

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, старш. преподаватель, НТУ «ХПИ»

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СТАРЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

У статті виконано аналіз впливу експлуатаційних чинників на інтенсивність старіння трансформаторних масел в баках силових високовольтних трансформаторів. Встановлено, що основними чинниками, які обумовлюють швидкість старіння масел є завантаження трансформаторів, тривалість експлуатації та якість трансформаторних масел.

In article the analysis of operational factors on intensity of ageing of transformer oils in tanks of high-voltage power transformers is executed. It is established, that by the major factors influencing for speed of ageing of oils, loading of transformers, duration of operation and quality of transformer oils are.

Постановка задачи. Трансформаторные масла являются одним из важнейших элементов изоляции силовых высоковольтных трансформаторов. Надежность трансформаторов во многом зависит от состояния масел. В процессе длительной эксплуатации под воздействием сильных электрических полей, рабочей температуры, химически агрессивных сред и других факторов происходит изменение химической структуры масел и ухудшение их изоляционных свойств. Усовершенствование методов диагностики состояния трансформаторных масел принципиально не возможно без учета закономерностей старения трансформаторных масел в условиях длительной эксплуатации и анализа влияния эксплуатационных факторов на скорость старения масел. В связи с этим исследование процессов старения трансформаторных масел в условиях реальных эксплуатационных воздействий в течение длительной эксплуатации является актуальной и важной задачей.

Анализ публикаций. В настоящее время кинетика старения масел достаточно подробно изучена и описана в литературе. В [1] установлено, что окисление трансформаторных масел происходит по цепному механизму, там же выделены основные участки окисления масел, проанализирован состав продуктов окисления. Влияние температуры, концентрации кислорода, напряженности электрического поля и других факторов на скорость окисления масел приведено в работах [1-3]. Однако, эти исследования выполнялись в лабораторных условиях, при строго фиксированных значениях температуры и напряженности электрического поля. Поэтому полученные результаты не могут в полной мере отражать особенности старения масел в условиях эксплуатации.

Цель статьи. В данной статье, на основе анализа результатов эксплуатационного контроля, выполнена оценка влияния эксплуатационных

факторов на интенсивность старения трансформаторных масел.

Методика решения задачи. В качестве исходных данных для выполнения анализа использовались результаты периодических испытаний состояния трансформаторных масел по 249 трансформаторам напряжением 110 кВ из 6 областей Украины. Анализировались как результаты контроля физико-химических показателей масел, так и результаты хроматографического анализа растворенных в масле газов. Всего проанализированы результаты испытаний по 20 показателям, характеризующим изменение изоляционных свойств масел на промежутке до 50 лет эксплуатации. Для удобства анализа были сформированы группы показателей с одинаковой скоростью дрейфа согласно [4]. Наглядно такие группы (M1 - M6) иллюстрирует рис. 1, на котором приведены зависимости кислотного числа трансформаторных масел от длительности эксплуатации.

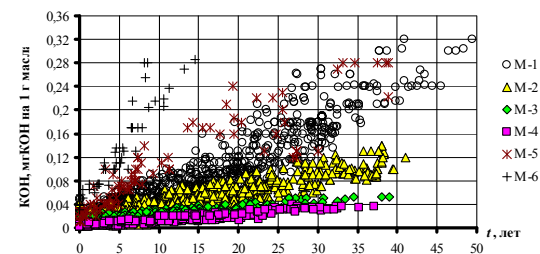


Рис. 1 - Зависимость кислотного числа трансформаторных масел от длительности эксплуатации для 6 групп трансформаторов с одинаковой скоростью старения.

На первом этапе исследований проверялось, на сколько различны скорости дрейфа кислотного числа масел между выделенными 6 группами. Поскольку предполагается, что значения показателей изменяются не только во времени, но и между группами то для проверки различий скорости старения использовалась математическая модель двухфакторного перекрестного дисперсионного анализа [5]. При этом фактор длительности эксплуатации располагался по строкам, а фактор группы по столбцам. Считается, что число наблюдений в каждой ячейке одинаково и равно m .

Если эффекты изменения уровней факторов аддитивны, т.е. разность математических ожиданий между любыми двумя уровнями одного фактора одинакова при любых уровнях второго, то модель компонент дисперсии может быть представлена в виде линейного уравнения [5]:

$$y_{ijr} = \mu + \rho_i + \gamma_j + \varepsilon_{ijr}, \quad (1)$$

где y_{ijr} – значение показателя качества масла; μ – общее среднее; ρ_i – среднее отклонение относительно μ для i -го уровня первого фактора; γ_j – среднее отклонение относительно μ для j -го уровня второго фактора; ε_{ijr} – остаточная случайная величина; i – уровень первого фактора; j – уровень второго

фактора; порядок появления одного из m_{ij} наблюдения для сочетания i -го уровня первого с j -м уровнем второго фактора.

Если эффекты не аддитивны, то необходимо ввести в модель (1) составляющую, характеризующую взаимодействие между факторами, тогда уравнение примет вид:

$$y_{ijr} = \mu + \rho_i + \gamma_j + (\rho\gamma)_{ij} + \varepsilon_{ijr}, \quad (2)$$

где: $(\rho\gamma)_{ij}$ – составляющая характеризующая взаимодействие между факторами;

Выражение для полной суммы квадратов отклонений от общего среднего для модели (2) имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m (\bar{y}_{ij} - \bar{y})^2 = k \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + n \cdot m \cdot \sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - \bar{y})^2 + m \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y})^2 \quad (3)$$

Откуда общая сумма квадратов отклонений от среднего:

$$Q_{\text{общ}} = Q_A + Q_B + Q_{AB} + Q_{\varepsilon} \quad (4)$$

где: $Q_A = k \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений, характеризует

рассеяние средних по строкам относительно общего среднего;

$Q_B = n \cdot m \cdot \sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений от общего среднего

между столбцами, характеризует рассеяние средних по столбцам;

$Q_{AB} = m \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений

характеризует эффект взаимного влияния; $Q_{\varepsilon} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m (y_{ijr} - \bar{y}_{ij})^2$ – сумма

квадратов отклонений внутри серии, характеризующая рассеяние отдельных наблюдений в серии относительно среднего серии, обусловленное влиянием только случайных величин.

Проверка гипотезы о значимости влияния факторов и их взаимодействий осуществлялись с помощью критерия Фишера. Для этого сначала, были найдены оценки средних квадратов:

$$\text{Общая: } s_{\text{общ}}^2 = \frac{Q_{\text{общ}}}{n \cdot k \cdot m - 1} = \sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_{AB}^2;$$

$$\text{межстрочная: } s_A^2 = \frac{Q_A}{n - 1} = \sigma_{\varepsilon}^2 + k \cdot m \cdot \sigma_A^2 + m \cdot \sigma_{AB}^2;$$

$$\text{между столбцами: } s_B^2 = \frac{Q_B}{k - 1} = \sigma_{\varepsilon}^2 + n \cdot m \cdot \sigma_B^2 + m \cdot \sigma_{AB}^2;$$

$$\text{взаимодействия: } s_{AB}^2 = \frac{Q_{AB}}{(n - 1) \cdot (k - 1)} = \sigma_{\varepsilon}^2 + m \cdot \sigma_{AB}^2;$$

$$\text{остаточную: } s_{\varepsilon}^2 = \frac{Q_{\varepsilon}}{n \cdot k \cdot (m - 1)} = \sigma_{\varepsilon}^2.$$

Значение F -критериев вычислялись как отношения соответствующих средних квадратов к остаточному среднему квадрату:

$$F_A = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_{\varepsilon}^2}, \quad F_B = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_{\varepsilon}^2}, \quad F_{AB} = \frac{\sigma_{AB}^2}{\sigma_{\varepsilon}^2}. \quad (5)$$

Гипотеза об отсутствии влияния фактора или эффекта взаимодействия не отвергалась, если расчетное значение F -критерия меньше табличного, при соответствующих значениях числа степеней свободы и уровне значимости $\alpha=0,05$.

Значения сумм дисперсионного разложения, а также расчетные и критические значения F -критериев, полученные в результате дисперсионного разложения для групп кислотного числа масел приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Результаты двухфакторного дисперсионного анализа

n	k	Суммы дисперсионного разложения					F критерии (расчетный / критический)		
		Q _{общ}	Q _A	Q _B	Q _{AB}	Q _{ост}	F _A	F _B	F _{AB}
5		0,83065	0,22317	0,43471	0,14021	0,03254	1193,08	2904,9	187,39
							2,23	2,39	1,59

Для всех анализируемых показателей качества масла, расчетные значения F - критериев значимо превышают табличные. А это значит, что скорости дрейфа показателей между группами значимо отличаются.

На основании этого можно сделать следующие выводы:

1. Значимое превышение расчетными значениями критериев F_A граничных значений свидетельствует о том, что наблюдается дрейф значений показателей масел во времени, т.е. происходят процессы старения масла;

2. Значимое превышение расчетными значениями критериев F_B граничных значений свидетельствует о том, что скорость дрейфа показателей масел, отличается между группами, а значит, трансформаторы в различных группах эксплуатировались в различных условиях;

3. Значимое превышение расчетными значениями критериев F_{AB} граничных значений свидетельствует о том, что эффекты изменения уровней

факторов не аддитивны, т.е. эффект от изменения уровня воздействия одного фактора приводит к изменению эффекта от уровня воздействия другого.

Анализ полученных результатов. Разная скорость старения масел между группами показателей, обусловлена в первую очередь различной нагрузкой трансформаторов [6]. Однако, представляет непосредственный интерес проанализировать и влияние других факторов. Поэтому анализировалось качество заливаемого масла, длительность эксплуатации, влияние региона, влияние типа и номинальных характеристик трансформаторов на скорость старения масел. В таблице 2 приведены основные характеристики трансформаторов, которые входят в группы М-1 – М-6 для кислотного числа трансформаторных масел. Анализ данных табл. 2 позволяет сделать ряд выводов о значимости влияния следующих факторов:

Влияние качества заливаемого масла. Как видно из табл. 2 значения кислотного числа масла на момент заливки в бак трансформаторов колеблется в достаточно широком диапазоне. Наименьшие значения кислотного числа выделены в группе М-4 (ей же соответствует и наименьшая скорость окисления см. рис. 1). Максимальные значения кислотного числа наблюдались в группе М-6 (максимальная скорость окисления). Для остальных групп трансформаторов кислотное число на момент заливки имеет промежуточные значения. Влияние качества масла на скорость его старения может быть объяснено ростом числа свободных радикалов в масле с худшим качеством (в данном случае с повышенным значением кислотного числа), что и приводит к повышенной интенсивности окислительных реакций.

Влияние продолжительности эксплуатации. Группы кислотного числа с наибольшей интенсивностью окисления (М-1, М-5 и М-6) составляют в основном трансформаторы с наработкой свыше 30 лет, а группы с наименьшей интенсивностью окисления (М-3 и М-4) содержат наибольший процент трансформаторов с наработкой до 20 лет. Данное обстоятельство свидетельствует с одной стороны о влиянии загрузки трансформаторов на интенсивность окислительных процессов (поскольку температура масла будет во многом зависеть от величины нагрузочных потерь, а загрузка трансформаторов до 1990 г была значительно выше, чем после 1990 г.). С другой стороны важным фактором является также время эксплуатации, поскольку старение изоляции протекает и при низких температурах, но с меньшей интенсивностью (эффекты изменения уровней факторов не аддитивны).

Влияние региона. При анализе распределения трансформаторов из различных регионов Украины по группам нельзя не обратить внимание, на то что, группы с наибольшей интенсивностью старения (М-1, М-5 и М-6) состоят преимущественно из трансформаторов находящихся в эксплуатации в Донецкой и Луганской областях. Вероятней всего это связано с преобладанием промышленного потребителя в составе нагрузки данных

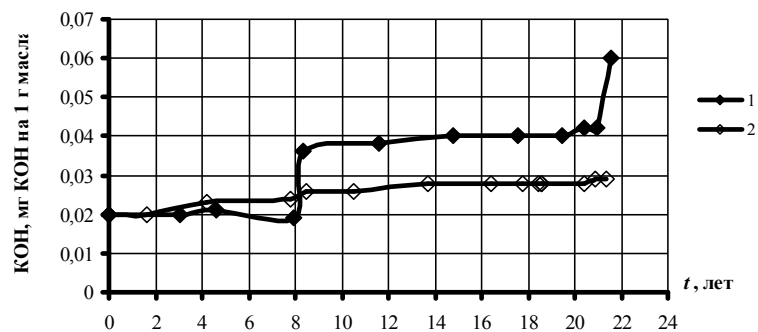
трансформаторов, а следовательно и с более жестким температурным режимом их эксплуатации.

Таблица 2 - Характеристики групп трансформаторов с одинаковой скоростью дрейфа кислотного числа

Характеристика массива	Массив данных					
	М-1	М-2	М-3	М-4	М-5	М-6
Значение показателя на момент заливки масла, мг КОН на 1 г масла						
Максимальное	0,049	0,043	0,027	0,009	0,028	0,049
Среднее	0,020	0,019	0,018	0,004	0,017	0,040
Минимальное	0,010	0,003	0,010	0,001	0,010	0,030
Среднее время выхода показателя за граничное значение, лет	18,41	30,76	-	-	7,33	4,49
Распределение трансформаторов по сроку службы, %						
до 10 лет	0	0	15	6	0	0
от 10 до 20 лет	21	35	52	63	25	0
от 20 до 30 лет	31	35	30	31	50	0
от 30 до 40 лет	35	27	3	0	0	33
более 40 лет	13	3	0	0	25	67
Распределение трансформаторов по регионам, %						
Донецкая обл.	23	16	3	6	25	33
АР Крым	0	5	9	19	0	0
Луганская обл.	49	24	3	44	75	67
Полтавская обл.	5	8	0	6	0	0
Сумская обл.	8	5	0	25	0	0
Харьковская обл.	15	42	85	0	0	0
Распределение трансформаторов по номинальным мощностям, %						
10 МВА	0	0	0	6	0	0
16 МВА	2	8	3	13	0	0
20 МВА	6	8	0	0	0	0
25 МВА	33	22	58	31	0	0
32 МВА	33	16	6	25	25	0
40 МВА	22	46	33	19	25	67
63 МВА	4	0	0	6	50	33
Распределение трансформаторов по типу исполнению, %						
ТДН	6	2	3	6	0	0
ТМН	0	0	0	6	0	0
ТДНГ	22	6	3	6	50	0
ТРДН	24	39	27	25	0	33
ТДТН	44	39	61	44	50	33
ТДТНГ	4	10	6	13	0	34
Зарубежные	0	4	0	0	0	0
Распределение трансформаторов по номинальным напряжениям, %						
110/6 кВ	27	29	21	38	0	33
110/10 кВ	8	20	12	6	0	0

110/10/6 кВ	4	4	21	0	0	0
110/35/6 кВ	43	41	40	25	75	34
110/35/10 кВ	18	6	6	31	25	33

Влияние номинальной мощности трансформаторов. Как и следовало ожидать, номинальная мощность трансформаторов не влияет на интенсивность старения масел. Значимым является не величина номинальной мощности трансформаторов, а на сколько процентов от номинальной мощности был загружен анализируемый трансформатор на всем интервале эксплуатации. Наглядно данный факт иллюстрирует рис. 2, на котором приведены зависимости кислотного числа масел от продолжительности эксплуатации для трансформаторов ПС «Алексеевская Т-1, ТРДН-25, 110/10» (кривая 1) и ПС «Московская Т-2, ТРДН-40, 110/10» (кривая 2) АК Харьковоблэнерго.



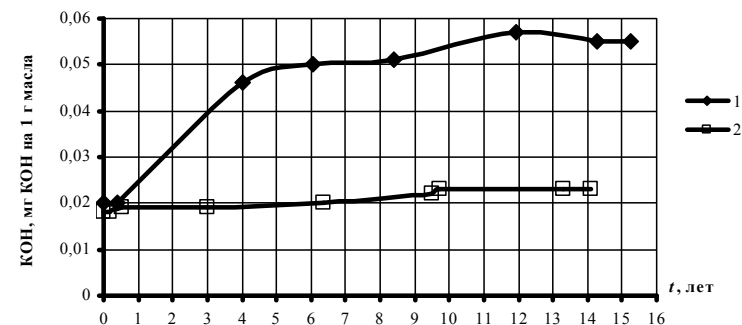
1 – трансформатор ПС «Алексеевская Т-1, ТРДН-25, 110/10»;
2 – трансформатор ПС «Московская Т-2, ТРДН-40, 110/10».

Рис. 2 - Зависимость кислотного числа масел от длительности эксплуатации

Как видно из рисунка скорость старения масла в трансформаторе ПС «Алексеевская Т-1» превышает скорость старения масла в трансформаторе ПС «Московская Т-2», не смотря на то, что номинальная мощность трансформатора ПС «Московская Т-2» выше. Это обусловлено тем, что средняя нагрузка трансформатора ПС «Алексеевская Т-1» составила 35,2%, а трансформатора ПС «Московская Т-2» 16,2%.

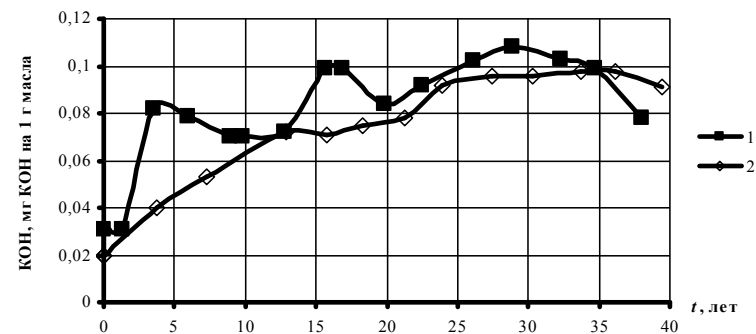
Влияние типов и номинальных напряжений трансформаторов. Анализируя данные табл. 2. легко увидеть, что ни тип трансформатора ни напряжение на обмотках СН и НН не оказывают значимого влияния на скорость старения масел. Как и в случае с номинальной мощностью трансформаторов, определяющим фактором интенсивности старения масел является его нагрузка. Однотипные трансформаторы с одинаковым значением

напряжения на сторонах СН и НН при разных значениях коэффициентов загрузки имеют различные скорости старения (см. рис. 3). Так, трансформатор АК Харьковоблэнерго ПС «Основа Т-1, имеет среднюю загрузку 39%, а «Основа Т-2» – 11%, что и обуславливает различную интенсивность окисления при одинаковых типах и номинальных напряжениях этих трансформаторов. В тоже время скорость старения масел в трансформаторах разного типа, но при одинаковой нагрузке практически одинакова (см. рис. 4). Загрузки трансформаторов АК Харьковоблэнерго ПС «Сокольники Т-1» и «Сокольники Т-2» приблизительно одинаковы 52% и 54% соответственно, что и обуславливает примерно одинаковую скорость старения при различных типах этих трансформаторов.



1 – трансформатор ПС «Основа Т-1, ТДТН-40, 110/35/6»;
2 – трансформатор ПС «Основа Т-2, ТДТН-40, 110/35/6».

Рис. 3 - Зависимость кислотного числа масел от длительности эксплуатации



1 – трансформатор ПС «Сокольники Т-1, ТДНГ-32, 110/6»;
2 – трансформатор ПС «Сокольники Т-2, Франция, 110/6».

Рис. 4 - Зависимость кислотного числа масел от длительности эксплуатации

Выводы. В условиях длительной эксплуатации старение трансформаторных масел в баках силовых высоковольтных трансформаторов протекает с разной скоростью. В результате скорость дрейфа показателей качества трансформаторных масел значительно отличается. Основными факторами, влияющими на скорость старения масел, являются: нагрузка трансформаторов, длительность эксплуатации и качество масел. Установлено, что номинальная мощность, тип и номинальные напряжения на обмотках СН и НН трансформаторов не оказывают значимого влияния на интенсивность окислительных реакций.

Список литературы: 1. *Литштейн Р.А., Шахнович М.И.* Трансформаторное масло М., Энергоатомиздат 1983 г.-296 с. 2. *Бурьянов Б.П.* Трансформаторное масло. М., Государственные энергетические издания – 1955 – 190. 3. *Штегер Г.* Электроизоляционные материалы М.: Госэнергоиздат, 1961. – 264с. 4. *Шутенко О.В.* Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний // Интегровані технології та енергозбереження.– Харків: НТУ «ХПИ», 2006. – № 4. – С. 42–50. 5. *Давыденко А.П.* Организация и планирование научных исследований, патентоведение: Учеб. пособие – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – 320с. 6. *Шутенко О.В.* Исследование влияния режимов работы трансформаторов на интенсивность старения масла / *О.В. Шутенко* // Энергетика та електрифікація. – 2008 – №8. – С. 54–59.



Шутенко Олег Владимирович закончил электроэнергетический факультет ХПИ в 1994 г. по специальности «Электроизоляционная, конденсаторная и кабельная техника». В 2010 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Усовершенствование диагностики силовых высоковольтных трансформаторов на основе анализа закономерностей длительного старения масел». Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования.

Поступила в редколлегию 03.09.2010