

ника при КЗ начальным условием является температура проводника в условиях номинального установившегося режима, за это отвечает  $f_n$ . Начальная температура в установившемся режиме должна быть равна длительно допустимой температуре и составлять 70 °С. Конечная температура в момент отключения КЗ не должна превышать предельно допустимую, которая варьируется от рода материала, для алюминия это 200 °С [1]. Таким образом, при КЗ температура проводника может безопасно вырасти на 130 °С. За величину роста температуры, исходя из уравнения (3), отвечает слагаемое  $k \frac{B_k}{q^2}$ . Таким образом, если величина интеграла Джоуля обеспечивает прирост температуры на величину, близкую или большую, чем 130 °С, необходимо проводить проверку токоведущих частей на тепловую стойкость при КЗ. Однако, как показывает практика расчетов, реальные тепловые импульсы редко достигают подобных значений.

На основании практических расчетов можно сделать вывод, что для жестких алюминиевых при  $\frac{B_k}{q^2} < (7,5 - 8)10^{-3}$  допускается проверка на термическую стойкость не проводить. При помощи аналогичных рассуждений можно получить величину отношения  $\frac{B_k}{q^2}$  для других материалов, а задавшись величиной минимальной площади, можно получить отдельно величину самого интеграла Джоуля и ориентировочную величину тока КЗ, которая позволит принять решение о необходимости проведения детальных расчетов по [2] для проверки токоведущих частей по термической стойкости при коротком замыкании.

#### Литература

1. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций : учеб. для техникумов / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – 2-е изд, перераб. – М. : Энергия, 1980.
2. ГОСТ Р 52736–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. – М. : Стандартинформ, 2007.

### **СВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕЖВИТКОВОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРЕ**

**И. Л. Громыко**

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет  
транспорта», г. Гомель*

Научный руководитель В. Н. Галушко

Одним из наиболее распространенных следствий ухудшения свойств изоляции являются межвитковые замыкания. При межвитковом замыкании изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя трансформатора.

В качестве объекта исследования использовались однофазные трансформаторы малой мощности с воздушным охлаждением. В ходе экспериментов при изменяющейся нагрузке трансформатора выполнялось межвитковое замыкание различного числа витков на одной фазе первичной и вторичной обмоток. Схема экспериментальной установки по исследованию межфазного короткого замыкания (МКЗ) трансформатора представлена на рис. 1.

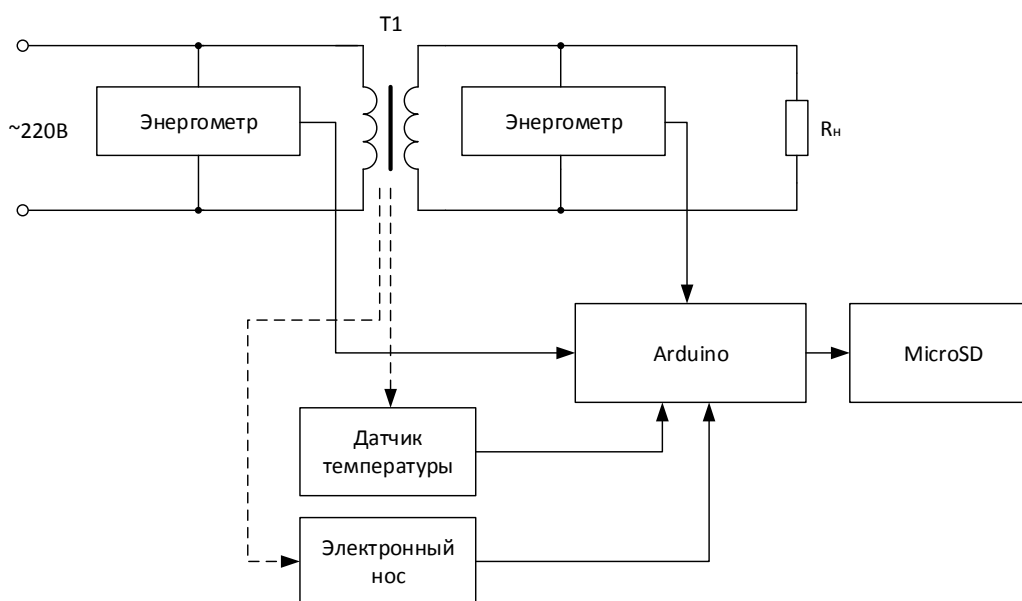


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию МКЗ трансформатора

Отслеживая в режиме реального времени возможные текущие сбои, можно снизить количество unplanned ремонтов и отказов указанного оборудования.

При проведении экспериментальных исследований были предусмотрены следующие мероприятия:

- МКЗ проводились в режиме реального времени на первичной и вторичной обмотках однофазного трансформатора с воздушным охлаждением;
- МКЗ выполнялось на двух-, пяти- и десяти витках;
- осуществлялась регистрация с помощью приборов и датчиков.

В то же время проводился анализ информации с использованием следующих данных:

- напряжения и токи первичной и вторичной обмоток;
- активные, реактивные и полные мощности по высокой и низкой стороне трансформатора;
- анализировался состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции с помощью устройства «электронный нос»;
- измерялась температура в зоне КЗ и на удалении 5 см от обмоток;
- проводилось осциллографирование и разложение по гармоникам кривых тока и напряжения;
- выполнено более 500 измерений при нормальном режиме работы и при межвитковом замыкании с интервалом в 1 с при 7 различных активных и активно-индуктивных нагрузках;
- получаемые результаты приборного учета через аналогово-цифровой преобразователь поступали на вход в программу MATLAB в качестве исходных данных для нейромодели с целью ее обучения и анализа информации и создания математической модели;
- с помощью RLC-метра определялись параметры обмоток трансформатора.

Разработка математического инструментария диагностирования состояния трансформаторов позволит решить следующие задачи:

– анализ процессов для настройки оборудования и аппаратов защиты от исследуемых неисправностей;

– обучение сверточных нейронных сетей.

Данные датчиков используются в качестве исходных данных для сверточных нейронных сетей. Самый популярный вариант их использования – это обработка и анализ изображений. В нашем случае они позволяют на основе информации, представленной в виде множества изменяющихся в реальном времени графиков, анализировать данные. Такой вид использования данных позволяет установить множественные взаимосвязи между отдельными факторами и, применяя нормированные данные, использовать их для быстрой настройки к другим силовым трансформаторам.

На рис. 2 и 3 приведен результат обучения и применения сверточных нейронных сетей, причем вероятность распознавания составила 99,9 %.

```
Training on single CPU.
Initializing input data normalization.
```

Epoch	Iteration	Time Elapsed (hh:mm:ss)	Mini-batch Accuracy	Mini-batch Loss	Base Learning Rate
1	1	00:00:00	38.28%	1.0837	0.0100
9	50	00:00:19	100.00%	0.0054	0.0100
17	100	00:00:38	100.00%	0.0027	0.0100
25	150	00:00:58	100.00%	0.0009	0.0100
30	180	00:01:09	100.00%	0.0008	0.0100

Рис. 2. Таблица результатов обучения и применения сверточных нейронных сетей

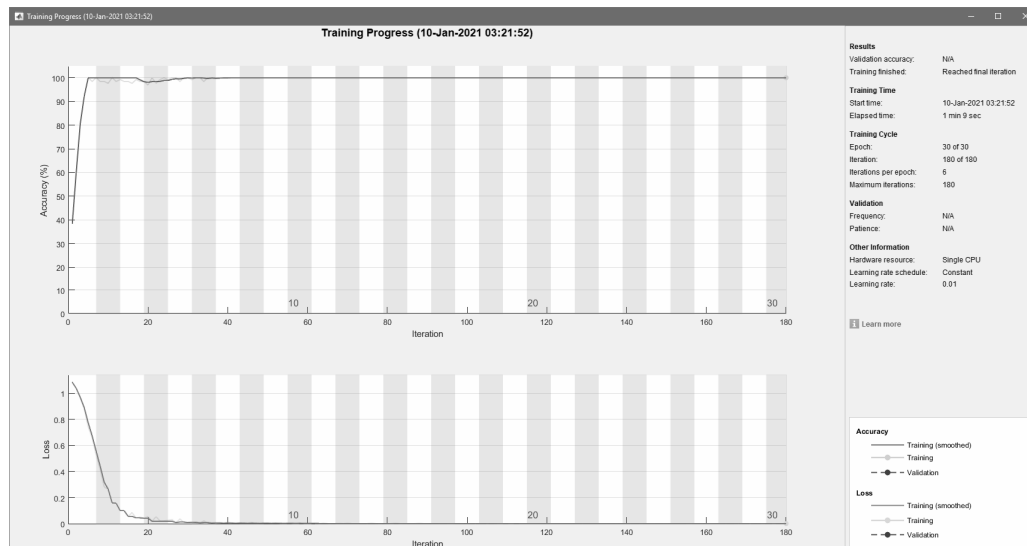


Рис. 3. Результаты обучения и применения сверточных нейронных сетей

Научная новизна материала статьи заключается в практическом применении сверточных нейронных сетей, которые в режиме реального времени анализируют информацию, классифицируют различные отклонения и диагностируют определенный вид дефекта. Практическая значимость заключается в снижении неплановых отказов, заблаговременном предупреждении о развитии повреждения. В работе приво-

дится анализ информации для классификации таких повреждений, как межвитковые замыкания, междуфазные короткие замыкания, дефекты межлистовой изоляции магнитопровода, местное замыкание пластин стали и «пожар» в стали.

Применение нейромоделирования в диагностике систем обеспечения энергообеспечения позволит контролировать состояние трансформаторов в режиме реального времени, не выводя трансформатор из работы, что предоставляет дополнительные возможности в обеспечении низкого уровня безаварийности и соблюдения режимов бесперебойного электроснабжения сопровождающимся, как правило, значительными экономическими и экологическими издержками или реальным ущербом для потребителей. При этом затраты на внедрение данной технологии нейромоделирования относительно невелики (например, применение одноплатных компьютеров), а эффективность от применения будет существенной.

#### Л и т е р а т у р а

1. Шерязов, С. К. Классификация факторов, влияющих на витковые замыкания в трансформаторах напряжением 6–10/0,4 кВ / С. К. Шерязов, А. В. Пятков // Вестн. КрасГАУ. – 2014. – № 7.
2. Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. – СПб. : СЗТУ, 2004. – 56 с.

### **ДИАГНОСТИКА ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРНОГО УЧЕТА ДАННЫХ И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

**И. Л. Громыко, В. О. Белькин**

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет  
транспорта», г. Гомель*

Научный руководитель В. Н. Галушко

Неотъемлемым элементом при централизованном электроснабжении является трансформатор. Выход из строя силового трансформатора может привести к созданию аварийных ситуаций, перебоям электроснабжения, массовому недоотпуску продукции. Поэтому контроль состояния трансформатора является важной задачей.

В связи с этим данная статья посвящена диагностике различных дефектов трансформатора и способам их классификации с помощью нейронных сетей.

Основные неисправности силовых трансформаторов:

1. Межвитковые замыкания. Основными причинами возникновения межвитковых замыканий в трансформаторе являются старение изоляции, перенапряжения или низкая организация производства и эксплуатации.

2. Местное замыкание пластин стали (пожар в стали). Это явление заключается в чрезмерном нагреве вихревыми токами какой-либо части магнитопровода вследствие нарушения изоляции между листами стали или между магнитопроводом и стягивающими его шпильками.

3. Наличие примесей в трансформаторном масле. В масле содержится около 70 % информации о состоянии маслonaполненного оборудования. Это нерастворенные вещества, содержащиеся в масле в виде осадка или во взвешенном состоянии, например, волокна, пыль, продукты растворения. Другие примеси появляются в масле после внутренних повреждений трансформатора, например, электрической дуги, мест перегревов, в виде обуглившихся частиц.

В связи с этим разработан комплексный подход анализа данных с помощью приборного учета в режиме реального времени. В качестве основных параметров выступают температура, вибрация и задымленность.