

Генерирование электрической энергии. Трансформаторы

Электромагнитная индукция – это явление, когда при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в этом проводнике возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока, полученный ток называется **индукционным током.**

Переменным называется **ток**, периодически изменяющийся со временем.

Чтобы в цепи существовал **синусоидальный переменный ток**, источник в этой цепи должен создавать переменное электрическое поле, изменяющееся синусоидально. На практике синусоидальная ЭДС создается **генераторами переменного тока**, работающими на электростанциях.

Генераторы — это электрические машины, преобразующие механическую энергию в электрическую.

К генераторам относятся гальванические элементы, электростатические машины, термобатареи, солнечные батареи

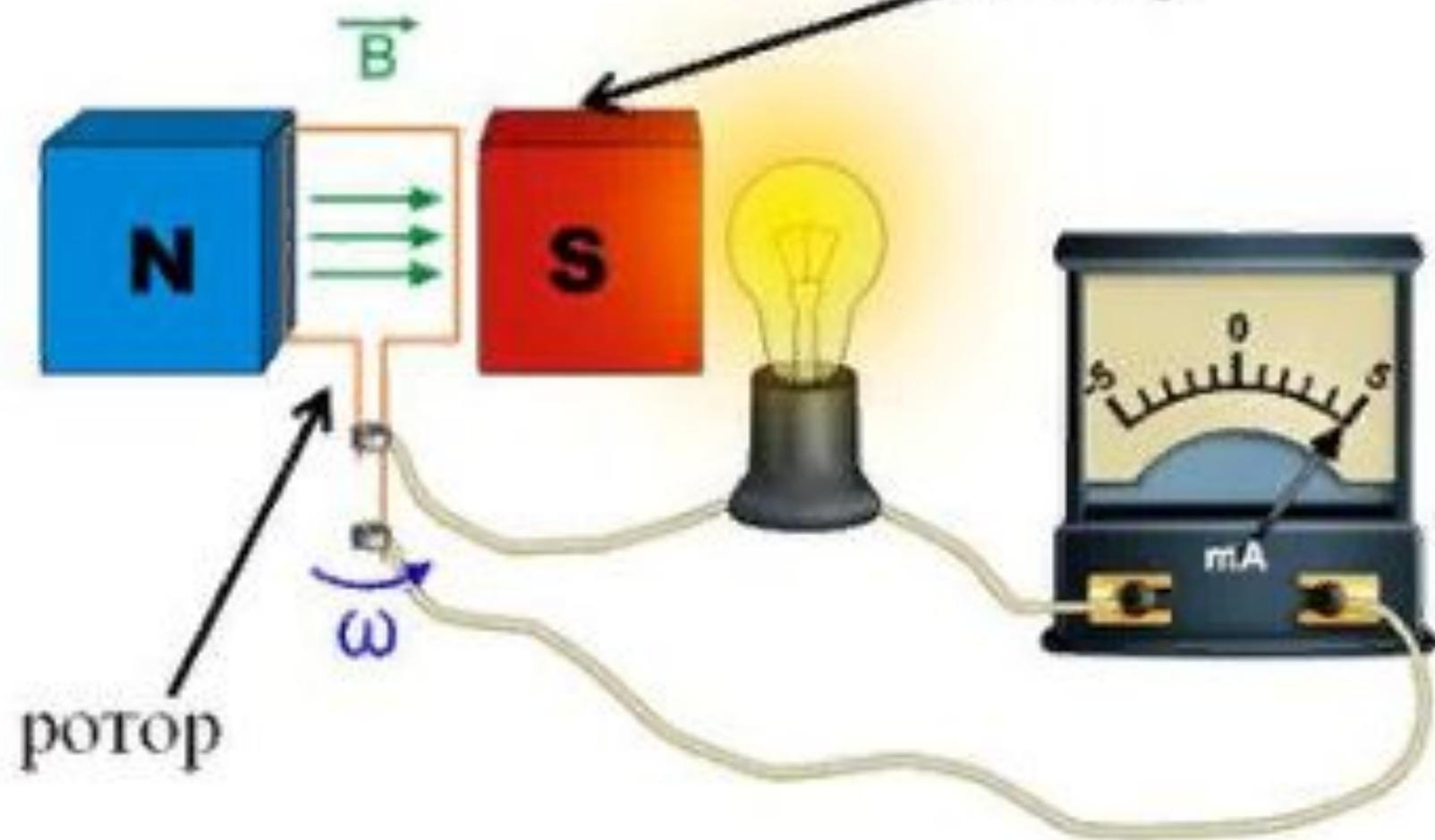


В настоящее время также исследуются возможности создания принципиально новых типов генераторов. Так, например, разрабатываются и уже частично используются топливные элементы, в которых энергия, освобождающаяся в результате реакции водорода с кислородом, непосредственно превращается в электрическую. Область применения различных генераторов различна и определяется их характеристиками. Так, например, электростатические машины создают высокую разность потенциалов, но они не способны создать в цепи сколько-нибудь значимую силу тока. Гальванические элементы наоборот могут дать большой ток, но их продолжительность невелика.

В современной энергетике применяют индукционные генераторы переменного тока, в которых используется явление электромагнитной индукции. Такие генераторы позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении. Простейшая модель такого генератора — рамка с током, вращающаяся в однородном магнитном поле вокруг своей оси. В настоящее время имеется много различных типов **индукционных генераторов**. Но все они состоят из одних и тех же основных частей.

Мы рассматривали пример получения индукционного тока в плоском контуре при его вращении в магнитном поле. На этом принципе и работает электромеханический генератор переменного тока. **Неподвижная часть генератора, аналогичная магниту, называется статором, а**

статор



ротор

В мощных промышленных генераторах вместо постоянного магнита используется электромагнит.

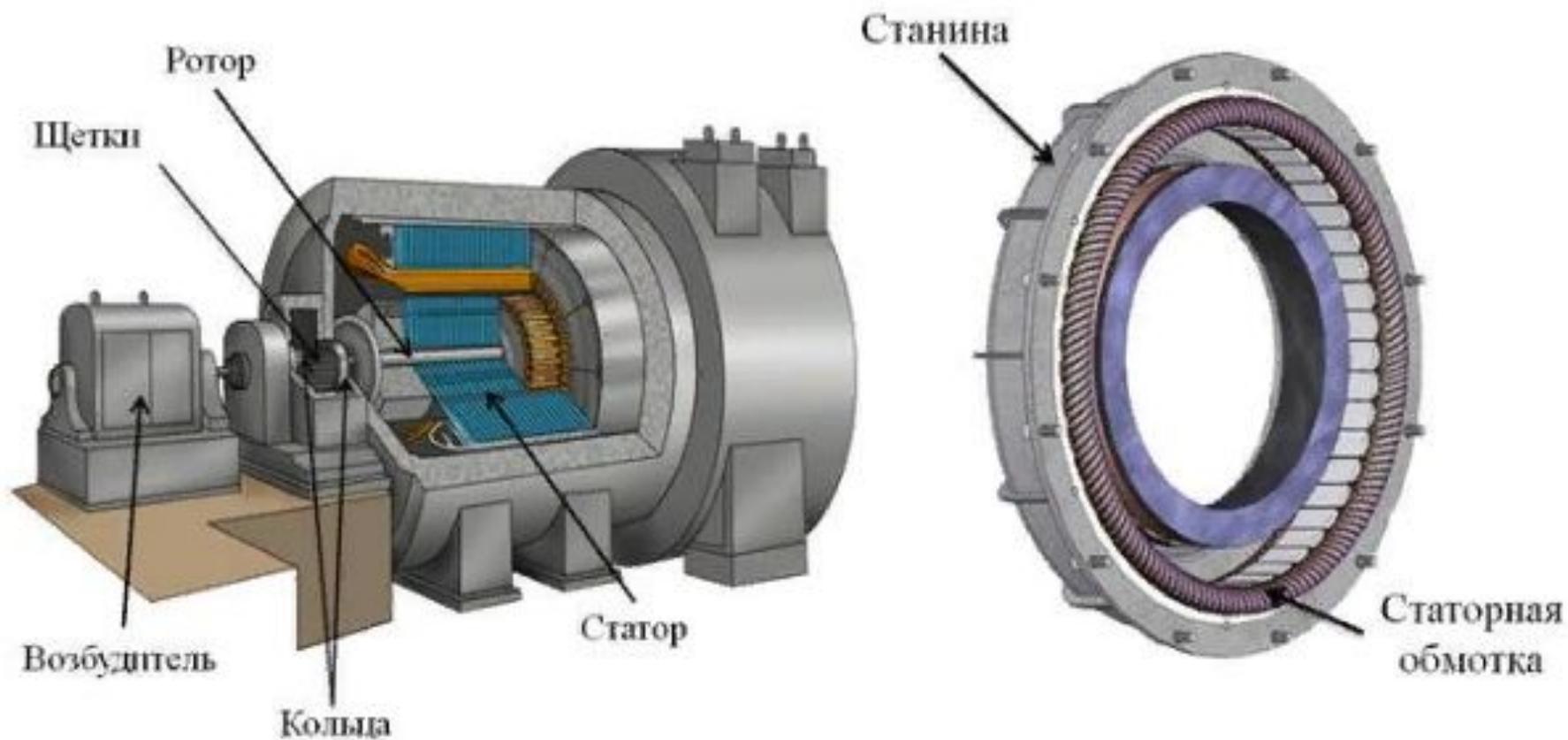
Зазор между сердечниками статора и ротора делают как можно меньшим для увеличения потока вектора магнитной индукции.

В рассмотренной нами ранее модели генератора, вращается проволочная рамка, играющая роль ротора.

Разумеется, можно было бы поступить и наоборот, т.е. вращать магнит, а рамку оставить неподвижной. В больших промышленных генераторах приводится **во вращение именно электромагнит.**

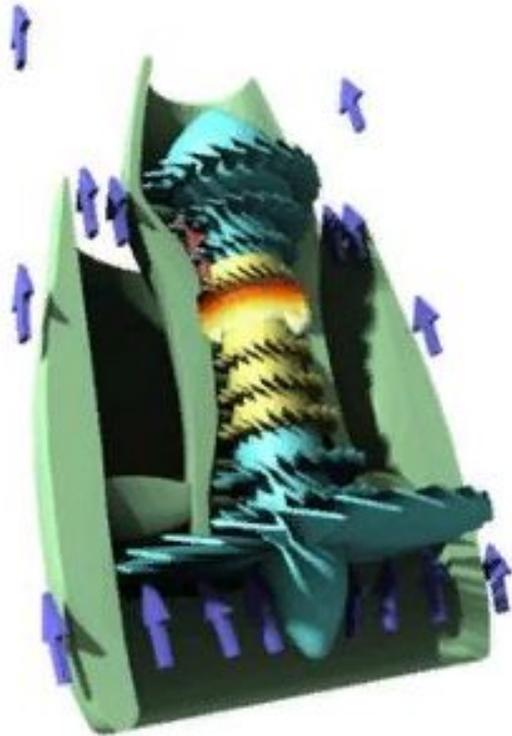
Статор промышленного генератора представляет собой стальную станину цилиндрической формы. Во внутренней его части прорезаются пазы, в которые укладывается **толстый**

Магнитное поле создается ротором. Он представляет собой электромагнит: на стальной сердечник сложной формы надета обмотка, по которой протекает постоянный электрический ток. Сила тока в обмотках электромагнита, создающего магнитное поле, значительно меньше силы тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь. Генерируемый ток удобнее снимать с неподвижных обмоток; а через скользящие контакты подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся электромагниту. Ток к этой обмотке подводится через щетки и кольца от постороннего источника постоянного тока, называемого возбудителем.

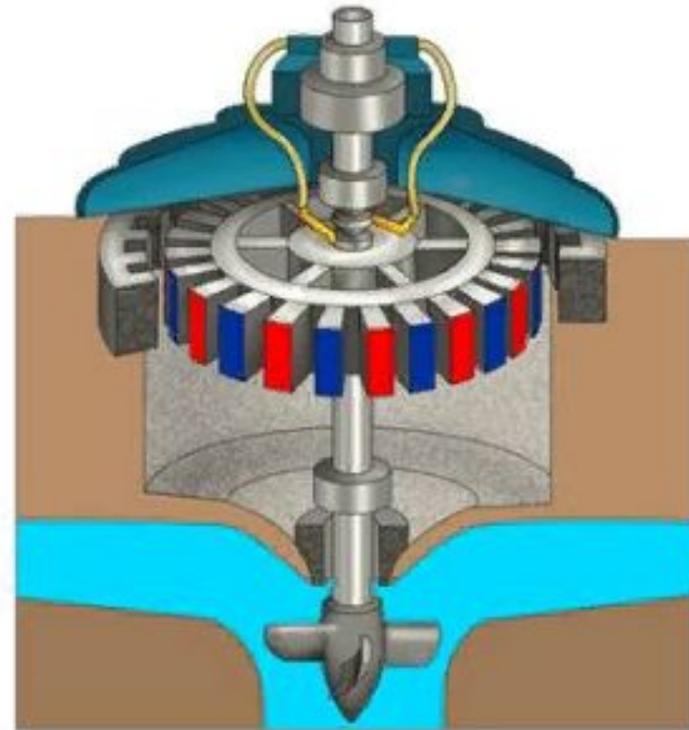


На рисунке представлена полная схема генератора переменного тока. При вращении ротора какой-либо внешней механической силой, создаваемое им магнитное поле тоже вращается. При этом магнитный поток, пронизывающий витки обмотки статора, периодически меняется, в результате чего в них

На тепловых электростанциях ротор генератора вращается с помощью паровой турбины, на гидроэлектростанциях — с помощью водяной турбины.



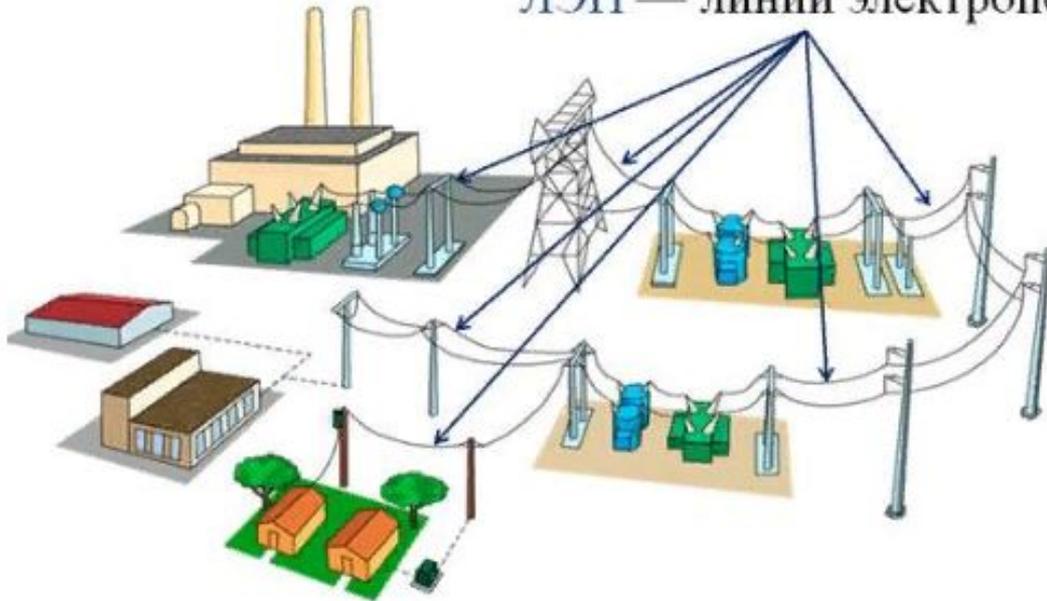
Парогенератор



Гидрогенератора

Ротор гидрогенератора имеет не одну, а несколько пар магнитных полюсов. **Чем больше пар полюсов, тем больше частота переменного электрического тока, вырабатываемого генератором при данной скорости вращения ротора.** Поскольку скорость вращения водяных турбин обычно невелика, то для создания тока стандартной частоты используют многополюсные роторы.

ЛЭП — линии электропередач.



Электрическую энергию производят на электростанциях. Для передачи электроэнергии потребителям, между станцией и потребителем

При передаче электроэнергии неизбежны потери, связанные с нагреванием проводов. **Чем дальше от электростанции находится потребитель тока, тем больше энергии тратится на нагревание проводов и тем меньше доходит до потребителя.**

Уменьшение потерь электроэнергии при ее передаче от электро-станций к потребителям является важной народнохозяйственной задачей. Из **закона Джоуля-Ленца** следует, что **уменьшить потери можно либо за счет уменьшения сопротивления проводов, либо уменьшения силы тока в них. Сопротивление проводов будет тем меньше, чем больше площадь их поперечного сечения и чем меньше удельное сопротивление металла, из которого они изготовлены.** Провода делают из меди или

Увеличивать толщину проводов экономически невыгодно, т.к. это ведет к перерасходу дорогостоящего цветного металла, а также возникновению трудностей при закреплении проводов на столбах. Поэтому такой способ снижения потерь практически невозможен.

Закон Джоуля-Ленца

$$Q = I^2 R \Delta t$$

Уменьшение потерь

Уменьшение
сопротивления проводов

Уменьшения силы тока
в проводах

$$R = \rho l / S$$

$$P = UI$$

Уменьшение
удельного
сопротивления

Увеличение
площади
сечения

Увеличение напряжение

Существенного снижения потерь можно добиться только за счет уменьшения силы тока. Но при данной мощности уменьшение силы тока возможно лишь при увеличении напряжения. Без такого преобразования силы тока и напряжения передача электроэнергии на большие расстояния становится невыгодной из-за существенных потерь. Так, электроэнергия Волжской ГЭС передается в Москву при напряжении 500 кВ, от Саяно-Шушенской ГЭС — при напряжении 750 кВ. Хотя на самих электростанциях генераторы вырабатывают электрическую энергию при напряжениях, не превышающих 20 кВ.

Решение этой важнейшей технической задачи стало возможным только после изобретения трансформатора — устройства, служащего

Первый трансформатор был изобретен в 1876 году русским ученым Павлом Николаевичем Яблочковым для питания изобретенных им электрических свечей — нового в то время источника света. А первый технический трансформатор впервые создал Иван Филиппович Усагин в 1882 г.

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Простейший трансформатор представляет собой две изолированные друг от друга катушки (их еще называют обмотками), намотанные на общий замкнутый сердечник. По одной из обмоток (первичной) пропускается преобразуемый переменный ток, а вторичная обмотка соединяется с потребителем.

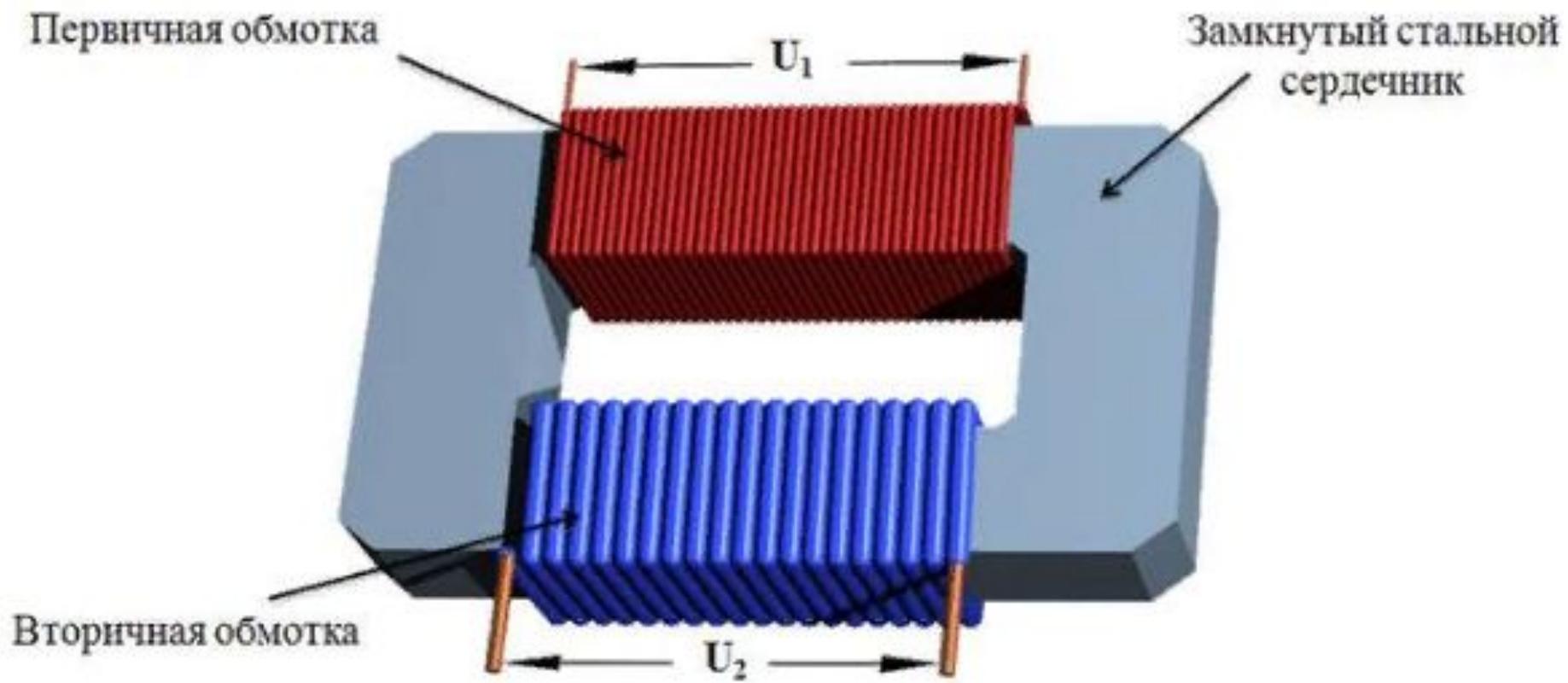
Первичная обмотка

U_1

Замкнутый стальной сердечник

Вторичная обмотка

U_2



Переменный ток в первичной обмотке создает в сердечнике переменный магнитный поток, который возбуждает ЭДС индукции в витках каждой обмотки. Сердечник из трансформаторной стали концентрирует магнитное поле так, что магнитный поток существует практически только внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях.

Мгновенное значение ЭДС индукции во всех витках первичной или вторичной обмотки одинаково. Согласно закону Фарадея, оно будет определяться формулой
$$e = -\dot{\Phi}$$
 где $\dot{\Phi}$ — производная потока магнитной индукции по времени.

Если первичная обмотка имеет N_1 витков, а вторичная N_2 витков, то в обмотках индуцируются (без учета потерь на рассеивание магнитного потока) соответственно e_1 и e_2 , а их отношение будет равно

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Возникающие в катушках ЭДС индукции (или самоиндукции) пропорциональны числу витков в них.

Обычно активное сопротивление обмоток трансформатора мало, и им можно пренебречь. В этом случае модуль напряжения на зажимах первичной обмотки примерно равен модулю суммарно $R \approx 0 \Rightarrow |u_1| \approx |e_1|$

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора ток в ней не идет, поэтому суммарная ЭДС индукции равна напряжению на зажимах вторичной обмотки. $|u_2| \approx |e_2|$

Изменение мгновенных значений ЭДС происходит так, что они одновременно достигают максимума и одновременно проходят через ноль, т.е. изменяются синфазно. Поэтому их отношения можно заменить отношением действующих значений этих ЭДС или отношением действующих значений напряжений. $\frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$

Отношение числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной называют коэффициентом трансформации k .

В зависимости от того, какое значение принимает коэффициент трансформации, различают **повышающий и понижающий трансформатор.**

Его обычно определяют при холостом ходе трансформатора, т.е. при разомкнутой цепи вторичной обмотки.

Если коэффициент трансформации меньше единицы, то трансформатор называется повышающим, а если больше единицы — то понижающим.

При включении во вторичную цепь какой-либо нагрузки (это рабочий ход трансформатора) в ней начинает проходить **ток нагрузки** (он переменный и такой же частоты). Этот ток создает в сердечнике магнитный поток, направленный по правилу Ленца навстречу потоку первичной обмотки. В результате суммарный поток магнитной индукции в первичной катушке уменьшается, уменьшается и ЭДС, а, следовательно, сила тока будет увеличиваться. Это увеличение силы тока в первичной цепи приводит к увеличению магнитного потока, ЭДС индукции и силы тока во вторичной цепи. Но, как мы знаем, увеличение тока во вторичной цепи сопровождается увеличением тока самоиндукции и, следовательно, уменьшением магнитного

Первичная обмотка N_1

Вторичная обмотка N_2

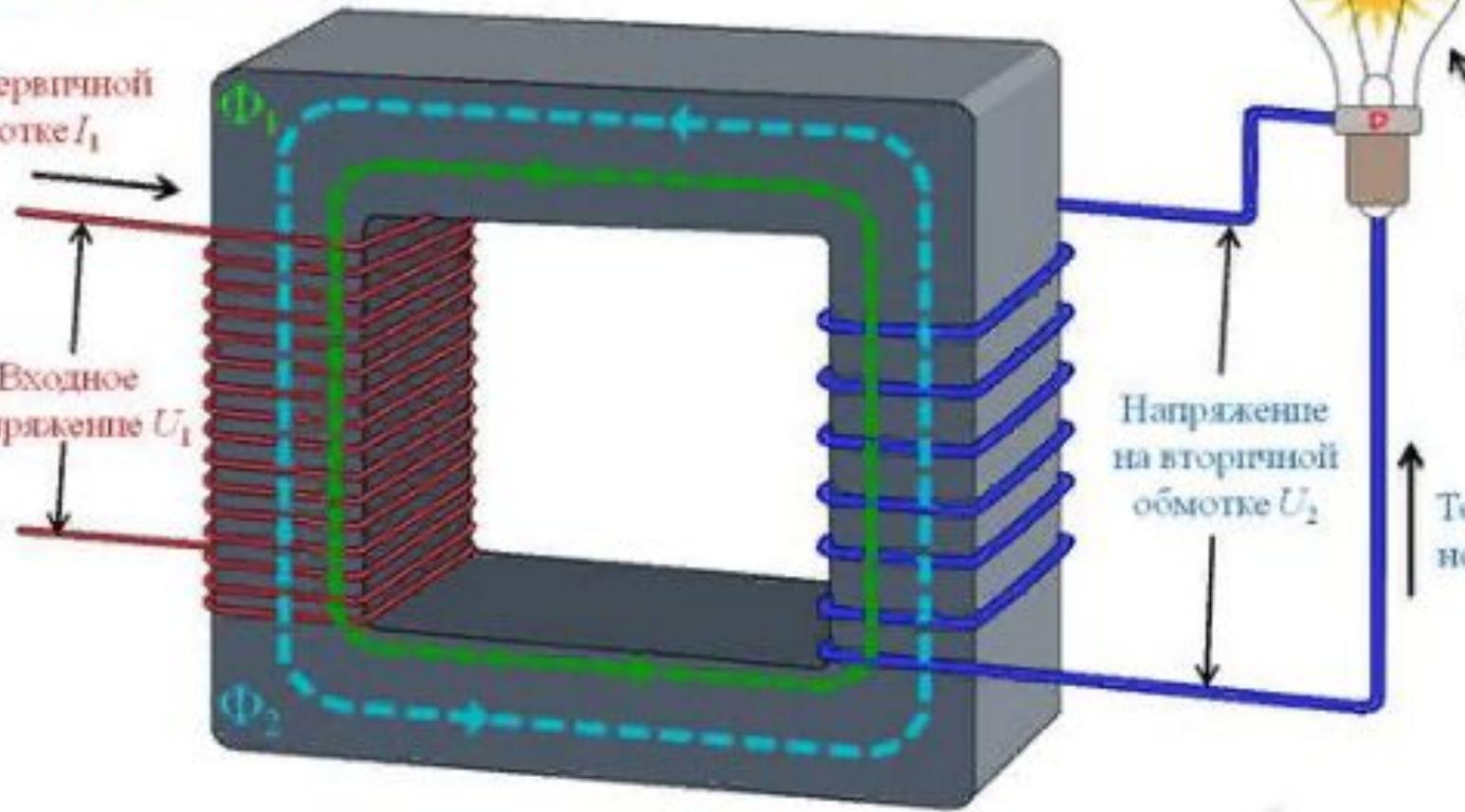
Ток в первичной обмотке I_1

Входное напряжение U_1

Напряжение на вторичной обмотке U_2

Ток во вторичной обмотке I_2

Нагрузка



При постоянной нагрузке устанавливаются определенные магнитный поток, ЭДС индукции во вторичной цепи и ток в первичной цепи. Трансформатор сам, автоматически регулирует потребление энергии в зависимости от нагрузки во вторичной цепи.

При рабочем ходе трансформатора происходит непрерывная передача энергии из первичной цепи во вторичную.

Мощности $P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1$ мая в первичной цепи, буд $P_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2$ определяться формулой а выделяемая на нагрузке

Коэффициент полезного действия трансформатора определяться отношением выделяемой мощности на нагрузке к потребляемой мощности в первичной цепи.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2 \cos \varphi_2}{I_1 U_1 \cos \varphi_1}$$

При работе трансформатора имеются потери на нагревание обмоток трансформатора, на рассеивание магнитного потока в пространство, на вихревые токи Фуко в сердечнике и его перемагничивание.

Для уменьшения этих потерь принимаются следующие меры:

1) обмотка низкого напряжения делается большего сечения, так как по ней проходит ток большей силы;

2) сердечник делают замкнутым, что уменьшает рассеивание магнитного потока;

3) сердечник делают из изолированных пластин для уменьшения токов Фуко.

Благодаря этим мерам **коэффициент полезного действия современных трансформаторов достигает 95—99%,**

Если иногда можно пренебречь потерями в трансформаторе, т.е. считать его коэффициент полезного действия равным 100%, то мощность, потребляемая в первичной цепи, будет равна мощности, выделяемой на нагрузке. Тогда отношение силы тока в первичной обмотке к силе тока во вторичной обмотке будет обратно пропорционально соответствующим напряжениям. А это значит, что увеличивая с помощью трансформатора напряжение, во столько же раз будем уменьшать силу тока и наоборот.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

В настоящее время трансформаторы нашли широкое применение, как в технике, так и в быту. Например, для передачи электроэнергии на большие расстояния используются как повышающие, так и понижающие трансформаторы (об этом, кстати, мы более подробно будем говорить в одном из следующих уроков). При подзарядке сотового телефона имеющийся в зарядном устройстве трансформатор понижает напряжение, полученное из осветительной сети до 5.5 В, пригодного для телефона. В телевизоре имеется несколько трансформаторов (как понижающих, так и повышающих), поскольку для питания различных его узлов требуется напряжение от 1,5 В до 25 кВ и так далее.



В задачах, где рассматривается работа трансформатора, основными являются формулы для определения коэффициента трансформации, определение коэффициента полезного действия и связи сил тока и напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора (если его КПД близок к 100%). Если же в задачах указываются большие токи во вторичной цепи, то

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2 \cos \varphi_2}{I_1 U_1 \cos \varphi_1} \quad \text{и} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad \xi_2 = U_2 + I_2 r_2$$

где U_2 — напряжение на зажимах вторичной обмотки, I_2 — сила тока во вторичной обмотке, а r_2 — ее сопротивление. В таких случаях коэффициент трансформации будет

Задача 1. Определите максимальное значение электродвижущей силы во вторичной обмотке трансформатора, если она имеет 100 витков и пронизывается магнитным потоком, изменяющимся со временем по закону $\Phi = 0,01 \cos 314 t$.

Дано:

$$N_2 = 100$$

$$\Phi = 0,01 \cos 314t$$

$$\xi_{\max} = ?$$

Задача 1. Определите максимальное значение электродвижущей силы во вторичной обмотке трансформатора, если она имеет 100 витков и пронизывается магнитным потоком, изменяющимся со

Дано:

$$N_2 = 100$$

$$\Phi = 0,01 \cos 314t$$

$$\xi_{max} = ?$$

Решение:

Переменный ток в первичной обмотке создает в сердечнике переменный магнитный поток, который возбуждает ЭДС индукции в витках каждой обмотки.

Мгновенное значение ЭДС: $e = -\Phi' \cdot N_2$.

$$e = -N_2 \cdot \Phi' = -100 \cdot (-314) \cdot 0,01 \sin 314t.$$

$$e = 314 \sin 314t.$$

$$e = \xi_0 \sin \omega t.$$

$$\xi_{max} = 314 \text{ В.}$$

Ответ: $\xi_{max} = 314 \text{ В.}$



Задача 2. Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 840 витков, повышает напряжение с 220 В до 660 В. Каков коэффициент трансформации и сколько витков содержится во вторичной обмотке трансформатора? В какой обмотке провод будет иметь большую площадь сечения?

Дано:

$$N_1 = 840$$

$$U_1 = 220 \text{ В}$$

$$U_2 = 660 \text{ В}$$

$$k = ?$$

$$N_2 = ?$$

Задача 2. Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 840 витков, повышает напряжение с 220 В до 660 В. Каков коэффициент трансформации и сколько витков содержится во вторичной обмотке трансформатора? В какой обмотке провод будет иметь большую площадь сечения?

Дано:	Решение:
$N_1 = 840$	Коэффициент трансформации: $k = \frac{U_1}{U_2}$.
$U_1 = 220 \text{ В}$	$k = \frac{220}{660} = \frac{1}{3}$.
$U_2 = 660 \text{ В}$	
$k = ?$	Коэффициент трансформации: $k = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow N_2 = \frac{N_1}{k}$.
$N_2 = ?$	$N_2 = \frac{840}{\frac{1}{3}} = 2520$.

Поскольку преобразование напряжения в трансформаторе осуществляется без заметной потери мощности, то $I_1 \approx 3I_2$. Следовательно $S_1 > S_2$.

Задача 3. Понижающий трансформатор с $k = 10$ включен в сеть напряжением 127 В. Сопротивление вторичной обмотки равно 2 Ом, а сила тока 3 А, то, каково напряжение на зажимах вторичной обмотки? Потерями энергии в первичной обмотке пренебречь.

Дано:

$$k = 10$$

$$U_1 = 127 \text{ В}$$

$$R_2 = 2 \text{ Ом}$$

$$I_2 = 3 \text{ А}$$

$$U_2 = ?$$

Задача 3. Понижающий трансформатор с $k = 10$ включен в сеть напряжением 127 В. Сопротивление вторичной обмотки равно 2 Ом, а сила тока 3 А, то, каково напряжение на зажимах вторичной обмотки? Потерями энергии в первичной

с

Дано:
$k = 10$
$U_1 = 127 \text{ В}$
$R_2 = 2 \text{ Ом}$
$I_2 = 3 \text{ А}$

Решение:

В первичной обмотке $R \approx 0$.

Следовательно: $\xi_1 = U_1$.

Закон Ома для замкнутой цепи:

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\xi}{R + r} \\ \varphi_1 - \varphi_2 &= IR = U \end{aligned} \right\} \xi_2 = U_2 + I_2 R_2.$$

Коэффициент трансформации: $k = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2 R_2} \Rightarrow U_2 = \frac{U_1}{k} - I_2 R_2.$

$$U_2 = \frac{127}{10} - 3 \cdot 2 = 12,7 - 6 = 6,7 \text{ В}.$$



Задача 4. Трансформатор включен в сеть с переменным напряжением 220 В. Напряжение на зажимах вторичной обмотки составляет 20 В, а сила тока 1 А. Определите коэффициент трансформации и сопротивление вторичной обмотки, если КПД данного трансформатора равен 91%. Потерями в первичной обмотке и сердечнике пренебречь.

Дано:

$$U_1 = 220 \text{ В}$$

$$U_2 = 20 \text{ В}$$

$$I_2 = 1 \text{ А}$$

$$\eta = 0,91$$

$$R_2 = ?$$

$$k = ?$$

Задача 4. Трансформатор включен в сеть с переменным напряжением 220 В. Напряжение на зажимах вторичной обмотки составляет 20 В, а сила тока 1 А. Определите коэффициент трансформации и сопротивление вторичной обмотки, если КПД данного трансформатора равен 91%. Потерями в первичной обмотке и сердечнике пренебречь.

Дано:	Решение:
$U_1 = 220 \text{ В}$	Коэффициент трансформации: $k = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2 R_2}$.
$U_2 = 20 \text{ В}$	В первичной обмотке $R \approx 0 \Rightarrow \xi_1 = U_1$.
$I_2 = 1 \text{ А}$	Из закона Ома для замкнутой цепи: $\xi_2 = U_2 + I_2 R_2$.
$\eta = 0,91$	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow k = \frac{I_2}{I_1}$.
$R_2 = ?$	Коэффициент полезного действия: $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}$.
$k = ?$	



$$k = \frac{U_1}{U_2 + I_2 R_2}$$

$$\Downarrow$$

$$U_1 = k(U_2 + I_2 R_2)$$

$$k = \frac{I_2}{I_1}$$

$$\Downarrow$$

$$I_1 = I_2/k$$

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}$$

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{\frac{I_2}{k} k (U_2 + I_2 R_2)} = \frac{U_2}{U_2 + I_2 R_2} \Rightarrow U_2 + I_2 R_2 = \frac{U_2}{\eta} \Rightarrow R_2 = \frac{U_2 - \eta U_2}{\eta I_2}$$

$$R_2 = \frac{20 - 0,91 \cdot 20}{0,91 \cdot 1} \approx 2 \text{ Ом.}$$

$$k = \frac{220}{20 + 1 \cdot 2} = 10.$$