

Выводы. 1. Разработана модель для исследования процессов в схеме повышающего ИП, включая САР для обеспечения заданных показателей регулирования.

2. Выявлено и обосновано ограничение мощности, которую может отдать ИП.

3. Предложена методика расчета, позволяющая осуществлять выбор параметров ИП исходя из: заданного значения амплитуды пульсаций выходного напряжения ИП и тока источника питания, максимальной частоты коммутации, мощности нагрузки, потерь напряжения, напряжения источника, номинального напряжения нагрузки.

1. *Справедливый В.И. Оптимальное управление солнечным асинхронным частотно-регулируемым электроприводом водяного насоса // Вестн. Нац. техн. ун-та "Харьковский политехнический институт": Сб. науч. тр. "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков, 2002. – № 12. – Т.2.*
2. Mohan N., Underland T.M., Robbins W.P. *Power electronics: converters, applications and design. – 2nd ed., USA., 1995.*
3. Бернштейн А.Я., Гусяцкий Ю.М. *Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе. – М., 1980. – 328 с.*

УДК 621.3.0025.519.233.4

О.В. Шутенко

Национальный технический университет "ХПИ",

КОВАРИАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СТАРЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

© Шутенко О.В., 2003

Запропоновано методику коваріаційного аналізу коефіцієнтів лінійної регресійної моделі старіння трансформаторного масла. Перевірено вплив деяких експлуатаційних чинників на старіння масла.

The technique of covariation analysis of factors linear regression of model aging transformer oil is offered. The influence of some operational factors on aging of oil is checked up.

Постановка проблемы. Одной из актуальнейших проблем электроэнергетической отрасли является общее "постарение" энергетического оборудования. По разным сведениям от 40 до 70 % мощных силовых трансформаторов отработали или приближаются к нормативному сроку службы 25 лет. Замена устаревшего оборудования, в силу экономических причин, производится крайне медленно и заметно отстает от темпов старения. Поэтому в ближайшие годы в эксплуатации будет находиться оборудование, отработавшее свой нормативный ресурс. Анализ технологических нарушений мощных трансформаторов [1], показал, что большинство нарушений (порядка 20 %) вызвано изменением свойств материалов в процессе эксплуатации (старением материалов). Причем значительная часть технологических нарушений обусловлена ухудшением свойств жидкой изоляции (трансформаторного масла). Подобная ситуация вынуждает большое внимание уделять вопросам диагностики и прогнозирования состояния трансформаторного масла. Контроль

состояния изоляции трансформаторного масла в процессе эксплуатации производится по комплексу показателей качества и нормативам регламентируемым [2]. Согласно [2] выход показателя качества трансформаторного масла за пределы своего граничного значения, является отказом и требует вывода трансформатора из эксплуатации. Для расчета остаточного ресурса, т.е. времени, через которое один из показателей качества достигнет своего граничного значения, необходимо знать вид функциональной зависимости математического ожидания данного признака от времени эксплуатации. При этом следует учесть, что прогноз возможен только для признаков имеющих монотонную зависимость от времени эксплуатации (в основном признаки, характеризующие процессы термоокислительного старения масла). Получение подобных зависимостей возможно путем статистической обработки результатов периодического контроля состояния трансформаторного масла в процессе эксплуатации. Использование априорной информации возможно лишь при учете тех эксплуатационных факторов, которые оказывают влияние на интенсивность старения изоляции. На рис. 1 приведено типичное распределение значений кислотного числа трансформаторного масла от срока эксплуатации для трансформаторов различной мощности, типа, года ввода в эксплуатацию и т. д. Как видно из рис.1 несмотря на то, что наблюдается заметная тенденция роста значения данного признака, со временем эксплуатации, подбор соответствующей функциональной зависимости вызывает определенные трудности, поскольку наблюдается достаточно широкий разброс эксплуатационных значений кислотного числа, для каждого значения времени эксплуатации. При этом из данной выборки, методом тестовой фильтрации были исключены временные ряды с искаженным знаком коэффициента парной корреляции и стационарные ряды. Такой разброс экспериментальных точек может быть обусловлен влиянием эксплуатационных факторов.

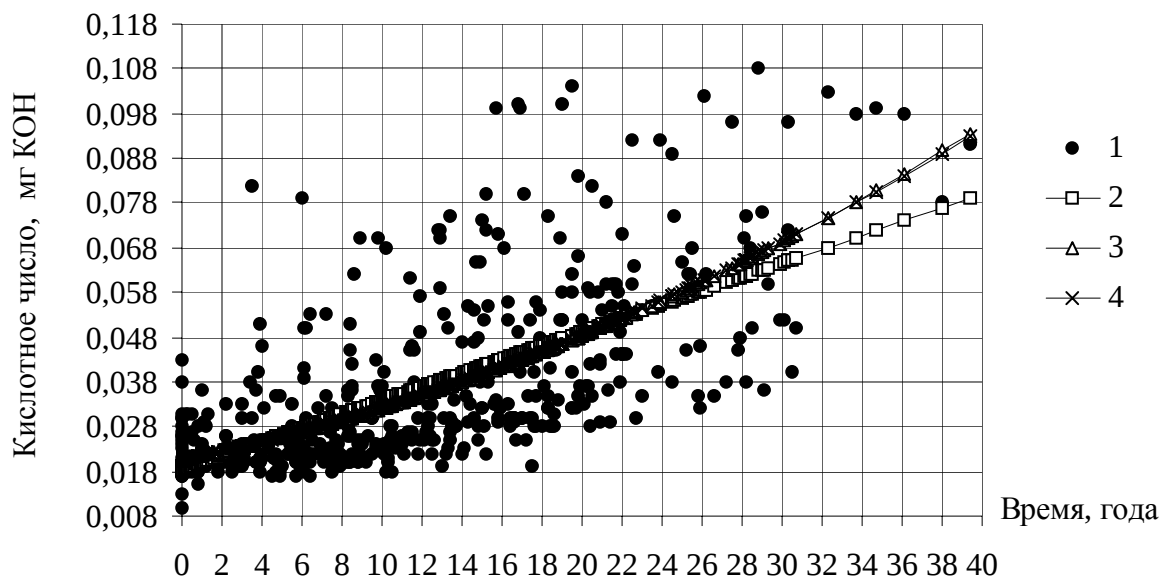


Рис. 1. Распределение значений кислотно-щелочного числа трансформаторного масла от срока эксплуатации.
1 – экспериментальные точки; 2 – линейный тренд;
3 – полином второй степени; 4 – полином третьей степени

Цель статьи. Данная статья посвящена разработке и экспериментальной проверке методики многофакторного, ковариационного анализа угловых коэффициентов линейных моделей параметрического старения трансформаторного масла. Для проверки значимости влияния эксплуатационных факторов, конструктивных особенностей высоковольтных маслонеполненных трансформаторов и качества трансформаторного масла на интенсивность термоокислительных процессов трансформаторного масла.

Метод решения. Одним из наиболее информативных показателем качества масла при контроле процессов теплового старения, является кислотное число. Поэтому проверку влияния эксплуатационных факторов лучше провести, анализируя временные ряды данного признака. В качестве исходных данных была проанализирована выборка результатов периодических испытаний 50 трансформаторов, Харьковоблэнерго, общим объемом 526 точек, для трансформаторов напряжением 110 кВ, номинальной мощностью 25, 32, 40 мВА, типов ТРДН, ТДТН, ТДНГ и ТДН, сроком ввода в эксплуатацию с 1962 по 1992 г, залитых маслом ТКп. Наиболее удобной моделью старения является среднееквадратичная регрессия показателей качества на время эксплуатации. Кроме того, данная модель не противоречит физике процесса. Так в работе [3] показано, что на основании большого числа опытов можно представить изменение кислотного числа и числа омыления трансформаторного масла простым уравнением:

$$y = a + b \cdot t, \quad (1)$$

где y – количественный показатель качества трансформаторного масла; t – время эксплуатации; a, b – частные коэффициенты регрессии;

Однако в [3] указано что уравнение (1) имеет узкую область применения, поскольку исходя из него при $t \rightarrow \infty$, значение показателя качества также будет бесконечно большим, что невозможно. Поэтому на первом этапе исследований, была проведена проверка гипотезы о влиянии срока эксплуатации на угловой коэффициент линейной регрессии. Далее была произведена проверка ряда статистических гипотез о влиянии дополнительных факторов, (кроме времени эксплуатации), на процессы старения масла. В качестве дополнительных факторов были выбраны:

- 1) год заливки масла в трансформатор;
- 2) степень очистки масла заливаемого в бак трансформатора;
- 3) номинальное напряжение на нижней обмотке двухобмоточных трансформаторов;
- 4) номинальное напряжение на нижней и средней обмотках трехобмоточных трансформаторов;
- 5) тип трансформаторов (два отдельных фактора: количество обмоток для трансформаторов типа ТРДН и ТДТН и влияние конструкции обмоток для трансформаторов типа ТРДН и ТДНГ);
- 6) номинальная мощность трансформаторов.

При проверке влияния каждого из факторов остальные факторы фиксировались на одном уровне.

Для оценки значимости исследуемых дополнительных факторов модель (1) была представлена в виде

$$y_{ji} = a_j + b_j \cdot t_{ji} + \varepsilon_{ji} \quad j = \overline{1, k}; \quad i = \overline{1, n}; \quad (2)$$

где k – количество уровней исследуемых факторов; n_j – объем выборки по j -му уровню; a_j, b_j – частные коэффициенты для j -го уровня фактора; ε_{ji} – случайный остаток.

Адекватность модели (2) была проверена на соответствие числовых характеристик остатков условиям:

$$E[\varepsilon_{ji}] = 0, \quad E[\varepsilon_{ji}^2] = \sigma^2, \quad \text{cov}(\varepsilon_{ji}, \varepsilon_{m\Gamma}) = 0, \quad j \neq m, i \neq \Gamma$$

где E – символ математического ожидания.

Основная гипотеза H_0 при проверке влияния выбранного дополнительного фактора может являться утверждением, что модель (1) представляет все k уравнений (2) т. е.

$$H_0: a_1 = a_2 = \dots = a_k, \quad b_1 = b_2 = \dots = b_k.$$

Однако, основную гипотезу удобно разбить на несколько независимых гипотез, каждую из которых можно проверить в отдельности:

$H_0^{(1)}: b_1 = b_2 = \dots = b_k \neq 0$ (дополнительный фактор не влияет на процессы старения);

$H_0^{(2)}: a_1 = a_2 = \dots = a_k$ (дополнительный фактор не влияет на начальные значения показателя качества Y , при $t = 0$);

$H_0^{(3)}: \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_k = 0$ (время эксплуатации не изменяет средних значений показателя качества, – старение отсутствует);

$H_0^{(4)}: \text{модели старения (2), } j = \overline{1 \dots k} \text{ тождественны друг другу (} a_1 = \dots = a_k; b_1 = \dots = b_k \neq 0 \text{), при условии значимости линейных регрессий.}$

В ходе исследований были сформированы девять групп трансформаторов по трём ($k = 3$) уровням дополнительного фактора и найдены оценки A_j, B_j частных коэффициентов a_j, b_j модели (2). Групповые регрессии по уровням фактора были представлены в виде:

$$\hat{Y}_{ji} = A_j + B_j \cdot t_{ji} \quad (3)$$

Используя дисперсионный анализ частных коэффициентов A_j, B_j модели (3) в рамках ковариационного анализа двумерных наблюдений [4], можно получить частное разложение суммы квадратов отклонений в виде уравнения

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \bar{Y})^2 = W_e B_c^2 + \sum_{j=1}^k n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2 + \sum_{j=1}^k w_j (B_j - B_c)^2 + S \quad (4)$$

где $S = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \hat{Y}_j)^2$ – остаточная сумма квадратов; $W_j = \sum_{i=1}^{n_j} (t_{ji} - \bar{t}_j)^2$ – вес коэффициента B_j ;

$W_c = \sum_{j=1}^k w_j$ – общий вес всех угловых коэффициентов $B_j, j = \overline{1 \dots k}$

$B_c = W_c^{-1} \cdot \sum_{j=1}^k W_j B_j$ – среднее по всем группам; $\bar{Y}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n_j} Y_{ji}$ – среднее внутри группы;

$N = \sum_{j=1}^k n_j$ – общий объем выборочных значений.

Обозначая общую сумму квадратов отклонений через Q , а первые три слагаемых (4) через Q_1, Q_2 и Q_3 , соответственно, получим общую модель разложения (4):

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + S. \quad (5)$$

Результаты ковариационного анализа модели (3) представлены в табл. 1. В табл. 2 представлены критериальные статистики для проверки гипотез $H_0^{(1)}, H_0^{(2)}, H_0^{(3)}, H_0^{(4)}$. Основная

гипотеза считается значимой, если критериальная статистика не превышает значение процентной точки для соответствующего F распределения при заданном уровне значимости.

Таблица 1

Результаты ковариационного анализа моделей старения

Обозначение	Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат
Q_1	Средневзвешенная линейная регрессия	1	$W_c B_c^2$	$\sigma^2 + W_c B_c^2$
Q_2	Аддитивное смещение групповых регрессий	$K-1$	$\sum_{j=1}^K n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2$	$\sigma^2 + \frac{\sum_{j=1}^K n_j (\alpha_j - \bar{\alpha})^2}{K-1}$
Q_3	Мультипликативное смещение групповых регрессий	$K-1$	$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} w_j (B_j - B_c)^2$	$\sigma^2 + \frac{\sum_{j=1}^K w_j (B_j - B_c)^2}{K-1}$
S	Остаток	$N-2K$	$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \hat{Y}_j)^2$	σ^2
Q	Общий	$N-1$	$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \bar{Y}_j)^2$	

где $\bar{\alpha} = K^{-1} \sum_{j=1}^K \alpha_j$, $N = \sum_{j=1}^K n_j$

Таблица 2

Критериальные статистики для проверяемых гипотез

Гипотеза	Используемая сумма квадратов	Число степеней свободы	Критериальная статистика
$H_0^{(1)}$	Q_3	$V_1 = K-1$	$F_{V_1, V} = \frac{Q_3}{S} \frac{V}{V_1}$
$H_0^{(2)}$	Q_2	$V_2 = K-1$	$F_{V_2, V} = \frac{Q_2}{S} \frac{V}{V_2}$
$H_0^{(3)}$	Q_1	$V_3 = 1$	$F_{V_3, V} = \frac{Q_1}{S} V$
$H_0^{(4)}$	$Q_2 + Q_3$	$V_1 + V_2 = 2(K-1)$	$F_{(V_1+V_2), V} = \frac{(Q_2 + Q_3)}{S} \frac{V}{(V_1 + V_2)}$

где $V = N - 2K$ – число степеней свободы остаточной суммы S .

Наглядно механизм ковариационного анализа иллюстрируют рис. 2 и 3. Рис. 2 отображает распределение экспериментальных точек и линейных трендов для влияющего фактора (номинальная мощность трансформаторов), а рис. 3 для фактора, влияние которого отсутствует (степень очистки трансформаторного масла)

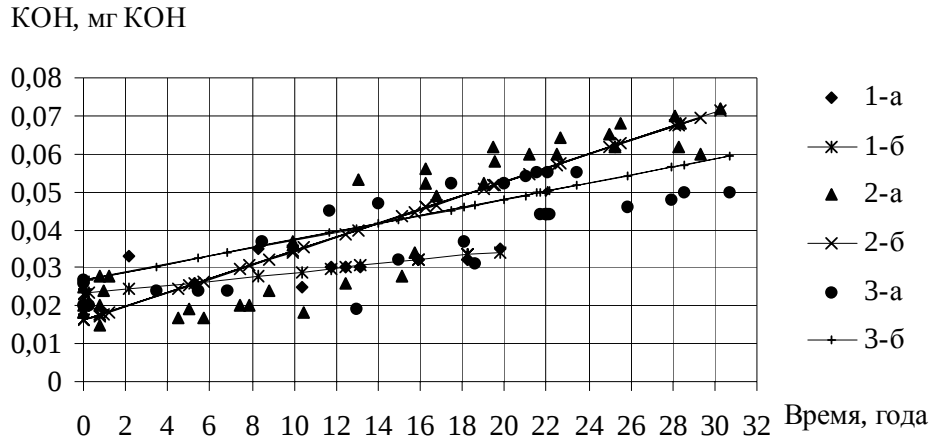


Рис. 2. Влияние номинальной мощности трансформаторов, на скорость старения трансформаторного масла.

1 – трансформаторы мощностью 25 мВА; 2 – трансформаторы мощностью 32 мВА; 3 – трансформаторы мощностью 40 мВА; а – экспериментальные точки; б – линейный тренд. (Сравнивались двухобмоточные трансформаторы типа ТРДН, 110/6 кВ, сроком эксплуатации 20–30 лет, объем выборки 83 точки, $F_{p\ 2,77} = 14,193$, $F_{кр\ 2,77} \approx 3,2$, гипотеза о влиянии данного фактора не отвергается)

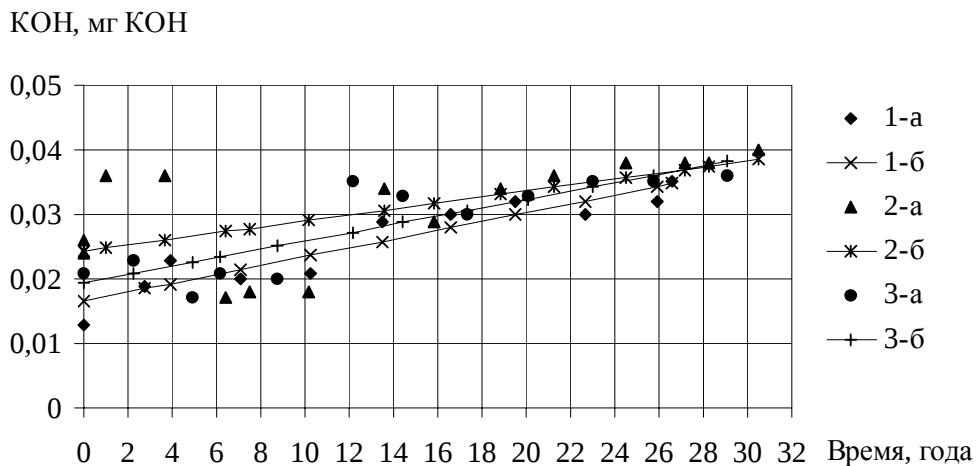


Рис. 3. Влияние степени очистки, на скорость старения трансформаторного масла: 1 – значение признака при заливке=0,013; 2 – 0,024; 3 – 0,021; а – экспериментальные точки; б – линейный тренд. (Сравнивались трехобмоточные трансформаторы типа ТДТН, мощностью 25 мВА, 110/35/6 кВ, сроком эксплуатации 30 лет, объем выборки 39 точек, $F_{p\ 2,77} = 0,699$, $F_{кр\ 2,77} \approx 3,3$, гипотеза о влиянии данного фактора отвергается)

Практические результаты. Результаты проверки влияния некоторых эксплуатационных факторов на старение масла, приведены в табл. 3

Таблица 3

Результаты ковариационного анализа

Проверяемый фактор	Выводы
Срок эксплуатации	Гипотеза о влиянии данного фактора не отвергается
Год заливки масла*	Гипотеза о влиянии данного фактора не отвергается
Степень очистки масла	Гипотеза о влиянии данного фактора отвергается
Номинальное напряжение на низкой стороне двухобмоточных трансформаторов	Для трансформаторов мощностью 25 мВА – гипотеза отвергается, для трансформаторов мощностью 32 и 40 мВА – гипотеза не отвергается.
Номинальное напряжение на средней и низкой сторонах трехобмоточных трансформаторов	Гипотеза о влиянии данного фактора не отвергается
Тип трансформаторов	Для трансформаторов типа ТРДН и ТДНГ гипотеза о влиянии данного фактора отвергается, а вот для трансформаторов типа ТРДН и ТДН гипотеза не отвергается (ТДН устаревшая модель трансформатора)
Номинальная мощность трансформаторов	Гипотеза о влиянии данного фактора не отвергается

* Из-за отсутствия данных по коэффициентам загрузки трансформаторов гипотезу о влиянии загрузки проверяли исходя из следующих допущений: поскольку общее потребление электроэнергии имеет непосредственную связь с темпами роста экономики, а в течении срока эксплуатации данных трансформаторов темпы роста, заметно менялись, то логично предположить, что влияние коэффициента загрузки можно выявить анализируя такой фактор как год ввода в эксплуатацию (год заливки масла).

Выводы. Выполненный ковариационный анализ регрессионных моделей старения трансформаторного масла показал, что наиболее значимыми эксплуатационными факторами являются: номинальная мощность трансформаторов, коэффициенты загрузки трансформаторов, время эксплуатации, тип трансформаторов (количество обмоток), и величина напряжения на низкой (или средней и низкой) обмотках трансформатора.

Направление дальнейших исследований. Наиболее важным этапом дальнейших исследований является более точная оценка влияния коэффициентов загрузки трансформаторов и последующий синтез модели старения с учетом всех влияющих факторов.

1. Чичинский М.И. "Состояние эксплуатации и диагностики высоковольтного маслонаполненного оборудования в РАО «ЕЭС России»" // Материалы Второго научно-технического семинара "Современные методы и средства оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации высоковольтного оборудования энергосистем". С. 1–10. 2. Норми випробування електрообладнання. ГКД 34.20.302-2002. – К., 2002. ОЕП ГРІФРЕ; 3. Штегер Г. Электроизоляционные материалы: Пер. с нем. – М., 1961. – С. 264. 4. Джонсон Н., Лион Ф., Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / Пер. с англ. – М., 1981. – С. 520.