

УДК 621.31

**ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

канд. техн. наук, доц. А. Н. ПЕХОТА, канд. техн. наук, доц. В. Н. ГАЛУШКО, И. Л. ГРОМЫКО
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)
V. Galushko ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4833-8820>;
I. Gromyko ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9339-6363>

Обосновано применение сверточных нейронных сетей с целью контроля состояния трансформаторов. Проанализированы возможные повреждения трансформаторов: межвитковые замыкания, междуфазные короткие замыкания, дефекты межлистовой изоляции магнитопровода, местное замыкание пластин стали и «пожар» в стали. Разработаны сверточные нейронные сети для диагностики состояния трансформаторов в режиме реального времени с целью анализа поступающей информации, классифицирования различных отклонений и диагностирования дефектов. Полученные результаты позволяют снизить количество unplanned отказов путем заблаговременного информирования о развитии повреждения.

Ключевые слова: *сверточная нейронная сеть, диагностика, классификация, трансформатор, unplanned отказ, короткое замыкание обмоток, магнитопровод, пожар в стали, моделирование.*

Введение. Одним из самых сложных и одновременно перспективных направлений в информационных технологиях является распознавание и анализ объектов или процессов на изображениях. Анализ методов распознавания объектов или процессов на изображениях предполагает использование искусственных нейронных сетей в связи с тем, что они слабочувствительны 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 персептрон, 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, что увеличивает вычислительную сложность решения задачи и время выполнения;
- отсутствует инвариантность к изменениям масштаба изображения и других геометрических искажений входного сигнала.

Следовательно, для решения задачи выделения области расположения исследуемых графических процессов *актуально* 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, не выводя их из работы. Это предоставляет дополнительные возможности в обеспечении низкого уровня аварийности и соблюдения режимов бесперебойного электроснабжения, минимизируя тем самым экономические и экологические издержки, а также реальный ущерб для потребителей. При этом затраты на внедрение технологии нейромоделирования относительно невелики (например, применение одноплатных компьютеров), а эффект от применения будет существенным.

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.

Описание методов диагностики электрооборудования приведено в [4]: рассмотрены основные методы неразрушающего контроля электротехнического оборудования (тепловой, магнитный, электрический и т.д.).

В масле содержится около 70% информации о состоянии маслонаполненного оборудования. Результаты анализа масла трансформатора позволяют судить о состоянии изоляции обмоток. Выявить их неисправность можно по таким показателям качества масла, как содержание водорастворимых кислот и температура вспышки в закрытом тигле [5].

Одним из основных факторов, определяющих срок службы изоляции электрических машин, является старение изоляции под действием температуры [6, с. 19]. К электрическому методу неразрушающего контроля для диагностирования электрооборудования можно отнести метод измерения частичных разрядов (ЧР). Внешним проявлением процессов развития ЧР является нагрев изоляции.

Основная задача исследования – диагностирование и классификация неисправности, анализ предаварийного состояния с указанием причины с применением сверточных нейронных сетей.

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.

Основная часть. Кратко проанализируем наиболее распространенные повреждения силовых трансформаторов, возможные причины их возникновения, традиционные способы выявления, а также приведем результаты экспериментальных исследований по выбору диагностируемых параметров для обучения и дальнейшей работы нейронной сети.

Условно сгруппируем повреждения следующим образом:

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

1. 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.

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. Также данный вид повреждения приводит к изменению сопротивления отдельных фаз трехфазных трансформаторов. Также изменяются сопротивления изоляции между обмотками и корпусом, хромотографический анализ масла, результаты анализа трансформаторного масла на электрическую прочность, пофазные измерения потери холостого хода. Внешний осмотр на наличие подгаров изоляции витков при вынутой активной части также актуален при анализе данного повреждения.

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 в виде заусенцев, внутренних раковин, эксплуатационные дефекты, дефекты при капитальном ремонте). В качестве основных причин межвиткового короткого замыкания (МКЗ) выделяют: разрушение витковой изоляции из-за длительных перегрузок и недостаточного охлаждения, понижение уровня масла, попадание влаги или грязи внутрь, перенапряжения и деформации обмоток при МКЗ.

Признаками появления межвитковых замыканий 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.

Межвитковые замыкания 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.

2. Повреждения магнитопровода обусловлены 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 и шпилек.

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

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

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 индуцированным 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 проанализировать данные без отключения и выявить повреждения на ранней стадии.

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. 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 экспериментов при изменяющейся нагрузке 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, которые через интерфейс USB-UART соединялись с компьютером.

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

Условия проведения экспериментов:

- МКЗ осуществлялись в режиме реального времени на первичной и вторичной обмотках однофазного трансформатора с воздушным охлаждением;
- МКЗ выполнялись на двух, пяти и десяти витках;
- полученные данные регистрировались с помощью приборов и датчиков.

В ходе экспериментов были пранализированы следующие параметры:

- напряжения и токи первичной и вторичной обмоток;
- активные, реактивные и полные мощности по высокой и низкой стороне трансформатора;
- состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции с помощью устройства «электронный нос»;
- температура, измеренная в зоне КЗ и на удалении 5 см от обмоток.

Кроме того, проводилось осциллографирование и разложение по гармоникам кривых тока и напряжения; было 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; с помощью RLC-метра определялись параметры обмоток трансформатора.

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.

Более подробно полученные результаты представлены в [7; 8].

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

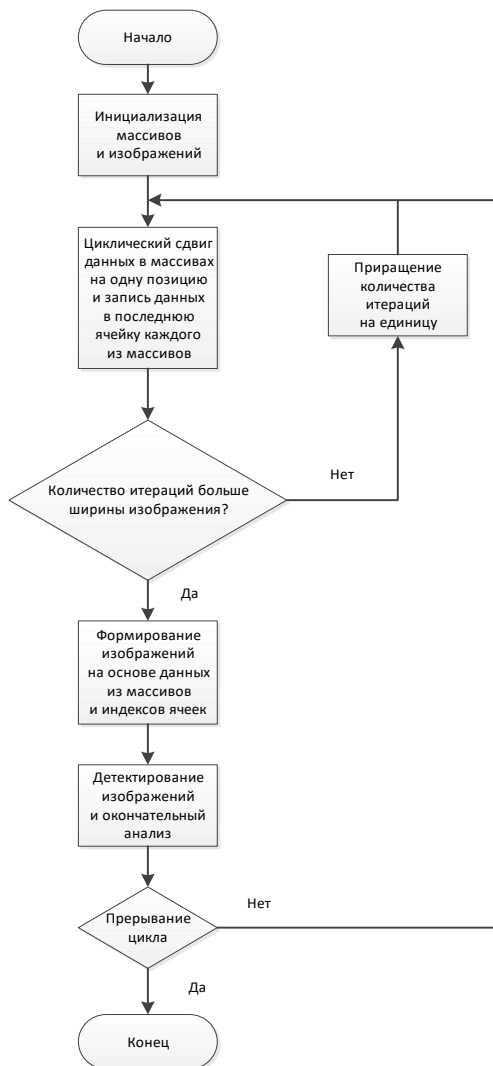
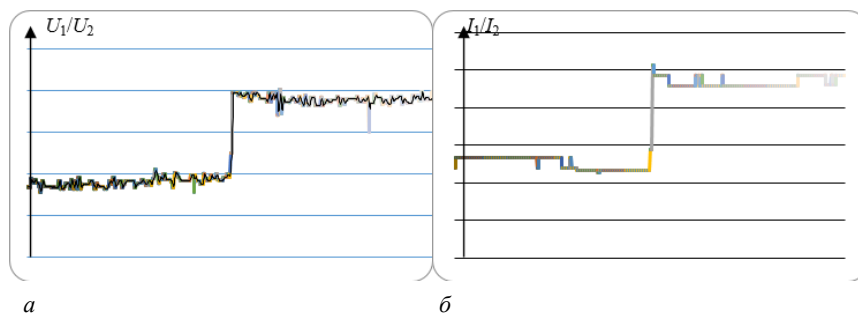


Рисунок 1. – Блок-схема алгоритма

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 анализировать данные. Такой вид использования данных позволяет установить множественные взаимосвязи между отдельными факторами и, применяя нормированные данные, использовать их для быстрой настройки других силовых трансформаторов.

Цели данного алгоритма заключаются в следующем:

- 1) сформировать изображения, представляющие собой зависимости отношений напряжений, токов и мощностей от времени (рисунок 2);
- 2) направить изображения на сверточные нейронные сети;
- 3) обработать данные сетей и сформировать заключение.



а

б

а – напряжений; б – токов

Рисунок 2. – Зависимости отношений от времени

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.

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

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

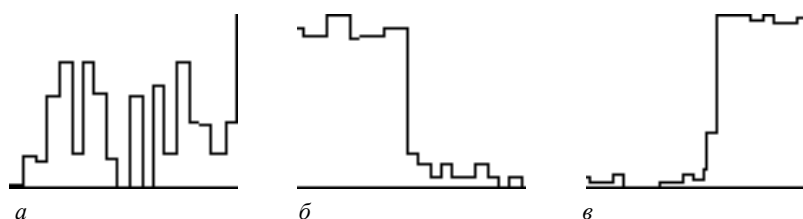


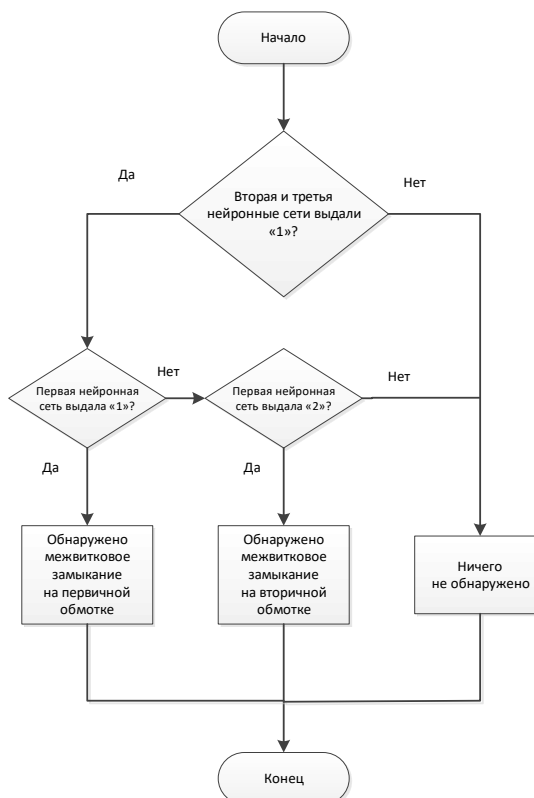
Рисунок 3. – Изображения, подаваемые на вход первой нейронной сети при нормальной работе трансформатора (а), при МКЗ на первичной обмотке (б), при МКЗ на вторичной обмотке (в)

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

Каждая нейронная сеть на выходе выдает номер класса, к которому относится неисправность трансформатора.

После детектирования изображений тремя нейронными сетями производится окончательный анализ, алгоритм которого приведен на рисунке 4.

Рисунок 4 – Алгоритм анализа результатов с нейронных сетей



С помощью видеокamеры в режиме реального времени отслеживалась ситуация в трансформаторной подстанции на наличие посторонних: сигнал отправлялся при обнаружении на территории ТП и РП людей, грызунов и птиц (рисунки 5 и 6).



Рисунок 5. – Пример фотофиксации посторонних объектов (птиц и грызунов) в трансформаторной подстанции

Training on single CPU.

Initializing input data normalization.

Epoch	Iteration	Time Elapsed (hh:mm:ss)	Mini-batch Accuracy	Mini-batch Loss	Base Learning 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

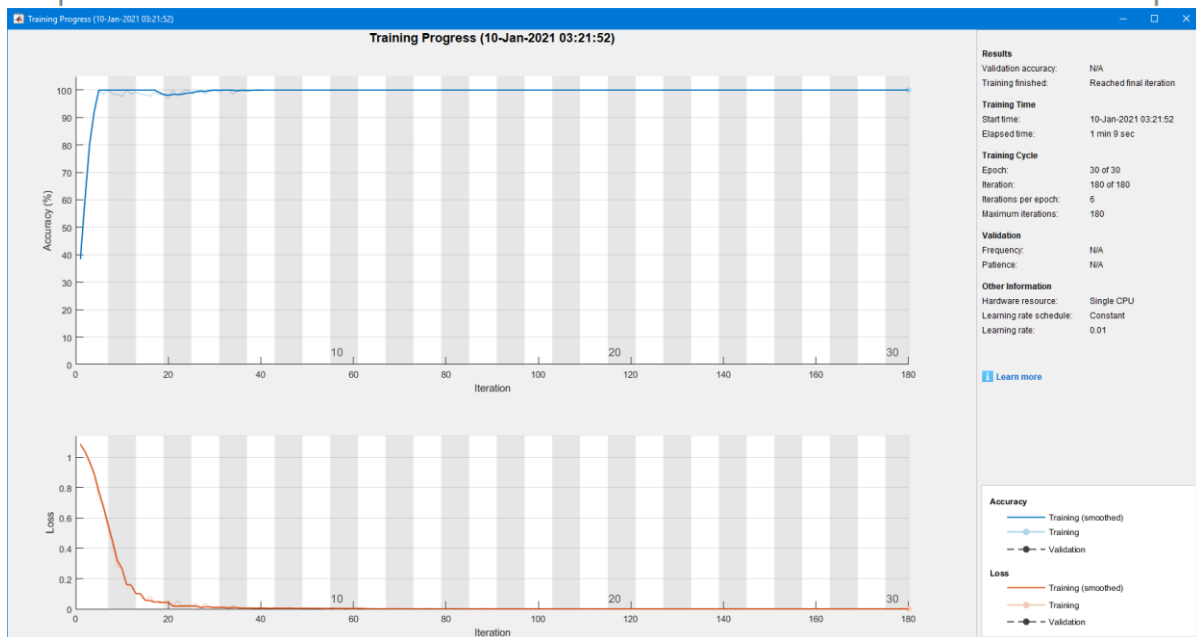


Рисунок 6. – Результаты применения сверточных нейронных сетей

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

ЛИТЕРАТУРА

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 // J. of Intelligent Learning Systems and Applications. – 2010. – V. 2. – № 4. – P. 212–220.
3. Буй Тхи Тху Чанг. 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. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций : учеб. пособие / А. И. Хальясмаа [и др.]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 64 с.
5. Паздников, И. Л. Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дроселей / И. Л. Паздников // Радио – 1990. – № 7. – С. 68–69.
6. Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин : письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. – СПб. : СЗТУ, 2004. – 56 с.
7. Пехота, А. Н. Диагностирование межвитковых коротких замыканий трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2020. – № 2. – С. 24–28.
8. Пехота, А. Н. Диагностика трансформаторов с помощью сверточных нейронных сетей / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2021. – № 2. – С. 30–36.

Поступила 09.11.2021

TECHNOLOGY FOR THE USE OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS IN DIAGNOSING TRANSFORMER STATUS

A. PEHOTA, V. GALUSHKO, I. GROMYKO

The use of convolutional neural networks for the purpose of monitoring the state of transformers is justified. Possible damage to transformers is analyzed: inter-turn short circuits, phase-to-phase short circuits, defects in the interlayer insulation of the magnetic circuit, local closure of steel plates and "fire" in steel. Convolutional neural networks have been developed to diagnose the state of transformers in real time in order to analyze incoming information, classify various deviations and diagnose defects. The results obtained make it possible to reduce the number of unscheduled failures by informing in advance about the development of damage.

Keywords: coupling neural network, diagnostics, classification, transformer, non-planning failure, short closure of windings, magnetic circuit, fire in steel, modeling.