

О ПРОБЛЕМЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ПУТИ РЕШЕНИЯ

Рогозин Г.Г.

Донецкий национальный технический университет

rgg@elf.dgtu.donetsk.ua

Кожухарь А.В.

ОАО «Донецкоблэнерго»

alex@doe.donbass.com

The paper deals with the fault modeling of the magnetic system. The matrix of symptoms for diagnose the elements of magnetic systems is considered. The results may be used in electric systems of Donetsk region.

Введение. Высокие требования к надежности и экономичности силовых трансформаторов обуславливают необходимость поиска новых способов оценки состояния данного оборудования. При этом выдвигается требование существенного снижения времени проведения контроля при достаточно высокой чувствительности к наиболее вероятным видам повреждений, связанных с возникновением короткозамкнутых контуров в конструктивных элементах магнитопровода.

Проблема диагностирования магнитных систем силовых трансформаторов остается не решенной. Признаком повреждения магнитной системы является повышение тока и потерь холостого хода. Характер повреждения связан, как правило, с местным пожаром в стали, повреждением изоляции между листами стали магнитопровода и повреждением изоляции стяжных болтов.

В связи с дальнейшим совершенствованием производственных процессов, сложности и высокой стоимости работ по изготовлению и ремонту трансформаторов, вопрос создания новых форм системы контроля приобретает особо важное значение.

Целью данной работы является разработка методики физического моделирования повреждений магнитных силовых трансформаторов, методики определения симптомов состояния элементов конструкции последних

Материал и результаты исследований. Физическое моделирование повреждений в магнитной системе трансформатора осуществляется путем имитации последних, а именно:

- 1) замыкание между отдельными листами магнитопровода по внешней поверхности его ярма;
- 2) замыкания между отдельными листами среднего стержня магнитопровода;
- 3) то же для одного из крайних стержней;
- 4) замыкание между отдельными листами магнитопровода по его внешней и внутренней поверхности ;
- 5) шунтирование изоляции стяжных шпилек.

Общий подход к моделированию неисправностей отображен в табл. 1. При имитации повреждений силовых трансформаторов 4-го 5-го габаритов необходимо осуществлять выемку активной части и слив трансформаторного масла. Основные принципы физического моделирования повреждений указаны на рис. 1 и 2.

Замыкание между отдельными листами магнитопровода по внешней поверхности его ярма осуществляется после удаления изоляции пластин магнитопровода.

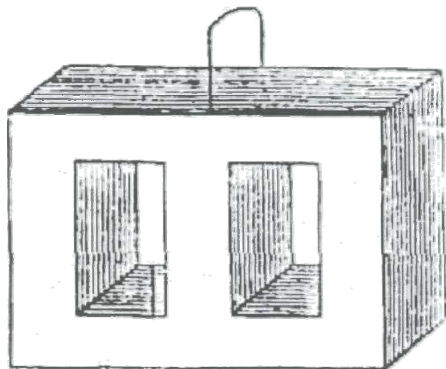


Рисунок 1 – Замыкание между отдельными листами магнитопровода по внешней поверхности



Рисунок 2 – Замыкание между отдельными листами среднего стержня магнитопровода

При моделировании учитывалось, что магнитопровод состоит не из целых пластин, а из отдельных составляющих. Поэтому необходимо в нескольких местах замыкать последние, для получения замкнутого контура.

Таблица 1 – Моделирование неисправностей элементов магнитной системы трансформаторов

Элемент магнитопровода	Особенности конструкции		Способ получения информации	Методика моделирования
1. Пакеты ярем	Безболтовые конструкции с косыми срезами у стыков соединений	Холоднокатаные листы металла с ориентированной зернистой структурой	Измерение переходной функции по методу затухания постоянного тока и тока включения силового трансформатора (холостой ход)	1. Замыкание между отдельными листами магнитопровода по внешней поверхности элемента. То же между отдельными листами по внешней и внутренней поверхностям
2. То же магнитопровода				
3. Нажимные конструкции сердечников	Стяжные изолированные шпильки, проходящих вдоль или через пластины	Стяжка стержней бандажами из стеклотенты		1. Шунтирование изоляции стяжных шпилек и других элементов нажимных конструкций сердечников. 2. То же ярем магнитопровода
4. То же ярем	То же	Металлические бандажи		

Разработана методика проведения диагностических экспериментов на отключенном трансформаторе.

Установлено, что процессы намагничивания железа в трансформаторе являются необратимыми. После ряда повторных изменений поля в одних и тех же пределах петля гистерезиса стабилизируется [2].

На рис. 3 показан переход к замкнутой петле при повторном изменении напряженности поля.

Критерий стабилизации магнитной системы основан на анализе площадей под кривыми в опытах затухания постоянного тока. Площадь под кривой равна интегралу функции этой кривой по времени от нуля до бесконечности. Условие стабильности:

$$\text{при } i(t) = I_0 e^{-at}, \quad \int_0^{\infty} i(t) dt = \frac{I_0}{a} [(e^{-t})_{t=\infty} - (e^{-t})_{t=0}] = const$$

Второй критерий основан на анализе касательных к кривым в опытах затухания постоянного тока. Угол наклона касательной к кривой равен производной функции этой кривой во времени. Условие стабильности:

$$\text{при } i(t) = I_0 e^{-at}, \quad \frac{di(t)}{dt} I_{t=0} = a I_0 = const$$

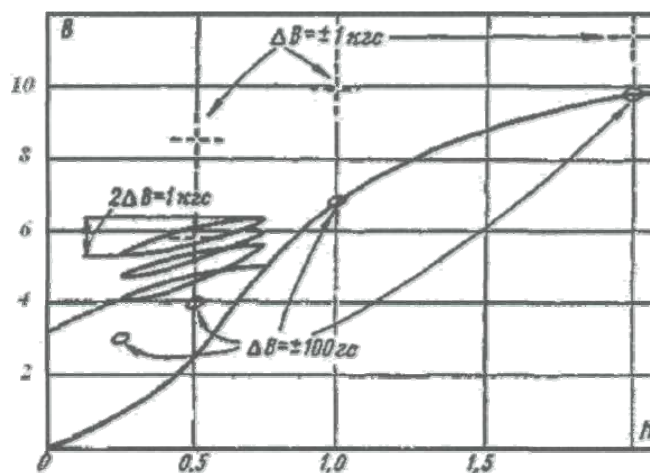


Рисунок 3 – Переход от кривой первого намагничивания к замкнутому частному несимметричному циклу $H = H_0 \pm \Delta H$ при $H_0 = 0,5e$, $2 H_0 = 0,5e$, $2\Delta B = 1$ кГс

Проведенными опытами фиксации кривых затухания постоянного тока в обмотке 0,4 кВ трансформатора ТМ-400 6/0,4 кВ установлено, что стабильное состояние согласно первого критерия наступает на 7-8 цикле.

Разработана методика проведения диагностических экспериментов при включении ненагруженного трансформатора на рабочее напряжение, основные положения которой приведены ниже.

Повреждения магнитной системы трансформатора влияют на изменение тока включения холостого хода в интервале времени, обусловленном нарастанием магнитного потока на линейном участке кривой намагничивания.

При физическом моделировании повреждений магнитопровода появляются замкнутые контуры, в результате реактивное сопротивление уменьшается при неизменном активном. Это приводит к увеличению коэф-

фициента затухания аperiodической составляющей потока, а также пропорционально ему индукции магнитного поля.

Эти изменения отражаются на характере кривой тока включения холостого хода

Для определения аperiodической составляющей в момент включения трансформатора, гармонических составляющих тока в установившемся режиме холостого хода использованы данные, полученные из опыта, проведенного согласно схемы рис.4.

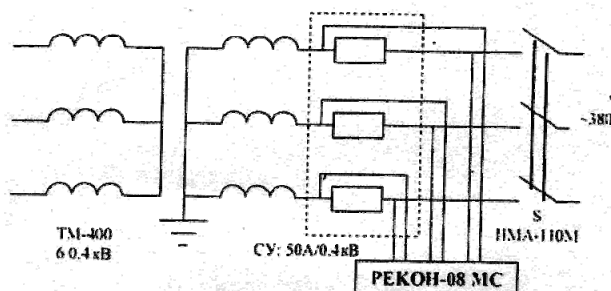


Рисунок 4 – Схема опыта включения ненагруженного трансформатора на рабочее напряжение

Дальнейшая обработка тока ф. А состоит в аппроксимации кривых, которые огибают ток по минимумам и максимумам [3], или в получении аналитических выражений для изменения тока во времени $I_{A \min}$ ($I_{A \min}$) $I_{A \max}$ ($I_{A \max}$), которые дают наименьшее отклонение значений указанных токов от их опытных значений для соответствующих моментов времени. Аппроксимация выполняется с использованием стандартной программы Curve-Expert 1.3.

Аппроксимирующие выражения :

$$I_{A \min}(t) = -110,65 * \exp(-32,0 * t) - 46,06 * \exp(-4,085 * t) - 10,314 * \exp(-1,063 * t) - 5,84;$$

$$I_{A \min}'(t) = -86,63 * \exp(-39,12 * t) - 47,18 * \exp(-11,42 * t) - 33,21 * \exp(-2,007 * t);$$

$$I_{A \max}(t) = (1,548 + 216,882 * t) * (1 + 68,507 * t) - 19,846 * t^2;$$

$$I_{A \max}'(t) = -4,274 + 6,383 * t - 13,214 * t^2 + 12,622 * t^3 - 3,85 * t^4$$

Наличие аналитических выражений для кривых, огибающих ток фазы А по минимумам и максимумам (без учета тока установившегося режима) позволит рассчитать аperiodическую составляющую фазы А по известной формуле:

$$i_a(t) = \frac{I_{A \min}'(t) - I_{A \max}'(t)}{2}.$$

Аналитическое выражение, которое аппроксимирует рассчитанную зависимость $i_a(t)$ представляет собой сумму трех затухающих экспонент [4]:

$$i_a(t) = 36,515 * \exp(-42,366 * t) + 25,881 * \exp(-15,93 * t) + 18,984 * \exp(-2,845 * t)$$

Параметры отдельных составляющих (их количество, начальные значения и коэффициенты затухания) могут быть использованы для оценки изменения состояния магнитопровода трансформатора.

На рисунках 5 и 6 приведены примеры осциллограмм тока в ф.А силового трансформатора ТМ-400 6/0,4 кВ в установившемся режиме холостого хода и спектрального анализа последнего.

Как видно из рис. 5 и 6, наиболее выраженными являются гармоники с частотами 50, 250 и 350 Гц.

Состав гармоник, а также их количественные характеристики [5] могут быть использованы для выявления повреждений элементов магнитной системы трансформаторов.

Разработана матрица симптомов для диагностики состояния элементов конструкции магнитной системы трансформатора, приведена в табл. 2

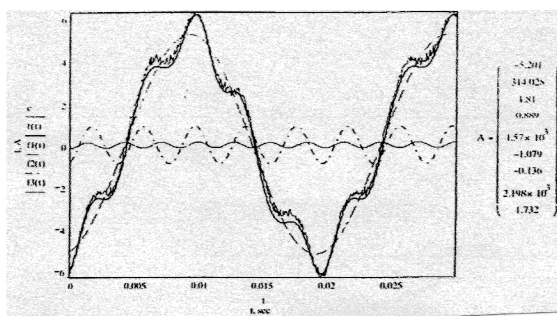


Рисунок 5 – Осциллограмма тока в установившемся режиме холостого хода трансформатора и его основные гармонические составляющие

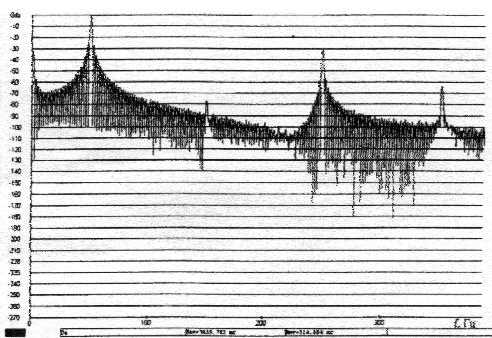


Рисунок 6 – Спектральный анализ тока установившегося режима холостого хода

Таблица 2 - Матрица симптомов для диагностики состояния элементов конструкции магнитной системы трансформатора

Причина изменения состояния	Степень подобию с эталонным образцом						Тренды			Корелирующие факторы					
	Анализ вектора состояний во временной или частотной области						Резкое изменение	Поступательное изменение	Нерегулярное изменение	В горячем состоянии	В холодном состоянии	Тепловой перекокс	После отключения сквозного КЗ	После повышения тона гудения	Неудовлетворительные данные хромографического анализа масла
	Эталонное значение			Данные текущего контроля											
	Эталонное значение	Данные текущего контроля	Эталонное значение	Данные текущего контроля											
Виды повреждений шихтованного магнитопровода: 1. Закорачивание двух листов ярма по внешней поверхности; 2. То же по внешней и внутренней частям магнитопровода; 3. Закорачивание листов стержня по типу п. 1; 4. То же по типу п. 2															
Шунтирование изоляции нажимных плит магнитопровода															
1. Шунтирование изоляции стяжных шпилек стержня; 2. То же ярмовых балок															
Смещение обмоток															

Выводы.

1. Установлены диагностические подходы к анализу повреждений элементов конструкции магнитопровода трансформатора по данным включения ненагруженного трансформатора на рабочее напряжение.
2. Установлены основные положения методики диагностирования магнитных систем трансформаторов распределительных электрических сетей в условиях капитального ремонта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фарабан С.А. Бун А.Ю. Ремонт и модернизация трансформаторов. – М.-Л.: Энергия, 1970. - 447с.
2. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории технического применения. – М.-Л.:ГЭИ, 1957. 248с.
3. Казовский Е.Я. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 548 с.
4. Рогозин Г.Г., Печуркин Ю.И. Применение импульсного метода для определения электромагнитных параметров массивных конструкций элементов ротора турбогенератора // Электротехника. – 1992, № 6-7. – С.16-21.
5. ANSYS, Electromagnetic Field Analysis Guide, Release 5.5, September 1998.

Рекомендовано д.т.н. Сивокобиленко В.Ф.