

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-235-248>

УДК 621.314

Обнаружение и классификация предотказных и дефектных состояний трансформаторов сверточными нейронными сетями

А. Н. Пехота¹), И. Л. Громыко²), В. Н. Галушко²)

¹)Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²)Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

Реферат. Современная диагностика трансформаторов является довольно долгим и затратным мероприятием. Часто необходимо провести целый ряд непростых испытаний, так как современные методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта. Это обусловлено сложностью входных сигналов, достаточно большим числом входных факторов, нелинейными множественными динамическими взаимосвязями с другими параметрами. Надежность электрических машин и трансформаторов в значительной степени определяется надежностью обмоток, которая в свою очередь во многом зависит от состояния изоляции обмоток. Традиционные методы испытаний включают в себя измерение различных параметров, таких как полное сопротивление короткого замыкания, потери холостого хода, коэффициент трансформации, ток намагничивания, сопротивление обмотки и др. Одним из наиболее перспективных видов диагностики на сегодняшний момент является метод частотных характеристик, который нашел широкое применение для обнаружения и оценки повреждений трансформаторов во время их транспортирования, а также с помощью одного набора измерений позволяет получить информацию о механическом состоянии магнитопровода, обмоток и прессуемой конструкции. Он доказал свою способность выявлять повреждения в обмотках при испытаниях на стойкость при КЗ. Этот метод обнаружения дополняет визуальный осмотр, поскольку позволяет выявить небольшие изменения размеров обмоток, которые не всегда можно разглядеть. При этом небольшие перемещения отводов и других частей не всегда могут быть легко обнаружены с помощью частотных характеристик. В данной работе для обнаружения и классификации дефектов обмоток предлагается метод, основанный на анализе частотных характеристик с помощью метода трех вольтметров и сверточных нейронных сетей.

Ключевые слова: схема диагностики, силовой трансформатор, надежность обмоток, состояние изоляции, самообучаемые системы

Для цитирования: Пехота, А. Н. Обнаружение и классификация предотказных и дефектных состояний трансформаторов сверточными нейронными сетями / А. Н. Пехота, И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 3. С. 235–248. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-235-248>

Detection and Classification of Pre-Failure and Defective Transformer States by Convolutional Neural Networks

A. N. Pekhota¹), I. L. Hramyko²), V. N. Galushko²)

¹)Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²)Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. Modern transformer diagnosing is a lengthy and costly undertaking. A series of complex tests is often necessary, as modern diagnostic methods do not always clearly indicate

Адрес для переписки

Пехота Александр Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

Address for correspondence

Pekhota Aleksandr N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

the of electrical machines and transformers is largely determined by the reliability of the windings, which, in turn, is largely dependent on the condition of the winding insulation. Traditional test methods include measuring various parameters such as short-circuit impedance, no-load loss, transformation ratio, magnetization current, winding resistance and others. Currently, one of the most promising diagnostic methods is the frequency response method. The frequency response method has found wide application in detecting and assessing transformer damage during transportation. Also, this method, using a single set of measurements, provides information on the mechanical condition of the magnetic core, windings, and pressing structure. It has proven its ability to detect damage in windings during short-circuit resistance tests. This detection method complements visual inspection, as it makes it possible to detect small changes in the size of the windings, which are not always visible. Yet, small movements of taps and other parts are not always easily detected using frequency characteristics. In this paper, a method based on frequency response analysis using the method of three voltmeters and convolutional neural networks is proposed for detecting and classifying winding defects.

Key words: diagnostic circuit, power transformer, winding reliability, insulation condition, self-learning systems

For citation: Pekhota A. N., Hramyka I. L., Galushko V. N. (2026) Detection and Classification of Pre-Failure and Defective Transformer States by Convolutional Neural Networks. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (3), 235–248. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-235-248>

Введение

Современная диагностика силовых трансформаторов – довольно долгое и затратное мероприятие. Часто необходимо провести целый ряд непродолжительных испытаний, так как современные методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта. Надежность электрических машин в значительной степени определяется надежностью обмоток, которая в свою очередь во многом зависит от состояния изоляции.

Следует отметить, что за прошедшие годы была проделана большая работа по созданию методов диагностики трехфазных трансформаторов, позволяющих при комплексном их применении адекватно оценить состояние обследуемого объекта с высокой надежностью. Однако при этом количество трансформаторов, «доживающих» до отказов по причине термохимического старения твердой изоляции, невелико. Причиной отказа большинства из них являются различные своевременно не выявленные дефекты. Сложившаяся ситуация обусловлена низкой эффективностью традиционной схемы диагностики.

Сигналы с трансформатора, как правило, представляют гармонические функции. Различные дефекты приносят к основным гармоникам еще и дополнительные гармонические составляющие. Из-за дискретизации процесса сбора данных, шумов и малых амплитуд дополнительных гармоник поиск этих изменений и отклонений оказывается сложной задачей.

Для диагностики неисправностей трансформаторов в настоящее время существует много различных методов. В качестве информативных параметров используются частичные разряды, анализ растворенного газа [1, 2], спектроскопия, индекс поляризации, коэффициент диэлектрической проницаемости [3], сопротивление изоляции, измерение напряжения восста-

новления, ток поляризации и деполяризации, анализ трансформаторного масла [4] и др.

Одним из перспективных методов диагностики трансформаторов является метод анализа частотных характеристик (Frequency Response Analysis (FRA)) [5]. Анализ частотных характеристик может быть разбит на три частотных диапазона: в нижнем определяющее влияние оказывает магнитная система трансформатора, в среднем – взаимодействие между обмотками, а в области высших частот влияние оказывают измерительные кабели.

В [6] представлена методика интерпретации частотных характеристик, основанная на обработке изображений и их анализе с помощью сверточных нейронных сетей. Предложенная процедура переводит частотные характеристики в двумерные изображения с помощью техники визуализации. Полученные изображения объединяются в наборы данных, которые используются в качестве входных данных для сверточной нейронной сети. Предложенная методика применяется к частотным откликам двух различных моделей обмоток с короткозамкнутыми витками. КЗ различной интенсивности прикладываются к разным участкам обмотки модели лестничного типа напряжением 20 кВ распределительного трансформатора мощностью 1,6 МВ·А. После определения частотной характеристики для каждого случая повреждения и применения техники визуализации точная локализация повреждений выполняется сверточной нейронной сетью. Затем результаты анализируются с помощью метрик оценки производительности. На этом этапе отмечается высокая производительность сверточной нейронной сети при использовании изображений вместо традиционного метода. Наконец, путем тестирования высокоомных повреждений в различных секциях моделируемой обмотки и пошагового применения предложенного метода в данном исследовании также осуществляется раннее обнаружение повреждений.

Следует отметить, что предложенный метод, помимо его точности и высокой скорости обнаружения, может рассматриваться как важный шаг в автоматической интерпретации частотных откликов для онлайн-мониторинга. Необходимо отдельно выделить тот факт, что в данном методе не используется фазо-частотная характеристика.

Таким образом, несмотря на все безусловные достоинства применяемых в нашей стране диагностических систем, они имеют ряд существенных недостатков: не являются универсальными (применяются под конкретные схемы и оборудование); используется разнородная информация с различной точностью, не учитывающая динамики изменения критериев диагностирования оборудования, другими словами, системы не обучаемы. Поэтому применение самообучаемых систем на основе искусственных нейронных сетей позволит устранить перечисленные недостатки.

Актуальность исследования

Достижение указанных целей невозможно без применения современных информационных технологий, что, в свою очередь, требует создания эффективных математических моделей и методов. Анализ используемых методов и диагностических систем указывает на достижение определенной

сложности дальнейшего развития существующих методов и диагностических систем. Это обусловлено во многом сложностью входных сигналов, достаточно большим числом входных факторов, нелинейными множественными динамическими взаимосвязями с другими параметрами. Данный недостаток в увеличении точности диагностирования и распознавания образов возможно решить за счет применения нейронных сетей.

Внедрение «интеллектуальных» систем повысит эффективность управления режимом, достоверность оценки состояния трансформаторов, устранит многие ошибки персонала и облегчит труд эксплуатационного персонала. Особенно эффективно использование экспертных систем постановки диагноза с базами знаний, составленными квалифицированными специалистами по отдельным направлениям диагностики.

Главным преимуществом искусственных нейронных сетей при диагностике аварийных ситуаций является их гибкость при большом потоке данных и информационном шуме. Главный же недостаток – относительная длительность времени обучения и получение необходимого количества исходных данных обучения.

Разработка авторами данной статьи методов диагностики состояния трехфазных трансформаторов выполнялась на базе УО «Белорусский государственный университет транспорта». Ранее исследования в области диагностики состояния трансформаторов были проведены в Гомельском, Минском и Барановичском отделениях Белорусской железной дороги. По результатам этих исследований получены акты об их практическом использовании [7].

Аналогичным образом исследовались асинхронные двигатели (АД) [8].

Тематика рассмотренных в данной статье исследований соответствует Указу Президента Республики Беларусь № 135 от 1 апреля 2025 г. «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026–2030 годы» и постановлению Совета Министров Республики Беларусь от 1 декабря 2023 г. № 855 «Об обеспечении технологического суверенитета» путем реализации системных мер, направленных на инновационное развитие национальной экономики и снижение зависимости от импорта критических технологий и товаров.

Основная часть

В данном исследовании представлен метод обнаружения неисправностей трансформаторов на основе амплитудно-частотных (импедансные) $Z(\omega)$ и фазо-частотных $\varphi(\omega)$ характеристик для определения дефектных состояний с помощью сверточных нейронных сетей. Испытания осуществлялись путем отключения трансформатора от сети и проведения подключений к измерительному оборудованию. Данный метод является продолжением методики, описанной в [9]. Неисправности создавались искусственно путем вмешательства в обмотки, выводы которых припаивались к проводникам, изолировались и выводились на внешнюю сторону бака для управления и моделирования различных дефектов.

С помощью метода трех вольтметров рассчитывался модуль и аргумент комплексного сопротивления в режиме холостого хода в диапазоне от 0 до 1 МГц. В основе способа обнаружения дефектов используется сравнение частотных характеристик с бездефектным состоянием.

В ходе исследований анализировались частотные характеристики для таких дефектных состояний трехфазного трансформатора ТМ-50/6 с эмалевой изоляцией обмоток, как:

- межвитковое короткое замыкание (МКЗ) сопротивления первичной и вторичной обмоток;
- межфазное короткое замыкание обмоток (МФКЗ);
- короткое замыкание на корпус одной фазы;
- повреждение сердечника.

Приведем результаты исследований различных неисправностей АД методом анализа частотных характеристик.

С помощью магазина измерительных сопротивлений выполнялось изменение сопротивления в широких пределах от 0 до 100 кОм для имитации различного состояния дефектов обмоток (МКЗ, МФКЗ) и для этих состояний фиксировались частотные характеристики. Таким образом, характер изменений позволял выявить «предотказные» состояния и классифицировать их. Эксперименты с трансформаторами проводились в специализированной лаборатории кафедры «Электротехника» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта».

Достоверность выявления повреждений определяется степенью отклонений полученных частотных характеристик в сравнении со степенью отклонений, характерной тому или иному типу референсных данных (исходное измерение для трансформаторов одной серии, однотипного трансформатора, отсоединенного от нагрузки, или другой фазы обмотки трехфазного трансформатора). При оценке состояния трансформатора также следует учитывать возможность того, что наблюдаемые отклонения могут быть вызваны использованием другой измерительной системы или иными различиями. Частотные характеристики разных фаз обмоток одного и того же трансформатора могут иметь более значительные отличия, которые могут быть обусловлены различной длиной отводов, соединением обмоток и характеристиками системы заземления. Например, из-за конструктивных особенностей магнитной системы частотные характеристики обмоток могут отличаться в области низких частот.

Для частотных характеристик дефектного короткого замыкания первичной обмотки на корпус характерны изменение формы первого резонанса, постепенное снижение амплитуды импедансной характеристики по отношению к бездефектному состоянию и смещение частоты первого резонанса в сторону увеличения (рис. 1).

Необходимо учитывать, что частотная характеристика в диапазоне до 100 кГц в основном определяется магнитной связью между обмотками, которая в значительной степени зависит от расположения и соединения обмоток и для однофазных трансформаторов имеет один резонанс, аналогичный «токовому» [10].

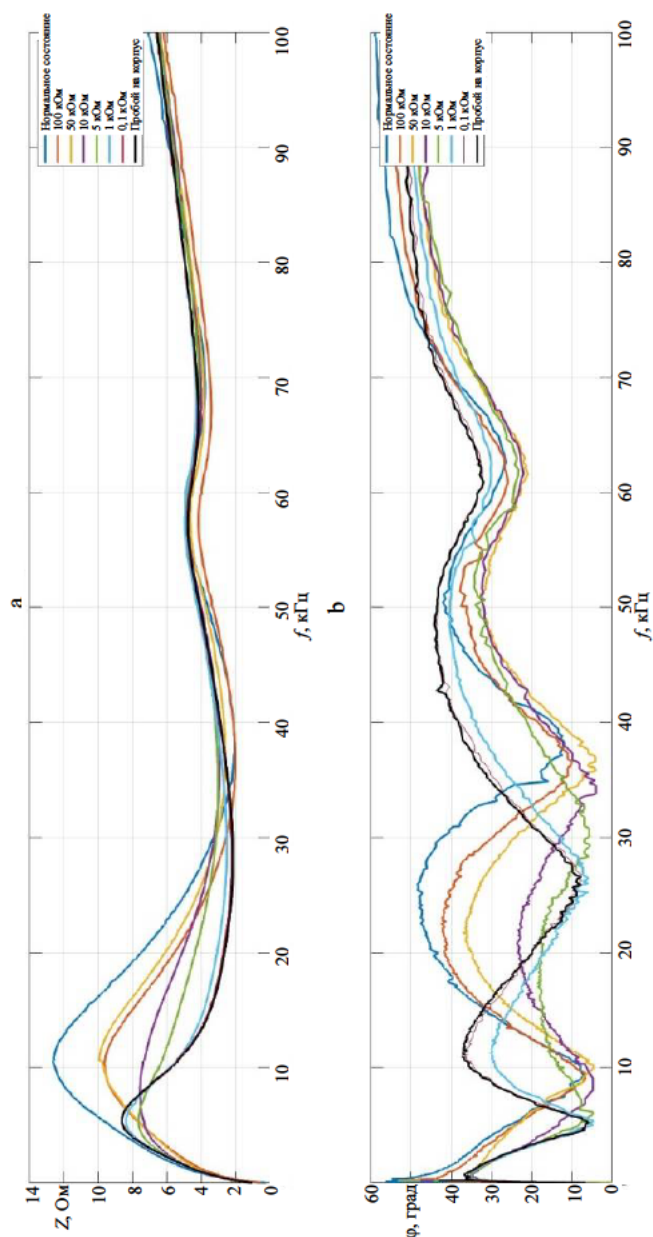


Рис. 1. Импедансная (а) и фазо-частотная (б) характеристики для дефектного короткого замыкания первичной обмотки на корпус при сопротивлениях 0,1; 1; 5; 10; 50, 100 кОм и полного короткого замыкания

Fig. 1. Impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics for defective short circuit of the primary winding to the housing with resistances 0,1; 1; 5; 10; 50, 100 kOhm and full short circuit

В области влияния конструкции обмотки частотная характеристика определяется индуктивностями рассеяния обмотки, ее продольными и поперечными емкостями. В этом диапазоне на форму частотной характеристики наибольшее влияние оказывает продольная емкость. Для трансформаторов характерно наличие нескольких резонансов, аналогичных «токовому».

На основании результатов измерений (представлены на рис. 2) можно отметить значительное изменение частот первого «резонанса» и его частоты при обнаружении дефектов сердечника, что объясняется изменениями индуктивной и активной составляющих магнитопровода.

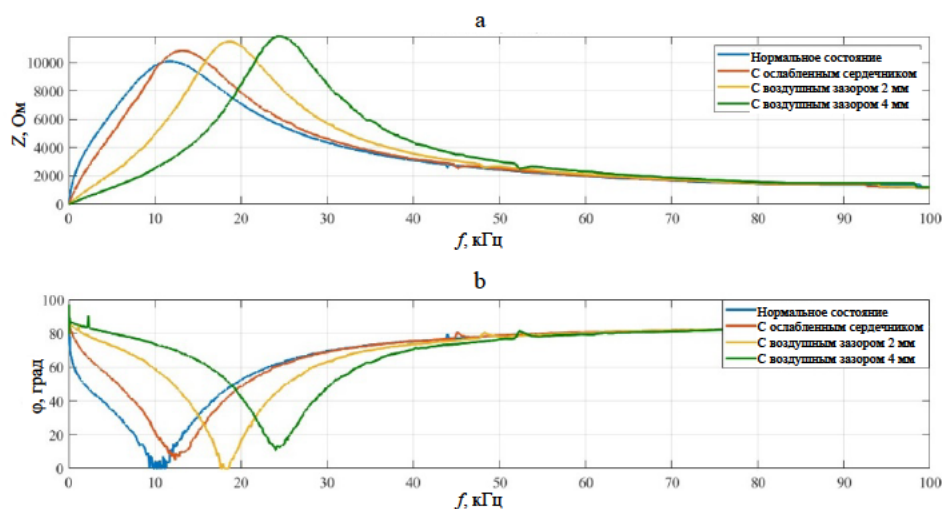


Рис. 2. Пример импедансных (а) и фазо-частотных (б) характеристик при обнаружении дефектов сердечника трансформатора ОСМ-1,0 УЗ в режиме холостого хода для диапазона частот от 0 до 100 кГц

Fig. 2. Example of impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics when detecting defects in the core of the OSM-1.0 U3 transformer in idle mode for the frequency range from 0 to 100 kHz

Общая закономерность изменения полученных частотных характеристик указывает на то, что по мере приближения к полному короткому замыканию происходят изменение формы, уменьшение амплитуды первого резонанса импедансной характеристики и изменение его частоты.

С использованием алгоритма линейной нормализации и библиотеки компьютерного зрения OpenCV были получены изображения импедансной и фазо-частотной характеристик, которые затем подавались на вход сверточной нейронной сети. Для каждой из характеристик формируются изображения, которые затем подаются на входы сверточных нейронных сетей. Алгоритм состоит из нескольких частей, приведенных далее. Для примера представлены алгоритм и его программная реализация детектирования и классификация типа дефекта (МКЗ или МФКЗ).

Формирование массива данных

Для формирования изображений на основании поступивших с мультиметров данных рассчитываются модули и аргументы комплексных сопротивлений по 65 частотам в диапазоне от 0 до 100 кГц. Далее рассчитанные параметры записываются в два специальных двумерных массива: в первую строку каждого массива – частоты, а во вторую – соответствующие им параметры (модуль либо аргумент комплексного сопротивления).

Формирование изображений

Для формирования координат пикселей изображений используется алгоритм линейной нормализации. Затем с помощью библиотеки компьютерного зрения OpenCV происходит отрисовка линий между пикселями. В результате получается изображение, приведенное на рис. 3.



Рис. 3. Изображение, полученное с помощью алгоритма линейной нормализации, для импедансной (а) и фазо-частотной (b) характеристик

Fig. 3. Image obtained using the linear normalization algorithm for the impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics

Классификация и окончательный анализ

После формирования алгоритмом линейной нормализации изображений зависимостей отношений напряжений, токов, активных мощностей и коэффициентов мощностей от времени они передаются на две сверточные нейронные сети, определяющие наличие дефектов: первая сеть отвечает за импедансную характеристику, вторая – за фазо-частотную.

Архитектура данных сверточных нейронных сетей основана на сети LeNet.

Примеры изображений, передаваемых на сверточные нейронные сети, и их классификация приведены в табл. 1.

Таблица 1

Классификация изображений

Image classification

Сеть	Класс 0. Нормальное состояние	Класс 1. Межвитковое короткое замыкание	Класс 2. Межфазное короткое замыкание
Первая			
Вторая			

К классу 0 относятся изображения, полученные при нормальном состоянии трансформатора, к классу 1 – с МКЗ, а к классу 2 – с МФКЗ.

Для обучения каждой из нейронных сетей использовались более 100000 данных. Результаты обучений нейронных сетей представлены на рис. 4 и 5.

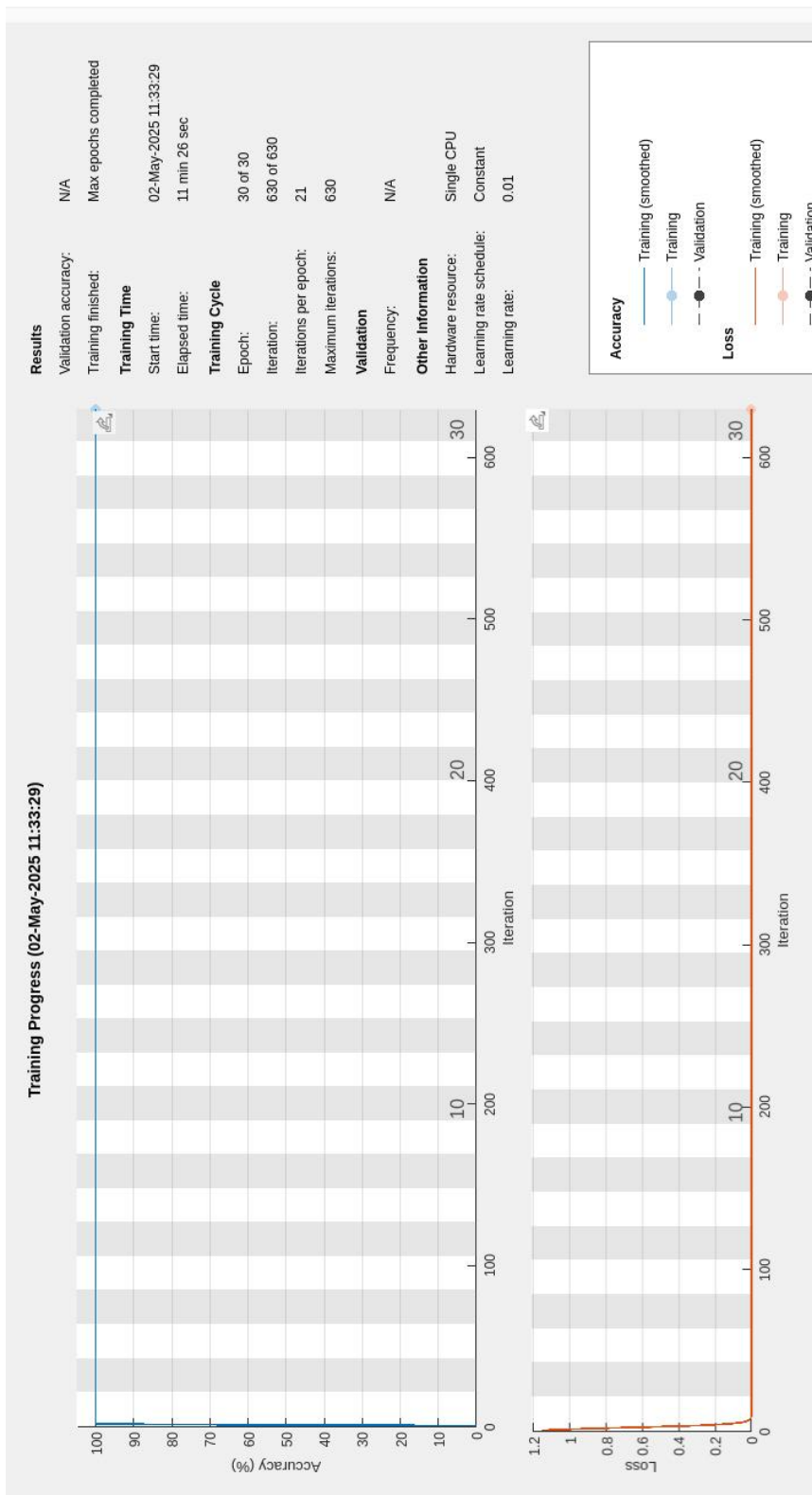


Рис. 4. Результат обучения первой нейронной сети

Fig. 4. The result of training the first neural network

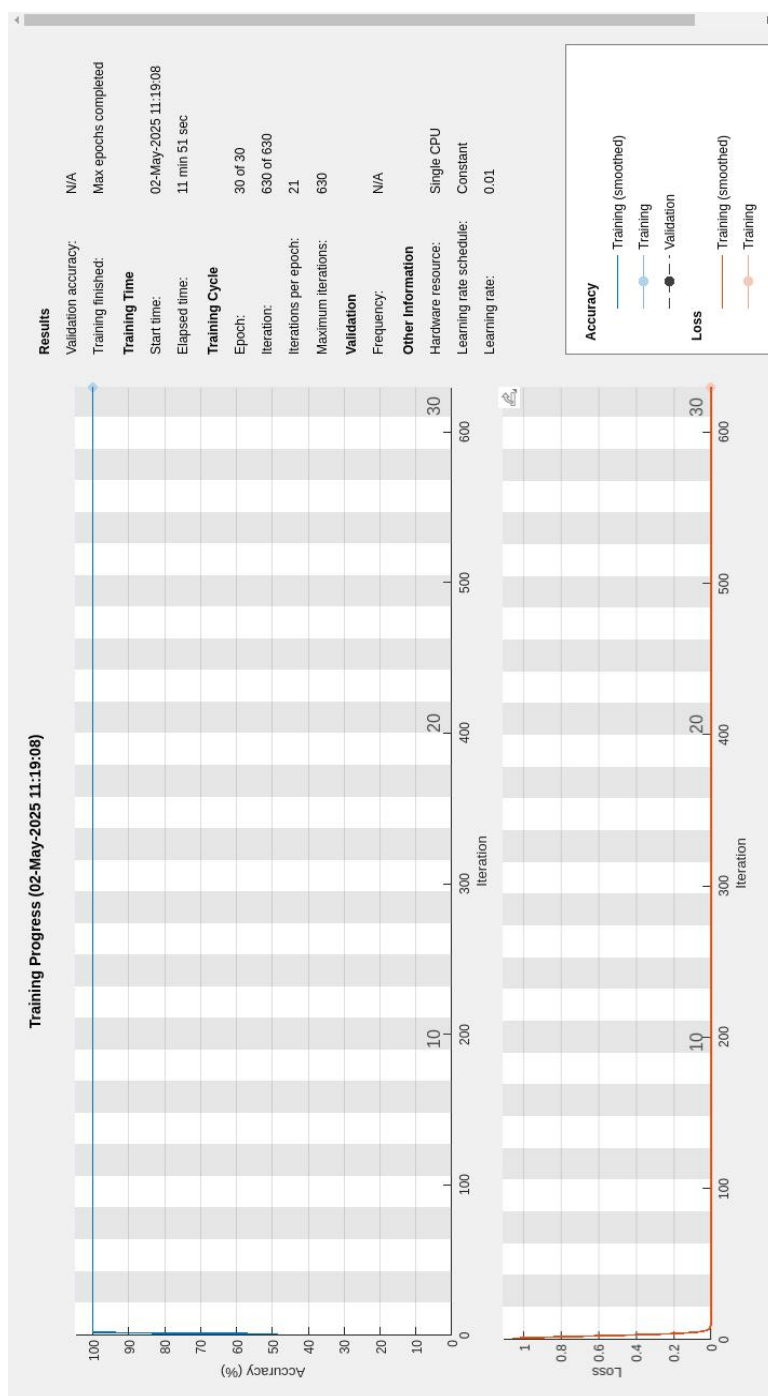


Рис. 5. Результат обучения второй нейронной сети
Fig. 5. The result of training the second neural network

После детектирования изображений двумя нейронными сетями производится окончательный анализ, алгоритм которого приведен на рис. 6.

Для проверки работоспособности алгоритма разработано программное обеспечение и проведена серия экспериментов на трехфазном трансформаторе ТМ-50/6 (рис. 7).

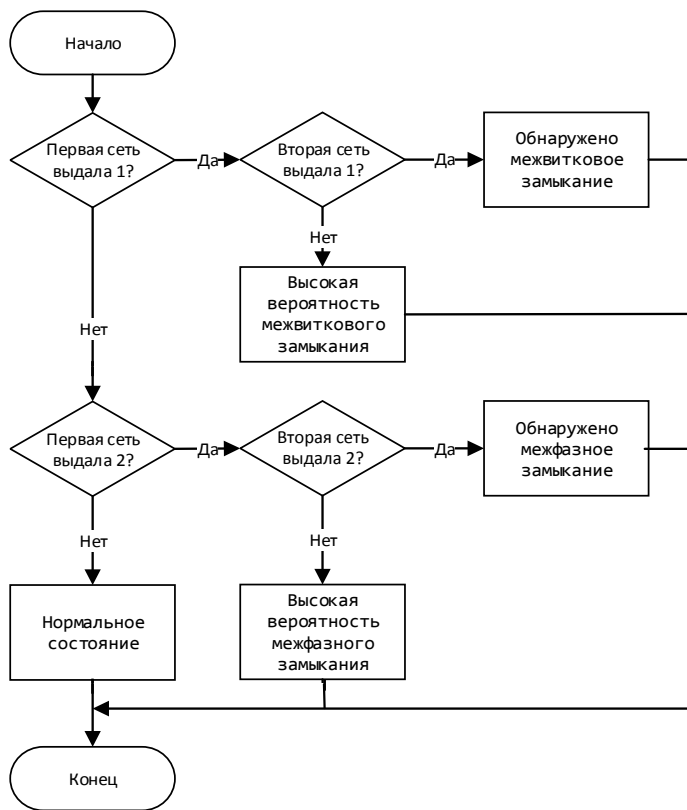


Рис. 6. Алгоритм анализа результатов с нейронных сетей

Fig. 6. Algorithm for analyzing results from neural networks

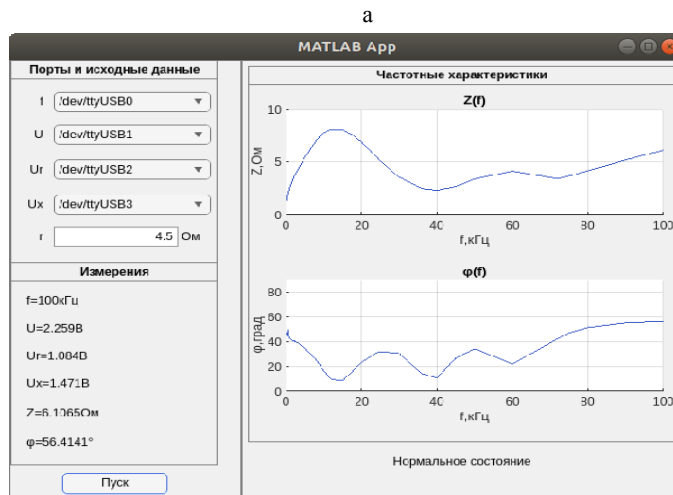


Рис. 7. Результаты работы программного комплекса обнаружения дефектов трансформатора: для бездефектного состояния (а); при МКЗ (b); при МФКЗ (c) (продолжение рис. на стр. 246)

Fig. 7. Results of operation of the transformer defect detection software package: for defect-free state (a); for turn-to-turn fault (b); for interfacial short circuit of windings (c) (continuation of the figure on page 246)

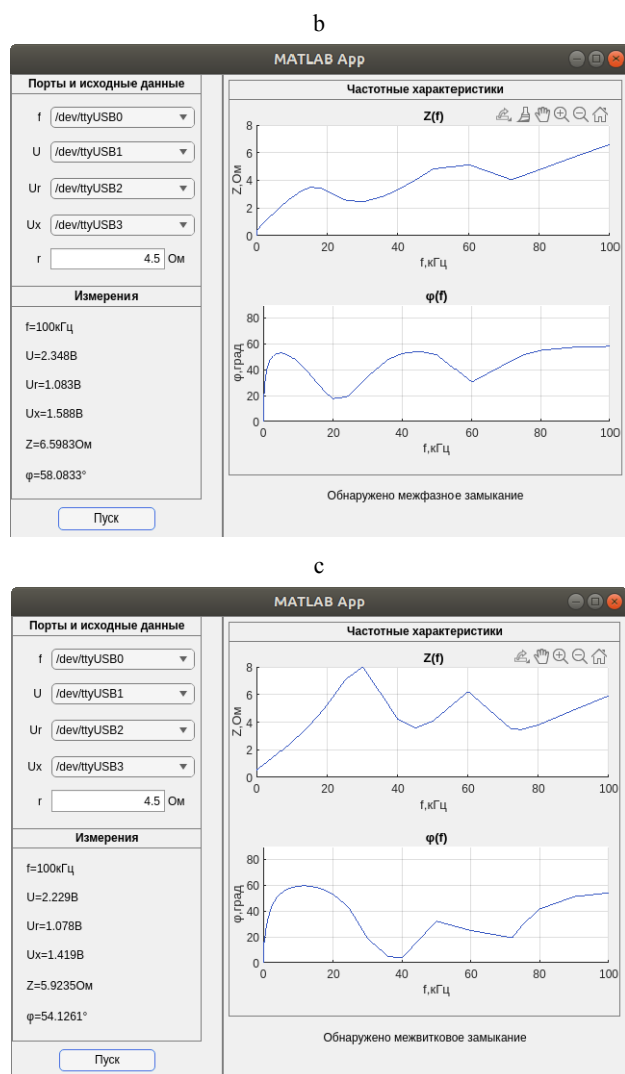


Рис. 7. Окончание

Fig. 7. The end

По характеру изменений частотных характеристик алгоритм распознал дефекты трансформатора.

ВЫВОДЫ

1. Полученные экспериментальные данные для различных дефектов трансформаторов с обмоткой, имеющей эмалевую изоляцию, позволяют на основе частотного анализа выявлять их путем сравнения с бездефектным состоянием обмоток статора.

2. Наиболее значительные изменения касаются формы, амплитуды и частоты первого резонанса импедансной характеристики, что позволяет

сузить классификационную область исследования и используемые ресурсы оборудования.

3. Применение сверточных нейронных сетей в данном случае обосновано, так как позволяет повысить точность и скорость обнаружения различных дефектов трансформаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mahmoudi, N. Experiences with Transformer Diagnosis by DGA: Case Studies / N. Mahmoudi, M. Samimi, H. Mohseni // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2019. Vol. 13, No 23. P. 5431–5439. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1056>.
2. Мурадалиев, А. З. Повышение эффективности диагностики состояния силовых трансформаторов / А. З. Мурадалиев, С. М. Исмаилова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 403–416. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-403-416>
3. Behjat, V. A New Statistical Approach to Interpret Power Transformer Frequency Response Analysis: Nonparametric Statistical Methods / V. Behjat, M. Mahvi, E. Rahimpour // 2015 30th International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran, 2015. P. 142–148. <https://doi.org/10.1109/IPSC.2015.7827740>
4. Зализный, Д. И. Система диагностирования силового масляного трансформатора по тепловым параметрам / Д. И. Зализный, О. Г. Широков // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2013. № 5. С. 30–37.
5. Evaluation of Numerical Indices for the Assessment of Transformer Frequency Response / M. H. Samimi, S. Tenbohlen, A. A. S. Akmal, H. Mohseni // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. Vol. 11, No 1. P. 218–227. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0879>
6. Turn-to-Turn Short Circuit Fault Localization in Transformer Winding via Image Processing and Deep Learning Method / A. Moradzadeh, H. Moayyed, B. Mohammadi-Ivatloo [et al.] // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. Vol. 18, No 7. P. 4417–4426. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3105932>
7. Hramyka, I. Development of Software and Hardware for Identification of Interturn Short Circuit in Single-Phase Transformers / I. Hramyka // 2024 Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), Raipur, India, 2024. P. 241–246. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T60072.2024.10474962>.
8. Анализ электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя с помощью 3D-моделирования / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, Б. М. Хрусталеv, Д. В. Мирош // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 2. С. 125–136. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136>
9. Громыко, И. Л. Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трехфазных трансформаторов на основе частотных характеристик / И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // *Приборы и методы измерений*. 2025. Т. 16, № 2. С. 158–167. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167>
10. Sofian, D. M. Interpretation of Transformer FRA Responses – Part II: Influence of Transformer Structure / D. M. Sofian, Z. Wang, J. Li // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25, No 4. P. 2582–2589. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050342>

Поступила 19.12.2025 Подписана в печать 24.02.2026 Опубликована онлайн 29.05.2026

REFERENCES

1. Mahmoudi N., Samimi M. H., Mohseni H. (2019) Experiences with Transformer Diagnosis by DGA: Case Studies. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13 (23), 5431–5439. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1056>

2. Muradaliyev A. Z., Ismailova S. M. (2025) Increasing the Efficiency of Power Transformer Condition Diagnostics. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (5), 403–416 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-403-416>
3. Behjat V., Mahvi M., Rahimpour E. (2015) A New Statistical Approach to Interpret Power Transformer Frequency Response Analysis: Nonparametric Statistical Methods. *2015 30th International Power System Conference (PSC)*. Tehran, 142–148. <https://doi.org/10.1109/IPSC.2015.7827740>
4. Zalizny D. I., Shirokov O. G. (2013) Diagnostic System of Power Oil Transformer in Accordance with Thermal Parameters. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 30–37 (in Russian).
5. Samimi M. H., Tenbohlen S., Shayegani Akmal A. A., Mohseni H. (2017) Evaluation of Numerical Indices for the assessment of transformer frequency response. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11 (1), 218–227. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0879>
6. Moradzadeh A., Moayyed H., Mohammadi-Ivatloo B., Gharehpetian G. B., Aguiar A. P. (2022) Turn-to-Turn Short Circuit Fault Localization in Transformer Winding via Image Processing and Deep Learning Method. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18 (7), 4417–4426. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3105932>
7. Hramyka I. (2024) 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, 241–246. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T60072.2024.10474962>
8. Pekhota A. N., Galushko V. N., Khrustalev B. M., Mirosh D. V. (2024) Analysis of Electromagnetic and Thermal Processes of an Induction Motor Using 3D Modeling. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 125–136 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136>
9. Hramyka I. L., Galushko V. N. (2025) 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*, 16 (2), 158–167 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167>
10. Sofia D. M., Wang Z., Li J. (2010) Interpretation of Transformer FRA Responses – Part II: Influence of Transformer Structure. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (4), 2582–2589. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050342>

Received: 19 December 2025

Accepted: 24 February 2026

Published online: 29 May 2026