

УДК 621.314

В. Ю. АШУРКО, М. Е. ГОНЧАРОВ (ЭМ-31)

Научный руководитель – канд. техн. наук *В. Н. ГАЛУШКО*

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ГРОМ-31 ДЛЯ ЧАСТОТНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДОТКАЗНЫХ СОСТОЯНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Представлена концепция разработки комплекса ГРОМ-31 для частотной диагностики трансформаторов и выявления предотказных состояний изоляции. Реализован метод частотных характеристик (FRA) с классификацией данных сверточными нейронными сетями. На текущем этапе сформирована обучающая выборка на базе трансформатора ТМ-50/6 и верифицированы алгоритмы распознавания дефектов. Отмечена практическая востребованность разработки со стороны предприятий энергетической и транспортной отраслей Республики Беларусь.

Повышение надёжности энергетического и транспортного оборудования напрямую связано с ранним выявлением скрытых дефектов обмоток и изоляции. Классические методы диагностики часто требуют отключения оборудования, не позволяют оценивать предотказные состояния или опираются на субъективную интерпретацию данных. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является создание программно-аппаратных комплексов, реализующих метод FRA в сочетании с алгоритмами искусственного интеллекта.

Следует отметить, что на текущий момент в Республике Беларусь не производится серийно диагностическое оборудование аналогичного функционального назначения и уровня автоматизации. Анализ зарубежного диагностического оборудования показывает, что существующие аналоги обеспечивают проведение частотного анализа и сравнение полученных спектров с эталонными значениями, однако, как правило, не обладают встроенными алгоритмами автоматизированной диагностики предотказных состояний изоляции. Ключевым научно-техническим отличием разрабатываемого комплекса ГРОМ-31 является интеграция метода частотных характеристик со сверточными нейронными сетями [1], что позволяет не только регистрировать изменения импедансных и фазочастотных характеристик, но и классифицировать степень деградации изоляции до перехода оборудования в аварийный режим.

В настоящее время в Белорусском государственном университете транспорта ведётся разработка комплекса ГРОМ-31, предназначенного для ча-

стотной диагностики электротехнических устройств, содержащих обмотки и магнитопроводы. В данной работе представлены концепция разработки, методологические основы частотного анализа и нейросетевой классификации, а также результаты лабораторных исследований, направленных на формирование обучающей выборки.

Архитектура и принцип действия комплекса ГРОМ-31

Одним из перспективных методов диагностики трансформаторов является метод частотных характеристик. Анализ частотных характеристик условно разделяется на три диапазона: в области низких частот определяющее влияние оказывает магнитная система, в среднем диапазоне – электромагнитное взаимодействие между обмотками, а в области высоких частот значимое влияние вносят измерительные кабели и паразитные ёмкости.

В основе данного метода лежит метод трех вольтметров, который используется для построения частотных характеристик электрических цепей. Полученные данным методом частотные характеристики (импедансная и фазочастотная) преобразуются в изображения, которые затем распознаются с помощью сверточных нейронных сетей.

С помощью данного программно-аппаратного комплекса можно обнаружить дефекты обмотки или сердечника устройства, а также можно выявить предотказные состояния изоляции.

Приведем более подробно результаты исследований для трансформаторов по программно-аппаратному комплексу ГРОМ-31, в корпус которого входят следующие элементы: модуль генератора сигналов с регулируемой частотой до 2 МГц, усилитель, чтобы увеличить выходное напряжение до 15 В на согласованную нагрузку 50 Ом, пробники напряжения, высокочастотный резистор, модули измерения напряжения.

Прибор ГРОМ-31 основан на методе обнаружения неисправностей трансформаторов на основе амплитудно-частотных (импедансных) $Z(\omega)$ и фазочастотных $\varphi(\omega)$ характеристик для определения дефектных состояний с помощью сверточных нейронных сетей [2, 3].

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

Лабораторные исследования и формирование обучающей выборки

Проведение испытаний осуществлялось путем отключения трансформатора от сети и проведения подключений к измерительному оборудованию. Неисправности для обучающей выборки создавались искусственно вмешательством 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 следующих дефектных состояний трехфазного трансформатора ТМ-50/6 с эмалевой изоляцией обмоток: межвитковое короткое замыкание (МКЗ) сопротивления первичной и вторичной обмотки; межфазное короткое замыкание обмоток (МФЗ); короткое замыкание на корпус одной фазы; повреждение сердечника.

Для моделирования предотказных состояний изоляции сопротивление между обмотками и корпусом изменялось с помощью магазина измерительных сопротивлений в диапазоне от 0 до 100 кОм. Фиксация частотных характеристик при каждом шаге изменения сопротивления позволила выявить закономерности деградации изоляции и сформировать помеченные данные для обучения классификатора.

Например, для состояния короткого замыкания первичной обмотки на корпус характерно изменение формы первого резонансного пика, постепенное снижение амплитуды импедансной характеристики относительно бездефектного состояния и смещение частоты первого резонанса в сторону увеличения (рисунок 1).

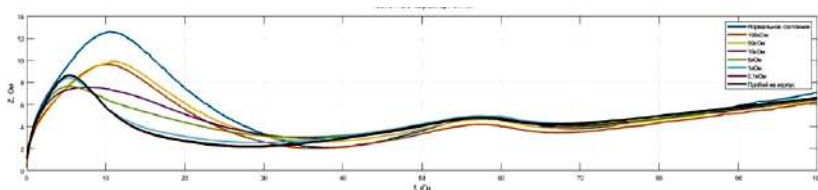
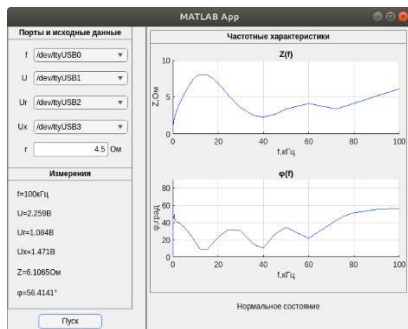


Рисунок 1 – Импедансная и фазочастотная характеристики для дефектного короткого замыкания первичной обмотки на корпус трансформатора ТМ-50/6 при сопротивлениях 0,1; 1; 5; 10; 50, 100 кОм и полном коротком замыкании

Для автоматизации обработки данных применялся алгоритм линейной нормализации и библиотека компьютерного зрения OpenCV. На основании измерений по 65 дискретным частотам в диапазоне 0–100 кГц рассчитывались модули и аргументы комплексных сопротивлений, которые записывались в двумерные массивы и преобразовывались в изображения спектральных зависимостей. Данные изображения подавались на вход двух независимых сверточных нейронных сетей, архитектура которых базируется на модели LeNet: первая сеть анализировала импедансные характеристики, вторая – фазочастотные. Классификация осуществлялась по следующим категориям: класс 0 – нормальное состояние, класс 1 – МКЗ, класс 2 – МФЗ.

Для проверки работоспособности алгоритма было разработано программное обеспечение и проведена серия вычислительных экспериментов на базе лабораторной установки кафедры электротехники БелГУТа (рисунок 2).

а)



б)

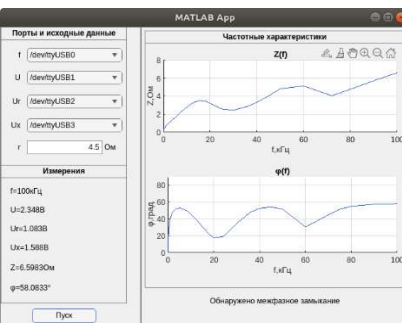


Рисунок 2 – Результаты работы программного комплекса обнаружения дефектов трансформатора: для бездефектного состояния (а); при МКЗ (б)

Перспективы внедрения и заключение

В процессе разработки осуществлялись презентации концепции и промежуточных макетов линейки на предприятиях энергетической и транспортной отраслей, включая ЭТЗ им. В. И. Козлова, дистанцию сигнализации и связи БЖД (г. Орша), моторвагонное депо, а также ОАО «Белэнергоремналадка». По итогам обсуждений со специалистами данных организаций была отмечена практическая значимость разрабатываемого комплекса ГРОМ-31 и выражена заинтересованность в его дальнейшем внедрении в службы КИП.

Разрабатываемый программно-аппаратный комплекс ГРОМ-31 представляет собой перспективное отечественное решение для диагностики трансформаторного оборудования. Основные преимущества проекта заключаются в адаптации метода частотных характеристик для автоматизированного выявления предотказных состояний изоляции, а также в ориентации на требования предприятий энергетической и транспортной отраслей Республики Беларусь. На текущем этапе ведутся работы по финализации аппаратной части и верификации нейросетевых алгоритмов, что создаёт основу для последующих натурных испытаний и потенциального серийного внедрения комплекса в службы контрольно-измерительных приборов промышленных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Исаев, А. В.** Спектрально-импульсные методы измерения сопротивления межвитковой изоляции электрических машин со вспынной обмоткой и приборы на их основе : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / А. В. Исаев [Место защиты: БНТУ]. – Минск, 2024. – 140 с.

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

3 **Мирош, Д. В.** Технология применения нейронных сетей для диагностики межвитковых замыканий в трансформаторах и асинхронных двигателях / Д. В. Мирош, В. М. Овчинников, И. Е. Монархович // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2024. – № 1 (48). – С. 24–29.

Получено 27.05.2026

ISSN 2227-1155. Сборник студенческих научных работ.

Вып. 31. Гомель, 2026

УДК 004.056.5

О. А. БАКИЕВ, П. А. ЖДАНОВ (ЭМ-21)

Научные руководители: старшие преподаватели *В. Е. МИНИН,*
С. С. ТАТУР

АНАЛИЗ СЕТЕВОГО ТРАФИКА С ПОМОЩЬЮ WIRESHARK, ZUI, ZEEK

Обосновывается трехуровневая методология анализа сетевого трафика, основанная на каскадном применении инструментов Zeek, ZUI и Wireshark. Показано, что традиционный подход Full Packet Capture (FPC) сталкивается с проблемой экспоненциального роста объемов данных, делающей хранение и ручной анализ терабайтных дампов экономически нецелесообразным. Предложенная архитектура базируется на принципе семантической компрессии. Доказано, что интеграция инструментов в единый континуум абстракции преодолевает фундаментальные ограничения каждого из них в отдельности.

Современные информационно-телекоммуникационные инфраструктуры генерируют колоссальные объемы данных, которые превращают сетевой трафик в ключевой источник для мониторинга безопасности и диагностики сбоев.

Традиционная парадигма полного захвата пакетов (Full Packet Capture, FPC) является «золотым стандартом» криминалистики, сталкивается с критическими ограничениями: на высокоскоростных каналах суточные объемы дампов достигают терабайт, что делает их хранение экономически нецелесообразным, а ручной поиск аномалий в них – практически невозможным.

В то же время упрощенный Flow-анализ хотя и решает проблему объема,