

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ОБМОТКАХ ФАЗ ОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А.А. Грибанов

*В статье рассмотрено моделирование волновых затухающих процессов в обмотках силовых трансформаторов при диагностике по методу низковольтных импульсов. Приведён математический аппарат для аналитического определения значений диагностических параметров по известным параметрам конструкции. Показаны преимущества использования спектрального анализа кривой волнового затухающего процесса в обмотке при подаче тестового сигнала для повышения информативности и достоверности диагностики.*

*Ключевые слова: силовой трансформатор, обмотка, диагностика, волновой затухающий процесс, спектральный анализ.*

На протяжении последних лет наблюдается неуклонный рост количества силовых трансформаторов, срок эксплуатации которых приблизился к предельно допустимому по действующим нормам. Наиболее разумным выходом из сложившейся ситуации могла бы стать массовая замена изношенных трансформаторов на новые. Однако по экономическим причинам это мероприятие в короткие сроки выполнить затруднительно. С другой стороны надёжная работа трансформаторов должна быть обеспечена несмотря ни на что. В связи с этим актуальным является выполнение комплекса организационных и технических мероприятий для поддержания надёжности на уровне не ниже заданного. Среди этих мероприятий необходимо выделить диагностику, как информационную основу этого комплекса. Трансформаторы являются дорогостоящими элементами, поэтому своевременное обнаружение и устранение дефектов в отдельных их элементах оказывается значительно дешевле по сравнению с ремонтом в результате аварийного выхода из строя.

Для диагностики трансформаторов разработан ряд методов и технических средств, основными из которых являются методы физико-химической диагностики, тепловизионная техника, методы акустического контроля и некоторые методы электрического контроля. Каждый метод направлен на выявление определённых дефектов и до настоящего времени не разработан метод, который бы позволял выявлять повреждения и отклонения от нормы во всех узлах трансформатора [1–4].

Одним из перспективных методов, который позволит решить эту проблему, является тестирование обмоток трансформатора низковольтными прямоугольными импульсами [5]. Суть его состоит в том, что на один из выводов трансформатора подаётся прямоугольный импульс амплитудой 100–600 В, а с другого фазного или нулевого вывода снимается сигнал и анализируется определённым образом. При этом возможны следующие схемы подачи и снятия сигнала:

- сигнал подаётся на фазный вывод обмотки одного напряжения и снимается с фазного или нулевого вывода обмотки другого напряжения;
- сигнал подаётся на фазный вывод обмотки одного напряжения и снимается с фазного или нулевого вывода обмотки того же напряжения (рисунок 1).

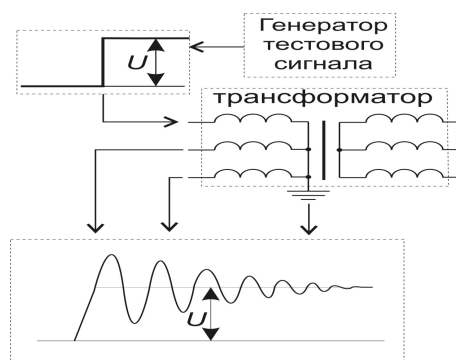


Рисунок 1 - Схема диагностирования обмоток трансформатора

До настоящего времени диагностика по данному методу проводилась на основе визуального сравнения эталонной и снятой в

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ОБМОТКАХ ФАЗ ОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

текущий момент времени осциллограмм. Такой способ оценки технического состояния отличается низкой объективностью. В связи с этим необходима разработка критериев, по которым можно было бы количественно судить об изменении технического состояния трансформатора.

В первую очередь для решения поставленной задачи необходимо осуществить моделирование процессов, протекающих в обмотках трансформатора при диагностировании. Для этого составим схему замещения трансформатора с учётом волновых процессов в обмотках. После некоторого упрощения она примет вид, представленный на рисунке 2.

Проведём расчёт переходного процесса для схемы замещения трансформатора при диагностировании обмоток одного напряжения.

Рассчитываем цепь до коммутации. Составляем систему дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа.

На основании первого и второго закона Кирхгофа составим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = i_5 + i_6; \\ i_4 \cdot R_{об} + L_{об} \cdot \frac{di_4}{dt} + i_5 \cdot R_K = U_{вых1}; \\ i_4 \cdot R_{об} + L_{об} \cdot \frac{di_4}{dt} - \frac{1}{C_K} \cdot \int i_6 dt = U_{вых1}; \\ i_4 \cdot R_{об} + L_{об} \cdot \frac{di_4}{dt} - \frac{1}{C_{прод}} \cdot \int i_1 dt = 0; \\ \frac{1}{C_K} \cdot \int i_6 dt - i_5 \cdot R_K = 0; \\ i_4 \cdot R_{об} + L_{об} \cdot \frac{di_4}{dt} + L_{\mu} \cdot \frac{di_3}{dt} + i_4 \cdot R_{об} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Опускаем промежуточные математические выкладки и приводим характеристическое уравнение в окончательном виде.

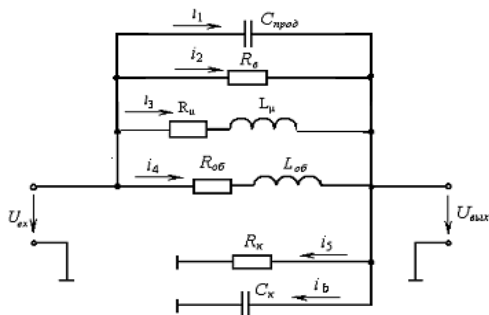


Рисунок 2 - Схема замещения для расчёта переходного процесса трансформатора

при диагностировании обмоток одного напряжения

$$\begin{aligned} & p^3 L_{об} R_{\epsilon} R_K L_{\mu} C_{прод} + p^2 \cdot (L_{об} \cdot R_{\epsilon} \cdot L_{\mu} + \\ & + L_{об} \cdot R_K \cdot L_{\mu} + R_{об} \cdot R_K \cdot R_{\epsilon} \cdot C_{прод} \cdot L_{\mu} + \\ & + R_{\mu} \cdot L_{об} \cdot R_K \cdot R_{\epsilon} \cdot C_{прод}) + \\ & + p \cdot (R_{\mu} \cdot R_{об} \cdot R_K \cdot R_{\epsilon} \cdot C_{прод} + L_{\mu} \cdot L_{об} \cdot R_{\epsilon} + \\ & + L_{об} \cdot R_{\epsilon} \cdot R_{\mu} + L_{\mu} \cdot R_{об} \cdot R_K + R_{\mu} \cdot L_{об} \cdot R_K + \\ & + R_K \cdot R_{\epsilon} \cdot L_{\mu} + L_{об} \cdot R_K \cdot R_{\epsilon}) + R_{\mu} \cdot R_{об} \cdot R_{\epsilon} + \\ & + R_{\mu} \cdot R_{об} \cdot R_K + R_{\mu} \cdot R_K \cdot R_{\epsilon} + \\ & + R_K \cdot R_{об} \cdot R_{\epsilon} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Трем комплексным корням  $p_1, p_2, p_3$  характеристического уравнения соответствуют три различных коэффициента  $A_1, A_2, A_3$ .

Выходной сигнал имеет следующий вид

$$U_2 = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t}. \quad (3)$$

Ряды экспонент – это ряды Дирихле [6]

$$f(z) = \sum_1^{\infty} a_k \cdot e^{\lambda_k z} \quad 0 < |\lambda_k| \uparrow \infty. \quad (4)$$

Поскольку корни характеристического уравнения комплексные, то будем рассматривать ряды Дирихле с комплексными показателями, которые удовлетворяют условию [6]

$$0 < |\lambda_1| \leq |\lambda_2| \leq \dots \leq |\lambda_k| \leq \dots, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \lambda_k = \infty. \quad (5)$$

Найдем постоянные интегрирования, для чего продифференцируем уравнение (3)

$$\begin{aligned} U_2' &= dU_2/dt = p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t} + p_3 A_3 e^{p_3 t}, \\ U_2'' &= d^2 U_2/dt^2 = p_1^2 A_1 e^{p_1 t} + p_2^2 A_2 e^{p_2 t} + p_3^2 A_3 e^{p_3 t}. \end{aligned}$$

При начальных нулевых условиях ( $t=0, U_0=300 В$ ) получаем систему уравнений

$$\begin{cases} A_1 + A_2 + A_3 + 300 = 0; \\ p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3 + 300 = 0; \\ p_1^2 A_1 + p_2^2 A_2 + p_3^2 A_3 + 300 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Решим данную систему уравнений методом Крамера.

$$A_1 = \frac{300(p_2^2(p_3 - 1) + p_3^2(1 - p_2) + (p_2 - p_3))}{p_1^2(p_3 - p_2) + p_2^2(p_1 - p_3) + p_3^2(p_2 - p_1)},$$

$$A_2 = \frac{300(p_3^2(p_1 - 1) + p_1^2(1 - p_3) + (p_3 - p_1))}{p_1^2(p_3 - p_2) + p_2^2(p_1 - p_3) + p_3^2(p_2 - p_1)},$$

$$A_3 = \frac{300(p_1^2(p_2 - 1) + p_2^2(1 - p_1) + (p_1 - p_2))}{p_1^2(p_3 - p_2) + p_2^2(p_1 - p_3) + p_3^2(p_2 - p_1)}.$$

График переходного процесса определяется следующим уравнением

$$U_{вых}(t) = U_{вх}(A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t}) + U_{вх}, \quad (7)$$

где  $U_{вх} = 300 В$  – входное напряжение.

Окончательно уравнение переходного процесса имеет вид

$$U_{\text{вых}}(t) = (300 \cdot U_{\text{вх}} \cdot W) : (p_1^2(p_3 - p_2) + p_1^2(p_3 - p_2) + p_2^2(p_1 - p_3) + p_3^2(p_2 - p_1)) \quad (8)$$

$$W = e^{p_1 \cdot t} (p_2^2(p_3 - 1) + p_3^2(1 - p_2) + p_2 - p_3) + e^{p_2 \cdot t} (p_1^2(1 - p_3) + p_3^2(p_1 - 1) + p_3 - p_1) + e^{p_3 \cdot t} (p_1^2(p_2 - 1) + p_2^2(1 - p_1) + p_1 - p_2) + U_{\text{вх}}. \quad (9)$$

Диагностическими параметрами при использовании рассматриваемого метода могут быть: пиковые максимальные или минимальные значения амплитуд, значение периода колебаний, длительность процесса до установившегося значения амплитуды, декремент затухания.

Для обеспечения сравнимости при диагностике необходимо знать значения диагностических параметров для условно идеального состояния изоляции обмоток трансформатора. Наличие этих значений позволит путём сравнения с текущими устанавливать степень старения изоляции.

Для того, чтобы иметь возможность рассчитывать диагностические параметры для условно идеального состояния изоляции обмоток трансформатора необходимо иметь данные о параметрах схемы замещения. Как правило, в паспорте указаны не все эти данные всвязи с чем актуальной является задача математического моделирования с целью получения расчётных выражений.

Активное сопротивление обмотки в общем случае может быть рассчитано по следующему выражению:

$$R_{\text{обм}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{ср}} \cdot n_{\text{е}}}{S_{\text{эл}}}, \quad (10)$$

где  $\rho$  – удельное объёмное сопротивление проводника, Ом·м;

$l_{\text{ср}}$  – длина витка, м;

$n_{\text{е}}$  – количество витков в обмотке, шт;

$S_{\text{эл}}$  – сечение эффективного проводника, м<sup>2</sup>;

Для расчёта индуктивного сопротивления обмотки можно использовать следующее выражение [7]:

$$L_{\text{обм}} = 0,32 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 \frac{n^2}{6R + 9l + 10d} \quad (11)$$

где  $l$  – длина, м;

$n$  – количество витков в обмотке, шт;

$R$  – радиус обмотки, м

$d$  – толщина обмотки

Для расчёта параметров междувитковой изоляции используется модель междувитко-

вого пространства, которая представлена на рисунке 3. Здесь  $\delta_{\text{эм}}$  – толщина эмали проводника.

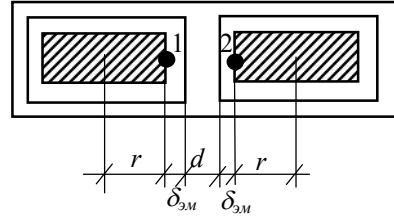


Рисунок 3 - Модель междувиткового изоляционного пространства

Для проведения расчётов с использованием этой модели был введён ряд допущений: проводники предполагаются бесконечно длинными и ёмкость определяется между их отрезками длиной  $l$ , что в нашем случае приравнивается к длине витка обмотки трансформатора.

Ёмкость между двумя уединёнными проводящими телами равна отношению заряда  $q$  одного из тел к разности их потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$ . Так как поле подразделено на трубки равного потока, то густота линий напряжённости поля всюду пропорциональна величине напряжённости поля. Напряжённость поля имеет максимум в точках 1 и 2. Около этих точек диэлектрик находится в наиболее напряжённом состоянии и, при повышении напряжения между проводами, нарушение электрической прочности диэлектрика начинается именно в этих точках.

Опуская математические выкладки, приведём окончательное выражение для определения разности потенциалов между точками:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau \cdot \ln \frac{d-r}{r}}{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_0}. \quad (12)$$

Следовательно, ёмкость равна:

$$C_{\text{е}} = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_0}{\tau \cdot \ln \frac{d-r}{r}}. \quad (13)$$

Так как  $q = \tau \cdot l$ , то ёмкость двух проводов определённой длины равна:

$$C_{\text{е}} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{у3}} \cdot l}{\ln \left[ \frac{(\delta_{\text{у3}} + 2 \cdot r) - r}{r} \right]} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{у3}} \cdot l}{\ln \left[ \frac{\delta_{\text{у3}} + r}{r} \right]}. \quad (14)$$

То есть ёмкость зависит только от конфигурации тел, их размеров, расстояния между телами и электрических свойств диэлектрика.

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ОБМОТКАХ ФАЗ ОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Расчет активного сопротивления междувитковой изоляции производится в два этапа.

На первом этапе производится расчёт удельного объемного сопротивления междувитковой изоляции.

На втором этапе производится расчёт активного сопротивления междувитковой изоляции.

Формула для расчёта активного сопротивления межвитковой изоляции имеет следующий вид:

$$R_{\epsilon} = \frac{\rho_{\text{виз}} \cdot \sum_{i=1}^g \delta_{\epsilon i}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l}, \quad (15)$$

где  $\delta_{\epsilon i}$  – толщина  $i$ -го слоя междувитковой изоляции, м;

$\rho_{\text{виз}}$  – усреднённое удельное электрическое сопротивление междувитковой изоляции, Ом·м;

$g$  – количество слоёв междувитковой изоляции;

Определить величину сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса можно путём рассмотрения многослойной диэлектрической конструкции. При рассмотрении характеристик изоляции обмотки относительно корпуса принимаются следующие допущения

– каждый изоляционный слой имеет однородную структуру без посторонних включений (посторонних включений из проводящих или полупроводящих материалов);

– эмаль проводов не имеет механических повреждений и располагается равномерным слоем по всей поверхности провода.

К рассмотрению примем упрощенную модель многослойной изоляции, где количество компонентов изоляционной конструкции нормируется. Таким образом, толщина корпусной изоляции определяется следующим образом:

$$\delta_{\text{куз}} = \sum \delta_{ki} \quad (16)$$

Находим объемные концентрации элементов изоляционной системы:

$$\theta_{ki} = \frac{\delta_{ki}}{\delta_{\text{куз}}}. \quad (17)$$

Затем определяем диэлектрическую проницаемость корпусной изоляции:

$$\epsilon_{\text{куз}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\theta_{ki}}{\epsilon_{ri}}}, \quad (18)$$

где  $\epsilon_{ri}$  – диэлектрическая проницаемость  $i$ -го слоя корпусной изоляции.

Так как корпусная изоляция состоит из многослойного диэлектрика, воспользуемся

логарифмическим законом смешения для последовательного включения компонентов.

$$R_{\kappa} = \frac{\rho_{\text{куз}} \cdot \sum_{i=1}^f \delta_{ki}}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot n \cdot l}, \quad (19)$$

где  $n$  – количество витков;

$l$  – длина обмотки;

$f$  – количество слоёв корпусной изоляции.

Для расчёта ёмкости относительно корпуса одной катушки обмотки можно приближённо подсчитать, принимая во внимание допущения, использованные при расчёте сопротивления изоляции относительно корпуса.

Ёмкость обмотки фазы относительно корпуса определена по формуле

$$C_{\kappa} = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{куз}} \cdot 2 \cdot l}{\ln r}. \quad (20)$$

Полученные математические модели позволили провести группу расчётных экспериментов для выявления характера влияния изменения значений параметров схемы замещения на вид переходного процесса. Анализ результатов исследований позволяет утверждать, что основное влияние на вид переходного процесса оказывают индуктивное сопротивление обмотки и параметры межвитковой изоляции и изоляции обмотки относительно корпуса. Поскольку индуктивное сопротивление обмотки в процессе эксплуатации не меняется, то изменение параметров изоляции и вызывает изменения параметров переходного процесса, а, следовательно, и диагностических параметров.

На рисунке 4 представлен расчётный график переходного процесса в обмотке трансформатора ТМ-4000/10. Для других трансформаторов график имеет аналогичный характер, но изменяются амплитуда и период колебаний. Кроме того, на рисунке 5 приведены зависимости комплексных корней от мощности силовых трансформаторов: а – вещественной части; б – мнимой части; в – фазовой части; г – модуля корня.

Знать значение диагностических параметров для условно идеального состояния изоляции трансформатора в ряде случаев оказывается недостаточно. Текущее значение диагностического параметра, которое сравнивается со значением для условно идеального состояния, зависит не только от параметров конструкции, но и от параметров, характеризующих техническое состояние трансформатора. При этом одно и то же значение диагностического параметра может характеризовать наличие различных дефектов и их сочетаний. Таким образом, по значению диагностического параметра можно су-

дить лишь о наличии или отсутствии дефектов, а также о степени старения изоляции в целом. Прогнозирование развития определённого дефекта или определение сроков выполнения профилактических мероприятий для устранения этого дефекта при использовании диагностических параметров затруднительно.

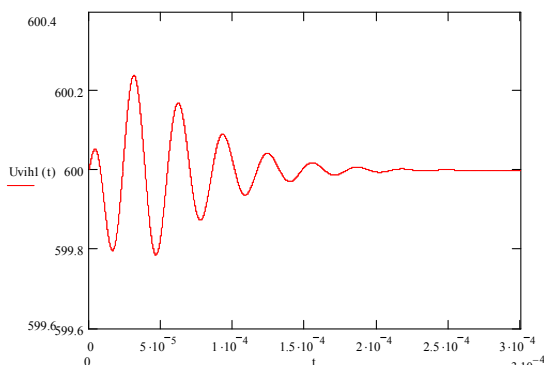


Рисунок 4 - График переходного процесса в обмотке трансформатора ТМ-4000/10

Для повышения достоверности диагностики силовых трансформаторов по методу низковольтных импульсов можно воспользоваться спектральным анализом получаемого выходного сигнала. Спектральный анализ – один из методов обработки сигналов, кото-

рый позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала. Преобразование Фурье является математической основой, которая связывает временной или пространственный сигнал (или же некоторую модель этого сигнала) с его представлением в частотной области [8].

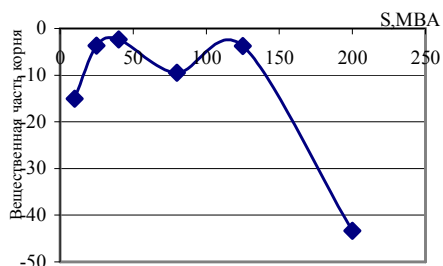
Спектральное описание периодических колебаний базируется на разложении периодических функций в ряды Фурье. В нашем случае периодичность функции будет подтверждаться тем, что на обмотку трансформатора действует периодически изменяющийся во времени сигнал прямоугольной формы. В местах фронта и спада сигнала будет наблюдаться одинаковый волновой затухающий процесс. Это подтверждается при исследовании формы сигнала с помощью осциллографирования.

Для разложения функции в ряд Фурье целесообразно использовать частный случай, описываемый выражением

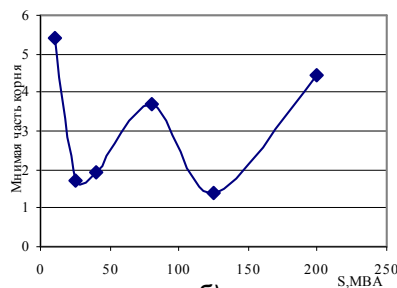
$$U(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\Omega t + \varphi_n), \quad (21)$$

где  $A_0$  – значение сигнала в момент  $t=0$ ;  $A_n$  и  $\varphi_n$  – амплитуды и начальные фазы гармоник, составляющих спектр;

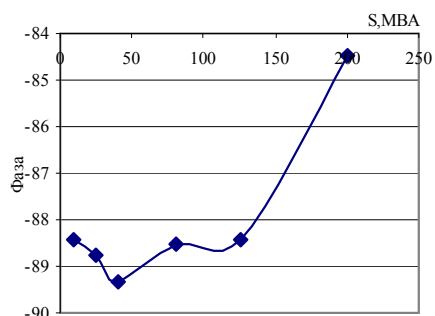
$\Omega$  – частота основной гармоники, Гц.



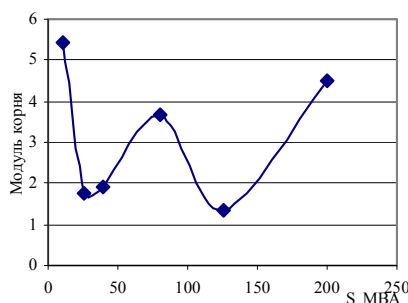
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 - Зависимость корней характеристического уравнения от номинала мощностей трансформаторов напряжением 110 кВ

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ОБМОТКАХ ФАЗ ОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Совокупность коэффициентов  $A_n$  будем называть амплитудным спектром, совокупность коэффициентов –  $\varphi_n$  фазовым спектром периодического колебания. Их распределение по частотной оси отображают на спектральных диаграммах (спектрограммах).

При использовании для обработки экспериментальной информации математических методов спектрального анализа требуется ввести альтернативные диагностические параметры. Как правило, в качестве диагностических параметров используются определённые частоты (или кратности гармоник по отношению к основной) и амплитуда сигнала на этих частотах сравнивается с известными значениями либо для идеального состояния узла, либо для критического состояния, при наступлении которого узел может выйти из строя. Для выявления определённого дефекта достаточно знать перечень частот или гармоник и значения амплитуд, характеризующих степень развития дефекта.

Для изучения спектров сигналов проведён комплекс экспериментальных исследований на действующих трансформаторах. Для сопоставимости результатов были выбраны трансформаторы одного класса напряжения (10 кВ) и одной мощности (160 кВА) производства ОАО «Алтайский трансформаторный завод». Диагностирующий сигнал генерировался специально разработанным устройством ГТС-1 и подавался на один из выводов 10 кВ расширенного трансформатора (схема соединения – звезда). С одного из других выводов снимался выходной сигнал и передавался на обработку в автоматизированный диагностический комплекс, сформированный на базе персонального компьютера, содержащего двухканальный цифровой осциллограф типа Bordo221 и специализированное программное обеспечение.

На первом этапе исследовался спектральный состав диагностирующего сигнала. Для этого выход ГТС-1 соединялся со входом осциллографа. После обработки сигнала была получена спектрограмма, приведённая на рисунке 6, а.

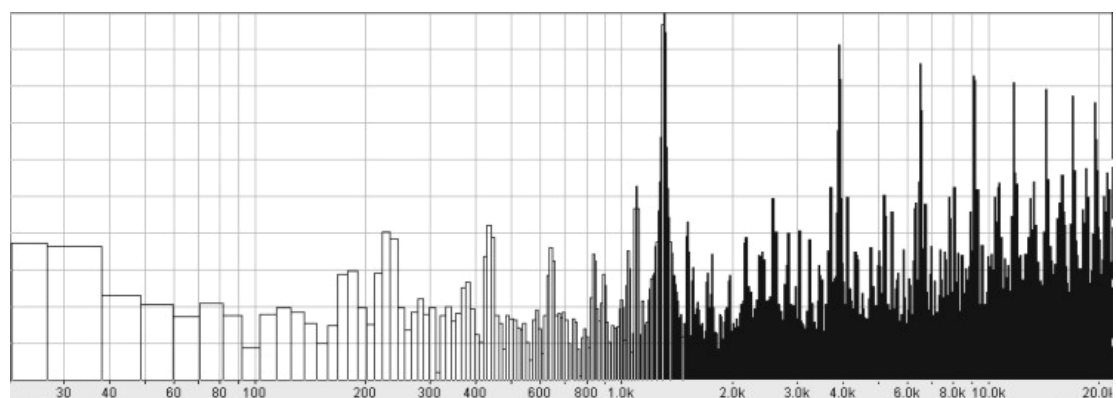
На втором этапе исследовался спектральный состав сигнала, полученного при диагностировании нового трансформатора с условно идеальным состоянием всех узлов. Полученная в результате обработки спектрограмма приведена на рисунке 6, б.

Сравнение сигналов, полученных с генератора тестовых сигналов и снятых с обмотки

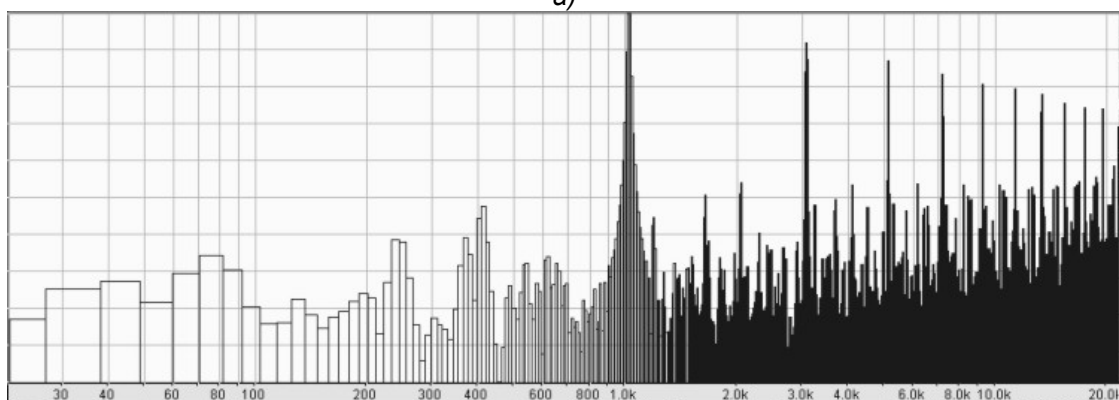
исправного трансформатора, показывает, что их спектральный состав изменяется, хотя в целом структура спектрограммы особенно в области высоких частот изменяется мало. Для обоих случаев характерен ярко выраженный пик в области основной задающей частоты сигнала (1 кГц). В области высоких частот наблюдаются ярко выраженные пики для частот, кратных основной частоте сигнала. При этом пики с частотой, кратной трём от основной частоты сигнала, имеют амплитуды, почти вдвое превышающие пики с частотами, кратными основной частоте в целое число раз. В дальнейшем с ростом частоты происходит постепенное выравнивание спектрограммы: амплитуды частот, не кратных трём от основной гармоники растут, а кратные трём – уменьшаются. Однако, амплитуды частот для сигнала, снятого с исправного трансформатора, в области высоких частот выше по сравнению с аналогичными частотами тестового сигнала. Это можно объяснить тем, что полученный с вывода трансформатора сигнал имеет форму прямоугольной формы главным образом в области фронта и спада, где частота колебаний в ходе переходного процесса может достигать  $10^6$  Гц.

Третьим этапом комплекса экспериментальных исследований стало получение спектрограмм для трансформаторов с деформацией обмоток. Спектрограмма для случая с ярко выраженным этим повреждением приведена на рисунке 6, в. Анализируя её можно заметить, что амплитуды сигнала существенно снизились, а для некоторых частот – почти до нуля. В среднем, амплитуды частот в диапазоне от 40 до 60 Гц возросли на 19%, а в диапазоне от 80 до 800 Гц снизились на 63%. Можно предположить, что механическое изменение структуры обмотки привело к изменению электрических параметров. Для более подробного объяснения необходимо при моделировании использовать схемы замещения не с сосредоточенными, как в нашем случае, а с распределёнными параметрами. Это представляет собой отдельную сложную научную задачу.

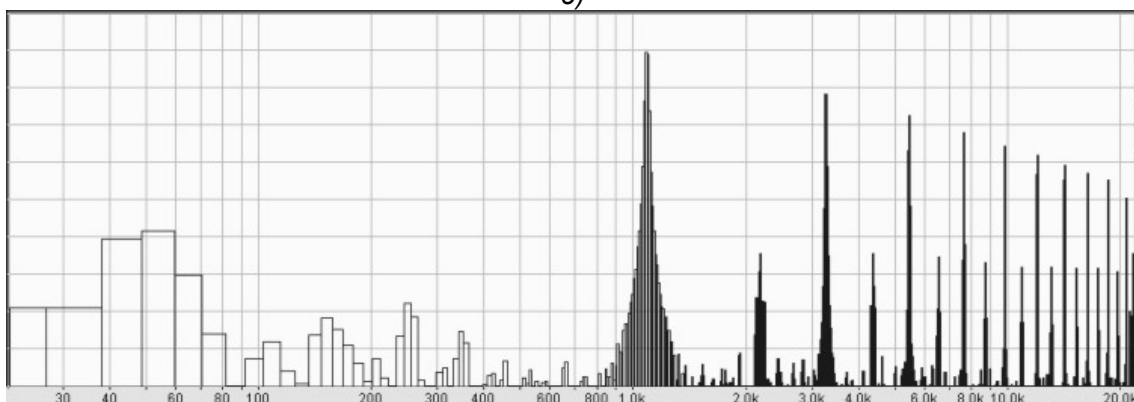
На четвёртом этапе выполнялось исследование спектрограмм при наличии виткового замыкания обмотки трансформатора. Наиболее характерная спектрограмма для данного вида повреждений приведена на рисунке 6, г.



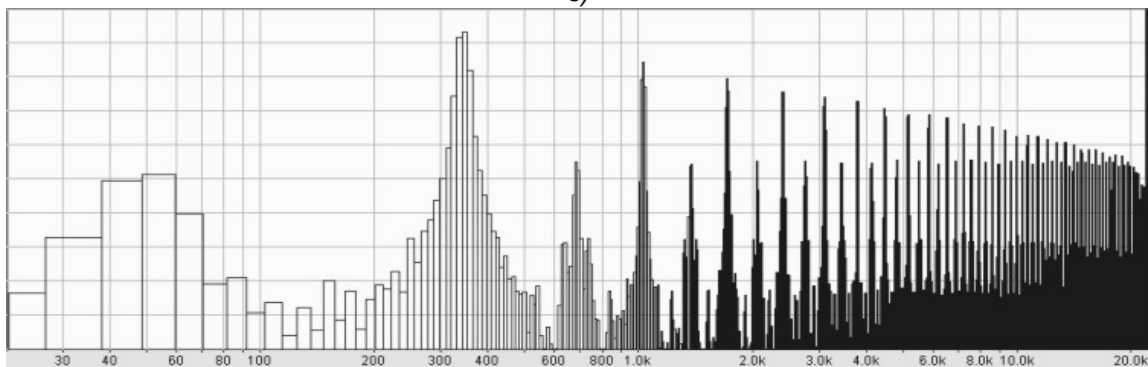
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6 - Спектрограммы исходного диагностического сигнала (а), исправного (нового) трансформатора (б), трансформатора с деформацией обмоток (в) и витковым замыканием (г)

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ОБМОТКАХ ФАЗ ОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В результате анализа этой спектрограммы можно заключить, что амплитуды на частотах от 40 до 60 Гц как и в предыдущем случае возрастают в среднем на 25%. Существенной отличительной особенностью спектрограммы данного вида повреждений обмотки является появление резкого пика (значения амплитуды в 8–9 раз больше, чем на спектрограмме исправного трансформатора) на частоте 330 Гц (1/3 от частоты тестового сигнала). Амплитуда этого пика превосходит по своему значению даже величину пика основной частоты тестового сигнала. В остальном спектрограмма повторяет картину спектрограммы для идеального состояния трансформатора с тем отличием, что амплитуды более высоких частот несколько уменьшились.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что идентифицировать развитие деформаций обмоток трансформатора можно по снижению амплитуд большого числа частот, а ухудшение свойств изоляции с возможным развитием виткового замыкания – по возрастанию амплитуды частоты 330 Гц. За счёт этого удастся повысить достоверность диагностики силовых трансформаторов и своевременно предусмотреть меры по устранению дефектов и недопущению дальнейшего их развития на ранних стадиях их обнаружения, что в свою очередь позволит повысить надёжность трансформаторов как ответственного элемента системы электроснабжения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Б. А. Контроль влажности изо-

ляции силовых трансформаторов. Использование поляризационных явлений [Текст] / Б. А. Алексеев // Электрические станции. – 2004. – № 2. – С. 57–63.

2. Аракелян, В. Г. Цели, понятия и общие принципы диагностического контроля высоковольтного электротехнического оборудования [Текст] / В. Г. Аракелян // Электротехника. – 2002. – № 5. – С. 23–27.

3. Долин, А. П. Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов [Текст] / А. П. Долин, В. К. Крайнов, В. В. Смекалов, В. Н. Шамко // Энергетик. – 2001. – № 7. – С. 30–34.

4. Долин, А. П. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов [Текст] / А. П. Долин // Электрические станции. – 2000. – № 6. – С. 46–52.

5. Грибанов, А. А. Диагностирование силовых трансформаторов на основе анализа параметров переходного процесса в обмотках фаз одного напряжения [Текст] / А. А. Грибанов // Вестник Томского государственного университета: Общественно-научный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. Социальные, информационные и энергетические проблемы региона. – №82. – Томск: Томский государственный университет, 2006. – С. 15 – 23.

6. Леонтьев, А. Ф. Ряды экспонент [Текст] / А. Ф. Леонтьев. – М.: Наука, 1976. – 536 с.: ил.

7. Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л. В. Лейтес; – М.: Энергия, 1981. – 392с.: ил.

8. Губарев, В. В. Алгоритмы спектрального анализа случайных сигналов: монография [Текст] / В. В. Губарев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 659 с.

**Грибанов А.А., к.т.н., доц., тел. 8-903-995-39-02**