

УДК 621.311

С.П. Высокорец, А.П. Васильев

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МАСЕЛ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 35–110 КВ

Наиболее дорогостоящее оборудование электрических сетей — это силовые трансформаторы. В России больше половины эксплуатируемого парка силовых трансформаторов работают с превышением назначенного срока (расчетного срока службы).

Анализ отказов силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ за длительный период показывает, что среди причин повреждений — увлажнение, загрязнение трансформаторного масла и твердой изоляции, в том числе продуктами старения [1]. Основным фактором, определяющим реальный срок службы силовых трансформаторов, является твердая изоляция, состояние которой существенно зависит от качества залитого эксплуатационного трансформаторного масла и процессов, протекающих в нем.

Группа электроизоляционных масел\*, залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–110 кВ, (масла со сниженной противокислительной стабильностью) имеет требования к качеству менее жесткие, чем к качеству масел, залитых в силовые трансформаторы напряжением 220 кВ и более.

Своевременная оценка качества масел, проведение мероприятий по поддержанию стабильных характеристик изоляции путем постоянного удаления продуктов старения и своевременное восстановление его ресурса позволят обеспечить требуемый уровень надежности маслонаполненных трансформаторов.

### Ресурс трансформаторного масла и его влияние на общий ресурс силового трансформатора

Определение «остаточного ресурса» установлено в ГОСТ 27.002–89 [3] и относится ко всем изделиям. Остаточный ресурс трансформатор-

\* Масла, принадлежащие к I группе по противокислительной стабильности, а также их смеси со II и/или III группами согласно классификации минеральных изоляционных масел, приведенной в [2].

ного масла — это суммарная наработка трансформаторного масла от момента контроля его технического состояния до перехода качества масла в предельное состояние, при котором недопустима или нецелесообразна его дальнейшая эксплуатация либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Ряд авторов [1, 6, 12, 16] указывают, что остаточный ресурс твердой изоляции тесно связан с остаточным ресурсом трансформаторного масла, поскольку продукты окислительного старения масла в значительной степени влияют на старение твердой изоляции. Таким образом, надежность силовых трансформаторов в значительной степени определяется как ресурсом целлюлозной (твердой) изоляции, так и ресурсом залитого эксплуатационного трансформаторного масла. Существующая нормативная база и подход к организации химического контроля силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ не позволяют оценивать ресурс изоляционных масел, выбирать необходимую номенклатуру и определять оптимальные сроки проведения работ по восстановлению ресурса масла.

В работах в области изучения химической структуры трансформаторных масел отмечается влияние химического структурно-группового состава трансформаторных масел на его эксплуатационные свойства [6, 12, 13].

В силовых трансформаторах старение масла происходит при повышенной температуре за счет совместного воздействия на него молекулярного кислорода воздуха и электрического поля в присутствии материалов, из которых изготовлен трансформатор. Доминирующим фактором старения трансформаторного масла являются окислительные превращения входящих в его состав углеводородов, смолистых и сернистых продуктов. Окисление углеводородов (R–H) протекает по цепному механизму, который осуществляется при помощи свободных радикалов: углеводородного R· и перекисного R–O–O· [6].



В отношении кинетики окисления трансформаторных масел следует отметить, что для трансформаторных масел характерна в начале автокаталитическая реакция, а в конце — самоотормозающая реакция (рис. 1) [6].

Таким образом, имеются следующие периоды процесса окисления [6]:

1. Начальная стадия, в течение которой нет наблюдаемых видимых измерений масла, называется индукционным периодом. В зависимости от особенностей химического состава масла и условий его применения продолжительность индукционного периода может варьироваться в довольно широких пределах.

2. Вслед за периодом индукции процесс вступает в автокаталитическую стадию в период самоускорения реакции, вызванный, в основном, распадом образовавшихся гидроперекисей на радикалы, который ведет к вырожденному разветвлению.

3. Затем наступает период постоянной скорости процесса, в котором скорость реакций образования и гибели свободных радикалов одинаковы. В этот период образуются продукты окисления фенольного типа, способные тормозить процесс.

4. Когда концентрация продуктов окисления фенольного типа оказывается достаточной, наступает последний период процесса окисления — период самоторможения. В нем кинетическая кривая окисления начинает идти почти параллельно оси абсцисс.

Наиболее чувствительные на разных стадиях старения показатели качества масел — кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, содержание антиокислительной присадки, тангенс угла диэлектрических потерь масла — служат маркерами протекающих процессов окисления.

Важным показателем качества масла, определяющим его устойчивость к старению, является противоокислительная стабильность, т. е. способность масла противостоять окислению.

#### **Изменения показателей качества трансформаторного масла по мере расходования его ресурса**

В филиале ОАО «МРСК Северо-Запада» — «Комиэнерго» — были проведены исследования, направленные на поиск зависимости изменения

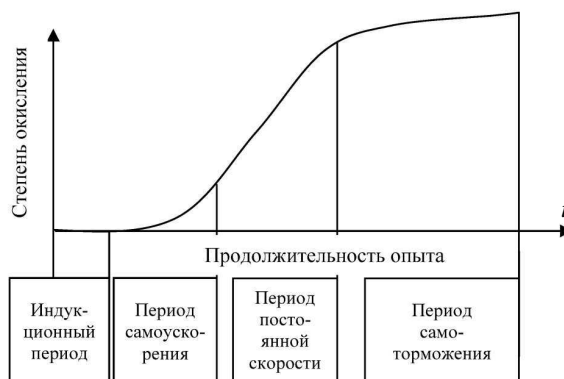


Рис. 1. Кинетическая кривая окисляемости масел

значений показателей качества эксплуатационного трансформаторного масла от степени его старения. Измерение доли утраченного ресурса производилось на силовых трансформаторах напряжением 35 и 110 кВ.

С помощью *U*-критерия Манна — Уитни было установлено, что отличия характеристик качества масла у трансформаторов разных классов напряжения (35 и 110 кВ) статистически незначимы, поэтому все результаты измерений были объединены в одну общую выборку (табл. 1).

Первичная оценка экспериментальных данных была проведена с помощью диаграмм рассеяния на основе корреляционного анализа. При построении диаграмм рассеяния было принято во внимание, что стабильность против окисления масел определяется следующими показателями качества: кислотным числом окисленного масла и количеством осадка, образованного после окисления. Соответственно, на диаграммах рассеяния (рис. 2) ось абсцисс содержит значения показателей качества эксплуатационных масел, ось ординат — значения показателя стабильности против окисления: кислотного числа окисленного масла. В диаграммах рассеяния откликом является кислотное число окисленного масла, фактором — показатель качества масла: кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, тангенс диэлектрических потерь масла, содержание антиокислительной присадки агидол-1 (ионол).

Диаграммы рассеяния (см. рис. 2) не показывают корреляции между фактором (показатель качества масла) и откликом (кислотное число окисленного масла). Вместе с тем на диаграммах

Таблица 1

**Усредненные результаты измерений силовых трансформаторов напряжением 35 и 110 кВ**

| Измеренная доля утраченного ресурса, ед. | Показатели качества масла в трансформаторах 35 и 110 кВ |        |   |        |  |        |  |        |
|--|---|--------|---|--------|--|--------|--|--------|
|  | Кислотное число, мгКОН/г                                |        | Водорастворимые кислоты и щелочи, мгКОН/г |        | Тангенс угла диэлектрических потерь масла, % |        | Содержание агидола-1 (ионола), % массы |        |
|  | 35 кВ   | 110 кВ | 35 кВ                                     | 110 кВ | 35 кВ  | 110 кВ | 35 кВ                                  | 110 кВ |
| 0  | 0,0050  | 0,010  | 0,00025                                   | 0,0011 | 0,80   | 1,25   | 0,085                                  | 0,089  |
| 0,25                                     | 0,014   | 0,018  | 0,0015                                    | 0,0018 | 1,85   | 2,44   | 0,057                                  | 0,089  |
| 0,50                                     | 0,038   | 0,035  | 0,0042                                    | 0,0052 | 4,57   | 4,55   | 0,048                                  | 0,070  |

обнаружены области, не содержащие внутри ни одного результата измерения (область № 1).

Границы области № 1 диаграммы (см. рис. 2) определяются следующим образом:

верхняя граница ограничена прямой, проходящей через значение 0,1 мгКОН/г оси ординат, что является пороговым значением противокислительной стабильности эксплуатационных масел трансформаторов 35–110 кВ; ниже этого значения стабильность масел является удовлетворительной;

левая граница ограничена прямой, проходящей через последнее значение в области от 0 до вышеуказанного порогового значения противокислительной стабильности.

Эта область указывает на то, что начиная с определенного значения показателя качества ресурса масла. Сравнение полученных значений показателей качества масла с действующими предельно допустимыми нормами приведено в табл. 2.

Установленные предельно допустимые нормы не обеспечивают гарантированного обнаружения пониженного ресурса масла на ранних стадиях старения.

Для оценки характера взаимосвязи показателей качества масла со степенью его старения усредненные данные представлены графически (рис. 3). Построение графиков усредненных данных проведено на основе регрессионного анализа.

На всех представленных графиках рис. 3 зависимости имеют вид монотонно возрастающей функции. При этом на оси абсцисс есть отрезок — от 0 до точки начала кривой, где доля утра-

ченного ресурса не изменяется и остается равной нулю; предположительно это и есть индукционный период окисления. Характер изменения кривой не противоречит теории окислительного процесса и в совокупности с вышеуказанным отрезком оси абсцисс соответствует классической кривой окисления: в начале — период спокойствия, далее — быстрый рост, затем — постепенное замедление скорости.

Одним из условий применимости для статистической обработки экспериментальных данных корреляционного и регрессионного анализа в классическом виде является представление фактора и отклика количественными характеристиками. Так как в ходе проведенных исследований отклик (противоокислительная стабильность) представлен качественной характеристикой, целесообразно рассмотреть применение методов статистики, которые позволяют получить количественную оценку.

Ввиду того, что по ряду групп результатов измерений выборка мала для того, чтобы судить о распределении генеральной совокупности, при статистической обработке данных использованы непараметрические методы.

Для оценки статистической значимости факторов на основе описательной статистики задано условие: в случае если противоокислительная стабильность не снижена (удовлетворительна), класс стабильности будет; 0, если противоокислительная стабильность снижена класс стабильности — 1. Факторами служат кислотное число, содержание водорастворимых кислот, тангенс диэлектрических потерь масла, содержание присадки агидол-1 (ионол); откликом — противоокислительная стабильность.

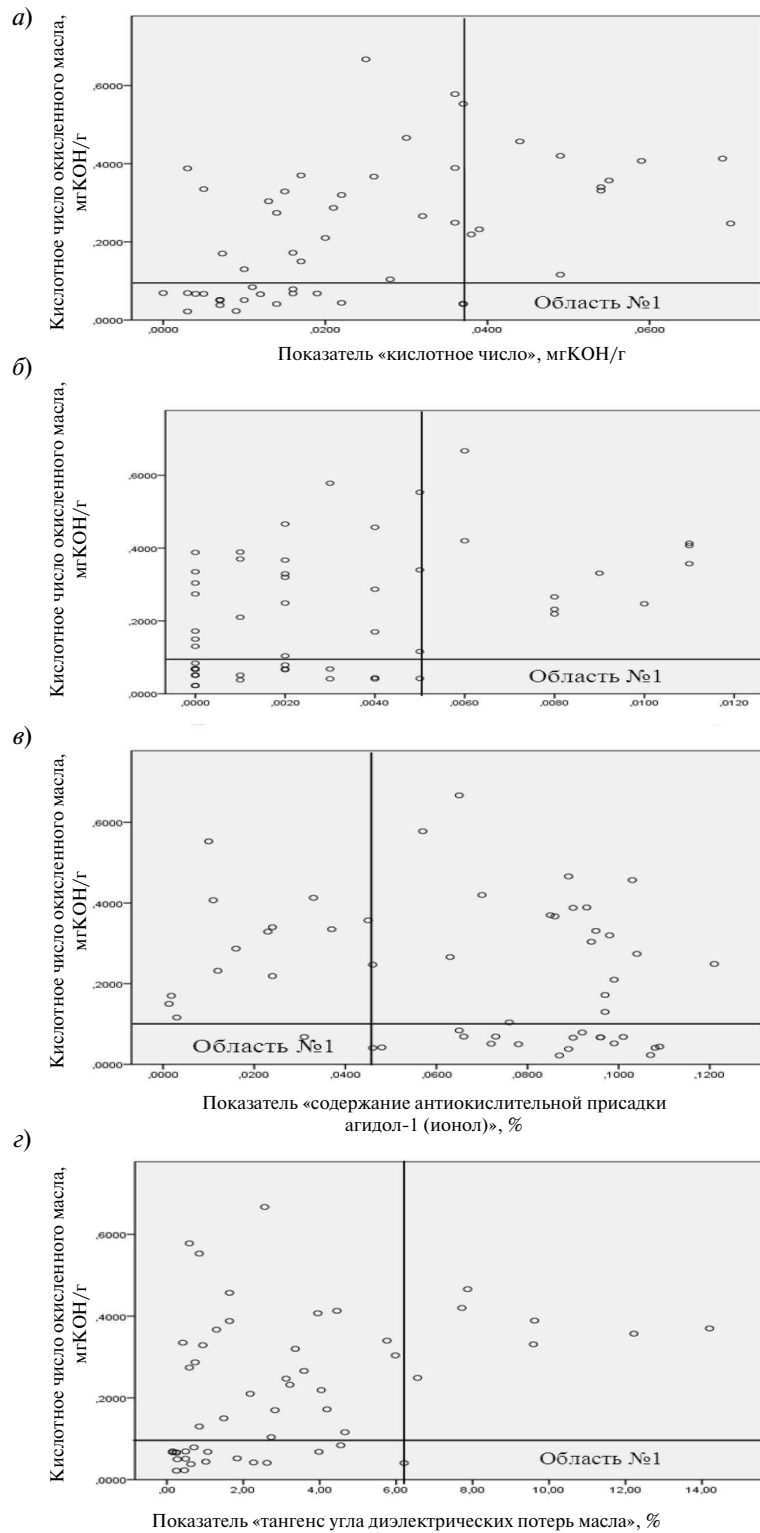


Рис. 2. Диаграммы рассеяния показателей качества масла от значения кислотного числа окисленного масла:

*a* — кислотное число; *б* — содержание водорастворимых кислот и щелочей; *в* — тангенс угла диэлектрических потерь масла; *г* — содержание антиокислительной присадки агидол-1; ○ — результат измерения

Таблица 2

**Измеренные показатели качества масла и предельно допустимые нормы**

| Наименование показателя качества                       | Значение диаграммы рассеяния | Предельно допустимая норма |
|--|------------------------------|----------------------------|
| Кислотное число, мгКОН/г                               | 0,04                         | 0,1 / 0,25                 |
| Содержание водорастворимых кислот, мгКОН/г             | 0,005                        | 0,014                      |
| Тангенс угла диэлектрических потерь масла при 90 °С, % | 6                            | 12 / 15                    |
| Содержание присадки ионол, %массы                      | 0,05                         | 0,1*                       |

\* Предельно допустимое значение, установленное для силовых трансформаторов напряжением свыше 110 кВ [15]

Учитывая, что медианы более устойчивы к выбросам, для определения статистической значимости различий показателей качества масла разных классов стабильности использованы диаграммы построения доверительных интервалов медиан показателей качества масла (рис. 4).

Расчет статистической значимости измерений показателей качества масла разных классов стабильности по критерию Манна — Уитни приведен в табл. 3.

Величины *P*-значений показателей — кислотное число, содержание водорастворимых

кислот, тангенса диэлектрических потерь масла — много меньше 0,05, и доверительные интервалы медиан для разных классов стабильности не пересекаются. Соответственно, различия между значениями вышеуказанных показателей качества масла для разных классов стабильности будут статистически значимыми.

*P*-значение содержания присадки ионола близко к значению 0,05, доверительные интервалы медиан для разных классов стабильности перекрываются значительно. Соответственно, статистическая значимость между измерениями

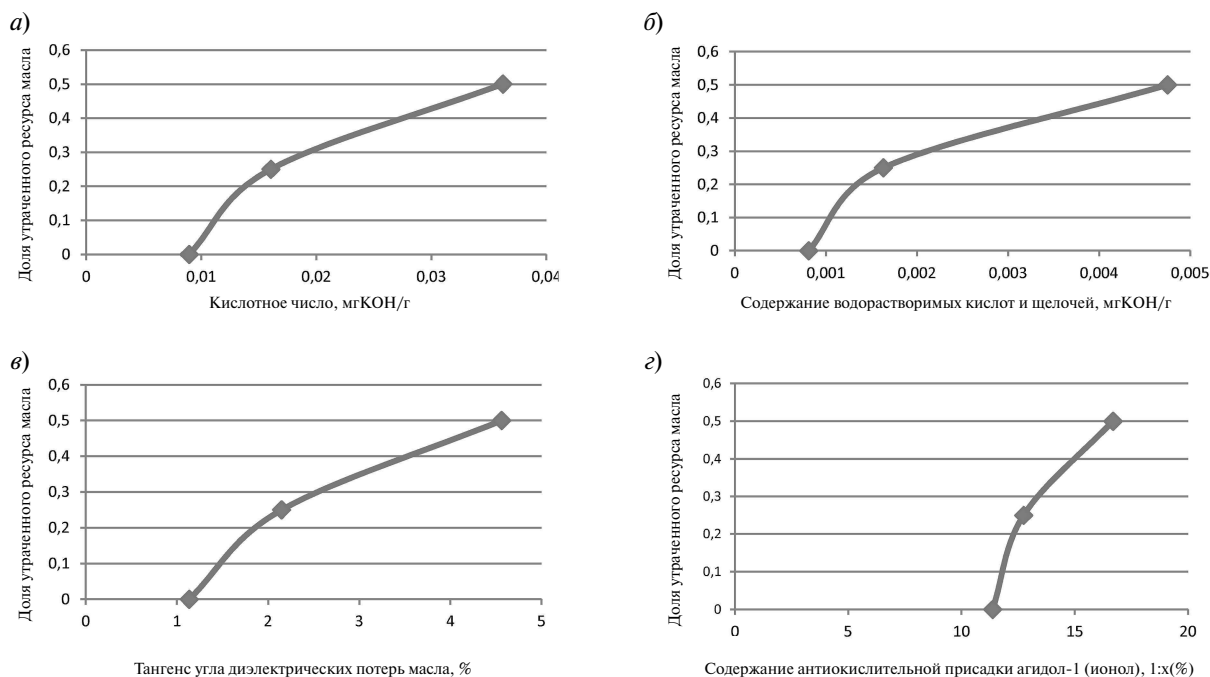


Рис. 3. Графики изменения значений показателей качества масла от доли утраченного ресурса: а — кислотное число; б — содержание водорастворимых кислот; в — тангенс угла диэлектрических потерь масла; г — содержание антиокислительной присадки агидол-1 (ионол)

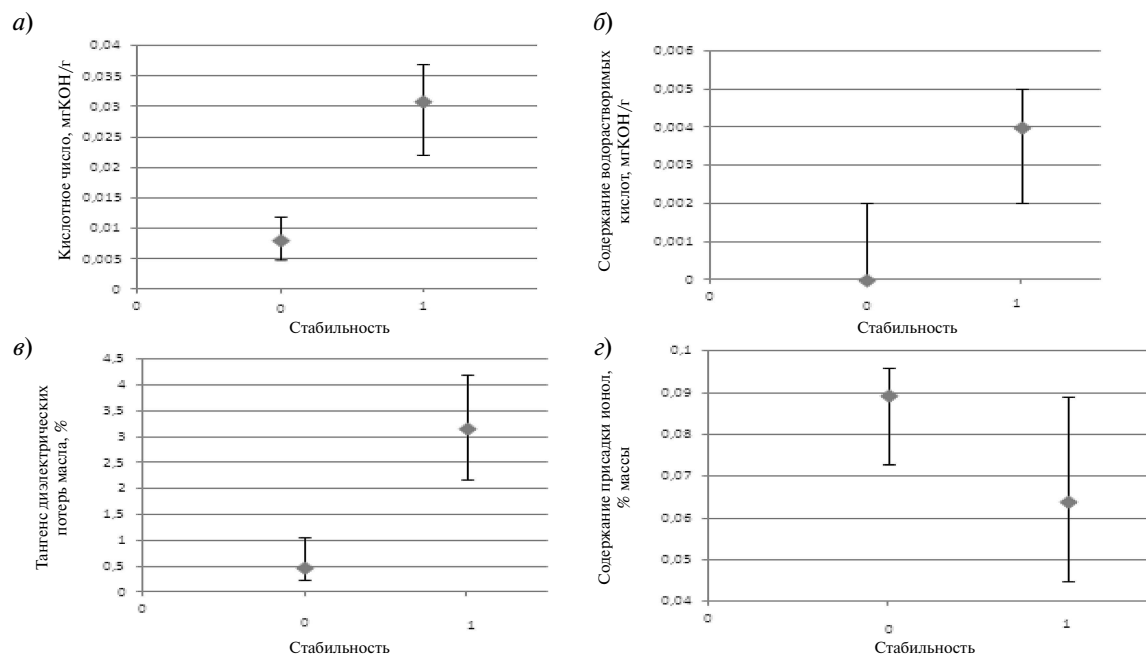


Рис. 4. Графики медиан показателей качества масла для различных классов стабильности с доверительными интервалами:

а — кислотное число; б — содержание водорастворимых кислот; в — тангенс диэлектрических потерь масла; г — содержание присадки ионол; † — значение медианы, с обозначением доверительного интервала ( $p = 0,95$ )

содержания присадки ионола для разных классов стабильности не доказана. Отсутствие доказательства статистической значимости различий может быть обусловлено или малочисленностью выборки, или слабой способностью данного показателя качества безошибочно обнаруживать изменение ресурса масла. Не исключено, что на результат мог повлиять такой эксплуатационный фактор, как периодические доливки свежего масла в бак трансформатора: введение в бак трансформатора свежего масла с повышенной

концентрацией ионола может повлечь некоторое изменение концентрации ионола в эксплуатационном масле.

На основе полученных зависимостей определены оптимальные пороговые значения для следующих показателей качества эксплуатационного масла силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ: кислотное число, водорастворимые кислоты и щелочи, тангенс угла диэлектрических потерь, содержание антиокислительной присадки (см. табл. 4).

Таблица 3

Результаты расчета по критерию Манна — Уитни

| Наименование показателя качества масла    | $P$ -значение / асимптотическая значимость (двухсторонняя) |
|---|--|
| Кислотное число                           | 0,000004   |
| Содержание водорастворимых кислот         | 0,000897   |
| Тангенс угла диэлектрических потерь масла | 0,000094   |
| Содержание присадки агидол-1 (ионол)      | 0,039214   |

Таблица 4

**Новые требования к качеству эксплуатационных масел,  
залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–110 кВ**

| Наименование показателя  | Значение   |                         |
|--|--|-------------------------|
|  | ограничивающее<br>область нормального<br>состояния | предельно<br>допустимое |
| Кислотное число, мгКОН/г   | Не более 0,04                                      | Не более 0,1            |
| Содержание водорастворимых кислот и щелочей, мгКОН/г   | Не более 0,014                                     | –                       |
| Тангенс угла диэлектрических потерь масла при 90 °С, %   | Не более 6   | Не более 12             |
| Содержание антиокислительной присадки агидол-1 (2,6-дитретбутил-4-метил-фенол или ионол), % массы  | Не менее 0,1                                       | Не менее 0,05           |
| Стабильность против окисления:<br>кислотное число окисленного масла, мгКОН/г;<br>содержание осадка образованного после окисления, %<br>массы | Не более 0,1<br>Не более 0,01                      | –<br>–                  |

**Необходимость изменения требований  
к качеству эксплуатационных масел  
силовых трансформаторов  
напряжением 35–110 кВ  
без специальных защит масла**

Для обеспечения надежности трансформаторов требуется не только использовать масла высокого качества, но и сохранить их свойства в течение периода эксплуатации. Для этого необходимо уточнить предельно допустимые значения контролируемых параметров, чтобы объективно и точно оценивать текущее состояние масла и его остаточный ресурс.

Необходимо повысить требования по обеспечению сохранения таких характеристик масла, как «кислотное число» и «тангенс диэлектрических потерь масла».

Результаты исследования количественного содержания продуктов старения показали, что установленные в [15] предельно допустимые значения таких показателей качества, как кислотное число и тангенс угла диэлектрических потерь, явно завышены и соответствуют уже глубоким стадиям старения масла.

При этом в стадии глубокого окисления эксплуатационное трансформаторное масло практически не восприимчиво к воздействию присадки, замена силикагеля в термосифонных

(адсорбционных) фильтрах на работающем трансформаторе бессмысленна [16]. Поэтому должен быть установлен момент времени, когда достигаются точки максимума.

На основе проведенных теоретических и практических исследований нами предложены приведенные в табл. 4 предельные значения показателей качества эксплуатационных масел, залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–110 кВ без специальных защит.

Для организации эффективного контроля масла силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ по результатам его физико-химического анализа требуется изменить и перечень измеряемых показателей качества масла при плановом физико-химическом анализе его проб. Измерение таких показателей качества, как кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, тангенс диэлектрических потерь масла, содержание антиокислительной присадки ионол, необходимо установить как обязательные для определения качества масла при плановом физико-химическом анализе. Предлагаемый объем плановых измерений силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ указан в табл. 5.

В перечень показателей для оценки качества эксплуатационных трансформаторных масел необходимо включить новый показатель — ста-

Таблица 5

**Рекомендуемая периодичность и объем измерений показателей качества масел силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ**

| Наименование объекта контроля   | Периодичность измерений и перечень измеряемых показателей  |   |
|---|--|---|
|   | Измерения с периодичностью 1 раз в 2 года  | Измерения с периодичностью 1 раз в 4 года   |
| Силовые трансформаторы напряжением 110 кВ без специальных защит масла | Кислотное число;<br>содержание водорастворимых кислот и щелочей;<br>тангенс угла диэлектрических потерь масла;<br>содержание механических примесей (класс промышленной чистоты);<br>пробивное напряжение;<br>влагосодержание | Кислотное число;<br>содержание водорастворимых кислот и щелочей;<br>тангенс угла диэлектрических потерь масла;<br>содержание механических примесей (класс промышленной чистоты);<br>пробивное напряжение;<br>влагосодержание;<br>содержание анти окислительной присадки агидол-1 (ионол);<br>содержание фурановых производных |
| Силовые трансформаторы напряжением 35 кВ без специальных защит масла  | —  | Кислотное число;<br>содержание водорастворимых кислот и щелочей;<br>тангенс угла диэлектрических потерь масла;<br>содержание механических примесей (класс промышленной чистоты);<br>пробивное напряжение;<br>влагосодержание;<br>содержание анти окислительной присадки агидол-1 (ионол)                                      |

бильность против окисления; он нужен для тестовой оценки ресурса масла при расширении объема измерений в случае, если масло имеет признаки старения.

Для тестовой оценки ресурса эксплуатационного трансформаторного масла может быть использован метод измерения стабильности против окисления трансформаторного масла, приведенный в ГОСТ 981–75 «Масла нефтяные. Методика определения стабильности против окисления» [7]. Однако в этом случае Методика должна быть доработана в части внесения в нее значений и условий процесса окисления эксплуатационных масел.

Измеряя противоокислительную стабильность эксплуатационного трансформаторного масла путем форсированного окисления пробы масла в лабораторных условиях, оценивают, насколько состояние исследуемого масла в данный

момент времени устойчиво к воздействию факторов, определяющих окислительные процессы.

Метод оценки остаточного ресурса для эксплуатационных трансформаторных масел, принадлежащих к I группе по противоокислительной стабильности, а также их смесей со II и/или III группами по классификации минеральных изоляционных масел, разработан и апробирован в филиале ОАО «МРСК Северо-Запада» — «Комиэнерго».

В результате проведенных исследований достигнуто следующее:

Определены наиболее чувствительные к различным стадиям старения показатели качества масел — кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, содержание антиокислительной присадки, тангенс угла диэлектрических потерь масла.



Определены зависимости степени старения (доли утраченного ресурса) эксплуатационных трансформаторных масел от изменения значенных показателей его качества.

Показано, что необходимо, во-первых, ввести новый, ранее не применявшийся показатель качества эксплуатационного трансформаторного масла — «стабильность против окисления»; во-вторых, изменить пороговые значения кислотного числа, водорастворимых кислот и щелочи, тангенса угла диэлектрических потерь, ввести пороговое значение содержания антиокислительной присадки агидол-1 (ионол) масел, залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–110 кВ без специальных защит масла; в-третьих, изменить объем измеряемых показателей для планового физико-химического анализа проб масла, установленный для силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ без специальных защит масла.

лочи, тангенса угла диэлектрических потерь, ввести пороговое значение содержания антиокислительной присадки агидол-1 (ионол) масел, залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–110 кВ без специальных защит масла; в-третьих, изменить объем измеряемых показателей для планового физико-химического анализа проб масла, установленный для силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ без специальных защит масла.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соколов, В.В.** Вопросы оценки и обеспечения надежности силовых трансформаторов [Текст] / В.В.Соколов, В.А. Лукашук // В кн.: В.В. Соколов, Избранные труды / Сост. А.Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной.— Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010.— С. 22–30.
2. **РД 34.43.105–89.** Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел [Текст].— М.: Технорматив, 2007.— 51 с.
3. **ГОСТ 27.002–89 (СТ СЭВ 3519–81).** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст] // М.: Изд-во стандартов, 1990.— 32 с.
4. **МУ 1.3.3.99.0037–2009.** Диагностика электрических аппаратов, распределительных устройств электростанций и подстанций [Электрон. ресурс] / Электронная библиотека ЗАО «Современные информационные услуги». — <http://www.snti.ru/>.
5. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [Текст] / Министерство энергетики РФ.— СПб.: ООО «Барс», 2003.— 276 с.
6. **Липштейн, Р.А.** Трансформаторное масло [Текст] / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович.— М.: Энергия, 1968. 352 с.
7. **ГОСТ 981–75.** Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления [Текст].— М.: Издательство стандартов, 1992.— 9 с.
8. **Boozer, C.** / C. Boozer, G. Hammond, C. Hamilton // J.Amer. Chem. Soc.— 1955. Vol. 77.— P. 3289.
9. **Эммануэль, Н.М.** Цепные реакции окисления углеводородов в жидкой фазе [Текст] / Н.М. Эммануэль, Е.Т. Денисов, З.К. Майзус // М.: Наука, 1965.
10. **Липштейн, Р.А.** О механизме действия ингибиторов окисления. Присадки к маслам [Текст] / Р.А. Липштейн // Труды II всесоюзного научно-технического совещания.— М.: Химия, 1968.— С. 169–177.
11. **Калачева, Н.И.** К вопросу о нормировании фурановых производных в трансформаторном масле для контроля состояния бумажной изоляции трансформаторов [Текст] / Н.И. Калачева // Сб.: Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 16.— СПб.: Изд-во ПЭИПК, 2001.— С. 194.
12. **Силовые трансформаторы** [Текст]: Справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина.— М.: Энергоиздат, 2004.— 616 с.
13. **Иванов, В.С.** Вопросы испытания и эксплуатации трансформаторных масел [Текст] / В.С. Иванов.— М.: Изд-во БТИ ОРГРЭС, 1962.— 116 с.
14. **Gezl, G.L.** The effect of composition on the oxidation stability of electrical oils [Текст] / G.L. Gezl, A.P. Stuart, E.S. Ross // Apparatus and Systems.— 1958. № 38.
15. **Объемы и нормы испытаний электрооборудования** [Текст] / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца.— 6-е изд., с изм. и доп.— М.: ЭНАС, 2007.— 256 с.
16. **Брай, И.В.** Регенерация трансформаторных масел [Текст] / И.В. Брай.— М.: Химия, 1972.— 168 с.