

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В.В. Соколов, В.В. Гурин, ЗТЗ-Сервис

Повышение чувствительности изоляции современных конструкций силовых трансформаторов 220-1150 кВ к ухудшению состояния в эксплуатации логически приводит и к необходимости переоценки традиционных методов профилактических испытаний.

Многие специалисты считают, что традиционная система контроля изоляции, опирающаяся в значительной степени на результаты измерения ее электрических характеристик - сопротивления изоляции ( $R_{60}$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ) является неэффективной.

Нередко ориентация на удовлетворительные результаты измерений приводила к ошибочным выводам о возможности включения (оставления в работе) трансформатора с опасно увлажненной изоляцией. Отдельная работа по обследованию изоляции эксплуатационных трансформаторов с определением влагосодержания образцов картона, вырезанных из различных участков изоляции показала, что в большинстве случаев измеренные по стандартным схемам характеристики изоляции, участки которых были увлажнены до 2.0-3.0 % оказывались даже лучше данных, полученных для сухой изоляции.

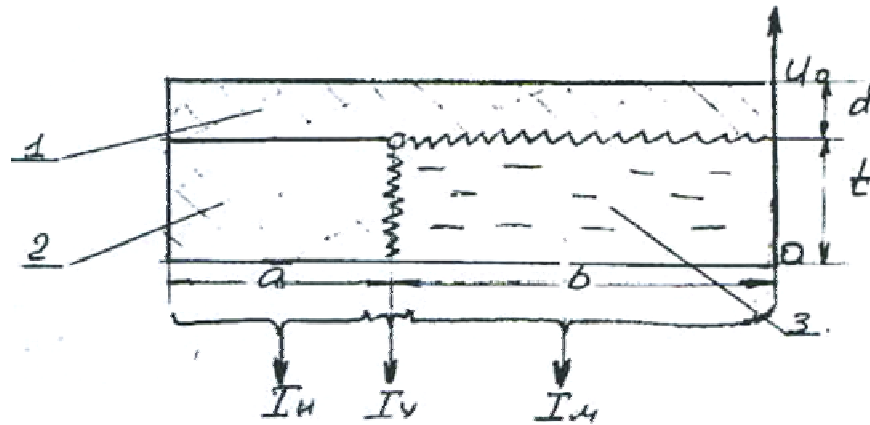
С другой стороны случаи снижения характеристик, что обычно оценивается как симптом увлажнения, зачастую фактически вызывались изменением характеристик масла. В последние годы предложена методика учета влияния масла, однако ее использование, в частности при оценке значений  $R_{60}$ , часто приводит к противоречивым выводам.

Указанные обстоятельства вызывают пессимистическую оценку принципиальной применимости электрических характеристик изоляции для контроля ее состояния в трансформаторах высших классов напряжения. Однако опыт НИЦ "ЗТЗ-Сервис" показывает, что при изменении методики испытания и оценке результатов с учетом особенностей конструкции и влияния параметров масла в традиционные характеристики могут быть влиты новые жизненные силы.

### 1. Влияние параметров твердой изоляции и масла на $\text{tg } \delta$ и $R_{60}$ маслобарьерной изоляции (МБИ).

1.1. При измерении характеристик изоляции обмоток силовых трансформаторов основную роль играют следующие участки изоляции: Обмотка - заземленные части и изоляция между обмотками. Влияние участков изоляции, шунтирующих маслобарьерную изоляцию (элементы изоляции отводов, выводов, устройства РПН) вследствие малости емкости на землю, практически оказывается существенным лишь в особых случаях, при значительном их увлажнении или загрязнении.

Для оценки состояния твердой изоляции наибольший интерес представляет участок изоляции между обмотками, поскольку электрические характеристики остальных участков в основном определяются параметрами масла. Основными элементами участка МБИ между обмотками являются электрокартонные цилиндры (барьеры), дистанцирующие их рейки и трансформаторное масло. Вследствие симметрии конструкции, при рассмотрении процессов, протекающих после приложения напряжения между обмотками, достаточно рассмотреть элементарный участок изоляции (см.рисунок)



Распределение токов проводимости через элементарный участок МБИ.

1 - электрокартонный цилиндр (барьер)

2 - дистанцирующая рейка

3 - масло.

Ток, протекающий через участок МБИ, при приложении напряжения  $U_0$  представляет сумму токов через толщину картона и рейки ( $I_u$ ), тока через масло ( $I_m$ ) и тока вдоль поверхности барьера и рейки ( $I_y$ ).

$$I_i = I_u + I_m + I_y = U_0 \cdot (g_u + g_m + g_y) = U_0 \cdot g_i \quad (1)$$

Величина тока поверхностной проводимости в каждой точке вдоль поверхности раздела карьера и масла меняется, а вдоль рейки, вследствие равномерности поля, постоянна.

Уравнение эквивалентной проводимости участка МБИ имеет вид

$$g_i = \frac{a \cdot H \cdot \sigma_u}{t + d} + \frac{b \cdot H \cdot \sigma_u}{d} \cdot \frac{1 + dF}{1 + \alpha}, \quad (2)$$

где  $F = \frac{1}{pb \cdot (cthp + pt)}$ ,

$$pb = \sqrt{\frac{b}{d} \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_y} \cdot (1 + 1/\alpha)},$$

$$\alpha = \frac{\sigma_u \cdot t}{\sigma_m \cdot d}.$$

Влияние поверхностной проводимости барьеров на эквивалентную проводимость МБИ определяется функцией  $F \cdot \left( \frac{\sigma_m \cdot b}{\sigma_u}, \frac{\sigma_u}{\sigma_m} \right)$ , изменяющейся в пределах  $0 \leq F \leq 1$ . Влияние проводимости масла проявляется через функцию  $\alpha \left( \frac{\sigma_u}{\sigma_m} \right)$ .

Однако при бесконечном увеличении поверхностной проводимости либо проводимости масла эквивалентная проводимость стремится к максимальному значению, зависящему только от объемной электропроводности картона

$$g_{i \max} = \left( \frac{\alpha \cdot H}{t + d} + \frac{b \cdot H}{d} \right) \cdot \sigma_u.$$

Минимальное значение эквивалентной проводимости имеет место при  $\sigma_y \rightarrow 0$  и измерениях без масла

$$g_{i \max} = g_u.$$

Значения  $g_i$  в пределах  $g_{i \min} \leq g_i \leq g_{i \max}$  определяется главным образом влиянием масла и, в

меньшей степени влиянием поверхностной проводимости.

Уравнение (2) позволяет рассчитать электрические характеристики МБИ как при постоянном и переменном напряжении, так и в переходных режимах. Далее ограничимся рассмотрением традиционных характеристик -  $tg\delta$  при напряжении промышленной частоты и проводимости (сопротивление изоляции  $R_{60}$ ) при постоянном напряжении.

### 1.2. Диэлектрические потери участка МБИ при напряжении промышленной частоты.

Можно показать, что при напряжении промышленной частоты, с учетом малости тангенса угла потерь картона ( $tg\delta_k$ ) и масла ( $tg\delta_m$ ) для реально возможных состояний МБИ, эквивалентное значение  $tg\delta_i$  МБИ представляет сумму из трех слагаемых, первое из которых (при заданном отношении  $E_k/E_m$ ) зависит только от состояния общей массы картона, второе - от состояния масла и третье - преимущественно, зависит от поверхностной проводимости картона

$$tg\delta_{i(50)} \approx K_0 \cdot tg\delta_k + K_m \cdot tg\delta_m + f(\sigma) \quad (3)$$

Аналитические выражения конструкционных коэффициентов  $K_0$ ,  $K_m$  и функции  $f(\sigma)$  и их численные значения, были рассчитаны для наиболее характерных конструкций трансформаторов напряжением 220-750 кВ.

Коэффициент  $K_0 < 1$  характеризует чувствительность  $tg\delta_i$  конструкции к изменению  $tg\delta$  картона, которая существенно увеличивается при измерениях без масла.

Коэффициент  $K_m < 1$  определяет влияние  $tg\delta$  масла. Для характерных конструкций МБИ  $K_m \approx 0,5 - 0,7$ , где меньшие значения относятся к изоляции внутренних обмоток, а большие - внешних обмоток.

Значение параметра  $f(\sigma)$  определяется величиной  $\sigma_y$ , однако зависит также от  $tg\delta$  картона и масла, величин отношения  $E_k/E_m$  и конструктивных размеров ( $b/a, b/t$ ). Величина  $\sigma_y$  на  $f(\sigma)$  и, соответственно, на  $tg\delta_i$  увеличивается с повышением "прозрачности" картона ( $tg\delta_k \rightarrow 0$ ), при измерениях без масла, при измерении участков изоляции внутренних обмоток. Измерение  $tg\delta$  масла оказывает заметное влияние на  $f(\sigma)$  лишь при весьма сильном загрязнении ( $tg\delta > 7 - 10\%$ ).

Уравнение (3) позволяет отдельно оценить влияние параметров картона и масла на эквивалентное значение  $tg\delta_i$  МБИ. Однако анализ показывает, что при существенных погрешностях аппаратуры, применяемой для измерения  $tg\delta$  в полевых условиях, влияние поверхностной проводимости оказываются заметны лишь при весьма сильном ее увеличении, что на практике случается редко. Обычно третьей составляющей в уравнении (3) можно пренебречь.

Влияние  $tg\delta$  масла на  $tg\delta_i$  МБИ является весьма существенным, особенно для малоувлажненной изоляции. Статистическое исследование результатов измерений после изготовления и монтажа более 700 трансформаторов 220-750 кВ подтверждает, что для малоувлажненной изоляции зависимость  $tg\delta_i = f(tg\delta_m)$  может быть представлена линейной функцией.

Анализ статистических зависимостей показал, что для оценки  $tg\delta_i$  малоувлажненной изоляции возможно использование выражения

$$tg\delta_i \leq 0,3 + K_m \cdot tg\delta_m \quad (4)$$

### 1.3. Сопротивление изоляции участка МБИ при постоянном напряжении.

Проводимость всего участка изоляции между обмотками имеет вид:

$$G_i = \frac{H_m}{n+2} \cdot \left( \frac{a}{t+d} + \frac{b}{d} \cdot \frac{1+\alpha \cdot F}{1+\alpha} \right) \cdot \gamma_k \quad (5)$$

где  $m, n$  - соответственно число реек и барьеров.

Влияние проводимости масла, определяемой функцией

$$\alpha = \frac{\gamma_{\kappa} \cdot t}{\gamma_{\text{м}} \cdot d}$$

и, поверхностной проводимости, определяемой функцией  $F$ , изменяет эквивалентную проводимость в пределах от минимального до максимального значений, определяемых только электропроводностью твердой изоляции.

Из уравнения (5) следует, что наибольшая чувствительность  $G_i$  к изменению состояния твердой изоляции имеет место при измерениях без масла.

Для залитого маслом трансформатора увеличение составляющей тока проводимости через масло приводит к уменьшению тока поверхностной проводимости и влияние последней оказывается практически незаметным, поскольку электропроводность масла практически всегда значительно больше электропроводности картона, отсюда следует вывод, что возможности контроля состояния поверхности картона залитого маслом трансформатора весьма ограничены.

В большинстве реальных случаев эквивалентную проводимость МБИ определяют параметры.

Влияние электропроводности масла проявляется через отношение  $\gamma_{\text{м}} / \gamma_{\kappa}$ .

При  $\gamma_{\text{м}} / \gamma_{\kappa} > 10$  величина  $G_i \rightarrow G_{i\text{max}}$  и зависит только от параметра  $\gamma_{\kappa}$ . Это означает, что для конкретных конструкций можно определить максимальное значение проводимости по условию ограничения электропроводности картона.

Однако увеличение  $\gamma_{\text{м}}$  вызывает увеличение токов утечки по маслу с торцов обмоток и при измерениях по стандартным схемам, без специального экранирования измерительной цепи от токов утечки на землю, увеличение электропроводности масла вызывает монотонное увеличение эквивалентной проводимости.

Если  $\gamma_{\text{м}} < 10 \cdot \gamma_{\kappa}$ , а также для случаев измерений по стандартным схемам, для малозагрязненного масла ( $E_{\text{м}} = \text{const}$ ) влияние масла можно оценить из следующего простого выражения:

$$G_i \approx K_0 \cdot \gamma_{\kappa} + K_1 \cdot \text{tg} \delta_{\text{м}} \% \cdot 10^{-9} \quad (6)$$

где  $K_0 = \frac{m \cdot H}{n + 2} \cdot \frac{a}{t + d}$ ,

$$K_1 \approx (0,03 - 0,06) \cdot \frac{m \cdot H}{n + 2} \cdot \frac{b}{t}$$

Расчеты показывают, что для характерных конструкций изоляции

$$K_1 = 2 - 6$$

При профилактических испытаниях обычно измеряют сопротивление изоляции ( $R_{60}$ ). Анализ показывает, что для практической оценки можно принять

$$R_{60} \approx \frac{1}{G_i}$$

2. Область оптимального применения традиционных электрических характеристик при контроле состояния изоляции трансформаторов.

Представляет интерес рассмотрение эффективности характеристик  $\text{tg} \delta$  и  $R_{60}$  при контроле трех характерных состояний изоляции: поверхностное увлажнение, общее (объемное) увлажнение картона, а также местное увлажнение, загрязнение и повреждение участков изоляции.

Наиболее частым дефектом является увлажнение.

Влияние влаги на электрические характеристики масла оказывается существенный лишь при повышении относительной влажности выше 40-50 %. Увеличение влажности масла при понижении температуры может приводить к изменению знака температурного коэффициента электропроводности, что для масел марок ТКП, Т-1500, Т-750 в температурном диапазоне 30-20-10

С может быть лишь при недопустимом влагосодержании масел выше 0,0025 - 0,0030 %.

Рассмотрим влияние увлажнения отдельных компонентов МБИ на  $tg\delta$  и  $R_{60}$ .

### 2.1. Контроль поверхностного увлажнения.

Более благоприятными условиями для контроля поверхностного увлажнения являются:

- 1) измерения  $tg\delta$  и  $R_{60}$  при слитом масле.
- 2) "прозрачный" картон - минимальные значения  $\gamma_k tg\delta_k$ ;
- 3) измерение характеристик участка МБИ внутренних обмоток.

Для указанных условий минимальная величина влагосодержания картона, которую можно заметить по изменению  $tg\delta_i$  при промышленной частоте оценивается на уровне 5-6%. Практически для промасляной изоляции это возможно при малореальных случаях длительного увлажнения изоляции на входе.

Изменение проводимости МБИ при измерении без масла может быть заметно при влагосодержании поверхностных слоев изоляции свыше 4 %. Однако, для сравнительно сухой общей массы изоляции изменение сопротивления изоляции происходит в интервале абсолютных значений 10 - 10 МОМ и для регистрации их требуется соответствующая аппаратура.

Условия контроля значительно ухудшаются, если трансформатор залит маслом. В этом случае при сравнительно сухой общей массе картона характеристики МБИ практически не зависят от изменения поверхностной проводимости.

Из изложенного следует, что использование рассматриваемых характеристик для контроля поверхностного увлажнения изоляции при монтаже и в эксплуатации трансформаторов практически не целесообразно.

### 2.2. Контроль общего увлажнения изоляции.

Более благоприятными условиями контроля являются: 1) проведение измерений при слитом масле; 2) предварительный прогрев изоляции для повышения чувствительности  $\gamma_k$  и  $tg\delta_k$  к увлажнению; 3) состояние поверхности изоляции, при котором можно пренебречь поверхностной проводимостью ( $W_k < 4-6\%$ ); 4) контроль участка МБИ внутренних обмоток.

Для расчета измеренной средней влажности  $\Delta W_k$  в этом случае может быть использовано выражение

$$\Delta W_k = \ln\left(\frac{tg\delta_u - K_m \cdot tg\delta_m}{K_u \cdot tg\delta_0}\right) \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (7)$$

где  $tg\delta_u$  - начальное значение ( $< 0.6\%$ ) = 0.2 (при  $t = 20-30$  С) и 0,5 (при 50-60 С).

Зависимость проводимости МБИ от увлажнения картона существенно более сильная. При измерениях без масла увеличение влагосодержания картона на 1% при  $t=60$  С может вызвать увеличение проводимости (снижение сопротивления изоляции) более чем в 5 раз. Однако абсолютные значения сопротивления изоляции при увеличении содержания влаги до 2% имеют порядок от нескольких десятков тысяч до нескольких тысяч МОМ, что требует применения специальной аппаратуры.

Заливка маслом вызывает увеличение  $G_i$  вплоть до максимальных значений. Если  $\gamma_m > 10 \cdot \gamma_k$ , зависимость  $G_i = f(W_k)$  проявляется по кривой  $G_{max}$  и не зависит от масла.

Для расчета изменения средней влажности могут быть использованы выражения.

$$\Delta W = \ln(\gamma_k / \gamma_0) \cdot \frac{1}{\alpha}, \% \quad (8)$$

где  $\gamma_k = \frac{1}{R_{60u} \cdot \frac{m \cdot H}{n+2} \cdot \frac{b}{d} \cdot \left(\frac{a}{t+d} \cdot \frac{d}{b} + \frac{1}{1+\alpha_m}\right)}$ , (Ом·м)<sup>-1</sup>

$$\alpha = 1,4$$

$$\alpha_m = (0,15 - 0,3) \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_{m70^\circ}}$$

Поскольку влияние масла не может увеличить проводимость МБИ свыше максимального значения, для оценки предложено условие минимальных значений  $R_{60}$ .

$$\frac{1}{R_{60\min}} \approx G_{\max} \leq \frac{m \cdot H}{n + 2} \cdot \left( \frac{a}{t + d} + \frac{b}{d} \right) \cdot \gamma_{\kappa(c)} \cdot e^{\alpha_1 \cdot (W_x - W_{\kappa cd})} \quad (9)$$

### 2.3. Контроль прочих дефектов изоляции.

Как следует из вышеприведенного анализа характеристик изоляции, могут дать некоторую прямую или косвенную информацию об общем состоянии изоляции. Ниже приведены вероятные дефекты, которые могут быть выявлены посредством измерения  $R_{60}$  и  $\operatorname{tg} \delta$ , систематизированные с учетом длительного наблюдения за состоянием большого числа трансформаторов.

Дефекты по способу обнаружения могут быть сведены в 3 группы:

Первая группа - связана с увеличением проводимости масла, вследствие повышения его влажности или загрязнения. Более чувствительной характеристикой здесь является сопротивление участков изоляции, включающих большие масляные промежутки.

Использование температурной зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  позволяет рассчитать значения  $\operatorname{tg} \delta$  масла непосредственно в масляном промежутке.

Вторая группа - связана со значительным увеличением поверхностной проводимости барьеров, вследствие их загрязнения или повреждения частичными разрядами. Как показано выше эти дефекты лучше выявляются при "прозрачном" картоне и, следовательно, при сравнительно низкой температуре изоляции.

Третья группа - связана со значительным ухудшением отдельных участков изоляции, шунтирующих МБИ.

Часть из дефектов может быть выявлена или подтверждена посредством испытания масла. В отличие от контроля увлажнения изоляции, для выявления указанных дефектов не требуется специальный прогрев изоляции, более того, большая часть из них лучше выявляется при сравнительно низких температурах. Следует также отметить, что, как правило, такие дефекты возникают при нестационарном состоянии трансформатора (хранение до монтажа, ремонтные работы в эксплуатации) и маловероятны в процессе нормальной эксплуатации.