

УДК 621.314.21

АВТОМАТИЗАЦИЯ И IT В ДИАГНОСТИКЕ: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО ОТКЛИКА (SFRA), МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИИ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЧАСТЬ 1

В статье приведены модели геометрических деформаций обмоток силовых трансформаторов, а также модернизированные формулы расчета электродинамических сил, действующих на обмотку с деформацией. Представлен обзор нормативной документации, регламентирующей анализ состояния обмотки силовых трансформаторов методом частотного отклика (SFRA), приведены формулы расчета показателей для численного сравнения нормограмм и дефектограмм. Также приведены примеры анализа обмоток силовых трансформаторов с наличием деформации обмотки в результате испытаний на электродинамическую стойкость к токам короткого замыкания и после коротких замыканий.

АВТОРЫ:

Хренников А.Ю.,
д. т. н., профессор,
«Россети Научно-технический центр»

Александров Н.М.,
к. т. н., НП «Динамика»

Михайлов С.А.,
магистрант, НИУ ТУ МЭИ

Ключевые слова:

#трансформатор;
#деформация;
#электродинамические
силы; #частотный
отклик; #SFRA;
#диагностика;
#интерпретация.

Введение

Силовой трансформатор является одним из наиболее важных и ответственных электротехнических устройств, элементом схем генерации, передачи и распределения электроэнергии путем ее преобразования посредством электромагнитной индукции из одной величины переменного напряжения и тока в другую величину переменного напряжения и тока той же частоты без изменения ее передаваемой мощности. Механические деформации обмоток силовых трансформаторов приводят к их повреждению и, соответственно, вызывают перерывы в электроснабжении. Механические повреждения в основном являются следствием электромагнитных сил, воздействующих на обмотки трансформатора во время коротких замыканий (КЗ). Диагностика механических повреждений до включения в работу и во время периодических испытаний поможет избежать негативных последствий, позволяя выявлять повреждения на ранней стадии развития для последующего быстрого и менее дорогостоящего ремонта [1, 2].

На основе актов расследования технологических нарушений в работе силовых трансформаторов, эксплуатируемых в электрических и межсистемных сетях холдинга РАО «ЕЭС России», был выполнен анализ удельной повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ мощностью 63 МВА и выше. Установлено, что около 30% от общего числа отключений оборудования связано с внутренними витковыми КЗ. Недостаточная электродинамическая стойкость обмоток при КЗ является одной из основных причин внутренних замыканий [2].

Основными причинами технологических нарушений, не сопровождавшихся внутренними КЗ, но приведших к отключению действием автоматических защитных устройств или вынужденному отключению персоналом по аварийной заявке, являются (в процентах от общего числа нарушений) [2]:

- нарушения в работе РПН — 20%;
- течи масла из вводов — 16%;
- течи и упуск масла из трансформатора из-за нарушения сварных

соединений и резиновых уплотнений — 13%;

- повреждение двигателей маслососов системы охлаждения — 4%;
- повышение давления в высоковольтных герметичных вводах — 3%;
- повреждение оболочки пленочной защиты — 2%.

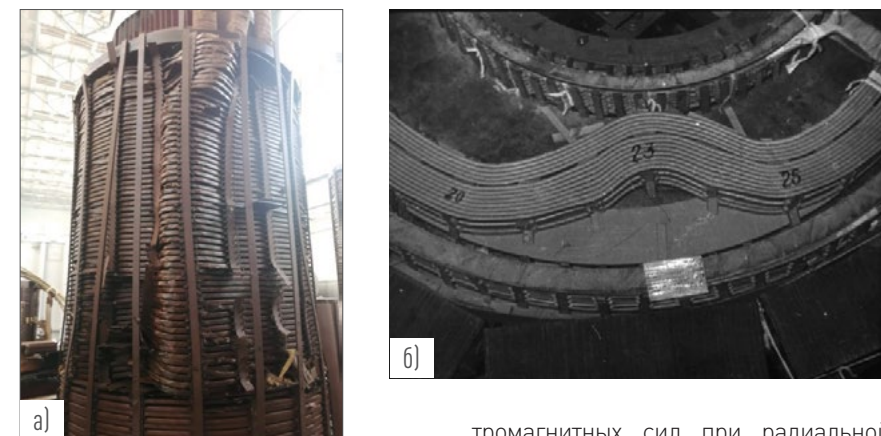
Основными причинами технологических нарушений, сопровождавшихся внутренним КЗ в трансформаторе, являются (в процентах от общего числа повреждений трансформаторов, сопровождавшихся внутренними КЗ) [2]:

- пробой внутренней изоляции высоковольтных вводов — 48%;
- недостаточная стойкость при КЗ — 14%;
- износ изоляции обмоток — 12%;
- пробой изоляции обмоток — 7%;
- пробой изоляции отводов, нарушения контактного соединения отвода обмотки, обрыв части проводников гибкой связи, замыкание на ярмовую балку магнитопровода и корпус бака — 5%;
- повреждения РПН — 5% [2].

Для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов в настоящее время наряду с традиционными методами, такими как хроматография трансформаторного масла, измерение полного сопротивления короткого замыкания и метода низковольтных импульсов (НВИ), применяется метод измерения частотных характеристик [Sweep frequency response analysis]. Данный метод является сравнительным, т.е. анализ производится методом сравнения дефектограммы — характеристики частотного отклика, полученной при текущих испытаниях, — и нормограммы — характеристики заведомо исправного трансформатора. Одним из наиболее важных аспектов применения метода является вопрос интерпретации, поскольку результатом проверки является графическое представление массива данных характеристик частотного отклика.

ПРИМЕРЫ ПОТЕРЬ РАДИАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ: А) ТРАНСФОРМАТОР ТИПА ТРДН-40000/110/10/6 С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ НН, РАСПОЛОЖЕНИЕ ОБМОТОК ОДНА НАД ДРУГОЙ, РАЗЛИЧИЕ ЗНАЧЕНИЙ Δz_k ПО ФАЗАМ — 7%; Б) РАДИАЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ВИТКА ОБМОТКИ НН

Рис. 1



Уравнение для радиальной деформации

При протекании тока через трансформатор к внутренней и внешней обмотке прикладываются разные по направлению радиальные силы. Внутренняя обмотка постоянно подвергается растягивающему усилию из-за внешнего направления сил. В то время как внешняя испытывает сжимающее напряжение из-за направленных внутрь сил.

Обычно напряжение на растяжение не представляет опасности повреждения внешней обмотки [8]. Однако сжимающее напряжение радиальных сил вызывает повреждение внутренней обмотки, которое называется выпучиванием, как показано на рисунке 1.

Радиальные силы растягивают внешнюю обмотку, стремясь ее разорвать, и сжимают внутреннюю [3]. Для расчета сил, действующих на обмотку, принято пользоваться либо законом Био — Савара (1), либо теоремой Лагранжа (2).

$$F = \int_V [B_j] dV. \quad (1)$$

В данном случае воспользуемся теоремой Лагранжа для вычисления элект-

ромагнитных сил при радиальной деформации. При применении к электромагнитному полю теорема формулируется следующим образом: в системе контуров с током, находящихся в магнитном поле, электромагнитная сила, стремящаяся изменить данную координату системы, равна производной энергии магнитного поля по данной координате в предположении, что токи в контурах поддерживаются постоянными [3].

$$f_g = \frac{dW_M}{dg}, \quad (2)$$

где f_g — сила, действующая в направлении координаты g ;
 W_M — энергия магнитного поля рассеяния трансформатора.

$$W_M = \frac{1}{2} \mu_0 \int_V B_\sigma^2 dV \quad \text{или} \quad W_M = \frac{1}{2} L_k i^2, \quad (3)$$

где L_k — индуктивность короткого замыкания трансформатора.

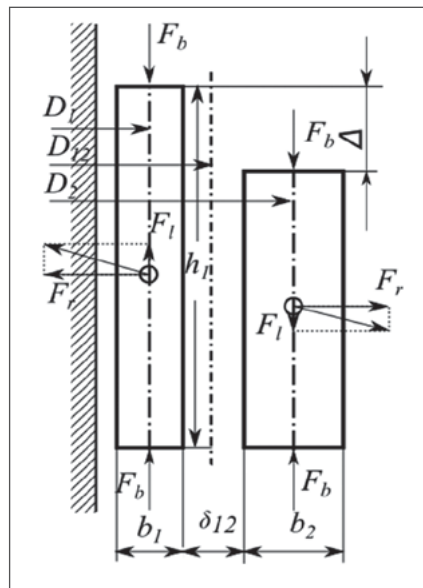
Таким образом,

$$f_g = \frac{1}{\mu_0} \int_V B_\sigma^2 \frac{\partial B_\sigma}{\partial g} dV = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L_k}{\partial g}. \quad (4)$$

Радиальные силы, действующие на обмотку двухобмоточного трансформато-

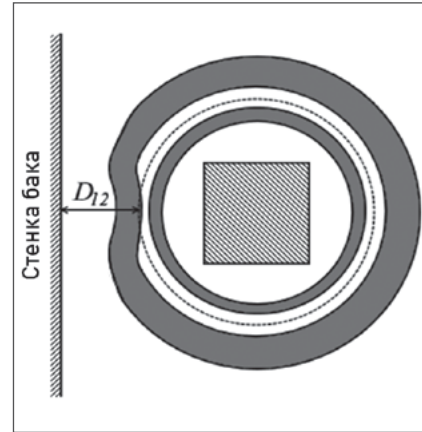
РАДИАЛЬНЫЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ОБМОТКИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Рис. 2



ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ОБМОТКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЛЬНЫХ СИЛ

Рис. 3



ра, стремятся увеличить расстояние между обмотками δ_{12} (рис. 2). Поэтому в соответствии с уравнением (4) необходимо взять производную по δ_{12}

$$F_r = \frac{1}{2} I_{\max}^2 \frac{\partial L_k}{\partial \delta_{12}}$$

Индуктивность короткого замыкания рассчитывается по формуле:

$$L_k = \frac{\mu_0 \omega^2 \rho_1 D_{12} (\delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3})}{h} \quad (5)$$

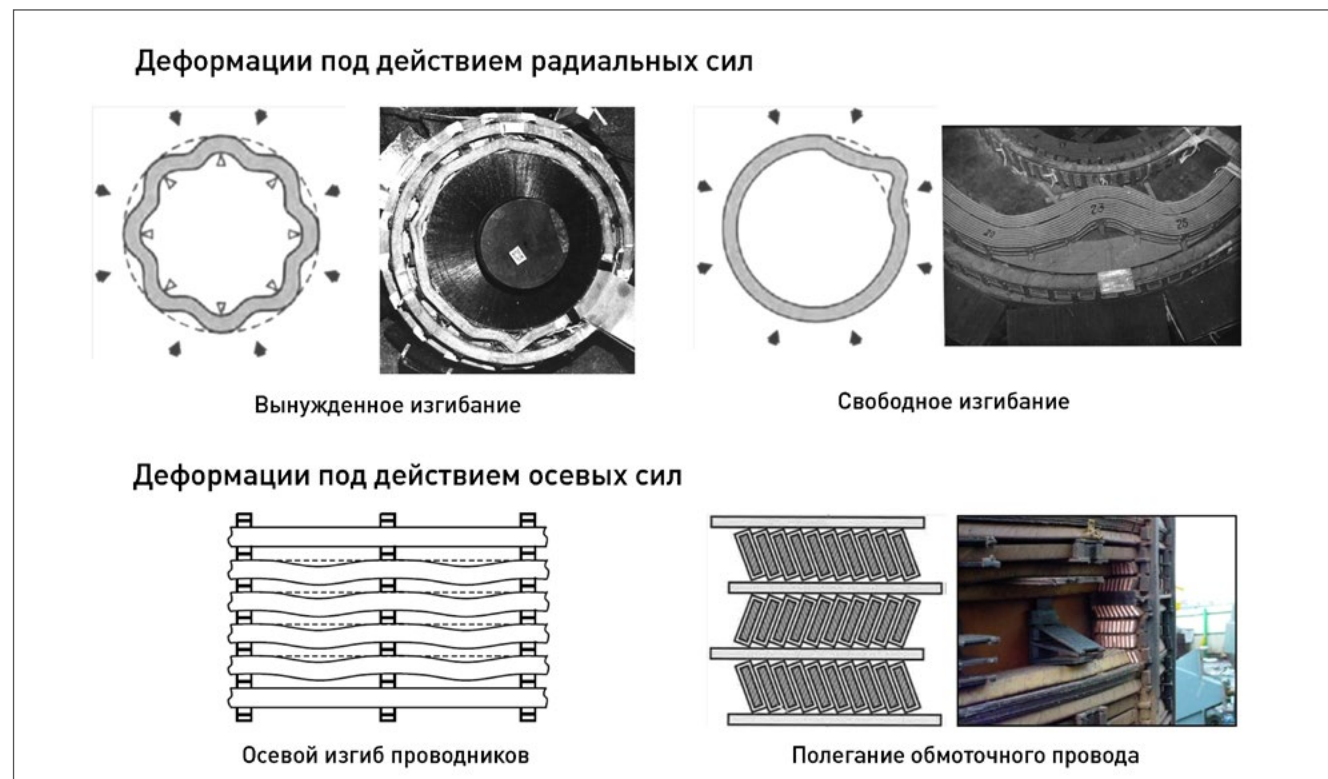
Радиальная сила, действующая на обмотку, рассчитывается по формуле:

$$F_r = \frac{\mu_0 (I_{\max} \omega)^2 \rho_1 \pi (D_{12} + a \cdot \sin(2\pi\varphi / \Phi))}{2h} \quad (6)$$

где F_r — радиальная сила;
 μ_0 — магнитная проводимость;
 I_{\max} — амплитуда тока КЗ;
 ω — количество витков обмотки;
 ρ_1 — коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского);
 D_{12} — расстояние стенки бака до середины промежутка между обмотками;
 h — высота обмотки.

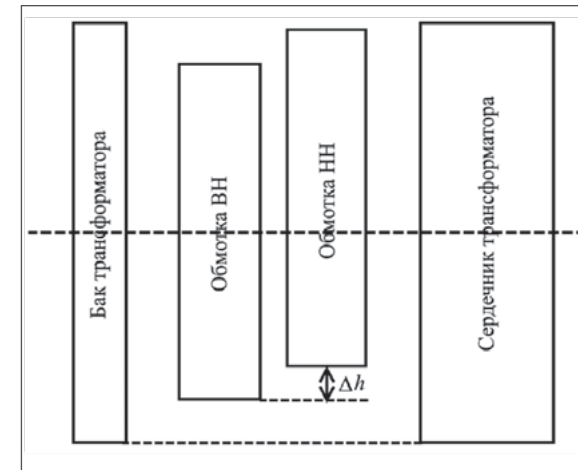
ДЕФОРМАЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЛЬНЫХ СИЛ (ВЕРХНИЙ РЯД), ДЕФОРМАЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОСЕВЫХ СИЛ (НИЖНИЙ РЯД)

Рис. 4



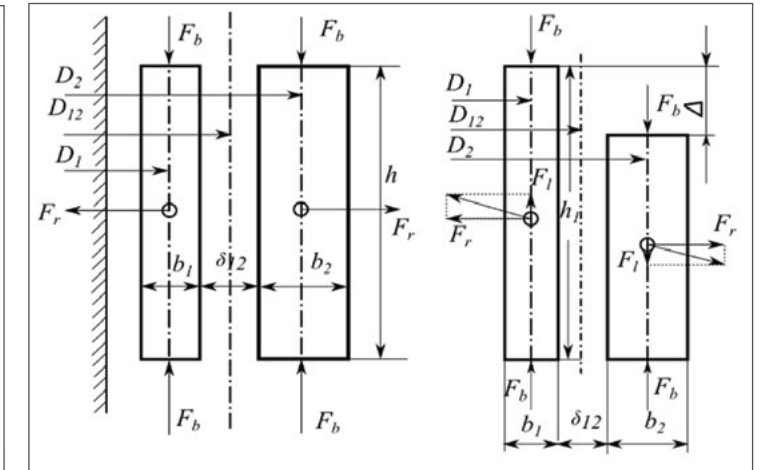
ОСЕВОЕ СМЕЩЕНИЕ ОБМОТКИ ВН

Рис. 5



ОСЕВЫЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ОБМОТКУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Рис. 6



Изменение формы обмотки под действием радиальных сил приведено на рис. 3.

Деформации под действием радиальных сил и под действием осевых сил — на рис. 4.

Выражение (6) для радиальной силы более точно отражает процессы, идущие в обмотках силовых трансформаторов в случае короткого замыкания и возникновения радиальных вынужденных изгибов, из-за применения тригонометрических функций при описании формы и объема деформации.

Уравнение для осевой деформации

Существует три вида деформаций из-за осевых сил, обычно упоминаемых в литературе, а именно: осевого смещения, осевого изгиба и наклона проводника. Из-за различного направления тока во внешней и внутренней обмотках каждая обмотка испытывает различное направление осевых сил одновременно. Поэтому крайне важно иметь идеальное выравнивание между обмотками относительно центральной линии. Небольшое смещение в одной из обмоток может вызвать асимметрию распределения сил, тем самым

ГРАНИЦЫ ОТНОСИТЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Таблица 1

Уровень деформации обмотки	Относительный коэффициент $K_{отн}$
Сильная деформация	$K_{отн(НЧ)} < 0.6$
Очевидная деформация	$1.0 > K_{отн(НЧ)} \geq 0.6$ или $K_{отн(СЧ)} < 0.6$
Незначительная деформация	$2.0 > K_{отн(НЧ)} \geq 1.0$ или $0.6 < K_{отн(СЧ)} \leq 1.0$
Отсутствие деформаций	$K_{отн(НЧ)} \geq 2.0$, $K_{отн(СЧ)} \geq 1.0$ и $K_{отн(ВЧ)} \geq 0.6$

дополнительно увеличивая действие осевых сил на обмотки [9]. Когда силы достаточно велики, чтобы преодолеть усилие зажимов, обмотка трансформатора может быть смещена вертикально, по сравнению с ее исходным положением, как показано на рис. 5. Это движение может привести к повреждениям части прессующей конструкции [10–14].

Если рассматривать осевую деформацию как изменение высоты обмотки, тогда формула осевой деформации будет иметь вид:

$$\Delta = h_{ВН} - h_{НН}$$

Осевые силы, действующие на обмотку силового трансформатора, показаны на рис. 6.

Из этого следует, что $h_{ВН} = h_{НН} + \Delta$.

Можно подставить в формулу (6):

$$F_a = - \frac{\mu_0 (I_{\max} \omega)^2 \rho_1 \pi D_{12} \delta'}{2(h_{НН} + \Delta)} \quad (7)$$

где $\delta' = \delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3}$ — это предельная ширина главного канала рассеяния.

Нормативная документация по применению метода частотного анализа

Стандарт DL 911/2004

Одним из первых появился стандарт DL 911/2004, опубликованный в Китае в 2004 году. В стандарте предлагается методология расчета относительного коэффициента в трех частотных диапазонах для определения уровня деформации обмотки. Уровень деформации и предельные значения приведены в таблице 1.

В стандарте выделены следующие диапазоны расчета относительных коэффициентов:

1. Низкочастотный диапазон (1 кГц – 100 кГц);
2. Среднечастотный диапазон (100 кГц – 600 кГц);
3. Высокочастотный диапазон (600 кГц – 1000 кГц).

Относительный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$K_{отн} = \begin{cases} 10, & \text{если } 1 - \sigma < 10^{-1} \\ -\log_{10}(1 - \sigma) \end{cases} \quad (8)$$

Коэффициент корреляции σ рассчитывается по формуле:

$$\sigma(x, y) = \frac{C_{xy}}{\sqrt{D_x \cdot D_y}} \quad (9)$$

$$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [(x(k) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(k))^2 \cdot (y(k) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(k))^2]$$

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [(x(k) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(k))^2] \quad (10)$$

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [(y(k) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(k))^2]$$

Анализ частотного отклика в данном стандарте проводится в частотном диапазоне от 1 кГц до 1 МГц, что отличается от более поздних публикаций.

Техническая брошюра рабочей группы СИГРЭ А2.26

Рабочей группой А2.26 Международного совета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ) в апреле 2008 г. была выпущена техническая брошюра [3] по методу анализа частотного отклика для определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Эта брошюра использовалась и цитировалась в опубликованных позднее стандартах МЭК и IEEE. В данной брошюре приведены реальные случаи повреждения силовых трансформаторов с выявленными повреждениями и измеренными откликами. В публикации приведены рекомендации, такие как особенности

ЧАСТОТНЫЕ ДИАПАЗОНЫ ОТКЛИКОВ

Таблица 2

Частотный диапазон	Границы частот	Влияющий фактор
Низкочастотный	< 2 кГц	Магнитопровод
Среднечастотный	2 кГц – 20 кГц	Межобмоточное взаимодействие
Высокочастотный	20 кГц – 1 МГц	Строение индивидуальной обмотки
Сверхвысокочастотный	> 1 МГц (для трансформаторов более 72,5 кВ) > 2 МГц (для трансформаторов менее 72,5 кВ)	Проверочная установка и измерительные кабели, включая заземление

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ОТКЛИКОВ В СТАНДАРТЕ C57.149

Таблица 3

Тип трансформатора	Количество рекомендуемого минимума испытаний	Всего испытаний, приведенных в стандарте
Двухобмоточный трансформатор	9	15
Автотрансформатор без третичной обмотки	9	12
Автотрансформатор с третичной обмоткой	18	33
Автотрансформатор с третичной обмоткой, не имеющей выводов	9	18
Трехобмоточный трансформатор	18	36

подключения и требования к проверочному оборудованию.

Выделены три основных метода получения нормограмм:

- 1) предыдущая регистрация отклика того же трансформатора;
- 2) регистрация отклика идентичного трансформатора;
- 3) регистрация отклика других фаз проверяемого трансформатора.

В брошюре также приводится методология интерпретации с использованием коэффициента корреляции, который может быть использован в том числе и для автоматической оценки результатов проверки. Однако следует отметить, что проблема определения пределов значений для «нормального» и «ненормального состояния» в данной брошюре не решена. Кроме этого, в брошюре приводится метод оценки

путем сравнения реальных измерений с измерениями, полученными на модели, учитывающей геометрические параметры трансформатора. Несмотря на то что результаты в модели могут отличаться от реальных, данный метод может использоваться как дополнение. В публикации также приведен метод параметризации кривой частотного отклика путем вычисления передаточной функции, но из-за наличия в характеристиках отклика резонансов и перегибов это сделать крайне сложно.

Стандарт МЭК 60076–18

Стандарт был опубликован в 2012 году Международной электротехнической комиссией (МЭК). По своему содержанию стандарт близок к брошюре СИГРЭ А2.26. В стандарте приводится соответствие между частотным диапазоном, в котором имеются отклонения, и влияющими на это факторами (табл. 2).

Следует отметить, что данные, приведенные в таблице, носят лишь информационный характер, поскольку параметры трансформаторов сильно отличаются в зависимости от их конструкции.

Стандарт IEEE C57.149

Стандарт был опубликован в марте 2013 года. Несмотря на то что документ опубликован как стандарт, по своему строению и названию он представляет собой руководящий документ: «Руководство по применению и интерпретации частотного отклика силовых трансформаторов с масляной изоляцией» [4]. В данном стандарте особое внимание уделено вопросам подключения. В документе описаны 6 различных типов трансформаторов и приведены рекомендуемые схемы для измерения откликов. Количество замеров и типы трансформаторов приведены в таблице 3.

Как видно из таблицы, для некоторых типов трансформаторов может быть применено до 36 разных схем для проверки.

Методы статистического анализа для сравнения откликов

При проведении анализа и интерпретации отклика силового трансформатора применяются статистические показатели для оценки различий между двумя откликами. Это позволяет получить численный результат вместо визуального сравнения двух графиков.

Наибольшее распространение получил коэффициент корреляции (КК) [в некоторых публикациях применяется термин «коэффициент кросс-корреляции»]. КК позволяет сравнивать два набора данных, и при полном совпадении двух характеристик КК равно 1. Значение КК уменьшается с увеличением различий между двумя характеристиками. КК рассчитывается по формуле:

ГРАНИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Таблица 4

	КК	ASLE
Граница допуска	Менее 0,997	Более 0,125

$$KK = \frac{\sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

где x_i и y_i – i значения наборов данных x и y (в дБ), а \bar{x} и \bar{y} – средние значения;

x и y – наборы данных откликов для первого и второго измерения соответственно.

Недостатком КК является то, что данный коэффициент имеет низкую чувствительность при сравнении характеристик, имеющих схожую форму, но отличающихся значением уровня. Данный недостаток предлагается исключить с помощью применения другого показателя, а именно – модуля суммы логарифмической ошибки (ASLE), который рассчитывается по формуле:

$$ASLE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|}{N} \quad (12)$$

Идеальное совпадение характеристик соответствует нулевому значению коэффициента, и значение увеличивается с увеличением различий между характеристиками откликов. У данного показателя нет ограничений, поэтому значение может быть больше 1.

В [5] на основе исследования большого количества откликов трансформаторов был проведен анализ 15 показателей с точки зрения применения к анализу частотных откликов. Были определены критерии для каждого из показателей при сравнении нормограмм и дефектограмм одной и той же обмотки, по которым можно сделать вывод о необходимости более тщательного изучения состояния обмоток. Граничные значения для данных показателей приведены в таблице 4.

Диапазоны и поддиапазоны

Поскольку изменения в различных элементах силового трансформатора влияют на изменение характеристики отклика на разных частотах, принято рассчитывать показатели, приведенные выше, в разных частотных диапазонах. В таблице 5 приведены данные из публикаций, в которых приводится информация по соответствию изменений характеристики отклика в определенном частотном диапазоне деформации элемента силового трансформатора.

Из таблицы можно видеть, что разные публикации указывают на различные границы для разных деформаций. Диапазоны частот зависят от конструкции силовых трансформаторов.

Рекомендуемое количество точек отклика

При расчете статистических показателей отличий откликов друг от друга достаточно важным является количество точек или дискретность, с которой снимались отклики, поскольку недостаточная дискретизация может негативно сказаться на значении показателя. Для демонстрации данного явления можно взять две характеристики друг от друга, и сравнить значения показателей КК, ASLE для разного значения дискретизации. В настоящем примере частота дискретизации изменялась от 10 до 1000 точек в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц (рис. 7).

Как видно, показатель КК не зависит от количества точек, в то время как показатель ASLE имеет наблюдаемую зависимость, и чем больше

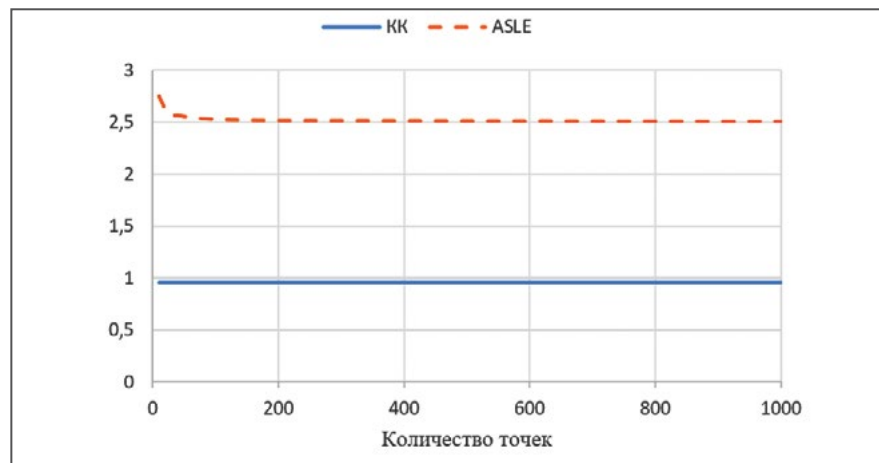
СООТВЕТСТВИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ИЗМЕНЕНИЯМ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

Таблица 5

Элемент силового трансформатора	Состояние	Частотный диапазон
Обмотка	Деформация в основной обмотке	20 кГц – 400 кГц [6]
	Смещение основной обмотки	400 кГц – 1 МГц [6]
	Перемещение между обмоткой и прессующей конструкцией	2 кГц – 20 кГц [6]
	Осевая деформация	> 400 кГц [7]
		> 500 кГц [8]
	Изменение дискового пространства	> 100 кГц [10]
	Радиальная деформация и смещения	> 50 кГц [9]
> 100 кГц [10]		
КЗ-витки	5 кГц – 500 кГц [7]	
	> 200 кГц [11]	
	< 2 кГц [6]	
Магнитопровод	Деформация магнитопровода	< 10 кГц [7]
		< 2 кГц [6]
Измерительные провода	Изменение заземления в измерительных проводах	> 2 МГц [6]
Другое	Плохое заземление на месте проверки	> 500 кГц [12]
	Изменение в сопротивлении заземления	400 кГц – 1 МГц [6]
	Остаточная намагниченность	< 2 кГц [6]
	Выводы	> 1 МГц [13, 14]

ЗАВИСИМОСТЬ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОТ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ОТКЛИКА

Рис. 7



частота дискретизации, тем точнее получаются расчеты. Однако данный фактор проявляется лишь при малом количестве точек, и погрешность практически исчезает при увеличе-

нии точек до 200 и более. В современных проверочных устройствах количество точек в диапазоне от 200 кГц до 2 МГц составляет не менее 1000.

Математическое моделирование электромагнитных и электродинамических процессов в трансформаторе

Моделировались магнитные процессы при определении механических нагрузок в режиме КЗ трехфазного масляного трансформатора ТМ-1600/35.

Были выделены две задачи:

- 1) уточнение величины ударного тока и вызванных им механических нагрузок, изменяющихся во времени;
- 2) уточнение механического воздействия на каждую катушку обмотки в отдельности.

Система уравнений Максвелла, описывающих электромагнитное поле и его связь с электрическими зарядами и токами в вакууме и сплошных средах, представлена ниже:

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla \times H &= J + \partial D / \partial t \\ \nabla \times E &= -\partial B / \partial t \end{aligned} \right\} \text{ электромагнитная связь}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \cdot D &= \rho \end{aligned} \right\} \text{ уравнения неразрывности поля [13]}$$

$$\left\{ \begin{aligned} B &= \mu H + Br \\ D &= \epsilon E \end{aligned} \right\} \text{ уравнения, описывающие свойства материалов}$$

$$J = \sigma E \text{ } \left. \vphantom{J = \sigma E} \right\} \text{ закон Ома.}$$

Математическая модель электромагнитного поля в потенциальной постановке:

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla^2 \varphi + \partial / \partial t (\nabla \cdot A) &= -\rho / \epsilon_0 \\ [\nabla^2 A - \epsilon_0 \mu_0 (\partial^2 A / \partial t^2)] - \\ -\nabla (\nabla \cdot A + \epsilon_0 \mu_0 (\partial \varphi / \partial t)) &= \mu_0 J. \end{aligned} \right. \quad [14]$$

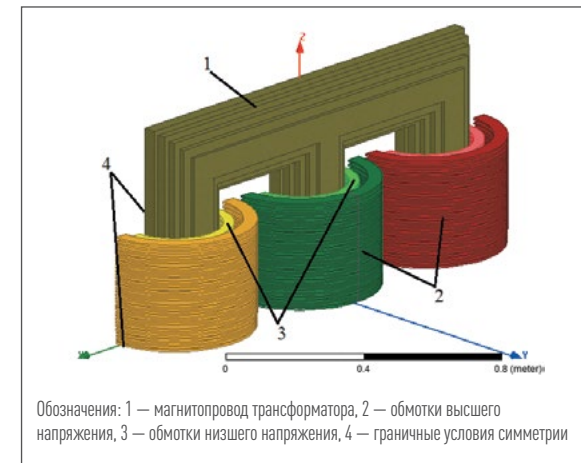
Суммарная механическая сила, действующая на элементарный объем dV :

$$F = \int (B \cdot n) H - 0,5(B \cdot H) ndV. \quad [15]$$

Математическая модель стационарного магнитного поля относительно векторного магнитного потенциала:

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ДОПУЩЕНИЯМИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КЗ-ТРАНСФОРМАТОРА

Рис. 8



$$\left\{ \begin{aligned} \text{rot}((1/\mu)\text{rot}A) &= J + \text{rot}((1/\mu)B), \\ \text{div}A &= 0, \\ \mu &= f[H(x, y, z)]. \end{aligned} \right. \quad [16]$$

Численное моделирование КЗ-трансформатора

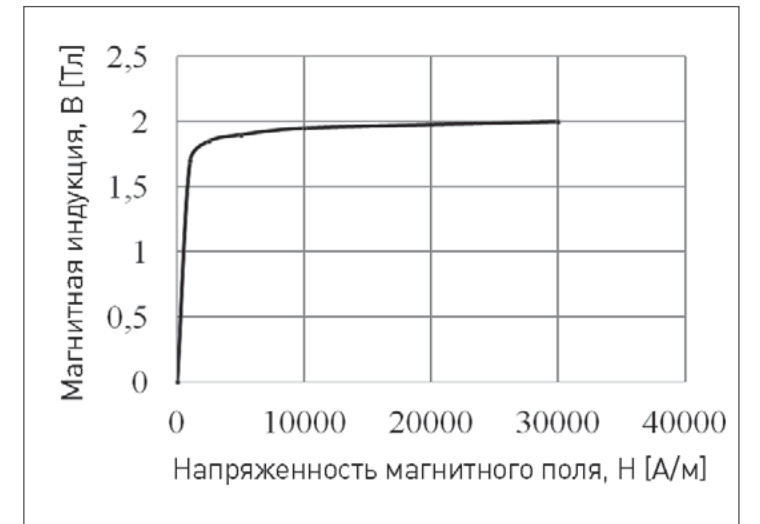
Допущения:

1. Трехмерная геометрическая модель;
2. Шихтованный сердечник, магнитная проницаемость материала сердечника изотропна и нелинейна;
3. Питание трансформатора осуществляется от источника напряжения бесконечной мощности;
4. Обмотка представляет собой монолитное тело;
5. Источником поля является амплитудное значение тока КЗ (стационарная постановка).

Пространственная модель силового трансформатора с допущениями для численного моделирования КЗ-трансформатора представлена на рис. 8.

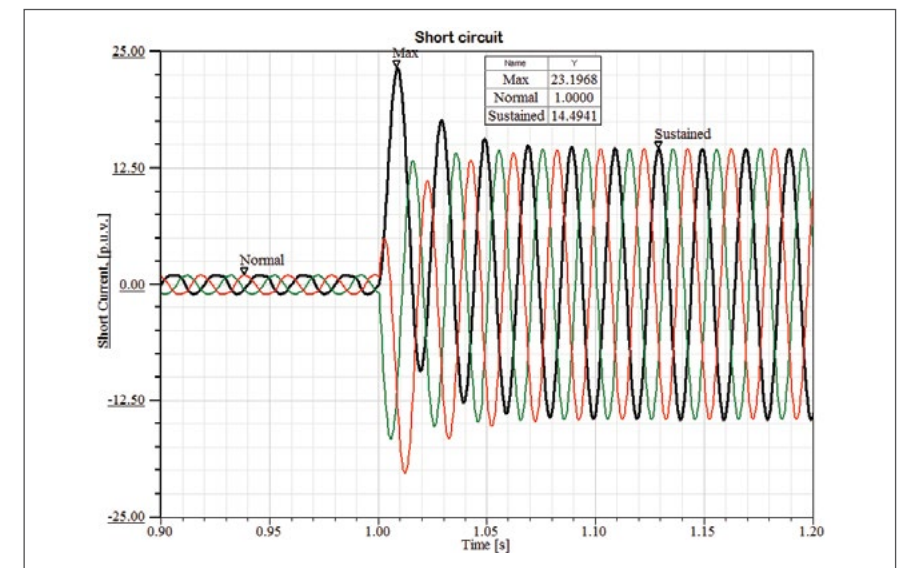
КРИВАЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛА СЕРДЕЧНИКА

Рис. 9



ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПО ТОКУ (О.Е., ФАЗА А) В РЕЖИМЕ АВАРИЙНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Рис. 10



Кривая намагничивания материала сердечника для моделирования — на рис. 9.

Результаты моделирования электромагнитных и электродинамических процессов

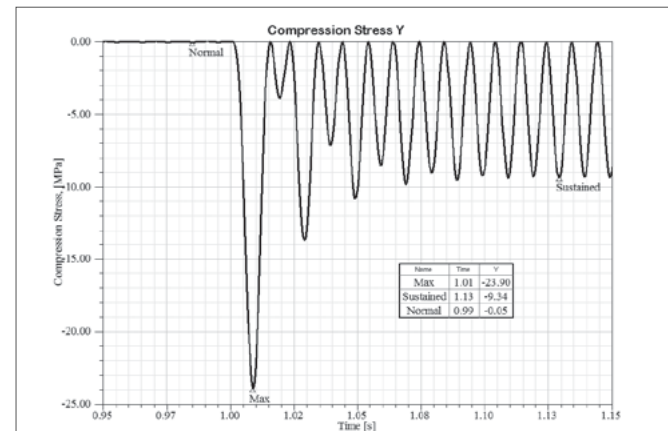
— Величина установившегося действующего значения тока корот-

кого замыкания оказалась выше на 2,5%, а величина максимального броска тока — на 3,2%, по сравнению с традиционной аналитической методикой (рис. 10).

— Среднее сжимающее радиальное напряжение оказалось на 45,5% выше рассчитанного по традиционной аналитической методике

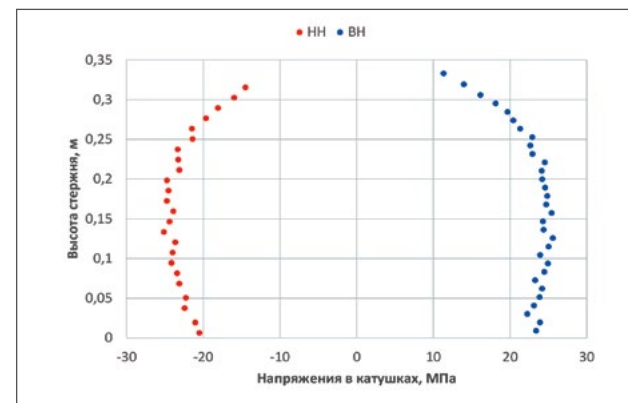
СЖИМАЮЩЕЕ РАДИАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ОБМОТКИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Рис. 11



МЕХАНИЧЕСКИЕ РАДИАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА КАТУШКИ И ВИТКИ ОБМОТОК

Рис. 12



РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗЫ А

Таблица 6

	Фаза А, схема а-б	Фаза А, схема а-с	Фаза А, схема б-с
KK	0,881	0,937	0,849
ASLE	0,078	0,077	0,062
CSD	0,014	0,013	0,011

и составило 39,8% от допустимого напряжения (рис. 11).

Механические радиальные напряжения, действующие на катушки и витки обмоток

1. На обмотку НН оказывается сжимающее механическое усилие, а на обмотку ВН — равное по величине растягивающее;
2. Минимальные радиальные усилия испытывают на себе витки и катушки на краях обмотки;
3. Максимальное напряжение приходится на витки, расположенные между серединой и краем обмотки (рис. 12).

Пример исследования частотной характеристики силового трансформатора

4.1. Исследование частотных характеристик силового трансформатора ТДЦ-400000/220

Исследование частотных характеристик трансформатора ТДЦ-400000/220 в ходе электродинамических испытаний на стойкость при КЗ, осциллограммы низковольтных импульсов (НВИ) и частотные характеристики фазы А, зарегистрированные между опытами КЗ, представлены на рис. 13, рис. 14.

Изменения частотной характеристики произошли в уровне амплитуды резонансов:

- Уменьшение на (20–30)% на частоте 100 кГц;
- Уменьшение на (15–30)% на частоте 200 кГц;
- Уменьшение на 30% на частоте 550 кГц;
- Изменения не более чем на 10% на других резонансных частотах.

Это объясняется усадкой обмотки и выборкой технологических зазоров.

Характер изменения частотной характеристики дефектограмм и нормограмм совпадает, частоты резонанса не сдвигаются друг относительно друга (не более ± 20 кГц).

В ходе разборки трансформатора на заводе-изготовителе в присутствии комиссии было установлено, что во внешнем слое обмотки НН фазы А произошло смещение реек (скручивание витков) максимально на 30 мм на верхнем торце и максимально 15 мм на нижнем торце без потери радиальной и осевой устойчивости.

В ходе опытов короткого замыкания эти деформации подтверждались измерением сопротивления короткого замыкания (Z_k), суммарное отклонение которого от базового после 5 зачетных опытов составило на фазе А $\Delta Z_k = + 1\%$.

Показатели сравнения нормограмм и дефектограмм фазы А трансформатора ТДЦ-400000/220 приведены в таблице 6.

В результате второго зачетного опыта КЗ для обмотки НН фазы С трансформатора типа ТДЦ-400000/220 произошло повреждение обмотки. Аналогичные КЗ происходят во время эксплуатации силовых трансформаторов. Осциллограммы НВИ для второго

зачетного опыта фазы С приведены на рисунке 15. Деформации обмотки фазы С после опытов КЗ приведены на рисунке 16. На фотографиях можно наблюдать начало потери радиальной устойчивости трансформатора.

Характер изменения частотной характеристики дефектограмм и нормограмм отличается.

Частоты резонанса сдвинуты друг относительно друга в некоторых случаях до 80 кГц.

Значительно изменилась амплитуда на частотах резонанса (рис. 17):

- увеличение на 60% на частоте 200 кГц;
- уменьшение на 50% на частотах 300 кГц и 350 кГц.

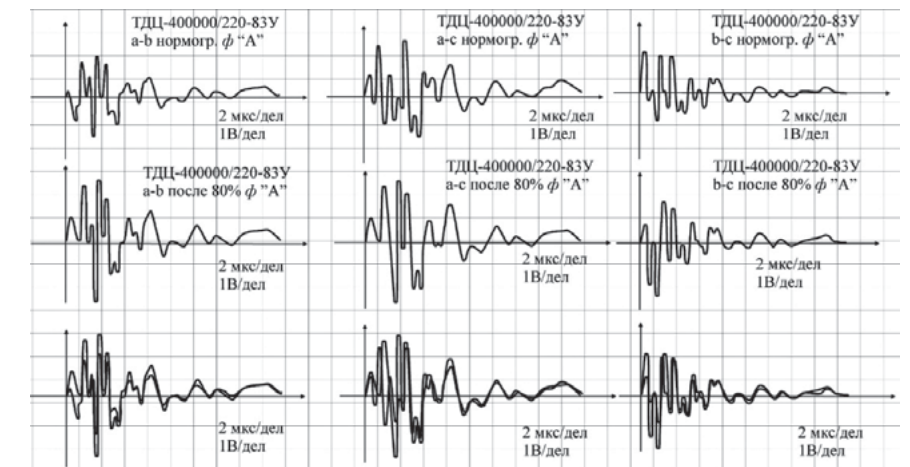
В ходе опытов короткого замыкания эти деформации подтверждались измерением сопротивления короткого замыкания (Z_k), суммарное отклонение которого от базового после 5 зачетных опытов составило на фазе С $\Delta Z_k = + 1,6\%$.

Результаты разборки показали, что на фазе С произошло смещение столбов прокладок на наружном слое равномерно от середины по ходу винта: в верхней части — от 0 до 60 мм, в нижней части — от 0 до 10 мм.

В нескольких местах катушки имеют выпуклость в прилегающий канал НН–ВН от 20 до 30 мм и от 5 до 10 мм внутрь с повреждением бумажной изоляции.

ОСЦИЛЛОГРАММЫ НВИ ФАЗЫ А СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТДЦ-400000/220

Рис. 13



Общая ширина деформируемых витков — 140 мм. В полях 18, 19, 20, 21 и 22 имеется осевая деформация витков от середины обмотки кверху до 15 мм.

В таблице 7 приведены результаты расчета показателей FRA и отклонения коэффициентов фазы С.

Выводы:

1. Приведенные математические модели деформации обмотки силового трансформатора в виде уравнения обладают большей точностью, по сравнению с ранее представленными моделями.

2. Благодаря применению тригонометрических функций при описании формы и объема деформации и меньшей

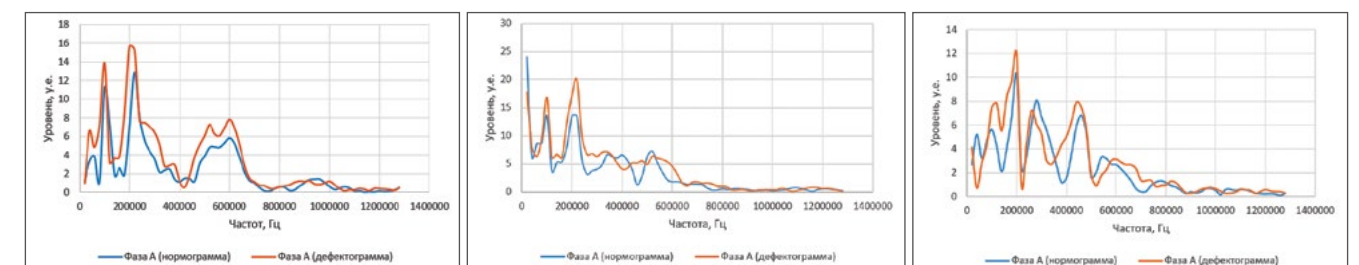
погрешности данная модель более реалистично отражает процессы, идущие в обмотках силовых трансформаторов при протекании в них токов короткого замыкания.

3. Представленные модели позволяют в будущем получать более точные характеристики обмоток, значения сил, действующих на обмотку, дадут понимание, где именно произошло повреждение, и позволят проводить более качественную диагностику силового трансформатора для обеспечения его бесперебойной работы.

4. Рассмотрена нормативная документация по применению метода частотного анализа: стандарт DL 911/2004, техническая брошюра рабочей группы СИГРЭ А2.26,

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФАЗЫ А ПО СХЕМЕ А-В, А-С, В-С

Рис. 14



стандарт МЭК 60076–18, стандарт IEEE C57.149, методы статистического анализа для сравнения от-

кликов, соответствие повреждений силового трансформатора изменению в частотном диапазоне.

5. На примере трехфазного масляного трансформатора ТМ-1600/35 проведено математическое моделирование электромагнитных и электродинамических процессов в трансформаторе. Моделировались магнитные процессы при определении механических нагрузок в режиме КЗ. Были выделены две задачи: уточнение величины ударного тока и вызванных им механических нагрузок, изменяющихся во времени; уточнение механического воздействия на каждую катушку обмотки в отдельности.

6. В проведении численного моделирования КЗ трансформатора были приняты следующие допущения: трехмерная геометрическая модель, шихтованный сердечник, магнитная проницаемость материала сердечника изотропна и нелинейна; питание трансформатора осуществляется от источника напряжения бесконечной мощности; обмотка представляет собой монолитное тело; источником поля является амплитудное значение тока КЗ (стационарная постановка).

7. Результаты моделирования электромагнитных и электродинамических процессов показали: величина установившегося действующего значения тока короткого замыкания оказалась выше на 2,5%, а величина максимального броска тока — на 3,2%, по сравнению с традиционной аналитической методикой; среднее сжимающее радиальное напряжение оказалось на 45,5% выше рассчитанного по традиционной аналитической методике и составило 39,8% от допустимого напряжения.

ОСЦИЛЛОГРАММЫ НВИ ФАЗЫ С СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТДЦ-400000/220

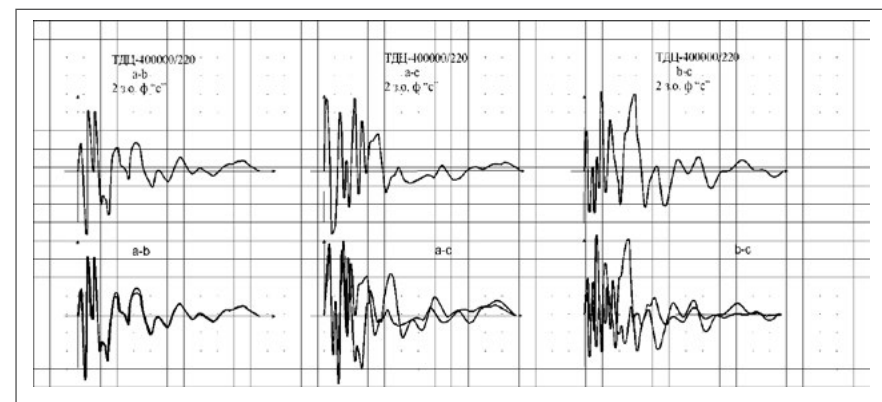


Рис. 15

ФАЗА С ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ (НАЧАЛО ПОТЕРИ РАДИАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ)



Рис. 16

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФАЗЫ С ПО СХЕМЕ А-В, А-С, В-С

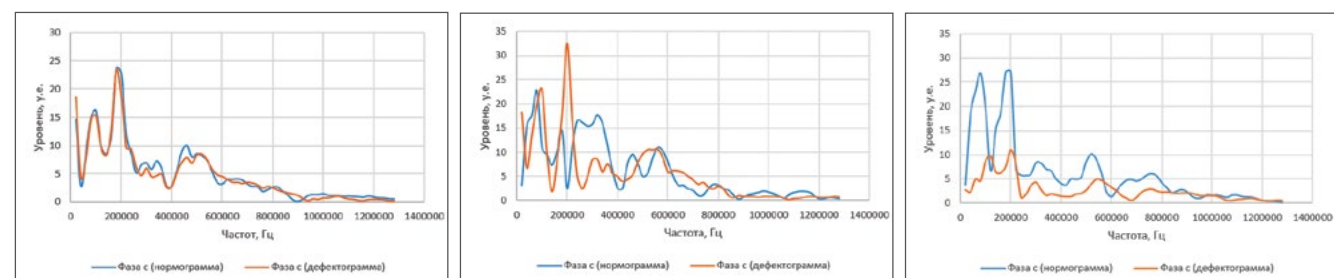


Рис. 17

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ FRA, ИСПЫТАНИЯ ФАЗЫ С

Таблица 7

	Фаза С, схема а-в	Фаза С, схема а-с	Фаза С, схема в-с
KK	0,982	0,541	0,731
ASLE	0,046	0,195	0,23
CSD	0,0075	0,044	0,041

8. Исследование частотных характеристик трансформатора ТДЦ-400000/220 в ходе электродинамических испытаний на стойкость при КЗ, осциллограммы низковольтных импульсов (НВИ) и частотные характеристики фазы А, зарегистрированные между опытами КЗ, показали, что повреждение обмотки НН фазы С в результате второго зачетного опыта КЗ привело к следующим выводам:

- характер изменения частотной характеристики дефектограмм и нормограмм отличается;
- частоты резонанса сдвинуты друг относительно друга в некоторых случаях до 80 кГц;
- значительно изменилась амплитуда на частотах резонанса:
- увеличение на 60% на частоте 200 кГц;
- уменьшение на 50% на частотах 300 кГц и 350 кГц.

9. В ходе опытов короткого замыкания эти деформации подтверждались измерением сопротивления короткого замыкания (Z_k), суммарное отклонение которого от базового после 5 зачетных опытов составило на фазе С $\Delta Z_k = +1,6\%$.

10. Результаты разборки показали, что на фазе С произошло смещение столбов прокладок на наружном слое равномерно от середины по ходу винта: в верхней части — от 0 до 60 мм, в нижней части — от 0 до 10 мм. В нескольких местах катушки имеют выпуклость в прилегающий канал НН-ВН от 20 до 30 мм и от 5 до 10 мм внутрь с повреждением бумажной изо-

ляции. Общая ширина деформируемых витков — 140 мм. В полях 18, 19, 20, 21 и 22 имеется осевая деформация витков от середины обмотки кверху до 15 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хренников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в процессе эксплуатации // Промышленная энергетика. 2006. № 12. С. 12–14.
2. Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Дементьев Ю.А., Антипов К.М., Сурба А.С., Шейка П.А., Неклепаев Б.Н., Шифрин Л.Н., Кассихин С.Д., Славинский А.З., Сипилкин К.Г. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей // Электрические станции. 2005. № 11. С. 69–75.
3. Васютинский С.Б. Расчет и проектирование трансформаторов. Л.: ЛПИ, 1976. 84 с.
4. Mariana Dalarsson. Online power transformer diagnostics using multiple modes of microwave radiation // Universitetservice US AB. Stockholm. 2013. 86 p.
5. Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов // Электричество. 2010. № 2. С. 27–31.
6. Лурье А.И. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. М.: Знак, 2005. 520 с.
7. Хренников А.Ю. Разработка математических моделей внешнего диагностического воздействия импульса на схему замещения обмоток высоковольтных электрических аппаратов // ЭЛЕКТРО. 2008. № 2. С. 7–11.
8. Bertagnoli G. The ABB Approach to Short-circuit Duty of Power Transformers // 3rd ed. Zürich, Switzerland: ABB Ltd., 1996.

9. Kulkarni S. V., Khaparde S. A. Transformer Engineering: Design and Practice // 1 ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
10. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А., Шкуропат И.А. Обеспечение надежной работы электрических сетей // New York: NOVA PUBLISHERS, 2019. 296 с.: ил. (на английском языке).
11. Хренников А.Ю. Высоковольтное оборудование в электротехнических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг: учеб. пособие / А.Ю. Хренников. М.: ИНФРА-М, 2019. 186 с.
12. Хренников А.Ю., Таджибаев А.И. Анализ деформаций конструктивных элементов трансформаторно-реакторного оборудования // Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Москва: НТФ «Энергопрогресс», 2016. Вып. 11 (215). 112 с.: ил.
13. Хренников А.Ю., Александров Н.М. Оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всеросс. науч.-тех. конф. Чебоксары, 2019. С. 378–382.
14. Хренников А.Ю., Александров Н.М. Автоматизация и ИТ в диагностике: Интерпретация результатов исследования методом частотного отклика (SFRA), модели деформации обмоток силовых трансформаторов // XII Международная научно-практическая конференция «Автоматизация и ИТ в энергетике». МФЭС-2023. Выставка «Электрические сети России». Москва, ВДНХ, 2023.
15. Хренников А.Ю., Любарский Ю.Я. Принципы построения систем искусственного интеллекта и их применение в электроэнергетике. Энергетик, 2022. № 3. С. 22–30.
16. Хренников А.Ю., Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Александров Н.М. Силовые трансформаторы в энергетических объектах: испытания, диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг: учеб. пособие. М.: Директ-Медиа, 2021. 335 с.: ил.
17. Хренников А.Ю., Ключкин Н.Г., Александров Н.М. Анализ аварийных событий в электрических сетях: учебно-методич. пособие. М.: Директ-Медиа, 2023. 149 с.

Для цитирования: Хренников А.Ю., Александров Н.М., Михайлов С.А., Автоматизация и ИТ в диагностике: Интерпретация результатов исследования методом частотного отклика (SFRA), модели деформации обмоток силовых трансформаторов. Часть 1 // Энергия единой сети. 2023. № 5–6. С.36–47.