



ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

Способ контроля технического состояния жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования по структурно-чувствительному параметру

Лукьянов М. М., канд. техн. наук

ЦЭТЛ ОАО “Челябинский металлургический комбинат”

Святых А. Б., канд. техн. наук

ФГБОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет (НИУ)”, г. Златоуст

Рассмотрены вопросы контроля технического состояния жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования (МВВЭО). Предложен новый способ контроля, основанный на нелинейном параметрическом взаимодействии акустических колебаний, с применением структурно-чувствительного параметра — нелинейного акустического параметра жидкой изоляции.

Ключевые слова: трансформатор, изоляция, акустические колебания, пробой, пузырек в трансформаторном масле.

Физический износ, старение и, как следствие, отказ в работе и аварийность маслонаполненного высоковольтного электрооборудования приводит к снижению эффективности и надежности функционирования электротехнического комплекса, ухудшению условий производственной среды, появлению опасных факторов в рабочей зоне электротехнического персонала, что в свою очередь зачастую обуславливает прекращение подачи электрической энергии [1].

Для предупреждения отказов главных элементов электротехнических комплексов, обеспечения безопасности электротехнического персонала необходимо контролировать техническое состояние жидкой изоляции МВВЭО с целью раннего обнаружения ее дефектной области с микровключениями, в которых развиваются физические процессы, приводящие к отказам изоляции, а в дальнейшем — к технологическим нарушениям в работе электрооборудования и в целом электротехнических комплексов.

Таким образом, для реализации контроля технического состояния действующего МВВЭО необходимо решить ряд технических задач:

1. Установить критерий безопасного состояния жидкой изоляции с микровключениями.

2. Выполнить имитационное моделирование теплового процесса кавитации и выявить закономерности развития микровключений в жидкой изоляции.

3. Исследовать волновую модель жидкой изоляции с микровключениями и разработать структурно-чувствительный параметр.

4. Исследовать характеристики средства обнаружения микровключений в трансформаторном масле и определения его параметров.

5. Разработать методику обнаружения газовых микровключений в жидкой изоляции и контроля ее технического состояния по напряжению пробоя при принятии решений в процессе производственной эксплуатации МВВЭО.

При использовании трансформаторного масла происходит его старение, которому сопутствует ряд физико-химических изменений. При этом выделяются продукты разложения, в том числе газы. Известно, что основными причинами образования газовых включений в трансформаторном масле являются перегревы, гидродинамическая кавитация, электродинамическая кавитация (электрострикция), акустические колебания, адсорбция [2].

Электрическая прочность газовых микровключений жидкой изоляции значительно меньше электрической прочности трансформаторного масла. В связи с этим в нем воз-

Категория электрооборудования	Предельно допустимые параметры					
	после заливки масла в электрооборудование			до заливки масла в электрооборудование		
	Пробивное напряжение трансформаторного масла, кВ	Напряженность пробоя, кВ/мм	Радиус газового включения в жидкой изоляции, мкм	Пробивное напряжение трансформаторного масла, кВ	Напряженность пробоя, кВ/мм	Радиус газового включения в жидкой изоляции, мкм
До 15 кВ включительно	25	10	29	30	12	25
До 35 кВ включительно	30	12	20	35	14	15
От 60 до 150 кВ включительно	55	22	9	60	24	9
От 220 до 500 кВ включительно	60	24	6	65	26	5
750 кВ	65	26	5	70	28	3

никают частичные разряды, причем с увеличением их интенсивности возрастают размеры газовых пузырьков, что в конечном итоге может привести к пробое изоляции [3]. Таким образом, центрами возникновения и развития частичных разрядов в жидкой изоляции являются газовые микровключения.

Критерием оценки технического состояния жидкой изоляции МВВЭО в процессе его производственной эксплуатации могут служить размеры газовых включений, радиус которых определяет значение пробивного напряжения внутри действующего МВВЭО в зависимости от категории электрооборудования.

В ходе исследований установлены критерии опасного состояния жидкой изоляции с газовыми микровключениями и определены допустимые размеры последних (см. таблицу).

Наблюдение за возникновением и развитием газовых микровключений в ходе имитационного моделирования теплового процесса кавитации позволило выявить закономерности в их распределении, описываемые нормальным законом. В результате обработки данных измерений установлено:

аналитическая функция распределения плотности вероятности среднего радиуса газовых включений в жидкой изоляции [4]

$$f_{\text{ср}}(R) = \frac{1}{384,005} e^{-\frac{(R-214,093)^2}{306,392}}; \quad (1)$$

аналитическая функция распределения газовых микровключений в жидкой изоляции по размерам

$$f(R) = \frac{1}{123252\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R-165,721)^2}{2 \cdot 123,252^2}}. \quad (2)$$

В графическом виде обе функции представлены соответственно на рис. 1 и 2.

Для исследования физико-механических свойств жидкой изоляции с микровключениями предложен структурно-чувствительный параметр качества жидкой изоляции с микровключениями — эффективный нелинейный акустический параметр, изменяющийся от единиц до нескольких десятков при температуре 20 — 70 °С.

Свойства реальных жидкостей существенно отличаются от свойств идеальной жидкости из-за наличия различных микронеоднородностей, среди которых можно выделить газовые и парогазовые пузырьки. Их присутствие резко увеличивает нелинейные свойства трансформаторного масла, что позволяет применять для контроля его технического состояния акустические методы спектроскопии.

Волновая модель жидкой изоляции описывается уравнениями движения, непрерывности и состояния [5, 6]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$P = P_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (5)$$

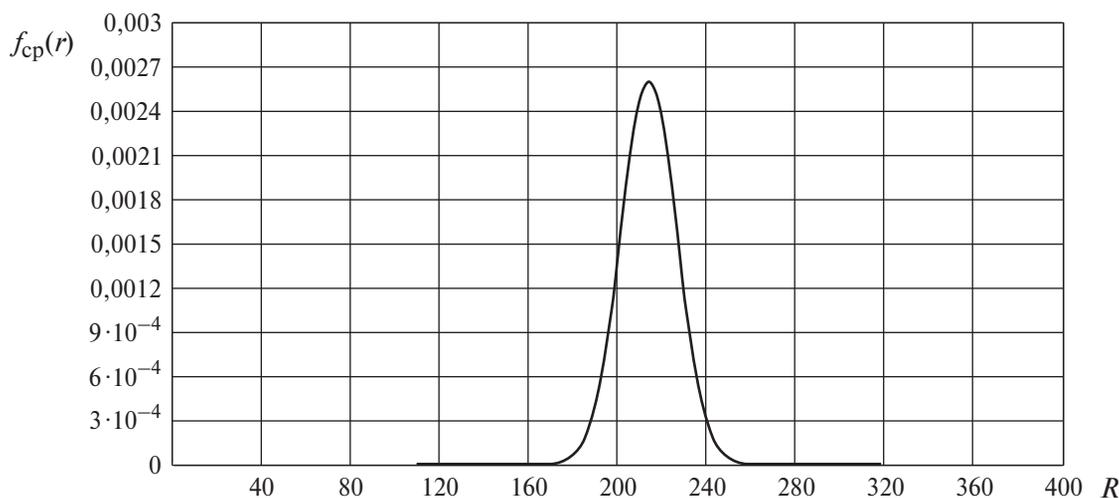


Рис. 1

где v — вектор скорости жидкости; ρ — плотность жидкости, м^3 ; x — координата, по направлению которой определяется частная производная; t — время, с; P — давление среды, Па; P_0 — внутреннее давление в жидкости, Па; γ — нелинейный параметр среды.

Объем газового включения, м^3 , возникающего в процессе технической эксплуатации маслонаполненного электрооборудования в жидкой изоляции, определяется из выражения

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3, \quad (6)$$

а объемное газосодержание — по формуле

$$\varphi = \frac{4}{3}\pi n R^3, \quad (7)$$

где R — радиус газового включения, м; φ — объемное газосодержание; n — количество газовых включений в трансформаторном масле.

Акустические методы исследования газовых включений в жидкой изоляции основываются на возможности раскачки низкочастотных радиальных колебаний стенок пузырька акустической волной, что позволяет применить акустическую спектроскопию включений. Обнаружение газовых микровключений в жидкой изоляции возможно с помощью нелинейной параметрической излучающей антенны (ПИА), структурная схема которой представлена на рис. 3 [7].

Суть нелинейного параметрического взаимодействия волн заключается в следующем: при наличии в трансформаторном масле нелинейного объекта (пузырьков газа) имеется область с нелинейными свойствами. Акусти-

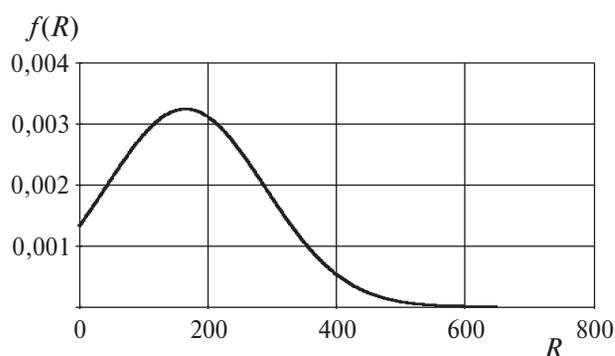


Рис. 2

ческие колебания, называемые волнами накачки и воздействующие на газовый пузырек в жидком диэлектрике, описываются уравнением

$$P_{\text{вын}} = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t), \quad (8)$$

где A_1 и A_2 — амплитуды акустических сигналов, Па; ω_1 и ω_2 — частоты акустических сигналов, с^{-1} .

В пределах дефектной области жидкой изоляции с микровключениями происходит нелинейное взаимодействие волн накачек (ω_1 и ω_2), при этом пузырек совершает радиальные колебания, описываемые уравнением Рэлея:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} R + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{\rho} (P_2 - P_{\text{вын}}). \quad (9)$$

В результате данного взаимодействия происходит генерирование волн комбинационных частот: вторых гармоник, волн суммарной ($\omega_1 + \omega_2$) и разностной ($\omega_1 - \omega_2$) частот. Причем чем более нелинейна область взаи-

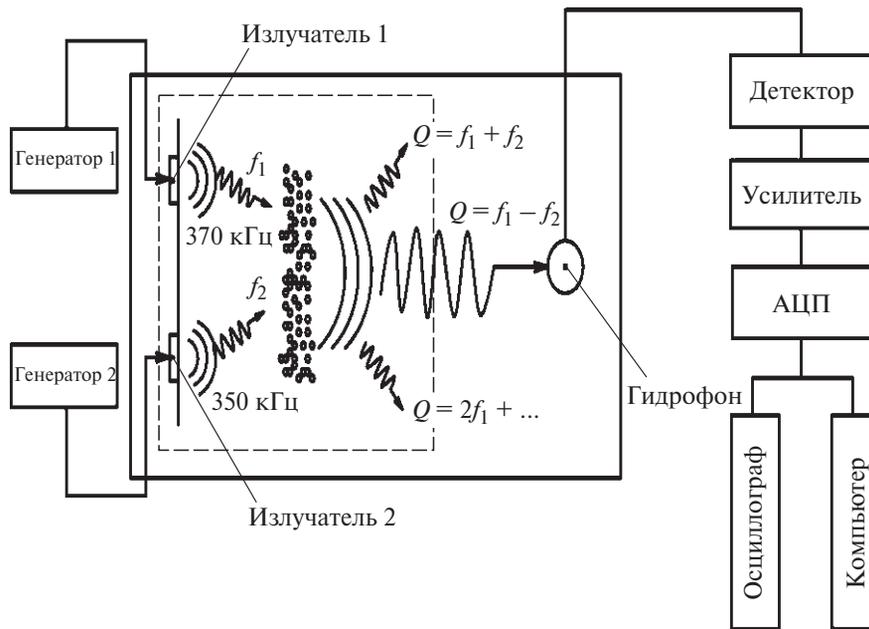


Рис. 3

модействия, тем более интенсивным будет взаимодействие. В результате область взаимодействия становится источником излучения волн комбинационных частот и является “бестелесной” антенной, размеры которой определяют характеристику направленности излучателя.

Для обнаружения микровключений в жидкой изоляции в контролируемую среду излучаются два гармонических сигнала, при этом акустическое давление волны разностной частоты (ВРЧ) в нелинейной среде можно определить по формуле

$$P_{\Omega} = \frac{\Omega^2 \rho \Delta V}{4\pi r}, \quad (10)$$

где Ω — разностная частота, с^{-1} ; ρ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; r — расстояние до пузырька, м; ΔV — изменение объема при колебаниях пузырька, м^3 .

Уравнение изменения объема газового включения при воздействии акустических колебаний, описываемых уравнением (8), с учетом структурно-чувствительного эффективного нелинейного акустического параметра примет следующий вид:

$$\Delta V = \{ \alpha_{\text{эф}}^2 [\vartheta - \beta(\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_1 \omega_2)] (A_1 A_2) \} / \{ [(\omega_{\text{рез}}^2 - \omega_1^2)^2 + \omega_1^4 \delta^2] [(\omega_{\text{рез}}^2 - \omega_2^2)^2 + \omega_2^4 \delta^2] \times [(\omega_{\text{рез}}^2 - \Omega^2)^2 + \Omega^4 \delta^2] \}^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

где A_1 и A_2 — амплитуды сигналов накачки; $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ — разностная частота, с^{-1} ; ω_1 и ω_2 — акустические сигналы накачки; $\omega_{\text{рез}}$ — резонансная частота пульсирующего пузырька; $\delta = 0,5$ — декремент затухания; $\vartheta = 3\beta(\gamma + 1)\omega_{\text{рез}}^2$; $\beta = 1/(8\pi R_0^3)$; R_0 — равновесное значение радиуса пузырька; $\alpha_{\text{эф}}$ — эффективный нелинейный акустический параметр жидкой изоляции.

В результате математического моделирования в программном комплексе MathCad определены зависимости амплитуды ВРЧ от радиуса обнаруживаемых газовых включений при разных значениях частот сигналов накачек. Установлено, что при изменении значений частоты ВРЧ изменяется лишь амплитуда ВРЧ, а изменение радиуса обнаруживаемого пузырька происходит при изменении частот сигналов накачек.

Таким образом, исследованы акустические характеристики ПИА, определены частотный диапазон сигналов накачки (от 400 до 30 кГц) и частота сигнала ВРЧ (20 кГц), обеспечивающие возможность акустической спектроскопии трансформаторного масла и обнаружения газовых включений размерами от 7 до 110 мкм.

На рис. 4 показана структурная схема натурной установки средства обнаружения газовых микровключений в трансформаторной жидкости [8], появление которых предшествует образованию дефектной области изоляции. С использованием этой схемы получены

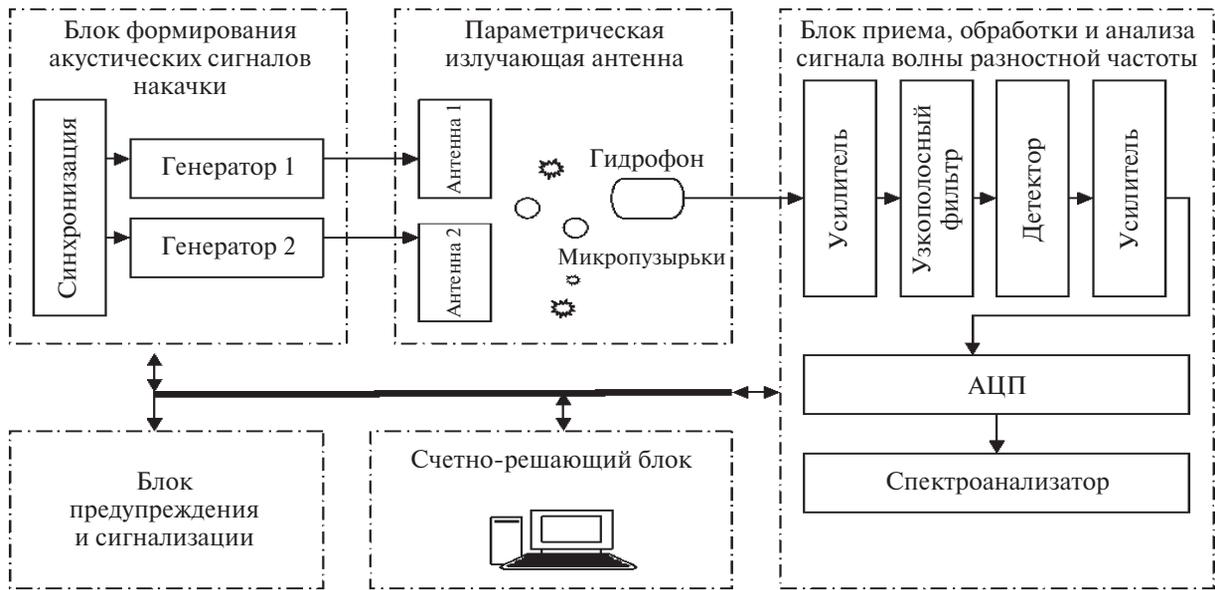


Рис. 4

экспериментальные данные амплитуды ВРЧ. Расхождение между ними и ее расчетными значениями составило не более 22 %, что позволяет идентифицировать газовые микровключения в жидкой изоляции действующего оборудования.

Предлагаемая ниже методика оценки технического состояния МВВЭО по напряжению пробоя позволяет получить информацию о состоянии жидкой изоляции электрооборудования без вывода его из работы в режиме “реального времени”. Методику реализуют в следующей последовательности:

- 1) определяют температуру жидкой изоляции;
- 2) вычисляют скорость звука в среде и нелинейный акустический параметр;
- 3) производят калибровку системы;
- 4) осуществляют накачку изоляционной среды акустическими сигналами близкой частоты;
- 5) с помощью приемного тракта установки обнаруживают и обрабатывают акустические сигналы;
- 6) измеряют спектры шумов и сигналов на спектроанализаторе;
- 7) выявляют дискретные составляющие в обоих спектрах, идентифицируют сигналы накачек;
- 8) детектируют сигнал и выделяют его амплитудную огибающую (ВРЧ);
- 9) измеряют спектр амплитудной огибающей сигналов;
- 10) в спектре ВРЧ выявляют дискретные составляющие сигналов;

11) осуществляют построение звукоряда из дискретных составляющих;

12) определяют дискретную составляющую сигнала ВРЧ и ее амплитуду;

13) делают заключение о наличии или отсутствии микровключений в жидкой изоляции;

14) определяют размер газовых микровключений по уровню амплитуды ВРЧ. Для этого применяют следующую формулу:

$$\frac{4\pi r P_{\Omega}}{\Omega^2 \rho} = \left\{ \alpha_{эф}^2 \left[3 \frac{1}{8\pi R_0^3} (\gamma + 1) \left(\frac{3\gamma P_0}{\rho R_0^2} \right) - \frac{1}{8\pi R_0^3} (\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_1 \omega_2) \right] (A_1 A_2) \right\} / \left[\left[\left(\frac{3\gamma P_0}{\rho R_0^2} - \omega_1^2 \right)^2 + \omega_1^4 \delta^2 \right] \left[\left(\frac{3\gamma P_0}{\rho R_0^2} - \omega_2^2 \right)^2 + \omega_2^4 \delta^2 \right] \right] \times \left[\left(\frac{3\gamma P_0}{\rho R_0^2} - \Omega^2 \right)^2 + \Omega^4 \delta^2 \right]^{1/2}. \quad (12)$$

Ее решение в программной среде MathCad позволяет рассчитать размеры газовых микровключений жидкой изоляции и получить зависимость $R_0 = f(P_{\Omega}, \omega_1, \omega_2)$ на основе информации о заданных частотах накачки и измеренного значения амплитуды ВРЧ, возникающей в результате нелинейного акустического взаимодействия акустических

колебаний в жидкой изоляции с газовыми микровключениями;

15) для обнаружения пузырьков других размеров изменяют частоты сигналов накачки и повторяют п. 3 – 14;

16) графоаналитическим методом определяют пробивное напряжение дефектной области жидкой изоляции с микровключениями;

17) сопоставляют расчетные значения пробивного напряжения с предельно допустимыми значениями, представленными в таблице;

18) делают заключение о техническом состоянии жидкой изоляции и возможности безопасной эксплуатации электрооборудования.

Создание автоматизированной системы контроля, основанной на нелинейном параметрическом взаимодействии колебаний, позволит контролировать техническое состояние электрооборудования в работе и предотвращать развитие дефектов в силовых трансформаторах в виде частичных разрядов, обеспечивая таким образом эффективную и безопасную эксплуатацию действующего МВВЭО.

Список литературы

1. **Святых А. Б., Морозов И. Б., Павлов В. И.** Маслонаполненное высоковольтное оборудование как источник повышенной опасности (Материалы 10-й междунар. науч.-практической конф. в области экологии и безопасности жизнедеятельности). — Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО “КнАГТУ”, 2010.
2. **К вопросу** об образовании газовых включений в масляной изоляции / М. М. Лукьянов, А. Б. Святых, А. В. Коношенко, В. Б. Иванченко. — Изв. вузов. Электромеханика, 2007 (специальный выпуск).
3. **Коробейников С. М.** Электрофизические процессы в газообразных жидких и твердых диэлектриках. Процессы в жидкостях: Учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010.
4. **Святых А. Б.** Закономерности в распределении газовых микровключений в жидкой изоляции при тепловом механизме. — Электробезопасность, 2011, № 1.
5. **Бодунова Ю. П., Коноплев С. А., Лисин В. Б.** Взаимодействие нелинейных локализованных волн в пузырьковой суспензии. — Тр. НГТУ “Механика жидкости, газа и плазмы”, 2010, № 1(80).
6. **Ким Д. Ч.** К теории акустических солитонов в жидкости с распределенными пузырьками газа. — ЖТФ, 2007, т. 77, вып. 6.
7. **Лукьянов М. М., Коношенко А. В., Святых А. Б.** Метод обнаружения опасного состояния изоляции высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. — В кн.: Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии (сб. материалов IV Междунар. науч.-практической конф.). Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009, т. 1.
8. **Святых А. Б., Лукьянов М. М., Коношенко А. В.** Физическая модель установки контроля микровключений в жидкой изоляции и предупреждения об ее опасном состоянии. — Электробезопасность, 2010, № 1.

lukmm@inbox.ru