

ние такта преобразования) параметрах датчика и преобразователя период колебаний электрических сигналов в схеме также изменится до некоторого значения T' , что будет зафиксировано узлом управления в виде неравенства кодов, соответствующих ненулевой разности $T - T'$. На выходе узла управления появится сигнал на изменение значения R_2 , а, соответственно, и периода колебаний в схеме. Изменение продолжится до тех пор, пока текущее значение периода не станет равным ранее запомненному значению T . Это условие осуществляется при некотором значении $R_2' = R_2 \pm \Delta R_2$, т.е. $k' = \frac{R_2'}{R_3} + 1$.

В момент равенства периодов

$$\pm \Delta C = \pm R_2 \frac{C_0}{R_3} \quad (7)$$

В уравнение (7) входит минимум параметров схемы преобразователя и датчика, что существенно снижает требования к их стабильности. Достоинством измерительного преобразователя является то, что его работа происходит в сущности на одной частоте, которая может быть выбрана так, чтобы максимально снизить требования к используемому узлам. Помехоустойчивость схемы улучшается заземлением

датчика и резистора R_3 . Для температурной компенсации в качестве C_0 может быть использован ненагруженный ёмкостный датчик, аналогичный рабочему.

В целях дальнейшего совершенствования комплекса метрологических характеристик преобразователей может быть использована «вторичная» избыточность [3]

1. Свиштунов, Б.Л. Классификация способов обеспечения инвариантности при измерении параметров электрических цепей / Б.Л. Свиштунов // Датчики и системы, №2 (45), 2003. – С.14-17.
1. Артамонов, П.И. Устройства измерения разбаланса дифференциальных датчиков с промежуточным частотно-временным преобразованием / П.И. Артамонов, Д.С. Прохоров // Вестник Самарского государственного технического университета, №2 (38), 2013. С.41-47.
2. Свиштунов, Б.Л. Организация избыточности в средствах измерений параметров электрических цепей как способ снижения методической погрешности / Б.Л. Свиштунов // Метрология. – 2005. - №9. С.32-38.

УДК 621.317.43

ДИАГНОСТИКА ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТОРОИДАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ. ЧАСТЬ 1. МЕТОДИКА

Скурту И.Т., Брановицкий И.И.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь.*

Одной из наиболее часто встречающихся причин, вызывающих выход трансформаторов из строя, является повреждение изоляции обмоток, т.е. витковые замыкания. Независимо от того, в какой обмотке произошло замыкание, является ли оно межвитковым или межслоевым, трансформатор выходит из границ своего электрического и теплового режима работы. При этом в изоляции, от состояния которой сильно зависит срок службы изделия, накапливаются необратимые изменения, приводящие в дальнейшем к росту дополнительных потерь энергии и выходу трансформатора из строя.

Испытания изоляции обмоток являются регламентированными при контроле качества изготавливаемых трансформаторов. Наличие или отсутствие КЗ-витков определяется путем измерения нормируемой величины – тока холостого хода. Также осуществляется измерение этой, но уже ненормируемой величины при удвоенных частоте и напряжении (по отношению к номи-

нальным) на первичной обмотке. В случаях, когда минимальный диаметр провода, используемого для намотки обмоток, превышает 0.3–0.5 мм, принципиальных сложностей при оценке качества изоляции вышеуказанными или другими известными методами обычно не возникает. При использовании более тонкого провода, например, диаметром около 0.1–0.15 мм, особенно при числе витков в первичной обмотке порядка нескольких тысяч, традиционный метод не позволяет отличить дефектную обмотку от исправной. В связи с этим, для маломощной трансформаторной номенклатуры необходимо использование более чувствительных методов контроля качества обмоток.

Такой метод был разработан в Институте прикладной физики НАН Беларуси и реализован в диагностическом приборе ТВ (тестер витковый) [1]. Данный прибор в 2012 году был внедрен на участке контроля качества трансформаторов ООО «Юджэн», г. Новополоцк (данное

предприятие специализируется на производстве тороидальных трансформаторов).

Намотанные на общий магнитопровод один отдельный виток и обмотка из 4000-5000 витков такого же диаметра при фиксированной частоте, имеют разное отношение активной и реактивной части импеданса (у единичного витка оно значительно больше). Вследствие этого, при увеличении частоты питающего напряжения и сохранении его амплитуды, относительное снижение тока в витках обмотки будет больше, чем в одном витке. Иными словами – происходит виртуальное увеличение отношения ампер-витков для отдельно взятого витка, что приводит к росту неоднородности распределения индукции по продольному сечению магнитопровода и может быть зафиксировано.

Фундаментальной и наиболее принципиальной характеристикой, отражающей возможность детектирования (с учетом доступной чувствительности и уровня шумов) одного короткозамкнутого витка на фоне многих исправных, является отношение

$$s = \frac{1}{w_{max}}, \quad (1)$$

где w_{max} – максимальное количество витков среди обмоток данного трансформатора. С учетом вышесказанного, при повышении частоты питающего напряжения и сохранении его амплитуды происходит увеличение отношения (1) и его преобразование к виду:

$$s(\omega) = \frac{w_v(\omega)}{w_{max}}, \quad (2)$$

где w_v – количество “создаваемых” повышением частоты виртуальных витков, ω – угловая частота питающего напряжения.

Зависимость (2) с ростом частоты (без учета вихревых токов в стальном магнитопроводе) асимптотически стремится к фиксированному значению, поскольку отношение импедансов обмотки и витка почти не меняется при значительном доминировании в обоих случаях реактивной составляющей импеданса. Это позволяет оценивать потенциал чувствительности метода (например, для ферритовых сердечников, где вихревые токи не играют заметной роли в полосе частот, включающей достаточную для оценки часть), а также выбирать диагностическую частоту для стальных сердечников в том диапазоне, где динамическая проницаемость [2] снижается медленнее, чем растет частота. Практически, отношение (2) заменяется отношением модулей импедансов обмотки к витку.

Порядок варьирования неоднородностей в распределении магнитной индукции вследствие наличия одного короткозамкнутого витка со-

ставляет десятитысячные доли тесла. Для обнаружения этой неоднородности была разработана гибкая многовитковая измерительная обмотка, представляющая собой спираль из провода минимально допустимого диаметра, сосредоточенную в изоляционном покрытии - рисунок 1.

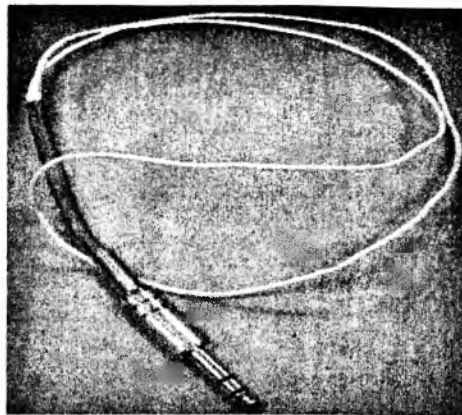


Рисунок 1 – внешний вид гибкой измерительной обмотки.

Такая конфигурация позволяет образовывать две встречно включенные локализованные обмотки без разрыва спирали. Типовая обмотка содержит 50-100 витков для получения необходимого уровня информативного сигнала. Более подробное описание приведено во второй части нашей статьи, размещенной в этом же сборнике.

Упомянутое ранее отношение импедансов обмотки и витка определялось расчетно-экспериментально, вследствие сильной нелинейности исследуемых процессов, и представлено на рисунке 2.

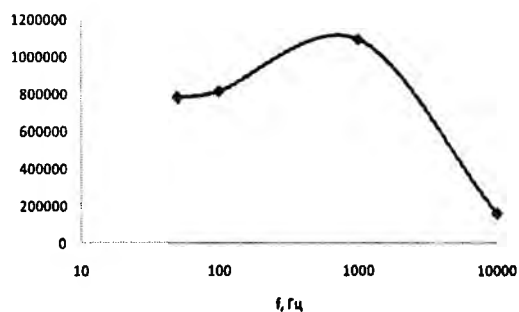


Рисунок 2 – отношение импеданса намагничивающей обмотки к импедансу одного короткозамкнутого витка в зависимости от частоты.

В процессе экспериментальных исследований, устойчивое детектирование одного короткозамкнутого витка (диаметр 0.1 мм) на фоне 4000 исправных фиксировалось с частоты в несколько сотен герц. Посредством зависимости, представленной на рисунке 2 можно сделать

оценку чувствительности метода применительно к группе трансформаторов с данным минимальным диаметром намотки. Обозначая

$$k = \frac{|Z_{coil}|}{|Z_1|}, \quad (3)$$

где Z_{coil} и Z_1 соответствующие импедансы, имеем:

$$N_{max} = 4000 \cdot \ln \frac{k_{max}}{k_{start}}, \quad (4)$$

Здесь N_{max} – максимальное число витков в обмотке, на фоне которых можно выявить виток, k_{max} – максимальное значение, отношения (3), k_{start} – значение отношения (3) при частоте начального обнаружения. Для указанного диаметра 0.1 мм оценка N_{max} составляет около 11000 витков.

УДК 621.317.43

ДИАГНОСТИКА ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТОРОИДАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ. ЧАСТЬ 2. ПРИБОР

Скурту И.Т., Брановицкий И.И.

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

На рисунке 1 представлен общий вид диагностического прибора Тестер витковый (ТВ).



Рисунок 1 – общий вид диагностического прибора ТВ; 1- электронный блок; 2 - гибкая измерительная катушка и контролируемый тороидальный трансформатор; 3 – ЭВМ

Детектирование короткозамкнутых витков осуществляется с помощью гибкой измерительной обмотки, представляющей собой тороидально сосредоточенную спираль, состоящую из необходимого количества витков (определяется с

Выводы

1. Разработан высокочувствительный метод диагностики витковых замыканий, который позволяет выявлять короткозамкнутые витки в обмотках тороидальных трансформаторов малой мощности, превосходя по чувствительности известные методы, включая метод измерения тока холостого хода.
2. Чувствительность метода с увеличением рабочей (диагностической) частоты асимптотически стремится к постоянной величине для слабоэлектропроводящих сердечников, и имеет экстремум в случае проводящих.
1. Устройство для обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках тороидальных трансформаторов: патент Республики Беларусь № 9492, МПК G 01R 31/06 (2006.01) / И.Т. Скурту, И.И. Брановицкий, Г.И. Размыслович; заявитель ГНУ Институт прикладной физики НАН Беларуси – № и 20130133; заявл. 2013.02.12.
2. Кифер, И.И. Испытания ферромагнитных материалов / И.И. Кифер – М., 1962. 544 с.

учетом электромагнитной обстановки в рабочих условиях). Измерительная обмотка в рабочем режиме представляет собой две встречно включенные катушки, обхватывающие магнитопровод в двух разных сечениях, в которых наводятся ЭДС, зависящие от локальных плотностей магнитного потока в данных поперечных сечениях. Внешний вид гибкой измерительной обмотки и ее рабочая конфигурация представлены на рисунке 2.

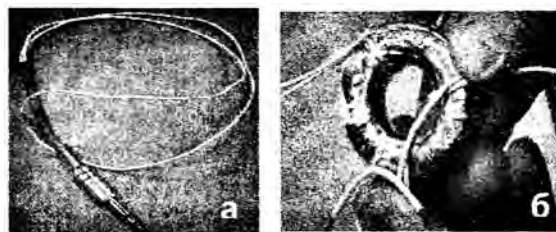


Рисунок 2 – Внешний вид гибкой измерительной обмотки (а) и ее рабочая конфигурация – положение на магнитопроводе в процессе контроля изделий (б).