

ГЛАВА 8

НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 29. ПРОЦЕСС НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При работе трансформатора часть энергии, преобразуемой им, теряется, поэтому полезная мощность трансформатора, отдаваемая им в нагрузку, меньше мощности, потребляемой им из сети источника энергии. Потеря энергии происходит как в магнитопроводе трансформатора, так и в его обмотках. Обмотки трансформатора нагреваются протекающими по ним токами. Потеря энергии в обмотках трансформатора P_k пропорциональна квадрату плотности тока j и весу обмоточного провода G_m .

В магнитопроводе трансформатора возникают потери энергии за счет перемагничивания стали и вихревых токов. Потери в стали магнитопровода зависят от частоты, магнитной индукции, магнитных свойств материала и толщины стальных листов, из которых собран магнитопровод. Потери в стали $P_{ст}$ пропорциональны весу магнитопровода $G_{ст}$ и квадрату максимальной магнитной индукции B_m в магнитопроводе.

Электромагнитные нагрузки трансформатора (магнитную индукцию и плотность тока) нельзя безгранично увеличивать. Магнитную индукцию в магнитопроводе нельзя увеличивать сколь угодно, так как при превышении известной меры намагничивающий ток может оказаться чрезмерно большим. Плотность тока в проводах обмоток так же нельзя увеличивать неограниченно, так как падение напряжения в сопротивлении обмоток при этом возрастает, понижая вторичное напряжение трансформатора при нагрузке.

В еще большей мере электромагнитные нагрузки ограничены допустимыми потерями энергии в активных материалах трансформатора, т. е. в стали магнитопровода и проводах обмоток. При увеличении магнитной индукции растут потери в стали, а при увеличении плотности тока — потери в проводах обмоток. Потери энергии, выделяющиеся в трансформаторе при его работе, превращаются в тепло и нагревают его. Это тепло излучается от поверхности трансформатора в окружающую среду.

Охлаждение нагретых частей трансформатора происходит за счет теплоизлучения, теплопроводности и конвекции. Тепло отводится в окружающую среду главным образом со свободных частей трансформатора (наружная цилиндрическая поверхность обмотки и поверхность ярма). Для увеличения поверхности охлаждения делают вентиляционные каналы в магнитопроводе и обмотках.

Внутренние части магнитопровода и обмоток отдают свое тепло поверхностным частям благодаря теплопроводности. Количество тепла, излучаемого в окружающую среду, зависит как от поверхности охлаждения, так и от разности температур нагретых частей трансформатора и окружающей среды.

Температура трансформатора сначала повышается быстро (рис. 41, а), так как мала разность температур трансформатора и окружающей среды. Следовательно, количество тепла, излучаемого в окружающую среду, также мало и потеря энергии в трансформаторе расходуется в основном на его нагрев.

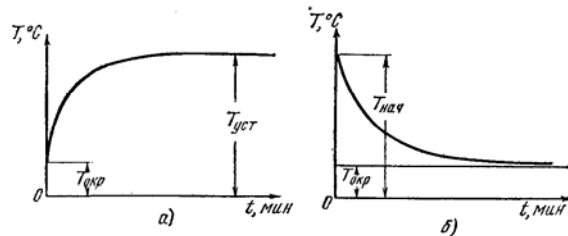


Рис. 41. Изменение температуры трансформатора: а — при нагреве, б — при охлаждении

По мере повышения температуры трансформатора увеличивается количество тепла, излучаемого в окружающую среду, и трансформатор нагревается медленнее. Температура повышается до определенного установившегося значения $T_{уст}$, при котором количество тепла, выделяющегося в трансформаторе, полностью излучается в окружающую среду.

Если трансформатор отключить после его работы, его нагретые части начнут охлаждаться. Когда разность температур трансформатора и окружающей среды достаточно велика, трансформатор охлаждается быстро (рис. 41, б). По мере понижения температуры трансформатора разность температур его и окружающей среды уменьшается и процесс охлаждения замедляется.

Если при работе трансформатор нагревается хотя бы в какой-нибудь точке до температуры, выше допустимой для какого-либо материала, из которого изготовлен трансформатор, то трансформатор может выйти из строя. Таким образом, электромагнитные нагрузки ограничиваются тем материалом, который наиболее чувствителен к нагреву.

Применяемые в трансформаторах изоляционные материалы по-разному реагируют на повышение температуры. В большинстве случаев выходит из строя раньше других бумажная изоляция, являющаяся наименее нагревостойким материалом из используемых в трансформаторостроении изоляционных материалов. Бумажная изоляция в масле длительно выдерживает температуру до 105°C без существенного снижения своих изоляционных свойств. При на-

греве до температуры выше допустимой происходит интенсивное старение изоляции, т. е. она быстро теряет свою электрическую и механическую прочность, что ведет к выходу из строя трансформатора.

В ГОСТ 11677—65 установлены для отдельных частей масляного трансформатора следующие наибольшие превышения температуры над температурой охлаждающего воздуха, которая принимается равной 40°C : обмотки (по измерению сопротивления) 65°C ; магнитопровод (на поверхности) 75°C ; масло в верхних слоях 55°C . Указанные температуры установлены с учетом колебания температуры в течение суток и года и изменения нагрузки трансформатора.

Трансформатор представляет собой неоднородное тело и отдельные его части нагреваются в различной мере. Необходимо, чтобы температура его наиболее нагретых частей была не выше допустимой.

Нагрев трансформатора зависит от потерь энергии и интенсивности охлаждения. Чем интенсивнее охлаждение трансформатора, тем большими будут допустимые потери энергии. Для трансформаторов различных мощностей условия охлаждения различны. Чем больше номинальная мощность трансформатора, тем сложнее осуществить его охлаждение. Так, для трансформаторов малых мощностей (десятки или сотни вольтампер) естественное воздушное охлаждение оказывается достаточным. Для трансформаторов больших мощностей (десятки, сотни, тысячи и т. д. киловольтампер) применяют специальные меры для повышения интенсивности охлаждения (масляное охлаждение, вентиляционные каналы, обдув бака и т. д.).

Это объясняется тем, что с увеличением номинальной мощности трансформатора увеличиваются его линейные размеры. Если для трансформаторов различных номинальных мощностей использовать одинаковые активные материалы (сталь магнитопровода и обмоточный провод) и допустить одинаковые электромагнитные нагрузки (магнитную индукцию и плотность тока), то потери энергии в трансформаторе ΔP будут пропорциональны весу G активного материала или его объему V . Объем V пропорционален третьей степени линейного размера l ; поверхность охлаждения $S_{охл}$ пропорциональна второй степени линейного размера l .

Таким образом, с увеличением номинальной мощности трансформатора (с увеличением его размеров) потери энергии в нем увеличиваются в большей мере, чем поверхность охлаждения, т. е. количество тепла, выделяющегося в трансформаторе, растет быстрее, чем количество тепла, излучаемого в окружающую среду. Чтобы избежать перегрева трансформаторов с увеличением их мощности, повышают интенсивность их охлаждения.

§ 30. ОХЛАЖДЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В сухих трансформаторах наружные нагретые поверхности обмоток и магнитопровода отдают тепло омывающему их воздуху

путем конвекции и излучения. В масляных трансформаторах передача тепловой энергии в окружающую среду осуществляется специальным трансформаторным маслом, заливаемым в бак, в который помещен трансформатор. Масло, омывающее магнитопровод и обмотки трансформатора, путем конвекции отводит выделяющееся из них тепло и отдает его стенкам бака.

Частицы масла, уровень которого значительно выше верхнего уровня магнитопровода (рис. 42), соприкасаются с горячими наружными поверхностями обмоток и магнитопровода и нагреваются. Нагретые частицы масла устремляются вверх и отдают свое тепло в окружающую среду через стенки и крышку бака. Охла-

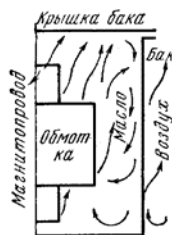


Рис. 42. Схема охлаждения масляного трансформатора

жденные частицы масла движутся вниз, уступая место более нагретым. Внешняя поверхность стенок и крышки бака, омываемая воздухом, отдает тепло в окружающую среду путем конвекции и излучения. В некоторых случаях для повышения интенсивности теплоотдачи применяют искусственную усиленную циркуляцию масла или воздуха при помощи насосов или вентиляторов.

Трансформаторное масло является не только хорошей охлаждающей средой. Оно представляет собой также хороший изоляционный материал, который обеспечивает высокую электрическую прочность трансформатора при сравнительно малых изоляционных промежутках. Это свойство трансформаторного масла позволяет создавать компактные конструкции обмоток и магнитопровода, а масляное охлаждение дает возможность применять сравнительно высокие электромагнитные нагрузки активных материалов (плотность тока и магнитная индукция) и производить трансформаторы с относительно малым весом этих материалов. В силовых трансформаторах наиболее широко используют масляное охлаждение.

Трансформаторное (минеральное) масло должно обладать следующими свойствами:

1. Масло должно быть безопасным для активного материала, т. е. не должно содержать кислот и серы, так как даже небольшие количества этих веществ крайне опасны для изоляции обмоток.

2. Масло должно достаточно хорошо отводить тепло от нагретых частей трансформатора. Поэтому оно должно обладать высокой теплоемкостью и теплопроводностью, а также малой вязкостью, чтобы не препятствовать охлаждающему потоку. Вязкость масла не остается постоянной при изменении температуры. Для трансформаторов больших мощностей желательно применять масло, вязкость которого резко изменяется при изменении температуры.

3. Масло должно иметь высокую электрическую прочность. Если электрическая прочность воздуха примерно 30 кВ/см , то для трансформаторного масла она может достигать 150 кВ/см . Наличие воды даже в незначительных количествах резко снижает электри-

ческую прочность масла, обесценивая его диэлектрические свойства. Поэтому трансформаторное масло должно быть «сухим», т. е. не содержать влаги. Воду из трансформаторного масла удаляют нагреванием его примерно до 110°C . В процессе эксплуатации трансформатора влага может проникать внутрь бака с воздухом. Кроме влаги с воздухом внутрь трансформатора могут проникать пылинки и продукты распада.

Недостатком масла является его старение, т. е. ухудшение его изоляционных свойств со временем. Поэтому в условиях эксплуатации периодически очищают масло и бак, а также меняют масло. Для удаления посторонних веществ нечистое масло пропускают через центрифугу, а для сушки его прогревают. Масляные баки трансформаторов больших мощностей снабжают кранами, к которым присоединяют маслоочистительный аппарат. Это дает возможность очищать масло в процессе работы трансформатора без его отключения. Прогревают масло также в процессе работы трансформатора посредством усиленной его нагрузки.

4. Температура воспламенения масла должна быть значительно выше рабочей температуры трансформатора, чтобы при работе трансформатора не возник пожар. Обычно трансформаторное масло имеет температуру воспламенения 180°C . Допускается использование масел с температурой воспламенения не ниже 150°C . Таким образом, помимо старения трансформаторное масло обладает еще одним очень существенным недостатком — оно является горючим материалом. Поэтому установка масляных трансформаторов во многих случаях требует принятия специальных мер пожарной безопасности.

В тех случаях, когда применение масляных трансформаторов недопустимо по соображениям пожарной опасности, используют сухие трансформаторы, а также трансформаторы с негорючими наполнителями (совол, совтол, пиранол, кварцевый кристаллический песок).

Сухие трансформаторы имеют защитные кожухи с отверстиями, закрытыми сетками. Применение в качестве изоляции обмоток стекловолнока или асбеста позволяет значительно повысить рабочую температуру обмоток и получить практически пожаробезопасную установку. Это свойство сухих трансформаторов дает возможность применять их для установки внутри сухих помещений в тех случаях, когда обеспечение пожарной безопасности установки является решающим фактором. Так как в сухих трансформаторах охлаждающей средой является воздух, который возобновляется непрерывно, то исключается старение масла и необходимость периодической чистки и замены его.

Однако воздух является менее совершенной изолирующей и охлаждающей средой, чем трансформаторное масло. Поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных.

Электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах приходится уменьшать по сравнению с электро-

магнитными нагрузками масляных трансформаторов, что приводит к увеличению сечения проводов обмоток и магнитопровода. Вследствие этого вес и стоимость активных материалов у сухих трансформаторов больше, чем у масляных.

Увеличение стоимости активных материалов сухих трансформаторов по сравнению с масляными сказывается особенно сильно с ростом мощности трансформатора и увеличением напряжений его обмоток. В настоящее время производят сухие трансформаторы с номинальной мощностью до 2500 кВА и напряжением обмоток ВН до 15 кВ.

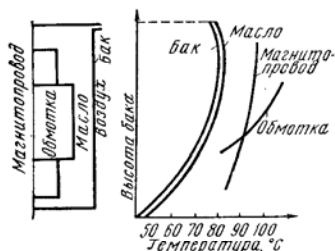


Рис. 43. Изменение температуры обмоток, магнитопровода, масла и бака по высоте

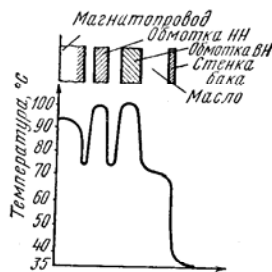


Рис. 44. Распределение температуры в горизонтальном сечении масляного трансформатора

Так как обмотки сухих трансформаторов непосредственно соприкасаются с воздухом и увлажняются, эти трансформаторы устанавливают только в сухих закрытых помещениях. Для уменьшения гигроскопичности обмотки пропитывают специальными лаками. Применение новых нагревостойких и негорючих изоляционных материалов, обладающих высокой теплопроводностью, позволяет увеличить электромагнитные нагрузки и уменьшить стоимость активных материалов.

В тепловом отношении трансформатор представляет собой неоднородное тело. Стальные листы магнитопровода обладают высокой теплопроводностью, а изоляционные прослойки между листами стали — малой. Обмотки также состоят из меди или алюминия с высокой теплопроводностью и изоляционного материала, плохо проводящего тепло. При работе трансформатора более нагретые внутренние части магнитопровода и обмоток отдают тепло наружным поверхностям, от которых оно отводится маслом или воздухом. Между нагретыми частями трансформатора (обмотками и магнитопроводом) и маслом или воздухом устанавливается определенная разность температур. Однако температура всех частей трансформатора и масла в различных точках по высоте неодинакова; она увеличивается по мере перехода от нижних частей к верх-

ним. Изменение температуры обмоток, магнитопровода, масла и бака по высоте показано на рис. 43, распределение температуры в горизонтальном сечении масляного трансформатора — на рис. 44.

Масло для заливки трансформатора готовят заранее в нужном количестве, высушивают и проверяют химическим анализом и на электрическую прочность. При заливке масло должно иметь температуру не ниже 10°С. Его заливают через нижний кран бака при помощи насоса фильтр-пресса. После заливки берут пробу масла для химического анализа и испытания электрической прочности.

§ 31. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ БАКИ И АРМАТУРА

Баки трансформаторов с масляным охлаждением сваривают из листовой стали. Толщина стенок бака 4—12 мм, дна — 4—40 мм. Стенки баков усиливают поясами жесткости и вертикальными балками. К стенкам бака у верхнего торца приваривают раму из полосовой стали.

Форма и размеры баков определяются формой и размерами активной части трансформатора с учетом необходимого объема масла, изоляционных промежутков, размещения вводов, переключателей, отводов и т. д. В большинстве случаев сечение бака в горизонтальной плоскости имеет овальную форму (рис. 45, а). В некоторых случаях бакам трансформаторов придают прямоугольную форму с закругленными углами (рис. 45, б). При очень больших мощностях и высоких напряжениях баки могут иметь более сложную форму.

На рис. 46 показаны наиболее широко используемые формы конструктивных исполнений баков мощных трансформаторов. Бак с верхним разъемом (рис. 46, а) имеет следующее устройство: стенка бака приварена к плоскому дну, крышка крепится болтами к раме, приваренной к стенке бака. Бак с верхним разъемом, надставкой и плоской крышкой (рис. 46, б) применяют в тех случаях, когда требуется уменьшить габариты трансформатора по высоте при его транспортировке. Для этого надставку снимают и нижнюю часть бака закрывают крышкой.

Бак с верхним разъемом и фигурной крышкой (рис. 46, в) соответствует очертанию железнодорожного габарита. У бака с нижним разъемом и поддоном (рис. 46, г) плоская крышка приварена к стенке бака, образуя верхний съемный колокол. Нижняя часть стенки, приваренная к плоскому дну, образует поддон, на котором укрепляют болтами верхнюю колоколообразную часть бака. Бак с нижним разъемом и плоским дном (рис. 46, д) вместо поддона

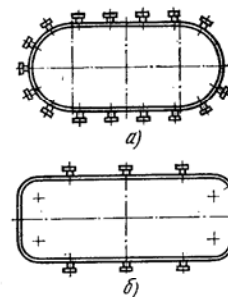


Рис. 45. Сечение баков трансформаторов (в плане): а — бак овальной формы, б — бак прямоугольной формы

имеет плоское дно, к которому болтами крепят раму верхней части бака. Бак с двумя разъемами (рис. 46, е) имеет съемную среднюю часть.

Если на подстанции установлен трансформатор с верхним разъемом бака, то необходимо иметь подъемный кран или лебедку, грузоподъемность которых должна соответствовать весу активной части трансформатора, так как при ревизии и ремонте трансформатора вынимают активную часть из бака.

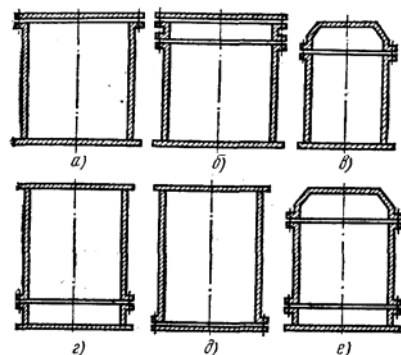


Рис. 46. Различные формы баков мощных трансформаторов:

а — бак с верхним разъемом, б — бак с верхним разъемом и с надставкой, в — бак с верхним разъемом и фигурной крышкой, г — бак с нижним разъемом и поддоном, д — бак с нижним разъемом и плоским дном, е — бак с нижним разъемом и двумя разъемами

Если бак с нижним разъемом, нет необходимости поднимать активную часть трансформатора. В этом случае достаточно поднять верхнюю колоколообразную часть бака, вес которой значительно меньше веса активной части.

Чтобы можно было передвигать трансформаторы в пределах подстанции, их снабжают катками. Для мощных трансформаторов используют конструкцию в виде четырех отдельных поворотных коробок с катками, устанавливаемых под дном бака.

При небольших мощностях (до 25 кВа) не требуется особых охлаждающих

устройств и трансформаторы помещают в гладкие баки, через стенки которых происходит теплоотдача.

В более мощных масляных трансформаторах для увеличения охлаждающей поверхности широко применяют трубчатые баки (рис. 47). Стальные трубы диаметром 30—60 мм располагают вертикально, параллельно стенке бака. Концы труб изгибают и вваривают в верхнюю и нижнюю части стенки. Для увеличения поверхности охлаждения трубы на стенках бака располагают в два ряда. Применяют трубчатые баки, у которых трубы расположены в три и четыре ряда, а также баки с трубами овального сечения.

В трансформаторах большой мощности (более 1600 кВа) трубы объединяют группами в отдельные охладители — радиаторы (рис. 48). В современных конструкциях применяют баки с прямо-трубными радиаторами.

На гидроэлектростанциях, где имеется достаточное количество проточной воды, устанавливают трансформаторы с искусственным водомасляным охлаждением. В таких трансформаторах нагретое масло при помощи насоса пропускают через водяной маслоохладитель.

В трансформаторах большой мощности для усиления процесса теплоотдачи каждый радиатор обдувают отдельным вентилятором. Для трансформаторов очень большой мощности иногда применяют искусственное воздушно-масляное охлаждение, при котором

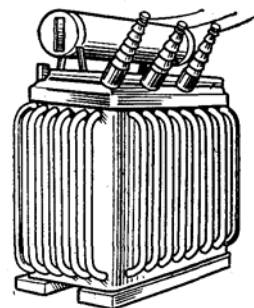


Рис. 47. Трансформатор с трубчатым баком

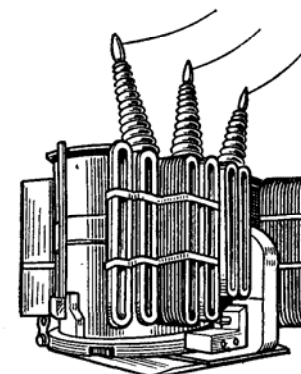


Рис. 48. Трансформатор с радиаторным баком

нагретое масло при помощи насоса пропускается через вынесенный охладитель, обдуваемый воздухом.

В процессе работы трансформатора изменяется его температура, что приводит к изменению уровня масла. У трансформаторов

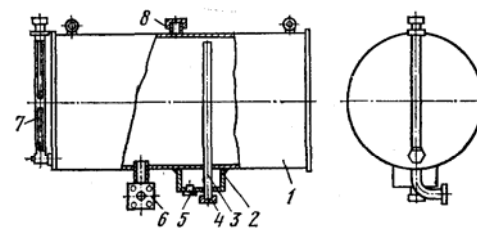


Рис. 49. Расширитель:

1 — корпус, 2 — отстойник, 3 — труба для доступа воздуха, 4 — колыбак, 5 — пробка отстойника, 6 — фланец, 7 — маслоуказатель, 8 — пробка для заливки масла

мощностью до 63 кВа допускается колебание уровня масла в баке. Баки трансформаторов больших мощностей и высоких напряжений снабжают расширителями (рис. 49), представляющими собой цилиндрический сосуд из листовой стали, устанавливаемый над крышкой бака и соединяющийся с баком патрубком. Колебания

уровня масла вследствие изменения температуры происходят лишь в расширителе. Для контроля температуры масла трансформатора служит термометр, который устанавливают на крышке бака в специальной металлической оправе.

Для вывода концов обмоток из бака трансформатора наружу на крышках бака размещают вводы. Они должны обеспечивать изоляцию токоведущего стержня от заземленной крышки бака как

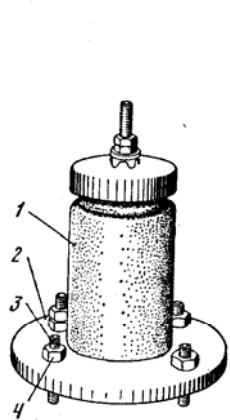


Рис. 50. Ввод для внутренней установки:
1 — фарфоровый изолятор, 2 — стальной фланец, 3 — стальная шпилька, 4 — гайка

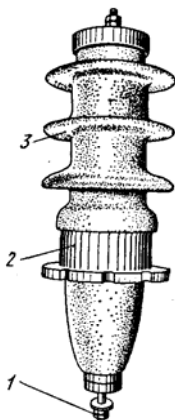


Рис. 51. Ввод для наружной установки:
1 — токоведущая шпилька, 2 — чугунный фланец, 3 — фарфоровый изолятор

со стороны масла, так и со стороны воздуха. Вводы трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, имеют гладкую наружную поверхность (рис. 50). Вводы для наружных установок (рис. 51) имеют ребра, чтобы часть поверхности изолятора 3 под ребром оставалась сухой во время дождя.

Снижение уровня масла грозит серьезной аварией, так как при конструировании трансформатора все изоляционные расстояния выбирают, исходя из электрической прочности масла. Если же вместо масла окажется воздух, электрическая прочность которого сравнительно мала, то неизбежны пробой изоляции и выход трансформатора из строя. Для предотвращения этого в нижней части расширителя устанавливают реле низкого уровня масла, имеющее поплавков, механически связанный с ртутным выключателем. Когда уровень масла становится ниже допустимого, поплавков опускается и контакты ртутного выключателя замыкают сигнальную цепь.

При коротких замыканиях трансформатора, замыканиях витков, возникновении дуги вследствие плохих контактов и других причин возможно выделение больших количеств тепла, что может привести к воспламенению нагретого масла в баке трансформатора.

Баки красят изнутри маслостойкой эмалью 624-С, а снаружи — эмалью ПФ-133.

Применение расширителя уменьшает поверхность соприкосновения масла с воздухом, который вредно действует на масло, увлажняя и окисляя его. Влага и грязь, попадающие в расширитель из воздуха, собираются в отстойнике 2 (см. рис. 49) и удаляются через пробку 5. В нижней части расширителя установлена труба 3 с отверстиями, которая обеспечивает свободный обмен воздуха в расширителе, исключая возможность попадания в него капель влаги. Для отключения расширителя в патрубке, соединяющем расширитель с баком, установлены кран и газовое реле. Маслоуказатель служит для контроля уровня масла, пробка 8 в верхней части расширителя — для заливки масла.

Расширители трансформаторов снабжаются воздухоосушителем, через который происходит очистка воздуха, проникающего в трансформатор. Кроме того, все трансформаторы имеют термосифонный фильтр для обезвоживания и очистки масла.

В нижней части бака установлена специальная пробка для отбора пробы масла. Заливают и спускают масло из бака через два крана, один из которых установлен на крышке бака, а другой — на стенке в его нижней части. Эти же краны используют для присоединения маслоочистительного аппарата при фильтрации масла.

У всех масляных трансформаторов в днище бака установлена пробка, служащая для спуска грязи, влаги и остатка масла после его слива через нижний кран. В крышке бака вблизи верхней рамы приварены подъемные кольца, с помощью которых поднимают активную часть трансформатора. Весь трансформатор поднимают посредством подъемных крюков, приваренных к стенкам бака. Таким образом, трансформатор является пожаро- и взрывоопасным аппаратом.

Чтобы не произошло воспламенения масла и взрывов газов внутри бака трансформатора, устанавливают газовое реле, состоящее из металлического корпуса и двух поворотных поплавков. Один из них является сигнальным, а другой — аварийным (отключающим). Каждый поплавок механически связан с ртутным выключателем.

При замыкании витков обмотки, искрении вследствие плохого контакта и других неисправностях, вызывающих перегревание масла и изоляции, выделяются газы, которые, поднимаясь, попадают в газовое реле. Скапливаясь в верхней части корпуса реле, газы снижают уровень масла в нем. Верхний поплавок реле опускается и замыкает контакты ртутного выключателя, который выключает цепь сигнализации на щите управления подстанции. Руководствуясь сигналом, дежурный принимает необходимые меры.

При возникновении мощной дуги и других значительных повреждениях трансформатора его немедленно отключают. Для этого используют толчок масла в патрубке расширителя и газовом реле. Этот толчок опрокидывает второй поплавок, который включает цепь управления, и трансформатор отключается от сети.

Для защиты бака трансформатора от деформации при очень сильных взрывообразных выделениях газов у трансформаторов большой мощности на крышке бака установлена выхлопная труба с тонкой стеклянной мембраной. При сильных выделениях газов резко увеличивается давление в выхлопной трубе и мембрана выдавливается раньше, чем происходит деформация бака. Для трансформаторов различных габаритов применяют мембраны диаметром 150, 200 и 250 мм при толщине стеклянных дисков соответственно 2,5; 3 и 4 мм.

Так как масляные трансформаторы пожаро- и взрывоопасны, их устанавливают в специально сооруженных помещениях, в которых стены, опоры, перегородки и перекрытия огнестойкие. Под трансформатором устраивают бетонированный маслоприемник, перекрытый решеткой со слоем гравия.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется температура трансформатора при его нагревании и охлаждении?
2. Почему масляное охлаждение трансформаторов дает возможность уменьшить их габариты?
3. Какое устройство имеют баки масляных трансформаторов?
4. Объясните назначение и устройство расширителя.
5. Какие устройства защищают трансформатор от перегрузок, коротких замыканий и междувитковых замыканий?