

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
В. Б. АБРАМОВ, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПИ», Киев;
Д. Н. БАКЛАЙ, ассистент, НТУ «ХПИ»;

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ХРОМАТИГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ ГАЗОВ

В статье рассмотрены основные проблемы интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, в том числе факторы, которые влияют на достоверность диагноза, поставленного по результатам анализа растворенных в масле газов. Сформулированы основные направления повышения достоверности интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов.

Ключевые слова: Хроматографический анализ, граничные значения, отношения пар газов, частичные разряды, развивающийся дефект.

Постановка проблемы. Хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ) является одним из наиболее распространенных видов неразрушающего диагностирования состояния маслonaполненного оборудования. Данный метод разработан в начале 70-х годов прошлого века в Англии, и с того момента нашел широкое применение в большинстве развитых стран. В настоящее время все крупные энергетические компании и трансформаторостроительные фирмы широко применяют ХАРГ, используя при этом различные системы оценки и определения типа дефекта трансформатора. Несмотря на имеющийся положительный опыт применения ХАРГ, существуют и целый ряд проблем, которые возникают при оценке состояния высоковольтного маслonaполненного оборудования с использованием данного метода. В связи с этим возникает необходимость рассмотрения основного спектра таких проблем, и путей их решения.

Анализ публикаций. В работе [1] отмечается, что выводы, полученные на основе интерпретации результатов ХАРГ, имеют значительный элемент неопределенности. Так по превышению граничных концентраций газов можно судить лишь о возможном развитии дефекта. Определенная степень нечеткости ХАРГ имеет место и при определении типа дефекта, и самое главное при принятии решений о дальнейших действиях, в случае обнаружения дефекта. Как отмечается в [2], с целью выявления местонахождения дефектов и

© О. В. Шутенко, В. Б. Абрамов, Д. М. Баклай, 2013

степени их опасности метод ХАРГ должен использоваться как вспомогательный в комплексе с другими диагностическими методами. В работе [3] выделены наиболее значимые данные, необходимые для достоверной постановки диагноза по результатам ХАРГ. В работах [4-11] приводятся результаты анализа отдельных критериев, используемых для интерпретации результатов ХАРГ.

Несмотря на значительное количество публикаций, в которых, в той или иной степени, освещаются вопросы достоверности результатов ХАРГ и пути ее повышения, многие аспекты остаются неосвещенными, что и послужило поводом к написанию данной статьи.

Цель статьи. Путем анализа основных проблем, которые возникают при оценке состояния высоковольтного маслonaполненного оборудования с использованием результатов ХАРГ наметить пути повышения достоверности диагностирования указанного оборудования.

Граничные и типичные концентрации газов. Одним из основных и наиболее часто используемых критериев наличия дефекта в маслonaполненном электрооборудовании является критерий граничных концентраций газов, растворенных в масле такого оборудования. Алгоритм использования этого критерия достаточно прост: если измеренные значения концентраций растворенных в масле газов превышают некоторое нормированное значение, то можно предположить наличие дефекта, тип которого определяется или с помощью отношений пар газов или графических образов.

Как правило, граничные значения концентраций приведены в национальных или международных нормативных документах, но энергокомпании могут определять граничные значения концентраций самостоятельно. Однако, рекомендуемый для определения граничных концентраций подход, основанный на анализе интегральных функций распределения, позволяет определить не граничные, а типичные концентрации газов. Т.е. максимальные концентрации газов, которые могут быть обнаружены у 90–95% оборудования от общего количества, не имеющего признаков дефектов. Данное ограничение является произвольным и связано с тем, что, согласно усредненной мировой статистики, только у 5–10% оборудования могут быть отклонения, приводящие к развитию дефектов. В некоторых методических руководствах типичные значения отождествляются с граничными концентрациями газов, разделяющими бездефектное и дефектное оборудование, что является сомнительным. Учитывая многофакторность процессов газообразования, значения, полученные на основании только статистического анализа даже очень большого

количества результатов ХАРГ оборудования, не имеющего дефектов, вряд ли можно использовать для определения граничных показателей дефектного состояния этого оборудования.

В методике СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Украина) критерии заданы в виде диапазонов значений концентраций растворенных в масле газов. В отличие от методики IEC 60599, эти концентрации газов называются граничными и имеют три уровня: 1 уровень – наличие дефектов не предполагается; при превышении нижней границы диапазона концентраций газов, соответствующих уровню 2, определяется скорость нарастания газов (дефект считается «присутствующим», если эта скорость превышает 30 мл/сутки); 3 уровень (превышение верхней границы уровня 2) – прогнозируется наличие дефекта без учета скорости нарастания концентраций газов.

Рекомендуемые методикой РД 153.34.0-46.302-00 (Россия) критерии концентраций растворенных в масле газов, так же как и в методике СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006, названы граничными значениями.

В методике Energoromiag (Польша) в качестве критериев наличия дефекта используются концентрации газов, названные граничными. Примечательно, что определенные на основании практического опыта допустимые концентрации газов в масле, приняты (по некоторой аналогии с IEC 60599) различными для блочных и сетевых трансформаторов.

В методике IEC 60599 указан, ограниченный нижним и верхним уровнями, диапазон значений концентраций газов, которые названы типичными. Т.е. таких, которые наблюдаются в 90 % случаев во всех анализируемых трансформаторах. Для случаев, когда концентрации газов превышают эти типичные значения, данная методика (как, впрочем, и большинство других) рекомендует применять критерий скорости нарастания и критериальные отношения пар газов с целью определения опасности, вида (характера) дефекта и корректировки периодичности отбора проб на ХАРГ.

Типичными названы также значения концентраций газов, приведенные в методике IEEE. Std C57.104 (США). Они имеют четыре уровня: первый соответствует бездефектному состоянию, остальные – различной степени дефектности.

Помимо статуса, рекомендуемые концентрации отличаются и своими значениями см. табл. 1, что может привести к противоположным («есть дефект – нет дефекта») выводам при их использовании. Очевидно, что противоречивость результатов интерпретации результатов ХАРГ, может быть получена и при использовании граничных значений одной методики, но используемой в разных условиях. Например, при использовании хроматографов с

различным пределом обнаружения газов, при диагностике трансформаторов с различным типом защиты масел, с разным сортом масел и т.д. Все это приводит к необходимости нормировать значения граничных концентраций с учетом наиболее влияющих факторов. В качестве таких факторов, в работе [4], предлагается использовать: особенности конструктивного исполнения трансформаторов (тип защиты, наличие РПН и т. д.), сорт масла, срок эксплуатации, регион в котором эксплуатируется трансформатор и т. д. Однако, выделение наиболее значимых факторов, по результатам эксплуатационных наблюдений, является достаточно сложной задачей, хотя бы в силу многофакторности процессов газовой выделенности и отсутствия полной информации об условиях эксплуатации.

В теории технической диагностики, граничные значения признаков определяются на основе анализа статистических распределений диагностических признаков не только для бездефектных, но и дефектных объектов. В случае если области, ограниченные кривыми распределений для двух различных состояний пересекаются, то для определения граничных значений используются методы статистических решений.

Таблица 1 – Типичные значения концентраций растворенных в масле газов рекомендуемые известными методиками

Методика	Уровень концен-траций	Растворенные в масле газы				
		CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	H ₂
IEC 60599 (МЭК)	нижний	0,004	0,006	0,0003	0,005	0,006
	верхний	0,011	0,028	0,005	0,009	0,015
IEEE Std C57.104 (США)	–	0,012	0,005	0,0035	0,0065	0,01
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Украина)	1	<0,005	<0,0015	<0,00005	<0,005	<0,01
	2	0,005-0,012	0,0015-0,01	0,00005-0,001	0,005-0,01	0,01-0,015
	3	>0,012	>0,01	>0,001	>0,01	>0,015
РД 153.34.0-46.302-00 (Россия)	–	0,01	0,01	0,001	0,005	0,01
Energoromiag (Польша)	–	0,02	0,026	0,007	0,017	0,05

Т. е. граничные значения определяются исходя из заранее выбранного критерия. Такими критериями могут быть:

1. Критерий минимума ошибочных решений – значения граничных концентраций газов, определяются так, чтобы минимизировать общее число ошибочных решений;
2. Критерий минимума среднего риска – значения граничных концентраций газов, определяются так, чтобы минимизировать возможный ущерб от принятия ошибочных решений;
3. Минимаксный критерий – значения граничных концентраций газов, определяются так, чтобы получить минимальное значение риска среди его максимальных значений. Используется для случаев, когда отсутствуют предварительные статистические сведения о вероятности дефектного и бездефектного состояний оборудования;
4. Критерий Неймана-Пирсона – значения граничных концентраций газов, определяются так, чтобы минимизировать значения вероятности одной из ошибок (пропуск цели или ложная тревога) при заданном значении другой;

Практическая реализация статистического подхода, к определению граничных концентраций затрудняется противоречивостью информации о распределениях концентраций растворенных в масле газов, опубликованной различными исследователями. На наш взгляд причиной таких различий является отличие применяемых методов статистической обработки результатов ХАРГ.

Скорости нарастания газов. Как правило, данный критерий используется для принятия окончательного решения о наличии дефекта в трансформаторе. Согласно национальной методике СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 решение о наличии дефекта принимается, если концентрации газов превышают граничные значения (уровень 3) и скорость нарастания превышает 30 %. В Российской Федерации данный критерий составляет 10 %. Использование строго фиксированного значения граничных скоростей нарастания без учета характера дефекта, особенностей конструктивного исполнения трансформаторов (тип защиты, наличие РПН и т. д.), сорта масла, срока эксплуатации и других факторов, может привести к принятию ошибочного решения, в т. ч. относительно времени проведения необходимых действий.

Отношения пар газов. В большинстве известных методик для определения типа прогнозируемого дефекта используются отношения пар газов. При этом сами отношения и их количество в различных методиках отличаются (см. табл. 2).

Таблица 2 – Отношения пар характерных газов в различных методиках

Методика	Соотношение пар характерных газов					
	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{CO}{CO_2}$	$\frac{O_2}{N_2}$
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{CO}{CO_2}$	$\frac{O_2}{N_2}$
РД 153-34.0-46.302-00	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{CO}{CO_2}$	$\frac{O_2}{N_2}$
Дорненбурга	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$		
Мюллера	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	$\frac{CO}{CO_2}$		
Роджерса	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$		
ВЭИ	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{CH_4}$ $\frac{CO}{CO_2}$

Кроме того методики различаются как по количеству распознаваемых дефектов так и по значениям границ диагнозов см табл. 3-5. Как видно из таблиц 3-5, даже при использовании одних и тех же отношений пар газов, и количество распознаваемых дефектов и указанные для них границы значений используемых отношений отличаются. В методике Дорненбурга (таблица 6), кроме этого, используется другой перечень отношений получаемых в результате ХАРГ газов. Очевидно, что одни и те же значения отношений пар газов, при использовании разных методик дадут разный результат.

Таблица 3 – Интерпретация результатов ХАРГ по стандарту МЭК 60599

Диагностическое заключение	Соотношения концентраций характерных пар газов		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Частичные разряды	*	<0,1	<0,2
Начальные ч.р.	>1	0,1-0,5	>1
Критические ч.р.	0,6-2,5	0,1-1	>2

Перегрев при $t < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	*	>1 *	<1
Перегрев в диапазоне температуры $300^{\circ}\text{C} < t < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	$<0,1$	>1	$1-4$
Перегрев при $t > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	$<0,2^{**}$	>1	>4

* Любые значения.

** Повышение концентрации C_2H_2 может свидетельствовать о наличии «горячей точки» с температурой более $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 4 – Интерпретация результатов ХАРГ по методике СОУ-Н ЕЕ

№ п/п	Тип прогнозируемого дефекта	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$
1	Нормальное старение	*	$0,1-1$	$<0,2$
2	Частичные разряды	*	$<0,1$	$<0,2$
3	Разряды малой энергии	>1	$0,1-0,5$	>1
4	Разряды высокой энергии	>1	$0,1-1$	>2
5	Разряды на поверхности и в толщине изоляции (ползучий разряд)	<1	$0,3-0,5$	>5
6	Термический дефект, температура $150-300^{\circ}\text{C}$	*	>1	<1
7	Термический дефект, температура $300-700^{\circ}\text{C}$	*	>1	$1-4$
8	Термический дефект, температура $>700\text{ }^{\circ}\text{C}$	$<0,2$	>1	>4

В связи с этим возникает объективная необходимость, выбора отношений, которые бы обеспечили наиболее достоверные результаты интерпретации. В [5] выполнен анализ диагностической ценности различных методов интерпретации ХАРГ. Согласно полученным результатам наибольшей диагностической ценностью ($0,93\%$) обладает методика МЭК (IEC 60599).

Однако исследования проводились на выборке состоящей только из дефектных трансформаторов, что не позволило проанализировать возможности методик применительно к бездефектным трансформаторам, в которых по тем или иным причинам концентрации газов превышают граничные значения. Кроме того величина диагностической ценности не позволяет оценить значения вероятностей ошибок первого и второго рода, что является немаловажным аспектом при выборе наиболее достоверной методики.

Таблица 5 – Интерпретация результатов ХАРГ по методике РД 153-34.0-46.302-00

№ п/п	Тип прогнозируемого дефекта	Отношение концентраций характерных газов		
		$\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$	$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}$	$\frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}$
1	Нормальное старение	$<0,1$	$0,1-1$	≤ 1
2	Частичные разряды с низкой плотностью энергии	$<0,1$	$<0,1$	≤ 1
3	Частичные разряды с высокой плотностью энергии	$0,1-3$	$<0,1$	≤ 1
4	Разряды малой мощности	$>0,1$	$0,1-1$	$1-3$
5	Разряды большой мощности	$0,1-3$	$0,1-1$	≥ 3
6	Термический дефект низкой температуры ($<150^{\circ}\text{C}$)	$<0,1$	$0,1-1$	$1-3$
7	Термический дефект в диапазоне низких температур ($150-300^{\circ}\text{C}$)	$<0,1$	≥ 1	<1
8	Термический дефект в диапазоне средних температур ($300-700^{\circ}\text{C}$)	$<0,1$	≥ 1	$1-3$
9	Термический дефект высокой температуры ($>700^{\circ}\text{C}$)	$<0,1$	≥ 1	≥ 3

Таблица 6 – Интерпретация результатов ХАРГ по методике Дорненбурга

№ п/п	Тип прогнозируемого дефекта	Отношения концентраций газов			
		CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$
1	Термическое воздействие	$>1,0$	$<0,75$	$<0,3$	$>0,4$
2	Частичные разряды с малой интенсивностью	$<0,1$	-	$<0,3$	$>0,4$
3	Дуговые процессы	$>0,1 <1,0$	$>0,75$	$>0,3$	$<0,4$

Графические образы дефектов. Для распознавания типа возможного дефекта, помимо отношений пар газов, рекомендуется использовать графические образы дефектов. Данный метод разработан японскими исследователями на основе практического опыта сопоставления фактически выявленных дефектов в трансформаторе во время внутреннего осмотра с составом газов, выявленных методом ХАРГ. Однако, как и любой из критериев для интерпретации результатов ХАРГ, метод графических образов может приводить к ошибочным решениям. В работе [6] выполнен сравнительный анализ достоверности распознавания типа дефекта с помощью отношений пар газов и графических образов дефектов. Установлено, что при

использовании графических образов дефектов совпадение поставленного и реального диагнозов составило 94%. Вместе с тем, приведенные результаты показывают, что с помощью графических образов дефектов невозможно распознавать деструкцию основной изоляции и разгерметизацию бака РПН. Также определенные сложности возникают с диагностированием тех электрических дефектов (кроме дугового разряда), для которых газом с максимальной концентрацией является ацетилен. Это обусловлено ограниченным числом эталонных образов приведенных в нормативных документах. Выводы, полученные в работе [6] сделаны исключительно на основе анализа данных для трансформаторов, имеющих дефект. Образы дефектов отображают наиболее общие зависимости в отношении между отдельными газами, во время нагревания до различных температур или разрядных процессов. На рисунке 1 приведены графические образы, совпадающие образами дефектов, но полученные для бездефектных трансформаторов.

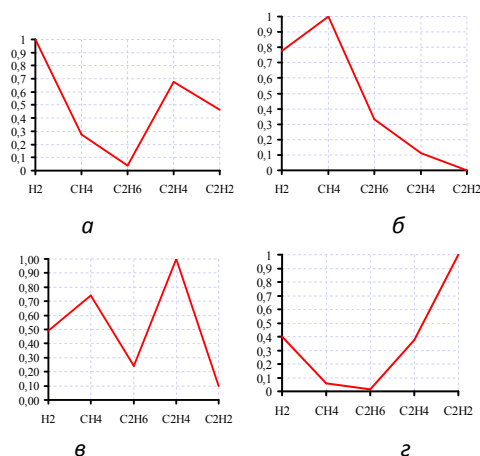


Рис. 1 – Графические образы дефектов, построенные по результатам ХАРГ бездефектных трансформаторов: а – искрение (ползучий разряд) – газ с максимальной концентрацией водород; б – нагрев переходящий в ч. р. – газ с максимальной концентрацией метан; в – высокотемпературный нагрев – газ с максимальной концентрацией этилен; г – дуговой разряд – газ с максимальной концентрацией ацетилен;

Поскольку данные образы получены для трансформаторов, у которых концентрации газов по тем или причинам превысили граничные значения, то существует большая вероятность постановки неправильного диагноза. Учитывая многообразие эксплуатационных

воздействий, которые могут привести к значительному росту концентраций растворенных газов, в масле трансформаторов, не имеющих дефектов [7], представляет практический интерес выполнить анализ графических образов, которые могут быть получены, для трансформаторов, не имеющих дефектов, и находящихся в условиях длительной эксплуатации.

Кроме проблем связанных с нормированием и оценкой достоверности диагностических критериев, значительное влияние на результаты интерпретации ХАРГ оказывает то, как эти критерии применяются на практике. Ниже рассмотрим наиболее часто встречающиеся факторы, которые могут повлиять на достоверность принимаемых решений.

Отсутствие надлежащего учета влияния эксплуатационных воздействий на результаты ХАРГ. Помимо конструктивных особенностей трансформаторов, сорта масла, в некоторых случаях срока службы на результаты ХАРГ значимое влияние оказывают такие факторы как: загрузка трансформаторов, воздействие токов короткого замыкания, перенапряжений и других.

Так, рост концентраций растворенных в масле газов при воздействии перенапряжений обусловлен переходом начальных частичных разрядов в критические. Исследования, выполненные на трансформаторах 110 кВ, показали, что начальное напряжение частичных разрядов составляет 65 кВ [8]. Т. е. даже при рабочем напряжении в изоляции трансформатора существуют начальные частичные разряды с уровнем 10^{-10} Кл. Под воздействием этих разрядов происходит разложение масла с выделением газов. При воздействии перенапряжений происходит переход от начальных ЧР к критическим в первом масляном канале и сопровождается его пробоем. При этом уровень ЧР возрастает до 10^{-5} Кл. Пробоем масляного канала способствует, в первую очередь, неоднородность электрического поля у краев катушек, что приводит к снижению электрической прочности масла. Переход от начальных ЧР к критическим сопровождается резким ростом концентраций газов.

Причинами роста концентраций газов при воздействии токов коротких замыканий могут быть:

1. перегрев обмоток трансформаторов (наблюдаемые токи короткого замыкания как минимум в 3 раза превосходили номинальные токи исследуемых трансформаторов);
2. выдавливание газовых и воздушных включений из обмотки под действием электродинамических сил, приводящих к деформации обмотки. На рис. 2 приведена фотография обмотки, подвергшейся электродинамическим воздействиям токов короткого замыкания.

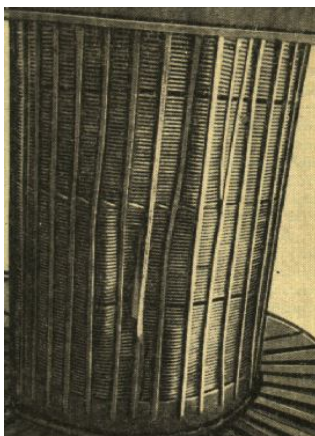


Рис. 2 – Деформированная обмотка трансформатора из-за воздействия токов короткого замыкания

Как правило, учет влияния данных факторов является крайне затруднительным из-за отсутствия в службах изоляции информации о режимах работы трансформаторов. Кроме того фиксация токов короткого замыкания и перенапряжений требует наличия специальных устройств (например, «Альтра», «Рикон», «Регина»), но они установлены не всех подстанциях. Характер изменения приращения суммы газов углеводородного ряда, от значения тока короткого замыкания, для четырех трансформаторов Луганской области, имеющих сходные условия эксплуатации [7], можно оценить по зависимости, приведенной на рис. 3.

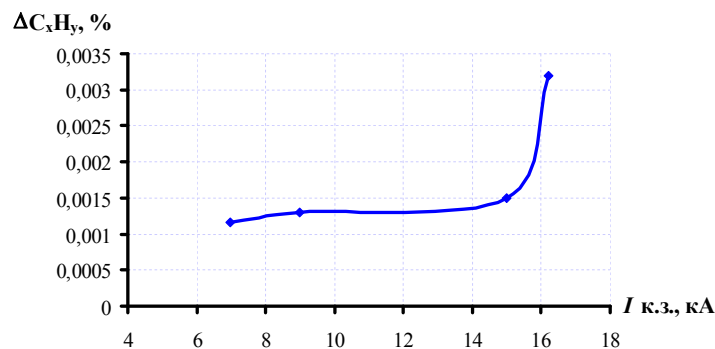


Рис. 3 – Зависимость приращения суммы газов углеводородного ряда от значения токов короткого замыкания, через 100 дней после даты короткого замыкания

В условиях крайней изношенности электрических сетей Украины, учет аварийных режимов работы электрических сетей на результаты ХАРГ является актуальной задачей.

Помимо аварийных режимов работы электрической сети на рост концентраций газов, а, следовательно, и на возможность принятия неправильного решения могут оказать влияние дефекты, не связанные с состоянием трансформатора. В этом легко убедиться на примере трансформатора ПС «Шахта-21» Т-2, «Луганскоблэнерго». Результаты хроматографического анализа приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Значения концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе ПС «Шахта-21» Т-2, % об.

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
20.07.2007	0,0039	0,0094	0,00001	0,0353	0,0039	0,0257	0,1899

Как видно из таблицы, концентрации этилена соответствуют уровню 3, а метана – уровню 2 из табл. 1, что указывает на возможное наличие дефекта. Критериальные отношения пар газов имеют следующие значения:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0,00028; \quad \frac{CH_4}{H_2} = 2,410; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 9,051,$$

что в соответствии с таблицей 4, можно интерпретировать как термический дефект с температурой более 700°C. Графический образ дефекта, построенный по результатам ХАРГ приведен на рис. 4, также соответствует термическому дефекту.

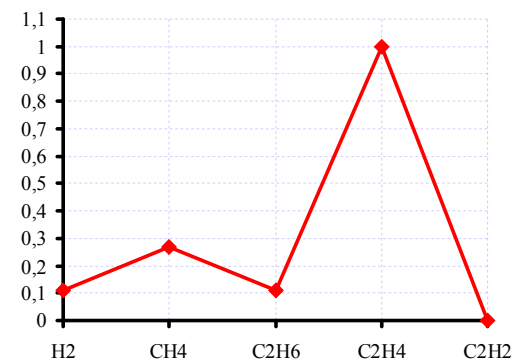


Рис. 4 – Графический образ дефекта в трансформаторе ПС «Шахта-21» Т-2»

Однако, причиной роста концентраций растворенных в масле газов оказался не внутренний дефект трансформатора, а нарушение наружных контактных соединений на низкой стороне трансформатора Т-2, фаза А. Причем данное нарушение было обнаружено с помощью тепловизионного контроля

Нарушения при отборе проб и выполнении анализа. Достоверность результатов ХАРГ во многом будет зависеть от того насколько корректно выполнены процедуры отбора пробы, в каких условиях осуществлялась хранение и транспортировка пробы.

Появление по тем или иным причинам пузырьков воздуха в пробах масла, отобранных на ХАРГ, приводят к искажению результатов в сторону уменьшения фактических концентраций газов [9], а нахождение этих проб под воздействием солнечного освещения (фотоокисление) – к увеличению первоначальных концентраций практически всех газов [10]. Причем степень искажения конечных результатов будет зависеть от продолжительности действия указанных воздействий и от степени старения отобранного масла. В качестве примера в таблице 8 приведены результаты ХАРГ для пробы масла, отобранного из силового трансформатора, проработавшего более 25 лет. Проба была разделена на две части, одна из которых была подвергнута очистке силикагелем для удаления продуктов старения. Перед фотоокислением из обеих частей были удалены все газы, за исключением воздуха.

Таблица 8 – Образование газов при фотоокислении эксплуатационного трансформаторного масла марки Т-750 до и после его сорбционной очистки (длительность фотоокисления - пять суток)

Концентрация газов, растворенных в трансформаторном масле Т-750, ppm											
H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	2-C ₄ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	1-C ₄ H ₈	C ₄ H ₁₀
Без очистки ($tg\delta_{\text{масла при } 90^{\circ}\text{C}} = 5,08\%$)											
11	600	2150	90	50	29	20	18	104	43	458	13
После очистки ($tg\delta_{\text{масла при } 90^{\circ}\text{C}} = 0,78\%$)											
5	177	1070	38	11	63	13	47	20	36	316	27

Для состаренных масел может наблюдаться еще одно явление: имеют место случаи, когда отбор проб масла в шприцы с металлическим поршнем приводит к спонтанному и нестабильному появлению в этой пробе водорода и ацетилена. Тогда как для проб масла, отобранных из того же оборудования, но в шприцы со стеклянным поршнем, по результатам ХАРГ эти газы отсутствовали [11].

Особо следует отметить, влияние длительных пауз между отбором пробы и проведением ХАРГ, когда отсутствуют воздействия, указанные

выше. Такие паузы приводят к снижению концентраций растворенных в пробе масла газов из-за диффузии их в атмосферу. Зависимость изменения суммы газов углеводородного ряда от количества дней между датами отбора проб и датами проведения анализов, приведена на рис. 5.

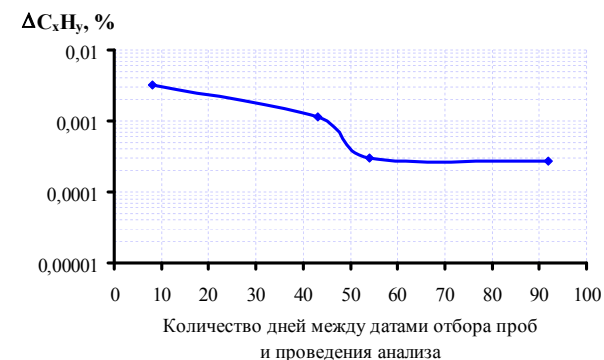


Рис. 5 – Зависимость изменения суммы газов углеводородного ряда от паузы между датами отбора проб и датами проведения анализов

Приведенная зависимость получена для пяти подстанций Луганской области после воздействия однофазного короткого замыкания. Ток короткого замыкания составил 9 кА. Из рисунка видно, что увеличение интервала между датой отбора проб и датой проведения анализа до 54 дней приводит к снижению концентраций газов углеводородного ряда на порядок. Данный факт подтверждает правильность введения жесткой регламентации временного интервала между датой отбора проб и датой проведения хроматографического анализа. Для оборудования, находящегося под усиленным контролем желательно, чтобы анализ проводился в день отбора проб.

Неполный учет рекомендаций нормативных документов по интерпретации результатов ХАРГ. Достаточно часто, неверный диагноз, может быть получен в результате ошибочных действий персонала, на этапе интерпретации результатов ХАРГ. Как правило, такие действия сводятся к частичному невыполнению норм заложенных в национальных методиках. Например, по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов трансформатора ПС «Бердянские жатки», Т-2, ТДН 16000/150 Запорожской области, получены следующие результаты, табл. 9.

Таблица 9 – Значения концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе ПС «Бердянские жатки», Т-2, ТДН 16000/150, % об.

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
19.12.2011	0,0012	0,0006	0,0024	0,0018	0,00015	0,0168	0,1457

Как видно из табл. 9 концентрация ацетилена превышает, типичное значение концентраций данного газа, рекомендуемое СОУ-ННН 46.501:2006, в 2,4 раза. Графический образ дефекта, построенный по результатам анализа, приведен на рис. 6. Данный образ соответствует дуговому разряду.

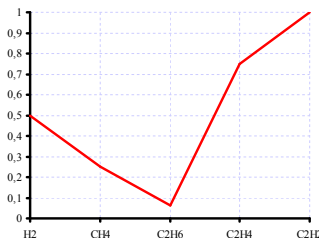


Рис. 6– Графический образ дефекта в трансформаторе ПС «Бердянские жатки»

Расчетом получены следующие значения критериальных отношений пар газов:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 1,3333; \quad \frac{CH_4}{H_2} = 0,5; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 12.$$

Что было интерпретировано как дуговой разряд, и, как следствие, принято решение о выводе трансформатора из эксплуатации и проведении ремонта. Стоимость ремонтных работ, выполненных на основании такого анализа результатов ХАРГ в экстренном порядке, составила 1500000 грн. Однако, вопреки рекомендациям указанного СОУ, не был выполнен отбор проб и анализ газов из устройства РПН, и самое главное не рассчитывалось отношение ацетилена к водороду, с помощью которого прогнозируются нарушения герметичности контактора РПН. Для приведенных в табл. 8 результатов отношение $\frac{C_2H_2}{H_2} = 2$, что свидетельствует о нарушении уплотнения бака

контактора РПН и попадании масла из него в бак трансформатора. Выполненное вскрытие трансформатора полностью подтвердило данный диагноз.

Выводы. Таким образом, достоверность решения, принимаемого по результатам ХАРГ, будет определяться как корректностью критериев и их граничных значений, которые регламентированы

нормативными документами, так и возможностью учета и распознавания внешних эксплуатационных воздействий на трансформаторы. Немаловажную роль при этом будет играть также уровень квалификации и ответственности эксплуатационного персонала, принимающего решение. Авторы считают, что повышение достоверности результатов интерпретации ХАРГ может быть достигнуто за счет реализации нескольких направлений:

1. Исследование и максимальный учет на всех этапах интерпретации эксплуатационных факторов, влияющих на концентрации растворенных в масле газов в условиях длительной эксплуатации трансформаторов;
2. Разработка методики анализа достоверности диагностических критериев, используемых для интерпретации результатов ХАРГ, позволяющая применять из них те, которые обеспечивают максимальную точность при постановке диагноза;
3. Разработка методики определения значений граничных концентраций газов, с учетом влияния эксплуатационных факторов;
4. Анализ достоверности диагноза, полученного с использованием графических образов прогнозируемых дефектов;
5. Использование альтернативных подходов к обнаружению развивающихся дефектов и распознаванию причин газовой выделению в трансформаторах;

По мнению авторов, использование более сложных алгоритмов распознавания, должно предполагать применение специальных программных продуктов, которые способны хранить, накапливать и обрабатывать диагностическую информацию и формировать рекомендации в помощь оперативному персоналу подстанций. Речь идет о создании и применении баз данных и автоматизированных систем их ведения, достаточно достоверно и полно отображающих особенности как самого диагностируемого оборудования, так режимов его эксплуатации и диагностических моделей поиска дефектов в этом оборудовании.

Список литературы: 1. Касаткина Т.Е., Львов М.Ю. Опыт применения хроматографического анализа газов для оценки состояния силовых трансформаторов. /Т.Е. Касаткина, М.Ю. Львов //Новое в российской электроэнергетике. – 2001. – № 7. – С. 23–27; 2. Боярчуков Г.М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле / Г.М. Боярчуков // Новини енергетики. – 2010. – №10. – С. 24–33; 3. Абрамов В. Б. Особенности контроля маслонаполненного электрооборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов /В.Б. Абрамов // Электрические сети и системы. – 2012. –

№4. – С. 77 – 79; 4. Давиденко И.В. Определение допустимых значений контролируемых параметров маслonaполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных / И.В. Давиденко // Электричество. – 2009. – № 6 – С. 10 – 21; 5. Львов М.Ю. Оценка информативности показателей контроля технического состояния изоляции трансформаторного оборудования. / М.Ю. Львов // Электрические станции. – 2002. – № 12. – С. 44–51; 6. Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А., Мельник Н.Ю. Анализ достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай, Т.А. Острикова, Н.Ю. Мельник // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск: Енергетика: надійність і енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», 2013. – №17(990) – С. 180–189; 7. Шутенко О.В. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на результати хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів / О.В. Шутенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків. – 2008. – Том 1, випуск 73. – С. 45–48; 8. Гурин В.В. Частичные разряды в изоляции высоковольтных трансформаторов / В.В. Гурин, И.С. Калиниченко, Д.А. Каплан и др. // Электричество. – 1971. – №3. – С. 20 – 24; 9. Абрамов В. Б. Корректировка результатов хроматографического анализа газов в трансформаторном масле при наличии в пробе пузырьков газа / В.Б. Абрамов, Г.М. Боярчуков, Р.В. Яблонский // Электрические сети и системы. – 2006. – №5. – С. 7 – 14; 10. Абрамов В. Б. Отличительные особенности газообразования в трансформаторном масле герметичного и негерметичного высоковольтного оборудования. / В. Б. Абрамов, Г. М. Боярчуков, Р.В. Яблонский // Новини енергетики. – 2009. – №9. – С. 17 –32; 11. Абрамов В. Б. Влияние пробоотборников на результаты хроматографического анализа газов, растворенных в масле высоковольтного оборудования. / В.Б. Абрамов, Г.М. Боярчуков, Р.В. Яблонский // Енергетика та електрифікація. – 2007. – №7(287). – С. 39 – 46.

Надійшла до редколегії 26.09.2013

УДК 621.314

Анализ проблем, возникающих при интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов / О. В. Шутенко, В. Б. Абрамов, Д. Н. Баклай // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 59 (1032). – С. 164–180. – Бібліогр.: 11 назв.

У статті розглянуто основні проблеми інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів, у тому числі фактори, які впливають на достовірність діагнозу, встановленого за результатами аналізу розчинених у маслі газів. Сформульовано основні напрями підвищення достовірності інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів.

Ключевые слова: хроматографічний аналіз, граничні значення, відносини пар газів, часткові розряди, дефект що розвивається.

The article describes the main problems of interpretation of the results of chromatographic analysis of dissolved gases in oil, including the factors of the analyzed that influence the accuracy of the diagnosis of the results of dissolved gas in the oil. The basic directions of improving the reliability of the interpretation of the results of chromatographic analysis of dissolved gases in the oil of formulated.

Keywords: chromatographic analysis, boundary values, attitudes pairs of gases, partial discharges, developing defect.