

УДК 621.019

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕИСПРАВНОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**ФАРХАДЗАДЕ Э.М., МУРАДАЛИЕВ А.З., РАФИЕВА Т.К., ИСМАИЛОВА С.М.***АзНИПНИИ Энергетики, г. Баку*

Предлагается метод прогнозирования времени возникновения неисправного состояния силовых трансформаторов по данным хроматографического анализа газов, растворенных в масле. Рекомендуемый алгоритм позволит повысить объективность сопоставления однотипных показателей растворенных в масле газов на начальной стадии изменения износа. Показано, что основным показателем следует считать расчетный интервал времени до возникновения дефекта

По мере увеличения относительного числа силовых трансформаторов, срок службы которых превышает расчетный, возрастает и актуальность проблемы уточнения оценки их технического состояния, уточнения парка неисправных трансформаторов, оценки объема плановых ремонтов, целесообразности замены.

В настоящее время к числу наиболее эффективных методов диагностики изменения износа в силовых трансформаторах, без вывода их из работы, относится хроматографический метод анализа растворенных в масле газов (ХАРГ) [1]. В этой связи совершенствование методов оценки и прогнозирования состояния оборудования по результатам анализа и систематизация накопленных данных ХАРГ имеет важное практическое значение.

Характерной особенностью используемой на практике методологии обработки данных ХАРГ является многокритериальный характер принятия решения о наличии, виде и характере развивающегося повреждения трансформаторов. В основе критериев находятся результаты измерения концентрации отдельных газов $\{A_i\}_n$, где n – число анализируемых газов, расчета концентрации суммы горючих газов (A_Σ) и отношения концентраций отдельных газов $\{A_i/A_j\}_m$, где m – число расчетных отношений. Наряду с сопоставлением с граничными значениями концентраций газов, соответственно с $\{A_{i,доп}\}_n$, $A_{\Sigma,доп}$ или интервалами возможных значений (для отношения концентрации отдельных газов), широко применяются критерии, основанные на сопоставлении скорости изменения $\{A_i\}_n$, A_Σ и $\{A_i/A_j\}_m$ с допустимыми значениями.

Превышение хотя бы одного из измеренных значений $\{A_i\}_n$ величин $\{A_{i,доп}\}_n$, значения A_Σ величины $A_{\Sigma,доп}$ или скорости их изменения $[v(A_i)]_n$ и $v(A_\Sigma)$ величины 10%об, свидетельствует о возможности возникновения дефекта и необходимости выявления причин указанных превышений.

«Слабым звеном» в системе ХАРГ нередко являются некачественные измерения, обусловленные несоответствием системы отбора и доставки образцов предъявляемым требованиям, недостаточный уровень квалификации операторов, осуществляющих обслуживание хроматографов, износ хроматографов и сопутствующие износу ошибки измерения. Выявляемые по данным ХАРГ дефекты в своей большей части относятся к группе дефектов, наличие которых практически сказывается на показателях надежности и эффективности работы трансформаторов в межремонтном периоде.

Своеобразие диагностики технического состояния трансформаторов по данным ХАРГ заключается, также и (или) в том, что существенное увеличение концентрации анализируемых газов не менее часто возникает на бездефектных трансформаторах. Эти

изменения обусловлены, как правило, воздействием ряда эксплуатационных факторов [1]. Отсутствие сведений об этих факторах может привести к ложным заключениям необходимости проведения ряда повторных ХАРГ.

Следовательно, повышение объективности выводов и рекомендаций по данным ХАРГ неразрывно связано с необходимостью подробной регистрацией всех работ и событий, приводящих к изменению состава и объема масла трансформаторов.

Например, обязательна регистрация дат отказов в системе охлаждения трансформатора, замены силикогеля, доливки масла с указанием его качества, указания нагрузки, места установки трансформатора и др. Воздействие ряда эксплуатационных факторов достаточно полно выявляется по данным физико-химического анализа масла (ФХАМ). Поэтому целесообразно изменение данных ХАРГ сопоставлять с изменением данных ФХАМ.

Результаты ХАРГ показывают, что в большинстве случаев (примерно 90%) концентрация растворенных в трансформаторном масле газов не превышает граничных значений. Достаточно редкие случаи возникновения развивающихся дефектов хорошо согласуются с реальной статистикой отказов силовых трансформаторов, большая часть из которых обуславливается мгновенно и быстро развивающимися дефектами. Не менее важным условием повышения достоверности анализа данных ХАРГ является совершенствование методологии расчета показателей, характеризующих техническое состояние трансформатора.

В настоящей статье на базе данных ХАРГ исправных силовых трансформаторов предлагается метод и алгоритм прогнозирования времени возникновения дефектов.

Некоторые особенности обработки данных ХАРГ. В условиях, когда $\{A_i\}_n < \{A_{i,\text{дон}}\}_n$ важно оценить насколько отличается A_i от $A_{i,\text{дон}}$ с $i=1,n$, сопоставить $\{A_i\}_n$ с целью выявления наибольшего изменения. Поскольку исходные значения $\{A_{i,\text{исх}}\}_n$ также как и граничные значения $\{A_{i,\text{дон}}\}_n$ для каждого газа различны, непосредственное сопоставление значений $\{A_i\}_n$ было бы ошибочным. По аналогии с [1] введем в рассмотрение показатель относительной концентрации i -го газа в момент времени t , обозначим его как $\delta A_i(t)$ и определим количественно по формуле:

$$\delta A_i(t) = \frac{A_i(t) - A_{i,\text{исх}}}{A_{i,\text{дон}} - A_{i,\text{исх}}} \quad (1)$$

Нетрудно заметить, что величина $\delta A_i(t)$ подобна величине относительной концентрации газа, которая в соответствии с [1] и принятыми нами обозначениями вычисляется по формуле:

$$a_i = A_i / A_{i,\text{дон}} \quad (2)$$

Для отдельных газов формула (2) практически не отличается от формулы (1) в условиях, когда исходное значение измерения принимается равным пороговой чувствительности хроматографа при измерении концентрации газов ($A_{i,0}$). Например, пороговая чувствительность измерения водорода согласно [1] должна быть не более $A_i = 5 \cdot 10^{-4} \% \text{ об.}$, а значение граничной концентрации водорода для трансформаторов 110-500кВ равно $A_{i,\text{дон}} = 1 \cdot 10^{-2} \% \text{ об.}$, т.е. значительно больше и, без нарушения общности, величиной $A_{i,0}$ можно пренебречь. Однако, для силовых трансформаторов напряжением 750 кВ величины $A_{i,\text{дон}} = 3 \cdot 10^{-3} \% \text{ об.}$ и соизмеримы с $A_{i,0} = 5 \cdot 10^{-4} \% \text{ об.}$. Более того, в реальных условиях эксплуатации и, в частности, при вводе трансформатора в работу после капитального ремонта, $A_{i,0} < A_{i,\text{исх}}$, а пренебрежение величиной $A_{i,\text{исх}}$ вносит существенную ошибку в результат сопоставления A_i . Необходимость учета начальных концентраций газов перед включением новых или прошедших ремонт трансформаторов отмечается и в п. 2.6 [1].

Наибольшее значение относительной концентрации газов определим по формуле:

$$\delta A_{\max}(t) = \max[\delta A_1(t); \delta A_2(t); \dots; \delta A_n(t)] \quad (3)$$

Следует отметить, что соотношение величин $\{\delta A_i(t)\}_n$, также как и величин $\{a_i\}_n$, справедливо в предположении о соответствии граничных значений $\{A_{i,\text{дон}}\}_n$, представленных в таблице 2 [1], предъявляемым требованиям. Однако в [1] отмечается ориентировочный характер $\{A_{i,\text{дон}}\}_n$; Здесь же приводится методика расчета $\{A_{i,\text{дон}}\}_n$ и отмечается необходимость расчета $\{A_{i,\text{дон}}\}_n$ для каждой энергосистемы. Заметим, что попытки определить индивидуальные значения $\{A_{i,\text{дон}}\}_n$ силовых трансформаторов в отдельной энергосистеме, когда число трансформаторов напряжением 110 кВ и выше исчисляется сотнями, приводит к тому, что при «механической» классификации данных измерения по отмеченным ранее признакам и их разновидностям число ХАРГ в большей части случаев составляет единицы. Решение этой задачи достигнуто применением алгоритма контроля значимости признаков и их разновидностей [2].

Интенсивность процесса изменения износа узлов силовых трансформаторов характеризуется изменением скорости нарастания концентрации газов в масле. По аналогии с неточностью сопоставления абсолютных $\{A_i\}_n$ и относительных $(a_i)_n$ значений концентрации газов в масле, недостаточно точно и сопоставление абсолютной и относительной скорости изменения $\{A_i(t)\}_n$, вычисляемых соответственно по формулам:

$$v_i(t_2) = \frac{A_i(t_2) - A_i(t_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (4)$$

$$\delta v_i(t_2) = \frac{v_i(t_2)}{A_i(t_1)} \quad (5)$$

Чтобы сопоставить скорости изменения концентрации газов, оценку скорости необходимо проводить по формуле:

$$v[\delta A_i(t_2)] = \frac{\delta A_i(t_2) - \delta A_i(t_1)}{(t_2 - t_1)} = \frac{A_i(t_2) - A_i(t_1)}{(A_{i,\text{дон}} - A_{i,\text{исх}})(t_2 - t_1)} \quad (6)$$

При этом наибольшая скорость изменения концентрации газов будет равна:

$$v[\delta A(t)]_{\max} = \max\{v[\delta A_1(t)]; v[\delta A_2(t)]; \dots; v[\delta A_n(t)]\} \quad (7)$$

Показатели $\delta A_{\max}(t)$ и $v[\delta A(t)]_{\max}$ безусловно важны, однако в отдельности недостаточно информативны. Действительно, при $\delta A_j(t) \ll [\delta A(t)]_{\max}$ и $v[\delta A_j(t)] = v[\delta A(t)]_{\max}$ по сравнению с $\delta A_i(t) = \delta A_{\max}(t)$ и $v[\delta A_i(t)] \ll v[\delta A(t)]_{\max}$, значимость j-го газа может оказаться выше, чем i-го газа. Поэтому, выявление основных газов целесообразно проводить путем сопоставления остаточного времени $\{\Delta T_i(t_k)\}_n$ в момент времени t_k , по истечению которого величина $\delta A(t)$ будет равна единице, по формуле:

$$\Delta T_i(t_k) = [1 - \delta A_i(t_k)] / v[\delta A_i(t_k)] \quad \text{с } i=1, n \quad (8)$$

Величина $\Delta T_i(t_k)$ по сути есть оценка времени до последующего контроля концентрации газов в масле силовых трансформаторов. Следовательно, последующий ХАРГ должен быть проведен за время, не превышающее:

$$\Delta T_{\text{дон}}(t_k) = \min\{\Delta T_1(t_k), \Delta T_2(t_k), \dots, \Delta T_n(t_k)\} \quad (9)$$

Оценка величины $\Delta T_{\text{дон}}(t_k)$ проводится при $\delta A_{\max}(t) < 1$. Если же $\delta A_{\max}(t) > 1$, то следует руководствоваться соответствующими рекомендациями по организации контроля изменения концентрации газов трансформаторного масла, представленными в [1].

Оценка технического состояния трансформаторов по суммарному (Σ) содержанию горючих газов в масле также проводится на основе показателей $\delta A_{\Sigma}(t)$; $v[\delta A(t)]_{\Sigma}$ и $\Delta T_{\Sigma}(t)$ с

той разницей, что вместо конкретного i -го газа рассматривается сумма горючих газов со своими значениями $A_{\Sigma,ucx}$, $A_{\Sigma,доп}$ и $A_{\Sigma}(t)$.

Опыт эксплуатации показывает, что характер износа силовых трансформаторов часто может быть установлен из соотношения концентрации газов H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 и C_2H_6 , а именно из соотношения $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$, $\frac{CH_4}{H_2}$ и $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$. С учетом того, что соотношение абсолютных значений отмеченных выше газов недостаточно объективно, повышение информативности физически объяснимых соотношений может быть достигнуто переходом к соотношениям соответствующих оценок $\delta A_i(t)$.

Практическая иллюстрация рекомендуемого подхода. Повышение информативности оценки технического состояния силовых трансформаторов на основе данных ХАРГ рассмотрим на конкретных примерах. Результаты ХАРГ и начальные условия для расчета показателей, характеризующих техническое состояние силовых трансформаторов приведены в таблице 1. Данные ХАРГ получены непосредственно после восстановления характеристик трансформаторного масла, а также через интервалы времени $\Delta T_1=6$ мес. и $\Delta T_2=4$ мес.

По этим данным необходимо оценить техническое состояние трансформатора и внести предложение о периодичности контроля. Как было отмечено выше, рассматривается случай, когда измеренные концентрации газов не превышают граничных значений. В таблице 2 приведены результаты расчетов относительного содержания концентрации газов (a_i), относительной скорости нарастания концентрации газов в масле ($v_{омн}$) и периодичность последующего контроля ($T_{o,i}$). В соответствии с данными табл.1 через шесть месяцев после капитального ремонта ($\Delta T_1=6$ мес.) концентрация всех газов возросла и почти для всех газов $v_{омн} > 10\%$ мес.

Особенно заметно изменение для CO_2 , CO и C_2H_6 . Значения оценок периодичности контроля свидетельствуют о том, что повторный ХАРГ необходимо выполнить не позже чем через две недели (0,43 мес.). Нельзя не обратить внимание на следующий факт: условию $v_{омн} > 10\%$ мес. может соответствовать периодичность контроля T_o , превышающая периодичность контроля для $v_{омн} < 10\%$ в мес., что свидетельствует об относительной значимости скорости $v_{омн}$, как критерия контроля технического состояния трансформатора. По данным первого контрольного измерения можно заключить: поскольку заметно возросла концентрация CO и CO_2 , следует предположить перегрев твердой изоляции; основными горючими газами являются C_2H_2 и H_2 . По данным второго измерения (через $\Delta T=4$ мес.) вытекает предположение о возможном термическом нагреве масла в интервале $(150-300)^0C$.

Обратимся к данным таблицы 3, в которой приводятся результаты расчетов $\delta A_i(t)$, $v[\delta A(t)]_i$ и ΔT . Нетрудно заметить, что соотношение между $a_i(t)$ с $i=1,7$ и $\delta A_i(t)$ практически неизменно. Причем как и следовало ожидать, $a_i(t) > \delta A_i(t)$ с $i=1,7$, поскольку $a_i(t) = A_i(t) / A_{i,доп}$, а $\delta A_i(t) = [A_i(t) - A_{i,ucx}] / (A_{i,доп} - A_{i,ucx})$. Скорости изменения концентрации газов не превышают 10%об. мес., срок до очередного испытания трансформатора равен 4 мес.

Данные очередного ХАРГ, проведенного через 4мес., подтвердили это предположение. Относительная скорость изменения концентраций CO и CO_2 снизились с 30 и 58,3% мес. (см.табл.2) до, соответственно, 7,7 и 10,5% в мес. По данным табл. 3. также наблюдается снижение скорости $v_{омн}$ для CO и CO_2 , но в значительно меньшей степени. Это соотношение позволяет заключить, что выдвинутое ранее по данным табл.2 предположение о возможном перегреве твердой изоляции ошибочно.

Через 10 месяцев эксплуатации данные ХАРГ (см. табл.2) свидетельствуют, что относительная скорость изменения:

- концентрации C_2H_6 и C_2H_4 , характеризующих нагрев масла и бумажно-масляной изоляции не изменилась;

- концентрации C_2H_2 , возникающего при искрении, электрической дуге или нагреве выше $700^{\circ}C$, уменьшилась более чем в три раза;
- концентрации H_2 возросла в 1,5 раза;
- концентрации CH_4 возросла почти в 4 раза.

При этих скоростях периодичность требуемого контроля равна 0,53 мес., а для суммы концентраций горючих газов 2,5 мес.

Данные табл.3 свидетельствуют о том, что через 10 месяцев работы скорость изменения износа по данным о концентрации C_2H_6 , C_2H_4 и H_2 возросла почти в два раза, CH_4 - в шесть раз, а C_2H_2 - уменьшилась в два раза. При этом срок до очередного испытания, обусловленный превышением концентрации водорода допустимого значения, составляет 1,4 месяца.

Сопоставление критерия граничных концентраций по сумме горючих газов и критериев, в основе которых находятся конкретные газы, свидетельствует о том, что с точки зрения оперативности распознавания возможности возникновения дефектов, вторая группа критериев более предпочтительна.

Заключение.

1. Предложен метод расчета показателей, характеризующих концентрацию растворенных в трансформаторном масле газов. Физическая обоснованность формул обуславливает объективность расчета.
2. Показано, что:
 - 2.1. Основные газы наиболее объективно определяются по показателю, характеризующему интервал времени до проведения очередного ХАРГ. Газ следует считать основным, если этот интервал времени у него наименьший;
 - 2.2. Оценка граничных значений концентраций растворенных в трансформаторном масле газов для отдельных энергосистем (или регионов) при «механической» классификации данных ХАРГ по множеству эксплуатационных факторов и их разновидностей, практически невозможна. Эти показатели могут быть рассчитаны при разработанной авторами методике оценки статистической значимости рассматриваемых признаков и их разновидностей.
 - 2.3. Существенная зависимость достоверности наличия дефектов силовых трансформаторов, устанавливаемого по данным ХАРГ, от эксплуатационных факторов, обуславливает необходимость рассмотрения автоматизированных систем обработки данных ХАРГ, как подсистем компьютерного анализа технического состояния трансформаторов, систематизирующего и обобщающего информацию об условиях эксплуатации, отказах, испытаниях и плановых ремонтах.

-
1. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. РД 153-34.0-46.302-00.– М.:
 2. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Повышение точности оценки показателей индивидуальной надежности энергоблоков. Электронное моделирование, 2007, т.29, № 5, 75-84 с.

Таблица 1

Данные ХАРГ и начальные условия

Наименование газа	Пороговая чувствительность измерения (% об)	Граничные (предельно-допустимые) значения концентраций (% об)	Данные ХАРГ (% об.)		
			После кап. ремонта	Контрольные измерения	
				$\Delta T_1 = 6$ мес.	$\Delta T_2 = 4$ мес.
Водород (H ₂)	$5 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,004	0,006	0,009
Метан (CH ₄)	$1 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,002	0,03	0,07
Ацетилен (C ₂ H ₂)	$5 \cdot 10^{-5}$	0,001	0,0005	0,0008	0,0009
Этилен (C ₂ H ₄)	$5 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,003	0,005	0,006
Этан (C ₂ H ₆)	$1 \cdot 10^{-4}$	0,005	0,001	0,002	0,0035
Оксид углерода (CO)	$1 \cdot 10^{-3}$	0,06	0,015	0,042	0,054
Диоксид углерода (CO ₂)	$2 \cdot 10^{-3}$	0,8	0,1	0,45	0,64
Сумма горючих газов	$5 \cdot 10^{-5}$	0,25	0,0255	0,0588	0,0804

Таблица 2

Результаты расчетов показателей концентраций газов, растворенных в масле силовых трансформаторов в соответствии с [1]

Наименование газа	После капитального ремонта	Контрольные измерения					
		$\Delta T_1 = 6$ мес.			$\Delta T_2 = 4$ мес.		
		Относительная концентрация газа (% об.)	Относительная скорость изменения концентраций газа (% мес.)	Периодичность контроля (мес.)	Относительная концентрация газа (% об.)	Относительная скорость изменения концентрации газа (% мес.)	Периодичность контроля (мес.)
H ₂	0,4	0,6	8,25	7,5	0,9	12,5	3,3
CH ₄	0,2	0,3	8,5	14,7	0,7	33,3	2,5
C ₂ H ₂	0,5	0,8	10	5,0	0,9	3,1	10,0
C ₂ H ₄	0,3	0,5	11	7,5	0,8	10,0	5,0
C ₂ H ₆	0,2	0,4	17	14,7	0,7	18,8	6,7
CO	0,25	0,7	30	5,6	0,9	7,7	8,3
CO ₂	0,13	0,56	58,3	0,43	0,8	10,5	0,53

Таблица 3

Результаты расчетов показателей концентраций газов по данным ХАРГ (рекомендуемый метод)

Наименование газа	Контрольные измерения					
	$\Delta T_1 = 6$ мес.			$\Delta T_2 = 4$ мес.		
	Относительная концентрация газа (о.е.)	Скорость изменения концентрации газа (% мес.)	Срок до возникновения дефекта (мес.)	Относительная концентрация газа (о.е.)	Скорость изменения концентрации газа (% мес.)	Срок до возникновения дефекта (мес.)
H ₂	0,33	5,5	12,0	0,83	12,5	1,4
CH ₄	0,13	2,1	42,0	0,63	12,5	3,0
C ₂ H ₂	0,6	10	4,0	0,80	5,0	4,0
C ₂ H ₄	0,29	4,8	15,0	0,72	10,8	2,6
C ₂ H ₆	0,25	4,2	18,0	0,58	8,1	5,2
CO	0,6	10	4,0	0,87	6,8	1,9
CO ₂	0,5	8,3	6,0	0,79	7,2	2,9
Сумма горючих газов	0,43	1,2	8,0	0,77	6,1	3,8

GÜC TRANSFORMATORLARININ NASAZ VƏZİYYƏTİNİN YARANMASI VAXTININ PROQNOZLAŞDIRILMASI

FƏRXADZADƏ E.M., MURADƏLİYEV A.Z., RƏFİYEVƏ T.K, ISMAYILOVA S.M.

Yagda həll olunmuş qazların xromatoqrafik analizlərinin verilənlərə əsasən güc transformatorlarının nasaz vəziyyətinin yaranması vaxtının proqnozlaşdırılmasının metodu təklif olunur. Təvsiyyə edilən alqoritm yagda həll olunmuş qazların ilkin mərhələsindəki aşınmanın dəyişməsi eynitipli göstəricilərinin müqayisəsinin obyektivliyini qaldırmaya imkan verir. Göstərilir ki, əsas göstərici kimi qüsurun aşkar edilməsi müddətinə qədər olan interval götürülür.

PREDICTION THE TIME OF ORIGINATING FAILURE CONDITION OF POWER TRANSFORMERS

FARHADZADEH E.M., MURADALIYEV A.Z., RAFIYEVA T.K, ISMAYILOVA S.M.

The method of prediction of originating of failure condition of power transformers according to a stereographic analysis of the gases diluted in oil is offered. The recommended algorithm will allow boosting objectivity of comparison the same type indexes the gases diluted in oil on an initial stage of variation a wear. It is displayed, that it is necessary to consider as the fundamental index a rated time interval before originating defect