УДК 621.314 **doi: 10.20998/2224-0349.2023.02.12**

О. А. ЗАГАЙНОВА, Г. М. СЕРДЮКОВА

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОФІЛАКТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ВВОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕОРІЇ ПЕРЕВІРКИ СТАТИСТИЧНИХ ГІПОТЕЗ

У статті наведено результати дослідження залежностей показників ізоляції від тривалості експлуатації високовольтних маслонаповнених вводів, як герметичної, так і негерметичної конструкції. В якості вихідних даних використовувалися результати періодичних випробувань маслонаповнених вводів, напругою 110 кВ герметичного виконання з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу, а також негерметичної конструкції. Для формування статистично однорідних масивів даних були використані три статистичних критерію: ранговій критерій Вілкоксона, Z–критерій, критерій Фішера–Снедекора. Були отримані значення вибіркового середнього, вибіркової дисперсії, а також коефіцієнтів асиметрії та ексцесу показників ізоляції високовольтних вводів для масиву вихідних даних і масивів, отриманих в ході статистичної обробки. Значення вибіркових середніх для масивів, отриманих в результаті процедури статистичної обробки, істотно розрізняються. Має місце суттєве зниження значень вибіркової дисперсії для $tg\delta_1$ в порівнянні з вихідними масивами. Для перевірки однорідності даних в отриманих масивах використовується модель однофакторного дисперсійного аналізу. Практичне використання цього алгоритму дозволило істотно знизити неоднорідність результатів періодичних випробувань стану ізоляції високовольтних вводів. Виконаний аналіз складу масивів з однорідними значеннями показників дозволив встановити, що в однорідні масиви даних потрапили значення показників вводів з різних областей України, різного типу і виготовлені з різних номерах заводських креслень. Зазначено, шо для високовольтних вводів, які не мають дефектів ізоляції, значення математичного очікування одного й того самого показника для різних масивів профілактичних випробувань ізоляції конденсаторного типу мають зсув відносно один одного. З цього випливає, що коефіцієнт завантаження та час експлуатації трансформатора істотно впливають на визначення гранично допустимого значення показника ізоляції вводу.

Ключові слова: високовольтні вводи, показники ізоляції, статистичні критерії, дисперсійний аналіз, експлуатаційні випробування, тривалість експлуатації.

A. A. ZAGAYNOVA, H. M. SERDIUKOVA

ANALYSIS OF THE RESULTS OF PREVENTIVE TESTING OF BUSHINGS USING ELEMENTS OF THE THEORY OF STATISTICAL HYPOTHESIS TESTING

The article presents the results of a study of the dependence of insulation indicators on the duration of operation for serviceable and faulty high-voltage oil-filled bushings, both of hermetic and non-hermetic construction. The results of periodic tests of oil-filled bushings, with a voltage of 110 kV of hermetic design with paper-oil insulation of the capacitor type, as well as non-hermetic construction, were used as initial data. Three statistical criteria were used to form statistically homogeneous data sets: the Wilcoxon rank test, the Z-test, and the Fisher-Snedecor test. The values of the sample mean, sample variance, as well as coefficients of asymmetry and excess of insulation indicators of high-voltage bushings were obtained for the array of initial data and arrays obtained during statistical processing. The values of the sample averages for the arrays obtained as a result of the statistical processing procedure differ significantly. There is a significant decrease in the sample variance values for tgδ1 compared to the original arrays. To check the homogeneity of the data in the obtained arrays, the one-factor variance analysis model is used. The practical use of this algorithm made it possible to significantly reduce the heterogeneity of the results of periodic tests of the state of insulation of high-voltage bushings. The analysis of the composition of the arrays with homogeneous values of the indicators made it possible to establish that the values of the indicators of bushings from different regions of Ukraine, of different types and made with different numbers of factory drawings, got into the homogeneous data arrays. It is noted that for high-voltage bushings that do not have insulation defects, the values of the mathematical expectation of the same indicator for different arrays of preventive tests of capacitor-type insulation have a shift relative to each other. From this it follows that the load factor and the operating time of the transformer significantly affect the determination of the maximum allowable value of the insulation index of the high-voltage bushing.

Keywords: high-voltage bushings, insulation indicators, statistical criteria, dispersion analysis, operational tests, duration of operation.

Вступ. Облік досвіду експлуатації високовольтного маслонаповненого обладнання є одним із шляхів підвищення ефективності системи оцінки технічного стану [1–3]. Як правило, облік зводиться до аналізу інформації про види дефектів, пошкоджень та відмов, характерних для того чи іншого виду обладнання. В енергосистемі України в експлуатації перебуває значна кількість високовольтних трансформаторів, що мають термін служби 40 і більше років, причому за багатьма з них є результати періодичного контролю з моменту введення в експлуатацію. Багато цінної та не врахованої інформації міститься в результатах періодичного контролю стану високовольтних вводів. Ці дані можна розглядати як інформацію зі старіння ізоляції трансформаторів, а також високовольтних вводів, які адекватно відображають реальні процеси старіння ізоляції. Однак з великого обсягу даних профілактичних випробувань не використовується цінна інформація для виявлення дефекту ізоляції вводу на ранньому етапі, тобто коли значення показників ізоляції вводу знаходяться в області гранично допустимих значень [4–6], а дефект розвивається і це може призвести до аварії. У зв’язку з цим розробка процедур, які б оцінювали поточний технічний стан електрообладнання та забезпечували раннє виявлення можливих дефектів, а також прогнозували їх розвиток в майбутньому є практично значимим завданням та актуальним.

Аналіз основних досягнень і літератури. Багато сучасних діагностичних методів базуються на математичних моделях, які використовують результати періодичного контролю стану маслонаповненого обладнання (трансформаторів, вводів тощо) [7–14]. Аналіз літературних джерел показав, що питанням розробки моделей для діагностики стану

© О. А. Загайнова, Г. М. Сердюкова, 2023

маслонаповненого обладнання присвячена велика кількість публікацій. У цих роботах зазвичай використовувалися результати профілактичних випробувань. Наприклад, при побудові моделей старіння ізоляції з урахуванням нейронних мереж [15–17], регресійних рівнянь [18, 19] тощо. як вихідну вибірку вибиралися дані профілактичного контролю. Істотним недоліком цих вихідних даних є те, що вони мають помилки з низки причин. У зв'язку з цим в даній статті виконаний аналіз результатів профілактичних випробувань вводів за допомогою елементів теорії перевірки статистичних гіпотез для зниження неоднорідності даних.

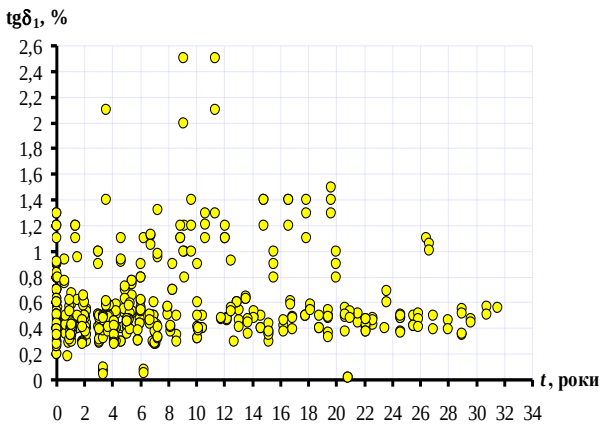
Мета статті. Метою цієї статті є аналіз ефективності процедур статистичної обробки результатів експлуатаційних випробувань періодичного контролю стану ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів.

Методи дослідження. Одним, з істотних недоліків, які обмежують використання результатів періодичних випробувань стану високовольтних вводів в якості навчальної вибірки, є повне або часткове відсутність інформації про режими роботи вводів, зокрема про їх завантаження, частоту і рівень впливу струмів короткого замикання, кратності перенапруги і тощо. Крім того, в розпорядженні дослідника не завжди є інформація про особливості конструктивного виконання вводів, про використовування конструкційних матеріалів, а також про сорт залитого масла. Фактично в розпорядженні дослідника є тільки значення показників ізоляції високовольтних вводів (відгук), і часткова інформація про умови експлуатації (значення деяких з факторів). Подібна невизначеність значно ускладнює виконання досліджень і вимагає попередньої статистичної обробки результатів контролю.

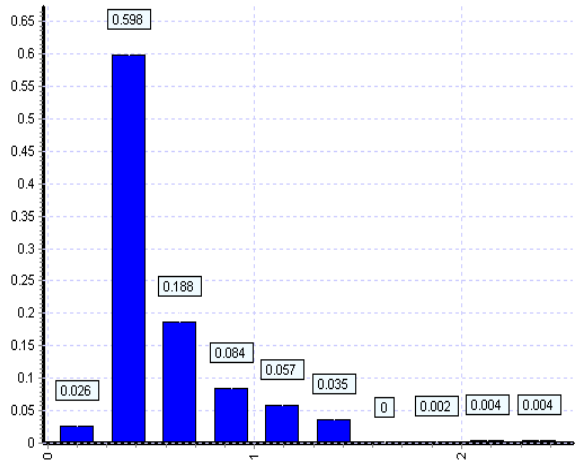
В якості ілюстрації на рис. 1 наведені залежності тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції високовольтних вводів від тривалості експлуатації (рис. 1). Як видно з рис.1, що незважаючи на те, що вихідні дані отримані для вводів одного класу напруги і одного і того ж типу ізоляції, має місце значний розкид значень тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції високовольтних вводів ($tg\delta_1$).

Розглянемо метод статистичної обробки результатів періодичного контролю високовольтних вводів. Метод розглядається на прикладі навчальної вибірки, складеної за результатами періодичного контролю стану високовольтних вводів, які експлуатуються в різноманітних областях України.

В якості вихідних даних використовувалися результати періодичних випробувань для 68 маслонаповнених вводів, напругою 110 кВ герметичного виконання з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу, а також негерметичної конструкції. Загальний обсяг вибірки для вводів негерметичної конструкції склав 453 значення, а для вводів негерметичної конструкції – 140.



а



б

Рисунок 1 – Вплив однорідності результатів випробувань на розподіл значень $tg\delta_1$:
а – залежність тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції високовольтних вводів від тривалості експлуатації;
б – гістограма емпіричного розподілу

В якості показників, які характеризують стан ізоляції високовольтних маслонаповнених вводів, аналізувалися значення:

- тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції ($tg\delta_1$);
- місткості основної ізоляції (C_1);
- тангенса кута діелектричних втрат ізоляції вимірювального конденсатора ($tg\delta_2$);
- місткості вимірювального конденсатора (C_2);
- опору ізоляції виводу для вимірювання (R).

Для формування статистично однорідних масивів даних були використані три статистичних критерію [20]:

1) рангові критерій Вілкоксона (*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.

Алгоритм формування статистично однорідних масивів даних по кожному з досліджуваних критерію наведено в табл. 1.

Обсяг вибіркових значень N, значення вибіркового середнього Mx, вибіркової дисперсії Dx, а також коефіцієнтів асиметрії та ексцесу ja та je показників ізоляції високовольтних вводів для масива вихідних даних M0 і масивів, отриманих в ході статистичної обробки M1, M2, M3) наведені в табл. 2.

Таблиця 1 – Статистичні критерії, які використовуються для формування однорідних даних

Критерій	Статистична модель	Основна гіпотеза	Критеріальна статистика	Статистика порівняння
W	$X_1 = (x_n^1 \dots x_{n1}^1) \sim f(x_1)$; $X_2 = (x_n^2 \dots x_{n2}^2) \sim f(x_2)$; $n = n_1 + n_2$	$f(x_1)=f(x_2)$	S_1–сума рангів множини$\{x_i^1\}$ S_2– сума рангів множини$\{x_j^2\}$	$S_{n1,n2,\,0,025}$ $S_{n1,n2,\,0,975}$
Z	Вибірка 1: обсяг n, вибіркове середнє m_1, вибіркова дисперсія δ_1^2 Вибірка 2: обсяг n, вибіркове середнє m_2, вибіркова дисперсія δ_2^2	$m_1=m_2$	$Z = \dfrac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\dfrac{D(x_1)}{n} + \dfrac{D(x_2)}{m}}}$	$Z_{крит}$
F	Вибірка 1: обсяг n, вибіркова дисперсія δ_1^2 Вибірка 2: обсяг m, вибіркова дисперсія δ_2^2	$\sigma_1^2=\sigma_2^2$	$F= \delta^2_{max}/ \delta^2_{min}$	$F_{(n-1),(m-1),\,0,95}$

Таблиця 2 – Статистичні характеристики масивів показників високовольтних вводів

Показ-ник	Масив	N	M_x	D_x	j_a	j_e
Вводи негерметичної конструкції						
$tg\delta_1$	M0	140	0,86	0,53	1,327	4,0
	M1	67	0,49	0,05	0,939	3,5
	M2	73	0,37	0,02	0,181	2,3
$tg\delta_2$	M0	140	0,87	0,31	0,79	2,5
	M1	75	0,61	0,11	0,86	3,6
	M2	65	0,94	0,23	0,57	3,1
C_1	M0	140	382	48512	0,56	2,7
	M1	91	414	64913	0,21	2,0
C_2	M0	140	452	50967	0,219	2,35
	M1	87	385	39879	0,353	2,79
Вводи герметичної конструкції						
$tg\delta_1$	M0	453	0,57	0,10	2,296	10,5
	M1	102	0,39	0,01	0,764	4,8
	M2	243	0,48	0,01	0,195	3,5
	M3	103	0,86	0,19	0,172	2,8
$tg\delta_2$	M0	453	0,72	0,181	1,808	7,11
	M1	159	0,43	0,007	1,020	5,40
	M2	98	0,50	0,008	–0,727	4,28
	M3	128	0,83	0,153	0,456	3,15
C_1	M0	453	309	18264	0,976	4,02
	M1	128	268	9369	1,022	5,79
	M2	115	314	34278	0,828	2,99
	M3	70	321	10654	1,180	5,41
C_2	M0	453	388	28013	0,495	3,21
	M1	118	312	34197	0,698	3,19
	M2	140	340	33439	0,477	3,01
	M3	104	514	28968	–0,442	2,80

Значення показника для двох вводів вважалися однорідними, якщо:

$$S_1>S_{n1,\,n2,\,0,025},\ S_2<S_{n1,\,n2,\,0,975}. \quad (1)$$

$$Z_{набл.}<Z_{крит,\,0,95}. \quad (2)$$

$$F<F_{(n1-1),\,(n2-1),\,0,95}. \quad (3)$$

Значення вибіркових середніх для масивів, отриманих в результаті процедури статистичної обробки, істотно розрізняються. Також легко побачити, що в результаті статистичної обробки має місце суттєве зниження значень вибіркової дисперсії для $tg\delta_1$ в порівнянні з вихідними масивами.

Для перевірки однорідності даних в отриманих масивах (M1, M2, M3) була використана модель однофакторного дисперсійного аналізу [21]:

$$S = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}\right)^2 = S_1 + S_2 \quad (4)$$

де n – обсяг вибіркових значень;

m – число рівнів варіювання досліджуваного фактору (кількість вводів у масиві даних);

$y_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\bar{y}_{ij}$ – середнє арифметичне з n вимірювань, виконаних при i-тому значенні фактора X;

$y_i = \frac{1}{m\cdot n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\bar{y}_{ij}$ – загальне середнє арифметичне всіх m·n вимірювань;

$S_1 = n\cdot\sum_{i=1}^{m}(\bar{y}_i - \bar{y})^2$ – сума квадратів відхилень між середніми значеннями досліджуваного показника в різних вводах, розсіювання по факторам;

$S_2 = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}_i\right)^2$ – сума квадратів відхилень значень показника від середнього для одного

і того ж вводу – залишкове розсіювання випадкових похибок експерименту;

$S = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}\right)^2$ – загальна або повна сума квадратів відхилень окремих спостережень від загальної середньої $\bar{y}$.

Оцінка значущості фактору зводиться до порівняння дисперсії, отриманої за рахунок S1, з тієї ж дисперсією, але отриманої за рахунок S2, що легко перевірити по відношенню:

$$F = \frac{\dfrac{S_1}{m-1}}{\dfrac{S_2}{m(n-1)}} \sim F_{(m-1);m(n-1)} \qquad (1)$$

Статистика F є випадковою величиною, яка має F-розподіл з (m–1) та m(n–1) ступенями свободи. Якщо при заданому α=0,05 F>Fα, то фактор є значущий. Це свідчить про неоднорідність значень показника в аналізованому масиві даних.

Результати розрахунку наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати однофакторного дисперсійного аналізу

Показник	Масив	*n*	*m*	Значення *F*-критерію	
				$F_{спос.}$	$F_{крит}$
Вводи негерметичної конструкції					
$tg\delta_1$	M0	140	19	23,47	1,608
	M1	67	9	1,716	2,105
	M2	73	10	1,287	2,036
$tg\delta_2$	M0	140	19	10,64	1,608
	M1	75	9	1,735	2,088
	M2	65	7	1,860	2,262
C_1	M0	140	19	1,242	1,608
	M1	91	13	1,004	1,892
	M2	140	19	8,388	1,608
C_2	M0	87	12	1,007	1,953
	M1	140	19	10,64	1,608
	M2	75	9	1,735	2,105
Вводи герметичної конструкції					
$tg\delta_1$	M0	453	68	4,793	1,306
	M1	102	19	1,201	1,749
	M2	243	34	0,702	1,439
	M3	103	15	0,805	1,823
$tg\delta_2$	M0	453	68	4,387	1,306
	M1	159	24	0,894	1,530
	M2	98	16	1,603	1,804
	M3	128	19	1,084	1,711
C_1	M0	453	68	6,373	1,306
	M1	128	21	0,631	1,678
	M2	115	18	1,011	1,747
	M3	70	12	1,538	1,963
C_2	M0	453	68	12,73	1,306
	M1	118	17	1,507	1,759
	M2	140	24	1,572	1,627
	M3	104	17	1,359	1,779

Як видно з табл. 3, практично у всіх масивах вхідних даних, за винятком ємності основної ізоляції для негерметичних вводів, значення $F_{крит.}$ перевищують табличні, при рівні значущості p=0,95 і числі ступенів свободи (m–1) та m·(n–1). Це свідчить про те, що значення параметрів у різних вводах істотно відрізняються один від одного, а, отже, вихідні дані є неоднорідними.

Незважаючи на те, що в початковому масиві показника C_1 для вводів негерметичного виконання, згідно з результатами дисперсійного аналізу, дані є однорідними, за допомогою процедури статистичної обробки з нього також вдалося виділити один масив даних. Подібне невідповідність пояснюється тим, що однофакторний дисперсійний аналіз виконує оцінку розсіювання за середнім значенням, а формування масивів однорідних даних виконувалося як по рівності середніх, так і по рівності дисперсій і схожості законів розподілу.

Дана обставина ще раз підкреслює ефективність використовуваної процедури формування масивів однорідних даних в умовах апріорної обмеженості вимірювальної інформації.

З табл. 3 також видно, що для всіх без винятку масивів, отриманих в результаті статистичної обробки, спостережувані значення F-критерію не перевищують табличні, при рівні значущості p=0,95 числі ступенів свободи (m–1) та m(n–1). Це свідчить про відсутність відмінностей між середніми значеннями показників результатів профілактичних випробувань з різних вводів.

Виконаний аналіз складу масивів з однорідними значеннями показників дозволив встановити, що в однорідні масиви даних потрапили значення показників вводів з різних областей України, різного типу і виготовлені з різних номерах заводських креслень. Але при цьому вводи, значення показників яких складають однорідні масиви даних, мають близьку напрацювання і встановлені на трансформаторах з близьким значенням коефіцієнтів завантаження. Дана обставина показує необхідність врахування даних факторів при діагностиці стану високовольтних маслонаповнених вводів.

Висновки. Запропоновано трьохетапний алгоритм статистичної обробки результатів експлуатаційних випробувань високовольтних вводів. Формування масивів з однорідними значеннями діагностичних критеріїв виконується за умови подібності законів розподілів, рівності математичні очікувань і дисперсій окремих вибірок, отриманих для різних вводів. Для перевірки однорідності даних в отриманих масивах використовується модель однофакторного дисперсійного аналізу. Практичне використання цього алгоритму дозволило істотно знизити неоднорідність результатів періодичних випробувань стану ізоляції високовольтних вводів. Наприклад, вихідний масив M0 для тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції ($tg\delta_1$) негерметичних вводів має значення *F*-критерію: $F_{спос.}$ = 23,47, а $F_{крит.}$ = 1,608. Для сформованих

однорідних масивів значення *F*-критерію: M1 – $F_{спос.}$ = 1,716, а $F_{крит.}$ = 2,105, для M2 – $F_{спос.}$ = 1,287, а $F_{крит.}$ = 2,036.

Для високовольтних вводів, які не мають дефектів ізоляції, значення математичного очікування одного й того самого показника для різних масивів профілактичних випробувань ізоляції конденсаторного типу мають зсув відносно один одного. З цього випливає, що коефіцієнт завантаження та час експлуатації трансформатора може істотно впливати на визначення гранично допустимого значення показника ізоляції вводу.

Список літератури

1. Рубаненко О. Є., Гуменюк О. І. Високовольтні вводи. Конструкція, експлуатація, діагностика і ремонт. Вінниця : Вінницький Національний Технічний Університет, 2011. 183 с.
2. Жорняк Л. Б., Райкова Е. Ю., Осинская В. И. Повышение надежности и эффективности высоковольтных вводов. *Вісник КДПУ імені Остроградського*. 2008, №. 4 (51), ч. 1. С. 95–99.
3. Andrienko P. D., Sakhno A. A., Konogray S. P., Spitsa A. G., Skrupskaya L. S. Characteristics of monitoring condition of main insulation of high-voltage bushings and current transformers. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 2014. No. 1. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-7.
4. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Норми випробування електрообладнання. На заміну СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 ; чинний від 2020-04-06. Вид. офіц. 2020.
5. IEC 60137:2017. Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V. Чинний від 2017-06-22. Вид. офіц. 2017. 124 с.
6. C57.19.01-2017. IEEE standard for performance characteristics and dimensions for power transformer and reactor bushings. На заміну IEEE Std C57.19.01-2000 ; чинний від 2018-07-12. Вид. офіц. 2018. 30 с. DOI: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8410922.
7. Feilat E. A., Metwally A. I., Al-Matri S., Al-Abri A. S. Analysis of the root causes of transformer bushing failures. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2013. Vol. 7, no. 6. P. 791–796.
8. Anglhuber M., Velásquez J. L. Contreras Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method. *Transformer Magazine. Special Edition: Bushing*. 2017. P. 126–132.
9. Septyani H. I., Arifianto I., Purnomoadi A. P. High voltage transformer bushing problems. *2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, Indonesia, 17–19 July 2011. DOI: https://doi.org/10.1109/iceei.2011.6021566.
10. Metwally I. Failures, monitoring and new trends of power transformers. *IEEE Potentials*. 2011. Vol. 30, no. 3. P. 36–43. DOI: https://doi.org/10.1109/mpot.2011.940233.
11. Mehta A., Sharma R. N., Chauhan S., Agnihotri S. D. Study the insulation system of power transformer bushing. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2011. P. 544–547. DOI: https://doi.org/10.7763/ijcee.2011.v3.376.
12. Tan D., Li H., Xiao D. Analysis on Failure causes of bushing used in 40.5kV metal enclosed air insulation switchgear. *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shenzhen, China, 23–26 September 2014. P. 1225–1229. DOI: https://doi.org/10.1109/ciced.2014.6991902.
13. Qi B., Dai Q., Li C., Zeng Z., Fu M., Zhuo R. The mechanism and diagnosis of insulation deterioration caused by moisture ingress into oil-impregnated paper bushing. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 6. 1496. DOI: https://doi.org/10.3390/en11061496.
14. Shutenko O. Method for detection of developing defects in high-voltage power transformers by results of the analysis of dissolved oil gases. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2018. Vol. 18, no. 1. P. 11–18. DOI: https://doi.org/10.15546/aeei-2018-0002.
15. Srividhya V., Babu J. S., Sujatha K. et al. Determination of breakdown voltage for transformer oil testing using ANN. Advances in Intelligent Systems and Computing. Singapore, 2021. P. 443–452. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-33-6981-8_35.
16. Singh H. D., Singh J. Enhanced optimal trained hybrid classifiers for aging assessment of power transformer insulation oil. *World Journal of Engineering*. 2020. Vol. 17, no. 3. P. 407–426. DOI: https://doi.org/10.1108/wje-11-2019-0339.
17. Gautam L., Kumar R., Sood Y. R. Identifying transformer oil criticality using fuzzy logic approach. *2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES)*, Prayagraj, India, 10–12 July 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/sces50439.2020.9236724.
18. Paul D., Goswami A. K. A multi-gene symbolic regression approach of determining insulating oil interfacial tension. *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, 16–19 December 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/pedes49360.2020.9379528.
19. Gouda O. E., El Dein A. Z. Prediction of aged transformer oil and paper insulation. *Electric Power Components and Systems*. 2019. Vol. 47, no. 4-5. P. 406–419. DOI: https://doi.org/10.1080/15325008.2019.1604848.
20. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособ. Москва : Высшая шк., 1977. 479 с.
21. Johnson N. L., Leone F. C. Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences: v. 1 (Probability & mathematical statistics S.). 2nd ed. New York : Wiley, 1977. 618 p.

References

1. O. Ye. Rubanenko and O. I. Humeniuk, *Vysokovoltni vvody. Konstruktsiia, ekspluatatsiia, diahnostyka i remont [High-voltage bushings. Design, operation, diagnostics and repair]*. Vinnytsia: Vinnytsia Nat. Tech. Univ., 2011. (in Ukrainian)
2. L. B. Zhornjak, E. J. Rajkova, and V. I. Osinskaja, “Povyshenie nadezhnosti i jeffektivnosti vysokovol'tnyh vvodov [Increased reliability and efficiency of high-voltage bushings]”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 4(51), pt.2, pp. 95–99, 2008. (in Russian)
3. P. D. Andrienko, A. A. Sakhno, S. P. Konogray, A. G. Spitsa, and L. S. Skrupskaya, “Characteristics of monitoring condition of main insulation of high-voltage bushings and current transformers”, *Electrical Engineering and Power Engineering*, no. 1, Feb. 2014, doi: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-7. (in Ukrainian)
4. *Normy vyprobuvannia elektroobladnannia [Testing standards for electrical equipment]*, SOU-N EE 20.302:2020, State Enterprise “Lviv Design Bureau,” 2020. (in Ukrainian)
5. *Insulated Bushings for Alternating Voltages Above 1000 V*, IEC 60137:2017, IEC, 2017.
6. *IEEE Standard for Performance Characteristics and Dimensions for Power Transformer and Reactor Bushings*, C57.19.01-2017, IEEE, 2018, doi: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8410922.
7. E. A. Feilat, I. A. Metwally, S. Al-Matri, and A. S. Al-Abri, “Analysis of the root causes of transformer bushing failures”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 791–796, 2013.
8. M. Anglhuber and J. L. Velásquez, “Contreras Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method,” *Transformer Magazine. Special Edition: Bushing*. 2017, pp. 126–132.
9. H. I. Septyani, I. Arifianto, and A. P. Purnomoadi, “High voltage transformer bushing problems”, in *2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, Indonesia, Jul. 17–19, 2011, doi: https://doi.org/10.1109/iceei.2011.6021566.
10. I. Metwally, “Failures, monitoring and new trends of power transformers”, *IEEE Potentials*, vol. 30, no. 3, pp. 36–43, May 2011, doi: https://doi.org/10.1109/mpot.2011.940233.
11. A. Mehta, R. N. Sharma, S. Chauhan, and S. D. Agnihotri, “Study the insulation system of power transformer bushing”, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, pp. 544–547, 2011, doi: https://doi.org/10.7763/ijcee.2011.v3.376.
12. D. Tan, H. Li, and D. Xiao, “Analysis on Failure causes of bushing used in 40.5kV metal enclosed air insulation switchgear”, in *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shenzhen, China, Sep. 23–26, 2014. pp. 1225–1229, doi: https://doi.org/10.1109/ciced.2014.6991902.
13. B. Qi, Q. Dai, C. Li, Z. Zeng, M. Fu, and R. Zhuo, “The mechanism and diagnosis of insulation deterioration caused by moisture ingress into oil-impregnated paper bushing”, *Energies*, vol. 11, no. 6, Jun. 2018, Art. no. 1496, doi: https://doi.org/10.3390/en11061496.
14. O. Shutenko, “Method for detection of developing defects in high-voltage power transformers by results of the analysis of dissolved oil

gases", *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 18, no. 1, pp. 11–18, Mar. 2018, doi: https://doi.org/10.15546/aeei-2018-0002.
15. V. Srividhya et al., "Determination of breakdown voltage for transformer oil testing using ANN", in *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore: Springer Singap., 2021, pp. 443–452, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-33-6981-8_35.
16. H. D. Singh and J. Singh, "Enhanced optimal trained hybrid classifiers for aging assessment of power transformer insulation oil", *World Journal of Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 407–426, Apr. 2020, doi: https://doi.org/10.1108/wje-11-2019-0339.
17. L. Gautam, R. Kumar, and Y. R. Sood, "Identifying transformer oil criticality using fuzzy logic approach", in *2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES)*, Prayagraj, India, Jul. 10–12, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/sces50439.2020.9236724.
18. D. Paul and A. K. Goswami, "A multi-gene symbolic regression approach of determining insulating oil interfacial tension", in *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, Dec. 16–19, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/pedes49360.2020.9379528.
19. O. E. Gouda and A. Z. El Dein, "Prediction of aged transformer oil and paper insulation," *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, no. 4-5, pp. 406–419, Mar. 2019, doi: https://doi.org/10.1080/15325008.2019.1604848.
20. V. E. Gmurman, *Teoriya Veroyatnostey I Matematicheskaya Statistika [Probability Theory and Mathematical Statistics]*. Moscow: Vysshaya shkola, 1977. (in Russian)
21. N. L. Johnson and F. C. Leone, *Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences: V. 1 (Probability & Mathematical Statistics S.)*, 2nd ed. New York: Wiley, 1977.

Надійшла (received) 14.12.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Загайнова Олександра Анатоліївна (Alexandra Zagaynova) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8558-3211; e-mail: zagaynova@gmail.com.

Сердюкова Галина Миколаївна (Galina Serdyukova) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1557-0260; e-mail: serdukova.galina@gmail.com.