

УДК 621.314

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

## ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ТРАНСФОРМАТОРОВ И ТЕХНОЛОГИЯ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Рассмотрены методы диагностики различных дефектов трансформатора и способ их классификации с помощью сверточных нейронных сетей. Применение данных нейронных сетей позволит в режиме реального времени анализировать информацию, классифицировать различные отклонения и диагностировать дефекты. Организованный таким образом диагностический контроль имеет своей целью предотвращение аварийного отказа оборудования, определения его состояния и прогнозирование остаточного ресурса. Использование сверточных нейронных сетей в режиме реального времени позволяет классифицировать различные отклонения, диагностировать виды предаварийного и аварийного состояния.

Сложившаяся к настоящему времени ситуация в системе энергообеспечения потребителей электрической энергией, как у нас в стране, так и за ее пределами, характеризуется следующими тенденциями:

- увеличением номенклатуры эксплуатируемого электрического оборудования и повышением требований к экономичности, надежности, экологичности;

- «старением» трансформаторного оборудования (более 60 % трансформаторов, установленных в распределительных сетях, эксплуатируются 25 лет и более [1]). В связи с этим появляется важная задача – переход от планово-предупредительного ремонта оборудования к системе технического обслуживания на основе оценки его фактического состояния, который позволит сделать проводимый ремонт более целесообразным и технически обоснованным.

Определение фактического состояния оборудования основано на измерении значений контролируемых параметров, которые либо сравниваются с аварийными уровнями, либо нейронная сеть сигнализирует о предаварийном состоянии. Такой диагностический контроль имеет своей целью предотвращение аварийного отказа оборудования, определения его состояния и прогнозирование остаточного ресурса.

Поэтому сегодня актуальной задачей становится управление состоянием эксплуатируемого оборудования и прогнозирование его состояния на относительно

длительный период. Также применение сверточных нейронных сетей позволит контролировать состояние трансформаторов в режиме реального времени, не выводя их из работы, что предоставляет дополнительные возможности в обеспечении низкого уровня безаварийности и соблюдения режимов бесперебойного электропитания и сопровождается, как правило, значительными экономическими издержками или реальным ущербом для потребителей.

Данная технология распространяется на однофазные трансформаторы с воздушным охлаждением, используемые в цепях автоматической блокировки и продольного железнодорожного электроснабжения. Оборудование наиболее целесообразно подключать в систему электроснабжения, содержащую большое количество таких трансформаторов, сосредоточенных на небольшой площади (горка, станция, горловина и т. д.). Особенно актуально применять данную диагностическую систему при наличии трансформаторов, у которых срок службы составляет более 15 лет.

Опишем основное оборудование, архитектуру операционной системы диагностического комплекса и технологию ее применения.

Для идентификации неисправностей в трансформаторе было разработано микропроцессорное устройство (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид микропроцессорного устройства

Данное устройство включает следующее оборудование: датчики; часы реального времени; модернизированный под микропроцессорное устройство пробник Паздникова; платы Z7-Lite 7010.

В качестве датчиков применяются следующие.

1 Датчик температуры MLX90614ESF (более трех). Это инфракрасный термометр для бесконтактных измерений температуры. Датчик измеряет температуру объекта бесконтактным способом и температуру

окружающей среды на кристалле датчика. Термометр поставляется с заводской калибровкой и цифровым выходом SMBus с разрешением 0,02 °C. Можно настроить цифровой выход на режим широтно-импульсной модуляции для непрерывной передачи измеренной температуры в диапазоне от -20 до 120 °C с разрешением 0,14 °C [2].

2 Датчик температуры, давления и влажности BME280.

3 Энергометры PZEM-004t-100A (шесть). Данный энергометр позволяет измерять переменные ток, напряжение, активную мощность, электроэнергию, частоту.

4 Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ADS1115. Это 16-разрядный аналогово-цифровой преобразователь с четырьмя выходами для преобразования аналогового сигнала в цифровой. АЦП используется для подключения к микропроцессорному устройству газовых датчиков.

Часы реального времени DS3231 помимо отсчета времени могут сохранять его при отключении основного питания при использовании резервного питания.

Пробник Паздникова (рисунок 2 [3]) предназначен для проверки обмоток трансформаторов, дросселей, электродвигателей, реле, магнитных пускателей, контакторов и других катушек. Пробником определяют не только целостность обмотки, но и наличие в ней корот-

козамкнутых витков. Кроме того, пробник может быть использован для проверки проводимости полупроводников и исправности переходов диодов и транзисторов.

В качестве основы микропроцессорного устройства использовалась плата Z7-Lite 7010. Это программно-аппаратная платформа, предназначенная для приема, анализа, хранения и передачи информации. На данной платформе был разработан одноплатный компьютер, который принимает информацию с датчиков, обрабатывает и анализирует ее и затем выводит на экран через локальную сеть получившиеся результаты.

Основой данной платы служит программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) XCZCLG400-1. Для данной интегральной схемы в САПР Vivado 2018.3 был разработан блок-дизайн программной части микропроцессорного устройства (рисунок 3).

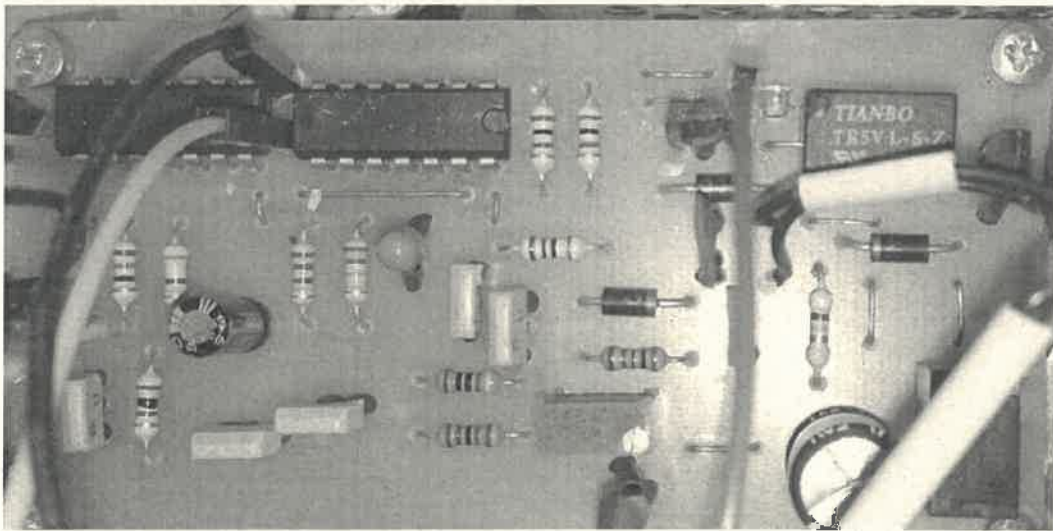


Рисунок 2 – Пробник Паздникова

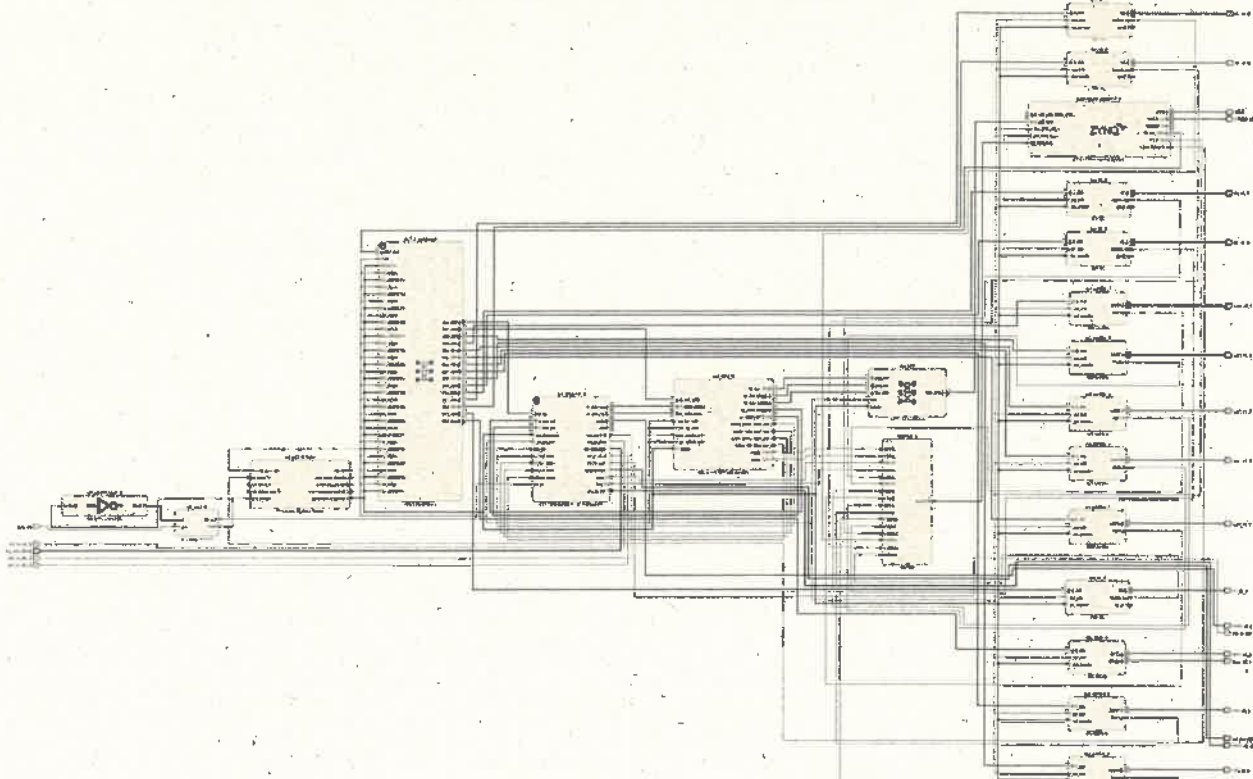


Рисунок 3 – Блок-дизайн программной части для микропроцессорного устройства



Данный блок состоит из нескольких ядер, каждое из которых отвечает за строго определенную задачу.

Софт-процессорное ядро (the processing system IP) является процессором для данного микропроцессорного устройства. Это программный интерфейс системы обработки, который состоит из интегрированной системы обработки (PS) и блока программируемой логики (PL), обеспечивая расширяемое и гибкое решение на одном кристалле. В данном ядре происходит обработка и анализ информации с датчиков.

К ядрам `axi_uartlite_1` – `axi_uartlite_6` подключаются энергометры, а все остальные датчики и дисплей подключаются к ядрам `axi_iic`.

Ядро `axi_gpio` используется для подключения клавиатуры и пробника Паздникова к микропроцессорному устройству.

Для передачи и приема данных по локальной сети используется связка ядер `axi_ethernet` и `axi_dma`.

Для регулирования потоков информации между вышеописанными ядрами и софт-процессорным ядром используется ядро AXI Interconnect.

Таблица 1 – Измеряемые параметры процессов в компонентах трансформаторов

Компонент	Неисправности	Возможные методы измерений и (или) измеряемые параметры	Необходимость отключения
1 Выводы	1.1 Проблемы с контактами	Измерение сопротивления, анализ гармоник	+
	1.2 Механическая деформация		+
2 Изоляция обмоток	2.1 Наличие влаги в твердой изоляции	Измерение емкости, тангенса угла потерь на разной частоте с помощью RLC-метра	+
	2.2 Старение, повышенная влажность		+
	2.3 Частичные разряды		+
3 Обмотки	3.1 КЗ между обмотками или витками	Измерение коэффициента трансформации, температуры, отношений токов и напряжений	-
	3.2 КЗ на землю	Измерение емкости, тангенса угла потерь, полного сопротивления и тока намагничивания	При включении
	3.3 Механическая деформация	Измерение емкости, тангенса угла потерь, полного сопротивления и реактивного тока намагничивания, анализ гармоник	+
4 Сердечник	4.1 Механическая деформация	Измерение емкости, тангенса угла потерь, контроль уровня вибрации	-
	4.2 КЗ пластин сердечника	Ток холостого хода, потери холостого хода, анализ гармоник	+
	4.3 Остаточная намагниченность	Ток холостого хода, потери холостого хода, анализ гармоник, размагничивание	+
	4.4 Ослабление креплений магнитопровода	Ток холостого хода, потери холостого хода и уровня вибрации	-
5 Наличие посторонних объектов	5.1 Появление грызунов или птиц	Видеофиксация	-

Приведем пояснения наиболее значимых измерений, во многом основанных на анализе современных диагностических систем [4].

1 Измерение емкости и коэффициента мощности или тангенса угла.

Потери в диэлектрике вызывают фазовый сдвиг. Значения  $\tan\delta$  для сухой изоляции трансформатора ниже, чем для влажной.

По результатам измерений емкости и коэффициента мощности/тангенса угла диэлектрических потерь можно оценить состояние изоляции силовых трансформаторов вводов. Эти две системы изоляции крайне важны для обеспечения стабильной работы трансформатора.

На основе блок-дизайна была разработана операционная система, использующая ядро Linux 5.15.

Также дополнительно проводилось осциллографирование и разложение по гармоникам кривых тока и напряжения.

На основе RLC-метра определялись параметры обмоток трансформатора.

Видеокамерой отслеживалась в режиме реального времени ситуация в трансформаторной подстанции на наличие посторонних – отправляя сигнал при обнаружении людей на территории ТП и РП, грызунов и птиц.

*Технология применения комплекса диагностического оборудования.*

В таблице 1 представлены измеряемые параметры процессов в компонентах трансформаторов для определения их неисправностей в процессе экспериментальных исследований, которые затем передаются на входы нейронных сетей и аналитической системы. Данный материал позволяет без отключения трансформатора не только однозначно указать развивающийся процесс развития неисправности, но и классифицировать ее.

Высокая электропроводность масла, износ материала и увеличение влагосодержания свидетельствуют об ухудшении свойств изоляции. Эти симптомы также ведут к увеличению потерь, которые можно определить, измерив коэффициент мощности/тангенс угла диэлектрических потерь.

Изменение значений емкости указывает на возможный пробой изоляции между обкладками. Измеряя емкость и потери, можно выявлять износившуюся изоляцию до того, как случится отказ.

Измерения производятся на изоляции между обмотками и на изоляции между обмотками и магнитопроводом. Обмотки закорачиваются, и на одну из них подает-

ся испытательное напряжение. Ток через изоляцию измеряется на противоположной обмотке или сердечнике.

Коэффициент рассеяния вычисляется через тангенс угла  $\delta$  между измеренным значением тока и идеальным значением тока, который протекал бы при отсутствии потерь. Коэффициент мощности — косинус угла  $\phi$ , или  $\cos\phi$ , между выходным напряжением и измеренным значением тока.

Использование частот, отличных от частоты сети, повышает чувствительность измерения, так как многие проблемы сначала проявляются на таких частотах.

Повышение емкости на 10 %, по сравнению с результатами предыдущих измерений, обычно считается тревожным симптомом для высоковольтных вводов. Это означает, что часть изоляции повреждена, а оставшаяся изоляция подвергается слишком высокой нагрузке напряжением.

2 Измерение сопротивления обмоток постоянному току и проверка.

Измерение сопротивления обмотки выполняют для того, чтобы проверить наличие потенциальных повреждений обмоток или проблем с контактами, соединяющими, например, вводы с обмотками и т. д. Сопротивление определяют по результатам измерения тока и падения постоянного напряжения. Обычно пользуются одним из двух распространенных способов проведения испытания: статическим либо динамическим измерением сопротивления обмотки.

Результаты измерения сопротивления обмоток постоянному току не должны отличаться более чем на 1 % от эталонного измерения. Кроме того, разница между фазами обычно составляет менее 2–3 %.

При сравнении результатов измерений сопротивления обмоток следует учитывать поправку на температуру. Обычно эталонная температура составляет 20 или 75 °С.

Обнаруженные обрывы цепи можно перепроверить измерением коэффициента трансформации, а проблемы с контактами — анализом частотного отклика.

3 Измерение коэффициента трансформации.

Коэффициент трансформации по соотношению витков измеряется для проверки основной функции силового трансформатора. Измерения коэффициента трансформации и фазового угла между обмотками позволяют обнаруживать обрывы цепи и короткие замыкания в витках.

Коэффициент трансформации измеряется во время приемочных испытаний, и затем его следует регулярно проверять в рамках планового обслуживания.

Результаты измерения сравниваются с данными в паспортной табличке и показателями по остальным фазам. В соответствии со стандартами IEC 60076-1 и IEEE C57.152 полученные результаты не должны отличаться от номинального коэффициента более чем на 0,5 %.

На результаты измерения могут отрицательно повлиять такие факторы, как намагниченность сердечника и отсутствие подключения к заземлению. Поэтому очень важно убедиться, что сердечник размагничен, а каждая обмотка должным образом заземлена.

Чтобы подтвердить или опровергнуть наличие выявленных проблем, при подозрении короткого замыкания дополнительно выполняется измерение тока намагничивания, при подозрении обрыва цепи — измерение сопротивления обмотки постоянному току.

4 Измерение тока намагничивания.

Ток намагничивания измеряется для оценки состояния межвитковой изоляции обмоток, магнитной цепи трансформатора.

Особенно ценной является возможность выявлять межвитковые замыкания в обмотках. Физическое смещение пластин или серьезное повреждение сердечника может повлиять на показатели магнитного сопротивления и изменить значение тока намагничивания. Изменения в значениях этого параметра могут также свидетельствовать об износе контактов.

Измерение тока намагничивания выполняется без нагрузки. Переменное напряжение подается на одну (обычно первичную) обмотку понижающего трансформатора, а противоположная сторона остается разомкнутой. Амплитуда тока, протекающего в первичной обмотке, прямо пропорциональна энергии, которая требуется для возбуждения трансформатора, т. е. для индуктирования напряжения на вторичной обмотке.

Значения для идентичных фаз не должны отличаться друг от друга более чем на 5–10 %.

5 Измерение частотной характеристики потерь рассеяния для уточнения наличия коротких замыканий между параллельными проводниками.

Испытание состоит в измерении активной составляющей импеданса КЗ на различных частотах. Это единственное электрическое испытание, позволяющее выявлять короткие замыкания между параллельными проводниками и участки нагрева вследствие чрезмерных потерь на вихревые токи.

По результатам измеренного значения тока, напряжения и угловой погрешности вычисляется резистивная составляющая импеданса КЗ при дискретных частотах в диапазоне 15–400 Гц.

Поскольку на высоких частотах больше потерь на вихревые токи, рост резистивной составляющей легко заметить при наложении результатов на диапазон частот.

Анализ результатов отображается в графическом виде и включает сравнение данных пофазных измерений и с результатами предыдущих измерений. Поскольку величина потерь на вихревые токи зависит от частоты, рост импеданса заметен по всему диапазону частот.

Это повышение должно быть одинаковым для всех трех фаз, отображаясь в виде плавной экспоненциальной кривой. Отклонения в пределах 3 %, особенно на высоких частотах, могут быть признаком коротких замыканий параллельных проводников.

6 Измерение тока и потерь холостого хода.

Ток и потери холостого хода при малом напряжении измеряются с целью выявления возможных замыканий магнитопровода на корпус трансформатора, замыканий в магнитопроводе, а также витковых замыканий в обмотках. Испытание проводится в соответствии с ГОСТ 3484.1–88.

Данное испытание проводится одним из первых, так как позволяет сразу же оценить состояние всей электромагнитной системы трансформатора в целом. Испытание рекомендуется проводить при том же напряжении, что и при испытаниях на заводе-изготовителе. Со временем происходит старение межлистовой изоляции, что приводит к увеличению потерь холостого хода по сравнению с заводскими данными. По динамике изменений можно оценить степень старения магнитопровода.



## 7 Гармонический анализ.

Анализ частотного отклика используется для выявления механических или электрических повреждений в обмотках, контактах или сердечниках трансформаторов. Сдвиг или деформация обмоток могут возникнуть, например, в результате коротких замыканий.

Силовые трансформаторы могут быть представлены как сложная электрическая сеть емкостей, индуктивностей и резисторов. Каждая электрическая сеть имеет уникальную частотную характеристику. Синусоидальное напряжение с непрерывно увеличивающейся частотой подается на один конец обмотки трансформатора, и измеряется ответный сигнал на другом конце обмотки. Сравнение входного и выходного сигналов дает уникальную частотную характеристику, которую можно сопоставить с эталонными данными.

Если исходные данные не доступны, для сравнения можно воспользоваться результатами испытания аналогичного трансформатора.

## 8 Анализ диэлектрического отклика.

Анализ диэлектрического отклика применяется для оценки содержания влаги в целлюлозной изоляции и, соответственно, определения ее состояния.

Влага проникает в трансформаторы вследствие старения бумажно-масляной изоляции либо из-за нарушенной герметичности. Это повышает вероятность пробоя изоляции и ускоряет ее старение.

Для оценки состояния этой изоляции выход прибора подключается к высоковольтной обмотке, а вход – к низковольтной. Коэффициент мощности/тангенс угла диэлектрических потерь такой изоляции измеряется в широком диапазоне частот. Полученная в результате кривая отображает данные о состоянии изоляции.

На предельно низких частотах собирается информация о влажности твердой изоляции, а на средних частотах («склон» кривой) можно получить данные о проводимости изоляционной жидкости.

Дальнейшая технология использования сверточных нейронных сетей и анализ данных на примере идентификации межвитковых коротких замыканий в трансформаторе представлены в статьях [5, 6]. Эта технология основывается на данных датчиков, представленных

в виде множества изменяющихся в реальном времени графиков отношений токов, напряжений, мощностей обмоток и т. д. Такой вид использования данных позволяет установить множественные взаимосвязи между отдельными факторами и, применяя нормированные данные, использовать их для быстрой настройки других диагностируемых трансформаторов.

Определение фактического состояния трансформаторов основано на измерении значений контролируемых параметров, которые либо сравниваются с аварийными уровнями, либо нейронная сеть сигнализирует о предаварийном состоянии. Организованный таким образом диагностический контроль имеет своей целью предотвращение аварийного отказа оборудования, определения его состояния и прогнозирование остаточного ресурса. Использование сверточных нейронных сетей в режиме реального времени позволяет классифицировать различные отклонения, диагностировать виды предаварийного и аварийного состояний.

## Список литературы

1 ЮНИТЕР [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – Гомель, 2022. – Режим доступа : <https://uniter.by/insights/>. – Дата доступа : 15.01.2022.

2 Датчик температуры. Chipdip [Электронный ресурс]. – Гомель, 2022. – Режим доступа : <https://www.chipdip.ru/product/8001774956>. – Дата доступа : 15.01.2022.

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

4 Omicron [Электронный ресурс] / Диагностические испытания и мониторинг силовых трансформаторов. – Гомель, 2022. – Режим доступа : <https://www.omicronenergy.com>. – Дата доступа : 03.01.2022.

5 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.

6 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.

Получено 01.02.2022

**I. L. Gromyko, V. O. Belkin, V. N. Galushko. Diagnostic complex of transformers and technology of its application using convolutional neural networks.**

Methods for diagnosing various transformer defects and a method for their classification using convolutional neural networks are considered. The use of neural network data will allow in real time to analyze information, classify various deviations and diagnose defects. The diagnostic control organized in this way is aimed at preventing an emergency failure of the equipment, determining its condition and predicting the residual life. The use of convolutional neural networks in real mode allows you to classify various deviations, diagnose types of pre-emergency and emergency conditions.