

WWW.EEPiR.RU



ЖУРНАЛ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА

Программно-аналитический комплекс принятия решений в ходе реализации метода определения ресурса трансформаторного масла

УДК 621.314.212

Определен оптимальный объем регенерационных работ для различных состояний масел в условиях энергопроизводства. По результатам научных исследований разработаны «Метод экспериментального определения ресурса жидкого диэлектрика и мер по его восстановлению» и «Алгоритм управления качеством жидкого диэлектрика в трансформаторном оборудовании», необходимые для поддержания удовлетворительных эксплуатационных характеристик масла. Для повышения качества принимаемых решений в ходе реализации метода и обработки полученных результатов разработан программно-аналитический комплекс «Советник по обслуживанию трансформаторов», позволяющий оператору согласно предлагаемых подсказок выбрать верный алгоритм действий и оптимальные рекомендации по ТОиР.

Высогорец С.П.,
к.т.н., доцент кафедры
ДЭО ФГАОУ ДПО
«ПЭИПК» Министерства
энергетики РФ

Горец И.А.,
студент кафедры ССИ
НИУ «ВШЭ СПб»

В каждом силовом трансформаторе имеют место индивидуальные условия работы масел, а химический состав различных марок масел специфичен. Поэтому номенклатуру профилактических работ по восстановлению ресурса масла оправданно определять путем моделирования процессов в лабораторных условиях. Данный метод определения сложен в силу многокомпонентности получаемых взаимосвязанных результатов и множества влияющих факторов, необходимых к учету при выборе алгоритма реализации эксперимента.

Для минимизации ошибок оператора при постановке эксперимента и в последующем формулировании диагноза целесообразна разработка программно-аналитического комплекса принятия решений, позволяющая на основе проводимых измерений согласно предлагаемых подсказок выбрать верный алгоритм действий и оптимальные рекомендации по ТОиР.

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МЕР ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ МАСЛА В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГОПРОИЗВОДСТВА

Для решения задачи подбора оптимальных мер по регенерации масла в условиях энергопроизводства необходимо определить возможные комбинации профилактических работ. При определенной степени старения масла для восстановления его ресурса требуется разный набор мероприятий. Обозначим следующие основные работы, проводимые в электросетевых организациях при снижении ресурса масла.

Первый вариант — замена силикагеля в термосифонном (адсорбционном) фильтре, стабилизация масла присадкой агидол-1 (ионол) путем введения концентрированного раствора ионола в бак трансформатора на работающем оборудовании.

Второй вариант — замена силикагеля в термосифонном (адсорбционном) фильтре, регенерация трансформаторного масла с помощью маслорегенерационных установок, стабилизация масла присадкой агидол-1 (ионол) на отключенном оборудовании.

Третий вариант — проведение капитального ремонта по второй группе сложности (с проведением промывки активной части от продуктов старения), замена эксплуатационного трансформаторного масла на свежее.

Соответственно, затраты на проведение работ для вышеуказанных вариантов будут различными. Формулы расчета затрат указаны в таблице 1. Возникающие затраты (W_m) будут иметь минимальное и максимальное значения, то есть значения ниже и выше которых быть не мо-

Ключевые слова:
регенерация, жидкий диэлектрик, трансформатор, метод, алгоритм, программно-аналитический комплекс

Табл. 1. Расчет затрат на проведение профилактических работ по восстановлению ресурса масла

Номер варианта проведения работ	Номенклатура работ	Формула расчета затрат (W_m)
Первый вариант	1. Замена силикагеля в термосифонном фильтре 2. Стабилизация масла присадкой	$W_{m1} = C_c m_c + C_i m_i + P_1 + P_2 V_k$
Второй вариант	1. Замена силикагеля в термосифонном фильтре 2. Регенерация масла специальной установкой 3. Стабилизация масла присадкой	$W_{m2} = C_c m_c + C_i m_i + P_1 + P_3 V_{m1}$
Третий вариант	1. Капитальный ремонт трансформатора по второй группе сложности (с проведением промывки активной части от продуктов старения) 2. Замена эксплуатационного масла на свежее	$W_{m3} = C_{кр} + V_{m2} C_m + P_2 V_{m2}$

Примечание: C_c — стоимость 1 кг силикагеля, руб.; m_c — масса силикагеля, засыпанного в термосифонный (адсорбционный) фильтр, кг; C_i — стоимость 1 кг агидола-1 (ионола), руб.; m_i — масса агидола-1 (ионола), необходимого для ввода в бак силового трансформатора, кг; P_1 — стоимость работ по замене силикагеля в термосифонном (адсорбционном) фильтре (определяется в соответствии с базовыми ценами — ремонт термосифонных фильтров II группы сложности в зависимости от типа фильтра), руб.; P_2 — стоимость работ по обработке трансформаторного масла (определяется в соответствии с базовыми ценами — заливка масла в трансформатор № 01080301), руб. за 1 т; V_k — объем заливаемого концентрированного раствора, м³; P_3 — стоимость работ по обработке трансформаторного масла (определяется в соответствии с базовыми ценами — регенерация со стабилизацией трансформаторного масла № 01080701), руб. за 1 т; V_{m1} — объем обрабатываемого масла, м³; $C_{кр}$ — стоимость капитального ремонта силового трансформатора по II группе сложности; V_{m2} — объем залитого в маслобак силового трансформатора изоляционного масла, м³; C_m — стоимость 1 т масла, руб.

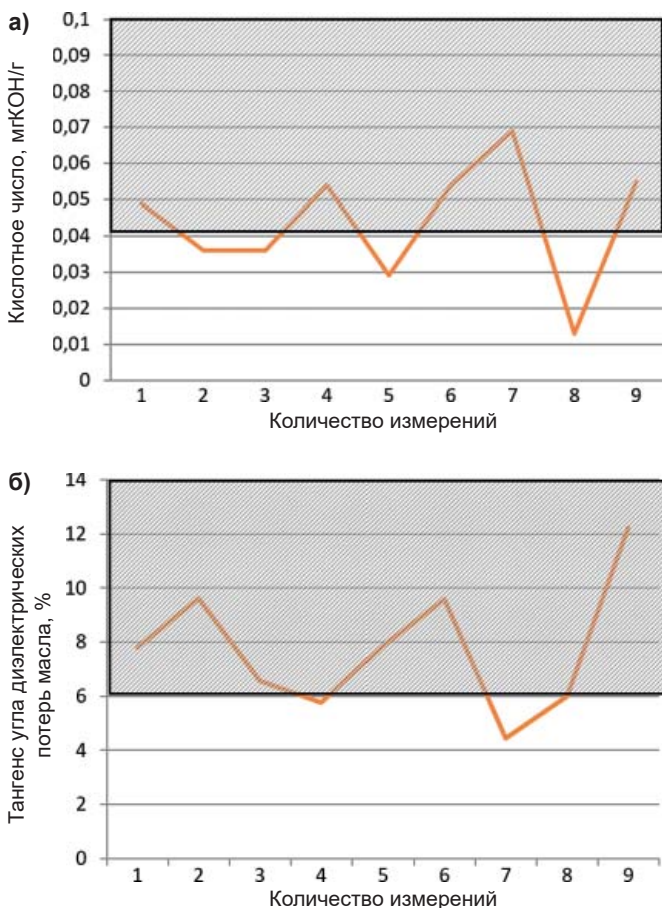


Рис. 1. Значения исходных показателей качества масла, восстановление ресурса которых эффективно только при расходе силикагеля не менее 5% от массы масла: а) для КЧ; б) для $tg\delta_m$

гут, и будут зависеть от доли утраченного ресурса масла.

Исходя из результатов проведенных экспериментальных работ следует, что ключевыми параметрами качества масла, на основе изменения которых можно определять номенклатуру работ и расходы по восстановлению ресурса масла, являются показатели КЧ и $tg\delta_m$. Проведена сортировка полученных результатов измерений по принципу: отобраны все случаи, в которых встречаются значения КЧ равные или более 0,05 мгКОН/г и/или $tg\delta_m$, равные или превышающие 6%. Полученные результаты представлены на рисунке 1. Здесь штриховкой обозначены области, в которых располагается максимальное количество точек: проб масла, для которых наиболее эффективными были признаны регенерационные работы, имеющие расход силикагеля не менее 5% от массы обрабатываемого масла.

При этом нижняя граница заштрихованной области на оси ординат определена установленными в ходе исследований [1] пороговыми значениями показателей качества масла для КЧ > 0,04 мгКОН/г (рисунок 1а) и $tg\delta_m > 6\%$ (рисунок 1б).

На рисунке 2 представлена кривая роста затрат, отражающая изменение стоимости работ от доли утраченного ресурса масла. При построении кривой принято: затраты W_{m1} условно равны 1, затраты W_{m2} условно равны 2 и затраты W_{m3} условно равны 3.

Из рисунка 2 следует, что интервал значений доли утраченного ресурса масла от 0,25 до 0,45 будет оптимальным с точки зрения затрат на проведение профилактических работ по предотвращению процессов глубокого старения масел. При этом доля утраченного ресурса определялась исходя из следующих условий. Если условно принять полностью израсходованный ресурс масла равным 100% (доля, равная 1), то:

– израсходованный ресурс равным 50% (доля 0,5) будет во всех случаях, когда после окисления проб эксплуатационных масел в лабораторных

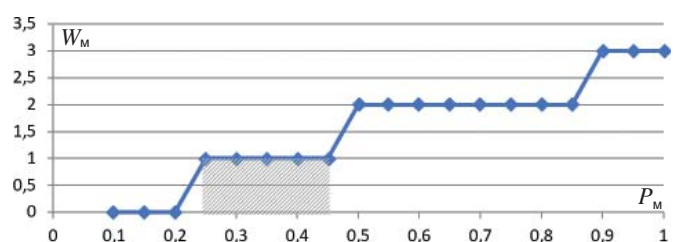


Рис. 2. Динамика изменения затрат на восстановление ресурса масла в зависимости от степени его старения / доли утраченного ресурса

условиях образовывался потенциальный осадок (продукты глубокого окисления);

- израсходованный ресурс равным 25% (доля 0,25) будет во всех случаях, когда после окисления проб эксплуатационных масел в лабораторных условиях потенциальный осадок отсутствует, однако при этом имеет место содержание кислых соединений, образованных после окисления сверх допустимой нормы;
- во всех остальных случаях ресурс будет признан не израсходованным.

В качестве ключевого критерия, позволяющего оценить эффективность проведения работ по восстановлению ресурса масла, принято следующее утверждение [2, 3]: положительным результатом определены все случаи, когда обработанная проба трансформаторного масла была стабильнее исходной не менее чем в два раза по показателям КЧОМ и Осадок.

В ходе научных исследований при реализации специальных лабораторных экспериментов была проведена оценка эффективности предлагаемых мер для реальных объектов с последующим отбором наиболее оптимальных, по итогам которых определен минимальный объем регенерационных работ для различных состояний масел.

Для определения набора мероприятий по восстановлению жидкого диэлектрика был разработан «Метод экспериментального определения ресурса жидкого диэлектрика и мер по его восстановлению» (далее — Метод) [4]. Метод предназначен для качественной оценки старения минерального эксплуатационного трансформаторного масла, а также определения оптимальных мер по его восстановлению в условиях электрохозяйства для силовых трансформаторов (автотрансформаторов) напряжением 35–220 кВ, залитых маслами I группы (низкой стабильности [5]), II группы (средней стабильности [5]) или их смесью, а также смесью масел III группы (высокой стабильности [5]) с группами I и II.

Сущность метода в части качественной оценки ресурса масла заключается в его форсированном окислении в лабораторных условиях при заданных параметрах, в части определения мер по его восстановлению — в проведении лабораторного эксперимента по моделированию процесса восстановления масла по установленным правилам и определения оптимального решения на основе комплексного рассмотрения полученных результатов эксперимента.

Для повышения точности и достоверности оценки технического состояния трансформаторов (приоритетно со сверхнормативным сроком эксплуатации) в ряде случаев помимо базового набора параметров, определяющих индекс технического состояния функционального узла изоляционной системы [6], необходима дополнительная информация, уточняющая техническое состояние обследуемого объекта и по-

зволяющая назначить объемы работ по ТОиР. Настоящий метод ориентирован на проведение глубокого анализа с подбором оптимального взаимодействия, направленного на снижение операционных расходов и повышение надежности трансформатора.

ПРОГРАММНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «СОВЕТНИК ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ ТРАНСФОРМАТОРОВ»

Алгоритмизация разработанного Метода позволила сформировать программно-аналитический комплекс «Советник по обслуживанию трансформаторов» (СпОТ), необходимый для принятия решений в ходе реализации Метода (рисунок 3).

СпОТ позволяет оператору на основе проводимых измерений согласно предлагаемых подсказок выбрать верный алгоритм действий, а также оптимальные рекомендации по ТОиР.

В основу СпОТ заложены:

- разработанный «Алгоритм управления качеством жидкого диэлектрика в трансформаторном оборудовании» (далее — Алгоритм);
- разработанная по результатам исследований «Матрица решений по организации специального лабораторного эксперимента». Матрица построена с учетом многообразия затрат на проведение вышеуказанных регенерационных работ и решения задач моделирования: выбора наиболее оптимального варианта по качеству и стоимости работ в зависимости от исходного состояния эксплуатационного масла трансформатора. При обнаружении наличия растворимого шлама в эксплуатационном масле установлено, что масло имеет значительную степень старения с высоким риском выпадения осадков в маслосистеме, что может вызвать резкое снижение надежности работы трансформатора. Соответственно, масла, в которых обнаружен шлам, не рекомендуются к использованию по прямому назначению после регенерации указанными методами, проведение экспериментальных работ в данных маслах представляется нецелесообразным;
- разработанная по результатам исследований «Матрица оценки результатов экспериментальных работ по подбору оптимальных мер для



Рис. 3. Окно со сведениями о программе

восстановления качества трансформаторного масла».

По итогам реализации метода экспериментального определения ресурса жидкого диэлектрика и мер по его восстановлению проводится комплексная оценка результатов, согласно которой определяется эффективность подбираемых мер по отношению к базовому замеру, а также формируются рекомендации по ТОиР с учетом требований таблицы 2 [7].

В совокупности, разработанные Метод, Алгоритм и СПОТ позволяют определить оптимальный набор мероприятий, необходимый для поддержания качества масла в удовлетворительном состоянии.

ВЫВОДЫ

1. Для решения задачи подбора оптимальных мер по регенерации масла в условиях энергопроизводства определены возможные комбинации профилактических работ.

По результатам исследований уточнен минимальный объем регенерационных работ для различных состояний масел.

2. Разработаны «Метод экспериментального определения ресурса жидкого диэлектрика и мер по его восстановлению», «Алгоритм управления качеством

Табл. 2. Требования к качеству эксплуатационных масел, залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–220 кВ, применяемых при планировании и реализации экспериментальных работ

Наименование показателя	Удовлетворительный результат измерения	Область «риска»	Неудовлетворительные результаты измерения
Кислотное число, мгКОН/г	< 0,05	0,05–0,15	> 0,15
Водорастворимые кислоты и щелочи, мгКОН/г	pH ≥ 5,5	pH ≥ 5,5	–
	< 0,014	≥ 0,014	–
Тангенс угла диэлектрических потерь масла при 90°С, %	< 6	6–12	> 12
Содержание антиокислительной присадки, % массы	> 0,1	0,1–0,05	< 0,05
Общее содержание шлама, %	отсутствие (< 0,005)	–	присутствие (≥ 0,005)
Стабильность против окисления:			
Кислотное число окисленного масла, мгКОН/г	< 0,1	–	> 0,1
Массовая доля осадка, %	< 0,01	–	> 0,01
Условия процесса окисления	1. Расход кислорода — 200 мл/мин. 2. Температура термостатирования — 120°С. 3. Время термостатирования — 14 часов. 4. Катализатор — медная пластина.		

жидкого диэлектрика в трансформаторном оборудовании», программно-аналитический комплекс «Советник по обслуживанию трансформаторов», позволяющие определить перечень работ по ТОиР для поддержания качества масла в удовлетворительном состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высогорец С.П. Обеспечение надежности силовых трансформаторов на основе управления качеством масла. СПб.: ПЭИПК, 2015. 117 с.
2. Аптов И.С., Хомяков М.В. Химические материалы в электрохозяйстве. М.: Энергия, 1969. 280 с.
3. Брай И.В. Регенерация трансформаторных масел. М.: Химия, 1972. 168 с.
4. Высогорец С.П. Методы диагностического обследования маслосна-

- полненного оборудования. Книга 2: Методика определение ресурса трансформаторных масел / Под общ. ред. А.И. Таджибаева. СПб.: ПЭИПК, 2012. 26 с.
5. РД 34.43.105-89. Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел. М.: Технорматив, 2007. 51с.
6. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических стан-

ций и электрических сетей. Приказ Минэнерго РФ от 26.07.2017 г. № 676. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456088008>.

7. СТО 01.Б7.02-2017. Техническое диагностирование маслоснаполненного оборудования по результатам анализа трансформаторного масла. Стандарт организации. Утв. приказом ПАО «МРСК Северо-Запада» от 15.01.2018 №16. СПб, 2018. 76 с.

REFERENCES

1. Vysogorotets S.P. Provision of power transformer reliability based on oil quality control. *Sankt-Peterburg, PEIPK* [Saint-Petersburg Power Engineering Institute], 2015, 117 p.
2. Aptov I.S., Khomyakov M.V. Chemical materials in electrical facilities. Moscow, *Energiya* [Power], 1969, 280 p.
3. Bray I.V. Regeneration of transformer oils. Moscow, *Khimiya* [Chemicals], 1972, 168 p.

4. Vysogorotets S.P. Methods of diagnostic examination of the oil-filled equipment. Book 2: Methods of transformer oil resource determination / Under general editorship of A.I. Tadzhibayev. *Sankt-Peterburg, PEIPK* [Saint-Petersburg Power Engineering Institute], 2012, 26 p.
5. Regulatory Directive 34.43.105-89. Guidelines for transformer oil application. M: Tekhnormativ, 2007, 51 p.
6. Technique for technical condition estimation of the main equipment and

power transmission lines of electrical stations and networks. Order of Ministry of Energy of RF dated 26.07.2017, № 676. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456088008>. (in Russian)

7. Company Standard 01.Б7.02-2017. Technical diagnosis of the oil-filled equipment based on transformer oil analysis. Company standard confirmed by PJSC "IDGC of North-West" dated 15.01.2018 №16. Saint-Petersburg, 2018, 76 p.