

При этом надо учитывать, что МЭК 61508 прямо говорит, что одноканальное исполнение без специальных архитектурных решений может обеспечить максимум УПБ2. Поэтому разработки сторонних организаций (если обратное не подтверждается соответствующим сертификатом) не могут иметь УПБ выше УПБ2 (а чаще ограничиваются УПБ1). Достижение более высокого УПБ должно базироваться на специальных архитектурных методах, например, дублировании. Однако при этом надо помнить, что если несколько элементов с различными УПБ участвуют в выполнении функции безопасности последовательно, то результирующий УПБ будет равен наименьшему УПБ.

Повысить УПБ можно, только используя многоканальное построение (например, дублирование). В этом случае УПБ системы в наилучшем случае (при выполнении всех мероприятий по защите от систематических отказов) может достигать суммы УПБ отдельных каналов. Но при этом следует учитывать, что на результат оказывают сильное влияние отказы по общей причине. В многоканальной структуре такие отказы принято считать опасными. Интенсивность отказов по общей причине обычно составляет 1–5 % от интенсивности опасных отказов аналогичной одноканальной системы, поэтому без дополнительных мероприятий максимум чего можно достичь, это увеличения большего УПБ на единицу. Дополнительного повышения УПБ можно достичь, например, применением диверситета, который позволяет значительно снизить влияние отказов по общей причине на общую безопасность системы.

Таким образом, можно сформулировать основные подходы к оценке показателей функциональной безопасности систем технического зрения:

1) оценка правильности выбора УПБ системы и компонентов, оценка полноты и корректности критериев опасных отказов и требуемых количественных показателей функциональной безопасности (могут быть использованы статистические методы, например, принцип GAMAB, и требования нормативных документов);

2) оценка полноты перечня мероприятий по защите от систематических отказов, выполняемых на каждом этапе ЖЦ (для системы в целом в соответствии с установленным УПБ);

3) оценка корректности определения УПБ сторонних компонентов (при отсутствии сертификата – не более УПБ2), и оценка полноты перечня мероприятий по защите от систематических отказов на уровне отдельных разрабатываемых компонентов (в соответствии с установленным УПБ для компонента);

4) оценка влияния систематических отказов для системы, определение стойкости к систематическим отказам (*systematic capability*);

5) оценка влияния случайных отказов (выполнение анализа *FMECA*, построение деревьев отказов и расчет количественных показателей функциональной безопасности на уровне одноканальных компонентов);

6) оценка влияния отказов по общей причине для многоканальных компонентов;

7) оценка влияния случайных отказов для системы в целом (расчет общих количественных показателей функциональной безопасности и сравнение количественных показателей с нормативными значениями для установленного УПБ или требованиями технического задания);

8) принятие решения о соответствии системы заданному УПБ (стойкость к систематическим отказам соответствует УПБ, количественные показатели соответствуют УПБ).

УДК 621.314

## **ДИАГНОСТИКА ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

*И. Л. ГРОМЫКО, Д. В. МИРОШ, К. Я. ШАБЛОВСКИЙ, И. Е. МОНАРХОВИЧ*  
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

На сегодняшний день более 50 % трансформаторов системы электроснабжения железнодорожной отрасли страны отработали 25 лет – установленный согласно [1] срок службы. Многие из таких трансформаторов могут эксплуатироваться еще длительное время, однако в этом случае должны предъявляться повышенные требования к методам диагностики их технического состояния.

Цель исследования – разработка программного и аппаратного (на базе энергометров) обеспечения для определения технического состояния трансформаторов системы электроснабжения.

Для реализации данной цели было разработано программное обеспечение для мониторинга текущего состояния трансформатора с помощью сверточных нейронных сетей [2]. Аппаратное обеспечение состоит из двух энергометров PZEM-004T-100A, которые считывают данные (напряжение, ток, активная мощность и коэффициент мощности) с первичной и вторичной обмоток трансформатора и передают их на компьютер.

В основе программного обеспечения лежит алгоритм, который с помощью сверточных нейронных сетей сравнивает текущее состояние трансформатора с нормальным. Данные для нормального трансформатора формируются на основе введенных параметров и его T-образной схемы замещения. В то же время данные для текущего состояния берутся напрямую с энергометров. Далее идет параллельная обработка текущего и нормального состояний.

Из-за различного рода помех определить по отдельным данным нормальное или ненормальное состояние достаточно проблематично, поэтому для минимизации влияния помех лучше всего использовать отношения напряжений, токов, активных мощностей и коэффициентов мощностей, между первичной и вторичной обмотками трансформатора. Используя линейную нормализацию и библиотеку OpenCV, алгоритм преобразует полученные отношения в изображения. Затем происходит наложение изображений нормального и текущего состояний и анализ с помощью сверточных нейронных сетей. Результат наложения изображений по отношению токов представлен на рисунке 1.

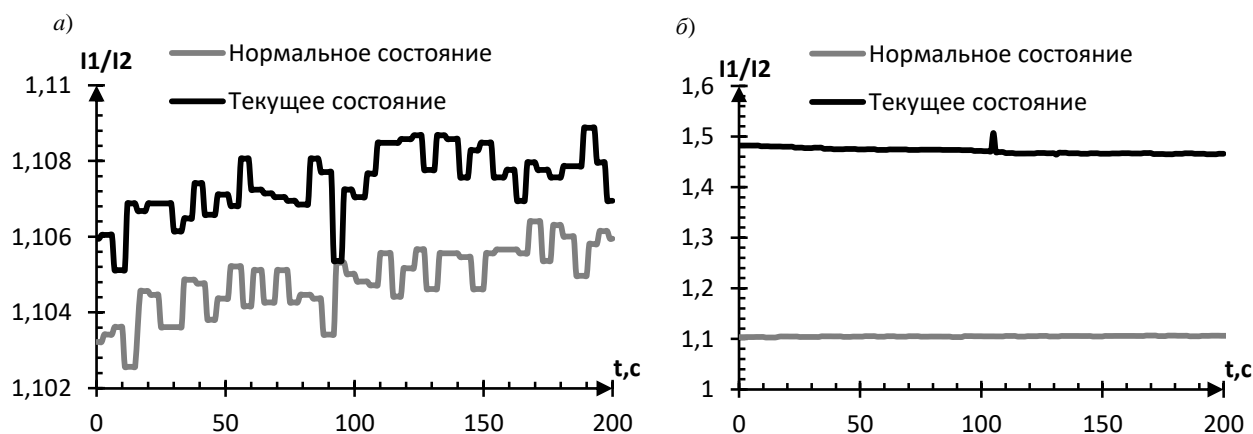


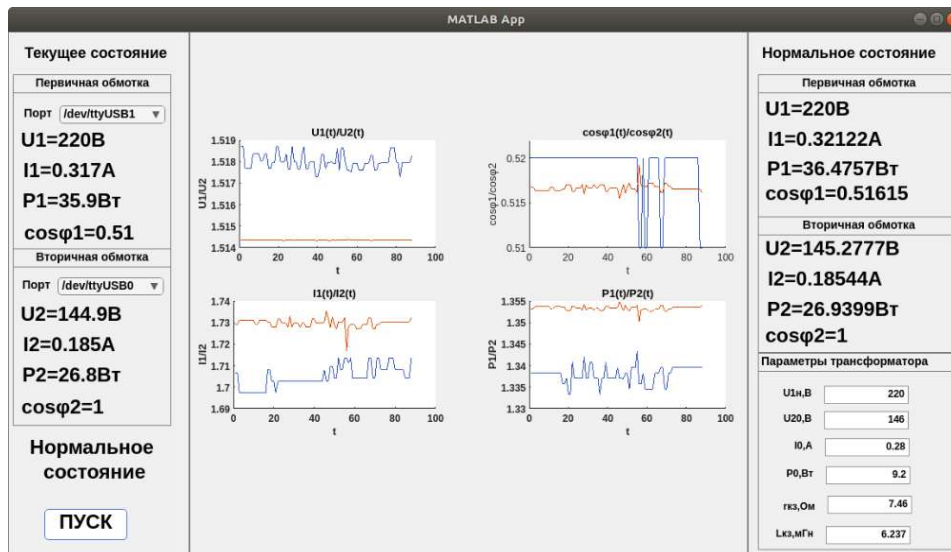
Рисунок 1 – Результат наложения изображений по отношению токов между первичной и вторичной обмотками при нормальном (а) и ненормальном (б) состояниях трансформатора

Если отношения токов, снятые с трансформатора при его текущем состоянии, практически не отличаются от данных, снятых при его нормальном состоянии (см. рисунок 1, а), то можно сделать вывод, что трансформатор находится в нормальном состоянии. В противном случае (см. рисунок 1, б), можно сделать вывод о недопустимом техническом состоянии. Однако этого вывода недостаточно для оценки состояния трансформатора. Поэтому аналогичные изображения формируются ещё на основании отношений активных мощностей и коэффициентов мощностей. Отношения напряжений не используются из-за малой информативности.

Полученные изображения затем передаются на входы трех сверточных нейронных сетей. Первая нейронная сеть отвечает за мониторинг состояния трансформатора на основании отношений токов, вторая сеть отвечает за отношения активных мощностей, а третья – за отношения коэффициентов мощностей. На выходе, нейронные сети выдают только два числа: «0» (нормальное состояние) и «1» (ненормальное состояние). Если первая и вторая (или третья) нейронные сети выдали «1», то алгоритм делает вывод о нормальном состоянии трансформатора. В противном случае – трансформатор неисправен.

Для проверки работы программного обеспечения были произведены эксперименты с трансформатором ТС-280Р. На данном трансформаторе выполнялось и обучение сверточных нейронных сетей. Результаты работы программного обеспечения приведены на рисунке 2.

а)



б)

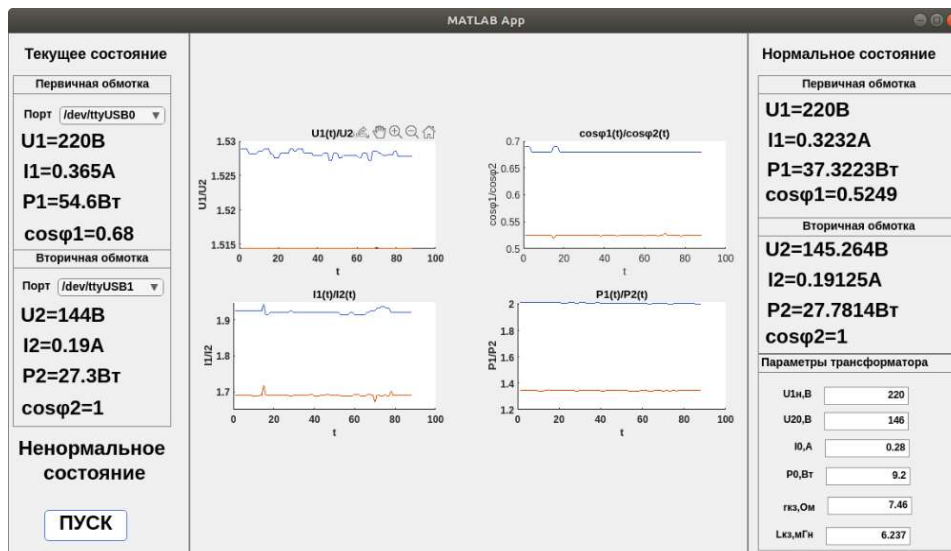


Рисунок 2 – Работа программы при нормальном (а) и ненормальном (б) состояниях

На четырех диаграммах представлены графики зависимостей отношений от времени процесса проверки. На каждой диаграмме синим цветом отмечен график при нормальном состоянии трансформатора, оранжевым – при ненормальном. Время процесса проверки измеряется в секундах. После ввода параметров трансформатора указания портов подключения энергометров к компьютеру и нажатия кнопки «ПУСК» программное обеспечение выдает информацию о состоянии трансформатора.

Применение разработанного программного обеспечения в диагностике систем энергоснабжения позволит контролировать состояние трансформаторов в режиме реального времени, не выводя их из работы. Это предоставляет дополнительные возможности в обеспечении низкого уровня безаварийности и соблюдения режимов бесперебойного электроснабжения, что позволит избежать значительных экономических и экологических издержек или реального ущерба для потребителей.

#### Список литературы

1 ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – Введ. 1986-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 39 с.

2 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.