

УДК 656.1

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

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИБОРНОГО УЧЕТА ПРИ МЕЖВИТКОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Рассмотрены методы диагностики различных дефектов трансформатора и способ их классификации с помощью нейронных сетей. Применение данных нейронных сетей 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.

Экономическая ситуация, сложившаяся в последние годы в энергетике, заставляет принимать меры, направленные на увеличение сроков эксплуатации различного оборудования. Решение задачи по оценке технического состояния электротехнического оборудования электрических сетей в значительной мере связано с внедрением эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики.

Основной целью технической диагностики являются в первую очередь распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации, и как следствие, повышение надежности и оценка остаточного ресурса оборудования.

Неотъемлемым элементом при централизованном электроснабжении является трансформатор. Выход из строя силового трансформатора может привести к созданию аварийных ситуаций, перебою электроснабжения, массовому недоотпуску продукции, сопровождающимся значительным экономическим и экологическим ущербом. Поэтому, контроль состояния трансформатора является важной задачей.

Диагностика трансформаторов сегодня довольно долгое и затратное мероприятие. Часто необходимо провести целый ряд непростых испытаний, так как со-

временные 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 к прогрессирующему ухудшению свойств изоляции.

Основными причинами возникновения межвитковых замыканий в трансформаторе являются старение изоляции, перенапряжения или низкая организация производства и эксплуатации. Классификация факторов, влияющих на возникновение замыканий, приведена на рисунке 1. Приведенная классификация показывает, что причины нарушения изоляции могут быть связаны или могут проявляться обособленно, что затрудняет поиск решения по защите обмоток трансформаторов от межвитковых замыканий [1].

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

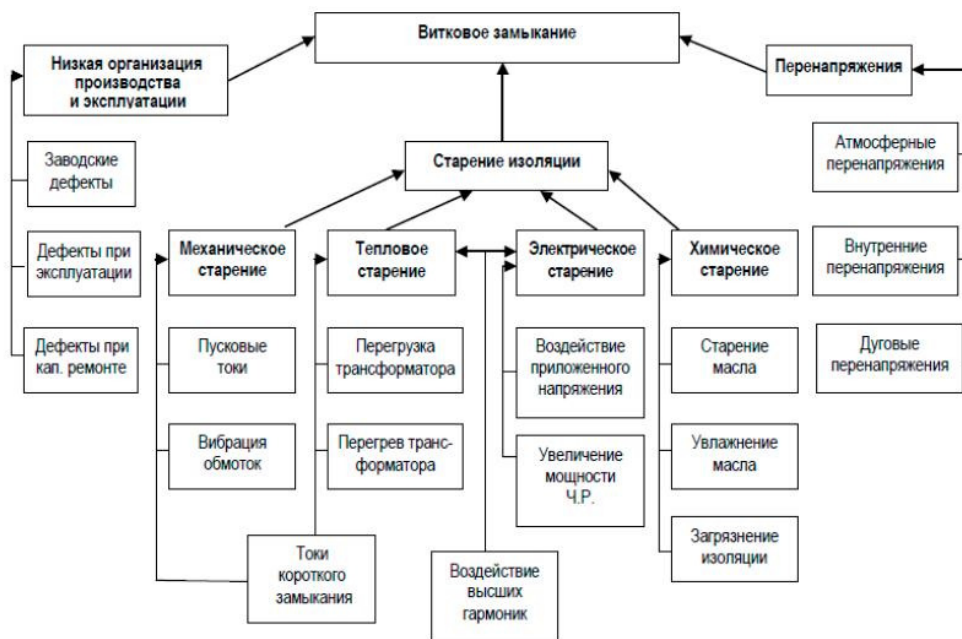


Рисунок 1 – Классификация факторов, влияющих на возникновение межвитковых замыканий трансформаторов

В [2] описаны закономерности старения изоляции. Также было рассмотрено старение изоляции под действием температуры, электрического поля, механических нагрузок, влаги и химически активных веществ. В работе отмечается, что скорость старения изоляции определяется в основном эксплуатационными условиями и свойствами применяемых материалов, а на образование местных дефектов оказывают значительное влияние уровень технологии и общей культуры производства, условия хранения трансформатора, его транспортировка и монтаж.

Описание методов диагностики электрооборудования приведено в [3], где рассмотрены основные методы неразрушающего контроля электротехнического оборудования (тепловой, магнитный, электрический и т. д.).

В масле содержится около 70 % информации о состоянии маслonaполненного оборудования. Результаты анализа масла трансформатора позволяют судить о состоянии изоляции обмоток. Выявить неисправность изоляции обмоток позволяют такие показатели качества масла, как содержание водорастворимых кислот и температура вспышки в закрытом тигле [3].

Среди различных факторов, определяющих срок службы изоляции электрических машин, одним из основных является старение изоляции под действием температуры [2, 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 [3].

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).

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 перспективе еще и прогнозировать остаточный срок службы изоляции. Подобный метод диагностики позволит повысить надежность электроснабжения и сэкономить средства на ремонте оборудования.

Температура – самое универсальное отражение состояния любого оборудования. При практически любом, отличном от нормального, режиме работы трансформатора изменение температуры является самым

первым сигналом, 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.

В [4] 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 [5] представлена электрическая схема пробника для проверки обмотки трансформаторов и других катушек индуктивностью от 200 мкГн до 2 Гн. Данная схема не намного 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.

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.

Сегодня искусственный интеллект быстро развивается, поэтому существует большое количество литературы, описывающей работу нейронных сетей и варианты применения их на практике [6–8]. В [9] рассмотрено применение нейронных сетей для поддержания требуемой относительной скорости термического износа изоляции для продления срока службы трансформаторного оборудования за счет управления системой охлаждения. При этом тема применения нейромоделирования для диагностики межвитковых замыканий трансформаторов в литературе не рассматривалась.

Использование данной технологии для диагностики межвитковых замыканий позволит контролировать состояние обмотки трансформатора в режиме реального времени, не выводя его из работы. Затраты на использование данной технологии относительно невелики, а эффект может быть существенным.

В силовых трансформаторах с масляным охлаждением межвитковое короткое замыкание 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.

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. Отслеживая в режиме реального времени возможные текущие сбои

можно снизить количество неплановых ремонтов и отказов указанного оборудования.

При проведении экспериментальных исследований (рисунок 2) по проведению межвитковых коротких замыканий (КЗ) были предусмотрены следующие мероприятия:

- МКЗ проводились в режиме он-лайн 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, а также анализ информации следующих данных:
 - напряжений и токов обмоток;
 - активные, реактивные и полные мощности по высокой и низкой сторонам трансформатора;
 - анализировался состав воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции с помощью устройства “электронный нос” (рисунок 3, а);
 - измерялась температура в зоне КЗ и на удалении 5 см от обмоток (рисунок 3, б);
 - 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 с 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.

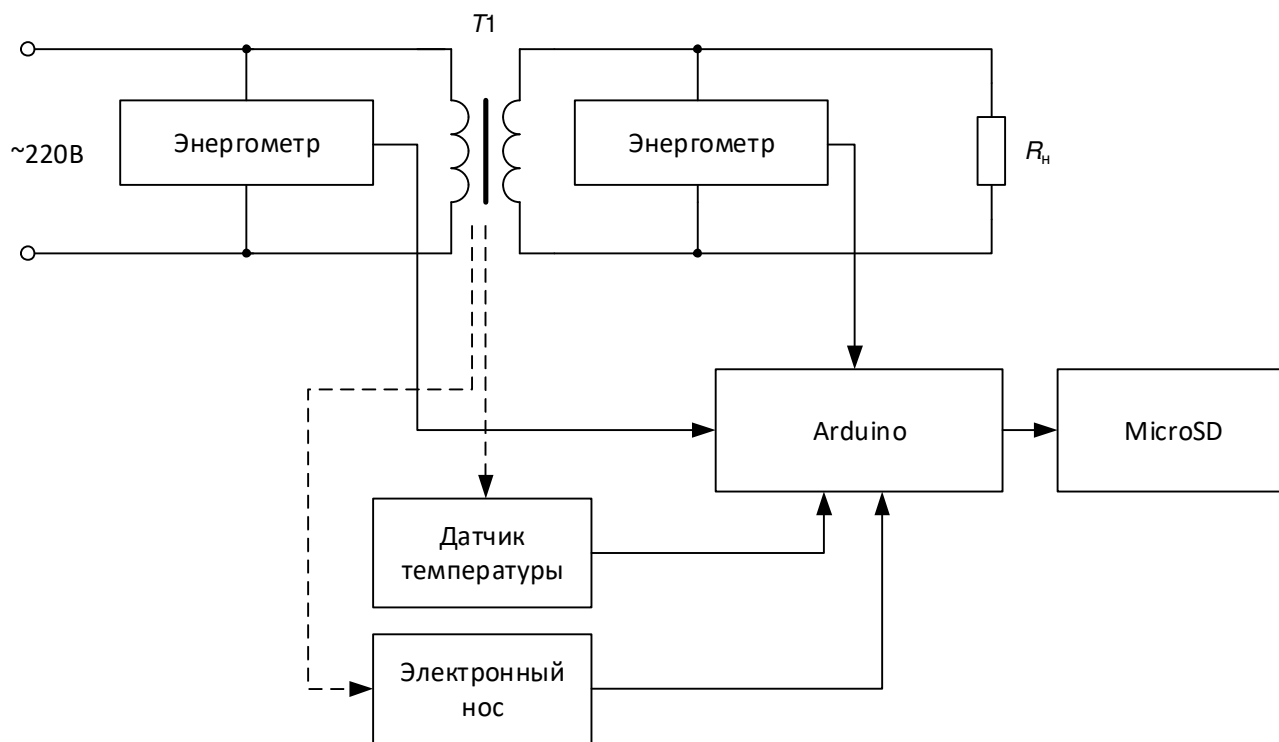


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки по исследованию МКЗ трансформатора

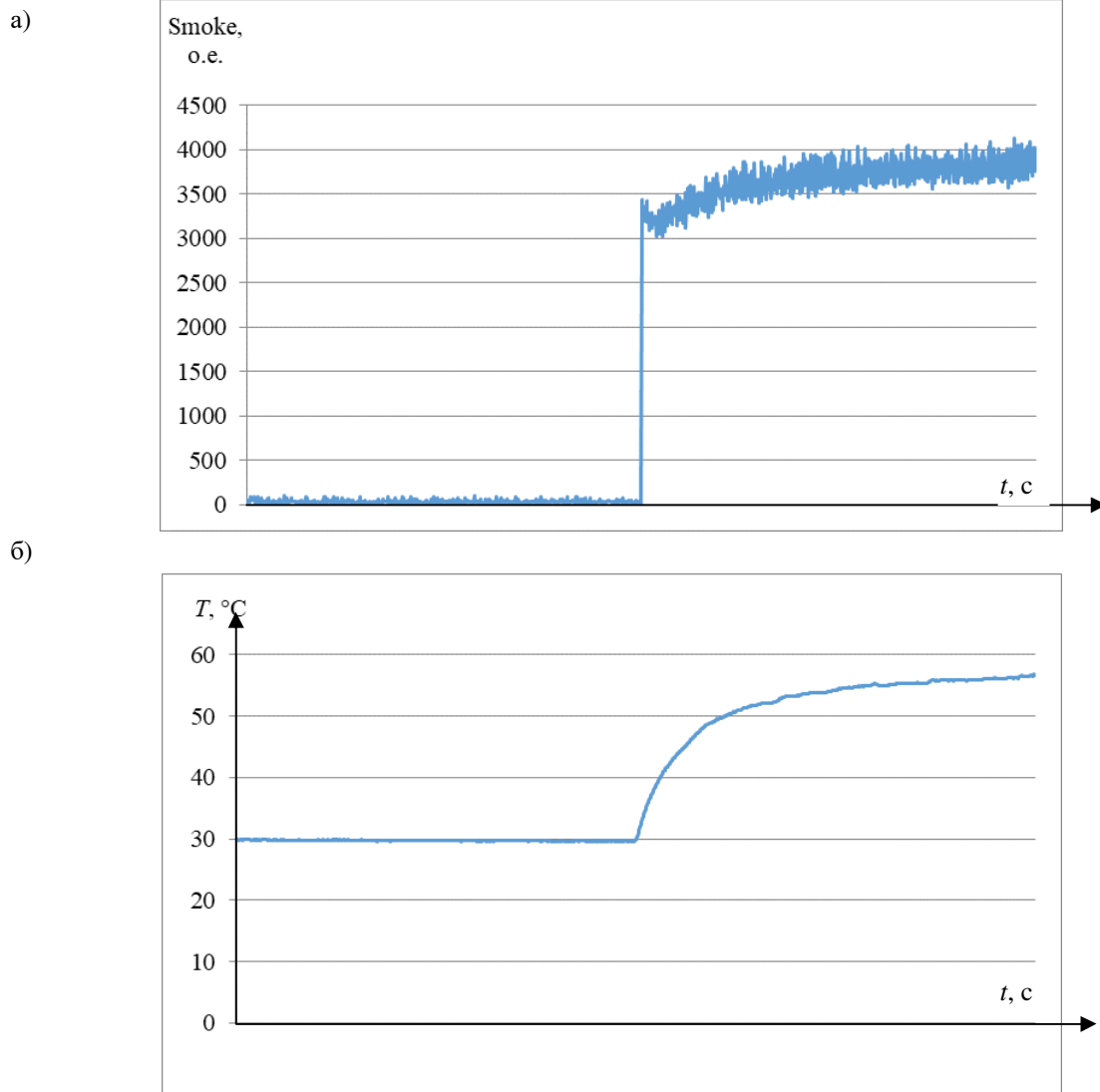


Рисунок 3 – График зависимости концентрации дыма (а) и температуры (б) при МКЗ

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 определить МКЗ (рисунок 4).

В опыте межвиткового замыкания на первичной обмотке количество измерений намного меньше из-за очень быстрого роста температуры и как следствие большей опасности вывода из строя обмотки трансформатора, чем при межвитковом замыкании на вторичной обмотке и нормальной работе.

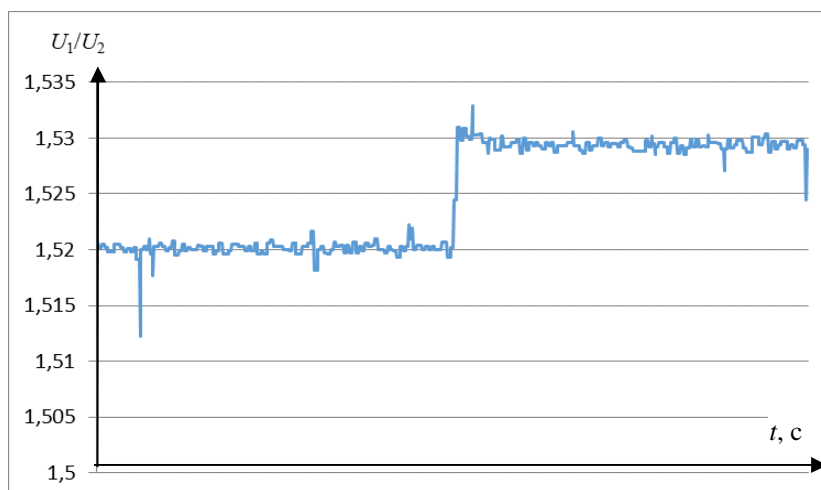


Рисунок 4 – График зависимости отношения напряжений при МКЗ

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

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.

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 °С/мин);

- отношение токов, напряжений и активных мощностей первичной и вторичной обмоток;

- состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции.

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.

Применение нейромоделирования в диагностике систем обеспечения энергоснабжения позволит контролировать состояние трансформаторов в режиме реального времени, не выводя трансформатор из работы. Это предоставляет дополнительные возможности в обеспечении низкого уровня безаварийности и соблюдения

режимов бесперебойного электроснабжения, что сопровождается, 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 ее применения будет существенной.

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. – С.172–174.

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

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

4 Кривонос, А. В. Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дросселей / А.В. Кривонос // Радио. – 1968. – № 4 – С. 56.

5 Паздников, И. Л. Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дросселей / И. Л. Паздников // Радио. – 1990. – № 7. – С. 68–69.

6 Викторова, Е. В. Применение нечетких нейронных сетей для технической диагностики дорожных машин / Е. В. Викторова // Вестник ХНАДУ. – 2012. – Вып. 56. – С. 98–102.

7 Хаханов, В. И. Применение искусственных нейронных сетей для диагностирования цифровых систем / В. И. Хаханов, О. В. Щерба // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2010. – № 5. С. 208–213.

8 IBM Business Consulting Services. Построение интеллектуальной электрической сети для передающих и распределительных энергокомпаний. – М., 2005. – 20 с.

9 Бережной, А. В. Применение нейронных сетей для моделирования относительной скорости износа изоляции трансформаторного оборудования / А. В. Бережной, Е. Г. Дашевский // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. – 2010. – № 5. – С. 44–46.

Получено 11.11.2020

V. N. Galushko, I. L. Gromyko, S. L. Zaytsev. Increasing the reliability of transformers by means of comprehensive analysis of data of instrument measurement in inter-circular short circuits.

The methods of diagnostics and signs of the appearance of turn-to-turn short circuits in a single-phase transformer are considered. An integrated approach has been developed for detecting turn-to-turn short circuits in single-phase transformers. Instrumental accounting of data for determining turn-to-turn closures and mathematical regularities for diagnosing this malfunction are proposed.