**Дисциплина: Эксплуатация оборудования электрических сетей**

**Лекция № 15 «Хроматографический анализ растворённых в трансформаторном масле газов (ХАРГ)»**

Оглавление

[15.1 Ключевые газы - наиболее характерные для определённого вида дефекта 1](#_Toc421201533)

[15.2 Основные критерии развивающихся дефектов в силовых трансформаторах, критерий граничных концентраций газов 1](#_Toc421201534)

[15.3 Определение характера дефекта в трансформаторе по отношению концентраций пар газов, критерий скорости нарастания газов 2](#_Toc421201535)

[15.4 Периодичность проведения ХАРГ 5](#_Toc421201536)

[15.5 Физико-химические показатели оценки состояния бумажной изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации 6](#_Toc421201537)

# 15.1 Ключевые газы - наиболее характерные для определённого вида дефекта

С помощью ХАРГ в силовых трансформаторах можно обнаружить две группы дефектов:

- перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции остова,

- электрические разряды в масле.

При этом определяются концентрации семи газов: водорода (H2), метана (CH4), ацетилена(C2H2), этилена(C2H4), этана(C2H6), оксида углерода(CO) и диоксида углерода(CO2).

Группа 1. Перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции остова.

Основные газы: С2Н4 - в случае нагрева масла и бумажно-масляной изоляции выше 600°С или С2Н2 - в случае перегрева масла, вызванного дуговым разрядом. Характерными газами в обоих случаях являются: Н2, СН4 и С2Н6.

Группа 2. Электрические разряды в масле Электрические разряды в масле могут быть разрядами большой и малой мощности. При частичных разрядах основным газом является Н2, характерными газами с малым содержанием - СН4 и С2Н2. При искровых и дуговых разрядах основными газами являются Н2 или С2Н2; характерными газами с любым содержанием - СН4 и С2Н4. Превышение граничных концентраций СО и СO2 может свидетельствовать об ускоренном старении и/или увлажнении твёрдой изоляции. При перегревах твёрдой изоляции основным газом является диоксид углерода.

# 15.2 Основные критерии развивающихся дефектов в силовых трансформаторах, критерий граничных концентраций газов

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

Дефекты электрического характера:

водород - частичные разряды, искровые и дуговые разряды;

ацетилен - электрическая дуга, искрение;

Дефекты термического характера:

этилен - нагрев масла и бумажно-масляной изоляции выше 600°С;

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

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

оксид и диоксид углерода - старение и увлажнение масла и/или твёрдой изоляции;

диоксид углерода - нагрев твёрдой изоляции.

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

1. критерий граничных концентраций;
2. критерий скорости нарастания газов;
3. критерий отношения пар характерных газов.

Граничные концентрации растворенных в масле газов

Таблица № 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 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.

# 15.3 Определение характера дефекта в трансформаторе по отношению концентраций пар газов, критерий скорости нарастания газов

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

При этом рекомендуется использовать такие результаты АРГ, 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 четырёх газов: Н2, CH4, C2H2, С2Н4.

Условия прогнозирования "разряда":

 и 

Условия прогнозирования "перегрева":

 и 

Если при этом концентрацияСO**<** 0.05%об, то прогнозируется "перегрев масла", а если концентрация С0>0.05%об - "перегрев твёрдой изоляции".

Условия прогнозирования "перегрева" и "разряда":

 и 

или

 и 

Характер развивающихся в трансформаторах дефектов определяется согласно таблицы 2 по

Отношению концентраций пар из пяти газов: Н2, CH4, C2H2, С2Н4 и С2Н6. Отношение СО2/СО дополнительно уточняет характер дефектов, приведённых в таблице 2:

- если повреждением не затронута твёрдая изоляция, то

5≤СO2/СO≤13;

- если повреждением затронута твёрдая изоляция, то

СO2/СО < 5 или СO2/СО > 13

При интерпретации полученных значений отношений СO2/СО следует учитывать влияние эксплуатационных факторов п.3.

Следует иметь в виду, чтоСО2 и СО образуются в масле трансформаторов при нормальных рабочих температурах в результате естественного старения изоляции.

Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Характер прогнозируемого | Отношение концентраций характерных газов | | | Типичные примеры |
|  | дефекта | 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 ведёт к оставлению следа или пробою твёрдой 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 твёрдыми 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.

Критерий скорости нарастания газов в масле определяет 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:

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

Td -периодичность диагностики, мес.;

2. Относительная скорость нарастания i-го газа определяется по формуле: (%в мес.)

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.

# 15.4 Периодичность проведения ХАРГ

Хроматографический контроль должен осуществляться в следующие сроки:

- 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 АРГ 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>Arpi. и/или Vothi > 10% в мес.) необходимо выполнить 2-3 повторных анализа растворенных газов (с периодичностью анализов по п.п.6.6) для подтверждения вида и характера дефекта и принятия решения о дальнейшей эксплуатации трансформатора и/или выводе его из работы.

# 15.5 Физико-химические показатели оценки состояния бумажной изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации

В процессе эксплуатации силового трансформатора целлюлозная изоляция обмоток претерпевает деградацию, обусловленную развитием процессов деструкции и дегидратации, сопровождающихся ухудшением ее физико-химических свойств. Это проявляется, в первую очередь, в снижении механической прочности, окислении и образовании пор, хемосорбции кислых продуктов, образующихся в процессе старения трансформаторного масла, а также соединений металлов переменной валентности. Из-за достаточно сложной сетки параллельных и последовательных химических реакций, приводящих к деградации, и множественности факторов влияющих на кинетику их развития, не представляется возможным спрогнозировать с необходимой точностью степень износа изоляции обмоток путем анализа воздействий эксплуатационных факторов. Следует так же подчеркнуть, что электрическая прочность пропитанной маслом бумаги в результате ее старения существенно не изменяется, поскольку разрушенные участки целлюлозной изоляции немедленно заполняются маслом и в этой связи электрические показатели (сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь изоляции) не могут служить индикаторами старения. Оценка износа изоляции обмоток для каждого конкретного трансформатора должна включать непосредственный анализ физико-химического состояния целлюлозной изоляции и сопутствующих показателей, свидетельствующих о степени развития ее деградации. При этом необходимо иметь набор диагностических признаков, позволяющих не только объективно оценивать степень износа изоляции, но и принимать решение о возможности и целесообразности дальнейшей эксплуатации трансформатора.

Очевидно, что формирование множества диагностических признаков для оценки износа изоляции обмоток должно основываться на глубоком анализе физико-химических процессов, происходящих в целлюлозной изоляции под воздействием эксплуатационных факторов, среди которых следует выделить наиболее значимые, в смысле влияния их на скорость развития деградации. Таковыми являются: электрическое поле, температура, наличие воздуха (кислорода), наличие химически активных примесей (продуктов старения), наличие влаги.

К настоящему времени накоплен достаточно обширный фактический материал по влиянию на целлюлозу различных факторов, позволяющий выделить основные физико-химические процессы, приводящие к деградации изоляции обмоток в процессе эксплуатации силовых трансформаторов. Это:

* каталитический кислотный алкоголю;
* термическая деструкция и дегидратация;
* гидролиз целлюлозной изоляции;
* окислительная деструкция при воздействии кислых продуктов старения масла и содержащихся в нем окислителей.

Необходимо отметить, что существенное влияние на ускорение старения целлюлозной изоляции в среде жидкого диэлектрика оказывает электрическое поле. Оно усиливает воздействие практически всех физико-химических факторов, а также способствует адсорбции на поверхности целлюлозной изоляции продуктов старения трансформаторного масла и конструкционных материалов. Воздействие электрического поля ускоряет и другой важный процесс деградации целлюлозы - каталитический кислотный алко-голиз при действии гидроксилсодержащих углеводородов (спиртов) в присутствии низкомолекулярных органических кислот и других продуктов, образующихся в масле в процессе старения. Высокая значимость вклада этого процесса в деградацию изоляции обмоток обусловлена тем, что трансформаторное масло по своим физико-химическим характеристикам является лучшим пластификатором для целлюлозной изоляции, чем вода. Содержание в целлюлозной изоляции участков с сильным межмолекулярным взаимодействием, т.е. недоступных для масла полностью «кристаллических» областей, в общем случае, составляет не более 20% массы, и с увеличением времени эксплуатации будет уменьшаться под действием электрического поля и других эксплуатационных факторов (температуры, наличия химически активных примесей и др.). Гидролиз целлюлозной изоляции, протекающий параллельно с процессом кислотного алкоголиза, вносит, по сравнению с ним, существенно меньший вклад в общий процесс деградации, что обусловлено, в частности, достаточно низким содержанием влаги в изоляции трансформатора при нормальной его эксплуатации.

Важным фактором старения целлюлозной изоляции является ее термолиз, вызванный повышенной температурой. Под воздействием высокой температуры (более 90 °С) в целлюлозной изоляции, помимо ускорения перечисленных выше процессов, активизируются также процессы термической деградации - деструкция и дегидратация в аморфных и мезоморфных областях с образованием фурфурола и фурановых соединений.

Наряду с указанными процессами деградации, в процессе эксплуатации происходит окислительная деструкция целлюлозной изоляции, при воздействии кислых продуктов старения масла и содержащихся в них окислителей. Этот процесс приводит к образованию в макромолекулах полимера окислённых (главным образом карбоксильных) групп и нарушениям в ее структуре. Разрушение структуры целлюлозной изоляции и образование окислённых групп приводит к хемосорбции низкомолекулярных продуктов деструкции, а также кислых продуктов старения масла, ионов меди и железа, образующихся при коррозии металлических компонентов трансформатора в процессе его эксплуатации. Следует также отметить, что указанный процесс сопровождается выделением в масло оксида и диоксида углерода, а визуальным признаком каталитической термоокислительной деструкции целлюлозной изоляции обмоток является ее темно-коричневый цвет.

Рассмотренные процессы деградации целлюлозной изоляции обмоток (каталитический кислотный алкоголиз, термическая деструкция и дегидратация, гидролиз и окислительная деструкция) являются наиболее значимыми и приводят к снижению механической прочности бумаги и образованию воды.

Для оценки состояния бумажной изоляции обмоток предусмотрено два метода:

* по наличию фурановых соединений в масле;
* по степени полимеризации образцов изоляции.

Следует отметить, что деструкция целлюлозной изоляции в процессе эксплуатации трансформатора, может сопровождаться выделением в трансформаторное масло фурановых соединений: фурфурол (2-фурфурол), 5-гидроксиметилфурфурол, фурфуриловый спирт (2-фурфурилакогояь), 2-ацетилфуран, метилфурфурол (2 -метил-2 -фурфурол) и ряд других, основными из которых следует считать фурфурол и гидроксиметилфурфурол. При этом согласно полярности 80% фурфурола растворяется в изоляционном масле, а гидроксиметилфурфурол адсорбируется в большей степени на бумажной изоляции, чем переходит в трансформаторное масло.

Допустимое значение содержания фурановых соединений (ограничивающего область нормального состояния) установлено не более 0,0015 % массы (в том числе фурфурола 0,001 % массы).

Однако необходимо отметить, что выход этих соединений в процессе деградации изоляции не является стехиометрическим в отношении числа разрывов в «средней по массе» макромолекуле целлюлозы. Вследствие этого данный показатель не отражает реально степень деструкции целлюлозы. Наличие в масле фурановых соединений может свидетельствовать лишь о локально протекающем процессе деструкции, что не отражает динамику деградации целлюлозной изоляции. К тому же фурановые соединения являются лабильными и разлагаются в кислой среде с образованием продуктов нефуранового типа. Кроме того, образующиеся фурановые соединения (при наличии в трансформаторе термосифонного фильтра) адсорбируются на силикагеле и распадаются в кислой среды, что необходимо учитывать в эксплуатации.

Объективным показателем, позволяющим оценивать степень износа изоляции обмоток, является степень полимеризации, прямо характеризующая глубину ее физико-химического разрушения в процессе эксплуатации. При этом снижение степени полимеризации имеет монотонную зависимость и отражает монотонное уменьшение механической прочности изоляции, что определяет детерминированную диагностическую ценность использования данного показателя.

Как указывалось выше, в соответствии с РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования» для оценки состояния бумажной изоляции обмоток силовых трансформаторов предусмотрено измерение степени полимеризации образцов этой изоляции. При этом указывается, что ресурс бумажной изоляции обмоток считается исчерпанным при снижении значения степени полимеризации до 250 единиц.

Следует подчеркнуть, что для объективной оценки износа изоляции обмоток трансформатора необходимо проводить измерение степени полимеризации образца витковой изоляции, отобранной в одной из верхних катушек**.** Отбор образца витковой изоляции может быть выполнен на отключённом трансформаторе, как при капитальном ремонте, так ипри осуществлении подсливамасла через люки. Представительность заложенного в трансформатор образца целлюлозной изоляции, а также образцов барьерной изоляции в отношении достигнутого уровня деструкции изоляции обмоток не обеспечивается в полной мере, поскольку такие образцы расположены в баке трансформатора в условиях, не отвечающих наиболее нагретой зоне.

В отношении деструкции витковой изоляции обмоток необходимо отметить, что достижение значения 250 ед. может оцениваться как не менее чем 4-кратное снижение механической прочности изоляции в сравнении **с** исходной. Это, в свою очередь, резко повышает риск возникновения витковых замыканий и повреждения трансформатора при возникновении механических усилий, в первую очередь при протекании сквозных токов коротких замыканий.

Значимость процесса дегидратации напрямую связана со степенью износа бумажной изоляции обмоток. Если оценка выхода воды из бумаги, имеющей степень полимеризации более 300 ед., составляет порядка 10-3- 10-2 % массы ине оказывает существенного влияния на обеспечение работоспособности изоляции трансформатора, то при достижении значений степени полимеризации ниже 250 ед. выход воды из-за дегидратации может составлять более 6% массы, что приводит к снижению электрической прочности изоляции. Измерения степени полимеризации для получения объективной оценки износа изоляции обмоток силовых трансформаторов необходимо проводить посредствамопределения вязкостных характеристик растворов целлюлозной изоляции в кадмийэтилендиаминовомкомплексе. Это позволяет обеспечить отсутствие значимых деструктивных изменений в испытуемых образцах целлюлозы, в том числе и окислённых. В то же время применение других растворителей, как правило, вызывает химическую деструкцию целлюлозы. Проведение анализа степени полимеризации изоляции путем перевода ее в эфирыможет привести к завышенным значениям показателя вследствие растворения низкомолекулярной фракции и, как следствие, к ошибочным выводам.