

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик

И.Л. Громыко, В.Н. Галушко

Белорусский государственный университет транспорта,
ул. Кирова, 34, г. Гомель 246653, Беларусь

Поступила 17.03.2025

Принята к печати 14.05.2025

Существуют различные методы диагностики трансформаторов. Анализ используемых методов и диагностических систем указывает на достижение определённой сложности дальнейшего развития существующих методов и диагностических систем. Это обусловлено сложностью входных сигналов, достаточно большим числом параметров, нелинейными множественными динамическими взаимосвязями. Одним из наиболее перспективных видов диагностики, на сегодняшний момент, является анализ частотных характеристик трансформатора. Целью данной работы являлось выявление различных дефектов трансформатора с помощью анализа частотных характеристик. В данной работе для обнаружения дефектов сердечника и обмоток использован анализ частотных характеристик на основе метода трёх вольтметров. В результате проведения серии экспериментов получены импедансные и фазо-частотные характеристики трансформаторов с дефектами сердечника и обмоток. Данные характеристики показывают значительные различия между нормальным и аварийным состояниями трансформаторов. Полученные характеристики в виде изображений являются исходными данными для свёрточной нейронной сети, определяющей вид дефекта. Использование частотных характеристик однофазных и трёхфазных трансформаторов при диагностировании предотказных состояний и отказов позволит создать универсальный программно-аппаратный комплекс диагностики для трансформаторов различных типов и номинальных данных.

Ключевые слова: трансформатор, частотные характеристики, метод трёх вольтметров

Адрес для переписки:

Громыко И.Л.
Белорусский государственный университет транспорта,
ул. Кирова, 34, г. Гомель 246653, Беларусь
e-mail: ivangromyko95@mail.ru

Address for correspondence:

Hramyka I.L.
Belarusian State University of Transport,
Kirova str., 34, Gomel 246653, Belarus
e-mail: ivangromyko95@mail.ru

Для цитирования:

И.Л. Громыко, В.Н. Галушко.
Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик. Приборы и методы измерений. 2025. Т. 16. № 2. С. 158–167.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

For citation:

Hramyka IL, Galushko VN.
Method of Non-Destructive Control of Single-Phase and Three-Phase Transformers's Condition on the Basis of Frequency Characteristics. Devices and Methods of Measurements. 2025;16(2):158–167. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

Method of Non-Destructive Control of Single-Phase and Three-Phase Transformers's Condition on the Basis of Frequency Characteristics

I.L. Hramyka, V.N. Galushko

Belarusian State University of Transport,
Kirova str., 34, Gomel 246653, Belarus

Received 17.03.2025

Accepted for publication 14.05.2025

Abstract

Nowadays, there are many different methods of transformer diagnostics. The analysis of used methods and diagnostic systems indicates that a certain complexity of further development of existing methods and diagnostic systems has been achieved. This is due to the complexity of input signals, quite a large number of input factors, nonlinear multiple dynamic interrelationships with other parameters. One of the most promising types of diagnostics, to date, is frequency response analysis. The objective of this paper was to identify various transformer defects by analysing the frequency response. In this paper, frequency response analysis based on the three voltmeter method is used to detect core and winding defects. In a series of experiments, impedance and phase-frequency characteristics of transformers with core and winding defects are obtained. These characteristics show significant differences between the normal and emergency states of the transformers. The obtained characteristics in the form of pictures are the initial data for the convolutional neural network, which determines the type of defect. The use of frequency characteristics of single-phase and three-phase transformers in diagnostics of pre-failure states and failures will allow to create a universal hardware-software complex of diagnostics for transformers of different types and nominal data.

Keywords: transformer, frequency characteristics, method of three voltmeters

Адрес для переписки:

Громыко И.Л.
Белорусский государственный университет транспорта,
ул. Кирова, 34, г. Гомель 246653, Беларусь
e-mail: ivangromyko95@mail.ru

Address for correspondence:

Hramyka I.L.
Belarusian State University of Transport,
Kirova str., 34, Gomel 246653, Belarus
e-mail: ivangromyko95@mail.ru

Для цитирования:

И.Л. Громыко, В.Н. Галушко.
Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 158–167.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

For citation:

Hramyka IL, Galushko VN.
Method of Non-Destructive Control of Single-Phase and Three-Phase Transformers's Condition on the Basis of Frequency Characteristics.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):158–167. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

Введение

Для диагностики неисправностей трансформаторов в настоящее время существует много различных методов. В качестве информативных параметров используются частичные разряды, анализ растворенного газа [1], спектроскопия, индекс поляризации, коэффициент диэлектрической проницаемости [2], сопротивление изоляции, измерение напряжения восстановления, ток поляризации и деполяризации, анализ частотных характеристик (*frequency response analysis* – FRA) и др. В последнее время FRA привлекает всё больше внимания для обнаружения механических повреждений из-за его высокой чувствительности к деформациям обмоток трёхфазных трансформаторов [3].

FRA – это сравнительный метод, основанный на сравнении передаточных функций между собой. Обмотка трансформатора может рассматриваться как сложная цепь, состоящая из индуктивных, ёмкостных и резистивных элементов. Межвитковые короткие замыкания (МКЗ), межфазные короткие замыкания (МФЗ) и соответствующие им предотказные состояния, деформации обмотки и магнитопровода трансформатора изменяют передаточную функцию обмотки. В результате сравнения новой измеренной передаточной функции с передаточной функцией нормального (соответствующего номинальным параметрам) состояния обмотки и магнитопровода позволяет выявить данные изменения. Анализируя эти различия с помощью метода FRA, определяется тип и степень неисправности. В литературе (стандарт IEEE C57.149TM–2012, ГОСТ Р 59239–2020) этот этап называется интерпретацией частотной характеристики. В материале данной статьи, в отличие от обычного FRA, авторы в качестве исходных данных предложили использовать импедансную и фазо-частотную характеристику сопротивления. При анализе передаточной функции различными авторами использовались методы, основанные на числовых показателях [3], непараметрических статистических показателях, бинарной морфологии и вариации экстремальных точек [4], оконном методе расчёта [5], методах моделирования трансформатора [6], методах

нечёткой логики [7], вероятностном нейросетевом анализе [8], а также полярные характеристики графика FRA наряду с цифровой обработкой изображений. Согласно ГОСТ 59239-2020, частотные характеристики могут быть разбиты на три частотных диапазона: в нижнем частотном диапазоне определяющее влияние оказывает магнитопровод, в среднем частотном диапазоне – взаимодействие между обмотками, в верхнем – конструкция измеряемой обмотки и внутренние соединения; также в области высоких частот влияние оказывают измерительные кабели.

Современные методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта [9]. Программно-аппаратные комплексы диагностирования неисправностей для предприятий электроэнергетической отрасли компании Omicron, например *Testrano 600*, реализованы в одном устройстве для плановых проверок на месте эксплуатации и при заводских приёмочных испытаниях. Оборудование компании *Alstom Schorch Transformatoren* предоставляют сведения о состоянии трансформатора в режиме непрерывного контроля для силовых трёхфазных трансформаторов мощностью от 10 до 100 МВА и более. Компания *Siemens* поставляет систему непрерывного контроля состояния *Sitram+* второго поколения на базе вычислительной системы *Sitnatic*, получающей сигналы от датчиков, установленных на трансформаторе, производящей обработку, анализ и визуализацию данных измерений.

Несмотря на все безусловные достоинства применяемых в Республике Беларусь диагностических систем, они имеют ряд существенных недостатков: не являются универсальными (применяются под конкретные схемы, оборудование и др.); используется разнородная и разноточная информация; не учитывается динамика изменения критериев диагностирования оборудования, другими словами, системы не обучаемы. Поэтому применение самообучаемых систем на основе искусственных нейронных сетей позволит устранить перечисленные недостатки. При этом подготовка исходных данных для диагностических систем на основе экспериментальных исследований, например, при возникновении межвитковых замыканий (МКЗ) и других неисправностей представляет определенные практические

трудности, связанные, например, с большими величинами токов, которые могут повредить испытываемый трансформатор.

Оценка состояния обмотки требует определения параметров, по которым будет производиться анализ, а также выявления корреляции этих параметров с сопротивлением в месте дефекта, количеством короткозамкнутых витков, местоположением дефекта. Метод, позволяющий оценивать работоспособность трансформаторов в эксплуатационном периоде их работы, должен делать возможным выявление ослабления витковой изоляции. При замыкании любых медных проводников сопротивление в месте контакта не будет равно нулю из-за оксидных плёнок и, в зависимости от усилия прижима, может находиться в пределах от нескольких десятков долей ома до десятков ом. Кроме этого, витки могут замыкаться через разрушенную, а часто и обугленную изоляцию или через проводящие мостики, образованные локальными дефектами. В этом случае сопротивление может достигать 1000 Ом и более, т. е. значения, при котором трансформатор будет ещё достаточно работоспособен. Однако такие дефекты обмотки в процессе эксплуатации будут активно прогрессировать. Это связано с тем, что, когда сопротивление в месте дефекта станет соизмеримо с модулем комплексного сопротивления витка, наводимая в нём ЭДС будет вызывать дополнительное лавинообразное тепловое разрушение изоляции витка и спекание соседних витков вплоть до выгорания всей катушки. Всё это в итоге способствует скорейшему выходу трансформатора из строя [10].

Выбор контролируемых параметров и характеристик авторы основывали на анализе существующих нормативных требований при квалификационных, приёмо-сдаточных, периодических и типовых испытаниях и методах контроля, изложенных в ГОСТ Р 58115-2018, ГОСТ 21023-75, ГОСТ 16110-82, ГОСТ 3484.1-88.

В статье [11] представлена методика интерпретации частотных характеристик, основанная на обработке изображений и их анализе с помощью свёрточных нейронных сетей. Предложенная процедура переводит частотные характеристики в двумерные изображения с помощью техники визуализации. Точная локализация повреждений

выполняется с помощью свёрточной нейронной сети, а затем результаты анализируются с помощью метрик оценки производительности нейронной сети. Путём тестирования высокоомных повреждений в различных секциях моделируемой обмотки и пошагового применения предложенного метода в данном исследовании также осуществляется раннее обнаружение повреждений. Необходимо отметить, что в данном методе не используется фазо-частотная характеристика.

Использование фазо-частотной характеристики для диагностики трансформатора описано в статье [12]. Данный метод заключается в сравнении «фазовых портретов» трансформатора при различных технических состояниях. Однако данный метод не позволяет определить ни протяжённость повреждения, ни его тип, поэтому нуждается в дальнейшей доработке.

В работе [12] предложен метод диагностики межвитковых коротких замыканий, основанный на анализе с использованием свёрточных нейронных сетей отношений токов, напряжений, активных мощностей и коэффициентов мощностей. Данный метод имеет преимущество по сравнению с FRA в виде непрерывного онлайн-мониторинга работы трансформатора как в режиме холостого хода, так и в режиме работы под нагрузкой.

Используя измерители иммитанса (например, E7-30 или HM8118), можно непосредственно получить амплитудно-частотные (импедансные) $Z(\omega)$ и фазочастотные $\varphi(\omega)$ характеристики трансформаторов. При отсутствии таких приборов на практике можно использовать различные косвенные методы определения комплексных сопротивлений (или проводимостей) для каждой частотной составляющей сигнала с учетом их результирующей погрешности измерений.

Целью данной работы являлось выявление различных дефектов трансформатора с помощью анализа частотных характеристик.

Методика эксперимента

Для проведения частотного анализа использован метод трёх вольтметров. Схемы подключения задающего генератора сигналов и вольтметров для опытов холостого хода и короткого замыкания приведены на рисунке 1.

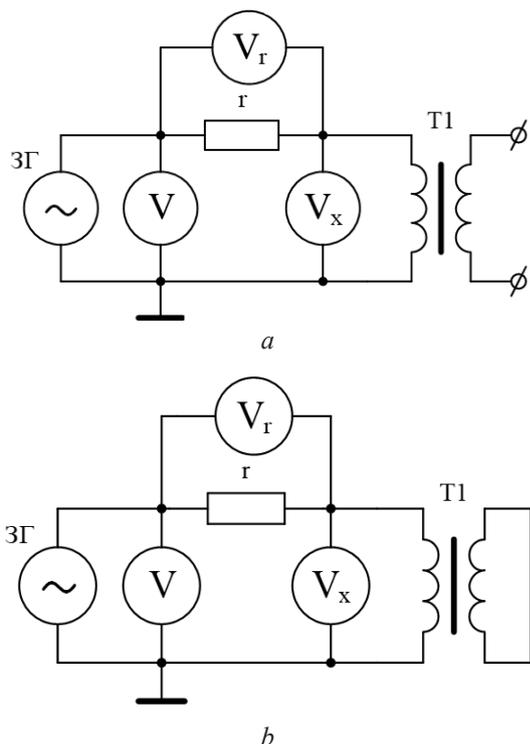


Рисунок 1 – Схемы подключения задающего генератора сигналов и вольтметров: *a* – для опыта холостого хода; *b* – для опыта короткого замыкания

Figure 1 – Wiring diagrams of the signal generator and voltmeters: *a* – for the no-load experiment; *b* – for the short-circuit experiment

Для построения частотных характеристик, используются четыре мультиметра В7-68 (один используется как частотомер, другие – как вольтметры), задающий генератор сигналов ГЗ-112 и высокочастотный резистор r на 4,5 Ом. Вольтметр обеспечивает работу в составе автоматизированных информационно-измерительных систем с управлением от персонального компьютера или ноутбука. Режим измерения постоянного напряжения необходим для работы вольтметра с ВЧ-пробником.

С помощью магазина измерительных сопротивлений выполнялось изменение сопротивления в широких пределах от 0,1 Ом до 100 кОм для имитации различного состояния обмоток (МКЗ, МФЗ) и сердечника.

С целью проведения статистического анализа измеряемых величин импедансных и фазо-частотных характеристик выполнялись многократные измерения (для каждой из 100 фиксированных частот в диапазоне от 0 до 1 МГц проводилось по 30 измерений), на основании которых рассчитывались статистические

оценки параметров распределения случайных величин: среднее значение и оценка среднего квадратического отклонения. При этом выполнялось определение интервальных оценок математического ожидания и стандартного отклонения исследуемых результатов измерений с доверительной вероятностью 0,95 и проводилась проверка гипотезы о нормальном законе распределения. Отклонение результатов измерений относительно среднего значения для частот диапазона от 0 до 100 кГц не превысила 1 %.

При разработке универсальной диагностической системы необходимо учитывать не только данный фактор, но и разброс в значениях по каждой из фаз. Поэтому если исходное измерение частотных характеристик отдельных фаз исследуемого трансформатора отсутствует, то можно выполнить сравнение с частотной характеристикой, полученной на другом трансформаторе той же серии (изготовленном по тем же чертежам и тем же заводом-изготовителем). Следует отметить, из-за возможных отличий в конструкции обмоток даже в случае одного завода-изготовителя (например, модернизации серии), в том числе для однотипных трансформаторов, результаты экспериментов частотных характеристик могут отличаться. В некоторых случаях при диагностических мероприятиях на предприятиях можно допустить использование неповрежденной фазы для оценки состояния обмотки при условии, что длина магнитной цепи одинакова для рассматриваемых фаз.

Результаты исследования

На рисунке 2 представлены импедансные и фазо-частотные характеристики трёхфазного трансформатора ТМ-50/6 при МФЗ в режиме холостого хода для диапазона частот 0–100 кГц. Полученные изображения могут использоваться после нормировки в качестве исходных данных для искусственных нейронных сетей [14]. Особое внимание требуется уделить таким факторам в порядке их значимости, как форма фазовых характеристик, амплитуды резонансов, смещения резонансных частот и число резонансов, связав их с требуемой детализацией при классификации неисправностей.

Из рисунка 2 можно сделать следующие выводы:

– наиболее значимые изменения присущи первой резонансной области до достижения

частоты 30–50 кГц в зависимости от мощности трансформатора;

– амплитуда первого резонансной области импедансных характеристик снижается по мере уменьшения сопротивления до наступления полного МФЗ;

– фазо-частотные характеристики отличаются значимым изменением формы кривой и сдвигом частоты в большую сторону для первой резонансной области;

– характер изменения фазо-частотных характеристик отличается снижением фазы первой резонансной области до 5 кОм, а затем увеличением ёмкостной составляющей до нескольких ом при МКЗ.

Сравнительный частотный анализ МФЗ и МКЗ в опыте холостого хода для ТС-280Р (рисунок 3) и трёхфазного трансформатора ТМ-50/6 (рисунок 4) указывает в обоих случаях на следующие отличия:

– для МКЗ наблюдается значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики и снижение амплитуды первой резонансной области;

– форма фазо-частотных характеристик значительно отличается;

– для фазо-частотной характеристики регистрируется классификационный диапазон на частотах 75–90 кГц.

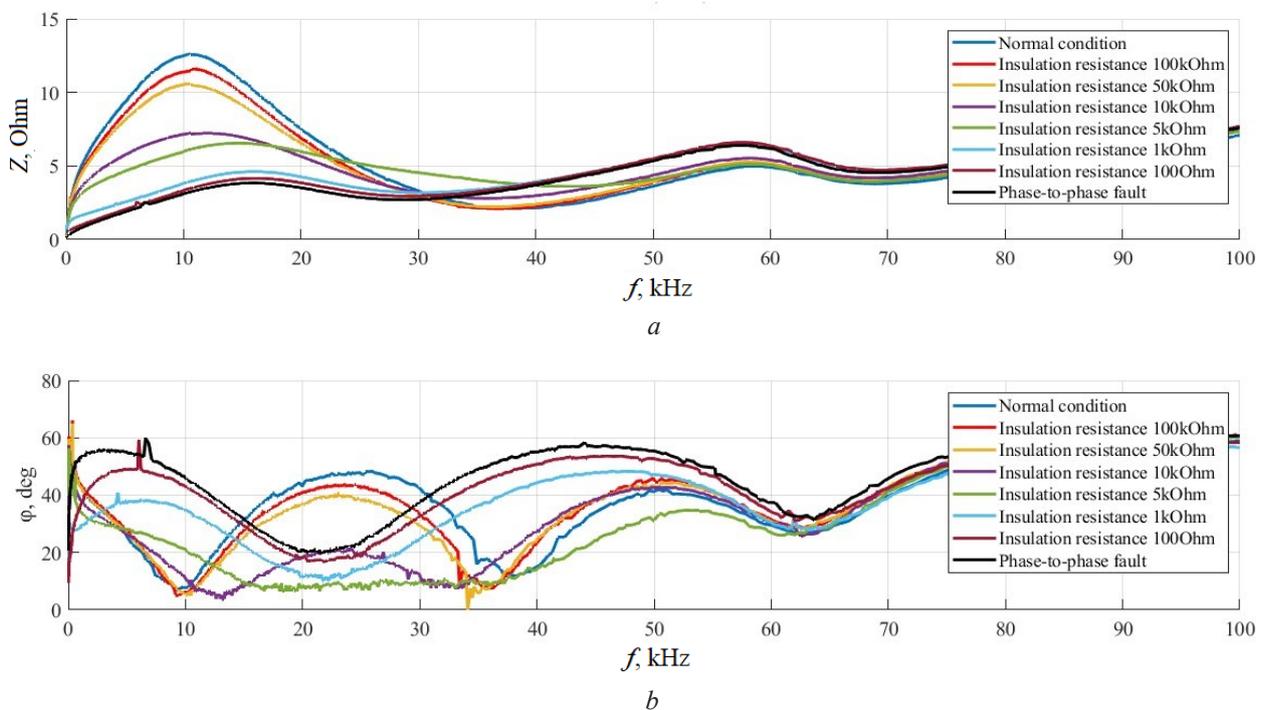
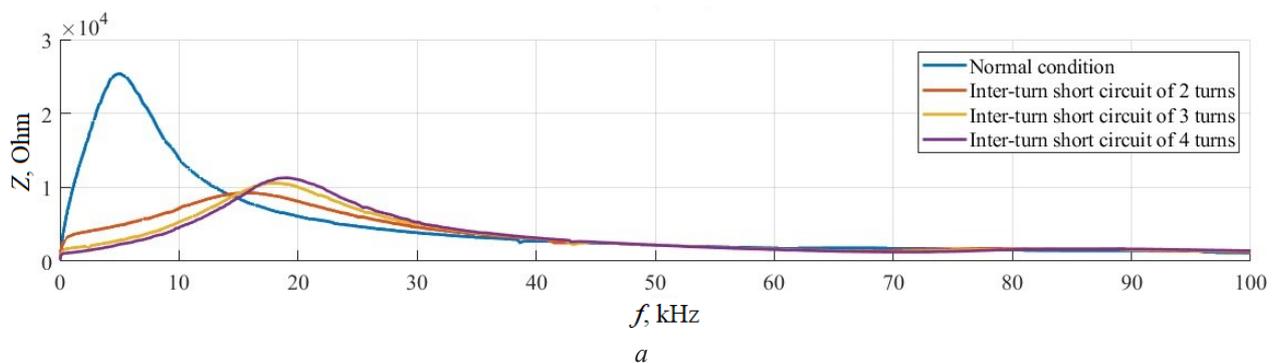


Рисунок 2 – Импедансные (a) и фазо-частотные (b) характеристики при межфазном замыкании

Figure 2 – Impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics for phase-to-phase faults



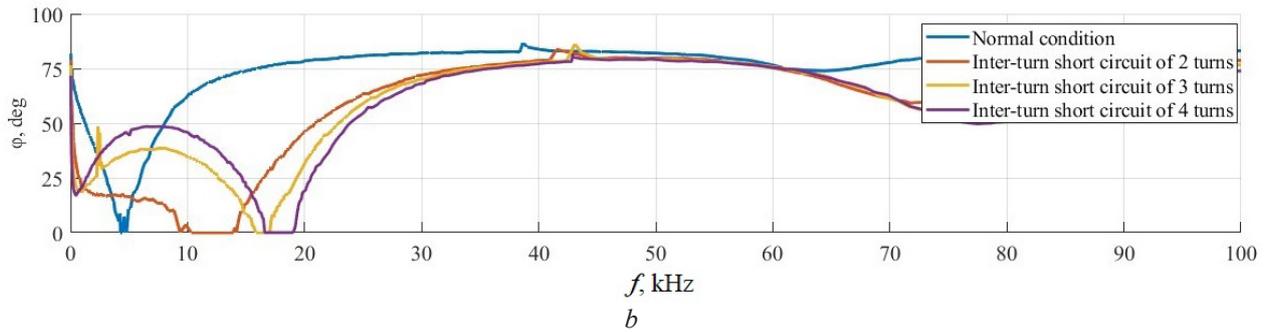


Рисунок 3 – Импедансные (а) и фазо-частотные (б) характеристики при межвитковом коротком замыкании трёхфазного трансформатора ТС-280Р для диапазона частот 0–100 кГц

Figure 3 – Impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics at interturn short-circuit of three-phase transformer TS-280R for frequency range 0–100 kHz

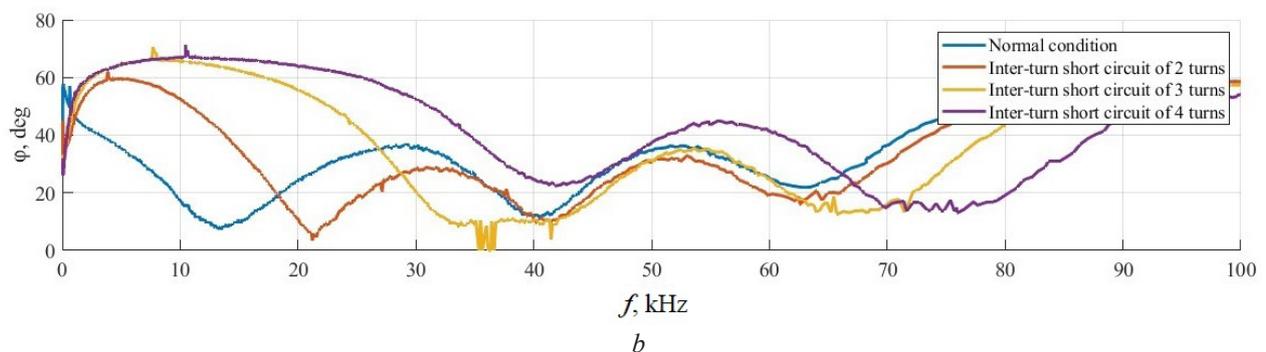
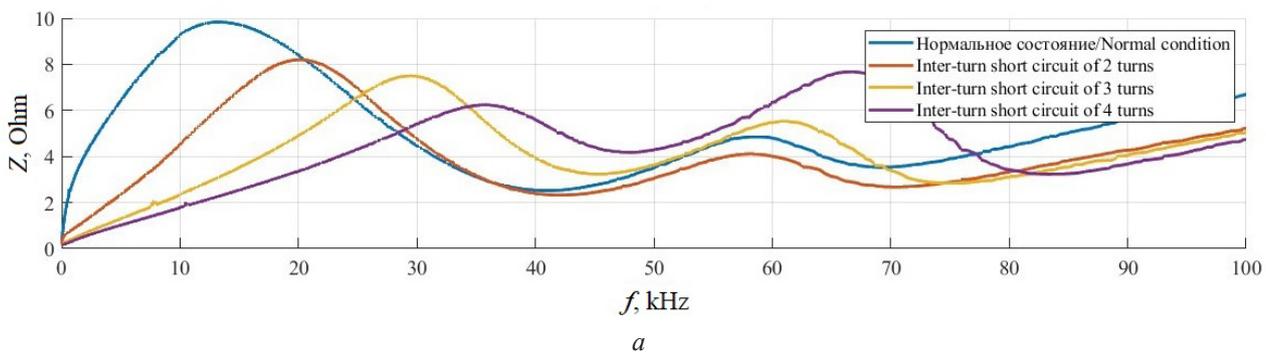


Рисунок 4 – Импедансные (а) и фазо-частотные (б) характеристики при межвитковом коротком замыкании трёхфазного трансформатора ТМ-50/6 для диапазона частот 0–100 кГц

Figure 4 – Impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics at interturn short-circuit of three-phase transformer TM-50/6 for frequency range 0–100 kHz

Сравнительный частотный анализ МКЗ и повреждений сердечника трансформатора ОСМ-1,0 УЗ (рисунок 5) указывает на следующие отличия:

- для дефектов сердечника наблюдается увеличение амплитуды (в отличие от МКЗ и междуфазного МФЗ, где происходит снижение) и значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики;

- значительно изменяется форма фазо-частотных характеристик.

Для получения исходных данных, связан-

ных с дефектами сердечника, использовался трёхфазный трансформатор ТМ-50/6 на рисунке 6 представлены четыре следующих состояния:

- сердечник не повреждён (нормальное состояние);

- ослаблено болтовое соединение листов электротехнической стали сердечника (ослабленное состояние);

- с помощью текстолитовых клинов между пластинами создан воздушный зазор по верхнему яруму 4 мм;

- то же – 8 мм.

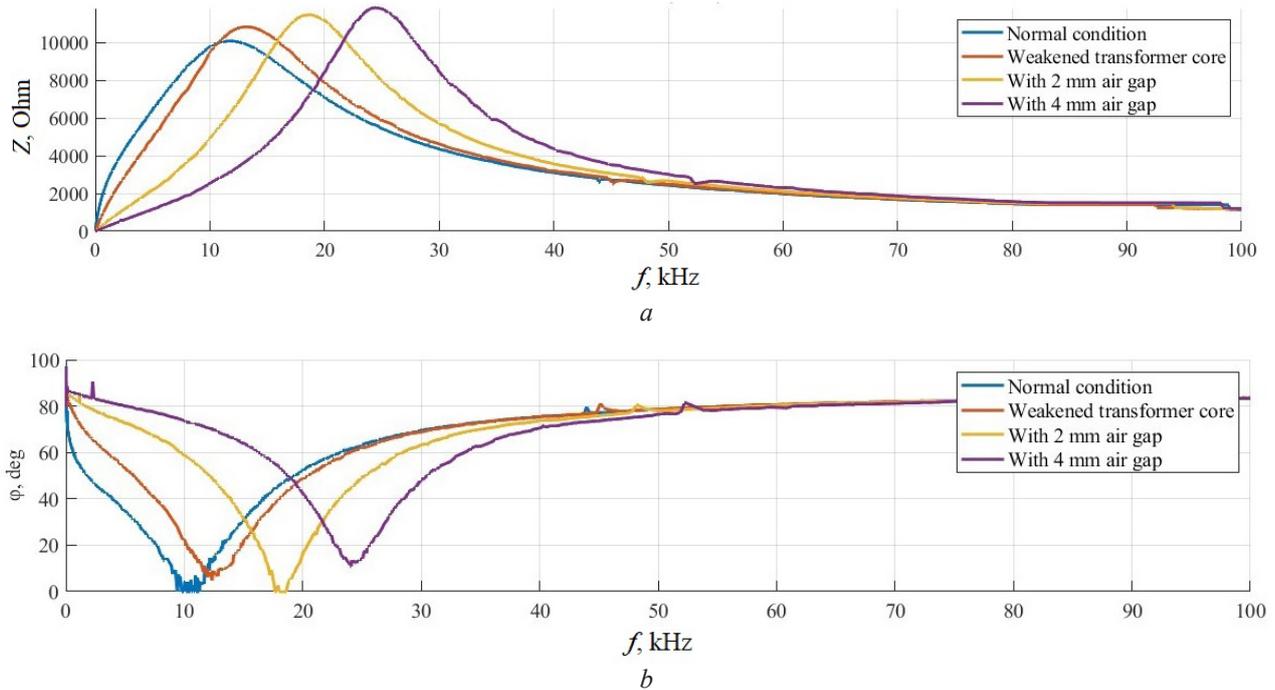


Рисунок 5 – Импедансная (a) и фазо-частотная (b) характеристики при обнаружении дефектов сердечника трансформатора

Figure 5 – Impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics for transformer core defect detection

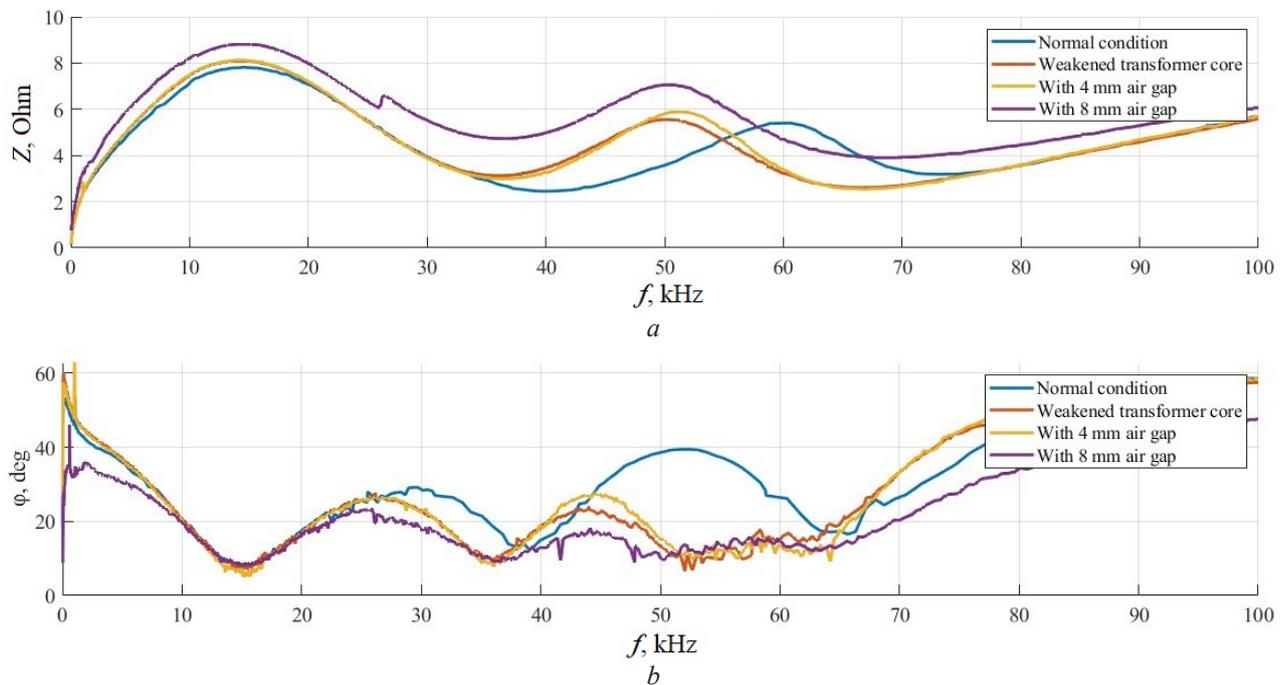


Рисунок 6 – Импедансная и фазо-частотная характеристики при дефектах магнитопровода для трёхфазного трансформатора ТМ-50/6: a – для обмотки, расположенной на краю стержневого магнитопровода; b – то же – по центру стержневого магнитопровода

Figure 6 – Impedance and phase-frequency characteristics at defects of magnetic core for three-phase transformer TM-50/6: a – for the winding located at the edge of the core magnetosheet; b – the same for the winding located in the centre of the core magnet core

При увеличении степени ослабления сердечника и при появлении воздушных зазоров увеличивается магнитное рассеяние обмоток, ЭДС рассеяния, на импедансной характеристике происходит смещение амплитуды второй резонансной частоты в сторону уменьшения и небольшое увеличение амплитуды первой резонансной частоты.

Заключение

На основании приведённых результатов авторы предлагают использовать частотные характеристики для обнаружения наиболее распространённых повреждений (межвитковые короткие замыкания, межфазные короткие замыкания, магнитопровод), а также предотказных состояний. Наибольшим изменениям подвержены следующие параметры частотных характеристик: амплитуда первой резонансной области импедансной характеристики и сдвиг его частоты; форма фазо-частотных характеристик. С целью классификации неисправностей следует обратить внимание на следующие отличительные черты частотных характеристик при возникновении различных неисправностей и их предотказных состояний:

– при межвитковых коротких замыканиях наблюдается значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики и снижение амплитуды первой резонансной области.

– при межфазных коротких замыканиях амплитуда первой резонансной области импедансных характеристик снижается по мере уменьшения сопротивления до наступления полного межфазного короткого замыкания;

– дефекты магнитопровода: смещение амплитуды второй резонансной частоты в сторону уменьшения (трёхфазные трансформаторы) и увеличение амплитуды первой резонансной частоты.

Полученные результаты в виде изображений нормализованных характеристик являются исходными данными для свёрточной нейронной сети, выходной слой которой не только позволяет определить вид дефекта, но и классифицировать указанные процессы в зависимости от назначения и количества классифицирующих нейронов выходного слоя.

Использование частотных характеристик однофазных и трёхфазных трансформаторов

при диагностировании предотказных состояний и отказов позволит создать универсальный программно-аппаратный комплекс диагностики для трансформаторов различных типов и номинальных данных. Результаты работы могут практически заинтересовать как энергетические предприятия Республики Беларусь (например, ГПО «Белэнерго», государственное объединение «Белорусская железная дорога», ОАО «МЭТЗ имени В.И. Козлова» и др.), так и других стран.

Список использованных источников / References

1. Mahmoudi N, Samimi MH, Mohseni H. Experiences with transformer diagnosis by DGA: case studies. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2019;13(23):5431-5439.

DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1056

2. Behjat V, Mahvi M, Rahimpour E. A new statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: Nonparametric statistical methods. 2015 30th International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran. 2015;142-148.

DOI: 10.1109/IPSC.2015.7827740

3. Samimi MH, Tenbohlen S, Akmal AAS, Mohseni H. Evaluation of numerical indices for the assessment of transformer frequency response. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017;11(1):218-227.

DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0879

4. Zhao Z, Yao C, Li C, Islam S. Detection of Power Transformer Winding Deformation Using Improved FRA Based on Binary Morphology and Extreme Point Variation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018;65(4):3509-3519.

DOI: 10.1109/TIE.2017.2752135

5. Tarimoradi H, Gharehpetian GB. Novel Calculation Method of Indices to Improve Classification of Transformer Winding Fault Type, Location, and Extent. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2017;13(4):1531-1540.

DOI: 10.1109/TII.2017.2651954

6. Jahan MS, Keypour R, Izadfar HR, Keshavarzi MT. Locating power transformer fault based on sweep frequency response measurement by a novel multistage approach. *IET Science, Measurement & Technology*. 2018;12(8):949-957.

DOI: 10.1049/iet-smt.2018.0003

7. Contin A, Rabach G, Borghetto J, Nigris MD, Passaglia R, Rizzi G. Frequency-response analysis of power transformers by means of fuzzy tools. *IEEE*

Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011;18(3):900-909.

DOI: 10.1109/TDEI.2011.5931079

8. Bigdeli M, Vakilian M, Rahimpour E. A probabilistic neural network classifier - based method for transformer winding fault identification through its transfer function measurement. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2013;23(3):392-404.

DOI: 10.1002/etep.668

9. Гизатулин И.А. Построение системы диагностики и мониторинга силового трансформатора 110 КВ / Гизатулин И.А., Воркунов О.В. // Сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции (3 декабря 2024 г., г. Уфа). В 3 ч. Ч.1 / – Уфа: Изд. Научноиздательский центр Вестник науки, 2024. – С. 64–68.

9. Gizatulin IA, Vorkunov OV. Construction of the system of diagnostics and monitoring of 110 KV power transformer. Fundamental and applied approaches to solving scientific problems. Collection of scientific articles on the materials of XVI International Scientific and Practical Conference (December 3, 2024, Ufa), In 3 parts., Part.1, Ufa, Bulletin of Science. 2024;64-68.

10. Суходолов, Ю.В. Возможность определения дефектов в обмотках электрических машин частотными методами / Ю.В. Суходолов, А.В. Исаев, В.В. Зеленко, С.В. Сизиков // Метрология и приборостроение. – 2022. – Том 98. – № 3. – С. 10-17.

10. Sukhodolov YV, Isaev AV, Zelenko VV, Sizikov SV. Possibility of defects determination in electric machine windings by frequency methods. *Metrology and instrumentation*. 2022;98(3):10-17. (In Russ.).

11. Moradzadeh A, Moayyed H, Mohammadi-Ivatloo B, Gharehpetian GB, Aguiar AP. Turn-to-Turn Short Circuit Fault Localization in Transformer Winding via Image Processing and Deep Learning Method. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022;18(7):4417-4426. **DOI:** 10.1109/TII.2021.3105932

12. Vosoughi A. and M. Hamed Samimi. Evaluation of the Image Processing Technique in Interpretation of Polar Plot Characteristics of Transformer Frequency Response. 2022 International Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP), Ahvaz, Iran, Islamic Republic of, 2022;1-6.

DOI: 10.1109/MVIP53647.2022.9738771

13. Hramyka I. Development of Software and Hardware for Identification of Interturn Short Circuit in Single-Phase Transformers. 2024 Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), Raipur, India. 2024;241-246.

DOI: 10.1109/ICPC2T60072.2024.10474962

14. Galushko VN, Hramyka IL, Ermolenko DV. Development of methodological principles of diagnostics of transformers of the non-pulling railroad power supply system with the help of artificial neural networks. Monograph, Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, Homel, BSUT, 2025, 167 p.