

# **ТРАНСФОРМАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

## **ТРАНСФОРМАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

Содержание лекции:

1. Общие вопросы
2. Принцип работы и устройство трансформатора
3. Автотрансформаторы
4. Конструкция трансформатора
5. Изоляция в трансформаторах
6. Потери и коэффициент полезного действия трансформатора
7. Структура условного обозначения типа трансформатора
8. Измерительные трансформаторы
9. Современное состояние, тенденции развития трансформаторостроения

# 1. Общие вопросы

Для связи с *энергосистемой* и *потребителями*, а также для питания собственных потребителей станции (собственных нужд) на электрических станциях и *подстанциях* устанавливают повышающие и понижающие *трансформаторы*. В связи с тем что в сетях энергосистем существует несколько ступеней *трансформации*, количество трансформаторов и их мощность в несколько раз превышают число и установленную мощность генераторов. Следует заметить, что на каждый установленный киловатт генераторной мощности приходится 7—8 кВА трансформаторной мощности, а на вновь вводимый — до 12—15 кВА.

На крупных электростанциях для связи двух высших напряжений, как правило, применяются *автотрансформаторы*, обладающие существенными технико-экономическими преимуществами в сравнении с обычными трансформаторами. Стоимость автотрансформатора, потери энергии при эксплуатации значительно ниже, чем у обычных трансформаторов той же мощности.

На подстанциях 35—750 кВ энергосистем России работает около 2500 силовых трансформаторов и автотрансформаторов общей мощностью более 570 тыс. МВА, что почти втрое больше установленной мощности электростанций.

Распределение трансформаторов и автотрансформаторов мощностью 120 МВ · А и более по классам напряжения и их доля в общей мощности представлены в табл. 1.

<b>Распределение трансформаторов и автотрансформаторов по классам напряжения и их доля в общей мощности Таблица 1</b>	
Класс напряжения, кВ	Доля общей мощности, %
110	7
220	36
330	12,5
500	37
750	6
1150	1,5

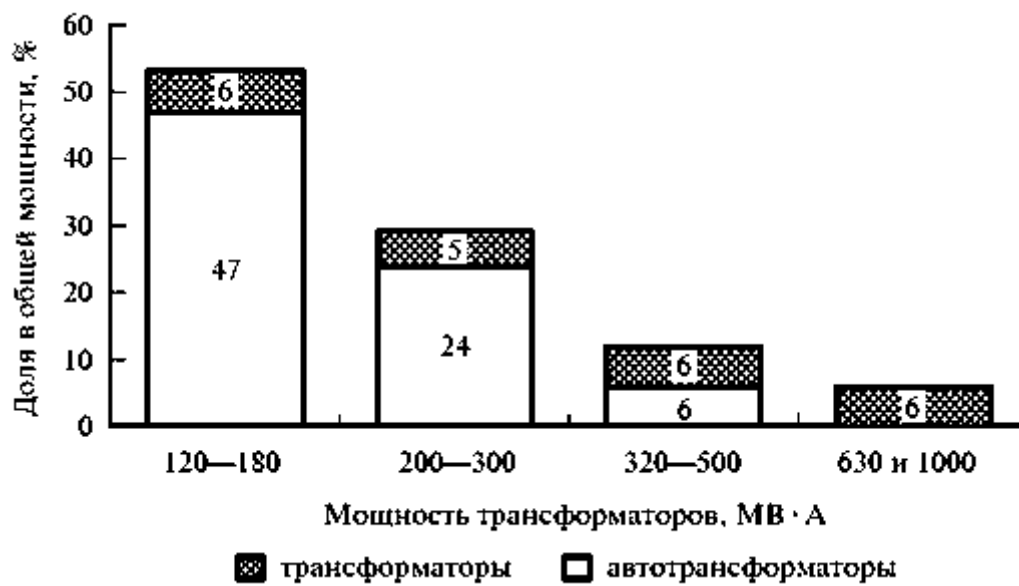


Рис1 Распределение мощности трансформаторов и автотрансформаторов.

Напряжение 1150 кВ отечественных трансформаторов является наивысшим в мире.

На диаграмме рис.1 представлено распределение мощности трансформаторов и автотрансформаторов.

## 2. Принцип работы и устройство трансформатора

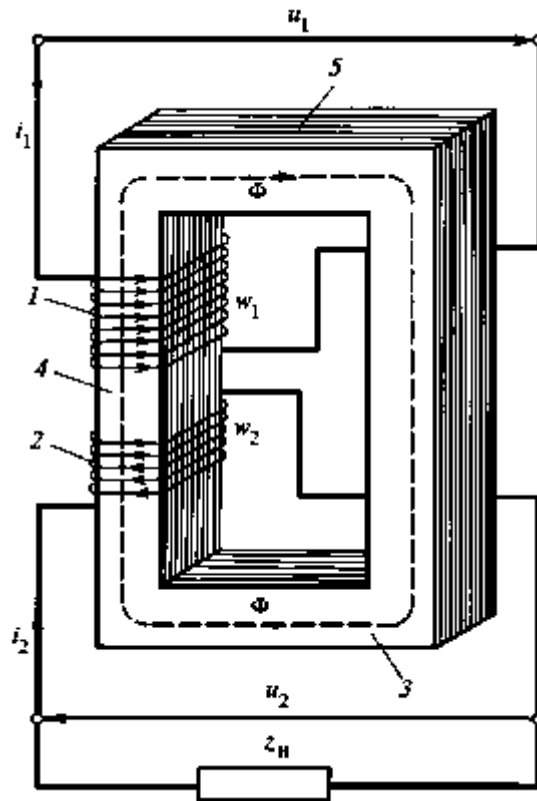


Рис.2. Электромагнитная система однофазного двухобмоточного трансформатора:

- 1- Первичная обмотка
- 2- вторичная обмотка
- 3,4,5- магнитопровод
- 4 стержень магнитопровода
- 5 ядро магнитопровода

В трансформаторе передача электрической энергии из *первичной обмотки* во *вторичную* осуществляется, как и во всех электрических машинах, посредством *магнитного потока*  $\Phi$ , который является переменным, т.е. изменяющимся во времени.

В основе работы трансформатора лежит явление *электромагнитной индукции*, в соответствии с которым значение *электродвижущей силы* (ЭДС), наведенной в контуре, пропорционально скорости изменения потока  $\Phi$ , пронизывающего этот контур. Если в контуре имеется несколько последовательно соединенных витков  $w$ , то наведенная в катушке ЭДС будет в  $w$  раз больше.

Принцип работы трансформатора рассмотрим на примере простейшего однофазного двухобмоточного трансформатора, электромагнитная система которого представлена на рис.2.

Трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода 3 и двух обмоток с числом витков  $w_1$  и  $w_2$ .

Обмотки трансформатора служат для создания *магнитного поля*, посредством которого осуществляется передача электрической энергии и обеспечивается наведение в обмотках ЭДС, требуемой по условиям эксплуатации. Обмотки выполняют из медных или алюминиевых изолированных проводов круглого или прямоугольного сечения.

Обмотку  $w_1$  трансформатора, к которой подводится электрическая энергия (напряжение  $u_1$ ), называют *первичной*, а обмотку  $w_2$ , от которой энергия отводится (напряжение  $u_2$ ), — *вторичной*.

*Магнитопровод* трансформатора служит для усиления магнитной связи между обмотками и является конструктивным основанием (остовом) для установки и крепления обмоток, отводов и других деталей трансформатора (рис.3).

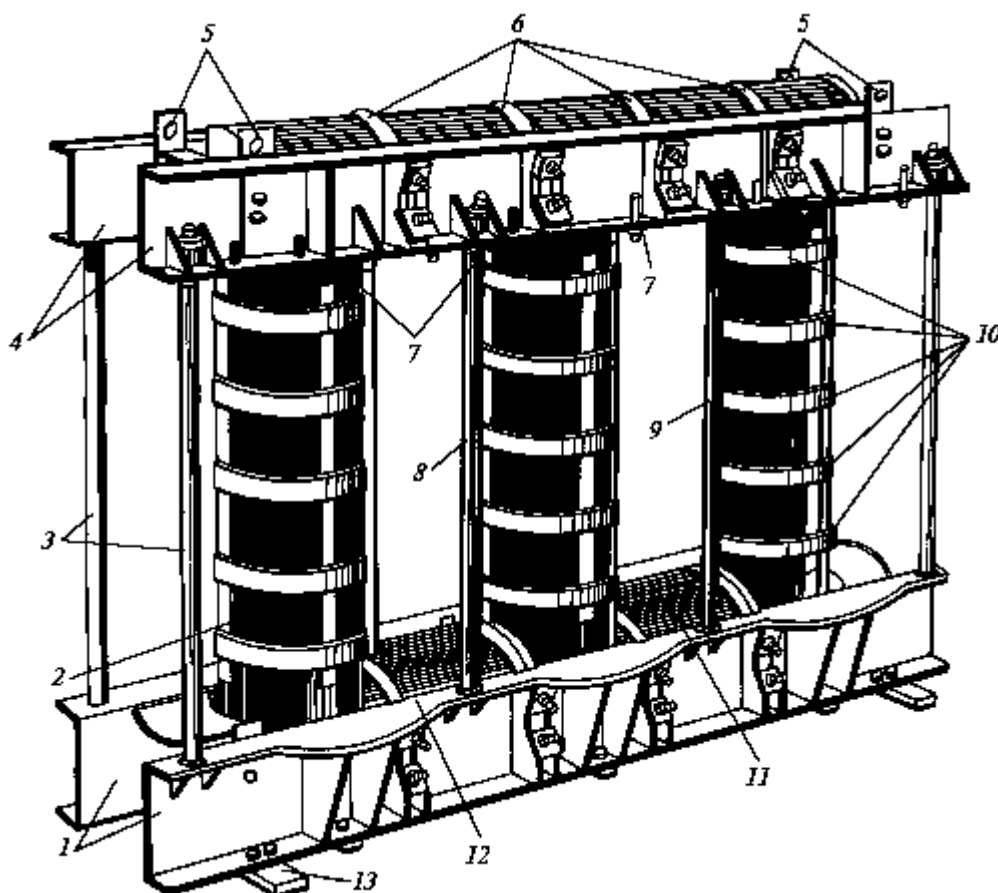


Рис.3. Остов трансформатора с прессующими шпильками.

Магнитопровод набирают из изолированных листов специальной электротехнической стали с относительным содержанием кремния до 5%. Толщину листов выбирают из условий получения приемлемого уровня потерь от индуцированных в них вихревых токов при заданной частоте питающего трансформатор источника переменного тока и технологических условий при производстве магнитопровода.

При частоте 50 Гц в современных силовых трансформаторах толщина листов равна 0,27—0,35 мм.

Часть магнитопровода, на которой располагается обмотка, называют *стержнем*, а часть магнитопровода, замыкающая стержни, на которых не располагаются обмотки, называется *ярмом*.

Если первичную обмотку трансформатора при разомкнутой вторичной включить в сеть переменного тока с напряжением  $u_1$ , то по ней потечет ток  $i_1 = i_0$ , называемый током холостого хода. Обусловленная током  $i_0$  *магнитодвижущая сила* (МДС) первичной обмотки  $i_0 w_1$  создает в магнитопроводе трансформатора переменный магнитный поток  $\Phi$ , который почти полностью, за исключением некоторого рассеяния, сцеплен со всеми витками первичной и вторичной обмоток. Магнитный поток  $\Phi$  в соответствии с законом электромагнитной индукции наведет в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $e_1$ , значение которой пропорционально числу витков  $w_1$ , а во вторичной обмотке — ЭДС  $e_2$ , пропорциональную числу витков  $w_2$ .

Отношение индуктированных в первичной и вторичной обмотках ЭДС, равное отношению чисел витков этих обмоток, называют *коэффициентом трансформации*  $K = e_1/e_2 = w_1/w_2$ .

Таким образом, подбирая число витков обмоток, можно при заданном напряжении  $u_1$ , которое примерно равно ЭДС  $e_1$ , получить требуемое выходное напряжение трансформатора  $u_2 = e_2$ .

Если  $u_1 > u_2$  ( $w_1 > w_2$ ), т.е.  $K > 1$ , трансформатор называют *понижающим*, а при  $u_1 < u_2$  ( $w_1 < w_2$ ) — *повышающим*.

При подключении вторичной обмотки к сопротивлению нагрузки  $Z_n$  по ней потечет переменный ток  $i_2$ . При этом в первичной обмотке возникнет ток  $i_1$ , который поддерживает магнитный поток постоянным. Вследствие этого обеспечивается равновесие между ЭДС  $e_1$ , наведенной в первичной обмотке, и напряжением в сети  $u_1$ .

Таким образом, при нагрузке трансформатора магнитный поток создается совместным действием магнитодвижущих сил первичной и вторичной обмоток.

При замкнутом магнитопроводе, собранном из пластин электротехнической стали, обладающей небольшим магнитным сопротивлением, МДС первичной обмотки  $i_0 w_1$  (при разомкнутой вторичной обмотке) составляет 0,2—3,0 % МДС обмоток при номинальной нагрузке, поэтому можно принять, что  $i_1 w_1 \approx i_2 w_2$ . Следовательно, токи, протекающие в первичной и вторичной обмотках, обратно пропорциональны отношению чисел их витков  $i_1/i_2 = w_2/w_1$ .

Для *силовых трансформаторов* установлены стандартные обозначения (маркировка) начал и концов (выводов) обмоток.

В однофазном трансформаторе начало и конец обмотки *высшего напряжения* (ВН) обозначается соответственно прописными буквами  $A$  и  $X$ , а обмотки *низшего напряжения* (НН) — строчными латинскими буквами  $a$  и  $x$ . При наличии третьей обмотки с промежуточным (*средним*) *напряжением* (СН) начало и конец обмотки обозначают соответственно  $A_m$  и  $X_m$ .

В трехфазном трансформаторе начала и концы обмоток ВН обозначаются соответственно  $A, B, C$  и  $X, Y, Z$  и т.д.

В трехфазных трансформаторах обмотки могут быть соединены по схемам «звезда», «треугольник» или «зигзаг», которые соответственно обозначают русскими буквами  $Y$  и  $D$  и латинской  $Z$ . При выводе от нейтрали (общей точки обмоток фаз) у схемы «звезда» или «зигзаг» отвода (ответвления) его обозначают  $0$ , добавляя к буквенным обозначениям схем соединения обмоток индекс «н» ( $Y_n$ ).

Схемы соединения трехфазного трансформатора обозначаются в виде дроби, в числителе которой ставят обозначение схемы соединения обмотки ВН, а в знаменателе — НН, например для трансформатора с обмоткой ВН, соединенной по схеме треугольник, а НН — в звезду с выведенной нейтралью обозначение имеет вид  $D/Y_n$ .

При обслуживании трансформаторов кроме схем соединения необходимо знать взаимное направление ЭДС в обмотках ВН и НН. Если две обмотки  $1$  и  $2$  размещены на одном и том же стержне и пронизываются одним и тем же потоком  $\Phi$ , то при одинаковом направлении намотки и обозначении выводов (концов) (рис. 4, а) наведенные ЭДС одинаково направлены (от концов к началам) и, следовательно, совпадают по фазе.

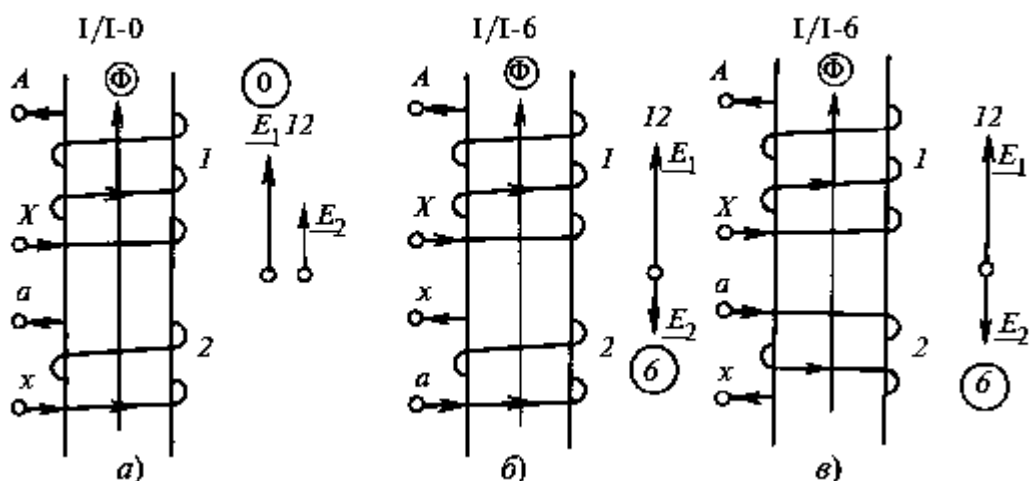


Рис.4. Группа соединения однофазных трансформаторов:  
а-0; б,в-6

Для характеристики сдвига фаз линейных ЭДС обмоток ВН и НН введено понятие *группы соединения обмоток трансформатора*.

Группа соединения обозначается целым числом, которое получено от деления на  $30^\circ$  угла сдвига между линейными ЭДС на одноименных выводах обмоток ВН и НН трансформатора, причем отсчет угла производится от вектора ЭДС обмотки ВН по направлению движения часовой стрелки.

На рис.4, а сдвиг между ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  обмоток  $Ax$  и  $ax$  равен нулю, поэтому группа соединений обмоток обозначается как  $I/I-0$ , где «I» говорит об однофазном варианте трансформатора, при этом ЭДС высшего напряжения  $E_1$  ассоциируется с минутной стрелкой часов и условно направляется на циферблате часов на цифру 12. Часовая стрелка часов представляет собой ЭДС низшего напряжения  $E_2$  и обозначает группу соединения.



Фазовый сдвиг между фазными ЭДС обмоток ВН и НН зависит как от обозначения выводов, так и от направления намотки. При размещении обмоток на одном стержне этот сдвиг может быть равным либо 0, либо  $180^\circ$ .

На рис.4, б, в при изменении обозначений концов обмотки НН (рис.4, б) или изменении направления намотки обмотки НН (рис.4, в) ЭДС  $\underline{E}_2$  поворачивается на угол  $180^\circ$ , что дает группу соединений I/I-6.

В трехфазных трансформаторах схемы соединения У, Д, Z могут образовывать 12 различных групп со сдвигом фаз линейных ЭДС через  $30^\circ$ .

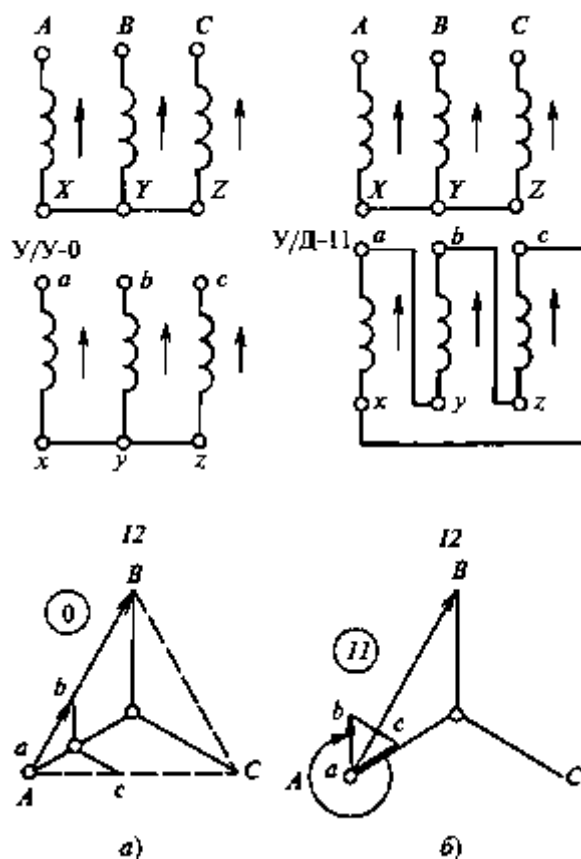


Рис.5. Группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов: 0 (а) и 11 (б)

На рис.5 для примера приведены схема соединения обмоток У/У и соответствующая векторная диаграмма для нулевой группы, которая обозначается У/У-0 (рис.5, а), а также векторная диаграмма для одиннадцатой группы при соединении обмоток У/Д (обозначение У/Д-11) (рис.5, б).

Из всех возможных групп соединения трехфазных двухобмоточных трансформаторов стандартизировано только две группы: 0 и 11 — с выводом в случае необходимости нулевой точки «звезды» или «зигзага», а для однофазных трансформаторов — только с соединением I/I-0.

Для трансформации трехфазного тока и напряжения применяют или три однофазных трансформатора (рис.6, а), или один трехфазный трансформатор (рис.6, б), в котором общий для трех фаз магнитопровод может быть образован из трех однофазных.

В самом деле, если три однофазных трансформатора расположить, как показано на рис.7, а, то стержни магнитопроводов, на которых не размещены обмотки, можно конструктивно объединить в один. Учитывая, что в трехфазной системе сумма фазных токов  $I_A + I_B + I_C = 0$ , а следовательно, и сумма потоков равна нулю, то надобность в объединенном стержне вообще отпадает. Полученный таким образом магнитопровод (рис.7, б) является пространственным трехфазным. В реальных конструкциях используют магнитопровод, называемый плоским стержневым трехфазным; он образуется, если у пространственного магнитопровода убрать *ярма* фазы *B* и все три *стержня* расположить в одной плоскости (рис.7, в).

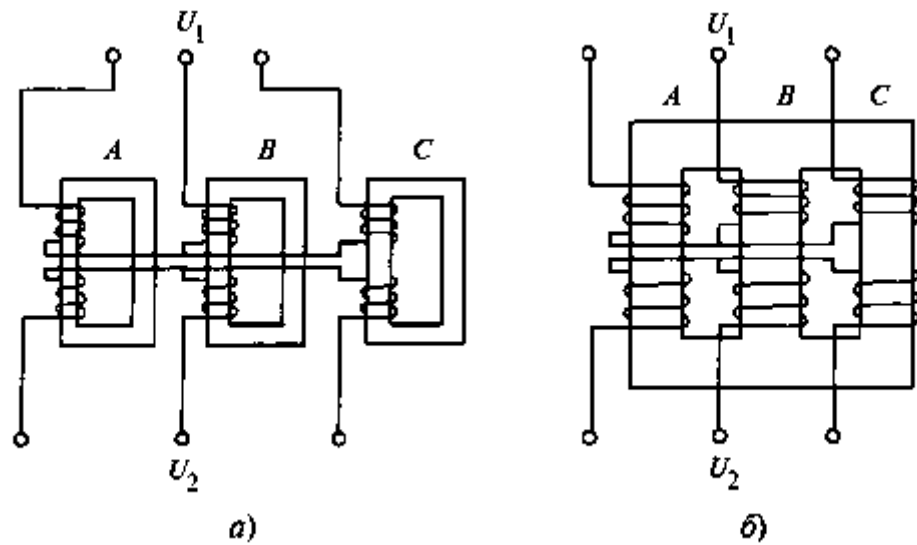


Рис.6. Трансформация трехфазных токов:  
а-группа однофазных трансформаторов; б-трехфазный трансформатор.

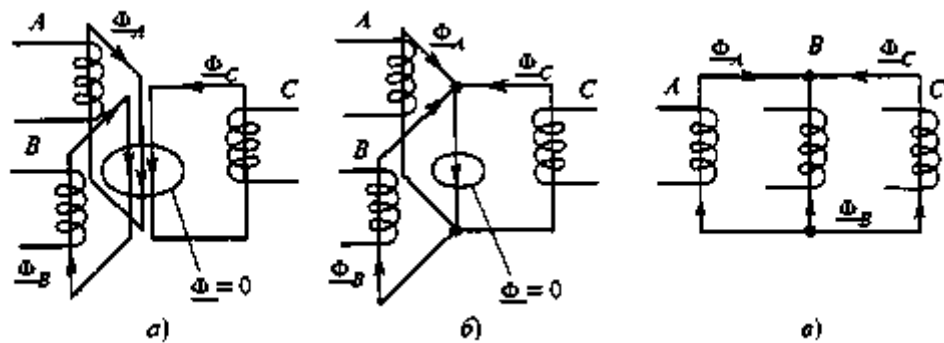


Рис.7. Образование пространственного (а,б) и плоского (в) трехфазного магнитопровода из трех однофазных.

Трехфазные трансформаторы с плоскими стержневыми магнитопроводами получили наибольшее распространение, а свойственная им магнитная несимметрия фаз существенного значения при эксплуатации не имеет.

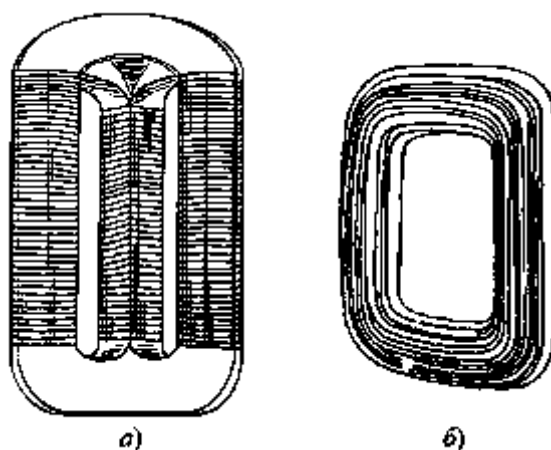


Рис.8. Пространственный ленточный магнитопровод: а-магнитопровод в сборе; б-секция магнитопровода.

На рис.8 представлена конструкция пространственного ленточного магнитопровода, состоящего из трех овальных секций, имеющих фасонную форму сечения и навитых из ленты холоднокатаной стали переменной ширины при безотходном раскрое стали и высоком коэффициенте заполнения сечения стержня активной сталью. Обмотки наматываются после сборки системы непосредственно на стержни на специальном стенде.

### 3. Автотрансформаторы

Для передачи электрической энергии с незначительным изменением напряжения и тока применяются автотрансформаторы, у которых, в отличие от обычного трансформатора, обмотки имеют не только магнитные, но и электрические связи. Автотрансформатор, как и трансформатор, может быть понижающим или повышающим (рис.9).

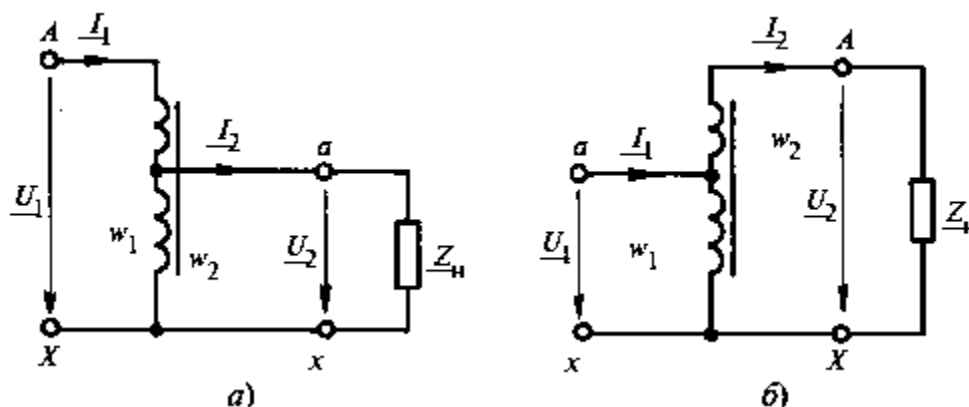


Рис.9. Однофазный понижающий (а) и повышающий (б) автотрансформаторы.

Электромагнитная (расчетная) мощность автотрансформатора меньше расчетной мощности двухобмоточного трансформатора вследствие того, что часть мощности передается во вторичную сеть за счет непосредственной электрической связи обмоток.

За счет уменьшения массы металла обмоток и стали магнитопровода КПД автотрансформатора выше по сравнению с трансформатором такой же номинальной мощности.

К числу недостатков автотрансформаторов, ограничивающих их применение, относится усложнение их *релейной защиты* и *регулирования напряжения*, а также повышенная опасность атмосферных перенапряжений из-за электрической связи обмоток. Автотрансформатор имеет, кроме того, повышенные токи короткого замыкания.

Автотрансформаторы используются для соединения *электрических сетей* высокого напряжения, пуска *двигателей* переменного тока большой мощности и т.д.

## 4. Конструкция трансформатора

Трансформатор кроме *активной части* — магнитопровода и обмоток — включает и конструктивную часть (рис.10).

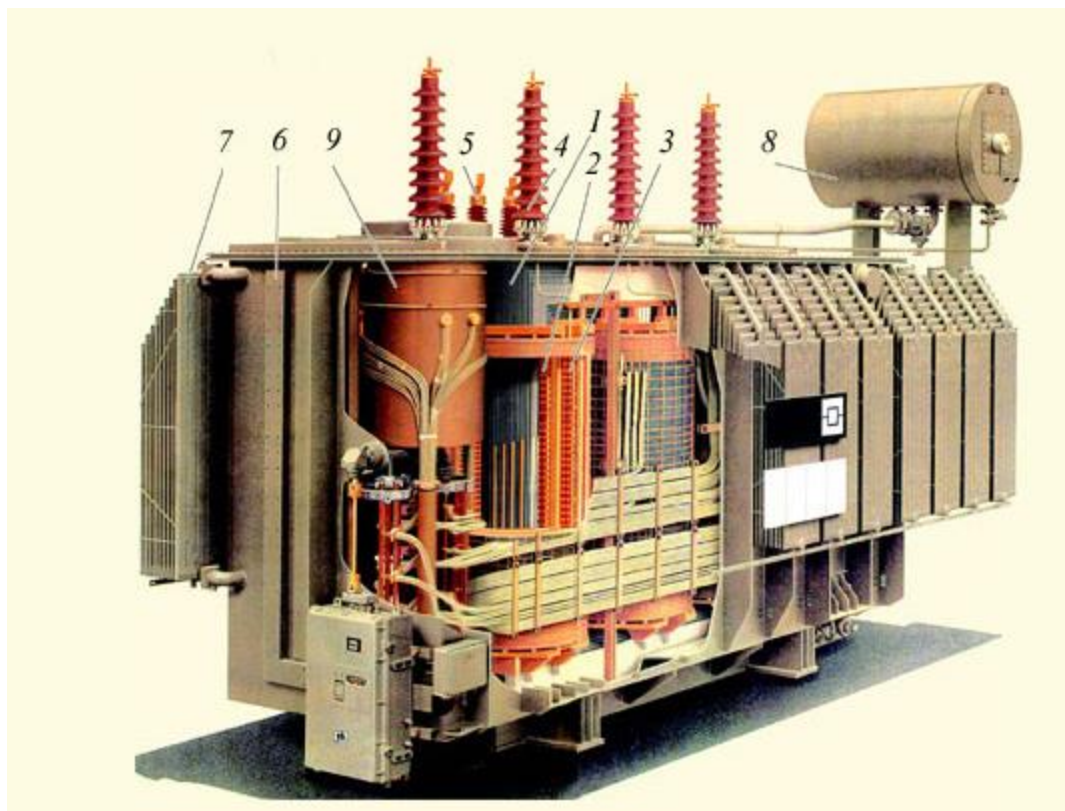


Рис.10.Трехфазный трансформатор

В мощных силовых трансформаторах в качестве обмоток низшего напряжения в основном применяют *винтовые обмотки* (рис.11). Они могут иметь от 4 до 20 (и более) параллельных проводов.

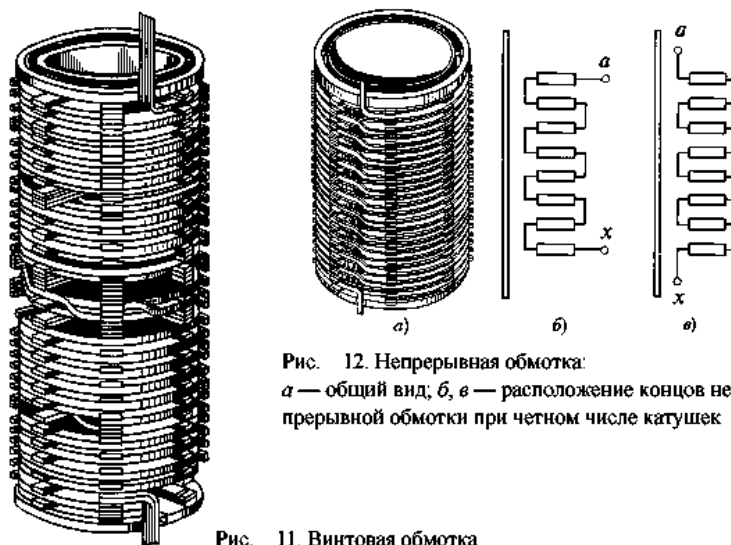


Рис. 11. Винтовая обмотка

Рис. 12. Непрерывная обмотка:  
а — общий вид, б, в — расположение концов непрерывной обмотки при четном числе катушек

В качестве обмоток высшего и низшего напряжения широко используются *непрерывные катушечные обмотки* ввиду их большой механической прочности и надежности (рис.12).

В тех случаях, когда затруднительно выполнить обмотку непрерывной (по условиям сборки или изоляции обмоток), применяется дисковая обмотка, собираемая из комплекта отдельно намотанных двойных катушек. Обмотку выполняют дисковой, если ее катушки имеют дополнительную изоляцию для всех витков катушки.

В трансформаторах классов напряжения 150 кВ и выше применяют *переплетенные обмотки*. Схема соединения витков переплетенной обмотки представлена на рис.13.

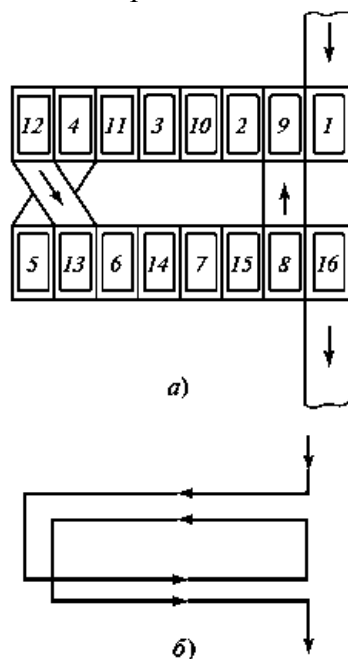


Рис.13. Расположение витков в паре соседних катушек переплетенной обмотки (а) и направление тока в витках (б)

В процессе намотки обеспечивается переплетение витков соседних катушек, что приводит к равномерному емкостному распределению напряжения.

Соединение различных частей обмоток между собой, с вводами и переключателями называют *отводами* трансформатора.

При работе трансформатора, а также при испытаниях отдельные части (обмотки, отводы и др.) находятся под высоким напряжением относительно магнитопровода, бака, крышки и других заземленных частей. При этом должна быть обеспечена электрическая прочность всей конструкции трансформатора. Изоляционные детали выполняют из различных твердых электроизолирующих материалов — электроизоляционного картона, бумаги, дерева и т.п. Кроме того, для изоляции большинства силовых трансформаторов используются жидкие электроизоляционные материалы, главным образом трансформаторное (минеральное) масло.

При эксплуатации трансформаторов возникает необходимость изменения их коэффициента трансформации — *регулируемому напряжению*, которое обеспечивается либо при отключенном от сети трансформаторе, осуществляемом переключателями без возбуждения (ПБВ) для подсоединения к различным отпайкам обмотки, либо регулированием под нагрузкой (РПН), которое осуществляется при помощи специальной аппаратуры, состоящей из переключателя (избирателя отпайки), контактора, приводного механизма и других элементов (для отсоединения и присоединения выбранной отпайки при номинальном токе обмотки). Устройство для регулирования напряжения представляет собой самостоятельный конструктивный узел, устанавливаемый на трансформаторе. Для присоединения обмоток к сети служат *вводы*, состоящие из токоведущей части, фарфоровой оболочки и опорного фланца. Вводы устанавливаются на крышке или стенке бака. При этом нижняя их часть находится внутри бака трансформатора в масле, а верхняя — вне бака в воздухе.

Активная часть с отводами и переключающим устройством помещается в *бак*, служащий резервуаром для трансформаторного масла. Крышку бака используют для установки вводов, крепления *расширителя*, термометров, переключающего устройства (ПБВ) и других конструктивных деталей. *Расширитель* служит для компенсации колебаний уровня масла при всех возможных в эксплуатации колебаниях температуры и предохраняет масло в баке от непосредственного соприкосновения с окружающим воздухом.

На стенке бака укрепляют охлаждающие устройства трансформатора — *радиаторы* или *охладители*, контакторы устройства регулирования напряжения под нагрузкой и т.п. В некоторых конструкциях радиаторы устанавливают на отдельном фундаменте рядом с трансформатором.



## 5. Изоляция в трансформаторах

Изоляция в трансформаторах определяет срок его службы. Она обеспечивается правильным выбором соответствующих изоляционных промежутков, которые могут выполнять в трансформаторе роль охлаждающих каналов.

Изоляция в трансформаторах должна без повреждений выдерживать электрические, тепловые, механические и другие воздействия, которым она подвергается в процессе эксплуатации.

Трансформатор постоянно находится в процессе эксплуатации во включенном состоянии, и на его изоляцию длительно воздействует *электрическое поле*, соответствующее *номинальному рабочему напряжению*. Это воздействие изоляция должна выдерживать неограниченно длительное время.

При работе трансформатора в энергосистеме возможны кратковременные повышения напряжения (перенапряжения), возникающие вследствие нормальных коммутационных процессов в сети (включение и отключение больших мощностей) или процессов аварийного характера, а также импульсные волны перенапряжения, возникающие из-за грозных атмосферных разрядов.

Обмотки трансформатора и все его токоведущие части при работе нагреваются. Воздействие высоких температур приводит к старению изоляции, вследствие чего она теряет эластичность, становится хрупкой, снижается ее электрическая прочность. В правильно спроектированном трансформаторе и при правильной эксплуатации изоляция может служить 20—25 лет и более. Теплостойкость изоляции, позволяющая обеспечить безаварийную работу трансформатора, достигается применением изоляционных материалов соответствующего класса, а также конструкцией обмоток и деталей изоляции, обеспечивающей их нормальное охлаждение.

В результате контакта изоляции со средой, охлаждающей обмотку (трансформаторным маслом или другим заполнителем), возможны неблагоприятные воздействия на нее, особенно при наличии в изоляции посторонних примесей, в частности влаги. Поэтому одной из важнейших технологических операций обработки изоляции является вакуумная сушка трансформатора после окончания сборки перед заливкой трансформатора маслом, а также защита от увлажнения при эксплуатации.

*Электрическая прочность изоляции* — один из основных показателей, определяющих пригодность трансформатора к эксплуатации. Требование электрической прочности состоит в том, что трансформатор должен выдерживать неограниченно длительное воздействие напряжения промышленной частоты и импульсные перенапряжения, которые могут превышать рабочее напряжение в несколько раз.

Проверка электрической прочности изоляции осуществляется в процессе испытаний, включающих, в частности, испытания напряжением промышленной частоты, а также импульсные испытания, имеющие целью проверку прочности в условиях эксплуатации при перенапряжениях, вызываемых атмосферными перенапряжениями. (Нормы и методы испытаний, формы и амплитуды испытательных напряжений устанавливаются соответствующими стандартами.)

Трансформаторы классов напряжения 150кВ и выше проходят испытания при длительных (0,5—1ч) приложениях напряжения промышленной частоты (1,3—1,5 номинального напряжения) при одновременном измерении уровня частичных разрядов в изоляции.

Эти испытания имеют целью выявить частичные повреждения в изоляции, которые могут возникнуть в процессе испытаний, а также дефекты изоляции, которые не выявлены при испытании напряжением промышленной частоты.

Уровень перенапряжения на зажимах обмоток трансформатора определяется степенью электрической защиты, осуществляемой *разрядниками* (или другими видами защиты), а также тем, заземлена или изолирована нейтраль электрической сети, в которой работает трансформатор.

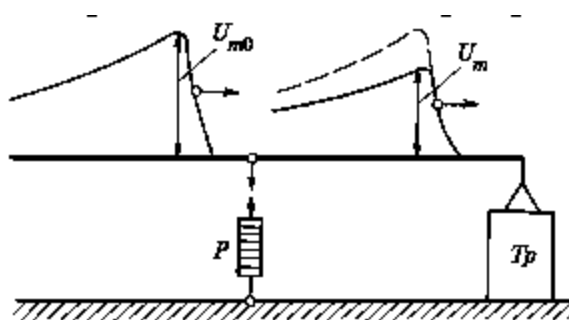


Рис.14. Воздействие на трансформатор волны перенапряжения

На рис.14 приведена схема защиты трансформатора при воздействии перенапряжения атмосферного характера. Для снижения перенапряжения трансформатор защищают разрядниками  $P$ , которые пробиваются при напряжении  $U_{m0}$ . Таким образом, если до разрядника волна имеет большую амплитуду, то после разрядника напряжение, достигающее обмотки трансформатора  $T_p$ , оказывается сниженным до  $U_m$ .

Перенапряжения распространяются вдоль *линии электропередачи* со скоростью, близкой к скорости света. Воздействие волны перенапряжения может быть представлено как колебательный процесс весьма высокой частоты. В этом случае можно считать, что токи не протекают по виткам катушки вследствие их большого индуктивного сопротивления. Ток протекает только по емкостным сопротивлениям, обусловленным емкостными связями между элементами обмоток (продольные емкости  $C'_d$ ) и между элементами обмоток и заземленными частями (поперечные емкости  $C'_q$ ) (рис.15). Следовательно, в первый момент для набегающей волны трансформатор является некоторой емкостью, называемой входной.

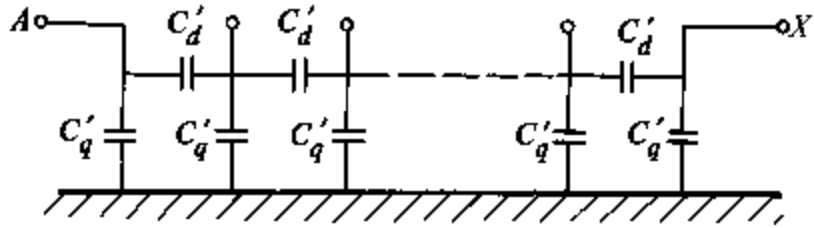


Рис.15. Емкостная цепь обмотки.

При переходе волны напряжения из цепи с меньшим волновым сопротивлением (линия) в цепь с большим сопротивлением (трансформатор) напряжение на зажимах трансформатора увеличивается и в пределе повышается до двукратного значения  $2U_m$  ее амплитуды. При заземленном конце  $X$  обмотки ( $U_x = 0$ ) начальное распределение напряжения (при  $t = 0$ ) весьма неравномерно. Конечное распределение напряжения (при  $t = \infty$ ) в этом случае будет линейным.

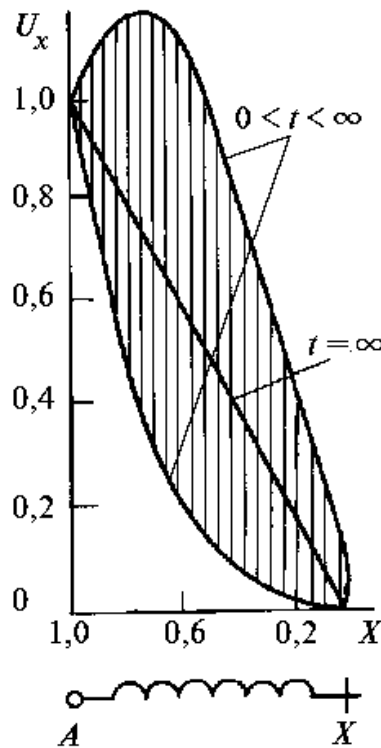


Рис.16. Распределение напряжения вдоль обмотки с заземленным концом в переходном режиме.

Процесс проникновения волны в обмотку представляет собой переходный процесс от начального распределения к конечному (при  $t = \infty$ ) и носит колебательный характер. Колебания постепенно затухают вследствие потерь в активных сопротивлениях. На рис. 4.16 показаны огибающие максимальных напряжений, возникающих в процессе колебаний в различных элементах по длине обмотки.

Вследствие колебательного процесса потенциалы отдельных точек обмотки могут оказаться больше амплитуды волны; перенапряжения вдоль обмотки (между соседними катушками и витками) могут значительно превышать рабочее напряжение.

Для защиты трансформатора от перенапряжений необходимо не допускать воздействий на него напряжений с амплитудой, превышающей значение, установленное для данного класса напряжения обмотки. Это условие обеспечивается правильным выбором трассы линий электропередач, исключаяй районы, особо подверженные грозам, а также защитой трансформаторных подстанций заземленными тросами и разрядниками. Одним из мероприятий для выравнивания начального распределения напряжения и сближения его с конечным является применение емкостных колец — электростатических экранов в виде разомкнутых шайбообразных колец.

В современных трансформаторах для защиты обмоток от импульсных перенапряжений используют в сочетании с емкостными кольцами переплетенные катушечные обмотки. Переплетением проводов соседних витков и катушек достигается увеличение продольной емкости  $C_d$ , что приводит к равномерному начальному распределению напряжения.

Для напряжения 110 кВ и выше может быть использована многослойная цилиндрическая экранированная обмотка, схематически показанная на рис.17.

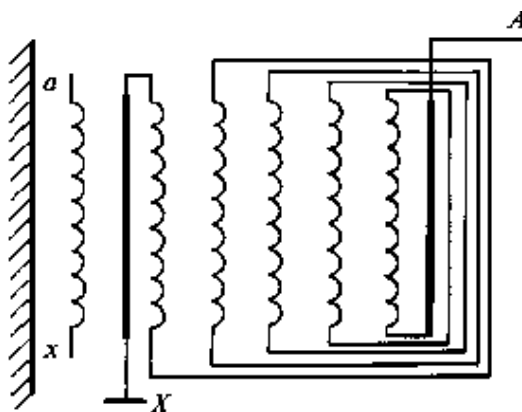


Рис.17. Схема соединения многослойной экранированной обмотки.

Для выравнивания начального распределения напряжения вдоль обмотки применяют электростатические экраны, которые размещают у начального А и нейтрального Х концов обмотки (см. рис.17) (благодаря большой поверхности слоев и близкому их расположению емкости между слоями больше, чем емкость на землю). Начальное распределение напряжения в этом случае получается близким к конечному.

Главная изоляция силовых масляных трансформаторов (изоляция между обмотками разных напряжений и между обмотками и заземленными частями) имеет следующее исполнение:

- 1) маслобумажная барьерная изоляция, образующаяся при пропитке трансформаторным маслом бумажной изоляции обмоток и электроизоляционного картона и заполнении маслом изоляционных промежутков между элементами обмоток, *остовом* и баком;
- 2) бумажно-масляная, состоящая из бумаги, пропитанной маслом, которая является одним из перспективных видов изоляции, так как дает возможность значительно сократить изоляционные расстояния, что позволяет в итоге уменьшить массу и габариты активной части и трансформатора в целом (однако процесс изготовления обмоток с бумажно-масляной изоляцией значительно сложнее).

## 6. Потери и коэффициент полезного действия трансформатора

Важной величиной, характеризующей экономичность работы трансформатора, является *коэффициент полезного действия* (КПД), равный отношению активной мощности, отдаваемой трансформатором во вторичную сеть  $P_2$ , к активной мощности  $P_1$ , потребляемой из сети:

$$\eta = P_2/P_1.$$

Первичная активная мощность определяется суммой, которая включает активную мощность  $P_2$ , магнитные потери  $P_m$  (потери в стали), электрические потери в первичной и вторичной обмотках  $P_{\varepsilon 1}$ ,  $P_{\varepsilon 2}$ :

$$P_1 = P_2 + P_m + P_{\varepsilon 1} + P_{\varepsilon 2}.$$

В современных силовых трансформаторах КПД достигает 0,98—0,995, причем максимальные значения КПД получаются при  $(0,45—0,65)P_{2ном}$ . Такая нагрузка обычно соответствует средней нагрузке при эксплуатации трансформатора. Отметим, что в диапазоне нагрузок  $(0,4—1,5)P_{2ном}$  КПД трансформатора изменяется относительно мало.

## 7. Структура условного обозначения типа трансформатора

Буквенная часть условного обозначения содержит обозначения в следующем порядке:

- А — автотрансформатор;
- О или Т — одно- или трехфазный трансформатор;
- Р — расщепленная обмотка НН.

Условное обозначение видов охлаждения:

- а) масляные трансформаторы:
  - М — естественная циркуляция воздуха и масла;
  - Д — принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла;
  - МЦ — естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком масла;
    - НМЦ — естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком масла;
    - ДЦ — принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла;
    - НДЦ — принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла;
    - Ц — принудительная циркуляция воды и масла и ненаправленным потоком масла (в охладителях вода движется по трубам, а масло — в межтрубном пространстве, разделенном перегородками);
    - НЦ — принудительная циркуляция воды и масла с направленным потоком масла;
  - б) трансформаторы с жидким негорючим диэлектриком:
    - Н — естественное охлаждение негорючим жидким диэлектриком;
    - НД — охлаждение негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха;
      - ННД — охлаждение негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха и направленным потоком жидкого диэлектрика;
    - в) сухие трансформаторы:
      - С — естественное воздушное при открытом исполнении;
      - СЗ — естественное воздушное при защищенном исполнении;
      - СГ — естественное воздушное при герметичном исполнении;
      - СД — воздушное с принудительной циркуляцией воздуха;
      - З — исполнение трансформатора с естественным масляным охлаждением или с охлаждением негорючим жидким диэлектриком с защитой при помощи азотной подушки без расширителя;
        - Т — трехобмоточный трансформатор;
        - Н — трансформатор с РПН (с регулированием напряжения под нагрузкой);
        - С — исполнение трансформатора собственных нужд электростанции;
        - Л — трансформатор с литой изоляцией.

Примеры условных обозначений:

- трансформатора трехфазного, сухого, с естественным воздушным охлаждением, при защищенном исполнении, двухобмоточного, мощностью 100 кВА, напряжением 10 кВ, исполнения У, категории 3 по ГОСТ 15150-69: ТСЗ-100/10-УЗ;
- трансформатора трехфазного, масляного, с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла, двухобмоточного, с расщепленной обмоткой НН, регулированием напряжения под нагрузкой, мощностью 32 000 кВА, напряжением 110 кВ, исполнения У, категории 1 по ГОСТ 15150-69: ТРДН-32 000/110-У1.

## 8. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы используют, главным образом, для подключения электроизмерительных приборов к цепи переменного тока высокого напряжения. При этом электроизмерительные приборы оказываются изолированными от цепей высокого напряжения, что обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала. Кроме того, измерительные трансформаторы дают возможность расширять пределы измерения приборов, т.е. измерять большие токи и напряжения с помощью сравнительно несложных приборов, рассчитанных для измерения малых токов и напряжений. В ряде случаев измерительные трансформаторы служат для подключения к цепям высокого напряжения обмоток *реле*, обеспечивающих защиту электроустановок от *аварийных режимов*.

Измерительные трансформаторы подразделяют на два типа — *трансформаторы напряжения* и *трансформаторы тока*. Трансформаторы напряжения служат для включения вольтметров, а также других приборов, реагирующих на значение напряжения (например, катушек напряжения ваттметров, счетчиков, фазометров и различных реле). Вторые служат для включения амперметров и токовых катушек указанных приборов. Измерительные трансформаторы изготовляют мощностью от пяти до нескольких сотен вольт-ампер; они рассчитаны для совместной работы со стандартными приборами (амперметрами на 1; 2; 2,5 и 5 А, вольтметрами на 100 и  $100\sqrt{3}$  В).

*Трансформатор напряжения* выполняют в виде двухобмоточного понижающего трансформатора (рис.18). Для обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала вторичную обмотку тщательно изолируют от первичной и заземляют. Условное обозначение трансформатора напряжения такое же, как двухобмоточного трансформатора.

Так как сопротивления обмоток вольтметров и других приборов, подключаемых к трансформатору напряжения, велики, то он практически работает в режиме холостого хода. В этом режиме можно с достаточной степенью точности считать, что

$$U_1 = U_2 K,$$

где  $K$  — коэффициент трансформации.



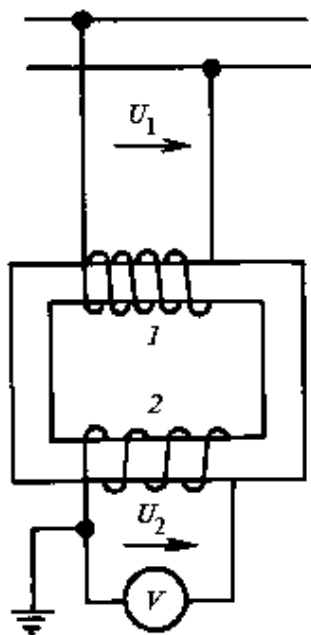


Рис. 18. Схема включения трансформатора напряжения:  
1 — первичная обмотка;  
2 — вторичная обмотка

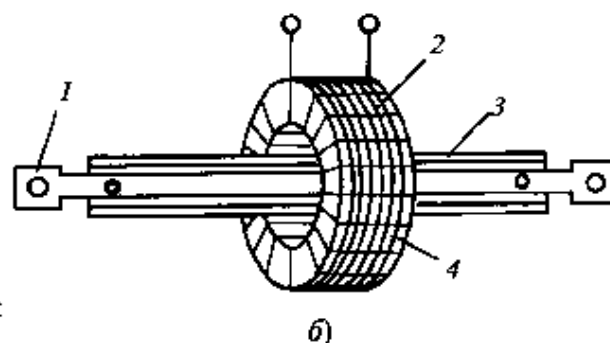
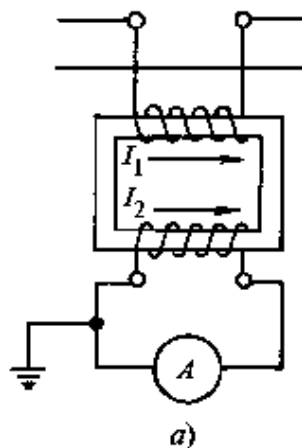


Рис. 19. Схема включения трансформатора тока (а) и общий вид проходного трансформатора тока (б):  
1 — медный стержень (первичная обмотка); 2 — вторичная обмотка; 3 — изоляция; 4 — магнитопровод

Поскольку ток холостого хода создает в трансформаторе некоторое падение напряжения, преобразование напряжения происходит с некоторой погрешностью по значению и фазе.

В зависимости от значения допускаемых погрешностей стационарные трансформаторы напряжения подразделяют на три класса точности: 0,5; 1 и 3; а лабораторные — на четыре класса: 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5. Обозначение класса соответствует значению относительной погрешности по фазе при номинальном напряжении  $U_{ном}$ .

**Трансформатор тока** выполняют в виде двухобмоточного повышающего трансформатора (рис.19, а) или в виде проходного трансформатора, у которого первичной обмоткой служит провод, проходящий через окно магнитопровода. В некоторых конструкциях магнитопровод и вторичная обмотка смонтированы на проходном изоляторе, служащем для ввода высокого напряжения в *силовой трансформатор* или другую электрическую установку. Первичной обмоткой трансформатора служит медный стержень, проходящий внутри изолятора (рис.19, б).

Сопrotивления обмоток амперметров и других приборов, подключаемых к трансформатору тока, обычно малы. Поэтому он практически работает в режиме короткого замыкания, при котором ток  $I_1$  во много раз больше тока холостого хода  $I_0$ , и с достаточной степенью точности можно считать, что

$$I_1 = I_2 / K.$$

В действительности из-за наличия тока холостого хода в рассматриваемом трансформаторе между векторами этих токов первичной и вторичной обмоток имеется некоторый угол, отличный от  $180^\circ$  что создает относительную токовую (амплитудную) и угловую погрешность.

В зависимости от значения допускаемых погрешностей трансформаторы тока подразделяют на пять классов точности: стационарные — на классы 0,2; 0,5; 1; 3 и 10; лабораторные — на классы 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2. Приведенные цифры соответствуют допускаемой для данного класса токовой погрешности при номинальном значении тока.

## 9. Современное состояние, тенденции развития трансформаторостроения.

В *электрических сетях* России эксплуатируются трансформаторы напряжением от 6 до 1150кВ и номинальной мощностью от 5 кВА до 1200МВА; общая мощность установленных силовых трансформаторов к 2000 г. составила более 570 ГВА. Основная часть силовых трансформаторов имеет маслбумажную изоляцию с естественной или направленной циркуляцией масла. В пожароопасных зонах используются трансформаторы с сухой (полимерной) изоляцией и воздушным охлаждением, а также с элегазовой изоляцией. В последнее время разработаны трансформаторы с обмотками кабельного типа, имеющие полиэтиленовую изоляцию. Большие мощности трансформаторов и их выполнение на сверхвысокие напряжения определяют значительные напряженности электрического и магнитного полей при использовании активных материалов, а также значительные механические воздействия при коротких замыканиях в сети. Поэтому при эксплуатации трансформаторного оборудования необходимыми являются жесткий контроль за тепловым режимом работы (для предупреждения износа изоляции вследствие старения при повышенных нагревах), периодическая подпрессовка обмоток, тщательная защита масла от увлажнения.

Направления совершенствования силовых трансформаторов характеризуются изменением ряда технических показателей и совершенствованием элементов конструкции.

Одна из существенных задач — уменьшение потерь энергии в трансформаторах, т.е. потерь холостого хода и короткого замыкания.

*Уменьшение потерь холостого хода* (магнитных потерь) может быть достигнуто при использовании холоднокатаной электротехнической стали с содержанием кремния 3 % и выше, имеющей изотропию магнитных свойств (т.е. одинаковые свойства независимо от направления проката) и сниженные удельные потери при толщине листа 0,23; 0,18 и 0,15мм.

Сокращение расхода изоляционных материалов, трансформаторного масла, массы обмоток и металла, используемого на изготовление баков и систем охлаждения трансформаторов, может быть достигнуто *уменьшением изоляционных расстояний* на основе новых технологий и применения новых средств защиты от перенапряжений. Значительный эффект для экономии конструктивных материалов дает *применение форсированного охлаждения с направленной циркуляцией масла* в каналах обмоток и эффективных охладителях.

Для обеспечения экономичной работы сетей и надлежащего качества энергии, отпускаемой потребителям, т.е. для поддержания постоянства напряжения, возникает необходимость в расширении выпуска трансформаторов *с регулированием напряжения под нагрузкой* (РПН).

Разработанные в трансформаторостроении методы исследования поля рассеяния трансформаторов и создание точных методов анализа распределения поля рассеяния и вызываемых ими электродинамических сил, действующих на обмотки при коротком замыкании, позволяют обеспечить электродинамическую стойкость и надежность силовых трансформаторов мощностью 250—1000 МВА и более.

*Исследование поля рассеяния трансформаторов* имеет целью также обеспечить определенную организацию и локализацию этого поля за счет рационального размещения обмоток и применения магнитных экранов, что позволяет существенно уменьшить добавочные потери в обмотках и конструктивных деталях трансформатора — стенках бака, прессованных деталях обмоток и остова.

Создание программ расчета электрического поля обмоток позволяет разрабатывать конструкцию изоляции обмоток трансформаторов напряжением 35—1150 кВ с учетом воздействия импульсных перенапряжений, не обращаясь к достаточно дорогим методам исследования натуральных моделей.

## Литература для самостоятельного изучения

1. **Сергеенков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А.** Электрические машины. Трансформаторы: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1989.
2. **Электротехнический справочник.** Т.2. Электротехнические изделия и устройства. М.: Издательство МЭИ, 1998.