

**РАЗВИТИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ЖИДКОЙ ИЗОЛЯЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

В статье рассмотрены вопросы допущений принятых при способе контроля технического состояния жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования основанного на нелинейном параметрическом взаимодействии акустических колебаний. Предлагается уточнение разработанного ранее способа путем исследования времени нахождения газовых микровключений в трансформаторном масле и растворимости газовых включений.

**Ключевые слова:** изоляция маслонаполненного оборудования, частичные разряды, газовые пузырьки.

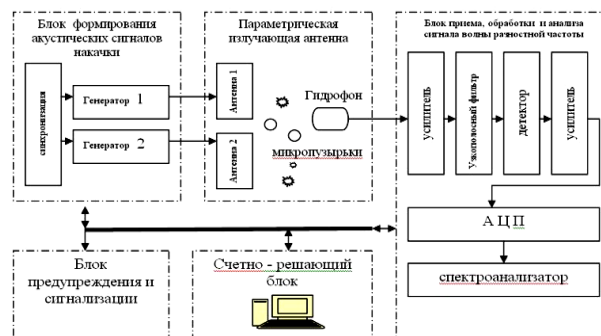
**ВВЕДЕНИЕ**

Маслонаполненное высоковольтное оборудование, несмотря на тенденцию к модернизации и замене на более современные аппараты, составляет основную часть эксплуатационного парка предприятий электрических сетей, при этом до 70% парка высоковольтных трансформаторов являются маслонаполненными [1]. Силовой трансформатор – это сложная техническая система, для поддержания работоспособности которой необходим регулярный контроль состояния и проведение своевременного ремонта. На практике способы контроля основаны, как правило, на обнаружении протекания тока в местах образования дефектов.

Специалистами отмечено [1], что одной из насущных проблем в области поддержания трансформаторного масла в электроизоляционном состоянии является содержание газовых микровключений в жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования как предвестников частичных разрядов. Основными причинами образования газовых включений в трансформаторном масле являются перегревы, в разной степени гидродинамическая, электродинамическая и акустическая кавитации, адсорбция. Изучая причинно-следственную связь образования газовых микровключений в жидкой изоляции и развитие в них частичных разрядов под действием сильного электромагнитного поля, влияния данных процессов на деградацию трансформаторного масла, можно утверждать, что резонансные свойства газового пузырька и нелинейность среды жидкого диэлектрика позволяют исследовать акустические свойства трансформаторного масла для определения его новых критериев состояния. Иными словами, рассматривая зависимость нелинейного акустического параметра изоляционной среды от размера микровключений как акустическую характеристику жидкой изоляции, можно контролировать количество и размеры данных микропузырьков. Автором [2] 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 в режиме «реального времени», основанные на использовании принципа нелинейной параметрической антенны. Суть способа заключается в следующем:

В нелинейную среду (трансформаторное масло с газовыми микровключениями) генерируются две аку-

стические волны с близкими частотами (370 и 350 кГц) гармонической формы. Проходя через среду с пузырьками, волны частично рассеиваются на неоднородностях, а частично взаимодействуют друг с другом. В результате этого взаимодействия среда генерирует волну разностной частоты (ВРЧ)  $\Omega = 20$  кГц. При этом амплитуда ВРЧ определяется нелинейностью среды, обусловленной наличием в ней газовых микровключений. Для приема относительно слабых сигналов несущей ВРЧ в приемном тракте производится усиление, детектирование и выделение огибающей узкополосного спектра на спектроанализаторе. Таким образом, уровень сигнала ВРЧ позволяет сделать заключение о наличии и размерах газовых микровключений в жидкой изоляции. Для технической реализации предложенного способа на силовом трансформаторе блок антенны и гидрофона размещается в радиаторных трубах силового трансформатора [2].



**Рис. 1. Структурная схема натурной установки средства обнаружения газовых микровключений в жидкой изоляции**

Расхождение аналитических и экспериментальных данных, представленных в [1], составило около 20%. Указанный уровень расхождения связан с допущениями, ранее принятыми авторами. Так, в предложенном способе в качестве допущений принято, что форма пузырька имеет форму шара, при этом радиус микровключения ( $R$ ), при движении от обмотки трансформатора до гидрофона, расположенного в радиаторной трубе, остается постоянным, однако в реальных условиях радиус микровключения может меняться, вплоть до полного растворения пузырька, в зависимости от различных факторов. Одним из этих факторов является время нахождения пузырька в трансформаторном масле, которое в свою очередь зависит от скорости потока трансформаторного масла в обмотке и

радиаторной трубе.

Скорость движения масла зависит, с одной стороны, от плотности теплового потока на охлаждаемых маслом поверхностях и размеров (ширины, длины) охлаждающих каналов, а с другой – от кинематической вязкости самого масла [3].

Реальную скорость потока в трансформаторе рассчитать затруднительно, но для одинаковой конструкции можно предположить, что при заданной температуре она зависит от вязкости. Скорость потока описывается законами Ньютона и Бернулли и может быть рассчитана по формуле

$$\Delta p = \frac{32 \cdot v \cdot l \cdot \gamma \cdot w}{d^2 \cdot g}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление, Па;  $l, d$  – размеры канала, м;  $\gamma$  – удельный вес масла, кг;  $g$  – постоянная сила тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $w$  – скорость масла в канале, м/с;  $v$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Тогда

$$w = \frac{\Delta p \cdot d^2 \cdot g}{32 \cdot l \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{v}. \quad (2)$$

Объединение всех постоянных значений в виде постоянного коэффициента  $a$ , позволяет получить следующее соотношение:

$$w = a \cdot \frac{1}{v}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что скорость масла обратно пропорциональна вязкости. При этом зависимость вязкости от температуры описывается уравнением Вальтера

$$\lg \lg(v + 0,6) = A + B \cdot \lg T. \quad (4)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты.

Зависимость вязкости от температуры показана на рис. 2. В первом приближении будем считать, что эта зависимость, как и видно это на рисунке, обратно пропорциональна температуре, тогда

$$w = a \cdot T, \quad (5)$$

где  $T$  – температура масла, которая определяется температурами обмоток и окружающей среды;  $w$  – скорость масла в точке с температурой  $T$ .

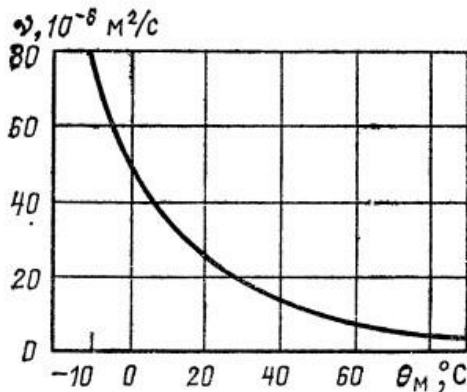


Рис. 2. Изменение кинематической вязкости трансформаторного масла с изменением его температуры

Различают несколько видов охлаждения: охлаждение при естественной циркуляции масла и воздуха, охлаждение при естественной циркуляции масла и принудительной циркуляции воздуха, принудительная циркуляция масла и направленная циркуляция масла. Несмотря на синонимичное название двух последних видов, они имеют между собой некоторое различие. А именно: принудительная циркуляция отличается от направленной направлением потока масла, но в этих случаях вектор потока задается посторонним возбудителем – насосом или вентилятором. Безусловно, такие способы охлаждения более эффективны: масло циркулирует со скоростями, превышающими скорость при естественной конвекции.

Рассмотрим подробнее естественную циркуляцию масла. Циркуляция масла в контуре охлаждения осуществляется за счет гравитационных сил. Выделяющиеся в активной части потери путем конвективного теплообмена передаются окружающему активную часть маслу. Масло под действием воспринятых им потерь нагревается и его плотность уменьшается, в связи с чем оно в зоне активных частей устремляется вверх, а вместо переместившегося нагретого масла снизу поступает холодное. Нагретое масло отдает свое тепло более холодным стенкам радиаторов, температура масла падает, его плотность увеличивается и оно устремляется вниз. В радиаторах возникает поток масла,двигающийся вниз, т. е. в направлении, противоположном направлению его движения в активной части. Принципиальная схема этого вида охлаждения показана на рис. 3.

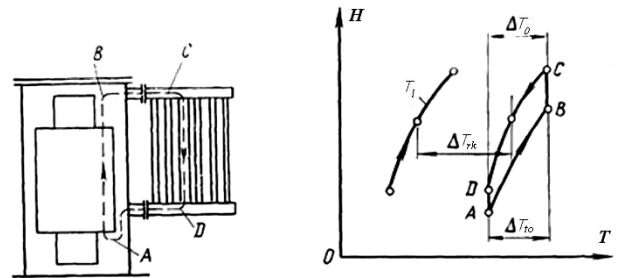


Рис. 3. Принципиальная схема естественного масляного охлаждения трансформатора

Происходящий физический процесс представлен в системе координат  $T - H$ , где  $H$  – высота трансформатора. В точке  $A$  масло попадает в обмотку, нагревается, движется вверх и в точке  $B$  выходит из обмотки. На пути движения от точки  $B$  до точки  $C$ , иными словами, до входа в радиатор, температура масла несколько падает, что обусловлено теплоотдачей крышки и верхней части стенки бака. Между точками  $C$  и  $D$  в радиаторах масло охлаждается и движется вниз. Охлажденное масло перемещается от точки  $D$  до точки  $A$  и процесс повторяется [3].

Формула (1) справедлива для потока масла в радиаторных трубах с определенными геометрическими размерами. Для анализа изменения давления в общем случае справедлива формула

$$\Delta p = \rho g \Delta H, \quad (6)$$

где  $\Delta H$  – изменение высоты; в частном случае это высота трансформатора, м;  $\rho$  – плотность трансформатор-

ного масла. Зависимость  $\rho=f(T)$  представляет собой в первом приближении обратную пропорциональность, иными словами

$$\rho = \frac{A}{T}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3), а затем в (6), получим выражение:

$$\Delta p = \frac{Ag\Delta H}{aw} = B \frac{\Delta H}{w}, \quad (8)$$

где  $A, B$  – постоянные величины.

Из (8) видно, что скорость движения масла представляет собой функцию изменения давления и высоты трансформатора. Полученная зависимость позволит определить скорость движения масла, а следовательно, и время прохождения газового пузырька от обмотки трансформатора до гидрофона, установленного в радиаторной трубе.

Для уточнения предложенной в [1,2] методики контроля технического состояния жилкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования необходимо определить не только время нахождения газового пузырька в трансформаторном масле при его движении от обмотки до гидрофона, но и зависимость изменения размеров газовых микровключений от времени их нахождения в трансформаторном масле.

Рассмотрим растворение газовых пузырьков в жидкости [5] через выражение, описывающее зависимость радиуса уединенного неподвижного пузырька от времени в ненасыщенном газом бесконечно большом объеме жидкости:

$$\frac{dR}{dt} = kD \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{(\pi D(t-t_0))^{\frac{1}{2}}} \right). \quad (9)$$

Здесь  $R$  – текущее значение радиуса растворяющегося пузырька, м;  $D$  – коэффициент диффузии газа в жидкости;  $t-t_0$  – время, прошедшее после начала растворения, с;  $k$  – коэффициент растворимости газа (отношение концентрации газа в жидкости  $c$  к концентрации газа в газовой фазе в условиях равновесия между фазами).

Это выражение для случая малых пузырьков (и больших коэффициентов диффузии) упрощается за счет пренебрежения вторым членом в скобке, что после преобразований дает возможность получить сле-

дующее выражение для определения коэффициента диффузии:

$$D = \frac{R^2(t_0) - R^2(t)}{2k(t-t_0)}. \quad (10)$$

Для установления времени схлопывания пузырька необходимым условием является

$$R^2(t) = 0.$$

Тогда

$$t - t_0 = \frac{R^2(t_0)}{2kD}. \quad (11)$$

Представленная аналитическая зависимость действительна для водородных микропузырьков, находящихся в идеальной жидкости, в реальности же состав газовых микровключений и процессы в жидкой изоляции значительно сложнее.

Таким образом, дальнейшие исследования, направленные на изучение скорости движения трансформаторного масла в радиаторных трубах и растворения газовых микровключений, позволят уточнить разработанную ранее методику контроля технического состояния жидкой изоляции, основанную на нелинейном параметрическом взаимодействии акустических колебаний, что обеспечит своевременный контроль технического состояния жидкой изоляции высоковольтного маслонаполненного электрооборудования с требуемым уровнем точности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянов М.М., Святых А.Б., Коношенко А.В. Контроль технического состояния жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного оборудования. Златоуст: Изд-во ООО «Златоустовская типография», 2011. 210 с.
2. Святых А.Б. Контроль технического состояния жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования: автореферат дис. канд. техн. наук. М.: Изд-во МЭИ, 2011. 19 с.
3. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов: учеб. пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
4. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. М.: Энергия, 1980. 180 с.
5. Растворение пузырьков диагностических газов в трансформаторном масле / С.М. Коробейников, Ю.Г. Соловейчик, А.Л. Бычков и др. ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР. 2011. Т.49. № 5. С. 771–776.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### THE ACOUSTIC METHODS OF LIQUID INSULATION TECHNICAL STATUS CONTROL IN OIL-FILLED TRANSFORMERS DEVELOPING

Svjatyh A.B.

This article reviews the issues of allowances which have been accepted within the methods of liquid insulation technical status control in oil-filled high-voltage electric equipment based on nonlinear parametrical interaction of the acoustic vibrations. The updating of predeveloped method was proposed by the

residence time of gas microinclusions in transformer oil and solubility of gas inclusions researching.

**Keywords:** isolation of oil-filled equipment, partial discharges, gas bubbles.

## REFERENCES

1. Luk'janov M.M., Svjatyh A.B., Konoshenko A.V. *Kontrol' tehničeskogo sostojanija zhidkoj izoljicii maslonapolnennogo vysokovol'nogo oborudovanija* [Control of the technical status of liquid insulation in oil-filled high-voltage electric equipment]. *Zlatoust: Izd-vo OOO «Zlatoustovskaja tipografija»* [Zlatoust: Publishing house LLC "Zlatoust printing house"]. 2010, 210 p.
2. Svjatyh A.B. *Kontrol' tehničeskogo sostojanija zhidkoj izoljicii maslonapolnennogo vysokovol'nogo elektrooborudovanija: avtoreferat dis. kand. tehn. nauk* [Control of the technical status of liquid insulation in oil-filled high-voltage electric equipment: abstract of Ph.D. thesis]. Moscow, MPEI. 2011, 19 p.
3. Tihomirov P.M. *Raschjot transformatorov* [Transformer design]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 528 p.
4. Korobejnikov S.M., Solovejchik Ju.G., Bychkov A.L., Vagin D.V., Melekhov A.V., Ryzhkina A.Ju. *Rastvorenije puzyr'kov diagnostičeskikh gazov v transformatornom masle* [Dissolution of the diagnostic gases bubbles in transformer oil]. *Teplofizika vysokih temperatur* [High Temperature]. 2011, issue 49, pp. 771-776.

УДК 621.311.016:691.31:678.06:537.8.11

Ильин А.Н.

## ПОЛИМЕРЦЕМЕНТ КАК ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исследованы прочностные и электроизоляционные свойства полимерцементов в широком диапазоне изменения полимерцементных отношений. Определен оптимальный состав полимерцемента для электроизоляции. Показана принципиальная возможность использования полимерцемента в качестве изолятора электромагнитов.

**Ключевые слова:** полимерцемент, электроизоляционный материал, диэлектрик, прочностные свойства.

## ВВЕДЕНИЕ

Атомная энергетика обладает важными принципиальными особенностями по сравнению с другими энерготехнологиями: ядерное топливо имеет в миллионы раз большую концентрацию энергии, а отходы атомной энергетике – относительно малые объемы и могут быть надежно локализованы.

В связи с развитием технологий возникла проблема создания радиационно-стойкой электроизоляции, выдерживающей радиационные нагрузки выше  $5 \times 10^7$  Гр (пределной поглощенной дозы для электроизоляции из эпоксидной смолы, армированной стеклолентой [1]). Основная причина выхода из строя электромагнита с такой изоляцией в процессе облучения – потеря механической прочности полимера.

В связи с этим для изделий, работающих при высоких уровнях излучения, используется минеральная электроизоляция. Наибольшее распространение получила электроизоляция из коаксиального кабеля прямоугольного сечения, в котором в качестве изолятора используется магнезия и асбестоцементная электроизоляция [2]. Основным недостатком использования электроизоляции с магнезией – очень низкий фактор заполнения обмотки электромагнита (не более 40%) и, следовательно, большая стоимость обмотки. Асбестоцементная электроизоляция позволяет получить фактор заполнения, близкий к обычным обмоткам с эпоксидной изоляцией. Однако пористость и гигроскопичность цементных материалов вызывает необходимость заключать обмотки электромагнита в герметичную оболочку для поддержания стабильных электроизоляционных свойств материала. Технология производства асбестоцементных обмоток достаточно сложна и требует специального оборудования, поэтому целесообразно применять ее в случае, когда поглощенные дозы могут достигать за период эксплуатации уровней  $10^{10}$ – $10^{11}$  Гр, т.е. на два-три порядка выше

предельных доз полимерной изоляции. Некоторые электромагниты несут радиационные нагрузки меньше доз  $10^{10}$ – $10^{11}$  Гр, но значительно превосходящие предельные дозы эпоксидной изоляции. Для изоляции обмоток таких электромагнитов желательно иметь материал, позволяющий значительно упростить технологию изготовления обмоток и в то же время обеспечить более высокую радиационную стойкость по сравнению с эпоксидной изоляцией.

Анализ свойств различных материалов, занимающих промежуточные значения по радиационной стойкости между асбестоцементной электроизоляцией и эпоксидной электроизоляцией показал, что такими материалами могут быть полимерцементы.

Полимерцемент – это материал на основе композиционного вяжущего, включающего органический полимер и неорганическое вяжущее вещество.

В работе была поставлена цель, чтобы полимерный компонент образовывал в затвердевшем материале свой самостоятельный структурный элемент и цементный компонент образовывал в затвердевшем материале свой самостоятельный структурный элемент.

На основе этого была сформулирована основная идея использования полимерцемента: разделить функции электроизоляционного материала между компонентами полимерцемента. Минеральный компонент обеспечивает долговечность по механическим свойствам и радиационную стойкость изделия, а полимерный компонент существенно улучшает электрофизические свойства электроизоляции, поскольку деградация диэлектрических свойств полимеров запаздывает по сравнению с механическими по дозе облучения на порядок.

В связи с тем, что полимерцементы в качестве электроизоляции не использовались, в настоящей работе приведены результаты исследований механических и диэлектрических свойств полимерцементов.

Полимерцементы в зависимости от вида поли-