

УДК 621.314

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЕВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АРГ, В ИСПРАВНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

ШУТЕНКО О. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Передача электрической энергии» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: o.v.shutenko@gmail.com;

**Цель работы.** Исследовать характер динамики изменения критериев используемых для интерпретации результатов АРГ, в исправных высоковольтных трансформаторах, негерметичного исполнения.

**Методы исследования.** Теория временных рядов, регрессионный анализ, теория распознавания образов, метод контрольных уровней, метрические методы распознавания, диагностика по расстоянию до эталона.

**Полученные результаты.** По результатам исследований установлено, что в нормально работающих исправных трансформаторах, значения всех без исключения диагностических признаков, используемых для интерпретации результатов АРГ, изменяются случайным образом. Аварийные воздействия со стороны электрической сети, приводят к кратковременному появлению систематической составляющей в зависимостях концентраций и скоростей нарастания газов от продолжительности эксплуатации, и к кратковременной стабилизации значений отношений пар газов на уровне соответствующему данному энергетическому воздействию, а также к схожести графических образов.

**Научная новизна.** Выполненный анализ показал, что в трансформаторах негерметичного исполнения возникновение и развитие дефекта сопровождается не только изменением численных значений диагностических критериев, что известно и используется при диагностике, но и к существенному изменению характера зависимостей диагностических критериев от времени.

**Практическая ценность.** Полученные результаты дают возможность обнаружения развивающихся дефектов в негерметичных трансформаторах, на ранней стадии их развития, еще до того как значения концентраций газов превысят граничные значения, что позволит избежать разрушения изоляции, а также распознать рост концентраций растворенных в масле газов, обусловленный влиянием аварийных режимов работы электрических сетей.

**Ключевые слова:** анализ растворенных в масле газов; концентрации газов; скорости нарастания; отношения газов; графические образы; динамика изменения; регрессионный анализ; контрольные уровни; диагностическое расстояние.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, для интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов (АРГ) ведущими мировыми энергетическими и трансформаторостроительными компаниями используются несколько критериев: критерий граничных концентраций, критерий скоростей нарастания газов и значения отношений пар газов. При этом для каждого из критериев, известные стандарты [1]-[5], регламентирует граничные значения, которые значимо различаются между собой. В дополнении к перечисленным критериям различными национальными и ведомственными стандартами, рекомендуются к использованию графические методы интерпретации, предназначенные для распознавания типа прогнозируемого дефекта. Следует отметить, что во всех без исключения известных нормативных документах [1]-[5], для принятия решения о состоянии диагностируемого объекта используются, только количественные значения данных критериев, а вот динамика их изменения во времени практически не используются, что ограничивает возможность для раннего обнаружения развивающихся дефектов. В связи с этим анализ динамики изменения критериев, используемых для интерпретации резуль-

татов АРГ, в трансформаторах с различным состоянием, является актуальной и практически значимой задачей.

### II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопросам усовершенствования методов и критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, посвящено достаточное количество публикаций. Как показал анализ, основными направлениями усовершенствования являются как корректировка граничных значений концентраций и скоростей нарастания газов [6]-[8], поиск новых отношений пар газов [9], так и разработка графических методов интерпретации [10]-[11]. Достаточно большое количество публикаций [12]-[17] посвящено вопросам использования аппарата нечеткой логики и нейронных сетей для интерпретации результатов АРГ. Несмотря на большой объем публикаций в открытых зарубежных источниках практически не рассматриваются вопросы анализа динамики изменения критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, во времени, а если и рассматриваются, как например, в [18]-[19] то только для значений концентраций газов. При этом анализ носит скорее качественный характер. В тоже время как показано в [20], одним из перспективных направ-

лений усовершенствования методов интерпретации результатов АРГ, является использование в качестве диагностических признаков не численных значений диагностических критериев, а характера их изменения во времени. Выполненные в работе [21] исследования показали, что при отсутствии дефекта в высоковольтных трансформаторах со свободным дыханием, значения концентраций газов, практически не зависят от продолжительности эксплуатации. Аналогичные исследования для трансформаторов с дефектами разного типа, выполненные в работе [22], показали наличие значимой систематической составляющей в зависимостях концентраций и скоростей нарастания газов от длительности эксплуатации. Однако динамика изменения значений скоростей нарастания газов, отношений пар газов и графических образов в исправных трансформаторах негерметичного исполнения, до настоящего времени не исследовалась, что и послужило поводом для написания данной статьи.

### III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является обнаружение различий в характере изменения во времени значений концентраций, скоростей нарастания, отношений газов, а также графических образов, построенных по результатам АРГ в трансформаторах с различным состоянием. Для обнаружения данных различий исследуется и анализируется изменение перечисленных выше критериев от длительности эксплуатации в исправных трансформаторах негерметичного исполнения, которые эксплуатируются в разных условиях.

### IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве исходных данных, для выполнения исследований, использовались результаты хроматографического анализа по Донецкой, Луганской, Полтавской, Сумской, Харьковской областям, Украины. Всего проанализированы результаты наблюдений по 426 трансформаторам, негерметичного исполнения, напряжением 110 и 330 кВ общим объемом 54658 значений. Все исследуемые трансформаторы находились в исправном состоянии. Суть исследований сводилась к оценке наличия систематической составляющей в зависимостях диагностических критериев от длительности эксплуатации, в исправных трансформаторах, которые эксплуатируются в разных условиях.

Измерение концентраций газов сопровождается погрешностями, особенно в области их малых значений. Известно [5], что чувствительность обнаружения газов хроматографом находится на уровне  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  % об. При этом суммарная погрешность анализа, при значениях концентраций газов углеводородного ряда – 10 мкл/л (0,001% об.), может достигать 50%. Систематическая погрешность измерения концентраций газов, растворенных в масле, может достигать 19,7% [7] и растет по мере приближения концентраций к порогу чувствительности хроматографа. Для снижения вероятностей принятия ошибочных решений при

диагностике оборудования по результатам АРГ в [4], рекомендуется выполнять диагностику по критерию скоростей нарастания газов, в случае если значения концентраций газов превышают граничные значения. Диагностика по значениям отношений пар газов или при использовании графических методов, согласно [4] может выполняться, если значения концентраций газов превышают регламентированный аналитический порог распознавания. Данные рекомендации учитывались при выполнении анализа динамики изменения графических образов и отношений пар газов (исключение составило лишь отношение  $\text{CН}_4/\text{H}_2$  для исправных трансформаторов, которые работали в нормальном режиме. Это обусловлено крайне низким содержанием водорода в негерметичном оборудовании из-за его диффузии в атмосферу. Поэтому зависимости изменения во времени отношение  $\text{CН}_4/\text{H}_2$  далее приводятся из соображений наглядности). В трансформаторах, которые работают в нормальных режимах, значения концентраций газов не превышают граничных значений, более того в негерметичных трансформаторах из-за процесса диффузии газов в атмосферу, значения измеренных концентраций не совпадают с реально образованными значениями. Однако, поскольку целью исследования является не оценка значений скоростей нарастания газов, а анализ характера их изменения во времени, то значения скоростей нарастания газов определялись, если концентрации газов между измерениями превышали аналитический порог распознавания, что привело к различиям в объеме выборочных значений концентраций и скоростей нарастания газов. Исключение составил водород.

По аналогии с [20]-[22] для анализа динамики изменения значений концентраций и скоростей нарастания газов был использован математический аппарат регрессионного анализа. Такой тест эквивалентен однофакторному дисперсному анализу показателя качества на наличие систематического смещения среднего значения в различных интервалах времени эксплуатации [23]. Результаты АРГ были представлены в виде временных рядов, которые представляют собой двумерный массив значений длительности эксплуатации и концентраций газов. В качестве основной, принималась гипотеза об отсутствии значимого влияния длительности эксплуатации на концентрации растворенных в масле газов, т.е.  $H_0: b_1=0$ . Проверка основной гипотезы  $H_0$  для всех временных рядов проводилась при уровне значимости  $\alpha=0,05$  в следующей последовательности:

Статистическая модель:

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot x_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

Остатки распределены по нормальному закону:

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \text{ с } M[\varepsilon_i] = 0; D[\varepsilon_i] = \sigma^2; \text{cov}[\varepsilon_i] = 0.$$

2. Коэффициенты линейной регрессии  $b_1$  и  $b_0$  определялись с помощью метода наименьших квадратов. После чего рассчитывалось значение величины  $R^2$ , которая представляет собой отношение полезного

сигнала (суммы квадратов отклонений, обусловленной регрессией) к шуму (сумме квадратов отклонений относительно регрессии). Значение величины  $R^2$  рассчитывалось по выражению.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

где:  $\hat{Y}_i$  – значение концентрации анализируемого газа, рассчитанное по статистической модели с учетом значений коэффициентов  $b_1$  и  $b_0$ ;  $\bar{Y}$  – математическое ожидание показателя

3. Критериальная статистика:  $F_{1, n-2}$  вычислялась как функция оценки  $R^2$ :

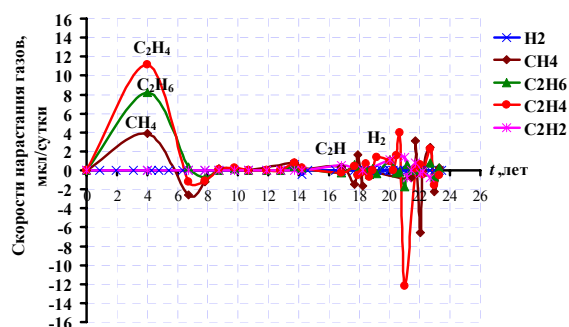
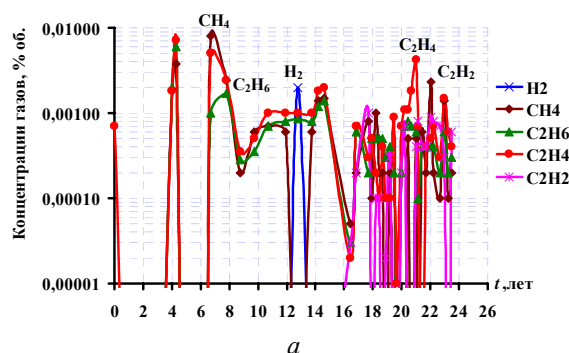
$$F_{1, (n-2)} = \frac{R^2}{(1-R^2)} (n-2) \quad (3)$$

4. Статистика сравнения  $F_{кр} = F_{1, (n-2)} - 95\%$  точка  $F$  распределения с 1 и  $(n-2)$  степенями свободы.

5. Решение: основная гипотеза  $H_0 (b_1=0)$  отвергалась, если  $F > F_{кр}$

Выполненный анализ показал, что для подавляющего большинства анализируемых временных рядов концентраций и скоростей нарастания газов углеводородного ряда и водорода, расчетное значение  $F$ -критерия не превышало, соответствующее критическое значение. Это свидетельствует о том, что шумовая компонента превышает систематическую составляющую, а, следовательно, зависимости концентраций газов и скоростей нарастания газов носят *случайный, стохастический характер*. Более того, для многих рядов значение углового коэффициента  $b_1$  имеет отрицательное значение, другими словами концентрации газов могут и уменьшаться с увеличением продолжительности эксплуатации. Еще одним важным результатом, является значимые различия в характере временных зависимостей концентраций и скоростей нарастания газов для нормально работающих трансформаторов и трансформаторов подвергшихся аварийным режимам работы со стороны электрической сети. В качестве примера, на рис. 1 и 2 приведены зависимости концентраций газов и скоростей нарастания газов для нормально работающего трансформатора ТДНГ-31,5/110/35/6 (рис. 1) и трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6 (рис. 2), который подвергся динамическому воздействию тока короткого замыкания. Как видно из рис. 1 для нормально работающих трансформаторов изменения концентраций и скоростей нарастания газов, носит исключительно случайный характер, а сами зависимости являются немонотонными. Что подтверждается результатами регрессионного анализа, приведенными в табл. 1. Как видно из табл. 1, при нормальной работе трансформаторов, для всех пяти газов углеводородного ряда и водорода, расчетные значения  $F$ - критерия не превы-

шают критического значения, что свидетельствует о преобладании шумовой компоненты над систематической составляющей. При этом угловые коэффициенты для всех газов, кроме ацетилена имеют отрицательные значения, т.е. концентрации газов, на наблюдаемом промежутке времени снижаются. При нормальной работе трансформаторов значения скоростей нарастания также изменяются случайным образом (рис. 1 б). Как видно из рисунка на протяжении наблюдений имели место, как положительные (новообразование газов) так и отрицательные (диффузия газов в атмосферу) значения скоростей нарастания. При этом как видно из табл. 1 значения скоростей нарастания всех газов кроме ацетилена снижаются.



а – концентрации газов;  
б – скорости нарастания газов;

**Рисунок 1.** Зависимость концентраций газов и их скоростей нарастания от длительности эксплуатации для трансформатора ТДНГ-31,5/110/35/6

Совсем иная картина наблюдается для трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6, который подвергся динамическому воздействию тока короткого замыкания со стороны сети. Как видно из табл. 1, на анализируемом промежутке времени в зависимостях концентраций метана, этилена и ацетилена наблюдается преобладание систематической компоненты над шумовой, т.е. значимый рост концентраций газов. При этом, как видно из рис. 2, максимальные значения и концентрации и модулей скоростей нарастания, для всех без исключения газов приходятся на один и тот же момент времени, а именно дату воздействия тока короткого замыкания. В тоже время рост газов не является устойчивым и после достижения максимума

концентрацій, вызванного впливом тока короткого замикання, значення концентрацій поступово знижуються.

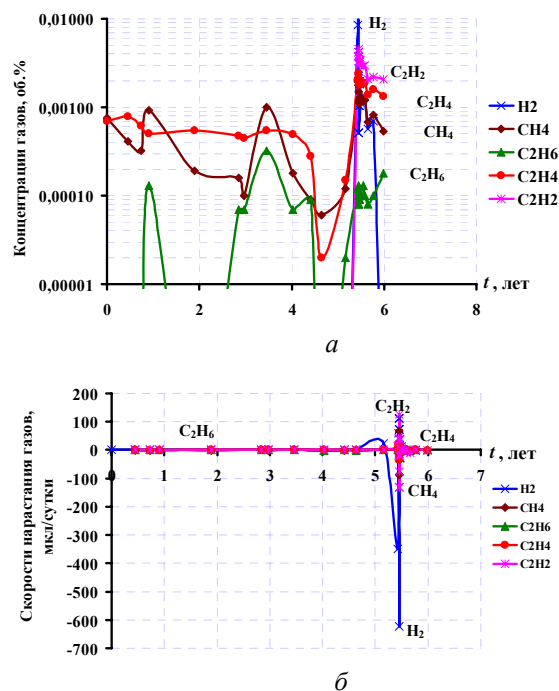
**Таблиця 1.** Результати регресійного аналізу для трансформаторів ТДНГ-31,5,110/35/6 і ТДТН-31,5/110/35/6

Газ	Коефіцієнти лінійної регресії		$R^2$	$F$	$F_{\text{крит}}$
	$b_0$	$b_1$			
<b>Трансформатор ТДНГ-31,5,110/35/6</b>					
CH <sub>4</sub>	0,001327	-0,000043	0,0502	2,22	5,41
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,00144	-0,0000318	0,0264	1,13	5,41
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,00101	-0,0000274	0,0436	1,91	5,41
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	-0,000046	0,0000092	0,0983	4,57	5,41
H <sub>2</sub>	0,0000582	-0,00000087	0,0004	0,018	5,41
$R_{\text{CH}_4}$	0,543189	-0,047115	0,022	0,439	5,92
$R_{\text{C}_2\text{H}_4}$	2,293743	-0,1303213	0,061	1,84	5,609
$R_{\text{C}_2\text{H}_6}$	1,744374	-0,0900781	0,127	4,39	5,56
$R_{\text{C}_2\text{H}_2}$	-0,02737	0,0078552	0,0112	0,215	5,87
$R_{\text{H}_2}$	0,0044286	-0,0001473	$9 \cdot 10^{-5}$	0,003	5,41
<b>Трансформатор ТДТН-31,5/110/35/6</b>					
CH <sub>4</sub>	-0,016512	$4,2452 \cdot 10^{-7}$	0,239	8,79	5,609
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-0,028136	$7,1757 \cdot 10^{-7}$	0,417	20,07	5,609
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-0,001392	$3,6096 \cdot 10^{-8}$	0,145	4,77	5,609
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	-0,075940	$1,89850 \cdot 10^{-6}$	0,548	34,0	5,609
H <sub>2</sub>	-0,037687	$9,43803 \cdot 10^{-7}$	0,149	4,93	5,609
$R_{\text{CH}_4}$	166,3111	-0,0041449	0,0084	0,228	5,633
$R_{\text{C}_2\text{H}_4}$	90,750453	-0,00226876	0,0127	0,346	5,633
$R_{\text{C}_2\text{H}_6}$	2,1019124	$-5,043 \cdot 10^{-5}$	0,0004	0,011	5,633
$R_{\text{C}_2\text{H}_2}$	217,73229	-0,00543264	0,0049	0,133	5,633
$R_{\text{H}_2}$	717,57561	-0,0179181	0,006	0,164	5,633

Значення концентрацій ацетилену, перевищує граничне значення, практично в 5 раз, що згідно [4], повинно бути істотною, як наявність дефекта, без урахування значень швидкостей наростання. В той же час, аналіз динаміки змін швидкостей наростання газів (рис. 2 б і табл. 1), показує, що, незважаючи на зростання концентрацій газів, випадкова складова в залежностях швидкостей наростання газів переважає над систематичною складовою. Як видно з табл. 1 швидкості наростання газів на розглянутому проміжку мають тенденцію до зниження, що свідчить про негативні значення кутових коефіцієнтів регресії. Це може бути пояснено тимчасовим характером впливу струмів короткого замикання, після якого значення концентрацій газів починають зменшуватися. Примітно, що модулі значень негативних швидкостей наростання для всіх газів крім ацетилену, перевищують значення позитивних швидкостей наростання (рис. 2 б). Т.е. після «зовнішнього впливу» система повертається в початковий стан.

При оцінці динаміки змін відношень пар газів, важливо не тільки характер залежності, але й самі значення відношень пар газів. Для аналізу динаміки змін відношень пар газів, зручно

використовувати метод контрольних рівнів [24].



*a* – концентрації газів;  
*б* – швидкості наростання газів;

**Рисунок 2.** Залежність концентрацій газів і їх швидкостей наростання від тривалості експлуатації для трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6

В якості значень контрольних рівнів природно прийняти межі відношень пар газів, розділяючі області з різними типами дефектів, які регламентовані в [4]. Динаміка змін значень відношень пар газів для трансформаторів ТДНГ-31,5,110/35/6 і ТДТН-31,5/110/35/6 приведена на рис. 3 і рис. 4. Як видно з рис. 3 для нормально працюючого исправного трансформатора значення відношень пар газів змінюються випадковим чином. Це виражається тим, що для кожного нового вимірювання відношення пар газів, приймають значення відповідні різним рівням. Така ж картина спостерігається і для трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6, *але тільки до впливу струму короткого замикання* (рис. 4). *Сразу ж після впливу значення відношень пар газів тимчасово стабілізуються на одному рівні*, після чого, продовжують змінюватися випадковим чином. Діючим в Україні нормативним документом [4] для исправного стану трансформаторів регламентовані наступні значення відношень пар газів:  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$ ,  $0,2 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ . Значення відношення  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$  згідно [4], є не характерним для исправного стану, оскільки передбачається, що при відсутності дефекта етилен і ацетилен в маслі відсутні. Але, як видно з рис. 3 і 4 значення відношень пар газів (як для нормально працюючого, так і для трансформатора, що піддався впливу струму короткого замикання) виходять за межі значень відповідні исправному стану.

Это обусловлено как процессами диффузии газов в атмосферу, так и окислительными реакциями, которые согласно [25, 26] приводят к нетипично высокому содержанию этилена.

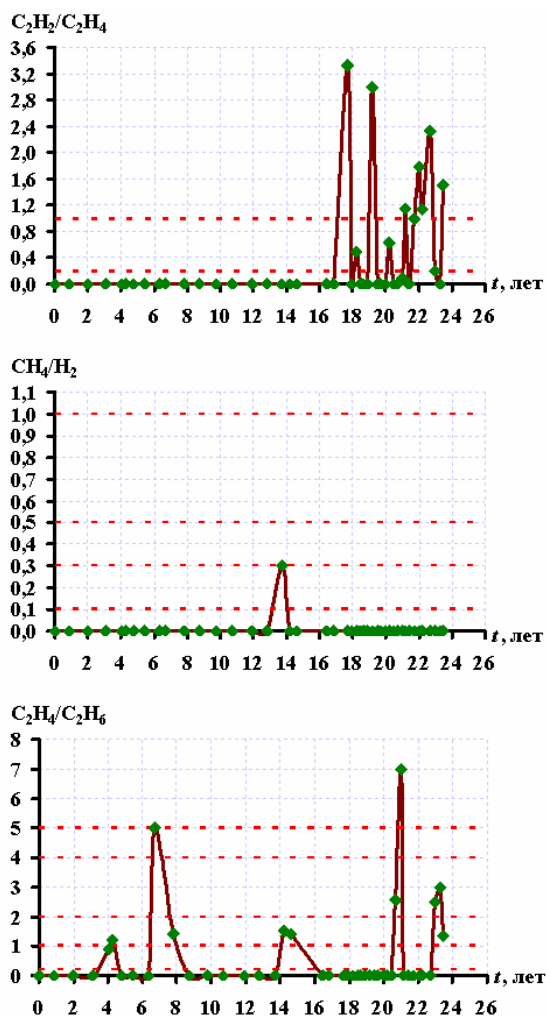


Рисунок 3. Динамика изменения отношений пар газов для трансформатора ТДНГ-31,5/110/35/6

Особый интерес представляет анализ динамики изменения графических образов, построенных по результатам АРГ для анализируемых трансформаторов. Выполненные в [22] исследования динамики изменения графических образов в трансформаторах с дефектами разного типа показали, что развитие дефекта в трансформаторах, сопровождается неизменностью образов, построенных по результатам АРГ для относительно медленно развивающихся дефектов и стабильным соответствием графических образов, дефектам разного типа для быстро развивающихся дефектов. Как показал анализ, в нормально работающих исправных трансформаторах графические образы изменяются случайным образом от измерения к измерению. В качестве примера на рис. 5 а приведены графические образы, построенные по результатам АРГ трансформатора ТДНГ-31,5/110/35/6, по первым 5 пробам, для которых концентрации газов превышали аналитический порог распознавания.

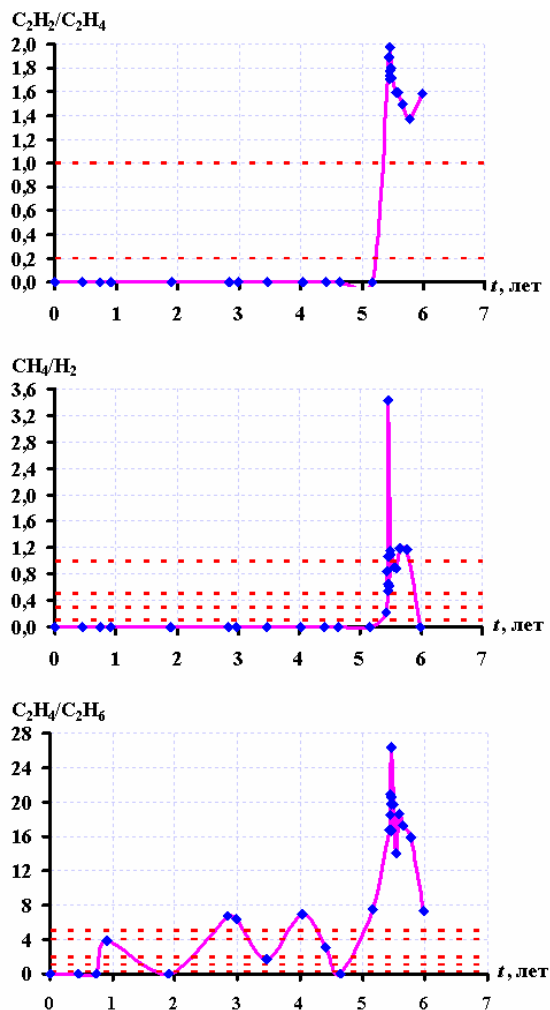


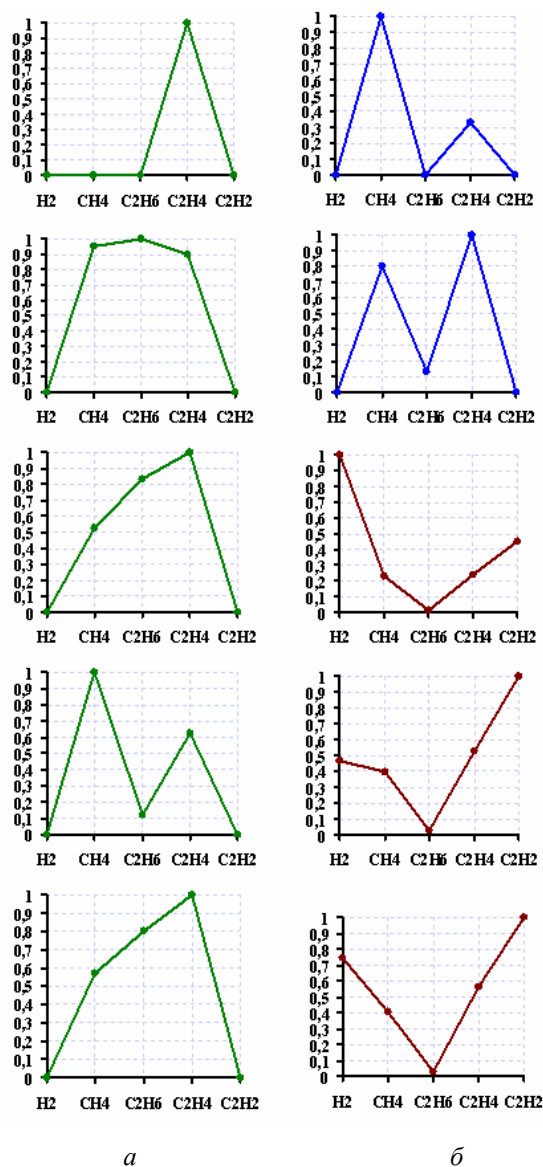
Рисунок 4. Динамика изменения отношений пар газов для трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6

Как видно из рис. 5 а количество одинаковых образов, построенных по результатам соседних испытаний ничтожно мало. В большинстве проб, газами с максимальной концентрацией является метан и этилен. Количество проб, в которых газами с максимальной концентрацией являются водород, этан и ацетилен, намного меньше. Такая же тенденция характерна и для первых проб масла из трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6, т.е., которые построены по результатам АРГ непосредственно до воздействия тока короткого замыкания (рис. 5 б). Однако, сразу же после динамического воздействия токов короткого замыкания содержание газов на протяжении оставшихся измерений, практически не изменяется и соответствует дуговому разряду, согласно [4].

Для количественной оценки динамики изменения процентного содержания газов предлагается использовать подход, основанный на метрических методах распознавания [24, 22], в частности использовать значение диагностического расстояния между координатами соседних образов.

В общем виде выражение для расчета диагностического расстояния может быть представлено как:





*a* – трансформатор ТДНГ-31,5/110/35/6;  
*б* – трансформатор ТДТН-31,5/110/35/6;

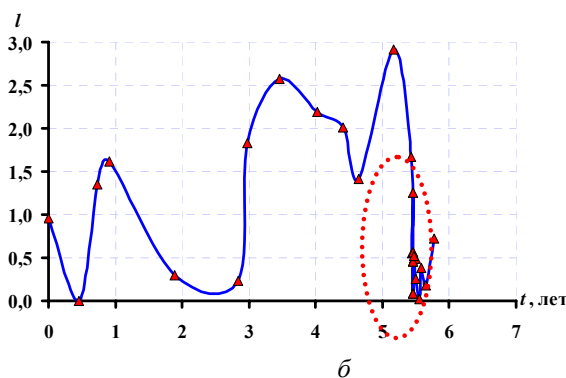
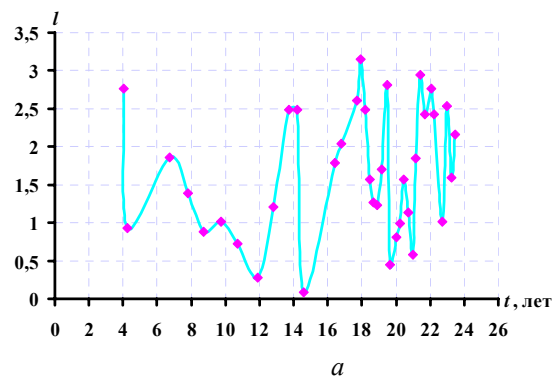
**Рисунок 5.** Динамика изменения графических образов, в трансформаторах ТДНГ-31,5/110/35/6 и ТДТН-31,5/110/35/6

$$l_i = \left( \left| H_{2i}^* - H_2 \right|^v + \left| CH_{4i}^* - CH_4 \right|^v + \left| C_2H_{6i}^* - C_2H_6 \right|^v + \left| C_2H_{4i}^* - C_2H_4 \right|^v + \left| C_2H_{2i}^* - C_2H_2 \right|^v \right)^{\frac{1}{v}}, \quad (4)$$

где:  $H_{2i}^*, CH_{4i}^*, C_2H_{6i}^*, C_2H_{4i}^*, C_2H_{2i}^*$  – координаты графических образов (отношения значений концентраций каждого из газов к газу с максимальной концентрацией), полученные по результатам предыдущего измерения;  $v$  – мера расстояния ( $v=2$ ).  
 $H_{2_{i+1}}, CH_{4_{i+1}}, C_2H_{6_{i+1}}, C_2H_{4_{i+1}}, C_2H_{2_{i+1}}$  – координаты

графических образов, полученные по результатам последующего измерения;

Очевидно, что чем больше отличаются графические образы, тем большие значения принимает диагностическое расстояние, тем более случайным является характер их изменения во времени. Зависимости диагностического расстояния, между графическими образами, построенными по результатам соседних измерений, в трансформаторах ТДНГ-31,5,110/35/6 и ТДТН-31,5/110/35/6 от продолжительности эксплуатации приведены на рис. 6.



*a* – диагностическое расстояние между графическими образами в трансформаторе ТДНГ-31,5,110/35/6;  
*б* – диагностическое расстояние между графическими образами в трансформаторе ТДТН-31,5/110/35/6;

**Рисунок 6.** Зависимость диагностического расстояния, между графическими образами в трансформаторах ТДНГ-31,5,110/35/6 и ТДТН-31,5/110/35/6 от продолжительности эксплуатации

Анализируя приведенные зависимости можно легко увидеть, что в нормально работающих бездефектных трансформаторах значения диагностических расстояний между графическими образами (рис. 6 *a*) изменяются случайным образом, и существенно различаются между собой. Количество минимальных значений  $l$  крайне мало, по сравнению с остальными, и самое главное, что минимальные значения не повторяются для повторных наблюдений. После воздействия тока короткого замыкания, на протяжении 7 измерений (рис. 6 *б* выделенная область) диагностические расстояния принимают минимальные значения.

Выполненные исследования показали, что в нормально работающих исправных трансформаторах, значения всех без исключения диагностических признаков, используемых для интерпретации результатов АРГ, изменяются случайным образом. Аварийные воздействия со стороны электрической сети, приводят к кратковременному появлению систематической составляющей в зависимостях концентраций и скоростей нарастания газов от продолжительности эксплуатации, и к кратковременной стабилизации значений отношений пар газов на уровне соответствующему данному энергетическому воздействию, а также к схожести графических образов. Сравнивая полученные результаты, с результатами аналогичных исследований, для трансформаторов с развивающимися дефектами [22], следует констатировать, что характер изменения диагностических критериев от длительности эксплуатации изменяется в зависимости от состояния трансформаторов. Учитывая [22], что такие изменения имеют место еще до того момента как концентрации газов в дефектном оборудовании превысят граничные значения оценка динамики изменения данных критериев позволяет выявлять развивающиеся дефекты на ранней стадии.

#### В. ВЫВОДЫ

В данной статье впервые выполнен комплексный анализ динамики изменения диагностических критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, во времени, для исправных трансформаторов. При этом, кроме нормально работающих трансформаторов анализировались и трансформаторы, которые подверглись аварийным воздействиям со стороны электрической сети. В результате выполненных исследований установлено:

1. При отсутствии дефекта в высоковольтных силовых трансформаторах негерметичного исполнения зависимости концентраций газов, скоростей нарастания газов, отношений пар газов носят случайный стохастический характер. Также случайно изменяются и графические образы, построенные по результатам АРГ, бездефектного оборудования. Случайный характер изменения во времени, диагностических критериев используемых для интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, в нормально работающих исправных трансформаторах, обусловлен как процессами диффузии газов из масла в атмосферу, так и особенностями газообразования в присутствии свободного кислорода.

2. При аварийных воздействиях со стороны сети в зависимостях концентраций газов и скоростей их нарастания от длительности эксплуатации наблюдается кратковременное преобладание систематической компоненты над случайной составляющей. При этом значения отношений пар газов временно стабилизируются в области характерной для данного уровня энергетического воздействия, которое является следствием, данного аварийного режима. Также наблюдается кратковременная стабилизация графических об-

разов дефектов, при которой полученные образы совпадают с образами дефектов, характерных для данного уровня энергетического воздействия.

3. С учетом выполненных ранее исследований, можно утверждать, что динамика изменения диагностических критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, в исправных и дефектных трансформаторах, существенно различается. Что позволяет выявлять развивающиеся дефекты на ранней стадии их развития еще до того момента как концентрации газов превысят граничные значения, а также распознавать рост концентраций газов, вызванный аварийными режимами работы электрических сетей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. IEC Publication 60599, Interpretation of the analysis of gases in transformer and other oil med electrical equipment in &, Geneva, Switzerland, 1999.
- [2]. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARCD C57.104-2008, Feb.2009.
- [3]. Dornenburg E., and Strittmater W. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis/ E. Dornenburg, W. Strittmater // Brown Boveri Review, vol. 61, pp. 238-274, 1974.
- [4]. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ. – 2007.
- [5]. РД 153-34.0-46.302-00: Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – Офиц. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001;
- [6]. Давиденко И.В. Определение допустимых значений контролируемых параметров маслonaполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных /И.В Давиденко // Электричество. – 2009. – № 6.–С. 81–82.
- [7]. Давиденко И.В. Критерии оценки технического состояния маслonaполненных вводов и измерительных трансформаторов по скорости роста концентраций растворенных газов. Сб. докладов научно-практической конференции специалистов Сибири и Востока “Диагностика электрических установок”. Новосибирск: ГЦРО. –2009.– С.57-68.
- [8]. Шутенко О.В. Определение значений граничных концентраций растворенных в масле газов методом минимального риска /О.В. Шутенко // Электричество – Москва. – 2017. – № 8. – С. 50–60 DOI: 10.24160/0013-5380-2017-8-50-60.
- [9]. Абрамов В.Б. Особенности контроля маслonaполненного электрооборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов / В.Б. Абрамов // Электрические сети и системы. – 2012. – №4. – С. 77–79.

- [10]. Давиденко И.В. Новые способы идентификация вида дефектов маслонаполненных вводов /И.В. Давиденко // Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики.–2009. – № 1-2. С. – 130–134.
- [11]. Duval M., Lamarre L. The Duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers / M. Duval, L. Lamarre // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2014. – vol. 30. – Issue 6. – pp. 9-12 doi: 10.1109/MEI.2014.6943428.
- [12]. Ahmed M.R., Geliel M.A., Khalil A. Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis / M.R. Ahmed, M.A. Geliel, A.Khalil //Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on. – IEEE, 2013. – pp. 584-589 DOI: 10.1109/MED.2013.6608781.
- [13]. Dhote N.K., Helonde J.B. Diagnosis of power transformer faults based on five fuzzy ratio method / N.K. Dhote, J.B. Helonde //WSEAS Transaction on Power System – 2012. – Issue 3. – no.3. – pp. 114-125 DOI: 10.1109/IPEC.2005.206897.
- [14]. Chih-Hsuan Liu, Tung-Bin Lin, Shun-Yuan Wang. Integrated power transformer diagnosis using hybrid fuzzy dissolved gas analysis /Liu Chih-Hsuan, Lin Tung-Bin, Wang Shun-Yuan // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – 2015. – Vol. 10. – №.6. – pp. 689-698. DOI: 10.1002/tee.22148.
- [15]. Siddique M.A.A., Mehruz S. Artificial neural networks based incipient fault diagnosis for power transformers /M.A.A. Siddique, S. Mehruz //India Conference (INDICON), 2015 Annual IEEE. – IEEE, 2015. – pp. 1-6. DOI: 10.1109/indicon.2015.7443174.
- [16]. Liu C.H., Yao L.T., Lin, T.B., Wang, S.Y. Innovated Fault Diagnosis for Power Transformer Using Hybrid Fuzzy Dissolved Gas Analysis / C.H. Liu, L.T. Yao, T.B. Lin, S.Y. Wang, //Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vols. 284-287. – pp. 1082-1086. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.1082.
- [17]. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Разработка нечеткой нейронной сети для интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко // Электротехника і Електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. –№2. – С. 49–56 DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.08.
- [18]. Lindgren S.R. Transformer condition assessment experiences using automated on-line dissolved gas analysis. /S.R. Lindgren // CIGRE Reports, A2-202.
- [19]. Sparling, Brian D., and Jacques Aubin. Power transformer life extension through better monitoring. // Proc. PowerGrid Europe, Spain, 2007.
- [20]. Шутенко О.В. Метод обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов /О.В. Шутенко // Электрические сети и системы – Київ.–2010– № 3. – С. 38–45.
- [21]. Шутенко О.В., Абрамов В.Б. Оценка влияния длительности эксплуатации на значения концентраций газов в негерметичных трансформаторах / О.В. Шутенко, В.Б. Абрамов // "Электро" Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность – 2017. – № 2. – С. 36–45.
- [22]. Шутенко О.В. Особенности динамики изменения критериев используемых для интерпретации результатов АРГ в силовых трансформаторах с разными типами дефектов // О.В. Шутенко / Новое в Российской электроэнергетике – Москва. – 2017. – № 9. – С. 30-49.
- [23]. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1981. – 520 с.
- [24]. Биргер И.А. Техническая диагностика /И.А. Биргер – М.: Машиностроение. – 1978. – 240 с.
- [25]. Боярчуков Г.М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле /Г.М. Боярчуков // Новини енергетики. – 2010. – № 7. – С. 23–33.
- [26]. Малошевська А. П. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових ізоляційних системах/ А. П. Малошевська, С. О. Топоров, А. Я. Дмитрішин // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – №1. – С. 21–25. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-4

*Стаття надійшла до редакції 15.10.2017*

## АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗМІНИ КРИТЕРІЇВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ АРГ, У СПРАВНИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ВИКОНАННЯ

ШУТЕНКО О. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Передача електричної енергії» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: o.v.shutenko@gmail.com;

*Мета роботи.* Дослідити характер динаміки зміни критеріїв що використовуються для інтерпретації ре-



зультатів АРГ, в справних високовольтних трансформаторах, негерметичного виконання.

**Методи дослідження.** Теорія часових рядів, регресійний аналіз, теорія розпізнавання образів, метод контрольних рівнів, метричні методи розпізнавання, діагностика по відстані до еталону.

**Отримані результати.** За результатами досліджень встановлено, що в нормально працюючих справних трансформаторах, значення всіх без винятку діагностичних ознак, які використовуються для інтерпретації результатів АРГ, змінюються випадковим чином. Аварійні впливи з боку електричної мережі, призводять до короткочасного появи систематичної складової в залежності концентрацій і швидкостей наростання газів від тривалості експлуатації, і до короткочасної стабілізації значень відношень пар газів на рівні, що відповідає даному енергетичного впливу, а також до схожості графічних образів.

**Наукова новизна.** Виконаний аналіз показав, що в трансформаторах негерметичного виконання виникнення і розвиток дефекту супроводжується не тільки зміною чисельних значень діагностичних критеріїв, що відомо і використовується при діагностиці, а й до істотної зміни характеру залежностей діагностичних критеріїв від часу.

**Практична цінність.** Отримані результати дають можливість виявлення дефектів, що розвиваються в негерметичних трансформаторах, на ранній стадії їх розвитку, ще до того як значення концентрацій газів перевищать граничні значення, що дозволить уникнути руйнування ізоляції, а також виявляти зростання концентрацій розчинених в маслі газів, що обумовлені впливом аварійних режимів роботи електричних мереж.

**Ключові слова:** аналіз розчинених у маслі газів, концентрації газів, швидкості наростання, відношення газів, графічні образи, динаміка зміни, регресійний аналіз, контрольні рівні, діагностична відстань.

## THE ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF CHANGE OF CRITERIA USED FOR INTERPRETATION OF DGA RESULTS, IN CORRECT HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS OF NON-GERMETIC EXECUTION

SHUTENKO O. V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the department of «Electric power transmission» of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute, Ukraine, e-mail: o.v.shutenko@gmail.com;

**Purpose.** Investigate the nature of the dynamics of changes in the criteria used for interpreting the results of DGA, in serviceable high-voltage transformers, leaky performance.

**Methodology.** Theory of time series, regression analysis, the theory of pattern recognition, the method of reference levels, metric methods of recognition, diagnostics by distance to the standard.

**Findings.** According to the results of the research, it is established that in normal functioning transformers, the values of all the diagnostic features used to interpret DGA results are changed randomly. Emergency actions on the part of the power grid lead to a short-term occurrence of a systematic component in the dependencies of the concentrations and rates of gas build-up on the duration of operation, and to a short-term stabilization of the values of the gas ratios at the level corresponding to this energy impact, as well as to the similarity of the graphic images.

**Originality.** The performed analysis showed that in transformers of leaky performance, the appearance and development of a defect is accompanied not only by a change in the numerical values of the diagnostic criteria, which is known and used in the diagnosis, but also to a significant change in the nature of the dependencies of the diagnostic criteria versus time.

**Practical value.** The obtained results make it possible to detect developing defects in transformers of non-germetic execution at an early stage of their development, even before the values of gas concentrations exceed the boundary values, which will help to avoid the destruction of insulation, and also to recognize the growth of concentrations of gases dissolved in oil, caused by the influence of emergency operation of electrical networks.

**Keywords:** 5 dissolved gas analysis, concentration of gases, slew rate, gas ratio, graphic images, dynamics of change, regression analysis, control levels, diagnostic distance.

### REFERENCES

- [1]. IEC Publication 60599, Interpretation of the analysis of gases in transformer and other oil med electrical equipment in &, Geneva, Switzerland, 1999.
- [2]. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARCD C57.104-2008, Feb.2009.
- [3]. Dornenburg, E., Strittmater, W. (1974). Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis, *Brown Boveri Review*, 61, 238-274.
- [4]. SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezul'tatami 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]. Kiiv, 2007, 92 p. (in Ukrainian).
- [5]. RD 153-34.0-46.302-00: Metodicheskie ukazanija po diagnostike razvivajushhihsja defektov transformatornogo oborudovanija po rezul'tatam 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]. Moskva: NC JeNAS, 2001, 28 p. (in Russian).
- [6]. Davidenko I.V. (2009). Opredelenie dopustimyh znachenij kontroliruemymykh parametrov maslonapolnennogo oborudovaniya na osnove massiva nabljudаемых данных [Determination of admissible values of controlled parameters of oil-filled equipment on the basis of an array of observable data]. *Jelektrichestvo*, 6, 81–82. (in Russian).
- [7]. Davidenko I.V. (2009) Kriterii ocenki tehničeskogo sostojaniya maslonapolnennykh vvodov i izmeritel'nykh transformatorov po skorosti rosta koncentracij rastvorenykh gazov. [Criteria for assessing the technical condition of oil-filled bushings and measuring transformers in terms of the growth rate of concentrations of dissolved gases]. *Sb. dokladov nauchno-praktičeskoj konferencii specialistov Sibiri i Vostoka "Diagnostika jelektricheskikh ustanovok"*. Novosibirsk: GCRO, 57–68. (in Russian).
- [8]. Shutenko O.V. (2017). Opredelenie znachenij granichnykh koncentracij rastvorenykh v masle gazov metodom minimal'nogo riska [Determination of the values of the boundary concentrations of gases dissolved in oil by the minimum risk method]. *Jelektrichestvo*, 8, 50–60 (in Russian) DOI: 10.2 4160 /0013-5380-2017-8-50-60
- [9]. Abramov V.B. (2012). Osobennosti kontrolja maslonapolnennogo oborudovaniya po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza rastvorenykh v masle gazov. [Features of the control of oil-filled equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 4, 77–79. (in Russian).
- [10]. Davidenko I.V. (2009) Novye sposoby identifikacija vida defektov maslonapolnennykh vvodov [New ways to identify the type of defects of oil-filled bushings]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy Jenergetiki*, 1-2, 130–134. (in Russian).
- [11]. Duval M., Lamarre L. (2014). The duval pentagon - a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30, 6, 9-12. DOI: 10.1109/MEI.2014.6943428.
- [12]. Ahmed M.R., Geliel M.A., Khalil A. (2013) Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis. *Control & Automation (MED), 21st Mediterranean Conference on IEEE*, 584-589. DOI: 10.1109/MED.2013.6608781.
- [13]. Dhote N.K., Helonde J.B. (2012). Diagnosis of power transformer faults based on five fuzzy ratio method. *WSEAS Transaction on Power System*, 3, 3, 114-125. doi: http://10.1109/IPEC.2005.206897.
- [14]. Liu, C.H., Lin, T.B., Wang, S.Y. (2015). Integrated power transformer diagnosis using hybrid fuzzy dissolved gas analysis. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 10, 6, 689-698. DOI: 10.1002/tee.22148.
- [15]. Siddique M.A.A., Mehruz S. (2015). Artificial neural networks based incipient fault diagnosis for power transformers. *India Conference (INDICON), 2015 Annual IEEE, IEEE*, 1-6. DOI: 10.1109/indicon.2015.7443174.
- [16]. Liu C.H., Yao L.T., Lin, T.B., & Wang, S.Y. (2013). Innovated Fault Diagnosis for Power Transformer Using Hybrid Fuzzy Dissolved Gas Analysis. *Applied Mechanics and Materials*, 284-287, 1082-1086. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.1082.
- [17]. Bondarenko V.E., Shutenko O.V. (2017). Razrabotka nechetkoj nejronnoj seti dlja interpretacii rezul'tatov analiza rastvorenykh v masle gazov [Development of fuzzy neural network for interpretation of analysis results of dissolved gases in oil]. *Elektrotehnika i Elektromehanika*, 2, 49–56. (in Russian). DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.08.
- [18]. Lindgren S.R. Transformer condition assessment experiences using automated on-line dissolved gas analysis. /S.R. Lindgren // CIGRE Reports, A2-202.
- [19]. Sparling, B.D., Jacques, A. (2007) Power transformer life extension through better monitoring. // Proc. PowerGrid Europe, Spain.
- [20]. Shutenko O.V. (2010). Metod obnaruzhenija razvivajushih defektov vysokovol'nykh transformatorov po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza rastvorenykh v masle gazov [The method for detecting developing defects of high-voltage transformers based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 3, 38–45. (in Russian).
- [21]. Shutenko O.V., Abramov V.B. (2017) Ocenka vlijanija dlitel'nosti jekspluatacii na znachenija koncentracij gazov v negermetichnykh transformatorah [Estimation of the influence of operating time on the values of gas concentrations in transformers of non-germetic execution]. *Jelektro. Jelektrotehnika, jelektrojenergetika, jelektrotehnicheskaja promyshlennost*, 2, 36–45. (in Russian).
- [22]. Shutenko O.V. (2017). Osobennosti dinamiki izmenenija kriteriev ispol'zuemykh dlja interpretacii rezul'tatov ARG v silovykh transformatorah s raznymi tipami defektov [Features of dynamics of change of criteria used for interpretation of DGA results in power transformers with different types of defects]. *Novoe v Rossijskoj jelektrojenergetike*, 9, 30-49. (in Russian).
- [23]. Dzhonson N. (1981). Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnike i nauke. M. Mir, 520.
- [24]. Birger I.A. (1978). Tehničeskaja diagnostika. M. Mashinostroenie, 240.
- [25]. Bojarchukov G.M. [2010]. Praktičeskie problemy ocenki sostojaniya vysokovol'tnogo oborudovaniya po soderzhaniju gazov v transformatornom masle. [Practical problems in assessing the state of high-voltage equipment for the gas content in transformer oil]. *Novini energetiki*, 7, 23–33. (in Russian).
- [26]. Malyushevska, A., Dmitrishin, A., & Toporov, S. (2015). Research of influence of heightened temperatures on the operational characteristics of transformer oil t-1500 in film insulation systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 21-25. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-4