

С.П. КОНОГРАЙ, аспирант, ЗНТУ, Запорожье

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНИХ СЛОЕВ МАСЛА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В статті розглянута можливість та перспективи застосування нейронних мереж для прогнозування температури верхніх шарів масла силового трансформаторного обладнання у режимі експлуатації. Виконано порівняння результатів прогнозування з безпосередніми вимірюваннями.

В статье рассмотрена возможность и перспективы применения нейронных сетей для прогнозирования температуры верхних слоев масла силового трансформаторного оборудования в режиме эксплуатации. Выполнено сравнение результатов прогнозирования с непосредственными измерениями.

Введение. Важнейшими факторами, определяющими темпы старения трансформаторов, а также длительную и кратковременную электрическую прочность их бумажно-масляной изоляционной системы, являются температурный режим и содержание влаги [1]. В настоящее время для расчета тепловых процессов в силовых трансформаторах применяются методики, изложенные в стандарте МЭК 60076-7 [2]. Предлагаемая в стандарте методика расчета температуры верхних слоев масла (ВСМ) дает только ориентировочные результаты, так как обладает следующими недостатками:

- не учитывает процессы теплопереноса (вязкость масла);
- не учитывает режимы охлаждения трансформатора;
- оперирует коэффициентами, соответствующими только номинальным режимам нагрузки, что обуславливает большие погрешности при выполнении расчетов для условий эксплуатации, отличающихся от стандартных.

Для расчета температуры ВСМ в стандарте предлагается следующее дифференциальное уравнение:

$$\left[\frac{1 + K^2 R}{1 + R} \right]^x \cdot \Delta\theta_{or} = k_{11} \tau_o \frac{d\theta_o}{dt} + (\theta_o - \theta_a), \quad (1)$$

где K – коэффициент нагрузки трансформатора, о.е.; R – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода; $\Delta\theta_{or}$ – превышение температуры ВСМ над температурой воздуха θ_a при номиналь-

ной нагрузке, K ; τ_0 – тепловая постоянная времени масла, χ ; k_{11} – константы, предоставляемые заводами-изготовителями.

Перспективность применения нейронных сетей обусловлена следующими факторами [3]:

- их способностью нейронных сетей воспроизводить сложные нелинейные соотношения;

- их высокой эффективностью работы с большими объемами данных, которые накапливаются за время работы системы непрерывного контроля;

- отсутствием ограничений на функцию их распределения, возможностью обработки разнотипных экспериментальных данных и сохранением работоспособности при наличии пропусков в таблице обучающей выборки.

Цель и задачи исследования. Усовершенствование существующих методов непрерывного контроля технического состояния силового трансформаторного оборудования на основе применения нейронных сетей.

Прогнозирование температуры ВСМ трансформатора в режиме эксплуатации позволит диагностировать техническое состояние его компонентов. Сравнивая спрогнозированную температуру масла с непосредственно измеренной, можно выявить неисправности маслонасосов или вентиляторов системы охлаждения, определить загрязнение радиаторов. Такой прогноз осуществим в случае проведения обучения нейронной сетью непосредственно после ввода в эксплуатацию трансформатора с исправной системой охлаждения [3].

Результаты исследования. По своей структуре нейронные сети могут быть сгруппированы в сети прямого распространения, в которых на входы каждого нейрона подаются выходные сигналы нейронов предыдущих слоев, и сети с обратными связями, в которых выходы нейронов последующих слоев подаются на вход предыдущим. Сети прямого распространения являются статическими в том смысле, что на заданный вход они вырабатывают одну совокупность значений, не зависящих от предыдущих состояний сети. Сети с обратными связями являются динамическими, так как в силу обратных связей в них модифицируется вход нейронов, что приводит к изменению состояния сети.

В литературе описаны оптимальные конфигурации нейронных сетей [3, 4], используемые для решения отдельных типов задач. Примеры таких задач приведены в табл. 1.

Исходя из поставленной задачи расчета (прогнозирования) динамики изменения температуры верхних слоев масла в режиме реального времени при различных токовых нагрузках, температурах окружаю-

Таблица 1

Архитектура нейронной сети	Решаемые задачи	
Сети с обратными связями	Соревновательные сети	Категоризация внутри класса, сжатие данных, анализ данных
	Сеть Кохонена	Категоризация, анализ данных
	Сеть Хопфилда	Ассоциативная память
	Модели ART	Классификация образов, категоризация
Сети прямого распространения	Перцептрон	Классификация образов, аппроксимация функций, предсказание, управление
	Сеть радиальных базисных функций	

щей среды и режимах работы охладителей, были выбраны сети прямого распространения. Основным алгоритмом обучения нейронных сетей прямого распространения является алгоритм обратного распространения ошибки.

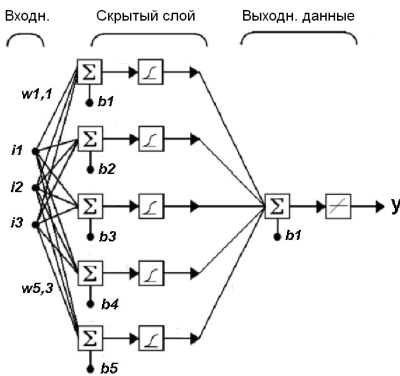


Рис. 1.

На рис. 1 представлен пример структуры алгоритма обучения нейронной сети прямого распространения с одним скрытым слоем. Общая форма записи математической модели такой нейронной сети для определения температуры ВСМ будет иметь следующий вид:

$$y = \sum_{h=1}^H w_{ik} \left\{ f_k^{\text{sig}} \left(\sum_{j=1}^J w_k j^i_j + b_k \right) \right\} + b_h, \quad (2)$$

где i_j – входные данные нейронной сети; j – номер входной перемен-

Для оптимизации параметров нелинейной модели был выбран алгоритм Левенберга-Марквардта, являющийся наиболее распространенным алгоритмом оптимизации. Он превосходит по производительности метод наискорейшего спуска и другие методы сопряженных градиентов в различных задачах. Алгоритм заключается в последовательном приближении заданных начальных значений параметров к искомому локальному оптимуму [4].

ной; w_{kj} – веса связи входа нейрона со скрытым слоем; J – общее количество входных переменных; h – номер нейрона в выходном слое; H – общее количество нейронов в выходном слое.

В качестве активационной функции выходного слоя нейронной сети берется нелинейная функция

$$\text{Sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (3)$$

где x – взвешенная сумма всех входных переменных и смещений нейронов.

При проведении численного эксперимента использовался программный комплекс MATLAB 7.10, в котором был реализован рассмотренный алгоритм обучения нейронной сети прямого распространения с одним скрытым слоем, в результате применения которой были получены значения спрогнозированной температуры верхних слоев масла.

Для решения поставленной задачи – прогнозирования динамики изменения температуры масла – число J входных параметров взято равным 5.

Входными данными являются:

- режим охлаждения (естественная конвекция, принудительная циркуляция воздуха);
- температура окружающей среды;
- величина нагрузки трансформатора;
- интервал времени между измерениями;
- температура масла в предыдущий момент.

На рис. 2 приведены результаты применения аппарата нейронных сетей к прогнозированию температуры масла на основе данных, полученных с ПС 750кВ "Ленинградская" системой непрерывного контроля АТДТН-200000/330/110-У1.

Число H нейронов в скрытом слое сети взято равным 10. Нейронная сеть обучена на 5400 данных за период 15 дней (данные за май 2008г.), а затем использована для расчета температуры ВСМ в последующие моменты, что и отображено на графике.

Из приведенного на рис. 3 графика ошибки прогнозирования видно, что, несмотря на наличие областей, в которых все еще есть расхождения между рассчитанной при помощи нейронной сети и измеренной температурами масла, нейронная сеть дает результаты с ошибкой не более 5 °С.

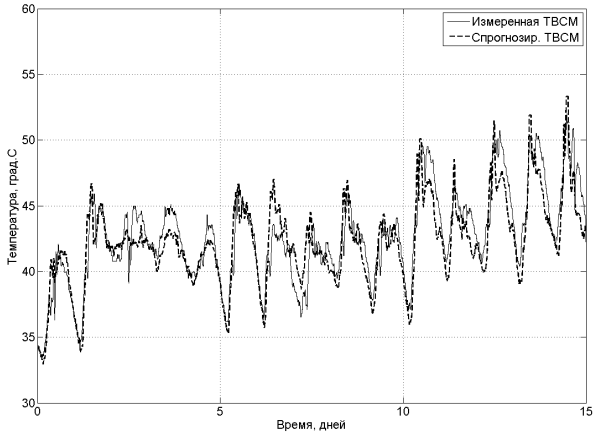


Рис. 2.

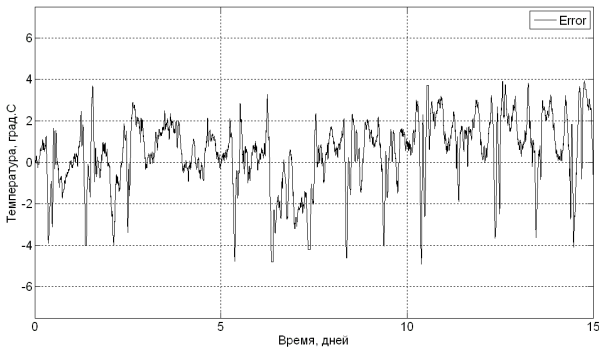


Рис. 3.

Накопленный за последние несколько лет практический опыт эксплуатации систем непрерывного контроля *SAFE-T* [5] показывает, что для ряда трансформаторов мы получаем хорошее соответствие результатов расчетов по методике МЭК 60076-7 и непосредственных измерений, а для других расхождение может более 5 °С. При этом значения расхождений имеют нерегулярный характер во времени. Наличие таких случайных колебаний затрудняет использование методики МЭК 60076-7 для контроля эффективности работы системы охлаждения.

Выводы. Представленные данные показывают, что уже в настоящее время применение нейронных сетей для расчета температуры ВСМ дает результаты, достаточные по своей точности (4-5 °С) для применения в системах непрерывного контроля силового трансформаторного оборудования для диагностики технического состояния системы охлаждения.

Одним из преимуществ нейронных сетей при прогнозировании температуры ВСМ является их независимость, в отличие от существующих современных стандартов МЭК, от параметрических коэффициентов трансформаторов, предоставляемых заводами-изготовителями для каждой выпускаемой единицы оборудования.

Дальнейшая работа по выбору структуры, вида нейронной сети, а также предварительному анализу и фильтрации входных данных для нейронной сети предположительно позволит уменьшить погрешность расчета температуры до 2-3 °С.

Список литературы: 1. *Конограй С. П.* Применение модели старения твердой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации / *С.П. Конограй* // *Электротехника і Електромеханіка*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 1. – С. 43-45. 2. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers – Vol. 14/512/FDIS, Sept. 2005. 3. *Каранетян Н. В.* Применение нейронных сетей в аналитических моделях систем мониторинга трансформаторного оборудования / *В.А. Туркот, А.А. Филиппов* // *ЭЛЕКТРО*. – 2009. – №6. – С. 15-19. 4. *Круглов В. В.* Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Учеб. пособие. / *Дли М.И., Голунов Р.Ю.* – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2001. – 224 с. 5. *Рассальский А.Н.* Результаты внедрения системы непрерывного контроля силовых автотрансформаторов на подстанции "Ленинградская" / *А.Н. Рассальский, С.П. Конограй, А.А. Сахно, А.Г. Спица, А.А. Гук* // *Вісник КДПУ імені М. Остроградського*. – Кременчук, 2009. – № 3(56), Ч. 1. – С. 150-153.



Конограй Сергей Петрович, аспирант Запорожского национального технического университета. Защитил диплом магистра в Запорожском национальном техническом университете по специальности "Электрические машины и аппараты" в 2006 г. Ведущий специалист отдела Систем мониторинга трансформаторов ООО "Энергоавтоматизация" с 2006г.

Научные интересы связаны с вопросами диагностики технического состояния высоковольтного трансформаторного оборудования под рабочим напряжением в режиме эксплуатации.

Поступила в редакцию 30.09.2010