

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
Д. М. БАКЛАЙ, аспірант, НТУ «ХПІ»;

АНАЛІЗ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ГАЗІВ, РОЗЧИНЕНИХ У МАСЛІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ВИКОНАННЯ

Запропоновано алгоритм статистичної обробки результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів, для формування масивів з однорідними концентраціями в умовах апіорної невизначеності вхідної, вимірювальної інформації. Виконані дослідження законів розподілу газів розчинених у маслі бездефектних і дефектних трансформаторів. Установлено, що щільності розподілів для дефектних і бездефектних станів перетинаються, а це значить що принципово не можливо вибрати граничні значення показників, які б не давали помилкових рішень.

Ключові слова: хроматографічний аналіз, дефект що розвивається, статистична обробка, закони розподілу, критерії згоди.

Постановка проблеми. Одним з первинних ознак наявності дефекту, що розвивається, у силових трансформаторах, може бути перевищення концентрацій газів, деяких значень, названих граничними. Очевидно, що надійність роботи устаткування буде багато в чому залежати від того наскільки коректно обрані граничні значення концентрацій розчинених у маслі газів. Відповідно діючому в Україні нормативному документу [1], граничні значення визначаються на основі аналізу інтегральних функцій розподілу концентрацій газів, отриманих для 90% усіх вимірів у бездефектних трансформаторах. Однак у такий спосіб можна визначити типові концентрації газів, тобто максимальні концентрації газів, які можуть бути виявлені у 90 – 95% устаткування від загальної кількості, що не має ознак дефектів. Дане обмеження є довільним і пов'язане з тим, що згідно із середньосвітовою статистикою тільки у 5–10% устаткування можуть бути відхилення, що приводять до розвитку дефектів. У деяких методичних керівних документах типові значення ототожнюються із граничними концентраціями газів, що розділяють бездефектне й дефектне устаткування. Така інтерпретація, [2], є помилковою. На підставі тільки статистичного аналізу навіть дуже великої кількості результатів ХАРГ, отриманих від устаткування, що не має дефектів не можна визначити граничні показники дефектного стану через багатofакторність процесів газотворення.

© О. В. Шутенко, Д. М. Баклай, 2014

У теорії технічної діагностики [3] граничні значення ознак визначаються на основі аналізу статистичних розподілів діагностичних ознак не тільки для бездефектних, але й дефектних об'єктів.

В зв'язку з цим дослідження й аналіз законів розподілу газів, розчинених у маслі високовольтних силових трансформаторів, є актуальною й практично значимою задачею.

Аналіз публікацій. У цей час питанням, пов'язаним з дослідженням законів розподілу газів, розчинених у маслі високовольтного електроенергетичного устаткування, присвячено кілька публікацій. У роботі [4] на основі аналізу результатів хроматографічного аналізу розчинених газів у маслі високовольтних вводів 110-500 кВ, було встановлено, що по виду розподілу, гази можна розділити на дві групи: перша - H_2 , C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 ; друга - CO , CO_2 . Огибаюча гістограми розподілу першої групи описується виразом:

$$F = \frac{A^2 \cdot x \cdot e^{-A \cdot x}}{Q} \quad (1)$$

Функція розподілу вуглеводнів описується виразом:

$$F = \frac{A^4 \cdot x^2 \cdot e^{-A \cdot x}}{Q}, \quad (2)$$

де: A – коефіцієнт, що задає форму, Q – коефіцієнт масштабування, x – значення аналізованого газу.

У роботі [5] вирази (1) і (2) використані для опису розподілів концентрацій газів, розчинених у маслі силових трансформаторів, напругою 35 кВ. У той же час у роботі [6], вказується, що концентрації газів (зокрема оксиду вуглецю) для трансформаторів напругою 110-220 кВ, мають ранговий розподіл. А в роботі [7] для апроксимації концентрацій газів використаний розподіл експонентного типу:

$$p(x) = \frac{\alpha}{2\sigma\lambda\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \cdot e^{-\left|\frac{x-m}{\sigma\lambda}\right|^\alpha}, \quad (3)$$

де: x_i – поточне значення змінної; m – оцінка математичного очікування; σ – середньоквадратичне відхилення; α – параметр

розподілу; $\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)$ – гамма-функція від аргументу $\frac{1}{\alpha}$; $\lambda = \sqrt{\frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{\alpha}\right)}}$;

Враховуючи суперечливість результатів, наведених у відкритих джерелах, питання оцінки законів розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі високовольтних силових трансформаторів, вимагає додаткових досліджень.

Ціль статті. У статті наведені результати аналізу законів розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі як, бездефектних трансформаторів, так і трансформаторів у яких виявлені дефекти.

Статистична обробка результатів експлуатаційних випробувань. Для дослідження законів розподілу концентрацій розчинених у маслі газів, використовувалися результати хроматографічного аналізу по Донецькій, Луганській, Полтавській, Сумській, Харківській областям, України. Усього проаналізовано результати спостережень по 426 трансформаторам, негерметичного виконання, напругою 110 і 330 кВ загальним обсягом 54658 значень. Отримані в результаті експлуатаційного контролю дані, є статистично неоднорідними, оскільки, аналізовані трансформатори експлуатуються в різних умовах, мають відмінності в сортах масла, що заливається, різні значення завантаження, різний ступінь впливу аварійних режимів роботи мережі і т. д. Усе це приводить до того, що значення концентрацій газів у різних трансформаторах можуть суттєво різнитися.

Наявність неоднорідності в масивах вихідних даних не дозволяє одержати коректні функції щільності законів розподілу (див. рис. 1). У зв'язку, із чим виникає об'єктивна необхідність у розробці алгоритму для попередньої статистичної обробки вихідних даних. Як показав аналіз для більшості газів вуглеводневого ряду, розчинених у маслі трансформаторів негерметичного виконання, при відсутності дефектів, гістограми емпіричного розподілу мають вигляд аналогічний рис. 1. Іншими словами найбільшу ймовірність появи мають концентрації газів рівні нулю. Слід розуміти що, відсутність газу або нульове значення концентрацій є умовністю, а насправді розчинені в маслі гази присутні, просто їх концентрація нижче межі виявлення використовуюваного хроматографа.

У роботі [5] пропонується замінити значення нульових концентрацій значенням нижньої межі хроматографа. Однак, така заміна принципово не змінить форму емпіричного розподілу. Крім того значення реальних концентрацій можуть значно відрізнятись від значення нижньої межі хроматографа. Оскільки, для визначення граничних концентрацій розчинених у маслі газів область мінімальних концентрацій становить незначний інтерес, у порівнянні з областю високих значень концентрацій (необхідно виявити можливу область перетинання для бездефектного й дефектного станів), то при дослідженні законів розподілу «нульові концентрації» не враховувалися.

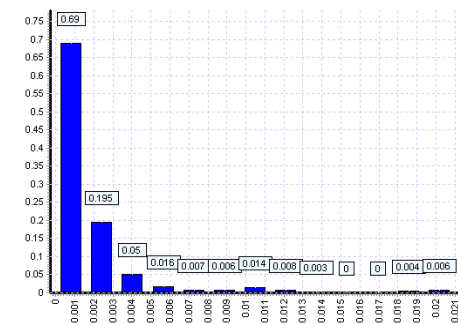


Рис. 1 – Гістограми емпіричного розподілу концентрацій етилену в маслі для масиву вихідних даних

Виконаний аналіз показав, що значення концентрацій того самого газу, для того самого трансформатора, отримані в різні моменти часу можуть відрізнятись на кілька порядків. У зв'язку із цим загальний алгоритм формування масивів однорідних даних був розбитий на два етапи. На першому етапі були виділені однорідні значення концентрацій газів у кожному окремому трансформаторі. На другому етапі були сформовані однорідні масиви по кожному з газів. Для виділення однорідних концентрацій газів у кожному окремому трансформаторі був використаний підхід, заснований на виділенні грубих промахів із числа однотипних вимірів. Враховуючи, що вид закону розподілу невідомий і судячи з літературної інформації, відмінний від нормального, то для виділення грубих промахів, був використаний статистичний критерій Ірвіна [8].

Результати тестування ілюструє рис. 2, на якому наведена залежність вмісту в маслі метану від тривалості експлуатації для

автотрансформатора ПС «Лозова» АТ-2 АТДЦТН-200/330 Північної енергетичної системи, для вихідних даних (рис. 2. *а*) і після обробки (рис. 2. *б*). Як видно з рисунка використання критерію Ірвіна дозволяє суттєво знизити неоднорідність результатів випробувань.

Формування масивів з однорідними концентраціями газів виконувалося з використанням трьох статистичних критеріїв [9]:

1). Ранговий непараметричний критерій Уїлкоксона (W) – для перевірки статистичної гіпотези про схожість законів розподілу двох незалежних вибірок;

2). Z критерій (Z) – для перевірки статистичної гіпотези про рівність математичних очікувань двох незалежних вибірок;

3). Критерій Фішера-Снедекора (F) для перевірки статистичної гіпотези про рівність дисперсій двох незалежних вибірок.

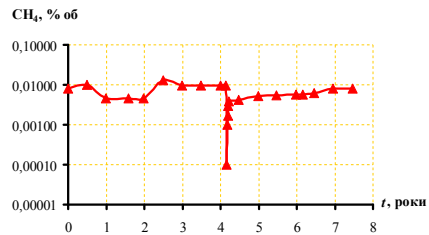
Дві незалежні вибірки вважалися однорідними, якщо за результатами тестування статистичні гіпотези:

про схожість законів розподілу двох незалежних вибірок;

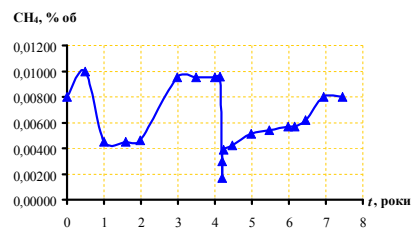
про рівність математичних очікувань двох незалежних вибірок;

про рівність дисперсій двох незалежних вибірок не відкидалися

при заданому рівні значимості $\alpha = 0,05$.



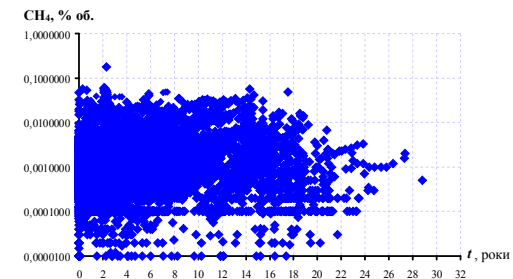
а



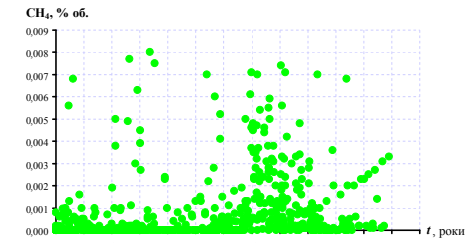
б

Рис. 2 – Залежність вмісту в маслі метану від тривалості експлуатації для автотрансформатора ПС «Лозова» АТ-2 АТДЦТН-200/330 Північної енергетичної системи: *а* – вихідні дані; *б* – після обробки критерієм Ірвіна.

Результати тестування ілюструє рисунок 3, на якому наведені залежності вмісту в маслі метану від тривалості експлуатації, для вихідного масиву даних (3 *а*) і отримані в результаті обробки (3 *б*). Порівнюючи рисунки 3 *а* й *б* легко побачити, що в результаті статистичної обробки неоднорідність, результатів ХАРГ значно знижується.



а



б

Рис. 3 – Залежність вмісту в маслі метану від тривалості експлуатації: *а* – вихідні дані; *б* – після статистичної обробки.

Дослідження законів розподілу газів у бездефектних трансформаторах. У результаті виконаного тестування по кожному з газів були сформовано кілька масивів однорідних концентрацій газів, що дозволило виконати оцінку законів розподілу по кожному з них. Для скорочення обсягу матеріалу в статті наведені характеристики однорідних масивів з мінімальними й максимальними значеннями швидкостей наростання газів, проміжні значення не приводяться. Обсяг вибірових значень N , значення вибірового середнього M_x , вибірової дисперсії D_x , а також коефіцієнтів асиметрії й ексцесу j_a і j_e

для даних з однорідних масивів, з мінімальними (M1) і максимальними (M2) концентраціями наведені в табл. 1.

Як видно з таблиці значення вибіркового середнього для тих самих газів, у різних масивах значимо відрізняються, що свідчить про різні умови, у яких експлуатувалися досліджувані трансформатори. Усі без винятку масиви даних мають позитивне значення коефіцієнта ексцесу, що говорить про те, що крива розподілу має більш високу й «гостру» вершину, ніж крива нормального закону. У той же час коефіцієнт асиметрії розподілів має як позитивні, так і негативні значення. Позитивне значення коефіцієнта асиметрії свідчить про те, що «довга частина» кривої розподілу розташована праворуч від математичного очікування, при негативному значенні коефіцієнта асиметрії «довга частина» кривої розподілу розташований ліворуч.

Таблиця 1 – Статистичні характеристики однорідних масивів розчинених у маслі газів

Газ	Масив	N	M_x	D_x	j_a	j_e
CH ₄	M1	749	0,001787	0,000001	0,859882	4,086394
	M2	114	0,006081	0,000008	0,406340	3,478714
C ₂ H ₄	M1	105	0,005734	0,000003	-0,26606	2,581705
	M2	139	0,016447	0,000073	0,321062	2,700014
C ₂ H ₆	M1	374	0,000400	0,000001	0,267044	3,270485
	M2	115	0,008508	0,000009	0,231670	3,009867
C ₂ H ₂	M1	220	0,000430	0,0000001	-0,03091	2,955332
	M2	621	0,000508	0,0000001	0,421933	3,626950
H ₂	M1	368	0,000167	0,000000	0,838634	3,765743
	M2	124	0,004404	0,000004	0,378305	3,169493
CO	M1	644	0,003914	0,000003	0,474578	3,011045
	M2	606	0,009667	0,000012	0,365192	3,177988
CO ₂	M1	944	0,045001	0,000537	0,627713	3,392695
	M2	896	0,116301	0,003507	0,439919	2,809543
N ₂	M1	249	2,648796	1,616153	0,984917	3,707773
	M2	585	12,722501	4,765405	0,152636	3,312872
O ₂	M1	259	3,069082	0,943027	0,103397	3,711135
	M2	898	4,537143	1,969509	0,499289	4,113706

Побудова гістограм емпіричного розподілу, оцінка параметрів 18 відомих законів розподілу, розрахунки значень критеріїв згоди (χ^2 Пірсона й критерію Колмогорова-Смірнова) виконувалися за допомогою, розробленої на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХПІ» програми «ZR» [9]. За результатами аналізу виконаного за допомогою програми «ZR» вдалося встановити, що розподіл

концентрацій газів, розчинених у маслі трансформаторів, що не мають дефектів, підкоряється закону розподілу Вейбулла, із щільністю:

$$p(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (4)$$

де: α, β – параметри закону розподілу, що інтерпретуються відповідно як параметр масштабу й параметр форми.

Значення параметрів розподілу α і β , критеріїв згоди χ^2 і критерію Колмогорова-Смірнова наведені в табл. 2. Як видно з таблиці для всіх масивів даних і розрахункові значення критерію згоди Пірсона й критерію Колмогорова-Смірнова не перевищують критичних значень, на підставі чого можна зробити висновок про те, що немає підстав для того, щоб відкинути гіпотезу про прийнятність закону розподілу Вейбулла. Гістограми емпіричного розподілу й функції щільності розподілу Вейбулла для однорідних підмножин газів, розчинених у маслі бездефектних трансформаторів, наведено на рисунку 4 та 5.

Таблиця 2 – Значення параметрів закону розподілу Вейбулла а також розрахункові й критичні значення (при $\alpha=0,05$) критеріїв Пірсона й Колмогорова-Смірнова для однорідних підмножин газів, розчинених у маслі бездефектних трансформаторів

Газ	Масив	Параметри закону розподілу		Значення критерію Пірсона		Значення критерію Колмогорова-Смірнова		
		α	β	f	$\chi^2_{расч}$	$\chi^2_{крит}$	$\lambda_{расч}$	$\lambda_{крит}$
CH ₄	M1	0,001989	1,54227	6	10,877	12,60	0,7404	1,360
	M2	0,006866	2,25528	4	6,7478	9,49	0,9142	1,360
C ₂ H ₄	M1	0,006313	4,02688	3	3,8636	7,82	0,5912	1,360
	M2	0,018570	1,98983	4	1,2375	9,49	0,2962	1,360
C ₂ H ₆	M1	0,000444	3,41316	4	7,9233	9,49	0,5648	1,360
	M2	0,009516	3,00048	3	4,0364	7,82	0,5370	1,360
C ₂ H ₂	M1	0,000470	4,42029	2	5,0430	5,99	0,6118	1,360
	M2	0,000573	2,22434	2	7,3878	7,82	0,7156	1,360
H ₂	M1	0,000188	1,89445	5	9,6103	11,10	0,6968	1,360
	M2	0,004968	2,36394	4	1,3976	9,49	0,3394	1,360
CO	M1	0,004416	2,36833	5	7,0255	11,10	0,6510	1,360
	M2	0,010804	3,04655	6	9,7422	12,60	0,7756	1,360
CO ₂	M1	0,050823	2,02699	8	8,0402	15,50	0,3754	1,360
	M2	0,131360	2,05227	12	17,464	21,00	0,4656	1,360
N ₂	M1	2,991637	2,18549	5	8,4480	11,10	0,8743	1,360
	M2	13,60117	6,83962	5	10,990	11,10	1,2698	1,360
O ₂	M1	3,406234	3,48529	3	4,3127	7,82	0,6849	1,360
	M2	5,027787	3,58451	7	14,009	14,1	1,0978	1,360

Отримані відмінності між отриманими авторами законами розподілу, і розподілами, які наведені у відкритих джерелах [5, 6, 7]

можуть бути пояснені різними методами статистичної обробки, які використовували дослідники при формуванні однорідних масивів даних. Так судячи з матеріалів, викладених в [6], попередня обробка даних не використовувалася, тому був використаний ранговий розподіл, який має вигляд, схожий з рис. 1. При формуванні масивів з однорідними концентраціями в [5], був використаний тільки статистичний критерій на рівність математичних очікувань. Наведені автором розподіли концентрацій газів мають форму, схожу на розподіл Вейбулла. А в роботі [7] масиви з однорідними концентраціями формувалися на основі аналізу факторів, що впливають на зміни концентрацій газів.

Дослідження законів розподілу газів у дефектних трансформаторах. При оцінці законів розподілу концентрацій газів для дефектних трансформаторів, принципово враховувати характер дефекту, що вимагає наявності великого обсягу результатів ХАРГ із чітко встановленим типом дефекту. На жаль, обмежений обсяг таких даних, не дозволив виконати більш ретельну оцінку законів розподілу, газів у трансформаторах, що мають дефект. При формуванні однорідних вибірок для дефектних трансформаторів, відбиралися тільки ті гази, які є ключовими для даного типу дефекту. Статистичні характеристики масивів газів для дефектних трансформаторів наведено в таблиці 3.

Як видно з таблиці 3 статистичні характеристики масивів газів, для дефектних трансформаторів, практично не відрізняються від параметрів розподілів отриманих для бездефектних трансформаторів. Позитивні значення коефіцієнтів асиметрії й ексцесу свідчать про відмінність досліджуваних законів розподілів від нормального. Трохи менші значення коефіцієнтів асиметрії для масивів дефектних трансформаторів, що свідчать про більш симетричну форму розподілу, можуть бути обумовлені невеликим обсягом вибірових значень.

Таблиця 3 – Статистичні характеристики однорідних масивів концентрацій газів для дефектних трансформаторів

Газ	N	M_x	D_x	j_a	j_e
CH_4	54	0,036865	0,000303	0,487109	3,150885
C_2H_4	67	0,058117	0,000809	0,527678	3,669434
C_2H_6	44	0,027432	0,000139	1,071759	4,291861
C_2H_2	53	0,017286	0,000099	0,840056	4,037096
H_2	47	0,000627	0,000000	0,174890	2,969487

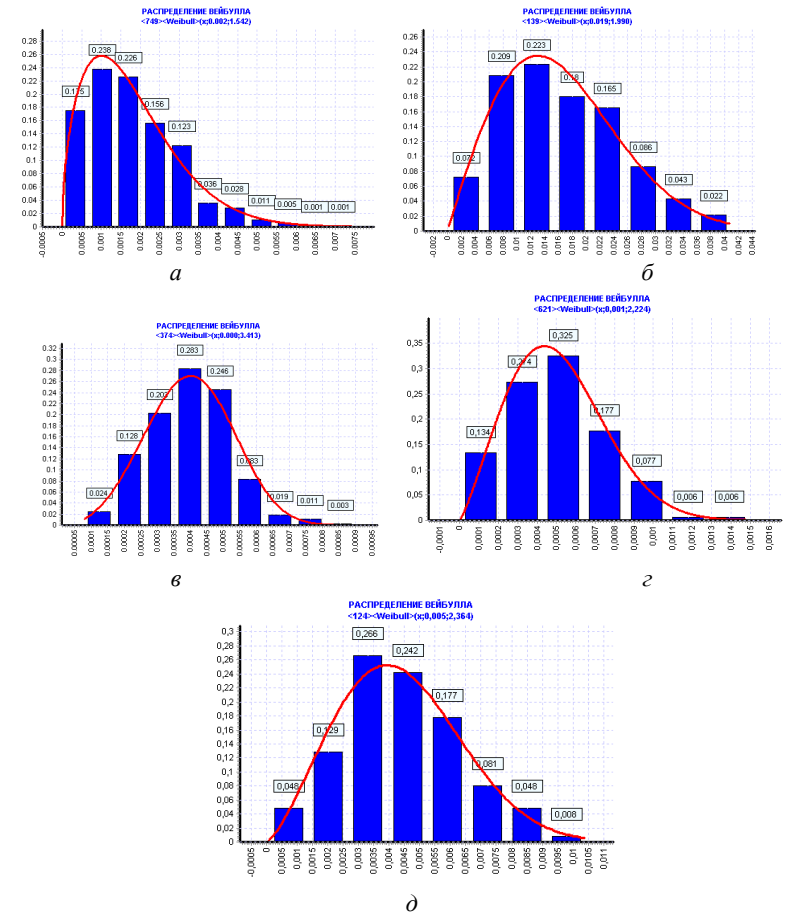


Рис. 4 – Гістограми емпіричного розподілу й функції щільності розподілу Вейбулла для однорідних підмножин газів, розчинених у маслі бездефектних трансформаторів: а – зміст метану; б – зміст етилену; в – зміст етану; г – зміст ацетилену; д – зміст водню.

Значення параметрів закону розподілу Вейбулла а також розрахункові й критичні значення (при $\alpha=0,05$) критеріїв Пірсона й Колмогорова-Смирнова для концентрацій п'яти газів наведено в таблиці 4.

На рисунку 6 наведені гістограми емпіричного розподілу й функція щільності розподілу законів Вейбулла для п'яти газів

вуглеводневого ряду й водню, які є визначальними при розпізнаванні дефекту.

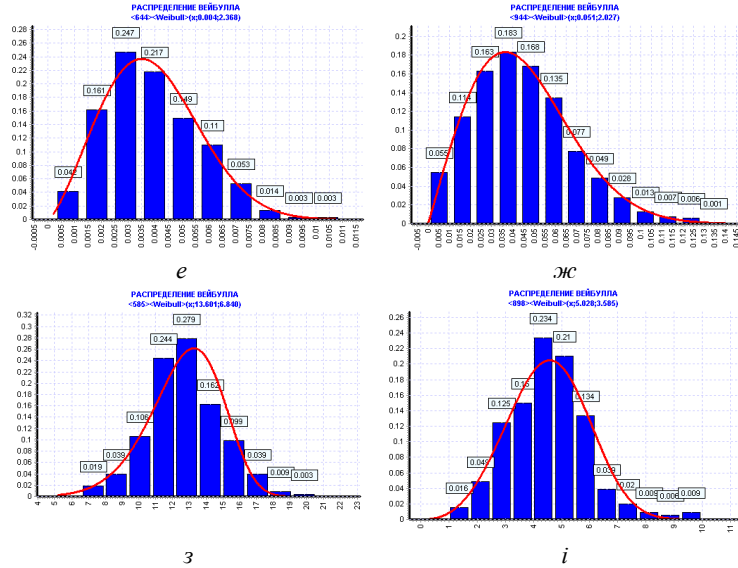


Рис. 5 – Гістограми емпіричного розподілу й функції щільності розподілу Вейбулла для однорідних підмножин газів, розчинених у маслі бездефектних трансформаторів: е – зміст оксиду вуглецю; ж – зміст діоксиду вуглецю; з – зміст азоту; і – зміст кисню.

Таблиця 4 – Значення параметрів закону розподілу Вейбулла а також розрахункові й критичні значення (при $\alpha=0,05$) критеріїв Пірсона й Колмогорова-Смірнова для газів у дефектних трансформаторах

Газ	Параметри закону розподілу		Значення критерію Пірсона			Значення критерію Колмогорова-Смірнова	
	α	β	k	$\chi^2_{роз.}$	$\chi^2_{крит.}$	$\lambda_{роз.}$	$\lambda_{крит.}$
CH ₄	0,041635	2,194290	2	0,7309	5,990	0,29950	1,360
C ₂ H ₄	0,065647	2,115252	2	0,7636	5,990	0,24242	1,360
C ₂ H ₆	0,030929	2,421890	1	0,4550	3,840	0,23414	1,360
C ₂ H ₂	0,019442	1,761373	1	1,8212	3,840	0,43029	1,360
H ₂	0,055464	2,503356	2	1,2793	5,990	0,35642	1,360

Аналізуючи дані табл. 4 і рис. 6 легко побачити, що для всіх п'яти газів розрахункові значення критерію згоди Пірсона й критерію

Колмогорова-Смірнова не перевищують критичних значень. На підставі чого можна зробити висновок про те, що немає підстав для того, щоб відкинути гіпотезу про прийнятність закону розподілу Вейбулла.

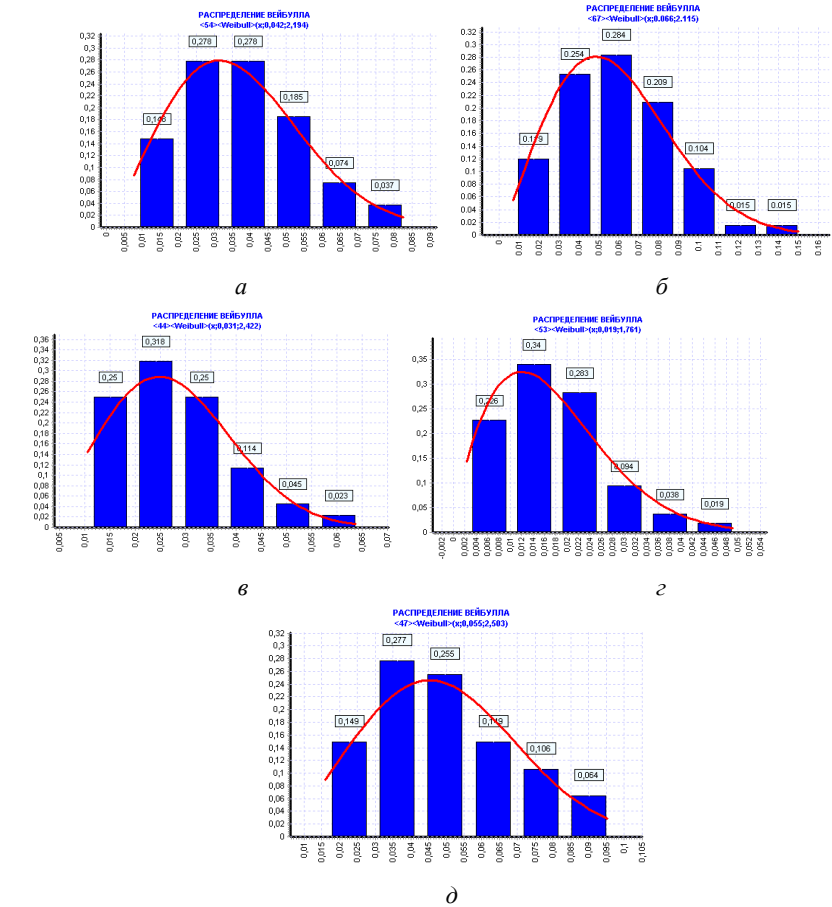


Рис. 6 – Гістограма емпіричного розподілу й функція щільності розподілу закону Вейбулла для газів, розчинених у маслі дефектних трансформаторів: а – зміст метану; б – зміст етилену; в – зміст етану; г – зміст ацетилену; д – зміст водню.

Аналіз отриманих результатів. Взаємне розташування теоретичних щільності розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі бездефектних і дефектних трансформаторів, наведено на рисунку 7. Там же наведені граничні значення рівнів 2 і 3, які рекомендовані в СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006.

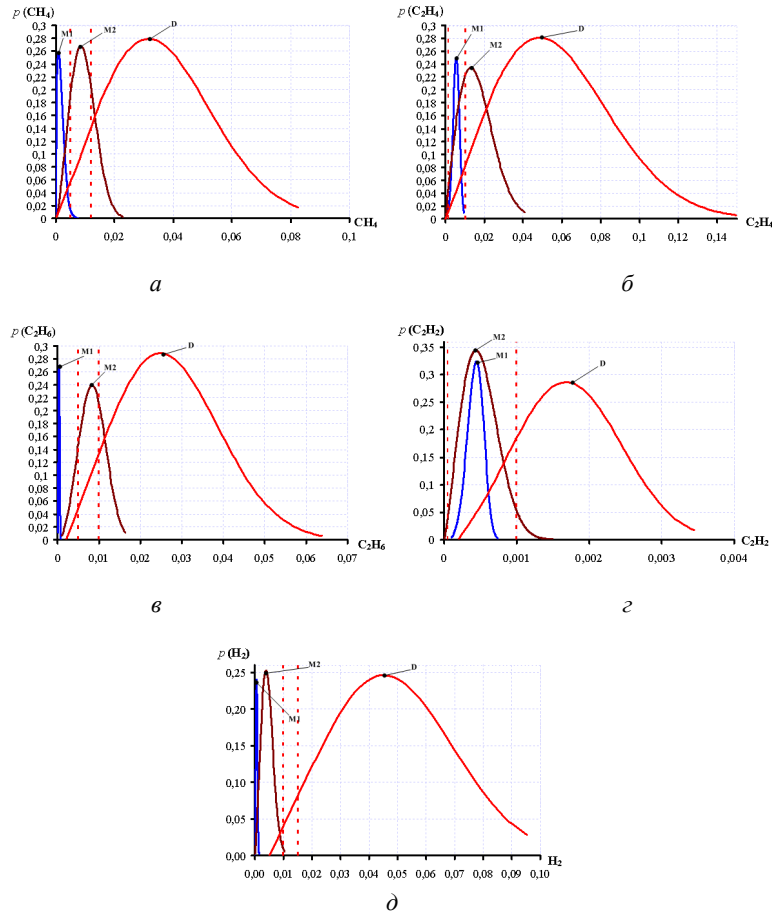


Рис. 7 – Щільності теоретичних розподілів газів для бездефектного (M1 і M2) і дефектного станів (D) і граничні значення концентрацій газів для рівнів 2 і 3, які рекомендовані в СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: а – зміст метану; б – зміст етилену; в – зміст етану; г – зміст ацетилену; д – зміст водню.

З рисунку 7 видно, що щільності розподілу для дефектних і бездефектних станів перетинаються, а це значить що принципово не можливо вибрати граничні значення показників, які б не давали помилкових рішень. У зв'язку із ці граничні значення концентрацій газів слід вибирати з використанням статистичних методів розпізнавання, наприклад методу мінімального числа помилкових рішень, метод мінімакса, метод мінімального ризику і т. д.

Оскільки для бездефектного стану наведені розподіли відповідні тільки мінімальним і максимальним концентраціям, а всі інші розподіли розташовані між ними, то можна зробити висновок, про те, що граничні значення для одного й того ж газу можуть різнитися, в залежності від умов експлуатації, конструктивних особливостей трансформаторів, типу масла та інших чинників.

Крім того з рисунку 7 видно, що площі областей перетинання дефектного й бездефектного стану, а саме вони визначають імовірність прийняття помилкових рішень, для різних газів відрізняються. Максимальна площа перетинання щільності розподілу, для бездефектного й дефектних станів, спостерігається в етилені. Для даного газу, навіть бездефектний розподіл з мінімальними значеннями концентрацій перетинається з розподілом для дефектного стану. Отримані результат дуже добре корелюється з даними наведеними в [10], у яких відзначається, що для негерметичного устаткування спостерігаються аномально високі концентрації етилену.

Мінімальна площа перетинань спостерігається у водню. Якщо врахувати, що в негерметичному устаткуванні поряд із процесом газоутворення має місце процес дифузії газів в атмосферу. А також досить низьке значення коефіцієнта розчинності водню в маслі, то стає очевидним і отримані закони розподілу й той факт, що в негерметичному устаткуванні значимі концентрації водню зустрічаються досить рідко.

Для інших газів площі перетинань мають проміжні значення.

Аналізуючи розташування граничних значень концентрацій газів для рівнів 2 і 3, які рекомендовані в СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 і розподілу газів для різних станів, легко побачити, що концентрації газів у бездефектних трансформаторах можуть перевищувати як рівень 2, так і рівень 3, за винятком водню. Концентрації газів у дефектних трансформаторах перебувають або між рівнями 2 і 3 або трохи вище рівня 3 (водень і етан).

Висновки.

1. Запропонований алгоритм статистичної обробки результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів, для формування

масивів з однорідними концентраціями в умовах апріорної невизначеності вхідної, вимірювальної інформації;

2. Виконаний аналіз, законів розподілу для дев'яти газів розчинених у маслі трансформаторів, що не мають дефекти. Встановлено, що всі дев'ять досліджуваних газів, підкоряються закону розподілу Вейбулла;

3. Виконаний аналіз, законів розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі дефектних трансформаторів. Встановлено, що всі газу вуглеводневого ряду й водень, також підкоряються закону розподілу Вейбулла;

4. Щільності розподілів для дефектних і бездефектних станів перетинаються, а це значить що принципово не можливо вибрати граничні значення показників, які б не давали помилкових рішень;

5. Площі областей перетинання дефектного й бездефектного стану, які визначають імовірність прийняття помилкових рішень, для різних газів відрізняються, при цьому мінімальний розмір площі перетинання має водень, максимальний – етилен;

6. Концентрації газів у бездефектних трансформаторах можуть перевищувати 2 і 3 рівні концентрацій які рекомендованих у СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Концентрації газів у дефектних трансформаторах перебувають або між рівнями 2 і 3 або трохи вище рівня 3 (водень і етан).

Список літератури: 1. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Київ. – 2007. – 92 с; 2. 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; 3. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с; 4. Давиденко И.В. Исследование показателей, описывающих рабочее состояние маслонеполненных вводов, методами математической статистики // Журнал Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион: Технические науки. – 2006. – N 15 – С. 31-33 (ISSN 0321-2653); 5. Давиденко И.В. Определение допустимых значений контролируемых параметров маслонеполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных // Электричество. – 2009. – № 6 – С. 81 – 82; 6. Чулак Т. М., Южанников А.Ю. Оценка состояния трансформатора на основе золотого сечения // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 9 – С. 10 – 21; 7. Захаров А.В. Обнаружение дефектов силовых маслонеполненных трансформаторов как процедура проверки статистических гипотез /А.В. Захаров// Новое в российской энергетике. – 2001. – N 2 – С. 19 – 28; 8. Шутенко О.В. Особенности статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний при исследовании законов распределения результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов /Шутенко О.В., Баклай Д.Н. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №60(1033). – С. 136–150; 9. 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 «ХПІ», 2013. – 268 с.; 10. Абрамов В.Б. Особенности контроля маслонеполненного электрооборудования по результатам хроматографического анализа

растворенных в масле газов / В.Б. Абрамов // Электрические сети и системы. – 2012. – №4. – С. 77–79;

Bibliography (transliterated): 1. Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannya za rezul'tatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih u izoljacijnomu masli SOU-N EE 46.501:2006. – Kiiv. – 2007. – 92 s; 2. Bojarchukov G. M. Prakticheskie problemy ocenki sostojanija vysokovol'tnogo oborudovanija po sodержaniju gazov v transformatornom masle. *Novini energetiki*. 2010. No 7. 23–33. Print. 3. Birger I.A. *Tehnicheskaja diagnostika* Moscow: Mashinostroenie. 1978. 4. Davidenko I.V. Issledovanie pokazatelej, opisuvajushih rabochee sostojanie maslonapolnennyh vvodov, metodami matematicheskoj statistiki // *Zhurnal Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region: Tehnicheskie nauki*. 2006. No 15 31-33. Print. 5. Davidenko I.V. Opredelenie dopustimyh znachenij kontroliruemyh parametrov maslonapolnennogo oborudovanija na osnove massiva nabljudаемых данных. *Elektrichestvo*. 2009. No 6. 81 – 82. Print 6. Chupak T. M., Juzhannikov A.Ju. Ocenka sostojanija transformatora na osnove zolotogo sechenija. *Fundamental'nye issledovanija*. 2006. No 9. 10 – 21. Print. 7. Zaharov A.V. Obnaruzhenie defektov silovyh maslonapolnennyh transformatorov kak procedura proverki statisticheskijh gipotez. *Novoe v rossijskoj jenergetike*. 2001. No 2. 19 – 28 Print. 8. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Osobennosti statisticheskoj obrabotki rezul'tatov ekspluatacionnyh ispytanij pri issledovanii zakonov raspredelenija rezul'tatov hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov. *Visnik NTU «HPI»*. 2013. No 60 (1033). 136–150. Print 9. Shutenko O.V., Baklaj D.N. *Planirovanie jeksperimental'nyh issledovanij v jelektrojenergetike. Metody obrabotki jeksperimental'nyh dannyh*. Har'kov: NTU «HPI». 2013. 10. Abramov V.B. Osobennosti kontrolja maslonapolnennogo jelektrooborudovanija po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov. *Jelekticheskie seti i sistemy*. 2012. No 4. 77–79. Print.

Надійшла (received) 24.03.2014