

УДК 621.315.615.2

ДІАГНОСТИКА СТАНУ ТРАНСФОРМАТОРНИХ МАСЕЛ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАРІАТИВНИХ ГРАНИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПОКАЗНИКІВ

Пономаренко С.Г.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Україна, м. Харків*

Використання граничних значень показників масел для оцінки його стану при проведенні експлуатаційних випробувань дозволяє відповісти на головне питання чи придатне масло до подальшої експлуатації чи ні. У той же час для масла придатного до подальшої експлуатації, коли значення показників знаходяться в області допустимих значень, використання граничних значень не дозволяє відповісти на інше не менш важливе питання, а саме чи є інтенсивність старіння масел природньою для конкретних умов експлуатації або ж старіння масла є прискореним. Остання обставина не дозволяє ранжувати трансформатори за станом масел і як наслідок здійснити перехід на технічне обслуговування трансформаторів за їх реальним станом, а не за календарним планом.

Найбільш природним шляхом усунення даного недоліку є використання варіативних граничних значень показників, які є функцією тривалості експлуатації, а також режимів роботи і особливостей конструктивного виконання трансформаторів (Системи охолодження, тип захисту масла) і сорти трансформаторних масел. Ситуація ускладнюється наявністю нелінійності а для деяких показників і не монотонності в залежностях показників від тривалості експлуатації, а також істотними відмінностями в інтенсивності старіння трансформаторних масел в різних трансформаторах [1]. Для максимального врахування даних особливостей, для визначення варіативних граничних значень показників, були використані результати періодичних випробувань стану трансформаторних масел для 231 трансформатора напругою 110 кВ та 49 автотрансформаторів напругою 330 кВ. Вихідні дані були піддані попередній статистичній обробці [2-3], що дозволило сформувати масиви з близькими значеннями інтенсивності дрейфу показників масел у часі. Як приклад таких масивів на рис. 1 наведені залежності вмісту в маслі органічних кислот від тривалості експлуатації для трансформаторів 110 кВ і автотрансформаторів 330 кВ. як видно з рисунка, швидкість зміни вмісту в маслі органічних кислот не є постійною на різних стадіях експлуатації, тобто залежності відмінні від лінійних.

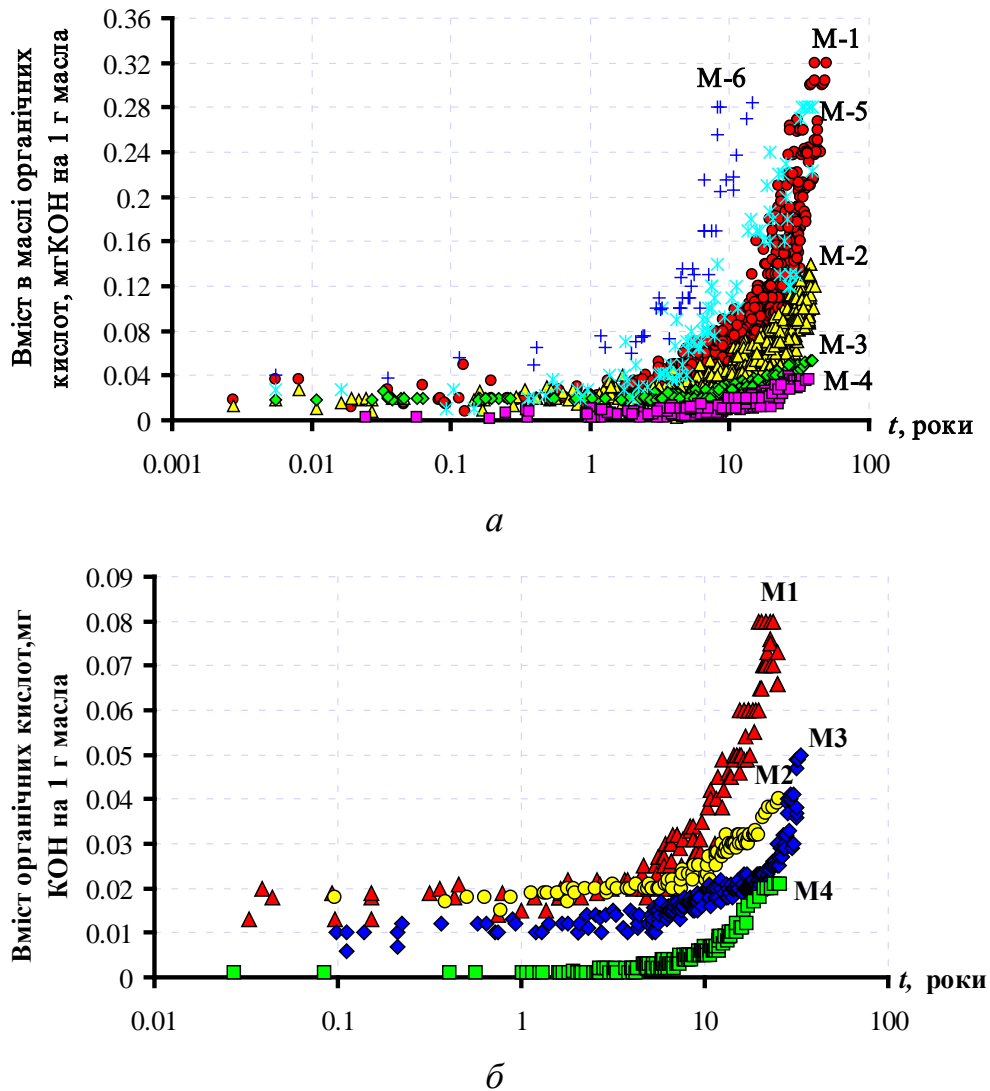


Рисунок 1 – Залежності вмісту в маслі органічних кислот від тривалості експлуатації для однорідних масивів даних для трансформаторів напругою 110 кВ (а) і автотрансформаторів 330 кВ (б)

Отримані масиви з близькими значеннями інтенсивності дрейфу показників масел в часі були використані для отримання варіативних меж показників масел. При практичній реалізації було використано два підходи.

Перший підхід заснований на використанні еталонних траєкторій для кожного з показників масла [2, 4]. Суть методу полягає в тому, що рішення про стан трансформаторного масла приймається на підставі аналізу приналежності часової залежності показника, до тієї чи іншої еталонної траєкторії. Під еталонною траєкторією слід розуміти залежності діагностичних ознак від тривалості експлуатації, отримані для безлічі однотипних технічних об'єктів, які експлуатуються в схожих умовах. Для оцінки ступеня належності показника що діагностується, до тієї або іншої еталонної траєкторії в [2, 4] запропоновано використовувати величину діагностичної відстані, яка розраховується в евклідовому

просторі. Рішення щодо стану трансформаторних масел приймається в наступній послідовності:

Залежність показника від тривалості експлуатації, що діагностується перевіряється на приналежність одночасно трьом еталонним траєкторіям. При цьому перша еталонна траєкторія побудована для даного показника в однотипних трансформаторах, які мають умови експлуатації схожі з умовами експлуатації для трансформатору що діагностується. Друга еталонна траєкторія побудована для даного показника в однотипних трансформаторах, які мають більш «важкі» умови експлуатації в порівнянні з умовами експлуатації для трансформатору що діагностується. Третя еталонна траєкторія побудована для даного показника в однотипних трансформаторах, які мають більш «легкі» умови експлуатації в порівнянні з умовами експлуатації трансформатору що діагностується. Якщо залежності всіх діагностичних ознак для даного об'єкта належать до еталонної траєкторії побудованої для даного показника в однотипних трансформаторах, які мають умови експлуатації схожі з умовами експлуатації для трансформатору що діагностується, то стан масла вважається нормальним, процеси старіння не є прискореними. Якщо залежність хоча б одного показника ознаки для даного трансформатору належить еталонної траєкторії, побудованої для даного показника в однотипних трансформаторах, які мають більш «важкі» умови експлуатації в порівнянні з умовами експлуатації для трансформатору що діагностується, то старіння вважається прискореним. В цьому випадку рекомендується застосувати заходи щодо його інгібування незалежно від того чи знаходяться значення даного показника в області допустимих значень чи ні. Якщо залежність хоча б одного показника для даного трансформатору належить еталонної траєкторії, побудованої для даного показника в однотипних трансформаторах, які мають більш «легкі» умови експлуатації в порівнянні з умовами експлуатації для трансформатору що діагностується, то з'ясовуються причини, за якими відбулося зниження інтенсивності старіння. У цьому випадку важливо встановити, чи є зниження швидкості дрейфу показника наслідком порушень, похибок і помилок при проведенні випробувань або ж дане зниження обумовлено об'єктивними причинами (зміна режиму експлуатації трансформатору, оперативне втручання персоналу і т.д.).

Другий підхід заснований на використанні моделей множинної регресії [3, 5] виду:

$$\hat{t} = b_0 + \sum_{i=1}^p b_{1i} x_i + \sum_{i=1}^p b_{2i} x_i^2 + \dots + \sum_{i=1}^p b_{mi} x_i^m, \quad (1)$$

де: \hat{t} – прогнозована тривалість експлуатації трансформаторних масел по регресійної моделі (1), яка є функцією значень показників; p – кількість показників якості масел (регресорів); x_i – i - тий регресор (показник), i – номер показника; b_0, b_1, \dots, b_{1m} – коефіцієнти регресійної моделі.

Оцінка ступеня старіння масла проводиться шляхом порівняння дійсного терміну експлуатації масел t_i з розрахованим за регресійною моделлю (1) \hat{t}_i . Тобто працює аналогія з віком людини, коли є «паспортний вік» (кількість прожитих років) і «біологічний вік» (ступінь зношеності організму, яка визначається набором медичних і фізіологічних ознак). Рішення про ступінь старіння масел приймається згідно з одним з наступних правил:

Якщо $t_i > \hat{t}_i + 3 \cdot \sigma_{\text{прог}}$, то старіння масла визнається прискореним-необхідне втручання персоналу;

Якщо $\hat{t}_i - 3 \cdot \sigma_{\text{прог}} < t_i < \hat{t}_i + 3 \cdot \sigma_{\text{прог}}$, то визнається, що старіння масла відбувається з нормальною швидкістю;

Якщо $\hat{t}_i - 3 \cdot \sigma_{\text{прог}} > t_i$, то визнається, що старіння уповільнено – необхідно з'ясувати можливі причини.

З огляду на відмінності в інтенсивності старіння масла для трансформаторів, які експлуатуються з різним навантаженням і залиті різним сортом масла, регресійні моделі повинні використовуватися виключно для трансформаторів зі схожими значеннями навантаження і сортом залитого масла, за якими ці регресійні моделі навчалися.

Приклади практичного використання еталонних траєкторій і моделей множинної регресії, наведені в [2-5] показали їх високу ефективність в порівнянні з традиційним підходом.

Список використаної літератури:

1. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of ageing characteristics of transformer oils under long-term operation conditions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. 2022. Vol. 46, no. 2. P. 481–501. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40998-022-00492-7>.
2. 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.
3. Shutenko O., Ponomarenko S. Development of a multiple regression model for early diagnosis of transformer oil condition. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. Vol. 47, no. 11. P. 14119–14132. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06418-5>.
4. Бондаренко В.О., Шутенко О.В. Усовершенствование процедуры принятия решений при оценке степени старения трансформаторных масел. *Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2009. № 1. С. 17–21.
5. Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnostics of transformer oils using the multiple linear regression model. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 21–25 September 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240875>