

УДК 621.314

О. В. Шутенко,
канд. техн. наук,
Д. Н. Баклай, асп.
Национальный
технический
университет
«Харьковский
политехнический
институт»

АНАЛИЗ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОШЕНИЙ ПАР ГАЗОВ, РЕКОМЕНДУЕМЫХ ЗАРУБЕЖНЫМИ МЕТОДИКАМИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПА ДЕФЕКТА В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Постановка проблемы. Повышение достоверности процедуры принятия решения при интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ), является актуальной и практически значимой задачей. Одним из критериев, который позволяет установить тип прогнозируемого дефекта в трансформаторе, является отношение пар газов. Большинство известных методик, по интерпретации результатов ХАРГ используют отношения пар газов, но при этом существуют различия, как между используемыми отношениями, так и между их значениями, которые и определяют тип возможного дефекта. Соответственно использование различных критериев приводит к разным выводам. В связи с этим возникает объективная необходимость в оценке достоверности использования различных по интерпретации результатов ХАРГ и в частности отношений пар газов. В качестве одного из направлений для выполнения подобной оценки, возможно, использовать анализ законов распределения отношений пар газов, для трансформаторов с различным состоянием. Анализ законов распределения позволит определить вероятности ошибок I и II-го рода, а также значение возможного экономического ущерба, в случае принятия ошибочных решений.

Анализ публикаций. В настоящее время известными мировыми энергетическими компаниями и трансформаторостроительными фирмами наряду с отношениями пар газов, которые рекомендованы методикой ИЕС 60599 (CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ и дополнительных отношений CO_2/CO , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ и O_2/N_2), используются и собственные отношения.

Отношение $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ используется в методике Дорненбурга [1] вместе с отношениями CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, и $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$. Эти соотношения объединяют пять газов: H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 и C_2H_6 . Методика позволяет идентифицировать три основных дефекта в маслonaполненном оборудовании: термическое воздействие, частичные разряды с малой интенсивностью, дуговые процессы. Для дефектов

термического характера и для частичных разрядов с малой интенсивностью значение отношения меньше 0,3, а для дуговых процессов больше 0,3.

Отношение C_2H_6/CH_4 используется в методике Роджерса [2] совместно с отношениями CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 и C_2H_4/C_2H_6 . Согласно методике Роджерса, нормальному состоянию трансформаторов соответствуют следующие значения отношений: $CH_4/H_2 > 0,1 < 1,0$, $C_2H_6/CH_4 < 1$, $C_2H_4/C_2H_6 < 1$, $C_2H_2/C_2H_4 < 0,5$. Другими словами отношение этана к метану при отсутствии дефекта в трансформаторе должно быть меньше единицы.

Отношение C_2H_6/C_2H_2 используется в методиках Дорненбурга [1], Мюллера [3] и ВЭИ [4]. В методике Дорненбурга отношение C_2H_6/C_2H_2 используется вместе с отношениями CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 и C_2H_2/CH_4 . В методике Мюллера данное отношение анализируется вместе с отношениями CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 и C_2H_2/CH_4 . В методике, разработанной ВЭИ, отношение C_2H_6/C_2H_2 применяется наряду с отношениями CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_4/C_2H_6 , C_2H_6/CH_4 и C_2H_4/CH_4 . Согласно методике Дорненбурга для дуговых процессов отношение $C_2H_6/C_2H_2 < 0,4$, а для дефектов термического характера и для частичных разрядов с малой интенсивностью $C_2H_6/C_2H_2 > 0,4$.

Отношение C_2H_2/CH_4 используется в методике ВЭИ [4] вместе с отношениями CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_4/C_2H_6 , C_2H_6/CH_4 и C_2H_6/C_2H_2 .

Отношение H_2/C_2H_6 используется в методике Шлизингера [3], по которой отношения газов комбинируются с уровнями концентрации. Комбинация выражается кодовыми числами, применяемыми для интерпретации результатов ХАРГ. Используется пять отношений газов: C_2H_2/H_2 , C_2H_2/C_2H_6 , H_2/C_2H_6 , C_2H_4/C_2H_6 , CO_2/CO . В зависимости от значений отношений им присваиваются кодовые числа. Далее находятся кодовые числа по уровням концентрации C_2H_2 , H_2 , суммы C_xH_y и суммы CO_2 и CO . Для этих газов установлены уровни концентраций (от-до). В зависимости от концентрации по таблице присваивается кодовое число. Комбинации кодовых чисел сведены в диагностическую таблицу. Методика способна определять более чем один вид дефекта.

Отношение C_2H_4/C_xH_y предложено в работах [5, 6] в качестве дополнительного критерия для распознавания высокотемпературных дефектов в маслonaполненном оборудовании. Согласно данным приведенным в этих работах в герметичном оборудовании можно предполагать отсутствие дефектов термического характера, если $C_2H_4/C_xH_y \leq 10 \pm 5\%$. В негерметичном оборудовании можно предполагать отсутствие дефекта термического характера с высокими температурами если, $C_2H_4/C_xH_y \geq 79 \pm 5\%$.

В работе [7] выполнены исследования законов распределения отношений пар газов, рекомендуемых СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 для распознавания типа дефекта в высоковольтных трансформаторах. По результатам исследований установлено, что как для бездефектного так и для дефектного состояний (термический дефект с температурой более 700°C), отношения пар газов имеют распределение, близкое к распределению Вейбулла. При этом установлено, что при отсутствии дефекта в трансформаторах негерметичного исполнения, эти отношения могут иметь значения характерные для дефектных трансформаторов. В связи с этим представляет непосредственный интерес выполнить анализ законов распределения и для отношений газов, не входящих в СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006.

Цель статьи – В статье приведены результаты исследований законов распределений для отношений пар газов, которые используются в зарубежных методиках, для распознавания типа дефекта в высоковольтных трансформаторах.

Исследование законов распределения отношений пар газов в бездефектных трансформаторах. Для исследования законов распределения данных отношений, 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.

Сначала были рассчитаны следующие отношения пар газов: C_2H_2/CH_4 , C_2H_6/C_2H_2 , C_2H_6/CH_4 , C_2H_4/CH_4 , H_2/C_2H_6 и C_2H_4/C_xH_y . При этом расчет значений отношений пар газов выполнялся, только, если концентрации двух газов в паре превышали порог чувствительности хроматографа. Другими словами при расчетах, не учитывались концентрации газов равные нулю, поскольку в этом случае вероятность появления в трансформаторе дефекта практически отсутствует. В таблице 1 приведены объемы выборочных значений отношений пар газов полученные в результате расчета.

Таблица 1

Объемы выборочных значений отношений пар газов

C_2H_2/CH_4	C_2H_6/C_2H_2	C_2H_6/CH_4	C_2H_4/CH_4	H_2/C_2H_6	C_2H_4/C_xH_y
2532	2837	5354	5403	2629	6748

Наблюдаемые различия в объеме исходных данных обусловлены тем, что в трансформаторах негерметичного исполнения концентрации ацетилена, имеющие значения выше предела распознавания хроматографа встречаются редко, в тоже время этилен является наиболее распространенным газом, при этом его концентрации могут достигать аномально высоких значений и при отсутствии дефекта. Относительно небольшой объем значений для отношения H_2/C_2H_6 обусловлен большим количеством измерений, для которых, концентрации водорода, имеют значения ниже предела обнаружения хроматографа. Это обусловлено низкой растворимостью водорода в масле и его диффузией в атмосферу. С другой стороны, в негерметичном оборудовании, концентрации этана, достаточно часто могут иметь значения, ниже предела обнаружения хроматографа [5, 6].

Для снижения статистической неоднородности результатов расчета, был использован двухэтапный алгоритм статистической обработки, который приведен в [7]. В результате статистической обработки для каждого отношения пар газов были сформированы несколько массивов с однородными значениями. Объем выборочных значений N , значения математического ожидания M_x , дисперсии D_x , а также значения коэффициентов асимметрии и эксцесса j_a и j_e для данных из однородных массивов, приведены в табл. 2. Как видно из таблицы значения математических ожиданий для одних и тех же отношений пар газов, в разных массивах значительно отличаются, что свидетельствует о различных условиях, в которых эксплуатировались исследуемые трансформаторы. Все без исключения массивы данных имеют положительное значение коэффициента эксцесса, что говорит о том, что кривая распределения имеет более высокую и «острую» вершину, чем кривая нормального закона. В то же время коэффициент асимметрии распределений имеет как положительные, так и отрицательные значения. При этом отрицательные значения коэффициентов асимметрии выявлены только в массивах отношений C_2H_4/C_xH_y , что свидетельствует о том, что для этого отношения наиболее вероятными, являются значения близкими к единице, что согласуется с результатами, приведенными в работах [5, 6]. Положительное значение коэффициента асимметрии свидетельствует о том, что «длинная часть» кривой распределения расположена справа от математического ожидания, при отрицательном значении коэффициента асимметрии «длинная часть» кривой распределения расположена слева. Полученные значения коэффициентов асимметрии и эксцесса косвенно свидетельствуют об отличии исследуемых распределений от нормального закона.

Таблица 2

Статистические характеристики однородных массивов для отношений пар газов

Отношения	Массив	<i>N</i>	<i>M_x</i>	<i>D_x</i>	<i>j_a</i>	<i>j_e</i>
C_2H_2/CH_4	<i>M₁</i>	391	3,138562	4,360944	1,113699	4,977899
	<i>M₂</i>	421	2,317547	2,342387	0,798162	3,694635
	<i>M₃</i>	348	1,725058	1,225896	0,621294	2,862679
	<i>M₄</i>	235	0,899964	0,300208	0,549578	2,894237
	<i>M₅</i>	229	0,303565	0,037248	1,079210	4,646515
	<i>M₆</i>	248	0,232122	0,020535	0,730720	2,995391
C_2H_6/C_2H_2	<i>M₁</i>	361	1,937166	1,432782	1,378281	5,734734
	<i>M₂</i>	456	1,637119	1,387815	1,692149	7,976029
	<i>M₃</i>	644	0,647621	0,155910	1,182657	5,907405
	<i>M₄</i>	440	0,437422	0,037605	0,467620	3,545397
C_2H_6/CH_4	<i>M₁</i>	626	2,130948	2,444715	1,220382	5,358247
	<i>M₂</i>	441	2,257228	2,166339	0,746503	3,513658
	<i>M₃</i>	665	0,890381	0,286323	1,112960	4,742561
	<i>M₄</i>	661	0,626242	0,118062	0,759087	4,008767
	<i>M₅</i>	745	0,275262	0,026226	1,102471	5,534506
	<i>M₆</i>	785	0,292741	0,021783	0,588534	3,163253
	<i>M₇</i>	769	0,250493	0,018204	0,736428	3,444390
	<i>M₈</i>	550	0,225436	0,089756	0,120859	2,730554
C_2H_4/CH_4	<i>M₁</i>	1244	2,626438	2,076897	0,916871	4,459397
	<i>M₂</i>	1138	2,428152	1,726298	0,756143	3,793862
	<i>M₃</i>	945	2,478729	1,270100	0,415870	3,061597
	<i>M₄</i>	590	1,516429	0,540979	0,440877	2,894042
	<i>M₅</i>	332	1,118587	0,463797	0,334765	3,027621
	<i>M₆</i>	333	0,492680	0,031891	0,253899	3,438559
H_2/C_2H_6	<i>M₁</i>	552	2,745351	4,414659	1,640170	7,096793
	<i>M₂</i>	549	2,523945	3,227933	1,404816	6,007654
	<i>M₃</i>	561	2,204501	2,023085	1,024803	4,683067
	<i>M₄</i>	567	1,777260	0,989022	0,810787	3,698118
C_2H_4/C_2H_2	<i>M₁</i>	1966	0,676941	0,032061	-0,254389	2,764653
	<i>M₂</i>	1028	0,688992	0,024053	-0,226288	2,925939
	<i>M₃</i>	1013	0,625026	0,025838	-0,088772	2,985645
	<i>M₄</i>	761	0,740701	0,029879	-0,388721	2,619703
	<i>M₅</i>	729	0,820626	0,022003	-0,818918	3,794483

В процессе расчетов, выполнялась проверка гипотезы о предполагаемом распределении генеральной совокупности экспериментальных значений для следующих законов распределения: нормального, логарифмически-нормального, экспоненциального, гамма-распределения, бетта-распределения, распределений Лапласа, Коши, Вейбулла, Релея, распределения экстремальных значений, а также ряда других. Всего было проверено 18 известных законов распределения. В качестве меры согласия использовались значения критериев χ^2 Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова.

Все расчеты и построение гистограмм эмпирического распределения, выполнялись с помощью, разработанной на кафедре «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ» программы «ZR» [8].

Значения параметров распределения α и β , критериев согласия χ^2 и критерия Колмогорова-Смирнова приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения параметров закона распределения Вейбулла а также расчетные и критические значения (при $\alpha=0,05$) критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова для отношений пар газов

Отношения	Массив	Параметры закона распределения		Критерий Пирсона			Критерий Колмогорова-Смирнова	
		α	β	f	$\chi^2_{\text{расч.}}$	$\chi^2_{\text{крит.}}$	$\lambda_{\text{расч.}}$	$\lambda_{\text{крит.}}$
C_2H_2/CH_4	M_1	3,491251	1,532229	3	7,000	7,820	0,600	1,360
	M_2	2,580232	1,544680	3	7,175	7,820	0,945	1,360
	M_3	1,926250	1,591266	3	6,105	7,820	0,766	1,360
	M_4	1,009399	1,681641	3	1,154	7,820	0,420	1,360
	M_5	0,339234	1,605043	4	3,648	9,490	0,389	1,360
	M_6	0,260072	1,656989	4	6,891	9,490	0,452	1,360
C_2H_6/C_2H_2	M_1	2,170463	1,657468	1	2,173	3,840	0,630	1,360
	M_2	1,801886	1,413073	2	3,324	5,990	0,559	1,360
	M_3	0,726427	1,683564	2	5,752	5,990	0,604	1,360
	M_4	0,493340	2,392488	4	6,348	9,490	0,563	1,360
C_2H_6/CH_4	M_1	2,338277	1,386187	4	9,480	9,490	0,890	1,360
	M_2	2,516577	1,565726	3	4,145	7,820	0,524	1,360
	M_3	0,999751	1,710095	3	7,785	7,820	0,849	1,360
	M_4	0,706314	1,888823	3	6,163	7,820	0,559	1,360
	M_5	0,309491	1,750263	5	6,669	11,100	0,804	1,360
	M_6	0,330663	2,074609	7	5,426	14,100	0,360	1,360
	M_7	0,282671	1,928062	7	10,073	14,100	0,759	1,360
	M_8	0,253281	2,702919	6	8,007	12,600	0,462	1,360
C_2H_4/CH_4	M_1	2,962309	1,890031	4	8,807	9,490	0,581	1,360
	M_2	2,739769	1,919149	4	9,079	9,490	0,685	1,360
	M_3	2,797196	2,328621	4	8,067	9,490	0,910	1,360
	M_4	1,712807	2,165003	4	4,052	9,490	0,836	1,360
	M_5	1,258843	2,581313	4	3,589	9,490	0,463	1,360
	M_6	0,551070	2,996390	4	8,258	9,490	0,836	1,360
H_2/C_2H_6	M_1	2,989842	1,328556	5	6,461	11,100	0,502	1,360
	M_2	2,782739	1,429364	5	10,556	11,100	0,430	1,360
	M_3	2,460583	1,584160	6	11,432	12,600	0,911	1,360
	M_4	2,003095	1,847991	6	9,787	12,600	0,616	1,360
C_2H_4/C_xH_y	M_1	0,742727	4,267570	8	11,828	15,500	0,738	1,360
	M_2	0,748310	5,095007	6	11,266	12,600	0,879	1,360
	M_3	0,684558	4,400124	7	12,511	14,100	0,601	1,360
	M_4	0,806295	4,895573	4	8,686	9,490	0,709	1,360
	M_5	0,879809	6,467571	3	7,130	7,820	0,646	1,360

По результатам анализа выполненного с помощью программы «ZR» удалось установить, что распределения всех без исключений, анализируемых отношений пар

газов, для трансформаторов, не имеющих дефектов, подчиняется закону распределения Вейбулла, с плотностью:

$$p(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (1)$$

где: α , β – параметры закона распределения, интерпретируемые соответственно как параметр масштаба и параметр формы.

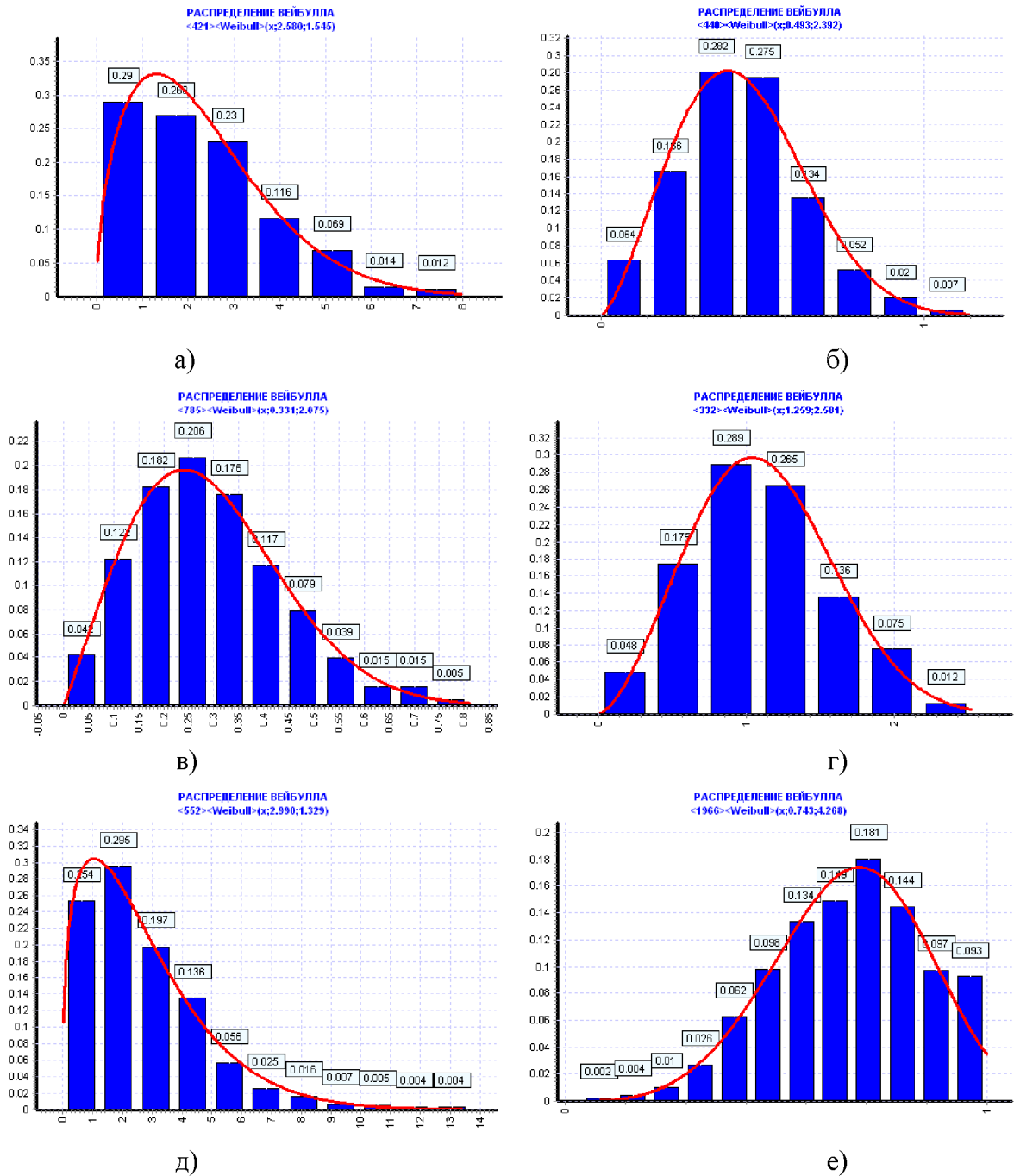


Рис. 1 – Гистограммы эмпирического распределения и функции плотности распределения Вейбулла для исследуемых отношений пар газов

а) C_2H_2/CH_4 ; б) C_2H_6/C_2H_2 ; в) C_2H_6/CH_4 ; г) C_2H_4/CH_4 ; д) H_2/C_2H_6 ; е) C_2H_4/C_2H_6

Значения параметров масштаба и формы для закона распределения Вейбулла определялись по выражениям:

$$\beta = \frac{N-1}{N} \cdot \left(0,465 \cdot \frac{\sqrt{D}}{M} + 1,282 \cdot \frac{M}{\sqrt{D}} - 0,7 \right); \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{M}{1 - 0,427 \cdot (\beta - 1) \cdot \beta^{-1,9}}, \quad (3)$$

где: N – объем выборочных значений, M – значения математического ожидания, D – значение дисперсии.

Как видно из таблицы для всех массивов данных расчетные значения критерия согласия Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова не превышают критических точек, на основании чего можно сделать вывод о том, что нет оснований для того, чтобы отвергнуть гипотезу о приемлемости закона распределения Вейбулла.

Гистограммы эмпирического распределения и функции плотности распределения Вейбулла для некоторых массивов, исследуемых отношений пар газов, приведены на рисунке 1. Как видно из рисунка математическое ожидание для разных отношений пар газов может смещаться как влево, так и вправо, что свидетельствует о различной степени влияния условий эксплуатации, на изменение концентраций растворенных в масле газов.

Исследование закона распределения отношений пар газов для трансформаторов с термическим дефектом (температура более 700°C). При оценке законов распределения отношений пар газов для дефектных трансформаторов, принципиально учитывать характер дефекта. В работе [7] исследованы законы распределения отношений пар газов, рекомендуемые СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006, на основании результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов по 67 трансформаторам, у которых были выявлены дефекты с температурой более 700°C. В основном это дефекты магнитопровода. Для удобства дальнейшего анализа, оценка законов распределения, исследуемых отношений выполнялась по той же выборке. Статистические характеристики массивов отношений пар газов используемых в различных методиках, для 67 трансформаторов, у которых были выявлены дефекты с температурой более 700°C приведены в таблице 4.

Таблица 4

Статистические массивы отношений пар газов используемых в различных методиках, для 67 трансформаторов, у которых были выявлены дефекты с температурой более 700°C

Отношения	N	M_x	D_x	j_a	j_e
C_2H_2/CH_4	67	0,037872	0,000538	0,716891	2,820343
C_2H_6/C_2H_2	67	62,124343	1291,612167	0,509206	3,082295
C_2H_6/CH_4	67	0,473342	0,075899	0,417329	1,746829
C_2H_4/CH_4	67	4,917361	4,602911	0,296165	2,489976
H_2/C_2H_6	67	2,975094	1,895930	0,351752	2,354118
C_2H_4/C_xH_y	67	0,659125	0,005993	-0,486549	3,005760

Как видно из таблицы 4 статистические характеристики массивов отношений пар газов, для дефектных трансформаторов, практически не отличаются от параметров распределений полученных для бездефектных трансформаторов. Положительные значения коэффициентов асимметрии и эксцесса свидетельствуют об отличии исследуемых законов распределений от нормального. Несколько меньшие значения коэффициентов асимметрии для массивов дефектных трансформаторов, свидетельствующие о более симметричной форме распределения, могут быть обусловлены небольшим объемом выборочных значений.

Выполненный, анализ показал, что для описания отношений пар газов в дефектных трансформаторах может быть использован закон Вейбулла. Значения параметров закона распределения Вейбулла а также расчетные и критические значения (при $\alpha=0,05$) критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова для отношений пар газов используемых в различных методиках, для 67 трансформаторов, у которых были выявлены дефекты с температурой более 700°C приведены в таблице 5.

Таблица 5

Значения параметров закона распределения Вейбулла а также расчетные и критические значения (при $\alpha=0,05$) критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова для отношений пар газов используемых в различных методиках, для 67 трансформаторов, у которых были выявлены дефекты с температурой более 700°C

Отношения	Параметры закона распределения		Значение критерия Пирсона			Значение критерия Колмогорова-Смирнова	
	α	β	f	$\chi^2_{\text{расч.}}$	$\chi^2_{\text{крит.}}$	$\lambda_{\text{расч.}}$	$\lambda_{\text{крит.}}$
C_2H_2/CH_4	0,042423	1,652243	3	0,491	7,820	0,197	1,360
C_2H_6/C_2H_2	69,866759	69,866759	3	0,606	7,820	0,163	1,360
C_2H_6/CH_4	0,532146	1,746829	3	0,209	7,820	0,144	1,360
C_2H_4/CH_4	5,545300	2,404795	3	0,400	7,820	0,153	1,360
H_2/C_2H_6	3,359155	2,251090	3	0,201	7,820	0,113	1,360
C_2H_4/C_xH_y	0,692314	10,116741	3	0,166	7,820	0,104	1,360

Как видно из таблицы для всех исследуемых отношений, расчетные значения критерия согласия Пирсона и критерия Колмогорова не превышают критические, на основании чего можно сделать вывод о том, что нет оснований для того, чтобы отвергнуть гипотезу о приемлемости закона распределения Вейбулла. На рисунке 2 приведены гистограмма эмпирического распределения и функция плотности распределения законов Вейбулла для исследуемых отношений пар газов. Таким образом, распределения отношений пар газов для трансформаторов с высокотемпературным перегревом, могут быть описаны законом Вейбулла.

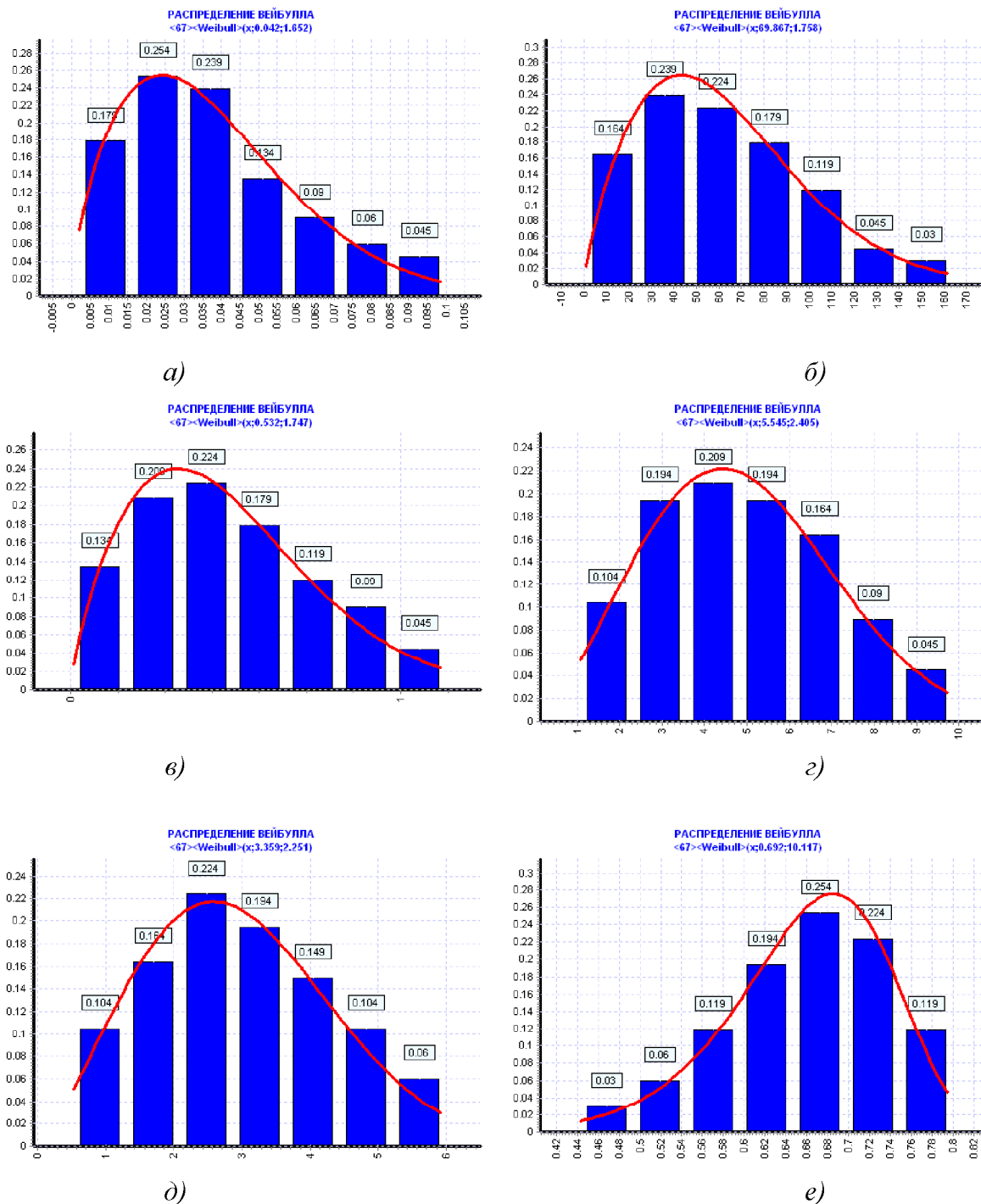


Рис. 2 – Гистограмма эмпирического распределения и функция плотности распределения законов Вейбулла отношений пар газов, для трансформаторов с высокотемпературным дефектом
 а) C_2H_2/CH_4 ; б) C_2H_2/C_2H_2 ; в) C_2H_2/CH_4 ; г) C_2H_4/CH_4 ; д) H_2/C_2H_6 ; е) C_2H_4/C_xH_y

Анализ полученных результатов. Полученные плотности теоретических распределений отношений пар газов для бездефектных и дефектных трансформаторов позволяют проанализировать области пересечения этих распределений, которые и обуславливают вероятность принятия ошибочных решений. Данные плотности приведены на рисунке 3.

Как видно из рисунка значения отношений пар газов, в трансформаторах, не

имеющих дефектов, в процессе длительной эксплуатации изменяются в достаточно широком диапазоне. При этом значения отношений могут выходить за границы, характеризующие нормальное состояние трансформаторов, и принимать значения характерные для дефекта.

Плотности теоретических распределений отношения C_2H_2/CH_4 , для исследуемых массивов, приведены на рисунке 3.а). Потенциально площади ограниченные кривыми плотностей распределения на интервалах $0,3 < \frac{C_2H_2}{CH_4}$ и $\frac{C_2H_2}{CH_4} > 0,3$ определяют вероятность ошибки первого рода.

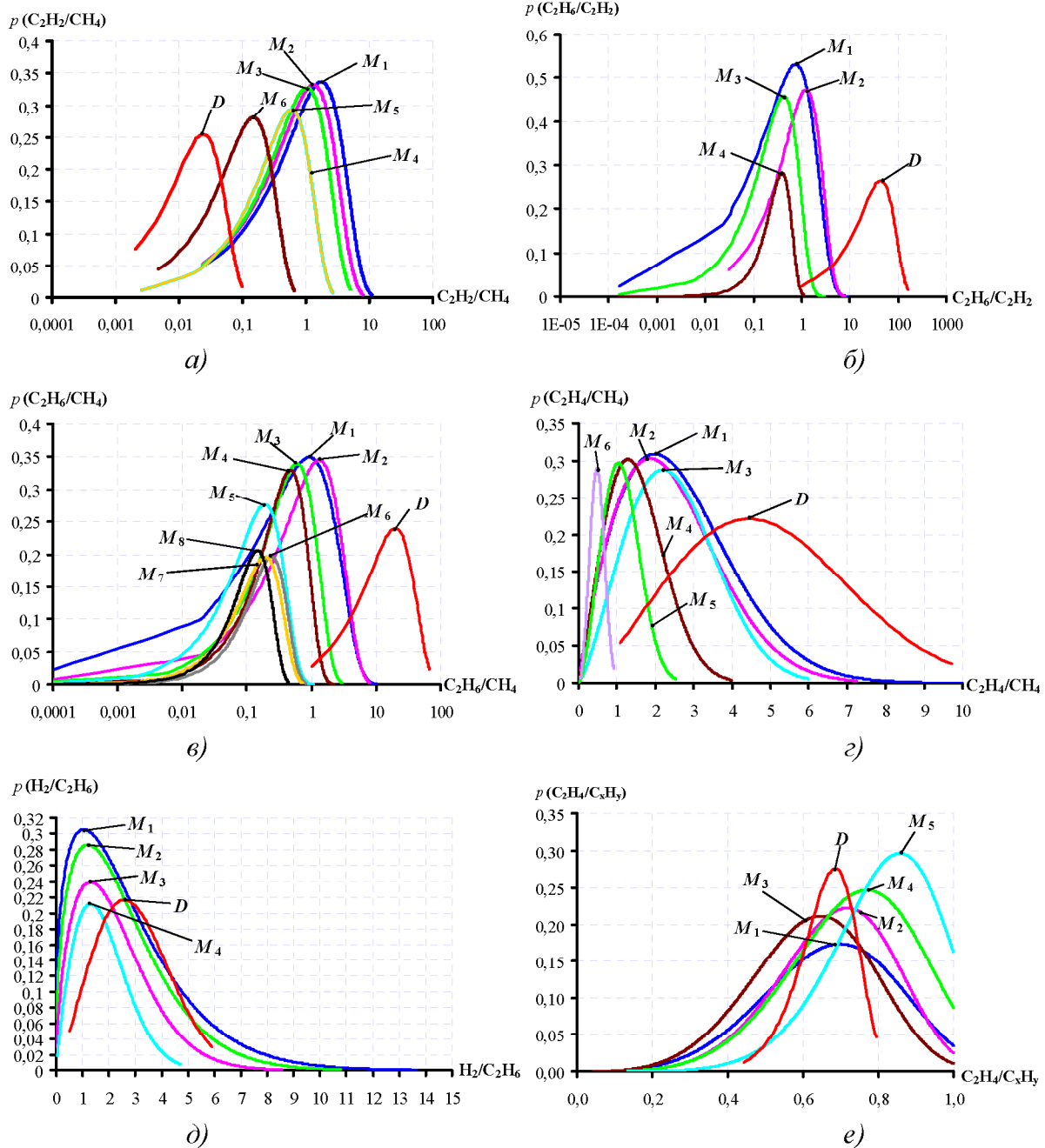


Рис. 3 - Плотности теоретических распределений отношений пар газов, для нормального (M_1 – M_i) и дефектного (D – термический дефект с температурой выше $700^\circ C$) состояний трансформаторов
 а) C_2H_2/CH_4 ; б) C_2H_6/C_2H_2 ; в) C_2H_6/CH_4 ; г) C_2H_4/CH_4 ; д) H_2/C_2H_6 ; е) C_2H_4/C_xH_y

Однако, для принятия ошибочного решения о наличии дефекта в трансформаторе, при использовании отношения C_2H_2/CH_4 необходимо одновременное выполнение еще нескольких условий:

1. Концентрации хотя бы одного из газов углеводородного ряда и водорода должны превышать граничные значения установленные методикой Дорненбурга;

2. Значения отношений CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 , и C_2H_6/C_2H_2 должны соответствовать наличию дефектного состояния, согласно методики Дорненбурга.

Плотности распределений отношения C_2H_6/C_2H_2 приведены на рисунке 3 б). Как видно из рисунка при отсутствии дефекта в трансформаторах значения отношения C_2H_6/C_2H_2 распределены и в областях характерных для дефектного состояния трансформаторов. Как и в предыдущем случае, для принятия ошибочного решения о наличии дефекта в трансформаторе, при использовании данного отношения необходимо одновременное выполнение еще нескольких условий:

1. Концентрации хотя бы одного из газов углеводородного ряда и водорода должны превышать граничные значения;

2. Значения остальных, используемых отношений должны соответствовать наличию дефектного состояния, согласно значениям регламентируемым методиками Дорненбурга, Мюллера и ВЭИ.

Таким образом, достоверность принятия решений при использовании отношения C_2H_6/C_2H_2 будет определяться не только и даже не столько значением самого отношения, но и значениями концентраций растворенных в масле газов, а также значениями отношений, используемых совместно с отношением C_2H_6/C_2H_2 .

Плотности теоретических распределений отношения C_2H_6/CH_4 приведены на рисунке 3 в). Потенциально площади ограниченные кривыми плотностей распределения на интервале $1 < \frac{C_2H_6}{CH_4}$ определяют вероятность ошибки первого рода.

Как и для двух рассмотренных выше отношений, для принятия ошибочного решения о наличии дефекта в трансформаторе, при использовании отношения C_2H_6/CH_4 необходимо одновременное выполнение еще нескольких условий:

1. Концентрации хотя бы одного из газов углеводородного ряда и водорода должны превышать граничные значения;

2. Значения отношений CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 и C_2H_4/C_2H_6 должны соответствовать наличию дефектного состояния, методике Роджерса.

Таким образом, достоверность принятия решений при использовании отношения C_2H_6/CH_4 будет определяться не только и даже не столько значением самого отношения, но и значениями концентраций растворенных в масле газов, а также значениями отношений CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 и C_2H_4/C_2H_6 .

На рисунке 3 г) приведены плотности теоретических распределений для отношения C_2H_4/CH_4 . Как видно из рисунка значения отношения C_2H_4/CH_4 в бездефектных трансформаторах варьируются в широких пределах. Для принятия ошибочного решения о наличии дефекта в трансформаторе, при использовании отношения C_2H_4/CH_4 необходимо, одновременное выполнение еще нескольких условий:

1. Концентрации хотя бы одного из газов углеводородного ряда и водорода должны превышать граничные значения;

2. Значения отношений CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_4/C_2H_6 , C_2H_6/CH_4 и C_2H_6/C_2H_2 должны соответствовать наличию дефектного состояния согласно методике ВЭИ.

Таким образом, достоверность принятия решений при использовании отношения C_2H_4/CH_4 будет определяться не только и даже не столько значением

самого отношения, но и значениями концентраций растворенных в масле газов, а также значениями отношений CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$ и $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$.

Теоретические плотности распределений для отношения $\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$ приведены на рисунке 3 д). Как видно из рисунка кривые распределений для нормального состояния практически полностью совпадают с теоретическим распределением для высокотемпературного дефекта. Следует отметить, что из всех рассмотренных выше случаев, это самый тяжелый с точки зрения достоверности распознавания. Но при этом следует учитывать, что окончательно решение о наличии либо отсутствии дефекта будет приниматься с учетом значений концентраций газов и значений отношений $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$, $\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$, CO_2/CO , которые регламентированы методикой Шлизингера.

На рисунке 3 е) приведены плотности теоретических распределений отношения $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_x\text{H}_y$. Как видно из рисунка при отсутствии дефекта с температурой выше 700°C , значения отношений могут находиться в области $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_x\text{H}_y \leq 79$, однако для массива M_5 с максимальным значением концентраций этилена, математическое ожидание смещено в область более высоких значений отношений.

Из рисунка 3, также видно, что кривые распределений для исправного и дефектного состояний пересекаются. Потому принципиально невозможно выбрать значение того или иного отношения пар газов, которые не давали бы ошибочных решений. При этом, значения отношений для дефектных трансформаторов как правило достаточно компактно находятся в областях характерных для данного дефекта. В тоже время значения отношений для бездефектных трансформаторов могут выходить за границы, характеризующие нормальное состояние трансформаторов, и принимать значения характерные для дефекта. Полученные результаты свидетельствуют о том, что отношения пар газов обладают условной диагностической ценностью поскольку, они позволяют распознать вид дефекта, при превышении граничных концентраций хотя бы одного газа углеводородного ряда. Для принятия ошибочного решения о наличии дефекта в трансформаторе, необходимо чтобы кроме значения данного отношения, которое соответствовало бы данному дефекту, концентрации хотя бы одного из газов углеводородного ряда и водорода превышали граничные значения, которые регламентированы данной методикой. Кроме того, значения оставшихся отношений должны также соответствовать наличию дефектного состояния. Таким образом, достоверность принятия решений при использовании отношений пар газов, рекомендуемых зарубежными методиками, будет определяться не только и даже не столько значением самого отношения, но и значениями концентраций растворенных в масле газов, а также значениями других отношений.

Направления дальнейших исследований. Полученные в данной работе законы распределения отношений пар газов, совместно с результатами, полученными в работе [7], позволяют выполнить количественную оценку достоверности распознавания типа прогнозируемого дефекта с помощью известных методик для интерпретации результатов ХАРГ.

Выводы.

1. Выполнен анализ, законов распределения для 6 отношений пар газов, которые рекомендуются известными, международными методиками для определения типа дефекта в трансформаторах. Установлено, что при отсутствии дефекта в трансформаторах негерметичного исполнения отношения $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{CH}_4$, $\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$ и $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_x\text{H}_y$ подчиняются закону распределения Вейбулла;

2. Анализ плотностей распределения 6 исследуемых отношений пар газов показал, что при отсутствии дефекта в трансформаторе, негерметичного исполнения, эти отношения могут иметь значения характерные для дефектных трансформаторов;

3. Выполнен анализ, законов распределения отношений пар газов, для дефектных трансформаторов с термическим дефектом, с температурой выше 700°C. Установлено, отношения C_2H_2/CH_4 , C_2H_6/C_2H_2 , C_2H_6/CH_4 , C_2H_4/CH_4 , H_2/C_2H_6 и C_2H_4/C_xH_y подчиняются закону распределения Вейбулла;

4. На основе сравнительного анализа теоретических плотностей распределения для дефектных и бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения, установлено, что для трансформаторов с термическим дефектом, с температурой выше 700°C кривые распределений для бездефектного и дефектного состояний пересекаются. Потому принципиально невозможно выбрать значение того или иного отношения пар газов, которые не давали бы ошибочных решений;

5. Установлено, что значения отношений для дефектных трансформаторов как правило, достаточно компактно находятся в областях характерных для данного дефекта. В тоже время значения отношений для бездефектных трансформаторов могут выходить за границы, характеризующие нормальное состояние трансформаторов, и принимать значения характерные для дефекта;

6. Достоверность принятия решений при использовании отношений пар газов, рекомендуемых зарубежными методиками, будет определяться не только и даже не столько значением самого отношения, но и значениями концентраций растворенных в масле газов, а также значениями других отношений;

7. Полученные результаты свидетельствуют о том, что отношения пар газов обладает условной диагностической ценностью поскольку, они позволяют распознать вид дефекта, при превышении граничных концентраций хотя бы одного газа углеводородного ряда.

Список литературы:

- 1 IEEE Std C57.104, Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers;
2. Rogers R.R. U.K.Experiences in the Interpretation of Incipient Faults in Power Transformers by Dissolved Gas-in-Oil Chromatography Analysis (A Progress Report)// Minutes of Forty-Fourth Int. Conf. of Doble Clients, 1977, Section 10-501.;
3. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов /Б. А. Алексеев – М. НЦ ЭНАС, 2002 г. – 216 с;
4. Львов М.Ю. Оценка информативности показателей контроля технического состояния изоляции трапформаторного оборудования / М.Ю. Львов // Электрические станции. 2002. №12. С. 44 – 51;
5. Боярчуков Г. М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле / Г. М. Боярчуков // Новини енергетики. – 2010. – №10. – С. 24–33;
6. 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;
7. Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Анализ законов распределения отношений пар газов, рекомендуемых СОУ-Н ЕЕ 46.501 для распознавания типа дефекта в высоковольтных трансформаторах /О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай // // Енергетика та електрифікація. – 2013. – № 8. – С. 36 – 47;
8. Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных [Учеб. пособие для вузов] /О.В.Шутенко, Д.Н. Баклай – Харьков.: НТУ «ХПИ». , 2013. – 268 с.

АНАЛІЗ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ВІДНОСИН ПАР ГАЗІВ, ЩО РЕКОМЕНДОВАНІ
ЗАРУБІЖНИМИ МЕТОДИКАМИ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ДЕФЕКТУ У
ВИСОКОВОЛЬТНИЙ ТРАНСФОРМАТОРАХ

О. В. Шутенко, Д. М. Баклай

У статті виконані дослідження законів розподілу відносин пар газів, які рекомендуються відомими зарубіжними методиками для розпізнавання типу дефекту в високовольтних силових трансформаторах. Встановлено, що відносини пар газів, як у бездефектних, так і в дефектних трансформаторах підпорядковані закону розподілу Вейбулла. Встановлено, що криві розподілів відносин пар газів для справного і дефектного станів перетинаються. Тому принципово неможливо вибрати значення того чи іншого відношення пар газів, яке не давало б помилкових рішень.

THE ANALYSIS OF LAWS OF DISTRIBUTION OF RELATIONS OF PAIRS THE
GASES USED BY FOREIGN TECHNIQUES FOR RECOGNITION OF TYPE OF
DEFECT IN HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS

O. V. Shutenko, D. N. Baklay

In the article the study of distribution laws are made relations pairs of gases, which are recommended methods for well-known foreign recognition of the type of defect in the high-voltage power transformers. Found that the ratio of pairs of gases in defect-free and defective in transformers subject Weibull distribution law. Found that the distribution curve of the relationship of pairs of gases for correct and faulty states intersect. Because fundamentally impossible to select a particular relationship pairs of gases, which are not given to wrong decisions.