

УДК 621.314

И. Л. ГРОМЫКО, Д. В. МИРОШ, аспирант, В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, В. О. БЕЛЬКИН, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

Рассмотрено применение самообучаемых систем на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) для устранения недостатков существующих систем диагностирования трансформаторов, которые решают проблемы избыточности информации при системном подходе к мониторингу оборудования и позволяют унифицировать программное обеспечение. Для достижения высокой точности, хороших результатов по классификации и обнаружению неисправностей перспективным направлением является сверточная нейронная сеть с архитектурой глубокого обучения. Авторами был предложен и внедрен метод определения влажности изоляции с помощью фигур Лиссажу на основе сверточных нейронных сетей.

Разработка системы оценки технического состояния трансформаторов в системе железнодорожного нетягового электроснабжения линий сигнализации, централизации, блокировки, предприятий железнодорожных электрических сетей (ПЭ и АБ) и на подстанциях является актуальной задачей. На сегодняшний день более 50 % трансформаторов системы электроснабжения железнодорожной отрасли страны отработали установленный срок службы (25 лет), согласно ГОСТ 11677-85. Многие из таких трансформаторов могут эксплуатироваться еще длительное время, однако в этом случае должны предъявляться повышенные требования к методам диагностики их технического состояния. С другой стороны, многие специалисты отмечают, что менять трансформатор по истечении его назначенного ресурса (25 лет [1]) зачастую оказывается нецелесообразно [2]. В случае, если условия работы оборудования на протяжении срока эксплуатации соответствовали расчетным, а нагрузки не превышали номинальных значений, велика вероятность того, что состояние его твердой изоляции (основной параметр, определяющий реальный срок службы трансформатора) после завершения назначенного ресурса останется удовлетворительным.

Необходимо отметить, что за прошедшие годы была проделана большая работа по созданию методов диагностики трансформаторного оборудования, позволяющих при комплексном их применении адекватно оценить состояние обследуемого объекта с надежностью, достигающей 98 % [3]. Однако несмотря на это, количество трансформаторов, «доживающих» до отказов по причине термохимического старения твердой изоляции, составляет по разным источникам от 7 до 20 % [4]. То есть причиной отказа от 80 до 93 % трансформаторов являются различные своевременно не выявленные дефекты. Данная ситуация обусловлена низкой эффективностью традиционной схемы диагностики.

Например, для ШЧ наиболее распространенными являлись следующие типы трансформаторов: ПРТ-А в путевой коробке на питающем конце рельсовой цепи; СОС2-50 светофора; СОБС-2А; СТ-3; ПОС2-50. Статистика по выходу из строя трансформаторов с 2014 по 2022 г. указывает, что основной причиной выхода из строя являлись короткие замыкания (37 %), обрывы в обмотках (21 %), грозовые перенапряжения. Часто (бо-

лее 20 %) установление причин выхода из строя представлялось затруднительным. Так как надежность системы железнодорожной автоматики и телемеханики является важнейшим параметром функционирования железнодорожных перевозок, то отсутствие современной системы мониторинга состояния данного оборудования является актуальной задачей.

Традиционная схема (проведение плановых комплексных обследований) разрабатывалась для условий плановой экономики СССР, принципы которой исключали возможность эксплуатации большого количества оборудования сверх расчетного периода. Соответственно, период комплексных обследований выбирался с учетом вероятностей появления и скоростей развития дефектов в трансформаторах с наработкой до 25 лет и не учитывал особенности развития дефектов в состаренном оборудовании. Вследствие этого в современных условиях участились случаи, когда за период между обследованиями дефект успевает зародиться, развиваться и вызвать аварийный отказ трансформатора. При этом простое сокращение интервала проведения обследований приводит к неприемлемому увеличению затрат на диагностику, что говорит о необходимости разработки схемы диагностики, эффективной в современных условиях.

При этом следует помнить, что плановое техническое диагностирование позволяет решить следующие задачи: повысить надежность работающих трансформаторов; сократить время ремонтов; уменьшить количество запасных изделий на предприятиях; увеличить срок службы трансформаторов; сократить стоимость ремонтных работ; исключить повторные дефекты.

Для возможности реализации обслуживания оборудования по фактическому состоянию ведутся активные разработки и внедрение автоматизированных комплексных систем диагностики и диагностики, позволяющие в различных режимах без отключения оборудования, оценивать его текущее техническое состояние [5, 6]. Такие системы помогают выявлять различного вида дефекты, некоторые – формировать технические рекомендации по продлению срока эксплуатации, планировать сервисное обслуживание и ремонтные циклы.

Ряд авторов [7] доказывает экономическую целесообразность профилактических испытаний и постоянного мониторинга силового электрооборудования.

Современные автоматизированные системы диагностики состояния трансформаторов и электрических

машин чаще всего разрабатываются для конкретного вида оборудования и их применение на других типах оборудования требует трудоемкой настройки библиотеки базы данных и значительной технической доработки. Этого можно избежать за счет применения самообучающихся интеллектуальных систем. Применение ИИС позволяет унифицировать диагностические исследования, не прибегая к созданию библиотек баз данных для каждого типа трансформатора. Также оптимизируется применение данных систем за счет простоты практического применения и устранения человеческого фактора при анализе результатов. С ростом числа исследований снижается вероятность ошибки, а системный подход (оценка множества факторов между собой в динамике) позволяет увеличить точность прогнозирования [8–10].

Оценка состояния изоляции различными емкостными методами возможна только для волокнистой изоляции (класса А), так как для нее характерна зависимость явления поляризации от увлажненности. У многослойной изоляции класса В явление поляризации значительно, из-за чего емкостные методы в этом случае неэффективны.

В этой связи разработка и исследование высокоэффективных систем диагностического контроля состояния трансформаторов, в основу которых положен системный универсальный подход и возможность непосредственного применения разработанных систем диагностики в технологический процесс обслуживания представляет действительно актуальную научно-техническую проблему современной системы электроснабжения железнодорожных потребителей.

Авторы разработали высокоэффективную универсальную диагностическую систему для определения и классификации неисправностей трансформаторов и оценки остаточного ресурса изоляции обмоток на основе сверточных нейронных сетей для трансформаторов нетягового электроснабжения линий сигнализации, централизации, блокировки, предприятий железнодорожных электрических сетей.

Разработанная методика высокоэффективной диагностической системы и технология ее применения на основе сверточных нейронных сетей нашла положительные отзывы при практическом применении в практике эксплуатации таких подразделений железнодорожной отрасли, как ШЧ и локомотивные депо. Получены акты внедрения от дистанции электроснабжения железной дороги, ШЧ и локомотивного депо о высокой заинтересованности в применении разработанных технологий для диагностических исследований трансформаторов с воздушным охлаждением и дальнейшем развитии с целью диагностики масляных трансформаторов и тяговых асинхронных двигателей.

Материалы, полученные в ходе выполнения данной научно-исследовательской работы, используются как иллюстрационный, практический и лабораторный материал в образовательном процессе по курсу «Электрические машины и преобразователи» для студентов механического и электротехнического факультетов БелГУТа.

Система мониторинга, по сравнению с методами технического диагностирования, обладает рядом технических преимуществ, но экономически установка

данных систем на каждый трансформатор нецелесообразна. Для решения задачи можно рассмотреть внедрение системы мониторинга на основе данных технического диагностирования без отключения из эксплуатации либо при плановых диагностических испытаниях в лабораториях ШЧ, локомотивных депо, дистанций электроснабжения БДЖ.

Западноевропейские системы, в отличие от Республики Беларусь не ставят своей задачей продление срока службы электрооборудования, поскольку зарубежная практика предполагает замену оборудования после окончания его срока службы. Также существуют достаточно большие отличия в нормативной документации по обслуживанию, диагностированию, составу оборудования и его эксплуатации, которые не позволяют использовать зарубежные системы диагностирования оборудования.

Традиционные методы испытаний включают в себя измерение различных параметров, таких как полное сопротивление короткого замыкания, потери холостого хода, коэффициент трансформации, ток намагничивания, сопротивление обмотки.

Увлажнение внутриобмоточной изоляции трансформатора вызывает увеличение внутриобмоточных емкостей и приводит к уменьшению собственных частот составляющих обмотки (слоя, катушки) трансформатора и коэффициента передачи.

Если подать тестовое напряжение U_1 к выводам обмотки низкого напряжения силового трансформатора, а с выводов обмотки высокого напряжения снимать напряжение U_2 (плавно меняя частоту от десятков до сотен килогерц), и таким способом снять АЧХ при разных состояниях внутриобмоточной изоляции, то можно отметить, как изменяется разность напряжений $\Delta U = |U_1| - |U_2|$ от увлажнения или старения.

Из вышеизложенного можно заключить, что экстремальные точки АЧХ $k_1(f) = U_2/U_1$ и $k_2(f) = \Delta U$ смещаются относительно оси абсцисс в зависимости от изменения состояния (увлажнения, старения) витковой, слоевой или межобмоточной изоляции силового трансформатора. Значение амплитуды напряжения на разных экстремальных точках также изменяется в зависимости от состояния изоляции. Эти параметры можно рекомендовать как диагностические признаки состояния внутренней изоляции силовых трансформаторов, посредством создания специальных устройств.

В настоящее время разработано, проверено на практике и закреплено в стандартах три метода определения степени увлажненности трансформаторов связанных с измерением емкостей обмоток трансформаторов.

Одним из новых методов испытания является «емкость – время» с помощью прибора ЕВ-3. При этом методе производится заряд емкости изоляции C , а затем быстрый разряд и медленный (закорачиванием через 1 с после окончания заряда). В первом случае определяется емкость, во втором – прирост емкости за счет абсорбционной емкости, которая успевает проявиться за 1 с у влажного трансформатора, но не успевает у сухого. У сухого трансформатора ΔC незначительно ($0,02-0,08$), у влажного $\Delta C \gg 0,1C$.

Кроме емкостно-температурного метода, для оценки состояния волокнистой изоляции класса А, используется метод частотной зависимости емкости – метод ем-

костно-частотный. При этом методе емкость изоляции измеряется на частотах 2 (C2) и 50 (C50) Гц. При измерении емкости изоляции на частоте 50 Гц успевает проявиться только геометрическая емкость, одинаковая у сухой и влажной изоляции. При измерении емкости изоляции на частоте 2 Гц успевает проявиться абсорбционная емкость влажной изоляции, так как у сухой изоляции она меньше и заряжается очень медленно. У сухой изоляции отношение C2/ C50 в связи с этим близко к единице, а у влажной оно больше единицы.

Оценка состояния изоляции класса В в настоящее время производится успешно измерением токов утечки при приложении к изоляции выпрямленных напряжений различной величины, т. е. снятием характеристики $I_{ут} = f(U_{выпр})$, где $I_{ут}$ – ток утечки; $U_{выпр}$ – прикладываемое к изоляции выпрямленное напряжение.

Известно, что у машин, имеющих увлажненную изоляцию, зависимость токов утечки от приложенного выпрямленного напряжения нелинейна. Нелинейность тем больше, чем больше прикладываемое напряжение. Нелинейность у влажной изоляции связана с явлением ионизации, наступающей при определенном напряжении и резким увеличением в связи с этим тока утечки. Критерием увлажненности служит коэффициент нелинейности, являющийся отношением сопротивления изоляции постоянному току, определяемого по величине тока утечки при испытательном напряжении $0,5U_n$ к току утечки при $2U_n$.

Обмотки трансформатора представлены слоями, катушками и слоями катушек с постоянной индуктивностью и переменной емкостью, поэтому емкость является одним из основных критериев, определяющих состояние изоляции. Отсюда следует, что каждому слою витков, слою катушек или отдельным катушкам соответствуют собственные частоты.

При подаче тестового сигнала высокой частоты на обмотку трансформатора и совпадении частот приложенного напряжения с собственной частотой частей обмотки (витков, слоев или катушек) будет иметь место резонансное распределение напряжения в обмотке трансформатора.

Экстремальные точки зависимостей указывают на резонансные явления в слоях обмотки на частоте подаваемого сигнала, совпадающей с собственной частотой слоев обмотки.

Резонансное явление, происходящее в частях обмоток (слой, катушка), также можно наблюдать, если подключить к выводам трансформатора (например, к низковольтной обмотке) высокочастотный генератор тестового сигнала U_1 , а с соответствующих выводов высоковольтной обмотки снимать напряжение U_2 .

Увлажнение внутриобмоточной изоляции трансформатора вызывает увеличение внутриобмоточных емкостей и приводит к уменьшению собственных частот составляющих обмотки (слоя, катушки) трансформатора и коэффициента передачи.

На АЧХ (резонансных кривых) это отражается смещением экстремальных точек). Это смещение экстремальных точек можно рассматривать как диагностический признак состояния изоляции.

Акустический метод основан на измерении упругих колебаний (мощности или амплитуды контролируемого сигнала) в объекте контроля. Технология строится на

измерении величин сигналов в контрольных точках и сравнении их с пороговыми значениями.

Энергию излома или пластической деформации изоляции обнаруживают с помощью тензодатчиков или чувствительных микрофонов и преобразуют в электрический сигнал. Данные о скорости эмиссии, общем числе всплеск, их амплитуде накапливаются в памяти компьютера. Специальная программа обрабатывает полученные данные и определяет состояние изоляции. По амплитуде импульсов акустической эмиссии выдается результат о размерах дефектов в изоляции, а по частоте – об их числе.

Развитием данной технологии является информационная частотная технология, предполагающая выделение из измеряемого сигнала составляющих в определенных частотных диапазонах и дальнейший анализ выделенных составляющих. Также можно выделить информационную фазо-временную технологию, основанную на сравнении формы сигналов, измеренных через фиксированные интервалы времени.

Сравнение формы сигналов с эталоном выполняется с помощью информационной спектральной технологии, основанной на узкополосном спектральном анализе сигналов. При использовании такого вида анализа сигналов диагностическая информация содержится в соотношении амплитуд и начальных фаз основной составляющей и каждой из кратных ей по частоте составляющих. Она находит применение при анализе сигналов с датчиков вибрации и шума. Например, при магнитном насыщении сердечника искажается форма сигнала и увеличиваются составляющие вибрации на гармониках питающего напряжения.

Электрический метод основан на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля или возникающего в результате внешнего взаимодействия. Данный метод является наиболее чувствительным к появлению частичных разрядов (ЧР), так как датчики подключаются непосредственно к высоковольтной шине объекта контроля или измерительным выводам высоковольтных вводов. Необходимость установки датчиков на исследуемый объект является ключевым недостатком метода относительно остальных методов диагностики ЧР. Среди преимуществ можно выделить возможность отстройки от наводимых помех, проведение анализа в штатном рабочем режиме (без подачи повышенного напряжения). Данный метод является единственным методом, применяемым для измерения ЧР в маслобарьерной изоляции.

При некорректной эксплуатации или вследствие старения в изоляции оборудования могут возникать частичные разряды (ЧР), которые могут привести к появлению искровых разрядов или дуговым пробоям в изоляции, поэтому анализ уровня частичных разрядов позволяет вовремя выявлять такие дефекты. Сегодня согласно нормативным документам для РФ предусматриваются только периодические испытания для выявления ЧР в изоляции высоковольтного энергетического оборудования.

На сегодняшний день распространенными методами определения ЧР в изоляции являются акустический, электромагнитный и электрический методы.

С помощью современной диагностической системы MPD800 можно обнаружить уже ЧР на ранней стадии и определить местоположение источника акустическим

способом. Это позволяет сделать вывод о состоянии изоляции.

Важнейшей характеристикой силовых трансформаторов является электродинамическая стойкость. Она характеризует способность трансформатора противостоять воздействиям ударных токов сквозных коротких замыканий, что выражается в способности к сохранению неизменной геометрии обмоток и межобмоточного пространства.

Традиционным параметром, позволяющим оценить снижение электродинамической стойкости, является сопротивление короткого замыкания. Метод измерения этого параметра достаточно прост, но недостаточно чувствителен. Одним из способов совершенствования метода является ориентирование его на определение реактивной (индуктивной) составляющей сопротивления короткого замыкания, более чувствительной к изменению геометрии обмоток трансформатора, чем полное сопротивление (импеданс). Современная аппаратура (например, измерительный комплекс M4000) позволяет выполнить это измерение с высокой точностью.

Другим направлением решения рассматриваемой задачи является разработка группы методов, связанных с подачей на трансформатор переходного напряжения определенной формы и применение частотного анализа напряжения, являющегося реакцией на данное воздействие. В зарубежной литературе эта методология получила название Frequency Responce Analysis.

Суть метода состоит в том, что от специального генератора на обмотку «расшинованного» трансформатора подается прямоугольный зондирующий импульс низкого напряжения (100–500 В) и одновременно осциллографируются реакции обмоток на воздействие этого импульса – напряжения на измерительных сопротивлениях, подключенных к другим обмоткам. Изменения в осциллограммах и их спектрах свидетельствуют о наличии деформаций обмоток трансформатора.

Современные диагностические системы одного из ведущих мировых производителей диагностического оборудования для предприятий электроэнергетической отрасли компании OMICRON, например TESTRANO 600 позволяют измерять полное сопротивление короткого замыкания, потери холостого хода, коэффициент трансформации, ток намагничивания, сопротивление обмотки и динамическое сопротивление переключателя ответвлений в одном устройстве. Системой можно управлять с помощью TESTRANO Touch Control на встроенном дисплее или с помощью программного обеспечения Primary Testing Manager TM на ноутбуке. Система используется при плановых и диагностических проверках на месте эксплуатации, а также при заводских приемочных испытаниях (FAT).

Таким образом, несмотря на все безусловные достоинства применяемых в Беларуси систем, они имеют ряд существенных недостатков: нацелены на решение конкретной задачи (под конкретные схемы, конкретное оборудование и т. д.); используется разнородная и разноточная информация; не учитывается динамика изменения критериев диагностирования оборудования, другими словами, системы не обучаемы. Поэтому применение самообучаемых систем на основе ИНС устраняет перечисленные недостатки.

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 ИНС.

Сегодня искусственный интеллект быстро развивается, поэтому существует большое количество литературы, описывающей работу нейронных сетей в системах электроснабжения предприятий и варианты применения их на практике.

Главным преимуществом ИНС при диагностике аварийных ситуаций является ее гибкость при большом потоке данных и информационном шуме. Главный же недостаток заключается в относительной длительности времени обучения. Для сокращения времени обучения до приемлемых результатов используются обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN) с топологией прямой передачи сигнала, вероятностная нейронная сеть (PNN) и адаптивная (самоорганизующаяся) нечеткая нейронная сеть.

Наибольшую применимость нейронные сети получают в областях, где человеческий интеллект малоэффективен, а традиционные вычисления трудоемки или фактически неадекватны. Как и человеческий мозг, нейронная сеть способна к решению большого количества разноплановых задач.

Применение ИНС позволяет унифицировать диагностические исследования, не прибегая к созданию библиотек баз данных для каждого типа трансформатора. Также оптимизируется применение данных систем за счет простоты практического применения и устранения человеческого фактора при анализе результатов.

Использование ИНС позволяет работать с неоднородными и зашумленными первичными данными, а также за счет самообучения и самонастройки повысить точность обработки данных, что обеспечит системы диагностирования свойством универсальности.

Применение ИНС по алгоритму обратного распространения ошибки (BP) в совокупности с Вейвлет-преобразованием сигналов от трансформатора тока дифференциальной защиты силовых трансформаторов на основании тока намагничивания при включении, а также сравнения второй и пятой гармонических составляющих тока использовалось в работах, посвященных мониторингу состояния силовых трансформаторов с помощью трехуровневой нейронной сети MLP на основе анализа семи растворенных газов тремя алгоритмами обучения: gradient descent, scale conjugate gradient, Levenberg-Marquart. Причем результаты диагностирования устранили неопределенности распознавания неисправностей обычных методов и показали хорошие результаты обучения для новых типов проб трансформаторного масла.

По мере развития обработки и анализа сигналов многочисленные исследования сосредоточились на применении методов искусственного интеллекта при мониторинге и для повышения точности диагностики. Из них всё большее распространение получают те, ко-

торые хорошо справляются с проблемами «размерности», самообучения и преодоления точек локальных минимумов.

При этом возникает проблема выбора параметров модели. Несмотря на простую структуру моделей на основе нечеткой логики и быструю диагностику, способность с обучению недостаточна, а также нельзя воспользоваться результатами предыдущих экспериментов.

Использование глубокого обучения показывает более высокую точность, чем другие подходы к машинному обучению. В частности, применение сверточных нейронных сетей с широкой архитектурой глубокого

обучения в настоящее время показывают хорошие результаты по классификации, выделению и обнаружению содержания изображения и видеоматериалов.

Сверточные нейронные сети отличаются более простым алгоритмом обучения и простотой построения глубокой архитектуры, что снижает вероятность дополнительного переобучения. Авторами был предложен и внедрен метод определения влажности изоляции с помощью фигур Лиссажу на основе сверточных нейронных сетей (на рисунке 1, а представлены частичные результаты программного обеспечения диагностической системы).

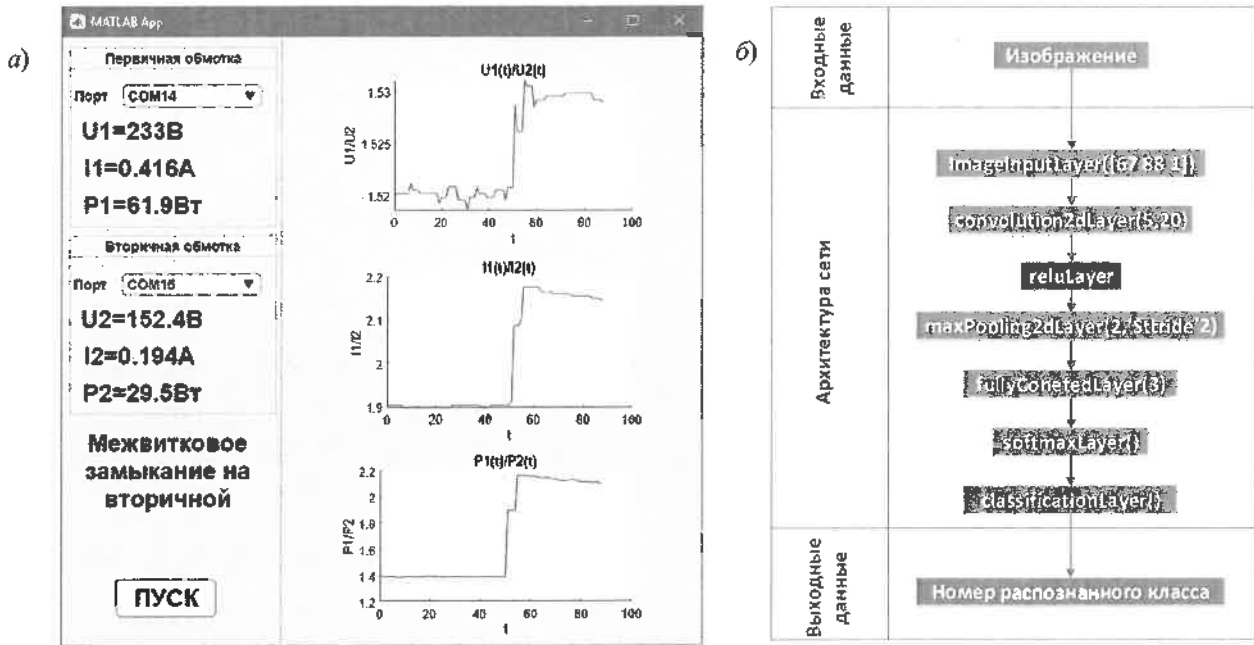


Рисунок 1 – Пример результатов диагностирования (а) и архитектура нейронной сети (б) в программе Matlab

Архитектура нейронной сети в программе Matlab представлена на рисунке 1, б. Во входном слое (ImageInputLayer) указывается размер изображения, который в данном случае составляет 67×88×1. Эти числа соответствуют высоте, ширине и размеру канала. Цифровые данные состоят из изображений в градациях серого.

В сверточном слое (ConvolutionalLayer) первым аргументом является filterSize, который функция обучения использует при сканировании изображений. В этом примере число 5 указывает, что размер фильтра 5 на 5. Вторым аргумент – это количество фильтров (numFilters) или нейронов. Этот параметр определяет количество карт объектов.

После слоя нормализации партии следует нелинейная функция активации (ReLULayer). Наиболее распространенной функцией активации является выпрямленная линейная единица (ReLU).

За сверточными слоями (с функциями активации) иногда следует операция понижения дискретизации (максимальный объединяющий слой MaxPoolingLayer), которая уменьшает пространственный размер карты объектов и удаляет избыточную пространственную информацию. Понижающая выборка позволяет увеличить количество фильтров в более глубоких сверточных слоях без увеличения необходимого объема вычислений на слой. Одним из способов понижения ча-

стоы дискретизации является использование максимального пула, который создается с помощью maxPooling2dLayer. Слой максимального пула возвращает максимальные значения прямоугольных областей входных данных, заданных первым аргументом poolSize. Аргумент пары «шаг – значение» (Stride) задает размер шага, который выполняет обучающая функция при сканировании входных данных.

Вслед за слоями свертки и понижающей дискретизации следуют один или несколько полносвязных слоев (FullyConnectedLayer). В нем нейроны соединяются со всеми нейронами предыдущего слоя. Этот слой объединяет все признаки, изученные предыдущими слоями на изображении, чтобы идентифицировать более крупные закономерности. Последний полносвязный слой объединяет функции для классификации изображений. Таким образом, параметр OutputSize в последнем полносвязном слое равен количеству классов в целевых данных.

Функция активации softmax нормализует вывод полностью подключенного слоя. Выходные данные слоя softmax состоят из положительных чисел, которые в сумме дают единицу и которые затем могут использоваться в качестве вероятностей классификации слоем классификации.

Последним слоем является классификационный слой (ClassificationLayer). Он использует вероятности, возвращаемые функцией активации softmax для каждого

входа, чтобы назначить вход одному из взаимоисключающих классов и вычислить точность.

Таким образом, применение ИНС позволяет унифицировать диагностические исследования, не прибегая к созданию библиотек баз данных для каждого типа трансформатора. Простота практического применения и устранения человеческого фактора при анализе результатов позволяет с ростом числа исследований снижать вероятность ошибки и на основе системного подхода (оценки множества факторов между собой в динамике) увеличить точность прогнозирования.

Список литературы

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

2 Львов, М. Ю. Об оценке состояния силовых трансформаторов с длительным сроком эксплуатации / М. Ю. Львов // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. – СПб.: ПЭИПК, 2000. – Вып. 11. – С. 264–268.

3 Монастырский, А. Е. Техничко-экономические проблемы диагностики трансформаторного оборудования / А. Е. Монастырский, В. И. Бунин, Я. А. Евдокимов // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. – СПб.: ПЭИПК, 2005. – Вып. 28. – С. 367–372.

4 Попов, Г. В. Алгоритм комплексной диагностики масляных трансформаторов / В. Г. Попов, Ю. Ю. Рогожников // Электрические станции. – 2003. – № 8. – С. 54–59.

5 Комбинированные системы сбора передачи технологической диагностической информации АСУ ТП электроустановок / А. Н. Васев [и др.] // Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (11–12). – С. 16–26.

6 Кубарев, А. Ю. Методы исследования свойств дефектного электрооборудования / А. Ю. Кубарев, А. Б. Закирова, Ю. Г. Кубарев // Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (3–4). – С. 108–115.

7 Gaser, H. P. Condition Assessment of the Cellulosic Insulation from Power Transformers Taken out of Servis / H. P. Gaser, V. Heireich, C. Krause // Proc. of the Inter. Symp. on High Voltage Engineering. – Beijing (China), 25–29 August 2005.

8 Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях / А. И. Хальясмаа [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 1 (45). – С. 289–300.

9 Хальясмаа, А. И. Предпосылки и причины применения методов искусственных нейронных сетей для анализа данных технической диагностики электрооборудования на ПС 35-110 кВ / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Научное обозрение. – 2013. – № 2. – С. 126–131.

10 Оценка состояния силовых трансформаторов на основе анализа данных технической диагностики / А. И. Хальясмаа [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 114–120.

Получено 01.02.2023

I. L. Gromyko, D. V. Miroch, V. N. Galushko, V. O. Belkin. Analysis and improvement of the existing system of diagnostics of faults of transformers in the railway industry.

The use of self-learning systems based on artificial neural networks (ANN) to eliminate the shortcomings of existing systems for diagnosing transformers, which solve the problems of information redundancy in a systematic approach to equipment monitoring and allow unifying software, is considered. To achieve high accuracy, good results in classification and fault detection, a convolutional neural network with a deep learning architecture is a promising direction. The authors proposed and implemented a method for determining the moisture content of insulation using Lissajous figures based on convolutional neural networks.