

УДК 621.314

**О.В. ШУТЕНКО****АНАЛИЗ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ НАРАСТАНИЯ ГАЗОВ  
В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

У статті досліджено закони розподілу швидкостей наростання газів в нормально працюючих силових, високовольтних трансформаторах негерметичного виконання. Встановлено, що при відсутності дефекту в негерметичних високовольтних трансформаторах значення швидкостей наростання газів можуть приймати як позитивні (новоутворення газів), так і негативні (дифузія газів з масла) значення, при цьому значення швидкостей наростання для одного і того ж газу в одному і тому ж трансформаторі, отримані в різні моменти часу можуть відрізнитися на кілька порядків і при цьому можуть перевищувати граничні значення. Виконаний аналіз показав, що в негерметичних трансформаторах, при відсутності дефекту значення швидкостей наростання газів можуть бути описані розподілом Лапласа. Даний закон дозволяє враховувати як утворення газів, так і їх дифузію в атмосферу.

**Ключові слова:** аналіз розчинених у маслі газів, виділення газів, швидкості наростання газів, дифузія газів, статистична обробка даних, розподіл Лапласа, критерії згоди.

В статье исследованы законы распределения скоростей нарастания газов в нормально работающих силовых, высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения. Установлено, что при отсутствии дефекта в негерметичных высоковольтных трансформаторах значения скоростей нарастания газов могут принимать как положительные (новообразование газов), так и отрицательные (диффузия газов из масла) значения, при этом значения скоростей нарастания для одного и того же газа в одном и том же трансформаторе, полученные в разные моменты времени могут отличаться на несколько порядков и при этом могут превышать граничные значения. Выполненный анализ показал, что в негерметичных трансформаторах, при отсутствии дефекта значения скоростей нарастания газов могут быть описаны распределением Лапласа. Данный закон позволяет учитывать как образование газов, так и их диффузию в атмосферу.

**Ключевые слова:** анализ растворенных в масле газов, выделение газов, скорости нарастания газов, диффузия газов, статистическая обработка данных, распределение Лапласа, критерии согласия.

The article deals with the laws of distribution of the rates of gas growth in normally operating power, high-voltage transformers of a leaky design. It is established that in the absence of a defect in unsealed high-voltage transformers, the values of the rates of gas growth can take both positive (new formation of gases) and negative (diffusion of gases from the oil) values, while the values of the rates of increase for the same gas in the same gas Transformer, obtained at different times can differ by several orders of magnitude and can exceed the boundary values. To reduce the heterogeneity of measurement results, an algorithm for statistical processing of the results of analysis of gases dissolved in oil is proposed. The performed analysis showed that in non-hermetically sealed transformers, in the absence of a defect, the values of the rates of increase of gases can be described by the Laplace distribution, as evidenced by the values of the agreement criteria given in the text of the article. This law makes it possible to take into account both the formation of gases and their diffusion into the atmosphere. The physical substantiation of the use of the Laplace criterion for analyzing the values of the rates of increase of gases is given.

**Keywords:** analysis of gases dissolved in oil, gas evolution, rate of gas build-up, gas diffusion, statistical data processing, Laplace distribution, compliance criteria.

**Постановка проблеми.** Одним из критериев, позволяющих оценить степень развития дефекта в силовых трансформаторах [1-2], является скорость нарастания газов. В большинстве методик по интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов [3-7] регламентированы допустимые значения скоростей нарастания газов, которые имеют статус либо граничных, либо типичных значений. Помимо различий в формулах, рекомендуемых для расчета скоростей нарастания разными методиками и как следствие их разных значений, имеет место различия и в подходе к заданию допустимых значений скоростей нарастания. Так в методике МЭК [3] типичные значения скоростей нарастания отличны для водорода, ацетилен, оксида и диоксида углерода, а для метана, этана и этилена совпадают. В методике IEEE Std C57.104 [4] типичные значения скоростей нарастания газов задаются в виде диапазона значений, которые связаны с суммой концентраций горючих газов и периодичностью наблюдений. В Украине [6] нормируется значение скорости нарастания

суммы газов углеводородного ряда, которое составляет 30 мкл/сут. В Российской Федерации [7] в качестве допустимого значения скорости нарастания для всех газов рекомендовано значение относительной скорости нарастания равное 10% в месяц. Приведенные примеры свидетельствуют об отсутствии единого подхода к определению граничных значений скоростей нарастания газов. Кроме того, регламентируемые разными методиками допустимые значения скоростей нарастания газов не учитывают влияние целого ряда факторов, что может привести к принятию ошибочных решений при диагностике трансформаторов. Одним из возможных подходов к корректировке допустимых значений скоростей нарастания газов, является использование методов математической статистики, в частности анализа распределений диагностических критериев в оборудовании с разным состоянием.

**Анализ публикаций.** В работе [8] выполнена корректировка граничных значений скоростей нарастания газов для маслонаполненных вводов и измери-

тельных трансформаторов. Допустимые и предельно допустимые значения скоростей нарастания газов для вводов определялись с учетом таких факторов, как: тип исполнения ввода, сорт масла, класс напряжения, срок эксплуатации. Для трансформаторов напряжения значения скоростей нарастания получены с учетом срока эксплуатации и сорта масел. Для трансформаторов тока учитывались класс напряжения, сорт масла и вид защиты. Предельно допустимые значения относительных скоростей нарастания концентраций газов в силовых трансформаторах со свободным дыханием и пленочной защитой приведены в работе [9]. Эти значения получены с учетом региона, в котором эксплуатируются трансформаторы, и срока службы. Предельно допустимые и допустимые значения скоростей нарастания газов для разных типов оборудования, которые приведены в работах [8, 9], получены на основе анализа интегральных функций распределения скоростей нарастания газов в нормально работающем оборудовании. В тоже время результаты исследований законов распределения скоростей нарастания газов освещены недостаточно, что и послужило поводом для проведения данных исследований.

**Цель статьи.** В статье приведены результаты исследований законов распределений скоростей нарастания газов в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения.

**Статистическая обработка результатов эксплуатационных испытаний.** Для исследования законов распределения скоростей нарастания газов 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.

Значения скоростей нарастания газов рассчитывались как [6]:

$$R_i = \frac{(S_2 - S_1) \cdot V}{t} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $R_i$  – скорость нарастания газов, мл/сутки;  $S_1$  – концентрация газа или сумма концентраций газов углеводородного ряда первой пробы, мкл/л;  $S_2$  – концентрация газа или сумма концентраций газов углеводородного ряда второй пробы, мкл/л;  $V$  – объем масла в баке трансформатора, л;  $t$  – время между отбором проб, сутки.

Как показал анализ, значение скоростей нарастания, полученные в результате расчета, могут принимать как положительные (новообразование газов), так и отрицательные (диффузия газов из масла) значения. При этом сами значения скоростей нарастания существенно разнятся. Значительный разброс полученных значений скоростей нарастания обусловлен как большим количеством измерений, для которых концентрации газов не превышают значений аналитического порога распознавания, так и разными условиями эксплуатации трансформаторов, отличиями в конструк-

тивном исполнении, разными сортами масел и т.д.

Известно [8], что чувствительность обнаружения концентраций газов хроматографом находится на уровне  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  % объема. Как правило, в картах хроматографического анализа значения ниже предела обнаружения обозначаются как «0» либо «отсутствует». Как отмечается в [6], суммарная погрешность анализа, при значениях концентраций газов углеводородного ряда 10 мкл/л (0,001% объема) может достигать 50%. Систематическая погрешность измерения концентраций газов, растворенных в масле, может достигать 19,7% [8] и растет по мере приближения концентраций к порогу чувствительности хроматографа. Таким образом, наличие большого числа концентраций ниже и близких к порогу чувствительности хроматографа является источником погрешности результатов ХАРГ, что в свою очередь приводит к статистической неоднородности результатов и к искажению законов распределений. Для снижения погрешности, анализ значений скоростей нарастания газов выполнялся только в том случае, если значения концентраций газов превышали аналитический порог распознавания, регламентированный в [6].

При анализе результатов расчета выяснилось, что значения скоростей нарастания для одного и того же газа в одном трансформаторе, полученные в разные моменты времени могут отличаться на несколько порядков. Это обусловлено, как изменениями загрузки трансформаторов, так и аварийными воздействиями со стороны электрической сети (короткие замыкания, перенапряжения и т.д.). Для выделения аномально высоких и низких значений скоростей нарастания был использован подход, основанный на выделении грубых промахов из числа однотипных измерений. Учитывая, что вид закона распределения неизвестен и, судя по литературной информации, отличен от нормального, то для выделения грубых промахов был использован статистический критерий Ирвина. Для этого из значений скоростей нарастания газов, по каждому трансформатору строился вариационный ряд, и оценивались сомнительные значения на обоих краях ряда. Для чего вычислялось расчетное значение критерия Ирвина:

$$\eta_{\text{расч.}} = \frac{(x_k - x_{k \text{ пред}})}{S}, \quad (2)$$

где  $x_k$  – подозрительное значение;  $x_{k \text{ пред}}$  – предыдущее значение в вариационном ряду.

Полученное расчетное значение критерия Ирвина сравнивалось с критическим значением  $\eta_{\text{табл}}$  [10, 11]. Если  $\eta_{\text{расч.}} > \eta_{\text{табл.}}$ , то рассматриваемое значение отбрасывалось и проверялось следующее. Проверка продолжалась, пока не выполнялось условие  $\eta_{\text{расч.}} < \eta_{\text{табл.}}$ . Результаты тестирования иллюстрирует рисунок 1, на котором приведена зависимость скорости нарастания этилена в масле от продолжительности эксплуатации для трансформатора ПС «Стандарт» Т-1 ТДНГ-6,3/110/10, Луганскоблэнерго, для исходных данных (рис. 1. а) и после обработки (рис. 1. б).

Как видно из рисунка использование критерия Ирвина позволяет существенно снизить неоднород-

ность результатов испытаний.

Формирование массивов с однородными значениями скоростей нарастания газов выполнялось с использованием трех статистических критериев [10, 11]:

1) Ранговый непараметрический критерий Уилкоксона ( $W$ ) – для проверки статистической гипотезы о схожести законов распределения двух независимых выборок;

2)  $Z$  критерий ( $Z$ ) – для проверки статистической гипотезы о равенстве математических ожиданий двух независимых выборок;

3) Критерий Фишера-Снедекора ( $F$ ) – для проверки статистической гипотезы о равенстве дисперсий двух независимых выборок.

Две независимые выборки считались однородными, если по результатам тестирования статистические гипотезы:

– о схожести законов распределения двух независимых выборок;

– о равенстве математических ожиданий двух независимых выборок;

– о равенстве дисперсий двух независимых выборок не отвергались при заданном уровне значимости  $\alpha = 0.05$ .

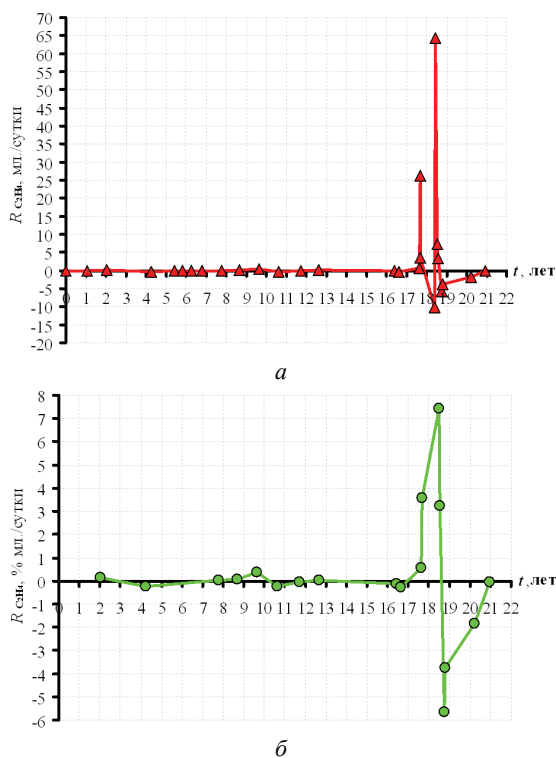


Рисунок 1 – Зависимость скорости нарастания этилена в масле от продолжительности эксплуатации для трансформатора ПС «Стандарт» Т-1 ТДНГ-6,3/110/10, Луганскоблэнерго

Далее формирование массивов с однородными значениями скоростей нарастания газов выполнялось с использованием трех, описанных выше, статистических критериев, но при этом результаты хроматографического анализа по двум трансформаторам объединялись в один массив не только при выполнении трех условий однородности, но и при одинаковом объеме

выборочных значений.

Результаты тестирования иллюстрирует рис. 2, на котором приведены зависимости содержания в масле этилена от продолжительности эксплуатации, для исходного массива данных и одного из массивов, полученного в результате обработки. Сравнивая зависимости на рис. 2, а и 2, б легко увидеть, что в результате статистической обработки неоднородность анализируемых данных значительно снижается.

**Оценка законов распределения скоростей нарастания газов.** В результате выполненного статистического анализа для каждого из газов были сформированы несколько массивов с однородными значениями скоростей нарастания, что свидетельствует о необходимости нормировки граничных значений скоростей нарастания газов для различных групп трансформаторов с учетом наиболее влияющих факторов. При этом анализ массивов данных с однородными значениями скоростей нарастания газов показал, что схожие значения скоростей нарастания могут иметь место в трансформаторах разного номинального напряжения (330 и 110 кВ), разной номинальной мощности и разного типоразмера. Эти результаты отличаются от опубликованных в работах [8, 9].

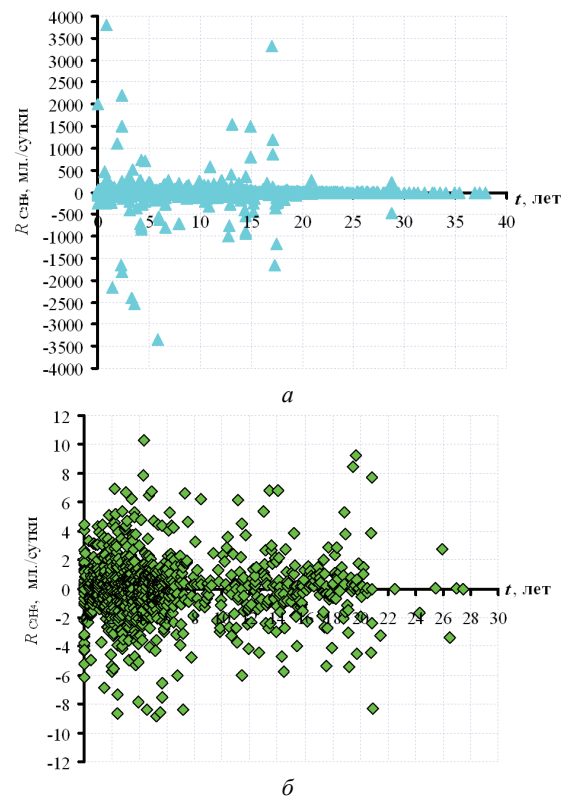


Рисунок 2 – Однородный массив данных скоростей нарастания этилена в масле бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения: а – массив исходных данных до обработки; б – массив с однородными значениями скоростей нарастания газов, полученный после статистической обработки

По мнению автора, основной причиной выявленных отличий являются разные режимы работы трансформаторов. Вероятней всего влияние особенностей

конструктивного исполнения трансформаторов можно выявить при схожих условиях их эксплуатации, в частности при близком составе потребителей, близких значениях коэффициентов загрузки, одинаковых климатических условиях и т.д. В тоже время выявлены достаточно существенные различия между значениями скоростей нарастания газов в трансформаторах, залитых разными сортами масел (ГК, Т-750, НИТРО), что совпадает с результатами опубликованных ранее исследований

В табл. 1 приведены характеристики однородных массивов с минимальными и максимальными значениями скоростей нарастания газов, по каждому из газов. В таблице приведены: объем выборочных значений  $N$ , значения выборочного среднего  $M_x$ , дисперсии  $D_x$ , а также коэффициентов асимметрии и эксцесса  $j_a$  и  $j_e$  для данных из однородных массивов с минимальными ( $M_1$ ) и максимальными ( $M_2$ ) значениями скоростей нарастания.

Как видно из таблицы, значения выборочных средних для скоростей нарастания одних и тех же газов в разных массивах значимо отличаются, что свидетельствует о различных условиях, в которых эксплуатировались исследуемые трансформаторы. Судя по значениям коэффициента асимметрии, анализируемые распределения являются симметричными относительно математического ожидания. 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.

Таблица 1 – Статистические характеристики однородных массивов скоростей нарастания растворенных в масле газов

Газ	Массив	$N$	$M_x$	$D_x$	$j_a$	$j_e$
CH <sub>4</sub>	$M_1$	169	0,107	0,412	0,332	4,316
	$M_2$	1192	0,431	41,270	0,173	5,603
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	$M_1$	214	-0,001	0,228	0,272	4,357
	$M_2$	187	3,020	167,635	0,224	5,984
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$M_1$	141	0,017	0,069	0,568	4,778
	$M_2$	773	0,572	12,607	0,057	5,921
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$M_1$	416	0,028	0,281	0,101	3,627
	$M_2$	103	-0,162	7,849	0,009	5,452
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	$M_1$	108	0,083	0,330	0,542	4,116
	$M_2$	566	1,009	69,986	0,137	5,929
H <sub>2</sub>	$M_1$	148	0,112	0,840	-0,280	4,941
	$M_2$	179	0,227	43,089	-0,023	3,683
CO	$M_1$	245	0,346	23,197	-0,112	5,725
	$M_2$	441	12,268	3242,21	-0,152	3,658
CO <sub>2</sub>	$M_1$	260	-0,932	380,163	-0,204	4,722
	$M_2$	1649	21,121	26805,1	0,253	6,527
N <sub>2</sub>	$M_1$	51	-0,028	0,048	0,128	4,109
	$M_2$	277	0,546	6,638	0,526	7,738
O <sub>2</sub>	$M_1$	87	0,008	0,079	0,213	5,717
	$M_2$	86	0,077	1,425	-0,025	4,621

Построение гистограмм эмпирического распределения, оценка параметров 18 известных законов распределения, расчет значений критериев согласия ( $\chi^2$  Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова) выполнялись с помощью разработанной на кафедре «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ» программы «ZR» [10], результаты работы которой иллюстрирует рис. 3.

Таблица 2 – Значения параметров закона распределения Лапласа, а также расчетные и критические значения (при  $\alpha = 0,05$ ) критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова для однородных массивов скоростей нарастания газов растворенных в масле бездефектных трансформаторов

Газ	Массив	Параметры закона распределения		Значение критерия Пирсона			Значение критерия Колмогорова-Смирнова	
		$\alpha$	$\beta$	$f$	$\chi^2_{расч.}$	$\chi^2_{крит.}$	$\lambda_{расч.}$	$\lambda_{крит.}$
CH <sub>4</sub>	$M_1$	0,10713	0,45544	3	5,533	7,820	0,636	1,360
	$M_2$	0,43120	4,54446	6	11,32	12,600	0,533	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	$M_1$	-0,0014	0,33858	4	8,521	9,490	0,734	1,360
	$M_2$	3,01994	9,17977	3	5,147	7,820	0,956	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$M_1$	0,01732	0,18679	3	6,007	7,820	0,963	1,360
	$M_2$	0,57227	2,51230	6	2,364	12,600	0,335	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$M_1$	0,02846	0,37552	6	9,284	12,600	0,750	1,360
	$M_2$	-0,1620	1,99077	2	3,493	5,990	0,723	1,360
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	$M_1$	0,08319	0,40837	4	8,839	9,490	0,724	1,360
	$M_2$	1,00897	5,92073	5	2,861	11,100	0,405	1,360
H <sub>2</sub>	$M_1$	0,11237	0,65037	3	6,473	7,820	0,942	1,360
	$M_2$	0,22739	4,65461	4	3,485	9,490	0,498	1,360
CO	$M_1$	0,34555	3,41264	3	0,101	7,820	0,119	1,360
	$M_2$	12,2680	40,30869	9	15,10	16,900	0,401	1,360
CO <sub>2</sub>	$M_1$	-0,9319	13,81359	3	1,067	7,820	0,402	1,360
	$M_2$	21,1211	115,8044	6	7,420	12,600	0,483	1,360
N <sub>2</sub>	$M_1$	-0,0275	0,15678	1	0,732	3,840	0,165	1,360
	$M_2$	0,54565	1,82508	2	4,527	5,990	0,524	1,360
O <sub>2</sub>	$M_1$	0,00803	0,19949	2	2,691	5,990	0,553	1,360
	$M_2$	0,07707	0,84890	2	1,261	5,990	0,410	1,360

По результатам анализа выполненного с помощью программы «ZR» удалось установить, что распределение скоростей нарастания газов для бездефектных трансформаторах негерметичного исполне-

ния, не имеющих дефектов, подчиняется закону распределения Лапласа с плотностью:

$$p(x; \alpha; \beta) = \frac{\alpha}{2} \cdot e^{-\alpha|x-\beta|}, \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta$  – параметры закона распределения, интерпретируемые соответственно как параметр масштаба и параметр формы.

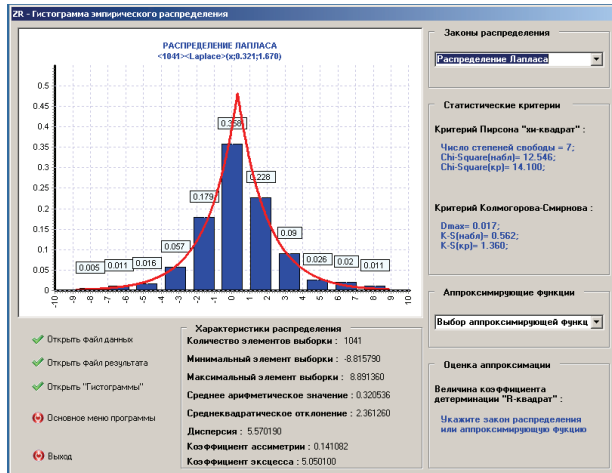


Рисунок 3 – Диалоговое окно программы «ZR» при исследовании законов распределения скоростей нарастания газов

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

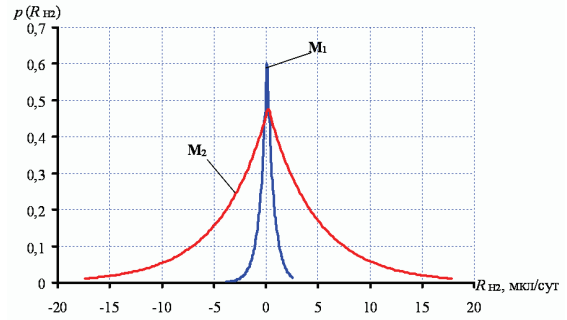
$$\alpha = \sqrt{\frac{D}{2}}; \beta = M, \quad (4)$$

где  $M$  – значение выборочного среднего;  $D$  – значение выборочной дисперсии.

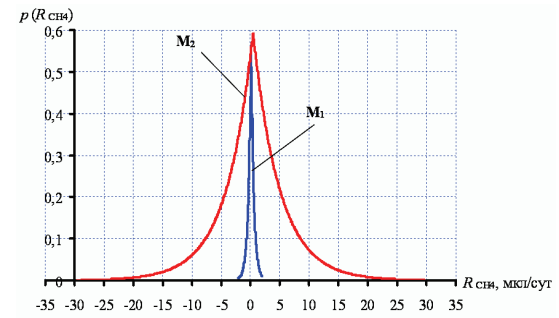
Значения параметров распределения  $\alpha$  и  $\beta$ , критериев согласия  $\chi^2$  и критерия Колмогорова-Смирнова приведены в табл. 2.

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 Лапласа.

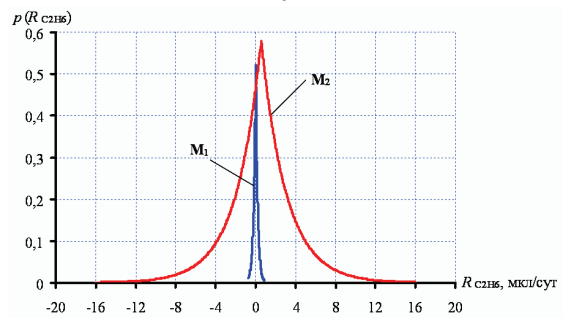
**Анализ полученных результатов.** На рис. 4 приведены функции плотности теоретических распределений Лапласа для минимальных и максимальных значений скоростей нарастания газов в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения. Как видно из рисунка, значения скоростей нарастания значительно различаются для разных газов, а следовательно, предельные значения скоростей нарастания для разных газов должны отличаться. Различия в значениях скоростей нарастания для разных газов обусловлено разным уровнем энергии, необходимой для образования газов в результате воссоединения моноуглеродных радикалов и молекулярного водорода, которые в свою очередь образуются из-за распада углеводородов. Кроме того значения коэффициентов растворимости газов в масле, которые и определяют процесс их диффузии в атмосферу, также разнятся для различных газов (наименьшие значения коэффициентов растворимости наблюдаются для водорода, оксида углерода и метана, наибольшие – для этана, этилена и ацетилена).



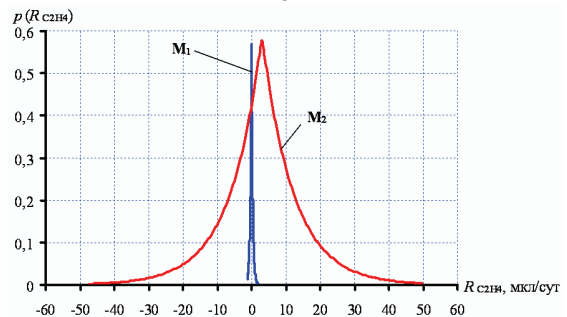
а



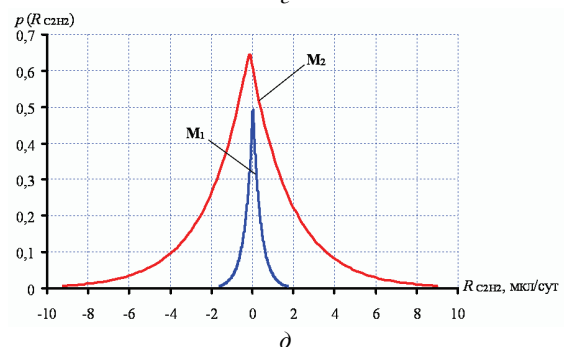
б



в

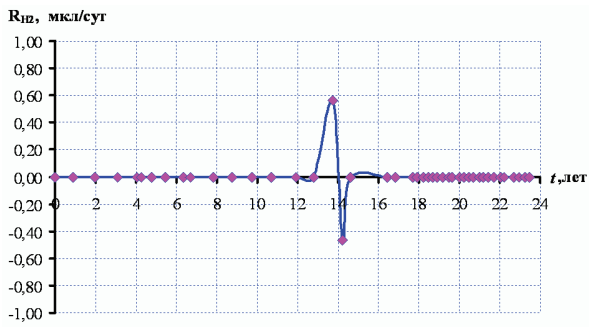


з

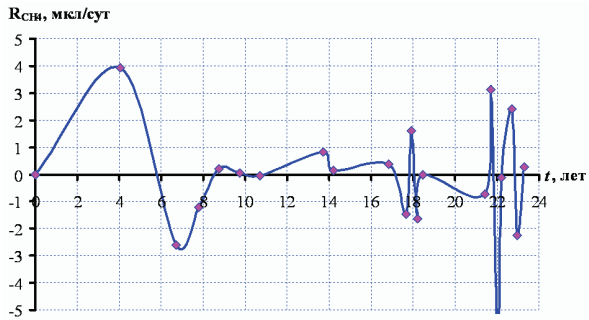


д

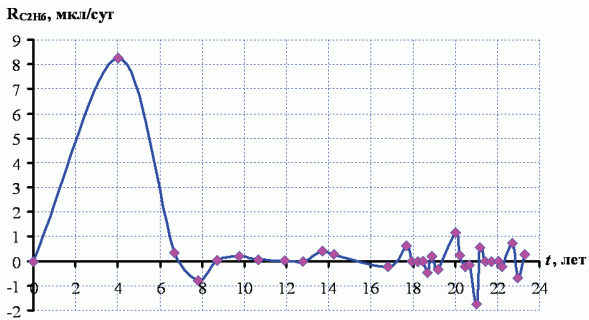
Рисунок 4 – Функции плотности теоретических распределений Лапласа для минимальных и максимальных значений скоростей нарастания газов в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения: а – водород; б – метан; в – этан; з – этилен; д – ацетилен



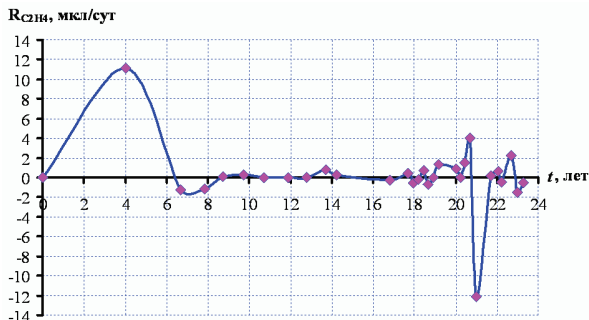
a



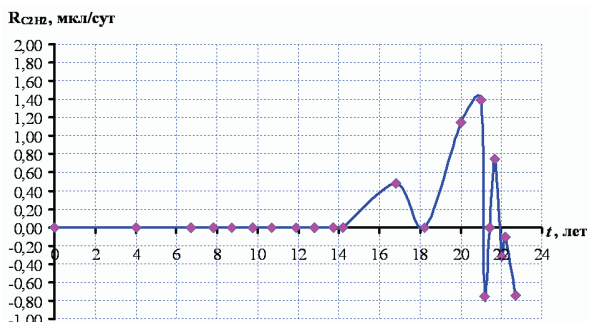
б



в

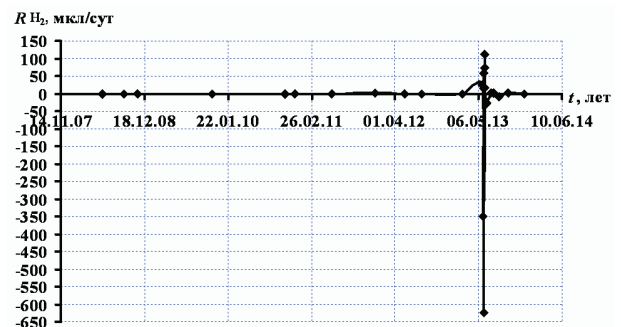


г

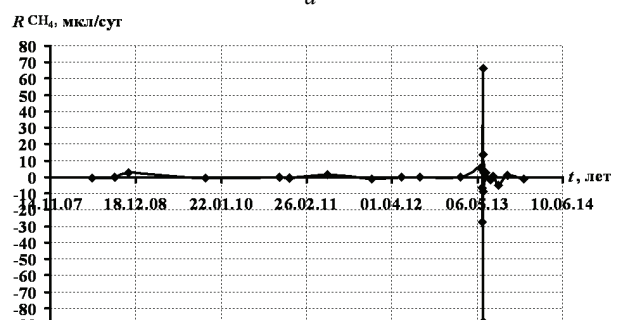


д

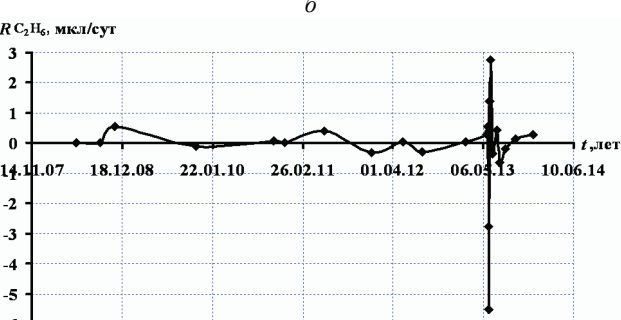
Рисунок 5 – Динамика изменения скоростей нарастания газов в бездефектном трансформаторе:  
а – водород; б – метан; в – этан; г – этилен д – ацетилен



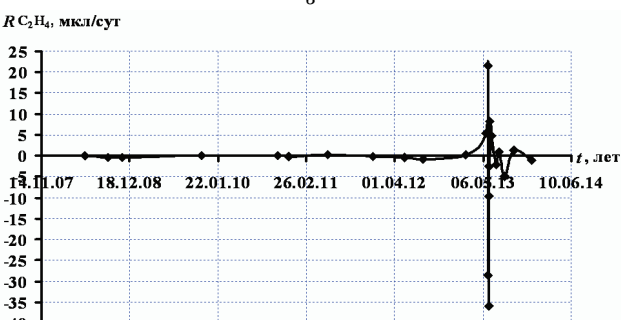
a



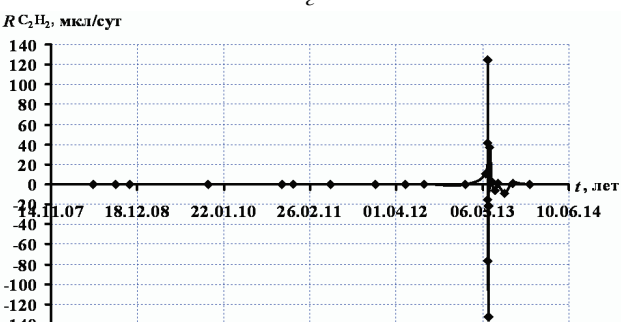
б



в



г



д

Рисунок 6 – Динамика изменения скоростей нарастания газов в бездефектном трансформаторе, подвергнутому воздействию тока к.з.:  
а – водород; б – метан; в – этан; г – этилен д – ацетилен

Также, на значения концентраций газов в негерметичном оборудовании, а следовательно, и на скорости их нарастания оказывает влияние процесс окисления масла атмосферным кислородом. Симметричность распределений скоростей нарастания газов относительно математических ожиданий должно свидетельствовать о том, что при отсутствии дефекта имеет место некоторое равновесие между количеством образовавшегося газа и количеством газа ушедшего в атмосферу.

Если проанализировать динамику изменения скоростей нарастания во времени для нормально работающего бездефектного трансформатора (рис. 5), то можно увидеть, что практически за каждым положительным значением скоростей нарастания газов следует отрицательное значение. Особенно данная тенденция проявляется при воздействиях на трансформаторы аварийных режимов со стороны электрической сети. На рисунке рис. 6 отображена динамика изменения скоростей нарастания газов в трансформаторе ТДТН-31,5/110/35/6 до и после воздействия однофазного короткого замыкания. Как видно из рисунка после резкого возрастания значений концентраций газов, вызванного воздействием токов к.з., имеет место их не менее резкое снижение, после чего скорости нарастания возвращаются к значениям, характерным для нормального режима работы, что и обуславливает симметричность закона распределения.

«Остроконечность» распределения обусловлена тем, что с увеличением, по сравнению с математическим ожиданием, как положительных, так и отрицательных значений скоростей нарастания газов, вероятность их появления снижается по закону, близкому к экспоненциальному.

### Выводы

1. В бездефектных высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения значения скоростей нарастания газов могут принимать как положительные (новообразование газов), так и отрицательные (диффузия газов из масла) значения.

2. Значения скоростей нарастания для одного и того же газа в одном и том же трансформаторе, полученные в разные моменты времени могут отличаться на несколько порядков и при этом могут превышать граничные значения. Это обусловлено как изменениями загрузки трансформаторов, так аварийными воздействиями со стороны электрической сети (короткие замыкания, перенапряжения и т.д.).

3. В результате выполненного статистического анализа для каждого из газов были сформированы несколько массивов с однородными значениями скоростей нарастания, что свидетельствует о необходимости нормировки граничных значений скоростей нарастания газов для различных групп трансформаторов, с учетом наиболее влияющих факторов.

4. Выполнен анализ, законов распределения скоростей нарастания девяти газов растворенных в масле трансформаторов, не имеющих дефекты. Установлено, что при отсутствии дефекта значения скоростей нарастания подчиняются закону распределения Лап-

ласа.

5. В бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения значения скоростей нарастания значимо различаются для разных газов, а, следовательно, предельные значения скоростей нарастания для разных газов должны отличаться.

### Список литературы:

1. Алексеев Б.А. Оценка состояния силовых трансформаторов. Интерпретация результатов газохроматографического анализа масел / Б. А. Алексеев // Электро. – 2002. – № 2. – С. 10-15.

2. Шутенко О.В. Анализ проблем, возникающих при интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов / О.В. Шутенко, В.Б. Абрамов, Д.Н. Баклай // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2013. – № 59 (1032). – С. 164-180.

3. IEC Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis. IEC Standard 60599, IEC publ. 60599, Mar. 1999.

4. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil -Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104 – 2008.

5. Gray I. A. R. A Guide Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services. <[http://www.satcs.co.za/Transformer Oil Analysis.pdf](http://www.satcs.co.za/Transformer%20Oil%20Analysis.pdf)> (2/2013).

6. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: Діагностика маселонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – К.: 2007.

7. 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.

8. Давиденко И.В. Критерии оценки технического состояния маселонаполненных вводов и измерительных трансформаторов по скорости роста концентраций растворенных газов / И.В. Давиденко // Сб. докладов научно-практической конференции специалистов Сибири и Востока «Диагностика электрических установок». Новосибирск: ЦПРО, 2009. – С. 57-68.

9. Давиденко И.В. Развитие критерия скорости нарастания газов в масле при диагностике силовых трансформаторов / И.В. Давиденко // Сб. докладов II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергосистема: управление, качество, конкуренция». – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – № 12 (42). – С. 266-270.

10. Шутенко О.В. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных : Учеб. пособие для вузов / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – 268 с.

11. Шутенко О.В. Особенности статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний при исследовании законов распределения результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 136-150.

### References (transliterated):

1. Alekseev B.A. Ocenka sostojanija silovyh transformatorov. Interpretacija rezul'tatov gazohromatograficheskogo analiza masel [Assessment of the state of power transformers. Interpretation of the results of gas chromatographic analysis of oils]. Jelektro, Moscow, 2002, no 2, pp. 10-15.

2. Shutenko O.V., Abramov V.B., Baklaj D.N. Analiz

problem, vznikajushih pri interpretacii rezultatov hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov [An analysis of the problems encountered in interpreting the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta. Ser.: Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist' [Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute. Series: Energy reliability and energy efficiency]. Kharkiv, 2013, no 59, issue 1032, pp 164-180.

3. IEC Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis. IEC Standard 60599, IEC publ. 60599, Mar. 1999.

4. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil -Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104 – 2008.

5. Gray I. A. R. A Guide Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services. <http://www.satcs.co.za/ Transformer Oil Analysis.pdf> (2/2013).

6. SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezultatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih u 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]. Kyiv: 2007, 92 p.

7. RD 153-34.0-46.302-00: Metodicheskie ukazaniya po diagnostike razvivajushih defektov transformatornogo oborudovaniya po rezultatami 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.

8. Davidenko I.V. Kriterii ocenki tehničeskogo sosto-

janija maslonapolnennyh vvodov i izmeritel'nyh transformatorov po skorosti rosta koncentracij rastvorenyh 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 jelektričeskikh ustanovok". Novosibirsk: GCRO, 2009, pp. 57-68.

9. Davidenko I.V. Razvitie kriterija skorosti narastaniya gazov v masle pri diagnostike silovyh transformatorov [Development of the criterion of the rate of increase of gases in oil in the diagnostics of power transformers]. Sb. dokladov II Vserosijskoj nauchno-tehničeskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Jenergosistema: upravlenie, kachestvo, konkurencija". Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI. 2004. No 12 (42). pp. 266-270.

10. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Planirovanie jeksperimental'nyh issledovanij v jelektroenergetike. Metody obrabotki jeksperimental'nyh dannyh [Planning of experimental research in the electric power industry. Methods for processing experimental data]. Kharkiv: NTU "KhPI", 2013, 268 p.

11. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Osobennosti statističeskoj obrabotki rezultatov jekspluatacionnyh ispytanij pri issledovanii zakonov raspredelenija rezultatov hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov. [Features of statistical processing of the results of operational tests in the study of the laws of distribution of the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil.] Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta. Ser.: Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist' [Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute. Series: Energy reliability and energy efficiency]. Kharkiv, 2013, No 60 (1033), pp. 136-150.

Поступила (received) 10.03.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Аналіз законів розподілу швидкостей наростання газів у високовольтних трансформаторах негерметичного виконання / О. В. Шутенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 103-110. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

**Анализ законов распределения скоростей нарастания газов в высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения / О. В. Шутенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 103-110. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

**The analysis of laws of speeds distribution of gases increase in high-voltage transformers of not tight manufacturing / O.V. Shutenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 103-110. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Шутенко Олег Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Передача електричної енергії», НТУ «ХПІ», тел.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

**Шутенко Олег Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Передача электрической энергии», НТУ «ХПІ», тел.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

**Shutenko Oleg Volodimirovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor at the Department of «Electric power transmission», NTU «KhPI», tel.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.