

УДК 656.1

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТРАНСФОРМАТОРЕ И ОБУЧЕНИЕ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

ГРОМЫКО И. Л., ГАЛУШКО В. Н.

Белорусский государственный университет транспорта,
(Гомель, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрены методы диагностики различных дефектов трансформатора и способ их классификации с помощью свёрточных нейронных сетей. Применение данных нейронных сетей позволит в режиме реального времени анализировать информацию, классифицировать различные отклонения и диагностировать дефекты. В работе приводится анализ информации для классификации таких повреждений как межвитковые замыкания, междуфазные короткие замыкания, дефекты межлистовой изоляции магнитопровода, местное замыкание пластин стали и «пожар» в стали.

Ключевые слова: межвитковое замыкание, трансформатор, нейронная сеть, старение изоляции

DIAGNOSIS OF INTER-ROLLER CIRCUITS IN THE TRANSFORMER AND TRAINING OF CONVENTIONAL NEURAL NETWORKS

HRAMYKA I. L., GALUSHKO V. N.

Belarusian State University of Transport,
(Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. Methods for diagnosing various defects of a transformer and a method for their classification using convolutional neural networks are considered. The use of these neural networks will allow in real time to analyze information, classify various deviations and diagnose defects. The paper analyzes information for the classification of such damages as turn-to-turn short circuits, phase-to-phase short circuits, defects in the inter-sheet insulation of the magnetic circuit, local short-circuit of steel plates and "fire" in steel.

Keywords: turn-to-turn circuit, transformer, neural network, aging of insulation

Одним из наиболее распространенных следствий ухудшения свойств изоляции являются межвитковые замыкания. При межвитковом замыкании изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя трансформатора.

Основными факторами, влияющими на возникновение межвитковых замыканий в трансформаторах, являются старение изоляции (механическое, тепловое, электрическое, механическое, химическое), перенапряжения (атмосферные, внутренние, дуговые) и организация производства и эксплуатации (заводские дефекты, эксплуатационные дефекты, дефекты при капитальном ремонте) [1].

Приведем краткий анализ наиболее распространенных повреждений силовых трансформаторов, возможные причины возникновения, традиционные способы выявления. Далее приведем результаты экспериментальных исследований по выбору диагностируемых параметров для обучения и дальнейшей работы нейронной сети.

В дальнейшем условно сгруппируем повреждения следующим образом:

1. Межвитковые замыкания, междуфазные короткие замыкания;
2. Дефекты межлистовой изоляции магнитопровода, местное замыкание пластин стали и «пожар» в стали.

При межвитковом замыкании изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя трансформатора.

Тепловой метод контроля позволяет, не выводя из работы трансформатор, быстро и безопасно для персонала выявить ненормальный режим работы оборудования. Однако для этого требуется наличие довольно дорогого оборудования – тепловизора или специального пирометра.

В журнале «Радио» [2] описан прибор, позволяющий определить короткозамкнутые витки в обмотках трансформаторов и дросселей. Описываемый прибор представляет собой генератор низких частот, собранный на двух транзисторах. Конструктивное выполнение схемы простое, что позволяет его собрать без больших материальных и временных затрат.

Недостатком данного пробника является отсутствие возможности однозначного определения вида неисправности обмотки. Также отсутствует возможность отличить межвитковое замыкание от обрыва цепи.

В 7 номере журнала «Радио» за 1990 год [3] представлена электрическая схема пробника для проверки обмотки трансформаторов и других катушек индуктивностью от 200 мкГн до 2 Гн. Данная схема ненамного сложнее предыдущей. Она дает возможность однозначно определить вид неисправности – обрыв цепи или короткое замыкание.

Изменение тока намагничивания, коэффициента мощности и потерь холостого хода, дополнительные потери короткого замыкания или отличие сопротивлений обмоток трансформатора свидетельствуют о возможном появлении межвиткового замыкания. Измерение этих величин предполагает отключение нагрузки трансформатора, что нежелательно с экономической точки зрения.

Таким образом, диагностика дефектов требует отключения трансформаторов, что представляется более затратным и менее оперативным. Поэтому применение датчиков соответствующих параметрам трансформатора для нейромодели позволит анализировать данные без отключения и указывать на ранней стадии наличие повреждений.

В силовых трансформаторах с масляным охлаждением межвитковое короткое замыкание (МКЗ) обнаруживается по выделению горючего газа в газовом реле и работе реле на сигнал или отключение. В сухих трансформаторах вопрос определения замыкания между витками обмоток актуален и может привести к unplanned выводу из строя трансформатора и отключению потребителей от системы электроснабжения.

В качестве объекта исследования использовались однофазные трансформаторы малой мощности с воздушным охлаждением. В ходе экспериментов при изменяющейся нагрузке трансформатора выполнялось межвитковое замыкание различного числа витков на одной фазе первичной и вторичной обмоток. Схема экспериментальной установки по исследованию МКЗ трансформатора представлена на рис. 1.

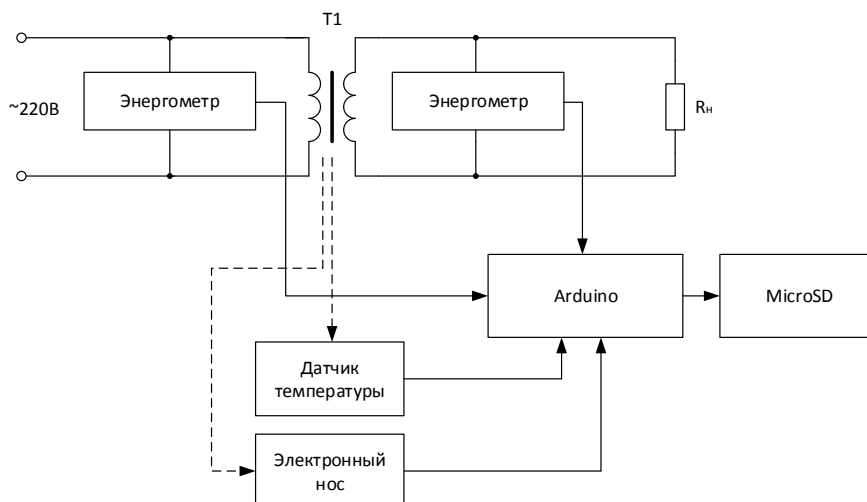


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию МКЗ трансформатора

Отслеживая в режиме реального времени возможные текущие сбои, можно снизить количество unplanned ремонтов и отказов указанного оборудования.

При проведении экспериментальных исследований были предусмотрены следующие мероприятия:

- МКЗ проводились в режиме реального времени на первичной и вторичной обмотках однофазного трансформатора с воздушным охлаждением;
- МКЗ выполнялось на двух-, пяти- и десяти витках;
- осуществлялась регистрация с помощью приборов и датчиков, внешний вид которых представлен на рис. 2.

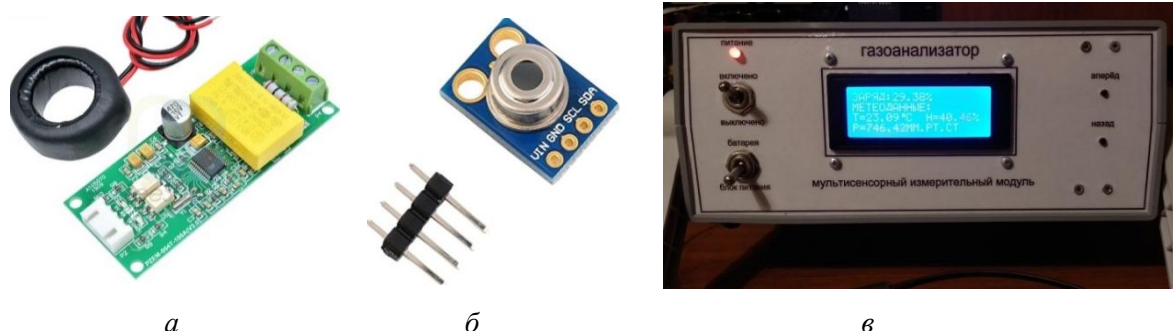


Рис. 2. Применяемое при эксперименте оборудование и приборы:
а – энергометр *PZEM*; *б* – датчик температуры *MLX90614ESF*; *в* – «электронный нос»

- В тоже время проводился анализ информации с использованием следующих данных:
- напряжений и токов первичной и вторичной обмоток;
 - активные, реактивные и полные мощности по высокой и низкой стороне трансформатора;
 - анализировался состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции с помощью устройства «электронный нос»;
 - измерялась температура в зоне КЗ и на удалении 5 см от обмоток;
 - проводилось осциллографирование и разложение по гармоникам кривых тока и напряжения;
 - выполнено более 500 измерений при нормальном режиме работы и при межвитковом замыкании с интервалом в 1 секунду при 7 различных активных и активно-индуктивных нагрузках;
 - получаемые результаты приборного учета (рисунок 3, 4, 5) через аналогово-цифровой преобразователь поступали на вход в программу *MATLAB* в качестве исходных данных для нейромодели с целью ее обучения и анализа информации;
 - с помощью *RLC*-метра определялись параметры обмоток трансформатора.

Нестабильность сетевого напряжения сильно влияет и на остальные параметры. Поэтому для минимизации данной нестабильности необходимо анализировать не каждый параметр по отдельности, а их отношения между первичной и вторичной обмотками, что несколько уменьшает зашумленность исходных данных приборного учета и позволяет более четко заметить МКЗ (рис. 6 и 7). В опыте межвиткового замыкания на первичной обмотке количество измерений намного меньше из-за очень быстрого роста температуры и как следствие опасности вывода из строя обмотки трансформатора, чем при межвитковом замыкании на вторичной обмотке и нормальной работе.

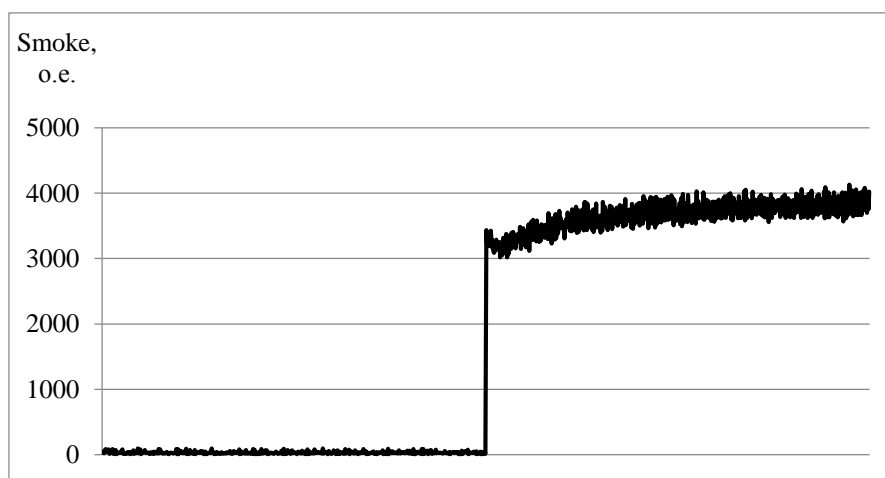


Рис. 3. График зависимости концентрации дыма при МКЗ



Рис. 4. График зависимости температуры при МКЗ



Рис. 5. График зависимости активной мощности при МКЗ

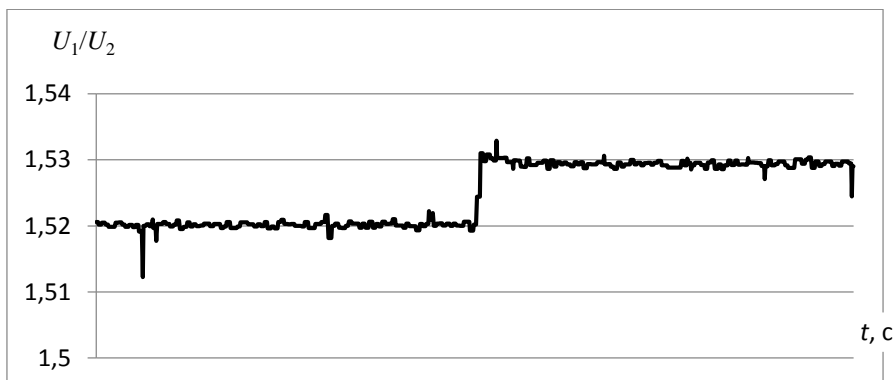


Рис. 6. График зависимости отношения напряжений при МКЗ

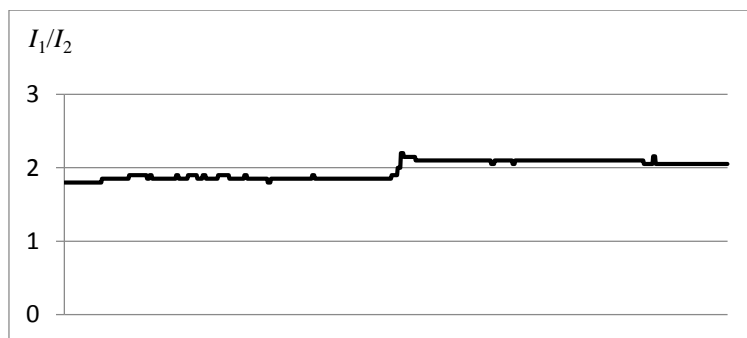


Рис. 7. График зависимости отношений токов при МКЗ

На основании графиков отношений напряжений при межвитковом замыкании в первичной или вторичной обмотках можно сделать вывод, на какой из обмоток произошло межвитковое замыкание.

При МКЗ регистрируется (*RLC*-метром) значимое снижение индуктивностей сразу первичной и вторичной обмоток, а также существенное увеличение активного сопротивления сердечника (из опыта холостого хода).

Отмечено, что в отличие от скачков сетевого напряжения график потребления активной мощности при МКЗ имеет сложный характер. Он содержит минимум три составляющие экспоненты, которые учитывают индуктивности обмоток и сердечника (рисунок 8).

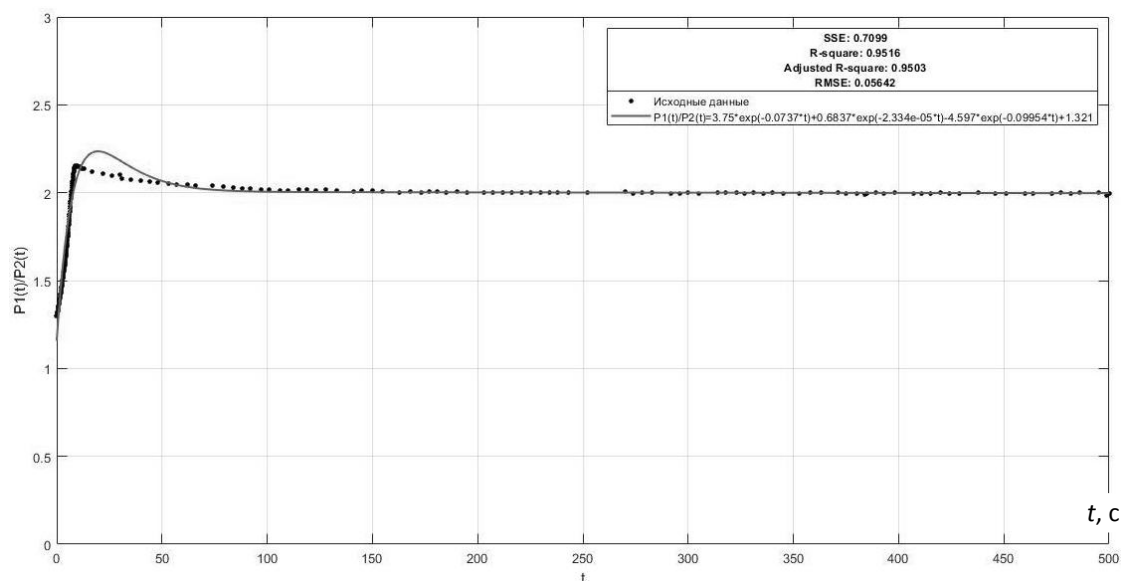


Рис. 8. Результаты статистического анализа в программе *Statistica* отношения P_1/P_2 при МКЗ

Таким образом, для однофазного трансформатора с воздушным охлаждением броневым или стержневым сердечником и классом изоляции обмоток *Y* и *A* установлено, что наиболее значимыми исходными данными для нейромодели являются следующие:

- температура на поверхности обмоток (при МКЗ средний градиент температуры в зоне МКЗ составил около $35^{\circ}\text{C}/\text{мин}$);
- отношение токов, напряжений и активных мощностей первичной и вторичной обмоток;
- состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции.

Данные датчиков используются в качестве исходных данных для сверточных нейронных сетей. Самый популярный вариант их использования – это обработка и анализ изображений. В нашем случае они позволяют на основе информации, представленной в виде множества изменяющихся в реальном времени графиков (частично приведенных выше) анализировать данные. Такой вид использования данных позволяет установить множественные взаимосвязи между отдельными факторами и, применяя нормированные данные, использовать их для быстрой настройки к другим силовым трансформаторам.

На рис. 9 приведен результат обучения и применения свёрточных нейронных сетей, причем вероятность распознавания составила 99,9%.

```

Training on single CPU.
Initializing input data normalization.
=====|
| Epoch | Iteration | Time Elapsed | Mini-batch | Mini-batch | Base Learning |
|        |           | (hh:mm:ss)   | Accuracy   | Loss       | Rate         |
|=====|
|    1  |     1    | 00:00:00    | 38.28%    | 1.0837    | 0.0100    |
|    9  |    50    | 00:00:19    | 100.00%   | 0.0054    | 0.0100    |
|   17  |   100    | 00:00:38    | 100.00%   | 0.0027    | 0.0100    |
|   25  |   150    | 00:00:58    | 100.00%   | 0.0009    | 0.0100    |
|   30  |   180    | 00:01:09    | 100.00%   | 0.0008    | 0.0100    |
|=====|
    
```

Рис. 9. Результаты обучения и применения свёрточных нейронных сетей

Научная новизна материала статьи заключается в практическом применении сверточных нейронных сетей, которые в режиме реального времени анализируют информацию, классифицируют различные отклонения и диагностируют определенный вид дефекта. Практическая значимость заключается в снижении неплановых отказов, заблаговременном предупреждении о развитии повреждения. В работе приводится анализ информации для классификации таких повреждений, как межвитковые замыкания, междуфазные короткие замыкания, дефекты межлистовой изоляции магнитопровода, местное замыкание пластин стали и «пожар» в стали.

Список литературы

1. Шерьязов, С.К. Классификация факторов, влияющих на витковые замыкания в трансформаторах напряжением 6-10/0,4 кВ/ С.К. Шерьязов, А.В. Пятков // Вестник КрасГАУ – 2014. – №7.
2. Кривонос, А.В. Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дросселей/ А.В. Кривонос // Радио – 1968. – №4 – С.56.
3. Паздников, И.Л. Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дросселей/ И.Л. Паздников // Радио – 1990. – №7 – С.68 – 69