

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ОБМОТОК КРУПНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Соколов В. В., канд. техн. наук, Цурпал С. В., инж., Конов Ю. С., канд. техн. наук, Короленко В. В., инж. Запорожтрансформатор — НИЦ ВВА

Повышение мощности энергосистем обостряет проблему динамической стойкости обмоток крупных силовых трансформаторов при коротких замыканиях. Во многих точках энергосистем токи наиболее частых однофазных КЗ существенно превышают токи в расчетном трехфазном режиме. В ряде случаев токи КЗ бывают больше допустимых для трансформаторов по расчетным или фактическим запасам прочности. В этих условиях вероятность повреждения трансформаторов, особенно старых конструкций и с большим сроком эксплуатации, значительно увеличивается.

Деформация обмоток мощных трансформаторов с нарушением их работоспособности происходит обычно после нескольких воздействий токов КЗ достаточно большой амплитуды. Вероятность повторения предельных нагрузок в эксплуатации невелика, вследствие чего трансформаторы длительно (по имеющимся данным до 5—6 лет) могут работать с частично деформированными обмотками. Таким образом, рассматриваемый вид повреждения может быть отнесен к развивающимся с той отличительной особенностью, что внешние признаки повреждения, определяемые по работе защит, результатам нормированных профилактических испытаний и др., как правило, отсутствуют.

Вместе с тем надежность трансформаторов, имеющих даже начальную стадию повреждения обмоток, оказывается существенно сниженной.

По оценке комитета 12 СИГРЭ [1] многие случаи повреждений изоляции обмоток были обусловлены ее первичным механическим нарушением.

Отечественный опыт показывает, что основной вид начального повреждения при воздействии токов КЗ — деформация внутренних обмоток (особенно автотрансформаторов), а типичная форма их развития — нарушение изоляции с последующим возникновением межсекционного пробоя, витковых замыканий, разрядов или полного пробоя участков главной изоляции. Задачи обнаружения механических повреждений обмоток и их креплений составляют в настоящее время одно из основных направлений диагностики трансформаторов. Для этой цели с разным успехом используются вибрационные и акустические характеристики, а также электрические характеристики, свидетельствующие о механических изменениях в обмотках [1]. К последним относятся методы измерения сопротивления КЗ, метод низковольтных импульсов и метод анализа частотных характеристик [2].

При выборе метода обычно стремятся обеспечить высокую чувствительность измеряемой характеристики к искомому дефекту. Вместе с тем в отношении механических повреждений для полного заключения о степени их опасности требуется не только вывод оборудования из работы, но и разборка активной части, поэтому основным требованием к методам индикации таких повреждений должна быть надежность диагноза.

С учетом изложенного при обследовании трансформаторов в эксплуатации для оценки деформаций обмоток нами был принят метод контроля полного сопротивления КЗ  $Z_K$ , отличающийся простотой процедуры измерений, хорошей повторяемостью результатов и, главное, достаточно высокой надежностью оценки наличия повреждения при отклонении параметра на определенную величину.

Для мощных силовых трансформаторов с цилиндрическими обмотками примерно равной высоты, расположенных на одном стержне (рис. 1), при равномерном распределении ампервитков, пренебрегая близостью ферромагнитного сердечника, а также практически незначительным активным сопротивлением обмотки, полное сопротивление КЗ можно выразить следующей формулой:

$$Z_{\kappa} \approx X_{\kappa} = \frac{2\pi f \mu_0 W^2 \zeta_1 D_{cp} \delta}{h}, \quad (1)$$

где  $X_{\kappa}$  — индуктивное сопротивление рассеяния, Ом;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$W$  — число витков в питаемой обмотке;  $\zeta_1$  — коэффициент Роговского;  $h$  — средняя высота обмоток;  $D_{cp}$  — средний диаметр главного канала рассеяния;  $\delta$  — приведенная ширина главного канала рассеяния;

для  $D_{cp} \gg b_1, b_2$

$$\delta \approx C + \frac{b_1 + b_2}{3}.$$

Наиболее характерным видом повреждения обмоток при КЗ является волнообразная деформация с наличием одной-двух волн, распространяющихся по высоте в нескольких (обычно в двух-трех) полях, определяемых прошивочными рейками.

При этом изменение  $Z_{\kappa}$  обусловлено практически только изменением формы обмотки и связанного с этим изменением геометрических размеров обмотки. Обмеры деформированных обмоток показывают, что при ограниченной зоне деформации изменяется (уменьшается) диаметр обмотки. Это обстоятельство позволяет оценить изменение  $Z_{\kappa}$ , например, при деформации сжимающими усилиями внутренней обмотки и уменьшении ее диаметра на величину  $2\Delta X$  (рис. 1), заменив в уравнении (1)

$$D_{cp} \text{ на } D'_{cp} = D_{cp} - \Delta X; \delta \text{ на } \delta' = C + \Delta X + \frac{b_1 + b_2}{3}.$$

Таким образом, изменение формы обмотки повлечет за собой изменение  $Z_{\kappa}$  на относительную величину

$$\Delta Z_{\kappa} = \frac{Z'_{\kappa} - Z_{\kappa}}{Z_{\kappa}} = \frac{(D_{cp} - \Delta X) \left( C + \Delta X + \frac{b_1 + b_2}{3} \right)}{D_{cp} \left( C + \frac{b_1 + b_2}{3} \right)} - 1, \quad (2)$$

или после несложных преобразований получим:

$$\Delta Z_{\kappa} = (m - n)\Delta X - mn\Delta X^2, \quad (3)$$

где

$$m = \frac{1}{C + \frac{b_1 + b_2}{3}}; \quad (4)$$

$$n = 1/D_{cp} \quad (5)$$

Величина второго слагаемого в уравнении (3) сравнительно мала, так что практически можно считать

$$\Delta Z_{\kappa} \approx (m - n)\Delta X \quad (6)$$

При деформации внутренней обмотки, расположенной у стержня, значение  $\Delta Z_{\kappa}$  всегда положительно. В трехобмоточном трансформаторе деформация (сжатие) средней по расположению обмотки при измерении  $Z_{\kappa}$  пары обмоток (внутренней и средней) приводит к отрицательному изменению  $\Delta Z_{\kappa}$  в соответствии с выражением

$$\Delta Z_{\kappa} = -(m - n)\Delta X + mn\Delta X^2 \approx -(m + n)\Delta X. \quad (7)$$

Из уравнений (3) — (7) видно, что наибольшее отклонение  $\Delta Z_{\kappa}$  должно быть для пары обмоток, величина канала рассеяния  $C$  между которыми наименьшая.

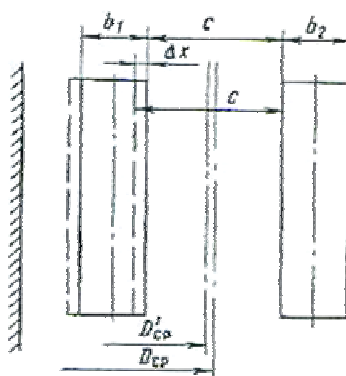


Рис. 1. Расчетная схема изменения размеров обмотки двухобмоточного трансформатора

Методика диагностики деформации обмоток по изменению  $Z_k$  предполагает сравнение его значений в эксплуатации с результатами измерений заведомо исправного оборудования. При этом критерием дефекта считается отклонение  $\Delta Z_k \%$  выше допустимого уровня.

Такое однозначное определение дефекта обычно достаточно при проведении динамических испытаний, но при измерениях в эксплуатации может приводить к ложной отбраковке.

Существенное значение имеет также методика измерения  $Z_k$ . В соответствии с ГОСТ 3484-77 при приемо-сдаточных испытаниях мощных трехфазных трансформаторов измеряется напряжение КЗ ( $U_k \%$ ) при трехфазном питании, на номинальной отпайке и токе в питаемой обмотке больше или равном  $0,25 I_{ном}$ . При испытаниях трансформаторов на стойкость при КЗ измерение  $Z_k$  в соответствии с режимом испытания [4] осуществляется при подведении однофазного напряжения до 400 В. Следует отметить, что значение  $Z_k$  не зависит от тока, но может существенно различаться в зависимости от способа подачи напряжения.

С учетом изложенного для контроля состояния обмоток по значениям  $Z_k$  в эксплуатации была определена методика измерения, по которой на возбуждаемую обмотку подводилось трехфазное напряжение от сети 380 В. Вторая обмотка закорачивалась медным проводом, сечение которого выбиралось численно равным (в квадратных миллиметрах) величине  $0,1 I_n$  (в амперах) закороченной обмотки. Например, для номинального тока обмотки  $I_n = 300$  А выбиралась закоротка сечением  $30 \text{ мм}^2$ .

Особое внимание обращалось на качество контактных присоединений.

Измерения проводились пофазно с регистрацией напряжения и тока приборами класса точности 0,5. Одновременно фиксировалась частота в питающей сети.

Предварительно для обследуемых трансформаторов были определены и практически отработаны схемы измерений, позволяющие обнаружить деформации обмоток, а также подтвердить наличие дефекта.

На рис. 2 приведены основные (индикаторные) и дополнительные (уточняющие) схемы контроля автотрансформатора АТДЦТН-125000/330/110-63. а также расчетная графическая оценка изменения  $Z_k$  при характерных деформациях (ПО — последовательная обмотка, РО — регулировочная обмотка). В число основных включены схемы измерения  $Z_k$  на номинальных отпайках для возможности сравнения с исходными (заводскими) данными, а также схемы, позволяющие получить большую чувствительность  $Z_k$  к дефекту. Следует отметить, что при повторных измерениях в эксплуатации могут быть использованы только последние схемы. В число дополнительных включаются также схемы с однофазным питанием.

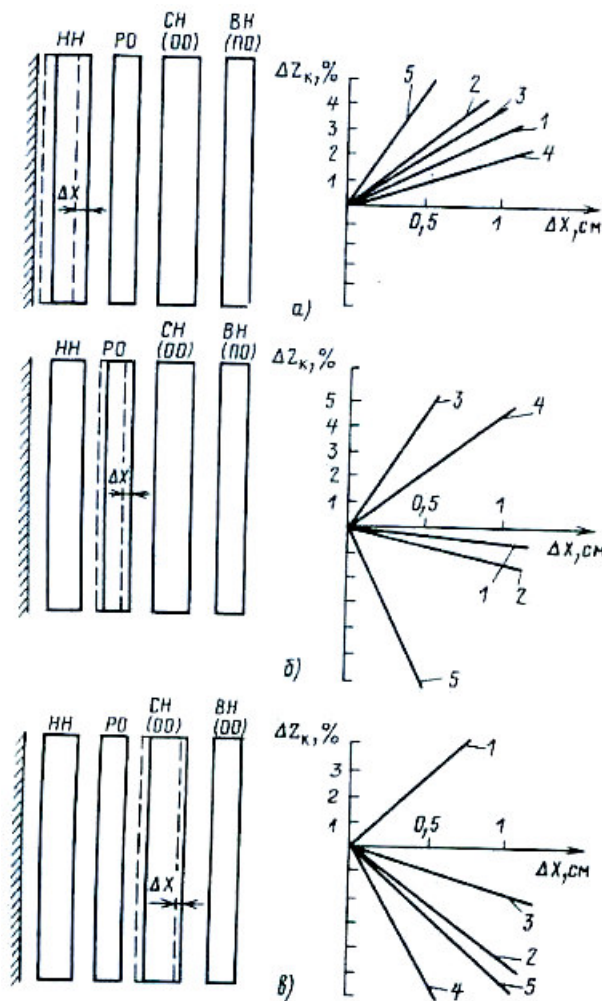


Рис. 2 Расположение обмоток, вид и место деформации и график зависимости  $\Delta Z_k = f(\Delta X)$ :  
а – радиальная НН; основные схемы: 1 – ВН – НН; 2 –  $CH_{ном}$  – НН; дополнительные схемы: 3 –  $CH_{мин}$  – НН; 4 – ПО – НН; 5 – РО – НН;  
б – радиальная РО; основные схемы: 1 – ВН – НН; 2 –  $CH_{ном}$  – НН; 3 –  $CH_{мин}$  – РО; дополнительные схемы: 4 – ВН – РО; 5 – РО – НН; 6 – радиальная СН; основные схемы: 1 – ВН –  $CH_{ном}$ ; 2 –  $CH_{ном}$  – НН; 3 – ВН – НН; 4 –  $CH_{мин}$  – РО; дополнительная схема: 5 –  $CH_{мин}$  – НН

С целью надежного выявления повреждений, оценки степени их опасности и предупреждения случаев ложной отбраковки предложена комплексная оценка результатов, заключающаяся в следующем.

1. Для каждой основной схемы вычисляются относительные отклонения измеренных значений  $Z_k$  от паспортных данных, определяемых по значениям напряжения КЗ

$$\Delta Z_k = \frac{\sqrt{3} Z_k I_n \cdot 10^4}{U_k U_n} - 100 \quad (7)$$

где  $\Delta Z_k$  – отклонение, %;  $U_k$  – паспортное значение напряжения КЗ, %;  $U_n$  – номинальное линейное напряжение, В;  $I_n$  – номинальный ток со стороны питаемой обмотки (при соединении в звезду), А.

2. Рассчитывается наибольшее отличие измеренных по каждой схеме  $Z_k$  между фазами

$$\Delta Z'_k = \frac{Z_{k.макс} - Z_{k.мин}}{Z_{k.мин}} 100 \quad (8)$$

3. Оцениваются величины и знаки  $Z_k$  и сравниваются с расчетными зависимостями  $\Delta Z_k = f(\Delta X)$  (см. графики на рис. 2). Проверяется совпадение отклонений  $\Delta Z_k$  и  $\Delta Z'_k$ .

4. При значениях  $\Delta Z_k$  или  $\Delta Z'_k \geq 3\%$  в одной или нескольких схемах и совпадении

характера изменения  $\Delta Z_K$  с графиками делается предварительный вывод о наличии деформации обмоток.

5. Выполняются измерения по дополнительным схемам и оцениваются полученные результаты по п. 3. Особое внимание обращается на наличие и совпадение с расчетными отклонений  $\Delta Z_K$  во всех схемах.

6. Оцениваются режимы работы, число КЗ, токи КЗ через трансформатор в сравнении с предельно допустимыми, после чего делается окончательный вывод о наличии повреждения и его ориентировочном объеме.

Заключение о невозможности продолжения нормальной эксплуатации при подтверждении наличия повреждения обычно дается при  $\Delta Z_K$  и (или)  $\Delta Z'_K \geq 3\%$  с учетом вероятного развития повреждения, режима эксплуатации и др.

По указанной методике в 1984—1987 гг. совместно с работниками энергосистем выполнено обследование 75 крупных силовых трансформаторов, основную часть которых представляло оборудование 330 кВ, установленное в энергосистемах Украины, в сетях с повышенной кратностью токов КЗ.

В результате обследования обнаружено 22 трансформатора, дальнейшая эксплуатация которых была признана опасной; 16 из них при первой возможности были выведены из работы и заменены; еще 6 оставлены временно в работе под повышенным контролем и в ближайшее время должны быть заменены; 12 из 16 отключенных трансформаторов уже разобраны с демонтажем обмоток. При осмотре, диагноз о деформации обмоток полностью подтвердился.

Следует отметить, что во всех случаях рекомендации о необходимости ремонта трансформаторов были даны только на основании комплексной оценки.

С помощью последней также примерно 40 % первичных результатов измерений, показывающих значительное отклонение  $\Delta Z_K$ , были признаны ошибочными и после перепроверки не подтвердились.

Далее приведено несколько характерных примеров выявления дефектов.

Результаты обследования АДЦТН-125000/330/110-63 (табл. 1) показали, что значения  $Z_K$  в схеме измерений с участием обмотки СН отличаются от расчетных более чем на 3 % для всех фаз. Знаки отклонения  $\Delta Z_K$  совпадают со знаками кривых на рис. 2 для деформации обмоток СН, значения  $\Delta Z'_K$  (отклонения между фазами) в схемах с непосредственным участием СН превысили 3 %. В то же время в схемах измерений без участия СН (см. ПО—НН) значения  $\Delta Z'_K < 1\%$ ,  $\Delta Z_K < 3\%$ .

Таблица 1

Схема измерения	Фаза	$Z_K$ , Ом	$Z_{кп}$ , Ом	$\Delta Z_K$ , %	$\Delta Z'_K$ между фазами, %
ВН – СН <sub>ном</sub>	А	82,32		3,52	4,9
	В	88,13	83,38	5,7	
	С	90,57		8,62	
ВН – НН	А	272		-5,08	1,68
	В	276,5	285,8	-3,3	
	С	272,4		-4,89	
СН <sub>ном</sub> – НН	А	22,08		-2,81	4,56
	В	22,01	22,7	-3,13	
	С	21,02		-6,6	
СН <sub>мин</sub> – РО	А	12,87		-5,26	5,7
	В	12,69	13,55	-6,75	
	С	12,23		-10,74	
ПО – НН	А	147,3		-2,9	0,86
	В	148,1	151,5	-2,27	
	С	148,5		-2,02	

Анализ условий эксплуатации выявил превышение расчетных токов КЗ через АТ над

допустимыми.

По приведенным данным предположена деформация обмоток СН фазы С.

При внутреннем осмотре после слива масла через осевые каналы между обмотками обнаружено смещение изоляции в промежутке ВН—СН с выпучиванием проводников обмоток СН. На фазе С обнаружено выпучивание в двух местах по окружности.

На основании выданных рекомендаций о невозможности дальнейшей надежной эксплуатации АТ в плановом порядке был изготовлен и установлен новый АТ.

Измерения АТДЦТГ-240000/330/150-61 (табл. 2) показали отклонение  $DZ_k$  и  $DZ'_k$ , характерные для деформации обмоток НН фаз В и С. Значения  $DZ_k$  заметно уменьшаются в схемах, где размер главного канала рассеяния увеличивается (соответственно СН—НН, ВН—НН, ПО—НН) и отличаются от расчетных менее чем на 1 % в схеме без участия обмоток НН.

Таблица 2

Схема измерения	Фаза	$Z_k$ , Ом	$Z_{кп}$ , Ом	$DZ_k$ , %	$DZ'_k$ , между фазами, %
ВН – СН <sub>НОМ</sub>	А	50,33	50,8	-0,95	0,75
	В	50,7		-0,19	
	С	50,5		-0,62	
ВН <sub>НОМ</sub> – НН	А	160,7	161,9	-0,74	6,48
	В	171,2		5,69	
	С	170,1		5,05	
СН – НН	А	24,1	23,8	1,2	11,8
	В	26,9		13,1	
	С	26,3		10,54	
ПО – НН	А	97,9	98	-0,06	3,3
	В	101,2		3,26	
	С	100,8		2,82	

Установлено, что за 2 года до обследования на шинах НН этой подстанции были КЗ.

Для замены поврежденного заказан новый АТ.

Необходимость обследования ТДЦ-400000/330 П была вызвана однократным выделением газа в газовом реле после несинхронного включения трансформатора в сеть. Состав газов, растворенных в масле, указывал на наличие искрового разряда в масле

(СН<sub>4</sub> — 30,5; С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub> — 35,3; С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub> — 5,1; С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub> — 245; Н<sub>2</sub> — 713 мкл/л)

При дальнейшей работе газовой выделением не наблюдалось. Все результаты нормированных измерений были удовлетворительными.

О наличии внутреннего повреждения свидетельствовали только результаты измерения  $Z_k$  (табл. 3), показавшие отклонение между фазами  $DZ'_k=3,28$  % и отклонения значений  $Z_k$  обмоток фазы А от данных, полученных при предыдущих профилактических испытаниях на  $DZ_k=2,4$  %.

Таблица 3

Схема измерения	Фаза	$Z_k$ , Ом	$Z_{кп}$ , Ом	$DZ_k$ , %	$DZ'_k$ , между фазами, %	Примечание
ВН – НН	А	35,39	35,84	-1,26	0,88	Профилактические испытания
	В	35,08		-2,12		
	С	35,39		-1,25		
ВН – НН	А	36,23	35,84	1,09	3,28	После несинхронного включения в сеть
	В	35,08		-2,12		
	С	35,33		-1,4		

На основании приведенных данных был поставлен диагноз о деформации обмотки ВН<sub>2</sub> фазы А и рекомендован вывод трансформатора в ремонт.

После разборки на обмотке ВН<sub>2</sub> фазы А обнаружены две волны деформации с

максимальным прогибом 40 мм, а с внутренней стороны обмотки — след перекрытия вдоль рейки между 17-й и 55-й катушками по высоте в зоне деформации.

Значительные трудности при оценке результатов измерений возникают из-за влияния различных погрешностей. Рассмотрение последних может быть предметом специальной работы, в данном случае ограничимся лишь некоторым перечислением.

Опыт измерений  $Z_k$  показал существенность инструментальных погрешностей (из-за необходимости отличия значимых отклонений 0,5—1 %), влияния схемы питания (однофазное, трехфазное), влияния петли индуктивности подсоединяемых проводов, влияния электрически соединенных обмоток, расположенных на разных стержнях, и др. Наиболее частой причиной отклонений  $Z_k$ , не связанных с дефектом, является влияние качества закоротки. Пример отклонения  $Z_k$  из-за плохой зачистки контактных присоединении закоротки приведен в табл. 4 (результаты измерения сопротивления КЗ трансформатора АТДЦТН-125000/ 330-63).

Таблица 4

Схема измерения	Фаза	$Z_k$ , Ом	$Z_{кп}$ , Ом	$\Delta Z_k$ , %	$\Delta Z_k$ , между фазами, %	Примечание
ВН – НН	А	294	282,3	4,14	2,15	После чистки контактных поверхностей вводов НН и ВН
	В	293		3,79		
	С	288		2,02		
ВН – НН	А	280,4	282,3	-0,60	1,19	
	В	283,7		0,49		
	С	180,8		0,53		

Вместе с тем использование приведенной методики оценки во всех случаях позволило получить достоверные результаты.

## ВЫВОДЫ

1. Метод оценки изменения сопротивления короткого замыкания является эффективным средством выявления деформаций обмоток мощных трансформаторов и может быть использован в нормах профилактических испытаний, особенно при эксплуатации оборудования в сетях с повышенными кратностями токов КЗ.

2. Предложенная комплексная методика оценки результатов измерения  $Z_k$  учитывающая особенности конструкции трансформаторов и условия эксплуатации, позволила предупредить ряд серьезных повреждений ответственного оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pratt F. C— CIGRE, 27 aug. — 4 sep. 1986, Rep. 12—06.
2. Dick E. P., Erven C. C— IEEE Transactions on Power App. and Systems, vol Pas-97, Nov/dec., 1978, 2144—2153.
3. Васютинский С. В. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970.
4. Конов Ю. С, Короленко В. В., Федорова В. П. Обнаружение повреждений трансформаторов при коротких замыканиях.— Электрические станции. 1980, № 7.