

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЖИДКОЙ ИЗОЛЯЦИИ С МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ**

Высокая степень износа маслonaполненного высоковольтного электрооборудования имеет потенциальную опасность для обслуживающего персонала. Негативными факторами производственной среды при работе изношенного маслonaполненного высоковольтного оборудования, воздействующими на работников, могут быть: шум, вибрация, электромагнитное поле, электрический ток, в случае аварийных ситуаций – огонь, механические части разрушенного оборудования.

Режим работы силового трансформатора оказывает большое влияние на его ресурс из-за износа изоляции. В качестве изоляции в маслonaполненном электрооборудовании используется трансформаторное масло. Оно выполняет две функции: во-первых, масло, заполняя поры в волокнистой изоляции, а также пространства между проводами обмоток и между обмотками и баком трансформатора, значительно повышает электрическую прочность; во-вторых, оно улучшает отвод теплоты, выделяемой за счёт потерь в обмотках и сердечнике трансформатора [1].

Трансформаторное масло – это жидкость от, почти бесцветной до тёмно-жёлтого цвета, по химическому составу представляющая собой смесь различных углеводородов.

Практически важные свойства трансформаторного масла нормируются стандартом ГОСТ 982-80. Согласно этому [2] электрические свойства жидкого диэлектрика описываются показателями и имеют следующие параметры: электрическая прочность очищенного масла составляет 200-250 кВ/мм; объёмное сопротивление  $10^{10}$ - $10^{13}$  Ом · м; тангенс угла диэлектрических потерь 0,025 при 70° С. К физико-механическим свойствам трансформаторного масла относится кинематическая вязкость масла - 30 мм<sup>2</sup>/с при 20° С и 8–9 мм<sup>2</sup>/с при 50° С; температура вспышки паров 135° С; плотность 895 кг/м<sup>3</sup> при 20 °С, акустическое сопротивление 1,28 (г/см<sup>2</sup>·с)·10<sup>5</sup> при скорости звука 1390 м/с и др [2].

Основным фактором, влияющим на износ изоляции, является ее нагрев, обуславливающий ухудшение свойств изоляции. Существует так называемое 6-градусное правило: увеличение температуры изоляции на 6 градусов сокращает срок ее службы вдвое. Это правило справедливо в диапазоне температур 80...140° С [4].

Наиболее интенсивный нагрев изоляции обмоток происходит при перегрузке трансформаторов. Поэтому режиму работы трансформаторов уделяется особое внимание. Перегрузки, обусловленные неравномерным суточным графиком нагрузки трансформатора, называются систематическими. Перегрузки, обусловленные аварийным отключением какого-либо элемента системы электроснабжения, называются аварийными перегрузками.

При работе трансформатора под нагрузкой в его шинах выделяется джоулево тепло, которое теплоотдачей передается охлаждающему маслу, повышая его температуру, как правило, до уровня 45 °С. Нагретое масло направляется во внешний теплообменник и отдает выделенное тепло в окружающую среду. При изменении нагрузки трансформатора изменяется и количество выделяемого в шине тепла, и это вызывает определенный нестационарный переходный процесс от одного теплового состояния к другому. При увеличении нагрузки такой процесс приводит к повышению температурных уровней, а при определенных перегрузках температура в зоне контакта шины с маслом может превзойти опасные пределы.

На рис. 1 приведен по [3] вид температурного поля медной обмотки марки ПБ сечением 5,6 × 18 мм при номинальной нагрузке трансформатора ТМ 630/10 мощностью 630 кВА. Более темные оттенки серого цвета соответствуют более высоким температурам, а линии изображают изотермы.

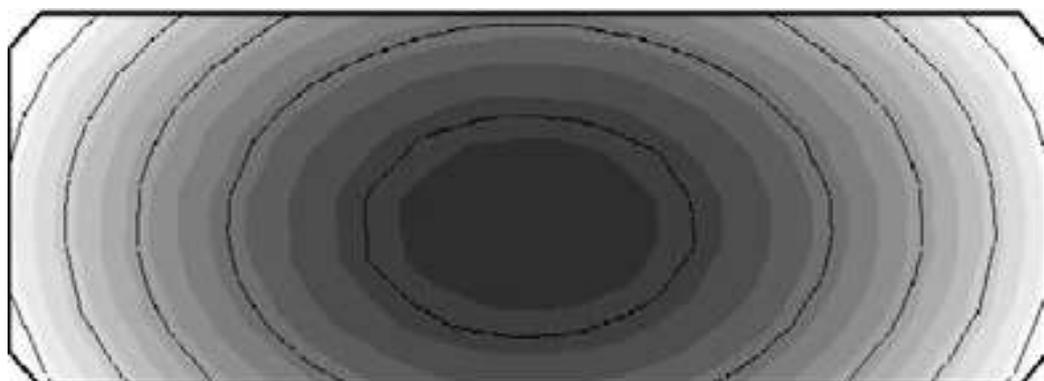


Рис. 1. Температурное поле шины при нагрузке 630 кВт [3]

Видно, что наиболее горячие места на поверхности находятся на оси симметрии шины. График зависимости температуры от времени при выходе трансформатора на номинальную нагрузку представлен на рисунке 2 [3].

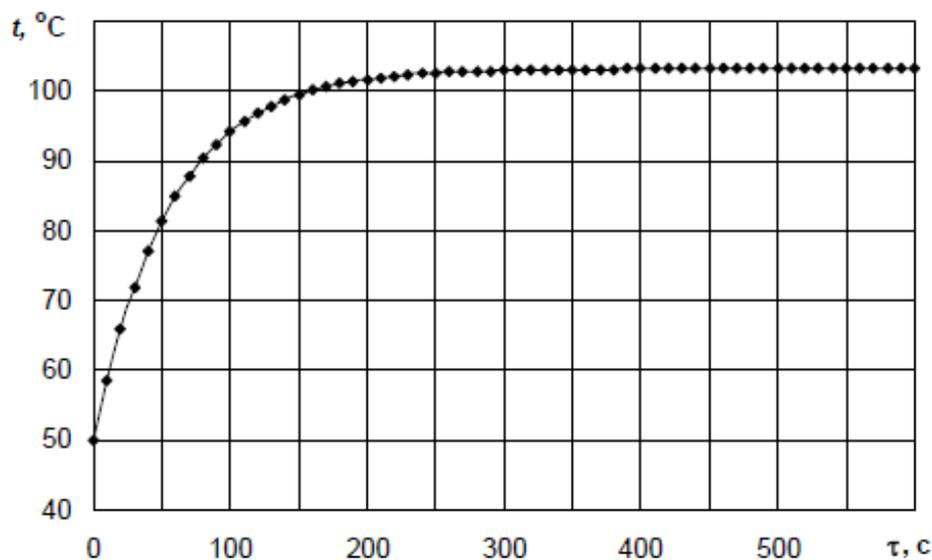


Рис. 2. Изменение  $t_{ст}^{max}$  по времени [3]

Как видно из графика, процесс нагрева имеет нелинейный характер, что объясняется постепенным уменьшением температурного градиента между центром шины и ее периферией. Ко времени  $\tau = 300$  с процесс теплообмена практически выходит на стационарный режим. При средней температуре масла  $50^{\circ}C$ , максимальная температура на поверхности шины при этом составила  $t = 103,3^{\circ}C$  [3].

На рис. 3 представлена зависимость максимальной температуры на поверхности шины от величины перегрузки трансформатора [3]. С увеличением температуры растворимость газа в масле уменьшается, и газ может выделяться в виде пузырьков (рис. 4 а). В точках поверхности разогретого токопровода, связанных с дефектами (трещинками), ширина которых настолько мала, что в них не попадает жидкость и постоянно находится воздух или газ (рис. 4 б) зарождаются микровключения, которые являются центрами тепловой кавитации.

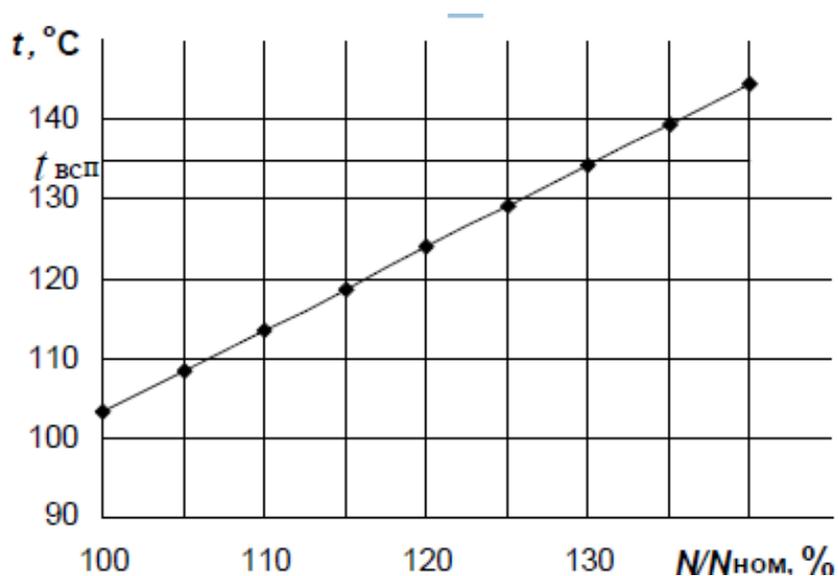


Рис. 3. Изменение максимальной температуры шины при увеличении перегрузки трансформатора [3]

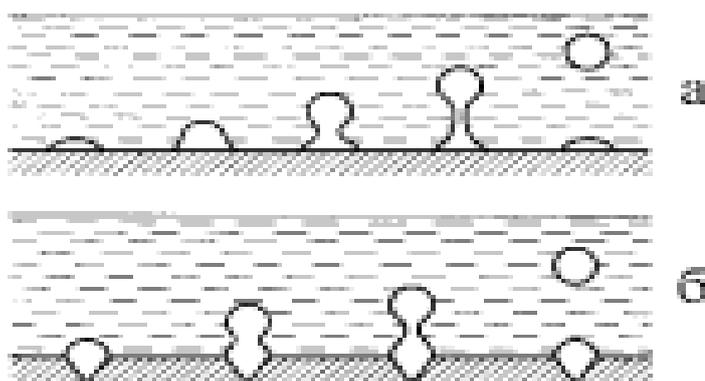


Рис. 4. Образование микровключений на поверхности токопровода [6]

В дефектной области жидкой изоляции при малых размерах микропузырька, может наблюдаться ламинарное течение (рис. 5 а). При больших размерах пузырька сзади него образуются пустоты, разрывы и завихрения - наблюдается турбулентное течение (рис. 5 б). При локальных перегревах в маслобарьерной изоляции высоковольтного электрооборудования, при наличии влаги в изоляции до 5,5% - возможен пробой изоляции при 90° С, до 7% - возможен пробой изоляции при 50° С [5].

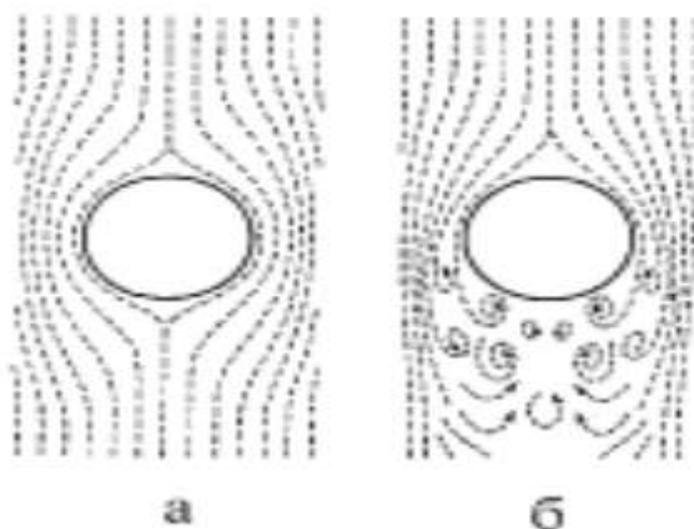


Рис. 5. Ламинарное (а) и турбулентное (б) обтекание микропузырька [6]

Однако это связано не только с проводящими эмульсиями в жидкой изоляции, но и с образованием парогазовых микровключений, электрическая прочность которых в несколько раз меньше окружающей жидкости и является причиной развития частичных разрядов (ЧР). Поэтому задача исследования микровключений в трансформаторной жидкости является актуальной для разработки способов контроля, технического состояния жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования.

Для изучения влияния микровключений в трансформаторном масле на характеристики акустической модельной установки и определения эффективной зоны взаимодействия сигналов накачки и образования волны разностной частоты (ВРЧ) была проведена серия экспериментов. Эксперименты проводились на модельной акустической установке представленной на рис. 6.

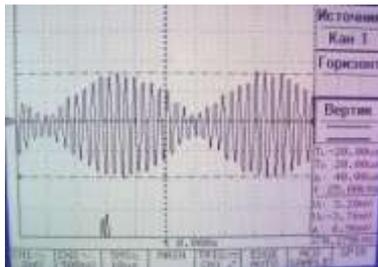
Суть экспериментов заключалась в том, что в трансформаторное масло с пузырьками излучалось два сигнала накачки на частотах  $f_1 = 350$  кГц и  $f_2 = 370$  кГц. В среде с пузырьками происходит частичное их рассеяние, а также их нелинейное взаимодействие, в результате которого происходит генерирование волн комбинационных частот, в том числе и ВРЧ. При последовательном перемещении каретки (изменении базы установки) с гидрофоном вдоль оси излучения волн накачек на расстояния 70 мм, 140 мм, 270 мм, измерялись амплитуды и спектры сигналов накачки и модуляция принимаемого сигнала.



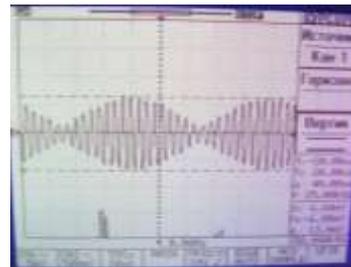
Рис. 6. Внешний вид модельной акустической установки контроля жидкой изоляции

На рис. 7 представлены фотографии осциллограмм и спектров сигналов накачки.

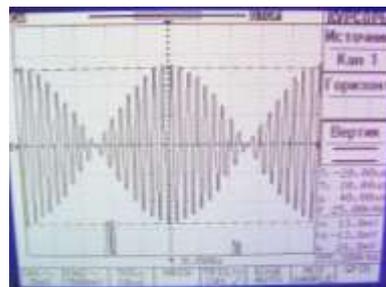
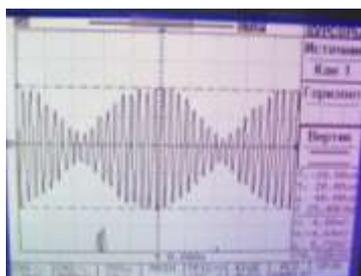
8 мВ



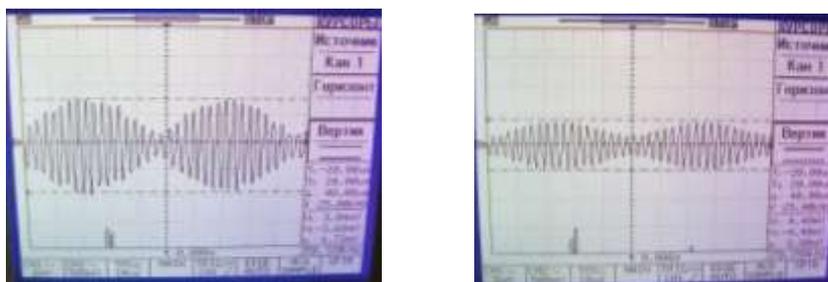
14 мВ



а)



б)



в)

Рис.7. Осциллограммы приемного сигнала при амплитуде сигнала накачки 8 мВ и 14 мВ при расстоянии между излучателями: а) 70 мм; б) 140 мм; в) 270 мм

В ходе экспериментов были получены данные о зависимости характеристик акустической волны в жидкой изоляции с микровключениями от изменения параметров модельной установки.

Для обнаружения микровключений в жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования модельной установкой оптимальной базой акустических датчиков будет расстояние 140 мм.

#### *Литература*

1. *Богородицкий Н.П.* Нефтяные электроизоляционные масла / Н.П. Богородицкий // Электротехнические материалы. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – с. 94 – 99.

2. ГОСТ 982-80 – Трансформаторные масла. Технические условия // Помощь по ГОСТам. URL: <http://www.gosthelp.ru/gost/gost22892.html> (дата обращения: 07.04.2011).

3. *Мохов Д.О.* Исследования нестационарного температурного поля в трансформаторной шине / Мохов Д.О. // Труды ТГТУ: сборник научных статей молодых учёных и студентов. – Тамбов: Издательство ТГТУ, 2007. – Вып. 20. – с. 56-59.

4. Осмотр трансформаторов – Эксплуатация силовых трансформаторов [Электронный ресурс] // Электрические сети: [сайт]. URL: <http://leg.co.ua/instrukcii/pidstanciyi/ekspluataciya-silovyh-transformatorov.html> (дата обращения: 06.04.2011).

5. *Савельев В.А., Львов С.Ю., Львов Ю.Н.* Технологические принципы мониторинга силовых трансформаторов. // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. Вып. 60. Методы и средства

исследования и обеспечения надежности систем энергетики – СПб.: «Северная звезда», 2010. – С. 443-453.

6. *Николаева Е.В.* Кинетика кипения воды в поле силы тяжести [Электронный ресурс] // МИФ: [сайт]. URL: <http://www.eunnet.net/mif/fr-set.jsp?tnum=5n04986> (дата обращения 01.04.2011).