

Analysis of the Content of Gases in Oil-Filled Equipment with Electrical Defects

Shutenko O.V.

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

Abstract. Operational reliability assurance of oil-filled equipment is an urgent real-world problem, which is especially essential for the facilities that have exceeded their lifetime. The objective of the research presented is improvement in the accuracy of oil-dissolved gas analysis data interpretation when distinguishing an oil-filled equipment fault. The desired result is achieved by means of both correction of criteria values used to identify the type of fault and increase in the number of faults recognized. The research technique chosen is analysis of dissolved gas percentage, their ratio values and graphic regions for facilities under various electric faults and comparison of the obtained data with the current standard requirements. Gas concentrations have been analyzed for 906 facilities with such faults as x-wax formation, partial discharge, spark discharge, creeping discharge, low- and high-energy discharge. It has been established that with the development of defects in oil-filled equipment, the content of gases for the same defect, can differ significantly 40 types of electric fault differing in gas concentration levels, gas ratios and their graphs have been identified, which allows significantly increasing the number of distinguishable faults as compared with the current standards. Ranges of gas ratios and their percentage introduced in the paper as well as plotted graphic regions with fault type indication make it possible to recognize reliably the faults that are difficult to interpret with the current standard criteria. The presented results allow significantly increase the operational reliability of oil-filled equipment, and to reduce the costs of its maintenance and repair.

Keywords: oil-filled equipment, dissolved gas analysis, faults diagnostics, defect type, gas ratios, percentage of gases, graphic areas.

DOI:10.5281/zenodo.2222331

Analiza conținutului de gaze din echipamentele umplute cu ulei cu defecte de tip electric

Șutenko O.V.

Universitatea Tehnică Națională "Institutul Politehnic Kharkiv"

Kharkov, Ucraina

Rezumat. Asigurarea fiabilității operaționale a echipamentelor de înaltă tensiune cu ulei prezintă o problemă actuală. Scopul lucrării constă în majorarea preciziei interpretării rezultatelor analizei gazelor dizolvate în ulei la identificarea tipului de defect. Aceasta se atinge prin precizarea valorilor criteriilor utilizate pentru identificarea tipului de defect și a majorării numărului de defecte identificate. În calitate de metode de cercetare s-au selectat: analiza procentajului de gaze, raportul valorilor gazelor și a zonelor grafice ale echipamentelor cu diferite tipuri de defecte electrice cu compararea rezultatelor obținute și a valorile reglementate în standard. S-a analizat conținutul de gaze pentru 906 de echipamente cu defecte de tipul: ceară de tip X, descărcări parțiale de intensitate joasă și înaltă, descărcări electrice cu densitate energetic joasă și înaltă. La dezvoltarea defectelor, conținutul de gaze din echipamentul cu ulei și valorile criteriilor utilizate pentru a identifica tipul de defect, pot să difere semnificativ de la un defect la alt defect de același tip. Au fost identificate 40 de tipuri de defecte de tip electric cu valori diferite ale criteriilor de comparare. Aceasta permite extinderea semnificativă a numărului de defecte identificate, în comparație cu standardele și metodele existente. Intervalele valorilor raporturilor de gaze și ale intervalelor de procente date în lucrare și zonele grafice construite, cu indicarea tipului de defect, fac posibilă identificarea certă a defectelor, a căror identificare prin utilizarea criteriilor reglementate în standardele actuale este dificilă. Rezultatele prezentate pot îmbunătăți semnificativ fiabilitatea operațională a echipamentelor umplute cu ulei și pot reduce costurile de întreținere și de reparații.

Cuvinte-cheie: echipament umplut cu ulei, diagnosticare, analiza gazelor dizolvate în ulei, tipul de defect, raportul gazelor, procentul de gaze.

Анализ содержания газов в маслонаполненном оборудовании с дефектами электрического типа

Шутенко О.В.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Харьков, Украина

Аннотація. Обеспечение эксплуатационной надежности высоковольтного маслонаполненного оборудования, особенно того, что эксплуатируется за пределами нормативного срока службы, является

актуальной и практически значимой задачей. Целью представленной работы является повышение достоверности интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов при распознавании типа дефектов маслonaполненного оборудования. Поставленная цель достигается за счет уточнения значений критериев, используемых для распознавания типа дефекта и за счет увеличения количества распознаваемых дефектов. Методом исследования был выбран анализ процентного содержания газов, значений отношений газов и графических областей, для оборудования с разными типами электрических дефектов, с последующим сравнением полученных результатов со значениями, регламентируемыми в действующих стандартах. Проанализировано газосодержание для 906 единиц оборудования с такими дефектами как: образование X-воска, частичные разряды низкой и высокой энергии, искровые и ползучие разряды, а также разряды с низкой и высокой плотностью энергии. По результатам анализа установлено, что при развитии дефектов, содержание газов в маслonaполненном оборудовании, а, следовательно, и значения критериев, используемых для распознавания типа дефекта, для дефекта одного и того же типа, может существенно отличаться. Выделено 40 разновидностей дефектов электрического типа, которые отличаются как содержанием газов, так и значениями отношений газов, а также их графическими отображениями. Это позволяет существенно расширить количество распознаваемых дефектов, по сравнению с действующими стандартами и методиками. Приведенные в работе диапазоны значений отношений газов и диапазоны их процентных содержаний, а также построенные графические области с указанием типа дефекта, позволяют достоверно распознавать дефекты, идентификация которых с помощью критериев, регламентируемых в действующих стандартах вызывает затруднение. Представленные результаты позволяют значительно повысить эксплуатационную надежность маслonaполненного оборудования, и снизить затраты на его обслуживание и ремонт.

Ключевые слова: маслonaполненное оборудование, диагностика, анализ растворенных в масле газов, тип дефекта, отношения газов, процентное содержание газов.

Введение

Обеспечение бесперебойного и надежного снабжения потребителей электрической энергией, в условиях существенного старения парка маслonaполненного оборудования (МНО), является актуальной и практически значимой задачей. Одним из путей ее решения, является как разработка и внедрение новых, так и усовершенствование уже существующих методов диагностики состояния МНО. В настоящее время одним из методов неразрушающей диагностики состояния МНО является анализ растворенных в масле газов (АРГ). Метод основан на том, что любой электрический или термический процесс, который развивается в МНО, приводит к разрушению изоляции и образованию соответствующих газов. При этом каждому типу дефекта соответствует свой, строго определенный спектр газов, что позволяет не только выявлять дефекты, но и распознавать их тип (электрические, термические или комбинированные) При проведении АРГ анализируются значения концентраций следующих газов: водорода (H_2), метана (CH_4), этана (C_2H_6), этилена (C_2H_4), ацетилена (C_2H_2), оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO_2), кислорода (O_2) и азота (N_2). Для определения типа дефекта в основном используются значения концентраций газов углеводородного ряда и водорода. К

дефектам электрического типа относятся частичные разряды (ч.р.) с низкой и высокой плотностью энергии, искровые разряды, разряды по поверхности или ползучие разряды, а также разряды с низкой и высокой (дуговые разряды) плотностью энергии. При воздействии электрических разрядов, деструкция изоляции происходит вследствие ударной ионизации электронами молекул углеводородов. При этом газами с максимальным содержанием являются в основном водород и ацетилен. Как правило, электрические разряды с высокой плотностью энергии развиваются за достаточно короткий промежуток времени и их несвоевременное распознавание может привести к серьезным авариям.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Действующими международными, и национальными стандартами по интерпретации результатов АРГ [1-6], для распознавания типа дефекта рекомендуется использовать, как аналитические, так и графические методы. Аналитические методы основаны на анализе значений отношений газов, при этом регламентируемые в разных стандартах и количество отношений газов, и их значения для дефектов разного типа существенно отличается. В большинстве действующих стандартов для определения типа дефекта рекомендуются следующие отношения: CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_4/C_2H_6 ,

C_2H_2/CH_4 , C_2H_2/C_2H_6 и C_2H_6/CH_4 . При использовании графических методов в качестве координат, по значениям которых определяется тип дефекта, чаще всего применяются либо, те же отношения газов (прямоугольник Дорненбурга, квадрат ETRA), либо процентное содержание газов (треугольники и пятиугольник Дюваля, треугольник GATRON, метод ключевого газа). Значения концентраций газов в качестве координат для распознавания типа дефекта используются в логарифмическом методе номограмм и лепестковых диаграммах И.В. Давиденко [7]. В методе графических образов [5, 6] в качестве координат используются значения отношений концентраций газов к концентрации газа с максимальным содержанием. Сравнительный анализ достоверности наиболее известных методов распознавания приведен в [8]. Из результатов следует, что наибольшей достоверностью являются методы: ансамбля газов, номограмм и Дюваля, а наименьшая достоверность, получена при использовании методик Дорненбурга и Роджерса. В работе показано, что при использовании разных методов достоверность распознавания существенно отличается для дефектов разного типа. В дополнении к методам, регламентируемым известными стандартами, в литературных источниках приведено большое количество публикаций, в которых описаны авторские методы распознавания типа дефекта. В работе [9] выполнен детальный анализ дефектов, обнаруживаемых в трансформаторах по результатам АРГ. Однако, для распознавания типа дефекта использовался треугольник Дюваля, а значения отношений газов не анализировались. Значительный объем публикаций [10-16] посвящен использованию нейронных сетей для распознавания типа дефектов. Следует отметить, что в большинстве работ [10-13], в качестве входных данных для распознавания типа дефекта использовались значения отношений газов, регламентируемые в [1]. В [14] входными данными для нейронной сети являлись как отношения из [1], так и отношения газов, регламентируемые в [4], а в [15] только отношения, регламентируемые в [4]. В [16] в качестве входных данных использованы процентные содержания газов углеводородного ряда и водорода. Еще одним направлением усовершенствования

процедуры распознавания типа дефекта, прогнозируемого по результатам АРГ, является использование аппарата нечеткой логики [17-20]. Однако, в этих работах для распознавания типа дефекта используются исключительно значения отношений газов, регламентируемые стандартами [1-4]. В [21] распознавание типа дефектов, предлагается выполнять, используя правила ассоциации, но при этом для распознавания используются отношения из [1]. В [22] для распознавания типа дефекта разработана интеллектуальная экспертная система, но в ней также используются значения отношений газов регламентируемые в [3] и в [4]. А в работе [23] предложен гибридный метод распознавания с использованием метода ключевого газа, и отношений газов из стандартов [1, 2, 4]. В работах [24-27] для диагностики состояния МНО использован метод векторной релевантности. При этом в [24-26] тип дефекта определялся на основе анализа концентраций газов углеводородного ряда и водорода, а в [27] для распознавания дефекта использовались координаты графических образов. В работах [28, 29] для распознавания типа дефекта использованы графические образы. В работе [30] выполнен анализ процентного содержания газов и отношений газов для 38 типов дефектов. Однако, графические образы дефектов в данной работе не анализировались. Выполненный анализ показал, что, несмотря на большое количество публикаций, повышение достоверности распознавания типа дефекта МНО по результатам АРГ, является актуальной и практически значимой задачей, что и послужило причиной для подготовки данной статьи.

II. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходных данных были использованы результаты АРГ по 906 единицам МНО с дефектами электрического типа, которые получены автором в результате сотрудничества с энергетическими компаниями Украины (23%) и подтверждены документально, так и приведены в открытых литературных источниках (77%). По типу МНО результаты АРГ распределились следующим образом: 56 – высоковольтные вводы, 20 – трансформаторы тока, 18 – трансформаторы напряжения, 4 – реакторы, 804 – силовые трансформаторы. Из 56 высоковольтных вводов в 33 выявлено

отложение X-воска, в 14 – частичные разряды, в 3 – искровые разряды, в 2 – разряды с низкой плотностью энергии и в 4 – разряды с высокой плотностью энергии. Из 20 трансформаторов тока в 9 выявлено отложение X-воска, в 6 – частичные разряды, в 1 – искровые разряды, в 1 – разряды с низкой плотностью энергии и в 3 – разряды с высокой плотностью энергии. В трансформаторах напряжения выявлены в основном частичные разряды (12) и искровые разряды (6), а в шунтирующих реакторах разряды низкой (2) и разряды высокой энергии (2).

Результаты АРГ были разбиты на отдельные массивы по типу установленного дефекта. Для каждой единицы МНО были рассчитаны значения отношений газов. Для снижения погрешности, расчет выполнялся только при условии, если значения концентраций газов, составляющих данное отношение, превышали значения, соответствующие «пределу появления газов в масле». Эти значения зависят как от чувствительности хроматографа, так и от методики измерения и согласно [5] составляют: $H_2=50$, $CH_4=C_2H_6=C_2H_4=15$ и $C_2H_2=3$ мкл/л. Если рассчитанные значения отношений выходили за пределы диапазона значений, регламентируемого действующими стандартами для данного дефекта, то результаты АРГ для данной единицы МНО переносились в другой массив. После этого для каждой единицы МНО определялось процентное содержание газов, как отношение значений концентрации каждого из газов к сумме концентраций газов углеводородного ряда и водорода [30]. Рассчитанные значения сравнивались между собой и в случае различия в процентном содержании результаты АРГ переносились в другой массив. Далее для каждой единицы МНО строился графический образ дефекта. Построенные образы сравнивались между собой и в случае наличия визуальных отличий между образами, даже при близких значениях отношений газов и их процентных содержаний, результаты АРГ переносились в другой массив. В результате сформировано 40 массивов с идентичными значениями отношений газов, близким содержанием газов и схожими графическими образами. Значения процентного содержания газов для полученных массивов с указанием типа дефекта и объема выборочных значений

приведено в табл. 1, а значения отношений газов в табл. 2. В [29] показано, что даже для дефекта одного и того же типа, при внешней схожести графических образов, значения координат образов (отношений газов к газу с максимальной концентрацией) существенно отличаются. Для учета дрейфа значений координат графических образов, в [31] предложено использовать не эталонные образы, а эталонные области. В качестве значений границ эталонных областей использовались максимальные и минимальные значения координат, полученных для 40 полученных массивов. Графические области, построенные по результатам АРГ оборудования из 40 массивов, приведены на рис. 1-7 (пунктирной линией выделены верхняя и нижняя границы областей, а сплошной линией характерный графический образ). Для распознавания типа дефекта с использованием графических областей в [31] предложено использовать метод диагностики по расстоянию до множества (диагностика по прецеденту). В этом методе оценивается диагностическое расстояние от графического образа, построенного по результатам АРГ диагностируемого оборудования до всех графических образов, образующих область с данным диагнозом и «запоминается» минимальное расстояние. Диагностируемый объект относится к области, с минимальным значением диагностического расстояния. Такой подход позволяет не только безошибочно относить образ диагностируемого объекта к характерной области, даже в условиях пересечения границ областей, но и находить внутри области идентичный объект с наиболее близкими значениями координат, что позволяет оценить не только тип дефекта, но и возможную причину его появления. Окончательное решение о типе дефекта принимается с учетом значений отношений газов, значений процентного содержания газов, и на основе принадлежности графического образа к области дефекта.

III. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отложение X-воска. Образование воскообразных продуктов на поверхности или между слоями изоляционной бумаги имеет место в МНО с относительно низким объемом масла (высоковольтные вводы, трансформаторы тока, трансформаторы

напряжения), которые залиты маслом с высоким содержанием парафиновых фракций, например, масло марки ГК. Согласно [32] отложение X-воска приводит к ухудшению теплоотвода изоляции, что может привести к тепловому пробую. В [33], образование X-воска, напрямую связывают с развитием разрядов. На рис. 1 приведены графические области, построенные по результатам АРГ оборудования с отложениями X-Воска. Для удобства анализа все области пронумерованы сквозной нумерацией. Номер области соответствует номерам дефектов из табл. 1 и 2.

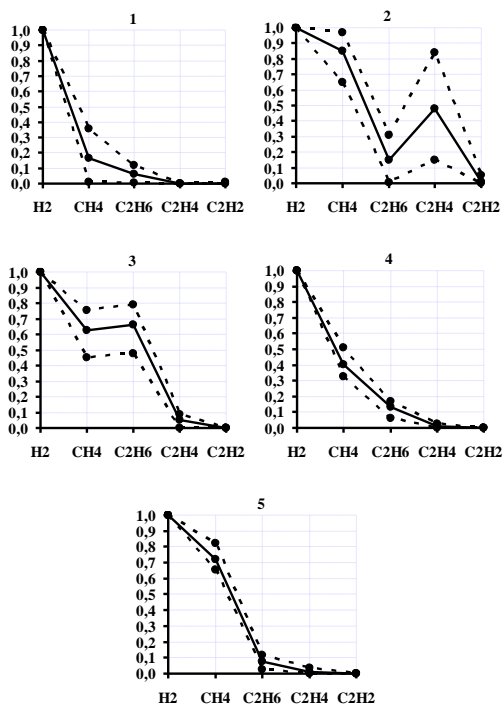


Рис. 1. Графические области для маслонаполненного оборудования, с отложениями X-воска¹.

Как видно из рис. 1, и табл. 1 содержание газов в пробах масла оборудования с отложениями X-воска существенно отличается. При этом, значения отношений газов, см. табл. 2, соответствуют дефектам разного типа. Для МНО, по результатам АРГ которого построена область №1, значения отношений газов соответствуют ч.р. В работе [7] отмечается, что для высоковольтных

вводов с отложением X-воска характерны следующие значения отношений газов $H_2/CH_4 > 5$ $C_2H_4/C_2H_6 < 0,7$. Выполненный анализ показал, что значения отношения $H_2/CH_4 > 5$ выявлено у 13 из 18 единиц МНО, по результатам АРГ которых построена область №1. При этом максимальные значения отношения H_2/CH_4 выявлены для оборудования с большим количеством X-воска. Из пяти единиц МНО, для которых значения отношения $H_2/CH_4 < 5$, три высоковольтных ввода напряжением 220 кВ, и два трансформатора тока ТФЗМ-110Б-У1. В данных вводах при вскрытии выявлено небольшое количество X-воска, что хорошо согласуется с данными, приведенными в [7]. Для МНО, по результатам АРГ которого построены области №2 и №3 значения отношений газов соответствуют перегреву с температурой ниже 150°C.

Значения отношений газов в МНО, по результатам АРГ которого, построены области №4 и №5 соответствуют перегревам, которые сопровождаются ч. р. При этом в данном МНО также выявлено отложение X-воска. Таким образом, при отложении X-воска, в зависимости от стадии процесса значения отношений газов, их процентное содержание, а также графические области могут соответствовать как частичным разрядам низкой энергии, так и перегревам в диапазоне низких температур, а также частичным разрядам, которые сопровождаются незначительными нагревами.

Частичные разряды. Это разряды в воздушных или газовых полостях, образовавшихся вследствие не полной пропитки или увлажнения изоляции. В зависимости от интенсивности ч.р. в некоторых стандартах различают ч.р. с низкой и высокой плотностью энергии. Считается, что ч.р. с низкой плотностью энергии не оставляют следов или не приводят к пробую твердой изоляции. В большинстве известных стандартов для распознавания ч.р. регламентированы следующие значения отношений газов: $CH_4/H_2 < 0,1$ и $C_2H_4/C_2H_6 < 0,2$ (согласно [6] $C_2H_4/C_2H_6 < 1$).

¹ Appendix 1

Процентное содержание газов в оборудовании с дефектами электрического типа.

№	Тип дефекта, объем выборки	Содержание газов, %				
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	Отложение X-воска. N=18.	70-97	1-25	0,5-9	0,002-0,1	0-1,1
2	Отложение X-воска, перегрев. N=12.	30-48	27-45	0,3-11	5-30	0-1,9
3	Отложение X-воска, перегрев. N=6.	35-50	22-29	23-31	0-5	0-0,1
4	Отложение X-воска, перегрев, ч.р. N=3.	50-72	16-31	4-16	0,01-10	0-2
5	Отложение X-воска, ч. р. N=3.	50-60	35-40	1-7	0,01-2	0-0,01
6	Ч.р. с низкой плотностью энергии. N=82.	85-95	1-9	0-3,5	0-1,8	0-1,5
7	Ч.р. с низкой плотностью энергии. N=4.	84-91	5-8	3-7	0,09-1,1	0-0,009
8	Ч.р. с низкой плотностью энергии. N=4.	85-90	5-7	3-5	2-3	0
9	Ч.р. с низкой плотностью энергии. N=17.	73-98	0,2-7	0,4-17	0-5,5	0-1,6
10	Ч.р. с низкой плотностью энергии. N=25.	80-98	0,1-9,5	0-4,2	0,03-12	0-0,65
11	Ч.р. с низкой плотностью энергии. N=4.	70-91	3-10	2-8	3-11	0-0,2
12	Ч.р. с низкой плотностью энергии. N=11.	0,1-7	80-96	0,9-16	0,1-3	0-0,25
13	Ч.р. с низкой плотностью энергии. N=5.	15-30	45-80	3-17	0-0,5	0-0,002
14	Ч.р. с низкой плотностью энергии. N=4.	25-45	3-15	49-62	0,01-0,6	0-0,5
15	Ч.р. с высокой плотностью энергии. N=5.	85-91	5-9	0,65-3	0,6-2	0,07-0,7
16	Ч.р. с высокой плотностью энергии. N=6.	80-96	1,1-6,1	1,5-10	1,1-4,5	0,1-1,6
17	Ч.р. с высокой плотностью энергии. N=76.	57-98	0,2-8	0-6	0,07-5	0,3-32
18	Ч.р. с высокой плотностью энергии. N=3.	15-35	1,5-8	1,1-8	0,8-3	55-75
19	Ч.р. N=4.	65-82	7-15	5-11	4-9	0-1,5
20	Ч.р. N=19.	74-90	9-21	0,4-4	0,001-2	0-0,9
21	Ч.р. N=23.	42-70	0,002-18	15-38	0,002-12	0-2
22	Ч.р. N=5.	30-41	3-22	20-40	5-20	2,5-10
23	Ч.р. N=4.	40-67	5-18	15-20	3-17	3-17
24	Искровые разряды. N=4.	46-69	0,5-6	2-10	25-40	0,1-1,5
25	Искровые разряды. N=3.	40-76	4-7,5	0-2	8-34	6-18
26	Искровые разряды. N=39.	35-78	6-26	0-13	3-40	0-3,2
27	Искровые разряды N=57	26-89	8-32	0,1-15	0,5-30	0,1-21
28	Разряды по поверхности (ползущие разряды). N=40.	29-74	5-42	0-5,5	5,5-35	2-25
29	Разряды низкой энергии. N=15.	40-86	8-31	0,1-23	0,01-8	0,7-32
30	Разряды низкой энергии N=5.	33-48	32-45	5-22	0,3-3	0,5-13
31	Разряды низкой энергии N=15	40-65	4-17	9-25	1,5-10	10-30
32	Разряды низкой энергии N=7.	55-83	2,5-6,5	1,0-10	1,5-11	10-30
33	Разряды низкой энергии N=29	34-74	5-25	1,5-15	1,8-15	5-36
34	Разряды низкой энергии N=12	5-37	1,2-16	10-32	2-22	25-60
35	Разряды низкой энергии. N=10	10-36	4-25	4-14	5-22	33-67
36	Разряды низкой энергии. N=72.	44-94	1-8	0-3	0,1-22	0,5-44
37	Разряды низкой энергии. N=3.	25-45	1-4	0,2-15	4-15	35-55
38	Разряды высокой энергии N=118.	30-78	3-29	0-14	0,5-28	10-45
39	Разряды высокой энергии. N=14.	0-2	0-1	0-5	1-45	50-98
40	Разряды высокой энергии. N=120.	4-44	0-23	0-11	1-36	28-88

Отношение C₂H₂/C₂H₄ не является характерным для ч.р. с низкой плотностью энергии. Согласно методу ключевого газа, в оборудовании с ч.р. содержится порядка 85% H₂, 13% CH₄, и около

1% C₂H₆ и C₂H₄, а C₂H₂, как правило, отсутствует. Наиболее характерными для ч.р. с низкой плотностью энергии, являются содержание газов и значения отношений газов, полученные для оборудования из

¹ см. Appendix 1

группы дефектов №6. Однако, как видно из табл. 2, значения отношения C_2H_4/C_2H_6 , полученные для оборудования с ч.р. превышает 0,2. Важно, что из 82 единиц МНО для дефекта №6, значения концентраций C_2H_4 и C_2H_6 , превышающие предел появления газов в масле выявлены только для 6 единиц оборудования. И во всех 6 случаях значения отношения C_2H_4/C_2H_6 превышало 0,2. Для остальных 76 единиц оборудования значения концентраций C_2H_4 и (или) C_2H_6 не превышали предел появления газов в масле, и значения отношений для этого МНО не рассчитывались.

Газосодержание МНО из группы №7, отличается более высоким содержанием C_2H_6 . При этом значения концентраций C_2H_4 не превышают предел появления газов в масле, в связи, с этим значения отношения C_2H_4/C_2H_6 не определялось. В работе [10] такой дефект идентифицирован как ч.р., а в работе [34], как разряды низкой энергии.

В МНО по результатам АРГ, которого сформирована группа дефектов №8, имеет место более высокое содержание C_2H_6 и C_2H_4 . При этом значения отношения C_2H_4/C_2H_6 превышают значение 0,2. Несмотря на это в некоторых источниках, например, [16], такие дефекты были идентифицированы, как ч.р.

Для оборудования из группы дефектов №9, характерно более высокое содержание C_2H_6 по сравнению с содержанием CH_4 и C_2H_4 . В [17, 22] применительно к оборудованию с подобным газосодержанием поставлены диагнозы: перегрев в диапазоне температур 150-200°C, ч.р., разряды низкой энергии. В работе [10], для оборудования с похожим содержанием был поставлен диагноз «ч.р. с низкой плотностью энергии». В [35] в трансформаторе напряжением 132/11 кВ, с аналогичным газосодержанием были выявлены ч.р. и перегрев, приводящий к разложению целлюлозы.

Еще более интересным является содержание газов в МНО, по результатам АРГ, которого сформирована группа дефектов №10. Как видно из рис. 2 и табл. 1, для этого оборудования содержание C_2H_4 выше, чем содержание C_2H_6 (значение отношения $C_2H_4/C_2H_6 > 1$, см. табл. 2). Как показано в [29] для оборудования с таким газосодержанием, разные исследователи поставили разные диагнозы: ч.р, коронный разряд в пузырьках воздуха и разложение масла под действием

ультразвуковой кавитации. В высоковольтном вводе ГМТА-45-110/630-Y1 выявлены ч.р. высокой интенсивности (кажущийся заряд составил 12 нКл), а содержание газов также соответствовало газосодержанию в группе дефектов №10. В [11, 13], оборудованию с близкими результатами АРГ, был поставлен диагноз ч.р., а в [34] такой дефект идентифицирован как ч.р. и увлажнение.

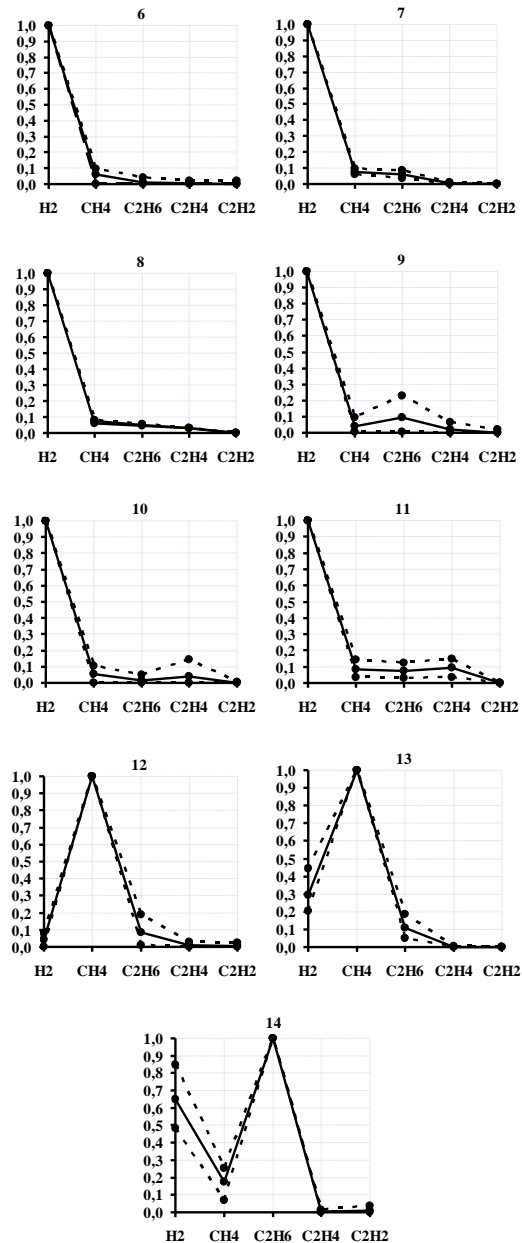


Рис. 2. Графические области для маслонаполненного оборудования с ч.р. с низкой плотностью энергии¹.

В МНО по результатам АРГ, которого сформирована группа дефектов №11, также

¹ Appendix 1

наблюдается незначительное превышение содержания C_2H_4 , по сравнению с CH_4 и C_2H_6 . При вскрытии трансформатора ОДГ-35000/150, с аналогичным содержанием газов

были выявлены ч.р. В работе [12] для оборудования с аналогичным содержанием газов дефект, также был идентифицирован как ч.р. с низкой плотностью энергии.

Таблица 2 ¹.

Значения отношений пар газов в оборудовании с дефектами электрического типа.

№	Значения отношений газов					
	CH_4/H_2	C_2H_6/CH_4	C_2H_4/C_2H_6	C_2H_2/CH_4	C_2H_2/C_2H_6	C_2H_2/C_2H_4
1	0,011-0,36	0,075-1,0	0,01-0,02	0,001-0,98	0,002-1,9	0,17-0,72
2	0,64-0,97	0,008-0,36	1,2-6,1	0,01-0,06	0,08-0,36	0,08-0,099
3	0,45-0,76	1,05-1,08	0,11-0,18	-	-	-
4	0,32-0,51	0,18-0,46	0,012-0,42	0,001-0,003	0,003-0,015	0,035-0,23
5	0,65-0,82	0,03-0,15	0,01-0,025	-	-	-
6	0,018-0,098	0,03-0,56	0,464-0,844	0,001-0,211	0,009-0,55	0,014-0,095
7	0,058-0,074	0,589-0,795	-	-	-	-
8	0,07-0,09	0,61-0,72	0,50-0,62	-	-	-
9	0,03-0,07	1,1-4,05	-	-	-	0,03-0,07
10	0,002-0,095	0,06-1,46	1,02-6,73	0,001-0,52	0,014-0,36	0,009-0,080
11	0,09-0,142	0,64-0,86	1,1-1,4	-	--	-
12	12-20	0,01-0,2	0,7-0,9	0,003-0,01	0,01-0,25	0,01-0,333
13	2,2-4,8	0,04-0,35	0,1-0,66	-	-	-
14	0,2-0,48	3,9-7,6	0,001-0,003	0,005-0,09	-	-
15	0,06-0,09	0,1-0,39	0,23-0,97	0,009-0,09	0,035-0,108	0,11-0,789
16	0,01-0,073	1,1-1,96	0,35-0,92	0,08-0,21	0,07-0,14	0,12-0,16
17	0,009-0,09	0,27-0,87	0,117-0,94	0,01-3,2	0,03-7	1,0-10,7
18	0,05-0,3	0,63-0,75	0,25-0,75	6,5-37,5	17,3-59,1	26-78
19	0,08-0,226	0,66-1,05	0,66-0,93	0,017-0,18	0,016-0,19	0,019-0,259
20	0,108-0,227	0,03-0,228	-	-	-	-
21	0,1-0,28	1,8-6,6	0,1-0,37	0,04-0,14	0,03-0,15	0,15-0,56
22	0,14-0,60	1,2-4,6	0,21-0,63	0,1-0,57	0,13-0,36	0,17-0,56
23	0,1-0,41	1,1-2,5	0,24-0,69	0,5-1,5	0,25-0,62	0,8-1,1
24	0,02-0,096	-	4-16	-	-	0,005-0,05
25	0,02-0,09	-	-	0,25-2,06	-	0,13-0,858
26	0,12-0,50	0,07-1,27	1,31-18,56	0,002-0,18	1,66-80,05	0,002-0,099
27	0,10-0,93	0,06-0,89	1,0-4,92	0,06-2,0	0,11-3,73	0,11-0,99
28	0,125-0,86	0,037-0,35	5,2-14,1	0,025-3,572	0,656-11,5	0,104-0,982
29	0,1-0,71	0,02-0,79	0,12-0,88	0,03-0,645	0,1-4,13	1,05-4,5
30	0,92-0,98	0,14-0,63	0,06-0,23	0,014-0,39	0,08-0,63	1,1-9,9
31	0,11-0,39	0,88-2,22	0,17-0,66	0,99-3,46	0,47-2,5	1,8-14,9
32	0,05-0,08	0,29-1,47	1,0-1,26	1,9-2,87	1,9-8,2	1,8-6,7
33	0,12-0,509	0,107-0,68	1,0-1,88	0,39-4,1	2,06-7,29	1,1-4,91
34	0,78-0,922	2,0-6,14	0,49-1,0	2,4-11,6	1,04-4,65	1,33-8,5
35	0,353-0,854	0,194-1,45	1,0-1,765	1,48-4,032	2,77-7,64	1,78-4,33
36	0,01-0,099	0,11-1,03	3,4-13,6	1,56-30,5	13,5-85,6	1,3-11,6
37	0,05-0,086	0,01-0,08	2,75-15,2	12,9-44	3-161	2,8-10,6
38	0,1-0,78	0,05-0,96	2,8-22,0	0,11-8,2	3,1-69,6	1,02-12,7
39	0,147-0,66	4,8-67,2	7,8-104,4	103-1020	15-167,2	1,2-92
40	0,11-0,991	0,063-1,4	2,06-30,9	1,26-31,6	3,46-249,3	1,02-18,5

В МНО, по результатам АРГ которого сформирована группа дефектов №12 и №13, были выявлены ч.р. с

низкой плотностью энергии, но газом с максимальным содержанием является CH_4 . Как видно из табл. 2 для данных дефектов

¹Appendix 1

значение отношения CH_4/H_2 больше единицы, что согласно [1-6] характерно не для ч.р., а для перегревов. В работе [9] дефекты с содержанием газов соответствующим газосодержанию для группы дефектов №12 идентифицированы как корона в масле, а в работах [14, 26] как ч.р.

В МНО по результатам АРГ, которого сформирована группа дефектов №13, имеет место более высокое содержание H_2 , и более низкое содержание CH_4 , по сравнению с оборудованием из группы дефектов №12. В работе [26], для МНО с аналогичными результатами АРГ, поставлен диагноз – частичные разряды. При вскрытии высоковольтного ввода ГМТБ-2200/1000 [29], в нем были обнаружены значительные отложения X-воска и следы ч.р. В автотрансформаторе АДЦТГУ-1200-220/110 выявлены неустойчивые ч.р. При этом и значения отношений газов, и их содержание соответствовало значениям отношений и газосодержанию для дефектов №13.

Согласно существующим представлениям о газосодержании дефектного оборудования [5], максимальное содержание C_2H_6 имеет место для термических дефектов с температурой 150-300°C, но не для дефектов электрического типа. Однако, как видно из табл. 1 и рис. 2, при развитии ч.р., газом с максимальным содержанием может являться C_2H_6 (см. дефект №14 из табл. 1 и 2). При этом как видно из табл. 1, для оборудования с подобными дефектами содержание H_2 выше чем CH_4 , а содержание C_2H_4 и C_2H_2 менее 1%. В [37], в оборудовании с аналогичным содержанием газов были выявлены ч.р. с низкой плотностью энергии. Аналогичное содержание газов получено для ввода масляного выключателя, напряжением 220 кВ и трансформатора тока ТФЗМ-110Б-У1, залитых маслом марки ГК, в которых выявлено отложение X-воска [29].

Таким образом, при развитии частичных разрядов, газами с максимальным содержанием является не только H_2 , но и газы, не характерные для дефектов электрического типа (CH_4 , C_2H_6), что приводит к изменению значений отношений газов и может вызвать некоторые сложности при распознавании таких дефектов.

Частичные разряды с высокой плотностью энергии. Это ч.р. которые приводят к оставлению следа или пробоем твердой изоляции. Для таких разрядов [6]

значения отношения C_2H_2/C_2H_4 составляют 0,1-3, а значения остальных отношений совпадают со значениями, для ч.р. с низкой плотностью энергии. Значения процентного содержания газов для ч.р. с высокой плотностью энергии приведены в табл. 1 (№15-18), а графические области на рис. 3. Несмотря на внешнюю схожесть графических областей для дефектов №6 и №15, из табл. 1 и табл. 2 видно, что для дефекта №15 имеет место более высокое содержание C_2H_2 , и как следствие более высокие значения отношения C_2H_2/C_2H_4 . Результаты АРГ оборудования с содержанием газов соответствующему дефекту №15, приводятся в работах [9, 21].

Внешнюю схожесть имеют также графические области № 9 на рис. 2 и №16 на рис. 3. Для этих двух групп дефектов характерно более высокое содержание C_2H_6 , по сравнению с содержанием CH_4 и C_2H_4 (значения отношений $C_2H_6/CH_4 > 1$ и $C_2H_4/C_2H_6 < 1$). Но, как и в предыдущем случае в оборудовании из группы №16 имеет место более высокое содержание C_2H_2 . В связи с этим в некоторых работах, например, [38] для дефектов с таким содержанием газов поставлен диагноз «дуговой разряд». А в работе [22], аналогичный дефект идентифицирован как ч.р. В оборудовании по результатам АРГ, которого построена графическая область №17 на рис. 3, имеет место превышение содержания C_2H_2 над содержанием C_2H_4 ($C_2H_2/C_2H_4 > 1$). Значения остальных отношений газов, в большей степени соответствуют частичным разрядам и, как правило, распознавание таких дефектов не представляет сложности.

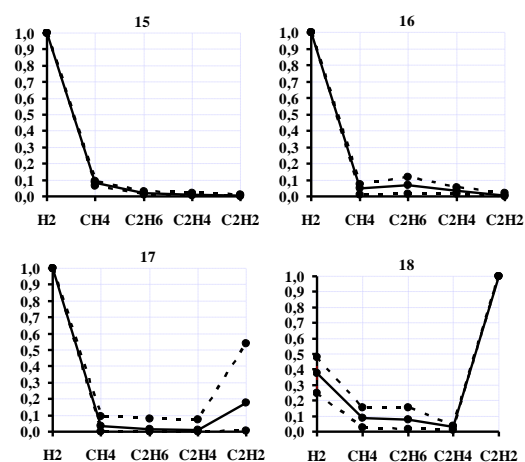


Рис. 3. Графические области для маслонаполненного оборудования, с ч.р. с высокой плотностью энергии ¹.

¹ Appendix 1

В оборудовании из группы дефектов №18, газом с максимальным содержанием является C_2H_2 ($C_2H_2/C_2H_4 \gg 1$), а как видно из табл. 2, значения остальных отношений близки к значениям, регламентируемым для частичных разрядов. Однако, согласно существующим представлениям о газосодержании оборудования с дефектами разного типа [5], максимальное содержание C_2H_2 имеет место только при разрядах высокой энергии. В [15], для оборудования с аналогичными значениями отношений газов был поставлен диагноз: «разряды с высокой плотностью энергии».

Характерной особенностью оборудования, по результатам АРГ, которого построены графические области на рис. 4, является более высокое содержание CH_4 по отношению к H_2 . При этом в данном оборудовании были обнаружены ч.р. с разной степенью интенсивности, но как видно из табл. 2 для дефектов № 19-23, значение отношения $CH_4/H_2 > 0,1$, т.е. не соответствует ч.р., что может создать объективные сложности при распознавании таких дефектов.

В оборудовании по результатам АРГ, которого сформирована группа дефектов №19, выявлено относительно высокое содержание CH_4 и C_2H_6 , а содержание C_2H_4 несколько ниже, чем для этих двух газов. В автотрансформаторе АТДЦТГУ-120000/220, со схожими результатами АРГ [29], были выявлены ч.р.

В оборудовании из группы дефектов №20 (на рис. 4), основными газами, являются H_2 и CH_4 , содержание C_2H_6 , C_2H_4 и C_2H_2 незначительно, а значения концентраций для этих газов ниже предела появления газов в масле. В результате, как видно из табл. 2, для идентификации данного дефекта, возможно использовать только два отношения (при этом значение отношения C_2H_6/CH_4 регламентировано только в [4]), что усложняет процесс распознавания и может привести к постановке неправильного диагноза. Например, в [18] дефект, с похожим содержанием газов был идентифицирован как разряды низкой энергии. В тоже время в работах [9, 18] для оборудования со схожим содержанием был поставлен диагноз: «корона», или «ч.р.».

Содержание газов для оборудования из групп №21-23 практически идентично: газом с максимальным содержанием является H_2 , сопутствующим газом является C_2H_6 .

Различия между ними заключаются в содержании C_2H_4 и C_2H_2 .

Дефекты в оборудовании из группы №21, как правило, идентифицируются как ч.р. [12, 18, 29] либо как разряды низкой энергии [40]. Кроме того, при схожем содержании газов в негерметичном вводе масляного выключателя 220 кВ, были выявлены значительные отложения X-воска [29].

Из-за более высокого содержания ацетилена в оборудовании из группы №22, в работах [21, 40] дефект был идентифицирован как разряды низкой энергии. Но как видно из табл. 2 для дефектов данной группы значения отношений C_2H_2/C_2H_4 и C_2H_4/C_2H_6 меньше единицы. По данным [34], в оборудовании с аналогичным содержанием газов был выявлен низкотемпературный перегрев, а в [40], для трансформатора 66/11 кВ, со схожим содержанием газов был поставлен диагноз – перегрев с температурой выше $700^\circ C$, при этом значения отношений газов в этом трансформаторе составили: $CH_4/H_2=0,21$, $C_2H_4/C_2H_6=0,6$, и $C_2H_2/C_2H_4=0,5$, что ни как не соответствует перегреву.

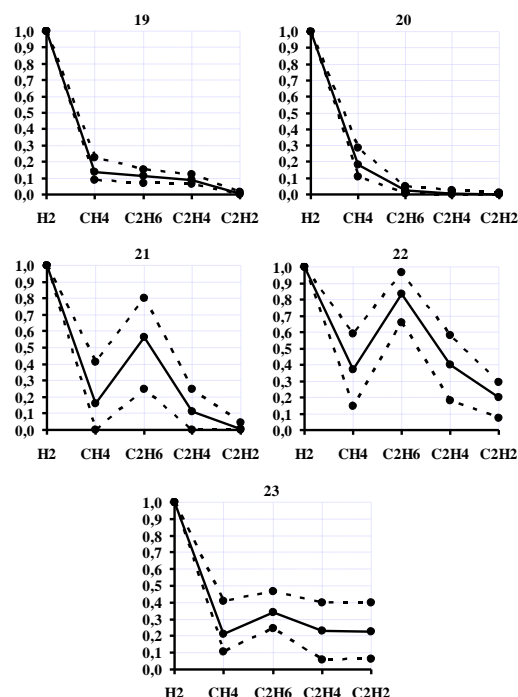


Рис. 4. Графические области для маслонаполненного оборудования с ч.р.¹.

В МНО, по результатам АРГ которого сформирована группа № 23, содержание C_2H_2 сравнимо или незначительно превышает содержание C_2H_4 . В [21] для оборудования с

¹ Appendix 1

подобным содержанием газов был поставлен диагноз «разряды высокой энергии», хотя, как видно из табл. 2, для данных дефектов значения отношения $C_2H_4/C_2H_6 < 1$.

Искровые и поверхностные (ползущие) разряды. К таким дефектам относятся разряды, обусловленные отложением загрязнений или продуктов деструкции масла на поверхностях изоляционных конструкций с последующим проращением по ним канала разряда (ползущие разряды) и искровые разряды между участками с разными потенциалами, которые обусловлены наличием острых кромок, нарушением контактных соединений или появлением «плавающего потенциала». Из всех известных стандартов поверхностные или ползущие разряды выделены в отдельный вид дефекта только в [4, 5, 6]. Согласно [6] для искровых разрядов регламентируются следующие значения отношений: $CH_4/H_2 = 0,1-1$, $C_2H_4/C_2H_6 = 1-3$ и $C_2H_2/C_2H_4 > 0,1$. Согласно новой редакции стандарта МЭК [1] дефекты с значениями отношений газов $0,6-C_2H_2/C_2H_4-2,5$, $0,1-C_2H_2/C_2H_4-1$ и $2 < C_2H_4/C_2H_6$ идентифицируются как разряды высокой энергии. Однако, как видно из табл. 2 (для дефектов № 24 и №26) значение отношения C_2H_2/C_2H_4 не только не превышает значение 0,6 (регламентируемое в [1]) но и значение 0,1 (регламентируемое в [6]), что может вызвать затруднение при постановке диагноза. В зарубежных источниках, в зависимости от используемой методики или стандарта, искровые разряды идентифицируются как разряды высокой энергии [18, 20, 21] или же как разряды низкой энергии [21, 23, 24]. Графические области, построенные по результатам АРГ оборудования с искровыми и ползучими разрядами, приведены на рис. 5.

Как видно из табл. 2 для дефекта №24 значения отношений $CH_4/H_2 < 0,1$ и $C_2H_2/C_2H_4 < 0,1$, что не совпадает со значениями отношений, регламентируемых большинством стандартов, однако, при этом в оборудовании были выявлены искровые разряды. Например, причиной искрения в трансформаторе ТДТНГ-110/35/6 [29] являлось ослабление гайки на выводе обмотки НН со шпилькой ввода. Значения отношений газов, составили: $CH_4/H_2 = 0,096$, $C_2H_6/CH_4 = 1,08$, $C_2H_4/C_2H_6 = 4,42$, $C_2H_2/CH_4 = 0,229$, $C_2H_2/C_2H_6 = 0,211$ и $C_2H_2/C_2H_4 = 0,0478$, и т.е. фактически только

значение отношения C_2H_4/C_2H_6 соответствует искровому разряду.

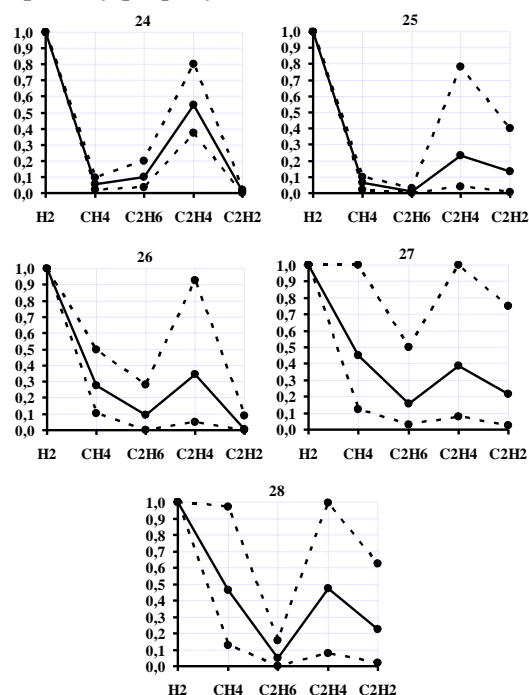


Рис. 5. Графические области для маслонаполненного оборудования с искровыми и ползучими разрядами¹.

В МНО по результатам АРГ, которого сформирована группа №25, имеет место более высокое содержание C_2H_2 , и как видно из табл. 2, значения отношения $C_2H_2/C_2H_4 > 0,1$, а значение отношения $CH_4/H_2 < 0,1$, и при этом в этом оборудовании также выявлены искровые разряды.

Также, как и для оборудования из группы №24, в оборудовании из группы №26 выявлено незначительное содержание C_2H_2 , из-за чего значение отношения $C_2H_2/C_2H_4 < 0,1$, а значения отношений $CH_4/H_2 > 0,1$ и $C_2H_4/C_2H_6 > 1$. Такие значения отношений газов, согласно некоторым стандартам, например, [6], соответствуют перегревам с температурой менее $150^\circ C$, что может стать причиной постановки ошибочного диагноза, как например в работе [21]. В тоже время в работе [23] для оборудования с аналогичным содержанием газов был поставлен диагноз «разряды низкой энергии», а в работе [16] «ч.р.».

Значения отношений газов для оборудования из группы дефектов №27, полностью соответствуют значениям характерным для искровых разрядов. Однако, в некоторых источниках, например, в [18, 20,

¹ Appendix 1

21] такие дефекты идентифицированы как разряды высокой энергии.

Как отмечается в [5] развитие ползущих разрядов характеризуются более высоким количеством выделяемой энергии, по сравнению с частичными и искровыми разрядами, что приводит к большим разрушениям изоляции. Как видно из табл. 1 (№28) для таких разрядов характерно более высокое содержание C_2H_4 и C_2H_2 . При этом как видно из табл. 2 значение отношения C_2H_4/C_2H_6 превышает 5. Значения остальных отношений практически совпадают с значениями характерными для искровых разрядов.

Разряды низкой энергии. К таким дефектам относятся интенсивные искровые и ползущие разряды, пробой масла между твердыми материалами и ряд других. Содержание газов в оборудовании с такими дефектами характеризуется повышенным содержанием C_2H_4 по отношению к C_2H_6 ($1 < C_2H_4/C_2H_6$) и C_2H_2 по отношению к C_2H_4 ($C_2H_2/C_2H_4 > 1$). Значения процентного содержания газов и отношений газов для оборудования с разрядами низкой энергии приведены в табл. 1 и 2 (№29-36), а соответствующие им графические области приведены на рис. 6. Как видно из табл. 1 и рис. 6 содержание газов в оборудовании с разрядами низкой энергии существенно различается. При этом как видно из табл. 2 если, значение отношения $C_2H_2/C_2H_4 > 1$, наблюдается для всех 8 групп, то значения других отношений существенно отличаются.

Для МНО по результатам АРГ, которого сформирована группа дефектов №29 значения отношений $CH_4/H_2=0,1-1$ и $C_2H_2/C_2H_4 > 1$, что соответствует разрядам низкой энергии, а значение отношения $C_2H_4/C_2H_6 < 1$, что соответствует ч.р. Несмотря на это, в некоторых работах, например, [21], такие дефекты идентифицированы как разряды высокой энергии. Следует отметить что, несмотря на относительно не высокое значение отношения C_2H_4/C_2H_6 , при вскрытии оборудования с подобными результатами АРГ, как правило, выявляются следы разрядов, повреждение изоляции, наличие поверхностных разрядов на барьерах и на обмотках. Во вводе масляного выключателя напряжением 220 кВ, с подобным содержанием газов были выявлены отложения X-воска.

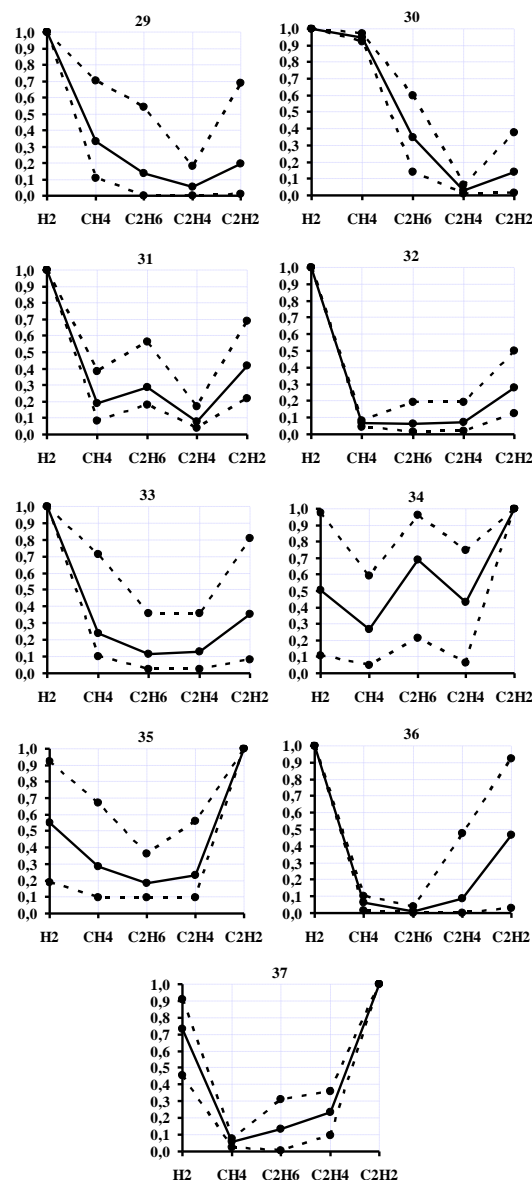


Рис. 6 Графические области для маслонаполненного оборудования с разрядами низкой энергии¹.

Особенностью содержания газов в МНО из группы №30, является относительно невысокое содержание H_2 и несколько меньшее содержание CH_4 ($CH_4/H_2 > 0,9$), при этом содержание C_2H_6 выше, чем C_2H_4 ($C_2H_4/C_2H_6 < 1$) и содержание C_2H_2 выше, чем C_2H_4 ($C_2H_2/C_2H_4 > 1$). Как показано в [30] такое же газосодержание имело место в пробах масла, взятых сразу же после повреждения трансформатора напряжением 125 кВ, по причине повреждения изоляции между катушками и повреждения витковой изоляции. В [21] для оборудования с аналогичными значениями отношений газов был поставлен диагноз «электрические разряды высокой энергии».

¹ Appendix 1

Содержание газов в МНО из группы №31 практически совпадает с газосодержанием для оборудования из групп №21-23, отличие заключается в том, что в оборудовании из группы №31 содержание C_2H_2 превышает содержание C_2H_4 ($C_2H_2/C_2H_4 > 1$). При этом содержание C_2H_6 намного больше чем содержание C_2H_4 ($C_2H_4/C_2H_6 < 1$), а в некоторых случаях выше чем содержание CH_4 ($C_2H_6/CH_4 > 1$). В работе [34] для оборудования с аналогичным содержанием газов был поставлен диагноз «разряды низкой энергии», а в [11] «разряды высокой энергии».

Особенностью газосодержания оборудования из группы №32, является низкое содержание CH_4 ($CH_4/H_2 < 0,1$), и при этом значения отношений $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ и $C_2H_4/C_2H_6 > 1$. В работе [40] дефект с аналогичными значениями отношений газов был идентифицирован как разряды высокой энергии, а в [19] как дуга в масле.

Значения отношений газов для оборудования из группы №33, полностью соответствует значениям регламентируемым большинством стандартов для разрядов низкой энергии, и распознавание таких дефектов не вызывает сложностей.

Газом с максимальным содержанием для оборудования из группы №34, является C_2H_2 , а вторым по содержанию газом является C_2H_6 . Следует отметить, что, несмотря на то, что для таких дефектов значение отношения $C_2H_4/C_2H_6 < 1$, в работах [9, 11, 38] такие дефекты идентифицированы как разряды высокой энергии.

Как видно из табл. 2 значения отношений газов для оборудования из группы №35 соответствует значениям регламентируемым большинством стандартов для разрядов низкой энергии, но при этом газом с максимальным содержанием является ацетилен. Как правило распознавание таких дефектов не вызывает сложности.

Как видно из табл. 1 для дефектов №36 и №37 газами с максимальным содержанием являются H_2 (№36) и C_2H_2 (№37), также высокое содержание имеет и C_2H_4 . Для таких дефектов (см. табл. 2), значения отношений $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ и $C_2H_4/C_2H_6 > 2$, что характерно для разрядов высокой энергии. Однако, из-за низкого содержания CH_4 , отношение $CH_4/H_2 < 0,1$, что характерно для ч.р. В [18], подобные дефекты идентифицируются как ч.р., а в [41] как дуга. В работе [11] такие

дефекты идентифицированы как «дуга низкой энергии».

Разряды высокой энергии. Такие разряды сопровождается выделением большого количества энергии за небольшой промежуток времени, при этом газами с максимальным содержанием являются H_2 и C_2H_2 . К ним относятся [6] дуговые разряды, искрение, пробой масла между обмотками или катушками, или между катушками на землю. Согласно [5] для разрядов высокой энергии характерно устойчивое содержание газов: 60-65% H_2 , 25-28% C_2H_2 , 5-6% C_2H_4 , 3-4% CH_4 и 0,5% C_2H_6 . Такое же газосодержание регламентировано и в методе ключевого газа: 60% H_2 , 30% C_2H_2 , 3% C_2H_4 , 5% CH_4 и 2% C_2H_6 . Однако, как видно из табл. 1, (№38-40) содержание газов в оборудовании с разрядами высокой энергии несколько отличается от указанных выше, но при этом значения отношений газов для этих дефектов соответствуют разрядам высокой энергии. Графические области, построенные по результатам АРГ оборудования с разрядами высокой энергии, приведены на рис. 7.

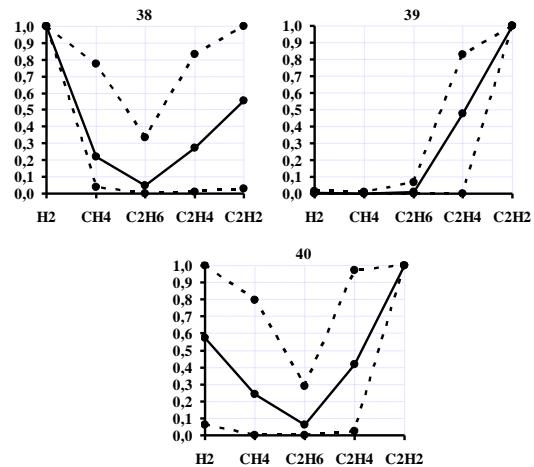


Рис. 7 Графические области для маслонеполненного оборудования с разрядами высокой энергии ¹.

В МНО по результатам АРГ, которого построена область №38, при развитии разрядов высокой энергии, газом с максимальным содержанием являлся H_2 , а в оборудовании по результатам АРГ, которого построены области №39 и 40- C_2H_2 . Особое внимание следует обратить на содержание газов для дефекта №39. Как видно из табл. 1, для данного дефекта имеет место повышенное содержание непредельных

¹ Appendix 1

углеводородов (C_2H_2 и C_2H_4), при крайне низком содержании предельных углеводородов (CH_4 и C_2H_6) и H_2 [30]. Несмотря на то, что значения отношений газов соответствуют разрядам высокой энергии, в работе [25] для оборудования с таким содержанием газов был поставлен диагноз ч.р. В работе [13] аналогичные дефекты были идентифицированы как разряды высокой интенсивности.

Анализируя приведенные результаты легко увидеть, что графические области, построенные по результатам АРГ со схожими значениями отношений газов и близким процентным содержанием газов, могут отличаться (например, дефекты №6, 7 и 8). В тоже время значения отношений газов для дефектов, имеющих схожие графические области также существенно рознятся (например, дефекты №24-28). Кроме того, в МНО со схожими значениями отношений газов, процентное содержание газов, также может отличаться (например, дефекты №31 и 34). Очевидно, что в таких условиях использование только одного из трех критериев не всегда позволяет достоверно распознать тип дефекта. Сформированные массивы результатов АРГ с близкими значениями отношений газов и их процентным содержанием, а также построенные графические области позволяют нивелировать выявленные различия и распознавать тип дефекта с одновременным использованием трех критериев.

IV. ВЫВОДЫ

1. Значения отношений газов, для некоторых разновидностей дефектов могут принимать значения, одновременно соответствующие разным дефектам, что значительно затрудняет процесс их распознавания, и может привести к постановке ошибочного диагноза.

2. Графические области (образы), построенные по результатам АРГ оборудования с дефектом одного типа (ч.р., разряды низкой и высокой энергии) могут существенно отличаться как друг от друга, так и от образов, регламентируемых действующими стандартами.

3. В оборудовании с электрическими разрядами, максимальное содержание могут иметь не только водород и ацетилен, что известно, но и метан и даже этан, т.е. те газы,

которые характерны для дефектов, вызванных нагревом.

4. Приведены диапазоны значений отношений газов, диапазоны процентного содержания газов, а также построены графические области как для тех дефектов, распознавание которых с использованием критериев, регламентируемых действующими стандартами не вызывает затруднений, так и для дефектов, для которых значения отношений газов и графические образы отличаются от критериев, регламентируемых в нормативных документах.

Appendix 1

On Figures, 1-8 graphical areas for electrical defects of various types have been shown. The names of the gases are plotted along the abscissa axis. The minimum and maximum ratio of the five gases, to the gas with the maximum concentration are plotted on the ordinate axis.

Fig. 1. Graphical areas for oil-filled equipment with X-wax deposits

Fig. 2. Graphical areas for oil-filled equipment with partial discharges with low energy density.

Fig. 3. Graphical areas for oil-filled equipment with partial discharges with high energy density.

Fig. 4. Graphical areas for oil-filled equipment with partial discharges.

Fig. 5. Graphical areas for oil-filled equipment with spark and creeping discharges.

Fig. 6. Graphical areas for oil-filled equipment with low-energy discharges.

Fig. 7. Graphical areas for oil-filled equipment with high-energy discharges.

Table 1 The percentage of gases in equipment with defects of electrical types;

Table 2 Values of gases ratios in equipment with defects of electrical types;

Литература (References)

- [1] IEC Publication 60599, Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis, 2015.
- [2] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARcd C57.104-2008, Feb. 2009.
- [3] E. Dornenburg, and W. Strittmater (1974). Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis. *Brown Boveri Review*, 1974, vol. 61, pp. 238-274.
- [4] R. R. Rogers, IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, 1978, no. 5(13), pp. 349-354.
- [5] SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo

- obladnannja za rezultatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih ui zoljacijnomu masli [SOU-N EE 46.501: Diagnosis oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gas with gas relay selected, i gases dissolved in insulating oil]. Kiiiv, 2007. 91 p.
- [6] RD 153-34.0-46.302-00: Metodi cheskie ukazaniya po diagnostike razvivajushhihsja defektov transformatornogo oborudovanija po rezultatam hromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenyh v masle. [RD 153-34.0-46.302-00: Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of the chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Moscow, 2001.26 p.
- [7] Davidenko I.V. Razrabotka sistemy mnogoaspektnoj ocenki tehničeskogo sostojanija i obsluzhivaniya vysokovol'tnogo maslonapolnennogo jelektrooborudovanija. Diss. dokt. Tehnika vysokih naprjazhenij [Development of a system for a multidimensional assessment of the technical condition and maintenance of high-voltage oil-filled electrical equipment. Technique of high voltages Dr. diss.]. Ekaterinburg, 2009. 462 p.
- [8] Ovchinnikov K. V., Davidenko I. V. [Analysis of the accuracy of methods for identifying the type of transformer defect based on the DGA results]. *Trudy vtoroj nauchno-tehničeskoj konferencii molodyh učenyh Ural'skogo jenergetičeskogo instituta*. [Proceedings of the second scientific and technical conference of young scientists of the Ural Energy Institute]. Yekaterinburg, 2017, pp. 273-276. (In Russian).
- [9] Michel Duval A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, vol. 18, no. 3, pp. 8-17.
- [10] Mostafa. M. Ibrahim, M.M. Sayed, and E.E. Abou El-Zahab. Artificial Intelligence Solution For Incipient Faults Diagnosis Of Oil-Filled Power Transformers. *Proceeding of Journal of Electric Engineering*, 2015, vol. 19, Edition 4, pp 1-6.
- [11] Sherif S.M. Ghoneim, Ibrahim B. Taha. Artificial Neural Networks for Power Transformers Fault Diagnosis Based on IEC Code Using Dissolved Gas Analysis. *International journal of control avtomation and systems*, 2015, Vol. 4, no. 2, pp. 18-21.
- [12] Chin-Pao Hung, Mang-Hui Wang. Diagnosis of incipient faults in power transformers using CMAC neural network approach. *Electric Power Systems Research*, 2004, no. 71, pp. 235-244.
- [13] Hazlee Azil Illias, Xin Rui Chai, Ab Halim Abu Bakar, HazlieMokhlis. Transformer Incipient Fault Prediction Using Combined Artificial Neural Network and Various Particle Swarm Optimisation Techniques. *PLos One*, 2015, no 10(6), pp. 1-16.
- [14] Mohd Muhridza Bin Yaacob, Ahmed Raisan Hussein, Mohd Fauzi Bin Othman. DGA Method-Based ANFIS Expert System for Diagnosing Faults and Assessing Quality of Power Transformer Insulation Oil. *Modern Applied Science*, 2016, vol. 10, no. 1, pp 13-22.
- [15] Uhumwangho Roland, Omorogiuwa Eeseosa. Artificial Neural Network Approach to Distribution Transformers Maintenance. *International Journal of Scientific Research Engineering Technology*, 2015, Vol. 1, Iss. 4, pp. 62-70
- [16] Jianqing Liu, Kai Zheng, Hao Zhang, Daogang Peng. A Comparative Research on Power Transformer Fault Diagnosis Based on Several Artificial Neural Networks. *Journal of Computational Information Systems*, 2013, Vol. 18, pp. 7501-7508.
- [17] M.R. Ahmed, M.A. Geliel, and A. Khalil. Power transformer Fault Diagnosis using Fuzzy Logic Technique Based on Dissolved Gas Analysis. *21 st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, Plataniass-Chania, Crete, Greece, June 25-28, 2013, pp. 584-589.
- [18] Ikb al Abulmageed Hameed, Saher Rady Farag. Monitoring Power Transformer Using Fuzzy Logic. *Journal of Engineering and Development*, 2013, Vol. 17, no. 6, pp. 146-163.
- [19] N.A. Muhamad, S.A.M. Ali LabVIEW with Fuzzy Logic Controller Simulation Panel for Condition Monitoring of Oil and Dry Type Transformer. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2008, vol. 2, no 8, pp. 1685-1691.
- [20] An-Pin Chen, Chang-Chun Lin. Fuzzy approaches for fault diagnosis of transformers. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, vol. 118, pp.139-151.
- [21].Kanika Shrivastava, Ashish Choubey. A Novel Association Rule Mining with IEC Ratio Based Dissolved Gas Analysis for Fault Diagnosis of Power Transformers. *International Journal of Advanced Computer Research*, 2012, T. 2, no. 2, pp. 34-44.
- [22] Ahmed Raisan Hussein, M.M. Yaacob, M.F. Othman. Ann expert system for diagnosing faults and assessing the quality insulation oil of power transformer depending on the DGA method. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2015, vol.78, no. 2, pp. 278-285.
- [23] Leonidha Londo, Rajmonda Bualoti, Marialis Çelo, Nako Hobdari. Hybrid Dissolved Gas-in-Oil Analysis Methods. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2015, vol. 3, pp. 10-19.
- [24] Lutao Liu, Zujun Ding. Modeling Analysis of Power Transformer Fault Diagnosis Based on

- Improved Relevance Vector Machine // *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, pp.1-6.
- [25] Zahriah Binti Sahri, Rubiyah Binti Yusof. Support Vector Machine-Based Fault Diagnosis of Power Transformer Using k Nearest-Neighbor Imputed DGA Dataset. *Journal of Computer and Communications*, 2014, vol. 2, pp. 22-31.
- [26] Niu, Lin, Jian-guo Zhao, and Ke-jun Li. Application of data mining technology based on RVM for power transformer fault diagnosis. *Advances in Computer Science and Information Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 121-127.
- [27] J. Eslin Fathima, A. Venkatasami. Transformer fault classification using support vector machine method. *International journal of advanced information and communication technology*, 2014, vol. 1, Iss. 1, pp. 168-172.
- [28] Kawamura T., Kawada N., Ando K., Yamaoka M., Maeda T., Takatsu T. Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers. SIGRE Session. Report 12–05. Paris, 1986.
- [29] Shutenko O.V. *Analiz graficheskikh obrazov, postroennykh po rezul'tatam HARG dlja vysokovol'nykh silovykh transformatorov s razlichnymi tipami defektov*. [Analysis of graphical samples of gases constructed for chromatographic analysis of gases dissolved in oil for high-voltage power transformers with various types of defects]. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "HPI": zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk: Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist'* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy reliability and energy efficiency], Kharkov, 2017, no. 31 (1253), p. 97–121. (In Russian).
- [30] Shutenko Oleg. Faults diagnostics of high-voltage equipment based on the analysis of the dynamics of changing of the content of gases. *Energetika*, 2018, T. 64, no. 1, pp 11-22. DOI: <https://doi.org/10.6001/energetika.v64i1.3724>
- [31] O. Shutenko, I. Jakovenko Fault Diagnosis of Power Transformer Using Method of Graphic Images. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017)*, October 17-20, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 66–69. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126594
- [32] Shteger G. *Jelektroizoljacionnye materialy*. [Electrical insulating materials]. Moscow, Gosenergoizdat, 1961. 264 p.
- [33] Lipshtejn R.A. Shahnovich M.I. *Transformatornoe maslo*. [Transformer oil]. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 296 p.
- [34] Wang Feng, Bi jiangang, Zhang bowen, Yuan Shuai. Research of Transformer Intelligent Evaluation and Diagnosis Method Based on DGA. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, 2016, vol. 77. p. 01002.
- [35] Inderpreet Kaur, Preetinder Singh. Residual Life assessment with DGA, Furan content in transformer oil and Degree of polymerization of solid insulation. *International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering*, 2016, vol. 6, Issue 7, pp. 230-234.
- [36] Makwana Mehulkumar B, Ankit Shahpatel. Special approach to detecting incipient fault in power transformer using dissolved gas analysis. *International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering*, 2015, vol. 3, Issue 5, pp. 186-188.
- [37] Ashis Ranjan Gouda. *Image Processing Based Analysis Of Transformer Oil*. Department Of Electrical Engineering National Institute Of Technology, Doctoral dissertation, 2014, 63 p.
- [38] Sherif Ghoneim, Sayed A. Ward, Dalal H. Helmi, Usama S. Zidan. Detection of Faults in Power Transformers Using an Expertise Method Depending on DGA. *Proceedings of the 15th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'12)*, Alexandria University, Egypt, 2012, pp. 1-6.
- [39] Xiaohui Wang, Kehe Wu and Yang Xu. Research on Transformer Fault Diagnosis based on Multi-source Information Fusion. *International Journal of Control and Automation*, 2014, vol.7, no.2 pp. 197-208.
- [40] Sherif Ghoneim and Nadjim Merabtime. Early Stage Transformer Fault Detection Based on Expertise Method. *International Journal of Electrical Electronics and Telecommunication Engineering*, 2013, vol. 44, pp. 1289-1294.
- [41] Hamed Ahadpour. A Novel Approach for Diagnosis of Power Transformers Internal Faults Using an Electronic Nose. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2011, pp. 808-815.

Сведения об авторе.



Шутенко Олег Владимирович. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра «Передача электрической энергии», кандидат техн. наук, доцент. Основное направление исследований: диагностика состояния высоковольтного оборудования.

E-mail: o.v.shutenko@gmail.com