

*А.А. ЗАГАЙНОВА* аспирант (НТУ «ХПИ», г. Харьков)

**ТЕСТИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
СТАРЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Наведено результати та методика прискорених випробувань трансформаторних масел. Зроблено тестування статистичних моделей старіння трансформаторних масел за результатами прискорених випробувань.

Results and procedure of the accelerated tests of transformer oils are given. Testing of statistical models of senescence of transformer oils is conducted on results speed-up tests.

**Постановка проблемы.** Профилактический контроль состояния электрической изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования производится в ходе длительной эксплуатации оборудования и не даёт возможности получать достоверные выводы о качестве изоляции на начальном этапе эксплуатации. Это связано с ограниченностью получаемой в ходе измерений информации, не позволяющей использовать для прогнозирования возможных параметрических изменений регрессионные модели старения изоляции. Более того, обнаруженные параметрические изменения состояния изоляции предполагают использование результатов двумерных наблюдений, например, в форме временных рядов, что может быть обеспечено измерениями на протяжении не менее трёх лет эксплуатации.

Проблема уменьшения времени наблюдения за свойствами изоляции - это проблема организации активного измерительного эксперимента, а также проблема выбора адекватной модели параметрических изменений свойств изоляции, позволяющей с максимальной достоверностью принять решение о соответствии качества изоляции нормативным требованиям на начальном этапе эксплуатации высоковольтного маслонаполненного энергетического оборудования.

**Анализ литературы.** Исследованию параметрических изменений свойств трансформаторного масла, как наиболее распространённого вида изоляции высоковольтного энергетического оборудования, посвящено достаточно много публикаций, из которых в первую очередь надо отметить монографию [1], в которой представлены результаты профилактических испытаний маслонаполненного оборудования по ряду областей Украины.

Расширенный анализ состояния эксплуатации и диагностики высоковольтного оборудования Российской Федерации хорошо отражено в публикациях [2,3]. Внедрение новых информационных технологий в систему мониторинга энергетического оборудования достаточно полно отражено в публика-

циях[4,5]. Однако, подавляющее большинство публикаций основано на результатах длительной подконтрольной эксплуатации энергетического оборудования. Задача выявления скрытых дефектов трансформаторных масел, влияющих на процессы их параметрического старения при ограничениях на время профилактических испытаний разработана недостаточно полно и требует для своего решения специальных методов планирования измерительного эксперимента, обеспечивающих минимизацию времени наблюдения.

**Цель статьи** заключается в обосновании выбора метода ускоренных испытаний образцов трансформаторных масел в условиях активного факторного эксперимента и описание методики дисперсионного анализа многомерных результатов испытаний электрических параметров с последующей дискриминацией тестовых статистик в рамках условной шкалы качественного состояния трансформаторного масла

**Описание методики ускоренных испытаний.** Ускоренные испытания проводились путем поступательного нагрева образцов масла в термощкафу, за время не превышающее шести часов. Образцы масла находились в испытательной ячейке, а измерения электрических параметров масла осуществлялись без изъятия ячейки из камеры нагрева. Нагрев производился ступенчато со стабилизацией температуры на каждой ступени и выдержке не менее 30 минут. Максимальная температура нагрева не превышала 90°C, а минимальная была не мене 20°C. Выборочные результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний чистого трансформаторного масла

Частота, кГц	Температура						
	Показатель	30	66	70	75	80	82
0,1	tg δ, %	0,85	1,11	1,13	1,25	1,46	1,51
	C, пФ	797,3	796,3	795,6	779,1	777,7	777,4
1	tg δ, %	0,84	0,76	0,77	0,86	0,88	0,89
	C, пФ	788,8	787,4	786,4	779,1	777,7	777,4
10	tg δ, %	1,05	0,84	0,84	0,85	0,82	0,82
	C, пФ	777,2	778	777,2	769,6	768,8	768,1

На основе имеющихся результатов ускоренных испытаний была разработана статистическая модель теплового старения. Достоверность модели и информативность каждого показателя, в первом приближении, были проверены с помощью дисперсионного анализа. Для проведения этого анализа была использована программа, написанная на языке *Turbo Pascal*. Была выдвинута гипотеза о линейности модели и составлена таблица дисперсионного анализа (табл. 2). В результате расчета были сделаны выводы, что выдвинутая гипотеза не отвергается и необходимо провести более точный анализ результатов, для этого был использован ковариационный анализ имеющейся моде-

ли, потому что при односторонней классификации измеряются две характеристики ( $x$  и  $y$ ) каждого объекта наблюдения и необходимо рассматривать их взаимосвязь, а также взаимную межгрупповую изменчивость.

Таблица 2 – Таблица дисперсионного анализа

Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат
Регрессия	$S_1 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{Y})^2$	$\nu_1 = 1$	$\bar{S}_1 = \frac{S_1}{\nu_1}$
Остаток $Z_i$	$S_e = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$\nu_e = N - 2$	$\bar{S}_e = \frac{S_e}{\nu_e}$
Общее	$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2$	$\nu = N - 1$	—

Общий объём выборки был разбит на  $K$  последовательных интервалов с  $n_j$  числом отсчетов ( $j = \overline{1, K}$ ) в каждом таком интервале. Была использована кусочно-линейная аппроксимация функции  $f(t_i)$ , сформированной на основе имеющейся модели, и представленная на  $K$  интервалах наблюдения линейными регрессиями:

$$E[y_j|x] = A_j + B_j x, \quad (1)$$

где  $A_j, B_j$  - оценки параметров  $\alpha_j, \beta_j$  модели наблюдения.

Рассмотрим основную линейную гипотезу порядка  $2(K-1)$ :

$$H_0: (\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k; \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k). \quad (2)$$

Согласно [6] ее можно разбить на три независимых части:

$$H_0^{(1)}: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k;$$

$$H_0^{(2)}: \text{групповые средние лежат на прямой};$$

$$H_0^{(3)}: \text{угловой коэффициент этой прямой равен } \beta_c, \text{ причем } \beta_1, \dots, \beta_k.$$

Для проверки выдвинутых гипотез используем разложение суммы  $S$  квадратов отклонений наблюдений от общего среднего  $\bar{Y}$  на пять слагаемых [6]:

$$S = S_0 + S_{WG} + S_G + S_W + S_R, \quad (3)$$

Результаты ковариационного анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты ковариационного анализа

Образы масел \ F статистики	$F_0$	$F_{wg}$	$F_{\square}$	$F_{0\Sigma}$
Чистое масло	8,81	210,79	131,9992	219,9986
Масло из автотрансформатора №2	277,39	112,93	78,53	125,65
Масло из автотрансформатора №3	191,77	35,28	23,36	38,93

**Практические результаты.** Из табл. 3 видно, что тестовые  $F$  статистики для нормального (чистое) и дефектных масел резко отличаются по среднему значению. Особенно наглядно это проявляется для статистики  $F_0$ . Использование для определения вида качественного состояния масла (норма – нарушение нормы) даже одной статистики  $F_0$  позволяет получить достоверность принятия решения не ниже значения  $P = 0,93$ . Добавление в процедуру параметрического тестирования дополнительных статистик  $F_{wg}$  и  $F_{\square}$  увеличит достоверность технической диагностики трансформаторных масел до значения  $P = 0,95$ .

**Выводы.** Показана статистическая обоснованность использования ускоренных испытаний трансформаторного масла, для выявления параметрических изменений контролируемых показателей и доказана эффективность параметрического тестирования результатов испытаний изоляции для выявления параметрических изменений изоляции.

**Список литературы:** 1. Бондаренко В.О., Шапов П.Ф., Шутенко О.В. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел: Монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007.-452с. 2. Чичинский М.И. Состояние эксплуатации и диагностики высоковольтного маслонаполненного оборудования в РАО «ЕЭС России» // Второй научно-технический семинар «Современные методы и средства оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации высоковольтного оборудования энергосистем» (19-23 ноября 2001 г., Москва): Материалы семинара. – М., 2001. 3. Чичинский М.И. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния // Энергетик, 2000, №11.- с. 29-31. 4. Воропай Н.И., Массель Л.В., Славин Г.Б. Организация системы мониторинга энергетического хозяйства России на базе новых информационных технологий // Электричество, 2002, №9.- с 2-8. 5. Дьяков А.Ф., Канцедалов В.Г., и др. Новые подходы к оценке ресурса стареющего энергооборудования электростанций и модульные принципы создания диагностической аппаратуры // Электрические станции, 2002, №4.- с. 67-78 6. Джонсон Н. Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. -М.:Мир, 1981.-520с.

*Поступила в редакцию 19.11.07*