

УДК 621.315.615.2

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРУ ЗМІНИ ПОКАЗНИКІВ МАСЕЛ В ПРОЦЕСІ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ**Шутенко О.В., Пономаренко С.Г., Холодний О.Г.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Україна, м. Харків*

При оцінці стану ізоляції високовольтного маслонаповненого обладнання принципово важливо, враховувати особливості фізичних процесів, які розвиваються протягом тривалої експлуатації. Одним з можливих способів дослідження таких процесів, є аналіз результатів періодичних випробувань стану ізоляції високовольтного обладнання. Однак, такий аналіз вимагає попередньої статистичної обробки результатів випробувань. У даній роботі наводиться процедури статистичної обробки результатів періодичних випробувань стану трансформаторних масел. Як приклад розглянемо такий показник як колір трансформаторних масел. В якості вихідних даних були використані результати періодичних випробувань по 121 трансформатору напругою 110 кВ. обсяг аналізованої вибірки склав 2108 значень. Результати випробувань були представлені у вигляді двовимірного масиву значення кольору масла на тривалість експлуатації. На першому етапі досліджень з вихідного масиву даних були видалені стаціонарні за математичним очікуванням, часові ряди, тобто ті ряди, для яких зростанням тривалості експлуатації значення кольору не змінювалося. Для цих цілей був використаний алгоритм тестової фільтрації, розроблений в [1]. На другому етапі досліджень були сформовані масиви з близькою швидкістю старіння масла, тобто з близькими значеннями кольору трансформаторного масла в один і той же момент часу. Для цих цілей був використаний критерій максимуму кореляційного відношення (характеризує наявність нелінійного зв'язку між двома випадковими величинами), запропонований в [2]. В результаті були сформовані 6 масивів показників з близькою швидкістю старіння масел. У табл. 1 наведені значення коефіцієнта парної кореляції і кореляційного відношення між кольором масла і тривалістю експлуатації для масивів даних на різній стадії обробки. Масив M_a являє собою масив вихідних даних, масив M_f це масив даних після тестової фільтрації, а масиви M-1...M-6 масиви з близьким значенням дрейфу кольору масел, отримані за критерієм максимуму кореляційного відношення. Як видно з табл. 1 на кожному етапі статистичної обробки спостерігається збільшення значень як коефіцієнта парної кореляції, так і прямого і зворотного кореляційних відносин. Дана обставина свідчить про високу ефективність запропонованої процедури статистичного аналізу. Отримані масиви з близькою швидкістю дрейфу кольору трансформаторних масел були перевірені на відхилення від лінійності. Для цього за аналогією з [3] була використана модель дисперсійного аналізу на відхилення від лінійності. Математичне очікування показника трансформаторного масла Y_t при заданому значенні тривалості експлуатації X_t можна представити у вигляді:

$$E(Y_t/x_t) = \alpha + \beta \cdot X_t + \delta_t, \quad (1)$$

де: δ_t – відхилення від лінійності

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта парної кореляції і кореляційного відношення між показниками якості масла і часом експлуатації для масивів даних на різній стадії обробки

Масив	n	N	Коефіцієнт парної кореляції ρ_{y-t}	Кореляційне відношення	
				$\eta_{t/y}$	$\eta_{y/t}$
М _a	121	2108	0,346	0,441	0,410
М _r	76	1558	0,546	0,608	0,616
М1	23	452	0,911	0,930	0,913
М2	11	166	0,942	0,953	0,944
М3	11	294	0,825	0,906	0,825
М4	18	350	0,902	0,911	0,911
М5	2	30	0,900	0,938	0,943
М6	9	250	0,847	0,936	0,875

Повну суму квадратів $Q_{\text{пов.}}$ можна розбити на суму квадратів між групами Q_1 і суму квадратів всередині груп $Q_{\text{зал.}}$:

$$Q_{\text{пов.}} = Q_1 + Q_{\text{зал.}}$$

або

$$\sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y})^2 = \sum_{t=1}^k n_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2 + \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y}_t)^2. \quad (2)$$

У свою чергу суму квадратів між групами можна розбити на дві: суму квадратів для лінійної регресії і суму квадратів для середніх даного плану щодо регресії:

$$\sum_{t=1}^k n_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2 = B^2 \sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2 + \sum_{t=1}^k n_t [\bar{Y}_t - \bar{Y} - B(x_t - \bar{x})]^2, \quad (3)$$

де

$$B = \frac{\sum_{t=1}^k n_t x_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2}; \quad \bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^k n_t x_t}{\sum_{t=1}^k n_t}.$$

Лінійність регресії перевірялася шляхом порівняння відношення: $F = (\text{Середній квадрат відхилення від лінійності}) / (\text{залишковий середній квадрат})$ з F -розподілом з $k-2$, $\sum_{t=1}^k n_t - k$ – ступінь свободи.

Результати дисперсійного розкладання наведені в таблиці 2. Як видно з табл. 2 для всіх 6 масивів кольору трансформаторного масла, відхилення від лінійності визнаються значущими, тобто гіпотеза про прийнятність лінійної регресії відкидається., що наочно ілюструють залежності на рис. 1. Як видно з рисунка на наведених залежностях можна виділити два характерних ділянки: ділянка індукційного

періоду (дивись горизонтальні ділянки залежностей на рис. 1) у цей період відбувається утворення і накопичення первинних продуктів окислення, і період самоускорення який супроводжується зростанням значення показника (дивись зростаючі ділянки залежностей на рис. 1), який обумовлений утворенням і зростанням концентрації продуктів більш глибокого окислення, в першу чергу смол. Тривалість індукційного періоду в різних підмножинах і інтенсивність зростання колірному числа масел відрізняються, що свідчить про різні умови експлуатації масла [4].

Таблиця 2 – Результати перевірки залежностей кольору трансформаторних масел від тривалості експлуатації на відхилення від лінійності

Масив даних	k	N	Суми дисперсійного розкладання				Число ступенів свободи		F - критерій	
			$Q_{пов.}$	$Q_{лін. рег}$	$Q_{відх.}$	$Q_{зал.}$	$V_{відх.}$	$V_{зал.}$	$F_{роз.}$	$F_{крит.}$
М-1	13	452	547.387	446.128	10.823	90.436	11	439	4.775	1.81
М-2	7	166	421.483	356.616	17.066	47.801	5	159	11.352	2.27
М-3	12	294	63.432	41.71	7.553	14.169	10	282	15.032	1.86
М-4	10	350	241.174	190.364	4.803	46.007	8	340	4.437	1.97
М-5	3	30	78.0416	50.1937	6.1089	21.739	1	27	7.586	4.21
М-6	12	250	381.089	270.949	48.62	61.52	10	238	18.809	1.87

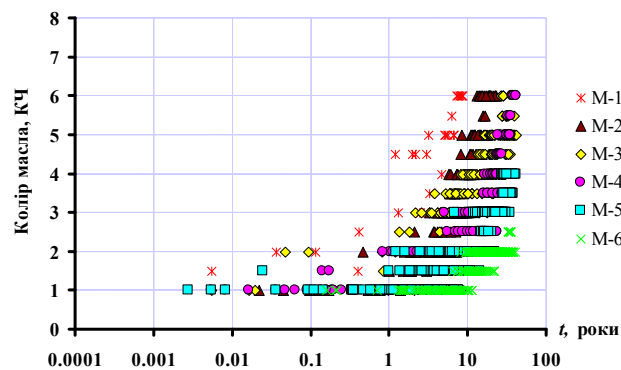


Рисунок 1 – Залежності кольору трансформаторного масла від тривалості експлуатації

Список використаних джерел:

1. 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). – IEEE, 2020. – P. 77–82. DOI: 10.1109/IEPS51250.2020.9263141.
2. Шутенко О.В. Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний / О.В. Шутенко // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 4. – С. 42–50.
3. Шутенко О.В. Особенности дрейфа показателей качества трансформаторного масла в течении длительной эксплуатации / О.В. Шутенко // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 4. – С. 26–30.
4. 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). – IEEE, 2020. – С. 76–81. DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250159.