




Электротехника и электроника




1. Основные определения




Электротехника - это область науки и техники, изучающая электрические и магнитные явления и их использование в практических целях.

Электрическая цепь - это совокупность устройств, предназначенных для производства, передачи, преобразования и использования электрического тока.




Электрический ток, направление и величина которого неизменны, называют постоянным током и обозначают прописной буквой *I*.



Различают активные и пассивные цепи, участки и элементы цепей.

Активными называют электрические цепи, содержащие источники энергии.

Пассивными - электрические цепи, не содержащие источников энергии.



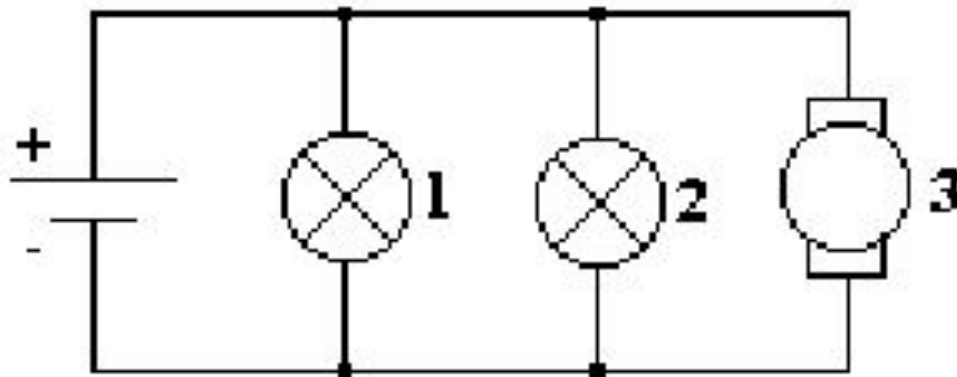
Электрическую цепь называют линейной, если ни один параметр цепи не зависит от величины или направления тока, или напряжения.

Электрическая цепь является нелинейной, если она содержит хотя бы один нелинейный элемент.

Параметры нелинейных элементов зависят от величины или направления тока, или напряжения.

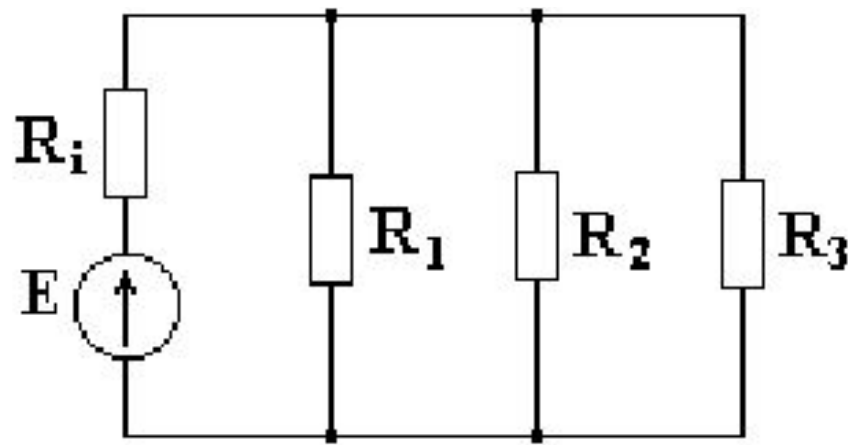
Электрическая схема - это графическое изображение электрической цепи, включающее в себя условные обозначения устройств и показывающее соединение этих устройств.


На рис. 1 изображена электрическая схема цепи, состоящей из источника энергии, электроламп 1 и 2, электродвигателя 3.



Для облегчения анализа электрическую цепь заменяют схемой замещения.

Схема замещения - это графическое изображение электрической цепи с помощью идеальных элементов, параметрами которых являются параметры замещаемых элементов.





Простейшими пассивными элементами схемы замещения являются сопротивление, индуктивность и емкость.

Сопротивление проводника определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где l - длина проводника;

S - сечение;

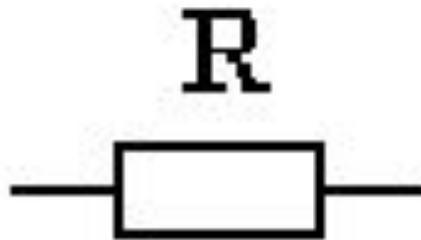
ρ - удельное сопротивление



Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью.

$$g = \frac{1}{R} .$$

Сопротивление измеряется в омах (Ом),
проводимость - в сименсах (См).

Сопротивление в схеме замещения изображается следующим образом:





Индуктивностью называется идеальный элемент схемы замещения, характеризующий способность цепи накапливать магнитное поле.

Индуктивность катушки измеряется в генри [Гн] и определяется по формуле


$$L = \frac{W \cdot \Phi}{i},$$

где W - число витков катушки;

Φ - магнитный поток катушки, возбуждаемый током i .

На рисунке показано изображение индуктивности в схеме замещения





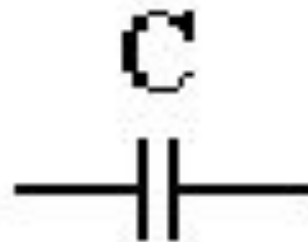
Емкостью называется идеальный элемент схемы замещения, характеризующий способность участка электрической цепи накапливать электрическое поле.

Емкость конденсатора измеряется в фарадах (Ф) и определяется по формуле:

$$C = \frac{q}{U_c},$$

где q - заряд на обкладках конденсатора;
 U_c - напряжение на конденсаторе

На рисунке показано изображение емкости в схеме замещения



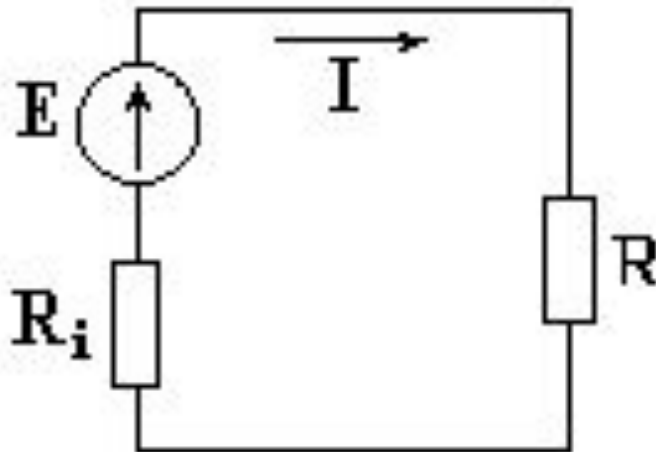


Любой источник энергии можно представить в виде источника ЭДС или источника тока.

Источник ЭДС - это источник, характеризующийся электродвижущей силой и внутренним сопротивлением.

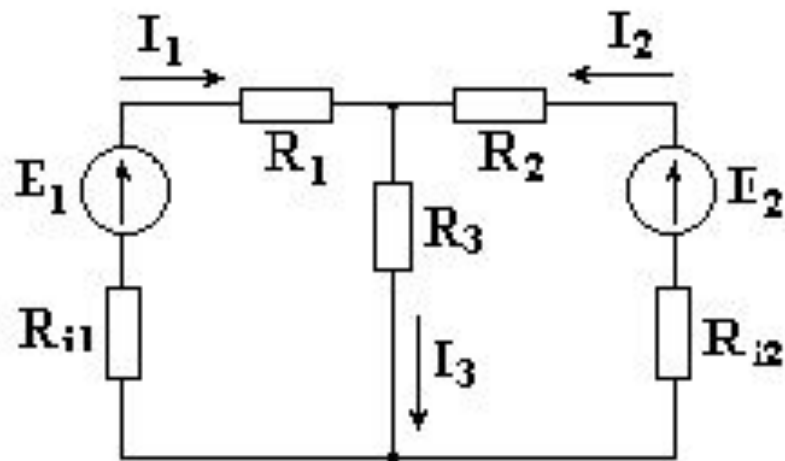
Источником тока называется источник энергии, характеризующийся величиной тока и внутренней проводимостью.


Различают разветвленные и неразветвленные схемы.
На рис. 2 изображена неразветвленная схема.



Разветвленная схема - это сложная комбинация соединений пассивных и активных элементов.

На рис. 3 показана разветвленная схема, содержащая два источника ЭДС и 5 сопротивлений. Сопротивления соединительных проводов принимают равными нулю.






Участок электрической цепи, по которому проходит один и тот же ток, называется ветвью.

Место соединения двух и более ветвей электрической цепи называется узлом.

Узел, в котором сходятся две ветви, называется устранимым.

Узел является неустрашимым, если в нем соединены три и большее число ветвей.


Узел в схеме обозначается точкой.



Последовательным называют такое соединение участков цепи, при котором через все участки проходит одинаковый ток.

При параллельном соединении все участки цепи присоединяются к одной паре узлов, находятся под одним и тем же напряжением.

Любой замкнутый путь, включающий в себя несколько ветвей, называется контуром.

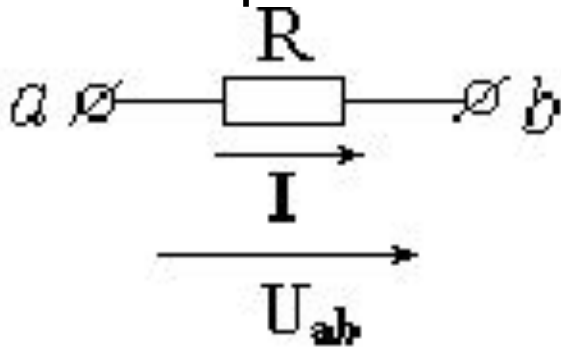


В зависимости от нагрузки различают следующие режимы работы:
номинальный,
режим холостого хода,
режим короткого замыкания,
согласованный режим.

2. Основные законы электрических цепей

Закон Ома.

На рис. 4 изображен участок цепи с сопротивлением R . Ток, протекающий через сопротивление R , пропорционален падению напряжения на сопротивлении и обратно пропорционален величине этого сопротивления.



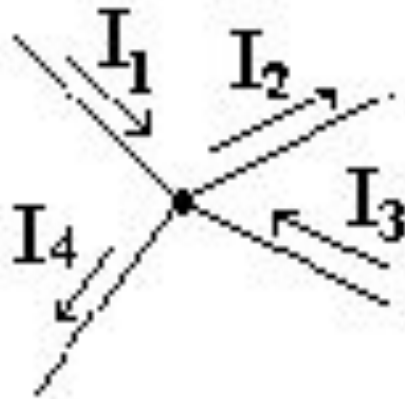
$$I = \frac{U_{ab}}{R}.$$

Падением напряжения на сопротивлении называется произведение тока, протекающего через сопротивление, на величину этого сопротивления.

Первый закон Кирхгофа.

В соответствии с первым законом Кирхгофа, алгебраическая сумма токов в любом узле цепи равна нулю:

$$\sum I = 0.$$



Возьмем схему и запишем для нее уравнение по первому закону Кирхгофа.

Токам, направленным к узлу, присвоим знак "минус", а токам, направленным от узла - знак "плюс".

Получим следующее уравнение:

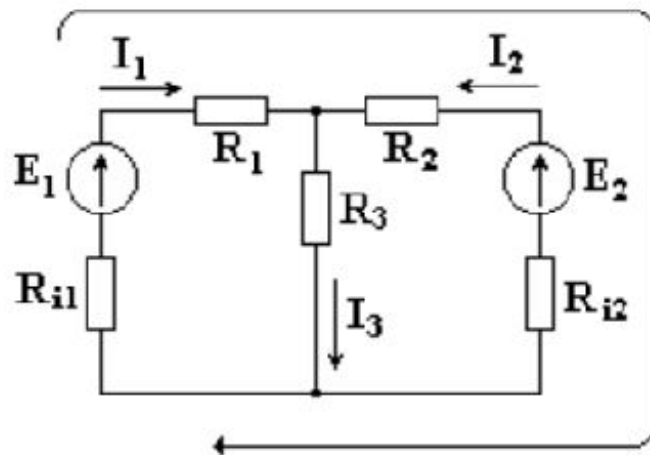
$$-I_1 + I_2 - I_3 + I_4 = 0$$

Второй закон Кирхгофа.

Алгебраическая сумма ЭДС вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре:

$$\sum E = \sum U$$

Возьмем схему и запишем для внешнего контура этой схемы уравнение по второму закону Кирхгофа.




Для этого выберем произвольно направление обхода контура, например, по часовой стрелке. ЭДС и падения напряжений записываются в левую и правую части уравнения со знаком "плюс", если направления их совпадают с направлением обхода контура, и со знаком "минус", если не совпадают.

При определении тока в ветви, содержащей источник ЭДС, используют закон Ома для активной ветви.



3. Линейные цепи синусоидального тока.




Переменным называется электрический ток, величина и направление которого изменяются во времени.

Значение переменного тока в рассматриваемый момент времени называют мгновенным значением и обозначают строчной буквой i .

Мгновенный ток называется периодическим, если значения его повторяются через одинаковые промежутки времени

$$i(t) = i(t + T)$$



Наименьший промежуток времени, через который значения переменного тока повторяются, называется периодом.

Период T измеряется в секундах. Периодические токи, изменяющиеся по синусоидальному закону, называются *синусоидальными*.

Мгновенное значение синусоидального тока определяется по формуле

$$i(t) = I_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_i\right) = I_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi_i) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i)$$

I_m - максимальное, или *амплитудное*, значение тока

Аргумент синусоидальной функции называют фазой

$$\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_i$$

Величину φ , равную фазе в момент времени $t = 0$, называют начальной фазой. Фаза измеряется в радианах или градусах.

Величину, обратную периоду, называют частотой. Частота f измеряется в герцах.

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Гц)}.$$

Круговая, или угловая частота измеряется в рад/с и находится по формуле

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$$

Если у синусоидальных токов начальные фазы при одинаковых частотах одинаковы, говорят, что эти токи совпадают по фазе. Если неодинаковы по фазе, говорят, что токи сдвинуты по фазе.

Сдвиг фаз двух синусоидальных токов измеряется разностью начальных фаз

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

Действующим значением переменного тока называется среднеквадратичное значение тока за период.

Действующие значения тока, напряжения и ЭДС определяются по формулам

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Действующие значения переменного тока, напряжения, ЭДС меньше максимальных в $\sqrt{2}$ раз.

Законы Ома и Кирхгофа справедливы для мгновенных значений токов и напряжений.


Закон Ома для мгновенных значений:

$$i = \frac{u}{R}$$

Законы Кирхгофа для мгновенных значений:

$$\sum i = 0$$

$$\sum e = \sum u$$



Векторная диаграмма - это совокупность векторов, изображающих синусоидальные напряжения, токи и ЭДС одинаковой частоты.



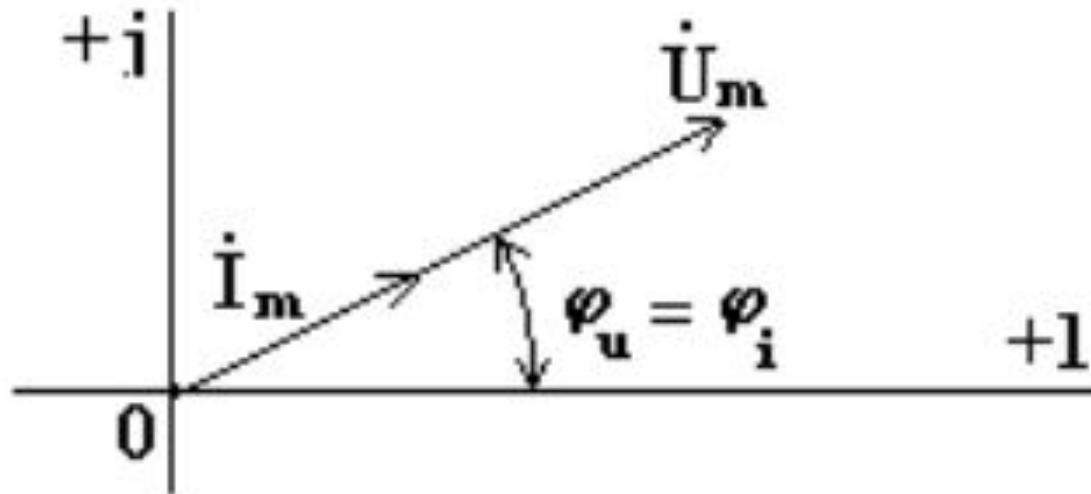
Положительным считается направление вращения векторов против часовой стрелки.

Векторные диаграммы используются для качественного анализа электрических цепей, а также при решении некоторых электротехнических задач.

Сопротивление в цепи синусоидального тока

Сопротивление участка цепи постоянному току называется омическим, а сопротивление того же участка переменному току - активным сопротивлением.

Напряжение на сопротивлении и ток, протекающий через него, совпадают по фазе.



Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

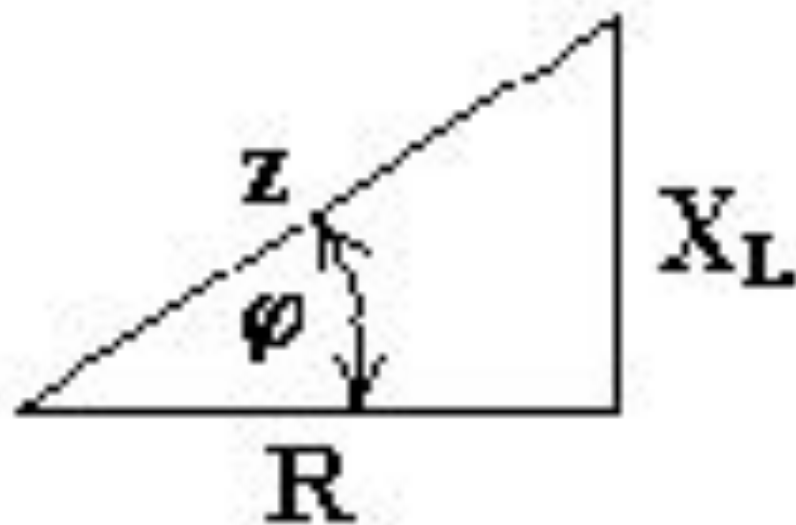
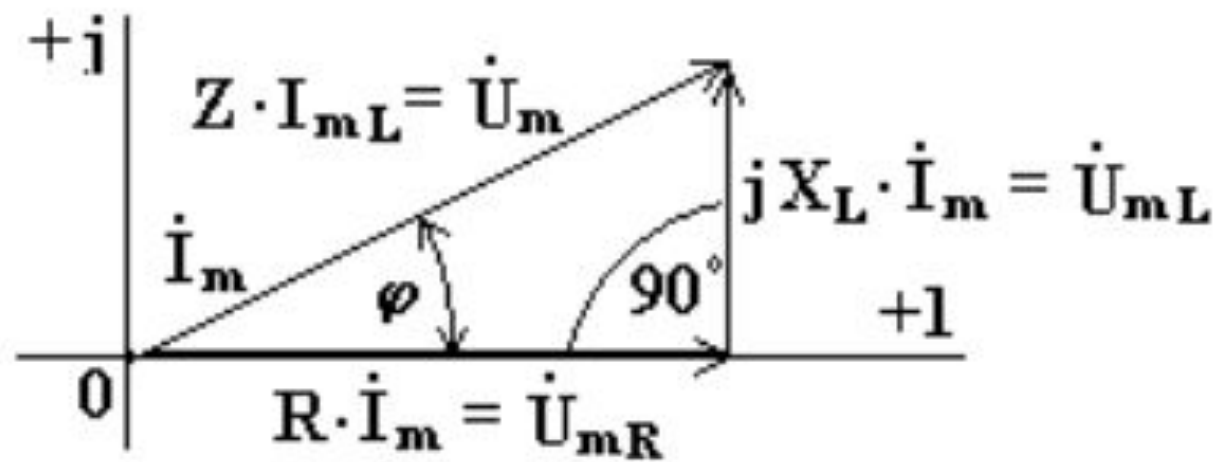
Ток в индуктивности отстает по фазе от напряжения на 90 градусов из-за явления самоиндукции

Полное сопротивление катушки индуктивности

$$Z_L = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$X_L = \omega \cdot L$$

индуктивное сопротивление - величина, характеризующая реакцию электрической цепи на переменное магнитное поле.



Из треугольника сопротивлений получим несколько формул:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi$$

$$X_L = Z \cdot \sin \varphi$$

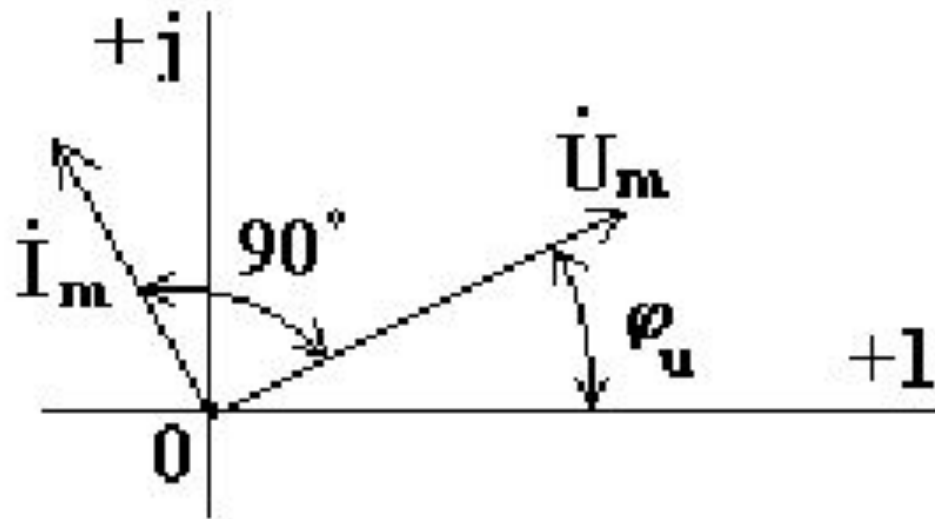
Емкость в цепи синусоидального тока

Ток опережает напряжение по фазе на 90 градусов

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

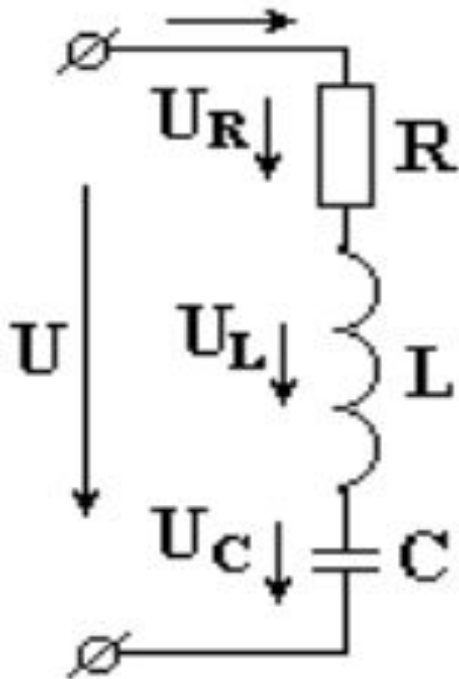
Емкостное сопротивление - расчетная величина, имеющая размерность сопротивления

Векторная диаграмма цепи с емкостью



Последовательно соединенные катушка индуктивности и конденсатор в цепи синусоидального тока

В схеме протекает синусоидальный ток



$$i = I_m \cdot \sin \omega t$$

Определим напряжение на входе схемы.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$u = u_R + u_L + u_C$$

$$u_R = i \cdot R, \quad u_L = L \cdot \frac{di}{dt}, \quad u_C = \frac{1}{c} \int i \cdot dt.$$

Подставим эти формулы в уравнение. Получим:

$$u_R = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{c} \int i \cdot dt = R \cdot I_m \cdot \sin \omega t + \\ + L \cdot \omega \cdot I_m \cdot \cos \omega t - \frac{1}{\omega c} \cdot I_m \cdot \cos \omega t = R \cdot I_m \cdot \sin \omega t + \\ + X_L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) + X_C \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Видно, что напряжение в активном сопротивлении совпадает по фазе с током, напряжение на индуктивности опережает по фазе ток на 90 градусов, напряжение по емкости отстает по фазе от тока на 90 градусов.

$$Z = R + j(X_L - X_c)$$

комплексное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}$$

модуль комплексного сопротивления, или полное сопротивление цепи

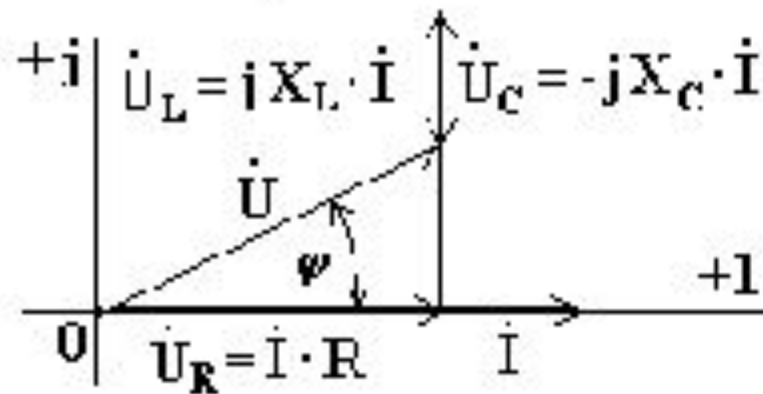
$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_L - X_c}{R}$$

начальная фаза комплексного сопротивления

При построении векторных диаграмм цепи рассмотрим три случая.

1. $X_L > X_C$, цепь носит индуктивный характер. Векторы напряжений на индуктивности и емкости направлены в противоположные стороны, частично компенсируют друг друга. Вектор напряжения на входе схемы опережает вектор тока

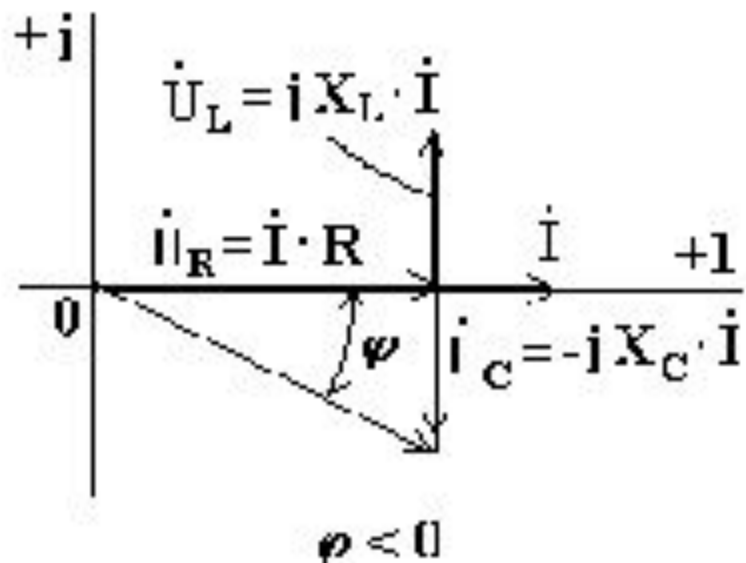
1. $X_L > X_C$



$$\varphi > 0$$

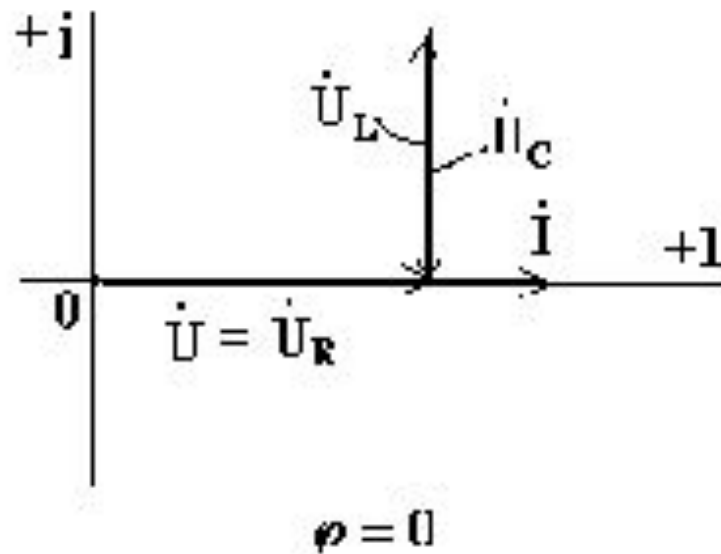
2. Индуктивное сопротивление меньше емкостного.
Вектор напряжения на входе схемы отстает от вектора тока. Цепь носит емкостный характер

$$2. X_L < X_C$$



3. Индуктивное и емкостное сопротивления одинаковы. Напряжения на индуктивности и емкости полностью компенсируют друг друга. Ток в цепи совпадает по фазе с входным напряжением. В электрической цепи наступает режим резонансного напряжения

$$3. X_L = X_C$$



Ток в резонансном режиме достигает максимума, так как полное сопротивление (z) цепи имеет минимальное значение.


$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}} = \frac{U}{R}$$

Условие возникновения резонанса:

$$\omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C}$$

отсюда резонансная частота равна

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$



Из формулы следует, что режима резонанса можно добиться следующими способами:

1. изменением частоты;
2. изменением индуктивности;
3. изменением емкости.

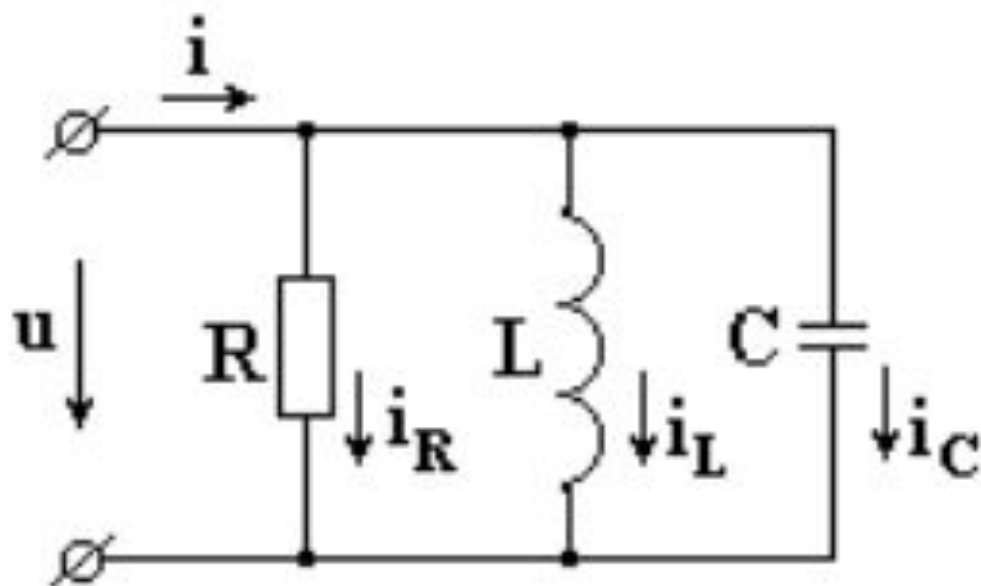
В резонансном режиме входное напряжение равно падению напряжения в активном сопротивлении. На индуктивности и емкости схемы могут возникнуть напряжения, во много раз превышающие напряжение на входе цепи. Это объясняется тем, что каждое напряжение равно произведению тока I_0 (а он наибольший), на соответствующее индуктивное или емкостное сопротивление (а они могут быть большими).

$$U = R \cdot I_0 \ll X_L \cdot I_0 = X_c \cdot I_0$$

Параллельно соединенные индуктивность, емкость и активное сопротивление в цепи синусоидального тока

К схеме на подключено синусоидальное напряжение

$$u = U_m \cdot \sin \omega t$$



Определим ток на входе схемы.

В соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$i = i_R + i_L + i_C$$

где $i_R = \frac{U}{R} = g \cdot U_m \cdot \sin \omega t,$

$g = \frac{1}{R}$ активная проводимость

$$i_L = \frac{1}{L} \int u \cdot dt,$$


$$i_C = c \cdot \frac{du}{dt}.$$

Подставим эти формулы в уравнение. Получим:

$$i = g \cdot u + \frac{1}{L} \cdot \int u \cdot dt + c \cdot \frac{du}{dt} = g \cdot U_m \cdot \sin \omega t - \\ - \frac{1}{\omega \cdot L} \cdot U_m \cdot \cos \omega t + c \cdot \omega \cdot U_m \cdot \cos \omega t = g \cdot U_m \cdot \sin \omega t + \\ + b_L \cdot U_m \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) + b_c \cdot U_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ),$$

$$b_L = \frac{1}{\omega \cdot L} \quad \text{индуктивная проводимость}$$

$$b_c = \omega \cdot c \quad \text{емкостная проводимость}$$



Из уравнения видно, что ток в ветви с индуктивностью отстает по фазе от напряжения на 90° , ток в ветви с активным сопротивлением совпадает по фазе с напряжением, ток в ветви с емкостью опережает по фазе напряжение на 90°

$$Y = g + j(b_c - b_L)$$

комплексная проводимость

$$y = \sqrt{g^2 + (b_c - b_L)^2}$$

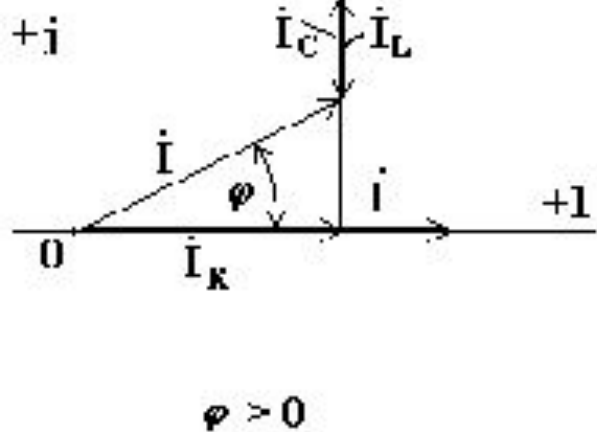
полная проводимость

$$\varphi = \arctg \frac{b_c - b_L}{g}$$

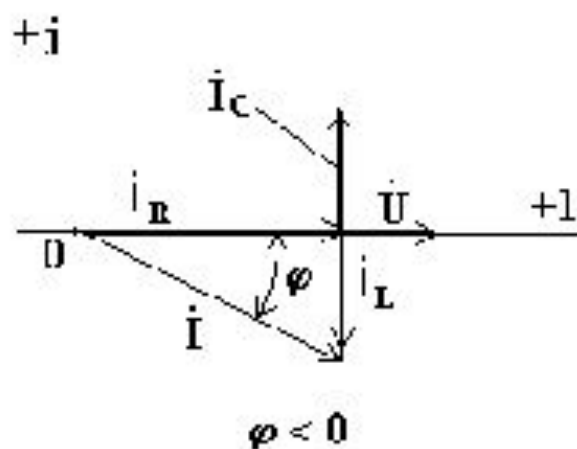
начальная фаза комплексной проводимости

Построим векторные диаграммы

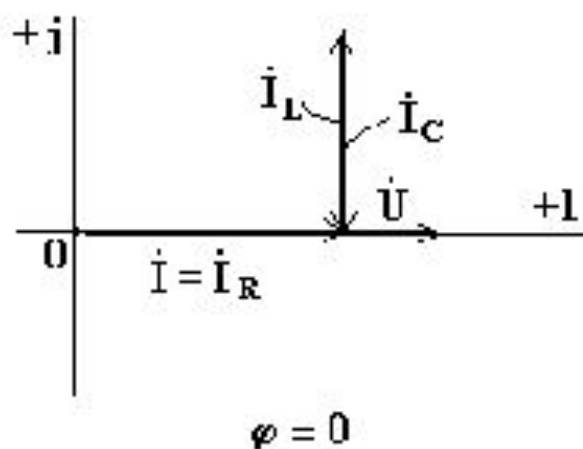
1. $b_L > b_C$




2. $b_L < b_C$



3. $b_L = b_C$





В электрической цепи может возникнуть режим резонанса токов. Резонанс токов возникает тогда, когда индуктивная и емкостная проводимости одинаковы. При этом индуктивный и емкостный токи, направленные в противоположные стороны, полностью компенсируют друг друга. Ток в неразветвленной части схемы совпадает по фазе с напряжением.

Из условия возникновения резонанса тока

$$\omega_0 \cdot C = \frac{1}{\omega_0 \cdot L}$$

получим формулу для резонансной частоты тока

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C \cdot L}}$$

В режиме резонанса тока полная проводимость цепи минимальна

$$y = \sqrt{g^2 + (b_c - b_L)^2} = g$$

а полное сопротивление максимально

$$z = \frac{1}{y}$$

Ток в неразветвленной части схемы
в резонансном режиме имеет минимальное значение.

$$I = \frac{U}{Z}$$

В идеализированном случае

$$R = 0$$

$$y = b_c - b_L = 0$$

$$z = \frac{1}{y} = \infty$$

Ток в неразветвленной части цепи $I = 0$. Такая схема называется фильтр-пробкой.


Мощность в цепи синусоидального тока

Мгновенной мощностью называют произведение мгновенного напряжения на входе цепи на мгновенный ток

Среднее арифметическое значение мощности за период называют активной мощностью и обозначают буквой P .

Эта мощность измеряется в ваттах и характеризует необратимое преобразование электрической энергии в другой вид энергии, например, в тепловую, световую и механическую энергию.

$$P_{cp} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \frac{R}{Z} = I^2 \cdot R = P \text{ (Вт)}$$




Возьмем реактивный элемент (индуктивность или емкость).

Активная мощность в этом элементе

$$P = U \cdot I \cdot \cos 90^\circ = 0$$

так как напряжение и ток в индуктивности или емкости различаются по фазе на 90 градусов.

В реактивных элементах отсутствуют необратимые потери электрической энергии, не происходит нагрева элементов.



Происходит обратимый процесс в виде обмена электрической энергией между источником и приемником.

Для качественной оценки интенсивности обмена энергией вводится понятие реактивной мощности Q .

Преобразуем выражение (6.23)

$$p = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I (\cos 2\omega t \cdot \cos \varphi - \sin 2\omega t \cdot \sin \varphi) = \\ = U \cdot I \cdot \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) + U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t = p_1 + p_2,$$

$$p_1 = U \cdot I \cdot \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t)$$

МГНОВЕННАЯ МОЩНОСТЬ В АКТИВНОМ
СОПРОТИВЛЕНИИ

$$p_2 = U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t$$

МГНОВЕННАЯ МОЩНОСТЬ В РЕАКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ (В
ИНДУКТИВНОСТИ ИЛИ В ЕМКОСТИ)

Максимальное или амплитудное значение мощности p_2 называется реактивной мощностью

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \frac{x}{z} I^2 \cdot x \text{ (ВАр)}$$

$$\sin \varphi = \frac{x}{z}$$

где x - реактивное сопротивление (индуктивное или емкостное).

Реактивная мощность, измеряемая в вольтамперах реактивных, расходуется на создание магнитного поля в индуктивности или электрического поля в емкости. Энергия, накопленная в емкости или в индуктивности, периодически возвращается источнику питания.

Амплитудное значение суммарной мощности $p = p_1 + p_2$ называется полной мощностью.

Полная мощность, измеряемая в вольтамперах, равна произведению действующих значений напряжения и тока:

$$S = U \cdot I = I^2 \cdot z \quad (\text{ВА})$$

$$U = I \cdot z$$


где z - полное сопротивление цепи.

Полная мощность характеризует предельные возможности источника энергии. В электрической цепи можно использовать часть полной мощности

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi$$

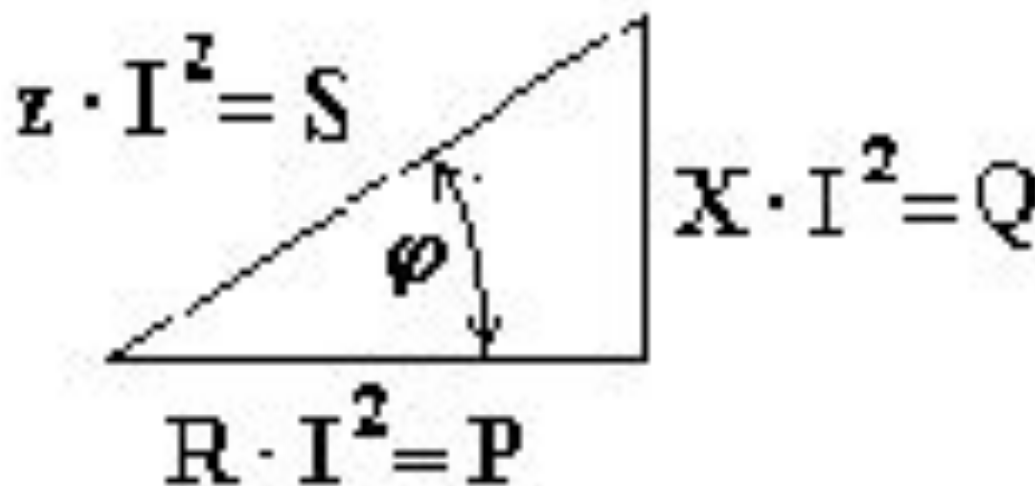
$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P}{S}$$

коэффициент мощности или "косинус "фи".



Коэффициент мощности является одной из важнейших характеристик электротехнических устройств. Принимают специальные меры к увеличению коэффициента мощности.

Возьмем треугольник сопротивлений и умножим его стороны на квадрат тока в цепи. Получим подобный треугольник мощностей



Из треугольника мощностей получим ряд формул:

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$




Активная мощность всегда положительна.

Реактивная мощность в цепи, имеющей индуктивный характер, - положительна, а в цепи с емкостным характером - отрицательна



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°***, 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



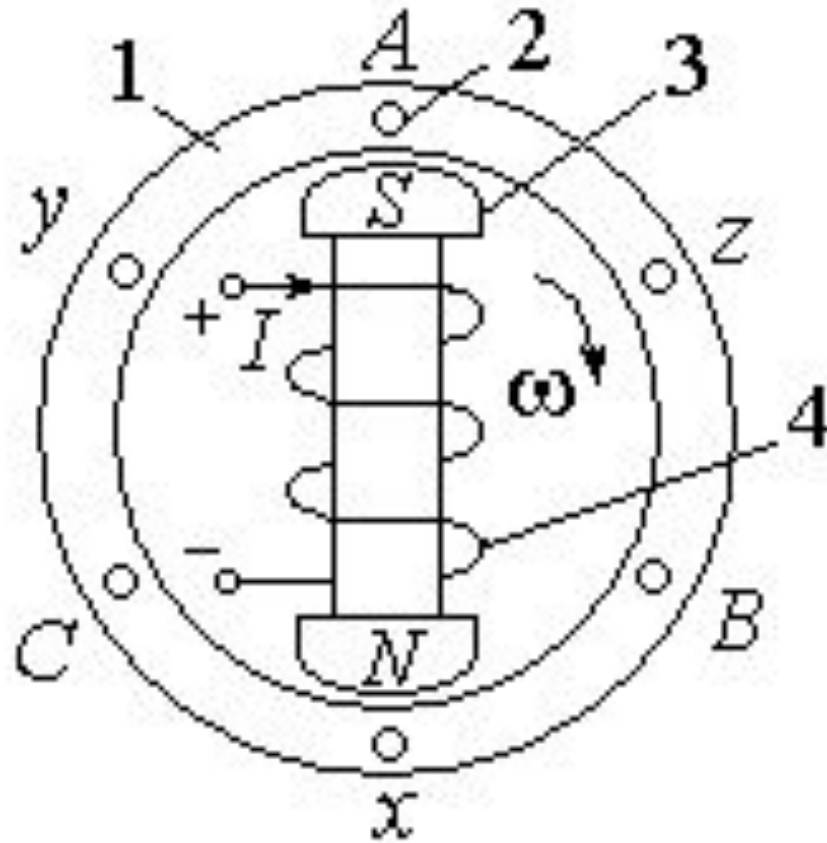
Трехфазный ток является простейшей системой многофазных токов, способных создавать вращающееся магнитное поле. Этот принцип положен в основу работы трехфазных электродвигателей.

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

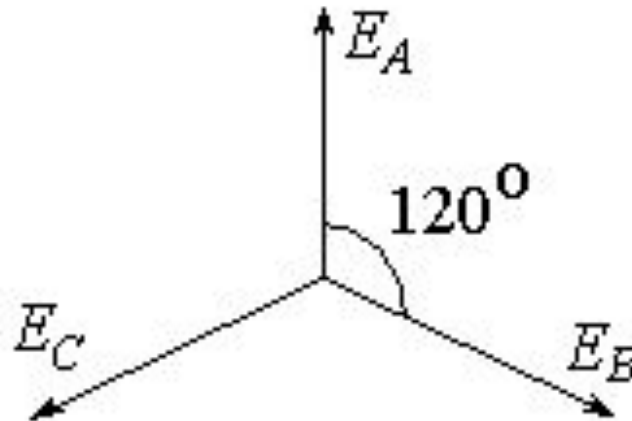
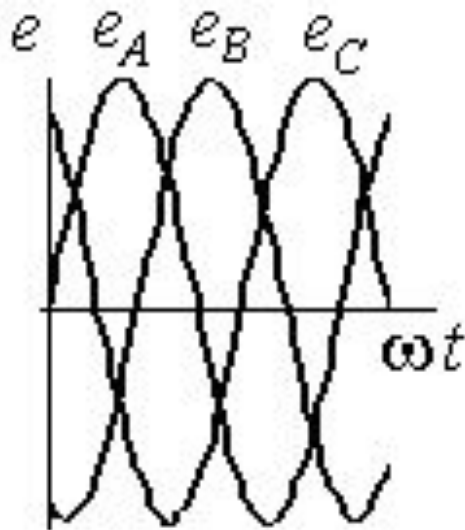
Электрическую энергию трехфазного тока получают в синхронных трехфазных генераторах. Три обмотки 2 статора 1 смещены между собой в пространстве на угол 120° . Их начала обозначены буквами *A, B, C*, а концы – *x, y, z*. Ротор 3 выполнен в виде постоянного электромагнита, магнитное поле которого возбуждает 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° .



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

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


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



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.

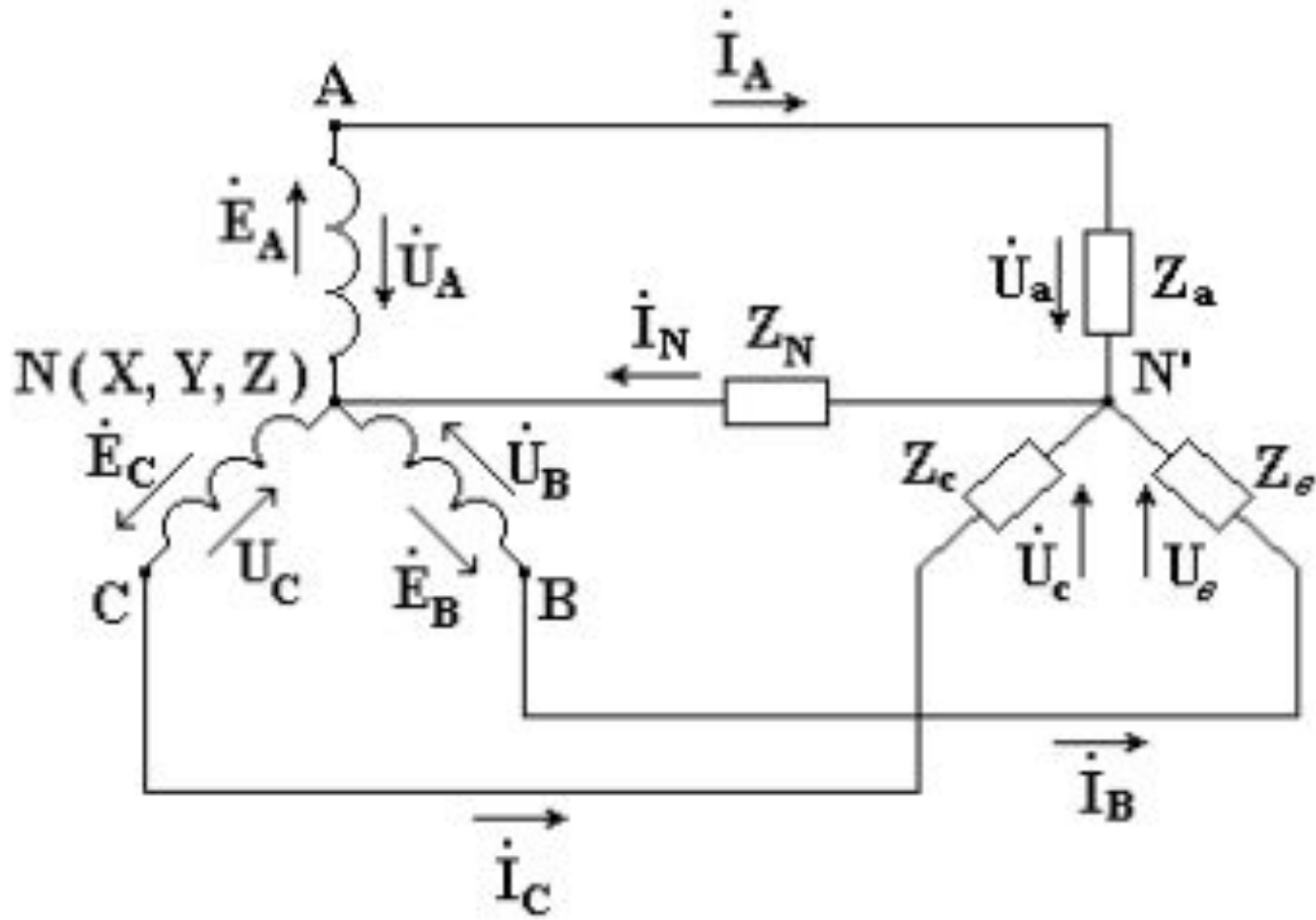
Каждая фаза нагрузки соединяется с фазой генератора двумя проводами: прямым и обратным. Получается несвязанная трехфазная система, в которой имеется шесть соединительных проводов.


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

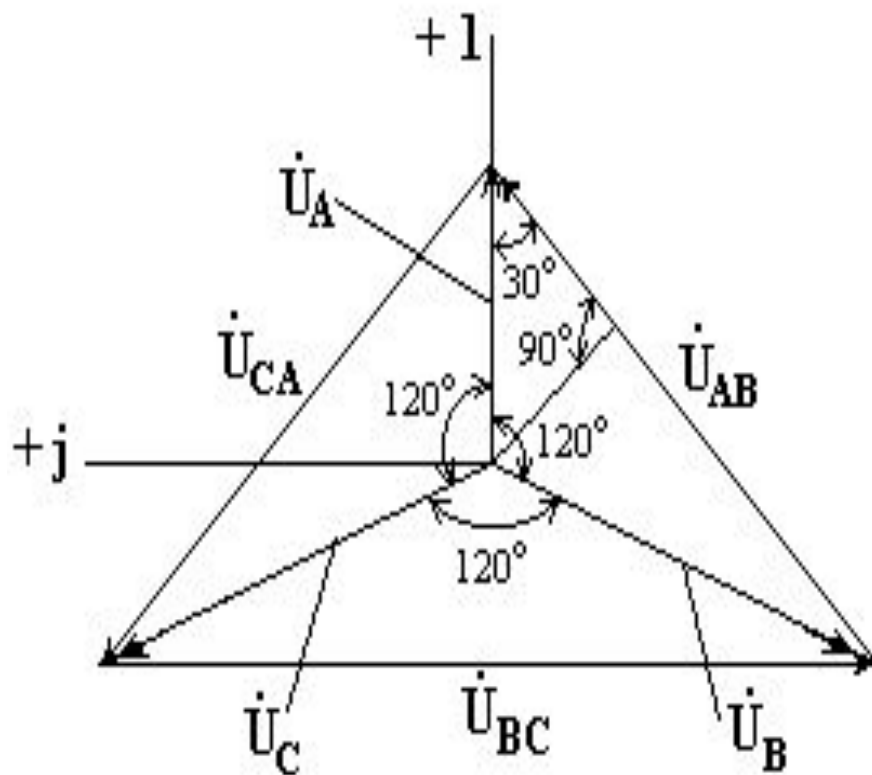
Напряжения между началами фаз или между линейными проводами называют линейными напряжениями.

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

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

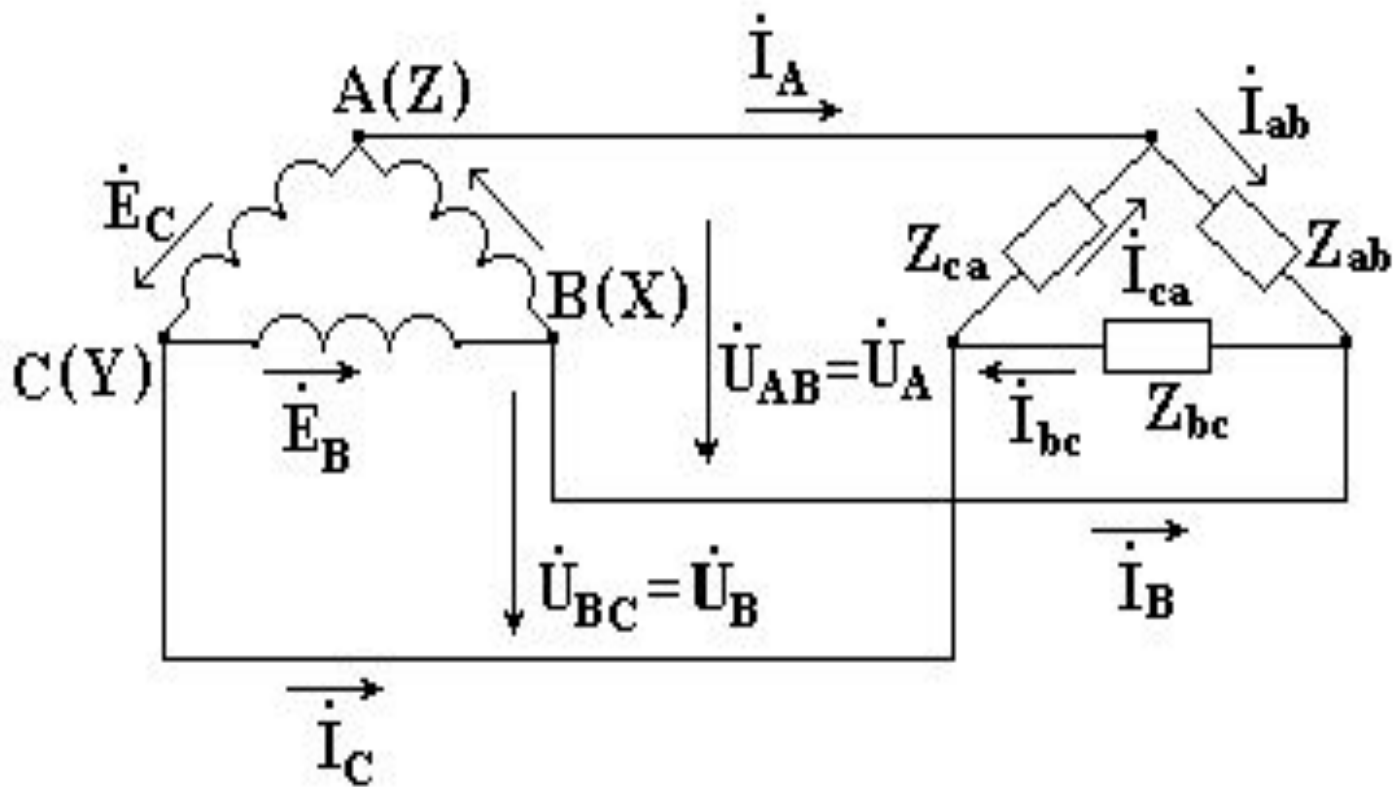
При симметричной системе ЭДС источника
линейное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi}$$



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

$$U_l = U_\phi$$

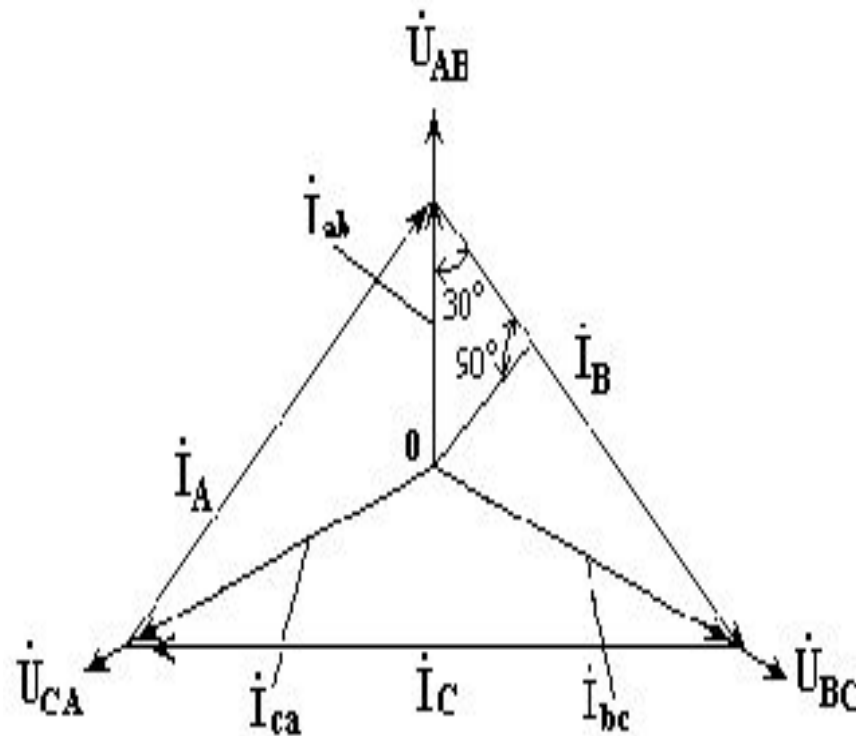
I_A, I_B, I_C - линейные токи

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

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}, I_B = I_{bc} - I_{ab}, I_C = I_{ca} - I_{bc}$$


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.

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

μ_0 - абсолютная магнитная проницаемость,
Гн/м;

μ - 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.

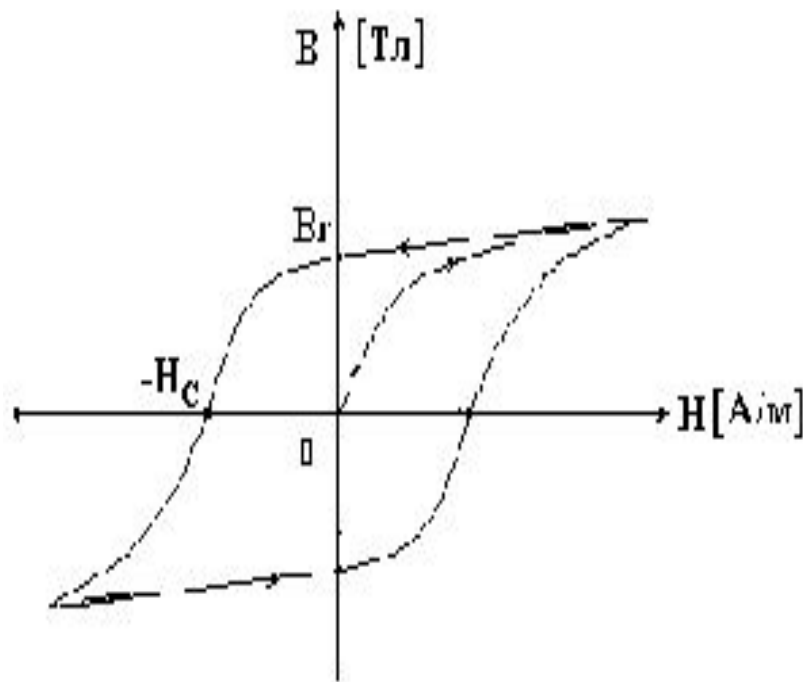
Свойства ферромагнитных материалов.

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

$$H_c > 4000 \frac{A}{м}$$


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 Δx 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* Δ , которая равна отношению наибольшей абсолютной погрешности Δx_{\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.



8. Трансформаторы. Назначение и области применения




Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно-связанных обмоток и предназначенное для преобразования одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока посредством электромагнитной индукции.



Трансформаторы широко используются в промышленности и быту для различных целей

1. Для передачи и распределения электрической энергии;
2. Для различных технологических целей: сварки, питания электротермических установок и др.;
3. Для питания различных цепей радиоаппаратуры, электронной аппаратуры, для согласования напряжения и пр.;
4. Для включения электроизмерительных приборов в цепи высокого напряжения или в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности.



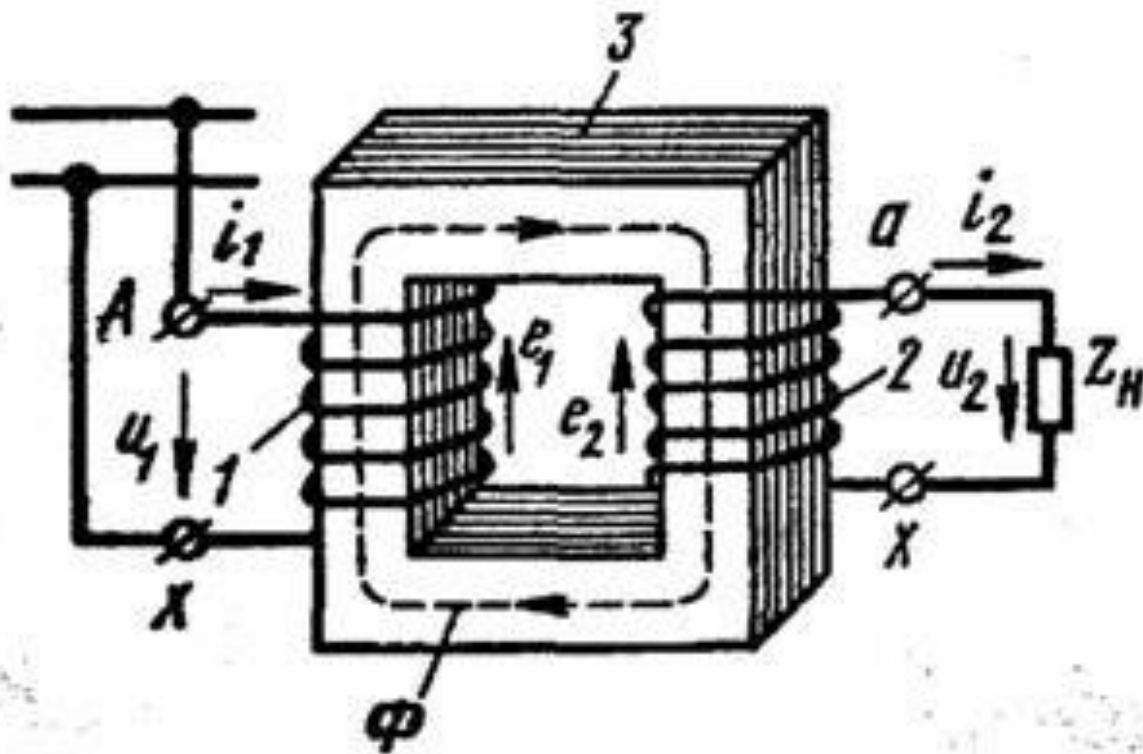
Классификацию трансформаторов можно произвести по нескольким признакам:

1. По назначению трансформаторы - силовые общего и специального применения.
2. По виду охлаждения – с воздушным и масляным охлаждением.
3. По числу фаз на первичной стороне – однофазные и трёхфазные.
4. По форме магнитопровода – стержневые, броневые, тороидальные.
5. По числу обмоток на фазу – двухобмоточные, трёхобмоточные, многообмоточные (более трёх обмоток).
6. По конструкции обмоток – с концентрическими и чередующимися (дисковыми) обмотками

Принцип действия трансформатора.

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток, размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала.

Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока – электрической сети с напряжением сети u_1 . К вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Z_n .



Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), а низкого напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами А и Х; обмотки НН – буквами а и х.

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 , который создаёт переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток Φ индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС – e_1 и e_2 , пропорциональные числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$.

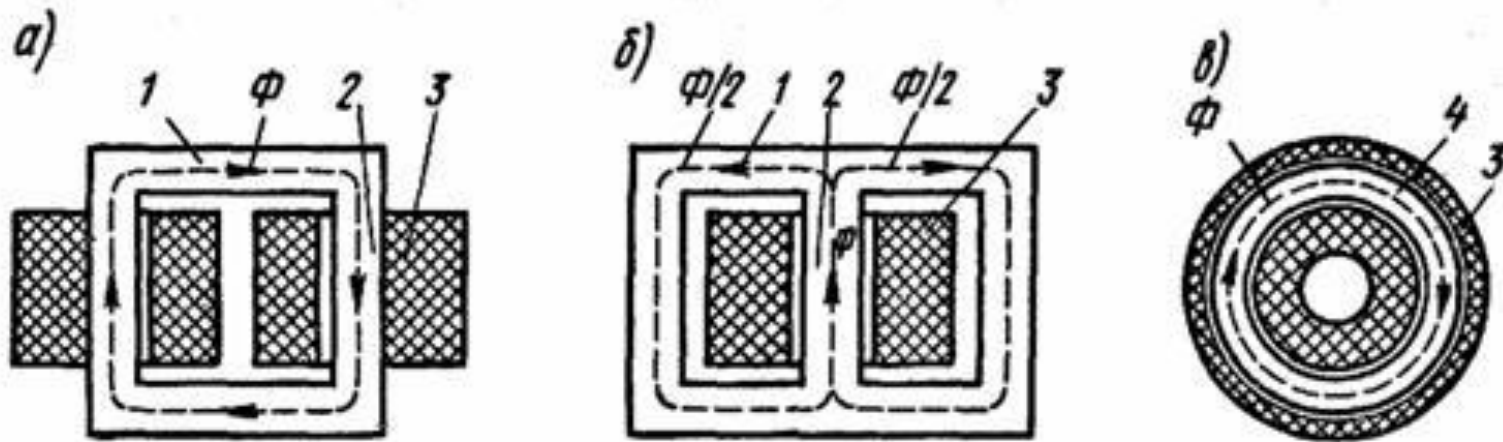
Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения E_{BH} к ЭДС обмотки низшего напряжения E_{HH} (или отношение их чисел витков) называют коэффициентом трансформации

$$n = \frac{E_{BH}}{E_{HH}} = \frac{W_{BH}}{W_{HH}}$$



Устройство трансформаторов.

В зависимости от конфигурации магнитной системы, трансформаторы подразделяют на стержневые, броневые и тороидальные.

Стержнем называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют ярмом. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.



Для уменьшения потерь от вихревых токов, магнитопроводы трансформаторов собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28-0,5 мм при частоте 50 Гц



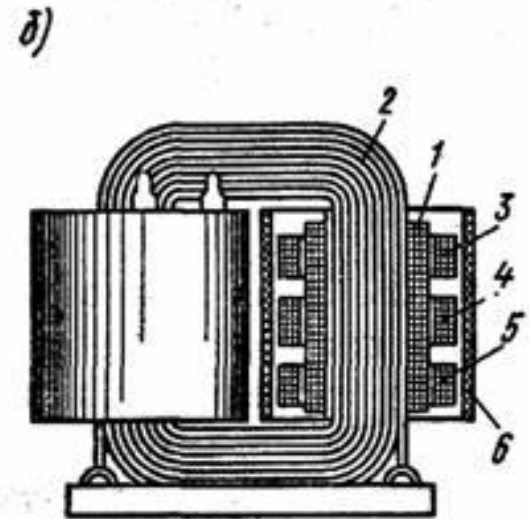
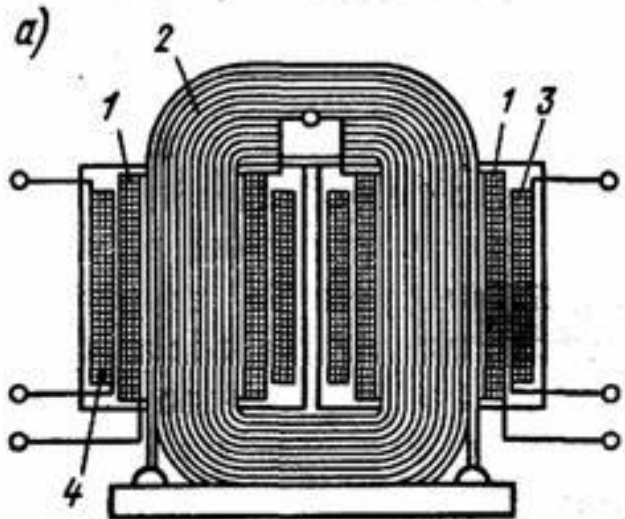
Трансформаторы малой мощности и микротрансформаторы часто выполняют броневыми, так как они имеют более низкую стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения сборки и изготовления.



Обмотки.

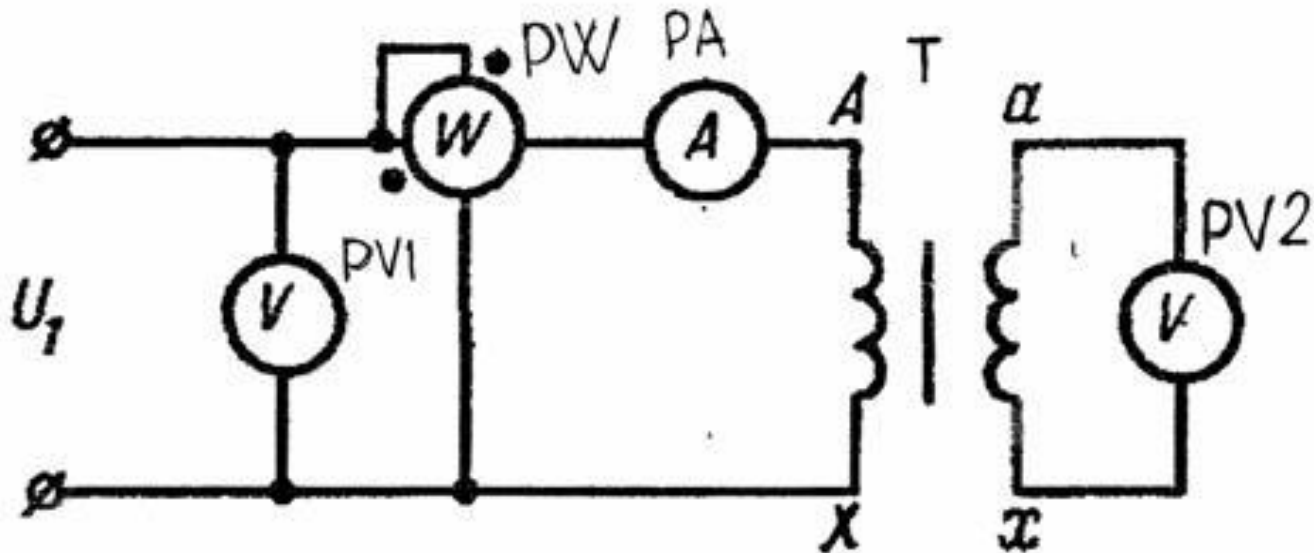
В современных трансформаторах первичную и вторичную обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки либо concentрически – одну поверх другой, либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующиеся по высоте стержня.

В силовых трансформаторах обычно применяют concentрические обмотки, причём ближе к стержням располагают обмотку НН, требующей меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи – обмотку ВН.



Опыт холостого хода

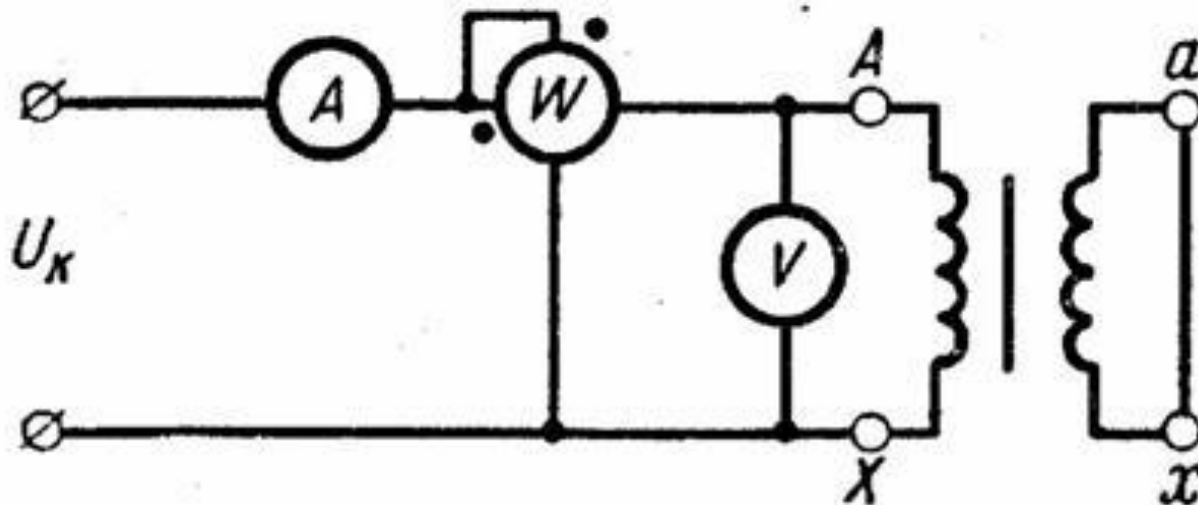
В опыте холостого хода вторичная обмотка трансформатора разомкнута, а к первичной подводится номинальное напряжение $U_{1н} = U_{10}$



Так как ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током трансформатора, электрическими потерями $\Delta P_{эл1} = I_{10}^2 R_1$ пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая трансформатором, расходуется на компенсацию магнитных потерь в стали магнитопровода.

Опыт короткого замыкания

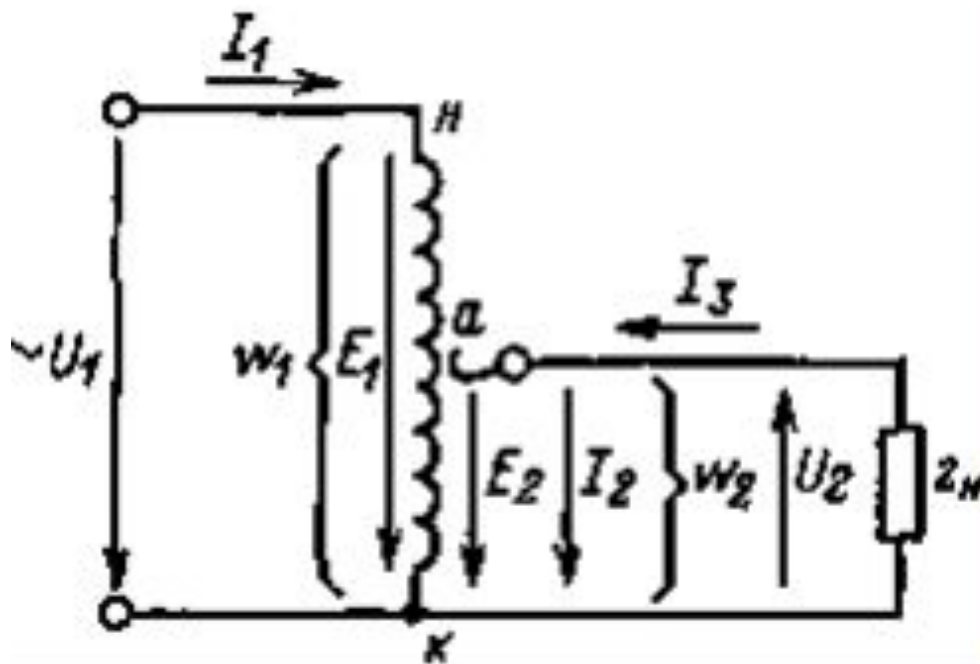
Вторичную обмотку замыкают накоротко (сопротивление $Z_H = 0$), а к первичной подводят пониженное напряжение такого значения, при котором по обмоткам проходит номинальный ток $I_{ном}$.




В мощных силовых трансформаторах напряжение U_K при коротком замыкании обычно составляет 5-15% от номинального. В трансформаторах малой мощности напряжение U_K может достигать 25-50% от $U_{ном}$

В ходе опыта короткого замыкания определяются потери энергии в обмотках трансформатора.

Автотрансформатором называется такой трансформатор, у которого имеется только одна обмотка, часть которой принадлежит одновременно вторичной и первичной цепям. Схема однофазного трансформатора изображена на рисунке






Так же как обычные трансформаторы, автотрансформаторы могут быть понижающими и повышающими, однофазными и трехфазными.

В автотрансформаторе электрическая энергия из первичной цепи во вторичную передается и через гальваническую связь, и посредством переменного магнитного потока.

Автотрансформатор целесообразно применять при малых коэффициентах трансформации ($n \leq 2$).



Автотрансформатор нельзя применять там, где по условиям техники безопасности или другим причинам недопустима гальваническая связь между первичной и вторичной обмотками.

Многообмоточные трансформаторы.


В энергетических устройствах довольно широко применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиотехники и автоматики — многообмоточные трансформаторы малой мощности.

Наиболее распространенная схема многообмоточного трансформатора — одна первичная и несколько вторичных обмоток.

Очевидно, что в данном случае двум вторичным напряжениям U_2 и U_3 , получаемым, например, от обмоток СН и НН, соответствуют два коэффициента трансформации:

$$k_{12} = w_{B.H} / w_{C.H}$$

$$k_{13} = w_{B.H} / w_{H.H.}$$




В трехфазной сети переменного тока преобразование напряжений осуществляется с помощью трехфазного трансформатора с общим для трех фаз сердечником. В трехфазном трансформаторе с общим магнитопроводом магнитный поток любой из фаз может замыкаться через стержни, на которых расположены обмотки двух других фаз. Затраты стали на трехфазный трансформатор значительно меньше, чем на три однофазных трансформатора


Измерительные трансформаторы

предназначены для изоляции измерительных приборов и аппаратов автоматической защиты от цепи высокого напряжения, расширения пределов измерения измерительных приборов.

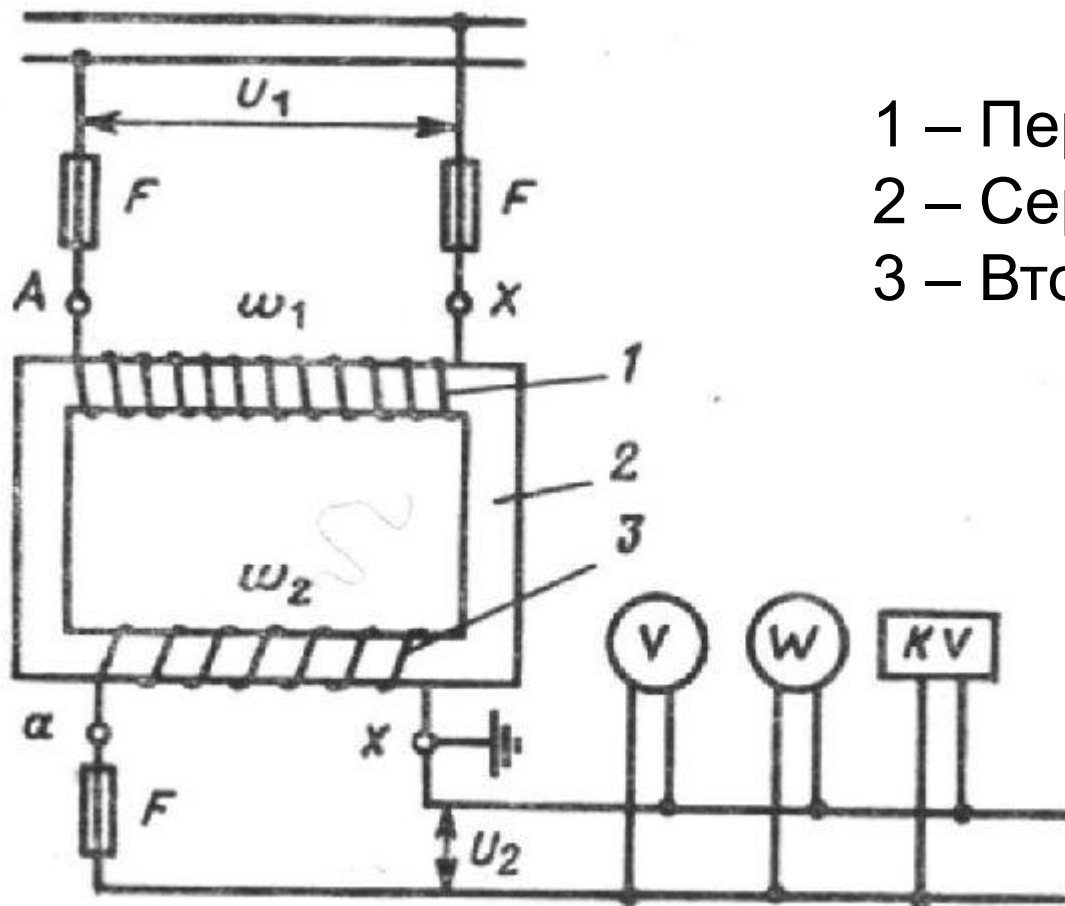
Измерительные трансформаторы дают возможность использовать измерительные приборы со стандартными пределами измерения (100 В и 5 А) для проведения измерений в различных цепях



Различают измерительные трансформаторы напряжения, применяемые для включения вольтметров, частотомеров, цепей напряжения измерительных приборов (ваттметров, счетчиков, фазометров) и реле, а также трансформаторы тока, предназначенные для включения амперметров, цепей тока измерительных приборов и реле.

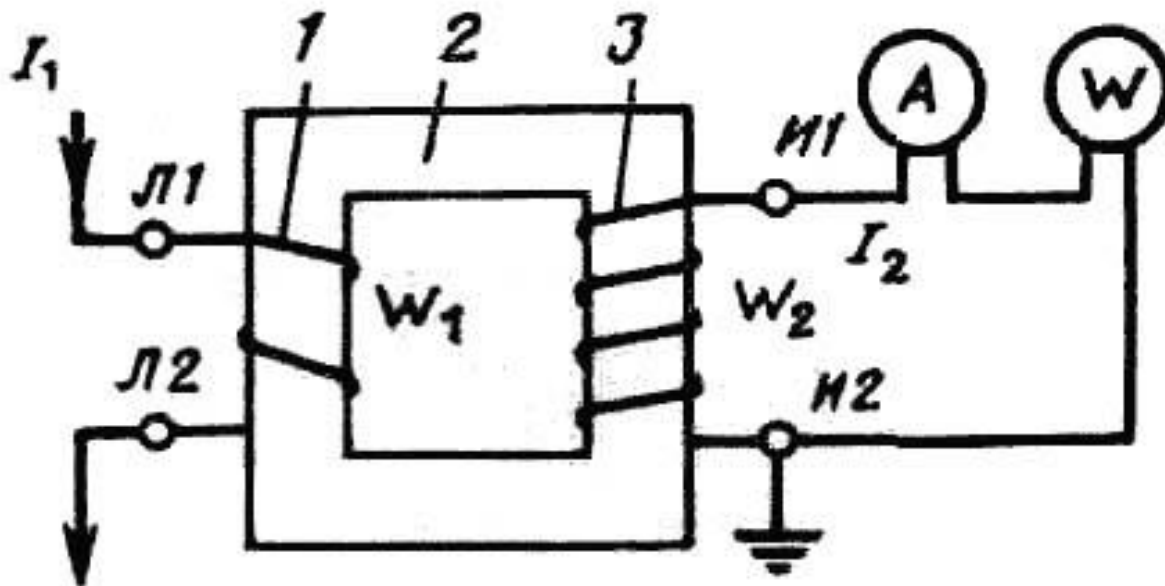



Трансформатор напряжения. Первичная обмотка таких трансформаторов, которая является и обмоткой высшего напряжения, имеет большое число витков и включается как вольтметр под измеряемое напряжение U_1 ; вторичная же обмотка является обмоткой низшего напряжения, имеет меньшее количество витков и замыкается на вольтметр и цепи напряжения других приборов.



- 1 – Первичная обмотка
- 2 – Сердечник
- 3 – Вторичная обмотка

Трансформатор тока включают в линию так же, как амперметр, последовательно с измеряемым объектом, а вторичную обмотку замыкают на амперметр и цепи тока других измерительных приборов.





Сварочные трансформаторы. В отличие от силовых сварочные трансформаторы работают в режиме меняющихся напряжений и тока и рассчитаны на кратковременные короткие замыкания сети.

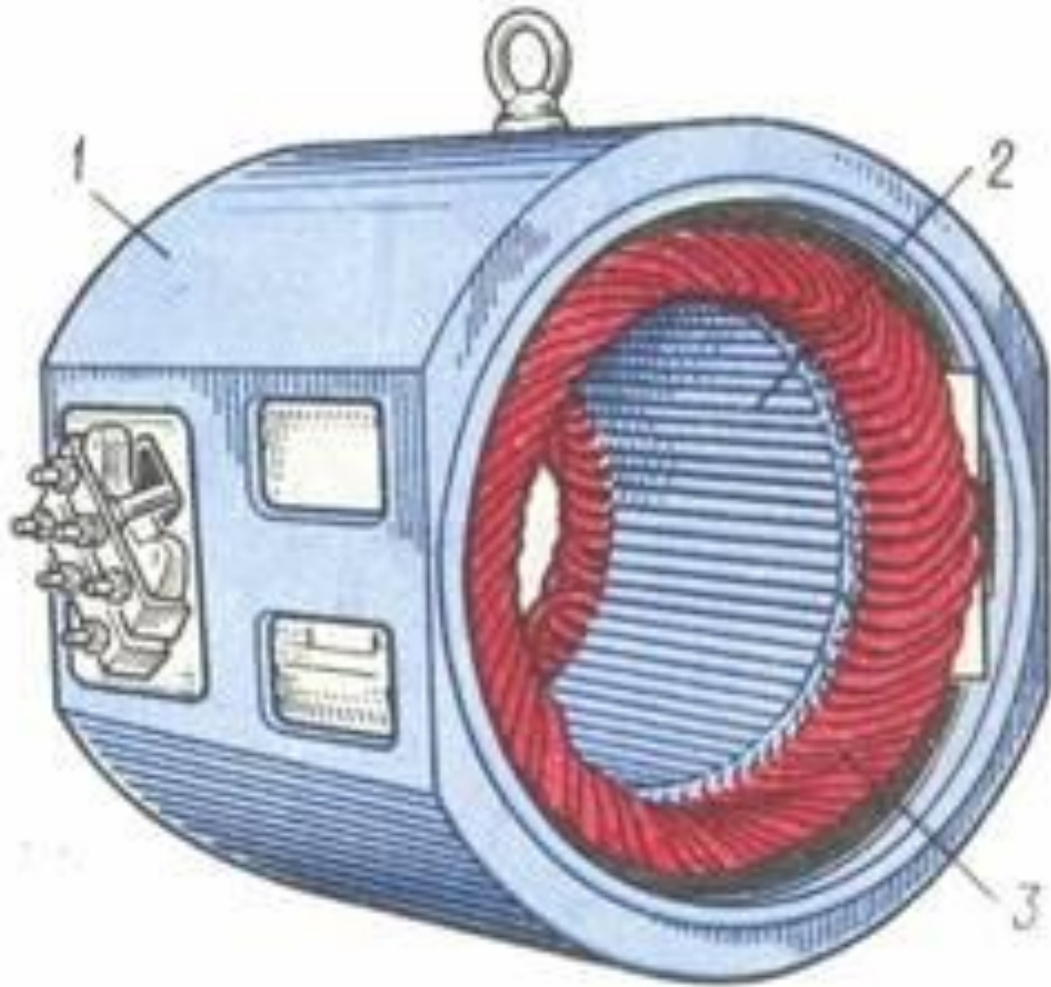
Для сварки переменным током широко применяют однофазные трансформаторы, которые разделяют силовую и сварочную цепи и понижают высокое напряжение 380 или 220 В до величины не более 80 В. Внешняя вольтамперная характеристика вторичной цепи этих трансформаторов, т. е. зависимость между величиной сварочного тока и напряжением, должна обеспечивать ведение устойчивого сварочного процесса, учитывающего статическую характеристику сварочной дуги. Наличие индуктивного сопротивления необходимой расчетной величины обеспечивает в трансформаторах стабилизацию дуги и ее восстановление при частом изменении полярности переменного тока.



9. Асинхронные машины

Устройство трёхфазной асинхронной машины

Неподвижная часть машины называется **статор**, подвижная – **ротор**. Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. Станина (1) выполняется литой, из немагнитного материала. Чаще всего станину выполняют из чугуна или алюминия. На внутренней поверхности листов (2), из которых выполняется сердечник статора, имеются пазы, в которые закладывается **трёхфазная обмотка** (3). Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия

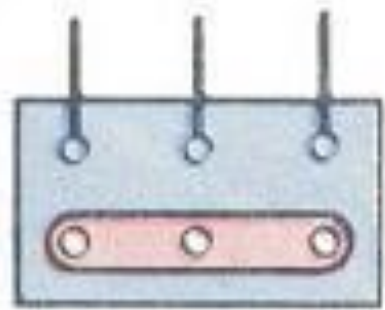
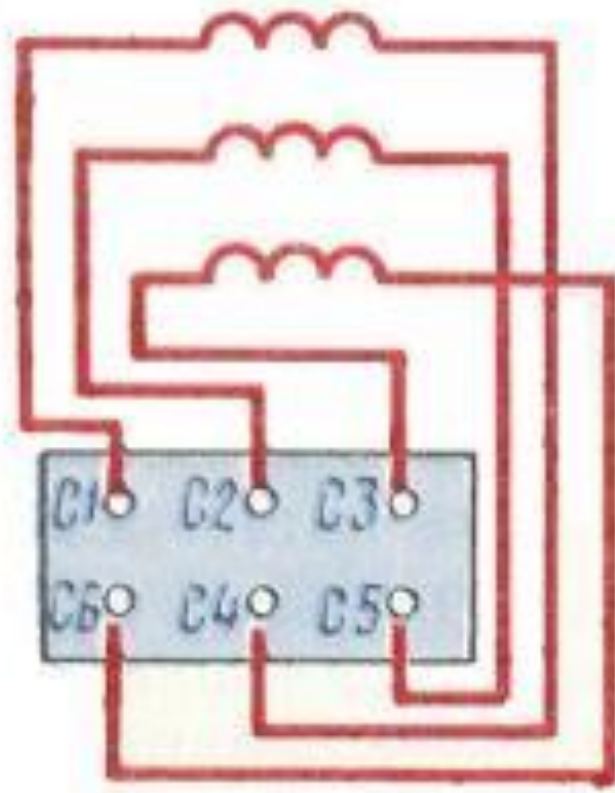


Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых **фазами**. Начала фаз обозначаются буквами c_1, c_2, c_3 , концы – c_4, c_5, c_6 .

Начала и концы фаз выведены на клеммник, закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора.

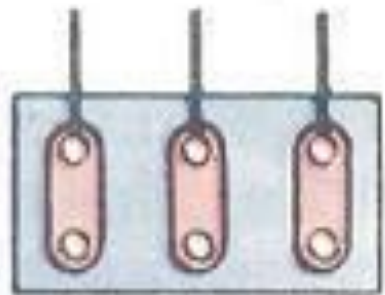
Основное назначение обмотки статора – создание в машине вращающегося магнитного поля

a)




b)

Y

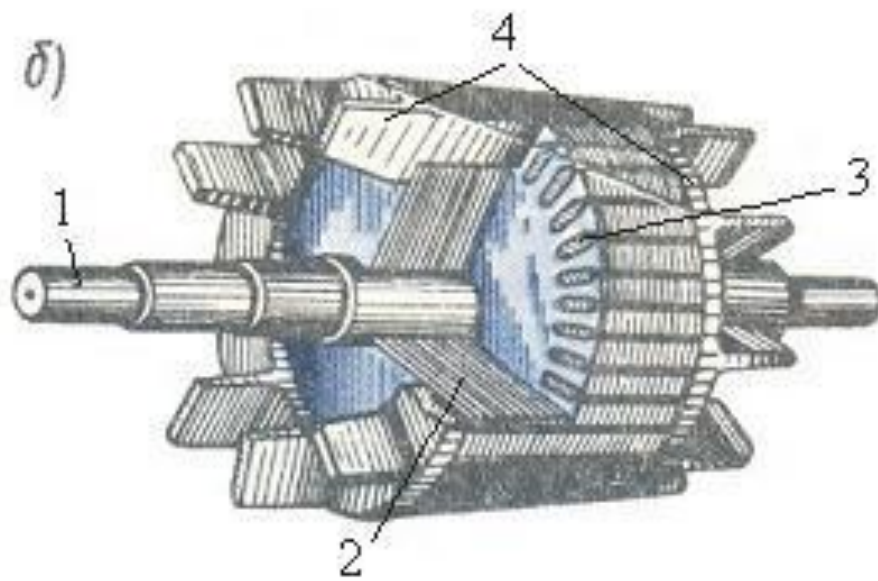
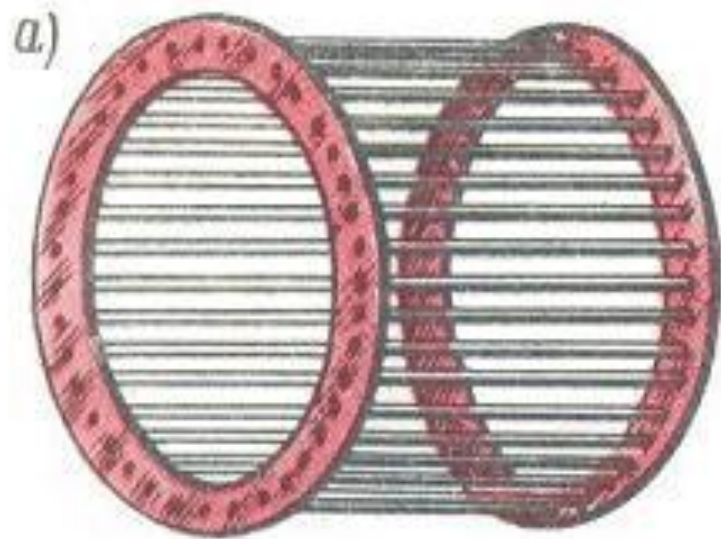



B)

Δ




Сердечник ротора набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: **короткозамкнутая** и **фазная**. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами).



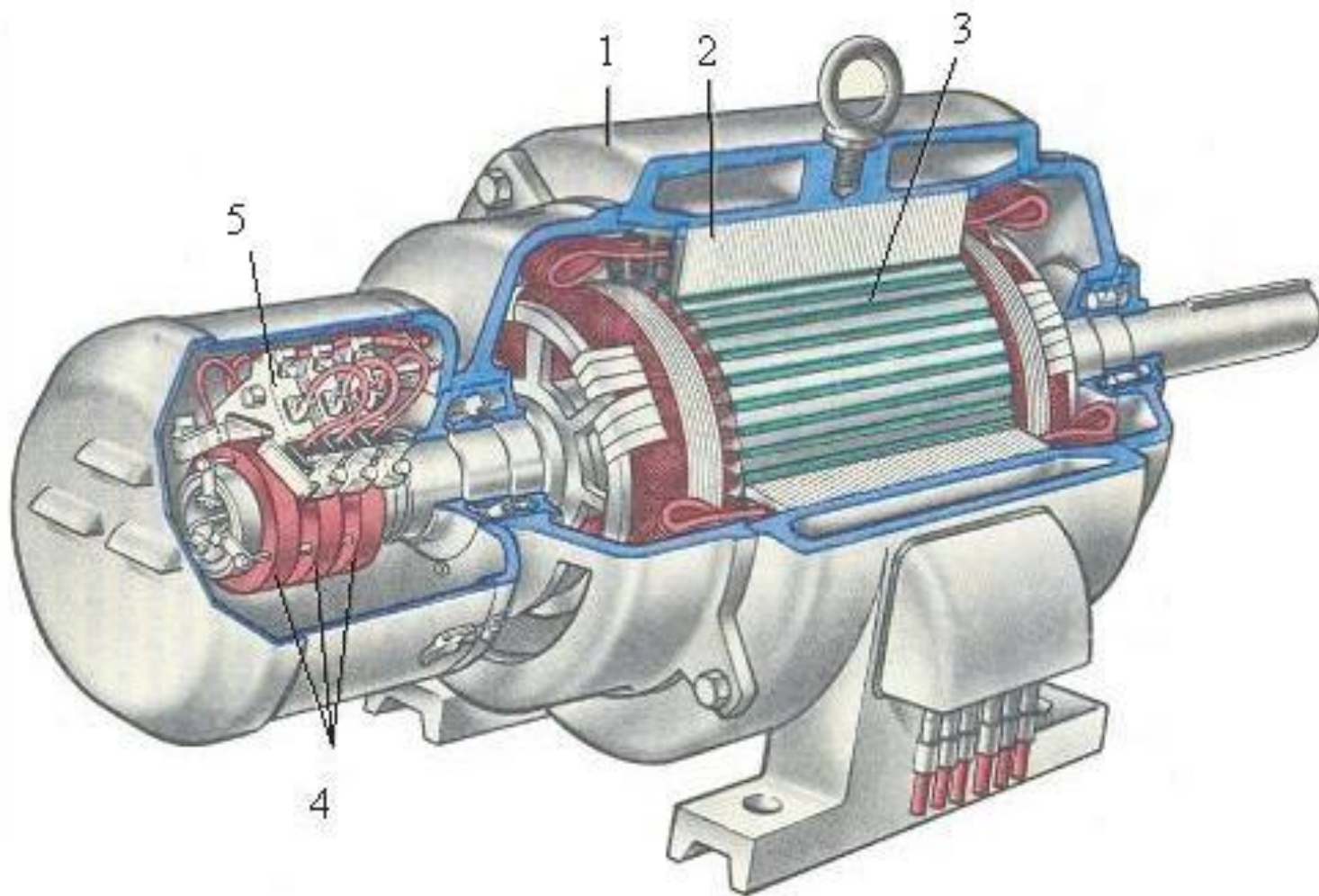



Короткозамкнутая обмотка ротора состоит из стержней 3, которые закладываются в пазы сердечника ротора. С торцов эти стержни замыкаются торцевыми кольцами 4. Такая обмотка напоминает “беличье колесо” и называют её типа “беличьей клетки”. Двигатель с короткозамкнутым ротором не имеет подвижных контактов. За счёт этого такие двигатели обладают высокой надёжностью. Обмотка ротора выполняется из меди, алюминия, латуни и других материалов.



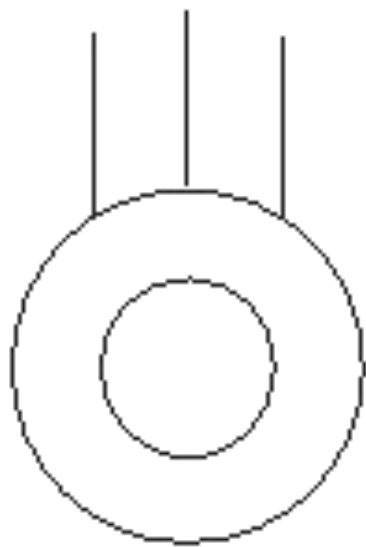
Доливо-Добровольский первым создал двигатель с короткозамкнутым ротором и исследовал его свойства. Он выяснил, что у таких двигателей есть очень серьёзный недостаток – ограниченный пусковой момент. Доливо-Добровольский назвал причину этого недостатка – сильно закореженный ротор. Им же была предложена конструкция двигателя с фазным ротором.

На рисунке приведен вид асинхронной машины с фазным ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – обмотка статора, 3 – ротор, 4 – контактные кольца, 5 – щетки.

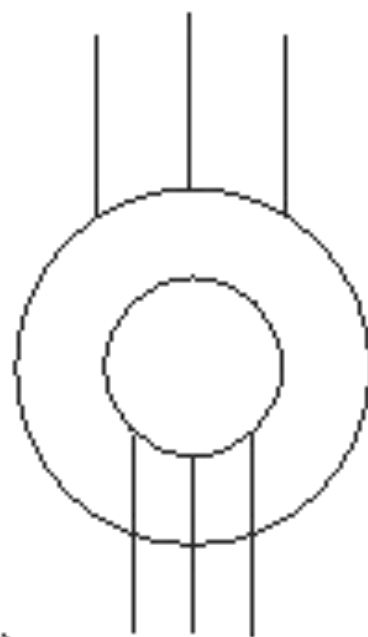




У фазного ротора обмотка выполняется трёхфазной, аналогично обмотке статора. Витки обмотки закладываются в пазы сердечника ротора и соединяются по схеме звезда. Концы каждой фазы соединяются с контактными кольцами, закреплёнными на валу ротора, и через щётки выводятся во внешнюю цепь. Контактные кольца изготавливают из латуни или стали, они должны быть изолированы друг от друга и от вала. В качестве щёток используют металлографитовые щётки, которые прижимаются к контактным кольцам с помощью пружин щёткодержателей, закреплённых неподвижно в корпусе машины.

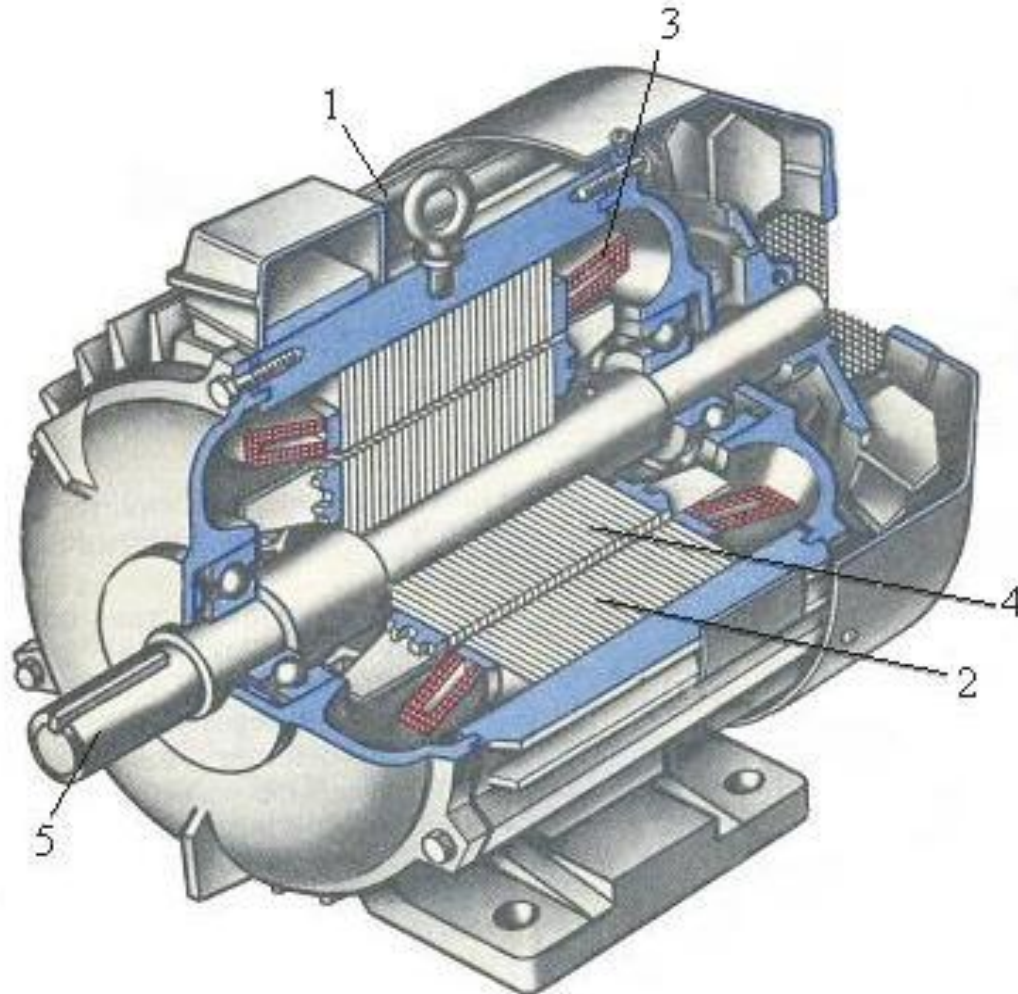


a)



b)

На рисунке приведен вид асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – сердечник статора, 3 – обмотка статора, 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 5 – вал.




На щитке машины, закреплённом на станине, приводятся данные: P_H , U_H , I_H , n_H , а также тип машины.

P_H – это номинальная полезная мощность (на валу);

U_H и I_H – номинальные значения линейного напряжения и тока для указанной схемы соединения. Например, 380/220, Y/Δ, $I_H Y / I_H Δ$;

n_H – номинальная частота вращения в об/мин.



Тип машины, например, задан в виде 4АН315S8.
Это асинхронный двигатель (А) четвёртой серии
защищённого исполнения. Если буква Н
отсутствует, то двигатель закрытого исполнения.

315 – высота оси вращения в мм;

S – установочные размеры (они задаются в справочнике);

8 – число полюсов машины.

В режиме двигателя ротор будет вращаться несинхронно с магнитным полем. Отсюда появилось название двигателя – асинхронный (несинхронный). При увеличении нагрузки на валу двигатель должен развивать больший вращающий момент, а это происходит при снижении частоты вращения ротора. В отличие от частоты вращения ротора частота вращения магнитного поля не зависит от нагрузки. Для сравнения частоты вращения магнитного поля n_0 и ротора n ввели коэффициент, который называли скольжением и обозначили буквой s . Скольжение может измеряться в относительных единицах и в процентах.

$$s = (n_0 - n) / n_0 \quad \text{или} \quad s = [(n_0 - n) / n_0] \cdot 100\%$$

При пуске в ход асинхронного двигателя $n=0, S=1$. В режиме идеального холостого хода $n=n_0, S=0$. Таким образом, в режиме двигателя скольжение изменяется в пределах:

$$0 < S \leq 1$$

При работе асинхронных двигателей в номинальном режиме:

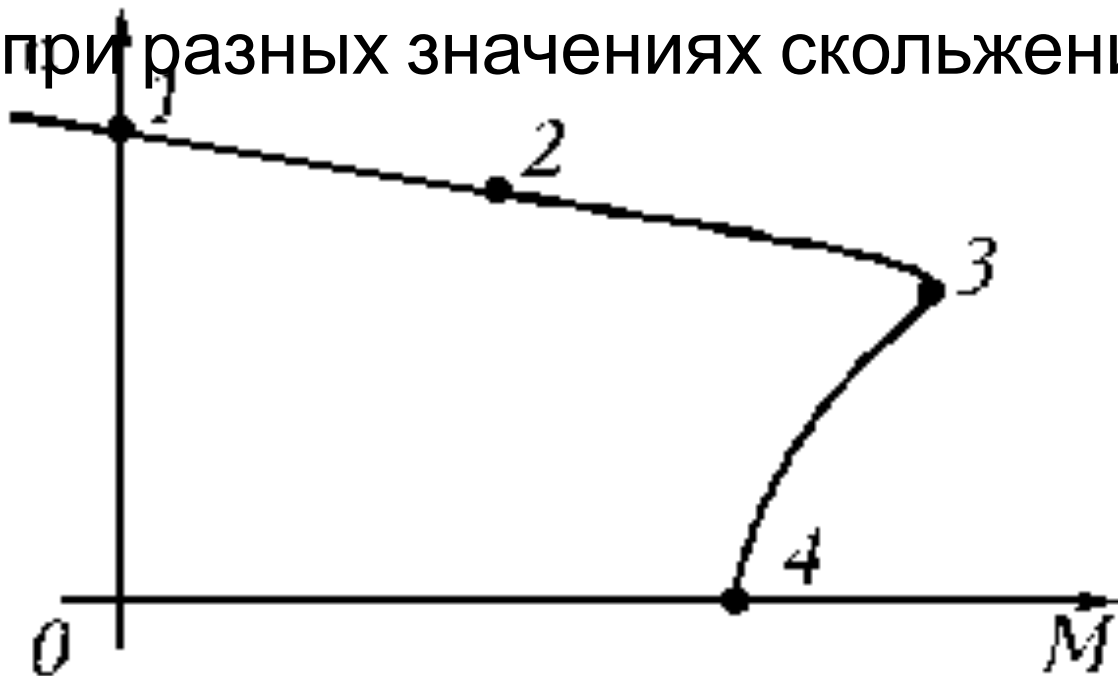
$$S_H = (2 \div 5)\%$$

В режиме реального холостого хода асинхронных двигателей:

$$S_{\text{хх}} = (0,2 \div 0,7)\%.$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя.

Под механической характеристикой принято понимать зависимость частоты вращения ротора в функции от электромагнитного момента $n=f(M)$. Эту характеристику можно получить, используя зависимость $M=f(S)$ и пересчитав частоту вращения ротора при разных значениях скольжения.



Участок 1-3 соответствует устойчивой работе, участок 3-4 – неустойчивой работе. Точка 1 соответствует идеальному холостому ходу двигателя, когда $n=n_0$. Точка 2 соответствует номинальному режиму работы двигателя, ее координаты M_H и n_H . Точка 3 соответствует критическому моменту $M_{кр}$ и критической частоте вращения $n_{кр}$. Точка 4 соответствует пусковому моменту двигателя $M_{пуск}$. Механическую характеристику можно рассчитать и построить по паспортным данным.

Асинхронные двигатели имеют жесткую механическую характеристику, т.к. частота вращения ротора (участок 1–3) мало зависит от



Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

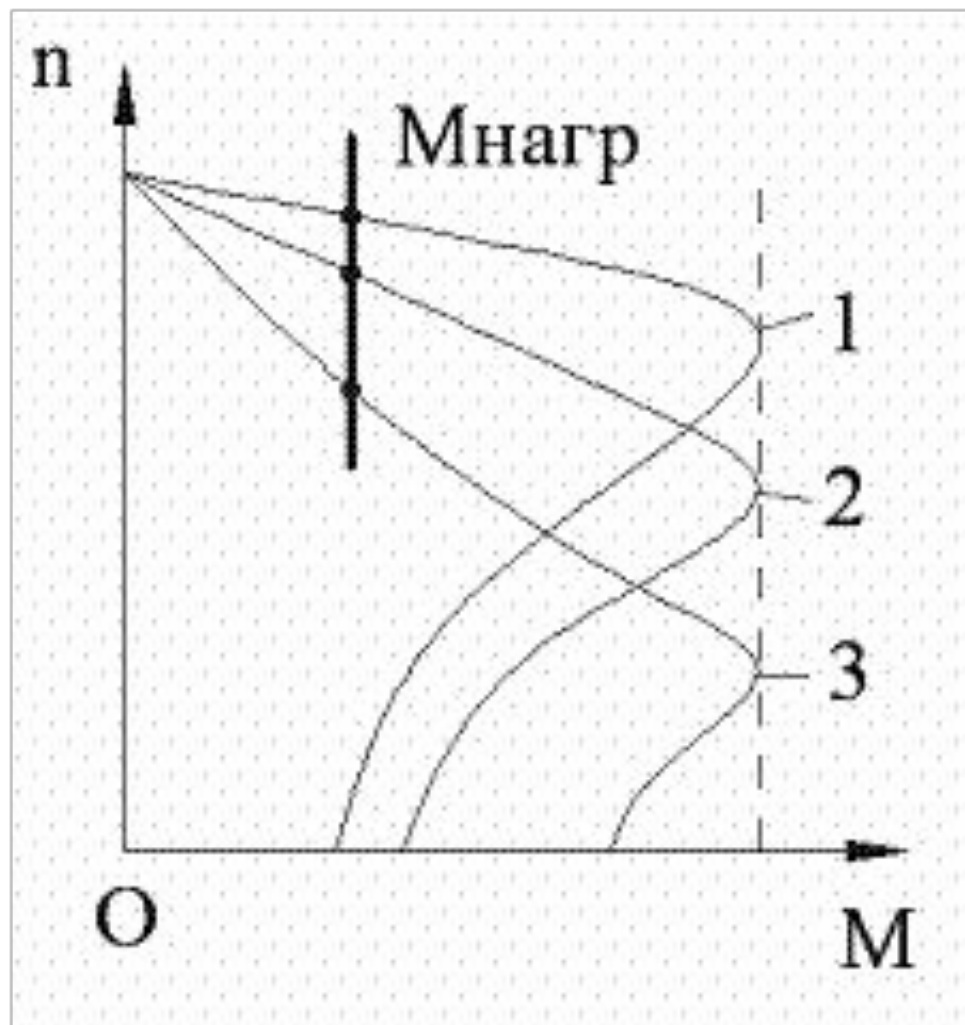
1. изменением скольжения;
2. изменением числа пар полюсов;
3. изменением частоты источника питания.

Изменение скольжения

Этот способ используют в приводе тех механизмов, где установлены асинхронные двигатели с фазным ротором.

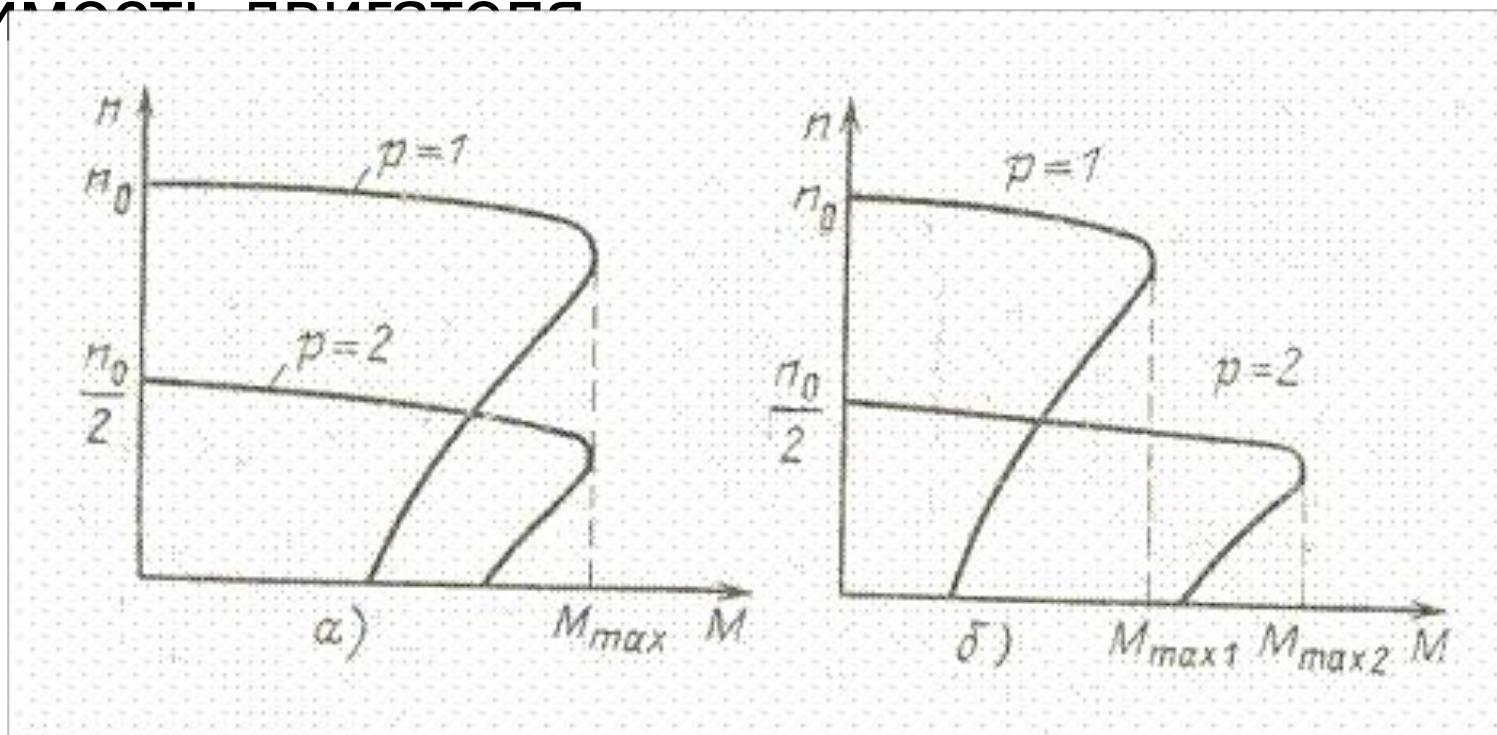
Основные недостатки этого способа:

1. Из-за больших потерь на регулировочном реостате снижается коэффициент полезного действия, т.е. способ неэкономичный.
2. Механическая характеристика асинхронного двигателя с увеличением активного сопротивления ротора становится мягче (снижается устойчивость работы двигателя).
3. Невозможно плавно регулировать частоту вращения



Изменение числа пар полюсов

Достоинства этого способа регулирования: сохранение жесткости механических характеристик, высокий К.П.Д. Недостатки: ступенчатое регулирование, большие габариты и большая стоимость привода.



Изменение частоты источника питания

Достоинства этого способа: плавное регулирование, возможность повышать и понижать частоту вращения, сохранение жесткости механических характеристик, экономичность.

Основной недостаток – требуется преобразователь частоты, т.е. дополнительные капитальные вложения.






10. Синхронные машины

Если в асинхронных машинах ротор имел частоту вращения, отличную от частоты вращения магнитного поля статора, то в синхронных эти частоты равны между собой.


Синхронной машиной называется электрическая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора n находится в строгом соответствии с частотой сети f_1 : $n = n_1 = 60 f_1 / p$.

На статоре синхронной машины располагается трехфазная обмотка переменного тока, называемая *обмоткой якоря*, а на роторе располагается обмотка постоянного тока, называемая *обмоткой возбуждения*.

Для улучшения динамических свойств синхронной машины в полюсные наконечники помещают дополнительную короткозамкнутую обмотку (4), выполняемую аналогично короткозамкнутой обмотке асинхронной машины. Ее называют *успокоительной* или *демпферной*.




Синхронные машины могут работать как генераторами, так и электродвигателями. Основная область применения синхронных машин — энергетика, где они используются в качестве генераторов электрической энергии. В зависимости от типа привода синхронные генераторы делятся на турбогенераторы, гидрогенераторы и дизельные генераторы.



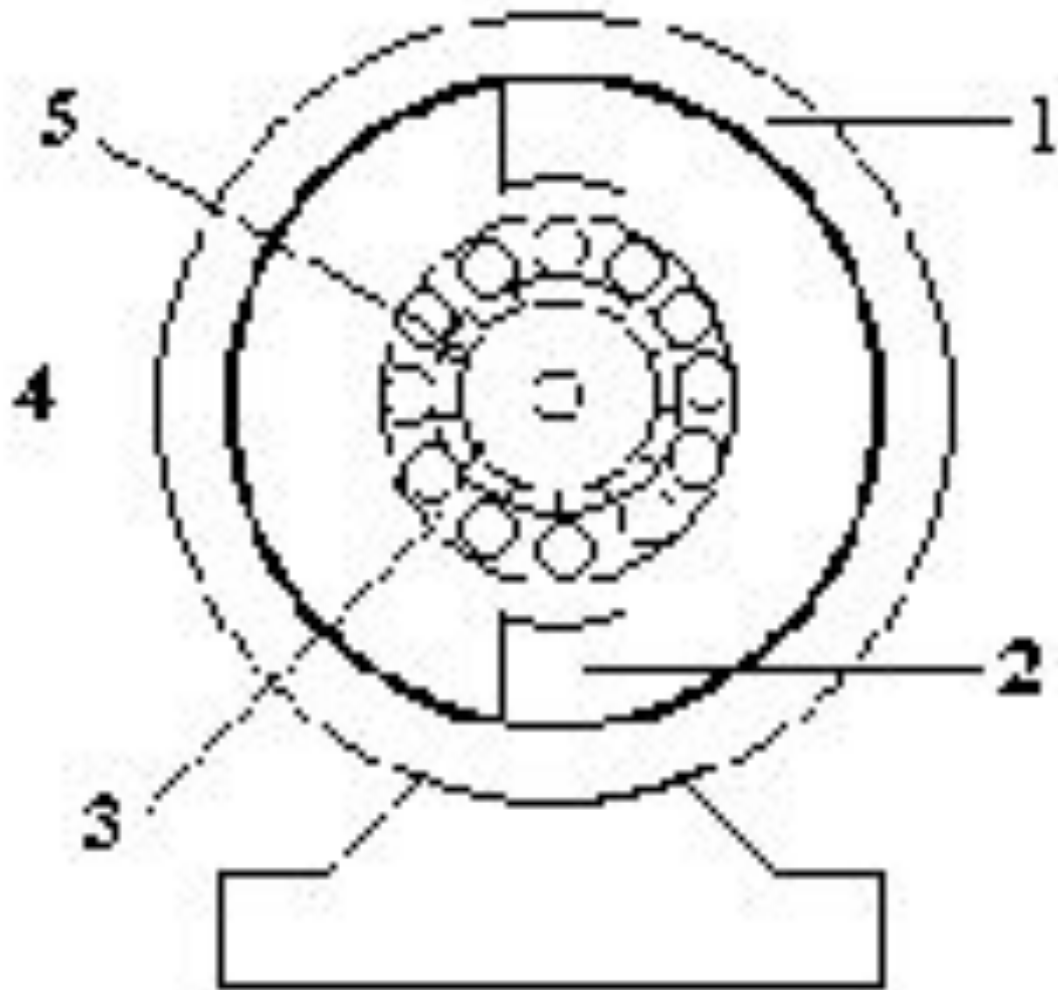
Синхронные электродвигатели широко применяют для привода мощных компрессоров, насосов, вентиляторов. Синхронные микродвигатели используют для привода лентопротяжных механизмов регистрирующих приборов, магнитофонов и так далее.




11. Электрические машины постоянного тока



Электрическая машина постоянного тока состоит из двух основных частей: **неподвижной** части (**индуктора**) и **вращающейся** части (**якоря** с барабанной обмоткой).





Индуктор состоит из станины 1 цилиндрической формы, изготовленной из ферромагнитного материала, и полюсов с обмоткой возбуждения 2, закрепленных на станине. Обмотка возбуждения создает основной магнитный поток.

Магнитный поток может создаваться постоянными магнитами, укрепленными на станине.

Якорь состоит из следующих элементов: сердечника 3, обмотки 4, уложенной в пазы сердечника, коллектора 5.

Сердечник якоря для уменьшения потерь на вихревые точки набирается из изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Работа электрической машины постоянного тока в режиме двигателя.

Под действием напряжения, подведенного к якорю двигателя, в обмотке якоря появится ток $I_{\text{я}}$. При взаимодействии тока с магнитным полем индуктора возникает электромагнитный вращающий момент

$$M_{\text{эм}} = C_{\text{м}} \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi,$$

где $C_{\text{м}}$ - коэффициент, зависящий от конструкции двигателя.

В установившемся режиме электромагнитный вращающий момент $M_{\text{эм}}$ уравнивается противодействующим тормозным моментом M_2 механизма, приводимого во вращение.

$$M_{\text{эм}} = M_2$$


В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$-E = -U + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

откуда


$$U = E + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = C_e \cdot \Phi \cdot n_2 + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

Уравнение называется основным уравнением двигателя



Магнитный поток Φ зависит от тока возбуждения $I_{\text{в}}$, создаваемого в обмотке возбуждения. Частоту вращения двигателя постоянного тока n_2 можно регулировать следующими способами:

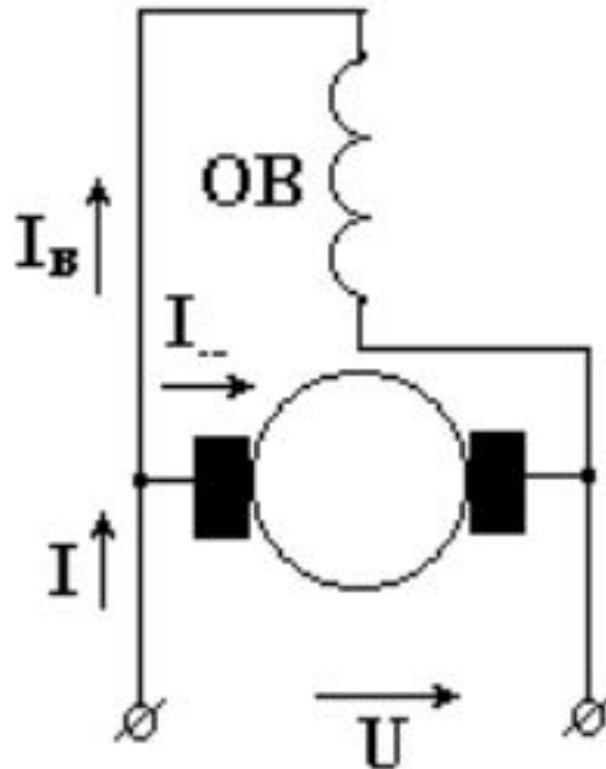
1. изменением тока возбуждения с помощью реостата в цепи обмотки возбуждения;
2. изменением напряжения U на зажимах якорной обмотки.



Чтобы изменить направление вращения двигателя на обратное (реверсировать двигатель), необходимо изменить направление тока в обмотке якоря или индуктора.

Механические характеристики электродвигателей постоянного тока.

Рассмотрим двигатель с параллельным возбуждением в установившемся режиме работы. Обмотка возбуждения подключена параллельно якорной обмотке.



$$M_{эм} = M_2 = C_M \cdot \Phi \cdot I_я$$

ОТКУД

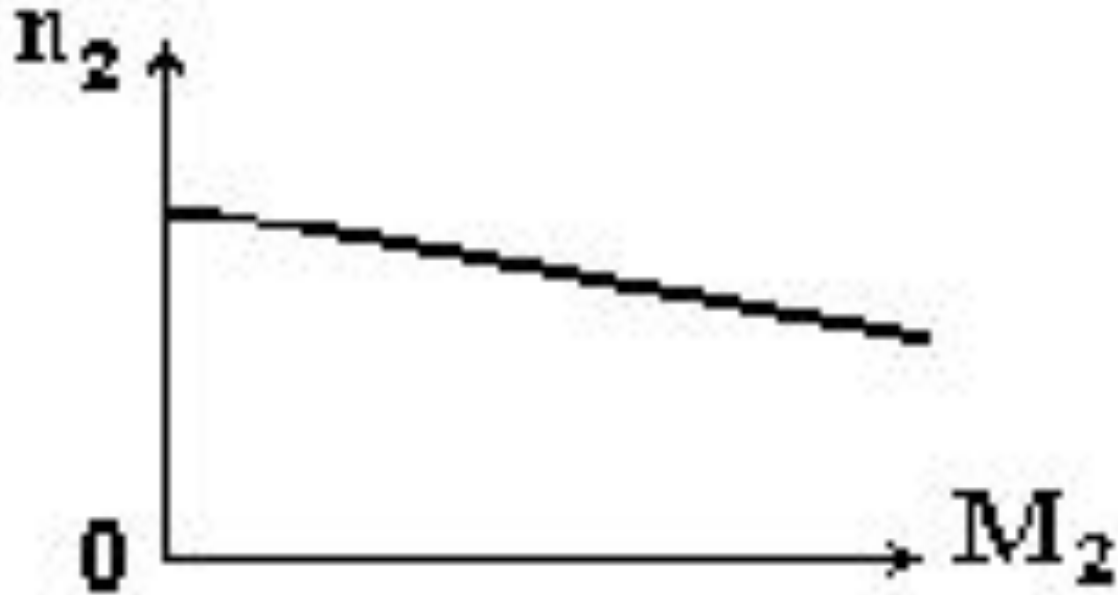
$$I_я = \frac{M_2}{C_M \cdot \Phi}$$

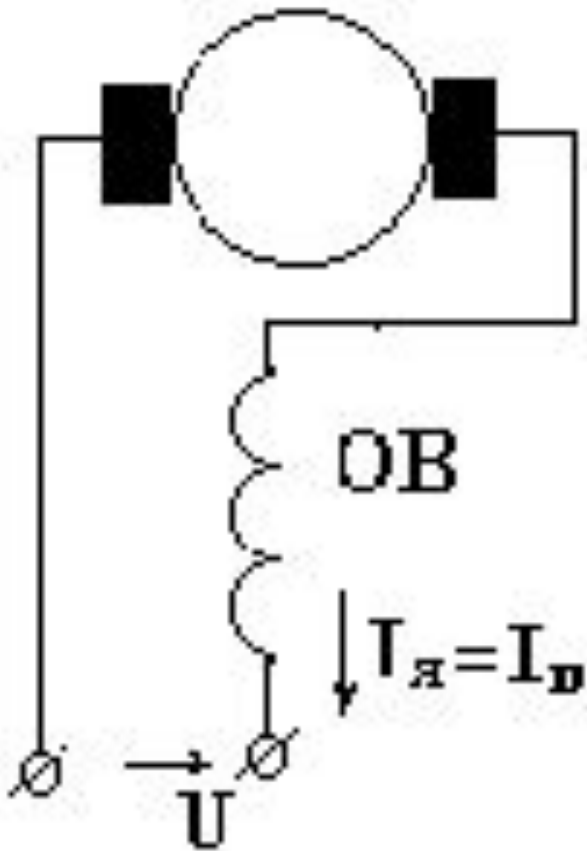
$$n_2 = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{I_я \cdot R_я}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{R_я \cdot M_2}{C_e \cdot C_M \cdot \Phi^2}$$

Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения якоря n_2 от момента на валу M_2 при $U = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$.

Уравнение является уравнением механической характеристики двигателя с параллельным

Эта характеристика является жесткой. С увеличением нагрузки частота вращения такого двигателя уменьшается в небольшой степени.





На рисунке изображен двигатель последовательного возбуждения. Якорная обмотка и обмотка возбуждения включены последовательно. Ток возбуждения двигателя одновременно является током якоря. Магнитный поток индуктора пропорционален току якоря.

$$\Phi = k \cdot I_{\text{я}}$$

где k - коэффициент пропорциональности

Момент на валу двигателя пропорционален квадрату тока якоря.

$$M_2 = C_M \cdot I_a \cdot \Phi = C_M \cdot k \cdot I_a^2$$

откуда

а


$$I_a = \sqrt{\frac{M_2}{C_M \cdot k}}$$

Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения является мягкой.



Уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения выглядит следующим образом:

$$n_2 = \frac{U \cdot \sqrt{C_M \cdot k}}{C_e \cdot k \cdot \sqrt{M_2}} - \frac{R_\Sigma}{C_e \cdot k}$$



С увеличением нагрузки скорость двигателя резко падает.


С уменьшением нагрузки на валу двигатель развивает очень большую частоту вращения.

Работа двигателя последовательного возбуждения без нагрузки недопустима.


Двигатель смешанного возбуждения имеет механическую характеристику, представляющую собой нечто среднее между механическими характеристиками двигателя параллельного и последовательного возбуждения.

Двигатели с параллельным возбуждением применяются для привода станков и различных механизмов, требующих широкой регулировки скорости.

Двигатели с последовательным возбуждением применяются в качестве тяговых двигателей электровозов, трамваев и т.д.




12. Общие сведения об электроснабжении потребителей




В системе электроснабжения объектов можно выделить три вида электроустановок:

- по производству электроэнергии — электрические станции;
- по передаче, преобразованию и распределению электроэнергии — электрические сети и подстанции;
- по потреблению электроэнергии в производственных и бытовых нуждах — приемники электроэнергии




Электрической станцией называется предприятие, на котором вырабатывается электрическая энергия. На этих станциях различные виды энергии (энергия топлива, падающей воды, ветра, атомная и др.) с помощью электрических машин, называемых генераторами, преобразуются в электрическую энергию.


В зависимости от используемого вида первичной энергии все существующие электрические станции разделяют на следующие основные группы: тепловые, гидравлические, атомные, ветряные и др.




Приемником электроэнергии называется электрическая часть производственной установки, получающая электроэнергию от источника и преобразующая ее в механическую, тепловую, световую энергию, энергию электростатического и электромагнитного полей.



Совокупность электрических станции, линий электропередачи, подстанций, тепловых сетей и приемников, объединенных общим и непрерывным процессом выработки, преобразования, распределения тепловой и электрической энергии, называется энергетической системой. Единая энергетическая система (ЕЭС) объединяет энергетические системы отдельных районов, соединяя их линиями электропередачи




Прием, преобразование и распределение электроэнергии происходят на подстанции — электроустановке, состоящей из трансформаторов или иных преобразователей электроэнергии, распределительных устройств, устройств управления, защиты, измерения и вспомогательных устройств.




Категории надежности электроснабжения, требования электроприемников потребителей к источникам энергоснабжения.

В соответствии с Правилами устройства электроустановок выделяют три категории надежности электроснабжения:


- Первая категория надежности электроснабжения;
- Вторая категория надежности электроснабжения
- Третья категория надежности электроснабжения



Потребители 1 категории надёжности электроснабжения - это электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу для безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения




Ко второй категории надёжности электроснабжения потребителей относят те электроприемники, перерыв в работе которых может привести к значительному снижению отпуска производимых потребителем товаров, имеющим место в связи с этим незанятостью персонала, простоем производственного оборудования или же может сказаться на нормальной жизнедеятельности большого количества граждан.



К третьей категории надежности электроснабжения относят все те электроприемники, которые не вошли в 1 или 2 группу. К третьей категории надежности могут относиться магазины, небольшие производственные помещения, офисные здания и т.д. Срок на которой может быть прекращено энергоснабжение потребителей 3 категории надежности - не более 24 часов подряд и не более 72 часов за год суммарно.




13. Электрическое освещение



Освещение производственных помещений и рабочих мест может быть естественным, искусственным и совмещенным.


Искусственное освещение осуществляется с помощью электрических источников света - ламп накаливания, люминесцентных или иных газоразрядных ламп.

Основными величинами, характеризующими видимый свет, являются световой поток источника света, сила света, освещенность, яркость светящейся поверхности, коэффициент отражения света.



Световой поток Φ - это мощность световой энергии, оцениваемая по световому ощущению, воспринимаемому зрительным органом человека. Единицей измерения светового потока является люмен (лм).

Об этой единице можно судить из примера, что световой поток лампы накаливания мощностью (потребляемой из электросети) 25 Вт при напряжении 220 В составляет около 200 лм.



Сила света характеризует его интенсивность в различных точках освещаемого пространства. Сила света равна отношению светового потока к телесному углу ω , в пределах которого световой поток распределен равномерно: $I = \Phi / \omega$. За единицу силы света принята *кандела* (кд), определяемая эталонным источником света.


Таким образом, люмен есть световой поток, испускаемый точечным источником света в телесном (пространственном) угле в один стерадиан (ст) при силе света в 1 кд.

Освещенность (E) - поверхностная плотность падающего на данную поверхность светового потока, измеряется в люксах (лк), т. е. $E = \Phi/S$; 1 лк равен 1 лм/м^2 .

Яркость L - световая величина, непосредственно воспринимаемая глазом, она определяется значением силы света, излучаемого с единицы площади поверхности в заданном направлении под углом α , где $L = I\rho/S$, ρ - коэффициент отражения поверхности, $\rho = \Phi_{\text{отр}}/\Phi_{\text{пад}}$, т. е. равен отношению светового потока, отраженного от поверхности, к падающему на нее световому потоку.



14. Основы электроники

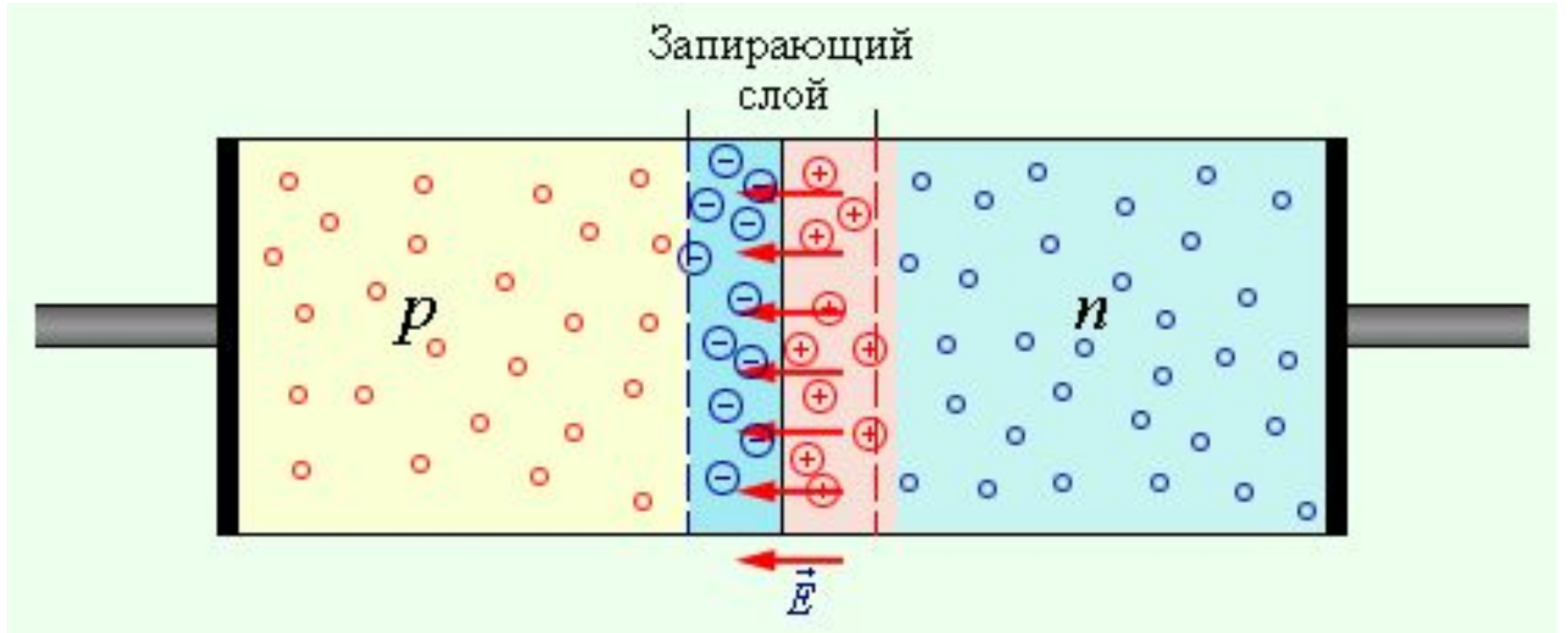


В современной электронной технике полупроводниковые приборы играют исключительную роль. За последние три десятилетия они почти полностью вытеснили электровакуумные приборы.

В любом полупроводниковом приборе имеется один или несколько электронно-дырочных переходов.


Электронно-дырочный переход (или n - p -переход) – это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

В полупроводнике n -типа основными носителями свободного заряда являются электроны; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок ($n_n \gg n_p$). В полупроводнике p -типа основными носителями являются дырки ($n_p \gg n_n$). При контакте двух полупроводников n - и p -типов начинается процесс диффузии: дырки из p -области переходят в n -область, а электроны, наоборот, из n -области в p -область.



Если полупроводник с n - p -переходом подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника соединен с n -областью, а отрицательный – с p -областью, то напряженность поля в запирающем слое возрастает. Дырки в p -области и электроны в n -области будут смещаться от n - p -перехода, увеличивая тем самым концентрации неосновных носителей в запирающем слое. Ток через n - p -переход практически не идет. Напряжение, поданное на n - p -переход в этом случае называют **обратным**.

Если n - p -переход соединить с источником так, чтобы положительный полюс источника был соединен с p -областью, а отрицательный с n -областью, то напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из p -области и электроны из n -области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать n - p -переход, создавая ток в **прямом** направлении. Сила тока через n - p -переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.




Способность n - p -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются ***полупроводниковыми диодами***.

Полупроводниковые диоды изготавливают из кристаллов кремния или германия. При их изготовлении в кристалл с каким-либо типом проводимости вплавляют примесь, обеспечивающую другой тип проводимости.



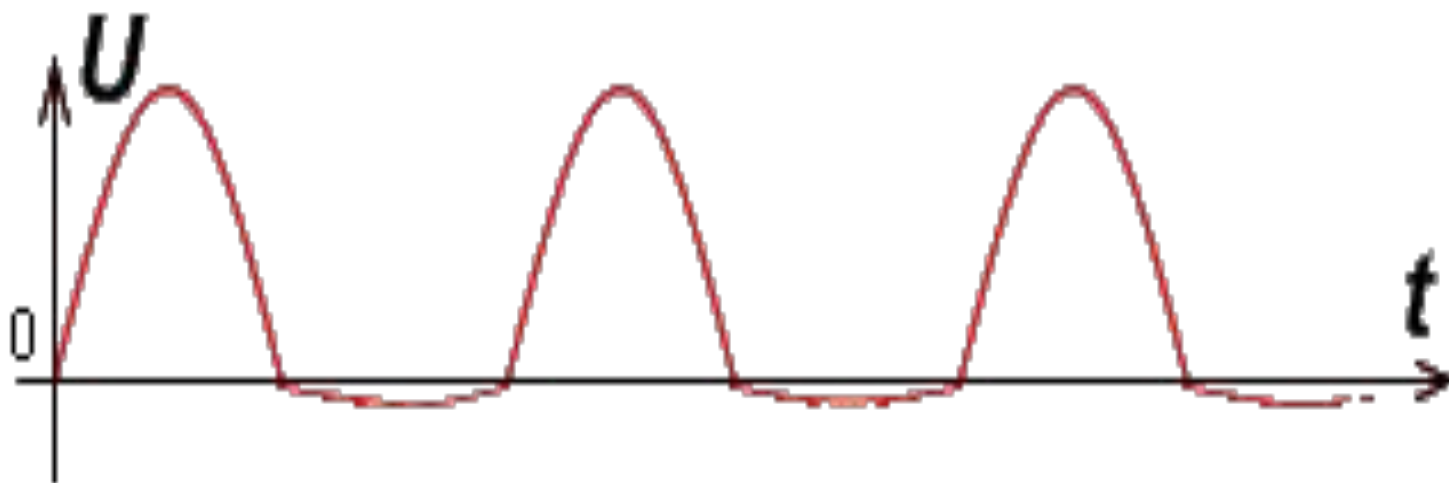
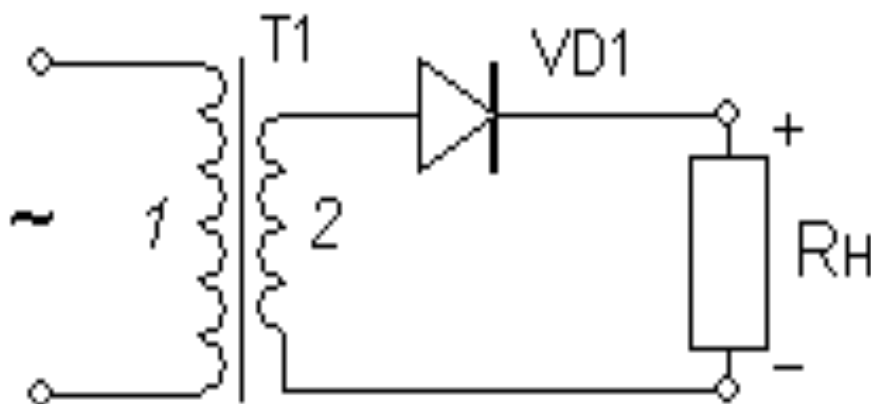
15. Полупроводниковые выпрямители




Выпрямитель электрического тока – электронная схема, предназначенная для преобразования переменного электрического тока в постоянный электрический ток.


Схемы построения выпрямителей сетевого напряжения можно поделить на однофазные и трёхфазные, однополупериодные и двухполупериодные.

На рисунке изображена схема и временная диаграмма выпрямления переменного тока однофазным однополупериодным выпрямителем.



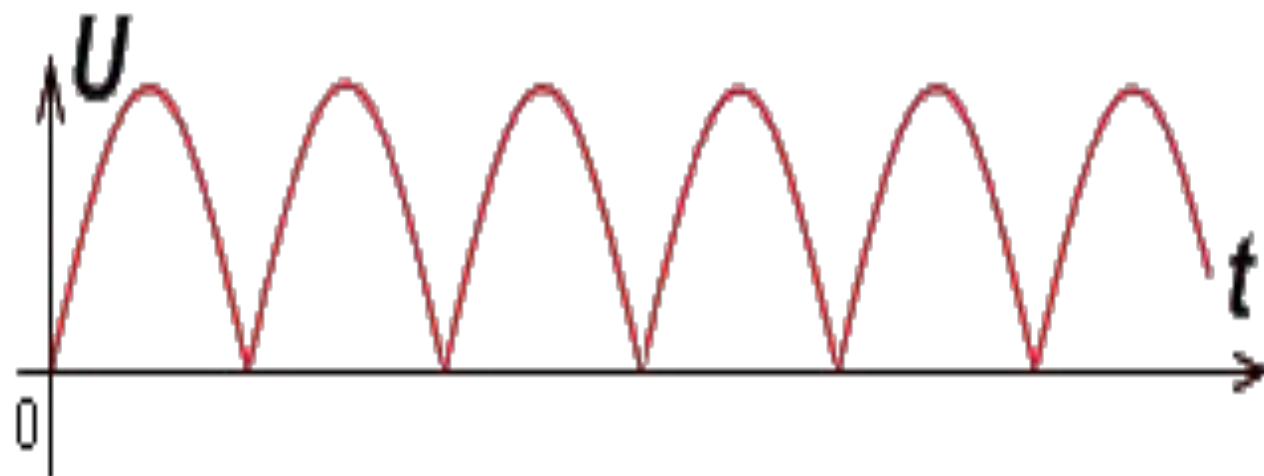
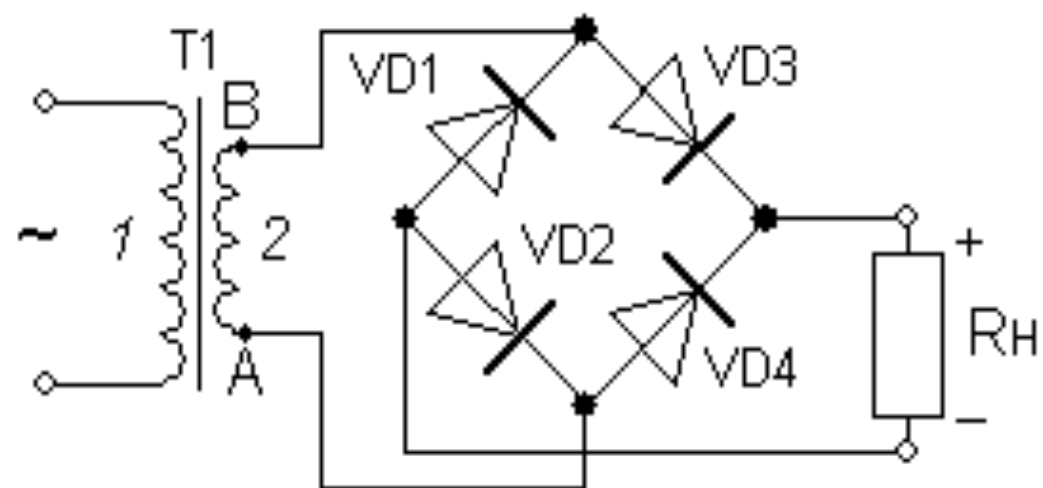


Из рисунка видно, что диод отсекает отрицательную полуволну. Если мы перевернём диод, поменяв его выводы – анод и катод местами, то на выходе окажется, что отсечена не отрицательная, а положительная полуволна.




Наиболее распространёнными являются однофазные двухполупериодные выпрямители. Существуют две схемы таких выпрямителей – мостовая схема и балансная.

Рассмотрим мостовую схему однофазного двухполупериодного выпрямителя и его работу.



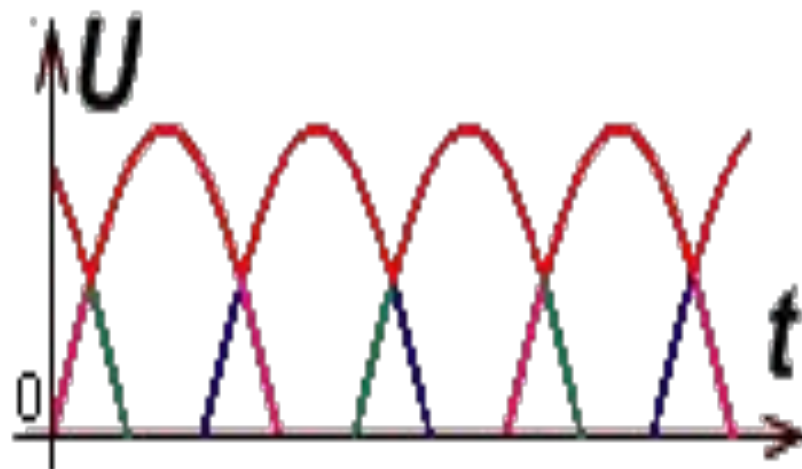
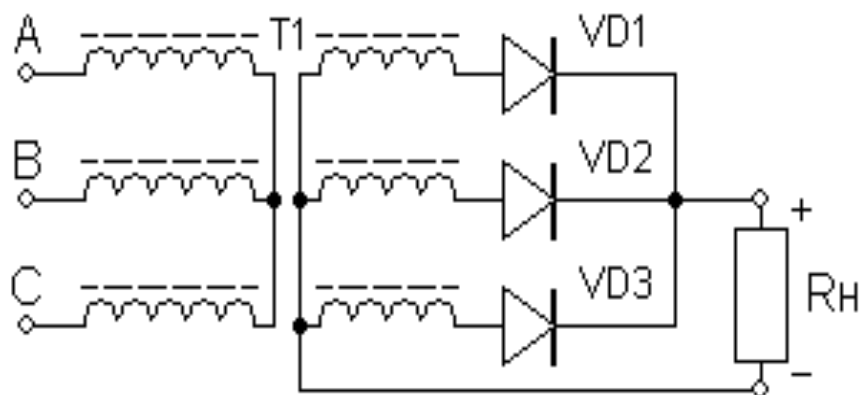
Если ток вторичной обмотки трансформатора течёт по направлению от точки «А» к точке «В», то далее от точки «В» ток течёт через диод VD3 (диод VD1 его не пропускает), нагрузку R_H , диод VD2 и возвращается в обмотку трансформатора через точку «А». Когда направление тока вторичной обмотки трансформатора меняется на противоположное, то вышедший из точки «А», ток течёт через диод VD4, нагрузку R_H , диод VD1 и возвращается в обмотку трансформатора через точку «В».


Таким образом, практически отсутствует промежуток времени, когда напряжение на выходе выпрямителя равно нулю.



Трёхфазные выпрямители обладают лучшей характеристикой выпрямления переменного тока – меньшим коэффициентом пульсаций выходного напряжения по сравнению с однофазными выпрямителями. Связано это с тем, что в трёхфазном электрическом токе синусоиды разных фаз «перекрывают» друг друга. После выпрямления такого напряжения, сложения амплитуд различных фаз не происходит, а выделяется максимальная амплитуда из значений всех трёх фаз входного напряжения.

На следующем рисунке представлена схема трёхфазного однополупериодного выпрямителя и его выходное напряжение (красным цветом), образованное на «вершинах» трёхфазного напряжения.






За счёт «перекрытия» фаз напряжения, выходное напряжение трёхфазного однополупериодного выпрямителя имеет меньшую глубину пульсации. Вторичные обмотки трансформатора могут быть использованы только по схеме подключения «звезда», с «нулевым» выводом от трансформатора.

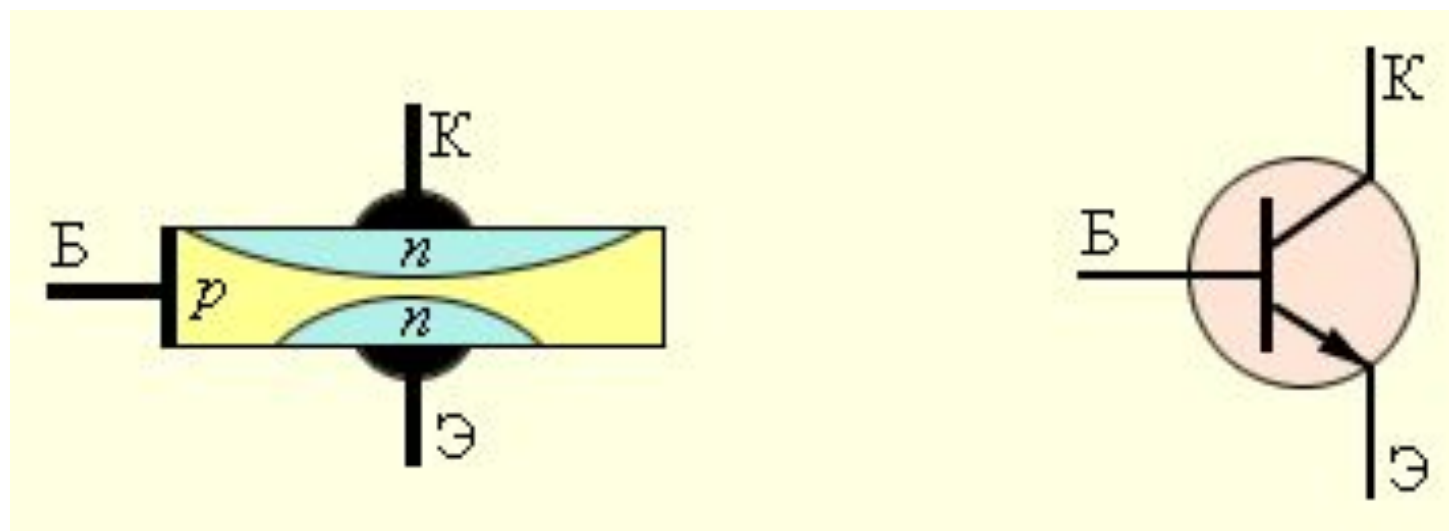
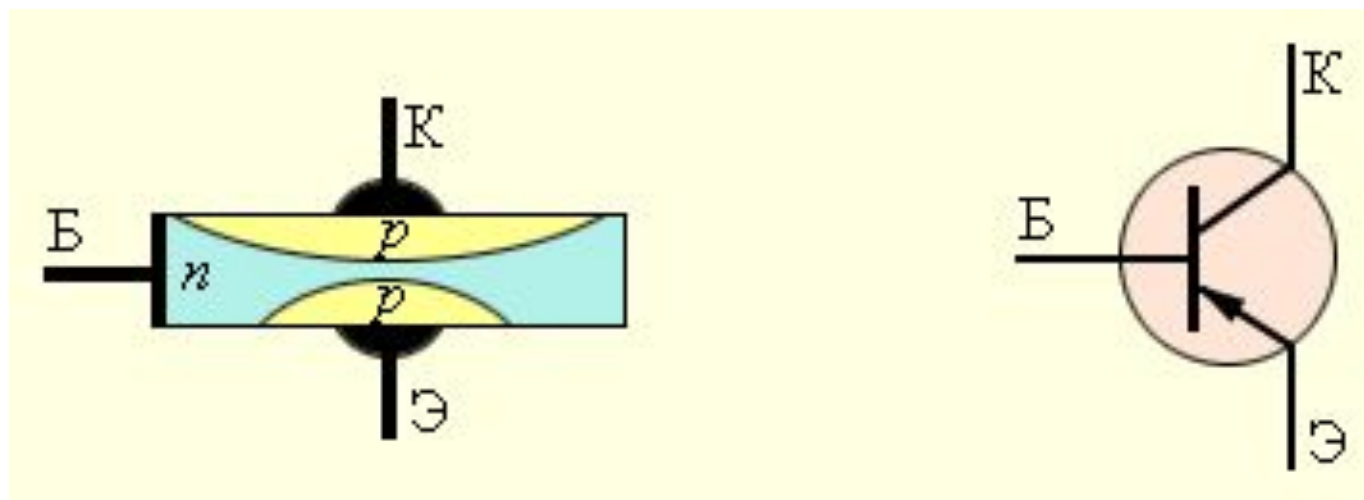



16. Транзисторы, тиристоры. Микропроцессоры



Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя n - p -переходами называются **транзисторами**. Название происходит от сочетания английских слов: transfer – переносить и resistor – сопротивление. Обычно для создания транзисторов используют германий и кремний.

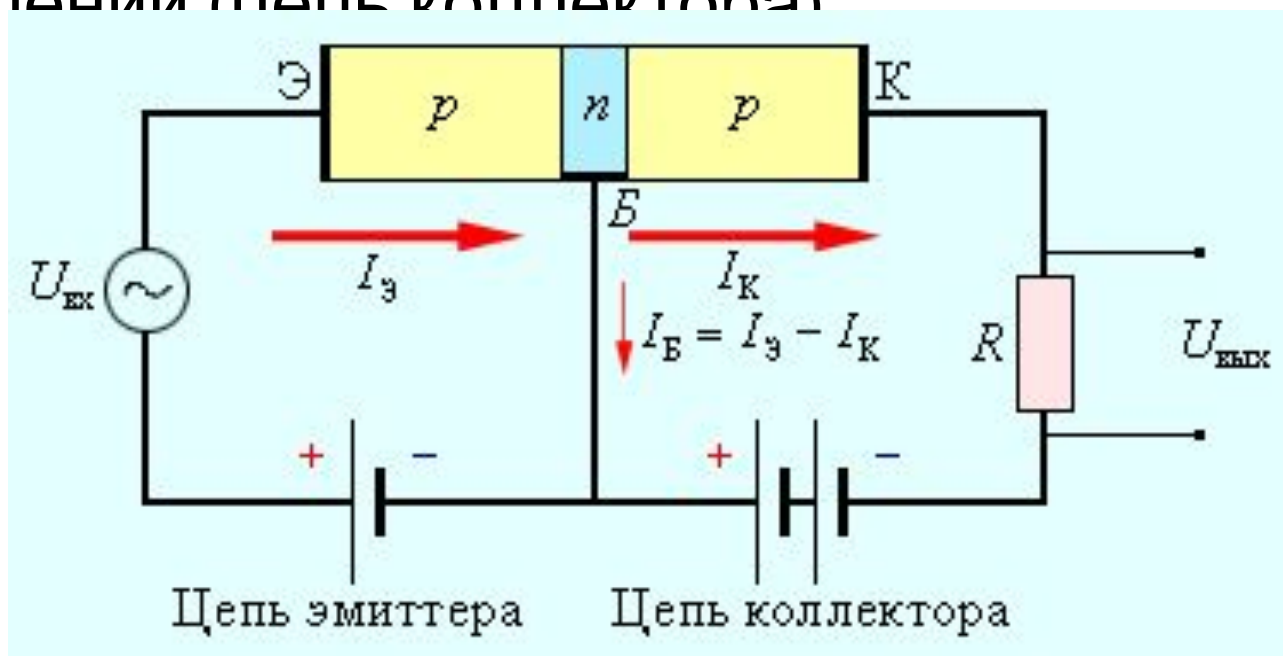
Транзисторы бывают двух типов: $p-n-p$ -транзисторы и $n-p-n$ -транзисторы. Например, германиевый транзистор $p-n-p$ -типа представляет собой небольшую пластинку из германия с донорной примесью, т. е. из полупроводника n -типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, т. е. области с дырочной проводимостью. В транзисторе $n-p-n$ -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью p -типа, а созданные на ней две области – проводимостью n -типа.






Пластинку транзистора называют **базой** (Б), одну из областей с противоположным типом проводимости – **коллектором** (К), а вторую – **эмиттером** (Э). Обычно объем коллектора превышает объем эмиттера. В условных обозначениях на схемах стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор.


Оба n - p -перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока. На рисунке показано включение в цепь транзистора p - n - p -структуры. Переход «эмиттер–база» включается в прямом (пропускном) направлении (цепь эмиттера), а переход «коллектор–база» – в запирающем направлении (цепь коллектора)






При замыкании цепи эмиттера дырки – основные носители заряда в эмиттере – переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток I_{ε} . Но для дырок, попавших в базу из эмиттера, n - p -переход в цепи коллектора открыт. Большая часть дырок захватывается полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток I_{κ} . Для того, чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора.


В настоящее время полупроводниковые приборы находят исключительно широкое применение в радиоэлектронике. Современная технология позволяет производить полупроводниковые приборы – диоды, транзисторы, полупроводниковые фотоприемники и т. д. – размером в несколько микрометров. Качественно новым этапом электронной техники явилось развитие **микроэлектроники**, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.




17. Основы цифровой электроники




Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа взаимосвязанных элементов – сверхмалых диодов, транзисторов, конденсаторов, резисторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле. Микросхема размером в 1 см^2 может содержать несколько сотен тысяч микроэлементов



Применение микросхем привело к революционным изменениям во многих областях современной электронной техники. Это особенно ярко проявилось в электронной вычислительной технике. На смену громоздким ЭВМ, содержащим десятки тысяч электронных ламп и занимавшим целые здания, пришли персональные компьютеры.



18. Электробезопасность и экономия электроэнергии.




Защитными мерами в электроустановках являются: защитное заземление или зануление, защитное отключение, электрическое разделение сети, применение малых напряжений, двойная или усиленная изоляция, применение электрозащитных средств.

Заземление и зануление в электроустановках

Требования к заземлению электроустановок изложены в Правилах устройства электроустановок. В электроустановках с изолированной нейтралью должно быть выполнено защитное заземление и должна быть предусмотрена возможность выявления и быстрого отыскания замыканий на землю. В электроустановках до 1000 В с глухозаземленной нейтралью в качестве защитной меры вместо защитного заземления применяется зануление .

В электроустановках до 1000 В в местах, где в качестве защитной меры применяются разделяющие или понижающие трансформаторы, их вторичное напряжение должно быть соответственно не более 380 и 42 В. От разделяющих трансформаторов разрешается питание только одного электроприемника с номинальным током плавкой вставки на первичной стороне не более 15 А; заземление (зануление) вторичной обмотки разделяющего трансформатора запрещается.



Заземление (зануление) электроустановок следует применять:


- при переменном напряжении 380 В и выше и постоянном напряжении 440 В и выше во всех случаях;

- при номинальных напряжениях - переменном выше 42 В и постоянном выше 110 В - только в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках.


Заземление не требуется при номинальных напряжениях - переменном до 42 В и постоянном до 110 В, за исключением взрывоопасных

Заземлению (занулению) подлежат следующие части электрооборудования;

- корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников и т. п.;
 - приводы электрических аппаратов;
 - вторичные обмотки измерительных трансформаторов;
 - каркасы распределительных щитов, щитков, шкафов и т. п.;
 - металлические конструкции распределительных устройств, кабельные конструкции, оболочки и броня, стальные трубы электропроводки, шинопроводы, короба, тросы и другие конструкции;
 - металлические оболочки кабелей и проводов при переменном напряжении до 42 В, и постоянном до 110 В, проложенные на общих металлических конструкциях, в трубах и т. п. вместе с кабелями и проводами, оболочки которых подлежат заземлению (занулению);
- металлические корпуса передвижных и переносных электроприемников, а также электрооборудование, размещенное на движущихся частях станков, машин и механизмов.




Заземлению (занулению) не подлежат корпуса электроприемников с двойной изоляцией, а также рельсовые пути (кроме крановых), выходящие за территорию электростанций, подстанций, распределительных устройств и промышленных предприятий.



Молниезащита — это комплекс технических решений и специальных приспособлений для обеспечения безопасности здания, а также имущества и людей, находящихся в нём.

Опасность для зданий (сооружений) в результате прямого удара молнии может привести к:

- повреждению здания (сооружения) и его частей;
- отказу находящихся внутри электрических и электронных частей;
- гибели и травмированию живых существ, находящихся непосредственно в здании (сооружении) или вблизи него.



Внешняя молниезащита представляет собой систему, обеспечивающую перехват молнии и отвод её в землю, тем самым, защищая здание (сооружение) от повреждения и пожара.

Существуют следующие виды внешней молниезащиты:

- молниеприемная сеть;
- натянутый молниеприемный трос;
- молниеприемный стержень.

В соответствии с вступившим в законную силу Федеральным законом РФ №261-ФЗ от 23 ноября 2009г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» энергосбережение определяется как реализация организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования.

Существуют три способа снижения объема потребления электроэнергии:

- Исключение нерационального использования электроэнергии;
- Устранение потерь электроэнергии;
- Повышение эффективности использования