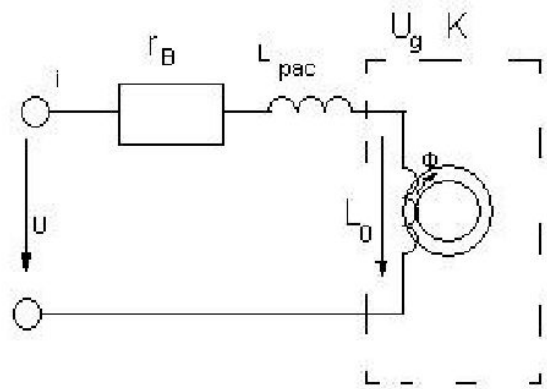
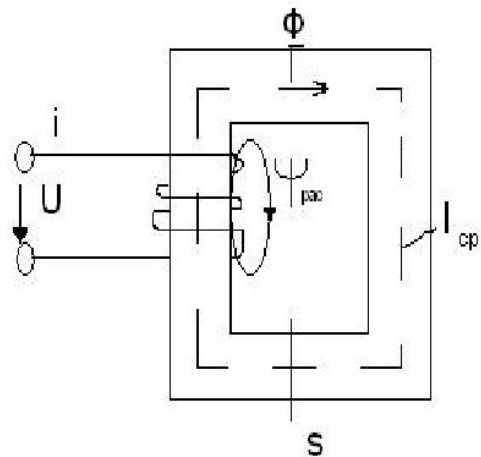


# Электромагнитные устройства

Лекция 8

Катушка с магнитопроводом в цепи переменного тока



# Трансформаторы.

- **Трансформатором** называется статическое (т.е. без движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное преимущественно для преобразования одного переменного напряжения в другое (или другие) той же частоты. Реже трансформаторы применяются для преобразования частоты, числа фаз и тока в напряжение (трансреакторы).

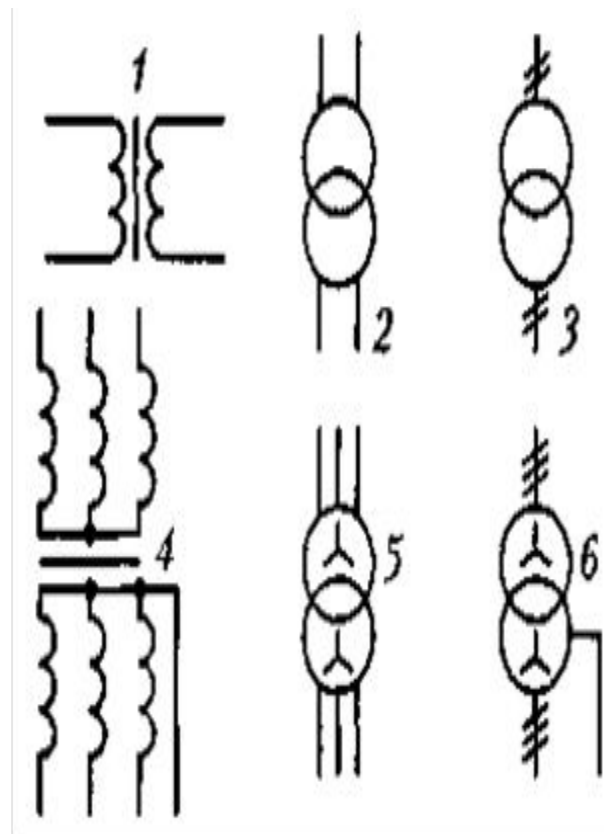
- Трансформатор имеет не менее двух обмоток с общим магнитным потоком, которые электрически изолированы друг от друга. Это позволяет применять трансформаторы для электрической развязки цепей (такая развязка называется также развязкой по постоянному току или гальванической).

- Для усиления индуктивной связи в большинстве трансформаторов обмотки размещаются на магнитопроводе, который с целью снижения влияния вихревых токов собирается из листовой электротехнической стали. В воздушных трансформаторах, которые применяются при частотах примерно выше 20 кГц, магнитопровод отсутствует

- Обмотка трансформатора, присоединенная к источнику питания, называется **первичной**. Соответственно, величины, относящиеся к этой обмотке, - число витков, напряжение и ток - именуются первичными. Обмотка, к которой подключается нагрузка трансформатора (электроприемник), и относящиеся к ней величины называются **вторичными**.

- Различают однофазные (для цепей однофазного тока) и трехфазные (для трехфазных цепей) трансформаторы. У трехфазного трансформатора **первичной или вторичной** обмоткой принято называть соответственно совокупности трехфазных обмоток одного напряжения.

- . На рис.26.1 показаны основные условные графические обозначения однофазного (1, 2, 3) и трехфазного (4, 5, 6) трансформаторов.

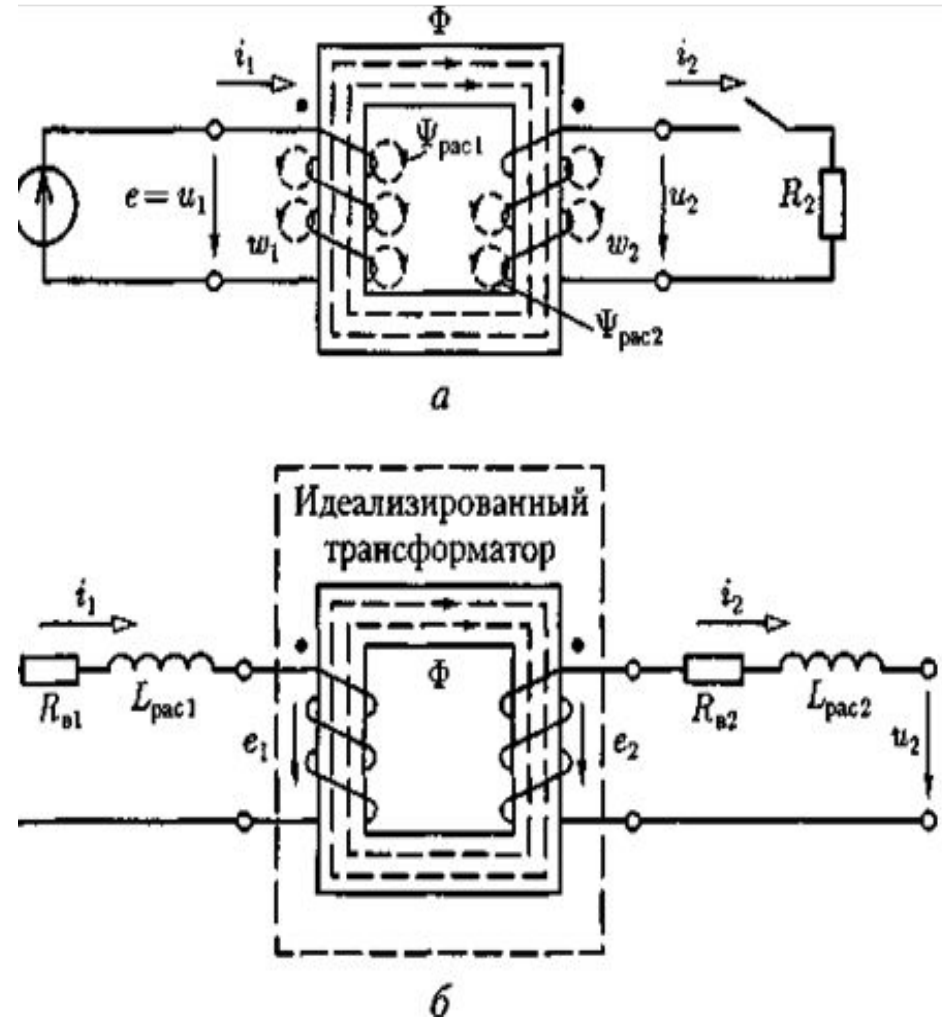




- Впервые с техническими целями трансформатор был применен Яблочковым П.Н. в 1876 г. для питания электрических свечей. Повсеместное распространение трансформаторы получили после того, как М.О. Доливо-Добровольским была предложена трехфазная система передачи электроэнергии и разработана конструкция первого трехфазного трансформатора (1891).

# Принцип действия однофазного трансформатора

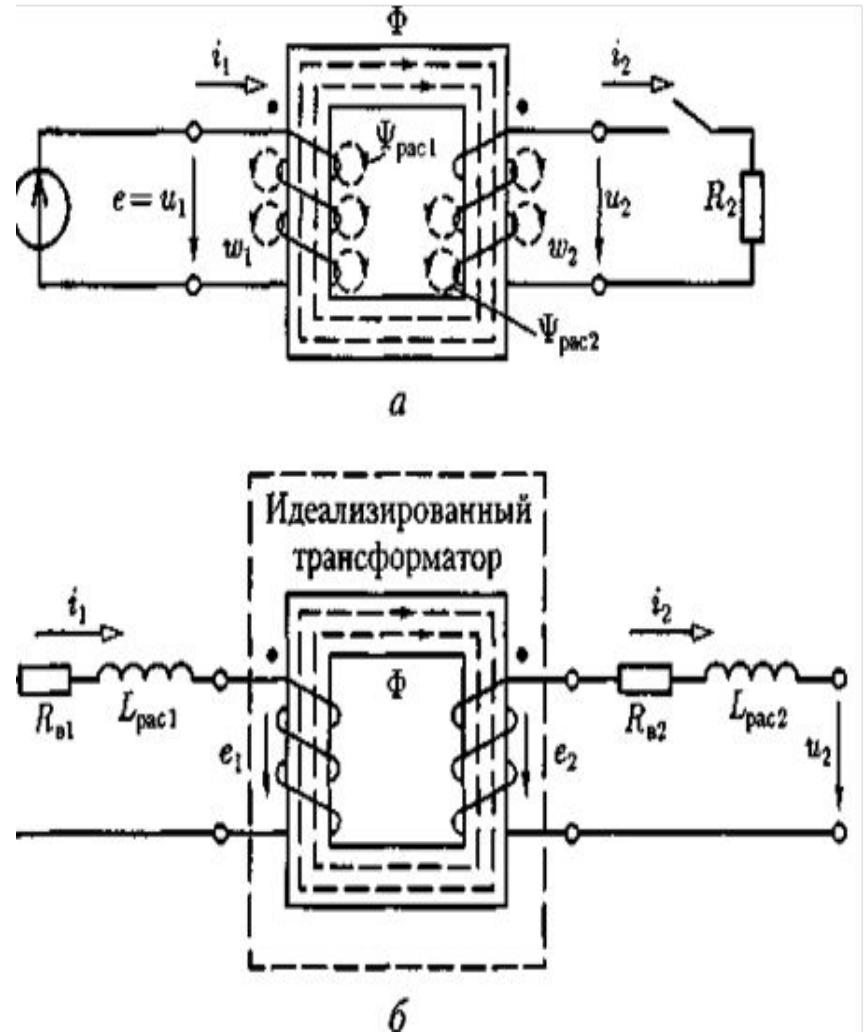
- На рис. 26.2, а приведена принципиальная конструкция однофазного трансформатора. Со стороны вторичной обмотки, содержащей  $w_2$  витков, т.е. для нагрузки  $R_2$ , трансформатор является источником электроэнергии, а со стороны первичной обмотки, содержащей  $w_1$  витков, - приемником энергии от источника питания.



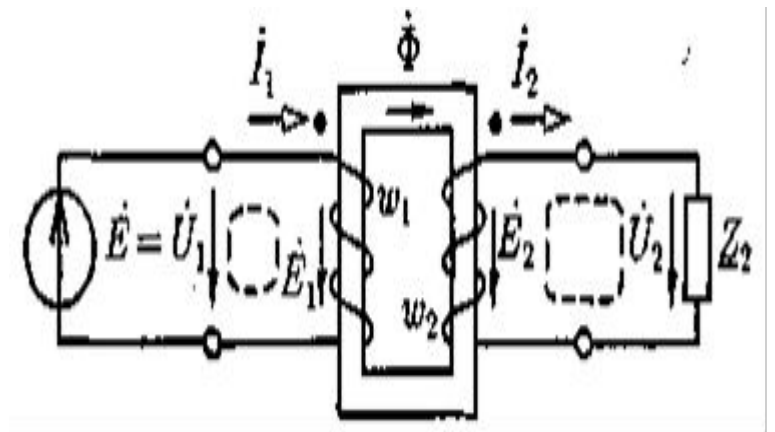
- Рассмотрим принцип действия однофазного трансформатора. Предположим сначала, что цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута и при действии источника напряжения  $u_1 = e$  ток в первичной обмотке равен  $i_1$ . Магнитодвижущая сила (МДС) первичной обмотки  $i_1 w_1$  создает в магнитопроводе магнитный поток  $\Phi_1$ , положительное направление которого определяется правилом буравчика. Этот магнитный поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $e_{L1}$  (на рисунке не показана), а во вторичной обмотке – ЭДС взаимной индукции  $e_{M2}$  (на рисунке также не показана). После замыкания цепи вторичной обмотки под действием ЭДС взаимной индукции  $e_{M2}$  в нагрузке  $R_2$  возникнет ток  $i_2$  такого направления, что обусловленная им МДС  $i_2 w_2$  создает в магнитопроводе магнитный поток  $\Phi_2$ , направленный встречно по отношению к  $\Phi_1$ .

- Следовательно, первичная и вторичная обмотки рассматриваемого трансформатора включены встречно и результирующая МДС этих обмоток равна  $i_1w_1 - i_2w_2$ . Эта МДС возбуждает в магнитопроводе общий магнитный поток  $\Phi$ . Кроме того, при анализе работы трансформатора нужно учесть потокосцепления рассеяния первичной  $\Psi_{рас1}$  и вторичной  $\Psi_{рас2}$  обмоток, которые пропорциональны соответственно токам  $i_1$  и  $i_2$ . В схеме замещения трансформатора эти потоки учитываются индуктивностями рассеяния  $L_{рас1}$  и  $L_{рас2}$ .

- Трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого не имеют активных сопротивлений и потоков рассеяния, называется идеализированным трансформатором. На рис. 26.2 идеализированный трансформатор выделен штриховой линией.



- На рис. 26.3 приведена схема включения идеализированного однофазного трансформатора между источником ЭДС  $E$  и электроприемником с комплексным сопротивлением нагрузки  $Z_2$ . Определим соотношения между основными величинами этой цепи.



В соответствии с законом электромагнитной индукции напряжение  $u_1$ , приложенное к первичной обмотке трансформатора с числом витков  $w_1$ , уравновешивается ЭДС самоиндукции этой обмотки  $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$ . Тогда при синусоидальном магнитном потоке  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$  можно записать:

$$u_1 = w_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = w_1 \omega B_m S \cos \omega t. \quad (26.1)$$

В данном выражении  $B_m$  – индукция в магнитопроводе сердечника, сечение которого –  $S$ .

На основе (26.1) легко устанавливается взаимосвязь между действующим значением первичного напряжения  $U_1$  и значением индукции  $B_m$  в магнитопроводе трансформатора при известных значениях частоты  $f$  и сечения  $S$ :

$$U_1 = 4,44 w_1 \omega B_m S. \quad (26.2)$$

- Выражение (26.2) справедливо по отношению ко всем обмоткам трансформатора и может быть использовано для определения числа их витков при известных напряжениях, в том числе – для определения числа витков  $w_2$  .



# 3. Мощность потерь в трансформаторе.

Энергетическая диаграмма трансформатора показана на рис. 26.4. Подводимая к первичной обмотке мощность  $P_1$  расходуется на нагревание проводов первичной ( $P_{\text{пр1}}$ ) и вторичной ( $P_{\text{пр2}}$ ) обмоток, а также на потери в магнитопроводе (в стали)  $P_c$ . Напомним, что потери в стали образуются за счет потерь на ее перемагничивание (потери на гистерезис) и потерь на вихревые токи.

Мощность  $P_{12} = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c$  поступает во вторичную обмотку и равна мощности  $P_2$ , отдаваемой в нагрузку, за вычетом  $P_{\text{пр2}}$ . Таким образом, в нагрузке рассеивается мощность

---

$$P_2 = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c - P_{\text{пр2}}.$$

Отношение активной мощности  $P_2$  на выходе трансформатора к активной мощности  $P_1$  на его входе называется коэффициентом полезного действия (КПД) трансформатора:

$$\eta = (P_2/P_1) \cdot 100\%. \quad (26.3)$$

В общем случае КПД трансформатора зависит от режима его работы. При номинальных значениях напряжения  $U_1 = U_{1\text{ном}}$  и тока  $I_1 = I_{1\text{ном}}$  первичной обмотки трансформатора и коэффициенте мощности электроприемника  $\cos \varphi_2 > 0,8$  КПД очень высок и у мощных трансформаторов превышает 99 %. По этой причине прямое определение КПД трансформатора по формуле (26.3), основанное на непосредственном измерении мощностей  $P_1$  и  $P_2$ , практически не применяется, так как приводит к значительным погрешностям. Для получения удовлетворительных результатов мощности  $P_1$  и  $P_2$  должны измеряться с такой высокой точностью, какую обеспечить очень трудно.

Относительно проще и точнее можно определить КПД методом, основанном на прямом измерении мощности потерь в трансформаторе. С учетом того, что мощность потерь  $\Delta P = P_1 - P_2$ , КПД трансформатора можно представить в виде

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}. \quad (26.4)$$

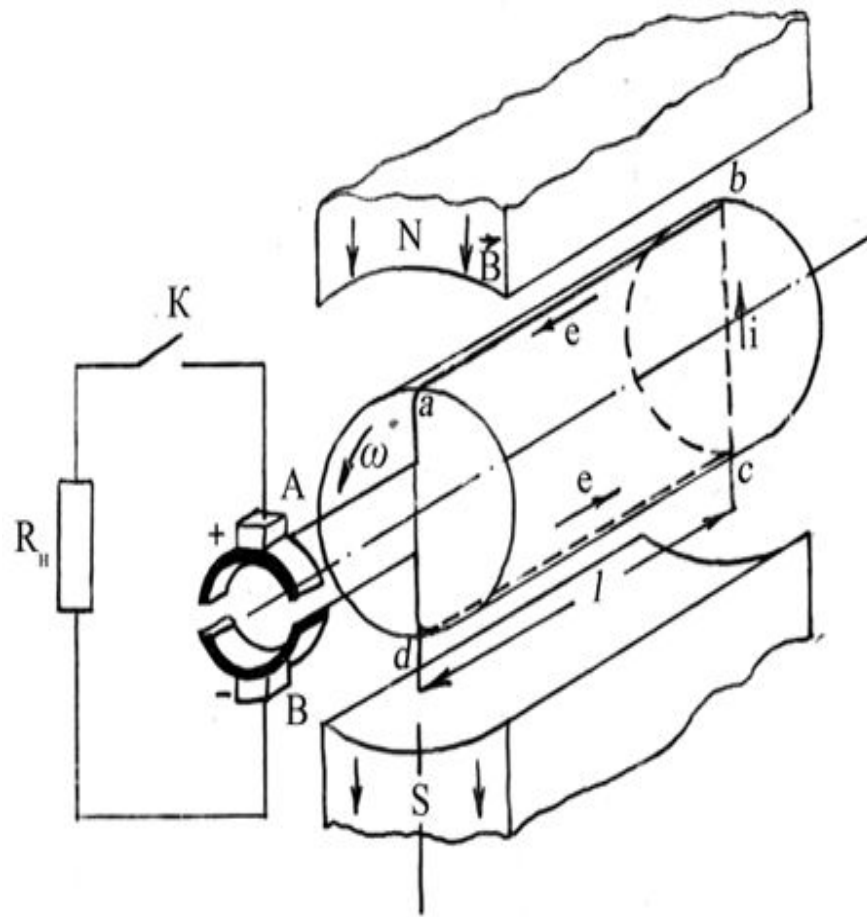
Как было отмечено ранее, мощность потерь в трансформаторе равна сумме мощностей потерь в магнитопроводе  $P_c$  и в проводах обмоток  $P_{пр}$ . При номинальных значениях первичного напряжения  $U_1 = U_{\text{ном}}$  и тока  $I_1 = I_{\text{ном}}$  мощности потерь в магнитопроводе и проводах обмоток практически равны активным мощностям, которые трансформатор потребляет в опыте холостого хода и короткого замыкания, соответственно. Точное измерение этих мощностей связано с меньшими трудностями и вполне доступно.

# Электрические машины

# Машины постоянного тока

- **Электрическими машинами** называются устройства, предназначенные для преобразования механической энергии вращения в электрическую (генератор) и наоборот, электрическую энергию в механическую (двигатель). Работа электрической машины основана на единстве закона электромагнитной индукции и закона электромагнитных сил.

- Возьмем устройство, состоящее из двух магнитных полюсов создающих постоянное магнитное поле, и якоря – стального цилиндра с уложенным на нем витком из электропроводного материала. Концы витка присоединены к двум металлическим полукольцам, изолированным друг от друга и от вала. Полукольца соприкасаются с неподвижными щетками, соединенными с внешней цепью (рисунок 1.1).



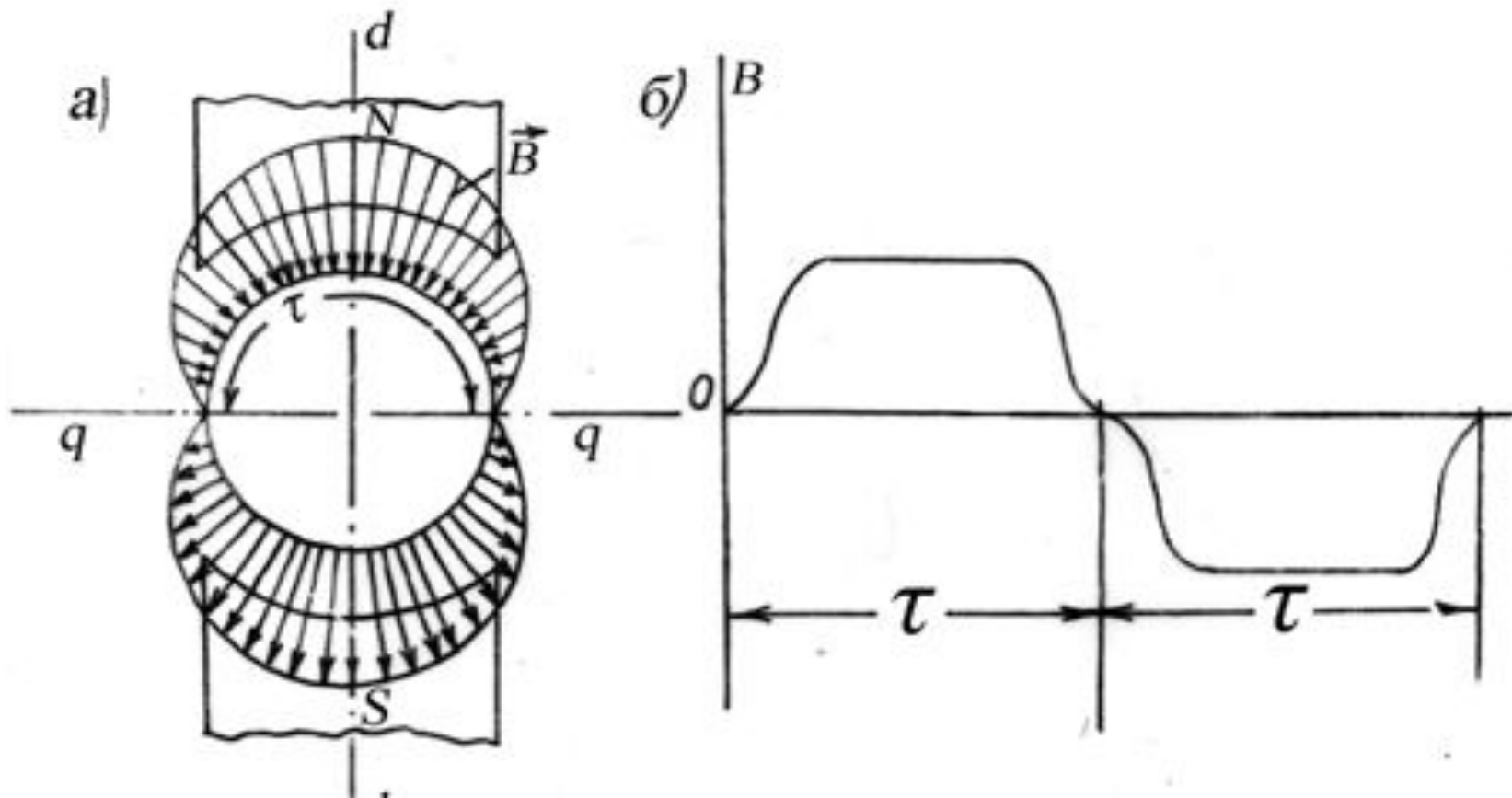
- При вращении якоря в соответствии с законом электромагнитной индукции в проводниках витка  $ab$  и  $cd$  при пересечении ими магнитного поля будет индуцироваться ЭДС, которая при наличии стального цилиндра равна
- $\epsilon = BLV$
- где  $V$  – линейная скорость движения проводника относительно магнитного поля;
- $B$  – индукция магнитного поля;
- $L$  – длина активной части витка.

- Направления ЭДС в проводниках  $ab$  и  $cd$  определяется по правилу правой руки. По контуру  $abcd$  эти ЭДС складываются и, так как верхний и нижний проводники находятся в одинаковых магнитных условиях, то ЭДС витка будет

$$e_b = 2e_{up}.$$

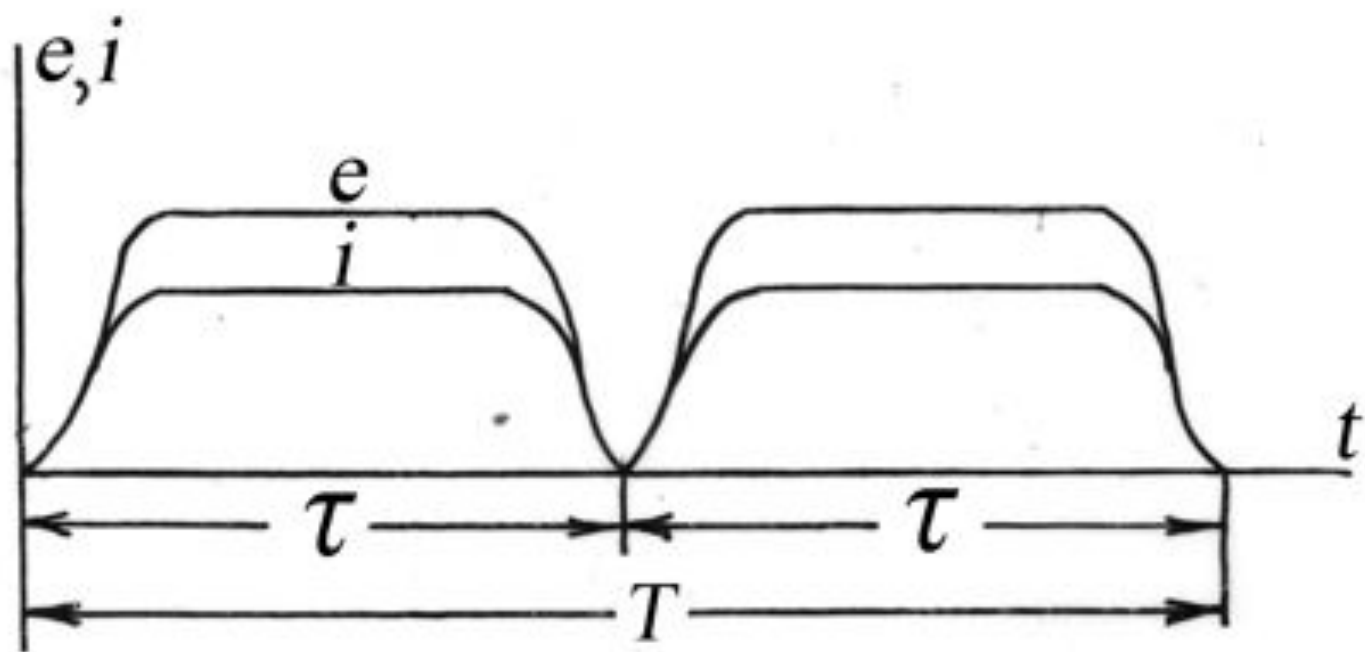


- Таким образом, в данных условиях характер изменения во времени ЭДС в проводнике при вращении определяется характером распределения индукции в зазоре. Распределение ее по окружности якоря неравномерное, так как магнитное сопротивление  $R_{\mu}$  потоку различное. Под полюсами индукция  $B$  имеет максимальное значение, в промежутке между полюсами индукция уменьшается, достигая на линии  $qq$  нулевого значения (рисунок 1.2,а). Линия  $dd$ , проходящая через центр якоря вдоль полюсов, называется продольной осью машины, а линия  $qq$ , проходящая через центр якоря посередине между полюсами, называется поперечной осью. Поперечную ось также называют геометрической нейтралью. Часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс, называют полюсным делением и обозначают  $\tau$ .



- При вращении якоря через каждые попоборота проводники  $ab$  и  $cd$  оказываются в поле противоположных полюсов. Поэтому направление ЭДС в них меняется на противоположное. Таким образом, при вращении якоря в витке индуктируется переменная ЭДС (рисунок 1.2,б). Для получения во внешней цепи постоянного тока устанавливают специальный переключатель, называемый коллектором. Проводники  $ab$  и  $cd$  присоединяются к полукольцам, изолированным друг от друга и от вала. Полукольца (пластины коллектора) соприкасаются с неподвижными щетками, соединенными с внешней цепью.

- При вращении якоря каждая из щеток будет соприкасаться только с той коллекторной пластиной и соответственно только с тем из проводников, который находится под полюсом данной полярности. Направление ЭДС в витке изменяется на линии геометрической нейтрали и в это же момент происходит переключение полуколец к щеткам А и В. В результате полярность щеток в процессе работы машины остается неизменной, а ЭДС и ток во внешней цепи становятся постоянными по направлению и переменным» по величине (рисунок 1.3).



- Таким образом, коллектор играет роль механического переключателя сторон витка к щеткам, т.е. является выпрямителем. Чтобы сгладить пульсацию ЭДС и тока во внешней цепи, на якоре располагают несколько витков, присоединенных к соответствующим парам коллекторных пластин и сдвинутых относительно друг друга на некоторый угол. Практически уже при 16 витках на якоре пульсации тока становятся незаметными и ток во внешней цепи можно считать постоянными не только по направлению, но и по величине. Таким образом, мы получили генератор постоянного тока.

- Рассмотрим работу данной системы в режиме двигателя. Если к щеткам приложить напряжение внешнего источника электроэнергии, то в витке потечёт ток. Согласно закону электромагнитных сил на каждую сторону витка будет действовать сила

$$F_{\text{эм}} = Bli .$$

- Эти силы создадут вращающий момент

- Под действием этого момента якорь начнет вращаться, преодолевая момент сопротивления на валу. После прохождения сторонами витка линии геометрической нейтральной они попадают в зону полюса противоположной полярности. Но в это же время в них изменяется и направление тока, что осуществляется с помощью коллектора. В результате направление момента остается прежним, и якорь будет вращаться в том же направлении. В этом случае коллектор выполняет роль инвертора – преобразователя постоянного тока в переменный.



# Асинхронный электродвигатель

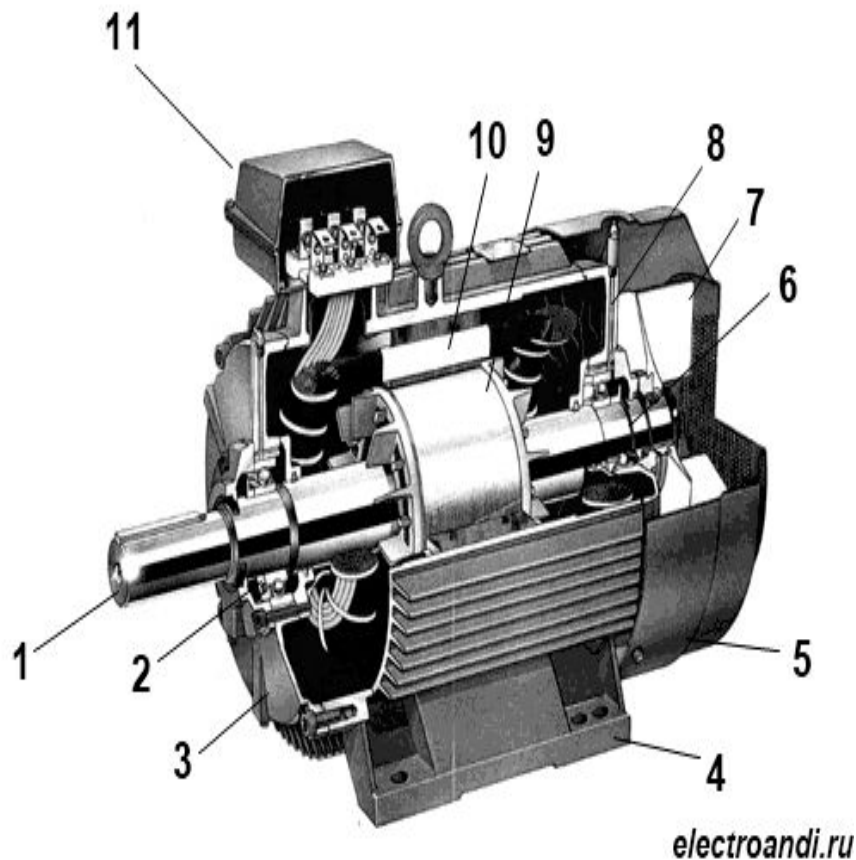
- 8 марта 1889 года величайший русский учёный и инженер Михаил Осипович Доливо-Добровольский изобрёл трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.



- Современные трёхфазные асинхронные двигатели являются преобразователями электрической энергии в механическую. Благодаря своей простоте, низкой стоимости и высокой надёжности асинхронные двигатели получили широкое применение. Они присутствуют повсюду, это самый распространённый тип двигателей, их выпускается 90% от общего числа двигателей в мире. Асинхронный электродвигатель поистине совершил технический переворот во всей мировой промышленности.
- Огромная популярность асинхронных двигателей связана с простотой их эксплуатации, дешёвизной и надёжностью.

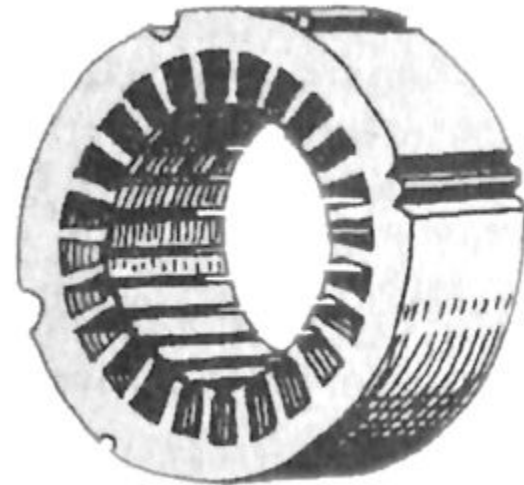
- **Асинхронный двигатель** - это асинхронная машина, предназначенная для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию. Само слово “асинхронный” означает не одновременный. При этом имеется в виду, что у асинхронных двигателей частота вращения магнитного поля статора всегда больше частоты вращения ротора. Работают асинхронные двигатели, как понятно из определения, от сети переменного тока.

# Устройство

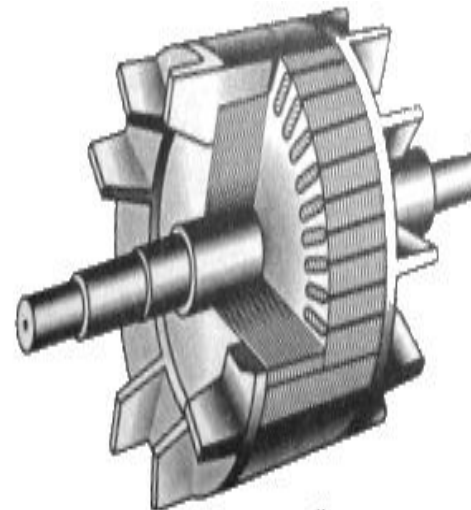


- На рисунке: 1 - вал, 2,6 - подшипники, 3,8 - подшипниковые щиты, 4 - лапы, 5 - кожух вентилятора, 7 - крыльчатка вентилятора, 9 - короткозамкнутый ротор, 10 - статор, 11 - коробка выводов.
- Основными частями асинхронного двигателя являются статор (10) и ротор (9).

- Статор имеет цилиндрическую форму, и собирается из листов стали. В пазах сердечника статора уложены обмотки статора, которые выполнены из обмоточного провода. Оси обмоток сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . В зависимости от подаваемого напряжения концы обмоток соединяются треугольником или звездой.



- Роторы асинхронного двигателя бывают двух видов: короткозамкнутый и фазный ротор.
- Короткозамкнутый ротор представляет собой сердечник, набранный из листов стали. В пазы этого сердечника заливается расплавленный алюминий, в результате чего образуются стержни, которые замыкаются накоротко торцевыми кольцами. Эта конструкция называется "беличьей клеткой". В двигателях большой мощности вместо алюминия может применяться медь. Беличья клетка представляет собой короткозамкнутую обмотку ротора, откуда собственно название.

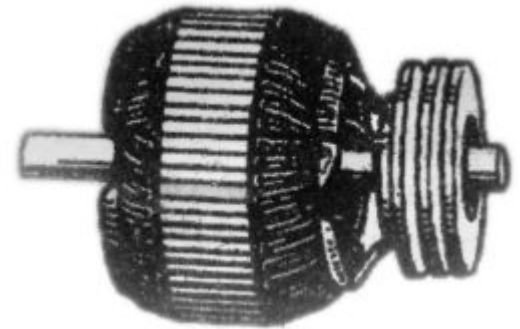


*короткозамкнутый ротор*



*беличья клетка*

- Фазный ротор имеет трёхфазную обмотку, которая практически не отличается от обмотки статора. В большинстве случаев концы обмоток фазного ротора соединяются в звезду, а свободные концы подводятся к контактными кольцам. С помощью щёток, которые подключены к кольцам, в цепь обмотки ротора можно вводить добавочный резистор. Это нужно для того, чтобы можно было изменять активное сопротивление в цепи ротора, потому что это способствует уменьшению больших пусковых токов. Подробнее о фазном роторе можно прочитать в статье - асинхронный двигатель с фазным ротором.



# Принцип работы

- При подаче к обмотке статора напряжения, в каждой фазе создаётся магнитный поток, который изменяется с частотой подаваемого напряжения. Эти магнитные потоки сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ , как во времени, так и в пространстве. Результирующий магнитный поток оказывается при этом вращающимся.
- Результирующий магнитный поток статора вращается и тем самым создаёт в проводниках ротора ЭДС. Так как обмотка ротора, имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который в свою очередь взаимодействуя с магнитным потоком статора, создаёт пусковой момент двигателя, стремящийся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Когда он достигает значения, тормозного момента ротора, а затем превышает его, ротор начинает вращаться. При этом возникает так называемое скольжение.



- Скольжение  $s$  - это величина, которая показывает, насколько синхронная частота  $n_1$  магнитного поля статора больше, чем частота вращения ротора  $n_2$ , в процентном соотношении.

$$s = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \cdot 100 \%$$

- Скольжение это крайне важная величина. В начальный момент времени она равна единице, но по мере возрастания частоты вращения  $n_2$  ротора относительная разность частот  $n_1 - n_2$  становится меньше, вследствие чего уменьшаются ЭДС и ток в проводниках ротора, что влечёт за собой уменьшение вращающего момента. В режиме холостого хода, когда двигатель работает без нагрузки на валу, скольжение минимально, но с увеличением статического момента, оно возрастает до величины  $s_{кр}$  - критического скольжения. Если двигатель превысит это значение, то может произойти так называемое опрокидывание двигателя, и привести в последствии к его нестабильной работе. Значения скольжения лежит в диапазоне от 0 до 1, для асинхронных двигателей общего назначения оно составляет в номинальном режиме - 1 - 8 %.

- Как только наступит равновесие между электромагнитным моментом, вызывающим вращение ротора и тормозным моментом создаваемым нагрузкой на валу двигателя процессы изменения величин прекратятся.
- Выходит, что принцип работы асинхронного двигателя заключается во взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и токов, которые наводятся этим магнитным полем в роторе. Причём вращающий момент может возникнуть только в том случае, если существует разность частот вращения магнитных полей.

- Спасибо за внимание!