

DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-74-84

УДК 621.314
ББК 31.264-08

А.А. ДИМИТРИЕВ, Г.М. МИХЕЕВ, Х.У. КАЛАНДАРОВ

**ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА**

Ключевые слова: силовые трансформаторы, диагностирование, трансформаторное масло, эксплуатационный персонал, хроматографический анализ растворенных газов, алгоритм дерева решений.

Силовой маслонаполненный трансформатор является основным звеном в процессе преобразования и передачи электрической энергии в электрических сетях практически на всех классах напряжений. На данный момент в нашей стране эксплуатируется со значимым превышением срока эксплуатации более 50% из них, что повышает требования к их надлежащему техническому контролю и полноценной диагностике всех его основных узлов.

Цель исследования – рассмотрение способов упрощения и автоматизации процесса технического диагностирования силового маслонаполненного оборудования посредством применения методов искусственного интеллекта, а именно алгоритма дерева решений для оценки результатов хроматографического анализа трансформаторного масла.

Материалы и методы. В качестве исходных данных рассмотрены и проанализированы результаты хроматографического анализа растворенных газов в трансформаторном масле, проведенные в течение периода времени с 11 декабря 2009 г. по 12 декабря 2020 г. для двух силовых трансформаторов классом напряжения 110 кВ, установленных в энергосистеме одного из регионов страны. В качестве программного приложения, используемого для диагностирования технического состояния силового трансформатора с помощью методов искусственного интеллекта, нами выбрано бесплатное приложение *Deductor Academic 5.3 Build 0.46*.

Результаты исследования. В статье рассмотрено применение перспективного метода (алгоритма дерева решений) интерпретации данных, получаемых по результатам хроматографического анализа растворенных газов в трансформаторном масле. Данные анализа подвергались обработке посредством методов искусственного интеллекта, результатом работы которых являлись достоверность и точность определения технического состояния силового маслонаполненного трансформатора.

Выводы. По результатам исследования можно отметить, что для внедрения искусственного интеллекта при решении задачи диагностики силового трансформатора с помощью применения результатов хроматографического анализа предложен алгоритм дерева решений.

Введение. Хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ) является одним из эффективных методов диагностирования высоковольтного маслонаполненного электрооборудования [1, 2, 4, 5, 9–11]. Этот метод применяют для определения причин возникновения дефектов, степени их опасности. С его помощью возможно определение местоположения неисправности отдельных узлов внутри бака трансформатора, что позволяет повысить эффективность и достоверность оценки технического состояния дорогостоящего электрооборудования.

Использование этого метода также позволяет спрогнозировать риски, возникающие в процессе эксплуатации вышеназванных устройств. В дальнейшем на основе анализа полученных данных необходимо принять меры, препятствующие выходу их из строя.

Однако процесс диагностирования напрямую зависит от механизма интерпретации результатов ХАРГ. В частности, определяющим нормативным документом в части исследования вышеназванных устройств по этому методу является СТО 34.01-23-003-2019 «Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслонаполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле»¹.

Для грамотной оценки, например, состояния силового трансформатора, эксплуатационному персоналу необходимо руководствоваться данным документом, а также иметь не только представление о процессах, протекающих в нём, но и обладать соответствующим опытом и компетенциями.

С точки зрения упрощения процесса технического диагностирования удобно пользоваться экспертными приложениями, с помощью которых возможно интерпретировать полученные данные на основе имеющихся знаний и похожих случаев [3, 15]. Такое приложение позволит дать оценку состоянию электрооборудования напрямую, без участия человека. Стоит отметить, что современное развитие технологий позволяет с помощью методов искусственного интеллекта (ИИ) и обработки данных испытаний и измерений силового трансформатора создавать указанные приложения [7].

Цель исследования – рассмотрение способов упрощения и автоматизации процесса технического диагностирования силового маслонаполненного оборудования посредством применения методов искусственного интеллекта, а также использование алгоритма дерева решений для оценки результатов хроматографического анализа трансформаторного масла.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных данных рассмотрены и проанализированы результаты хроматографического анализа растворенных газов в трансформаторном масле, проведенные в течение периода времени с 11 декабря 2009 г. по 12 декабря 2020 г. для двух силовых трансформаторов классом напряжения 110 кВ, установленных в энергосистеме одного из регионов нашей страны.

В качестве программного приложения, используемого для моделирования процессов диагностирования технического состояния силового трансформатора с помощью методов ИИ нами выбрано бесплатное приложение *Deductor Academic 5.3 Build 0.46*. Это приложение обладает множеством инструментов для обработки исходных сведений, в том числе и рассматриваемым алгоритмом искусственного интеллекта. Данные были предварительно обработаны

¹ СТО 34.01-23-003-2019. Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслонаполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле. М.: ПАО «Россети», 2019. 63 с.

программными средствами, встроенными в приложение *Deductor Academic*, с целью повышения их качества и достоверности.

Результаты исследования. Рассмотрим некоторые примеры математических аппаратов ИИ, а именно алгоритм дерева решений для реализации этой задачи.

Дерево решений (или дерево принятия решений, или дерево классификации, или регрессионное дерево) – средство поддержки принятия решений, использующееся в методах искусственного интеллекта, анализе данных и статистике [8, 15].

Структура дерева представляет собой «листья» и «ветки». На рёбрах («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. Чтобы классифицировать новый случай, надо спуститься по дереву до листа и выдать соответствующее значение [12]. В отличие от нейронных сетей деревья как модели аналитического решения задачи формируются более простым образом, потому что правила генерируются на естественном языке: например, «Если целевой параметр имеет значение меньше «0,01», то он имеет нормальное значение».

Правила генерируются за счет обобщения множества отдельных наблюдений на основе обучающих примеров, описывающих рассматриваемую область технической задачи диагностирования состояния электрооборудования [6, 16]. Поэтому их называют индуктивными правилами, а сам процесс обучения – индукцией «деревьев решений». В обучающем множестве для примеров должно быть задано целевое значение, так как деревья решений – модели, создаваемые на основе обучения с учителем [14].

Широкомасштабное внедрение искусственного интеллекта в электротехнические комплексы и системы нашей страны позволит наиболее эффективно и надежно управлять существующими объектами электроэнергетики. Использование практически всех имеющихся методов искусственного интеллекта способно свести к минимуму зависимость процессов управления в электроэнергетических структурах от человека. Однако для полномасштабного включения искусственного интеллекта в электроэнергетику следует провести больше количество исследований, чтобы изучить, на что способен его алгоритмический аппарат.

В качестве программного приложения, используемого для моделирования диагностирования силового трансформатора с помощью ИИ, нами выбрано бесплатное приложение *Deductor Academic 5.3 Build 0.46* (входит в состав аналитической платформы *Deductor Academic*) [13]. Это приложение обладает интуитивно-понятным интерфейсом, множеством инструментов для обработки данных.

В качестве одного из инструментов используется алгоритм дерева принятия решений (ДПР). Входными данными для обучения ДПР является таблица результатов ХАРГ. В качестве итогового значения определяются три состояния силового трансформатора [10]:

– нормальное (содержание газов не превышает допустимых значений), в дальнейшем это состояние везде будет обозначаться зелёным цветом;

- требующего внимание (не превышает предельных допустимых значений), в дальнейшем это состояние везде будет обозначаться голубым цветом;
- аварийное (превышает предельно допустимые значения концентраций растворенных в трансформаторном масле газов), в дальнейшем это состояние везде будет обозначаться красным цветом.

Рассмотрим процесс диагностирования на примере результатов ХАРГ, полученного на одном реальном силовом трансформаторе. В табл. 1 приведены данные о концентрациях характерных газов, упорядоченных по датам. Значения растворенных газов здесь приведены в объёмных долях, % от общего объема.

Таблица 1

Часть таблицы с результатами хроматографического анализа трансформаторного масла рассматриваемого преобразователя напряжения (указано 16 строк из 46)

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	состояние
11.12.2009	0,003	0,0005	0,001	0,0005	0,0007	0,015	0,33	нормальное
23.07.2010	0,002	0,0003	0,0005	0,0001	0,0008	0,011	0,13	нормальное
12.11.2010	0,003	0,0005	0,0008	0,0001	0,0005	0,015	0,19	нормальное
19.05.2011	0,004	0,0007	0,0012	0,0002	0,0004	0,013	0,2	нормальное
22.11.2011	0,004	0,0008	0,0012	0,0002	0,0003	0,02	0,27	нормальное
17.05.2012	0,005	0,0007	0,0011	0,0002	0,0003	0,014	0,28	нормальное
27.11.2012	0,011	0,0194	0,0429	0,0038	0,0029	0,014	0,28	аварийное
28.11.2012	0,011	0,0196	0,0439	0,0039	0,0027	0,014	0,29	аварийное
27.03.2013	0,005	0,0132	0,038	0,0035	0,0022	0,011	0,25	аварийное
22.05.2013	0,005	0,0104	0,0344	0,0034	0,0022	0,012	0,27	аварийное
31.10.2013	0,004	0,0048	0,0261	0,0026	0,0011	0,013	0,23	требует внимания
30.01.2014	0,004	0,0038	0,0239	0,0026	0,001	0,012	0,27	требует внимания
27.02.2014	0,004	0,0036	0,0235	0,0025	0,0011	0,011	0,28	требует внимания
17.04.2014	0,005	0,0031	0,0219	0,0024	0,0009	0,011	0,25	нормальное
25.04.2014	0,001	0,0002	0,0018	0,0002	0,0001	0,001	0,02	нормальное
25.04.2014	0,015	0,002	0,0032	0,0003	0,0023	0,001	0,03	аварийное

Статистика загруженных данных, по гистограмме которой следует, что необходимо произвести проверку качества данных, представлена на рис. 1.

Здесь в ходе проверки вычисляются основные статистические данные характерных газов, являющиеся входным набором для обучения и работы алгоритма ДПР: минимальные и максимальные, средние значения, сумма и квадрат суммы, стандартное отклонение по каждому из столбцов, указанной из табл. 1.

Для параметра «состояние» указано три возможных варианта, которые являются выходными (диагностическими) значениями. В то время как параметр «Состояние_OUT», являющийся расчетным, принимает только два значения вследствие внутренней математической обработки.

На рис. 2 представлены результаты проверки, которые указывают на то, что необходимо произвести ограничение выбросов и полученных экстремальных данных для столбцов со значениями растворенных газов, таких как водород (H₂), метан (CH₄), этан (C₂H₄).

Характерные газы имеют непрерывный вид и вещественный тип данных, а состояние является строковой переменной, имеющей дискретный тип.

Метка столбца	Гистогра...	Статистика: Кол-во значений = 46							
		Мини...	Макс...	Сред...	Стан...	Сумма	Σ ² Сумм...	s Кол-в...	∅ Кол-в...
1 Дата		11.12.2009	22.10.2020	16 18:46:57	дн. 11:45:13				0
2 9.0 H2		0	0,015	4602173913	3010462433	0,2117	0,00138211		0
3 9.0 CH4		0	0,0196	2267391304	4448972633	0,1043	0,00112719		0
4 9.0 C2H4		0,0001	0,0439	3932608696	1212179038	0,3189	0,00882301		0
5 9.0 C2H6		0	0,0039	7739130435	1122781226	0,0356	8,428E-5		0
6 9.0 C2H2		0	0,0029	1006521739	7942577734	0,0463	7,499E-5		0
7 9.0 CO		0,001	0,021	1018043478	4940518172	0,4683	0,00586589		0
8 9.0 CO2		0,02	0,33	1856630435	3320656854	8,5405	1,89720521		0
9 ab состояние		5	6	5,391	0,493	248	1348	3	0
10 ab состояние_OUT		6	6	6	0	276	1656	2	0

Рис. 1. Статистическая предварительная обработка входных данных дерева решений

№	Столбец	Тип данных	Вид данных	Пропуски		Выбросы		Экстремальные		Кол-во уникальных	Качество данных	Резюме
				Колво	Действие	Колво	Действие	Колво	Действие			
✓ 1	Дата	Дата/В...	Непер...								0,9502	Пригоден
2	H2	9.0 Вещест...	Непер...			1	Ограничив...				0,7541	Предобра...
3	CH4	9.0 Вещест...	Непер...			2	Ограничив...				0,3459	Предобра...
4	C2H4	9.0 Вещест...	Непер...			1	Ограничив...				0,3496	Предобра...
5	C2H6	9.0 Вещест...	Непер...								0,8103	Пригоден
6	C2H2	9.0 Вещест...	Непер...								0,8904	Пригоден
7	CO	9.0 Вещест...	Непер...								0,9218	Пригоден
8	CO2	9.0 Вещест...	Непер...								0,9127	Пригоден
9	состояние	ab Строко...	Дискре...							3	0,8360	Пригоден

Рис. 2. Результаты проверки качества загруженных входных данных дерева решений

Качество данных – обобщенное понятие, характеризующее степень пригодности информации для анализа. Существует ряд критериев, которые используются для оценки правильности, полноты, точности и надежности, используемых для решения задач ИИ данных [14].

В столбце «Качество данных» у некоторых газов выставлено значение, меньшее «0,8», т.е. они непригодны для дальнейшей работы в качестве входных данных для ИИ. Указанные значения выходят из статистического диапазона величин, приведённых на рис. 1, для таких газов, как водород (H₂), метан (CH₄) и этан (C₂H₄). В связи с этим приложение выставило соответствующее

оповещение о «предварительной обработке» указанных выбросов значений вышеупомянутых газов.

Приведение исходных «сырых» данных в соответствие с требуемыми критериями качества является важнейшей задачей работы алгоритмов ИИ и образует направление, называемое предварительной обработкой данных.

В предварительной обработке данных для их дальнейшего использования в алгоритмах ИИ применяются такие манипуляции, как заполнение пропусков, выборочная обработка, редактирование выбросов и экстремальных значений методами аппроксимации и интерполяции [14].

В нашем случае внутренними средствами программного приложения «*Deductor Academic*» была произведена предварительная обработка данных методом интерполяции. Дальнейшие попытки по улучшению качества данных значительных успехов не давали, по этой причине было принято решение строить дерево решений на основе последних обработанных данных.

Из всего массива входных данных алгоритм выявил наиболее характерный газ – ацетилен (C_2H_2). Концентрация данного газа является наиболее характерной в роли диагностического фактора при разборе результатов ХАРГ [10, 12]. Результат выделения целевого атрибута приведен на рис. 3.









Целевой атрибут: состояние				
№	Номер	Атрибут	Значимость, %	/
1	6	C2H2		100,000
2	5	C2H6		0,000
3	8	CO2		0,000
4	7	CO		0,000
5	2	H2		0,000
6	1	Дата		0,000
7	4	C2H4		0,000
8	3	CH4		0,000

Рис. 3. Определение целевого атрибута, наиболее влияющего на выходное состояние

Алгоритмом самостоятельно выделено разграничение состояний силового трансформатора на основе количества растворенного ацетилена, определенного по результатам ХАРГ в трансформаторном масле, что приведено на рис. 4.










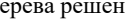
Условие	Следствие	Поддержка	Достоверность
ЕСЛИ			
C2H2 < 0,00105	нормальное		
C2H2 >= 0,00105	требуется внимания		
C2H2 < 0,00135			
C2H2 >= 0,00135	аварийное		

Рис. 4. Разграничение целевого атрибута, полученного при работе алгоритма дерева решений при анализе результатов ХАРГ первого трансформатора

Математическим аппаратом алгоритма дерева решений автоматически произошло разграничение целевого атрибута – концентрации растворенного

газа ацетилена (C_2H_2). Выделены с высокой поддержкой решения и достоверностью границы концентрации (в %), в которых будет определяться техническое состояние электрооборудования.

Воспользовавшись встроенным в приложение инструментом «Что – если», определим достоверность соотношения входных (концентраций растворенных газов) и выходных (состояние электрооборудования) данных, приведенных в табл. 1. Анализ соотношений входных и выходных данных приведен на рис. 5.

№	Номер правила	Условие			Следствие	Поддержка		Достоверность	
		Показатель	Знак	Значение		Кол-во	%	Кол-во	%
1		9.0 C2H2	<	0,00105	ab состояние нормальное	23	62,16	22	95,65
2	2	9.0 C2H2	>=	0,00105	требуется внимания	3	8,11	3	100,00
		9.0 C2H2	<	0,00135					
3	3	9.0 C2H2	>=	0,00105	аварийное	11	29,73	10	90,91
		9.0 C2H2	>=	0,00135					

Рис. 5. Инструмент «Что – если»

Алгоритм дерева решений с высокой точностью, поддержкой и достоверностью определил верность указанных в табл. 1 данных.

Распознавание результатов ХАРГ трансформаторного масла алгоритмом дерева решений получилось достаточно высоким, что можно наблюдать из таблицы сопряженности, показанной на рис. 6.

Фактически	Классифицировано			Итого
	аварийное	нормальное	требуется внимания	
аварийное	12			12
нормальное		28		28
требуется внимания	1	1	4	6
Итого	13	29	4	46

Рис. 6. Таблица сопряженности на примере выходных данных по состоянию первого силового трансформатора (ДТР)

Алгоритм дерева решений с высокой точностью определяет три значения технического состояния силового трансформатора, что более чем достаточно для детальной диагностики электрооборудования. При этом были дополнительно распознаны два состояния («Авария» и «Норма», выделенные в третьей строке), которые были заданы неверно в исходных данных, указанных в табл. 1.

Рассмотрим работу сформированного алгоритма дерева решений для интерпретации результатов ХАРГ другого силового трансформатора.

Сделаем допущение, что силовой трансформатор обладает всеми аналогичными характеристиками (мощность, тип защиты масла, марка залитой диэлектрической жидкости и иные характеристики) и установлен на той же подстанции. В табл. 2 приведены данные ХАРГ и результаты распознавания алгоритмом дерева решений. Точность распознавания и достоверность зависимости входных данных от выходной оценки достигают практически 100%.

Таблица 2

Результаты распознавания алгоритмом дерева решений хроматографического анализа газов второго трансформатора

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	Состояние
11.12.2009	0,0010	0,0008	0,0157	0,0011	0,0000	0,0450	0,4900	требуется внимания
22.07.2010	0,0010	0,0009	0,0169	0,0013	0,0000	0,0640	0,5700	аварийное
12.11.2010	0,0010	0,0008	0,0176	0,0014	0,0000	0,0550	0,5600	аварийное
19.05.2011	0,0010	0,0008	0,0168	0,0014	0,0000	0,0460	0,5300	аварийное
22.06.2011	0,0010	0,0008	0,0182	0,0015	0,0001	0,0580	0,6100	аварийное
22.11.2011	0,0010	0,0007	0,0170	0,0014	0,0001	0,0560	0,5700	требуется внимания
16.04.2012	0,0000	0,0006	0,0158	0,0013	0,0000	0,0380	0,5200	требуется внимания
17.05.2012	0,0010	0,0007	0,0157	0,0013	0,0000	0,0450	0,5500	аварийное
27.09.2012	0,0010	0,0007	0,0154	0,0013	0,0000	0,0680	0,6200	аварийное
28.11.2012	0,0010	0,0007	0,0156	0,0013	0,0000	0,0620	0,6200	аварийное
27.03.2013	0,0000	0,0006	0,0158	0,0013	0,0001	0,0510	0,5800	аварийное
22.05.2013	0,0000	0,0003	0,0090	0,0008	0,0000	0,0260	0,3800	нормальное
31.10.2013	0,0000	0,0005	0,0089	0,0006	0,0000	0,0350	0,3600	нормальное
27.02.2014	0,0010	0,0005	0,0107	0,0008	0,0000	0,0310	0,4100	нормальное
20.05.2014	0,0010	0,0005	0,0108	0,0008	0,0002	0,0410	0,5300	нормальное
26.08.2014	0,0010	0,0007	0,0122	0,0009	0,0001	0,0620	0,6400	требуется внимания
30.10.2014	0,0010	0,0007	0,0119	0,0008	0,0003	0,0620	0,6100	требуется внимания
17.12.2014	0,0010	0,0006	0,0118	0,0008	0,0003	0,0440	0,5700	аварийное
25.02.2015	0,0000	0,0006	0,0115	0,0006	0,0003	0,0340	0,5600	нормальное
26.05.2015	0,0010	0,0007	0,0141	0,0008	0,0006	0,0420	0,6300	аварийное

Выводы. В ходе диагностирования технического состояния двух находящихся в эксплуатации силовых трансформаторов на основе хроматографического анализа растворенных газов в масле с помощью алгоритма дерева решений при использовании программного средства *Deductor Academic 5.3 Build 0.71* были получены следующие результаты. Применение алгоритма дерева решений позволяет эффективно интерпретировать результаты ХАРГ, а также упростить и автоматизировать процесс технического диагностирования силового маслонаполненного электрооборудования.

Литература

1. Алексеев Б.А., Коган Ф.Л., Мамиконянц Л.М. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 256 с.
2. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. М.: НЦ ЭНАС, 2002. 216 с.
3. Баталыгин С.Н., Михеев Г.М., Шевцов В.М. Инженерные инновации в региональной электроэнергетике // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2011. № 5. С. 36–40.
4. Баталыгин С.Н., Михеев Г.М., Шевцов В.М. Комплексное обследование силовых трансформаторов // Кибернетика электрических систем: сб. материалов XXVI сессии Всероссийского семинара «Диагностика энергооборудования». Новочеркасск: Южно-Российский гос. техн. ун-т, 2004. С. 14–16.

5. Елтышев Д.К. Интеллектуальные технологии в организации процесса эксплуатации электротехнического оборудования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 43. С. 119–135. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.07.
6. Димитров В.П., Борисова Л.В., Хубиян К.Л. Моделирование знаний в задаче поиска причин неисправностей // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 3. С. 364–379. DOI: 10.15507/2658-4123.031.202103.364-379.
7. Кильчанов С.В., Коротченков М.В., Щербатов И.А. Применение деревьев решений при диагностике оборудования энергетики // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2019. № 4(9). С. 32–36.
8. Михеев Г.М. Трансформаторное масло. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. 156 с.
9. Михеев Г.М. Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования. Саратов: Профобразование, 2017. 297 с.
10. Панасов В.Л. Применение деревьев решений в экспертных системах диагностики // Материалы 58-й научной конференции профессорско-преподавательского состава РГУПС, Ростов-на-Дону, 20–22 апреля 1999 года / Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов н/Д., 1999. С. 28.
11. Платформа Loginom. Официальный сайт компании BaseGroup Labs [Электронный ресурс]. URL: <https://basegroup.ru/deductor/description/> (дата обращения: 23.06.2023).
12. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. М.: Горячая линия-Телеком, 2013. 384 с.
13. Селютин В.Е., Бодрилов П.А., Савиных В.А. Применение искусственного интеллекта в сфере энергетики // Моя профессиональная карьера. 2021. Т. 1, № 28. С. 100–103.
14. Хальясмаа А.И. Машинное обучение как инструмент повышения эффективности управления жизненным циклом высоковольтного электрооборудования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24, № 5(154). С. 1093–1104. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-1093-1104.
15. Lee C.T., Horng S.C. Abnormality Detection of Cast-Resin Transformers Using the Fuzzy Logic Clustering Decision Tree. *Energies.*, 2020, vol. 13(10), pp. 2546–2550. DOI: 10.3390/en13102546.
16. Loskutov A., Pelevin P., Vukolov V. Improving the Recognition Of Operating Modes In Intelligent Electrical Networks Based On Machine Learning Methods. *E3S Web of Conferences.*, 2020, vol. 216, pp. 1034–1041. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601034.

ДИМИТРИЕВ АНТОН АНАТОЛЬЕВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (Meterling21@mail.ru).

МИХЕЕВ ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (mikheevg@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2208-9723>).

КАЛАНДАРОВ ХУСЕЙДЖОН УМАРОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-энергетических систем, Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета, Россия, Чебоксары (huseinjon.86@mail.ru).

Anton A. DIMITRIEV, Georgi M. MIKHEEV, Huseyjon U. KALANDAROV
APPLICATION OF THE DECISION TREE ALGORITHM
TO EVALUATE THE RESULTS OF CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS OF
TRANSFORMER OIL

Key words: power transformers, diagnostics, transformer oil, operational personnel, chromatographic analysis of dissolved gases, decision tree algorithm.

Power oil-filled transformer is the main link in the process of conversion and transmission of electrical energy in electrical networks at almost all voltage classes. At the moment in our country more than 50% of them are operated with significant excess of service life,

which increases the requirements to their proper technical control and full-fledged diagnostics of all its main components.

The aim of the research is to consider the ways of simplification and automation of the process of technical diagnostics of power oil-filled equipment by means of application of artificial intelligence methods, namely the decision tree algorithm for evaluation of the results of chromatographic analysis of transformer oil.

Materials and Methods. As input data, the results of chromatographic analysis of dissolved gases in transformer oil conducted from December 11, 2009 to December 12, 2020 for two power transformers of voltage class 110 kV installed in the power system of one of the regions of our country were considered and analyzed. As a software application used for diagnosing the technical condition of a power transformer using artificial intelligence methods, we selected the free application Deductor Academic 5.3 Build 0.46.

Research results. The article considers the application of a promising method (decision tree algorithm) of interpretation of data obtained as a result of chromatographic analysis of dissolved gases in transformer oil. The analysis data were processed by means of artificial intelligence methods, the result of which was the reliability and accuracy of determining the technical condition of the power oil-filled transformer.

Conclusions. According to the results of the study, a decision tree algorithm is proposed for the implementation of artificial intelligence in solving the problem of power transformer diagnostics using chromatographic analysis results.

References

1. Alekseev B.A., Kogan F.L., Mamikonyants L.M. *Ob'em i normy ispytaniy elektrooborudovaniya* [Scope and norms of testing of electrical equipment]. Moscow, 2003, 256 p.
2. Alekseev B.A. *Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov* [Condition control (diagnostics) of large power transformers]. Moscow, 2002, 216 p.
3. Batalygin P.N., Mikheev G.M., Shevtsov V.M. *Inzhernyye innovatsii v regional'noi elektroenergetike* [Engineering innovations in the regional electric power industry]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2011, no. 5, pp. 36–40.
4. Batalygin P.N., Mikheev G.M., Shevtsov V.M. *Kompleksnoe obsledovanie silovykh transformatorov* [Comprehensive inspection of power transformers]. In: *Kibernetika elektricheskikh sistem: sb. materialov XXVI sessii Vserossiiskogo seminar'a «Diagnostika energooborudovaniya»* [Cybernetics of electrical systems: Proc. of the XXVI Session of the Russ. Seminar "Diagnostics of power equipment"]. Novocherkassk, 2004. pp. 14–16.
5. Eltyshhev D.K. *Intellektual'nye tekhnologii v organizatsii protsessa ekspluatatsii elektro-tekhnicheskogo oborudovaniya* [Intellectual technologies in the organization of the process of operation of electrical equipment]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniyax*, 2022, no. 43, pp. 119–135. DOI 10.15593/2224-9397/2022.3.07.
6. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Khubiyan K.L. *Modelirovanie znaniy v zadache poiska prichin neispravnosti* [Knowledge modeling in the task of searching for the causes of faults]. *Inzhernyye tekhnologii i sistemy*, 2021, vol. 31, no. 3. pp. 364–379. DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.364-379.
7. Kil'chanov S.V., Korotchenkov M.V., Shcherbatov I.A. *Primeneniye derev'ev reshenii pri diagnostike oborudovaniya energetiki* [Application of decision trees in diagnostics of the power engineering equipment]. *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya*, 2019, no. 4(9), pp. 32–36.
8. Kil'chanov P.V., Korotchenkov M.V., Shcherbatov I.A. *Primeneniye derev'ev reshenii pri diagnostike oborudovaniya energetiki* [Application of the decision trees in diagnostics of the power engineering equipment]. *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya*, 2019, no. 4(9), pp. 32–36.
9. Mikheev G.M. *Transformatornoe maslo* [Transformer oil]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2003, 156 p.
10. Mikheev G.M. *Elektrostantsii i elektricheskie seti. Diagnostika i kontrol' elektrooborudovaniya* [Power stations and electrical networks. Diagnostics and control of electrical equipment]. Saratov, Profobrazovanie Publ., 2017, 297 p.
11. Platforma Loginom. Ofitsial'nyi sait kompanii BaseGroup Labs [Loginom platform. Official site of BaseGroup Labs]. Available at: URL: <https://basegroup.ru/deductor/description/> (Accessed Date 2023, July 23).

12. Rutkowska D. Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems. 2013. 384 с. (Russ. ed.: *Neironnyye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy*. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2013, 384 p.).

13. Selyutin V.E., Bodrilov P.A., Savinykh V.A. *Primenenie iskusstvennogo intellekta v sfere energetiki* [Application of artificial intelligence in the field of power engineering]. *Moya professional'naya kar'era*, 2021, vol. 1, no. 28, pp. 100–103.

14. Khal'yasmaa A.I. *Mashinnoe obuchenie kak instrument povysheniya effektivnosti upravleniya zhiznennym tsiklom vysokovol'nogo elektrooborudovaniya* [Machine learning as a tool to improve the efficiency of life cycle management of high-voltage electrical equipment]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, vol. 24, no. 5(154), pp. 1093–1104. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-1093-1104.

15. Lee C.T., Horng S.C. Abnormality Detection of Cast-Resin Transformers Using the Fuzzy Logic Clustering Decision Tree. *Energies.*, 2020, vol. 13(10), pp. 2546–2550. DOI: 10.3390/en13102546.

16. Loskutov A., Pelevin P., Vukolov V. Improving the Recognition Of Operating Modes In Intelligent Electrical Networks Based On Machine Learning Methods. *E3S Web of Conferences.*, 2020, vol. 216, pp. 1034–1041. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601034.

ANTON A. DIMITRIEV – Post-Graduate Student, Department of Power Supply and Intellectual Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (Meterling21@mail.ru).

GEORGI M. MIKHEEV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Power Supply and Intellectual Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (mikheevg@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2208-9723>).

HUSEYJON U. KALANDAROV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Transport and Energy Systems, Cheboksary Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, Cheboksary, Russia (huseinjon.86@mail.ru).

Формат цитирования: *Димитриев А.А., Михеев Г.М., Каландаров Х.У.* Применение алгоритма дерева решений для оценки результатов хроматографического анализа трансформаторного масла // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 4. – С. 74–84. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-74-84.