**2. Общие требования и свойства трансформаторных масел**

Электроизоляционные свойства масел определяются в основном тангенсом угла диэлектрических потерь. Диэлектрическая прочность трансформаторных масел в основном определяется наличием волокон и воды, поэтому механические примеси и вода в маслах должны полностью отсутствовать. Низкая температура застывания масел (-45 °С и ниже) необходима для сохранения их подвижности в условиях низких температур. Для обеспечения эффективного отвода тепла трансформаторные масла должны обладать наименьшей вязкостью при температуре вспышки не ниже 95, 125, 135 и 150°С для разных марок.

Наиболее важное свойство трансформаторных масел — стабильность против окисления, т.е. способность масла сохранять параметры при длительной работе. В России все сорта применяемых трансформаторных масел ингибированы антиокислительной присадкой — 2,6-дитретичным бутилпаракрезолом (известным также под названиями ионол, агидол-1 и др.). Эффективность присадки основана на ее способности взаимодействовать с активными пероксидными радикалами, которые образуются при цепной реакции окисления углеводородов и являются основными ее носителями. Трансформаторные масла, ингибированные ионолом, окисляются, как правило, с ярко выраженным индукционным периодом.

В первый период масла, восприимчивые к присадкам, окисляются крайне медленно, так как все зарождающиеся в объеме масла цепи окисления обрываются ингибитором окисления. После истощения присадки масло окисляется со скоростью, близкой к скорости окисления базового масла. Действие присадки тем эффективнее, чем длительнее индукционный период окисления масла, и эта эффективность зависит от углеводородного состава масла и наличия примесей неуглеводородных соединений, промотирующих окисление масла (азотистых оснований, нафтеновых кислот, кислородсодержащих продуктов окисления масла).

Международная электротехническая комиссия разработала стандарт (Публикация 296) «Спецификация на свежие нефтяные изоляционные масла для трансформаторов и выключателей». Стандарт предусматривает три класса трансформаторных масел:

I — для южных районов (с температурой застывания не выше -30 °С),

II— для северных районов (с температурой застывания не выше -45°С),

III — для арктических районов (с температурой застывания -60 °С).

Буква А в обозначении класса указывает на то, что масло содержит ингибитор окисления, отсутствие буквы означает, что масло не ингибировано.

Трансформаторные масла работают в сравнительно «мягких» условиях. Температура верхних слоев масла в трансформаторах при кратковременных перегрузках не должна превышать 95 °С. Многие трансформаторы оборудованы пленочными диафрагмами или азотной защитой, изолирующими масло от кислорода воздуха. Образующиеся при окислении некоторые продукты (например, гидроперекиси, мыла металлов) являются сильными промоторами окисления масла. При удалении продуктов окисления срок службы масла увеличивается во много раз. Этой цели служат адсорберы, заполненные силикагелем, подключаемые к трансформаторам при эксплуатации. Срок службы трансформаторных масел в значительной мере зависит также от использования в оборудовании материалов, совместимых с маслом, т. е. не ускоряющих его старение и не содержащих нежелательных примесей. Для высококачественных сортов трансформаторных масел срок службы без замены может составлять 20–25 лет и более.

Перед заполнением электроаппаратов масло подвергают глубокой термовакуумной обработке. Согласно действующему РД 34.45-51.300–97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» концентрация воздуха в масле, заливаемом в трансформаторы с пленочной или азотной защитой, герметичные вводы и герметичные измерительные трансформаторы не должна превышать 0,5 % (при определении методом газовой хроматографии), а содержание воды 0,001 % (мас. доля). В силовые трансформаторы без пленочной защиты и негерметичные вводы допускается заливать масло с содержанием воды 0,0025 % (мас. доля). Содержание механических примесей, определяемое как класс чистоты, не должно быть хуже 11-го для оборудования напряжением до 220 кВ и хуже 9-го для оборудования напряжением выше 220 кВ. При этом показатели пробивного напряжения в зависимости от рабочего напряжения оборудования должны быть равны (кВ):

|  |  |
| --- | --- |
| Рабочее напряжение оборудования | Пробивное напряжение масла |
| До 15 (вкл.) | 30 |
| От 15 до 35 (вкл.) | 35 |
| От 60 до 150 (вкл.) | 55 |
| От 220 до 500 (вкл.) | 60 |
| 750 | 65 |

Непосредственно после заливки масла в оборудование допустимые значения пробивного напряжения на 5 кВ ниже, чем у масла до заливки. Допускается ухудшение класса чистоты на единицу и увеличение содержания воздуха на 0,5%.

В этом же РД указаны значения показателей масла, по которым состояние эксплуатационного масла оценивается как нормальное. При превышении этих значений должны быть приняты меры по восстановлению масла или устранению причины ухудшения показателя. Помимо этого даны значения показателей, при которых масло подлежит замене. В табл. 5.4 приведены требования к эксплуатационным маслам. Сорбенты в термосифонных и адсорбционных фильтрах трансформаторов согласно РД 34.20.501–95 «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации» следует заменять в трансформаторах мощностью свыше 630 кВ·А при кислотном числе масла более 0,1 мг КОН/г, а также при появлении в масле растворенного шлама, водорастворимых кислот и (или) повышении тангенса угла диэлектрических потерь выше эксплуатационной нормы. В трансформаторах мощностью до 630 кВ·А адсорбенты в фильтрах заменяют во время ремонта или при эксплуатации при ухудшении характеристик твердой изоляции. Содержание влаги в сорбенте перед загрузкой в фильтры не должно превышать 0,5 %.

**2.1. Назначение трансформаторного масла**

В большинстве трансформаторов, применяемых для энергоснабжения, используется трансформаторное масло, получаемое из нефти. И только часть распределительных трансформаторов заполняется негорючей синтетической жидкостью и часть выполняется в сухом виде, т. е. без заполнения жидким диэлектриком. Как правило, все трансформаторы номинального напряжения выше 35 кВ заполняются трансформаторным маслом. Масло в трансформаторе выполняет две функции: электрической изоляции и передачи тепла от активной части трансформатора к устройствам охлаждения. В качестве диэлектрика трансформаторное масло используется в трех основных типах изоляционных конструкций:

— Чисто масляные промежутки, например, между контактами переключающих устройств.

— Масляные промежутки в комбинации с пропитанной маслом твердой изоляцией.

Например, изоляция между обмотками, имеющими твердую витковую изоляцию и масляный промежуток, подразделенный барьерами из пропитанного маслом электротехнического картона.

— Пропитанная маслом твердая изоляция, например между витками обмотки и в высоковольтных конденсаторных вводах с бумажно-масляной изоляцией. Потери энергии в трансформаторе вызывают нафтен обмоток, магнитной системы, а также деталей конструкции. Нагрев ограничен передачей тепла в окружающее пространство. Благодаря относительно малой вязкости и высокой теплоемкости трансформаторное масло является хорошим переносчиком тепла от наиболее нагретых частей трансформатора к его охлаждающим устройствам.

Трансформаторное масло получают перегонкой и последующей очисткой сырой нефти Оно представляет собой смесь углеводородов в пропорциях в зависимости от месторождения нефти. Углеводороды, грубо говоря, делятся на три класса: нафтеновые, парафиновые и ароматические. Нафтеновые и парафиновые являются насыщенными углеводородами, химически стабильными. Они отличаются друг от друга химической структурой, а также физическими и химическими свойствами. Ароматические — являются ненасыщенными углеводородами и поэтому они менее стабильны и более химически активны.  
Применяемая за рубежом классификация масел как нафтеновых или парафиновых не означает, что эти масла состоят исключительно из нафтеновых или парафиновых углеводородов, а указывает на преобладание характеристик одного из этих классов в смеси нафтеновых, парафиновых и ароматических углеводородов. Источники нафтеновой нефти встречаются все реже и имеется тенденция все более частого применения парафиновой нефти. Это не приводит к каким либо отрицательным последствиям за исключением возможного повышения температуры застывания, что устраняется с помощью специальных добавок. Трансформаторное масло при работе в трансформаторах подвергается тепловому старению, при этом происходит окисление масла и выделение шлама. За последние десятилетия технологические процессы получения масла были значительно усовершенствованы и позволили увеличить срок эксплуатации масла.

Масла разных изготовителей (разных марок) допускают смешивание в любой пропорции. Для повышения стабильности масла в него добавляют антиокислительные добавки — ингибиторы. Все марки отечественных масел имеют в своем составе ингибиторы. Однако современные масла, благодаря совершенной технологии их изготовления, могут быть высокостабильными и не требовать добавки ингибиторов. Для такого масла может потребоваться введение в него ингибиторов только в случаях трансформаторов с тяжелым режимом работы, например, для очень больших трансформаторов.