

УДК 621.314

В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, И. С. ЕВДАСЕВ, кандидат технических наук, И. Л. ГРОМЫКО, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Рассмотрены методы диагностики различных дефектов трансформатора и способ их классификации с помощью сверточных нейронных сетей, применение которых позволит в режиме реального времени анализировать информацию, классифицировать различные отклонения и диагностировать дефекты. 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.

Одной из самых трудных и одновременно перспективной задачей в информационных технологиях является распознавание и анализ объектов или процессов на изображениях. Анализ методов распознавания объектов или процессов на изображениях предполагает при решении такой задачи использовать искусственные нейронные сети в связи с тем, что они являются слабочувствительными к искажениям, а также дают возможность классифицировать результаты, обеспечивая скорость и точность решения по сравнению с остальными методами [1].

Наиболее часто в задачах распознавания и идентификации изображений используются классические нейросетевые архитектуры (многослойный перцептрон, сети с радиально-базисной функцией и др.) [2, 3]. Результаты анализа данных работ указывают на то, что применение классических нейросетевых архитектур в данной задаче неэффективно по следующим причинам:

- изображения имеют большую размерность, что значительно увеличивает размер нейронной сети;
- большое количество параметров увеличивает вместимость сложной системы и требует большей обучающей выборки, увеличивает время и программную сложность процесса обучения;
- для повышения эффективности работы системы необходимо задействовать несколько нейронных сетей, но это увеличивает вычислительную сложность решения задачи и время выполнения;
- отсутствует инвариантность к изменениям масштаба изображения и других геометрических искажений входного сигнала.

Поэтому актуально для решения задачи выделения области расположения исследуемых графических процессов использовать сверточные нейронные сети, т. к. они обеспечивают частичную устойчивость к изменениям масштаба, смещениям и прочим искажениям.

Применение нейромоделирования в диагностике систем обеспечения энергоснабжения позволит контролировать состояние трансформаторов в режиме реального времени, не выводя трансформатор из работы, что предоставляет дополнительные возможности в обеспечении низкого уровня безаварийности и соблюдения режимов бесперебойного электроснабжения, сопровождающихся, как правило, значительными экономическими и экологическими издержками или реальным ущербом для потребителей. При этом затраты на внедрение данной технологии нейромоделирования относительно невелики

(например, применение одноплатных компьютеров), а эффективность от применения будет существенной.

Диагностика трансформаторов сегодня – довольно долгое и затратное мероприятие. Часто необходимо провести целый ряд непростых испытаний, так как современные методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта. Надежность электрической машины в значительной степени определяется надежностью обмоток, которая в свою очередь зависит от состояния изоляции. Изоляция работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации электрических машин, а также во время их хранения и транспортировки, они подвергаются разнообразным внешним воздействиям, приводящим с течением времени к прогрессирующему ухудшению свойств изоляции.

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

Основными факторами, влияющими на возникновение МКЗ 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).

Механизм повреждения предполагает, что повреждение изоляции образует контур, сцепленный с основным магнитным потоком и потоком рассеяния. Результирующий циркулирующий ток вызывает увеличение активного и индуктивного компонентов тока намагничивания, дополнительный рост потерь в опыте холостого хода и короткого замыкания. Данный вид повреждения приводит к изменению сопротивления отдельных фаз трехфазных трансформаторов. Также изменяются: сопротивление изоляции между обмотками и корпусом; хроматографический анализ масла; результаты анализа трансформаторного масла на электрическую прочность, фазные измерения потери холостого хода. Внешний осмотр на места подгаров изоляции витков при вынутой активной части также актуален при анализе данного повреждения.

В качестве основных причин МКЗ выделяют: разрушение витковой изоляции из-за длительных перегру-

зок и недостаточного охлаждения, понижение уровня масла, попадание влаги или грязи внутрь, перенапряжения и деформации обмоток при МКЗ.

Признаками появления МКЗ в трансформаторе могут быть срабатывание газовой защиты на отключение, аномальный нагрев трансформаторного масла, небольшое увеличение первичного тока, различное сопротивление фаз постоянному току, срабатывание дифференциальной или максимальной токовой защиты.

МКЗ в трансформаторах, в большинстве случаев, протекают по времени медленно. Поэтому для предотвращения серьезных поломок важно уметь выявлять замыкания на ранних стадиях, а в идеале еще и прогнозировать остаточный срок службы изоляции. Подобный метод диагностики позволит повысить надежность электроснабжения и сэкономить средства на ремонте оборудования.

Помимо МКЗ распространенным видом повреждений силовых трансформаторов являются дефекты межлистовой изоляции магнитопровода.

Повреждения магнитопровода связаны со следующими причинами: перегревы вихревыми токами или токами в короткозамкнутых контурах из-за повреждения изоляции, соприкосновения со стальными крепежными болтами и шпильками, нарушения схемы заземления; влага в виде водомасляной эмульсии между пластинами, вызывающая коррозию стали; наличие посторонних токопроводящих частиц, замыкающих пластины; повреждение изоляции крепежных пластин.

Признаками повреждения являются: ухудшение состояния масла (уменьшение температуры вспышки, повышение кислотности); увеличение потерь холостого хода; появление газа в газовом реле, потемнение масла вследствие крекинг-процесса, появление резкого запаха.

В качестве способов выявления повреждения магнитопровода выделяют: внешний осмотр при вынутой активной части; увеличение потерь в опыте холостого хода; измерение напряжений между крайними пластинами возбужденного магнитопровода; хроматографический анализ масла; проверка изоляции стяжных болтов, шпилек или бандажей мегаомметром.

Температура – самое универсальное отражение состояния любого оборудования. При практически любом, отличном от нормального, режиме работы трансформатора изменение температуры является самым первым показателем, указывающим на неисправное состояние.

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.

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.

Наличие короткозамкнутых витков можно определить индукционным методом. Этот метод основан на

определении наличия электромагнитного поля вокруг короткозамкнутого витка, которое создается в нем индуктированным током короткого замыкания. На ряде электроремонтных предприятий применяют комплект приборов системы Порозова. Прибор обнаруживает короткозамкнутые витки в обмотках любого диаметра и позволяет точно установить наличие и место замыкания. Однако для выполнения данного вида диагностики требуется отключение и разборка трансформатора.

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 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 неплановому выходу из строя трансформатора и отключению потребителей от системы электроснабжения.

Данное повреждение может быть вызвано недостаточной изоляцией переходных соединений, продавливанием изоляции витков при опрессовке или из-за заусенцев на меди витка, механическими повреждениями изоляции, естественным износом, перенапряжениями, электродинамическими усилиями при коротких замыканиях и т. д.

По замкнутым накоротко виткам проходит ток большей силы, причем ток в фазе может лишь незначительно возрасти; изоляция витков быстро сгорает, могут выгорать сами витки, причем возможно разрушение и соседних витков. При развитии замыкания между витками обмоток может перейти в междуфазное короткое замыкание (КЗ).

Если число замкнутых витков значительно, то в короткий промежуток времени обмотки и магнитопровод сильно нагреваются. Замыкание между витками также сопровождается уменьшением сопротивления фазы, где возникло замыкание.

В качестве объекта исследования использовались однофазные трансформаторы малой мощности с воздушным охлаждением. В ходе эксперимента при изменении нагрузки трансформатора выполнялось межвитковое замыкание различного числа витков на одной фазе первичной и вторичной обмоток. Для измерения напряжений, токов и мощностей, на первичную и вторичную обмотки были подключены энергометры PZEM-004t-100a, которые через интерфейс USB-UART были подключены к персональному компьютеру.

Отслеживая в режиме реального времени возможные текущие сбои, можно снизить количество неплановых 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.

В то же время проводился анализ информации с использованием следующих данных:

- напряжений и токов первичной и вторичной обмоток;
- активные, реактивные и полные мощности по высокой и низкой сторонам 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 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.

Более подробно полученные результаты представлены в статьях [4, 5].

Рассмотрим более подробно технологию использования сверточных нейронных сетей и анализ данных на примере идентификации межвитковых коротких замыканий в трансформаторе. Подготовка и детектирование изображений основана на реализации алгоритма, блок-схема которого представлена на рисунке 1.

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 трансформаторам.

Цели данного алгоритма заключаются в следующем:

- а) формирование изображений, представляющих собой зависимости отношений напряжений, токов и мощностей от времени (рисунок 2);
- б) направление изображений на сверточные нейронные сети;
- в) обработка данных сетей и формирование заключения.

Рассмотрим более подробно основные этапы блок-схемы.

1 Поступившие от датчиков результаты измерений напряжений, активных мощностей и токов первичной и вторичной обмоток делятся друг на друга. Далее полученные отношения записываются в специальные инициализированные массивы, размер которых равен ширине изображения. Производится циклический сдвиг каждого из массивов на одну позицию влево, а затем производится запись отношения в последнюю ячейку массива. Эта операция повторяется до тех пор, пока

массивы не будут заполнены исходными данными полностью.

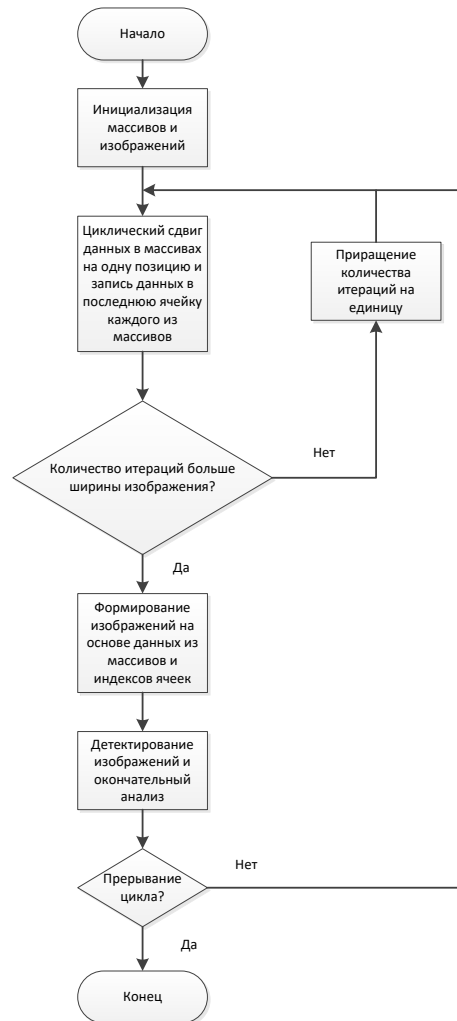


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма

2 После того как массивы полностью заполнятся исходными данными, необходимо в каждом из них найти максимальное и минимальное значения для определения границ графиков зависимостей. Далее переводятся значения каждой ячейки массивов в координаты пикселей по оси абсцисс.

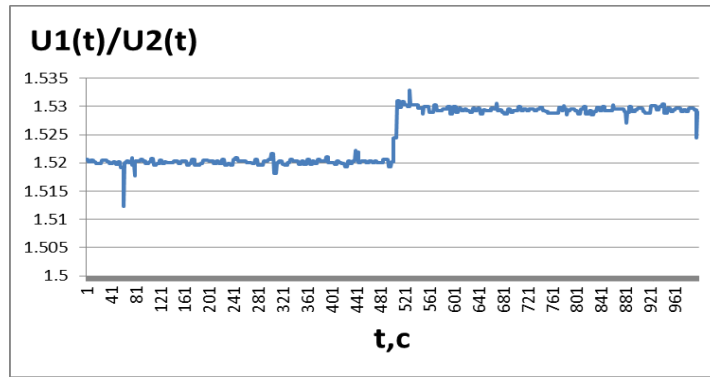
Координатами пикселей по оси ординат являются индексы ячеек каждого из массивов. По получившимся координатам производится изменение цвета пикселей на изображении с белого на черный.

После изменения цвета пикселей необходимо выполнить прорисовку вертикальных линий между соседними пикселями. В результате получаются изображения, которые передаются на входы сверточных нейронных сетей.

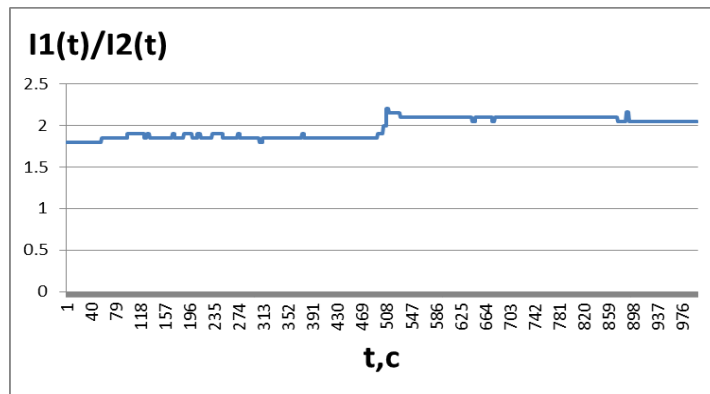
В данном исследовании используются три нейронные сети. Первая нейронная сеть отвечает за идентификацию МКЗ по отношению напряжений, вторая отвечает за идентификацию по отношению токов, а третья – по отношению мощностей.

Примеры изображений, которые передаются на первую сверточную нейронную сеть, отвечающую за идентификацию по отношению напряжений, приведены на рисунке 3.

a)



б)



в)

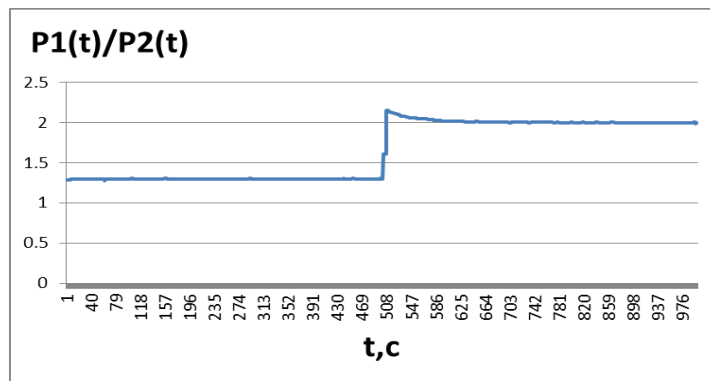


Рисунок 2 – Зависимости отношений от времени:
a – напряжений; *б* – токов; *в* – мощностей

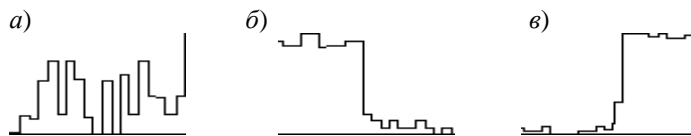


Рисунок 3 – Изображения на входе нейронной сети при нормальной работе трансформатора (*a*), при МКЗ на первичной обмотке (*б*), при МКЗ на вторичной обмотке (*в*)

Аналогично работают сверточные нейронные сети, отвечающие за идентификацию по отношению токов и по отношению активных мощностей.

Каждая нейронная сеть на выходе выдает номер класса, к которому относится неисправность трансформатора (таблица 1).

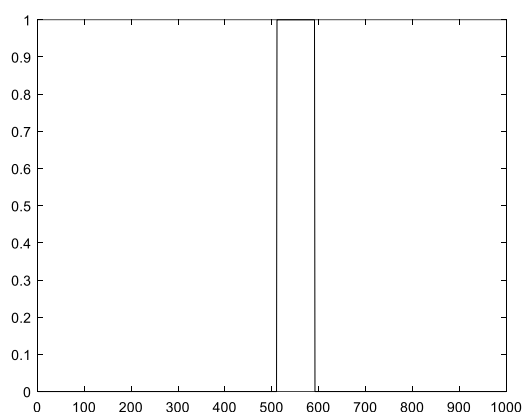
После детектирования изображений тремя нейронными

сетями производится окончательный анализ, результатом которого является одно из чисел: 0, 1 или 2. Данные числа обозначают те же неисправности, что и номера классов на выходе из первой нейронной сети. В ходе исследования были построены графики (рисунок 4), где по вертикальной оси были отложены номера неисправностей, а по горизонтальной – время, измеряющееся в секундах.

Таблица 1 – Неисправности в трансформаторе

Номер неисправности	Нейронная сеть	
	первая	вторая и третья
0	Нормальная работа	Нормальная работа
1	МКЗ на первичной обмотке трансформатора	МКЗ
2	МКЗ на вторичной обмотке трансформатора	–

а)



б)

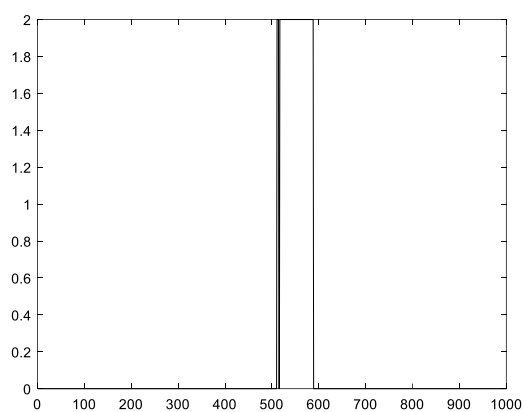


Рисунок 4 – Результаты проведения испытаний при обнаружении МКЗ на первичной (а) и на вторичной (б) обмотках

Как видно из данных графиков рисунка 4, МКЗ наступает после пятисотой секунды исследования.

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 – в снижении неплановых отказов, заблаговременном предупреждении о развитии повреждения.

Список литературы

- 1 Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
- 2 Bundzel, M. Object identification in dynamic images based on the memory-prediction theory of brain function / M. Bundzel, S. Hashimoto // Journal of Intelligent Learning Systems and Applications. – 2010. – Vol. 2, no 4. – P. 212–220.
- 3 Буй, Т. Т. Ч. Алгоритмическое и программное обеспечение для классификации цифровых изображений с помощью

вейвлет-преобразования Хаара и нейронных сетей / Буй Тхи Тху Чанг, Фан Нгок Хоанг, В. Г. Спицын // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 5. – С. 103–106.

4 Пехота, А. Н. Диагностирование межвитковых коротких замыканий трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громько // Энергоэффективность. – 2020. – № 2. – С. 24–28.

5 Пехота, А. Н. Диагностика трансформаторов с помощью сверточных нейронных сетей / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громько // Энергоэффективность. – 2021. – № 2. – С. 30–36.

6 Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций : учеб. пособие / А. И. Хальясмаа [и др.]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 64 с.

7 Паздников, И. Л. Для проверки катушек индуктивности / И. Л. Паздников // Радио. – 1990. – № 7. – С. 68–69.

8 Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.

Получено 18.10.2021

V. N. Galushko, A. N. Evdasev, I. L. Gromyko. Improving the diagnosis of transformers using convolutional neural networks.

The methods of diagnosing various transformer defects and the method of their classification using convolutional neural networks are considered. The use of these neural networks will allow real-time mode to analyze information, classify various deviations and diagnose defects. The paper provides an analysis of information for the classification of such damage such as inter-touch closures, semi-phase short circuits, the defects of the interstic insulation of the magnetic pipeline, the local closure of the steel plates and the "fire" in the steel.