

## ОЦЕНКА УВЛАЖНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ БЕЗ ОТКЛЮЧЕНИЯ ИХ ОТ СЕТИ

В. Соколов - НИЦ "ЗТЗ-Сервис"

### ВВЕДЕНИЕ

Увлажнение изоляционно-масляной системы трансформаторов является одним из факторов, ограничивающих работоспособность и срок службы оборудования. При выявлении этого дефекта обычно возникает два вопроса: 1) можно ли предполагать, что трансформатор существенно увлажнен? 2) Какова степень увлажнения твердой изоляции, являющейся основным накопителем влаги?

НИЦ "ЗТЗ-Сервис" применяет для оценки увлажнения комплекс из следующих основных мотивов:

- Оценка увлажнения без отключения трансформатора от сети;
- Оценка вероятности повышенного увлажнения испытанием герметичности;
- Оценка среднего увлажнения барьерной изоляции по результатам измерения сопротивления изоляции и  $tg\delta$  с учетом влияния характеристики масел и особенностей конструкции изоляции;
- Определение влагосодержания образцов изоляции из наиболее увлажненных зон;
- Определение количества и скорости выделения конденсата влаги в процессе термовакуумной обработки.

Целью данной работы является представление вероятной модели увлажненного силового трансформатора на основе обобщения опыта эксплуатации, а также рассмотрение методики и опыта оценки увлажненности трансформатора без отключения от сети.

### 1. ОСОБЕННОСТИ УВЛАЖНЕНИЯ МОЩНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

#### Источники увлажнения.

Существующая технология монтажа мощных силовых трансформаторов обеспечивает достаточно низкое начальное содержание влаги в изоляционных материалах перед включением оборудования в эксплуатацию. Источники существенного увлажнения имеют обычно эксплуатационное и ремонтное происхождение. В таблице 1 приведены источники и вероятный механизм увлажнения, систематизированные нами в результате многолетнего наблюдения за состоянием трансформаторов в эксплуатации.

#### Основные источники увлажнения трансформаторов в эксплуатации. Опыт эксплуатации

Таблица 1

Происхождение	Механизм увлажнения
1. Эксплуатационное	1.1. "Нормальное" проникновение в бак водяного пара с воздухом через "систему дыхания" при понижении температуры. 1.2. Аномальное натекание влажности воздуха или воды через неплотности в разъемах, не находящихся под избыточным давлением масла. 1.3. Аномальное попадание воды в масло из масловодяной

Происхождение	Механизм увлажнения
	системы охлаждения. 1.4. Выделение воды из изоляционных материалов вследствие термоокислительной деструкции.
2. Ремонтное	2.1. Адсорбция влаги изоляционными материалами при ремонтных работах с разгерметизированным баком. 2.2. Конденсация воды в баке в процессе неправильной сушки. 2.3. Применение недосушенных материалов (силикагель, изоляционные детали и др.). 2.4. Попадание воды при заливке масла или из плохо промытых охладителей, а также в процессе вакуумирования недостаточно загерметизированного трансформатора.

### Характер и степень увлажнения изоляции

Атмосферная влага является основным источником увлажнения. Первой и, как правило, решающей стадией процесса увлажнения является попадание влаги в бак.

Механизм проникновения влаги в бак представляется в виде вязкого течения влажного воздуха или воды через систему дыхания либо через неплотности в разъемах, не находящихся под избыточным давлением масла, при снижении температуры давления в баке ниже атмосферного.

Масло в процессе увлажнения выполняет роль "переносчика" влаги, но в то же время электрическая прочность масла определяет прочность изоляционной конструкции в целом.

Твердая изоляция является накопителем (аккумулятором) влаги и одним из наиболее опасных источников увлажнения масла. Переход влаги в масло происходит при повышении температуры масла, при условии превышения концентрации воды в изоляции над концентрацией воды в масле.

Изучение степени увлажнения трансформаторов с защитой масла силикагелевым воздухоосушителем показала, что увеличение влагосодержания изоляции внешних обмоток от бака составляет в среднем 0,2% в год. Вместе с тем систематизация данных сушек трансформаторов после 10-14 лет работы показывает, что при измеренном содержании влаги порядка 2,5% из изоляции извлекается обычно не более 20-30 кг воды. При средней массе изоляционных материалов порядка 5000 кг это означает, что доля эффективно увлажненной изоляции составляет примерно четвертую часть от общей массы.

Увлажнение изоляционной конструкции происходит неравномерно за счет отличия температуры и гигроскопичности разных деталей. Повышенную степень увлажнения имеют элементы конструкции, составляющие некую "влажную зону". К ним относятся тонкие изоляционные детали большой поверхности, имеющие в рабочем режиме сравнительно более низкую температуру масла.

Масса наиболее увлажненной части изоляции составляет примерно 10 – 15% от общей массы.

В трансформаторах с пленочной и азотной защитами масла от увлажнения среднее повышение влагосодержания после 10-12 лет работы составляет примерно 0,06% в год, если нет иных источников

Более сильного увлажнения (нарушение герметичности надмесячного пространства, ремонтные работы и др.)

Влага, попавшая в бак и растворившаяся в масле, интенсивно поглощается поверхностью целлюлозной изоляции, особенно при сравнительно низких температурах.

Расчет показывает, что при реальных суточных колебаниях температуры масла в трансформаторе скорость поглощения влаги изоляцией из масла выше скорости возможного ее проникновения в бак через систему "дыхания".

То есть существенное повышение влагосодержания масла может быть признаком

наличия аномального источника увлажнения.

При нарушении герметичности надмасляного пространства и прямом попадании воды (например, при дожде) в бак может всосаться значительное количество воды за весьма короткое время. Так, например, в трансформатор 400 МВА, 220 кВ через нарушенное уплотнение наконечника от ввода 220 кВ за одну ночь во время грозового ливня с дополнительным охлаждением трансформатора проникло около 0,5 л воды, что привело к пробое изоляции.

Зачастую местом проникновения воды является разъем уплотнения диафрагмы выхлопной трубы.

Опыт эксплуатации показывает, что актуальной проблемой опасного увлажнения остается попадание воды в бак из маслководяной системы охлаждения, главным образом из-за размораживания трубок маслоохладителей. Например, в блочный трансформатор ТЦ-1000000/500 через повреждение трубки в процессе подготовки блока к включению попало более 500 л воды.

Ужесточение экологических требований, в частности по недопущению попадания масла в водоемы, заставляет в некоторых случаях отказаться от надежных решений обеспечения постоянного избыточного давления масла над водой в системе охлаждения "Ц", что усиливает актуальность данной проблемы.

Вода, попавшая в масло, может длительно оставаться в нерастворенном состоянии, в частности на дне бака, что значительно затрудняет ее обнаружение.

## 2. СТАРЕНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Действие всех трех механизмов старения целлюлозной изоляции: окисления, гидролиза и пиролиза вызывает образование газов и воды. Лампе и Спикар, например, определили, что снижение степени полимеризации изоляции в 6 раз вызывает образование 2% воды. Эти же авторы показали, что при окислении масла на 1 л поглощенного кислорода образуется до 200 г воды. Из других источников следует, что при увеличении кислотности масла до 0,04 – 0,2 г КОН/г возникает до 30-200 ppm воды, причем электрическое поле увеличивает интенсивность ее образования.

Степень увлажнения и характер распределения влаги в композиционной изоляции трансформаторов известны из результатов исследования моделей.

Результаты искусственного старения моделей обмотки и главной изоляции показывают следующее:

- Старение в условиях нормальных рабочих температур 70-90 °С до умеренного износа изоляции - снижение степени полимеризации примерно в 2 раза не приводит к заметному повышению влажности твердой изоляции;

- Старение изоляции обмоток до степени износа, соответствующему 50-80% от критических значений степени полимеризации, вызывает увлажнение витковой изоляции и межкатушечных прокладок до 1,5-2,8 %, причем распределение влаги отличается значительной неравномерностью: наиболее нагретые зоны (верх обмоток) имели влажность на 40-50% ниже, чем наименее нагретые (низ обмотки).

То есть, влага, выделяющаяся в процессе старения, перераспределяется, образуя локальные зоны повышенной влажности.

Старение масла, а также его загрязнение частицами, могущими адсорбировать воду (волокна целлюлозы, крошки сорбента и др.) приводит к изменению состояния влаги в масле.

Фактически влага в масле находится:

- в растворенном состоянии;
- в растворенно-связанном состоянии - будучи связанной с механическими примесями, а также с поверхностно активными веществами (ПАВ), образующимися в процессе старения масла (гидратная вода).

### 3. РЕМОНТНЫЕ РАБОТЫ

#### Разгерметизация бака

За сравнительно короткое время контакта изоляции с влажным окружающим воздухом в трансформатор может проникнуть воды больше, чем за многие годы эксплуатации. Предварительный нагрев трансформатора перед разгерметизацией бака - традиционная мера по защите увлажнения, как видно из таблицы, лишь уменьшает степень увлажнения.

#### Расчетное увлажнение пропитанных маслом электрокартонных барьеров толщиной 3 мм

Влажность окружающего воздуха, $\varphi$ и длительность контакта, $t$ , условия защиты от увлажнения	Увеличение влажности картона, %		Количество адсорбированной влаги поверхностью 1000 м <sup>2</sup> , кг
	По всей толщине 3 мм	В поверхностных слоях 0,5 мм	
1) $\varphi = 75\%$ $t = 16$ ч без нагрева	0,45	1,35	13,5
2) $\varphi = 75\%$ $t = 16$ ч нагрев, с поддержанием температуры активной части на 10 °С выше окружающего воздуха	0,27	0,81	8,1
3) То же $t = 32$ ч	0,4	1,2	12
4) $\varphi = 85\%$ $t = 12$ ч без нагрева	0,55	1,65	16,5
5) $\varphi = 85\%$ $t = 24$ ч без нагрева	0,8	2,4	24

В худших условиях с точки зрения увлажнения находится изоляция обмоток ВН от бака. Она остывает быстрее, подвергается контакту с наиболее интенсивными конвективными потоками воздуха; источниками ее увлажнения может быть не только атмосферная, но и респираторная влага.

В трансформаторах 400-750 кВ поверхность барьерной изоляции обмоток ВН от бака и изоляции установок вводов составляет сотни м<sup>2</sup> и, как видно из таблицы, может адсорбировать значительное количество влаги.

Так, например, в одном трансформаторе 250 МВА, 400/15,75 кВ, обследованных нами в 1993 г., обнаружено увлажнение барьеров обмотки ВН до 3,8%, а при сушке из изоляции было удалено 28 кг воды. Этот трансформатор оборудован пленочной защитой масла, был герметичным. Причиной его увлажнения явились работы по замене вводов 400 кВ со сливом масла. Предположительно трансформатор находился с разгерметизированным баком более 2 суток.

#### Неквалифицированная сушка

Неправильное утепление бака и, особенно, недостаточно продуманный нагрев влажной изоляции нередко является причиной конденсации водяных паров на поверхностях бака, фарфора и др. и последующего скопления воды в локальных зонах.

Характерным примером является факт обнаружения значительного скопления воды в экранах вводов 330 кВ автотрансформатора 200 МВА 330/110 кВ после полного окончания ремонта.

Причиной опасного увлажнения может быть также попадание в масло воды или льда, скопившихся в маслопроводе при заливке трансформатора маслом. Обычно это происходит при использовании протяженных стационарных маслопроводов на электростанциях.

Потенциально опасным является также вакуумирование недостаточно загерметизированного трансформатора особенно во влажную или дождливую погоду.

В подобных случаях в трансформаторах обнаруживают прямое скопление воды или льда. К сожалению, в ряде случаев опасное увлажнение выявлялось лишь после повреждения изоляции.

#### 4. МОДЕЛЬ ВЕРОЯТНОГО УВЛАЖНЕНИЯ МОЩНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Из вышеприведенного обзора может быть определена следующая модель вероятного увлажнения силового трансформатора с изоляцией маслобарьерного типа.

Основной источник увлажнения трансформатора - атмосферная влага проникающая в бак в виде пара либо в виде воды. При значительном износе изоляции, последняя сама может быть существенным источником образования воды.

Масло выполняет функции влагопереноса, растворяя проникшую в бак воду и передавая ее в изоляцию.

Вода в масле может содержаться в следующих трех состояниях:

1) Растворенная вода: молекулярно растворенная вода; гидратная вода, связанная с активными веществами, образующимися в процесс старения масла; вода, адсорбированная механическими примесями, взвешенными в масле;

2) Эмульгированная вода;

3) Свободная вода - вследствие прямого проникновения воды в бак.

Твердая целлюлозная изоляция является аккумулятором влаги. Распределение влаги в изоляционных деталях существенно неравномерно. Эффективно увлажнена обычно четвертая - третья часть общей массы изоляции. О средней увлажненности можно судить по степени увлажнения межобмоточных барьеров.

Часть изоляции (ориентировочно 10-15%) образует зоны повышенной влажности. При увлажнении за счет атмосферной влаги этими зонами обычно являются тонкие изоляционные детали большой поверхности, контактирующие с наименее нагретыми потоками масла. Обычно это элементы изоляционных перегородок внешних обмоток от бака. Сравнительно повышенную влажность обычно имеют также поверхностные слои изоляции.

Влага, выделяющаяся за счет старения, образует зоны повышенной влажности в изоляции, находящейся при более низкой температуре.

Влагосодержание изоляционных деталей в зонах повышенной влажности по опыту на 1-2% выше средней влажности изоляции.

#### 5. ОЦЕНКА УВЛАЖНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ БЕЗ ОТКЛЮЧЕНИЙ ОТ СЕТИ

Традиционный подход к оценке увлажнения трансформатора в эксплуатации заключается в периодическом измерении содержания воды в масле.

МЭК 422 для трансформаторов выше 170 кВ рекомендует допустимый предел содержания воды 20 г/ при условии, если кислотное число масла не превышает 0,1 КОН/г, а температура масла составляет 40-60 °С.

МЭК также определяет возможность определения содержания воды в бумаге по значениям влагосодержания масла, используя условия равновесия.

Рассмотренные выше особенности увлажнения трансформаторов в эксплуатации с предопределенным существенно неравномерным распределением воды в изоляционных материалах заставляют усомниться в надежности указанного приема.

Подход НИЦ «ЗТЗ-Сервис» заключается в оценке изменения (приращения) содержания влаги в масле после специального нагрева трансформатора нагрузочными потерями до максимальной рабочей температуры и выдержке трансформатора при этой температуре в течение времени, достаточного для выхода в масло влаги из твердой изоляции в случае ее повышенного увлажнения.

По существу это испытание можно отнести к разряду функциональных. Результаты его предназначены ответить на вопрос: можно ли ожидать, что в предельном рабочем режиме влажность масла, чья электрическая прочность определяет прочность всей конструкции в целом, может существенно повыситься.

Предполагается, что относительная влажность на поверхности раздела масла и твердой изоляции при данной температуре постоянна, а при изменении температуры изменяется в соответствии с относительной влажностью масла  $\varphi_m$ , равной

$$\varphi_m = \frac{W_m}{W_m(t)},$$

где  $W_m$  и  $W_m(t)$  - соответственно измеренное влагосодержание и максимальное количество влаги, которое может растворить масло при температуре  $t$ ;

$$W(t) = W_0 \cdot e^{-\frac{B}{273+t}}$$

где  $W_0$  и  $B$  - параметры, характеризующие растворимость влаги в данном масле.

Предполагается также, что температура вероятных зон повышенной влажности - барьеров изоляции внешних обмоток - равна температуре верхних слоев масла. Сравнительно повышенная температура обмоток и масла в охлаждающих каналах и др. способствуют перераспределению влаги в более холодные слои масла.

Если повысить температуру масла, например, до наибольшей рабочей, то при том же значении  $W_m$  относительная влажность масла уменьшится до некоторого значения  $\varphi_{m2}$ .

Из известной изотермы сорбции (вернее, в данном случае изотермы десорбции) влаги целлюлозными материалами для значения  $\varphi_{m2}$  можно определить равновесное влагосодержание поверхности изоляции  $W'_k$ .

Если  $W'_k$  больше влагосодержания деталей твердой изоляции в системе «масло-твердая изоляция», создается градиент влажности и начнется медленный переход влаги в масло.

Разница концентрации влаги на поверхности и в слоях изоляции характеризуется параметром

$$\gamma = 1 - \frac{W'_k}{W_k}$$

Количество влаги  $\Delta W$ , могущее выделиться за время  $t$  из изоляции поверхностью  $S$  и толщиной  $d$ , полагая что влага по толщине распределена равномерно, может быть определено из выражения

$$\Delta W = W_k \cdot \gamma \cdot [1 - F(z)], \%$$

где 
$$F_z = \frac{8}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2 \cdot k + 1)^2} \cdot e^{-(2k+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot z}$$

$$z = \frac{D \cdot t}{d^2}$$

$D$  - коэффициент диффузии влаги в картоне, м<sup>2</sup>/с

$t$  - время опыта, с

$d$  - толщина изоляции.

Графическая зависимость  $[1 - F(z)]$  и  $Z$  в интересующем интервале приведена на рис.

1.

Существенное повышение влагосодержания масла за время опыта свидетельствует о вероятности повышенного увлажнения элементов твердой изоляции.

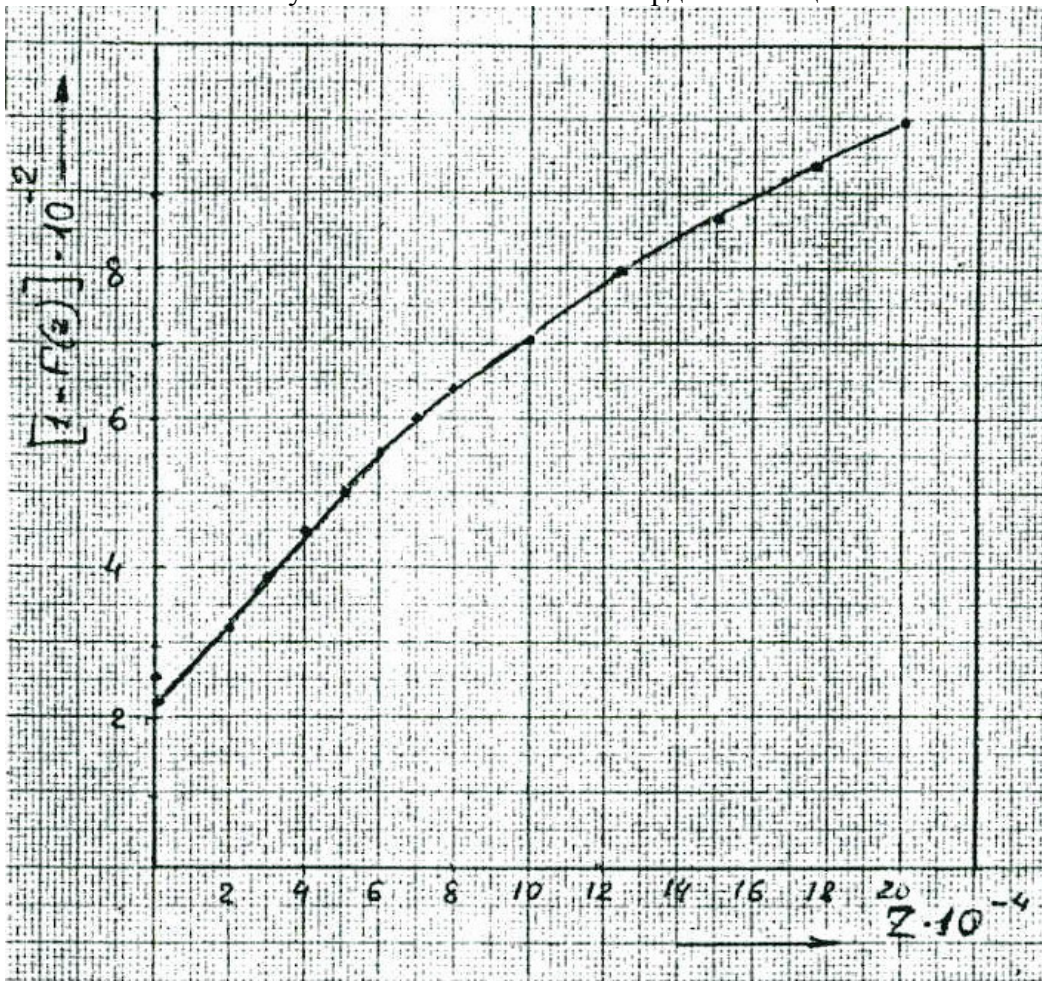


Рис. 1 Зависимость функции  $[1 - F(z)]$  от параметра  $Z = \frac{D \cdot t}{d^2}$

Для расчета возможного влаговыделения необходимо иметь информацию о равновесном содержании влаги в масле и картоне. Кривые равновесия можно построить, используя:

- 1) известные изотермы сорбции (десорбции) электрокартона в воздухе и
- 2) температурную зависимость максимального влагосодержания масла; исходя из условия постоянства относительной влажности системы материалов.

Из условия постоянства относительной влажности на поверхности раздела масла и картона рассчитаны и на рис.2 построены кривые равновесного содержания влаги в масле и картоне для условий сорбции (увлажнение картона) и десорбции (выделение влаги в масло) для масла типа ТКп с содержанием ароматических углеводородов 16% имеющего зависимость максимального влагосодержания вида:

$$W_m(t) = 22,76 \cdot 10^6 \cdot e^{-\frac{3783}{273+t^{\circ}C}} \text{ г/м}$$

Нетрудно подсчитать, что при температурах 10, 30, 50, 70°C масло может максимально растворить примерно 35, 86, 186 и 370 г/т воды, а фактическое влагосодержание, например 15 г/т, создаст относительную влажность соответственно 43, 17, 8 и 4 %.

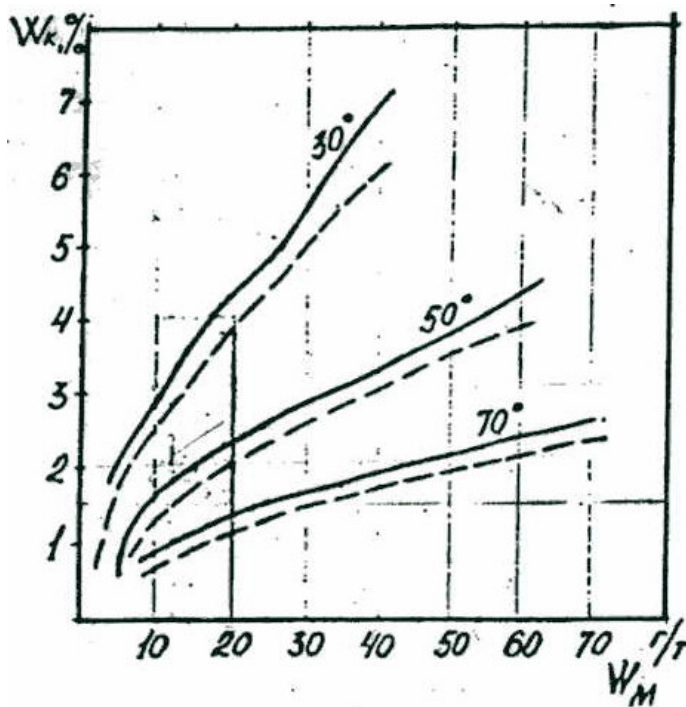


Рис. 2. Равновесие содержания влаги в масле и картоне

— кривая десорбции  
 ---- кривая сорбции

Из рис.2 видно, что при значениях влагосодержания масла, считающихся вполне удовлетворительными - 10-20 г/т, принимая также во внимание погрешности измерения воды в масле, сделать какой-либо определенный вывод о возможной содержании воды в твердой изоляции практически без значительных ошибок невозможно.

Если вблизи наибольшей рабочей температуры масла (70 °С) после достаточной выдержки влагосодержание масла заметно (в пределах погрешности измерения, составляющей обычно 2-5 г/т) не увеличится, можно считать значительное увлажнение изоляции маловероятным.

На рис.3 построены кривые возможного повышения влагосодержания масла, исходя из следующих условий:

- 1) масса масла в трансформаторе 50 т, общая поверхность барьеров главной изоляции - 1000 м<sup>2</sup>, электрокартон марки А, толщиной 3 мм;
- 2) коэффициент диффузии влаги в картоне принят  $D = 2 \times 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с;
- 3) вся выделяющаяся влага очень быстро перемешивается в масле и остается в масле в растворенном состоянии;
- 4) влага выделяется из 50 % общей массы барьерной изоляции, увлажненной до 2 % (кривая 1);
- 5) влага выделяется из «влажной зоны» - барьерной изоляции обмотки ВН<sub>1</sub> от бака, увлажненной до 3 % (кривая 2).



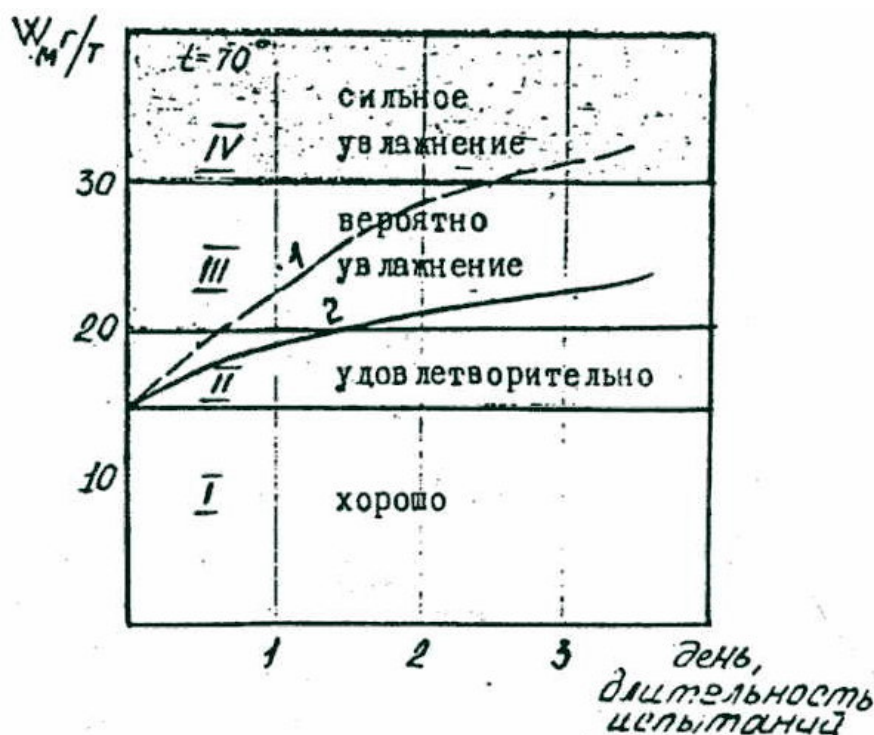


Рис.3. Ориентировочные нормы и возможное нарастание влагосодержания масла за счет выхода влаги из твердой изоляции

- 1 – 50% картона увлажнено до 2%
- 2 – 10% картона увлажнено до 3%.

Практически, с учетом указанных допущений, влага будет выделяться более замедленно, но кривая 2 в целом достаточно достоверно отражает картину проверки увлажненной изоляции.

Следует также иметь в виду, что, кроме увлажненного картона источниками повышения растворенной в масле влаги, могут быть увлажненный силикагель в адсорбных фильтрах, а также скопления жидкой воды, например, на днище бака.

Для исключения влияния силикагеля фильтры на время опыта должны быть перекрыты. Для повышения вероятности обнаружения воды в баке в процессе опыта масло должно интенсивно перемешиваться всеми насосами.

На рис.3 также для ориентировки показаны зоны состояния изоляции, которые могут быть определены по результатам данной проверки. Повышение влагосодержания масла до значений зоны III свидетельствует о вероятности увлажнения изоляции, что требует дополнительных проверок.

Если начальное влагосодержание масла составляет 10 г/т или ниже, то о вероятности увлажнения может свидетельствовать повышение влагосодержания масла, примерно в 2 раза.

## 6. ОПЫТ ОЦЕНКИ УВЛАЖНЕНИЯ МОЩНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Впервые методика оценки увлажнения по изменению влагосодержания масла была применена в 1990 году. За 4 года обследовано более 60 трансформаторов. Результаты обследования заслуживают отдельного рассмотрения. Ниже приведено несколько случаев, которые в целом подтверждают достоверность методики для выбранной задачи.

Случай I. Трансформатор ТДЦ-125000/400 № 85179, с защитой масла силикагелевым воздухоосушителем. После 9 лет проходил ремонт с сушкой. До обследования работал 22 года.

Результаты измерений содержания воды в масле		
Температура масла, град.	Влагосодержание, ppm	Время выдержки, час
40	10	0
65	22	24
65	16	48
65	24	72

Заключение: вероятно увлажнение.

Оценка среднего содержания воды в барьерах между обмотками.

Расчетная проводимость картона при 20° -  $9,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$

Расчетное влагосодержание - 1,9 %

Влагосодержание образцов картона:

3 мм (перегородка) - 1,8%

0,5 мм - подмотка отводов - 2,8%.

При сушке удалено 12 л воды, в том числе за I цикл - 7 л.

Случай 2. Трансформатор ТДЦ-125000/400 № 85132 с защитой масла силикагелевым воздухоосушителем. Обследование после 22 лет работы. После 8 лет трансформатору был выполнен профилактический ремонт с подсушкой изоляции. При текущих испытаниях влагосодержание масла не превышало 10-12 г/т.

Оценка степени увлажнения трансформатора по результатам изменения влагосодержания масла при прогреве трансформатора		
Температура масла, град	Влагосодержание, ppm	Время выдержки, час
35	10,12	0
55	16,9	24
60	15,49	48
62	20,89	72

Оценка среднего содержания влаги в барьерах по результатам измерения сопротивления участка изоляции ВН-НН с учетом влияния масла.

Расчетная проводимость изоляции -  $1,23 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$

Расчетная средняя влажность - 2,2%

Измеренное влагосодержание образцов:

Картон - 3,2 %

Удалено влаги при сушке, - 8,3 л

в том числе за первый цикл - 3 л

Случай 3. Трансформатор ТДЦ-250000/220 № 10743, защита масла силикагелевым воздухоосушителем. До обследования работал 12 лет. Дефектов не предполагалось.

Результаты измерений влаги в масле		
Температура масла, град	Влагосодержание, г/т	Время выдержки, час
25	21	0
70	31	24
70	43	43
70	43	72

Заключение: вероятно сильное увлажнение.

Проверка герметичности - обнаружены следы нарушения герметичности диафрагмы выхлопной трубы. При сушке удалено 14 л воды, в том числе 8 л за I цикл.

Случай 4. Трансформатор ТДЦ-250000/220 № 8498 с силикателевым воздухоосушителем. Работал до обследования 12 лет.

Оценка увлажнения по результатам измерения влагосодержания масла при нагреве трансформатора		
Температура масла, град	Влагосодержание, ррм	Время выдержки, час
25	18	0
65	42	24
65	44	48
65	48	72

Оценка средней влажности барьеров:

Расчетная проводимость картона -  $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$

Расчетная влажность - 2,3%.

При сушке выделилось 23 л воды, в том числе 13 л за 1 цикл.

Случай 5. Группа однофазных трансформаторов ОЦ-26000/150 №№401430, 401431, 401434, в эксплуатации 46 лет

Оценка увлажнения после прогрева				
Температура масла, град	Влагосодержание, ррм			Время выдержки, час
	ф."А"	ф."В"	ф."С"	
0	37,1	30,2	36,3	0
65	77,5	61,2	73,2	24
65	79,2	61,0	73,6	48
65	79,4	56,9	77,3	72

Заключение: сильное увлажнение.

Случай 6, Трансформатор практически не увлажнен. Автотрансформатор АДЦТН-250000/400 № 114065 с пленочной защитой масла. Обследование после 12 лет работы. Содержание воды в масле при текущих проверках не превышало 12 г/т

#### Результаты обследования

Изменение влагосодержания масла после нагрева		
Дата измерений	Ноябрь 1990 г.	
Температура масла, град.	Влагосодержание, ррм	Время выдержки, час
40	6,6	0
70	9,9	24
70	11,5	48
70	9,8	72

Результаты измерений влагосодержания образцов изоляции			
Дата измерений		Июль 1991 г.	
Толщина образ., мм	Место отбора	Влагосод. по массе, %	Норма, %
3,0	Пояс барьерн. изол.	0,85	1,5

### 3.2. WATER AND TRANSFORMER INSULATION

B.V.Vanin, V.V.Sokolov  
"ZTZ-Service"

Water in insulation oil may be in two states: dissolved and emulsified.

Dissolved water is in the form of separate molecules. The molecules motions are not quite free because of "hydrogen bonds". Water- in-oil solubility submits to Henry's law. Bound (hydration) water is located nearby the attraction centres of naphthenic and aromatic hydrocarbons active molecules. By temperature decreasing to dew point and bellow part of dissolved water turns into emulsion state. Water globules may decrease the dielectric strength of oil.

Cellulose impurities in oil absorb water. Moisture absorption isotherm has three sections: "Langemoure's section", polymolecular absorption section and capillary condensation section.

Used methods of dissolved water measurement give only limited information on degree and hazard of oil moistening in transformers.

It is necessary to develop a simple and convenient method for monitoring, for example, by the way of determining of relative oil humidity and/or of direct measurement of dew point by nephelometric method.

## 3 2. ВОДА И ИЗОЛЯЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Б. В. Ванин, В. В. Соколов

Рассмотрена физическая сторона явлений, обусловленных наличием воды в жидкой внутренней изоляции трансформаторов.

### СОСТОЯНИЕ ВОДЫ В ИЗОЛЯЦИОННОМ МАСЛЕ

Вода в изоляционном масле может быть в двух видах:

- 1) растворенная вода;
- 2) эмульгированная вода.

Первая в форме динамического равновесия распределяется в полях, создаваемых активными центрами молекул масла и в полях, создаваемых молекулами активных примесей в масле, ввиду чего для нее укоренились два разных названия: "растворенная вода" и так называемая "связанная вода", второе из которых не вполне правильно.

Кроме того, вода концентрируется в механических примесях, содержащихся в масле, в частности, в волокнах целлюлозы.

### РАСТВОРЕННАЯ ВОДА

Рассмотрим сначала воду, растворенную в масле, как если бы оно было лишено примесных активных веществ.

Растворенная в масле вода находится в виде отдельных молекул, движущихся между молекулами масла, которые также совершают тепловые движения. Движения молекул воды не вполне свободны из-за их притяжения к активным участкам молекул масла ("водородные связи"), но нет и полной заторможенности молекул воды, так как любые движения на молекулярном уровне прекращаются лишь при нулевой абсолютной температуре. Из-за наличия упомянутых сил притяжения для удаления растворенной воды из масла необходимо затратить некоторую энергию, примерно вчетверо большую, чем нужно для нагрева такого же количества воды от 0°C до 100°C.

Растворимость воды в углеводородных маслах подчиняется закону Генри. То есть, концентрация воды при данной температуре в равновесном состоянии пропорциональна относительной влажности воздуха.

Температурная зависимость максимальной растворимости воды может быть аппроксимирована выражением

$$W_m = W_0 \cdot e^{-B/T},$$

где  $W_0$  и  $B$  - константы.

В таблице 1 приведены значения параметров  $W_0$  и  $B$  для некоторых масел по данным *Bitsch, Oommen, Paul Griffin*.

Параметры температурной зависимости  
растворимости водяных паров  
в различных трансформаторных маслах

Автор	Тип масла	Параметры растворимости		Максимальная растворимость при t °С			
		$W_0 \cdot 10^{-7}$	$B$	0	20	50	80
<i>Bitsch</i>	1) Трансформаторное $C_A = 5\%$	1,697	3777	16,6	42,8	142	383
	2) То же $C_A = 8\%$	2,308	3841	17,9	46,8	158	434
	3) То же $C_A = 16\%$	2,276	3783	21,8	56,2	186	505
<i>Oommen</i>	Трансформаторное	2,6302	3845	20,1	525	178	489
<i>Paul</i>	Трансформаторное	1,2288	3608	22,3	55	173	447
<i>Griffin</i>	Силиконовое	1,9525	2733	87,7	174	413	848

### ГИДРАТНАЯ (СВЯЗАННАЯ) ВОДА

Вода, растворенная в масле вблизи растворенных в масле молекул некоторых активных веществ, в качественном отношении находится в таком же состоянии теплового движения, как и просто растворенная в масле вода, но, ввиду более сильного поля притягивающих молекулы воды молекул активных веществ местная концентрация растворенной воды вблизи них гораздо выше, чем собственная в масле. Удаление такой растворенной воды требует энергии ("энергии активации") на два-три порядка большей, чем удаления "просто растворенной" воды собственно из масла. Активные молекулы - центры притяжения - вместе с окружающими их молекулами вещества из раствора называются сольватами, а если это окружающие молекулы воды, как в данном случае, то - гидратами. Типичными активными веществами, образующими в масле такие гидраты, являются ароматические соединения, главным образом, нафтеноароматические углеводороды.

Наличие гидратов в масле повышает его общую растворимость очень значительно, иногда на порядок и более. Это оказывается причиной повышения гигроскопичности состаренных масел, потому что в них образуются продукты старения, которые способны гидратироваться, обезвоживая остальную часть масла. С другой стороны, свежее масло, содержащее гидраты, после осушки почти полностью освобождается от внегидратной и лишь отчасти освобождается от гидратной воды. Остающаяся часть последней постепенно перераспределяется в масле, вновь повышая содержание внегидратной воды. Процессы перераспределения воды между собственно маслом и содержащимися в нем гидратами длительны по времени, сравнимы с сезонными изменениями влаги в масле, не защищенных от атмосферы трансформаторов.

### ЭМУЛЬГИРОВАННАЯ ВОДА

В эмульгированном состоянии часть растворенной воды оказывается при понижении температуры масла до "точки росы" (которая при термодинамическом равновесии одинакова с точкой росы контактирующего с маслом воздуха) или ниже этой точки. Эмульсия представляет собой глобулы воды, висящие в масле. Размер глобул зависит от точки росы и фактической температуры заэмульгированного водомасла. При этом для более низких точек росы размеры глобул меньше. При наличии в масле поверхностно-активных веществ (например, нафтенов металлов) эмульсия более устойчива.

Образование эмульсии воды в масле неизбежно при понижении температуры масла,

так как для любого, даже малого, содержания воды существует такая, достаточно низкая, температура масла, при которой в нем выпадает роса.

В таблице 2 приведены данные о температуре точки росы масла *Shell Diala* примерно соответствующего по содержанию ароматических углеводородов маслу ГК.

Таблица 2

#### Влагосодержание масла

Точка росы, °С	-10	-5	0	5	10	15	20
Абсолютная влажность масла, г/	10	13	17	21	27	34	43

Это явление, вообще говоря, нежелательно, так как глобулы воды концентрируясь в напряженных участках поля, могут понизить электрическую прочность масла. Однако выпадение росы при небольших количествах растворенной воды не является катастрофой. Глобулы малого размера поляризуются в электрическом, притом слабонеоднородном поле, каким оно создается при разработке конструкции трансформатора, настолько мало, что действующей в результате поляризации на глобулы силы недостаточно для перемещения ее на участки с повышенной напряженностью поля и создания опасности понижения электрической прочности масла.

#### МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИМЕСИ И ВОДА

Содержание воды в гигроскопических механических примесях, взвешенных в масле, зависит от относительной влажности масла. Увлажнение волокон целлюлозы, взвешенных в масле, происходит аналогично увлажнению деталей целлюлозной изоляции обмотки.

Изотерма влагопоглощения целлюлозы характеризуется тремя участками:

- 1) "участок Лэнгмюра", соответствующий содержанию воды примерно (0-3)% по массе, который приблизительно можно характеризовать как область мономолекулярной адсорбции;
- 2) "участок полимолекулярной адсорбции" с пределами по влажности (3-7)%;
- 3) область капиллярной конденсации с влажностью более 7 %.

Ю. Калентьев показал, что влажность (более 6%) волокна целлюлозы могут снижать электрическую прочность масла практически в такой же степени, как и металлические проводящие частицы.

Вода в количествах, соответствующих "участку Ленгмюра" не способна существенно вредно влиять на электрические свойства материала, что в частности проявляется в том, что электрическими методами увлажнения материала в этом случае обнаруживается плохо.

#### ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В МАСЛЕ

Наличие в масле гидратной и просто растворенной воды обуславливает и различие в результатах измерения содержания воды в масле разными методами. Так, измерение хроматографическим методом с предварительным испарением пробы масла дает суммарное содержание гидратной и растворенной воды ("полную воду"); измерения, использующие равновесный способ извлечения водяного пара из масла в газовый объем, независимо от принципа самого измерения и используемого прибора (например, *Panametrics*, хроматограф) дают содержание растворенной воды; измеренной с предварительным экстрагированием воды из масла активным растворителем, как это делается при использовании реактивов Фишера, дает суммарное содержание растворенной воды и части гидратной. Вопрос о том, нужно ли контролировать содержание воды в масле трансформаторов и каким способом, будет рассмотрен ниже.

Обычно содержание гидратной и растворенной воды в трансформаторном масле

сравнимы между собой.

Таким образом, применяемые методы измерений растворенной воды дают лишь ограниченную информацию о степени и опасности увлажненного масла в трансформаторах особенно после длительной их эксплуатации (старение, загрязнение и т.п.).

В то же время измерения влажности, ведущие к определению "полно воды", "растворенной воды" (хроматографический, экстракционный) упомянутые выше, также не дают нужную информацию в полном объеме, так как служат цели измерения абсолютного содержания воды, а не ее способности образовывать эмульсию или увлажнять и увеличивать проводимость взвешенных в масле механических примесей. Такие средства представляют интерес, прежде всего, для исследовательских целей, в том числе для оценки состояния трансформатора с целью продления его срока службы.

Необходима разработка достаточно простого и удобного средства для опытного контроля этой концентрации в трансформаторном масле применительно к условиям эксплуатации трансформаторов.

Таким средством может быть определение относительной влажности масла и (или) прямое определение точки росы в жидкостях, например, нефелометрическим методом.

Важно отметить, что такой контроль воды в масле может быть устроен без необходимости отбора проб масла, непосредственно под напряжением.