

Выполнил студент : Тихов И.В.

# УСТРОЙСТВО И РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

# ТРАНСФОРМАТОР

---

**Трансформатор** (от лат. *transformo* — преобразовывать) — электрическая машина, состоящая из набора индуктивно связанных обмоток на каком-либо магнитопроводе или без него и предназначенный для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока без изменения частоты систем(системы) переменного тока.

Трансформатор осуществляет преобразование напряжения переменного тока и/или гальваническую развязку в самых различных областях применения — электроэнергетике, электронике и радиотехнике.

Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод (сердечник) из ферромагнитного магнито-мягкого материала.

# ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА

---

В практической конструкции трансформатора производитель выбирает между тремя различными базовыми концепциями:

- Стержневой
- Броневой
- Тороидальный

Любая из этих концепций не влияет на эксплуатационные характеристики или эксплуатационную надёжность трансформатора, но имеются существенные различия в процессе их изготовления. Каждый производитель выбирает концепцию, которую он считает наиболее удобной с точки зрения изготовления, и стремится к применению этой концепции на всём объёме производства.

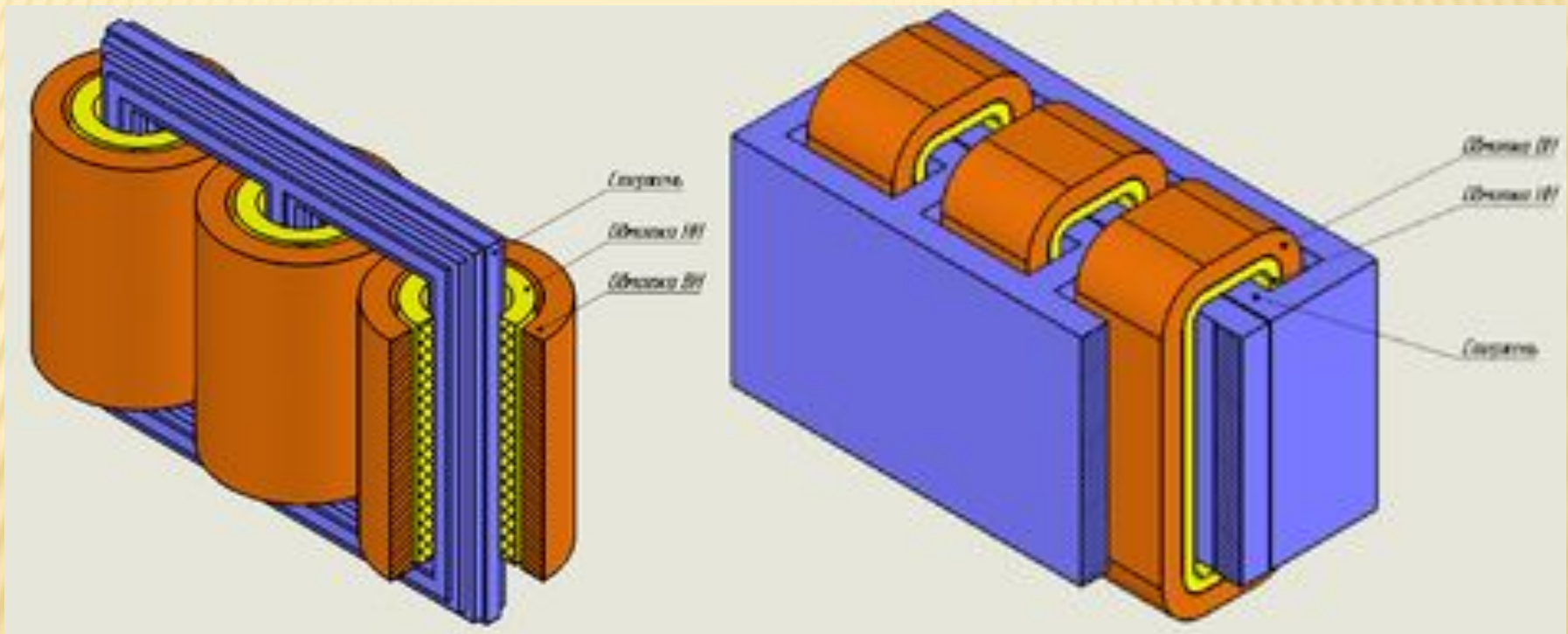
В то время как обмотки стержневого типа заключают в себе сердечник, сердечник броневого типа заключает в себе обмотки. Если смотреть на активный компонент (т.е. сердечник с обмотками) стержневого типа, обмотки хорошо видны, но они скрывают за собой стержни магнитной системы сердечника. Видно только верхнее и нижнее ядро сердечника. В конструкции броневого типа сердечник скрывает в себе основную часть обмоток.

---

Ещё одно отличие состоит в том, что ось обмоток стержневого типа, как правило, имеет вертикальное положение, в то время как в броневой конструкции она может быть горизонтальной или вертикальной.

Основными частями конструкции трансформатора являются:

- магнитная система (магнитопровод)
- обмотки
- система охлаждения



Стержневой тип  
трёхфазных  
трансформаторов

Броневой тип трёхфазных  
трансформаторов

# МАГНИТНАЯ СИСТЕМА (МАГНИТОПРОВОД)

---

**Магнитная система (магнитопровод) трансформатора** — комплект элементов (чаще всего пластин) электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, собранных в определённой геометрической форме, предназначенный для локализации в нём основного магнитного поля трансформатора. Магнитная система в полностью собранном виде совместно со всеми узлами и деталями, служащими для скрепления отдельных частей в единую конструкцию, называется **остовом трансформатора**.

Часть магнитной системы, на которой располагаются основные обмотки трансформатора, называется — **стержень**

Часть магнитной системы трансформатора, не несущая основных обмоток и служащая для замыкания магнитной цепи, называется — **ярмо**

---

В зависимости от пространственного расположения стержней, выделяют:

1. **Плоская магнитная система** — магнитная система, в которой продольные оси всех стержней и ярм расположены в одной плоскости
2. **Пространственная магнитная система** — магнитная система, в которой продольные оси стержней или ярм, или стержней и ярм расположены в разных плоскостях
3. **Симметричная магнитная система** — магнитная система, в которой все стержни имеют одинаковую форму, конструкцию и размеры, а взаимное расположение любого стержня по отношению ко всем ярмам одинаково для всех стержней
4. **Несимметричная магнитная система** — магнитная система, в которой отдельные стержни могут отличаться от других стержней по форме, конструкции или размерам или взаимное расположение какого-либо стержня по отношению к другим стержням или ярмам может отличаться от расположения любого другого стержня

# ОБМОТКИ

---

Основным элементом обмотки является **виток** — электрический проводник, или ряд параллельно соединённых таких проводников (многопроволочная жила), однократно обхватывающий часть магнитной системы трансформатора, электрический ток которого совместно с токами других таких проводников и других частей трансформатора создаёт магнитное поле трансформатора и в котором под действием этого магнитного поля наводится электродвижущая сила.

**Обмотка** — совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС, наведённые в витках. В трёхфазном трансформаторе под обмоткой обычно подразумевают совокупность обмоток одного напряжения трёх фаз, соединяемых между собой.

Проводник обмотки в силовых трансформаторах обычно имеет квадратную форму для наиболее эффективного использования имеющегося пространства (для увеличения коэффициента заполнения в окне сердечника). При увеличении площади проводника проводник может быть разделён на два и более параллельных проводящих элемента с целью снижения потерь на вихревые токи в обмотке и облегчения функционирования обмотки. Проводящий элемент квадратной формы называется жилой.



---

Каждая жила изолируется при помощи либо бумажной обмотки, либо эмалевого лака. Две отдельно изолированных и параллельно соединённых жилы иногда могут иметь общую бумажную изоляцию. Две таких изолированных жилы в общей бумажной изоляции называются кабелем.

Особым видом проводника обмотки является непрерывно транспонированный кабель. Этот кабель состоит из жил, изолированных при помощи двух слоёв эмалевого лака, расположенных в осевом положении друг к другу, как показано на рисунке. Непрерывно транспонированный кабель получается путём перемещения внешней жилы одного слоя к следующему слою с постоянным шагом и применения общей внешней изоляции.

Бумажная обмотка кабеля выполнена из тонких (несколько десятков микрометров) бумажных полос шириной несколько сантиметров, намотанных вокруг жилы. Бумага заворачивается в несколько слоёв для получения требуемой общей толщины.

---

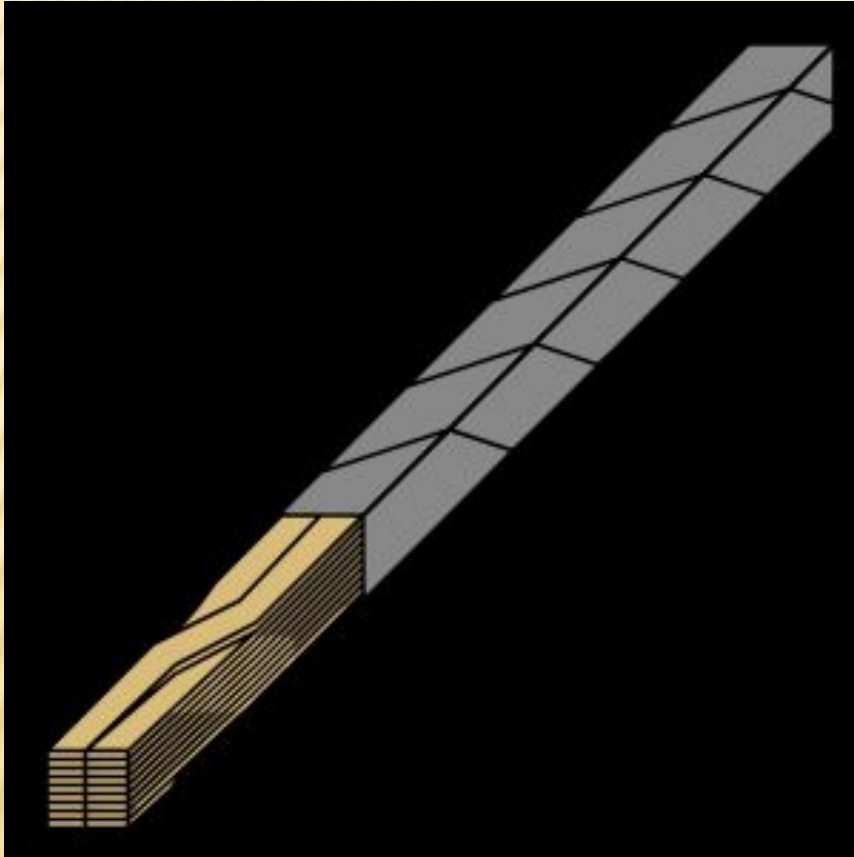
Обмотки разделяют по:

1. Назначению

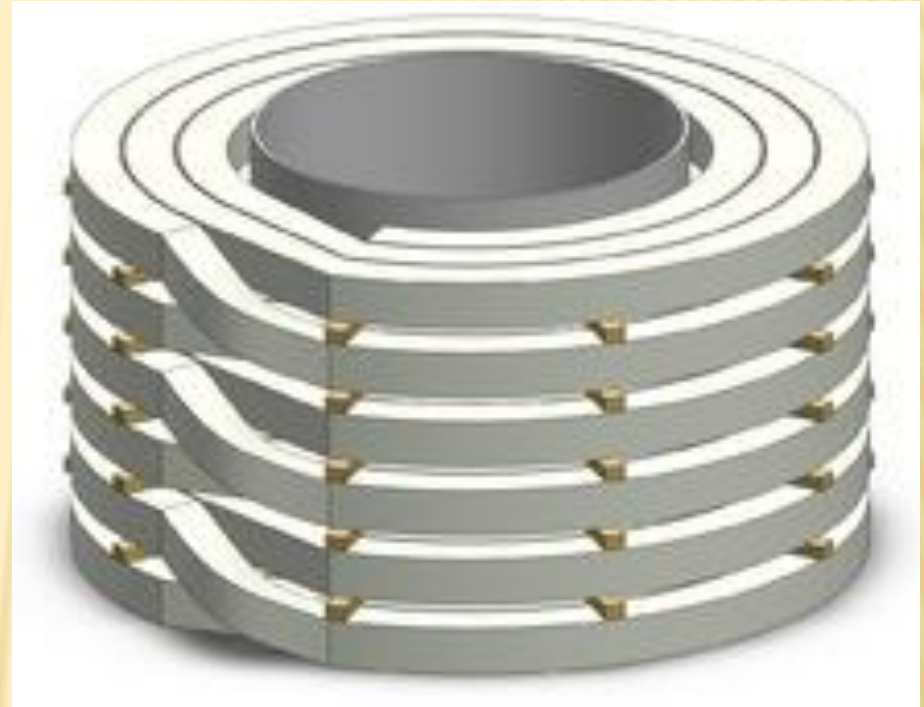
1. *Основные* — обмотки трансформатора, к которым подводится энергия преобразуемого или от которых отводится энергия преобразованного переменного тока.
2. *Регулирующие* — при невысоком токе обмотки и не слишком широком диапазоне регулирования, в обмотке могут быть предусмотрены отводы для регулирования коэффициента трансформации напряжения.
3. *Вспомогательные* — обмотки, предназначенные, например, для питания сети собственных нужд с мощностью существенно меньшей, чем номинальная мощность трансформатора, для компенсации третьей гармонической магнитного поля, подмагничивания магнитной системы постоянным током, и т. п.

2. Исполнению

1. *Рядовая обмотка* — витки обмотки располагаются в осевом направлении во всей длине обмотки. Последующие витки наматываются плотно друг к другу, не оставляя промежуточного пространства.
2. *Винтовая обмотка* — винтовая обмотка может представлять собой вариант многослойной обмотки с расстояниями между каждым витком или заходом обмотки.
3. *Дисковая обмотка* — дисковая обмотка состоит из ряда дисков, соединённых последовательно. В каждом диске витки наматываются в радиальном направлении в виде спирали по направлению внутрь и наружу на соседних дисках.
4. *Фольговая обмотка* — фольговые обмотки выполняются из широкого медного или алюминиевого листа толщиной от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров.



Транспонированный кабель,  
применяемый в обмотке  
трансформатора



Дисковая  
обмотка

# СХЕМЫ ИГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРЁХФАЗНЫХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Существуют три основных способа соединения фазовых обмоток каждой стороны трёхфазного трансформатора:

- Y-соединение, так называемое соединение бегонемом, где все три обмотки соединены вместе одним концом каждой из обмоток в одной точке, называемой нейтральной точкой или звездой
- $\Delta$ -соединение, так называемое дельта-соединение, или соединение треугольником, где три фазных обмотки соединены последовательно и образуют кольцо (или треугольник)
- Z-соединение, так называемое соединение зигзагом

Первичная и вторичная стороны трансформатора могут быть соединены любым из трёх способов, показанным выше. Данные способы предлагают несколько различных комбинаций соединений в трансформаторах с различными характеристиками, выбор которых также может быть обусловлен типом сердечника.

Y-соединение обычно является естественным выбором для самых высоких напряжений, когда нейтральная точка предназначена для заземления. В любом случае в целях защиты от перенапряжения или для прямого заземления предусмотрено наличие нейтрального проходного изолятора. В последнем случае в целях экономии уровень изоляции нейтрали может быть ниже, чем уровень изоляции фазного конца обмотки. Соединённая звездой обмотка также имеет то преимущество, что переключение регулирования коэффициента трансформации может быть предусмотрено на нейтральном конце, где также может быть размещён переключатель числа витков. Поэтому переключатель числа витков сможет функционировать при напряжении низкого логического уровня, а разница напряжений между фазами также будет незначительная. По сравнению с расходами, затраченными на установку переключателя числа витков, при более высоком уровне напряжения экономические затраты будут ниже.

---

Соединение звездой используется на одной стороне трансформатора, другая сторона должна быть соединена треугольником, особенно в случаях, если нейтраль соединения звездой планируется для зарядки. Соединение обмотки треугольником обеспечивает баланс ампер-виток для тока нулевой последовательности, следующего по нейтрали, и каждой фазы соединения звездой, что даёт приемлемый уровень полного сопротивления нулевой последовательности. Без соединения треугольником обмотки ток нулевой последовательности привёл бы к образованию поля токов нулевой последовательности в сердечнике. Если сердечник имеет три стержня, данное поле от ярма к ярму проникнет сквозь стенки бака и приведёт к выделению тепла. В случае с броневым сердечником, или при наличии пяти стержней сердечника, данное поле проникнет между раскрученными боковыми стержнями и полное сопротивление нулевой последовательности существенно повысится. Вследствие этого ток, в случае пробоя на землю может стать настолько слабым, что защитное реле не сработает.

В соединённой треугольником обмотке ток, протекающий по каждой фазовой обмотке равен фазному току, разделённому на  $\sqrt{3}$ , в то время как в соединении звездой, линейный ток каждой фазной обмотки идентичен линейному току сети. С другой стороны, для одинакового напряжения соединение треугольником требует наличия трёхкратного количества витков по сравнению с соединением звездой. Соединение обмотки треугольником выгодно использовать в высоковольтных трансформаторах, когда сила тока высока, а напряжение относительно низкое, как например, в обмотке низшего напряжения в повышающих трансформаторах.

Соединение обмотки треугольником позволяет циркулировать третьей (и кратным ей) гармонике тока внутри треугольника, образованного тремя последовательно соединёнными фазными обмотками. Токи третьей гармоники необходимы во избежание искажения синусоидальности потока магнитных, и, следовательно, наведённой ЭДС во вторичной обмотке. Третья гармоника тока во всех трёх фазах имеет одинаковое направление, данные токи не могут циркулировать в обмотке, соединённой звездой, с изолированной нейтралью. Недостаток троичных синусоидальных токов в намагничивающем токе может привести к значительным искажениям наведённого напряжения, в случаях, если у сердечника 5 стержней, или он исполнен в броневом варианте. Соединённая треугольником обмотка трансформатора устранит данное нарушение, так как обмотка с соединением треугольником обеспечит затухание гармонических токов. Иногда в трансформаторах предусмотрено наличие третичной  $\Delta$ -соединённой обмотки, предусмотренной не для зарядки, а для предотвращения искажения напряжения и понижения полного сопротивления нулевой последовательности. Такие обмотки называются компенсационными. Распределительные трансформаторы, предназначенные для зарядки, между фазой и нейтралью на стороне первого контура, снабжены обычно соединённой треугольником обмоткой. Однако ток в соединённой треугольником обмотке может быть очень слабым для достижения минимума номинальной мощности, а требуемый размер проводника обмотки чрезвычайно неудобен для заводского изготовления. В подобных случаях высоковольтная обмотка может быть соединена звездой, а вторичная обмотка — зигзагообразно. Токи нулевой последовательности, циркулирующие в двух отводах зигзагообразно соединённой обмотки будут балансировать друг друга, полное сопротивление нулевой последовательности вторичной стороны главным образом определяется полем рассеяния магнитного поля между двумя разветвлениями обмоток, и выражается весьма незначительной цифрой.

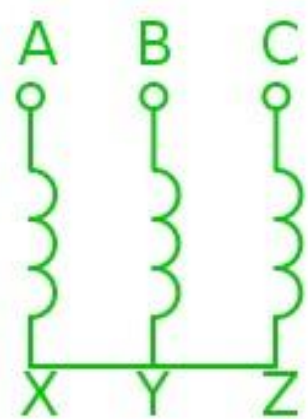
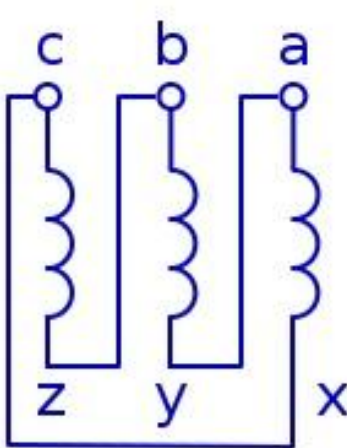
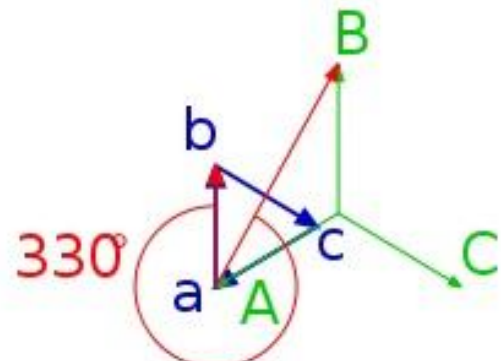
---

При использовании соединения пары обмоток различными способами возможно достигнуть различных степеней напряжения смещения между сторонами трансформатора. Сдвиг фаз между ЭДС первичной и вторичной обмоток принято выражать **группой соединений**. Для описания напряжения смещения между первичной и вторичной, или первичной и третичной обмотками, традиционно используется пример с циферблатом часов. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , а кратность сдвига составляет  $30^\circ$ , то для обозначения группы соединений выбирается ряд чисел от 1 до 12, в котором каждая единица соответствует углу сдвига в  $30^\circ$ . Одна фаза первичной указывает на 12, а соответствующая фаза другой стороны указывает на другую цифру циферблата.

Наиболее часто используемая комбинация Yd11 означает, например, наличие  $30^\circ$  смещения нейтрали между напряжениями двух сторон

# Схемы и группы соединения обмоток трёхфазных двухобмоточных трансформаторов (не закончена, в работе)

Схемы и группы соединения обмоток трёхфазных двухобмоточных трансформаторов<sup>[19][20]</sup>  
(не закончена, в работе)

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжения холостого хода*	Условное обозначение
ВН	НН		
			У/Д-11

Примечание: на диаграмме зелёным цветом обозначены векторы обмотки Звезда, синим — Треугольник, красным смещение вектора АВ.  
В железнодорожных трансформаторах также встречается группа соединений «разомкнутый треугольник — неполная звезда».



# БАК

---

Бак в первую очередь представляет собой резервуар для масла, а также обеспечивает физическую защиту для активного компонента. Он также служит в качестве опорной конструкции для вспомогательных устройств и аппаратуры управления.

Перед заполнением маслом бака с активным компонентом внутри из него выкачивается весь воздух, который может подвергнуть опасности диэлектрическую прочность изоляции трансформатора (поэтому бак предназначен для выдерживания давления атмосферы с минимальной деформацией).

Ещё одним явлением, учитываемым при проектировании баков, является совпадение звуковых частот, вырабатываемых сердечником трансформатора, и частот резонанса деталей бака, что может усилить шум, излучаемый в окружающую среду.

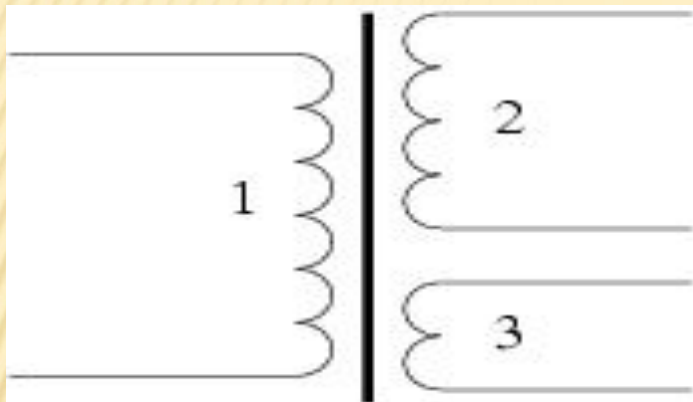
Конструкция бака допускает температурно-зависимое расширение масла. Чаще всего устанавливается отдельный расширительный бачок, который также называется расширителем.

При увеличении номинальной мощности трансформатора воздействие больших токов внутри и снаружи трансформатора оказывает влияние на конструкцию. То же самое происходит с магнитным потоком рассеяния внутри бака. Вставки из немагнитного материала вокруг сильноточных проходных изоляторов снижают риск перегрева. Внутренняя облицовка бака из высокопроводящих щитков не допускает попадания потока через стенки бака. С другой стороны, материал с низким магнитным сопротивлением поглощает поток перед его прохождением через стенки бака.

# ОБОЗНАЧЕНИЕ НА СХЕМАХ

---

На схемах трансформатор обозначается следующим образом:



Центральная толстая линия соответствует сердечнику, 1 — первичная обмотка (обычно слева), 2,3 — вторичные обмотки. Число полукружностей в очень грубом приближении символизирует число витков обмотки (больше витков — больше полукружностей, но без строгой пропорциональности).

---

При обозначении трансформатора жирной точкой около вывода могут быть указаны начала катушек (не менее чем на двух катушках, знаки мгновенно действующей ЭДС на этих выводах одинаковы). Применяется при обозначении промежуточных трансформаторов в усилительных (преобразовательных) каскадах для подчёркивание син- или противофазности, а также в случае нескольких (первичных или вторичных) обмоток, если соблюдение «полярности» их подключения необходимо для работы остальной части схемы. Если начала обмоток не указаны явно, то предполагается, что все они направлены в одну сторону (после конца одной обмотки — начало следующей).

В схемах трёхфазных трансформаторах «обмотки» располагают перпендикулярно «сердечнику» (Ш-образно, вторичные обмотки напротив соответствующих первичных), начала всех обмоток направлены в сторону «сердечника».

# ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

## Применение в электросетях

Поскольку потери на нагревание провода пропорциональны квадрату тока, проходящего через провод, при передаче электроэнергии на большое расстояние выгодно использовать очень большие напряжения и небольшие токи. Из соображений безопасности и для уменьшения массы изоляции в быту желательно использовать не столь большие напряжения. Поэтому для наиболее выгодной транспортировки электроэнергии в электросети многократно применяют трансформаторы: сначала для повышения напряжения генераторов на электростанциях перед транспортировкой электроэнергии, а затем для понижения напряжения линии электропередач до приемлемого для потребителей уровня.

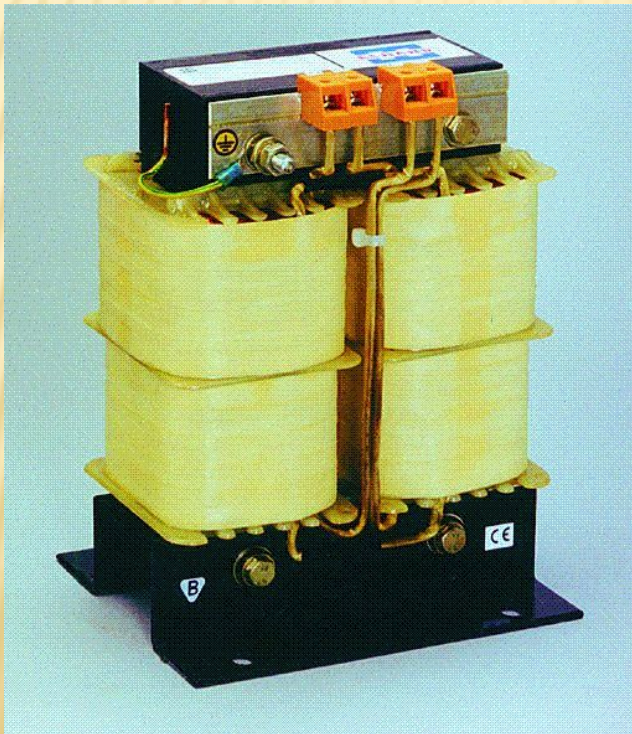
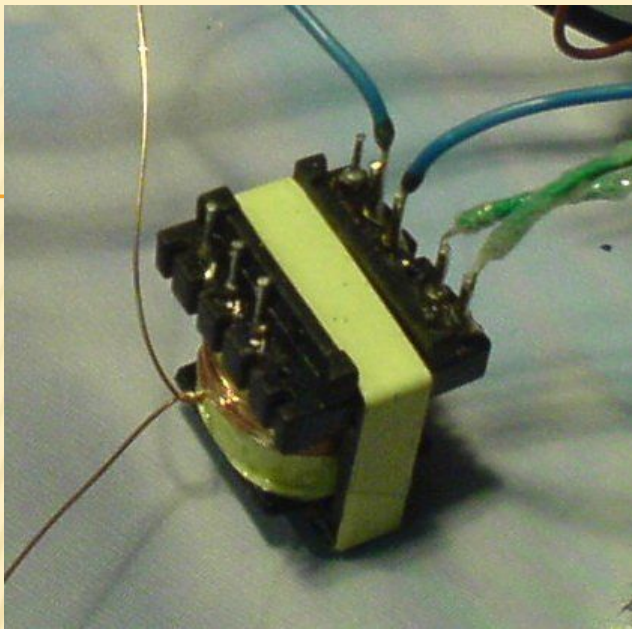
Поскольку в электрической сети три фазы, для преобразования напряжения применяют трёхфазные трансформаторы, или группу из трёх однофазных трансформаторов, соединённых в схему звезды или треугольника. У трёхфазного трансформатора сердечник для всех трёх фаз общий.

Несмотря на высокий КПД трансформатора (для трансформаторов большой мощности — свыше 99 %), в очень мощных трансформаторах электросетей выделяется большая мощность в виде тепла (например, для типичной мощности блока электростанции 1 ГВт на трансформаторе может выделяться мощность до нескольких мегаватт). Поэтому трансформаторы электросетей используют специальную систему охлаждения: трансформатор помещается в баке, заполненном трансформаторным маслом или специальной негорючей жидкостью. Масло циркулирует под действием конвекции или принудительно между баком и мощным радиатором. Иногда масло охлаждают водой. «Сухие» трансформаторы используют при относительно малой мощности (до 16000 кВт).



# ПРИМЕНЕНИЕ В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

- Для питания разных узлов электроприборов требуются самые разнообразные напряжения. Блоки электропитания в устройствах, которым необходимо несколько напряжений различной величины содержат трансформаторы с несколькими вторичными обмотками или содержат в схеме дополнительные трансформаторы. Например, в телевизоре с помощью трансформаторов получают напряжения от 5 вольт (для питания микросхем и транзисторов) до нескольких киловольт (для питания анода кинескопа через умножитель напряжения).
- В прошлом в основном применялись трансформаторы, работающие с частотой электросети, то есть 50-60 Гц.
- В схемах питания современных радиотехнических и электронных устройств (например в блоках питания персональных компьютеров) широко применяются высокочастотные импульсные трансформаторы. В импульсных блоках питания переменное напряжение сети сперва выпрямляют, а затем преобразуют при помощи инвертора в высокочастотные импульсы. Система управления с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) позволяет стабилизировать напряжение. После чего импульсы высокой частоты подаются на импульсный трансформатор, на выходе с которого, после выпрямления и фильтрации получают стабильное постоянное напряжение.
- В прошлом сетевой трансформатор (на 50-60 Гц) был одной из самых тяжёлых деталей многих приборов. Дело в том, что линейные размеры трансформатора определяются передаваемой им мощностью, причём оказывается, что линейный размер сетевого трансформатора примерно пропорционален мощности в степени  $1/4$ . Размер трансформатора можно уменьшить, если увеличить частоту переменного тока. Поэтому современные импульсные блоки питания при одинаковой мощности значительно легче.
- Трансформаторы 50-60 Гц, несмотря на их недостатки, продолжают использовать в схемах питания, в тех случаях, когда надо обеспечить минимальный уровень высокочастотных помех, например при высококачественном звуковоспроизведении.



# ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

- Разделительные трансформаторы (трансформаторная гальваническая развязка). Нейтральный провод электросети может иметь контакт с «землёй», поэтому при одновременном касании человеком фазового провода (а также корпуса прибора с плохой изоляцией) и заземлённого предмета тело человека замыкает электрическую цепь, что создаёт угрозу поражения электрическим током. Если же прибор включён в сеть через трансформатор, касание прибора одной рукой вполне безопасно, поскольку вторичная цепь трансформатора никакого контакта с землёй не имеет.
- Импульсные трансформаторы (ИТ). Основное применение заключается в передаче прямоугольного электрического импульса (максимально крутой фронт и срез, относительно постоянная амплитуда). Он служит для трансформации кратковременных видеоимпульсов напряжения, обычно периодически повторяющихся с высокой скважностью. В большинстве случаев основное требование, предъявляемое к ИТ, заключается в неискажённой передаче формы трансформируемых импульсов напряжения; при воздействии на вход ИТ напряжения той или иной формы на выходе желательно получить импульс напряжения той же самой формы, но, быть может, иной амплитуды или другой полярности.
- Измерительные трансформаторы. Применяют для измерения очень больших или очень маленьких переменных напряжений и токов в цепях РЗиА.
- Измерительный трансформатор постоянного тока. На самом деле представляет собой магнитный усилитель, при помощи постоянного тока малой мощности управляющий мощным переменным током. При использовании выпрямителя ток выхода будет постоянным и зависеть от величины входного сигнала.
- Измерительно-силовые трансформаторы. Имеют широкое применение в схемах генераторов переменного тока малой и средней мощности (до мегаватта), например, в дизель-генераторах. Такой трансформатор представляет собой измерительный трансформатор тока с первичной обмоткой, включённой последовательно с нагрузкой генератора. Со вторичной обмотки снимается переменное напряжение, которое после выпрямителя подаётся на обмотку подмагничивания ротора. (Если генератор — трёхфазный, обязательно применяется и трёхфазный трансформатор). Таким образом, достигается стабилизация выходного напряжения генератора — чем больше нагрузка, тем сильнее ток подмагничивания, и наоборот.



- Согласующие трансформаторы. Из законов преобразования напряжения и тока для первичной и вторичной обмотки ( $I_1 = I_2 w_2 / w_1$ ,  $U_1 = U_2 w_1 / w_2$ ) видно, что со стороны цепи первичной обмотки всякое сопротивление во вторичной обмотке выглядит в  $(w_1 / w_2)^2$  раз больше. Поэтому согласующие трансформаторы применяются для подключения низкоомной нагрузки к каскадам электронных устройств, имеющих высокое входное или выходное сопротивление. Например, высоким выходным сопротивлением может обладать выходной каскад усилителя звуковой частоты, особенно, если он собран на лампах, в то время как динамики имеют очень низкое сопротивление. Согласующие трансформаторы также исключительно полезны в высокочастотных линиях, где различие сопротивления линии и нагрузки привело бы к отражению сигнала от концов линии, и, следовательно, к большим потерям.

Фазоинвертирующие и согласующие трансформаторы в выходном каскаде усилителя звуковой частоты с транзисторами одного типа проводимости. Транзистор в такой схеме усиливает только половину периода выходного сигнала. Чтобы усилить оба полупериода, нужно подать сигнал на два транзистора в противофазе. Это и обеспечивает трансформатор  $T_1$ . Трансформатор  $T_2$  суммирует выходные импульсы VT1 и VT2 в противофазе и согласует выходной каскад с низкоомным динамиком

- Фазоинвертирующие трансформаторы. Трансформатор передаёт только переменную компоненту сигнала, поэтому даже если все постоянные напряжения в цепи имеют один знак относительно общего провода, сигнал на выходе вторичной обмотки трансформатора будет содержать как положительную, так и отрицательную полуволны, причём, если центр вторичной обмотки трансформатора подключить к общему проводу, то напряжение на двух крайних выводах этой обмотки будет иметь противоположную фазу. До появления широкодоступных транзисторов с npn типом проводимости фазоинвертирующие трансформаторы применялись в двухтактных выходных каскадах усилителей, для подачи противоположных по полярности сигналов на базы двух транзисторов каскада. К тому же, из-за отсутствия «ламп с противоположным зарядом электрона», фазоинвертирующий трансформатор необходим в ламповых усилителях с двухтактным выходным каскадом

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ

## Срок службы

Срок службы трансформатора может быть разделен на две категории:

1. **Экономический срок службы** — экономический срок службы заканчивается, когда капитализированная стоимость непрерывной работы существующего трансформатора превысит капитализированную стоимость доходов от эксплуатации этого трансформатора. Или экономический срок жизни трансформатора (как актива) заканчивается тогда, когда удельные затраты на трансформацию энергии с его помощью становятся выше удельной стоимости аналогичных услуг на рынке трансформации энергии.
2. **Технический срок службы**

### Работа в параллельном режиме

Параллельная работа трансформаторов нужна по очень простой причине. При малой нагрузке мощный трансформатор имеет большие потери холостого хода, поэтому вместо него подключают несколько трансформаторов меньшей мощности, которые отключаются, если в них нет необходимости.

При параллельном подключении двух и более трансформаторов требуется следующее<sup>[21]</sup>:

1. Параллельно могут работать только трансформаторы, имеющие одинаковую угловую погрешность между первичным и вторичным напряжениями.
2. Полюса с одинаковой полярностью на сторонах высокого и низкого напряжения должны быть соединены параллельно.
3. Трансформаторы должны иметь примерно тот же самый коэффициент передачи по напряжению.
4. Напряжение полного сопротивления короткого замыкания должно быть одинаковым, в пределах  $\pm 10\%$ .
5. Отношение мощностей трансформаторов не должно отклоняться более чем 1:3.
6. Переключатели числа витков должны стоять в положениях, дающих коэффициент передачи по напряжению как можно ближе.

Другими словами, это значит, что следует использовать наиболее схожие трансформаторы. Одинаковые модели трансформаторов являются лучшим вариантом. Отклонение от вышеприведенных требований возможны при использовании соответствующих знаний.

### Частота

При одинаковых напряжениях первичной обмотки трансформатор, разработанный для частоты 50 Гц, может использоваться при частоте сети 60 Гц, но не наоборот. При этом необходимо принять во внимание, что возможно потребуются заменить навесное электрооборудование. При частоте больше номинальной повышается величина паразитных токов в магнитопроводе, повышенный нагрев магнитопровода и обмотки, приводящие к ускоренному старению и разрушению изоляции.