

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ

Highly sensitive diagnostic technique for short-circuited turns detecting

И.И. Брановицкий, И.Т. Скурту
I.I. Branovitsky, I.T. Scurtu

В статье описывается метод диагностики витковых замыканий в обмотках тороидальных трансформаторов, позволяющий выявлять один виток на фоне нескольких тысяч исправных. Дается оценка чувствительности метода, а также рекомендации по применению на базе разработанного диагностического прибора.

This paper is about windings testing method for toroidal transformers (short-circuited turns finding). The method allows to detect single turn in winding with several thousand turns. The paper contains the estimate of method's sensitivity and application notes for device developed to realize testing procedures

Введение. 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 номинальным) 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. В случае использования

провода 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. И хотя для таких маломощных трансформаторов величина дополнительно теряемой рассеиваемой мощности невелика, нарушение теплового режима может привести к выходу из строя трансформатора за пределами предприятия-изготовителя уже, как правило, в составе другого изделия. 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). Данный прибор в 2012 году был внедрен на участке контроля качества трансформаторов ООО «Юджэн», г. Новополоцк (данное предприятие специализируется на производстве тороидальных трансформаторов).

Теоретические основы метода. Для рассмотрения физических принципов, заложенных в основу данного метода, рассмотрим распределение магнитной индукции по продольному (кольцевому) сечению витка тороидального магнитопровода из анизотропной электротехнической стали при увеличении частоты питающего напряжения.

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-виток 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 в 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 [1] снижается медленнее, чем растет частота. Практически, отношение (2) заменяется отношением модулей импедансов обмотки к витку.

Моделирование. В отличие от метрологических постановок задач [2], в данном случае спиралевидность магнитопровода не требует дополнительного учета и для снижения вычислительных затрат может быть заменена концентрической структурой. При этом, поскольку направление легкого намагничивания стали не отклоняется от направления магнитного пути, допустимо решать задачу в изотропной постановке. Обоснованно использование симметрии, а также применение сплошной магнитопроводящей структуры для замены составного сечения сплошным. Такой подход оправдан вследствие стационарного характера исследуемых процессов – это значит, что уменьшение потока вследствие вихревых токов может быть учтено введением динамической проницаемости [1] для данной рабочей точки. При этом оценка зависимости динамической проницаемости от частоты может быть выполнена экспериментально путем оценки индуктивности на разных частотах.

Расчет распределения магнитной индукции при равномерном расположении обмотки по длине магнитопровода представляет собой

осесимметричную задачу, но, поскольку интересующее нас поле одного витка не формирует осесимметричной картины, оправданно использовать одну четвертую часть трехмерной структуры.

Выход на рабочую точку трансформатора (по индукции около 1.7 Тл на частоте 50 Гц) осуществляется добавлением в модель осевой токонесущей линии. В данном случае токонесущая линия, в силу осесимметричности создаваемого ею магнитного поля, эквивалентна тороидальной токонесущей поверхности, воспроизводящей первичную обмотку, подключенную к номинальному входному напряжению. Последовательность геометрических преобразований, применяемых в данной задаче, представлена на рисунке 1.

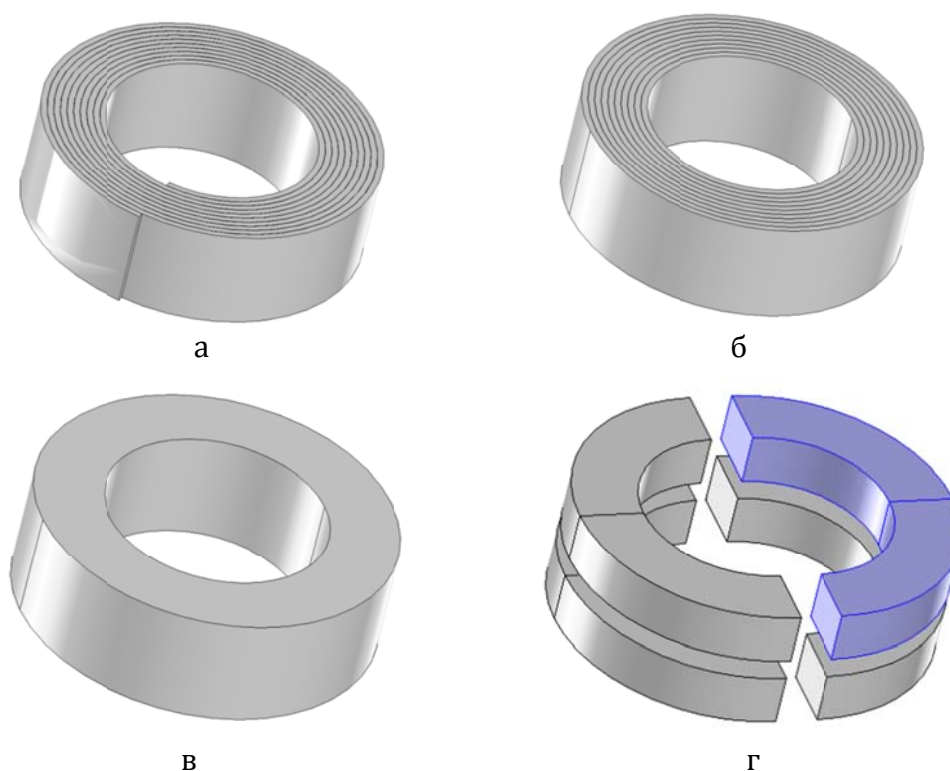


Рис. 1. Геометрические преобразования (последовательность а-б-в-г) для расчета распределения магнитной индукции в продольном сечении магнитопровода.

Пример расчета распределения средней по сечению магнитной индукции при наличии в обмотке одного короткозамкнутого витка представлен на рисунке 2 в виде развертки.

Расчеты выполнялись посредством метода конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics.

Как видно из рисунка 2, порядок варьирования неоднородностей в распределении магнитной индукции вследствие наличия одного короткозамкнутого витка составляет десятитысячные доли тесла. По этой причине гибкая локализованная измерительная обмотка включает в себя 50-100 витков для получения необходимого уровня информативного сигнала.

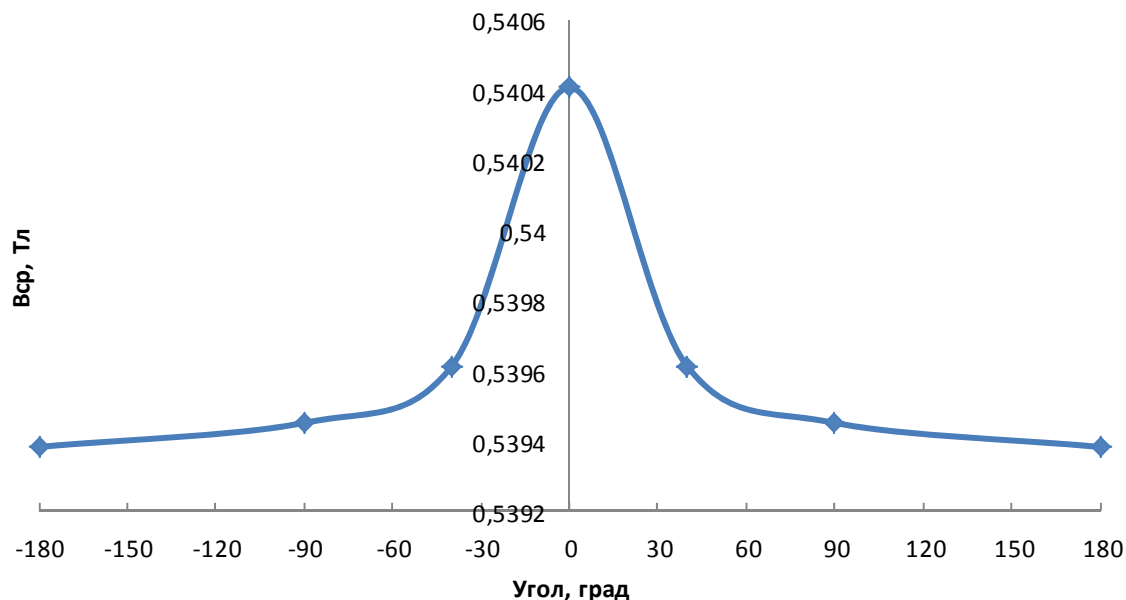


Рис. 2. Развертка распределения средней по сечению магнитопровода магнитной индукции.

Упомянутое ранее отношение импедансов обмотки и витка определялось расчетно-экспериментально, вследствие сильной нелинейности исследуемых процессов, и представлено на рисунке 3.

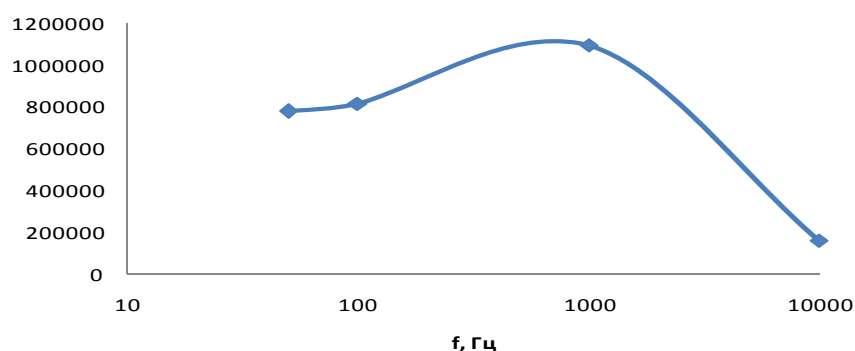


Рис. 3. Отношение импеданса намагничивающей обмотки к импедансу одного короткозамкнутого витка в зависимости от частоты.

В процессе экспериментальных исследований устойчивое детектирование одного короткозамкнутого витка (диаметр 0.1 мм) на фоне 4000 исправных фиксировалось с частоты около 300 Гц. Посредством зависимости, представленной на рисунке 3, можно сделать оценку чувствительности метода применительно к группе трансформаторов с данным минимальным диаметром катушки. Обозначая

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

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

$$N_{max} = 4000 \cdot \ln \frac{k_{max}}{k_{300}}. \quad (4)$$

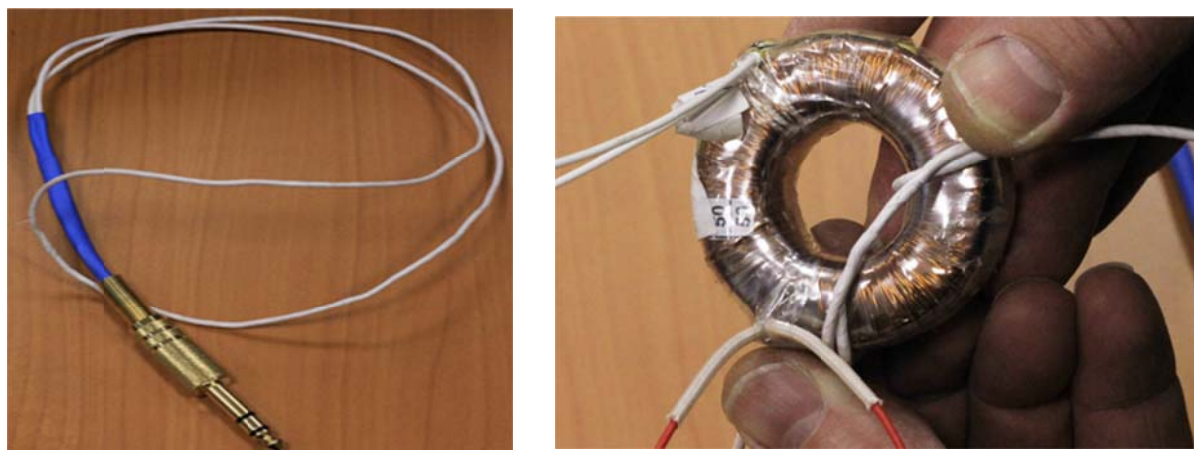
Здесь N_{max} – максимальное число витков в обмотке, на фоне которых можно выявить виток, k_{max} – максимальное значение, отношения (3), k_{300} – значение отношения (3) на частоте 300 Гц. Для указанного диаметра 0.1 мм оценка N_{max} составляет около 11000 витков.

Прибор ТВ. Общий вид диагностического прибора ТВ представлен на рисунке 4.



Рис. 4. 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 экспериментально с учетом электромагнитной обстановки в рабочих условиях). Измерительная обмотка в рабочем режиме представляет собой две встречно включенные катушки, в которых наводятся ЭДС, зависящие от локальных плотностей магнитного потока. Внешний вид гибкой измерительной обмотки и ее рабочая конфигурация представлены на рисунке 5.



а

б

Рис. 5. Внешний вид гибкой измерительной обмотки (а) и ее рабочая конфигурация – положение на магнитопроводе в процессе контроля изделий (б).

Разностный сигнал, соответствующий исправному трансформатору, будет иметь уровень шума порядка единиц милливольт, но при наличии одного и более короткозамкнутых витков он увеличивается в разы.

Разностный сигнал, снимаемый с гибкой измерительной обмотки, сильно зависит от минимального диаметра провода, который используется для намотки. Этот признак может быть использован как группирующий при работе с большим количеством разнотипных трансформаторов, намотанных проводом одинакового диаметра.

Программное обеспечение прибора ТВ ориентировано на работу с базой данных трансформаторов.

Для добавления нового типа трансформатора необходимо протестировать прибором несколько (2-3) трансформаторов, прошедших испытания на годность по другим методикам. Для этих трансформаторов, принимаемых условно исправными, проводится для каждого по два испытания:

- с искусственно созданным КЗ-витком,
- без него.

При этом диаметр искусственно создаваемого КЗ-витка должен соответствовать минимальному диаметру провода, используемого при намотке. Одна часть гибкой измерительной обмотки должна в эксперименте располагаться максимально близко к искусственному КЗ-витку, а вторая расположена диаметрально противоположно. В качестве результатов обоих экспериментов записываются максимальные (амплитудные) значения разностного сигнала.

Результаты разных экспериментов для каждого из исследуемых трансформаторов должны отличаться как минимум в два раза (для диаметров провода порядка 0,3 мм и выше результаты могут отличаться в 10 и более раз), а сами значения результатов должны быть для каждого из трансформаторов сопоставимыми в границах допуска для разброса токов холостого хода. Если вышеуказанные условия значительно нарушаются, необходимо повторить опыты с КЗ-витками (возможно, КЗ-виток создан некачественно), либо, если это не меняет результат, выбрать другие трансформаторы.

Результаты экспериментов позволяют установить границы уровня критического сигнала (порог срабатывания):

- не менее полуторного уровня результата эксперимента без КЗ витка,
- не более 75 % от уровня результата эксперимента с КЗ-витком.

В случае необходимости тестирования единичного образца трансформатора нового типа с проводом диаметра 0,1-0,112 мм следует принимать уровень критического сигнала равным 15 мВ. Также следует учитывать, что даже без подключения гибкой измерительной катушки к трансформатору она может обладать уровнем выходного шумового сигнала до 5-7 мВ. Типичное значение амплитуды разностного сигнала для исправного трансформатора с проводом вышеуказанного диаметра составляет около 9-12 мВ или ниже.

Достоверность тестирования напрямую зависит от позиционной разности обмоток, поэтому за время тестирования оператор-измеритель должен обеспечить позиционную разность как можно большим числом комбинаций. При наличии у трансформатора множества обмоток, затрудняющих позиционирование, тестирование может проводиться в несколько этапов, на каждом из которых обеспечивается новый позиционный диапазон. Вышеуказанное перемещение осуществляется в течение нескольких секунд присутствия напряжения на первичной обмотке. В это время в области вывода прилагаемой к

прибору управляющей программы осуществляется индикация осциллограмм разностного сигнала, а по окончании приложения напряжения фон графика подсвечивается зеленым или красным цветом, что соответствует исправному либо неисправному трансформатору соответственно.

Тестер витковый [3] позволяет диагностировать широкую номенклатуру трансформаторов за счет возможности перестройки частоты, использования различных измерительных обмоток и возможности ведения базы данных на ЭВМ.

Выводы

1. Разработанный высокочувствительный метод диагностики витковых замыканий позволяет выявлять короткозамкнутые витки в обмотках тороидальных трансформаторов малой мощности, превосходя по чувствительности другие 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.

3. Результативность метода зависит от конфигурации гибкой локально-сосредоточенной измерительной обмотки, что позволяет добиваться максимальной чувствительности, перемещая данную обмотку вдоль магнитопровода.

Литература

1. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М., 1962. 544 с.
2. Скурту И.Т. Параметрическое представление магнитных характеристик в задачах моделирования //Известия Национальной академии наук Беларуси № 4 2012. Серия физико-технических наук, с. 111-118.
3. 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. – № u 20130133; заявл. 2013.02.12.

Статья поступила в редакцию 12.06.2013