

# СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ С ЦЕЛЬЮ ЕГО ДИАГНОСТИКИ МЕТОДОМ НИЗКОВОЛЬТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Будько А. А.

Томский политехнический университет, Отдел элитного технического образования  
budkoaleksander@yandex.ru

## Введение

Одним из наиболее важных элементов электрической сети является силовой трансформатор. В настоящее время в России уделяется повышенное внимание поддержанию требуемой эксплуатационной надежности трансформаторов. В связи с этим, главной задачей является своевременное выявление появляющихся дефектов обмоток и начальных повреждений трансформатора, которое поможет вывести в ремонт трансформатор прежде, чем произойдет авария, влекущая выход его из строя [1, 2].

Поэтому целью данной работы являлось создание модели силового трансформатора для дальнейшего расчета элементов схемы замещения с целью его диагностики методом низковольтных импульсов.

## Описание метода

Для диагностики механического состояния обмоток трансформатора наиболее приемлем метод низковольтных наносекундных импульсов (НВИ), в основе которого лежит импульсный генератор, создающий импульсы с наносекундным фронтом и длительностью нескольких сотен наносекунд. Такой импульс подается на одну из обмоток силового трансформатора. Снятые осциллограммы с обмотки силового трансформатора, записанные до КЗ (нормограммы) и после КЗ (дефектограммы), позволяют качественно оценить состояние трансформатора. Схема проведения диагностики с помощью метода НВИ наглядно представлена на рисунке 1.

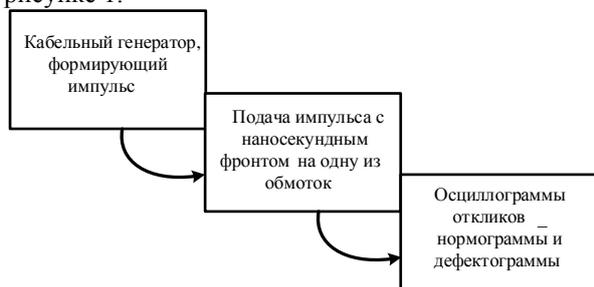


Рисунок 1 - Блок-схема проведения метода НВИ

Среди причин дефектов обмоток силового трансформатора основной является электродинамическое воздействие токов короткого замыкания, приводящее к смещению витков в обмотках [2]. При различной степени деформаций изменяются емкости и порой индуктивности звена, состоящим из ряда элементов. Здесь  $L$  – индуктивность рассеяния обмотки, учитывая

деформированных элементов. Следствием этого служит отклонение собственных частот колебаний, приводящих к изменению в осциллограммах импульсных токов и напряжений [3].

Спектр влияющего наносекундного импульса содержит высокочастотные компоненты, значит, при воздействии такого импульса на одну из обмоток трансформатора, в ней начинают протекать высокочастотные токи, где плотность распределения тока концентрируется у поверхности проводника.

## Описание модели

На рисунке 2 представлена электротехническая схема замещения обмотки силового трансформатора. При построении схемы замещения требуется учесть ряд важных факторов, а именно:

1. Воздействующий импульс имеет короткую длительность, длина импульса-теста составляет порядка 400-500 нс, следовательно, электротехническая схема замещения должна быть распределенной.

2. Поскольку воздействующий импульс содержит высокочастотное наполнение, следовательно, требуется принять во внимание зависимость элементов схемы замещения от частоты.

3. При расчете переходных процессов с помощью схемы замещения, целесообразно использовать принцип наложения по частотам.

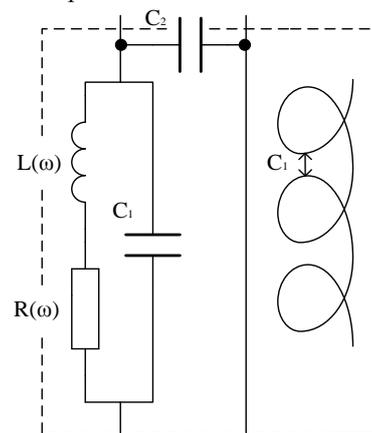


Рисунок 2 - Электротехническая схема замещения обмотки силового трансформатора одного витка

На рисунке 2 показан виток обмотки, представленный в виде электротехнического взаимную индуктивность между витками,  $C_1$  – емкость между витками,  $C_2$  – емкость между

витком и заземленной частью трансформатора,  $R$  – активное сопротивление витков обмотки.

Для вычисления параметров, входящих в схему замещения, проведем расчет частотного спектра и найдем частотный диапазон зондирующего импульса. Далее требуется привести расчет индуктивности и сопротивления звеньев обмотки силового трансформатора.

### Экспериментальные данные

В качестве экспериментального воздействующего импульса возьмем функцию в виде:

$$U(t) = \exp(-(t - 1,5 \cdot 10^{-6})^4 \alpha),$$

где длина подаваемого импульса равна  $T=0,5$  мкс.

Находим частотный спектр зондирующего импульса путем разложения импульса в ряд Фурье. Затем определяем коэффициенты разложения  $A_k$ ,  $k=0, \dots, N$  с помощью стандартной программы быстрого преобразования Фурье (FFT) математического пакета данных *MathCad*.

После частотного разложения требуется найти частотную зависимость индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$ . Для этого, используя программно-математический пакет *COMSOL Multiphysics*, находим требуемые зависимости [4].

Получив, требуемые зависимости индуктивности и сопротивления обмоток от частоты, следует вычислить переходные процессы, действующие в обмотках трансформатора. В виду того, что входной импульс представлялся в виде суммы гармоник, вычисления делались с учетом метода наложения. Сначала рассчитывались напряжения и токи для каждой гармоники. После этого результаты расчетов токов и напряжений каждой гармоники суммировались и получались результирующие токи и напряжения при подаче зондирующего импульса (рис. 3).

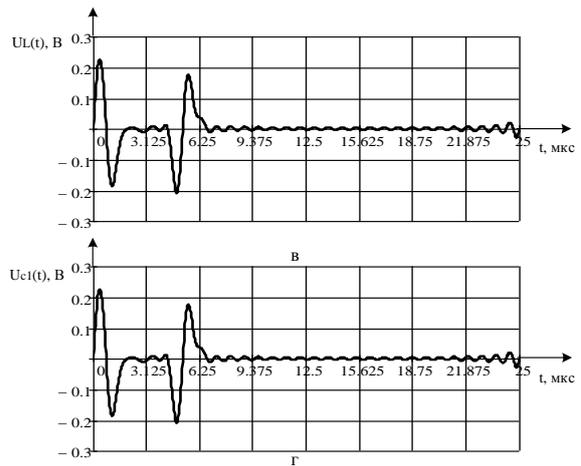
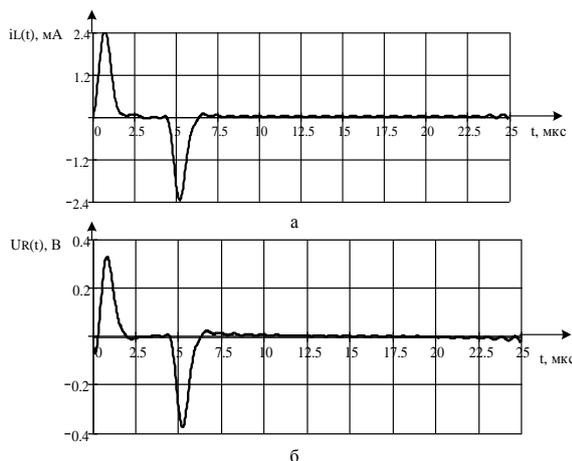


Рисунок 3 - Результаты моделирования провода обмоток силового трансформатора: а – ток индуктивности  $i_L(t)$ ; б – напряжение на активном сопротивлении  $U_R(t)$ ; в – напряжение на индуктивности  $U_L(t)$ ; г – напряжение на конденсаторе  $U_{C1}(t)$

### Заключение

Представлена математическая модель для расчета переходных процессов элементов схемы замещения обмоток силового трансформатора с помощью программных продуктов *MathCad* и *Comsol Multiphysics*. Данную математическую модель можно использовать в качестве моделирования дефектов обмоток и расчета токов и напряжений с малой погрешностью для дальнейших исследований.

### Список использованных источников

1. Кокорин, Д.В., Лебедев, Н.А. Математическое моделирование волновых процессов в обмотках силового трансформатора при их тестировании прямоугольным импульсом напряжения // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4. – С. 90-97.
2. Хренников, А.Ю. О повреждениях обмоток силовых трансформаторов и диагностике их геометрии методом низковольтных импульсов // Электро. – 2004. – № 5. – С. 13-18.
3. Лавринович, В.А., Пичугин, М.Т., Рамазанова, А.Р. Применение наносекундных низковольтных импульсов для диагностики состояния обмоток силовых трансформаторов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 292-294.
4. Будько А.А., Васильева О.В. Создание модели обмотки низкого напряжения силового трансформатора ТРДН-25000/110 // Сборник научных трудов VI Всероссийской конференции “Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых”. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2015. – С. 142-145