**Конструкция трансформаторов**

**Активные части трансформатора**

Части трансформатора, предназначенные для энергопреобразовательного процесса, — магнитопровод и обмотки, называются его активными частями. Достаточно эффективное преобразование электрической энергии удается получить только в конструкциях, в которых обмотки охватываются замкнутыми магнитопроводами из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью уха, в сотни раз превышающей магнитную постоянную р0 (см. рис. 1.1—1.3). Для получения высокой магнитной проницаемости магнитопровод не должен быть чрезмерно насыщен и индукция в нем при максимальном магнитном потоке не должна превышать 1,4—1,6 Тл. Снижение потребляемой реактивной мощности достигается за счет уменьшения магнитных полей рассеяния, сцепленных только с первичной или только со вторичной обмоткой. Эти поля уменьшаются с уменьшением промежутков между первичной и вторичной обмотками, и поэтому катушки первичной и вторичной обмоток каждой из фаз располагают на одном и том же участке магнитопровода, называемом стержнем (см. рис. 1.1, 1.2). При этом обмотки либо располагаются концентрически (рис. 1.4, а), либо разбиваются на отдельные диски и размещаются на стержне в чередующемся порядке (рис. 1.4, б). В последнем случае обмотка называется дисковой чередующейся.

Из большого числа разновидностей концентрических обмоток наиболее простой является цилиндрическая обмотка (рис. 1.5).

Для увеличения эффективности при преобразовании энергии должны быть приняты меры для уменьшения потерь энергии, выделяющихся в трансформаторе в виде тепла. В первую очередь должны быть выбраны достаточно малыми активные сопротивления обмоток, т.е. возможно большие сечения витков обмоток, возможно меньшие длины витков и возможно меньшие электрические удельные сопротивления проводов обмоток. Именно поэтому провода обмоток изготовляют из обычной меди, обладающей наименьшим удельным электрическим сопротивлением, и в редких случаях из алюминия, удельное сопротивление которого примерно в 1,6 раза больше, чем у меди.

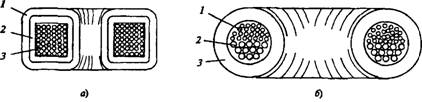


Рис. 1.3. Трансформаторы с ленточным (а) и броневым (б) магнитопроводами: 1,2 — первичная и вторичная обмотки; 3 – магнитопровод

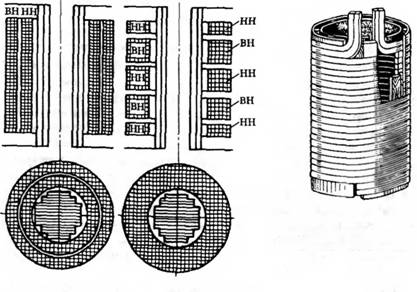


Рис. 1.4. Концентрические (в) и дисковые чередующиеся (б) обмотки

Рис. 1.5. Цилиндрическая двухслойная обмотка из прямоугольного провода

Магнитопровод трансформатора должен быть сконструирован таким образом, чтобы в нем в достаточной мере были ослаблены потери на вихревые токи и гистерезис, возникающие при перемагничивании. Эту задачу удается решить путем сочетания нескольких мероприятий:

применением специальных магнитно-мягких электротехнических сталей, имеющих малые потери на гистерезис;

использованием специальных сортов электротехнической стали, которые имеют благодаря специальным присадкам увеличенное удельное электрическое сопротивление;

сборкой магнитопровода из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали, толщина которых выбирается такой, чтобы вихревые токи практически не оказывали влияния на главное магнитное поле и не вызывали значительных потерь (толщина d пластин зависит от частоты перемагничивания /, и при частоте 50 Гц составляет 0,35 или 0,5 мм).

При выполнении этих мероприятий удается получить мощность потерь энергии на перемагничивание магнитопровода того же порядка, что и мощность электрических потерь в обмотках, и практически исключить размагничивающее действие вихревых токов.

Магнитные системы (магнитопроводы) трансформаторов встречаются в двух основных исполнениях: стержневом и броневом. В стержневом однофазном трансформаторе фазные обмотки состоят из двух катушек, соединяемых между собой последовательно или параллельно, причем эти две катушки располагаются на двух стержнях О-образного магнитопровода, связанных ярмами (рис. 1.6, а).

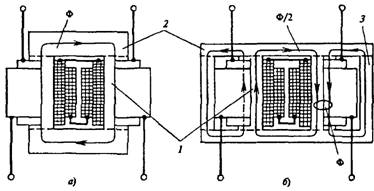


Рис. 1.6. Однофазные трансформаторы со стержневым (а) и бронестержневым (б) магнитопроводами. 1 — стержень; 2 — ярмо; 3 — крайний стержень

В трехфазном стержневом трансформаторе обмотки каждой фазы размещаются на своем стержне (см. рис. 1.2); стержни вместе с ярмами образуют замкнутую магнитную систему.

Магнитопровод однофазных броневых трансформаторов охватывает обмотку с двух сторон, как бы «бронируя» ее (см. рис. 1.1). Как видно из рисунка, ярма трансформатора могут иметь вдвое меньшее сечение, чем стержень, на котором размещаются обмотки. У трансформаторов большой мощности для снижения габаритов трансформатора по высоте и возможности их перевозки в собранном виде по железным дорогам применяется бронестержневая конструкция магнитопровода (рис. 1.6, б и 1.7). Высота магнитопровода бронестержневого трансформатора уменьшается за счет высоты ярм, которые проводят вдвое меньший магнитный поток. Для примера на рис. 1.6 изображены однофазные трансформаторы одной и той же мощности в стержневом и бронестержневом исполнениях. Почти столь же значительное уменьшение высоты удается получить в бронестержневом трехфазном трансформаторе (рис. 1.7), в ярмах которого поток в л/3 раз меньше, чем в стержнях (в стержневом трехфазном трансформаторе поток в ярмах не отличается от потока в стержнях).

В зависимости от способа сочленения стержней с ярмами различают магнитопроводы стыковые и шихтованные. Стержни и ярма стыкового магнитопровода собираются из электротехнической стали отдельно и объединяются в замкнутую систему после размещения на стержнях обмоток. В стыке между стержнями и ярмами (во избежание вихревых токов через взаимно перекрытые листы сопрягаемых частей) помещают изоляционные прокладки, которые образуют немагнитный зазор, заметно увеличивающий потребляемую трансформатором реактивную мощность. Поэтому, несмотря на простоту сборки и демонтажа, стыковые магнитопроводы имеют ограниченное применение.

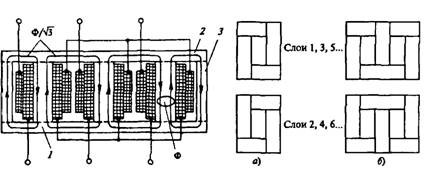


Рис. 1.7. Трехфазный трансформатор с бронестержневой магнитной системой: 1 — стержень; 2 — ярмо; 3 — крайний стержень

Рис. 1.8. Укладка листов в слоях шихтованных магнитопроводов: а — однофазный стержневой трансформатор; б — трехфазный стержневой трансформатор

Наиболее распространены шихтованные магнитопроводы, стержни и ярма которых собираются впереплет (шихтуются) и образуют цельную конструкцию (рис. 1.8). Для установки обмоток листы верхнего ярма вынимаются и затем снова зашихтовываются. В шихтованной конструкции тоже имеются немагнитные зазоры в стыке между листами данного слоя, но эти зазоры оказываются перекрытыми листами соседних слоев и не оказывают столь заметного влияния на потребляемую трансформатором реактивную мощность, как в стыковой конструкции.

При сборке магнитопровода из анизотропной холоднокатаной стали, у которой удельные потери меньше, а магнитная проницаемость больше в направлении прокатки листов, в зоне переходов от стержней к ярмам, где линии магнитного поля поворачивают на 90° от направления прокатки, наблюдается увеличение потерь и падения магнитного напряжения. Это явление удается в значительной мере ослабить применением косых стыков (рис. 1.9).

В трансформаторах малой мощности и на небольшие напряжения обмотки могут быть намотаны на прямоугольный каркас, а сечения стержней имеют прямоугольную форму. В трансформаторах большой мощности катушки наматываются на цилиндрический шаблон, а для получения лучшего заполнения пространства внутри катушки сталью сечению стержня придается ступенчатая форма (рис. 1.10). Размеры отдельных ступеней выбираются таким образом, чтобы стержень наилучшим образом вписывался в цилиндрическое пространство внутри катушки. Ярма выполняются прямоугольными или с небольшим числом ступеней.

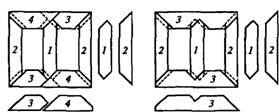


Рис. 1.9. Укладка листов в слоях стержневого трехфазного магнитопровода со скошенными листами из холоднокатаной стали

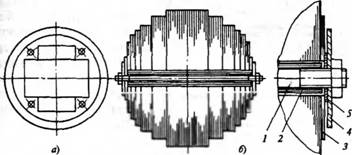


Рис. 1.10. Стяжка стержней: а — деревянными планками; б — стальными шпильками; 1 — стальная шпилька; 2 — трубка изоляционная; 3, 5 — шайбы из электроизоляционного картона; 4 — стальная шайба

Стяжка пакетов стержней в силовых трансформаторах мощностью менее 1 000 кВ • А (на один стержень) производится при помощи деревянных или пластмассовых планок и стержней, которые заполняют пространство между стержнем и изоляционным цилиндром, на котором укреплена ближайшая к стержню обмотка НН (рис. 1.10, а).

В трансформаторах большей мощности стяжка стержней ранее осуществлялась стальными шпильками, изолированными от стержня трубками из бакелизированной бумаги (рис. 1.10, б). Для прессовки ярм также использовались шпильки, стягивающие деревянные или стальные нажимные балки (рис. 1.11).

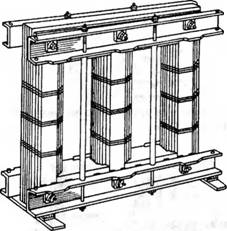


Рис. 1.11. Остов трансформатора

В настоящее время для стяжки стержней, а во многих случаях и ярм, широко применяется бандажировка стеклолентой, пропитанной эпоксидными термореактивными компаундами (бандажи на стержнях видны на рис. 1.11; бандажи на стержнях и полубандажи на ярмах показаны на рис. 1.13). При использовании бандажей отпадает необходимость в применении стягивающих шпилек и в штамповке отверстий в листах магнитопровода, что приводит к уменьшению его магнитного сопротивления и добавочных потерь при холостом ходе. Магнитопровод вместе с ярмовыми балками и другими деталями, предназначенными для прессовки магнитопровода и крепления на его стержнях обмоток, образует остов трансформатора (см. рис. 1.11).

Значительно проще конструкция магнитопроводов микротрансформаторов, мощность которых составляет единицы или десятки вольт-ампер. Магнитопроводы этих трансформаторов набираются из штампованных пластин Ф-образной формы (рис. 1.12, а) или Ш-образной формы в сочетании с пластинами прямоугольной формы (рис. 1.12, б).

В стержневой части Ф-образного листа имеется просечка. При сборке однофазного броневого трансформатора стержневая часть листа отгибается в сторону и вставляется внутрь обмотки. Следующий лист вставляется с другой торцевой стороны катушки. После сборки магнитопроводы стягиваются при помощи шпилек и нажимных плит.

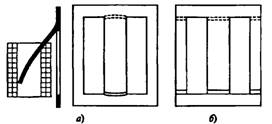


Рис. 1.12. Сборка магнитопроводов микротрансформатора: а — из листов Ф-образной формы; б — из листов Ш-образной и прямоугольной формы

Большое распространение получили также микротрансформаторы с ленточными магнитопроводами кольцеобразной формы. Эти трансформаторы имеют весьма технологичную конструкцию, показанную на рис. 1.3, д. Их магнитопровод образуется из навитой в виде спирали стальной ленты, обмотки обматываются вокруг магнитопровода на специальном станке.

Кроме активных элементов — обмоток и магнитопровода — конструкция трансформатора включает еще ряд важных частей, которые называются конструктивными частями и предназначены для создания электрической изоляции между обмотками, фиксации активных частей в Пространстве, охлаждения активных частей, сопряжения его обмоток с электрическими сетями и других вспомогательных функций. К конструктивным частям относятся, в частности, ярмовые балки и другие прессующие детали магнитопровода.

**Конструктивные части трансформатора**

Рассмотрим устройство конструктивных частей силового масляного трехфазного трансформатора, общая компоновка которого представлена на рис. 1.13.

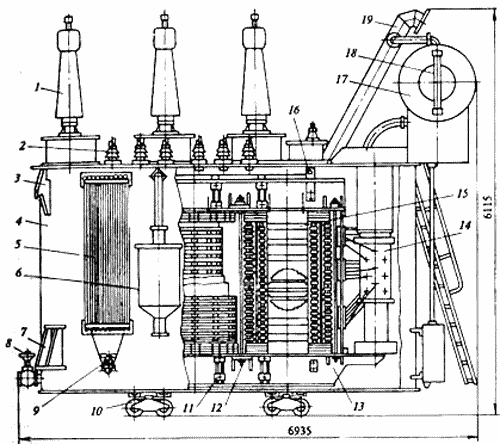
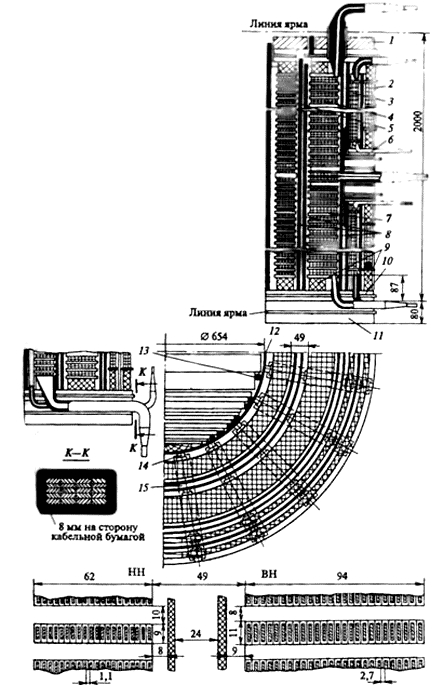


Рис. 1.13. Трехфазный двухобмоточный трансформатор мощностью 40 000 кВ • А, иа напряжение 110 кВ с расщепленными обмотками НН и регулированием напряжения ВН под нагрузкой: 1 — ввод ВН 110 кВ; 2 — ввод НН 10 кВ; 3 — крюк для подъема трансформатора; 4 — бак; 5 — радиатор; 6 — фильтр термосифонный; 7 — скоба для подъема домкратом; 6 — вертикальный кран для слива масла; 9 — вентилятор; 10 — каток; 11— полубандажи стяжки ярма; 12 — вертикальная стяжная шпилька остова; 13 — ярмовая балка; 14 — устройство переключения ответвлений обмотки ВН; 15 — бандажи стяжки стержня; 16 — пластина с проушиной для подъема активной части; 17 — расширитель; 18 — маслоуказатель; 19 — предохранительная труба

**Изоляция обмоток трансформатора**

Витки обмоток трансформатора должны быть надежно электрически изолированы друг от друга, от витков других обмоток и от корпуса трансформатора. В масляных трансформаторах, применяемых при напряжениях более 10 кВ, для этих целей используется так называемая маслобумажная барьерная изоляция, образующаяся при пропитке трансформаторным маслом кабельной бумаги или электроизоляционного картона и заполнении этим маслом изоляционных промежутков между витками обмоток и корпусом. Трансформаторное масло, заполняющее бак, в котором установлены активные части трансформатора, одновременно используется для их охлаждения.

Витковой изоляцией служит пропитанная маслом изоляция проводов марок ПЭЛБО, ПБ (круглые сечения проводов) и ПББО (прямоугольные сечения)- Конструкция главной изоляции, предназначенной для изоляции обмоток друг от друга, от бака и от остова, представлена на рис 1.14.



Ряс. 1.14. Обмотки трансформатора по рис. 1.13: 1 — стальное прессующее кольцо; 2 — обмотка тонкого регулирования; 3 — обмотка грубого регулирования; 4 — обмотка ВН; 5 — обмотка НН; 6— угловая изоляционная шайба; 7— междукатушечные прокладки; 8— изоляционные цилиндры; 9 — опорные кольца из электроизоляционного картона; 10 — ярмовая изоляция из электроизоляционного картона; // — уравнительная изоляция; 12 — деревянная планка; 13 — деревянный стержень; 14, 15 — рейка из электроизоляционного картона

**Отводы и вводы**

Электрическое соединение обмоток ВН и НН с электрическими сетями осуществляется (см. рис. 1.13) при помощи отводов (изолированных проводников, укрепленных внутри бака трансформатора) и вводов (проходных фарфоровых изоляторов, сквозь которые проходит токоведущий стержень).

Токоведущий стержень ввода должен быть надежно изолирован от заземленной крышки бака как со стороны масла, так и со стороны воздуха (рис- 1-15).

С увеличением напряжения размеры вводов увеличиваются, а их конструкция усложняется. Вводы на напряжение 110 кВ и выше делаются маслонаполненными.

Арматура бак трансформатора. Бак трансформатора недопустимо полностью заполнять маслом и закрывать герметически, так как в этом случае он был бы неизбежно разрушен давлением, возникающим в баке при увеличении объема масла при колебаниях температуры. Поэтому приходится заполнять бак маслом не полностью и сообщать воздушное пространство над маслом с окружающим воздухом. От соприкосновения с окружающим воздухом масло в трансформаторе окисляется и увлажняется, постепенно, теряя свои электроизоляционные свойства. Для уменьшения площади контакта масла с воздухом и стабилизации его изоляционных свойств баки масляных трансформаторов снабжаются расширителем — цилиндрическим сосудом из листовой стали, сообщающимся с баком (см. рис. 1,13, 1.16). Трансформатор, имеющий расширитель, значительно реже нуждается в сушке, очистке, регенерации масла или замене его новым.

Необходимыми принадлежностями расширителя являются указатель уровня масла и отстойник для грязи и влаги. Воздушный объем в верхней части расширителя сообщается с атмосферой при помощи трубки для свободного обмена воздуха, выведенной под расширитель (это исключает попадание в расширитель капель влаги).

Для увеличения поверхности, через которую происходит теплообмен между нагретым маслом и окружающей средой, на баке трансформатора устанавливаются охладители (в виде навесных радиаторов 5 на рис. 1.13). Охладители присоединяются к баку через патрубки с кранами, позволяющими производить замену и отсоединение охладителя при заполненном баке трансформатора. Для контроля температуры масла в верхней части бака используются ртутные, а в более мощных трансформаторах манометрические термометры или дистанционные электротермометры сопротивления. Измерительное устройство последних устанавливается на щите управления.

На патрубке между крышкой бака и расширителем устанавливается газовое реле, которое служит для обнаружения повреждений.

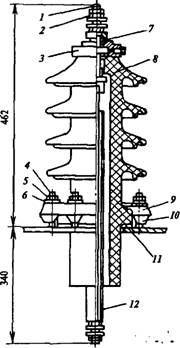


Рис. 1.15. Ввод для наружной установки на напряжение 35 кВ при токе до 250 А с токоведушей шпилькой, присоединяемой к отводу: 1 — медная шпилька; 2 — латунная гайка; 3 — латунный колпак; 4, 5 к 6 — стальные шпилька, гайка, шайба; 7 — резиновое кольцо; 6 — фарфоровый изолятор; 9 — стальной штампованный фланец; 10 — кулачок; 11 — резиновое уплотнение; 12 — токоведущая шпилька с изолирующей трубкой

**Арматура бака трансформатора**

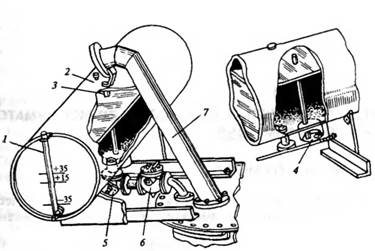


Рис. 1.16. Арматура бака трансформатора: 1 — указатель уровня масла; 2 — пробка для заливки масла; 3 — трубка для свободного обмена воздуха; 4 — грязеотстойник; 5 — кран для отсоединения расширителя; 6 — газовое реле; 7 — выхлопная труба

При повреждениях, приводящих к незначительному местному нагреванию (ухудшение контакта в соединениях, нарушение изоляции между листами сердечника), происходит разложение твердой изоляции и масла, сопровождающееся выделением пузырьков газа. Поднимаясь вверх, пузырьки газа скапливаются в газовом реле, вытесняя из него масло. Это приводит к опрокидыванию поплавка, замыкающего сигнальный контакт.

При значительных повреждениях, сопровождающихся взрывообразным выделением газов (короткое замыкание одного или нескольких витков и т.п.), масло толчкообразно перемещается из бака в расширитель. Струя масла опрокидывает другой поплавок реле, который, замыкая соответствующие контакты, отключает трансформатор от сети.

Еще одно устройство, называемое выхлопной трубой (см. рис. 1.13 и 1.16), предохраняет бак трансформатора от механических деформаций при взрывообразных выделениях газа. Выход из выхлопной трубы герметически закрыт мембраной, рассчитанной таким образом, чтобы при повышении давления она разрушалась раньше, чем деформируется бак.