

Шутенко О.В.

**ОСОБЕННОСТИ ДРЕЙФА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА  
ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА  
В ТЕЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Эффективность алгоритмов распознавания не в последнюю очередь будет определяться тем, насколько адекватна принятая модель классификации физической модели функционирования объекта. Особенно остро это проявляется при решении задач, связанных с оценкой степени старения и прогнозирования остаточного ресурса трансформаторного масла на длительных интервалах эксплуатации. Построение адекватных моделей старения жидкой изоляции трансформаторов невозможно без учета характерных особенностей зависимостей показателей от времени эксплуатации.

Данная статья посвящена описанию результатов исследований особенностей дрейфа показателей качества масла на длительных интервалах эксплуатации.

Механизмы старения трансформаторного масла достаточно подробно описаны в [1]. В то же время вопросы, связанные с исследованием зависимостей показателей качества трансформаторного масла от времени эксплуатации, не нашли широкого освещения в литературе. В работах [2, 3, 4] оценка степени старения масла осуществлялась с помощью модели множественной линейной регрессии, которая оказалась более эффективной, чем традиционная система контроля состояния масла. В то же время использование линейных моделей в [2, 3, 4], являлось в большей степени вынужденной мерой, поскольку ограниченный объем обучающих последовательностей не позволял выполнить адекватную оценку характера временных зависимостей показателей масла. На данном этапе исследований увеличение объема выборочных значений позволяет выполнить подобную оценку.

При исследовании процессов старения на длительных интервалах эксплуатации (40 лет и более) важно оценить, является ли скорость старения постоянной на всем исследуемом промежутке или же она изменяется. Выполнить подобного рода оценку возможно путем проверки общей линейной гипотезы [5]. Для проверки этой гипотезы записываем математическое ожидание случайной величины  $Y_t$  при заданном  $X_t$  в виде:

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

где  $\delta_t$  обозначает отклонение от линейности.

Если задано  $k$  различных значений  $X_t$ , то в данной модели имеется  $k+2$  параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , ...,  $\delta_k$ , и, следовательно, на эти параметры могут налагаться два линейных условия. Алгебраические выкладки упрощаются, если используются условия:

$$\sum \delta_t = 0 \text{ и } \sum \delta_t x_t = 0,$$

где  $\sum$  обозначает суммирование по всем наблюдениям.

Второе из этих условий иногда считается несколько необычным, так как из него следует, что значения  $\delta$  зависят только от  $x$ . Хотя это и верно, единственный эффект этих условий состоит в том, что  $Y = \alpha + \beta x$  является эмпирическим уравнением регрессии фактических значений математического ожидания случайной величины  $Y$  (при задан-

ном  $x$ ) на  $x$ , полученным методом наименьших квадратов. Иначе говоря, используются «наилучшие» значения  $\alpha$  и  $\beta$ . Модель имеет вид

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \delta_i + Z_i.$$

Поскольку  $\delta_i$  и  $Z_i$  имеют одинаковые индексы, оказывается невозможным получить остаточную сумму квадратов (математическое ожидание, пропорциональное  $\delta^2$ ), не зависящую от  $\delta_i$ . Однако, если хотя бы для некоторых  $x$  имеется более одного наблюдения  $Y$ , модель принимает вид [5]:

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \beta_t + Z_{it}. \quad (t=1, \dots, k; i=1, \dots, n_t). \quad (1)$$

Модель (1) аналогична модели для односторонней классификации. Полную сумму квадратов  $Q_{\text{пол}}$  можно разбить на сумму квадратов между группами  $Q_1$  и сумму квадратов внутри групп  $Q_{\text{ост}}$ :

$$Q_{\text{пол}} = Q_1 + Q_{\text{ост}} = \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{it} - \bar{Y})^2 = \sum_{t=1}^k n_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2 + \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{it} - \bar{Y}_t)^2. \quad (2)$$

В свою очередь, сумму квадратов между группами можно разбить на сумму квадратов для линейной регрессии и сумму квадратов для средних данного плана относительно регрессии в соответствии с формулой:

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

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

Результаты дисперсионного анализа для оценки отклонения от линейности [5] приведены в табл. 1. Линейность регрессии проверяется путем сравнения отношения:

$$F = \frac{\text{Средний квадрат отклонения от линейности}}{\text{Остаточный средний квадрат}} \quad (4)$$

с  $F$ -распределением с  $k-2$ ,  $\sum_{t=1}^k n_t - k$  степенями свободы.

Для анализа отклонений от линейности использовались результаты периодических испытаний трансформаторного масла по 249 трансформаторам, находящимся в эксплуатации в 6 областях Украины. Для повышения достоверности результатов испытаний была выполнена двухэтапная процедура тестовой фильтрации [3]. После чего на основании предложенного в [6] критерия максимума корреляционного отношения были

сформированы массивы однородных показателей качества, в которых изменение значений показателей происходило с одинаковой интенсивностью.

Таблица 1 – Результаты дисперсионного анализа для отклонения от линейности

| Источник изменчивости    | Число степеней свободы | Сумма квадратов   | Математическое ожидание среднего квадрата               |
|--------------------------|------------------------|---|---|
| Линейная регрессия       | 1                      | $B^2 \sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2$                      | $\alpha^2 + \beta^2 \sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2$ |
| Отклонение от линейности | $k-2$                  | $\sum_{t=1}^k n_t [\bar{Y}_t - \bar{Y} - B(x_t - \bar{x})]^2$ | $\sigma^2 + (k-2)^{-1} \sum_{t=1}^k n_t D_t^2$          |
| Остаток                  | $\sum_{t=1}^k n_t - k$ | $\sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y})^2$          | $\sigma^2$  |
| Сумма                    | $\sum_{t=1}^k n_t - 1$ | $\sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y}_{..})^2$     |   |

Процедуру проверки на отклонение от линейности проиллюстрируем на примере такого показателя масла, как содержание водорастворимых кислот. Данный показатель характеризует глубину термоокислительных процессов в трансформаторном масле. В ряде случаев отбраковка масла производится именно по этому показателю. Зависимости содержания водорастворимых кислот в масле от времени эксплуатации для 7-х массивов данных, квантованных с шагом 1 год приведены на рис. 1.

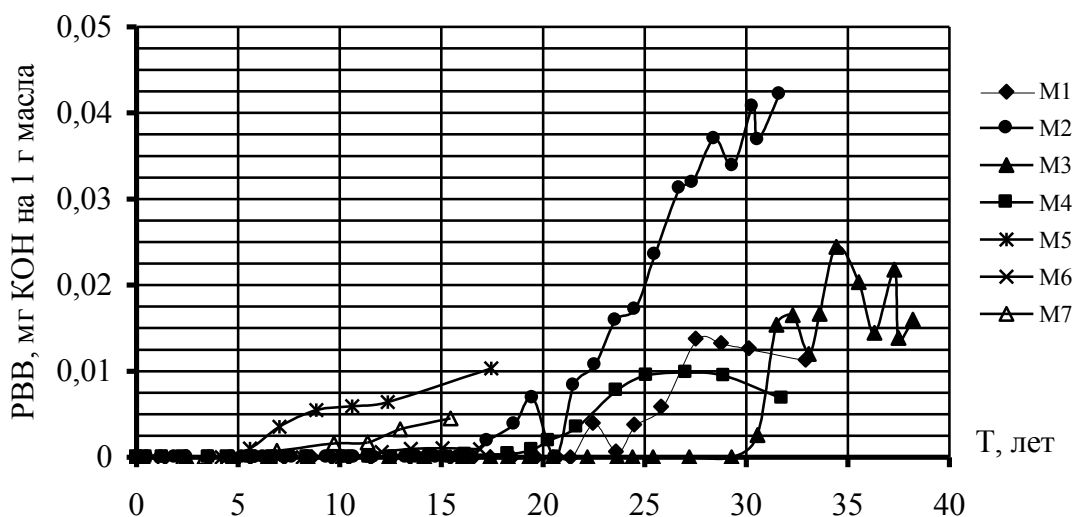


Рисунок 1 – Зависимость содержания водорастворимых кислот в трансформаторном масле от времени эксплуатации для массивов однородных данных, квантованных с шагом 1 год

В табл. 2 приведены результаты дисперсионного анализа для 7 массивов анализируемого показателя. Как видно из табл. 2, для всех массивов однородных данных гипотеза о линейности была отвергнута, поскольку расчетные значения  $F$  статистик значимо превышали критические при заданном уровне доверительной вероятности  $p = 0,95$  и соответствующих значениях числа степеней свободы.

Таблица 2 – Результаты оценки отклонения от линейности, временных рядов, показателей качества трансформаторного масла

| Показатель качества масла         | Массив данных | $k$ | $N$ | Суммы дисперсионного разложения |                        |                   |                  | Число степеней свободы |                  | $F$ статистика    |                    |
|-----------------------------------|---------------|-----|-----|---------------------------------|------------------------|-------------------|------------------|------------------------|------------------|-------------------|--------------------|
|                                   |               |     |     | $Q_{\text{пол}}$                | $Q_{\text{лин. регр}}$ | $Q_{\text{откл}}$ | $Q_{\text{ост}}$ | $V_{\text{откл}}$      | $V_{\text{ост}}$ | $F_{\text{рас.}}$ | $F_{\text{крит.}}$ |
| Содержание водорастворимых кислот | М-1           | 7   | 131 | 0,00311                         | 0,00117                | 0,000969          | 0,000971         | 5                      | 124              | 24,90             | 2,30               |
|                                   | М-2           | 13  | 368 | 0,09827                         | 0,05295                | 0,02045           | 0,02487          | 11                     | 355              | 26,53             | 1,82               |
|                                   | М-3           | 10  | 165 | 0,01351                         | 0,00673                | 0,004095          | 0,002685         | 8                      | 155              | 29,58             | 2,00               |
|                                   | М-4           | 8   | 139 | 0,001386                        | 0,0007724              | 0,00043           | 0,0001836        | 6                      | 131              | 51,20             | 2,005              |
|                                   | М-5           | 3   | 38  | 0,000433                        | 0,000275               | 0,0000605         | 0,0000975        | 1                      | 35               | 21,67             | 2,85               |
|                                   | М-6           | 4   | 28  | 0,0000066                       | 0,0000036              | 0,0000009         | 0,0000021        | 2                      | 24               | 5,401             | 3,40               |
|                                   | М-7           | 3   | 29  | 0,0000874                       | 0,000041               | 0,0000069         | 0,0000395        | 1                      | 26               | 4,517             | 4,22               |

Выполненная проверка отклонения от линейности как для физико-химических показателей масла (температура вспышки, кислотное число, пробивное напряжение, тангенс угла диэлектрических потерь при температурах 20, 70 и 90 °С, цвет, удельный вес и влагосодержание), так и для растворенных в масле газов (СО, СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub> и С<sub>Σ</sub>Н<sub>Σ</sub>) показала аналогичные результаты. При этом наибольшие отклонения от линейности были выявлены у растворенных в масле газов.

Полученные результаты позволяют сделать ряд важных выводов:

1. На наблюдаемых интервалах эксплуатации (а это более 40 лет) скорость дрейфа значений показателей меняется. При этом на зависимостях показателей от времени эксплуатации можно выделить характерные участки, соответствующие определенным стадиям процесса старения;
2. Для физико-химических показателей масла характерен период индукции – скрытого дрейфа, не обнаруживаемого с помощью традиционной системы контроля (например, горизонтальные участки кривых на рис. 1);
3. Продолжительность участков индукции значимо отличается даже для одного показателя качества и зависит от режимов работы трансформатора и условий эксплуатации (см. кривые М1–М7 рис.1);
4. Дрейф значений показателей качества масла начинается после завершения периода индукции и характеризуется высокой интенсивностью изменения значений показателей (период самоускорения). При этом скорость изменения значений показателей также зависит от условий эксплуатации.

В связи с этим, одной из важнейших задач следующего этапа исследований является количественная оценка влияния условий эксплуатации на скорость старения жидкой изоляции. При этом полученные результаты накладывают ряд существенных ограничений на выбор модели факторного анализа (из-за отклонения от линейности зависимостей показателей качества от времени эксплуатации использование регрессионного и ковариационного анализа является недопустимым). Выявленные отклонения от линейности значительно усложняют как модели для оценки степени старения масла, так и модели для прогноза остаточного ресурса. Поэтому еще одним направлением дальнейшей работы будет являться исследование возможностей линеаризации данных зависимостей.

### Литература

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло М., Энергоатомиздат 1983 г.– 296 с.
2. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного масла, для технического эксплуатационного контроля маслonaполненного энергетического оборудования // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, №2, Харьков., 2003., с. 46–50.
3. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Метод выделения оптимального числа наиболее информативных показателей качества при синтезе регрессионных моделей для оценки степени старения жидкой изоляции трансформаторов // Технічна електродинаміка, Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність», Частина 5, Київ., 2006., с. 88–93.
4. Бондаренко В.Е., Щапов П.Ф., Шутенко О.В. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. Монография. – Харьков.: НТУ «ХПИ», 2007. – 452 с.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. – М.: Мир, 1981. – 520 с.
6. Шутенко О.В. Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний // Інтегровані технології та енергозбереження – Харків: НТУ «ХПИ», 2006. – № 4. – С. 42–50.

УДК 621.314

Шутенко О.В.

### **ОСОБЛИВОСТІ ДРЕЙФУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ПРОТЯГОМ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Виконаний аналіз особливостей дрейфу показників якості трансформаторного масла на тривалих інтервалах експлуатації. Показано, що швидкість зміни значень показників якості змінюється на різних проміжках часу. Інтенсивність процесів старіння масла залежить від умов експлуатації трансформаторів.