

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ИХ ТЕСТИРОВАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Д. В. Кокорин, Н. А. Лебедев

В статье показана разработка математических моделей, описывающих процессы, протекающие в обмотках силовых трансформаторов при тестировании их импульсами напряжения. Приведены классификация и анализ существующих методов оценки технического состояния изоляции обмоток силовых трансформаторов. Показана разработанная математическая модель переходного процесса в обмотках силового трансформатора при их тестировании прямоугольным импульсом напряжения со схемой соединения обмоток «треугольник» и «звезда».

Ключевые слова: математическая модель, диагностирование, переходный процесс, силовой трансформатор, прогнозирование, метод низковольтных импульсов

Интенсивное использование разнообразных электротехнических устройств, в частности, высоковольтных установок, во многих сферах жизни и деятельности человека характеризуется рядом особенностей, а именно, повышенной ответственностью выполняемых функций и высокой ценой отказа. Эти обстоятельства вынуждают уделять повышенное внимание обеспечению таких качественных показателей функционирования электротехнических устройств, как надёжность, безопасность, отказоустойчивость [1].

Силовые трансформаторы являются важнейшей электротехнической установкой электропитающих систем, от надёжности и качества функционирования которых зависит надёжность и качество распределяемой электрической энергии [2].

В настоящее время в эксплуатации на энергетических предприятиях России находится значительное число силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ, имеющих срок наработки 25 лет и более [3].

Анализ литературных источников показал, что число силовых трансформаторов, выработавших свой нормативный срок службы в 25 лет, установленный ГОСТ 11677-85, в различных сферах промышленности изменяется в диапазоне 40-70 %. Сбором статистики по разным отраслям в своих научных работах занимались Н. Л. Макарова, В. В. Карчин, А. А. Балабин, А. Г. Туйгунова, П. П. Екименко, С. Е. Мостовой и др. В среднем за пределами нормативного срока службы находятся более 55 % силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ.

В связи с этим всё более актуальной становится задача продления срока службы и оценка возможности дальнейшей эксплуатации такого оборудования. Опыт эксплуатации силовых трансформаторов показывает, что и после отработки установленного срока службы значительная часть существующего парка сохраняет работоспособность и его замена нецелесообразна [4].

Учитывая значительное количество трансформаторных пунктов 6-10/0,4 кВ и ограниченность материальных ресурсов, обеспечение работоспособности может быть достигнуто за счёт качественного обслуживания с использованием современных средств диагностирования. Поэтому важной задачей является совершенствование и создание новой системы технического обслуживания электроустановок и электрооборудования, разработка новых технических средств диагностирования электроустановок, обеспечивающих своевременное обнаружение и устранение выявленных дефектов. Разработанные технические средства диагностирования должны выявлять дефекты на ранней стадии их появления, обладать большой чувствительностью к диагностическим признакам, быстроедействием, простотой конструкции, небольшой стоимостью и не требовать высокой квалификации обслуживающего данное средство персонала [5].

Одним из наиболее эффективных методов выявления дефектов в трансформаторном оборудовании является метод низковольтных импульсов, который позволяет определять не только наличие дефекта, но и

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ИХ ТЕСТИРОВАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ НАПРЯЖЕНИЯ

место его возникновения, а также выявлять дефекты, находящиеся на ранней стадии развития, следить за состоянием изоляции обмоток и объективно оценивать процесс эксплуатации силового трансформатора.

Диагностирование силовых трансформаторов делится на четыре принципа классификации систем диагностирования:

– по назначению:

а) текущее – определение состояния, правильности и возможности выполнения объектом его функций;

б) прогнозирующее – сбор данных для прогнозирования возможных изменений объекта;

– по способу проведения диагностирования:

а) функциональное (в рабочем режиме, без вывода трансформатора из эксплуатации);

б) тестовое;

– по режиму работы:

а) непрерывные – постоянный контроль выбранных параметров объекта в процессе его работы;

б) периодически действующие – контроль параметров осуществляется периодически через заданные промежутки времени;

в) разовые – используется, когда необходимо получить дополнительную информацию о контролируемом объекте;

– по степени автоматизации:

а) автоматические – алгоритмы сбора, преобразования и обработки информации функционируют без непосредственного участия человека;

б) автоматизированные – сбор и преобразование информации происходит автоматически, но анализ информации проводится оперативным персоналом [6].

Анализируя используемые для диагностирования силового электрооборудования методы можно сделать следующие выводы:

а) для диагностирования силовых трансформаторов используется большое количество различных методов. Любой из методов в отдельности не позволяет достоверно оценивать их состояние. Методы тестового (ремонтного) диагностирования, заложенные в нормативно-техническую документацию, работают в условиях, существенно отличающихся от режима эксплуатации. По литературным данным надёжность таких применяемых методов диагностирования изоляции силовых трансформаторов (измерение $U_{пр}$, $tg\delta$, сокращенный химический анализ масла) составляет около 3 % [7];

б) комплексное обследование силового электрооборудования в режиме его функционирования затруднено вследствие использования аналитических методов, большой номенклатуры диагностического оборудования, дороговизны и необходимости отключения нагрузки. Не имеется достоверного критерия для остановки силового электрооборудования на его профилактику и комплексное диагностирование;

в) традиционные методы диагностирования малоэффективны для изношенного электрооборудования. Их использование вызывает затруднения в определении видов повреждений и приводит к ошибочным выводам о причинах повреждения. Наблюдается несоответствие величины диагностического признака тяжести повреждения. Нормативно-техническая документация не рассчитана на такое силовое электрооборудование. В итоге, на этапе рабочего (оперативного) диагностирования нет надобности в малодостоверных, дорогостоящих методах;

г) в силу многообразия методов и средств определения состояния силового электрооборудования для определения их номенклатуры на этапе рабочего (оперативного) диагностирования необходимо разработать научную методику, учитывающую многофакторность поставленной задачи [8].

Современная тенденция развития методов контроля состояния силовых трансформаторов, и в частности механического состояния их обмоток, направлена на адаптацию методов контроля отключенного и расширенного трансформаторного электрооборудования для использования в нагрузочных режимах. В связи с этим особый интерес представляет рассмотрение методов контроля механического состояния обмоток отключенного силового трансформатора, особенностей и недостатков этих методов, затрудняющих их применение для контроля силовых трансформаторов под нагрузкой, а также предлагаемых путей их адаптации для использования в нагрузочных режимах. Согласно [9] различают:

– контроль сопротивления короткого замыкания Z_k (или индуктивности L_k);

– методы вибродиагностики;

– метод анализа частотных характеристик Frequency Response Analysis (FRA);

– метод низковольтных импульсов (НВИ).

Метод НВИ схож с методом FRA и состоит в подаче на одну из обмоток трансформатора прямоугольного импульса низкого

напряжения 100-500 В, регистрации и анализе кривой переходного импульсного тока, представляющей собой реакцию обмотки на этот импульс. Сравнительный анализ кривых импульсного переходного тока до и после электродинамических воздействий токов короткого замыкания позволяет достаточно эффективно выявлять возможные повреждения обмоток. Метод НВИ достаточно чувствителен к относительно малым изменениям геометрии обмоток, сопровождающимся изменениями межвитковых и межкатушечных ёмкостей и индуктивностей.

Наибольшее развитие этот метод получил во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ), где был разработан ряд испытательных установок типа «Импульс» с соответствующим программным обеспечением [10].

Анализ вида переходных функций позволяет выявить повреждения обмоток, сопровождающиеся изменением индуктивных, ёмкостных и резистивных связей между элементами конструкции трансформатора.

Для повышения достоверности диагностики предлагается полученный сигнал подвергать разложению в спектр, а также сравнению с эталонным спектром для данной марки трансформатора для условно-идеального технического состояния.

В ходе экспериментальных исследований подача и снятие тестового сигнала осуществлялись генератором-осциллографом АК ИП-4107, с программным обеспечением PicoScore 6, позволяющим раскладывать полученные сигналы в спектр и сравнивать их.

В процессе исследования были разработаны несколько схем замещения трансформатора и на основе наиболее правильного учёта всех параметров выбрана схема, более точно отображающая процессы, происходящие в обмотках силового трансформатора. После этого были обоснованы все элементы схемы замещения. Наличие как можно большего числа обоснованных элементов в схеме замещения приблизит математическую модель к описанию процессов в реальном трансформаторе и даст наиболее точный результат моделирования процесса. При изменении какого-либо параметра схемы замещения будет изменяться процесс, протекающий в обмотках и изоляции трансформатора. Характер этого процесса позволит объективно оценить работу оборудования и принять необходимые меры по его отключению, выводу в ремонт, устранению неполадок и предотвращению аварий.

При диагностировании трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда» на один вывод первичной обмотки подается тестовый сигнал прямоугольной формы, а с другого вывода фиксируется диагностический сигнал. Таким образом, третья обмотка остаётся незадействованной в процессе диагностики. Экспериментально доказано, что влияние третьей обмотки настолько мало, что можно исключить третью обмотку из модели. Поэтому в схеме замещения обмотки трансформатора и дальнейших расчётах её не будет. Схема замещения обмотки силового трансформатора по схеме «звезда» показана на рисунке 1.

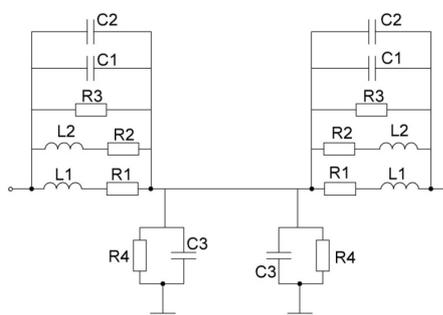


Рисунок 1 – Схема замещения обмотки силового трансформатора по схеме «звезда»

Для данной схемы выведена формула полного сопротивления (1) и составлено характеристическое уравнение (2):

$$Z_Y = \frac{2}{p \cdot C_{\Sigma} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{(p \cdot L_1 + R_1)} + \frac{1}{(p \cdot L_2 + R_2)}} + \frac{1}{\frac{2}{R_4} + 2 \cdot p \cdot C_3} \quad (1)$$

Наличие «2» в формуле (1) объясняется последовательным соединением продольных ветвей и параллельным соединением поперечных ветвей двух обмоток схемы замещения силового трансформатора. Следовательно, коэффициент «2» появляется в числителе первой дроби, описывающей продольную ветвь, и в знаменателе второй дроби, описывающей поперечную ветвь.

На рисунке 2 изображена схема замещения обмотки силового трансформатора по схеме «треугольник». В отличие от схемы соединения «звезда» в схеме соединения «треугольник» диагностический сигнал проходит по всем трём обмоткам, две из которых

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ИХ ТЕСТИРОВАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ НАПРЯЖЕНИЯ

подключены последовательно, а третья – им параллельно.

Для данной схемы также выведена формула полного сопротивления (3) и составлено характеристическое уравнение (4).

$$\begin{aligned}
 & 2 \cdot p^4 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + p^3 \cdot (4 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot R_4 + 2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma + \\
 & + 2 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + 2 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + 2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot C_3 \cdot R_4) + p^2 \cdot (4 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 + \\
 & + 4 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + 4 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot R_4 + L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot R_4 + \\
 & + L_1 \cdot L_2 \cdot R_4 + 2 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma + \\
 & + 2 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma + 2 \cdot L_1 \cdot L_2 + \\
 & + 2 \cdot C_\Sigma \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + 2 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + 2 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot C_3 \cdot R_4 + 2 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + 2 \cdot L_1 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4) + p \cdot (4 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + \\
 & + 4 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 + 4 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + C_\Sigma \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 + L_1 \cdot R_2 \cdot R_4 + L_2 \cdot R_1 \cdot R_4 + \\
 & + L_2 \cdot R_3 \cdot R_4 + L_1 \cdot R_3 \cdot R_4 + 2 \cdot C_\Sigma \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + \\
 & + 2 \cdot L_1 \cdot R_2 + 2 \cdot L_2 \cdot R_1 + L_2 \cdot R_3 + 2 \cdot L_1 \cdot R_3 + \\
 & + 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_3 \cdot R_4 + 2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + 2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4) + 4 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + \\
 & + R_1 \cdot R_2 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 + R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 + \\
 & + 2 \cdot R_1 \cdot R_2 + 2 \cdot R_2 \cdot R_3 + 2 \cdot R_1 \cdot R_3 = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 Z_A = & \\
 = & \frac{2}{3 \cdot p \cdot C_\Sigma + \frac{3}{R_3} + \frac{3}{(p \cdot L_1 + R_1)} + \frac{3}{(p \cdot L_2 + R_2)}} + \\
 & + \frac{1}{\frac{3}{R_4} + 3 \cdot p \cdot C_3};
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 & 3 \cdot p^4 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot C_3 \cdot R_4 + p^3 \cdot (2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot R_4 + 3 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma + \\
 & + 3 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot C_3 \cdot R_4 + 3 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + 3 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot C_3 \cdot R_4) + p^2 \cdot (2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_3 + \\
 & + 2 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + 2 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot R_4 + L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma \cdot R_4 + \\
 & + L_1 \cdot L_2 \cdot R_4 + 3 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma + 3 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_\Sigma + \\
 & + 3 \cdot L_1 \cdot L_2 + 3 \cdot C_\Sigma \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + 3 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + 3 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot C_3 \cdot R_4 + 3 \cdot L_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + 3 \cdot L_1 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4) + \\
 & + p \cdot (2 \cdot L_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + 2 \cdot L_2 \cdot R_1 \cdot R_3 + 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + C_\Sigma \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 + L_1 \cdot R_2 \cdot R_4 + L_2 \cdot R_1 \cdot R_4 + \\
 & + L_2 \cdot R_3 \cdot R_4 + L_1 \cdot R_3 \cdot R_4 + 3 \cdot C_\Sigma \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + 3 \cdot L_1 \cdot R_2 + \\
 & + 3 \cdot L_2 \cdot R_1 + 3 \cdot L_2 \cdot R_3 + 3 \cdot L_1 \cdot R_3 + 3 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_3 \cdot R_4 + \\
 & + 3 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4 + 3 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_3 \cdot R_4) + 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + \\
 & + R_1 \cdot R_2 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 + R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 + 3 \cdot R_1 \cdot R_2 + \\
 & + 3 \cdot R_2 \cdot R_3 + 3 \cdot R_1 \cdot R_3 = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

Наличие коэффициентов «2/3» в формуле (3) объясняется последовательным соединением двух продольных ветвей и одной параллельной им, коэффициент «1/3» объясняется соединением поперечных ветвей трёх обмоток схемы замещения силового трансформатора.

Составленные схемы замещения позволят смоделировать параметры силовых трансформаторов для различного технического состояния.

Элементы составленных схем замещения трансформатора меняют свои параметры в процессе при каком-либо отклонении технического состояния или наличия дефекта. Поэтому для решения задачи прогнозирования технического состояния изоляции были установлены зависимости между показателями технического состояния отдельных узлов силового трансформатора и параметрами схемы замещения. Также параметры схемы замещения должны быть связаны с диагностическими параметрами, что и отражено в таблице 1.

Моделирование переходных процессов предусматривает получение решения характеристического уравнения, описывающего переходный процесс, т. е. получение всех

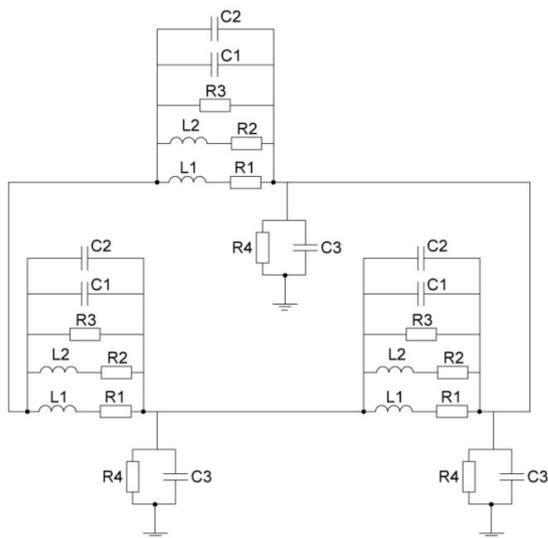


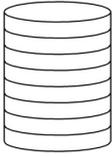
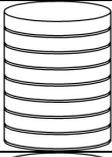
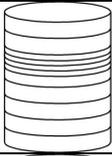
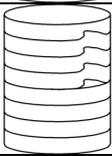
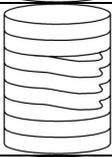
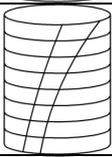
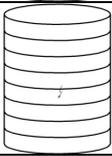
Рисунок 2 – Схема замещения обмотки силового трансформатора по схеме «треугольник»

переменных в виде функций от времени, а затем проведение анализа этих функций.

Для получения корней характеристического уравнения подставляем в него значения RLC-элементов схемы, экспериментально

снятые с реального трансформатора. После нахождения корней характеристического уравнения составляем уравнения переходного процесса.

Таблица 1 – Основные виды дефектов обмоток силовых трансформаторов

Тип дефекта		Изменения элементов схемы
1	2	3
Распрессовка обмоток		Уменьшение значений элементов C1, C2 Увеличение значений элементов L1, R3
Сжатие части витков		Уменьшение значений элементов C3, L1, R3 Увеличение значений элементов C1, C2
Деформация витков к оси обмотки		Уменьшение значений элементов C1, C2, L1 Увеличение значений элементов R3, R4, C3
Деформация витков от оси обмотки («грыжа»)		Уменьшение значений элементов C1, C2, C3, R4 Увеличение значений элементов L1, R3
Скручивание обмотки		Незначительное изменение элементов C1, C2
Междуслойное замыкание витков		Уменьшение значений элементов R1, R3, L1 Увеличение значений элементов C2

Для схемы соединения «звезда»:

$$U(t) = 1 + A_1 \cdot e^{-4,941 \cdot 10^7 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-8,211 \cdot 10^{11} \cdot t} + A_3 \cdot \sin(2,639 \cdot 10^7 \cdot t + \varphi_3) \cdot e^{-2,206 \cdot 10^4 \cdot t}$$

для схемы соединения «треугольник»:

$$U(t) = 1 + A_1 \cdot e^{-4,941 \cdot 10^7 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-3,596 \cdot 10^{11} \cdot t} + A_3 \cdot \sin(3,255 \cdot 10^7 \cdot t + \varphi_3) \cdot e^{-1,946 \cdot 10^4 \cdot t}$$

Так как уравнения содержат по четыре неизвестных: A_1 , A_2 , A_3 и φ_3 , то находим их с помощью решения специально составленной системы уравнений:

– для схемы соединений обмоток «звезда»:

$$\begin{cases} 1 + A_1 + A_2 + A_3 \cdot \sin(\varphi_3) = 0; \\ A_1 \cdot p_1 + A_2 \cdot p_2 + A_3 \cdot \alpha_3 \cdot \sin(\varphi_3) + A_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(\varphi_3) = 0; \\ A_1 \cdot p_1^2 + A_2 \cdot p_2^2 + A_3 \cdot (\alpha_3^2 - \omega_3^2) \cdot \sin(\varphi_3) + 2 \cdot A_3 \cdot \omega_3 \cdot \alpha_3 \cdot \cos(\varphi_3) = 0; \\ A_1 \cdot p_1^3 + A_2 \cdot p_2^3 + A_3 \cdot (\alpha_3^3 - 3 \cdot \omega_3^2 \cdot \alpha_3) \cdot \sin(\varphi_3) + A_3 \cdot (-\omega_3^3 + 3 \cdot \omega_3 \cdot \alpha_3^2) \cdot \cos(\varphi_3) = 0. \end{cases}$$

– Для схемы соединения обмоток «треугольник»:

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ИХ ТЕСТИРОВАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ НАПРЯЖЕНИЯ

$$\begin{cases} 1 + A_1 + A_2 + A_3 \cdot \sin(\varphi_3) = 0 \\ -4,941 \cdot 10^7 \cdot A_1 - 3,596 \cdot 10^{11} \cdot A_2 - \\ -1,946 \cdot 10^4 \cdot A_3 \cdot \sin(\varphi_3) + \\ + 3,255 \cdot 10^7 \cdot A_3 \cdot \cos(\varphi_3) = 0 \\ 2,441 \cdot 10^{15} \cdot A_1 + 1,293 \cdot 10^{23} \cdot A_2 - \\ -1,06 \cdot 10^{15} \cdot A_3 \cdot \sin(\varphi_3) - \\ -1,267 \cdot 10^{12} \cdot A_3 \cdot \cos(\varphi_3) = 0 \\ -1,206 \cdot 10^{23} \cdot A_1 - 4,65 \cdot 10^{34} \cdot A_2 + \\ + 6,185 \cdot 10^{19} \cdot A_3 \cdot \sin(\varphi_3) - \\ -3,449 \cdot 10^{22} \cdot A_3 \cdot \cos(\varphi_3) = 0. \end{cases}$$

После нахождения неизвестных уравнение переходного процесса для схемы соединения обмоток по схемам «звезда» записывается как:

$$U(t) = 1 - 0,222 \cdot e^{-4,941 \cdot 10^7 \cdot t} + \\ + 6,216 \cdot 10^{-14} \cdot e^{-8,211 \cdot 10^{11} \cdot t} - \\ - 0,882 \cdot \sin(2,639 \cdot 10^7 \cdot t + 1,079) \cdot e^{-2,206 \cdot 10^4 \cdot t},$$

а уравнение переходного процесса для схемы соединения обмоток по схеме «треугольник»:

$$U(t) = 1 - 0,303 \cdot e^{-4,941 \cdot 10^7 \cdot t} + \\ + 1,126 \cdot 10^{-12} \cdot e^{-3,596 \cdot 10^{11} \cdot t} - \\ - 0,835 \cdot \sin(3,255 \cdot 10^7 \cdot t - 0,987) \cdot e^{-1,946 \cdot 10^4 \cdot t}.$$

Полученные уравнения обрабатываются с помощью программы MathCad, которая наглядно отображает переходной процесс в обмотках силового трансформатора и программы AutoSignal v1.6 позволяющей разложить в спектр кривую переходного процесса.

На рисунках 3 и 4 изображена кривая переходного процесса для схемы соединения обмоток «звезда».

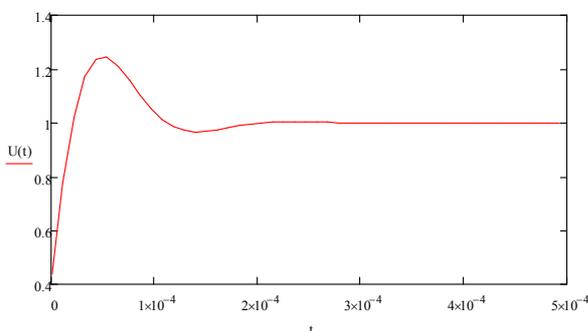


Рисунок 3 – Кривая переходного процесса для схемы соединения обмоток «звезда»

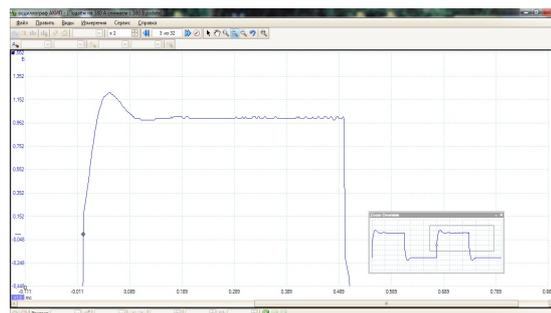


Рисунок 4 – Кривая переходного процесса, экспериментально снятая для схемы соединения обмоток «звезда»

На рисунках 5 и 6 изображена кривая переходного процесса для схемы соединения обмоток «треугольник».

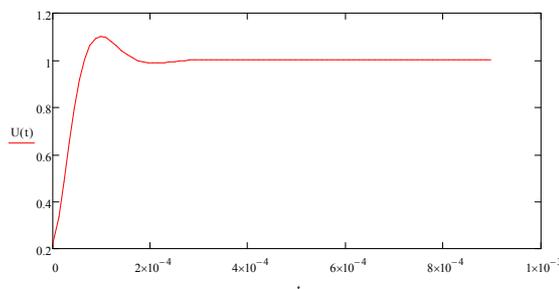


Рисунок 5 – Кривая переходного процесса для схемы соединения обмоток «треугольник»

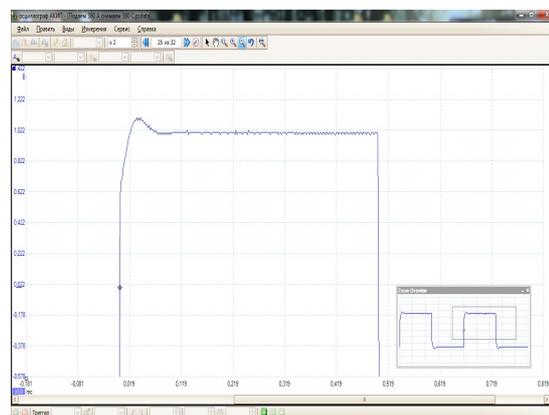


Рисунок 6 – Кривая переходного процесса, экспериментально снятая для схемы соединения обмоток «треугольник»

На рисунках 7–10 показаны экспериментальные и расчётные спектрограммы для одной обмотки и схем соединения обмоток «звезда» и «треугольник».

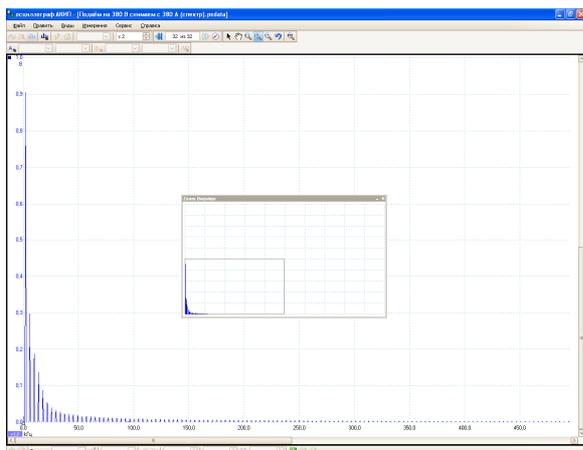


Рисунок 7 – Спектрограмма, экспериментально снятая для схемы соединения обмоток «звезда»

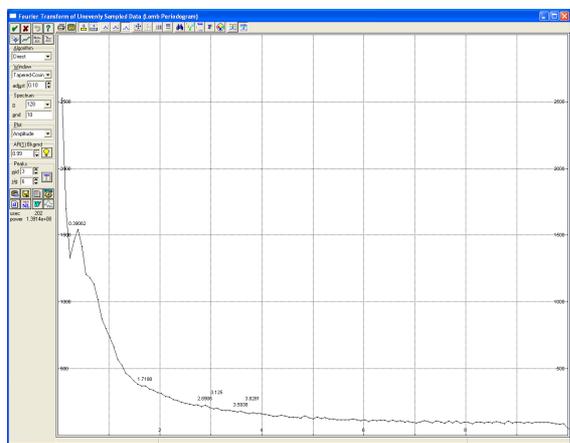


Рисунок 8 – Спектрограмма расчётная для схемы соединения обмоток «звезда»

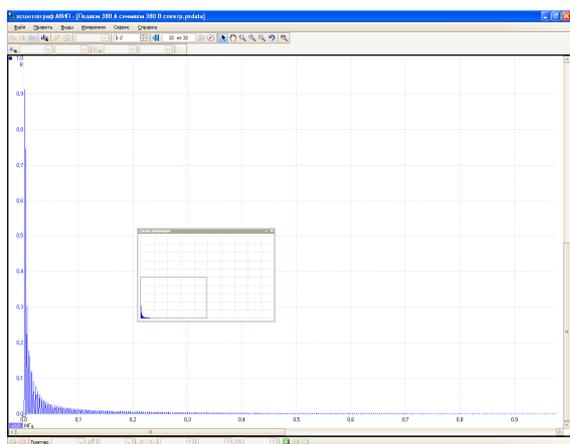


Рисунок 9 – Спектрограмма, экспериментально снятая для схемы соединения обмоток «треугольник»

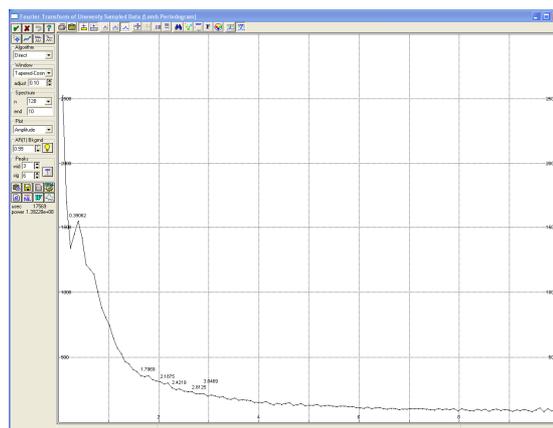


Рисунок 10 – Спектрограмма расчётная для схемы соединения обмоток «треугольник»

Результатом проделанной работы является получение спектрограмм для условно идеального состояния трансформатора. Под этим состоянием подразумевается трансформатор, который изготовлен без нарушений технологических норм, то есть дефекты, обусловленные процессом его изготовления, отсутствуют.

В дальнейшем планируется разработка методики обработки спектрограмм, после чего можно будет установить зависимость спектрального состава волнового затухающего процесса от вида и степени развития дефектов в обмотках трансформатора. Получение требуемых результатов работы позволит решить проблему диагностирования механического состояния обмоток силовых трансформаторов и предотвратить внезапный отказ электрооборудования, что повысит качество и уровень надёжности электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силин, Н. В. Оценка технического состояния электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам излучаемого им электромагнитного поля [Текст] : дис. на соискание ученой степени док. техн. наук : 05.09.05 / Силин Николай Витальевич. – Санкт-Петербург, 2009. – 303 с.
2. Тимонин, Ю. Н. Обоснование рациональных параметров энергосберегающих электромеханических систем охлаждения силовых трансформаторов для повышения надёжности их работы [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.09.03 / Тимонин Юрий Николаевич. – Тула, 2012. – 135 с.
3. Рощупкин, М. Д. Разработка методики акустической диагностики электрических разрядов в силовых и измерительных трансформаторах [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ СИЛОВОГО
ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ИХ ТЕСТИРОВАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ
НАПРЯЖЕНИЯ

техн. наук : 05.14.12 / Рошупкин Михаил Дмитриевич. – Москва, 2011. – 158 с.

4. Чупак, Т. М. Прогнозирование технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.14.02 / Чупак Татьяна Михайловна. – Красноярск, 2007. – 128 с.

5. Макарова, Н. Л. Разработка метода и технических средств диагностики изоляции силовых трансформаторов сельских электрических сетей [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.20.02 / Макарова Надежда Леонидовна. – Чебоксары, 2012. – 227 с.

6. Гольдштейн, Е. И. Технический контроль параметров схемы замещения трансформаторов по результатам их измерений в режимах холостого хода и номинальной нагрузки. Е. И. Гольдштейн, Н. Л. Бацева, А. В. Панкратов // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сб. статей. Ч. 1. Специальные электрические машины и электромагнитные устройства. Вопросы энергоснабжения. Образоват. Проекты. Екатеринбург : Вестник УГТУ-УПИ. 2003. – № 5(25). С. 398–401.

7. Алексеев, В. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов

[Текст] : Основное электрооборудование в энергосистемах: обзор отечественного и зарубежного опыта – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с. : ил.

8. Карчин, В. В. Комплекс методов определения работоспособности силовых трансформаторов без отключения с использованием экспертных оценок [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.09.03 / Карчин Виктор Васильевич. – Йошкар-Ола, 2008. – 172 с.

9. Хренников, А. Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов при коротких замыканиях [Текст] / А. Ю. Хренников // Электричество. – 2006. – № 7. – С. 17–24.

10. Дробышевский, А. А. Диагностика обмоток силовых трансформаторов методом низковольтных импульсов [Текст] / А. А. Дробышевский, С. В. Аликин, Е. И. Левицкая, М. А. Филатова // Электричество. – 1998. – № 5. – С. 30–35.

Кокорин Д. В., магистрант, E-mail: koksik_25@mail.ru; **Лебедев Н. А.**, магистрант, E-mail: nikita1190@mail.ru, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», +7(385-2)29-07-76.