – № 4.
2. Maximov, S.P. The means of losses reduction and electric lines operation reliability increase, 2016 / S.P. Maximov, S.N. Trofimova // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – 2016 – Proceeding.
3. Львов, М.Ю. Оценка предельного состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов / М.Ю. Львов, Л.Г. Мамиконянц // Электрические станции. – 2008. – №1. – С. 44–49.
4. Алексеев, Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б.А. Алексеев. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС. – 2002. – 216 с.
5. Диагностика и управление электротехническими комплексами погружных установок электроцентробежных насосов: монография / В.В. Сушков, Г.В. Мальгин, Т.Д. Гладких, А.А. Зябкин. – Нижневартовск: Изд-во Нижневартовского гос. ун-та, – 2013. – 112 с.
6. Алексеев, Б.А. Системы непрерывного контроля состояния крупных силовых трансформаторов / Б.А. Алексеев // Электрические станции. – 2000. – № 8. – С. 62–70.
7. Русов, В.А. Системы диагностического мониторинга силовых трансформаторов / В.А. Русов // Электро. – 2009. – № 6. – С. 35–37.

8. Хренников, А.Ю. «On-line» система защиты и мониторинга механического состояния обмоток силовых трансформаторов и реакторов / А.Ю. Хренников // Вестник СамГТУ, Технические науки. – 2007. – № 2(20). – С. 158–163.
9. Гольдштейн, Е.И. Определение параметров и характеристик ветви намагничивания однофазного трансформатора по массивам мгновенных значений токов и напряжений / Е.И. Гольдштейн, А.В. Панкратов // Известия ВУЗов: Электромеханика. – 2008. – № 5. – С. 20–24.
10. Давиденко, И.В. Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и обслуживания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования: автореф. дисс. ... на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук: 05.14.12, Екб., 2009. 48 с.: ил.
11. Алексеев, Б.А. Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии / Б.А. Алексеев. – М.: НТФ Энергопрогресс. – 2010. – 88 с.
12. Зябкин, А.А. Система непрерывного контроля параметров обмоток силовых трансформаторов на основе имитации динамических режимов работы / А.А. Зябкин, В.З. Ковалев, Н.Г. Ровкина // Омский научный вестник. – 2011. – № 3(103). – С. 191–193.
13. Хренников, А.Ю. Системы мониторинга и опыт диагностики состояния электротехнического оборудования в ОАО «Самараэнерго» / А.Ю. Хренников. – Электро. – 2004. – № 2. – С. 32–38.
14. Зарембо, Л.К. Введение в нелинейную акустику / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. – Звуковые и ультразвуковые волны большой интенсивности. – М.: Наука. – 1966.
15. Зарембо, Л.К. Некоторые вопросы распространения ультрозвуковых волн конечной амплитуды в жидкостях / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников // Успехи физических наук. – 1959. – Т. LXVIII, вып. 4. – С. 709–712.
16. Карандаев, А.С. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А.С. Карандаев, С.Е. Мостовой // Электрические станции. – 2005. – № 10. – С. 12–18.
17. Кашапов, Р.Н. Диагностика маслонаполненного оборудования при переходе к ремонту по техническому состоянию / Р.Н. Кашапов, С.П. Коршунова, Л.Н. Малышева, А.А. Тихонов // Электрика. – 2007. – № 9. – С. 24–28.
18. Киреева, Э.А. К вопросу о старении силовых трансформаторов / Э.А. Киреева // Промышленная энергетика. – 2004. – № 2. – С. 14–16.
19. Долин, А.П. Акустическая локация электрических разрядов в измерительных трансформаторах / А.П. Долин, С.К. Цветаев // Электро. – 2005. – № 2. – С. 15–26.
20. Львов, М.Ю. Анализ общих условий существования начальных частичных разрядов в масляных прослойках витковой изоляции трансформатора / М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов // Электрические станции. – 2009. – С. 26–31.
21. Дружинин, Г.А. Волны в средах с пузырьками / Г.А. Дружинин // Акустический журнал. – 1988. – Т. 34. – № 1.
22. Гурбунтов, С.Н. О параметрическом возбуждении шумовых низкочастотных волн в нелинейной среде / С.Н. Гурбунтов, А.А. Зубков // Акустический журнал. – 1977. – Т. 23. – № 2.

23. Дрожжин, А.П. Инициирование пробоя в жидкости с помощью кавитационных пузырьков / А.П. Дрожжин, С.М. Коробейников // Научный вестник НГТУ. – 2003. – №2. – С. 15–16.

24. Журавлев, А. Технология тепловизионного контроля в диагностике силовых трансформаторов / А. Журавлев, Г. Попов // Электроцех. – 2008. – № 10. – С. 50–54.

25. Заболотская, Е.А. Взаимодействие газовых пузырьков в поле звуковой волны / Е.А. Заболотская // Акустический журнал. – 1984. – Т. 30, № 5.

[К содержанию](#)