

## **4. Трехфазные цепи**

Трехфазная цепь является совокупностью трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе на  **$120^\circ$** , создаваемые общим источником.

Участок трехфазной системы, по которому протекает одинаковый ток, называется фазой

## *Основные преимущества трехфазной системы:*

- возможность простого получения кругового вращающегося магнитного поля (это позволило создать электродвигатели переменного тока);
- экономичность и эффективность (мощность можно передать по трем фазным проводам без применения четвертого общего провода - нейтрали);
- возможность использования двух различных эксплуатационных напряжений в одной установке (фазного и линейного, которые обычно составляют 220 В и 380 В, соответственно).

История появления трехфазных электрических цепей связана с именем М.С. Доливо-Добровольского Петербургского ученого, который в 1886 г., доказав, что многофазные токи способны создавать вращающееся магнитное поле, предложил (запатентовал) конструкцию трехфазного электродвигателя

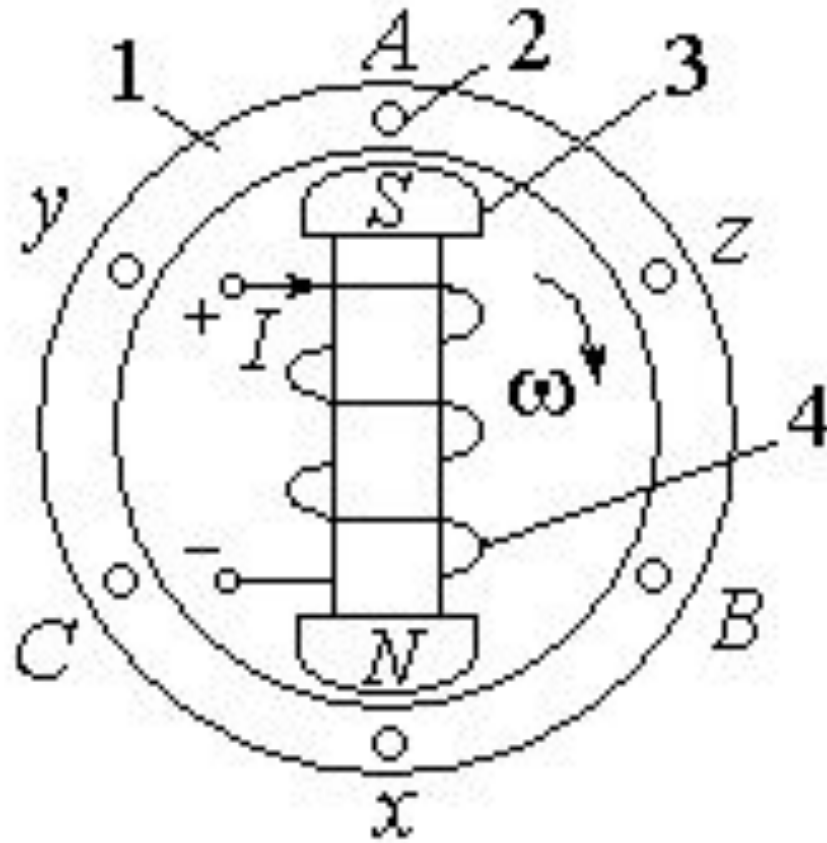
Трехфазный ток является простейшей системой многофазных токов, способных создавать вращающееся магнитное поле. Этот принцип положен в основу работы трехфазных электродвигателей.

Трехфазная цепь состоит из трехфазного генератора, трехфазной линии электропередач и трехфазных приемников.

В результате предложенной трехфазной системы электрического тока стало возможным эффективно преобразовывать электрический ток в механическую энергию

## ***Получение трехфазного тока***

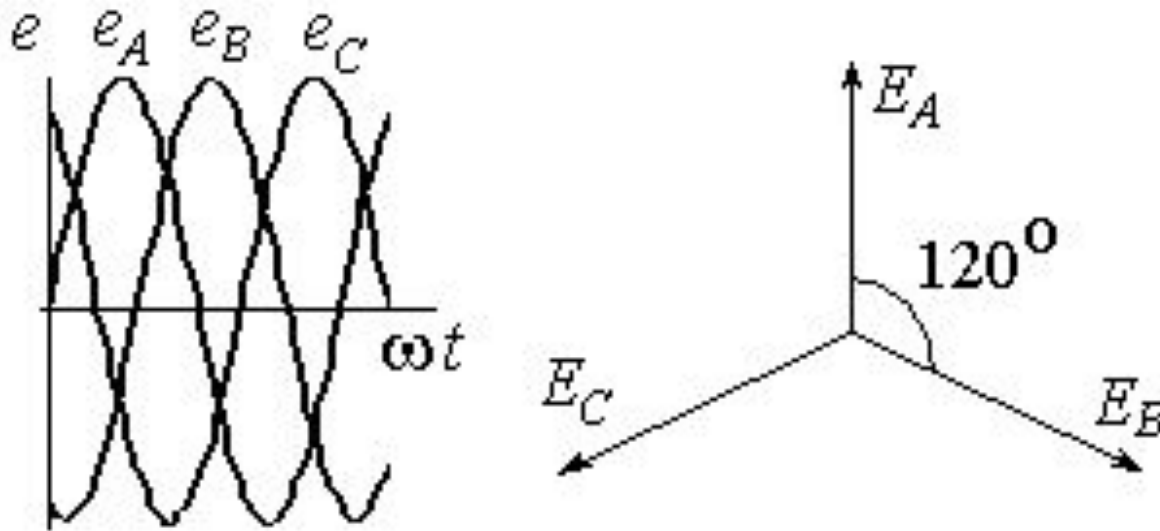
Электрическую энергию трехфазного тока получают в синхронных трехфазных генераторах. Три обмотки 2 статора 1 смещены между собой в пространстве на угол  $120^\circ$ . Их начала обозначены буквами *A, B, C*, а концы – *x, y, z*. Ротор 3 выполнен в виде постоянного электромагнита, магнитное поле которого возбуждает постоянный ток *I*, протекающий по обмотке возбуждения 4. Ротор принудительно приводится во вращение от постороннего двигателя. При вращении магнитное поле ротора последовательно пересекает обмотки статора и индуцирует в них ЭДС, сдвинутые (но уже во времени) между собой на угол  $120^\circ$ .



$$e_A = E_{mA} \sin \omega t$$

$$e_B = E_{mB} \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_{mC} \sin(\omega t + 120^\circ) = E_{mC} \sin(\omega t - 240^\circ)$$



На диаграмме изображена прямая последовательность чередования фаз (пересечение ротором обмоток в порядке  $A, B, C$ ). При смене направления вращения чередование фаз меняется на обратное -  $A, C, B$ . От этого зависит направление вращения трехфазных электродвигателей.



Сумма электродвижущих сил симметричной трехфазной системы в любой момент времени равна нулю.

$$\begin{aligned}\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C &= E \left( 1 + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ} \right) = \\ &= E \left( 1 + \cos 120^\circ - j \cdot \sin 120^\circ + \cos 120^\circ + j \cdot \sin 120^\circ \right) = E \left( 1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) = 0.\end{aligned}$$

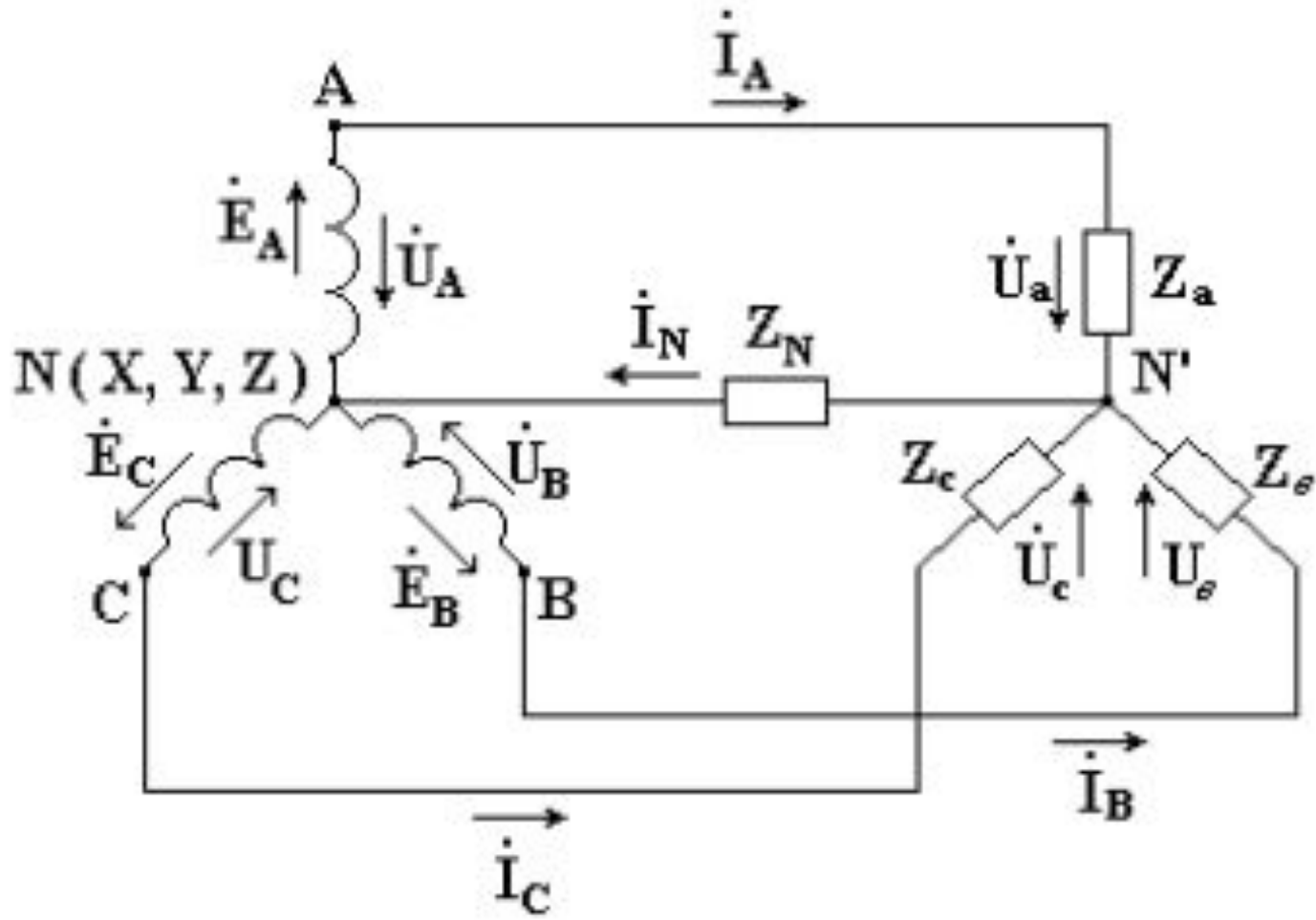
На схемах трехфазных цепей начала фаз обозначают первыми буквами латинского алфавита ( **A, B, C** ), а концы - последними буквами ( **X, Y, Z** ). Направления ЭДС указывают от конца фазы обмотки генератора к ее началу.

Каждая фаза нагрузки соединяется с фазой генератора двумя проводами: прямым и обратным. Получается несвязанная трехфазная система, в которой имеется шесть соединительных проводов.

Чтобы уменьшить количество соединительных проводов, используют трехфазные цепи, соединенные звездой или треугольником

**Соединение в звезду.** Если концы всех фаз генератора соединить в общий узел, а начала фаз соединить с нагрузкой, образующей трехлучевую звезду сопротивлений, получится трехфазная цепь, соединенная звездой. При этом три обратных провода сливаются в один, называемый нулевым или нейтральным. Трехфазная цепь, соединенная звездой, изображена на рис. 4.1.

Трехфазная цепь, соединенная звездой, изображена на рисунке



Провода, идущие от источника к нагрузке, называют линейными проводами, провод, соединяющий нейтральные точки источника  $N$  и приемника  $N'$ , называют нейтральным (нулевым) проводом.

Токи в фазах приемника или источника называют фазными токами, токи в линейных проводах - линейными токами.

Так как линейные провода соединены последовательно с фазами источника и приемника, линейные токи при соединении звездой являются одновременно фазными токами.

В симметричных системах (когда сопротивления нагрузок одинаковы), центральный провод может отсутствовать и линия для передачи системы трехфазного тока может состоять только из трех проводов.

В распределительных низковольтных сетях, в которых присутствует много однофазных потребителей, обеспечение равномерной нагрузки каждой фазы становится невозможным, такие сети делаются четырехпроводными

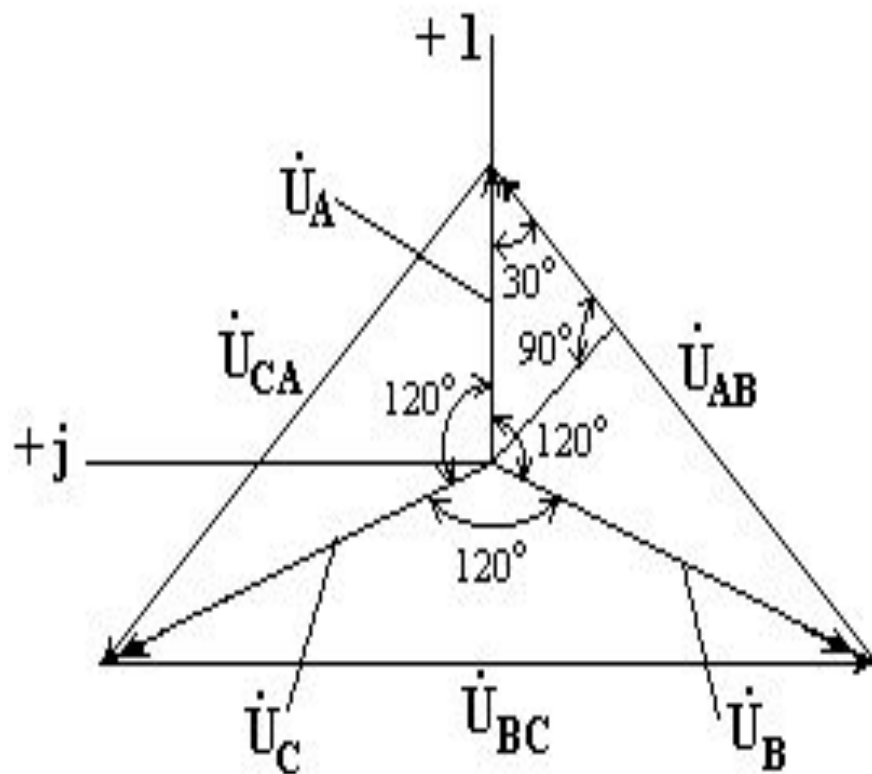
Напряжения между началами фаз или между линейными проводами называют линейными напряжениями.

Напряжения между началом и концом фазы или между линейным и нейтральным проводами называются фазными напряжениями.

Линейные напряжения равны геометрическим разностям соответствующих фазных напряжений

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

На рисунке изображена векторная диаграмма фазных и линейных напряжений симметричного источника





Из векторной диаграммы видно,  
что

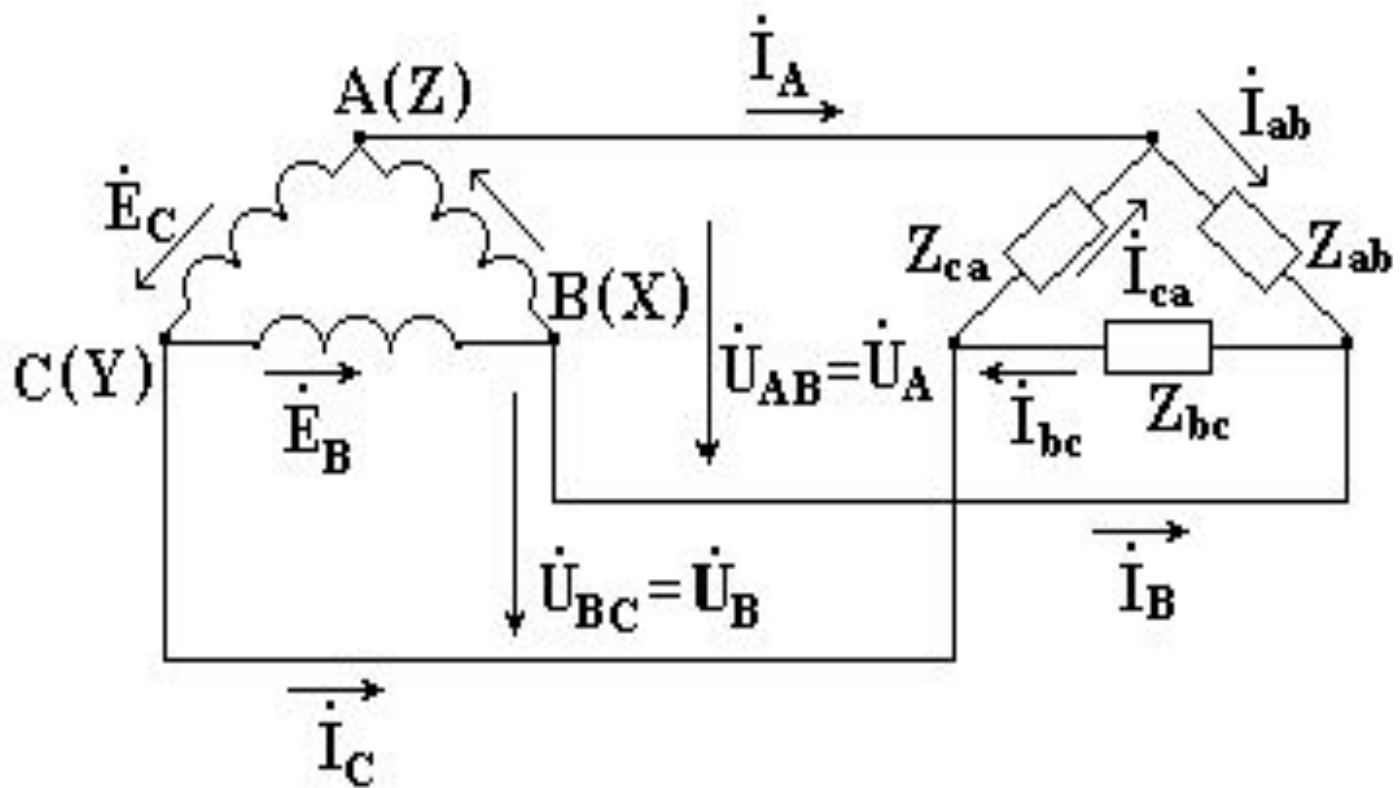
$$U_{л} = U_{AB} = 2U_{\phi} \cdot \cos 30^{\circ} = 2U_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}$$

При симметричной системе ЭДС источника  
линейное напряжение больше фазного в  $\sqrt{3}$  раз

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi}$$

**Соединение в треугольник.** Если конец каждой фазы обмотки генератора соединить с началом следующей фазы, образуется соединение в треугольник. К точкам соединений обмоток подключают три линейных провода, ведущие к нагрузке.

На рисунке изображена трехфазная цепь, соединенная треугольником



В трехфазной цепи, соединенной треугольником, фазные и линейные напряжения одинаковы

$$U_l = U_\phi$$

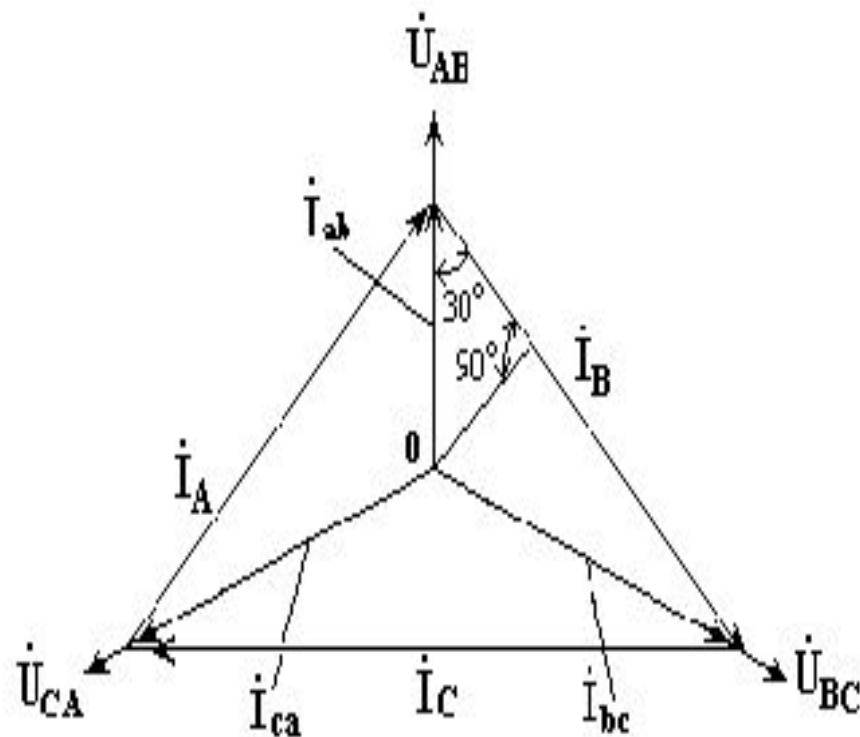
$I_A, I_B, I_C$  - линейные токи

$I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  - фазные токи

Линейные и фазные токи нагрузки связаны между собой первым законом Кирхгофа для узлов а, b, с  
Линейный ток равен геометрической разности соответствующих фазных токов

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$

На рисунке изображена векторная диаграмма трехфазной цепи, соединенной треугольником при симметричной нагрузке. Векторы фазных токов совпадают по направлению с векторами соответствующих фазных напряжений, так как нагрузка состоит из активных сопротивлений.



Из векторной диаграммы видно,  
что

$$I_{\text{л}} = 2I_{\phi} \cdot \cos 30^{\circ} = 2I_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$$

$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi}$   
при симметричной  
нагрузке.

Трехфазные цепи, соединенные звездой, получили большее распространение, чем трехфазные цепи, соединенные треугольником.

Это объясняется тем, что, во-первых, в цепи, соединенной звездой, можно получить два напряжения: линейное и фазное.

Во-вторых, если фазы обмотки электрической машины, соединенной треугольником, находятся в неодинаковых условиях, в обмотке появляются дополнительные токи, нагружающие ее. Такие токи отсутствуют в фазах электрической машины, соединенных по схеме "звезда".

Поэтому на практике избегают соединять обмотки трехфазных электрических машин в треугольник.

**Мощность в трехфазных цепях.** Трехфазная цепь является обычной цепью синусоидального тока с несколькими источниками.

Активная мощность трехфазной цепи равна сумме активных мощностей фаз

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi_A + U_B \cdot I_B \cdot \cos \varphi_B + U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi_C$$

При симметричной  
нагрузке

$$P = 3P_{\Phi} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi$$



При соединении в треугольник симметричной нагрузки

$$U_{\Phi} = U_{\text{л}}, \quad I_{\Phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$$

При соединении в

$$U_{\Phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \quad I_{\Phi} = I_{\text{л}}$$

В обоих

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi$$

## **5. Магнитные цепи при постоянных магнитных потоках**

Вокруг проводника с током появляется магнитное поле. Интенсивность магнитного поля характеризуется векторной величиной: напряженностью магнитного поля  $H$ , измеряемой в амперах на метр (А/м).

Интенсивность магнитного поля характеризуется также вектором магнитной индукции  $B$ , измеряемой в теслах (Тл).

Напряженность магнитного поля не зависит, а магнитная индукция зависит от свойств окружающей среды.

$$\vec{B} = \mu_a \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H}$$

$\mu_0$  - абсолютная магнитная проницаемость,  
Гн/м;

$\mu$  - относительное значение магнитной  
проницаемости, безразмерная величина;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

В зависимости от величины относительной магнитной проницаемости, все вещества делятся на три группы.

К первой группе относятся диамагнетики: вещества, у которых  $\mu < 1$ .

Ко второй группе относятся парамагнетики, вещества с  $\mu > 1$ .

К третьей группе относятся ферромагнетики, вещества с  $\mu \gg 1$ .

К ферромагнетикам принадлежат железо, никель, кобальт и многие сплавы из ферромагнитных веществ.

Магнитной цепью называется совокупность устройств, содержащих ферромагнитные вещества.

Процессы в магнитных цепях описываются с помощью понятий магнитодвижущей силы, магнитного потока. Магнитным потоком называется поток вектора магнитной индукции через поверхность  $S$

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Магнитный поток измеряется в веберах (Вб).

Источником магнитодвижущей силы МДС является либо постоянный магнит, либо электромагнит (катушка, обтекаемая током).

Магнитодвижущая сила электромагнита

$$F = I \cdot W,$$

$I$  - ток, протекающий в катушке;

$W$  - число витков катушки.

В магнитных цепях используется свойство ферромагнитного материала многократно усиливать магнитное поле катушки с током за счет собственной намагниченности.

## **Свойства ферромагнитных материалов.**

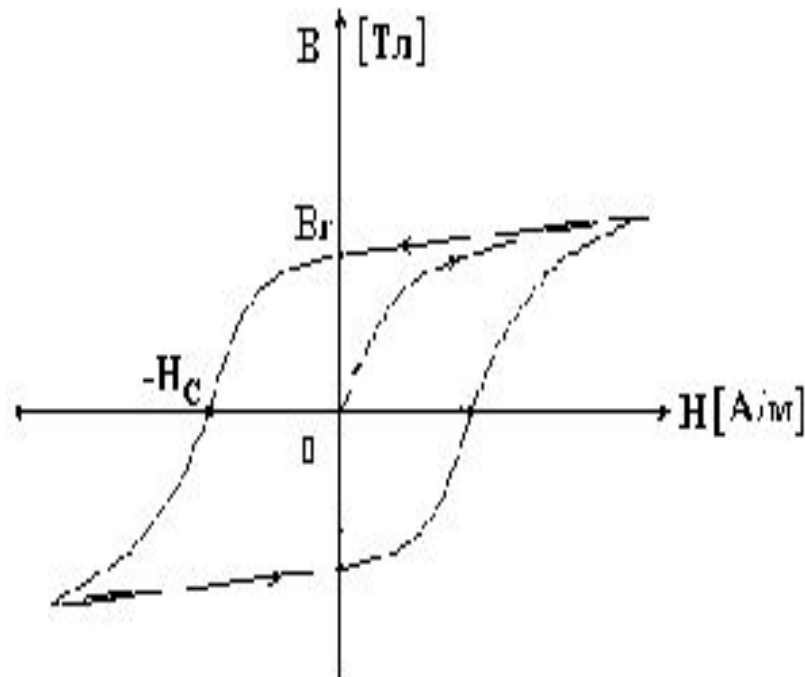
Поместим ферромагнитный материал внутри катушки с током. С увеличением напряженности намагничивающего поля, магнитная индукция сначала быстро возрастает.

Затем, из-за насыщения материала, при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля магнитная индукция почти не меняется.

При уменьшении напряженности намагничивающего поля кривая размагничивания не совпадает с кривой намагничивания из-за явления гистерезиса.



Явление гистерезиса заключается в том, что изменение магнитной индукции запаздывает от изменения намагничивающего поля. Кривая зависимости  $B(H)$ , получающаяся при циклическом перемагничивании ферромагнитного материала, называется петлей гистерезиса.



Значение магнитной индукции при напряженности намагничивающего поля, равном нулю, называется остаточной магнитной индукцией  $B_r$ , или остаточной намагниченностью.

Напряженность магнитного поля  $H_c$  при  $B = 0$  называется коэрцитивной силой.

Ферромагнитные материалы с большим значением коэрцитивной силы называются магнитотвердыми. Из этих материалов изготавливают постоянные магниты

$$H_c > 4000 \frac{A}{M}$$

Ферромагнитные материалы с малым значением коэрцитивной силы называются магнитомягкими.

Эти материалы используют в магнитопроводах электрических машин и трансформаторов

$$H_c < 200 \frac{A}{м}$$

## **6. Электрические измерения и приборы**

Электроизмерительные приборы служат для контроля режима работы электрических установок, их испытания и учета расходуемой электрической энергии.

Различают две категории электроизмерительных приборов: рабочие — для контроля режима работы электрических установок в производственных условиях и образцовые — для градуировки и периодической проверки рабочих приборов.

## **Типы приборов.**

В зависимости от способа отсчета электроизмерительные приборы разделяют на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения.

По конструкции отсчетного устройства показывающие приборы делятся на приборы с механическим указателем (стрелочные), со световым указателем (зеркальные), с пишущим устройством (самопишущие) и электронные приборы со стрелочным или цифровым указателем отсчета.

В электроизмерительных приборах сравнения измерения осуществляются путем сравнения измеряемой величины с какой-либо образцовой мерой или эталоном. К ним относятся различные мосты для измерения сопротивлений и компенсационные измерительные устройства (потенциометры).

Действие электроизмерительных приборов непосредственной оценки основано на различных проявлениях электрического тока (магнитном, тепловом, электродинамическом и пр.)

В зависимости от принципа действия, положенного в основу устройства измерительного механизма, электроизмерительные приборы относятся к различным системам: магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, тепловой, индукционной и др.



## Точность приборов.

Каждый электроизмерительный прибор имеет некоторую погрешность.

Для оценки точности измерений используют понятие *относительная погрешность*  $\Delta x\%$ .

Она представляет собой отношение абсолютной погрешности  $\Delta x$  к действительному значению измеряемой величины в процентах:

$$\Delta x\% = (x_{\text{из}} - x_{\text{д}}) / x_{\text{д}} * 100\%$$

Эта погрешность различна при разных значениях измеряемой величины, т. е. для различных делений шкалы прибора. Поэтому точность электроизмерительных приборов оценивают по *основной приведенной погрешности*  $\Delta$ , которая равна отношению наибольшей абсолютной погрешности  $\Delta x_{\max}$  для данного прибора к наибольшему (номинальному) значению  $x_{\text{НОМ}}$  той величины (тока, напряжения, мощности и пр.), которую может измерять прибор:

$$\Delta\% = \Delta x_{\max} / x_{\text{НОМ}} * 100\%$$

По степени точности электроизмерительные приборы непосредственной оценки подразделяются на восемь классов:

0,05    0,1    0,2    0,5    1,0    1,5    2,5    4,0

К первым трем классам относят точные лабораторные приборы.

Приборы классов 0,5; 1,0 и 1,5 используют для различных технических измерений. Они обычно переносные, подключаемые к электрическим установкам только во время измерений.

Приборы классов 2,5 и 4,0 устанавливают постоянно на щитах и панелях управления электрическими установками.

**Обозначения на шкале.** На шкале каждого прибора проставляют соответствующие условные обозначения, характеризующие назначение прибора (амперметр, вольтметр и т. д.), его класс точности, род тока, при котором он может применяться, систему прибора, нормальное его положение при измерениях, испытательное напряжение, при котором проверялась изоляция прибора, и пр.

## **7. Электрические измерения неэлектрических величин**

Измерение различных неэлектрических величин (перемещений, усилий, температур и т. п.) электрическими методами выполняют с помощью устройств и приборов, преобразующих неэлектрические величины в зависимые от них электрические, которые измеряют электроизмерительными приборами со шкалами, градуированными в единицах измеряемых неэлектрических величин.

Преобразователи неэлектрических величин в электрические, или датчики, разделяют на параметрические, основанные на изменении какого-либо электрического или магнитного параметра (сопротивления, индуктивности, емкости, магнитной проницаемости и т. п.) под действием измеряемой величины, и генераторные, в которых измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в зависимую от нее э. д. с. (индукционные, термоэлектрические, фотоэлектрические, пьезоэлектрические и другие).

Электрические методы измерения различных неэлектрических величин широко применяют в практике, поскольку они обеспечивают высокую точность измерений, отличаются широким диапазоном измеряемых величин, позволяют выполнять измерения и регистрацию их на значительном расстоянии от места расположения контролируемого объекта, а также дают возможность проводить измерения в труднодоступных местах.