**Пример оформления решения задачи № 4.**

**Вариант № …..**

**Задача № 4.** **«Определение состояния маслонаполненного электротехнического оборудования по результатам хроматографического анализа газов растворённых в трансформаторном масле (ХАРГ)»**

**Теория вопроса:**

**Раздел № 1. Общие понятия.**

В процессе эксплуатации силовых трансформаторов трансформаторное масло выполняет функции диэлектрика и охлаждающей среды. Но у трансформаторного масла есть еще одна важная функция - оно является диагностической средой. Большинство развивающихся дефектов, приводящих в дальнейшем к повреждению оборудования, может быть своевременно выявлено контролем состояния трансформаторного масла. Развитие таких дефектов, как локальные перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции остова, разряды в масле, искрение в контактных соединениях, загрязнение и увлажнение изоляции, попадание воздуха, окисление и старение самого масла и твердой изоляции в различной мере сказываются на изменении свойств трансформаторного масла. Таким образом, не вскрывая силового трансформатора можно чётко определить его техническое состояние. Физико-химические показателям трансформаторного масла, которые используются для оценки состояния трансформаторов в эксплуатации, относятся: кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, влагосодержание, газосодержание масла

***Хроматографический анализ газов****,* ***растворенных в масле (ХАРГ)****,* обладает высокой чувствительностью к развивающимся дефектам в трансформаторе, связанных с такими факторами, как электрические разряды в изоляции и локальные перегревы. Применение анализа растворенных в масле газов основано на том, что при появлении местных нагревов или электрических разрядов масло и соприкасающаяся бумажная изоляция разлагаются, а образующиеся газообразные продукты растворяются в масле.

Основные (ключевые) газы - наиболее характерные для определенного вида дефекта:

*Дефекты электрического характера:*

***водород*** (H2), **-** частичные разряды, искровые и дуговые разряды;

***ацетилен* (**C2H2), **-** электрическая дуга, искровые разряды;

*Дефекты термического характера:*

***этилен*** (C2H4), **-** нагрев масла и бумажно-масляной изоляции выше 600°С;

***метан***(CH4),**-** нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур (400-600)°С или нагрев масла и бумажно-масляной изоляции, сопровождающийся разрядами;

***этан***(C2H6),**-** нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур (300-400)°С;

***оксид и диоксид углерода***(CO; СO2) **-** старение и увлажнение масла и/или твердой изоляции;

***диоксид углерода*** (СO2) **-** нагрев твердой изоляции.

***Содержание фурановых производных***является показателем, который косвенно может свидетельствовать о деструкции бумажной изоляции. Термолиз, окисление и гидролиз изоляции, вызывая частичное разрушение макромолекул целлюлозы, приводят к образованию компонентов фуранового ряда, которые выделяются в трансформаторное масло.

Следует отметить, что такие физико-химические показатели, как кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, влагосодержание и газосодержание масла являются традиционными в практике эксплуатации силовых трансформаторов на протяжении многих лет, а различные аспекты их применения достаточно подробно описаны в многочисленной литературе. Поэтому в дальнейшем остановимся на более подробном рассмотрении применения хроматографического анализа газов, растворенных в масле, и показателей оценки состояния бумажной изоляции маслонаполненного оборудования. В таблице № 1 приведены основные методики ХАРГ.

**Таблица 1.**

**Отношения пар характерных газов основных существующих методик ХАРГ.**

|  |  |
| --- | --- |
| Методика | Используемые отношения пар характерных газов |
| Дорненбурга | СН2/Н2,С2Н2/ С2Н4, С2Н6/ С2Н2, С2Н2// СН4 |
| Мюллера | СН4/Н2, С2Н4/С2Н6, СО/СО2, С2Н6/С2Н2 |
| Роджерса | СН4/Н2, С2Н2/С2Н4, С2Н4/С2Н6, С2Н6/СН4 |
| МЭК | CH4/H2,C2H2/C2H4,C2H4 /C2H6 |
| ВЭИ | СН4/Н2, С2Н4/СН4, С2Н6/СН4, С2Н2/С2Н4, С2Н6/С2Н2, С2Н4/С2Н6 |

По результатам ХАРГ оказалось, что наибольшую диагностическую ценность при определении характера развивающегося дефекта имеет методика МЭК (IЕС 60599), которая рекомендована к применению в энергетике Российской федерации. (Например, используется в Российской программе «Альбатрос»). С помощью ХАРГ в силовых трансформаторах можно обнаружить две группы дефектов:

*- перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции остова*,

*- электрические разряды в масле*

Для диагностики развивающихся дефектов в силовых трансформаторах используются следующие основные критерии:

1. критерий граничных концентраций Таблица № 2;
2. критерий отношения пар характерных газов Таблица № 3;

3. критерий скорости нарастания газов;

**Таблица № 2**

**Граничные концентрации растворенных в масле газов.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Концентрации газов, % об. | | | | | | |
| Оборудование | Н2 | СН4 | С2Н2 | С2Н4 | С2Н6 | CO | СO2 |
| Трансформаторы напряжением 110-500 кВ | 0,01 | 0,01 | 0,001 | 0,01 | 0,005 | 0,05\*  0,06 | 0,6(0,2)\*  0,8(0,4) |
| Трансформаторы напряжением 750 кВ | 0,003 | 0,002\* | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,05 | 0,40 |
| Реакторы напряжением  750 кВ | 0,01 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,05 | 0,40 |

Для СО - в числителе приведено значение для трансформаторов с азотной или пленочной защитами масла, в знаменателе - для трансформаторов со свободным дыханием. Для С02 - в числителе приведены значения для трансформаторов со свободным дыханием при сроке эксплуатации до 10 лет, в знаменателе - свыше 10 лет. В скобках приведены те же данные для трансформаторов с пленочной или азотной защитами масла.

**Раздел 2. Определение характера дефекта в силовом трансформаторе по отношению концентраций пар газов.**

Вид и характер развивающихся в трансформаторе дефектов определяется по отношению концентраций следующих газов: Н2, CH4, C2H2, С2Н4 и С2Н6.

При этом рекомендуется выполнять повторные измерения при получении результатов ХАРГ, в которых концентрация хотя бы одного газа (из пяти, перечисленных выше газов) была больше соответствующего граничного значения в 1,5 раза.

Вид развивающихся в трансформаторах дефектов (тепловой или электрический) можно ориентировочно определить по отношению концентраций пар из четырех газов: Н2, CH4, C2H2, С2Н4.

Условия прогнозирования "разряда":

C2H2 **/**С2Н4  ≥ 0,1 ( 1) и СН4 / Н2 ≤0,5 (2)

Условия прогнозирования "перегрева":

C2H2 /С2Н4  < 0,1 ( 3) и CH4 / Н2 > 0,5 (4)

Если при этом концентрацияСO **<** 0,05% об, то прогнозируется "перегрев масла", а если концентрация СО > 0,05% об - "перегрев твердой изоляции".

Условия прогнозирования "перегрева" и "разряда":

C2H2 /С2Н4  ≥ 0,1 ( 1) и CH4 / Н2 > 0,5 (4)

или

C2H2 /С2Н4  < 0,1 ( 1) и СН4 / Н2 ≤0,5 (2)

 Характер развивающихся в трансформаторах дефектов определяется в соответствии с таблицей 3 по отношению концентраций пар из пяти газов: Н2, CH4, C2H2, С2Н4 и С2Н6. Отношение СО2/СО дополнительно уточняет

характер дефектов, приведенных в таблице 3:

- если повреждением не затронута твердая изоляция, то

5≤СO2/СO≤13; (5)

- если повреждением затронута твердая изоляция, то

СO2/СО < 5 или СO2/СО > 13 (6)

При интерпретации полученных значений отношений СO2/СО необходимо учитывать влияние эксплуатационных факторов.

Следует иметь в виду, чтоСО2 и СО образуются в масле трансформаторов при нормальных рабочих температурах в результате естественного старения изоляции. Определение характера дефекта производится в соответстви с Таблицей № 3.

**Таблица 3.**

**Определение характера дефекта в трансформаторе по отношению концентраций пар газов.**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Характер прогнозируемогодефекта | Отношение концентраций характерных газов | | | Типичные примеры |
|  |  | С2Н2  С2Н4 | СН4  Н2 | С2Н4  С2Н6 |  |
| 1. | Нормально | <0,1 | 0,1-1 | <1 | Нормальное старение |
| 2. | Частичные разряды с низкой плотностью энергии | <0,1 | <0,1 | <1 | Разряды в заполненных газом полостях, образовавшихся вследствие не полной пропитки или влажности изоляции. |
| 3. | Частичные разряды с высокой плотностью энергии | 0,1-3 | <0,1 | <1 | То же, что и в п.2, но ведет к оставлению следа или пробою твердой изоляции. |
| 4. | Разряды малой мощности | >0,1 | 0,1-1 | 1-3 | Непрерывное искрение в масле между соединениями различных потенциалов или плавающего потенциала. Пробой масла между твердыми материалами. |
| 5. | Разряды большой мощности | 0,1-3 | 0,1-1 | >3 | Дуговые разряды; искрение; пробой масла между обмотками или катушками или между катушками на землю. |
| 6. | Термический дефект низкой температуры (<150°С) | <0,1 | 0,1-1 | 1-3 | Перегрев изолированного проводника. |
| 7. | Термический дефект в диапазоне низких температур (150-300°С) | <0,1 | >1 | <1 | Местный перегрев сердечника из-за концентрации потока. Возрастание температуры "горячей точки". |
| 8. | Термический дефект в диапазоне средних температур (300-700°С) | <0,1 | >1 | 1-3 | То же, что и в п.7, но при дальнейшем повышении температуры "горячей точки". |
| 9. | Термический дефект высокой температуры (>700°С ) | <0,1 | >1 | >3 | Горячая точка в сердечнике; перегрев меди из-за вихревых токов, плохих контактов; циркулирующие токи в сердечнике или баке. |

Содержание СО2 в масле зависит от срока работы трансформатора и способа защиты масла от окисления. В трансформаторах со "свободным дыханием" СO2 может попасть в масло из воздуха приблизительно до 0,03%об.

**Раздел 3. Критерий скорости нарастания газов в масле как степень опасности развивающегося дефекта для работающих трансформаторов.**

Изменение во времени концентрации отдельных газов в масле бездефектных трансформаторов может происходить под воздействием различных факторов, а также вследствие естественного старения изоляции.

Наличие развивающегося дефекта в трансформаторе, накладываясь на эти факторы, приводит, как правило, к заметному росту концентрации одного или нескольких газов.

1. Абсолютная скорость нарастания *i*-го газа определяется по формуле:

Vабсi = (Аmi – A (m – 1)) / Td (% об/мес.) (7)

Где Аmi; А (m-1)i - два последовательных измерения концентрации *i*-го газа, %об;

Td - периодичность диагностики, мес.;

1. Относительная скорость нарастания *i*-го газа определяется по формуле:

Vотнi = Vабсi / A (m – 1) \*100% (% в мес.) (8)

Степень опасности развития дефекта устанавливается по относительной скорости нарастания газа/газов. Если относительная скорость нарастания газа/газов превышает 10% в месяц, то это указывает на наличие быстро развивающегося дефекта в трансформаторе. В случае выявления дефекта повторные анализы следует провести через короткие промежутки времени с целью подтверждения наличия дефекта и определения скорости нарастания газов. Отбор проб масла для определения скорости нарастания газов рекомендуется проводить 1 раз в 7-10 дней в течение месяца для медленно развивающихся дефектов и через 2-3 дня - для быстро развивающихся дефектов.

**Раздел 4. Периодичность хроматографического контроля трансформаторных масел силовых трансформаторов.**

Рекомендуется производить ХАРГ в масле силовых трансформаторов со следующей периодичностью:

- трансформаторы напряжением 110 кВ мощностью менее 60 МВА и блочные трансформаторы собственных нужд - через 6 мес. после включения и далее не реже 1 раза в 6 мес.;

- трансформаторы напряжением 110 кВ мощностью 60 МВА и более, а также все трансформаторы 220 - 500 кВ в течение первых суток, через 1, 3 и 6 мес. после включения и далее - не реже 1 раз в 6 мес.

- трансформаторы напряжением 750 кВ - в течение первых суток, через 2 недели, 1, 3 и 6 месяцев после включения и далее - не реже 1 раза в 6 мес.

Периодичность ХАРГ для трансформаторов с развивающимися дефектами определяется динамикой изменения концентраций газов и продолжительностью развития дефектов. Все дефекты в зависимости от продолжительности развития можно подразделить на:

мгновенно развивающиеся дефекты - продолжительность развития которых имеет порядок от долей секунды до минут,

быстро развивающиеся дефекты - продолжительность развития которых имеет порядок от часов до недель,

медленно развивающиеся дефекты - продолжительность развития которых имеет порядок от месяцев до нескольких лет.

Методом хроматографического анализа растворенных в масле газов обнаруживаются медленно развивающиеся дефекты, возможно - быстро развивающиеся дефекты и нельзя определить мгновенно развивающиеся дефекты.

В случае выявления дефекта (Ai>Aгpi. и/или Vотнi > 10% в мес.) необходимо выполнить 2-3 повторных анализа растворенных газов (с периодичностью анализов, указанных в Разделе 3) для подтверждения вида и характера дефекта и принятия решения о дальнейшей эксплуатации трансформатора и/или выводе его из работы. Где Aгpi.- граничная концентрация *i*-го газа, %об; Ai - измеренное значение концентрации *i*-го газа, %об;

Минимальное время повторного отбора пробы масла (Tid) для проведения анализа можно рассчитать по формуле:

Тid = β \* МАi / Vабсi (9)

Где β - коэффициент кратности последовательных измерений (принимать β = 5); МАi - предел обнаружения в масле *i*-го газа, %об;

Предел обнаружения определяемых в масле газов (МАi) должен быть не выше:

- для водорода - 0,0005 %об.

- для метана, этилена, этана - 0,0001 %об.

- для ацетилена - 0,00005 %об.

- для оксида и диоксида углерода - 0,002 %об.

Раздел 5. Рекомендуемый порядок выполнения диагностики состояния трансформаторов по результатам ХАРГ.

(Методические указания для проведения лабораторных и контрольных работ по ХАРГ)

5.1. Если в результате анализа Аi<Aгpi и Vотнi < 10% в месяц, то нет данных, указывающих на наличие развивающегося дефекта в этом трансформаторе; контроль по ХАРГ проводится по графику - один раз в 6 мес.

5.2. Если в результате анализа Ai>Aгpi и Vотнi < 10%в месяц, то провести повторный отбор пробы масла и хроматографический анализ растворенных в нем газов для подтверждения результатов измерения и соответственно:

* Проанализировать условия предшествующей эксплуатации трансформатора с учетом факторов, влияющих на изменение концентраций газов в нормально работающих трансформаторах
* По критериям отношений концентраций пар характерных газов (Раздел 2, Таблица 3) установить вид и характер дефекта.
* Определить время повторного отбора пробы масла (Раздел 4, формула 9) и провести ХАРГ.

5.3 Если в результате выполнения операций по п. 5.2 скорость Vотнi растет, то трансформатор оставить на учащенном контроле с периодичностью ХАРГ, определяемой по формуле (9).

По данным последующих результатов ХАРГ выполнить мероприятия п.п. 5.1- 5.2 и определить Vотнi.

5.4 Если при выполнении анализа следующего отбора получается неравенство Ai>Aгpi и Vотнi > 10% в месяц**, а** скорость Vотнi продолжает увеличиваться (быстро развивающийся дефект), то планировать вывод трансформатора из работы.

5.5.Если же при выполнении анализа сохраняется неравенствоAi>Aгpi, a Vотнiостается постоянной и меньше 10% в мес., то для выяснения наличия повреждения рекомендуется провести дегазацию масла и выполнить несколько последовательных анализов.

5.6. Если после проведения дегазации концентрации газов меньше соответствующих граничных значений и не увеличиваются, то это свидетельствует об отсутствии повреждения. Такой трансформатор снимается с контроля, и дальнейшая периодичность отбора проб масла устанавливается один раз в 6 мес.

5.7. Если же после проведения дегазации масла вновь наблюдается рост концентрации растворенных газов при повторных ХАРГ со скоростью:

Vотнi>10% в месяц , то следует планировать вывод трансформатора из работы;

Vотнi <10% в месяц, то трансформатор остается в работе на учащенном контроле по АРГ.

5.8 Если Ai > Arpi и Vотнi ≤ 0**,** то следует проверить влияние эксплуатационных факторов согласно Раздела 4 и при их отсутствии можно предположить, что дефект развивается "вглубь" (выгорание контактов переключающих устройств, листов магнитопровода, металлических шпилек и т.д.). В этом случае необходимо планировать вывод трансформатора из работы.

Для РПН в навесных баках в целях определения возможного перетока газов вследствие нарушения герметичности между баками контактора и трансформатора необходимо отобрать одновременно пробу масла из баков контактора и трансформатора.

**Задача № 4**

**Исходные данные по Таблице № 1, вариант 01:**

При очередном ХАРГ по графику концентрации каждого из измеренных газов не превышали граничные значения (1-анализ), следующий анализ (2-анализ) был проведен через 6 мес. и показал превышение граничных значений по **СН4,С2Н4, С2Н2.** 3-анализ выполненный через 6 днейподтвердил результаты измерений 2- анализа, а 4-анализ (контрольный) зафиксировал даже некоторый рост концентраций этих газов. ***Для определения характера развивающегося дефекта производится расчёт отношений концентраций пар характерных газов, приведённых в Таблице № 1 Задачи № 4.***

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Концентрации растворённых в трансформаторном масле газов % об. | | | | | | | Примечание |
| Граничные концентрации растворённых в трансформаторном масле газов (110-500 кВ) | **СО2**  **0,8** | **СО**  **0,06** | **СН4**  **0,01** | **С2Н4**  **0,01** | **С2Н2**  **0,001** | **С2Н6**  **0,005** | **Н2**  **0,01** |  |
| Силовой трансформатор 110 кВ (1-й анализ, измерение) | 0,17 | 0,02 | 0,0045 | 0,005 | - | 0,002 | 0,008 |  |
| **-//-** (2-й анализ, измерение) | 0,16 | 0,02 | 0,017 | 0,05 | 0,003 | 0.0048 | 0,0075 |  |
| **-//-** (3-й анализ, измерение) | 0,15 | 0,02 | 0,016 | 0,048 | 0,003 | 0,0047 | 0,01 |  |
| **-//-** (4-й анализ) контрольный, измерение) | 0,15 | 0,02 | 0,018 | 0,051 | 0,0035 | 0,0053 | 0,01 |  |

Для СО – приведены данные для трансформаторов со свободным дыханием. Для С02 - приведены данные для трансформаторов со свободным дыханием при сроке эксплуатации свыше 10 лет.

**Решение задачи:**

1. Анализ условий эксплуатации силового трансформатора за предшествующий период показал, что отсутствуют факторы, которые могли бы вызвать рост концентраций углеводородных газов.

2.По вышеприведённой таблице концентрации растворённых в трансформаторном масле газов % об. **СН4**, **С2Н4**, **С2Н2. (**2-й анализ, измерение)превышают критические.

3.Вид развивающихся в трансформаторах дефектов (тепловой или электрический) можно ориентировочно определить по отношению концентраций пар из четырех газов: Н2, CH4, C2H2, С2Н4.

Условия прогнозирования "разряда":

C2H2 **/**С2Н4=0,003/0,05=0,06 ≥ 0,1 не соблюдается ( 1)

и СН4 / Н2=0,017/0,0075=2,27≤0,5 не соблюдается (2)

Условия прогнозирования "перегрева":

C2H2 /С2Н4 =0,06 < 0,1 соблюдается ( 3)

и CH4 / Н2 = 2,27> 0,5 соблюдается (4)

*По формулам (3) и (4) прогнозируется «перегрев», а если при этом концентрация**СO=0,002* ***<*** *0,05% об, то уточняется диагностика -"перегрев масла",*

4.Для конкретизации раэвивающегося дефекта определяем соотношение:

С2Н4/ С2Н6 = 0,05/0,0048 = 10,4>3 (см. Таблица № 3, п.9) и учитывая, что

C2H2 /С2Н4 = 0,06 < 0,1 и CH4 / Н2 = 2,27 > 1

*Прогнозируется вероятность термического дефекта высокой температуры (>700°С ). Горячая точка в сердечнике; перегрев меди из-за вихревых токов, плохих контактов; циркулирующие токи в сердечнике или баке.*

5. Определение состояния твёрдой изоляции.

Определяем по формуле (5) состояние твёрдой изоляции:

5≤СO2/СO≤13 ( 5 ); СО2/СО=0,16/0,02 = 8; 5 < 8 < 13.

Прогнозируется, что дефект не затрагивает твердую изоляцию (Раздел 2, формула 5).

6. Определяем абсолютную скорость нарастания *i*-го газа (**Н2)** по формуле(7)Раздел 3 :

Vабсi = [Ami – A(m-1)]/Td (7)

За период 6 дней нарастание произошло только **Н2** с 0,0075 до 0,01% об.

VабсH2 = (0,01 – 0,0075)/6\*30 = 0,0125% *об/мес*.

7. Определяем минимальную периодичность следующего отбора пробы масла Tid = β\*MAiH2 / Vабсi = 5\*5\* 10-4 / 0,0125 *=* 0,2 мес. т.е. 6 дней

(Раздел 4, формула 9).

**8. Заключение:** По данным анализов газов растворённых в трансформаторном масле трансформатора и ивыполненных расчётов подтвердилось наличие быстроразвивающегося дефекта термического характера, не затрагивающего твердую изоляцию – «термический дефект с высокой температурой >700°С» и относящийся к первой группе дефектов «Перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции остова» (Раздел 1).

**Выводы:** Трансформатор рекомендуется вывести в ремонт с вскрытием бака и проведением тщательного осмотра внутренних конструкций для определения возможности проведения восстановительного ремонта или утилизации.

**Литература:**

1.СО 34.45-51.300-97 Объём и нормы испытания электрооборудования. ( РД 34.45-51.300-97 с изменениями 1,2 2000г., 20005 г.)

2. РД 153-34.0-46.302-00 Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворённых в масле.

3.Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Зарегистрировано в Минюсте РФ 22 января 2003 г. № 4145. (ПТЭЭП) (вводятся с 01.07.2003 взамен ПТЭЭП, 5-е издание)

4. СО 153-34.20.501-2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Зарегистрировано в Минюсте РФ 20 июня 2003 г. Регистрационный № 4799 (взамен РД 34.20.501-9

**В конце каждой работы указывается Ф.И.О. исполнителя, ставится подпись и дата выполнения работы.**