



СИСТЕМА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Галяутдинова А.Р., Ившин И.В., Соловьев С.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Alsu296@ya.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке новой системы оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования распределительных сетей. ЦЕЛЬ. Повысить точность оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования (СМТО) распределительных сетей за счет применения методов машинного обучения. В настоящее время увеличение объема анализируемой информации о состоянии СМТО распределительных сетей ведет к существенным изменениям при выборе методов обработки данных. Использование методов машинного обучения связано как с необходимостью применения эксплуатационного опыта (в виде экспертных оценок), так и получения объективных оценок состояния трансформаторного оборудования распределительных сетей из контрольно-измерительных приборов (КИП) и датчиков. МЕТОДЫ. В данной работе используются такие методы исследования как математическое моделирование, метод парных сравнений. В качестве примера рассматривается силовой маслонаполненный трансформатор ТМН-6300, его диагностические параметры, внешние и режимные параметры. Проводится оценка технического состояния трансформатора ТМН-6300 и создается прогнозная модель на базе существующей системы мониторинга, методов машинного обучения, которые позволяют формализовать экспертные знания и автоматизировать процесс обработки и анализа данных. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей сформирована база данных. Алгоритм прогнозирования технического состояния СМТО в виде модели искусственной нейронной сети был апробирован в разработанной системе оценки. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные в данной работе результаты оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей доказывают безусловную взаимосвязь между параметрами СМТО и внешними, режимными параметрами. Данные, получаемые в результате моделирования, помогают повысить точность прогнозирования технического состояния и определить долгосрочные перспективы функционирования СМТО, своевременное проведение технического обслуживания и ремонта в горизонте по годам и месяцам.

Ключевые слова: система контроля; силовое маслонаполненное трансформаторное оборудование; распределительные сети; машинное обучение; методы контроля; оценка и прогнозирование технического состояния.

Для цитирования: Галяутдинова А.Р., Ившин И.В., Соловьев С.А. Система оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования распределительных сетей с применением машинного обучения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 32-45. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45.

SYSTEM FOR ASSESSMENT AND PREDICTION OF THE TECHNICAL CONDITION OF POWER OIL-FILLED TRANSFORMER EQUIPMENT OF DISTRIBUTION NETWORKS USING MACHINE LEARNING

Galyautdinova A.R., Ivshin I.V., Solovlev S.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Alsu296@ya.ru

Abstract: RELEVANCE the research is to develop a new system for assessing the technical condition of power oil-filled transformer equipment of distribution networks. OBJECT. To increase the accuracy of assessing the technical condition of power oil-filled transformer equipment (POTE) of distribution networks through the use of machine learning methods. Currently, an increase in the volume of analyzed information about the state of the management system of distribution networks leads to significant changes in the choice of data processing methods. The use of machine learning methods is associated both with the need to apply operational experience (in the form of expert assessments) and to obtain objective assessments of the condition of transformer equipment of distribution networks from instrumentation and sensors. METHODS. This work uses research methods such as mathematical modeling and the method of paired comparisons. As an example, we consider the oil-filled power transformer TMN-6300, its diagnostic parameters, external and operating parameters. The technical condition of the TMN-6300 transformer is assessed and a predictive model is created based on the existing monitoring system and machine learning methods, which make it possible to formalize expert knowledge and automate the process of data processing and analysis. RESULTS. A database has been created to assess and predict the technical condition of POTE of distribution network management systems. The algorithm for predicting the technical condition of POTE of the technical equipment in the form of an artificial neural network model was tested in the developed assessment system. CONCLUSION. The results of assessing and predicting the technical condition of POTE of the metering system of distribution networks obtained in this work prove the unconditional relationship between the parameters of the metering system and external, operating parameters. The data obtained as a result of modeling helps to increase the accuracy of forecasting the technical condition and determine the long-term prospects for the functioning of POTE the equipment management system, timely maintenance and repairs over the course of years and months.

Keywords: control system; power oil-filled transformer equipment; distribution networks; machine learning; control methods; assessment and forecasting of technical condition.

For citation: Galyautdinova A.R., Ivshin I.V., Solovov S.A. System for assessment and prediction of the technical condition of power oil-filled transformer equipment of distribution networks using machine learning. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 32-45. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45.

Введение (Introduction)

Контроль технического состояния СМТО распределительных сетей и прогнозирование его технического состояния является актуальной задачей и связаны с обеспечением бесперебойного и надежного электроснабжения потребителей. Трансформаторное оборудование в распределительных сетях Единой энергетической системы России характеризуется с высокой степенью износа[1]. Эксплуатация трансформаторного оборудования с превышением ресурса, определенным нормативно-технической документацией, приводит к частым отказам и возникновению аварий. Замена трансформаторного оборудования – важный экономический вопрос. В свою очередь, она сопровождается заменой большого числа вспомогательного оборудования, что с технической точки зрения нецелесообразно и влечет за собой существенные затраты. Исследования показывают необходимость перехода к организации ремонта основного электротехнического оборудования подстанции с системы планово-предупредительных ремонтов на техническое обслуживание и ремонт по фактическому состоянию, что позволит оптимизировать эксплуатационные затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования. Существует взаимосвязь между параметрами силового трансформатора и внешними, режимными параметрами. Степень этих взаимосвязей возможно определить только при комплексной оценке состояния диагностических параметров трансформатора, внешних и режимных параметров. В настоящее время объем данных увеличивается каждый год. Большие данные, рассматриваемые в электроэнергетике, необходимо изучать на стыке двух наук: математики и компьютерных информационных технологий, в которых создаются алгоритмы и технические решения для работы с массивами данных. Данные слишком велики для классических способов хранения и их обработки. Следовательно, анализ и обработка данных о состоянии СМТО распределительных сетей требует применение искусственного интеллекта[2]. Научная значимость исследования состоит в использовании методов машинного обучения для

оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей. Практическая значимость исследования заключается в достижении эффективности при уменьшении эксплуатационных затрат на базе технически обоснованных характеристик состояния СМТО: объемов ремонта, замены, реконструкции и системы технического обслуживания.

Литературный обзор (Literature Review)

Одним из приоритетных направлений стратегии научно-технологического развития РФ до 2030 года является переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта[2]. Современная электроэнергетика требует большого внимания к надежности и качеству работы всей энергосистемы в целом. Однако старение и износ электрооборудования приводит к увеличению числа аварийных ситуаций, которые несут за собой неблагоприятные последствия. Ситуация усугубляется ростом энергопотребления во всем мире, в результате чего нагрузка на оборудование с истекшим сроком эксплуатации возрастает.

Силовое трансформаторное оборудование является наиболее важным компонентом объектов электроэнергетической системы, который непосредственно участвует в процессе передачи и распределения электрической энергии. От его надежной работы зависит надежное функционирование всей электроэнергетической системы[3]. К силовому трансформаторному оборудованию предъявляются высокие требования по надежности.

Основные функциональные узлы силового масляного трансформатора:

- магнитная система (МС);
- изоляционная система (ИС);
- высоковольтные вводы (ВВ);
- обмотки (ОБМ);
- система регулирования напряжения (РПН);
- система охлаждения (СО);
- обобщенный узел (ОУ).

Исследование каждой системы как отдельного объекта и их взаимное влияние друг к другу приведет более к детальной оценке технического состояния СМТО и формированию новых знаний об оценке технического состояния.

Надежность работы СМТО непосредственно связана с его сроком службы. Рост повреждаемости при работе за пределами нормированного срока службы (25 лет) увеличивает расходы на текущий ремонт СМТО и повышает вероятность аварийного выхода его из строя[4]. Это обуславливает повышенное внимание к методам диагностики и системам мониторинга СМТО, которые позволяют определить техническое состояние СМТО и поддержать его эксплуатационную надежность. Следовательно, крайне актуальными становятся вопросы поиска новых подходов и методов мониторинга, контроля и диагностики для возможности продления срока эксплуатации этих трансформаторов без потери надежности.

Таким образом, проблема оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей в настоящее время остается актуальной и охватывает целый ряд аспектов:

- Высокая степень износа СМТО[4];
- Необходимость раннего обнаружения аномалий СМТО;
- Цифровая трансформация электроэнергетической отрасли России;
- Необходимость перехода к системе технического обслуживания и ремонта СМТО по его техническому состоянию.

Материалы и методы (Materials and methods)

Большой объем СМТО распределительных сетей с выработанным ресурсом, отсутствие возможности их одновременной замены связаны с финансовыми затратами и трудностью обеспечения условий режима на время вывода СМТО в ремонт. Все это приводит к необходимости непрерывного мониторинга и прогнозирования технического состояния для использования оптимального графика технического обслуживания и ремонтов, снижения вероятности возникновения аварийных отказов СМТО[5]. Эксплуатация СМТО распределительных сетей с выработанным ресурсом приводит к увеличению капитальных затрат, необходимых для надежного функционирования электроэнергетической системы.

Современные тенденции развития методов диагностики СМТО указывают на развитие методов непрерывного контроля под напряжением и предиктивной диагностики.

Следовательно, создание системы оценки через непрерывный контроль и представление СМТО в виде функциональных узлов является актуальной задачей. По результатам исследований делается оценка и прогнозирование технического состояния трансформатора в целом.

В качестве объекта исследования рассмотрен силовой маслонаполненный трансформатор марки ТМН-6300 35/6(10) кВ. По каждому функциональному узлу силового трансформатора выбрали диагностические параметры для установления системы мониторинга.

Выбранные диагностические параметры по основным функциональным узлам силового трансформатора следующие:

1) в МС:

- температура масла в баке – регистрация температурных режимов работы трансформатора.

- виброскорость бака – контроль технического состояния конструкции трансформатора по параметрам вибрации (степень опрессовки обмоток трансформатора, оценка прочностных характеристик силовых элементов трансформатора).

2) в ИС:

- хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ) в масле – анализ растворенных в масле газов (ухудшение состояния изоляции и масла, перегрев, наличие локальных горячих точек, частичных и дуговых разрядов) [6]. Выбранный газоанализатор Intellix GLA 100 имеет 100% чувствительность к H_2 , т.е. общая сигнализация силового трансформатора о превышении концентрации газа, а также чувствителен к CO – при перегреве бумажной изоляции.

- уровень частичных разрядов – контроль состояния изоляции на основании регистрации и анализа частичных разрядов.

3) в ВВ:

- температура контактных соединений вводов – контроль температурных режимов работы трансформатора.

4) в ОБМ:

- влагосодержание масла – контроль текущей электрической прочности масла и влагосодержания в твердой изоляции обмоток трансформатора.

5) в обобщенном узле:

- срок службы – оценка технического состояния всего трансформатора.

Дополнительно измеряются внешние и режимные параметры трансформатора – температура окружающей среды и относительная влажность воздуха, коэффициент загрузки.

Выбор системы мониторинга для рассматриваемого трансформатора представлен в [7]. Система мониторинга по двум критериям:

- возможность определения технического состояния силового трансформатора;
- регистрация и анализ данных в режиме реального времени с целью определения технического состояния.

Перечень оборудования для мониторинга выбранных диагностических параметров технического состояния маслонаполненного силового трансформатора 35/6(10) кВ представлен в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Перечень оборудования для мониторинга технического состояния силового трансформатора

List of equipment for power transformer technical condition monitoring

Тип оборудования	Диагностические параметры	Контрольно-измерительные приборы
Силовой трансформатор ТМН – 6300 35/6(10)	ХАРГ в масле	Газоанализатор Intellix GLA 100
	Влагосодержание масла	Система TDM-10
	Температура масла в баке	Системы TDM-10, TDM-S
	Температура контактных соединений вводов	Датчики RF-Sens, WDM-T
	Уровень частичных разрядов	Системы TDM-S, TDM-10
	Виброскорость бака	Датчик вибрации ИВД-3Ц-3, система TDM-10

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Разработанная система мониторинга для рассматриваемого силового

маслонаполненного трансформатора 35/6(10) кВ (рис.1).



Рис. 1. Система мониторинга силового трансформатора ТМН-6300 35/6(10) кВ
Fig.1. Monitoring system for power transformer TMN-6300 35/6(10) kV

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Измеренные значения параметров силового маслаполненного трансформатора передаются в режиме реального времени с периодичностью 1 раз в минуту на III уровень системы – web-сервер.

Оценка технического состояния СМТО основывается на сопоставлении измеренных значений параметров оборудования с их нормативными значениями, в соответствии с требованиями, установленными нормативно-технической документацией. Результатом оценки является коэффициент экспресс-анализа (КЭА) силового маслаполненного трансформаторного оборудования, который выводится в виде численной величины[8]. КЭА находится в диапазоне [0; 100], где самое наихудшее значение соответствует 0, а наилучшее – 100. Данные диапазона приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Диапазоны КЭА
Ranges of CEA

Диапазон КЭА	Вид технического состояния	Визуализация (цвет)
$0 < \text{и} \leq 25$	Критическое	Красный
$25 < \text{и} \leq 50$	Неудовлетворительное	Оранжевый
$50 < \text{и} \leq 70$	Удовлетворительное	Желтый
$70 < \text{и} \leq 85$	Хорошее	Зеленый
$85 < \text{и} \leq 100$	Очень хорошее	Т-зеленый

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет КЭА силового маслаполненного трансформатора вычисляется по формуле:

$$КЭА = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n KB_i \times B_i}{4}, \quad (1)$$

где KB_i – значение весового коэффициента диагностических параметров;

B_i – значение, определенное в соответствии с методикой балльной оценки параметров[9].

Весовые коэффициенты параметров технического состояния отражают их важность и характеризуют степень влияния на надежность и работоспособность трансформаторного оборудования. Весовые коэффициенты определяются методом Саати[10]. Идея метода состоит в том, что попарно сравниваются каждые два диагностических параметра и определяется первенство одного из них. Весовой коэффициент каждому диагностическому параметру присваивается по важности, на основании экспертной оценки. Весовой коэффициент указывается в долях и принимает значение от 0 до 1. Для выбранных

диагностических параметров силового маслонаполненного трансформатора рассчитаны весовые коэффициенты (таблица 3).

Таблица 3
Table 3

Весовые коэффициенты диагностических параметров
Weighting coefficients of diagnostic parameters

№ п/п	Диагностические параметры	Весовые коэффициенты
X1	Уровень частичных разрядов	0,19
X2	Влагосодержание масла	0,19
X3	ХАРГ в масле	0,1
X4	Температура контактных соединений вводов фазы А	0,096
X5	Температура контактных соединений вводов фазы В	0,096
X6	Температура контактных соединений вводов фазы С	0,096
X7	Виброскорость бака	0,062
X8	Температура масла в баке	0,051
X9	Срок службы	0,022
X10	Температура окружающей среды	0,033
X11	Относительная влажность воздуха	0,031
X12	Коэффициент загрузки	0,033
Итого		1

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Каждый диагностический параметр силового маслонаполненного трансформатора оценивается в соответствии с балльной шкалой оценки отклонения фактических значений от предельно-допустимых. Балльная оценка характеризует качественную оценку параметров технического состояния и уровень выполнения требуемых функций от «0» (наихудшая оценка) до «4» (наилучшая оценка) (таблица 4).

Таблица 4
Table 4

Определение балльной шкалы значений [9]
Definition of the point value scale [9]

№ п/п	Балльная шкала	Описание диапазон значений параметров
1.	Балл 4	Отсутствует отклонение измеряемых параметров от нормативно-технической документации, оборудование выполняет требуемые функции в полном объеме.
2.	Балл 3	Параметры состояния оборудования находятся в пределах нормативно-технической документации, но появилась тенденция ухудшения значения контролируемого параметра.
3.	Балл 2	Параметры состояния оборудования находятся в пределах нормативно-технической документации, но возникает угроза наступления отказов, появляются первые признаки отклонения от выполнения требуемых функций оборудования.
4.	Балл 1	Указывает на предельно-допустимое состояние – параметры находятся близко к критическим значениям, оборудование выполняет требуемые функции не в полном объеме.
5.	Балл 0	Указывает на неудовлетворительное состояние – параметры состояния оборудования не соответствуют нормативно-технической документации, находятся в критичном значении. Дальнейшая эксплуатация оборудования недопустима.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В настоящее время данные играют важную роль в принятии решение, в частности, в электроэнергетике. Процесс обработки и анализа больших объемов данных (Big Data), позволяет выявлять новые тренды и находить новые закономерности. Обработка и анализ больших объемов данных требует использования специализированных инструментов и технологий, одним из которых являются методы машинного обучения. Использование методов машинного обучения связано как с необходимостью применения

эксплуатационного опыта (в виде экспертных оценок), так и получения объективных оценок состояния силового трансформатора, исключая человеческий фактор.

Машинное обучение – это раздел искусственного интеллекта, позволяющий системе обучаться на основе данных. Одной из составляющих машинного обучения является аппарат искусственных нейронных сетей, основанный на принципах работы биологического мозга. Применение методов машинного обучения для поиска неявных связей и корреляций между набором диагностических параметров силового маслонаполненного трансформатора позволяет получить достоверную оценку трансформатора [11]. Следовательно, своевременное принятие решения для продления срока эксплуатации трансформатора. Искусственные нейронные сети представляют собой сложные техники, способные моделировать сложные отношения. Одним из преимуществ нейронных сетей является способность обрабатывать нелинейные отношения и большой объем данных. Нейронные сети основаны на распознавании образов и некоторых процессов искусственного интеллекта, которые графически «моделируют» параметры. Они могут работать, когда неизвестна математическая формула, которая связывает входные данные с выходными [12].

Концепция нейронных сетей основана на том, как организована работа человеческого мозга, который обрабатывает данные как раз с помощью сети биологических нейронов (рис.2.). Базовым понятием искусственной нейронной сети является искусственный нейрон, который представляет собой простой вычислительный элемент [13].

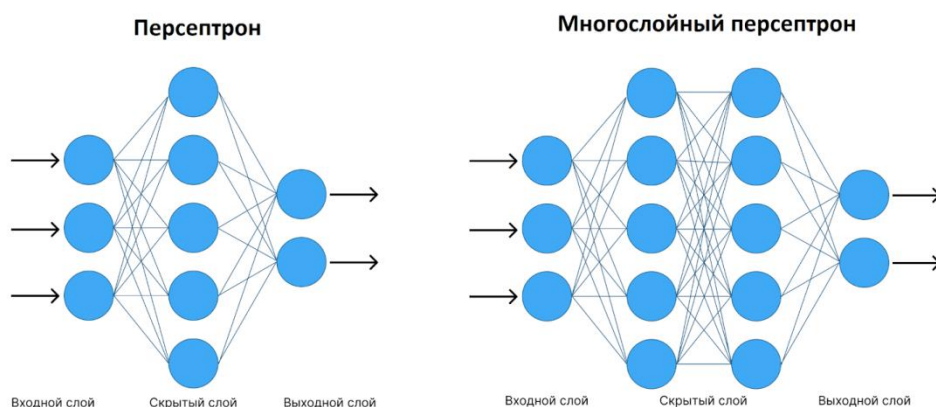


Рис.2. Модель нейронной сети

Fig.2. Neural network model

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

Исходные данные для создания базы данных системы оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформатора представлены в таблице 5.

Искусственный нейрон имеет вход, на который подается входной сигнал, вектор x , веса, вектор w , сумматор, который находит взвешенную сумму входных сигналов, а также функцию активации и выход. Функция активации дает нейрону нелинейные свойства. Поскольку нейрон – это не линейная функция, то объединение нейронов в систему приводит к эффекту эмерджентности, т.е. появлению у системы свойств, не присущих ее элементам в отдельности [14].

Процесс обучения модели на обучающей выборке и контроля результатов на валидационной выборке позволяет подобрать её подходящую архитектуру. Но в каждом конкретном случае определение числа слоев – это итерационный процесс, для которого также можно использовать различные подходы и алгоритмы.

Обучение модели и сама оценка технического состояния СМТО осуществляется на языке программирования Python, который широко применяется в разработке прикладного программного обеспечения, машинном обучении и обработке больших данных. Это высокоуровневый язык программирования, который отличается эффективностью, простотой и универсальностью использования.

На рисунках 3 и 4 представлена визуализация загружаемых данных трансформатора.

Таблица 5
Table 5Данные для формирования базы данных
Data for database formation

№ п/п	Диагностические параметры	Хорошее состояние t	Неудовлетворительное состояние	Критическое состояние	Функция
	Балльная оценка	4	2	1	
Данные из системы мониторинга					
X1	Уровень частичных разрядов	$(-60) \leq x < (-30)$	$(-30) \leq x < (-20)$	$(-20) \leq x < (-8)$	
X2	Влагосодержание масла	$x/30 < 1$ и $x/25 \leq 1$	$x/30 \leq 1$ и $x/25 > 1$	$x/30 > 1$	
X3	ХАРГ в масле	$25 \leq x \leq 399$	$400 \leq x \leq 499$	$500 \leq x \leq 5000$	
При $I_{раб} = (0,3-0,6) \cdot I_{ном}$, т.е. $0,3 \leq X12 < 0,6$					
X4'	Температура контактных соединений вводов фазы А	$x < 10$	$10 \leq x < 30$	$x \geq 30$	$(X4-X10)^* (0,5 \cdot X12/X13)^2$
X5'	Температура контактных соединений вводов фазы В	$x < 10$	$10 \leq x < 30$	$x \geq 30$	$(X5-X10)^* (0,5 \cdot X12/X13)^2$
X6'	Температура контактных соединений вводов фазы С	$x < 10$	$10 \leq x < 30$	$x \geq 30$	$(X6-X10)^* (0,5 \cdot X12/X13)^2$
ИЛИ					
При $I_{раб} = (0,6-1) \cdot I_{ном}$, т.е. $0,6 \leq X12 \leq 1$					
X4''	Температура контактных соединений вводов фазы А	$x < 20$	$20 \leq x < 40$	$x \geq 40$	$(X4-X10)^* (X14/X13)^2$
X5''	Температура контактных соединений вводов фазы В	$x < 20$	$20 \leq x < 40$	$x \geq 40$	$(X4-X10)^* (X14/X13)^2$
X6''	Температура контактных соединений вводов фазы С	$x < 20$	$20 \leq x < 40$	$x \geq 40$	$(X4-X10)^* (X14/X13)^2$
X7	Виброскорость бака	$x < 6,1$	$6,1 \leq x < 10$	$x \geq 10$	
X8	Температура масла	$x < 80$	$80 \leq x < 95$	$x \geq 95$	
X9	Срок службы	$x < 0,57$	$0,57 \leq x < 1,85$	$x \geq 1,85$	$(X16 - X15) / 25$
X10	Температура окружающей среды	$(-45) < x < (+40)$		$x \geq (+40)$ или $x \leq (-45)$	
X11	Относительная влажность воздуха	$x \leq 75$		$x > 75$	
X12	Коэффициент загрузки	$x < 0,8$	$0,8 \leq x < 1,2$	$1,2 \leq x < 1,6$	$X13/X14$
Паспортные данные трансформатора					
X13	Рабочий ток	31,17			
X14	Номинальный ток	103,9			
X15	Год изготовления	1982			
X16	Текущий год	2023			

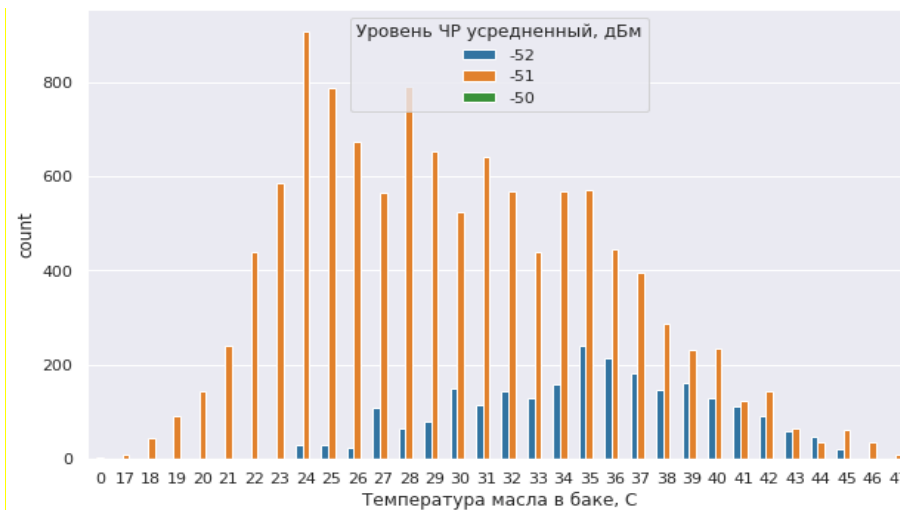


Рис.3. Распределение температуры масла в баке и уровня частичных разрядов: по оси X – распределение за 47 дней; по оси Y – значения температуры и уровня частичных разрядов

Fig.3. Distribution of oil temperature in the tank and the level of partial discharges: along the X axis – payments for 47 days; along the Y axis – the value of temperature and level of partial discharges

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис.4. Распределение температуры масла в баке: по оси X – температура масла за 28 дней; по оси Y – значения температуры в °C

Fig.4. Oil temperature distribution in the tank: along the X axis – oil temperature for 28 days; along the Y axis – temperature value in °C

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как и отмечалось выше, в разрабатываемой системе оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформатора 12 входных параметров (X1-X12) и один выходной параметр – КЭА (Y).

В нашем случае мы построили однослойную нейронную сеть с нейронными связями. В систему поступает, кроме текущих значений параметров, еще и значения предыдущих методов контроля, чтобы нейронная сеть смогла научиться оценивать динамику состояний, изменения состояний трансформаторного оборудования[15].

Для качественной работы нейронной сети важно подобрать оптимальное число нейронов в скрытом слое. Точность предсказания результата применения нейронной сети можно определить с помощью коэффициента детерминации R^2 . На рисунке 5 представлены результаты оценки работы сети с разным количеством нейронов.

Отрицательное значение R^2 при малом количестве нейронов говорит о том, что модель не объясняет изменчивости данных и работает хуже, чем выбор простое среднее. Нулевое значение R^2 говорит о том, что модель не предсказывает изменчивости данных, но также хороша, как и простое среднее. Положительное значение R^2 говорит о том, что модель лучше, чем простое среднее, и объясняет часть изменчивости данных. Из графиков видно, что увеличение числа нейронов делает модель лучше, а увеличение числа эпох хуже. Отличное значение получилось при использовании 2048 нейронов и 25 эпох.

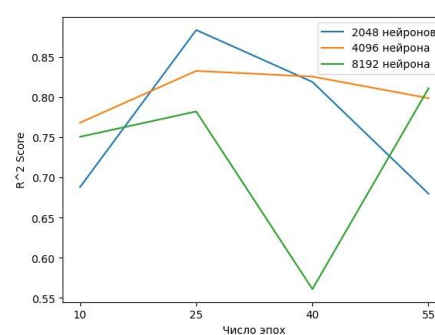
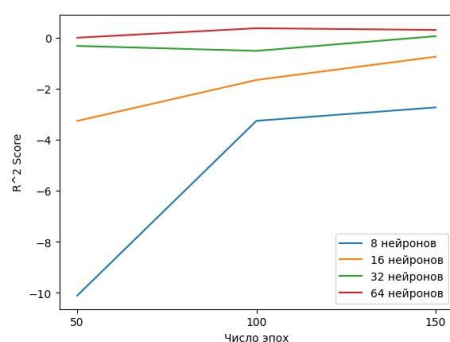


Рис.5. Анализ влияния количества нейронов на точность предсказания результата

Fig.5. Analysis of the influence of the number of neurons on the accuracy of predicting the result

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 6 представлен график изменения ошибки обучения и тестирования при обучении в зависимости от количества эпох. После 15 эпохи ошибки стали двигаться возле одного определённого значения и перестали изменяться. Дальнейшее обучение не приводит к улучшению показателей. Модель предсказывает 85 % данных.

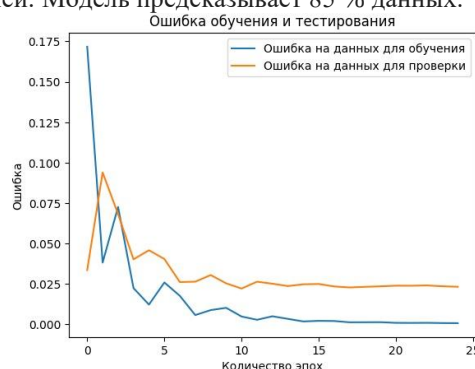


Рис. 6. Изменение ошибки при обучении в зависимости от количества эпох для модели 2048 нейронов

Fig.6. Change in training error depending on the number of epochs for a model of 2048 neurons

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На обучающей выборке обучили модель нейронной сети. Наилучшее значение получилось при использовании в модели 2048 нейронов и 25 эпох. Модель на тестовой выборке показала результат – 0,85, т.е. модель предсказывает техническое состояние силового трансформатора с точностью 85%. Выходной нейрон – КЭА – на основании текущего состояния и динамики изменений, будет говорить, какой вид технического воздействия необходимо применить.

Результаты оценки технического состояния силового трансформатора ранжируются по убыванию КЭА. Наименьший КЭА определяет наивысший приоритет необходимости осуществления технического воздействия. Диапазоны КЭА определяют необходимые виды технического воздействия. Они приведены в таблице 6 [16].

Таблица 6

Table 6

Вид технического воздействия по диапазону КЭА
Type of technical impact according to the range of CEA

Диапазон КЭА	Вид технического состояния	Вид технического воздействия
$0 < \text{и} \leq 25$	Критическое	Вывод из эксплуатации, техническое перевооружение и реконструкция
$25 < \text{и} \leq 50$	Неудовлетворительное	Дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение
$50 < \text{и} \leq 70$	Удовлетворительное	Усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт, реконструкция
$70 < \text{и} \leq 85$	Хорошее	По результатам планового диагностирования
$85 < \text{и} \leq 100$	Очень хорошее	Плановое диагностирование

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Собственно, таким образом, можно выстроить систему оценки и прогнозирования технического состояния силового трансформатора на основе 12 диагностических параметров.

Обсуждение (Discussions)

На основе методики оценки технического состояния построена модель нейронной сети для прогнозирования работы трансформатора. Полученная точность прогнозирования – 85%, показывает, что модель дообучена на имеющихся данных и может работать с определенной точностью. Большое количество нейронов в модели связано с искусственным созданием обучающих данных. Модель может быть дообучена и оптимизирована при работе с реальными данными.

На основе полученных результатов предложены следующие рекомендации:

1. Если КЭА силового трансформатора входит в диапазон (50;70] и ниже, то необходимо дополнительно анализировать внешние и режимные параметры силового трансформатора.

2. Внести корректировки в карту ремонтов для технического обслуживания оборудования силового трансформатора по его фактическому техническому состоянию, согласно данной оценке.

Заключение (Conclusions)

Из всего оборудования электрических подстанций силовое трансформаторное оборудование является одним из критически важных, в силу своей сложности и функциональной ответственности. А также является наиболее дорогостоящим элементом электроэнергетической системы по ремонту и техническому обслуживанию, его выход из строя приводит к большим экономическим потерям[17]. В настоящее время задача оценки и прогнозирования технического состояния силового трансформаторного оборудования распределительных сетей в ЕЭС России актуальна. Анализ парка СМТО распределительных сетей показал, что 60% эксплуатируемого трансформаторного оборудования в распределительных сетях выработало свой нормативный ресурс 25 лет [18]. Это указывает на необходимость использования комплексных систем оценки и прогнозирования технического состояния для принятия решений о функционировании, проведении ремонтных работ или замене трансформаторного оборудования.

Исследование каждого функционального узла СМТО как отдельного объекта и их взаимное влияние друг к другу привело более к детальной оценке его технического состояния, что позволит продлить срок эксплуатации. Исследуемые методы показывают лучшие характеристики, чем многие традиционные методы оценки технического состояния трансформаторного оборудования, и исключают планово-предупредительный ремонт. При планово-предупредительном ремонте проводят технические осмотры, ремонт и замену узлов трансформаторного оборудования по заранее составленному графику, с целью обеспечения его безотказной работы. Что не всегда исключает непредвиденные расходы за техническое обслуживание и ремонт. Наиболее эффективной системой является система технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию. Для перехода к такой системе необходимо разработать базу данных, т.е. собрать ретроспективу по каждому исследуемому силовому маслонаполненному трансформатору распределительных сетей.

Таким образом, разработана система оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей с применением машинного обучения. Под рассматриваемый силовой трансформатор создана система мониторинга, которая работает в режиме реального времени. По каждому диагностическому параметру определены предельно-допустимые значения. Сформирована база данных для системы оценки и прогнозирования технического состояния. Результаты оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформатора показали точность 85%, что позволяет внести корректировки в карту ремонтов и оптимизировать эксплуатационные затраты.

Литература

1. Galyautdinova A., Ivshin I., Vladimirov O., et al. Software and algorithmic support for online assessment of transformer substation technical condition 35/6(10) kV. REEPE 2023: Proceedings of the 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering; 16-18 March 2023; Moscow, Russian Federation. Moscow: IEEE; 2023. pp. 28-40.
2. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 №642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».
3. Галаяутдинова А.Р., Ившин И.В. Анализ параметров силового маслонаполненного трансформатора распределительных сетей для оценки его технического состояния // Материалы V

Всероссийской научно-практической (с международным участием) конференции, посвященной празднованию 55-летия КГЭУ. В 2-х томах, Казань, 11–12 октября 2023 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 234-238.

4. Khalyasmaa A., Matrenin P., Eroshenko S. Averaged errors as a risk factor for intelligent forecasting systems operation in the power industry. Smart Energy. USSEC 2021: Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021. 13–15 November 2021; Novosibirsk, 2021. pp. 192-196. doi 10.1109/USSEC53120.2021.9655742.

5. Хальясмаа А.И., Ревенков И.С., Сидорова А.В. Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 3(55). С. 99-113.

6. Byerly J., Schneider C., Schloss R. et al. Real-time circuit breaker health diagnostics. CPRE 2017: Proceedings of the 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2017. pp. 1-6.

7. Ившин И.В., Галяутдинова А.Р., Владимиров О.В. и др. Методика онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ по коэффициенту экспресс-анализа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23, № 4. С. 14-26.

8. Vladimirov O., Galyautdinova A., Ivshin I., et al. Equipment and data transmission system for express analysis of the technical condition of the main equipment of the 35/6(10)kV transformer substation. Efficient Production and Processing. 2021: Proceedings of ICEPP 2021, 18-20 February 2021; Kazan: ICEPP 2021. pp. 577-583.

9. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 26.07.2017 № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

10. www.edu.tltsu.ru Метод парных сравнений (Метод Саати).

11. Khruslov L., Rostovikov M., Shishov V. Web-based power quality monitoring system of smart transformer substation RTP-34 MPEI for engineering education. INFORNO-2016: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, INFORNO-2016. pp. 639-642.

12. Никулин С.А., Карнавский Е.Л. Оптимизация режимов установок электрохимической защиты // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 3 (57). С. 64–68.

13. Li Z., Yang J., Zhang Z. et al. Real Time Evaluation Algorithm for Measurement Performance of Substation Voltage Transformer Based on Artificial Neural Network. Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018. pp.1-4.

14. Gao Q., Zhong C., Wang Y., Wang P., Yu Z., Zhang J. Defect analysis of the same batch of substation equipment based on big data analysis algorithm. Proceeding of the 3rd International Conference on Green Energy and Sustainable Development. 2021. V.651. pp. 1-8.

15. Eroshenko S., Khalyasmaa A., Snegirev D., et al. The impact of data filtration on the accuracy of multiple time-domain forecasting for photovoltaic power plants generation. Applied Sciences (Switzerland), 2020. V. 10, № 22. pp. 1-22. doi: 10.3390/app10228265.

16. Farhadi M., Mollayi N. Application of the least square support vector machine for point-to-point forecasting of the PV power. International Journal of Electrical and Computer Engineering, August 2019.V.9(4). pp. 2205 – 2211.

17. Alimi O., Ouahada K., Abu-Mahfouz A. A review of machine learning approaches to power system security and stability. IEEE Access, art. 8, № 9121208, 2020. pp.113512-113531.

18. Гавриленко А.В., Долин А.П. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов. Димрус. Пермь, 2015. С. 60.

Авторы публикации

Галяутдинова Алсу Ренатовна – аспирант, преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID*: <http://orcid.org/0009-0000-4234-992X>. E-mail: Alsu296@yandex.ru.

Ившин Игорь Владимирович – докт. техн. наук, профессор, проректор по науке и коммерциализации, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-3124-2005>. E-mail: ivshini@mail.ru.

Соловьев Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационные технологии и интеллектуальные системы» (ИТИС) Казанского

References

1. Galyautdinova A., Ivshin I., Vladimirov O., et al. Software and algorithmic support for online assessment of transformer substation technical condition 35/6(10) kV. *REEPE 2023: Proceedings of the 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering; 16-18 March 2023; Moscow, Russian Federation*. Moscow: IEEE; 2023. pp. 28-40.
2. Decree of the President of the Russian Federation 01.12.2016 № 642 About the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation.
3. Galyautdinova AR, Ivshin IV, Analysis of parameters of power oil filled transformers of distribution networks to assess its technical condition. *Proceedings of the V All-Russian scientific and practical (with international participation) conference dedicated to the celebration of the 55th anniversary of KSPEU. In 2 volumes, Kazan, October 11–12, 2023*; Kazan: Kazan State Power Energy University, 2023. pp. 234-238. (In Russ.).
4. Khalyasmaa A., Matrenin P., Eroshenko S. Averaged errors as a risk factor for intelligent forecasting systems operation in the power industry. *Smart Energy. USSEC 2021: Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021. 13–15 November 2021*; Novosibirsk, 2021. pp. 192-196. doi 10.1109/USSEC53120.2021.9655742.
5. Khalyasmaa AI, Revenkov IS, Sidorova AV Application of digital twin technology for analysis and prediction state of power transformer equipment. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2022; 55(3):99-113. (In Russ.).
6. Byerly J., Schneider C., Schloss R. et al. Real-time circuit breaker health diagnostics. CPRE 2017: Proceedings of the 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2017. pp. 1-6.
7. Ivshin IV, Galyautdinova AR, Vladimirov OV, et al. Methodology of online assessment of technical state of transformer substation 35/6 (10) kV by express analysis coefficient. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(4):14-26. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-14-26.
8. Vladimirov O., Galyautdinova A., Ivshin I., et al. Equipment and data transmission system for express analysis of the technical condition of the main equipment of the 35/6(10)kV transformer substation. *Efficient Production and Processing. 2021: Proceedings of ICEPP 2021, 18-20 February 2021*; Kazan: ICEPP 2021. pp. 577-583.
9. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation 26.07.2017 № 676 On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and power lines of power plants and electrical networks.
10. www.edu.tltsu.ru Method of paired comparisons (Saaty method).
11. Khruslov L., Rostovikov M., Shishov V. Web-based power quality monitoring system of smart transformer substation RTP-34 MPEI for engineering education. *INFORNO-2016: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, INFORNO-2016*. pp. 639-642.
12. Nikulin SA, Karnavsky EL Optimization of electrochemical protection installation modes. *Automation and remote control*. 2014; 3(57): 64–68. (In Russ.).
13. Li Z., Yang J., Zhang Z. et al. Real Time Evaluation Algorithm for Measurement Performance of Substation Voltage Transformer Based on Artificial Neural Network. *Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018*. pp.1-4.
14. Gao Q., Zhong C., Wang Y., Wang P., Yu Z., Zhang J. Defect analysis of the same batch of substation equipment based on big data analysis algorithm. *Proceedings of the 3rd International Conference on Green Energy and Sustainable Development. 2021*. V.651. pp. 1-8.
15. Eroshenko S., Khalyasmaa A., Snegirev D., et al. The impact of data filtration on the accuracy of multiple time-domain forecasting for photovoltaic power plants generation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020. V. 10, № 22. pp. 1-22. doi: 10.3390/app10228265.
16. Farhadi M., Mollayi N. Application of the least square support vector machine for point-to-point forecasting of the PV power. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, August 2019. V.9(4). pp. 2205 - 2211.
17. Alimi O., Ouahada K., Abu-Mahfouz A. A review of machine learning approaches to power system security and stability. *IEEE Access*, art. 8, № 9121208, 2020. pp.113512-113531.
18. Gavrilenko AV, Dolin AP Quality control system for pressing windings and steel of transformers based on vibration measurements, monitoring the condition of oil pumps. *Dimrus. Perm, 2015*. pp. 60. (In Russ.)

Authors of the publication

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-3124-2005>. E-mail: ivshini@mail.ru.

Alsu R. Galyautdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0009-0000-4234-992X>. E-mail: Alsu296@yandex.ru.

Sergei A. Solovev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8428-3367>. E-mail: solovev.sa@kgeu.ru.

Научная специальность: 2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **05.02.2024 г.**

Отредактировано **11.02.2024 г.**

Принято **16.02.2024 г.**