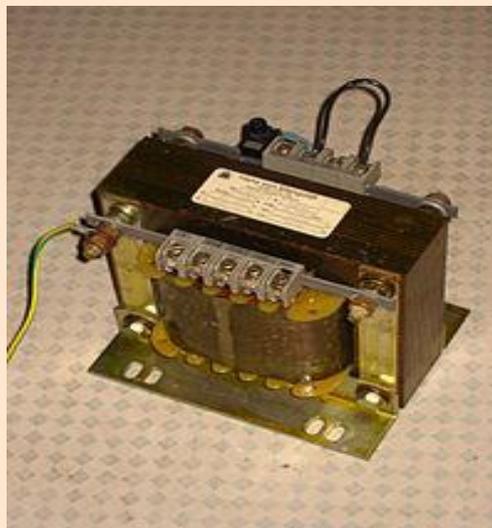
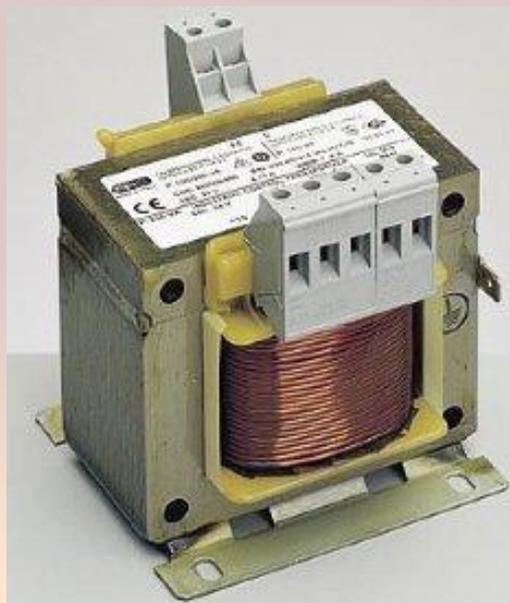


Трансформаторы

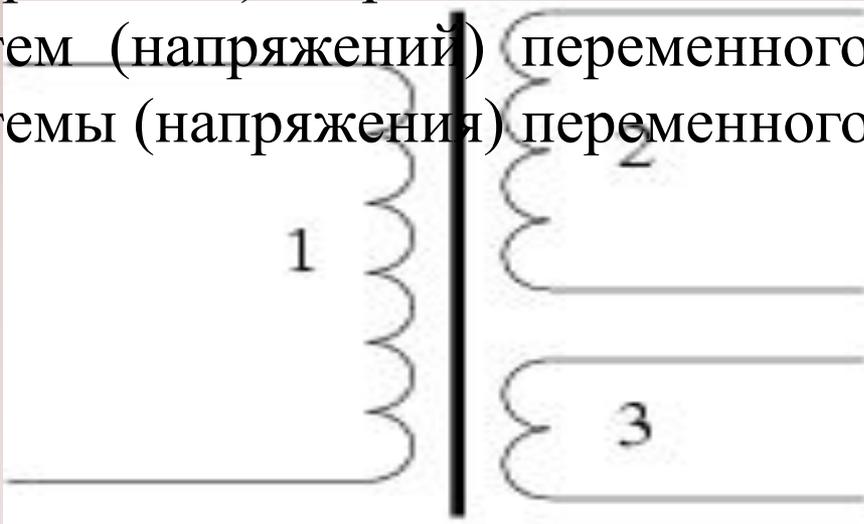




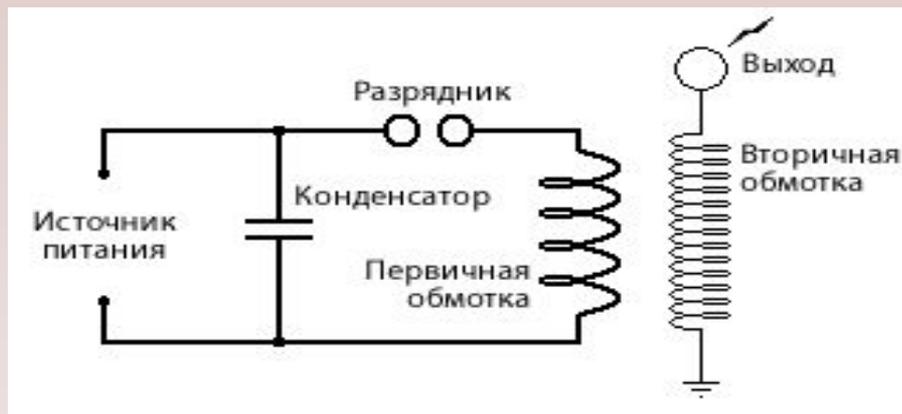
30 ноября 1876 года, дата получения патента Яблочковым Павлом Николаевичем, считается датой рождения первого трансформатора. Это был трансформатор с разомкнутым сердечником, представлявшим собой стержень, на который наматывались обмотки.

Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 году братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон. В 1885 г. венгерские инженеры фирмы «Ганц и К^о» Отто Блати, Карой Циперновский и Микша Дери изобрели трансформатор с замкнутым магнитопроводом, который сыграл важную роль в дальнейшем развитии конструкций трансформаторов.

Трансформатор (от лат. *transformo* — преобразовывать) — это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток на каком-либо магнитопроводе — преобразовывать) — это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток на каком-либо магнитопроводе и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем (напряжений) переменного тока в одну или несколько других систем (напряжений) переменного тока без изменения частоты системы (напряжения) переменного тока.



Трансформатор Теслы — единственное из изобретений Николы Теслы, носящих его имя сегодня. Это классический резонансный трансформатор, производящий высокое напряжение при высокой частоте. Оно использовалось Теслой в нескольких размерах и вариациях для его экспериментов. «Трансформатор Теслы» также известен под названием «катушка Теслы». Прибор был создан 22 сентября 1896 года и заявлен как «Аппарат для производства электрических токов высокой частоты и потенциала».



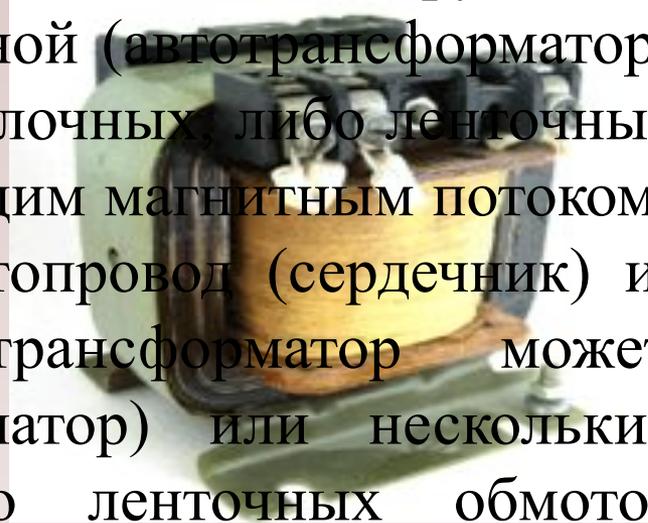
Трансформатор осуществляет преобразование напряжения переменного тока в самых различных областях применения — электроэнергетике, электронике и радиотехнике.

Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод

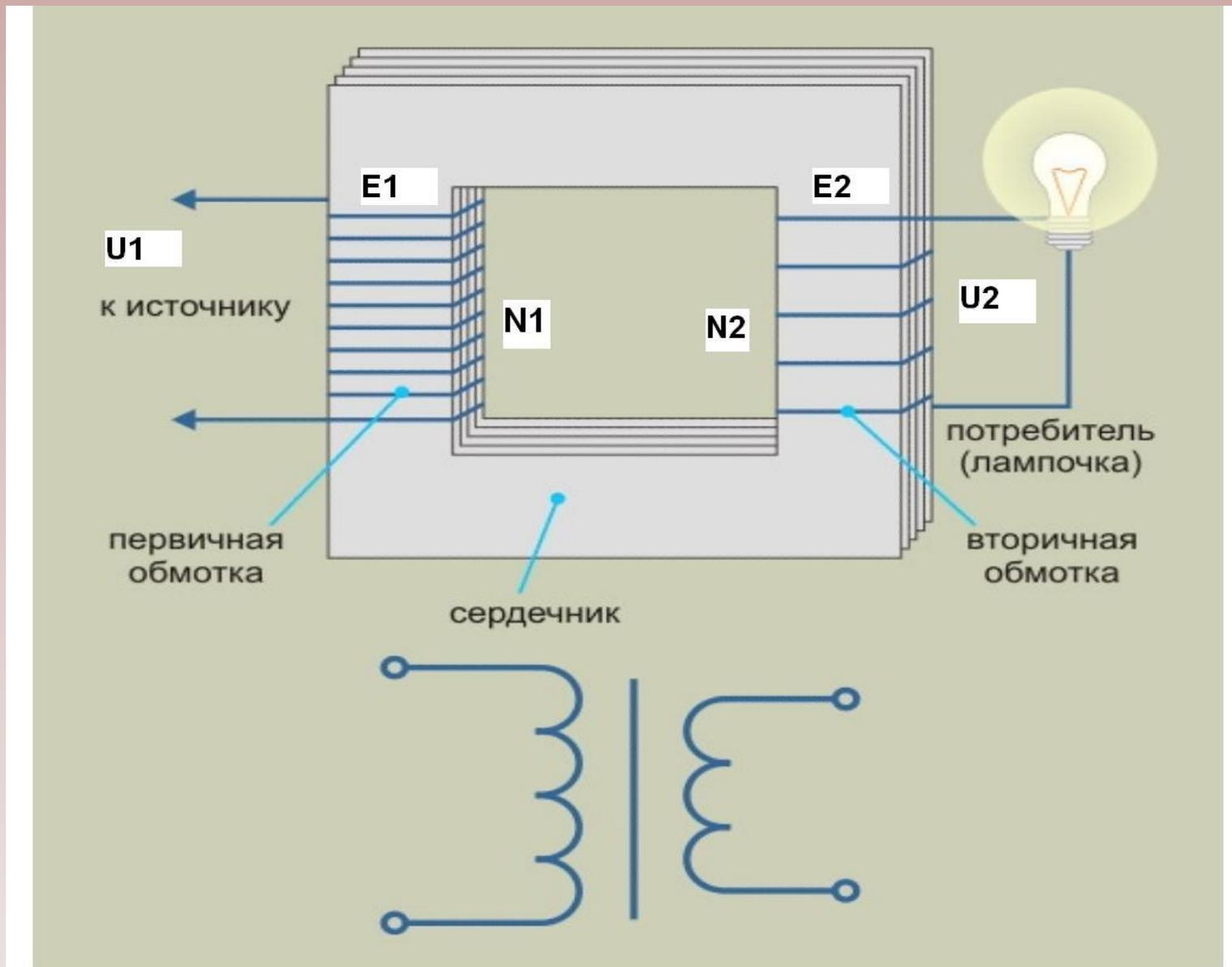
трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод (сердечник) из ферромагнитного материала. Конструктивно трансформатор может состоять из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



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 материала. 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 материала.



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 материала.



Условное обозначение на схемах

Классификация трансформаторов



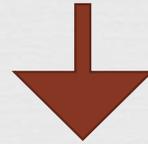
По признаку функционального назначения

трансформаторы питания

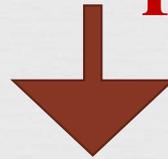
трансформаторы согласования



Классификация трансформаторов



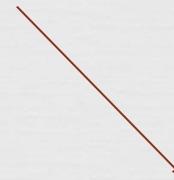
трансформаторы питания



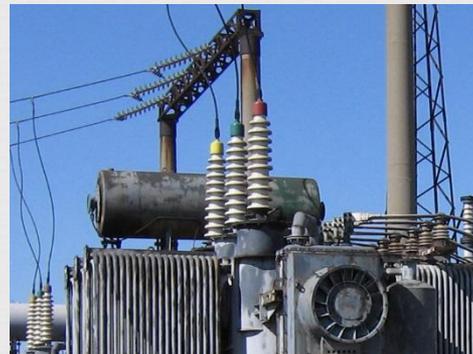
По напряжению



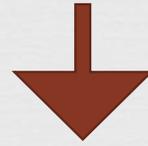
Низковольтные
(до 1000 В)



Высоковольтные
(свыше 1000 В)



Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



В зависимости от числа фаз преобразуемого напряжения

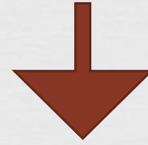
однофазные



трехфазные



Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



В зависимости от числа обмоток



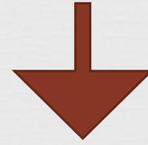
двухобмоточные



многообмоточные



Классификация трансформаторов



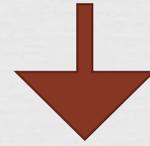
трансформаторы питания



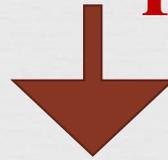
В зависимости от конфигурации магнитопровода



Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



В зависимости от мощности

малой мощности



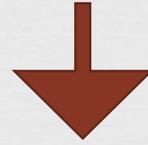
средней мощности



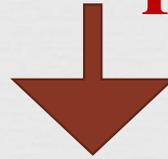
большой мощности



Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



В зависимости от способа изготовления магнитопровода

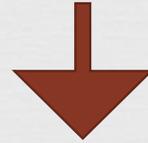


пластинчатые

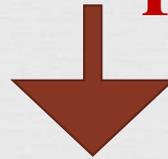


ленточные

Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



В зависимости от коэффициента трансформации



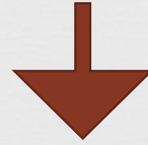
повышающие



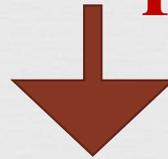
понижающие



Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



В зависимости от вида связи между обмотками

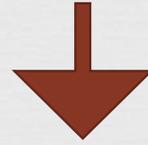


**с электромагнитной связью
(с изолированными обмотками)**



**с электромагнитной и электрической связью
(со связанными обмотками)**

Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



В зависимости от конструкции всего трансформатора

открытые



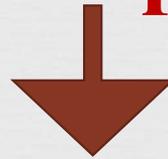
закрытые



Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



В зависимости от назначения



силовые общего и специального назначения



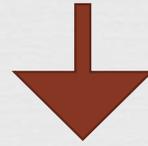
импульсные



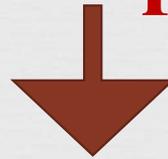
для преобразования частоты

выпрямительные и т.д.

Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



В зависимости от рабочей частоты трансформаторы делят на трансформаторы

повышенной промышленной частоты
(400, 1000, 2000 Гц)

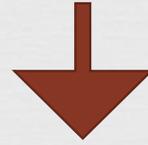
промышленной частоты (50 Гц)

пониженной частоты (менее 50 Гц)

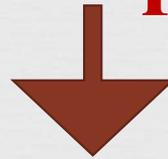
высокой частоты

повышенной частоты (до 10000 Гц)

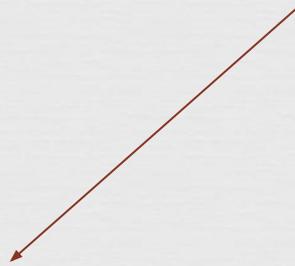
Классификация трансформаторов



трансформаторы питания



по виду охлаждения



с воздушным (сухие
тра



с масляным (масляные
трансформаторы)



Области применения трансформаторов

1. Для передачи и распределения электрической энергии.

В настоящее время для высоковольтных линий электропередач применяются силовые трансформаторы с масляным охлаждением напряжением 330, 500 и 750 кВ, мощностью до 1200-1600 МВ*А.

2. Для обеспечения нужной схемы включения вентилей в преобразовательных устройствах и согласования напряжения на входе и выходе преобразователя.

Трансформаторы, применяющиеся для этой цели, называются *преобразовательными*. Их мощность достигает тысячи киловольт-ампер, напряжение 110 кВ; они работают при частоте 50 Гц и более.

Рассматриваемые трансформаторы выполняют одно-, трёх- и многофазными с регулированием выходного напряжения в широких пределах и без регулирования.

Области применения трансформаторов

3. Для различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питание электротермических установок (электropечные трансформаторы) и др. Мощность их достигает десятков тысяч киловольт-ампер при напряжении до 10 кВ; они работают обычно при частоте 50 Гц.

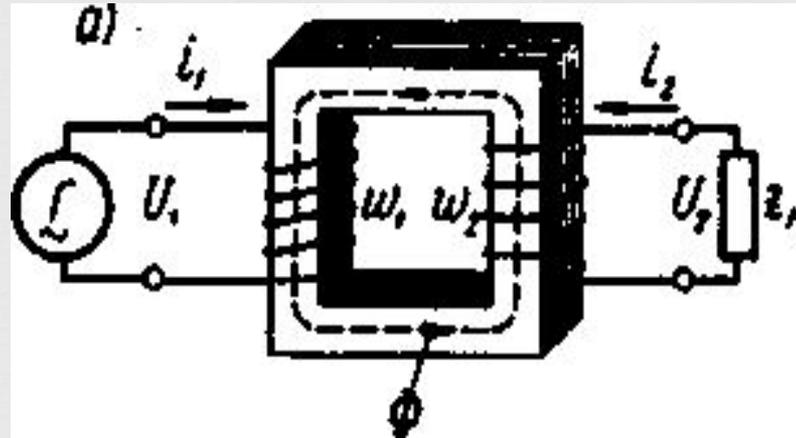
4. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов, например реле, в электрические цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности.

Трансформаторы, применяемые для этой цели, называются измерительными. Они имеют сравнительно большую мощность, определяемую мощностью, потребляемой электроизмерительными приборами, реле и др.

Области применения трансформаторов

5. Для питания различных цепей радио- и телевизионной аппаратуры; для разделения электрических цепей различных элементов этих устройств; для согласования напряжений и т.п. Трансформаторы, используемые в этих устройствах, обычно имеют малую мощность (от нескольких вольт-ампер до нескольких киловольт-ампер), невысокое напряжение, работают при частоте 50 Гц и более. Их выполняют двух-, трех- и многообмоточными; условия работы, предъявляемые к ним требования и принципы проектирования весьма специфичны. Как правило, трансформаторы питания изготавливаются комбинированными, т.е. позволяющими снимать несколько напряжений; при этом первичная обмотка (сетевая) может быть выполнена в виде одной обмотки с двумя отводами или двух одинаковых обмоток с одним отводом в каждом из них. Во втором варианте первичная обмотка на различные напряжения (110, 127 или 220 В) переключается специальным сетевым переключателем.

Принцип действия трансформаторов



Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. *a*). Одна из обмоток, которую называют *первичной*, присоединена к источнику переменного тока Γ на напряжение U_1 .

Принцип действия трансформаторов

К другой обмотке, называемой вторичной, подключен потребитель Z_H . Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены эти обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками. Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС: в первичной обмотке ЭДС *самоиндукции*

$$e_1 = -w_1(d\Phi/dt), \quad (1.1)$$

во вторичной обмотке ЭДС *взаимоиндукции*

$$e_2 = -w_2(d\Phi/dt), \quad (1.2)$$

где w_1 и w_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Принцип действия трансформаторов

При подключении нагрузки Z_H к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 . В повышающих трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижающих $U_2 < U_1$.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, — *обмоткой низшего напряжения* (НН).

Трансформаторы обладают свойством *обратимости*: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он повышающий, либо — понижающий.

Принцип действия трансформаторов

Трансформатор — это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению $[(d\Phi/dt)=0]$, поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, а следовательно, электроэнергия из первичной цепи не будет передаваться во вторичную.



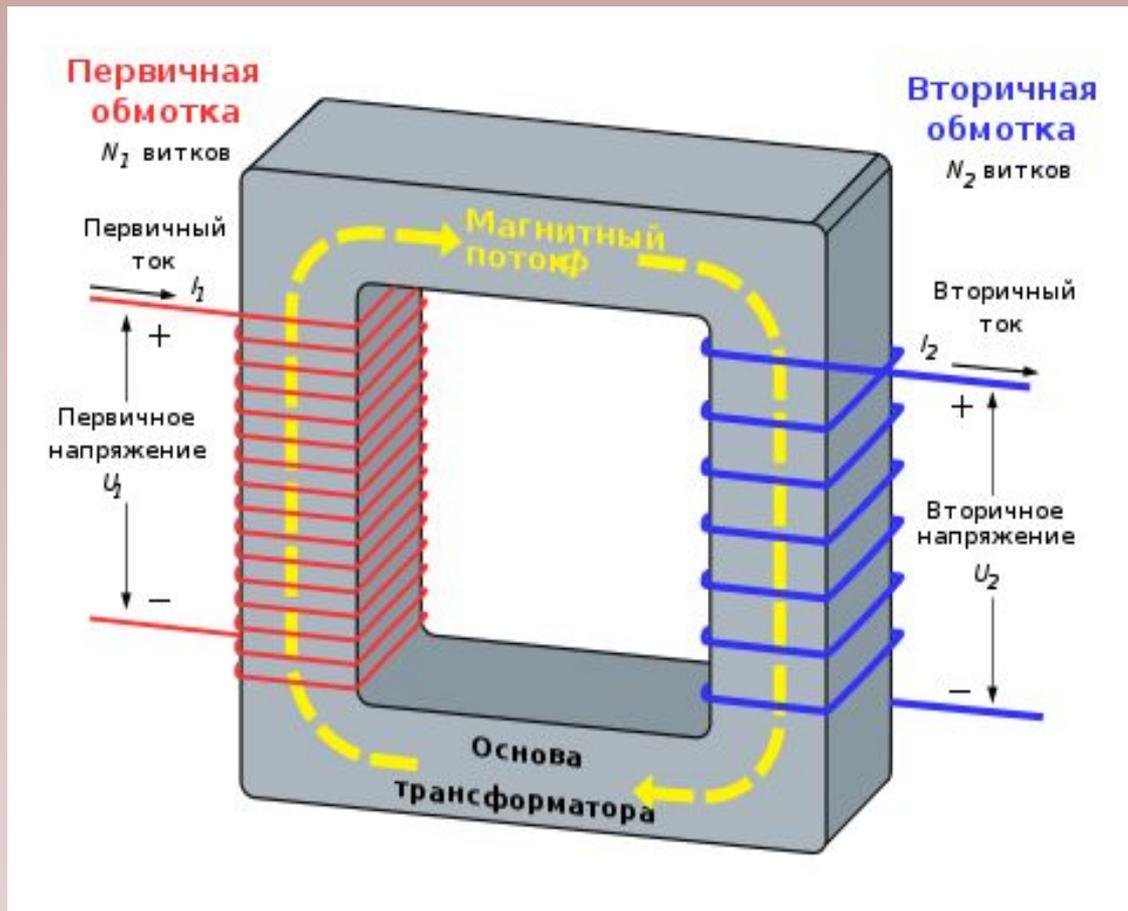
Устройство трансформаторов

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками составляет *активную часть* трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют *неактивными* (вспомогательными) частями.

Устройство трансформаторов

Магнитопровод

Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он предназначен для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей. Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т. е. он состоит из тонких (обычно толщиной 0,5 мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а, следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.



Устройство трансформатора.

- Две катушки с разными числами витков одеты в стальной сердечник
 - Катушка, подключенная к источнику – первичная катушка. (N_1, U_1, I_1)
 - Катушка, подключенная к потребителю – вторичная катушка. (N_2, U_2, I_2)
- N -число витков. U -напряжение. I -сила тока.

Работа трансформатора основана на двух базовых принципах:

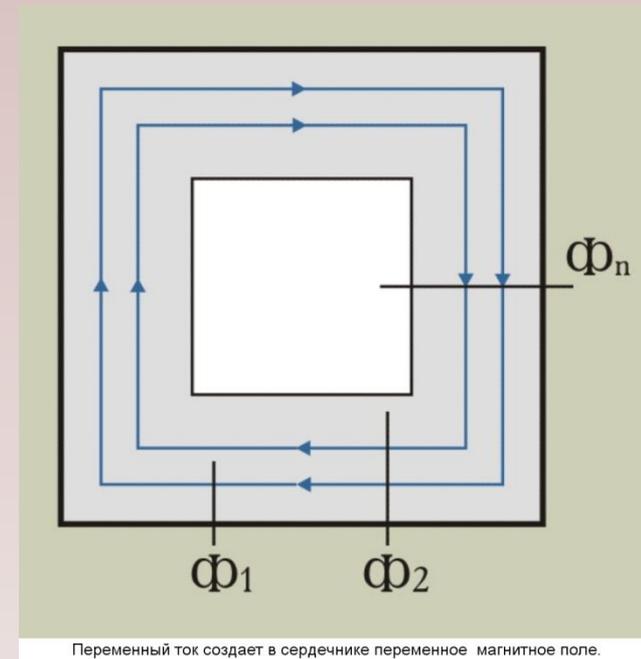
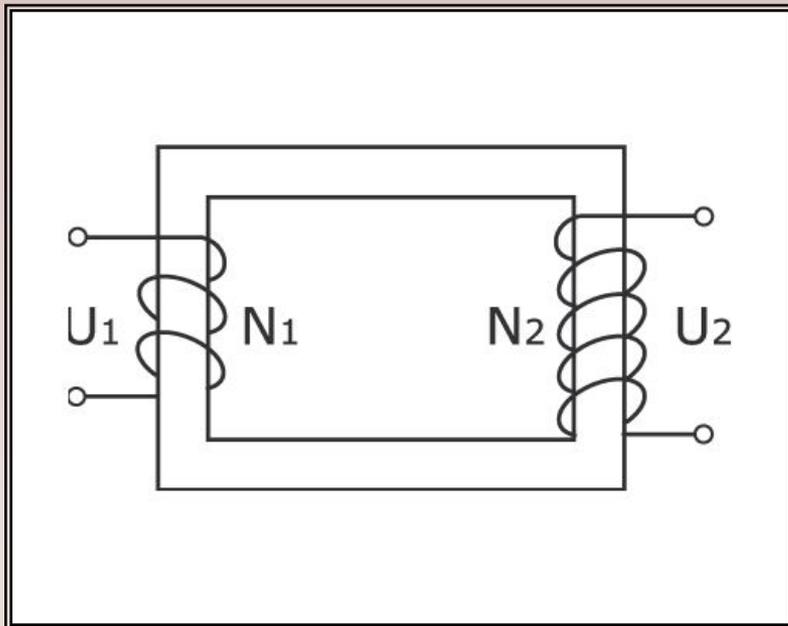
1. Изменяющийся во времени электрический ток изменяющийся во времени электрический ток создаёт изменяющееся во времени магнитное поле изменяющийся во времени электрический ток создаёт изменяющееся во времени магнитное поле (электромагнетизм)

2. Изменение магнитного потока, проходящего через обмотку, создаёт ЭДС изменение магнитного потока, проходящего через обмотку, создаёт ЭДС в этой обмотке (электромагнитная индукция)

На одну из обмоток, называемую *первичной обмоткой*, подаётся напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток создаёт переменный магнитный поток, подаётся напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток создаёт переменный магнитный поток в магнитопроводе. В результате электромагнитной индукции, подаётся напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке

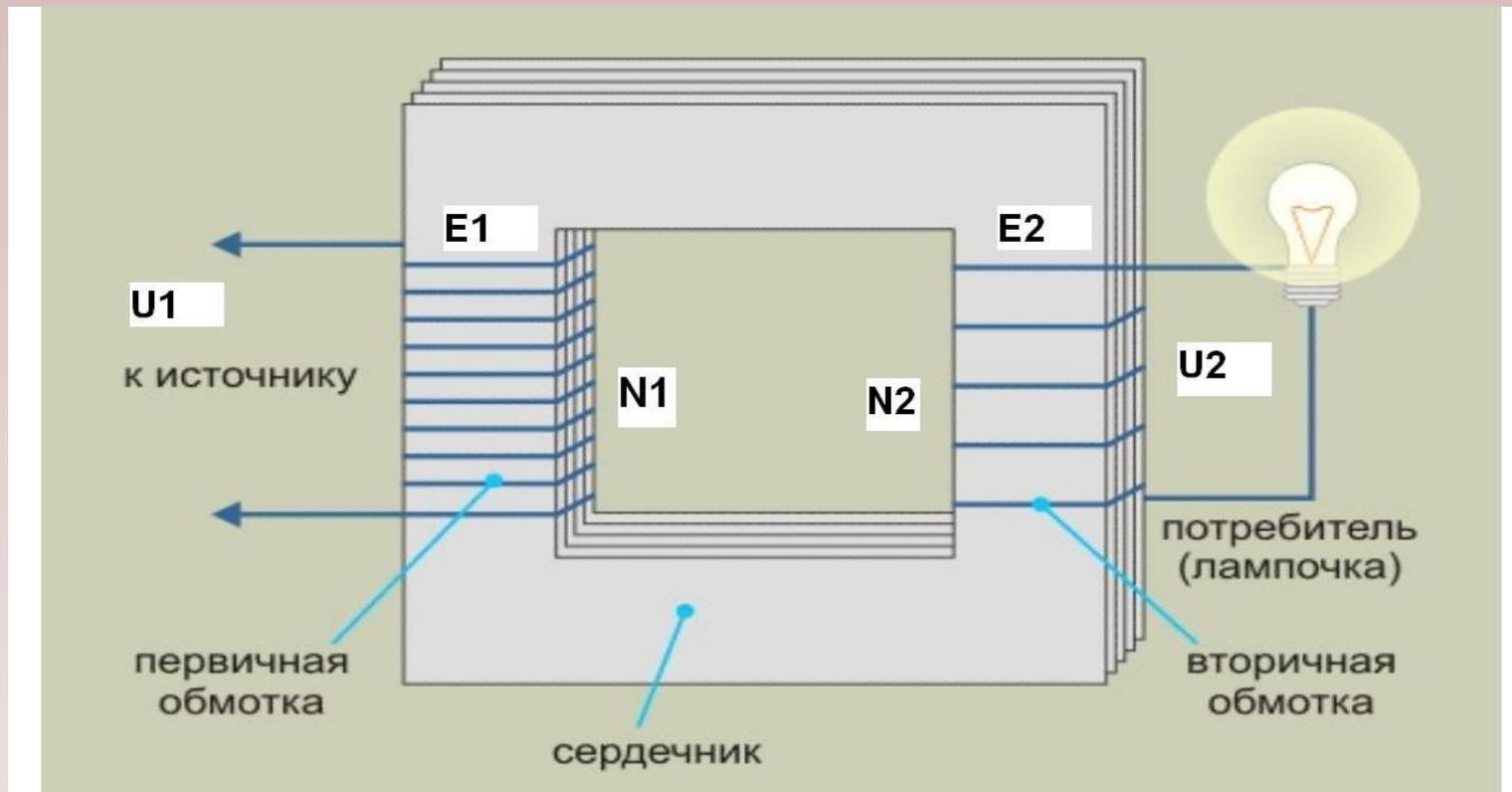
Режим холостого хода

Данный режим характеризуется разомкнутой вторичной цепью трансформатора, вследствие чего ток в ней не течёт. С помощью опыта холостого хода можно определить **КПД** трансформатора, коэффициент трансформации, а также потери в сердечнике.



Рабочий ход (под нагрузкой)

Нагрузочный режим. Этот режим характеризуется замкнутой на нагрузке вторичной цепью трансформатора. Данный режим является основным рабочим для трансформатора.



Коэффициент трансформации

Коэффициент трансформации – величина, равная отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Вывод: если $K < 1$, если $N_2 > N_1$ или $U_2 > U_1$, то трансформатор повышающий;
если $K > 1$ если $N_2 < N_1$ или $U_2 < U_1$, трансформатор понижающий.

Свойства трансформатора определяются его *номинальными параметрами*: 1) номинальное первичное линейное напряжение $U_{1\text{НОМ}}$, В или кВ; 2) номинальное вторичное линейное напряжение $U_{2\text{НОМ}}$ (напряжение на выводах вторичной обмотки при отключенной нагрузке и номинальном первичном напряжении), В или кВ; 3) номинальные линейные токи в первичной $I_{1\text{НОМ}}$ и вторичной $I_{2\text{НОМ}}$ обмотках, А; 4) номинальная полная мощность $S_{\text{НОМ}}$, кВ·А (для однофазного трансформатора $S_{\text{НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}}$, для трехфазного — $S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}}$

Номинальные линейные токи вычисляются по номинальной мощности трансформатора: для трехфазного трансформатора

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}} 10^3}{\sqrt{3} U_{1\text{НОМ}}}; \quad I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}} 10^3}{\sqrt{3} U_{2\text{НОМ}}}$$

Потери и КПД трансформатора

Потери в трансформаторе разделяются на электрические и магнитные

Электрические потери. Обусловлены нагревом обмоток трансформаторов при прохождении по этим обмоткам электрического тока. Мощность электрических потерь $P_{\text{э}}$ пропорциональна квадрату тока и определяется суммой электрических потерь в первичной $P_{\text{э}1}$ и во вторичной $P_{\text{э}2}$ обмотках:

$$P_{\text{э}} = P_{\text{э}1} + P_{\text{э}2} = mI_1^2 r_1 + mI_2^2 r_2,$$
 где m — число фаз трансформатора (для однофазного трансформатора $m = 1$, для трехфазного $m = 3$).

При проектировании трансформатора величину электрических потерь определяют по (1.73), а для изготовленного трансформатора эти потери определяют опытным путем, измерив мощность к.з. при номинальных токах в обмотках $P_{\text{к.ном}}$ -

$$P_{\text{э}} = \beta^2 P_{\text{к.ном}},$$
 где β — коэффициент нагрузки.

Электрические потери называют *переменными*, так как их величина зависит от нагрузки трансформатора

Потери и КПД трансформатора

Магнитные потери. Происходят главным образом в магнитопроводе трансформатора. Причина этих потерь — систематическое перемагничивание магнитопровода переменным магнитным полем. Это перемагничивание вызывает в магнитопроводе два вида магнитных потерь: потери от гистерезиса P_{Γ} , связанные с затратой энергии на уничтожение остаточного магнетизма в ферромагнитном материале магнитопровода, и потери от вихревых токов P_{BT} наводимых переменным магнитным полем в пластинах магнитопровода:

$$P_M = P_{\Gamma} + P_{B.T}$$

С целью уменьшения магнитных потерь магнитопровод трансформатора выполняют из магнитно-мягкого ферромагнитного материала — тонколистовой электротехнической стали. При этом магнитопровод делают шихтованным в виде пакетов из тонких пластин (полос), изолированных с двух сторон тонкой пленкой лака.

Потери и КПД трансформатора

При проектировании трансформатора магнитные потери определяют по значению удельных магнитных потерь $P_{уд}$ происходящих в 1 кг тонколистовой электротехнической стали при значениях магнитной индукции 1,0; 1,5 или 1,7 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц:

$$P_m = P_{уд} (B/B_x)^2 (f/50)^{1,3} G$$

где B — фактическое значение магнитной индукции в стержне или ярме магнитопровода трансформатора, Тл; B_x — магнитная индукция, соответствующая принятому значению удельных магнитных потерь, например $B_x = 1,0$ или $1,5$ Тл; G — масса стержня или ярма магнитопровода, кг.

Значения удельных магнитных потерь указаны в ГОСТе на тонколистовую электротехническую сталь.

Потери и КПД трансформатора

Активная мощность P_1 , поступающая из сети в первичную обмотку трансформатора, частично расходуется на электрические потери в этой обмотке $P_{\text{эл}1}$. Переменный магнитный поток вызывает в магнитопроводе трансформатора магнитные потери P_m . Оставшаяся после этого мощность, называемая *электромагнитной мощностью* $P_{\text{эм}} = P_1 - P_{\text{эл}1} - P_m$, передается во вторичную обмотку, где частично расходуется на электрические потери в этой обмотке $P_{\text{эл}2}$. Активная мощность, поступающая в нагрузку трансформатора, $P_2 = P_1 - \sum P$, где $\sum P = P_{\text{эл}1} + P_m + P_{\text{эл}2}$ — суммарные потери в трансформаторе.

Потери и КПД трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки P_2 (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки P_1 (подводимая мощность):

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - \Sigma P)/P_1 = 1 - \Sigma P/P_1. \quad \text{Сумма потерь}$$

$$\Sigma P = P_{0\text{НОМ}} + \beta^2 P_{\text{к.НОМ}}$$

Активная мощность на выходе вторичной обмотки трехфазного трансформатора (Вт)

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2, \quad \text{где } S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{2\text{НОМ}} I_{2\text{НОМ}}$$

— номинальная мощность трансформатора, В·А; I_2 и U_2 — линейные значения тока, А, и напряжения В.

Учитывая, что $P_1 = P_2 + \Sigma P$, получаем выражение для расчета КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_{0\text{НОМ}} + \beta^2 P_{\text{к.НОМ}}}$$

Потери и КПД трансформатора

КПД трансформатора имеет максимальное значение при $\beta'=0,45\div 0,65$. Максимального КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + 2P_{0ном}}$$

Применение в электросетях

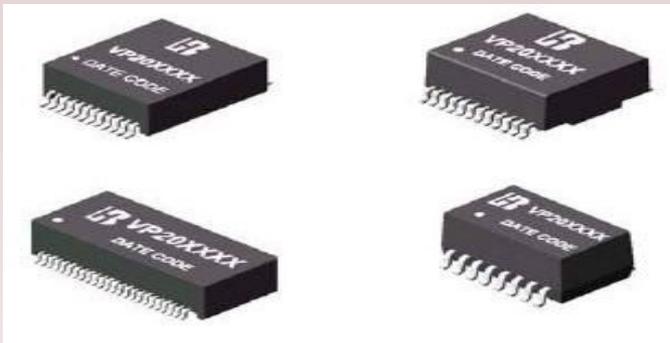
Поскольку потери на нагревание провода пропорциональны квадрату тока через провод, при передаче электроэнергии на большое расстояние выгодно использовать очень большие напряжения и небольшие токи. Из соображений безопасности и для уменьшения массы изоляции в быту желательно использовать не столь большие 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.



Применение в источниках питания. Компактный трансформатор

Для питания разных узлов электроприборов требуются самые разнообразные напряжения. Например, в телевизоре используются напряжения от 5 вольт, для питания микросхем и транзисторов, до 20 киловольт, для питания анода кинескопа. Все эти напряжения получаются с помощью трансформаторов (напряжение 5 вольт с помощью сетевого трансформатора, напряжение 20 кВ с помощью строчного трансформатора). В компьютере также необходимы напряжения 5 и 12 вольт для питания разных блоков. Все эти напряжения преобразуются из напряжения электрической сети с помощью трансформатора со многими вторичными обмотками.



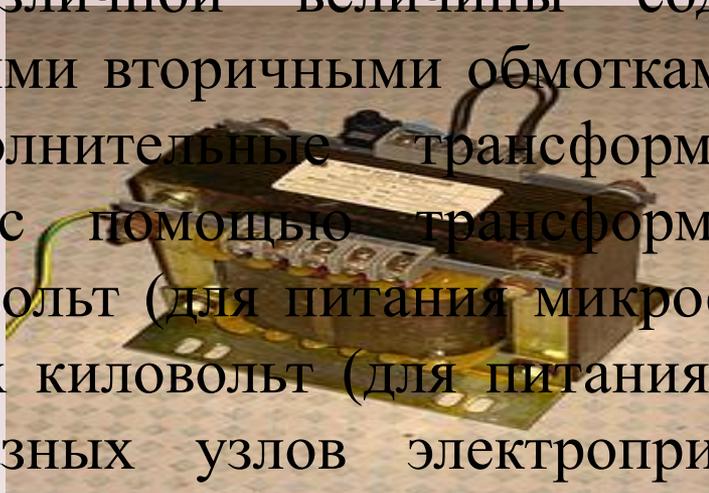
Применение в источниках электропитания.

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 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 Для питания разных узлов электроприборов требуются самые разнообразные напряжения. Блоки





Силовой трансформатор — трансформатор, предназначенный для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках, предназначенных для приёма и использования электрической энергии. Слово "силовой" отражает работу данного вида трансформаторов с большими мощностями. Необходимость применения силовых трансформаторов обусловлена различной *величиной рабочих напряжений ЛЭП* (100-750 кВ), городских электросетей (как правило 6 кВ), напряжения, подаваемого конечным потребителям (0,4 кВ, они же 380/220 В) и напряжения, требуемого для работы электромашин и электроприборов (самые различные от единиц вольт до сотен киловольт).

