

УДК 621.314

DOI 10.48612/vch/p446-5xkb-1ukh

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**А. А. Димитриев¹⁾, Х. У. Каландаров²⁾, Г. М. Михеев³⁾**¹⁾Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова
428003, Чебоксары, Российская Федерация²⁾Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета
428000, Чебоксары, Российская Федерация³⁾Чувашский государственный аграрный университет
428015, Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация. Известно, что силовые трансформаторы предназначены для передачи электрической энергии на дальние расстояния. Чем выше класс напряжения этого дорогостоящего электрооборудования, тем возможность передать мощность электроэнергии без потерь на более дальнее расстояние увеличивается. Например, силовые трансформаторы, работающие на напряжение 6-10 кВ, подключены к линиям электропередач, имеющим протяженность не более 30-50 км, трансформаторы 110 кВ – не более 100 км, а трансформаторы 220 кВ – около 200 км. Трансформаторное масло, которое омывает обмотки этого преобразователя напряжения предназначено как для охлаждения, так и для их изоляции. От качества этой диэлектрической жидкости зависит надежность электроснабжения предприятий промышленности страны, мегаполисов, фермерских хозяйств, а также бесперебойность электроснабжения населенных пунктов. Сегодня в России эксплуатируется со значимым превышением срока эксплуатации более 50% силовых трансформаторов. Данный факт способствует повышению требований к их техническому контролю и диагностике всех его основных узлов. Общеизвестно, что одним из эффективных методов диагностики преобразователей напряжения, залитых трансформаторным маслом, по праву считается хроматографический анализ растворенных в масле газов. Однако для определения характера дефекта и нахождения его местоположения во внутренней полости трансформатора по полученным данным анализа диэлектрической жидкости, необходимо иметь высококвалифицированный персонал. Но и он иногда может дать ошибочное заключение при решении этой поставленной цели. В недалеком будущем данную задачу вполне может решить искусственный интеллект. По вышеуказанным причинам для реализации этой идеи, в данной работе была проведена попытка сравнительного анализа трех перспективных методов машинного обучения: нейронных сетей, алгоритма дерева решений и нечеткой логики. Применение указанных алгоритмов способствует упрощению задачи диагностики силового трансформатора для определения неисправности и ее нахождению местоположения во внутренней полости преобразователя напряжения, а в будущем – внедрению искусственного интеллекта для решения данной непростой задачи.

Ключевые слова: диагностика, трансформаторное масло, силовые трансформаторы, хроматографический анализ, искусственный интеллект, алгоритм дерева решений, нейронные сети, нечеткая логика.

Введение. Со времен конца позапрошлого века и по настоящее время силовые маслonaполненные трансформаторы играли и играют важную роль в обеспечении непрерывной работы потребителей электрической энергии. От обслуживающего персонала требуется особое внимание, контроль и проведение полноценной диагностики для их надежного функционирования.

Игнорирование данного обстоятельства может привести к возникновению серьезных проблем и аварий в электроэнергетической системе [1], [2], [3], [4], [5], [6]. По вышеуказанным причинам применение передовых технологий является одним из путей решения этой задачи [5], [6], [7], [8], [9].

Хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ) является одним из эффективных методов диагностирования высоковольтного маслonaполненного электрооборудования [13]. Данный метод применяют для определения причин возникновения дефектов внутри бака силового преобразователя напряжения, а также выяснения степени их опасности. ХАРГ способствует уточнению местоположения неисправности отдельных узлов внутри бака трансформатора, что решает задачу повышения эффективности и достоверности оценки технического состояния дорогостоящего электрооборудования [10], [11].

Использование ХАРГ также позволяет прогнозировать риски, возникающие в процессе эксплуатации силового трансформатора (СТ). В дальнейшем, на основе анализа полученных данных, необходимо принять меры, препятствующие выходу его из строя.

Однако процесс диагностирования напрямую зависит от механизма интерпретации результатов ХАРГ. Определяющим нормативным документом в части исследования силового трансформатора по этому методу является СТО 34.01-23-003-2019 «Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслonaполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле». Для его грамотной и полноценной оценки, оператору необходимо руководствоваться данным документом, а также иметь не только представление о процессах, протекающих в нем, но и обладать соответствующим опытом и компетенциями.

Материалы и методы исследования. В настоящее время искусственный интеллект (ИИ) широко внедряется в быту и в различных отраслях народного хозяйства, включая электроэнергетику [5], [7], [8], [9], [12], [14], [16]. Внедрение методов машинного обучения в этой отрасли способствует созданию эффективных инструментов для диагностики СТ, которые залиты диэлектрической жидкостью.

Для выполнения этой задачи следует пользоваться уже имеющимися экспертными приложениями. С их помощью легко интерпретировать полученные данные ХАРГ на основе рекомендаций и методик, описанных в руководящих документах, например СТО 34.01-23-003-2019 по выявлению неисправностей в трансформаторе. Применение таких приложений позволяет оценить состояние СТ напрямую без участия человека [5].

Популярными методами в области ИИ, машинного обучения и анализа данных в настоящее время считаются искусственные нейронные сети (ИНС), алгоритм дерева решений (АДР), а также нечеткая логика (НЛ) [5], [6], [7], [8], [9], [15], [16]. Применительно к диагностике СТ все эти методы имеют свои достоинства и недостатки.

ИНС представляет собой совокупность искусственных нейронов, взаимодействующих между собой. Они базируются на наборе взаимосвязанных узлов и блоков, именуемых искусственными нейронами.

Принимая на входе набор данных, эта сеть пропускает их через сеть искусственных нейронов, каждый из которых производит свой собственный вывод на основе поставленных условий, подводимых к нейрону. Эти сети позволяют распознавать скрытые закономерности, которые могут протекать внутри СТ.

Однако для правильной работы ИНС необходимо иметь достаточное количество статистических параметров. Эти параметры трансформатора могут представляться либо с выходов средств диагностики, либо с данных, полученных по результатам компьютерного моделирования. На практике, получение большого массива данных ХАРГ для конкретного СТ не представляется возможным по причине отсутствия непрерывного контроля.

Дерево принятия решений (также называют деревом классификации или регрессионным деревом) – средство поддержки принятия решений, использующееся в методах ИИ, анализе данных и статистике. Структура дерева представляет собой «листья» и «ветки». На ребрах («ветках») дерева решения записаны признаки, от которых зависит целевая функция. В «листьях» записаны значения целевой функции, а в остальных узлах – признаки, по которым различаются случаи. Для классификации очередного случая необходимо спуститься по дереву до листа и выдать соответствующее значение [7].

Отсутствие четких границ между отдельными классами состояний считается главным достоинством математического аппарата НЛ [7]. Здесь каждый параметр состояния (содержание растворенного газа в масле) следует рассматривать как лингвистическую переменную.

Чтобы оценить значения данных используется единая описательная шкала термов: Н – низкий, С – средний, В – высокий [5], [9]. Каждый из этих термов представляет собой нечеткое множество, заданное с помощью соответствующей функции принадлежности. Составленные на основе опыта инженерно-технических работников и экспертных оценок нечетко-логические уравнения (вида ЕСЛИ..., ТО...) вместе с функциями принадлежности нечетких термов позволяют принимать решение о техническом состоянии трансформатора.

Сравнение характеристик рассматриваемых методов ИИ применительно к диагностированию технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение характеристик методов ИИ для диагностики маслонаполненных трансформаторов

Особенности	Характеристика методов ИИ		
	ИНС	АДР	НЛ
Преимущества	Могут обрабатывать большие объемы информации, извлекать сложные нелинейные зависимости и адаптироваться к изменениям в данных. Также они могут быть эффективны в задачах прогнозирования технического состояния электрооборудования и классификации, возникающих в них неисправностей.	Позволяют создавать простые и интерпретируемые модели, которые способны работать с различными типами данных и выявлять важные признаки. Они могут также обрабатывать большие объемы данных.	Позволяет учитывать неопределенность и вариативность в данных, а также описывать лингвистические переменные. Это делает ее полезной для моделирования в условиях нечеткости или неопределенности.
Недостатки	Интерпретируемость результатов может быть затруднена из-за их сложной структуры, и могут требоваться большие объемы данных для обучения НС.	Могут склоняться к переобучению, особенно при работе с большим количеством признаков, и иногда недостаточно точны в моделировании сложных взаимосвязей.	Может быть менее точной в некоторых ситуациях, особенно если данные хорошо структурированы и не содержат значительной степени неопределенности.

Результаты исследований и их обсуждение. Ниже рассмотрен анализ результатов ХАРГ, полученных в ходе эксплуатации одного из трансформаторов подстанции Чувашской Республики. 18 июля 2022 года в

результате срабатывания газовой защиты отключился трансформатор ТДН-16000/110 У1, марка масла ВГ (согласно ТУ 38.401.978-93).

В таблице 2 приведены данные о концентрациях характерных газов в трансформаторном масле (ТМ), упорядоченных по датам.

Значения растворенных газов здесь приведены в объемных долях, % от общего объема. Как видно из таблицы, в данных ХАРГ, полученных 18.07.2022, были выявлены превышения предельной концентрации газов (ПДЗ, % об.) водорода (H_2), ацетилена (C_2H_2), оксида углерода (CO) и диоксида углерода (CO_2).

Согласно требованиям действующих стандартов по анализу результатов ХАРГ, по рассчитанным отношениям концентраций пар газов в трансформаторе прогнозируется наличие разрядов большой мощности – дуговых разрядов, искрения или пробоя масла между обмотками или катушками, или между катушками на землю.

Таблица 2 – Часть таблицы с результатами ХАРГ рассматриваемого преобразователя напряжения (указано 16 строк из 31)

Дата	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	CO	CO_2	Состояние
21.11.2017	0,001	0,0008	0,0157	0,0011	0	0,00045	0,0049	нормальное
27.09.2018	0,001	0,0009	0,0169	0,0013	0	0,00064	0,0057	нормальное
12.11.2019	0,001	0,0008	0,0176	0,0014	0	0,00055	0,0056	нормальное
20.12.2019	0,001	0,0008	0,0168	0,0014	0	0,00046	0,0053	нормальное
24.04.2020	0,001	0,0008	0,0182	0,0015	0,0001	0,00058	0,0061	нормальное
14.06.2020	0,001	0,0007	0,017	0,0014	0,0001	0,00056	0,0057	нормальное
22.10.2020	0	0,0006	0,0158	0,0013	0	0,00038	0,0052	нормальное
22.01.2021	0,001	0,0007	0,0157	0,0013	0	0,00045	0,0055	нормальное
14.11.2021	0,001	0,0007	0,0154	0,0013	0	0,00068	0,0062	нормальное
03.04.2022	0,001	0,0007	0,0156	0,0013	0	0,0021	0,0062	требуется внимания
18.07.2022	0,01031	0,00485	0,07737	0,01602	0,00115	0,00593	0,0027	аварийное
20.07.2022	0,03479	0,00649	0,12464	0,0184	0,0012	0,0066	0,04672	аварийное
22.07.2022	0,04111	0,00752	0,12975	0,01851	0,00125	0,00826	0,05837	аварийное
25.07.2022	0,03573	0,00704	0,09297	0,01891	0,00127	0,00788	0,07093	требуется внимания
28.07.2022	0,02864	0,0068	0,11527	0,01794	0,00123	0,00773	0,06935	требуется внимания
04.08.2022	0,02513	0,00619	0,11899	0,0178	0,00122	0,00779	0,06187	требуется внимания

Для подтверждения результатов был проведен повторный отбор пробы масла на ХАРГ 20.07.2022 и 22.07.2022.

Анализ повторных проб диэлектрической жидкости показал развивающийся дефект, а также значительную скорость его развития. Поэтому трансформатор незамедлительно был выведен в ремонт. В ходе его вскрытия был обнаружен обрыв заземляющей шинки ярма трансформатора (указано на рисунке 1.)



Рис.1. Обрыв заземляющей шинки ярма магнитопровода трансформатора

По причине плохого контакта в месте крепления шинки, соединяющей корпус магнитопровода с баком трансформатора, масло интенсивно разлагалось на газы, а они, в свою очередь, растворялись в нем. Вследствие разрядов большой мощности произошел обрыв шинки. После устранения повреждения был установлен усиленный контроль за состоянием ТМ, который продолжается по настоящее время.

Рассмотрим этот реальный случай выявления дефекта в СТ с помощью ХАРГ с применением ИИ.

В процессе рассмотрения результатов ХАРГ в качестве итогового значения будем определять три индекса состояния СТ:

- нормальное – А1 (содержание газов не превышает допустимых значений);
- требующее внимания – А2 (концентрация газов не превышает предельно допустимых значений);
- аварийное – А3 (концентрация растворенных в ТМ газов выходит за рамки предельно допустимых значений).

Для выявления дефекта в СТ в первую очередь применим метод искусственных нейронных сетей. Обучение ИНС проводилось с помощью алгоритма RProp [14]. Условия завершения обучения были определены на основе эмпирических наблюдений с учетом изменений и стабилизации ошибок. Для достижения желаемого уровня точности было проведено 10000 циклов (эпох) обучения. Архитектура сети состояла из четырехслойного персептрона: 7 входных нейронов, два скрытых слоя с 15 и 10 нейронами соответственно, а также три выходных нейрона, представляющих целевую функцию – три состояния СТ (A1÷A3) (см. рис. 2). Для проверки эффективности обучения было создано тестовое множество, включающее 30% случайно выбранных строк из исходной выборки. Остальные строки выборки были использованы в качестве обучающего множества.

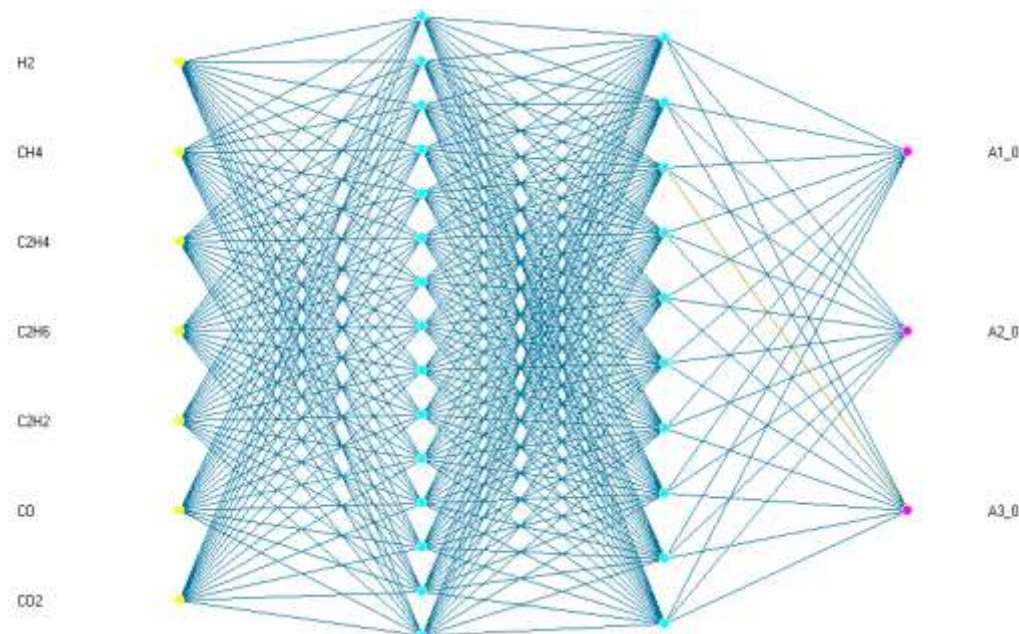


Рис.2. Граф нейронной сети с входным слоем (7 величин), скрытым слоем (15 и 10 нейронов) и тремя нейронами с выходными данными

Обученная НС позволяет проверить указанные входные данные (табл.2), на основании чего на рисунке 2 указана таблица сопряженности (рис. 3 а, б, в) для каждого индекса состояния (A1, A2 и A3) соответственно, рассматриваемого преобразователя напряжения.

Фактически	Классифицировано		
	0	1	Итого
0	9	2	11
1	5	14	19
Итого	14	16	30

а)

Фактически	Классифицировано		
	0	1	Итого
0	18	4	22
1	1	7	8
Итого	19	11	30

б)

Фактически	Классифицировано		
	0	1	Итого
0	26	1	27
1	1	2	3
Итого	27	3	30

в)

Рис.3. Таблицы сопряженности на примере входных данных для трех индексов технического состояния силового трансформатора (ИНС)

Рисунок, представленный выше, показывает, что с помощью ИНС можно более точно определять все три индекса технического состояния – «Авария», «Нормальное состояние», «Требующее внимание». По нашему

мнению, это обстоятельство дает право утверждать, что применение указанного метода ИИ является достаточно перспективным в целях технического диагностирования высоковольтного маслонаполненного электрооборудования.

Рассмотрим решение этой задачи на примере АДР. Из всего массива входных данных, приведенных в таблице 2, этот алгоритм выявил наиболее характерный газ – этилен (C_2H_4). Концентрации указанного растворенного газа в масле для данного преобразователя напряжения является наиболее приемлемым в роли диагностического фактора при оценке результатов ХАРГ.

Результат выделения целевого атрибута для определения аварийного состояния АЗ с помощью АДР приведен на рисунке 4.

Целевой атрибут: АЗ				
№	Номер	Атрибут	Значимость, %	/
1	3	C_2H_4		100,000
2	5	C_2H_2		0,000
3	7	CO_2		0,000
4	6	CO		0,000
5	1	H_2		0,000
6	2	CH_4		0,000
7	4	C_2H_6		0,000

Рис.4. Выделение целевого атрибута определения газов в трансформаторном масле, наиболее влияющего на возникновение аварийного состояния СТ

Алгоритмом АДР выполнен анализ всех трех состояний трансформатора. Состояния А1 получились аналогичными результатам, полученным с помощью ИНС. Поэтому на рисунках 5 и 6 приведен результат работы АДР только для состояний «Требующее внимание А2» (рис. 5, а) и «Аварийное А3» (рис. 5, б) по анализу характерного газа, указанного выше.

Условие	Следствие	Поддержка	Достоверность
ЕСЛИ		 21	 15
$C_2H_4 < 0,071565$	0	 9	 9
ЕСЛИ		 12	 6
$C_2H_4 < 0,121815$	1	 9	 6
$C_2H_4 \geq 0,121815$	0	 3	 3

а)

Условие	Следствие	Поддержка	Достоверность
ЕСЛИ		 21	 19
$C_2H_4 < 0,121815$	0	 18	 18
$C_2H_4 \geq 0,121815$	1	 3	 2

б)

Рис.5. Разграничение целевого атрибута, полученного при работе алгоритма дерева решений состояний «Требующее внимание А2» (рис. 5, а) и «Аварийное А3» (рис. 5, б) при анализе результатов ХАРГ силового трансформатора

Математическим аппаратом АДР автоматически произошло разграничение целевых атрибутов. Выделены с высокой поддержкой решения и достоверностью границы концентрации газов (в %), в которых будет определяться техническое состояние электрооборудования.

Распознавание аварийного состояния СТ по результатам ХАРГ диэлектрической жидкости с помощью АДР получилось достаточно высоким, что можно наблюдать из таблицы сопряженности, показанной на рис. 6.

Фактически	Классифицировано		
	0	1	Итого
0	25	2	27
1	1	2	3
Итого	26	4	30

а)

Фактически	Классифицировано		
	0	1	Итого
0	15	7	22
1	1	7	8
Итого	16	14	30

б)

Рис.6. Таблица сопряженности на примере выходных данных по требующему вниманию А2 (а) и аварийному состоянию А3 (б) силового трансформатора (АДР)

АДР с достаточной точностью определяет три значения технического состояния СТ, что более чем приемлемо для процедуры диагностики электрооборудования. При этом были дополнительно распознаны два индекса состояния: «требующих внимание» и «аварийное». Эти два состояния в исходных данных были заданы неточно (см. табл. 2). Эти случаи на рис. 6 отмечены красным цветом.

Использование нечетко-логического аппарата полностью соответствует результатам и выводам, полученным из опытных данных о содержании растворенных газов в испытуемом образце трансформаторного масла с дефектом. В качестве основы для нечетких экспертных правил был использован нормативный документ СТО 34.01-23-003-2019, где мы определили параметры, на основе которых осуществляется оценка технического состояния объекта. В качестве входных и выходных функций принадлежности мы выбрали S-образные и колоколообразные функции. Используемый алгоритм диагностирования состояния СТ с помощью нечеткой логики приведен на рисунке 7.



Рис.7. Алгоритм диагностирования состояния трансформатора с помощью нечеткой логики

Распознавание результатов ХАРГ диэлектрической жидкости с помощью НЛ получилось достаточно высоким и аналогичным результатам применения АДР, что можно наблюдать из таблицы сопряженности, показанной на рис. 8.

Фактически	Классифицировано		
	0	1	Итого
0	25	2	27
1	1	2	3
Итого	26	4	30

Рис. 8. Таблица сопряженности на примере выходных данных по аварийному состоянию АЗ силового трансформатора по методу нечеткой логики

Сравнение полученных характеристик рассматриваемых методов ИИ применительно к интерпретации ХАРГ силового маслонаполненного трансформатора типа ТДН-16000/110 приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение полученных характеристик рассматриваемых методов ИИ применительно к интерпретации ХАРГ силового маслонаполненного трансформатора типа ТДН-16000/110

Методы ИИ	Постановка граничных условий	Обучение метода ИИ	Точность постановки выходной оценки состояния
ИНС	Не требуется, ИНС использует входные данные и разделяет их на обучающий и тестирующий набор.	Необходима подготовка входных данных, их статистическая предобработка	Дает точную оценку технического состояния СТ даже при изменении входных параметров.
АДР	Не требуется, дерево решений автоматически разграничивает и уточняет допустимые границы входных параметров.	Требуется, необходимо выделять ряд достоверных и качественных входных данных.	Достаточно высокая точность определения технического состояния СТ. Точность зависит от качества и достоверности исходных данных.
НЛ	Требуется ручное задание граничных условий для наиболее точного определения границ состояний.	Входные параметры обрабатываются напрямую с использованием нечеткой базы правил, что исключает необходимость в ручном задании границ.	Дает наименее точный результат относительно двух других методов. Присутствует необходимость точного задания функций принадлежности и граничных условий.

Заключение.

1. Для диагностики СТ каждый из методов ИИ может быть эффективным в зависимости от конкретных условий.
2. Использование комбинаций различных методов ИИ по результатам ХАРГ позволяет наиболее точно распознать неисправность в маслонаполненном трансформаторе.

Литература

1. Алексеев, Б. А. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Б. А. Алексеев, Ф. Л. Коган, Л. М. Мамиконянц. – Москва : Издательство НИЦ ЭНАС, 2003. – 256 с.
2. Багян, Н. Р. Искусственный интеллект в электроэнергетике / Н. Р. Багян, М. Д. Коннова // Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика : материалы 1-й Международной научно-практической конференции, Москва : 04–05 декабря 2017 года. Том Выпуск 2. – Москва : Государственный университет управления, 2017. – С. 86-91.
3. Баталыгин, С. Н. Комплексное обследование силовых трансформаторов / С. Н. Баталыгин, Г. М. Михеев, В. М. Шевцов // Кибернетика электрических систем : материалы XXVI сессии Всероссийского семинара "Диагностика энергооборудования" – Новочеркасск, 21–24 сентября 2004 года / Ответственный редактор А. С. Засыпкин. – Т.1, Часть 1. – Новочеркасск : Южно-Российский государственный технический университет, 2004. – С. 14-16. – EDN YOQKQT.
4. Диагностирование и алгоритм работы быстродействующих регуляторов напряжения под нагрузкой / Г. М. Михеев, Т. Г. Иванова, Д. И. Константинов [и др.] – // Электротехника. – 2017. – № 7. – С. 30-36. – EDN YTXGTGX.
5. Димитриев, А. А. Применение алгоритма дерева решений для оценки результатов хроматографического анализа трансформаторного масла / А. А. Димитриев, Г. М. Михеев, Х. У. Каландаров // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 4. – С. 74-84. – DOI 10.47026/1810-1909-2023-4-74-84.
6. Егоров, А. А. Основные направления применения технологий искусственного интеллекта в электроэнергетике: зачем он нужен и на что способен / А. А. Егоров // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2023. – № 9(170). – С. 6-16. – EDN WLRDVR.
7. Кильчанов, С. В. Применение деревьев решений при диагностике оборудования энергетики / С. В. Кильчанов, М. В. Коротченков, И. А. Щербатов // Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2019. № 4(9). – С. 32–36.

8. Коновалов, Ю. В. Искусственный интеллект в электроэнергетике / Ю. В. Коновалов, А. Е. Вайгачев // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2021. – № 8. – С. 225-226.
9. Максимова, Т. В. Методы технической диагностики оборудования на основе нейросетевых технологий / Т. В. Максимова, А. С. Генералов, А. Е. Яблоков // Наука молодых – будущее России : сборник научных статей, 7-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 207–210.
10. Михеев, Г. М. Трансформаторное масло: учебное пособие / Г. М. Михеев. – Министерство образования Российской Федерации. Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова. – Чебоксары : Изд-во Чуваш.ун-та, 2003. – ISBN 5-7677-0731-6.
11. Михеев, Г. М. Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования / Г. М. Михеев. – Саратов : Профобразование, 2017. – 297 с. – ISBN 978-5-4488-0089-4.
12. Мурзин, Ж. А. Анализ математических моделей искусственных нейронных сетей для диагностики силового трансформатора / Ж. А. Мурзин // Студенческий вестник. – 2022. – № 19-18(211). – С. 41-42.
13. Платформа Loginom. Официальный сайт компании BaseGroupLabs. – Текст : электронный. – URL: <https://basegroup.ru/deductor/description/> (дата обращения: 23.06.2023).
14. Полошков, В. А. Использование искусственного интеллекта для решения задач прогнозирования запасов предприятия в сфере электроэнергетики / В. А. Полошков // Студенческий вестник. – 2021. – № 41-4(186). – С. 88-91. – EDN NLVCIU.
15. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: перевод с польского – Москва : Горячая линия-Телеком, 2013. – 384 с.
16. Семенова, Н. Г. Модели и методы искусственного интеллекта в задачах электроэнергетики / Н. Г. Семенова. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2022. – 189 с. – ISBN 978-5-7410-2701-1. – EDN BEVLXB.

Сведения об авторах

1. **Димитриев Антон Анатольевич**, аспирант кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем им. Федорова А.А., Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, 428015, г. Чебоксары, Московский пр-т, д. 15, Чувашская Республика, Россия; e-mail: meterling21@mail.ru, тел. +7-987-678-79-49;
2. **Каландаров Хусейджон Умарович**, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-энергетических систем, Чебоксарский филиал Московского политехнического университета, 428000, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 54, Чувашская Республика, Россия; e-mail: huseinjon.86@mail.ru, тел. +7-995-297-50-07.
3. **Михеев Георгий Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29, Чувашская Республика, Россия; e-mail: mikheevg@rambler.ru, тел. +7-903-345-85-40.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR POWER TRANSFORMER DIAGNOSTICS

A. A. Dimitriev¹⁾, H. U. Kalandarov²⁾, G. M. Mikheev³⁾

¹⁾ I.N. Ulianov Chuvash State University
428003, Cheboksary, Russian Federation

²⁾ Cheboksary Institute (branch) of Moscow Polytechnic University
428000, Cheboksary, Russian Federation

³⁾ Chuvash State Agrarian University
428015, Cheboksary, Russian Federation

Abstract. It is known that power transformers are designed to transmit electrical power over long distances. The higher the voltage class of this expensive electrical equipment, the greater the possibility of transmitting the power of electricity without losses over a longer distance increase. For example, power transformers operating at a voltage of 6-10 kV are connected to power lines with a length of no more than 30-50 km, 110 kV transformers – no more than 100 km, and 220 kV transformers – about 200 km. The transformer oil that bathes the windings of this voltage converter is designed both for cooling and for their insulation. The quality of this dielectric fluid determines the reliability of power supply to the country's industrial enterprises, megacities, farms, as well as uninterrupted power supply to settlements. Today in Russia more than 50% of power transformers are operated with significant excess of their service life. This fact contributes to increased requirements to their technical control and diagnostics of all its main components. It is well known that one of the effective methods of diagnostics of voltage converters filled with transformer oil is rightly considered to be chromatographic analysis of gases dissolved in the oil. However, in order to determine the nature of the defect and find its location in the inner cavity of the transformer based on the obtained data of dielectric fluid analysis, it is necessary to have highly qualified personnel. But even they can sometimes give an erroneous conclusion when solving this task. In the near future, this task may well be solved by artificial intelligence. For the above reasons, in order to realize this idea, this paper has attempted a comparative analysis of three promising methods of machine learning: neural networks, decision tree algorithm and fuzzy logic. The application of these algorithms helps to simplify

the problem of power transformer diagnostics to identify the fault and locate its location in the internal cavity of the voltage converter, and in the future to implement artificial intelligence to solve this difficult task.

Keywords: diagnostics, transformer oil, power transformers, chromatographic analysis, artificial intelligence, decision tree algorithm, neural networks, fuzzy logic.

References

1. Alekseev, B. A. Ob'yom i normy ispytaniy ehlektrooborudovaniya / B. A. Alekseev, F. L. Kogan, L. M. Mamikonyanc. – Moskva : Izdatel'stvo NC EHNAS, 2003. – 256 s.
2. Bagyan, N. R. Iskusstvennyy intellekt v ehlektroehnergetike / N. R. Bagyan, M. D. Konnova // Shag v budushchee: iskusstvennyy intellekt i cifrovaya ehkonomika : materialy 1-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Moskva : 04–05 dekabrya 2017 goda. Tom Vypusk 2. – Moskva : Gosudarstvennyy universitet upravleniya. – 2017. – S. 86–91.
3. Batalygin, S. N. Kompleksnoe obsledovanie silovykh transformatorov / S. N. Batalygin, G. M. Mikheev, V. M. Shevcov // Kibernetika ehlektricheskikh sistem : materialy XXVI sessii Vserossiyskogo seminar "Diagnostika ehnergooborudovaniya" – Novocherkassk, 21–24 sentyabrya 2004 goda / Otvetstvennyy redaktor A. S. Zasyupkin. – T.1, Chast' 1. – Novocherkassk : Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet, 2004. – S. 14–16. – EDN YOQKQT.
4. Diagnostirovanie i algoritmy raboty bystrodeystviyushchikh regulyatorov napryazheniya pod nagruzkoy / G. M. Mikheev, T. G. Ivanova, D. I. Konstantinov [i dr.] – // Ehlektrotehnika. – 2017. – № 7. – S. 30–36. – EDN YTXTGX.
5. Dimitriev, A. A. Primenenie algoritma dereva resheniy dlya ocenki rezul'tatov khromatograficheskogo analiza transformatornogo masla / A. A. Dimitriev, G. M. Mikheev, KH. U. Kalandarov // Vestnik Chuvashskogo universiteta. – 2023. – № 4. – S. 74–84. – DOI 10.47026/1810-1909-2023-4-74-84.
6. Egorov, A. A. Osnovnye napravleniya primeneniya tekhnologiy iskusstvennogo intellekta v ehlektroehnergetike: zachen na nuzhen i na chto sposoben / A. A. Egorov // Avtomatizatsiya i IT v ehnergetike. – 2023. – № 9(170). – S. 6–16. – EDN WLRDVR.
7. Kil'chanov, S. V. Primenenie derev'ev resheniy pri diagnostike oborudovaniya ehnergetiki / S. V. Kil'chanov, M. V. Korotchenkov, I. A. Shcherbatov // Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya. – 2019. № 4(9). – S. 32–36.
8. Konovalov, YU. V. Iskusstvennyy intellekt v ehlektroehnergetike / YU. V. Konovalov, A. E. Vajgachev // Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskij progress. – 2021. – № 8. – S. 225–226.
9. Maksimova, T. V. Metody tekhnicheskoy diagnostiki oborudovaniya na osnove nejrosetevykh tekhnologiy / T. V. Maksimova, A. S. Generalov, A. E. Yablokov // Nauka molodykh – budushchee Rossii : sbornik nauchnykh statej, 7-j Mezhdunarodnoj nauchnoy konferencii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh. – Kursk : Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2022. – S. 207–210.
10. Mikheev, G. M. Transformatornoe maslo: uchebnoe posobie / G. M. Mikheev. – Ministerstvovo obrazovaniya Rossiyskoy Federacii. Chuvashskij gosudarstvennyy universitet im. I. N. Ul'yanova. – Cheboksary : Izd-vo Chuvash.un-ta, 2003. – ISBN 5-7677-0731-6.
11. Mikheev, G. M. Ehlektrostantsii i ehlektricheskie seti. Diagnostika i kontrol' ehlektrooborudovaniya / G. M. Mikheev. – Saratov : Profobrazovanie, 2017. – 297 s. – ISBN 978-5-4488-0089-4.
12. Murzin, ZH. A. Analiz matematicheskikh modeley iskusstvennykh nejronnykh setej dlya diagnostiki silovogo transformatora / ZH. A. Murzin // Studencheskiy vestnik. – 2022. – № 19-18(211). – S. 41–42.
13. Platforma Loginom. Oficial'nyj sayt kompanii BaseGroupLabs. – Tekst : ehlektronnyj. – URL: <https://basegroup.ru/deductor/description/> (data obrashcheniya: 23.06.2023).
14. Poloshkov, V. A. Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta dlya resheniya zadach prognozirovaniya zapasov predpriyatiya v sfere ehlektroehnergetiki / V. A. Poloshkov // Studencheskiy vestnik. – 2021. – № 41-4(186). – S. 88–91. – EDN NLVCIU.
15. Rutkovskaya, D. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy: perevod s pol'skogO – Moskva : Goryachaya liniya-Telekom, 2013. – 384 s.
16. Semenova, N. G. Modeli i metody iskusstvennogo intellekta v zadachakh ehlektroehnergetiki / N. G. Semenova. – Orenburg : Orenburgskij gosudarstvennyy universitet, 2022. – 189 s. – ISBN 978-5-7410-2701-1. – EDN BEVLXB.

Information about authors

1. **Dimitriev Anton Anatolyevich**, postgraduate student of the Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems named after Fedorova A.A., I.N. Ulianov Chuvash State University, 428015, Cheboksary, Moskovsky Ave., 15, Chuvash Republic, Russia; e-mail: meterling21@mail.ru, tel. +7-987-678-79-49;
2. **Kalandarov Husejon Umarovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Energy Systems, Cheboksary Branch of Moscow Polytechnic University, 428000, Cheboksary, K. Marx str., 54, Chuvash Republic, Russia; e-mail: husejon.86@mail.ru, tel. +7-995-297-50-07;
3. **Mikheev Georgy Mikhailovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanization, Electrification and Automation of Agricultural Production, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, K. Marx str., 29, Chuvash Republic, Russia; e-mail: mikheevg@rambler.ru, tel. +7-903-345-85-40.