

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО КИСЛОТНОМУ ЧИСЛУ

Соколов Леонид Юрьевич, sokolov.l.y@mail.ru
Попов Андрей Николаевич, popov.a.n@mail.altstu.ru

Аннотация:

На сегодняшний день все чаще возникает вопрос об улучшении надежности того или иного оборудования в различных отраслях промышленности. Энергетическая отрасль – это одна из основных отраслей, без которой невозможна работа заводов, фабрик, кустов скважин по нефти- и газодобыче, школ, больниц и т.д.

Ключевые слова: анализ трансформаторного масла, надежность силового масляного трансформатора, масло гидрокрекинга, химический анализ масла ГК, кислотное число.

В настоящее время в России, большинство всех силовых масляных трансформаторов выработали свой ресурс. Исходя из статистики, следует, что основная часть отказов не связана с окончанием максимального срока службы силового трансформатора, а связана с возникновением различных дефектов внутри трансформатора. [1].

Трансформатор (от лат. transformare — «превращать, преобразовывать») – электромагнитное устройство, работа которого основана на явлении электромагнитной индукции, предназначенное для трансформирования переменного электрического тока одного напряжения и частоты в электрический ток другого напряжения и той же частоты. [6].

Магнитное поле создается вокруг проводника с током. В середине XIX века была обнаружена связь магнитного поля с током, исследование которой привело к многочисленным попыткам возбудить ток в контуре с помощью магнитного поля. Эта фундаментальная задача была блестяще решена в 1831 г. английским физиком М. Фарадеем, открывшим явление электромагнитной индукции.

Электромагнитная индукция (1) — явление возникновения электрического тока, электрического поля или электрической поляризации при изменении во времени магнитного поля или при движении материальной среды в магнитном поле.

Знак «минус» в формуле показывает направление индукционного тока, согласно правилу Ленца:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (1)$$

где ε – электродвижущая сила, действующая вдоль произвольного контура, $\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS}$ – магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром.

Индукционный ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре, принимает такое направление, что он ослабляет первопричину своего возникновения.

Основное отличие силовых масляных трансформаторов – это использование бумажно-масляной изоляции, в которых в качестве охлаждения используются циркулирующие по радиаторам масло, а также как диэлектрика. Также масло имеет свободное дыхание за счет воздухоосушительного фильтра, в котором находится силикагель и имеет гидрозатвор. Отсюда возникает необходимость вести контроль параметров масла марки ГК, указанных в таблице 1.

Таблица 1 – Типичные физико-химические показатели трансформаторного масла марки ГК

Показатель	Метод испытаний	Величина
Кинематическая вязкость при 50 °С, мм ² /с при минус 30 °С, мм ² /с	ГОСТ 33	7 771
Кислотное число, мг КОН/г	ГОСТ 11362	0,003
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С, %	ГОСТ 6581	0,1
Напряжение пробоя после подготовки пробы, кВ	ГОСТ 6581	70
Стабильность против окисления - массовая доля осадка, %	ГОСТ 981	0,007
Температура вспышки в открытом тигле, °С	ГОСТ 4333	141
Температура застывания, °С	ГОСТ 20287	-48
Стабильность против окисления - массовая доля осадка, %	ГОСТ 981	0,007
Температура вспышки в открытом тигле, °С	ГОСТ 4333	141
Температура застывания, °С	ГОСТ 20287	-48

Трансформаторное масло ГК – высококачественное специальное изоляционное масло. Вырабатывается из малосернистого минерального масла с применением процесса гидрокрекинга, и содержит 0,25-0,40% масс. ингибитора окисления. Данное масло отличается длительным сроком службы, кроме того, продукт неагрессивен по отношению к большинству изолирующих материалов.

Трансформаторное масло ГК предназначено для заливки силовых трансформаторов, реакторного оборудования, а также масляных выключателей с целью изоляции токонесущих частей оборудования, отвода тепла и для быстрого гашения электрической дуги в выключателях. Масло является газовыделяющим, что позволяет обнаруживать водород, генерируемый на ранней стадии развития неисправности трансформатора.

В ходе эксплуатации трансформатора масло, используемое для охлаждения и изоляции обмоток, подвергается испытаниям:

- химический анализ (хроматографический анализ);
- анализ на влагосодержание (диэлектрический пробой, ГОСТ 6581).

Хроматографический анализ позволяет определить содержание в масле растворенных: углекислого газа, водорода, окиси углерода, а также метана, этана, ацетилена и этилена, азота и кислорода. Чаще всего анализируют наличие этилена, ацетилена и углекислого газа.

Трансформаторное масло, в частности используется, как диэлектрик. Диэлектрик (изолятор) (от др.-греч. διὰ «через; отдельно», и др.-греч. ἤλεκτρον — «янтарь») – это вещество (материал), относительно плохо проводящее электрический ток. Электрические свойства диэлектриков определяются их способностью к поляризации во внешнем электрическом поле. Также трансформаторное масло используется для отвода тепла от рабочей зоны трансформатора к радиаторам. Процесс обмена тепла, которое выделяется входе работы трансформатора, можно описать в соответствии со вторым законом термодинамики, а именно процессом теплообмена — разность температур более и менее нагретого тел.

Когда диэлектрический материал помещается в электрическое поле, электрические заряды не проходят через материал, как в электрическом проводнике, так как в диэлектрике нет свободных электронов, которые могут дрейфовать через материал, но вместо этого они лишь незначительно смещаются от своих средних положений равновесия, тем самым вызывая диэлектрическую поляризацию.

При проверке на диэлектрический пробой масла берется прибор АИД-70 (рисунок 1), масло заливается в фарфоровую ванночку, где есть встроенные электроды и регулятором постепенно повышается напряжение, измеряемое в кВ, при пробое срабатывает защита на отключение, показания фиксируются с киловольтметра прибора.



Рисунок 1 - Аппарат испытательный АИД-70

Аппарат типа АИД-70 предназначен для испытания изоляции силовых кабелей и твердых диэлектриков выпрямленным электрическим напряжением, а также для испытания твердых диэлектриков синусоидальным электрическим напряжением частотой 50 или 60 Гц.

Электрический пробой или пробой диэлектрика – это процесс, который происходит, когда электроизоляционный материал, подвергнутый достаточно высокому напряжению, внезапно становится электрическим проводником и по нему течет электрический ток.

Вышеописанные испытания прописаны в действующих ПУЭ, ПТЭЭП, а также регламентировано нормами испытаний электрооборудования, заводскими

инструкциями на аппараты и СО 153-34.43.105-89 «Методические указаниями по эксплуатации трансформаторных масел».

Определение свойств масла ГК проводится по стандартизированным методикам, в соответствии с действующими ГОСТ-Р 54331-2011 и указаниями Международной электротехнической комиссии (МЭК 60296) [2, 3, 4].

На данный момент существует возможность отслеживать содержание гидроксида калия в составе масла. Показатель окисления или, иными словами, кислотное число является одним из важных показателей. Поскольку при появлении кислот возникает большая вероятность повреждения обмоток изоляции. Кислотное число отражает количество гидроксида калия, необходимого для удаления окислов в 1 грамме продукта.

Кислотное число для трансформаторного масла определяется количественным содержанием гидроксида калия в составе. Для определения содержания предполагается использовать один из датчиков концентрации и величины рН, например:

– анализатор жидкости кондуктометрический АЖК-3101 М (рисунок 2) – одноканальное средство измерения, предназначенное для определения количественного содержания кислот (H_2SO_4 , HCl , HNO_3), щелочей ($NaOH$, KOH) и солей ($NaCl$, HN_4NO_3 , Na_2CO_3), в исследуемой среде, в процентном выражении при максимальной температуре области измерений до $95\text{ }^{\circ}C$. Выходной сигнал 4, 20 мА, либо дискретный.



Рисунок 2 – Кондуктометр АЖК-3101 М

– кондуктометр-трансмиситтер с контактным датчиком АЖК-3110 (рисунок 3) – моноблочное одноканальное средство измерения, предназначенное для определения удельной электрической проводимости растворов кислот (H_2SO_4 , HCl , HNO_3), щелочей ($NaOH$, KOH) и солей ($NaCl$) в мкСм/см или в процентном выражении при температуре измеряемой среды до $95\text{ }^{\circ}C$. Выходной сигнал аналоговый 4, 20 мА, либо цифровой – интерфейс RS-485, протокол ModBus [5].

Перед установкой необходимо собрать лабораторный стенд и проверить работоспособность установки, а также корректность отображаемых данных. После проведения необходимых тестов устройство можно установить либо в одно из штатных отверстий на корпусе масляного силового трансформатора, либо

просверлить дополнительное, но так чтобы отверстие и данный прибор не мешал работе трансформатора.



Рисунок 3 – кондуктометр-трансмиситтер с датчиком АЖК-3110

После того, как устройство будет установлено, его нужно подключить к мини-компьютеру, например на базе Raspberry Pi 5. Также нужно написать алгоритм, по которому системой будет высчитываться кислотный показатель, данные можно отправлять на ПК, вывести на дисплей напрямую с Raspberry или отправить диспетчеру, через ПК или, опять же напрямую с Raspberry.

Кислотный показатель свидетельствует о наличии каких-либо кислых веществ. Увеличение показателя кислотности указывает на окисление масла, следствием чего является эрозия конструкционных элементов, а также ухудшение свойств бумажной изоляции.

Трансформатор устанавливается под уклоном 2° в противоположную сторону от газового реле, это делается для того, чтобы газы, которые возникают при кипении, с повышением температуры верхних слоев масла более 95°C , что является следствием неисправности низковольтной или высоковольтной обмоток трансформатора, с потоками масла устремлялись в сторону расширительного бочка. Если на трансформаторе установлена газовая защита, то при кипении повышается уровень масла. Масло по маслопроводу устремляется в газовое реле, далее трансформатор отключается по газовой защите.

Трансформатор является газовыделяющим электрооборудованием, где на ранних стадиях развития неисправностей трансформатора генерируется газ водород, наличие которого можно регистрировать различными способами, например использовать датчик газа.

Основная часть газов скапливается в расширительном бочке, что дает возможность внутри расширительного бочка установить датчик газа, например, датчик водорода MQ-8 (рисунок 4).



Рисунок 4 - Датчик водорода MQ-8

Arduino, которая является модульной платформой, что дает возможность собрать небольшой прибор с датчиком газа, микроконтроллером для обработки данных, получаемых с датчика, и небольшим дисплеем для вывода информации о содержании газа, либо через кабель подключить Arduino к ПК, а уже с ПК отправлять данные диспетчеру.

Чтобы улучшить качество измерений, можно воспользоваться расчетом случайной погрешностью. Для этого необходимо произвести несколько измерений подряд и через определенный промежуток времени, например, сами измерения проводить два раза в неделю, а промежуток времени между измерениями будет составлять 30 секунд, а количество 10 раз. Далее, воспользовавшись формулой для расчета случайной погрешности $\Delta x_{сл}$ (2), нужно воспользоваться формулой:

$$\Delta x_{сл} = t_{n,\alpha} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (d_i - d_{cp})^2}; \quad (2)$$

где $t_{n,\alpha}$ – коэффициент Стьюдента.

Таким образом, учитывая погрешность измерений, можно получить более точные данные. Чтобы максимально приблизить получаемые показатели к лабораторным, необходимо рассчитать абсолютную погрешность измерений. Абсолютная погрешность Δx (3) определяется из случайной и систематической погрешностей:

$$\Delta x = \Delta x_{сл} + \Delta x_{сист}. \quad (3)$$

Систематическая погрешность $\Delta x_{сист}$ (4) определяется через класс точности прибора:

$$\Delta x_{сист} = \frac{x_{пред} \cdot E_x}{100\%}, \quad (4)$$

где $x_{пред}$ – максимальное значение по шкале данного прибора, E_x – класс точности прибора.

Погрешность измерения является характеристикой точности измерения, позволяющее более точно определить значение измеряемой величины,

поскольку нет приборов, которые способны измерять какую-либо величину без погрешности.

Данные способ поможет увеличить срок службы обмоток трансформатора, так как трансформаторное масло можно будет своевременно заменить или отправить на регенерацию и сушку, как только изменится один из исследуемых показателей в любую сторону от нормы. Так как от качества масла зависит работоспособность трансформатора.

По показателю кислотного числа можно судить о степени окисления масла, чем больше окислов в масле, тем сильнее и быстрее разрушается изоляция обмоток трансформатора. И как следствие высокий риск возникновения КЗ, а отсюда повышение температуры масла. Так же при разрушении (старении) изоляции может возникнуть междуфазное короткое замыкание, в следствии чего может произойти выброс масла с разрушением стеклянной мембраны выхлопной трубы.

Список используемой литературы

1. Тюрюмина, А. В. Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов в зарубежных странах / А. В. Тюрюмина, А. П. Батрак, В. С. Секацкий. – Текст: электронный // Молодой ученый. – 2016. – № 8 (112). – С. 321-325. – URL: <https://moluch.ru/archive/112/28760/>. – Режим доступа: свободный.
2. СО 153-34.43.105-89. Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел. – Текст: электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006947/>. – Режим доступа: свободный.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Текст: электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901839683/>. – Режим доступа: свободный.
4. Правила устройства электроустановок. – Текст: электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030216/>. – Режим доступа: свободный.
5. Датчики концентрации и величины pH. – Текст: электронный. – Загл. с экрана. – URL: https://studopedia.ru/9_81433_datchiki-kontsentratsii-i-velichini-ph.html/. – Режим доступа: свободный.
6. Трансформатор. – Текст: электронный. – Свободная энциклопедия Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Трансформатор>. – Режим доступа: свободный.

Информация об авторах

Соколов Л. Ю. – студент группы 8Э(з)-21, Попов А. Н. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», РФ, Алтайский край, г. Барнаул.

Ссылка для цитирования

Соколов, Л. Ю. Диагностирование силового масляного трансформатора по кислотному числу / Л. Ю. Соколов, А. Н. Попов // Энерджинет. 2023. № 1. URL: <http://nopak.ru/231-710> (дата обращения: 18.11.2023).

