

О.В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, старший преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТАРЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статті викладені результати досліджень характеру дрейфу ізоляційних показників трансформаторних масел в умовах тривалої експлуатації. Наведені та проаналізовані характерні залежності показників масел від тривалості експлуатації. Встановлено, що в залежності від сорту масел та умов експлуатації трансформаторів характер залежності одного й того ж показника може суттєво відрізнятися.

В статье изложены результаты исследований характера дрейфа изоляционных показателей трансформаторных масел в условиях длительной эксплуатации. Приведены и проанализированы характерные зависимости показателей масел от длительности эксплуатации. Установлено, что в зависимости от сорта масел и условий эксплуатации трансформаторов характер зависимости одного и того же показателя может существенно отличаться.

Постановка задачі. Трансформаторные масла являются одним из элементов изоляции высоковольтных трансформаторов. Под воздействием эксплуатационных факторов происходит старение масел и ухудшение их изоляционных свойств. Степень старения масел определяется по комплексу показателей регламентированных в [1]. В настоящее время информация о характере изменения показателей масел в условиях длительной эксплуатации практически отсутствует, что делает невозможным не только прогнозирование состояния масел, но и значительно усложняет оценку их текущего состояния. В связи с этим исследование особенностей старения трансформаторных масел в условиях длительной эксплуатации является актуальной и важной задачей.

Анализ публікацій. Процессы старения трансформаторных масел достаточно подробно изучены и освещены в литературе. В [2] приведены кинетические кривые окисляемости масел, выделены основные участки окисления масел. Достаточно подробно проанализирован состав продуктов окисления, исследовано влияние различных факторов на скорость окисления масел [2-4]. В тоже время зависимости показателей масел от длительности эксплуатации исследованы недостаточно.

Цель статьи. В статье приводятся результаты исследований осо-

бенностей старения трансформаторных масел, в условиях длительной эксплуатации.

Метод решения задачи. В качестве исходных данных для выполнения анализа использовались результаты периодических испытаний состояния трансформаторных масел по 6 областям Украины. Всего обследовано 249 трансформаторов напряжением 110 кВ и номинальными мощностями от 6,3 до 63 МВА. Объем проанализированной выборки составил 44728 выборочных значений по 20 показателям масел, и растворенным в масле газам. Представив результаты периодических испытаний по каждому из показателей в виде временных рядов (показатель качества масла на время эксплуатации), был сформирован массив данных, который характеризует изменение изоляционных свойств масел на интервале эксплуатации до 50 лет.

Общая математическая модель состояния объекта контроля может быть представлена в виде многомерного вектора показателей (характеристик) [5]:

$$\bar{x}(t) = \bar{G}(t) + \bar{\eta}(t) + \bar{\xi}(t), \quad (1)$$

где $\bar{G}(t)$ – систематическая составляющая, характеризующая в объекте необратимые изменения; $\bar{\eta}(t)$ – обратимые изменения; $\bar{\xi}(t)$ – погрешность измерительных средств контроля.

Считается, что регулярная составляющая представляет собой гладкую функцию от аргумента времени t , описываемую конечным вектором параметров β . $\bar{G}(t) = f(\beta, t)$

Используя терминологию статистического анализа временных рядов, регулярную составляющую назовем трендом. Случайная составляющая $\bar{\eta}(t)$ – это случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и с достаточно узкой автокорреляционной функцией. Составляющие $\bar{\eta}(t)$ и $\bar{\xi}(t)$ определяют стохастическую часть процесса. Для простоты анализа составляющие $\bar{\eta}(t)$ и $\bar{\xi}(t)$ можно объединить в процесс (1) и записать в виде

$$\bar{x}(t) = \bar{G}(t) + \bar{\eta}(t). \quad (2)$$

Процессом постепенного изменения технического состояния объекта контроля будем считать процесс, для которого выполняется соотношение

$$\|G(t+t) - G(t)\| \gg \|\eta(t+t) - \eta(t)\|, \quad (3)$$

где: $\| \dots \|$ – норма вектора.

Действительно, чем сильнее неравенство (3), тем ближе процесс к детерминированному, функционально зависящему от длительности эксплуатации t . При этом случайный процесс предполагается стационарным по среднему значению, т.е.

$$M[\eta(t)] = 0. \quad (4)$$

Если выполняется условие (4) для процесса (2), то он может считаться детерминированным и его можно использовать для прогнозирования технического состояния объекта. В таком случае многомерный процесс необратимого изменения технического состояния объекта контроля определяется вектором $W[\beta(x), t]$ функции времени, постоянных коэффициентов β :

$$\bar{x}(t) = \bar{W}[\bar{\beta}(x), t] + \bar{E}, \quad (5)$$

где \bar{E} – вектор случайных ошибок, не зависящих от времени эксплуатации.

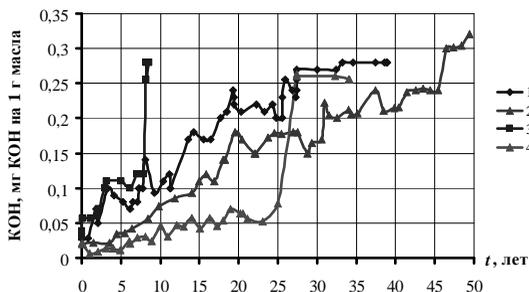
Выражение (5) позволяет рассматривать измеренные в ходе периодических испытаний значения показателей X_i как реализации нестационарных по среднему и непрерывных, случайных процессов с дискретным временем (временем профилактических испытаний). Под значимостью контролируемого показателя качества будем понимать его способность ощутимо изменять регулярную составляющую $W[\beta(x), t]$ на фоне случайной величины e_i , что предполагает превышение изменения тренда $f(\beta, t)$ над средним квадратичным отклонением процесса σ^2 в интервале времени эксплуатации оборудования.

Для выявления трансформаторов, у которых показатели качества масел значимо изменяются во времени, использовался однофакторный регрессионный анализ [5]. Влияние длительности эксплуатации считался значимым, если значение F – критерия превышала критическое значение при основной гипотезе $H_0: b_1=0$ – угловой коэффициент регрессии равен нулю, т.е. линия тренда параллельна оси времени.

Анализ полученных результатов. Выполненный анализ позволил установить, что для временных зависимостей физико-химических показателей масел преобладающей является систематическая составляющая или регулярный тренд. Для растворенных в масле газов при нормальной эксплуатации (отсутствие дефектов и аварийных режимов работы сети) зависимости от времени носят стохастический характер. Более того, в зависимости от условий эксплуатации, сорта и качества масел характер дрейфа одного и того же физико-химического показателя *значительно отличается*. Рассмотрим наиболее характерные зависимости некоторых показателей качества трансформаторных масел

от продолжительности эксплуатации.

Кислотное число является одним из показателей, характеризующих степень окисления трансформаторных масел. Установлено, что зависимости кислотного числа масел от продолжительности эксплуатации, практически повторяет известные кинетические кривые окисляемости масел [2]. Наиболее характерные зависимости данного показателя приведены на рис. 1.



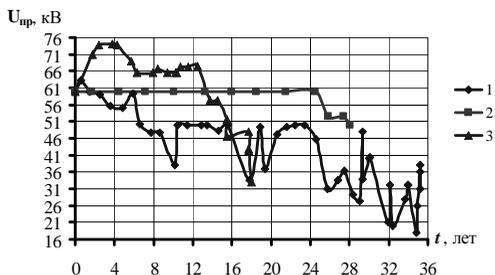
- 1 – трансформатор ПС "Амвросиевка" Т-2, ТДТНГ- 31,5, Донбассэнерго;
- 2 – трансформатор ПС "Луганская" Т-1, ТДТНГ- 31,5, Луганскоблэнерго.;
- 3 – трансформатор ПС "Бутовка" Т-1, ТДТН- 31,5, Донбассэнерго;
- 4 – трансформатор ПС "Амвросиевка" Т-1, ТДТНГ- 31,5, Донбассэнерго.

Рис. 1.

Как видно из рисунка, в зависимости от особенностей химического состава масла и условий его эксплуатации наблюдается 4 вида зависимостей. Для трансформатора ПС "Амвросиевка" Т-2 характерна самотормозящаяся окислительная реакция. Из рисунка видно, что скорость образования органических кислот замедляется с ростом длительности эксплуатации. В трансформаторе ПС "Луганская" Т-1 окислительная реакция протекает практически с линейной скоростью. В трансформаторе ПС "Бутовка" Т-1 имеет место автокаталитическая реакция. А в трансформаторе ПС "Амвросиевка" Т-1 в начале окисления автокаталитическая реакция, в конце самотормозящаяся.

Пробивное напряжение масла является показателем, характеризующим способность жидкого диэлектрика выдерживать приложенное напряжение без пробоя. В процессе эксплуатации пробивное напряжение масла уменьшается. На рис. 2 приведены три наиболее характерные зависимости пробивного напряжения масла от длительности экс-

плуатации.



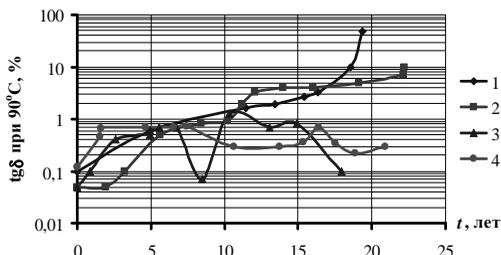
- 1 – трансформатор ПС "Октябрьская" Т-2, ТДТНГ-31,5, Луганскоблэнерго;
- 2 – трансформатор ПС "Знамя" Т-2, ТДТН-25, Полтаваоблэнерго;
- 3 – трансформатор ПС "Комиссаровская" Т-2, ТДТНГ-40, Луганскоблэнерго.

Рис. 2.

В трансформаторе ПС "Октябрьская" Т-2 (кривая 1 на рис. 2) снижение пробивного напряжения масла происходит практически сразу же после его заливки и наблюдается на всем интервале эксплуатации. Для трансформатора ПС "Знамя" Т-2 (кривая 2 на рис. 2) можно четко выделить индукционный период, продолжительность которого составила 24 года, на протяжении которого значение пробивного напряжения оставалось неизменным, после чего наблюдается незначительное снижение электрической прочности масла. На начальном этапе эксплуатации в трансформаторе ПС "Комиссаровская" Т-2 (кривая 3 на рис. 2) на интервале от начала эксплуатации до 5 лет наблюдается увеличение пробивного напряжения, которое вызвано подсушиванием масла за счет ухода влаги, после чего пробивное напряжения начинает снижаться. Снижение пробивного напряжения будет определяться содержанием влаги в эмульсионном состоянии. Кроме влаги электрическую прочность масла снижают низкокипящие вещества, образующие в масле коллоидные растворы или эмульсии с очень малым размером капель (являющиеся причиной электрофоретической проводимости), а также растворенные в масле газы.

Тангенс угла диэлектрических потерь масла в настоящее время является одним из основных показателей, характеризующих качество масла. Выполненные исследования показали, что тангенс угла диэлектрических потерь имеет достаточно сложную зависимость от времени эксплуатации. В течение эксплуатации значение $\text{tg}\delta$ изменяется как в

сторону повышения (см. кривые 1, 2 на рис. 3), так и в сторону снижения (кривые 3, 4 на рис. 3), имея, как правило, общую тенденцию к повышению.

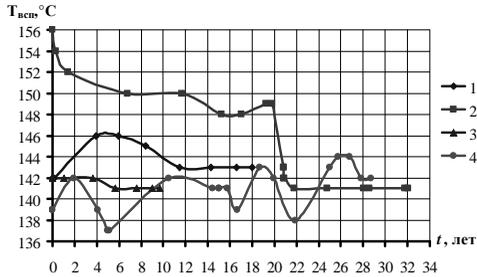


- 1 – трансформатор ПС "Постниково" Т-1, ТДТН-40, Донбассэнерго;
- 2 – трансформатор ПС "Вентиляционная" Т-3, ТДНГ-20, Донбассэнерго;
- 3 – трансформатор ПС "Лисичанская" Т-11, ТДТН-40, Луганскоблэнерго;
- 4 – трансформатор ПС "Диканька" Т-1, ТДТН-25, Полтаваоблэнерго.

Рис. 3.

Рост тангенса угла диэлектрических потерь масла, может быть вызван как ионизационными процессами в масле или основной изоляции (кривая 1, рис. 3), так и процессами теплового старения (кривая 2, рис. 3). Снижение тангенса угла диэлектрических потерь [2, 3] объясняется коллоидным характером примесей и необратимым изменением коллоидов. В свежих маслах в коллоидном состоянии могут находиться смолы и мыла. В процессе эксплуатации коллоидными веществами, которые накапливаются в масле, могут являться: компоненты лака, обмоток и старого шлама масел; мыла, образующиеся в результате взаимодействия кислых продуктов старения масел с металлами трансформаторов; кислые шламopodobные продукты, не содержащие в своем составе металла, например, кислоты, в том числе асфальтогеновые, плохо растворимые в масле смолы, асфальтены, карбены и другие продукты окисления.

Температура вспышки характеризует испаряемость масла и наличие в нем низкокипящих примесей. На начальном этапе эксплуатации у многих трансформаторов наблюдается увеличение значения температуры вспышки из-за испарения легких (низкокипящих) фракций, однако далее значение температуры вспышки начинает снижаться. На рис. 4. приведены наиболее характерные зависимости температуры вспышки трансформаторного масла от длительности эксплуатации.



- 1 – трансформатор ПС "Барбашова" Т-1, ТДТН-40, Харьковоблэнерго;
- 2 – трансформатор ПС "Левада" Т-1, ТНД-40, Харьковоблэнерго;
- 3 – трансформатор ПС "Ивановка" Т-4, ТРДН-40, Харьковоблэнерго;
- 4 – трансформатор ПС "Ромны" Т-2, ТДТН-40, Сумыоблэнерго.

Рис. 4.

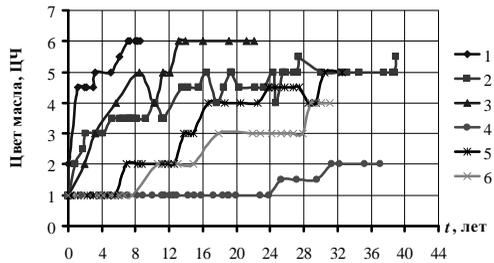
Для трансформатора ПС "Барбашова" Т-1 (кривая 1 на рис. 4) на начальном этапе эксплуатации (от момента заливки масла до 5 лет), наблюдается увеличение значения температуры вспышки от 142 до 146°C, далее начинается постепенное снижение значения этого показателя. В трансформаторе ПС "Левада" Т-1 (кривая 2 на рис. 4) снижение температуры вспышки наблюдалось с момента заливки масла, причем к концу наблюдения (а это 32 года) значение температуры вспышки данного трансформатора уменьшилось на 15°C, что говорит о достаточно высокой интенсивности изменения значения данного показателя в процессе эксплуатации. А в трансформаторе ПС "Ивановка" Т-4 (кривая 3 на рис. 4) на протяжении первых 4-х лет эксплуатации температура вспышки практически не менялась, а дальше наблюдается незначительное ее снижение. Незначительное увеличение температуры вспышки масел наблюдается в трансформаторе Ромны Т-2 (кривая 4, рис. 4). Интерпретировать полученные результаты можно исходя из следующих позиций: наличие участка роста температуры вспышки, обусловлено испарением низкокипящих фракций. Однако наряду с процессом испарения происходят и процессы окисления масла с образованием низкокипящих продуктов окисления (перекиси, спирты, летучие кислоты и CO₂ [2]). Естественно, что их образование приводит к снижению температуры вспышки. Если интенсивность образования низкокипящих продуктов окисления невелика, изменение температуры вспышки происходит согласно кривой 4 рис. 4. Если скорость испарения

низкокипящих примесей и скорость их образования сравнимы, то имеют место кривые 2 и 3. Если же процессы окисления протекают с достаточной высокой интенсивностью, то имеет место кривая 2.

Цвет трансформаторного масла. Характеризует степень окисления и полимеризации трансформаторного масла с образованием высокомолекулярных продуктов. Цвет масла определяется содержанием в нем асфальто-смолистых соединений, концентрации которых в свежем масле составляют 2,0-2,5 %. В процессе окисления [2, 3] некоторые асфальто-смолистые соединения обладают ингибирующим действием, другие наоборот – пассивируют антиокислительные присадки, а смолы при окислении переходят в состав осадка. В процессе эксплуатации наблюдается изменение цвета масла от светло-желтого (светлого для высококачественных марок масла) до темного цвета. Основной причиной потемнения масла является образование и рост концентрации продуктов окисления масла особенно смол и осадков. Количественную оценку цвета осуществляют с помощью цветовых чисел (ЦЧ), значения которых для свежих масел составляют порядка 0,5-1 ЦЧ, – для сильно окисленных масел значение цвета составляет 6-7 ЦЧ. Наиболее характерные зависимости цвета трансформаторного масла от длительности эксплуатации приведены на рис. 5. Как видно из рисунка характер зависимостей цвета масла от продолжительности эксплуатации является практически идентичным для большинства трансформаторов. Единственным существенным отличием между приведенными зависимостями, является скорость показателя, которая условиями эксплуатации и качеством масел.

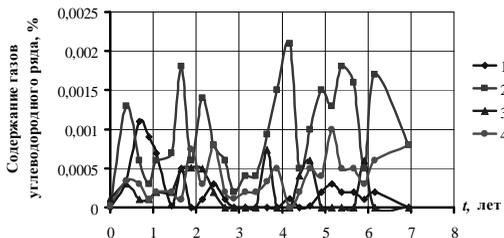
Газосодержание в масле. Сравнивая зависимости концентраций растворенных в масле газов от длительности эксплуатации с аналогичными зависимостями физико-химических показателей масел легко увидеть, что данные зависимости принципиально отличаются. Для зависимостей физико-химических показателей масел характерной является систематическая составляющая. Для зависимостей растворенных в масле газов (в трансформаторах, у которых отсутствует дефект) преобладающей является шумовая компонента. Наглядно это иллюстрирует рисунок 6, на котором приведены зависимости содержания газов углеводородного ряда от длительности эксплуатации для трансформатора ПС "Молодогвардейская" Т-1. Как видно из рисунка зависимости газов углеводородного ряда от длительности эксплуатации являются стационарными по математическому ожиданию и имеют стохастический, случайный характер. В этом случае рост концентраций газов обусловлен нормальным старением изоляции, а снижение

концентраций обусловлено диффузией газов из масла в атмосферу.



- 1 – трансформатор ПС "Амвросиевка" Т-1, ТДТНГ- 31,5, Донбассэнерго;
- 2 – трансформатор ПС "Амвросиевка" Т-2, ТДТНГ- 31,5, Донбассэнерго;
- 3 – трансформатор ПС "Постниково" Т-1, ТДТН - 40, Донбассэнерго;
- 4 – трансформатор ПС "Артемовка" Т-1, ТДТНГ- 31,5, Луганскблэнерго;
- 5 – трансформатор ПС "Петровская" Т-1, ТДТНГ- 31,5, Луганскблэнерго;
- 6 – трансформатор ПС "Знамя" Т-1, ТРДН-40, Сумыоблэнерго.

Рис. 5.



- 1 – содержание CH_4 ; 2 – содержание C_2H_4 ;
- 3 – содержание C_2H_2 ; 4 – содержание C_2H_6 .

Рис. 6.

Значимая систематическая составляющая в зависимостях концентраций газов углеводородного ряда от продолжительности эксплуатации была выявлена только в дефектных трансформаторах (рис. 7), а также при воздействии аварийных режимов работы на трансформатор [6, 7]. На рис. 7 приведены зависимости газов углеводородного ряда от длительности эксплуатации трансформатора ПС "Постниково" Т-1, Донбассэнерго.

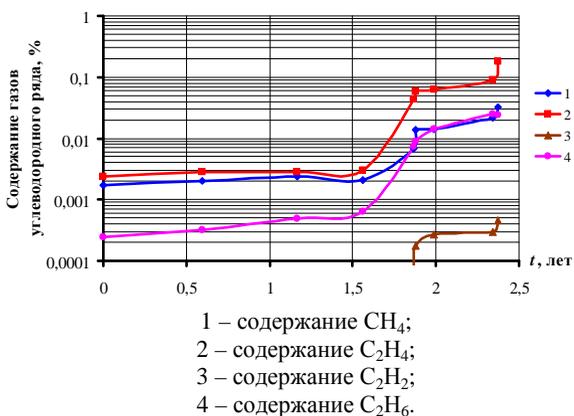


Рис. 7.

По результатам ХАРГ от 29.03.99 г., был обнаружен термический дефект $t > 700^\circ\text{C}$, с повреждением твердой изоляции (перегрев сердечника, из-за вихревых токов). Как видно из рисунка 7 развитие дефектов в трансформаторах, приводит к появлению значимой систематической составляющей в зависимостях газов углеводородного ряда от продолжительности эксплуатации. Появление значимой систематической составляющей, в зависимостях газов углеводородного ряда, при развитии дефекта обусловлено значительным ростом газовой выделению в изоляции, вследствие процессов термической деструкции в зоне дефекта.

Выводы. Установлено, что в зависимостях физико-химических показателей масел от длительности эксплуатации преобладающей является систематическая составляющая или регулярный тренд. В зависимости от условий эксплуатации, сорта и качества масел характер дрейфа одного и того же физико-химического показателя может значительно отличаться. Для растворенных в масле газов при отсутствии дефектов и аварийных режимов работы сети зависимости от длительности эксплуатации имеют стохастический, случайный характер. Значимая систематическая составляющая в зависимостях газов углеводородного ряда выявлена только в трансформаторах, которые имели дефект или подвергались воздействию аварийных режимов работы электрической сети.

Направления дальнейших исследований. В качестве дальнейшей

ших исследований предполагается проанализировать влияние сорта трансформаторных масел и условий эксплуатации трансформаторов на характер изменения изоляционных свойств масел.

Список литературы: 1. Норми випробування електрообладнання: СОУ – НEE 20.302:2007 – Офіц. вид. – К.: ОЕП ГРiФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2007. – 262 с. 2. *Липиштейн Р.А., Шахнович М.И.* Трансформаторное масло М., Энергоатомиздат 1983. – 296 с. 3. *Бурьянов Б.П.* Трансформаторное масло. М.: Государственные энергетические издания. – 1955. – 190 с. 4. *Штегер Г.* Электроизоляционные материалы. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 264 с. 5. *Бондаренко В.Е., Щанов П.Ф., Шутенко О.В.* Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. Монография. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2007. – 452 с. 6. *Шутенко О.В.* Интерпретация результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, при обнаружении дефектов в изоляции трансформаторов // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – № 34. – С. 101-115. 7. *Шутенко О. В.* Дослідження впливу експлуатаційних факторів на результати хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харьков: ХНТУСГ, 2008. – №73. – С. 45-48.



Шутенко Олег Владимирович закончил электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 1994 г. по специальности "Электроизоляционная, конденсаторная и кабельная техника". В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. Тема диссертационной работы: "Усовершенствование диагностики силовых высоковольтных трансформаторов на основе анализа закономерностей длительного старения масел". Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры "Передача электрической энергии", НТУ "ХПИ". Имеет 37 научных публикаций, в том числе 1 монографию.

Поступила в редколлегию 20.09.2010