

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-403-416>

УДК 621.019

Повышение эффективности диагностики состояния силовых трансформаторов

А. З. Мурадалиев¹⁾, С. М. Исмаилова¹⁾

¹⁾Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский
институт энергетики (Баку, Азербайджанская Республика)

Реферат. В последние годы понимание эффективности технической диагностики электрооборудования существенно возросло. Основными причинами этого является то, что более половины парка эксплуатируемого оборудования выработало расчетный ресурс, а темпы старения оборудования превышают темпы его обновления вследствие ограниченности средств на техническое обслуживание и из-за перехода на ремонты по техническому состоянию. Качественно и своевременно проведенное диагностирование повышает объективность оценки технического состояния высоковольтного электрооборудования. Все это позволяет планировать и своевременно проводить необходимые операции технического обслуживания и ремонта, что делает надежнее эксплуатацию электрооборудования, продлевает ресурс его работы, экономит средства, снижает риски ущербов. Одним из факторов, влияющих на эффективность диагностики состояния электрооборудования, является ощутимый дефицит квалифицированных специалистов в области технической диагностики. Разработан метод оценки момента возникновения изменения роста концентрации растворенных в масле газов, позволяющий установить наличие развивающегося дефекта трансформатора, основные газы, вероятный тип дефекта и характер его проявления. Предлагаются метод и алгоритм прогнозирования времени возникновения неисправного состояния силовых трансформаторов по данным хроматографического анализа газов, растворенных в масле трансформатора (ХАРГ). Рекомендуемый алгоритм для расчета времени возникновения дефекта, интенсивности и длительности воздействия эксплуатационных факторов на изменение концентрации растворенных газов по данным ХАРГ позволит повысить объективность сопоставления однотипных показателей растворенных в масле газов на начальной стадии изменения износа. Предлагаемая методика оценки статистической значимости рассматриваемых признаков и их разновидностей позволяет обеспечить объективность расчета этих показателей. Установлено, что основным показателем следует считать расчетный интервал времени до возникновения дефекта.

Ключевые слова: трансформатор, диагностика, техническое состояние, хроматографический анализ, дефект, время возникновения, интенсивность, длительность

Для цитирования: Мурадалиев, А. З. Повышение эффективности диагностики состояния силовых трансформаторов / А. З. Мурадалиев, С. М. Исмаилова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 403–416. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-403-416>

Адрес для переписки

Мурадалиев Айдын Зураб оглы
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики
просп. Гасанбек Зардаби, 94
AZ1012, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +99450 680-40-93
aydin_murad@yahoo.com

Address for correspondence

Muradaliyev Aydin Zurab oglu
Azerbaijan Scientific-Research
and Design-Prospecting Institute of Energetic
94, Hasanbek Zardabi Ave.,
AZ1012, Baku, Azerbaijan Republic
Tel.: +99450 680-40-93
aydin_murad@yahoo.com

Increasing the Efficiency of Power Transformer Condition Diagnostics

A. Z. Muradaliyev¹⁾, S. M. Ismailova¹⁾

¹⁾Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Institute of Energetic
(Baku, Azerbaijan Republic)

Abstract. In recent years, the understanding of the efficiency of technical diagnostics of electrical equipment has increased significantly. The main reasons for this are that more than half of the equipment in operation has exhausted its estimated service life; the rate of equipment aging exceeds the rate of its renewal due to limited funds for technical maintenance, as well as due to the transition to repairs based on technical condition. High quality and timely diagnostics improve the objectivity of assessing the technical condition of high-voltage electrical equipment. All this allows planning and timely execution of necessary maintenance and repair operations, which makes the operation of electrical equipment more reliable, extends its service life, saves money, and reduces the risk of damage. One of the factors influencing the efficiency of diagnostics of the condition of electrical equipment is the noticeable shortage of qualified specialists in the field of technical diagnostics. A method for assessing the moment of occurrence of a change in the growth of concentration of gases dissolved in oil has been developed, which allows to establish the presence of a developing transformer defect, the main gases, the probable type of defect and the nature of its manifestation. A method and algorithm for predicting the time of occurrence of a faulty state of power transformers based on data of chromatographic analysis of gases (CADG) dissolved in transformer oil are proposed. The recommended algorithm for calculating the time of occurrence of a defect, the intensity and duration of the impact of operational factors on the change in the concentration of dissolved gases according to the CADG data will improve the objectivity of comparing similar indicators of gases dissolved in oil at the initial stage of wear changes. The proposed methodology for assessing the statistical significance of the considered features and their varieties allows us to ensure the objectivity of calculating these indicators. It has been established that the main indicator should be considered the calculated time interval before the defect occurs.

Key words: transformer, diagnostics, technical condition, chromatographic analysis, defect, time of occurrence, intensity, duration

For citation: Muradaliyev A. Z., Ismailova S. M. (2025) Increasing the Efficiency of Power Transformer Condition Diagnostics. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 403–416. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-403-416> (in Russian)

Введение

Одним из факторов, влияющих на развитие энергетической отрасли, является нарастающая доля оборудования, срок службы которого превышает нормативный [1]. Увеличение промышленного производства приводит к росту энергопотребления, а следовательно, и к увеличению количества негативных внешних воздействий (перегрузок, перенапряжений и т. д.) [2].

В совокупности с износом это способствует определенному росту числа аварий и отказов оборудования. В этих условиях повышение эффективности диагностики состояния электротехнического оборудования предполагает разработку новых подходов и методов оценки его технического состояния, развитие системы диагностики, которая предполагается в виде четкой техниче-

ской стратегии по выявлению дефектов электрооборудования и прогнозированию их развития [3, 4]. Существенный вклад в совершенствование системы анализа результатов измерения диагностических показателей внесли исследования [5], ориентированные на использование экспертных систем.

Технология оценки состояния маслонеполненного электрооборудования предполагает использование любой информации об объекте на любом этапе его жизненного цикла. При этом для оценки состояния трансформаторов используются результаты: всех видов межремонтных испытаний; периодических и внеочередных осмотров; тепловизионного контроля; проверки коэффициента трансформации; проверки группы соединений обмоток и т. д.

В то же время при оценке состояния высоковольтных вводов анализируется информация, которая вводится по результатам проведения таких видов испытаний, как: хроматографический анализ масла (ХАРГ); измерение параметров изоляции под рабочим напряжением; физико-химический анализ масла; тепловизионный контроль и т. д. [6].

Важным результатом является выдача рекомендаций по итогам анализа состояния оборудования, которые могут быть сгруппированы как:

- диагностические, которые направлены на уточнение вида дефекта и связаны с проведением новых испытаний;
- текущие, которые призваны уменьшить отрицательное воздействие возможных дефектов, т. е. обеспечить работоспособное состояние оборудования или предотвратить аварию.

Данный подход направлен на оценку состояния не только объекта управления, но и субъекта управления, т. е. на подготовку оперативного и ремонтного персонала. Основное внимание акцентируется на трех направлениях: обеспечении надлежащего уровня подготовки оперативного, ремонтного и инженерно-технического персонала; обеспечении персонала нормативно-технической документацией; организации обслуживания, контроля и оценки состояния оборудования, планирования и проведения ремонтно-технического обслуживания. Решение этих задач основывается на применении алгоритма контроля значимости признаков и их разновидностей [7].

Одной из основных задач диагностики технического состояния оборудования энергосистем является оценка времени возникновения дефекта и длительности его развития до уровня, при котором вероятность повреждения достаточно велика. Отсутствие этой информации приводит к тому, что периодичность и объем испытаний оборудования регламентируются как детерминированные величины, т. е. величины, не зависящие от технического состояния оборудования.

В определенной мере решение вопроса о сроках проведения испытания и ремонта достигается оценкой остаточного срока службы до отказа работоспособности (ΔT_c^*). Оценка этой величины в соответствии с [8] проводится по формуле

$$\Delta T_c(t_k) = \min \Delta T_{c,1}(t_k); \Delta T_{c,2}(t_k); \dots; \Delta T_{c,m}(t_k), \quad (1)$$

$$\Delta T_{c,j}^*(t_k) = \frac{1 - I_{z_j}(t_k)}{V[I_{z_j}(t_k)]}, \quad (2)$$

где t_k – дата контрольного испытания; m – число показателей, характеризующих техническое состояние оборудования; $I_{z_j}(t_k)$ – величина износа j -го материала в момент t_k , вычисляется по выражению

$$I_{z_j}(t_k) = \frac{P_j(t_k) - P_{j,0}}{P_{j,\text{доп}} - P_{j,0}}, \quad j = 1, m; \quad (3)$$

$P_j(t_k)$ – условное обозначение количественной оценки j -го показателя в момент времени t_k ; $P_{j,0}$ и $P_{j,\text{доп}}$ – исходные и предельно допустимые значения j -го показателя; $V[I_{z_j}(t_k)]$ – скорость изменения значения j -го показателя в момент t_k , рассчитывается по формуле

$$V[I_{z_j}(t_k)] = \frac{I_{z_j}(t_k) - I_{z_j}(t_{k-1})}{(I_{j,\text{доп}} - I_{j,\text{исх}})(t_k - t_{k-1})}, \quad (4)$$

где t_{k-1} – момент предшествующего испытания.

Вопрос о времени возникновения дефекта остается открытым во многом потому, что нет четкой количественной интерпретации понятия «дефект». Несмотря на ряд формулировок, в них недостаточно отображалась физическая суть процесса. Кратко рассмотрим физическую суть процесса развития дефекта.

Известно, что в процессе эксплуатации оборудования происходит монотонное ухудшение электрических, электромагнитных, тепловых, механических и прочих свойств элементов конструкции. Закономерности изменения этого процесса достаточно сложны, включают непрерывную и дискретную составляющие, определяются многими эксплуатационными факторами.

На определенном этапе износа, когда ресурс бездефектности (или «порог чувствительности») преодолен, начинают проявляться «слабые звенья» материалов. Эти «слабые звенья» называют, как правило, местными дефектами. Проявляются они в том, что скорость износа материала существенно возрастает [9]. Число дефектов и их разновидности зависят от срока службы оборудования (T_c) и, без сомнения, увеличиваются по мере роста T_c . Подтверждением тому является опыт осмотра оборудования, отключенного для проведения капитального ремонта.

Таким образом, под временем возникновения дефекта будем понимать момент, начиная с которого скорость износа оборудования возрастает. Практическую реализацию этого подхода рассмотрим на примере изменения технического состояния силовых трансформаторов. 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 [6]. В этой связи совершенствование методов оценки и прогнозирования состояния оборудования по результатам анализа и систематизация накопленных данных ХАРГ имеют 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 $\{A_{i, \text{доп}}\}_n$, $A_{\Sigma, \text{доп}}$ или интервалами возможных значений (для отношения концентрации отдельных газов), широко применяются критерии, основанные на сопоставлении скорости изменения $[v(A_i)]_n$, $v(A_\Sigma)$ с допустимыми значениями. Превышение хотя бы одного из измеренных значений $\{A_i\}_n$ соответствующих допустимых величин $\{A_{i, \text{доп}}\}_n$, или скорости их изменения величины 10 % об, свидетельствует о возможности возникновения дефекта и необходимости выявления причин указанных превышений.

Выявляемые по данным ХАРГ дефекты в основном относятся к группе дефектов, наличие которых практически сказывается на показателях надежности и эффективности работы трансформаторов в межремонтном периоде. Особенностью диагностики технического состояния трансформаторов по данным ХАРГ является также и то, что существенное увеличение концентрации анализируемых газов часто возникает на бездефектных трансформаторах. Эти изменения обусловлены, как правило, воздействием ряда эксплуатационных факторов [10]. 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 реги-

страции всех работ и событий, приводящих к изменению состава и объема масла трансформаторов. Воздействие ряда эксплуатационных факторов достаточно полно выявляется по данным физико-химического анализа масла (ФХАМ). Поэтому целесообразно изменение данных ХАРГ сопоставлять с изменением данных ФХАМ.

Процесс изменения концентрации растворенных в масле газов в реальных условиях существенно отличается от «лабораторных» моделей, когда для фиксированного типа дефекта (электрический разряд или нагрев) и характера их проявления исследуется соотношение выделяемых в масле газов. В реальных условиях газы выделяются также в результате старения изоляции трансформаторов, воздействия перенапряжений, сквозных токов короткого замыкания, изменения нагрузки и многих других эксплуатационных факторов. Интенсивность этого процесса существенно возрастает при возникновении одного из многих возможных дефектов.

Важным условием повышения достоверности анализа данных ХАРГ является совершенствование методологии расчета показателей, характеризующих техническое состояние трансформатора.

Рассмотрим некоторые особенности обработки данных ХАРГ [11, 12].

Опыт эксплуатации показывает, что заслуживающее внимания изменение концентрации растворенных в масле газов наиболее часто проявляется в превышении скорости изменения относительной концентрации газа допустимой величины $V[\delta A(t)]_{\text{доп}}$. Такой трансформатор берется на контроль, и через 1–2 недели проводится контрольный ХАРГ.

Известные рекомендации по оценке $V[\delta A(t)]_{\text{доп}}$ основываются на приведении абсолютной скорости нарастания i -го газа в момент t_{j+1} к предшествовавшему значению (в момент t_j) концентрации этого газа по формуле

$$V_{\text{отн}}(t_{j+1}) = \frac{A(t_{j+1}) - A(t_j)}{A(t_j) \cdot \Delta T_{j+1}} \cdot 100 \quad (\% \text{ в мес.}), \quad (5)$$

что ограничивает возможность анализа динамики изменения $V_{\text{отн}}(t)$.

Чтобы преодолеть эту трудность, рекомендуется расчеты скорости изменения относительной концентрации i -го газа выполнять по формуле

$$V[\delta A(t_{j+1})] = \frac{\delta A_i(t_{j+1}) - \delta A_i(t_j)}{\Delta T_{j+1}} = \frac{A_i(t_{j+1}) - A_i(t_j)}{A_{i,\text{гр}} \Delta T_{j+1}}, \quad (6)$$

где $\Delta T_{j+1} = (t_{j+1} - t_j)$.

При этом предполагается, что верхнее граничное (допустимое) значение $V[\delta A_i(t)]_{\text{доп}} \leq 10 \%$, что исключает различие требований к $V[\delta A_i(t)]$ в момент t_j и t_{j+k} и условия $V_{\text{отн}}(t) < 10 \%$ вследствие эффекта монотонного увеличения скорости.

Если в результате обработки данных контрольного ХАРГ установлено, что скорость нарастания газа еще более увеличилась, то при сохранении предположения о линейном характере изменения относительной концентрации газа в масле силовых трансформаторов оценка момента изменения скорости может быть выполнена решением следующего уравнения:

$$\delta A_i(t_k) = V[\delta A_i(t_{j+1})](t_x - t_j) = \delta A_i(t_{j+3}) - V[\delta A_i(t_{j+3})](t_{j+3} - t_x), \quad (7)$$

где $i = 1, 7$; $t_x - t_j = \Delta T_x$; $t_{j+1} - t_j = \Delta T_1$; $t_{j+2} - t_{j+1} = \Delta T_2$; $t_{j+3} - t_{j+2} = \Delta T_3$;
 $t_{j+3} - t_x = \sum_{v=1}^3 \Delta T_v - \Delta T_x$; $V[\delta A_i(t_{j+1})]$ и $V[\delta A_i(t_{j+3})]$ – скорости изменения относительной концентрации газа в моменты t_{j+1} и t_{j+3} .

В рассмотрение вводим показатель относительной концентрации i -го газа в момент $t_j - \delta A_i(t_j)$. Количественно он определяется по формуле

$$\delta A_i(t_j) = \frac{A_i(t_j) - A_{i,исх}}{A_{i,доп} - A_{i,исх}}, \quad (8)$$

где $A_{i,исх}$ и $A_{i,доп}$ – соответственно исходное и допустимое (граничное) значения концентрации i -го газа.

Наибольшее значение относительной концентрации газов определим по формуле

$$A \delta A_{\max}(t) = \max[\delta A_1(t_1); \delta A_2(t_2); \dots; \delta A_n(t_n)]. \quad (9)$$

Интенсивность процесса изменения износа узлов силовых трансформаторов характеризуется скоростью изменения нарастания концентрации газов в масле. Чтобы сопоставить скорости изменения концентрации газов, оценку скорости необходимо проводить по выражению

$$v[\delta A_i(t_2)] = \frac{\delta A_i(t_2) - \delta A_i(t_1)}{(t_2 - t_1)} = \frac{A_i(t_2) - A_i(t_1)}{(A_{i,доп} - A_{i,исх})(t_2 - t_1)}. \quad (10)$$

При этом наибольшая скорость изменения концентрации газов будет равна

$$v[\delta A(t)]_{\max} = \max\{v[\delta A_1(t)]; v[\delta A_2(t)], \dots, v[\delta A_n(t)]\}. \quad (11)$$

Показатели $\delta A_{\max}(t)$ и $v[\delta A(t)]_{\max}$, безусловно, важны, однако в отдельности недостаточно информативны. Поэтому выявление основных газов целесообразно проводить путем сопоставления остаточного времени $\{\Delta T_i(t_k)\}_n$ в момент времени t_k , по истечении которого величина $\delta A(t)$ будет равна единице, по формуле

$$\Delta T_i(t_k) = [1 - \delta A_i(t_k)] / v[\delta A_i(t_k)], \quad i = 1, n. \quad (12)$$

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

$$\Delta T_{\text{доп}}(t_k) = \min\{\Delta T_1(t_k), \Delta T_2(t_k), \dots, \Delta T_n(t_k)\}. \quad (13)$$

Оценка величины $\Delta T_{\text{доп}}(t_k)$ проводится при $\delta A_{\text{max}}(t) < 1$. Если же $\delta A_{\text{max}}(t) > 1$, то следует руководствоваться соответствующими рекомендациями по организации контроля изменения концентрации газов трансформаторного масла, представленными в [6].

На рис. 1 приведена графическая иллюстрация сущности величины t_x (момент изменения скорости относительной концентрации газа) и рекомендуемая последовательность ее оценки.

Решив уравнение (7) относительно t_x , получим

$$t_x = t_j + \Delta T_x = t_j + \frac{V[\delta A_i(t_{j+3})] \sum_{v=1}^3 \Delta T_v - \delta A_i(t_{j+3})}{V[\delta A_i(t_{j+3})] - V[\delta A_i(t_{j+1})]}. \quad (14)$$

Как следует из рис. 1, реальный процесс изменения относительной величины концентрации i -го газа соответствует маршруту $acde$, а регистрируемый по данным ХАРГ – маршруту $abde$.

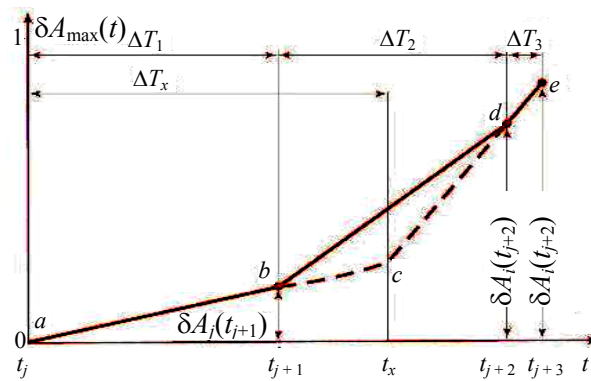


Рис. 1. Графическая иллюстрация алгоритма оценки величины t_x

Fig. 1. Graphic illustration of the algorithm for estimating the value of t_x

Пример 1. В табл. 1 приведены данные о значениях концентрации метана (CH_4), по данным ХАРГ, соответственно через $\Delta T_1 = 6$ мес., $\Delta T_2 = 5$ мес. и $\Delta T_3 = 0,25$ мес. после капитального ремонта силового трансформатора.

В табл. 2 даны результаты расчетов показателей относительной концентрации $\delta A(t_j)$ и скорости изменения концентрации $V[\delta A(t_j)]$ соответственно по формулам (8) и (10).

Целью контрольного ХАРГ был анализ влияния увеличения нагрузки трансформатора на концентрацию растворенных в трансформаторном масле газов.

Таблица 1

Сведения о концентрации метана в пробах трансформаторного масла (% об)

Information on methane concentration in transformer oil samples (% vol)

После капитального ремонта, % об	Контрольные измерения		
	$\Delta T_1 = 6$ мес., % об	$\Delta T_2 = 5$ мес., % об	$\Delta T_3 = 0,25$ мес., % об
0,0015	0,0025	0,0075	0,0085

Таблица 2

Результаты расчетов показателей изменения концентрации метана

Results of calculations of indicators pertaining to changes in methane concentration

$\Delta T_1 = 6$ мес.		$\Delta T_2 = 5$ мес.		$\Delta T_3 = 0,25$ мес.	
$\delta C(t_1)$, о. е.	$V[\delta C(t_1)]$, % мес.	$\delta C(t_2)$, о. е.	$V[\delta C(t_2)]$, % мес.	$\delta C(t_3)$, о. е.	$V[\delta C(t_3)]$, % мес.
0,117	1,950	0,706	11,800	0,823	46,800

Как следует из табл. 2, при контрольном измерении концентрации метана в пробе трансформаторного масла установлено существенное увеличение $V[\delta A(t_j)]$ по сравнению со скоростью изменения в первые 6 месяцев эксплуатации ($46,8/1,95 = 24$ раза). Анализ эксплуатационных факторов показал, что в этот момент времени отмечено подключение нового потребителя к подстанции и увеличение нагрузки силового трансформатора.

В соответствии с формулой (14) и данными табл. 2 определим величину ΔT_x

$$\Delta T_x = \frac{(46,8 \cdot 11,25)10^{-2} - 0,823}{(46,8 - 1,95)10^{-2}} = 9,9 \text{ мес.}$$

Как известно, изменение $\delta A(t)$ происходит не только из-за развивающихся дефектов силовых трансформаторов, но и вследствие воздействия ряда эксплуатационных факторов. Одни факторы приводят к увеличению концентраций растворенных газов в масле (к ним относятся: увеличение нагрузки, доливка масла, бывшего в эксплуатации и содержащего растворенные газы, и т. д.), другие же – к уменьшению концентрации растворенных газов (например, замена силикогеля, дегазация масла и др.).

На практике значительный интерес представляют вопросы о величине и длительности изменения $\delta A(t)$. Графическая иллюстрация процесса изменения $\delta A(t)$ приведена на рис. 2а и 2б.

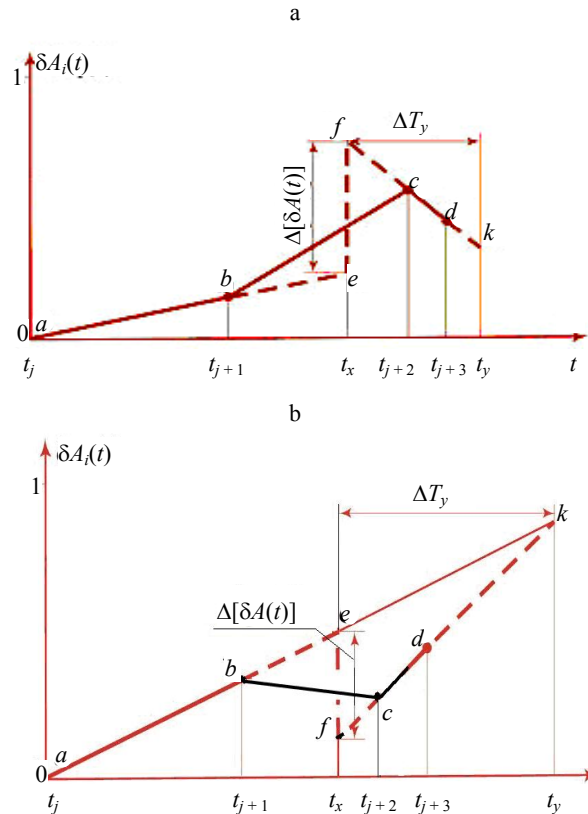


Рис. 2. Графическая иллюстрация изменения $\delta A(t)$ при воздействии эксплуатационных факторов, вызывающих: а – увеличение $\delta A(t)$; б – уменьшение $\delta A(t)$

Fig. 2. Graphic illustration of changes $\delta A(t)$ under the influence of operational factors causing: a – increase $\delta A(t)$; b – decrease $\delta A(t)$

Из этих графиков наглядно видно, что действительная закономерность изменения $\delta A(t)$ существенно отличается от кусочно-линейной кривой, построенной по данным ХАРГ. Так, на рис. 2а показано совмещение двух процессов изменения $\delta A(t)$. Первый из них связан с естественным старением изоляции, изменением ее диэлектрических свойств, теплопроводности, механической прочности. Второй процесс обусловлен эксплуатационным фактором, вызывающим в момент t_x увеличение $\delta A(t)$ масла трансформаторов. Действительная закономерность изменения $\delta A(t)$ характеризуется маршрутом $abefcd$, а формируемая по данным ХАРГ – маршрутом $abcd$.

Аналогичное заключение может быть сделано и по данным рис. 2б. На этом рисунке на процесс монотонного (линейного) изменения $\delta A(t)$ накладывается процесс изменения $\delta A(t)$ вследствие воздействия, вызывающего резкое уменьшение $\delta A(t)$.

Чтобы рассчитать величину $\delta A(t)$ в результате некоторого воздействия, воспользуемся уравнениями прямых, проходящих через точки a и b , c и d , имеющими соответственно вид:

$$\delta A(t) = V[\delta A(t_{j+1})]t; \quad (15)$$

$$\delta A(t) = V[\delta A(t_{j+3})](t - t_{j+2}) + \delta A(t_{j+2}). \quad (16)$$

Если обозначим величину относительной концентрации растворенных в масле газов до воздействия в момент t_x некоторого эксплуатационного фактора через $\delta A(t_x)$, то в соответствии с уравнением (14)

$$\delta A(t_x) = V[\delta A(t_{j+1})] \cdot t_x$$

и графически иллюстрируется отрезком прямой, соединяющей точки t_x и e .

После воздействия этого фактора относительная концентрация газов, растворенных в трансформаторном масле, практически мгновенно изменяется, и в соответствии с уравнением (15) становится равной

$$\delta A(t_x) = V[\delta A(t_{j+3})](t_x - t_{j+2}) + \delta A(t_{j+2}), \quad (17)$$

и графически отображается отрезком прямой, соединяющей точки t_x и f .

В соответствии с рис. 2 величина воздействия эксплуатационного фактора отображается отрезком прямой fe , который для рис. 2а вычисляется как разность отрезков $t_x f$ и $t_x e$ по формуле

$$\Delta_1[\delta A(t_x)] = V[\delta A(t_{j+3})] \cdot (t_x - t_{j+2}) + \delta A(t_{j+2}) - V[\delta A(t_{j+1})] t_x, \quad (18)$$

а для рис. 2б вычисляется как разность отрезков $t_x e$ и $t_x f$ по формуле

$$\Delta_2[\delta A(t_x)] = V[\delta A(t_{j+1})] \cdot t_x - V[\delta A(t_{j+3})](t_x - t_{j+2}) - \delta A(t_{j+2}). \quad (19)$$

Таким образом:

$$\Delta[\delta A(t_x)] = \Delta_1[\delta A(t_x)] = -\Delta_2[\delta A(t_x)]. \quad (20)$$

Завершение изменения величины $\delta A(t)$, обусловленной воздействием эксплуатационного фактора, происходит в момент времени t_y , который, исходя из уравнений (12) и (13), вычисляется по формуле

$$t_y = \frac{\delta A(t_{j+2}) - V[\delta A(t_{j+3})]t_{j+2}}{V[\delta A(t_{j+1})] - V[\delta A(t_{j+3})]}, \quad (21)$$

а длительность изменения относительной концентрации газов в трансформаторном масле бездефектного трансформатора определяется по выражению

$$\Delta T_y = t_y - t_x. \quad (22)$$

Анализ графиков рис. 2 свидетельствует о том, что возникновение внезапного изменения (увеличения или уменьшения) $\delta A(t)$ вследствие воздействия эксплуатационных факторов приводит к снижению скорости $V[\delta A(t)]$ на интервале $[t_{j+2}; t_{j+3}]$ (при повышении $\delta A(t)$) или увеличению скорости на интервале $[t_{j+1}; t_{j+2}]$ (при снижении $\delta A(t)$), и может рассматриваться как диагностический признак причин изменения $\delta A(t)$. Заметим, что при наличии дефектов силового трансформатора скорость изменения $\delta A(t)$ удовлетворяет условию

$$V[\delta A(t_j)] \leq V[\delta A(t_{j+1})] \leq V[\delta A(t_{j+2})], \text{ где } t_j < t_{j+1} < t_{j+2}. \quad (23)$$

Оценка величины $\Delta T_{\text{доп}}(t_k)$ проводится при $\delta A_{\text{max}}(t) < 1$. Если же $\delta A_{\text{max}}(t) > 1$, то следует руководствоваться соответствующими рекомендациями по организации контроля изменения концентрации газов трансформаторного масла, представленными в [6].

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 $A_{\Sigma, \text{исх}}$, $A_{\Sigma, \text{доп}}$ 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 $\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$,

$$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2} \text{ и } \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}.$$

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 $\delta A_i(t)$.

ВЫВОДЫ

1. Техническое состояние силовых трансформаторов в значительной степени зависит от воздействующих эксплуатационных факторов. Рекомендуемые формулы для расчета времени возникновения дефекта (ΔT_x), интенсивности $\Delta[\delta(t)]$ и длительности (ΔT_y) воздействия эксплуатационных факторов на изменение концентрации растворенных газов по данным

ХАРГ позволяют повысить объективность анализа технического состояния силовых трансформаторов.

2. Предложен метод расчета показателей, характеризующих концентрацию растворенных в трансформаторном масле газов. Физическая обоснованность формул обуславливает объективность расчета.

3. 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.

4. Оценка граничных значений концентраций растворенных в трансформаторном масле газов при «механической» классификации данных ХАРГ по множеству эксплуатационных факторов и их разновидностей представляет определенную сложность. Предлагаемая методика оценки статистической значимости рассматриваемых признаков и их разновидностей позволяет обеспечить объективность расчета этих показателей.

5. Существует зависимость достоверности наличия дефектов силовых трансформаторов, устанавливаемого по данным ХАРГ, от эксплуатационных факторов. Это определяет необходимость использования автоматизированных систем обработки данных ХАРГ, как подсистемы интеллектуального анализа технического состояния трансформаторов, систематизирующего и обобщающего информацию об условиях эксплуатации, отказах, испытаниях и плановых ремонтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силовые трансформаторы: справ. кн. / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. М.: Энергоатомиздат, 2004. 616 с.
2. Попов, Г. В. Определение индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации / Г. В. Попов, Е. Б. Игнатьев // Вестник ИГЭУ. 2014. Вып. 4. С. 25–33.
3. Автоматизированный анализ срока службы воздушных линий электропередачи электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445>.
4. Внутренний бенчмаркинг тепловых электростанций электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-539-551>.
5. Граничные значения концентрации газов в масле трансформаторов тока с конденсаторной изоляцией / О. Н. Гречко, И. В. Давиденко, Н. И. Калачева [и др.] // Электротехника. 2007. № 1. С. 34–39.
6. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. РД 153-34.0-46.302-00. М., 2001. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/4eb/4294845319.pdf>.
7. Фархадзаде, Э. М. Повышение точности оценки показателей индивидуальной надежности энергоблоков / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, Ю. З. Фарзалиев // Электронное моделирование. 2007. Т. 29, № 5. С. 75–84.
8. Фархадзаде, Э. М. Методы оценки долговечности невосстанавливаемых элементов / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, А. Д. Никджу // Energetikanın problemləri = Проблемы энергетики. 2001. № 1. С. 21–30.
9. Герцбах, И. Б. Модели отказов / И. Б. Герцбах, Х. Б. Кордонский. М.: Сов. радио, 1966. 166 с.

10. Львов, М. Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов / М. Ю. Львов // Электричество. 2010. № 2. С. 27–31.
11. Давиденко, И. В. Оценка технического состояния силовых трансформаторов по результатам традиционных испытаний и измерений: учеб.-метод. пособие / И. В. Давиденко. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 96 с.
12. Давиденко, И. В. Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и обслуживания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И. В. Давиденко; Уральский государственный технический университет. Екатеринбург, 2009.

Поступила 20.10.2024. Подписана в печать 15.05.2025. Опубликовано онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Lizunov S. D., Lokhanin A. K. (eds.) (2004) *Power Transformers*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 616 (in Russian).
2. Popov G. V., Ignatyev E. B. (2014) Determination of the Index of Technical Condition of Power Transformers During Their Operation. *Vestnik IGEU = Vestnik of Ivanovskii Gosudarstvennyi Energeticheskii Universitet*, (4), 25–33 (in Russian).
3. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Abdullayeva S. A., Nazarov A. A. (2021) Automated Analysis of Service Life of Air-Lines of the Electricity Transmission of Electric Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445> (in Russian).
4. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Y. Z., Ashurova U. K. (2020) Internal Benchmarking of Thermal Power Plants of Electric Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-539-551> (in Russian).
5. Grechko O. N., Davidenko I. V., Kalacheva N. I., Kurbatova A. F., Smekalov V. V. (2007) Limit Values of the Gas Concentration in the Oil of Current Transformers with Capacitor Insulation. *Russian Electrical Engineering*, 78 (1), 32–36. <https://doi.org/10.3103/s1068371207010063>.
6. RD [Ruling Document] 153-34.0-46.302-00. *Methodological Guidelines for Diagnostics of Developing Defects in Transformer Equipment Based on the Results of Chromatographic Analysis of Gases Dissolved in Oil*. Moscow, 2001. Available at: URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/4eb/4294845319.pdf> (in Russian).
7. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z. (2007) Improving the Accuracy of Assessing the Individual Reliability Indicators of Power Units. *Elektronnoye Modelirovaniye = Electronic Modeling*, 29 (5), 75–84 (in Russian).
8. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Nikdzhu A. D. (2001) Methods for Assessing the Durability of Non-Renewable Elements. *Energetikanın Problemlari = Problems of Power Engineering*, (1), 21–30 (in Russian).
9. Gertsbach I. B., Kordonsky Kh. B. (1966) *Models of Failure*. Moscow, Sovetskoye Radio Publ. 166 (in Russian).
10. Lvov M. Yu. (2010) Analysis of Damage of Power Transformers. *Elektrichestvo*, (2), 27–31 (in Russian).
11. Davidenko I. V. (2015) *Assessment of the Technical Condition of Power Transformers Based on the Results of Traditional Tests and Measurements*. Yekaterinburg, Ural Federal University. 96 (in Russian).
12. Davidenko I. V. (2009) *Development of a System for Multi-Aspect Assessment of the Technical Condition and Maintenance of High-Voltage Oil-Filled Electrical Equipment* [Dissertation]. Ekaterinburg, Ural State Technical University (in Russian).

Received: 20 October 2024. Accepted: 15 May 2025. Published online: 30 September 2025