

Шутенко Олег Володимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри передачі електричної енергії
Пономаренко Сергій Григорович, аспірант кафедри передачі електричної енергії
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, вул. Кирпичова, 2, 61002

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕДУР СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ТРАНСФОРМАТОРНИХ МАСЕЛ

Анотація. Використовуючи результати періодичних випробувань стану трансформаторних масел по 91 трансформатору напругою 110 кВ з чотирьох областей України був виконаний аналіз ефективності процедур статистичної обробки з метою зниження неоднорідності даних і виділення грубих промахів з результатів експлуатаційного контролю стану трансформаторних масел. В процесі досліджень аналізувалися ефективність непараметричного двовибіркового критерію Вілкоксона на рівність середніх значень, параметричного критерію Фішера-Снедекора на рівність дисперсій і параметричного критерію на значимість парної лінійної кореляції показників і тривалості експлуатації, а також їх комбінації. Дані критерії використовувалися для тестування результатів фізико-хімічного аналізу стану трансформаторних масел за 11 показниками і для результатів аналізу розчинених в маслі газів. В результаті послідовного тестування сформовано вісім масивів даних по кожному показнику, які були використані для оцінки ефективності аналізованих статистичних критеріїв та їх комбінацій. Оцінка ефективності аналізованих статистичних критеріїв та їх комбінацій проводилася на основі аналізу тісноти кореляційного зв'язку між показниками з подальшою оцінкою інформаційної значущості по кожному з показників. В результаті досліджень запропоновано метод виділення оптимального числа найбільш інформативних показників якості на базі статистичного аналізу результатів періодичних випробувань трансформаторного масла. Як приклад, практичного використання запропонованого методу розроблена регресійна модель для оцінки ступеня старіння масла і доведена її адекватність.

Ключові слова: трансформаторне масло, експлуатаційні випробування, показники масла, статистичний аналіз, перевірка статистичних гіпотез, кореляція, інформативність показників, множинна регресія, адекватність моделі, локальний максимум міри згоди.

Shutenko Oleg Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Electric Power Transmission Department

Ponomarenko Serhii Hryhorovych, PhD Student of the of the Electric Power Transmission Department
 National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, Kyrpychova str., 2, 61002

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF STATISTICAL PROCESSING PROCEDURES TO IMPROVE THE RELIABILITY OF THE RESULTS OF INSERVICE CONTROL OF THE CONDITION OF TRANSFORMER OILS

Abstract. Using the results of periodic transformer oil condition tests on 91 transformers, 110 kV from four regions of Ukraine, we analyzed the effectiveness of statistical processing procedures to reduce the heterogeneity of data and highlight gross outliers from the results of operational control of transformer oil condition. In the process of researches we analyzed the efficiency of nonparametric two-sample Wilcoxon criterion for equality of mean values, parametric Fisher-Snedecor criterion for equality of variance and parametric criterion for significance of pair linear correlation of indicators and duration of operation, as well as their combinations. These criteria were used to test the results of physical and chemical analysis of transformer oils by 11 indicators and for the results of analysis of gases dissolved in oil. As a result of sequential testing, eight data sets for each indicator were formed and used to evaluate the effectiveness of the analyzed statistical criteria and their combinations. Evaluation of the effectiveness of the analyzed statistical criteria and their combinations was carried out on the basis of analysis of the closeness of the correlation relationship between the indicators with the subsequent assessment of the information significance for each of the indicators. As a result, we proposed a method for selecting the optimal number of the most informative indicators of quality, based on statistical analysis of the results of periodic tests of transformer oil. As an example of practical use of the suggested method a regression model to estimate oil aging degree has been developed and its adequacy has been proved.

Keywords: transformer oil, operational tests, oil indicators, statistical analysis, test of statistical hypotheses, correlation, informativeness of indicators, multiple regression, model adequacy, local maximum of agreement measure.

Шутенко Олег Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри передачі електричної енергії
Пономаренко Сергей Григорьевич, аспірант кафедри передачі електричної енергії
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна,
 ул. Кирпичова, 2, 61002

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕДУР СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННО- ГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

Аннотация. Используя результаты периодических испытаний состояния трансформаторных масел по 91 трансформатору напряжением 110 кВ из четырех областей Украины был выполнен анализ эффективности процедур статистической обработки с целью снижения неоднородности данных и выделения грубых промахов из результатов эксплуатационного контроля состояния трансформаторных масел. В процессе исследований анализировались эффективность непараметрического критерия Уилкоксона на равенство средних значений, параметрического критерия Фишера-Снедекора на равенство дисперсий и параметрического критерия на значимость парной линейной корреляции показателей и длительности эксплуатации, а также их комбинации. Данные критерии использовались для тестирования результатов физико-химического анализа состояния трансформаторных масел по 11 показателям и для результатов анализа растворенных в масле газов. В результате последовательного тестирования сформировано восемь массивов данных по каждому показателю, которые были использованы для оценки эффективности анализируемых статистических критериев и их комбинаций. Оценка эффективности анализируемых статистических критериев и их комбинаций проводилась на основе анализа тесноты корреляционной связи между показателями с последующей оценкой информационной значимости по каждому из показателей. В результате исследований предложен метод выделения оптимального числа наиболее информативных показателей качества на базе статистического анализа результатов периодических испытаний трансформаторного масла. В качестве примера практического использования предложенного метода разработана регрессионная модель для оценки степени старения масла и доказана ее адекватность.

Ключевые слова: трансформаторное масло, эксплуатационные испытания, показатели масла, статистический анализ, проверка статистических гипотез, корреляция, информативность показателей, множественная регрессия, адекватность модели, локальный максимум меры согласия.

Постановка завдання. Одним з істотних недоліків існуючої системи оцінки стану трансформаторних масел за результатами експлуатаційних випробувань є відсутність можливості виявлення трансформаторів з прискореним старінням трансформаторних масел на ранній стадії, тобто коли значення показників масел знаходяться в області гранично-допустимих значень. Згідно з нормами і критеріями, що регламентуються більшістю діючих міжнародних і національних стандартів [1-5], трансформаторне масло вважається не придатним до подальшої експлуатації, якщо значення хоча б одного з показників виходить за область гранично-допустимих значень. При цьому, незважаючи на те, що гранично-допустимі значення показників, що регламентуються даними стандартами, розрізняються, у всіх без винятку стандартах вони є постійними і не залежать ні від тривалості експлуатації, ні від режимів роботи трансформаторів. Остання обставина не дозволяє виконати ранжування трансформаторів за ступенем старіння масла, що в свою чергу не дозволяє здійснити перехід на технічне обслуговування маслонаповненого обладнання за технічним станом, а не за календарним планом. Крім того, накопичення продуктів окислення масел, особливо таких як волога і водорозчинні кислоти, призводять до зниження механічної міцності целюлозної ізоляції [6], що призводить до скорочення ресурсу силових трансформаторів. У зв'язку з цим розробка моделей для ранньої діагностики стану трансформаторних масел є актуальним і практично значимим завданням.

Аналіз публікацій. В даний час питанням розробки моделей для ранньої діагностики стану трансформаторних масел присвячено досить велика кількість публікацій. Так згідно [7], американська компанія S. D. Myers для оцінки стану трансформаторних масел використовує тривірневу систему діагностики, яка має три характерні області: область прийнятних значень показників якості масла, область погіршених значень показників якості і область неприйнятних показників якості. У роботах [8,9] запропоновано підхід до ко-

ригування гранично-допустимих значень показників масел з метою мінімізації ризику, що виникає в разі прийняття помилкових рішень. Ряд зарубіжних дослідників [10-14] для діагностики стану і прогнозування значень показників трансформаторних масел пропонують використовувати апарат нечіткої логіки і нейронні мережі різної конфігурації. У роботах [15-18] для оцінки стану трансформаторних масел запропоновані різні види регресійних моделей, а в [19,20] був використаний підхід, заснований на машинному навчанні. У роботі [21] для ранньої діагностики стану трансформаторних масел з використанням варіативних меж показників був використаний метод траєкторій. Слід зазначити, що практична реалізація всіх перерахованих вище підходів в тій чи мірі має на увазі використання процедури навчання (визначення вагових коефіцієнтів нейронної мережі, виду і функцій приналежності апарату нечіткого виведення, визначення коефіцієнтів регресійної моделі або діаметра еталонних траєкторій), що передбачає наявність навчальної вибірки, тобто результатів випробувань для обладнання із заздалегідь встановленим (верифікованим) діагнозом. В якості навчальної вибірки можна використовувати як результати експериментів зі штучного старіння масел, наведені, наприклад, в роботах [22-28], або результати експлуатаційних випробувань стану трансформаторних масел, як, наприклад, в [8,9,18,21]. Істотним обмеженням при використанні першого підходу є недостатньо повний облік впливу всього можливого спектру експлуатаційних впливів на інтенсивність старіння масла. Як показано в [29] основним недоліком другого підходу є наявність помилок і грубих промахів в результатах експлуатаційних випробувань, що, незважаючи на явні переваги даного підходу, не дозволяє використовувати результати експлуатаційних випробувань без попередньої статистичної обробки. У зв'язку з цим в даній статті виконаний аналіз ефективності трьох статистичних критеріїв і їх комбінацій для зниження неоднорідності даних та виділення грубих промахів з результатів експлуатаційного контролю стану трансформаторних масел.

Мета статті. У даній статті наведені результати порівняльного аналізу ефективності процедур статистичної обробки результатів експлуатаційних випробувань для підвищення достовірності результатів періодичного контролю стану трансформаторних масел.

Методика розв'язання задачі. Пропонований метод статистичної обробки результатів періодичного контролю включає в себе кілька етапів. Розглянемо практичну реалізацію даного методу на прикладі навчальної вибірки, складеної за результатами періодичного контролю стану масла по 91 трансформатору, які експлуатуються у Луганській, Полтавській, Сумській та Харківській областях України. Досліджувані трансформатори мають номінальну напругу 110 кВ, потужності 6,3, 16, 25, 32, 40 мВА, типи ТРДН, ТДТН, ТДНГ і ТНД. Обсяг вихідної вибірки склав 6267 значень за 19 показниками якості масла. У табл. 1 наведено перелік показників і обсяг вибірки по кожному з них.

Представивши результати вимірювань по кожному з показників для одного трансформатора у вигляді часових рядів отримаємо 460 підмножин вихідних даних. На першому етапі досліджень для підвищення достовірності вимірювальної інформації був використаний двоетапний метод тестової фільтрації масивів даних. На першому етапі фільтрації з масиву вихідних даних (позначимо його як M_a) були виключені ряди зі спотвореним знаком коефіцієнта парної кореляції показників масла на час експлуатації, що дозволило сформувати масив M_b . Модель старіння масла базувалася на негативних коефіцієнтах кореляції для першого і третього показників та на позитивних для всіх інших.

На другому етапі фільтрації з масиву даних M_b були видалені стаціонарні часові ряди, тобто ті ряди, для яких зміна часу експлуатації не призводять до значущої зміни значень показників якості.

Далі були досліджені методи фільтрації вихідних даних на основі використання елементів перевірки статистичних гіпотез [30].

Перелік показників якості та обсяг вибірових значень

№	Показник якості	Обсяг вибірки	
		Кількість трансформаторів	Кількість значень
1	Температура спалаху	89	971
2	Кислотне число	90	969
3	Пробивна напруга	90	950
4	Тангенс кута втрат 20 °С	11	66
5	Тангенс кута втрат 70 °С	23	157
6	Тангенс кута втрат 90 °С	12	108
7	Колір	16	194
8	Реакція водної витяжки	7	83
9	Вміст механічних домішок	1	9
10	Вміст осаду	1	5
11	Вологовміст масла	10	93
12	Вміст СО	8	153
13	Вміст СО ₂	26	721
14	Вміст СН ₄	11	247
15	Вміст С ₂ Н ₂	14	343
16	Вміст С ₂ Н ₄	21	559
17	Вміст С ₂ Н ₆	11	211
18	Сума газів С _x Н _y	16	393
19	Вміст Н ₂	3	35

На етапі тестової фільтрації була досліджена ефективність 3 статистичних критеріїв [30]:

1. Параметричний критерій на значимість парної лінійної кореляції показників і часу експлуатації (тест F – на значимість лінійної регресії).

2. Непараметричний двовибірковий критерій Вілкоксона (тест W – на стаціонарність по середньому).

3. Параметричний критерій Фішера-Снедекора (тест d – на стаціонарність по дисперсії).

Слід зазначити, що результати, наведені в [31], свідчать про високу ефективність спільного використання критеріїв Вілкоксона і Фішера-Снедекора при формуванні однорідних масивів даних при аналізі законів розподілу трансформаторних масел. Незважаючи на те, що, як показано в [32,33], залежності показників масел від тривалості експлуатації є нелінійними, результати досліджень, наведені в [29], також свідчать про досить високу ефективність даного критерію.

Тестування часових рядів, як безперервних випадкових процесів з дискретним часом, проводилося при рівні значущості $\alpha=0,05$ і основній гіпотезі H_0 – числові характеристики ряду інваріантні в часі, при альтернативній гіпотезі H_1 – час експлуатації впливає на зміну середніх значень показників якості. Алгоритм тестової фільтрації по кожному з досліджуваних тестів наведено в табл. 2. За результатами тестової фільтрації даних масиву Мб були складені 7 масивів. При цьому три з них (масиви Mw, Md, Mf) отримані в результаті тестування даних масиву Мб, відповідно, W, d і F тестами, а чотири масиви (Mwd, Mwf, Mdf і Mwdf) – в результаті одночасного тестування даних масиву Мб двома і трьома тестами. І хоча відомо [34], що застосування декількох статистичних критеріїв при аналізі одних і тих же даних збільшує помилку першого роду і слід досліджувати лише один критерій, бажано більш потужний, було прийнято рішення досліджувати і ефективність одночасного використання декількох тестів. Оскільки в даній ситуації ціна помилки першого роду (приймається гіпотеза H_1 , коли справедлива гіпотеза H_0) це зниження обсягу вибірових значень, то ціна помилки другого роду (приймається гіпотеза H_1 коли справедлива

гіпотеза H_0) – збільшення зашумленості масиву даних. Тому бажано мати критерій, який би забезпечував мінімальне значення помилки другого роду.

Таблиця 2

Алгоритм проведення тестової фільтрації

Тест	Статистична модель	Основна гіпотеза	Критеріальна статистика	Статистика порівняння
F	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 t_i + e_i;$ $i = 1, N$ $M[e_i] = 0,$ $M[e_i^2] = \sigma^2$	$\beta_1 = 0$	$F = R^2 / (1 - R^2) \sim F_{1, (N-2)}$	$F_{1, (N-2), 0,95}$
W	$X_1 = (x_{n_1}^1 \dots x_{n_1}^1) \sim f(x_1);$ $X_2 = (x_{n_2}^2 \dots x_{n_2}^2) \sim f(x_2);$ $n = n_1 + n_2$	$f(x_1) = f(x_2)$	S_1 – сума рангів множини $\{x_i^1\}$ S_2 – сума рангів множини $\{x_i^2\}$	$S_{n_1, n_2, 0,025}$ $S_{n_1, n_2, 0,975}$
d	Вибірка 1: обсяг n_1 , вибіркова дисперсія S_1^2 Вибірка 2: обсяг n_2 , вибіркова дисперсія S_2^2	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	$F = S_1'^2 / S_2'^2 \sim F_{(n_1-1), (n_2-1)}$	$F_{(n_1-1), (n_2-1), F_{0,95}}$

Графічно процедура формування масивів даних наведена на рис. 1. Обсяг вибірко-вих значень N і кількість часових рядів k по кожному показнику для даних масивів наведені в табл. 3.

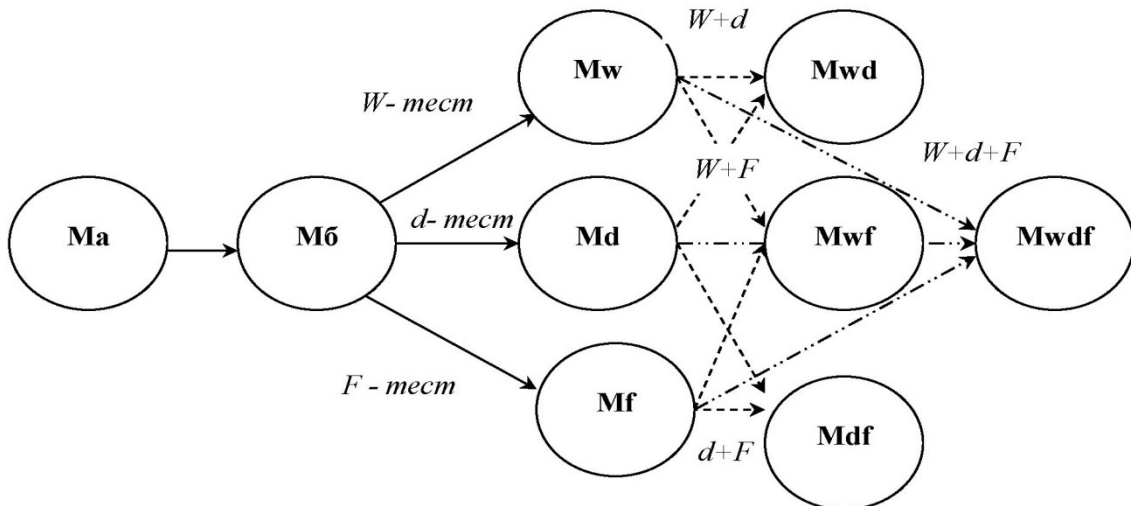


Рис. 1. Графічна ілюстрація формування масивів даних шляхом тестової фільтрації

Для вибору найбільш потужного критерію був виконаний кореляційний аналіз всіх 9 масивів даних. Вважалося, що найбільш ефективним буде той тест якщо в масиві даних, сформованих з його використанням, показники якості матимуть найбільшу тісноту зв'язку з часом експлуатації. Мірою зв'язку між двома випадковими величинами є коефіцієнт парної кореляції:

$$r_B = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p}) \cdot (t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}}, \quad (1)$$

де r_B – вибіркоче значення коефіцієнта парної кореляції; p_i – поточне значення показника якості; t_i – поточне значення часу експлуатації; \bar{p} – середнє значення показника якості; \bar{t} – середнє значення часу експлуатації; N – обсяг вибіркових значень.

Таблиця 3

Обсяг вибірових значень показників якості масла на різних етапах тестової фільтрації

№ показ- ника	Масив Ma		Масив Mb		Масив Mw		Масив Md		Масив Mf		Масив Mwd		Масив Mwf		Масив Mdf	
	N	k	N	k	N	k	N	k	N	k	N	k	N	k	N	k
1	614	56	546	47	318	32	398	34	284	27	392	33	232	22	226	21
2	794	77	445	40	329	28	643	63	215	18	424	39	263	23	194	17
3	501	56	372	39	264	26	291	30	215	20	245	23	175	16	147	12
4	49	9	9	1	32	6	27	5	9	1	9	1	18	3	9	1
5	113	17	49	7	58	8	62	9	34	4	34	4	51	7	34	4
6	108	12	60	6	51	6	82	9	28	3	60	6	42	5	28	3
7	185	15	74	7	89	7	175	14	32	3	69	6	84	6	27	2
8	83	7	22	2	83	7	78	6	22	2	17	1	78	6	17	1
9	9	1	9	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	5	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	41	6	—	—	15	2	11	1	—	—	—	—	—	—	—	—
12	125	7	83	4	77	5	74	3	35	2	48	2	26	1	—	—
13	541	19	242	7	308	9	307	9	123	3	145	4	170	4	45	1
14	68	5	28	1	60	4	8	1	28	1	—	—	—	—	—	—
15	190	9	161	7	161	7	24	1	161	7	24	1	24	1	24	1
16	211	10	93	4	134	6	44	3	24	1	8	1	28	1	—	—
17	168	9	58	3	132	7	36	2	50	2	8	1	—	—	—	—
18	161	9	52	2	129	6	52	3	52	2	28	1	28	1	28	1
19	35	3	19	1	35	3	—	—	19	1	—	—	—	—	—	—

Оскільки обсяги показників якості масла для різних масивів значимо відрізняються, для зручності порівняння використовуємо величину T -статистики [30]:

$$T = \frac{r_B \cdot \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} \quad (2)$$

Результати розрахунку T -статистики для кожного показника по всіх 9 масивах наведені в табл. 4. Аналізуючи дані табл. 4 легко побачити, що з розглянутих 19 показників максимальне значення $T_{сност.}$ мають 10 показників масиву Mf (1-3, 7, 8, 11-15). Максимальне значення $T_{сност.}$ показника 4 припадає на масив Md, показника 5 – одночасно на 3 масиви Mwd, Mwf і Mwdf, показника 6 – на масиви Mw і Mwf, показників 16 і 17 – мають максимум $T_{сност.}$ у масиві Mwf, а 18 – в масивах Mwf і Mwdf. Таким чином, в якості масиву для навчання моделі найкраще використовувати масив, отриманий в результаті фільтрації параметричним тестом на значимість лінійної регресії.

До складу аналізованої вибірки входять трансформатори різного типу, різної номінальної потужності і напруги на низькій і середній обмотках, виготовлені на різних підприємствах і в різний час, а найголовніше експлуатованих при різних умовах. Природно, що подібна відмінність призводить до наявності у вихідній вибірці систематичного зміщення, обумовленого різними умовами експлуатації. Причому це зміщення може бути як по осях ординат і абсцис, так і викликане різним кутом нахилу (різною інтенсивністю процесів старіння). Наявність систематичної складової при навчанні моделі для оцінки ступеня старіння масла є небажаною, оскільки її наявність призводить до збільшення дисперсії результатів вимірювань, що значно ускладнює навчання моделі. Тому завданням даного етапу досліджень є формування масиву статистично однорідних даних по кожному

з показників масла. Для вирішення даного завдання був використаний коваріаційний аналіз лінійних моделей [35, 36] показників масла на час експлуатації:

$$Y_{ji} = \alpha_j + \beta_j \cdot X_{ji} + \varepsilon_{ji}, \quad (3)$$

де $i = \overline{1, n_j}$; ε_{ji} – залишок; Y_{ji} – значення регресії показника на час для j -ї групи, коли $X = x_{ij}$; α_j, β_j – значення часткових коефіцієнтів регресії для j -ї групи.

Таблиця 4

Результати розрахунку Т-статистики для масивів даних, отриманих в результаті тестової фільтрації

№ _i показника	Масив Ma	Масив Mb	Масив Mw	Масив Md	Масив Mf	Масив Mwd	Масив Mwf	Масив Mdf	Масив Mwdf
1	2,09	5,847	6,566	3,178	6,792	3,969	6,787	3,965	3,947
2	18,09	22,007	18,691	16,276	23,481	12,822	19,262	15,742	13,506
3	2,037	9,036	8,647	7,469	9,737	6,676	8,255	7,119	5,967
4	0,918	1,876	3,833	4,087	3,433	3,833	3,833	3,699	3,833
5	5,353	6,724	7,011	7,786	7,364	7,842	7,842	7,200	7,842
6	3,179	3,179	6,178	2,805	4,139	3,112	6,178	3,133	3,112
7	11,36	11,448	8,294	8,746	11,401	6,026	7,934	8,307	5,704
8	0,941	0,941	0,299	0,941	5,449	0,299	2,659	5,448	2,659
9	1,835	1,835	1,835	—	—	—	—	—	—
10	2,301	2,301	—	—	—	—	—	—	—
11	1,300	1,2 · 10 ⁻³	—	0,322	3,340	—	—	—	—
12	4,971	5,133	2,779	3,893	4,593	1,118	3,427	2,293	—
13	3,488	4,273	1,236	2,654	3,565	0,0099	2,723	1,593	4,307
14	2,149	0,595	0,784	1,290	2,541	0,784	—	—	—
15	2,516	0,233	0,158	0,158	2,096	0,157	2,096	2,096	2,096
16	1,585	2,313	1,467	1,719	1,781	0,927	4,730	4,158	—
17	0,379	0,017	0,973	1,521	0,582	0,570	6,054	—	—
18	2,959	0,739	0,583	0,614	0,333	0,581	5,747	5,747	5,746
19	0,363	0,363	0,125	0,363	—	0,124	—	—	—

Вважалося, що часові ряди статистично однорідні, якщо одне лінійне рівняння регресії (3) може представляти всі групи – це лінійна гіпотеза H_0 : ($\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n$; $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n$). Оскільки процедура перевірки гіпотез при коваріаційному аналізі досить детально викладена в [36], обмежимося описом загальної послідовності її використання. Перевірка даної гіпотези здійснювалася у два етапи. На першому етапі були сформовані масиви даних показників масла, для яких не відкидалася гіпотеза про рівність кутових коефіцієнтів. На другому етапі формувалися масиви даних показників, для яких не відкидалася гіпотеза про рівність вільних членів часткових регресій. За результатами коваріаційного аналізу були сформовані кілька масивів показників, для яких основна гіпотеза H_0 не відкидається. Однак більшість масивів мають обмежений обсяг вибірових значень показників, тому на даному етапі досліджень в якості навчальної вибірки був використаний масив, що має найбільший обсяг вибірових значень показників – назовемо його M_0 . Обсяг вибірових і результати кореляційного аналізу показників масла масиву M_0 наведені в табл.5.

Результати кореляційного аналізу показників масла масиву Мо

№ показника	<i>N</i>	<i>k</i>	<i>r</i> _{виб.}	<i>r</i> _н	<i>r</i> _в	<i>T</i> _{спост.}	<i>t</i> _{крит.}
1	160	12	-0,658	-0,56	-0,738	10,984	1,979
2	289	29	0,905	0,882	0,924	36,04	1,978
3	257	27	-0,575	-0,487	-0,652	11,223	1,977
4	20	3	0,732	0,428	0,887	4,558	2,10
5	30	3	0,741	0,519	0,869	7,839	2,05
6	61	6	0,712	0,561	0,817	7,789	2,001
7	127	10	0,783	0,705	0,842	14,074	1,979
8	44	3	0,731	0,554	0,845	6,943	2,018
11	11	1	0,744	0,260	0,929	3,340	2,260
12	74	3	0,476	0,278	0,635	4,593	1,996
13	182	6	0,406	0,277	0,521	5,96	1,97
14	8	1	0,720	0,031	0,945	2,541	2,310
15	24	1	0,408	5,5 · 10 ⁻³	0,697	2,096	2,060
18	44	2	0,620	0,396	0,774	5,121	2,016

Порівнюючи значення Т-статистики для масиву даних Мо (табл. 5) з результатами розрахунку Т-статистики для інших масивів даних (табл. 4) слід зазначити, що практично для всіх показників масла значення Т-статистики Мо перевершують значення Т-статистики для інших масивів. Це свідчить про високу ефективність процедури формування масиву даних на основі статистично однорідних рядів показників якості.

Одним із шляхів оптимізації алгоритмів контролю в технічній діагностиці є облік інформаційної значущості або діагностичної цінності показників при формуванні послідовності виконання перевірок (метод послідовного аналізу Вальда [37], алгоритм Сіднеєва [38] і т.д.). В основі даних алгоритмів лежить процедура ранжування діагностичних ознак зі зниженням їх інформаційної значущості і організація послідовності перевірок згідно рангу ознаки. Кількість інформації по кожному з показників розраховувалася як:

$$I = \log_2 \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{Q}{N-1}\right)}{\frac{Q_e}{N-2}}} = \log_2 \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{Q_1 + Q_e}{N-1}\right)}{\frac{Q_e}{N-2}}} \quad (4)$$

де Q – повна сума квадратів відхилень експериментальних точок від лінійної регресії показника на час експлуатації, характеризує вихідну ентропію (розсіювання результатів вимірювань щодо середнього значення); Q_1 – регресійна сума квадратів відхилень, характеризує мінливість середніх значень показників якості масла від часу експлуатації; Q_e – залишкова сума квадратів відхилень, характеризує залишкову ентропію обумовлену похибкою самої моделі (розсіювання результатів вимірювань щодо лінії тренда); N – обсяг вибіркового значень; $N-1$ – число ступенів свободи, що відповідає сумі Q ; $N-2$ – число ступенів свободи, що відповідає сумі Q_e .

Залежність інформативності показників якості масла від методу тестової фільтрації наведені на рис. 2.

Показники якості трансформаторного масла, ранжовані зі зменшенням їх інформаційної значущості, для 10 досліджуваних масивів даних наведені в табл. 6. Як видно з табл. 6 для всіх масивів даних незалежно від процедури обробки найбільш інформативним показником є кислотне число масла. А як видно з рис. 3 максимальним значенням інформативності володіють показники з масиву Мо.

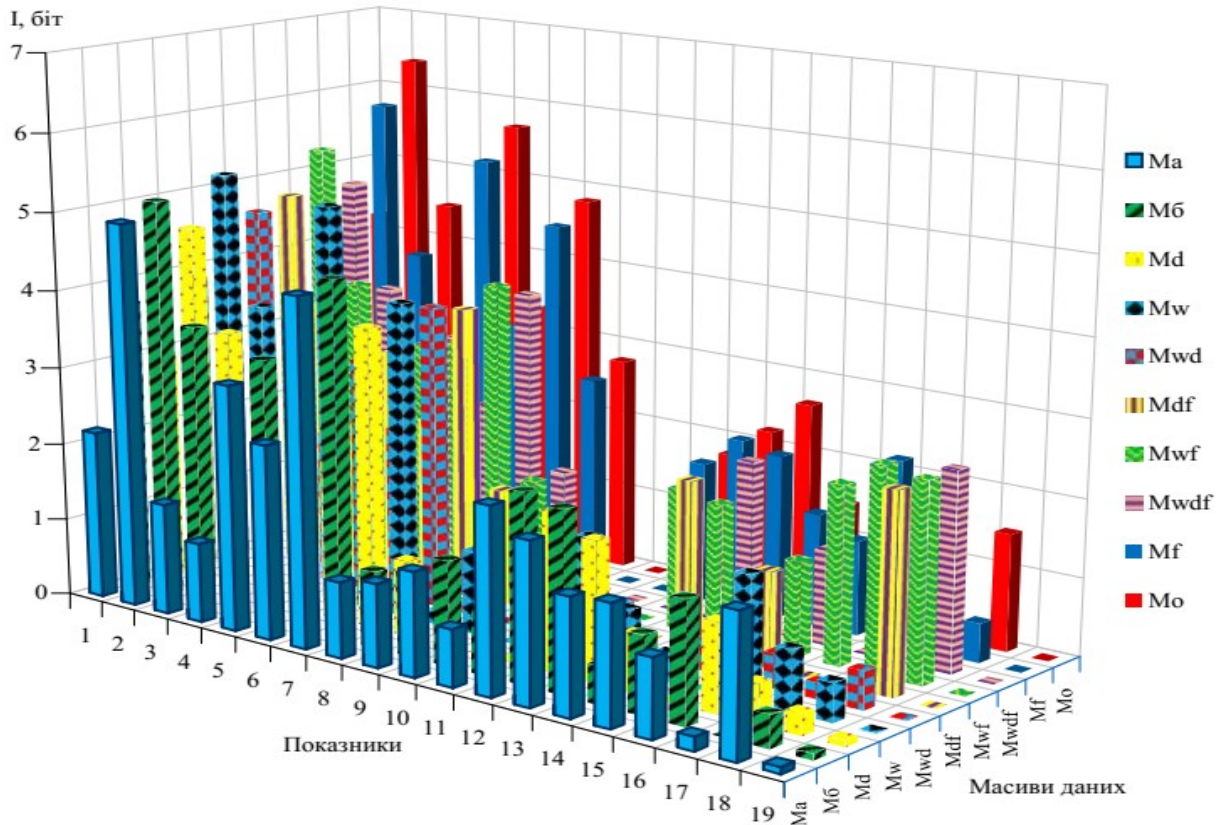


Рис. 2. Залежність інформаційної значущості показників якості трансформаторного масла від процедури тестової фільтрації

Отримані в результаті тестування масиви даних були використані в якості навчальних вибірок в процесі синтезу регресійних моделей для оцінки ступеня старіння трансформаторного масла. На жаль значне зниження обсягу вибірових значень показників якості масла в процесі фільтрації не дозволило використовувати при навчанні більш складну модель. Тому в якості параметричної моделі для прогнозованого часу старіння t було використано рівняння множинної поліноміальної регресії, яке є лінійним як відносно $(p+1)$ параметрів $\theta_0, \theta_1 \dots \theta_p$, так і щодо своїх регресорів, $x_i, i = 1, \dots, p$:

$$\hat{t} = \theta_0 + \sum_{i=1}^p \theta_i x_i, \quad (5)$$

де \hat{t} – розрахунковий час старіння; θ_0, θ_i – коефіцієнти регресійного рівняння, що підлягають визначенню; x_i – значення показника якості; p – кількість регресорів (показників якості масла).

Перевірка згоди регресійних рівнянь (5) велася за скоригованим коефіцієнтом детермінації $\overline{R_p^2}$ [18], який враховує множинну кореляцію R_p регресорів даного рівняння і заданого часу експлуатації t , кількість n значень часу експлуатації, передбачених за допомогою даних рівнянь регресії і p – число регресорів, використовуваних для показання часу експлуатації:

$$\overline{R_p^2} = 1 - (1 - R_p^2) \cdot \left(\frac{n}{n - p} \right), \quad (6)$$

де n - обсяг вибірових значень; p - число регресорів у рівнянні; R_p - коефіцієнт множинної кореляції.

Таблиця 6

Результати ранжування показників якості зі зменшенням їх інформаційної значущості

Ранг показника	Ma	Mb	Mw	Md	Mf	Mwd	Mwf	Mdf	Mwdf	Mo
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	7	7	5	7	5	7	1	7	7	5
3	5	1	7	3	7	3	7	3	3	7
4	6	3	1	5	1	1	3	5	1	3
5	12	5	3	1	3	5	6	1	5	1
6	1	6	6	6	6	6	5	8	6	6
7	13	12	12	12	8	12	12	6	—	8
8	3	13	13	13	12	8	13	13	—	13
9	8	16	8	8	13	13	—	12	—	12

Залежність $\overline{R_p^2}$ від числа регресорів для всіх 10 досліджуваних підмножин даних наведена на рис. 3. Адекватність регресійних моделей перевірялася за допомогою F -критерію [18] за розрахованою критеріальною статистикою:

$$F = \frac{R_p^2 / (p - 1)}{(1 - R_p^2) / (n - p)} \approx F_{(p-1), (n-p)}, \quad (7)$$

де n - обсяг вибірових значень; p - число регресорів у рівнянні.

Результати регресійного аналізу: число регресорів N_p , що дають максимум міри згоди $\overline{R_p^2}$ і значення $\overline{R_p^2}$, значення залишкової дисперсії $\sigma_{залиш.}^2$ і помилки прогнозу $\sigma_{прогн.}$, значення математичного очікування залишків M_d , асиметрії j_a і ексцесу залишків j_e , по всіх 10 моделям наведені в табл. 7. Як видно з рис. 3 найвищі значення міри згоди і чітко виражений максимум залежності $\overline{R_p^2}(n)$ мають регресійні моделі, побудовані за даними масивів Mo (максимум на 4 регресорі) і масиву Mf (максимум на 5 регресорі). Всі інші 8 моделей максимуму не мають.

З табл. 6 видно, що для всіх 10 досліджуваних моделей $F_{розр.} > F_{крит. (p-1), (n-p), 0,95}$, тому немає підстав для того, щоб гіпотеза про адекватність даних моделей була відкинута. У той же час найвищі значення $F_{розр.}$, найменші значення залишкової дисперсії і помилки прогнозу в точці максимуму $\overline{R_p^2}$ мають регресійні моделі, побудовані за даними масивів Mo і масиву Mf, що збігається як з результатами кореляційного, так і інформаційного аналізів.

Отримані результати свідчать, про досить високу ефективність процедури фільтрації вихідних даних тестом на значимість лінійної регресії з подальшим виділенням однорідних часових рядів за допомогою коваріаційного аналізу лінійних моделей.

Для оцінки достовірності отриманої за даними масиву Mo моделі виконаємо кількісну оцінку прогнозованого часу старіння, використовуючи при цьому незалежну вибірку. Регресійне рівняння має вигляд:

$$\hat{t} = 19,393 - 0,320748 \cdot p_4 - 17,5105 \cdot p_1 + 1,13618 \cdot p_2 + 3,10496 \cdot p_3 \quad (8)$$

де \hat{t} - розрахунковий час старіння; p_1 - поточне значення кислотного числа масла; p_2 - поточне значення тангенса кута діелектричних втрат масла при 70 °C; p_3 - поточне значення колірному числа масла; p_4 - поточне значення пробивної напруги.

Показники адекватності регресійних моделей

Показник	Навчальні вибірки									
	Ma	Mb	Mw	Md	Mf	Mwd	Mwf	Mdf	Mwdf	Mo
N_p	9	9	9	9	5	9	8	9	6	4
$F_{роз.}$	401,40	582,36	3111,3	728,6	3345,2	1355,6	1989,2	3032,0	1561,9	10011,5
$F_{крит.}$	2,34	2,34	2,34	2,34	2,70	2,34	2,39	2,34	2,57	2,93
\overline{R}_p^2	0,922	0,945	0,989	0,956	0,990	0,976	0,983	0,989	0,979	0,9967
$\sigma_{залиш.}^2$	7,339	4,942	0,954	3,980	0,887	2,170	1,486	0,979	1,884	0,2986
$\sigma_{прогн.}$	2,709	2,223	0,977	1,995	0,942	1,4732	1,219	0,989	1,372	0,5464
M_{Δ}	-1,26 10^{-4}	-3,26 10^{-5}	-3,80 10^{-5}	-3,25 10^{-4}	3,49 10^{-4}	-5,6 10^{-6}	5,88 10^{-4}	-3,97 10^{-4}	-1,10 10^{-4}	-5,5 10^{-5}
j_a	0,879	0,609	-0,397	0,461	-0,019	-0,720	-0,212	-1,256	0,242	-0,091
j_e	0,080	-0,360	-0,408	0,0367	-0,496	1,000	-0,287	1,866	-0,992	-0,163

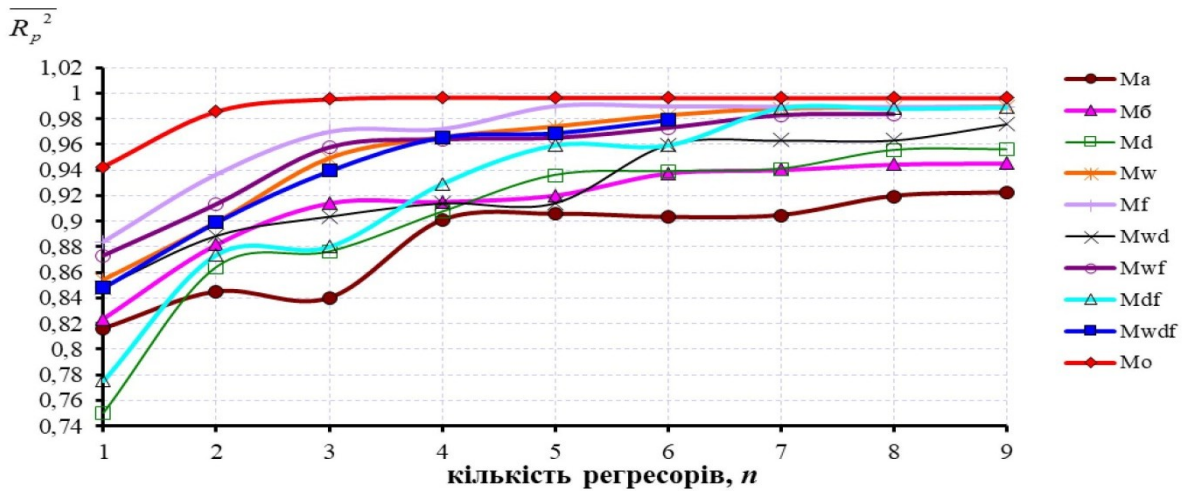


Рис. 3. Залежність \overline{R}_p^2 від числа регресорів

В якості незалежної вибірки використовувалися результати періодичних випробувань трансформаторного масла по Луганській і Донецькій областях України, при цьому дані результати не використовувалися при навчанні моделі. Перевірка проводилася по масиву даних, для яких не відкидалася гіпотеза про однорідність з даними масиву Mo. Виконаний розрахунок показав, що значення помилки моделі (8) $\sigma_{прогн.} = 1,085$ року, що говорить про досить високу точність запропонованої моделі.

Висновки. Найбільш ефективною процедурою тестової фільтрації при виявленні стаціонарних часових рядів показників якості масла є тест на значимість лінійної регресії з подальшим формуванням масиву статистично однорідних показників і ранжуванням їх зі зменшенням інформаційної значущості. Виконаний регресійний аналіз показав явні переваги даного методу статистичної обробки в порівнянні з аналізованими методами. Виконана перевірка точності регресійної моделі на незалежній вибірці показала, що значення помилки моделі склала 1,085 року, що говорить про досить високу точність запропонованої моделі.

Список використаної літератури:

1. Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance: IEC 60422:2013. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2013. – 93 p.
2. IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment: IEEE Std C57.106-2015. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. – 38 p. – doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7442048.

3. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості: СОУ-Н ЕЕ 43-101:2009. Київ: Українська науково-технічна електроенергетична асоціація «Аселенерго», 2018.
4. Объем и нормы испытаний электрооборудования: СТО 34.01-23.1-001-2017. ПАО «Россети», 2017. – 262с.
5. Mineral insulating oils in electrical equipment-supervision and maintainance guidance: BS EN 60422:2013. British Standard Institute (BSI), 2013. – 50 p.
6. Rao U. M. et al. Condition monitoring of in-service oil-filled transformers: Case studies and experience. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2019. Vol. 35, № 6. P. 33-42. – doi: 10.1109/mei.2019.8878258.
7. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. Москва: НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
8. Shutenko O., Ponomarenko S. Correction of the Maximum Permissible Values of the Oil Acidity by the Minimum Risk Method. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021. P. 310-315. – doi: 10.1109/ukrcon53503.2021.9575854.
9. Shutenko O., Ponomarenko S. Using Statistical Decision Methods to Correct the Maximum Permissible Values of Transformer Oils Indicators. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 471-476. – doi: 10.1109/khpiweek53812.2021.9570041.
10. Srividhya V., Babu J. S. et al. Determination of Breakdown Voltage for Transformer Oil Testing Using ANN. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. P. 443-452. – doi: 10.1007/978-981-33-6981-8_35.
11. 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, № 3. P. 407-426. – doi: 10.1108/wje-11-2019-0339.
12. Nurcahyanto H., Nainggolan J., Ardita I., Hudaya C. Analysis of Power Transformer's Lifetime Using Health Index Transformer Method Based on Artificial Neural Network Modeling. 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI). 2019. P. 574-579. – doi: 10.1109/iceei47359.2019.8988870.
13. Forouhari S., Abu-Siada A. Application of adaptive neuro fuzzy inference system to support power transformer life estimation and asset management decision. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25, № 3. P. 845-852. – doi: 10.1109/tdei.2018.006392.
14. Gautam L., Kumar Y., Sood Y.R. Identifying Transformer Oil Criticality Using Fuzzy Logic Approach. 2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES). 2020. P. 1-6. – doi: 10.1109/sces50439.2020.9236724.
15. Abdi S. et al. The Correlation of Transformer Oil Electrical Properties with Water Content Using a Regression Approach. Energies. 2021. Vol. 14, № 8. P. 2089. – doi: 10.3390/en14082089.
16. Wahab M. A. A. et al. A new non-linear model for transformer oil residual operating time. 2008 12th International Middle-East Power System Conference. 2008. P. 66-70. – doi: 10.1109/mepcon.2008.4562315.
17. Gouda O. E., El Dein A. Z. Prediction of Aged Transformer Oil and Paper Insulation. Electric Power Components and Systems. 2019. Vol. 47, № 4-5. P. 406-419. – doi: 10.1080/15325008.2019.1604848.
18. Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnostics of Transformer Oils Using the Multiple Linear Regression Model. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). 2020. P. 1-6. – doi: 10.1109/paep49887.2020.9240875.
19. Senoussaoui M. E. A., Brahami M., Fofana I. Transformer Oil Quality Assessment Using Random Forest with Feature Engineering. Energies. 2021. Vol. 14, № 7. P. 1809. – doi: 10.3390/en14071809.
20. Bhatia N. K., El-Hag A. H., Shaban K. B. Machine Learning-based Regression and Classification Models for Oil Assessment of Power Transformers. 2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIOT). 2020. P. 400-403. – doi: 10.1109/iciot48696.2020.9089647.
21. Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnosing the Condition of Transformer Oils Using the Trajectory Method. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2021. P. 1-6. – doi: 10.1109/mees52427.2021.9598490.
22. Dessouky S. S. et al. Further Contribution For Evaluating The Aging of Transformer Oil of Power Transformer. JES. Journal of Engineering Sciences. 2015. Vol. 43, № 2. P. 211-226. – doi: 10.21608/jesaun.2015.115168.
23. Karthik M., Sharma S., Visalakshi M. Characteristics of Dielectric Fluids in Power Transformer Applications – A Review. International Journal of Recent Trends in Engineering and Research. 2017. Vol. 3, № 2. P. 239-245. – doi: 10.23883/ijrter.2017.3032.ihoat.
24. Kassi K. S., Fofana I., Volat C., Farinas M. I. Impact of oils degradation on the cooling capacity of power Transformers. The 19th International Symposium on High Voltage Engineering. – Pilsen, Czech Republic. – 2015.
25. Meshkatodd M. R. Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil. American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2008. Vol. 1, № 4. P. 384-388. – doi: 10.3844/ajeassp.2008.384.388.
26. Abdi S. et al. Influence of Artificial Thermal Aging on Transformer Oil Properties. Electric Power Components and Systems. 2011. Vol. 39, № 15. P. 1701-1711. – doi: 10.1080/15325008.2011.608772.
27. Ouyang X. D. et al. Research on Aging Characteristics and Chemical Composition of Hydrogenated Transformer Oil. Advanced Materials Research. 2012. Vol. 614-615. P. 1131-1137. – doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.614-615.1131.
28. Belmecheri H. et al. Insulating and Thermal Aging Dielectric Properties Dependency of Transformer Oil Using Spectroscopy Techniques. Instrumentation Measure Métrologie. 2019. Vol. 18, № 4. P. 337-342. – doi: 10.18280/im.180402.

29. Shutenko O., Ponomarenko S. Reliability Assessment of the Results of Periodic Monitoring of the Transformer Oils Condition. 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). 2020. P. 77-82. – doi: 10.1109/ieps51250.2020.9263141.

30. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов. Москва: Высш. шк., 1977. – 479 с.

31. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of distribution laws of transformer oil indicators in 110-330 kV transformers. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. № 5. P. 46-56. – doi: 10.20998/2074-272x.2021.5.07.

32. Шутенко О. В. Особенности дрейфа показателей качества трансформаторного масла в течении длительной эксплуатации. *Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал*. 2007. № 4. С. 26-30.

33. Шутенко О. В. Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний. *Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал*. 2006. № 4. С. 42–50.

34. Pollard J. H. A handbook of numerical and statistical techniques. Cambridge University Press, 1976. – 344 p.

35. Johnson N. L. Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences. New York: Wiley, 1977.

36. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of the Impact of Power Transformer Loading on the Transformer Oil Aging Intensity. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. P. 76-81. – doi: 10.1109/khpiweek51551.2020.9250159.

37. Биргер И. А. Техническая диагностика. Москва: Машиностроение, 1978. – 240 с.

38. Верзаков Г. Ф., Киншт, Н. В. и др. Введение в техническую диагностику. Москва: «Энергия», 1968. - 224 с.

References:

1. Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance: IEC 60422:2013. Geneva, Switzerland. International Electrotechnical Commission, 2013. 93 p.

2. IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment: IEEE Std C57.106-2015. Piscataway, NJ, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. 38 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7442048

3. SOU-N EE 43-101:2009. Pryumannya, zastosuvannya ta ekspluatatsiya transformatornykh masel. Normy otsynuyannya yakosti. Kyiv, Ukrainian Scientific and Technical Electric Power Association «Aselenergo», 2018.

4. STO 34.01-23.1-001-2017. Ob'em i normy ispytaniy elektrooborudovaniya. PJSC "Rosseti", 2017. 262p.

5. Mineral insulating oils in electrical equipment-supervision and maintainance guidance. BS EN 60422:2013. British Standard Institute (BSI), 2013. 50 p.

6. Rao U. M. et al. Condition monitoring of in-service oil-filled transformers: Case studies and experience. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2019, Vol. 35, 6, P. 33-42. doi: 10.1109/mei.2019.8878258.

7. Alekseev B. A. Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov. Moskva. NTs ENAS, 2002. 216 s.

8. Shutenko O., Ponomarenko S. Correction of the Maximum Permissible Values of the Oil Acidity by the Minimum Risk Method. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021, P. 310-315. doi: 10.1109/ukrcon53503.2021.9575854.

9. Shutenko O., Ponomarenko S. Using Statistical Decision Methods to Correct the Maximum Permissible Values of Transformer Oils Indicators. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021, P. 471-476. doi: 10.1109/khpiweek53812.2021.9570041.

10. Srividhya V., Babu J. S. et al. Determination of Breakdown Voltage for Transformer Oil Testing Using ANN. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, P. 443-452. doi: 10.1007/978-981-33-6981-8_35.

11. 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, 3, P. 407-426. doi: 10.1108/wje-11-2019-0339.

12. Nurcahyanto H., Nainggolan J., Ardita I., Hudaya C. Analysis of Power Transformer's Lifetime Using Health Index Transformer Method Based on Artificial Neural Network Modeling. 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2019, P. 574-579. doi: 10.1109/iceei47359.2019.8988870.

13. Forouhari S., Abu-Siada A. Application of adaptive neuro fuzzy inference system to support power transformer life estimation and asset management decision. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, Vol. 25, 3, P. 845-852. doi: 10.1109/tdei.2018.006392.

14. Gautam L., Kumar Y., Sood Y. R. Identifying Transformer Oil Criticality Using Fuzzy Logic Approach. 2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES), 2020, P. 1-6. doi: 10.1109/sces50439.2020.9236724.

15. Abdi S. et al. The Correlation of Transformer Oil Electrical Properties with Water Content Using a Regression Approach. *Energies*, 2021. Vol. 14, 8, P. 2089. doi: 10.3390/en14082089.

16. Wahab M. A. A. et al. A new non-linear model for transformer oil residual operating time. 2008 12th International Middle-East Power System Conference, 2008, P. 66-70. doi: 10.1109/mepcon.2008.4562315.

17. Gouda O. E., El Dein A. Z. Prediction of Aged Transformer Oil and Paper Insulation. *Electric Power Components and Systems*, 2019. Vol. 47, 4-5, P. 406-419. doi: 10.1080/15325008.2019.1604848.
18. Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnostics of Transformer Oils Using the Multiple Linear Regression Model. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), 2020, P. 1-6. doi: 10.1109/паер49887.2020.9240875.
19. Senoussaoui M. E. A., Brahami M., Fofana I. Transformer Oil Quality Assessment Using Random Forest with Feature Engineering. *Energies*, 2021. Vol. 14, 7, P. 1809. doi: 10.3390/en14071809.
20. Bhatia N. K., El-Hag A. H., Shaban K. B. Machine Learning-based Regression and Classification Models for Oil Assessment of Power Transformers. 2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIOT), 2020, P. 400-403. doi: 10.1109/iciot48696.2020.9089647.
21. Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnosing the Condition of Transformer Oils Using the Trajectory Method. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021, P. 1-6. doi: 10.1109/mees52427.2021.9598490.
22. Dessouky S. S. et al. Further Contribution For Evaluating The Aging of Transformer Oil of Power Transformer. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 2015. Vol. 43, 2, P. 211-226. doi: 10.21608/jesaun.2015.115168.
23. Karthik M., Sharma S., Visalakshi M. Characteristics of Dielectric Fluids in Power Transformer Applications A Review. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*, 2017. Vol. 3, 2, P. 239-245. doi: 10.23883/ijrter.2017.3032.ihoat.
24. Kassi K. S., Fofana I., Volat C., Farinas M. I. Impact of oils degradation on the cooling capacity of power Transformers. The 19th International Symposium on High Voltage Engineering. Pilsen, Czech Republic. 2015.
25. Meshkatodd M. R. Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2008. Vol. 1, 4, P. 384-388. doi: 10.3844/ajeassp.2008.384.388.
26. Abdi S. et al. Influence of Artificial Thermal Aging on Transformer Oil Properties. *Electric Power Components and Systems*, 2011. Vol. 39, 15, P. 1701-1711. doi: 10.1080/15325008.2011.608772.
27. Ouyang X. D. et al. Research on Aging Characteristics and Chemical Composition of Hydrogenated Transformer Oil. *Advanced Materials Research*, 2012. Vol. 614-615, P. 1131-1137. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.614-615.1131.
28. Belmecheri H. et al. Insulating and Thermal Aging Dielectric Properties Dependency of Transformer Oil Using Spectroscopy Techniques. *Instrumentation Measure Métrologie*, 2019. Vol. 18, 4, P. 337-342. doi: 10.18280/i2m.180402.
29. Shutenko O., Ponomarenko S. Reliability Assessment of the Results of Periodic Monitoring of the Transformer Oils Condition. 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2020, P. 77-82. doi: 10.1109/ieps51250.2020.9263141.
30. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. Ucheb. posobie dlya vuzov.* Moskva. Vyssh. shk., 1977. 479 s.
31. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of distribution laws of transformer oil indicators in 110-330 kV transformers. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021. 5, P. 46-56. doi: 10.20998/2074-272x.2021.5.07.
32. Shutenko O. V. Osobennosti dreyfa pokazateley kachestva transformatornogo masla v techenii dlitel'noy ekspluatatsii. *Integrated technologies and energy saving*, 2007, no. 4, P. 26-30.
33. Shutenko O. V. Formirovanie odnorodnykh massivov pokazateley kachestva transformatornogo masla v usloviyakh apriornoy neopredelennosti rezul'tatov ispytaniy. *Integrated technologies and energy saving*. 2006, no. 4, P. 42-50.
34. Pollard J. H. *A handbook of numerical and statistical techniques.* Cambridge University Press, 1976. 344 p.
35. Johnson N. L. *Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences.* New York. Wiley, 1977.
36. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of the Impact of Power Transformer Loading on the Transformer Oil Aging Intensity. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020, P. 76-81. doi: 10.1109/khpiweek51551.2020.9250159.
37. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika.* Moskva. Mashinostroenie, 1978. 240 s.
38. Verzakov G. F., Kinsht N. V. *i dr. Vvedenie v tekhnicheskuyu diagnostiku.* Moskva. Energiya, 1968. 224 s.

Надійшла до редакції 20.10.2021