

УДК 620.192.34+621.315.615.2+681.518.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЖИДКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ С МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ

© М. М. Лукьянов¹*Статья поступила 24 октября 2014 г.*

Рассмотрены проблемы образования микровключений в жидкой изоляции (ЖИ) маслонаполненного высоковольтного электрооборудования (МВВЭО), особенности существующих методов контроля технического состояния ЖИ, диагностирующих повреждение изоляции в случае прохождения через дефектную область. Предложено устройство для обнаружения микропузырьков и контроля технического состояния ЖИ с целью раннего обнаружения дефектов, предупреждения отказов МВВЭО и обеспечения безопасности электротехнического персонала. Описан принцип действия установки, основанный на нелинейном параметрическом взаимодействии акустических колебаний близких частот. Приведены схема формирования параметрической излучающей антенны и методика обнаружения акустического сигнала волны разностной частоты. Представлены экспериментальные данные по исследованию влияния области нелинейного параметрического взаимодействия акустических колебаний в трансформаторном масле с микровключениями на технические параметры модельной установки по исследованию кавитационных явлений в ЖИ. Описаны новые признаки, характеризующие дефектную область изоляции с микровключениями. Разработаны показатели качества ЖИ, характеризующие физико-механические свойства диэлектрика в действующем (работающем) высоковольтном электрооборудовании.

Ключевые слова: маслонаполненное высоковольтное электрооборудование; жидкая изоляция с микровключениями; сигнал акустических волн накачки; нелинейное параметрическое взаимодействие акустических волн; параметрический сигнал волны разностной частоты; параметрическая излучающая антенна; установка для предупреждения об опасном состоянии жидкой изоляции высоковольтного маслонаполненного электрооборудования.

Системы электроснабжения включают разнообразные технические устройства, важным элементом которых — маслонаполненное высоковольтное электрооборудование (МВВЭО). Физический износ и, как следствие, отказ в работе и аварийность МВВЭО приводят к снижению надежности и эффективности функционирования электроустановок, ухудшению условий производственной среды, появлению опасных факторов в рабочей зоне электротехнического персонала.

Безаварийность производственной эксплуатации МВВЭО во многом зависит от качества жидкой изоляции (ЖИ). Старение масла снижает надежность изоляционной конструкции, так как повышенная кислотность способствует старению твердой изоляции, а осаждение шлама увеличивает диэлектрические потери и ухудшает отвод тепла. Влага в масле, переходя в твердый диэлектрик, усиливает в нем процессы разрушения. Наличие в масле пузырьков газа способствует развитию частичных разрядов (ЧР).

Для предупреждения отказов МВВЭО, обеспечения безопасности электротехнического персонала необходимо контролировать техническое состояние ЖИ с целью раннего обнаружения дефектов.

Прямые методы определения интенсивности вышеуказанных факторов, пригодные для эксплуатационных условий, отсутствуют. Применяются косвенные методы контроля параметров изоляции, определяемые процессами, происходящими в диэлектриках (поляризацией, адсорбцией, проводимостью). К таким параметрам относятся: комплексная проводимость изоляции, диэлектрические потери, емкость, интенсивность ЧР. Для диагностирования используются также зависимости этих параметров от температуры, приложенного напряжения и времени.

В настоящее время среди косвенных методов контроля все более широкое применение находят такие, как высокоэффективная жидкостная и газовая хроматография, определение фракционного состава механических примесей и характера загрязнений при помощи автоматических счетчиков частиц и устройств мембранной фильтрации, инфракрасная спектроскопия, определение электрической проводимости трансформаторных масел. Однако и они способны обнаружить дефектные области изоляции только в случае, когда через диэлектрик уже проходит ток.

Одной из главных причин изменения состояния изоляции (вплоть до непригодной для предусмотренных условий эксплуатации) сегодня считается кавита-

¹ Челябинский металлургический комбинат, г. Челябинск, Россия; e-mail: Lukmm@inbox.ru

ционный механизм износа. В известных на настоящее время лабораторных экспериментах [1–4] выявлены и показаны механизмы износа изоляции в маслонаполненном электрооборудовании, связанные с кавитационным образованием микровключений.

Кавитация в жидкости сопровождается различными явлениями [5]: характерным шумом, ускорением одних химических реакций и инициированием других, интенсивными микропотоками и ударными волнами, способными перемешивать слои жидкости и разрушать поверхности граничащих с кавитирующей жидкостью твердых тел и др. Однако наиболее важные с точки зрения безопасности эксплуатации изоляции явления, инициируемые кавитацией, — ЧР, электрический пробой и в конечном счете деградация всей изоляционной системы МВВЭО.

Установлено [4], что зажигание разряда обусловлено возникновением многолавиного пробоя в пузырьке, деформацией пузырька и последующим переходом разряда непосредственно в жидкую фазу после достижения в жидкости (вблизи полюса пузырька) критической напряженности. Зажигание разряда может происходить как на поверхности пузырька, так и при возникновении стримера внутри него.

Рост образовавшегося пузырька возможен в результате развития в нем ЧР и формирования газообразных продуктов разложения изоляции. Увеличение газовых пузырьков сопровождается дальнейшим ростом интенсивности ЧР, что приводит в конечном итоге к пробоям изоляции.

Таким образом, одна из причин пробоя ЖИ — пузырьковый механизм. При этом пузырьки газа могут изначально присутствовать в жидкости либо возникать позднее в процессе эксплуатации. После образования пузырьков происходит их рост под действием электрического поля, и когда они достигают некоторого размера, появляются условия для пробоя газа внутри них. Возникновение электрического разряда определяется физико-химическим составом жидкости, параметрами парогазовой смеси, размерами пузырька. Пробой газа в пузырьке приводит к локальному усилению электрического поля в жидкости. Далее возможен пробой жидкого диэлектрика.

Двухфазное состояние ЖИ представляет собой газожидкостную смесь, состоящую из сплошной жидкой фазы и распределенного в ней в виде отдельных пузырьков газа. Для характеристики двухфазного состояния принято использовать объемное газосодержание либо некоторые осредненные параметры, определяющие размеры включений (например, средний диаметр или радиус). В экспериментах проводили имитационное моделирование тепловой кавитации с распределением газовых микровключений в трансформаторном масле марки ГК при объемном газосодержании в области взаимодействия $1,9 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3}$; средний радиус включений — 214 мкм.



Рис. 1. Структурная схема устройства для предупреждения об опасном состоянии ЖИ МВВЭО

В номенклатуре [6] показатели качества, признаки и параметры, прямо характеризующие дефектную область изоляции с микровключениями, отсутствуют. Косвенно такую область можно обнаружить по изменению плотности трансформаторной жидкости, так как микровключения определенного размера, заполненные парогазовой смесью, имеют плотность, отличную от жидкого диэлектрика. Это необходимый, но не достаточный признак для определения дефекта. Более важными с точки зрения практической применимости являются параметры, связывающие геометрические размеры микровключения и его пробивное напряжение [6], признаки, описывающие физико-механические свойства области диэлектрика с микровключениями.

Для описания новых признаков, характеризующих дефектную область изоляции с микровключениями, и разработки показателей качества ЖИ, характеризующих ее физико-механические свойства в действующем (работающем) высоковольтном электрооборудовании, необходимо в первую очередь исследовать параметры сигналов акустического поля и их влияние на технические характеристики устройства для предупреждения об опасном состоянии ЖИ МВВЭО [7]. С этой целью разработано устройство, структурная схема которого показана на рис. 1.

Установка включает систему контроля жидкой изоляции, а также блок анализа и предупреждения. Для формирования гармонических сигналов с заданными постоянными частотами в диапазоне 100–400 кГц используют генераторы G_1 и G_2 . Частоту формируемых гармонических сигналов устанавливают с помощью ПЭВМ (шаг настройки — 1 Гц). Выходы генераторов G_1 и G_2 соединены с ультразвуковыми излучателями A_1 и A_2 , способными работать в широком диапазоне температур (10–95 °С). Акустические волны накачки от ультразвуковых излучателей достигают ЖИ с газовыми микровключениями, в которой происходит их частичное рассеивание, нелинейное параметрическое взаимодействие и формирование на этих неоднородностях параметрической антенны, излу-

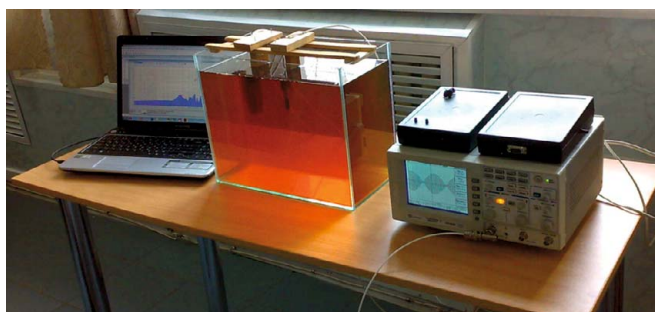


Рис. 2. Модельная акустическая установка контроля ЖИ с микровключениями

Результаты измерения амплитуды параметрического сигнала ВРЧ (мкВ)

Расстояние между излучателями и гидрофоном, мм	Амплитуда сигнала накачки, мВ	
	8	14
70	1,8	1,1
140	2,0	2,8
270	1,6	0,9

ки сигнала, несущие информацию об амплитуде и частоте акустической ВРЧ в ЖИ, затем поступают в решающий блок, позволяющий на основании указанных выше полученных данных и заложенного алгоритма рассчитать размеры газовых микровключений в ЖИ МВВЭО и определить напряжение пробоя ЖИ.

Для определения эффективной зоны нелинейного параметрического взаимодействия акустических волн накачки в заданном диапазоне частот, образования ВРЧ и исследования влияния области нелинейного акустического взаимодействия волн в трансформаторном масле с микровключениями на технические параметры акустической установки провели серию экспериментов на модельной акустической установке (рис. 2).

Суть экспериментов заключалась в следующем. В трансформаторное масло с пузырьками поступали два сигнала накачки акустических волн на частотах $f_1 = 350$ кГц и $f_2 = 370$ кГц. Вследствие этого в среде происходило частичное их рассеяние, а также нелинейное параметрическое взаимодействие на неоднородностях, в результате которого генерировались волны комбинационных частот, включая и ВРЧ. Параметрический сигнал последних принимали трактом приема на частоте $F_\Omega = 20$ кГц.

При перемещении каретки (изменении базы установки) с гидрофоном вдоль оси распространения волн накачки последовательно на интервале расстояний от 50 до 300 мм с шагом 10 мм измеряли модуляцию принимаемого параметрического сигнала ВРЧ при амплитудах сигнала накачки на излучающих антеннах 8 и 14 мВ соответственно. Параметры сигналов накачки во всех проведенных экспериментах измеряли на расстоянии 50 мм.

На рис. 3 представлены осциллограммы ВРЧ и спектры сигналов волн накачки акустического поля. Зависимость амплитуды параметрического сигнала ВРЧ от расстояния между излучателями и гидрофоном приведена в таблице.

Обработку результатов наблюдений и оценку погрешностей измерений выполняли в соответствии с общими рекомендациями [8]. Можно считать, что данные наблюдений имеют нормальное распределение. Пределы допустимой относительной погрешности — $\pm 12\%$.

В ходе экспериментов установлено: для обнаружения микровключений в ЖИ в заданном акустическом

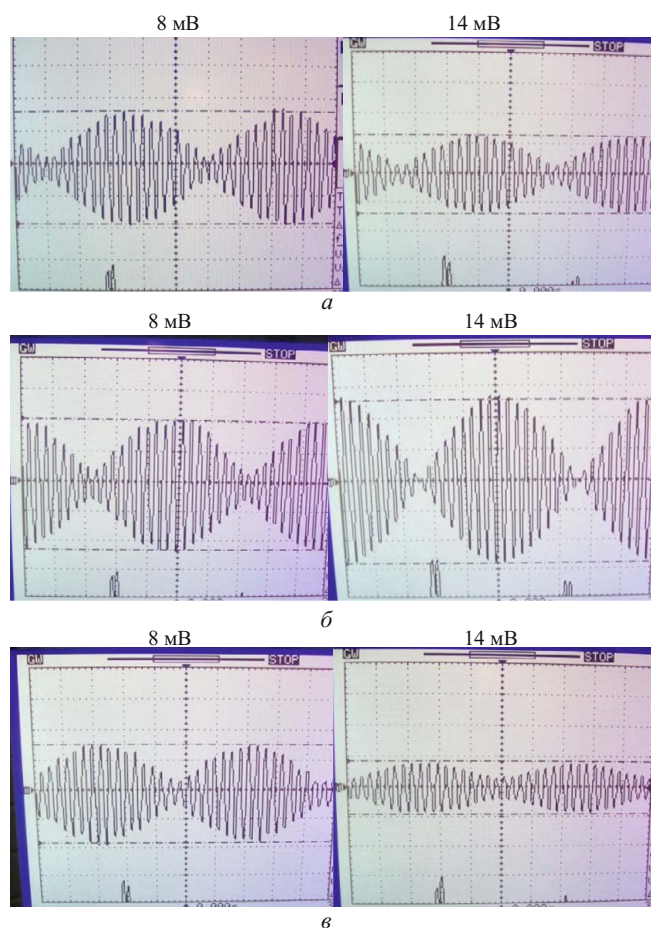


Рис. 3. Осциллограммы параметрического сигнала ВРЧ и спектры сигналов волн накачки при расстоянии между излучателями и гидрофоном 70 (а), 140 (б) и 270 (в) мм (амплитуда сигнала накачки — 8 и 14 мВ)

ющей комбинационные колебания, в том числе акустическую волну разностной частоты (ВРЧ) $F_\Omega = f_1 - f_2$ (см. рис. 1). Прием акустической ВРЧ осуществляют малогабаритным гидрофоном. Принятый параметрический сигнал ВРЧ подается в тракт приема, детектирования и обработки сигнала, состоящий из многокаскадного усилителя сигнала, узкополосного фильтра, амплитудного детектора, усилителя, аналого-цифрового преобразователя и спектроанализатора. Сигналы с тракта приема, детектирования и обработ-

диапазоне частот оптимальная база акустических датчиков составляет $140,0 \pm 16,8$ мм (см. таблицу).

Таким образом, в работе представлены новые экспериментальные результаты исследования влияния характеристик параметрического сигнала акустического поля ВРЧ в ЖИ с микровключениями на технические параметры установки для предупреждения об опасном состоянии ЖИ МВВЭО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дарьян Л. А. Исследование механизма повреждения внутренней изоляции трансформаторов тока с «газовой подушкой» / Электрические станции. 2008. № 5. С. 42 – 49.
 2. Дарьян Л. А. Кавитационный механизм старения маслопропитанной изоляции конденсаторного типа при переменном напряжении / Научный вестник НГТУ. 2007. № 2. С. 131 – 143.
 3. Коробейников С. М. Электрофизические процессы в газообразных жидких и твердых диэлектриках. Процессы в жидкостях. — Новосибирск: Издательство НГТУ, 2010. — 116 с.
 4. Вдовико В. П. Образование и развитие частичных разрядов в бумажно-масляной изоляции высоковольтного оборудования в условиях эксплуатации / Электро. 2004. № 1. С. 36 – 39.
 5. Маргулис М. А. Электрические явления в многопузырьковых кавитационных полях / Физическая химия. 2007. Т. 81. № 7. С. 1334 – 1338.
 6. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. — М., 1997. — 152 с.
 7. Пат. 2444023 РФ. Установка для предупреждения об опасном состоянии жидкой изоляции высоковольтного маслонаполненного электрооборудования / Святых А. Б., Лукьянов М. М., Коношенко А. В.; заявитель и патентообладатель ООО «Предприятие «Уралспецавтоматика». — № 2010140265/28; заявл. 01.10.2010; опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6.
 8. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения [электронный ресурс]. URL: <http://www.docload.ru/Basesdoc/34/34612/index.htm> (дата обращения 02.04.2014).
- ## REFERENCES
1. Dar'yan L. A. Issledovanie mekhanizma povrezhdeniya vnutrennei izolyatsii transformatorov toka s «gazovoi podushkoi» [Investigation of mechanism of internal insulation damage for current transformers with "gas blanket"] / Élekt. Stantsii. 2008. N 5. P. 42 – 49 [in Russian].
 2. Dar'yan L. A. Kavitatsionnyi mekhanizm stareniya maslopropitannoi izolyatsii kondensatornogo tipa pri peremennom napryazhenii [Cavitation aging mechanism of oil-impregnated insulation of condenser-type at alternating voltage] / Nauch. Vestnik NGTU. 2007. N 2. P. 131 – 143 [in Russian].
 3. Korobeynikov S. M. Élektrofizicheskie protsessy v gazoobraznykh zhidkikh i tverdykh diélektrikakh. Protsessy v zhidkostyakh [Electrophysical processes in gaseous liquid and solid dielectrics. Processes in fluids]. — Novosibirsk: Izd. NGTU, 2010. — 116 p. [in Russian].
 4. Vdoviko V. P. Obrazovanie i razvitie chastichnykh razryadov v bumazhno-maslyanoi izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya v usloviyakh ékspluatatsii [Origin and formation of discharges in paper-oil insulation of high-voltage equipment in operational conditions] / Élektro. 2004. N 1. P. 36 – 39 [in Russian].
 5. Margulis M. A. Élektricheskie yavleniya v mnogopuzyr'kovykh kavitatsionnykh polyakh [Electric phenomena in multivesicular cavitation fields] / Fiz. Khimiya. 2007. Vol. 81. N 7. P. 1334 – 1338.
 6. Regulating Document RD 34.45-51.300-97. Ob'em i normy ispytaniy élektrooborudovaniya [Extent and norms of electrical equipment testing]. — Moscow, 1997. — 152 p. [in Russian].
 7. RF Pat. 2444023. Ustanovka dlya preduprezhdeniya ob opasnom sostoyanii zhidkoi izolyatsii vysokovol'tnogo maslonapolnennogo élektrooborudovaniya [Installation for warning about dangerous condition of liquid insulation of high-voltage oil-filled electrical equipment] / Svyatych A. B., Luk'yanov M. Moscow, Konoshenko A. V. — N 2010140265/28; appl. 01.10.2010; publ. 27.02.2012. Byul. N 6 [in Russian].
 8. State Standard GOST 8.207-76. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Pryamye izmereniya s mnogokratnymi nablyudeniymi. Metody obrabotki rezul'tatov nablyudenii. Osnovnye polozheniya [State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct measurements with multiple observations. Methods of processing the results of observations. Basic principles]. URL: <http://www.docload.ru/Basesdoc/34/34612/index.htm> (02.04.2014) [in Russian].