

УДК 658.512.2:621.314.21

В. В. САВИЦКАЯ (ЭТ-41)

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

ОБЗОР СТУДЕНЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК МАКЕТОВ ПРИБОРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ, АСИНХРОННЫХ И БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рост промышленности, цифровизации и ИИ повышает спрос на электроэнергию; дефицит энергоресурсов и повышение цен подчёркивают необходимость эффективного использования и продления срока службы энергетического оборудования. Ключевая задача – ранняя диагностика дефектов (межвитковые КЗ, обрывы, повреждения сердечника, ухудшение изоляции) для повышения надёжности и продления эксплуатации. В БелГУТе реализуются проекты по разработке макетов приборов для диагностики обмоток и магнитных систем; приборы прошли испытания на предприятиях (ЭТЗ им. Козлова, БЖД и др.).

Линейка включает три программно-аппаратных комплекса: ГРОМ-12, ГРОМ-21 и ГРОМ-31. Все приборы ориентированы на практическое применение: простота, универсальность, невысокая стоимость, возможность интеграции в службы КИПиА.

ГРОМ-12 предназначен для обнаружения короткозамкнутых витков и обрывов (включённое состояние: ВЫКЛ).

Назначение: поиск межвитковых коротких замыканий и обрывов обмоток при выключенном оборудовании.

Принцип работы: универсальный LC-генератор, в котором обмотка исследуемого устройства служит индуктивностью. Генератор состоит из конденсатора, электронного сопротивления, автогенератора и регулируемого электронного сопротивления под управлением микропроцессора. При штатной обмотке настраиваемые параметры обеспечивают устойчивые колебания; при обрыве или МКЗ колебания прекращаются (рисунок 1).

Индикация: светодиоды сигнализируют о наличии межвиткового КЗ или обрыва.

Память: встроенная база параметров для типового оборудования (для удобства испытаний).

Преимущества: простота конструкции и эксплуатации, универсальность, низкая стоимость.

Применение: быстрый скрининг обмоток перед ремонтом или при приёмке оборудования.

ГРОМ-21 предназначен для онлайн-обнаружения межвитковых коротких замыканий (в рабочем состоянии)

Назначение: обнаружение МКЗ в реальном времени без отключения устройства от сети.

Принцип работы: прибор измеряет на обмотках напряжения, токи, активные мощности и коэффициенты мощности; строит графики зависимости этих величин во времени; преобразует временные зависимости в изображения и применяет сверхточные нейронные сети (CNN) для распознавания характерных признаков МКЗ (рисунок 2).

Преимущества: позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях без остановки производства; автоматизация анализа через CNN повышает чувствительность к малым признакам дефекта.

Комментарий: эффективность CNN зависит от качества и объёма обучающей выборки; прибор удобен для постоянного мониторинга.



Рисунок 1 – Внешний вид макета ГРОМ-12



Рисунок 2 – Внешний вид прибора ГРОМ-21

ГРОМ-31 осуществляет полную диагностику в отключенном состоянии: FRA + CNN.

Назначение: комплексная диагностика трансформаторов и других устройств с обмотками и сердечником методом частотных характеристик (FRA) с последующей обработкой CNN. Позволяет выявлять дефекты обмоток, повреждения сердечника и «предотказные» состояния изоляции.

Принцип FRA: анализ амплитудно-частотных (импедансных) $Z(\omega)$ и фазо-частотных $\varphi(\omega)$ характеристик в широком частотном диапазоне; частотные диапазоны дают информацию о различных компонентах (низкие – магнитная система, средние – взаимодействие обмоток, высокие – влияние измерительных кабелей). Метод трёх вольтметров используется для построения частотных характеристик цепи. Полученные характеристики преобразуются в изображения и анализируются CNN.

Аппаратная конфигурация (в корпусе ГРОМ-31):

- модуль генератора сигналов с регулируемой частотой до 2 МГц;
- усилитель для увеличения выходного напряжения до 15 В на согласованную нагрузку 50 Ом;

– пробники напряжения; высокочастотный резистор; модули измерения напряжения; система подключения по методу трёх вольтметров; магазин измерительных сопротивлений для имитации ухудшения изоляции (0–100 кОм).

Обучение и верификация:

– дефекты моделировались искусственно (вмешательство в выводы обмоток, изменение сопротивлений и т. д.);

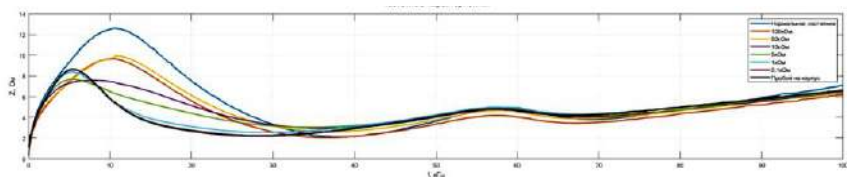
– измерения проводились в режиме холостого хода в диапазоне до ~1 МГц; рассчитывались модуль и аргумент комплексного сопротивления; сравнение с базовой (бездефектной) характеристикой позволяет выявлять изменения; CNN классифицируют состояния и определяют «предотказные» уровни.

Преимущества и ограничения: гибкость обработки больших объёмов данных и устойчивость к шумам – ключевые плюсы; основной минус – потребность в большом числе обучающих примеров.

Испытания трансформатора ТМ-50/6 проводили, отключая его от сети и подключая к измерительному оборудованию. Неисправности для обучающей выборки создавали искусственно: изменяли/повреждали обмотки (припаивали выводы, изолировали и выводили их на бак) для моделирования различных дефектов.

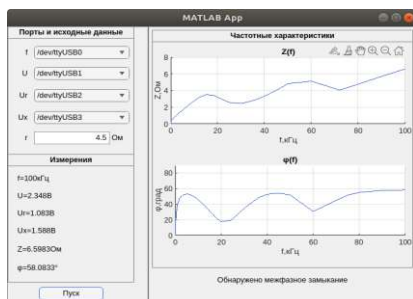
Частотные характеристики снимали методом трёх вольтметров в режиме холостого хода в диапазоне частот до 1 МГц, сравнивая их с характеристиками бездефектного состояния. Изучали дефекты: межвитковое короткое замыкание (МКЗ), межфазное замыкание, замыкание на корпус и повреждение сердечника.

Для имитации предотказных состояний изменяли сопротивление изоляции (примерно 0–100 кОм) и фиксировали частотные характеристики. Далее по данным с мультиметров рассчитывали модуль и аргумент комплексного сопротивления по 65 частотам (0–100 кГц), формировали на их основе изображения и подавали их в две сверточные нейросети (архитектура LeNet): одна анализировала импеданс, вторая – фазо-частотную характеристику (рисунок 3).



Классы для обучения/оценки: 0 – исправное состояние, 1 – МКЗ, 2 – межфазное замыкание. Для проверки алгоритма разработали программное обеспечение и провели серию экспериментов на трёхфазном трансформаторе. Для проверки работоспособности алгоритма было разработано программное обеспечение и проведена серия экспериментов на трехфазном трансформаторе ТМ-50/6 (рисунок 4).

а)



б)

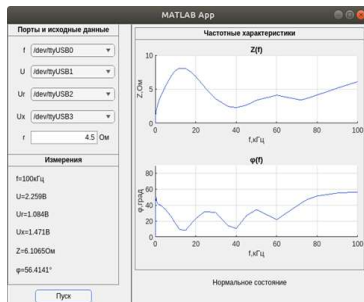


Рисунок 4 – Результаты работы программного комплекса обнаружения дефектов трансформатора:
для бездефектного состояния (а); при МКЗ (б)

Приборы успешно протестированы на реальном оборудовании: ЭТЗ им. Козлова, БЖД, Минский электромеханический завод и др. Эксперты оценили приборы положительно и отметили целесообразность внедрения в службы КИП.

Как достоинства отмечены универсальность, простота эксплуатации, относительная дешевизна по сравнению с аналогами.

Предложения по улучшению приборов: повышение влагозащиты корпуса, логирование и хранение событий (файлы), проверки перед измерениями, объединение функций нескольких приборов в одном корпусе. Эти предложения реализуются в новой линейке, финансируемой университетским грантом.

Разработанная линейка (ГРОМ-12, -21, -31) обеспечивает инструменты для ранней диагностики обмоточных и магнитных дефектов как в отключённом, так и в рабочем состоянии. Комбинация классических методов (LC-генератор, FRA, метод трёх вольтметров) с современными алгоритмами машинного зрения (CNN) даёт практичные и экономичные решения для предприятий.

Дальнейшие работы направлены на реализацию предложенных улучшений, расширение обучающих выборок и интеграцию устройств в сервисные процессы предприятий.

Получено 05.06.2026