



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Темы

1. Электрическое поле
2. Электрические и магнитные цепи. Общие сведения
3. Основные определения, топологические параметры и методы расчета электрических цепей
4. Анализ и расчет электрических цепей с нелинейными элементами
5. Анализ и расчет линейных цепей переменного тока.
6. Анализ и расчет магнитных цепей
7. Электромагнитные устройства и электрические машины
- 8 7. Элементная база современных электронных устройств
- 9 8. Усилители электрических сигналов
- 10 9. Функциональные устройства аналоговой электроники
1. Основы цифровой электроники
12. Источники вторичного электропитания
3. Электрические измерения и приборы

Тема 1

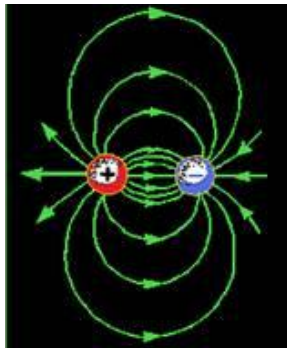
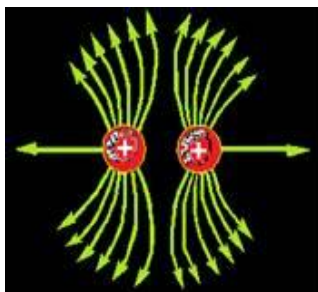
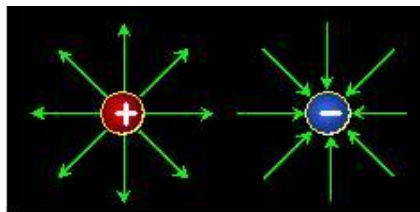
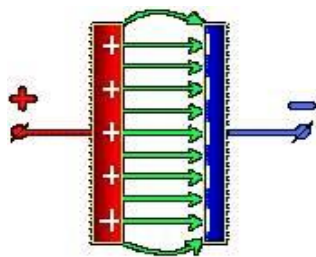
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ

ПОЛЕ

Общие сведения

Электрическое поле - особый вид материи, существующий вокруг любого электрического заряда и проявляющий себя в действии на другие заряды.

- *Поле, созданное двумя плоскими разноимённо заряженными параллельными пластинами, называется **однородным**.*
- Графически такое поле изображается параллельными прямыми линиями с одинаковым расстоянием между линиями.



Параметры электрического поля

- **1. Напряженность поля (E, единицы измерения: В/м – вольт на метр, В/см – вольт на см) - характеризует интенсивность электрического поля, т.е. его способность притягивать или отталкивать некоторый электрический заряд q , принятый за единицу. $E=F/q$ $E=U/l$**
- **2. Электрический потенциал (ϕ) характеризует энергию, запасённую в каждой точке поля (единицы измерения: В -вольт, киловольт (тысячи вольт), милливольт (тысячная вольта), микровольт (миллионная вольта).**
Электрический потенциал поля в данной точке равен работе, которую могут совершить силы этого поля при перемещении единицы заряда из этой точки за пределы поля.
- **3. Напряжение. Разность потенциалов ϕ_1 и ϕ_2 между двумя точками поля называется электрическим напряжением (U, единицы измерения: В -вольт, киловольт (тысячи вольт), милливольт (тысячная вольта), микровольт (миллионная вольта). $U=W/q$**

Закон Кулона

Два точечных заряда действуют друг на друга с силой, которая обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и прямо пропорциональна произведению их зарядов (без учета знака зарядов)

$$\vec{F}_{\text{кл}} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon r^2}$$

$\vec{F}_{\text{кл}}$ – сила Кулона

q_1 – заряд первого тела (точечного заряда)

q_2 – заряд второго тела (точечного заряда)

r – расстояние между зарядами

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \quad \text{постоянная величина}$$

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды

$$[F] = 1\text{Н} \quad [q] = 1\text{Кл} \quad [r] = 1\text{м} \quad [k] = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

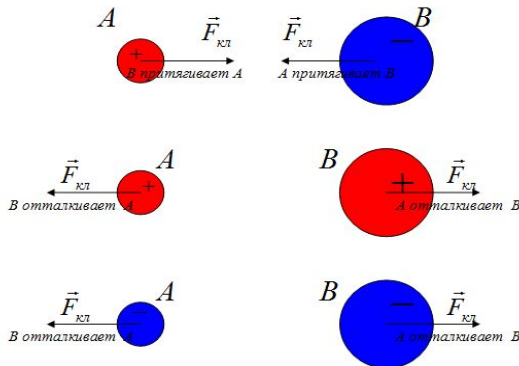
$[\epsilon]$ – безразмерная

Постоянная k определяется как

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$\pi = 3,14$

ϵ_0 – электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$



В электричестве выделяют три основных группы материалов – это проводники, полупроводники и диэлектрики.

1. Вещество, в котором присутствуют свободные носители зарядов, называют **проводником**. Движение свободных носителей называют тепловым. Основной характеристикой проводника является его сопротивление (R) или проводимость (G) – величина обратная сопротивлению.

2. **Диэлектриками** называют вещества, которые не проводят ток, или проводят, но очень плохо. В них нет свободных носителей зарядов, потому что связь частиц атома достаточно сильная, для образования свободных носителей, поэтому под воздействием электрического поля тока в диэлектрике не возникает.

3. **Полупроводник** проводит электрический ток, но не так как металлы, а при соблюдении определенных условий – сообщении веществу энергии в нужных количествах.

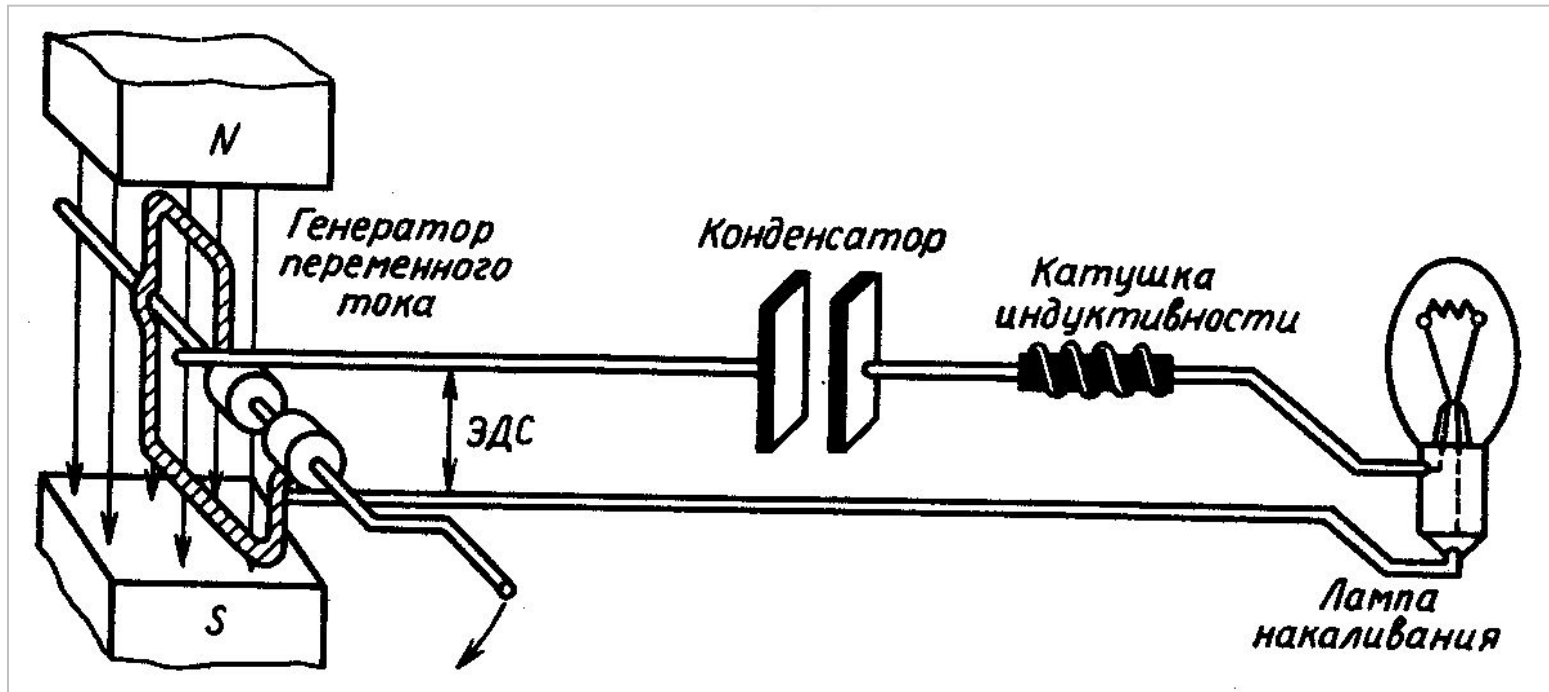
Тема 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ***Общие сведения***

Электрической цепью

**называется совокупность
соединенных между собой
проводящих тел, полупроводниковых
и диэлектрических устройств,
электромагнитные процессы в которой
могут быть описаны с помощью понятий
об электрическом токе и напряжении**

Пример электрической цепи



Схема

Для учета процессов преобразования электромагнитной энергии в цепях вводятся *идеализированные элементы*, процессы в которых связаны лишь с одним видом энергии поля.

Элементы цепи рассматриваются как математические модели, связывающие токи и напряжения.



Активные элементы –
источники электрической энергии,
в которых неэлектрические виды энергии
преобразуются в электрическую.

Различают два основных активных элемента:

источник напряжения (ЭДС)

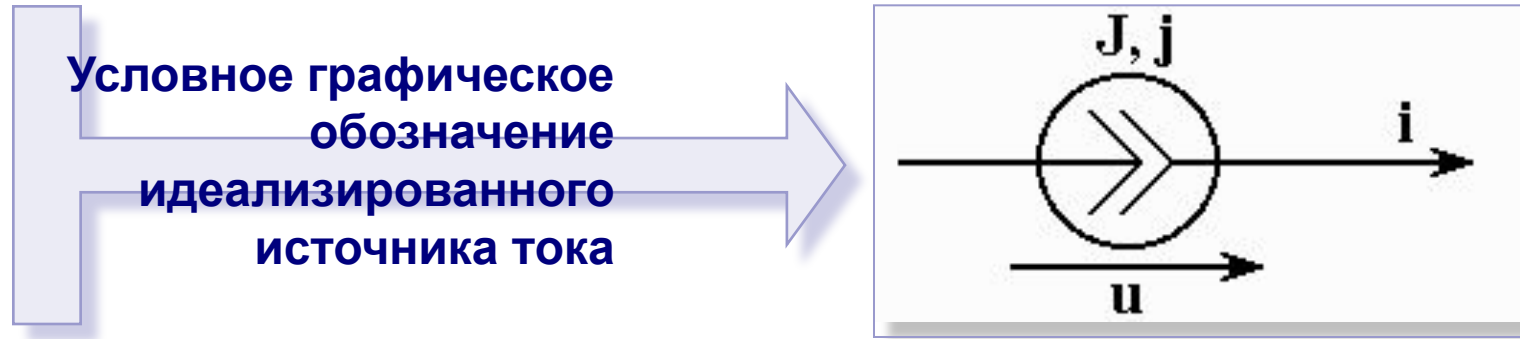
источник тока

Пассивные элементы –

приемники электромагнитной энергии. Электрическая энергия в них преобразуется в неэлектрические виды энергии – активное сопротивление (*проводимость*), либо накапливается в виде энергии электрического поля (*емкость*) или энергии магнитного поля (*индуктивность*).

**Емкость и индуктивность являются
реактивными приемниками энергии
или
*реактивными элементами.***

Источник тока



Идеализированным источником тока

называют элемент цепи, который создает заданный ток $j(t)$ независимо от напряжения на его полюсах.

Единица измерения – **ампер** (А).

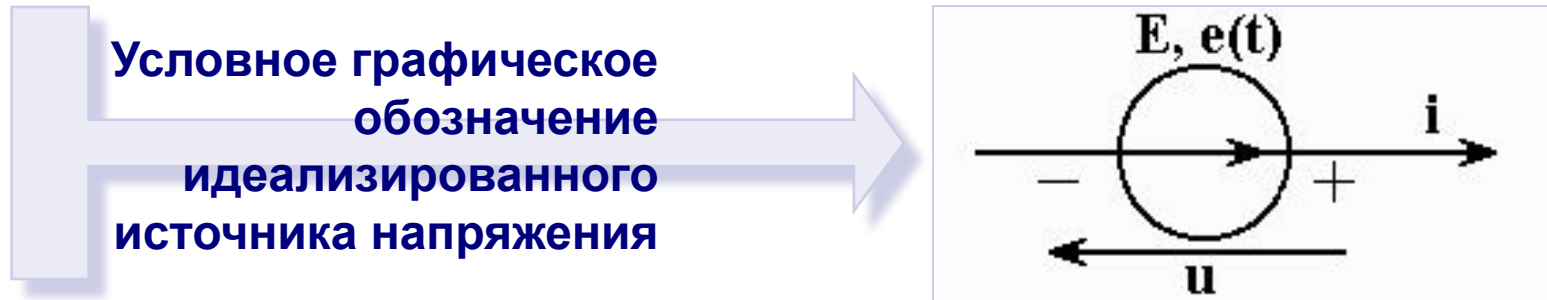
Напряжение на элементе определяется величиной сопротивления

$u = ir$ и принимает любое значение.

Ток в элементе не зависит от величины сопротивления: $i = j$.

Активные элементы

Источник напряжения (ЭДС)



Идеализированным источником напряжения

называют элемент цепи, который создает на своих зажимах напряжение $u(t) = e(t)$ независимо от того, какой ток протекает через источник. Единица измерения – **вольт** (В).

Напряжение на элементе не зависит от величины сопротивления: $e = u$.

Ток в элементе $i = u/r$ и принимает любое значение.

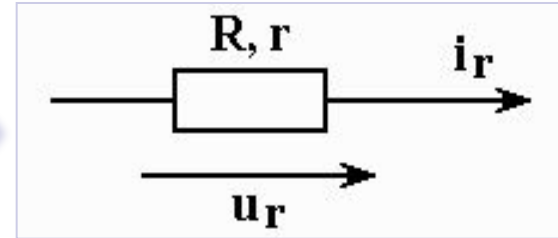
Источник напряжения характеризует внесенную в цепь энергию извне, поэтому он называется также

источником электродвижущей силы.

Пассивные элементы

Активное сопротивление

Условное графическое
обозначение
активного сопротивления



Величина R называется *сопротивлением*.

Единица измерения – *ом (Ом)*.

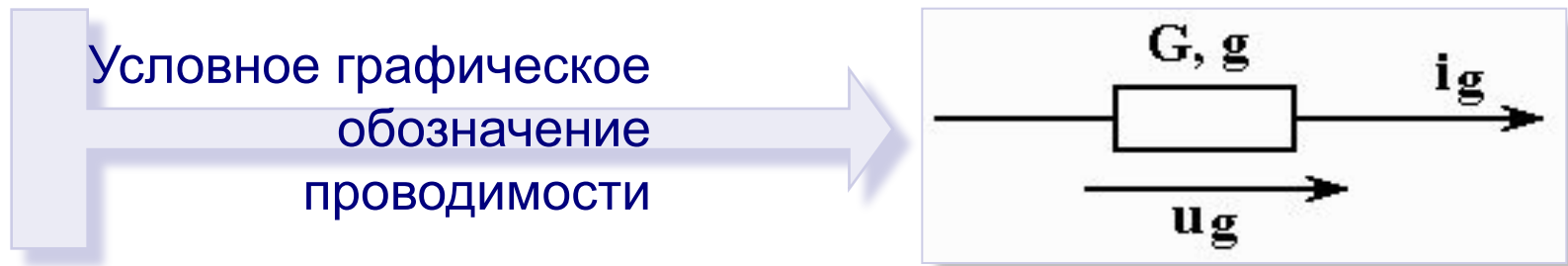
Кратные единицы измерения активного
сопротивления,

наиболее часто встречающиеся в практике:

килоом (кОм), $1 \text{ кОм} = 1 \cdot 10^3 \text{ Ом}$;

мегаом (МОм), $1 \text{ МОм} = 1 \cdot 10^6 \text{ Ом}$.

Проводимость



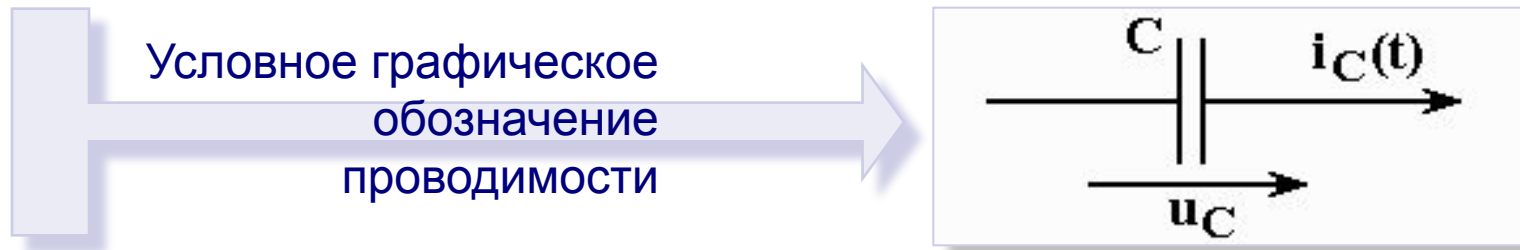
Проводимостью называется величина, обратная сопротивлению:

$$G = 1/R.$$

Единица измерения – **сименс** (См).

Пассивные элементы

Емкость



Величина C называется **емкостью**.

Единица измерения – **фарада** (Ф).

Кратные единицы измерения емкости, наиболее часто встречающиеся в практике:

пикафарада (пФ), $1 \text{ пФ} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$;

нанофарада (нФ), $1 \text{ нФ} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$;

микрофарада (мкФ), $1 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

Пассивные элементы

Индуктивность



Величина L называется *индуктивностью*.


Единица измерения – *генри* (Гн).

Кратные единицы измерения индуктивности, наиболее часто встречающиеся в практике:

миллигенри (мГн), $1 \text{ мГн} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

В реальных электрических цепях:

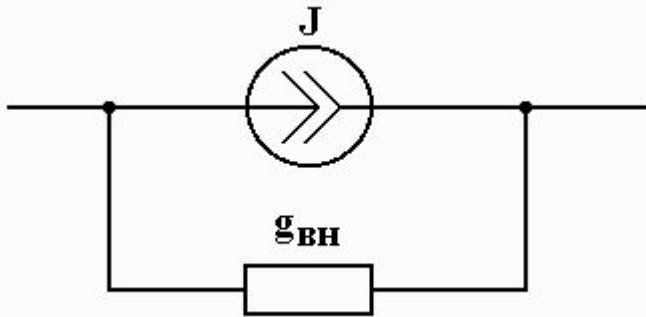
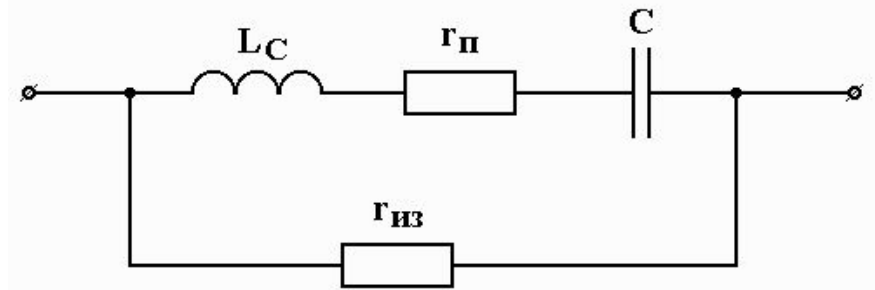
- 1) заданное сопротивление обычно обеспечивают включением специального изделия, называемого **резистором**;
- 2) заданную емкость – включением специального изделия, называемого **конденсатором**;
- 3) заданную индуктивность – включением катушек и просто проводников.



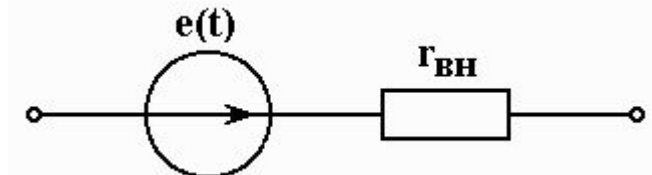
В отличие от идеализированных элементов реальные элементы электрических цепей характеризуются множеством параметров, часть которых опять же можно смоделировать с помощью эквивалентных **электрических схем (схем замещения)**, составленных из идеализированных элементов.

Электрическая схема – графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов и способы их соединения

Эквивалентная схема конденсатора:
 C – емкость



Эквивалентная схема источника
напряжения: $e(t)$ – электродвижущая
сила (ЭДС); $г_{вн}$ – внутреннее
сопротивление источника



Эквивалентная схема источника тока:
 $г_{вн}$ – внутренняя проводимость
источника тока

Элемент электрической цепи, параметры которого не зависят от тока в нем, называют **линейным**, в противном случае – **нелинейным**.

**Линейная
электрическая
цепь –**

*цепь, все элементы
которой являются
линейными*

**Нелинейная
электрическая
цепь –**

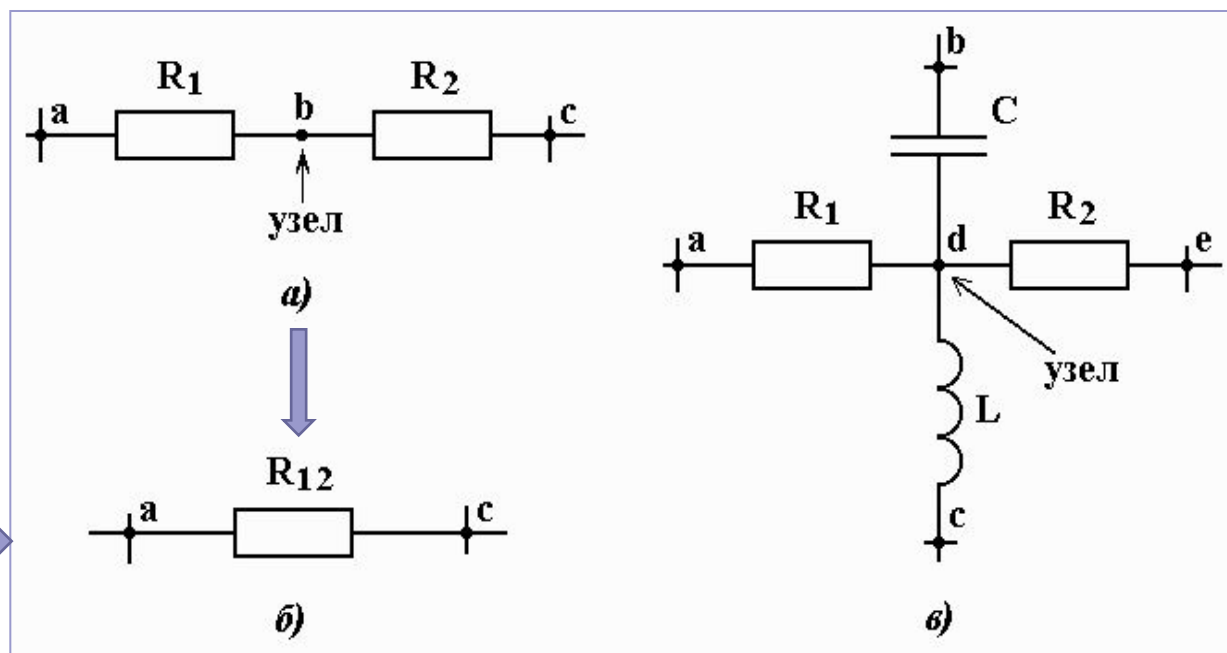
*цепь, содержащая
хотя бы один
нелинейный
элемент*

В общем случае все цепи являются нелинейными, но в ряде случаев нелинейностью можно пренебречь с удовлетворительной точностью моделирования.

На настоящем этапе мы будем изучать линейные электрические цепи.

Точка, в которой соединяются два или более элемента электрической цепи, называется **узлом**

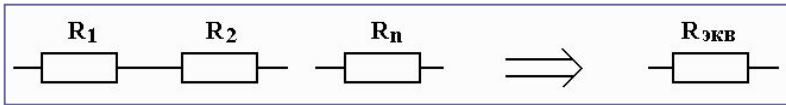
Если в узле соединены только два элемента (а), то их можно объединить по правилам последовательного соединения и представить в виде одного более сложного элемента (б).



Узел b поэтому называется **устранимым узлом**.

ПРАВИЛА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ

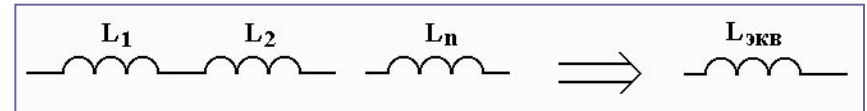
- Последовательное соединение активных сопротивлений



определяется по формуле:

$$R_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n R_i$$

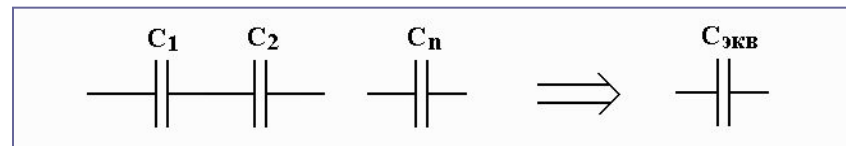
- Последовательное соединение индуктивностей без учета взаимной индукции



определяется по формуле:

$$L_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n L_i$$

- Последовательное соединение емкостей



определяется по формуле:

$$C_{\text{экв}} = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

Для $n = 2$:

$$C_{\text{экв}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Тема 3

**ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ,
ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ
ПАРАМЕТРЫ И МЕТОДЫ
РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Закон Ома для участка цепи (ветви с сопротивлением R или проводимостью G)

Ток в электрической цепи
прямопропорционален приложенному напряжению
и обратнопропорционален ее сопротивлению

*Эту закономерность можно выразить
следующими формулами:*

$$I = U/R$$

$$U = RI$$

$$R = U/I$$

$$I = UG$$

$$U = I/G$$

$$G = I/U$$

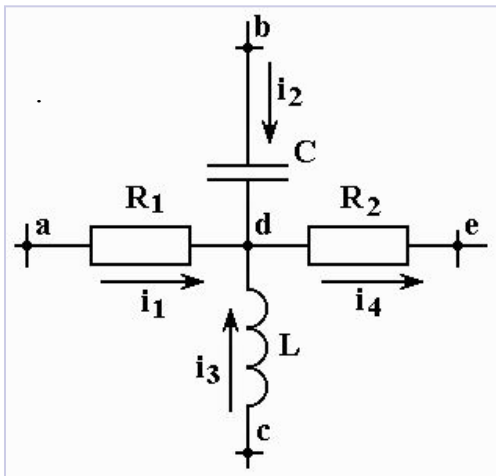
Первый закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

Ток, втекающий в узел, полагают положительным, а вытекающий – отрицательным

Для узла на схеме



$$i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0$$

Другая формулировка первого закона Кирхгофа:

*сумма втекающих в узел токов равна
сумме вытекающих токов,*

то есть

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_4$$

Второй закон Кирхгофа

Контур – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям.
Для контура выполняется второй закон Кирхгофа:

*Алгебраическая сумма ЭДС в ветвях контура
равна алгебраической сумме падений напряжений на элементах контура с
учетом выбранного направления обхода:*

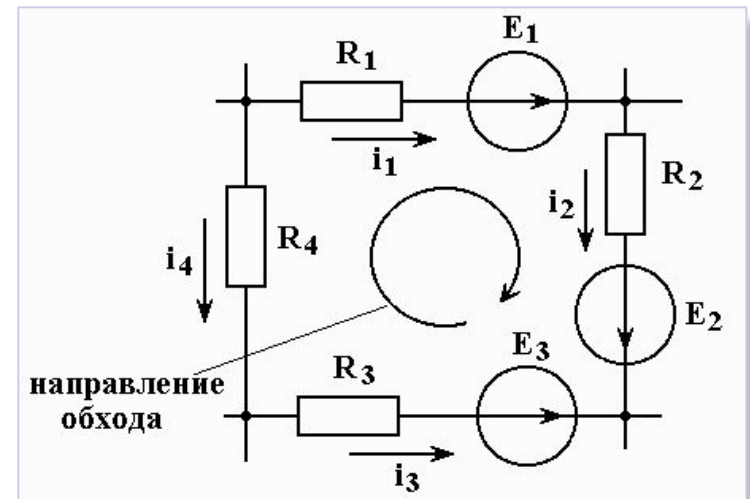
$$\sum_{i=1}^m e_i = \sum_{i=1}^k u_i$$

где **m** – количество источников ЭДС в ветвях контура;
k – количество элементов в ветвях контура.

Для контура, приведенного справа, уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа, имеет следующий вид:

$$E_1 + E_2 - E_3 = I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4$$

Используя законы Ома и Кирхгофа можно
рассчитать любую электрическую цепь



Тема 4

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменный ток — электрический ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению или, в частном случае, изменяется по величине, сохраняя своё направление в электрической цепи неизменным

Условное обозначение на электроприборах:

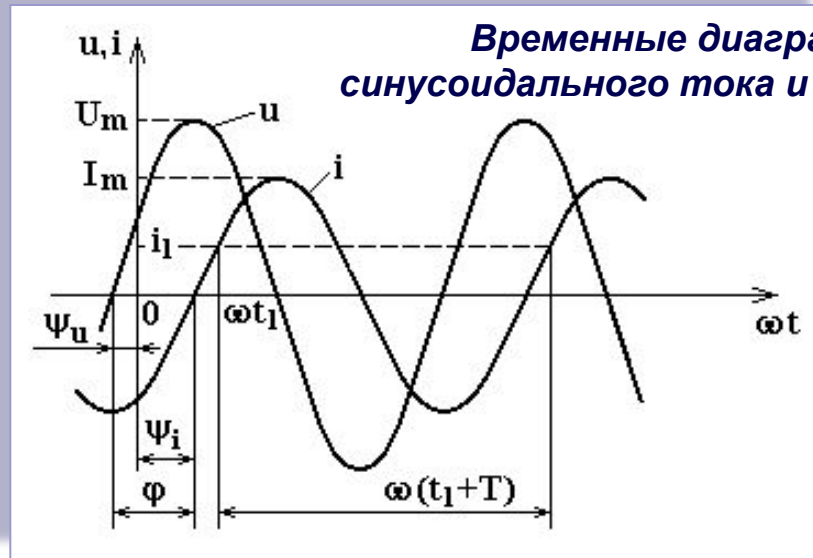
или (знак синусоиды), или латинскими буквами *АС*.

Величина переменного тока, соответствующая данному моменту времени, называется **мгновенным значением** переменного тока.

Максимальное мгновенное значение переменного тока, которое он достигает в процессе своего изменения, называется **амплитудой тока**

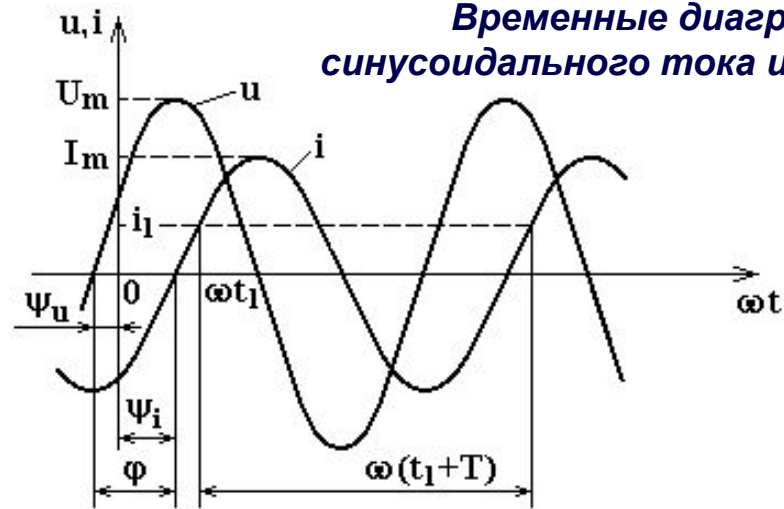
$$I_m$$

**Временные диаграммы
синусоидального тока и напряжения**



Период T , с – промежуток времени, по истечении которого синусоидальный ток (напряжение, ЭДС) принимает одно и то же значение

**Временные диаграммы
синусоидального тока и напряжения**

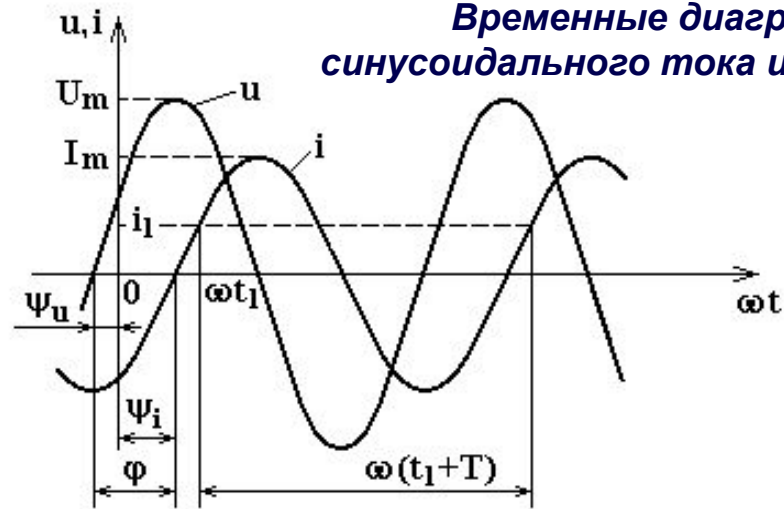


Частота f , Гц – число полных изменений периодической величины в течение одной секунды:

$$f = 1/T$$

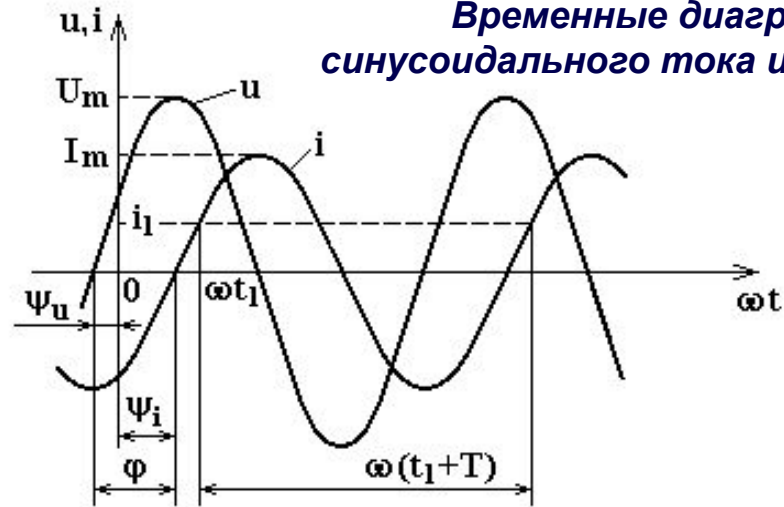
где 1 – целое число.

*Временные диаграммы
синусоидального тока и напряжения*



Амплитуда (I_m, U_m, E_m) – наибольшее значение синусоидальной величины.

**Временные диаграммы
синусоидального тока и напряжения**



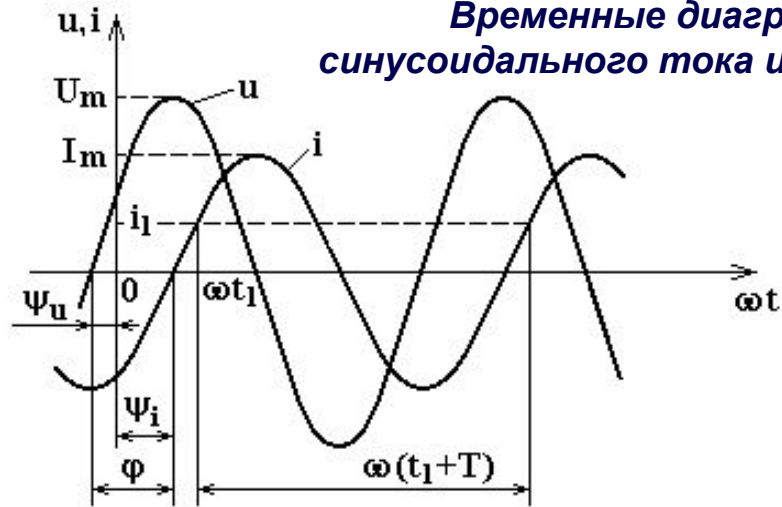
Фаза (полная фаза) α , рад – аргумент синусоидальной величины, например, для тока:

$$\alpha = (\omega t + \psi_i) ,$$

$$i = I_m \sin \alpha$$

Начальная фаза ψ , рад – значение фазы в момент времени $t = 0$.

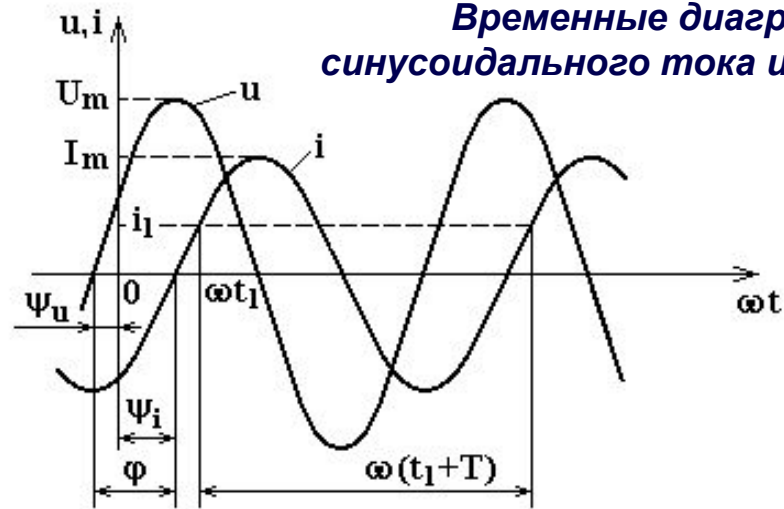
**Временные диаграммы
синусоидального тока и напряжения**



Угловая частота ω , рад/с – скорость изменения фазы:

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

*Временные диаграммы
синусоидального тока и напряжения*



Сдвиг фаз ϕ , рад – разность фаз двух синусоидальных величин. Например, сдвиг фаз между напряжением и током:

$$\phi_0 = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i$$

**Действующие значения
тока, напряжения и ЭДС не зависят от времени
и являются эквивалентными некоторым
постоянным току I , напряжению U и ЭДС E ,
которые производят в электрической цепи
такую же работу, что и переменные ток i ,
напряжение u и ЭДС e за одинаковый
промежуток времени.**

Тема 5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Трансформатор –

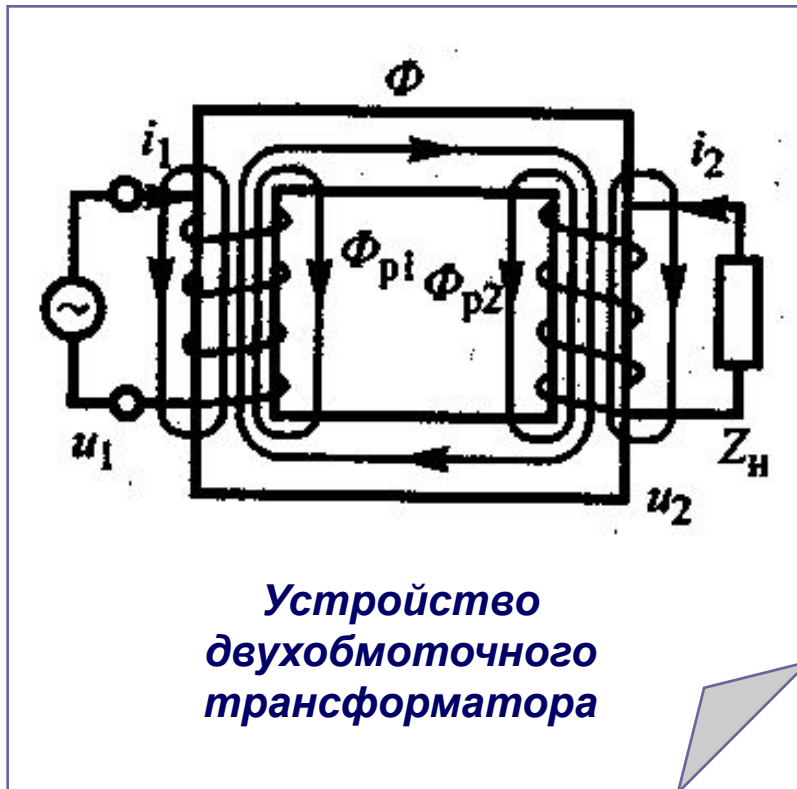
это электромагнитный аппарат, который преобразует электрическую энергию переменного тока, имеющую одни величины, в электрическую энергию с другими величинами.

В трансформаторе преобразуются напряжение, ток и начальная фаза.

Неизменной остается частота тока.

Простейший трансформатор имеет магнитопровод (сердечник) и обмотки.

По количеству обмоток различают трансформаторы *двухобмоточные* и *многообмоточные*.



Обмотка с количеством витков w_1 , к зажимам которой подводится напряжение, называется ***первичной***.

На зажимы ***вторичной*** обмотки включается потребитель Z_n .

Важной характеристикой трансформатора является

коэффициент трансформации,

который в обычном случае определяется как отношение высшего напряжения к низшему в режиме холостого (нерабочего) хода.

$$K_{\text{т}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Коэффициент трансформации для понижающего трансформатора:

Из этого следует, что трансформатор снижает напряжение и во столько же раз повышает ток (и наоборот)

Нерабочий (холостой) ход

Нерабочим ходом (режимом холостого хода)

называется режим, при котором вторичная цепь трансформатора разомкнута (нагрузка отключена), т.е.

$$Z_H = \infty, \quad I_2 = 0$$

Уравнение трансформатора в режиме холостого хода:

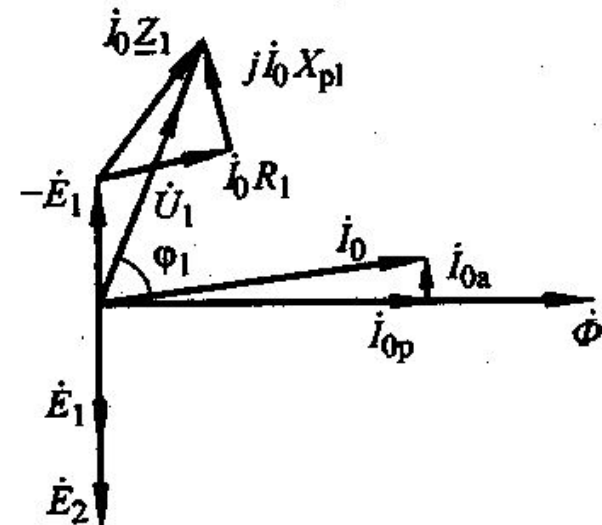
$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_0 R_1 + j \underline{I}_0 X_{p1}$$

Полное внутреннее сопротивление первичной обмотки:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{p1}$$

Уравнение первичной цепи в окончательном виде:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_0 \underline{Z}_1$$



Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

Режим нагрузки

Режим нагрузки осуществляется, когда на вторичную обмотку включена нагрузка Z_n .

Уравнение первичной цепи:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1$$

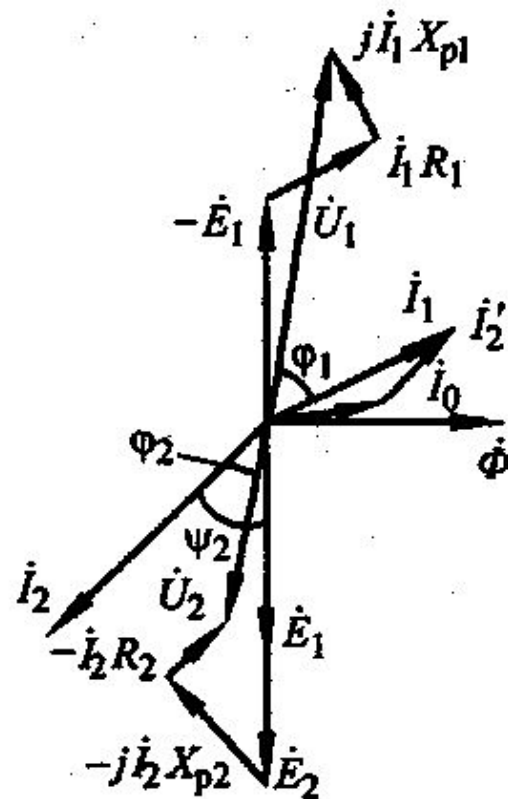
Уравнение вторичной цепи:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2$$

В режиме нагрузки вторичное напряжение U_2 незначительно зависит от тока нагрузки. Эта зависимость ($U_2=f(I_2)$) называется внешней характеристикой



Режим нагрузки



**Векторная диаграмма
нагруженного трансформатора**

Режим короткого замыкания

Режим короткого замыкания –

это аварийный режим работы трансформатора. В режиме короткого замыкания напряжение первичной обмотки равно номинальному, а сопротивление нагрузки равно нулю.

В аварийном режиме короткого замыкания устанавливаются большие токи короткого замыкания в обмотках. Эти значения так велики, что приводят к выходу из строя обмотки трансформатора.

Реальный, идеализированный и приведенный трансформаторы

Реальный трансформатор имеет обмотки, расположенные на сердечнике. Обмотки имеют как активное сопротивление, так и сопротивление рассеяния, т.е., кроме основного магнитного потока, пронизывающего обе обмотки, существуют потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток

Идеализированный трансформатор – это трансформатор, в котором отсутствуют магнитные потоки рассеяния, а активные сопротивления обмоток равны нулю. Эти понятия используют для упрощенных исследований процессов

Приведенный трансформатор – эквивалентный реальному трансформатору, у которого коэффициент трансформации равен единице (количество витков вторичной обмотки равно количеству витков первичной обмотки). Для замещения реального трансформатора приведенным нужно выдержать принципы эквивалентности энергетического состояния. Приведенные электрические величины обозначаются штрихами.

Уравнения приведенного трансформатора –

это уравнения электрической цепи с двумя смежными контурами, составленными по законам Кирхгофа.

Уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа (для узла электрической цепи):

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_2'$$

Уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа, для замкнутого контура с идеальными элементами:

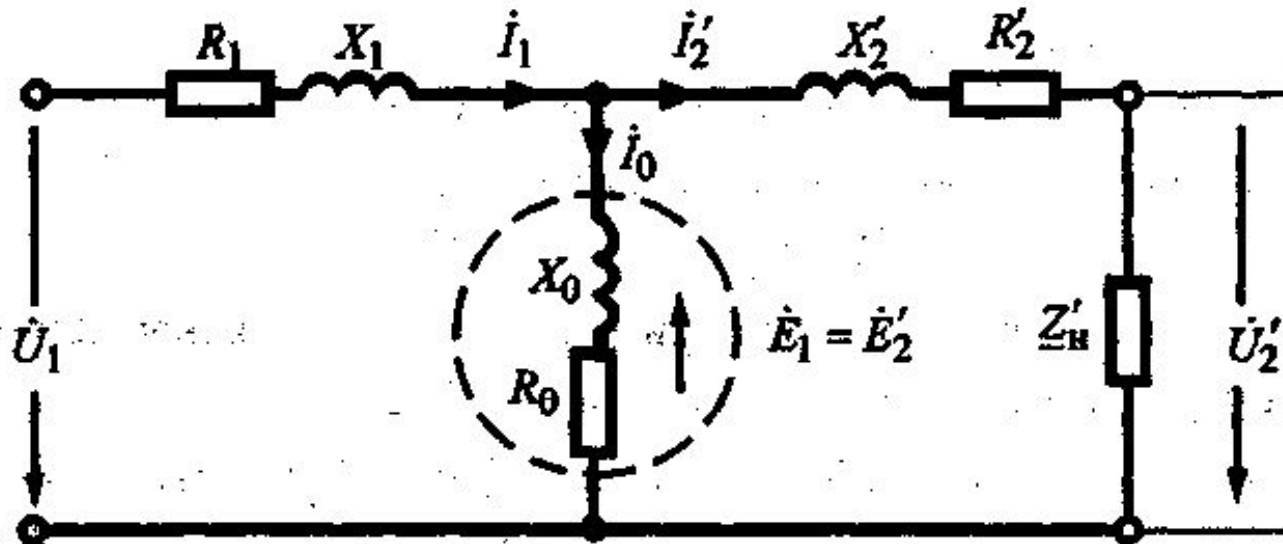
$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_0 R_1 + j \underline{I}_0 X_{p1}$$

$$\underline{U}_2' = \underline{E}_2' - \underline{I}_2' R_2' - j \underline{I}_2' X_2'$$

Внутренне сопротивление общего для смежных контуров элемента, индуцирующего ЭДС (обеспечивает протекание в нем тока холостого хода):

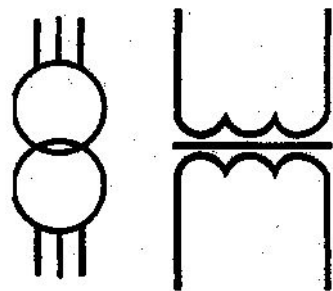
$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$$

**Схема замещения трансформатора,
отвечающая уравнениям приведенного трансформатора**

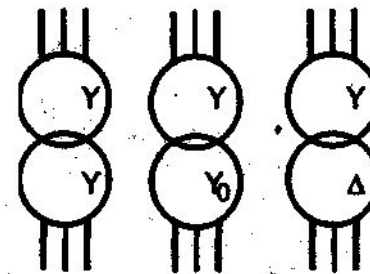


Изображение трансформаторов на электрических схемах


Стандартом предусмотрены три способа условных графических обозначений трансформаторов: *упрощенный однолинейный*;
упрощенный многолинейный;
развернутый.



Упрощенное многолинейное изображение трехфазного трансформатора и развернутое обозначение однофазного трансформатора с сердечником



Обозначения трансформаторов с различным соединением обмоток



Электрические машины переменного тока

Асинхронная машина —

это машина переменного тока,
в которой возбуждается вращающееся магнитное поле.

Ротор вращается асинхронно, т.е. со скоростью,
отличающейся от скорости вращения поля.

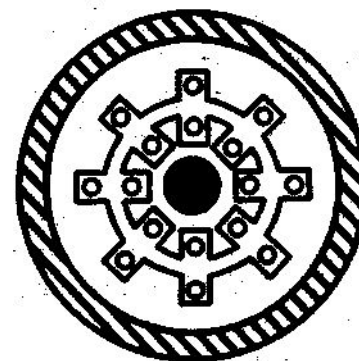
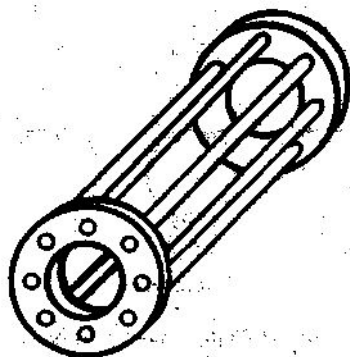
Асинхронные машины принципиально могут быть генераторами или двигателями. Характеристики асинхронных двигателей очень высоки, и они широко применяются в технике. Асинхронные генераторы практически не используются, так как имеют очень низкие эксплуатационные качества.

Асинхронная машина состоит из **статора** и **ротора**.

Статор имеет шихтованный сердечник, в пазах которого расположена трехфазная обмотка. В простейшем случае она состоит из трех катушек, которые сдвинуты одна относительно другой на 120° .

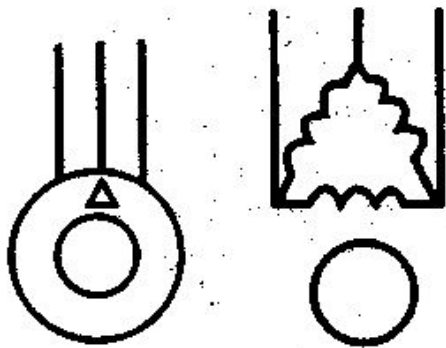
Ротор бывает двух типов: **короткозамкнутый** и **фазный**.

Короткозамкнутый ротор имеет шихтованный цилиндр с пазами. В пазы укладываются стержни, замкнутые электрически с двух сторон кольцами. Эти кольца и стержни называют «беличьим колесом» (рисунок ниже)

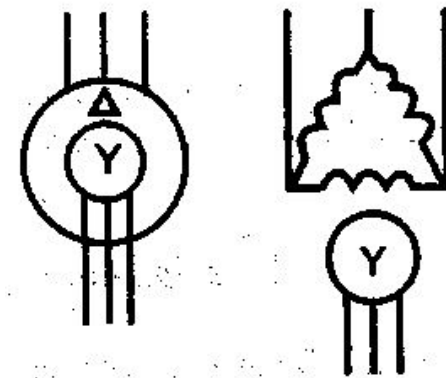


На рисунке выше показано устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Поскольку на роторе нет коллекторного узла, ротор не имеет скользящих контактов, двигатель очень прост в обслуживании, надежен в работе, дешев, легок и экономичен. Это двигатель основного исполнения.

Условные графические обозначения асинхронных машин



*Упрощенное и развернутое
графические изображения
короткозамкнутого
асинхронного двигателя*



*Упрощенное и развернутое
обозначения асинхронной
машины с фазным ротором*

Синхронные машины

Как и все электрические машины, синхронная машина обратима и может широко использоваться в промышленности как генератор и двигатель преимущественно большой мощности.

Синхронные машины относятся к классу машин трехфазного переменного тока. Частота вращения ротора синхронной машины равна частоте вращающегося магнитного поля.

Синхронная машина состоит из статора и ротора

Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит, обмотка которого питается от источника постоянного тока.

Ротор синхронной машины бывает двух типов:
явнополюсный и **неявнополюсный**

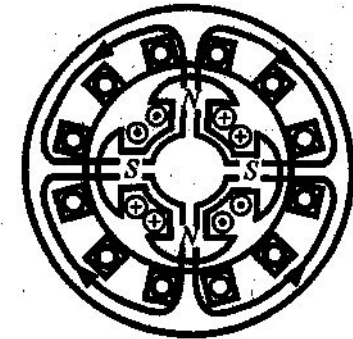
Явнополюсный ротор

используется большей частью в тихоходных синхронных машинах.

Обмотка ротора присоединяется к контактными кольцам и с помощью щеток на нее подается постоянное напряжение. В машинах с большой

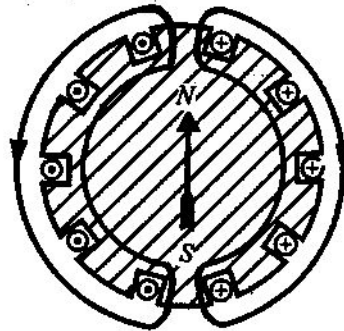
скоростью вращения

(турбогенераторах, газогенераторах) применяется неявнополюсный ротор.



**Схема
явнополюсного
ротора**

На рисунке ниже приведена схема неявнополюсного ротора с одной парой полюсов.



В многополюсных роторах полюсы чередуются по кругу. Обмотка ротора возбуждает постоянный магнитный поток и называется обмоткой возбуждения.

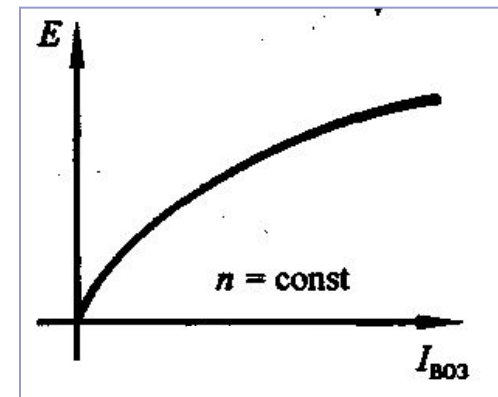
В **генераторном режиме** обмотка возбуждения включается на постоянное напряжение.

В **режиме двигателя**, кроме постоянного напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения, подается также трехфазное синусоидальное напряжение на обмотку статора. Обмотка возбуждает вращающееся магнитное поле, которое захватывает в синхронном вращении поле ротора и сам ротор.

Холостой ход синхронного генератора

Холостой ход (или нерабочий режим) осуществляется при отключенной нагрузке. Ток статора в этом случае равен нулю. Ток возбуждения регулируется внешним источником в широких пределах.

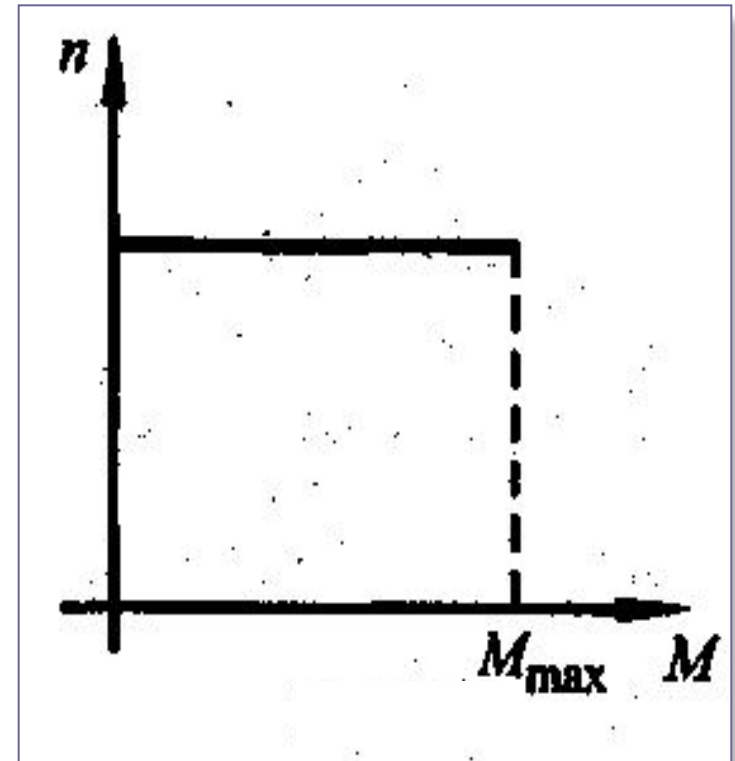
Характеристика нерабочего (холостого) хода представляет собой магнитную характеристику системы и напоминает кривую намагничивания.



Форма ЭДС статорной обмотки зависит от формы магнитного потока в цепи статора. Специальной формой полюсных наконечников можно получить синусоидальную ЭДС статорной обмотки.

Характеристики синхронных двигателей

Основным преимуществом синхронного двигателя перед двигателями других типов является **абсолютно жесткая механическая характеристика** (см. рис. справа), т. е. ротор вращается со скоростью вращающегося магнитного поля, возбуждаемого статором. Скорость вращения поля не зависит от момента сопротивления. Если сопротивление больше максимального, ротор останавливается.

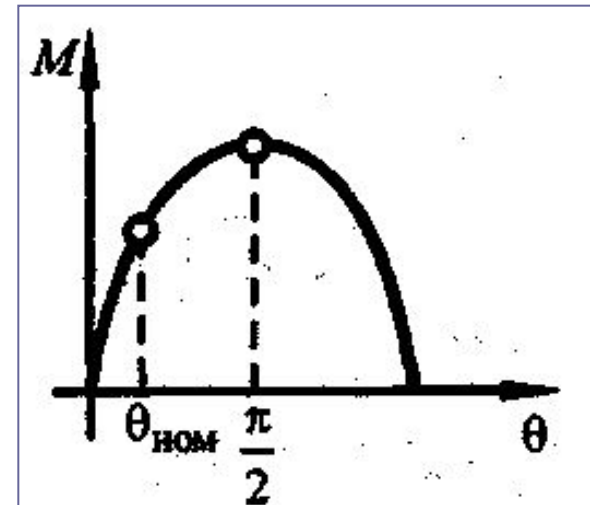


Характеристики синхронных двигателей

Полюсы статора и ротора вращаются с одинаковой скоростью. Но между осями этих полюсов есть некоторое угловое смещение. Это смещение зависит от момента сопротивления.

Зависимость электромагнитного момента от угла между осями полюсов статора и ротора называется **угловой характеристикой двигателя** (см. рис. справа).

Момент имеет положительные значения в пределах $0 < \theta < \pi$, но устойчивый режим работы может быть только на участке $0 < \theta < \pi/2$. Обычно $\theta_{\text{ном}} = (20...30)^\circ$.

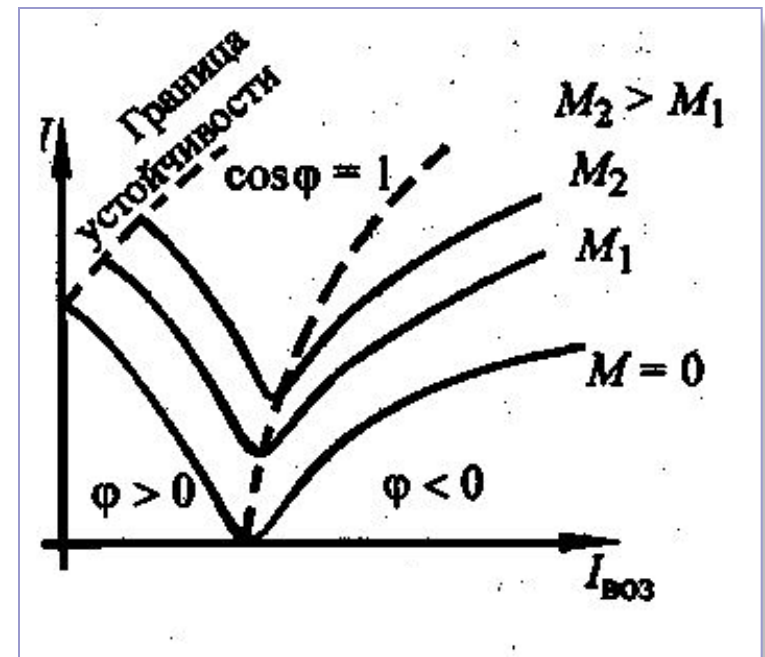


Синхронные двигатели используют там, где требуются стабильная скорость вращения, экономичность. Бесконтактные микродвигатели с однофазной и трехфазной обмотками статора применяют в программных механизмах, электрочасах, звуковой аппаратуре и др.

Характеристики синхронных двигателей

U-образной характеристикой синхронного двигателя

называется зависимость тока якоря от тока возбуждения при постоянном тормозящем моменте. Как и у генератора, минимальный ток обеспечивается при коэффициенте мощности $\cos\phi = 1$ (см. рис. справа)). При $\phi > 0$ ток ограничивается областью неустойчивой работы двигателя ($\theta > \pi/2$), а при $\phi < 0$ - магнитным насыщением сердечника.

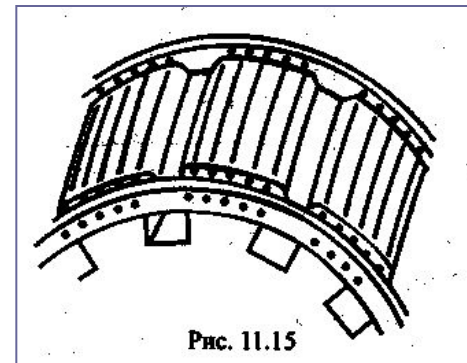


Пуск синхронного двигателя

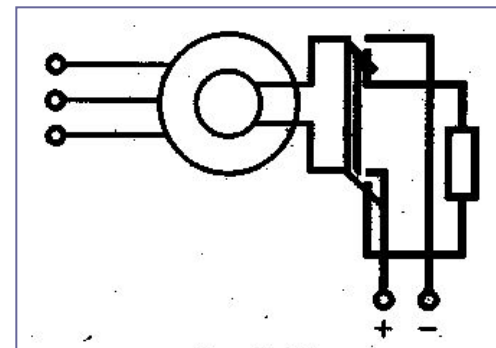
При включении двигателя механическая инерция ротора велика и вращающий момент на валу практически равен нулю. Поэтому для пуска нужно раскрутить вал двигателя до скорости, близкой к синхронной.

Сложный пуск в значительной мере ограничивает использование синхронного двигателя.

Для пуска синхронного двигателя укладывают короткозамкнутую обмотку («беличье колесо») в полюса ротора (рис. справа).



Стержни обмотки соединяются кольцами. При пуске обмотка возбуждения замыкается на пусковое сопротивление, как показано на рис. справа.



После включения обмотки статора в сеть образуется вращающееся магнитное поле, которое индуцирует ток в «беличьем колесе» и создает асинхронный пусковой момент. Чтобы увеличить пусковой момент, иногда используют клетку с глубоким пазом или двойную «беличью клетку». Это повышает пусковой момент до 0,8... 1,0 А/н. Когда скольжение достигает примерно 5%, обмотка возбуждения отключается от сопротивления и включается на источник постоянного тока.

Если обмотку возбуждения на время пуска оставить разомкнутой, то индуцируемая в ней большая ЭДС, приведет к пробое изоляции. После асинхронного разгона ротора и включения обмотки возбуждения возникает синхронный вращающий момент.

Действие этого момента переводит двигатель в режим синхронной работы. Мощные синхронные двигатели пускают при сниженном напряжении на статорной обмотке.

Преимущества и недостатки синхронной машины

Преимущества синхронных машин:

- высокие КПД и коэффициент мощности;
- абсолютно жесткая механическая характеристика двигателя;
- независимость частоты ЭДС генератора от нагрузки машины.

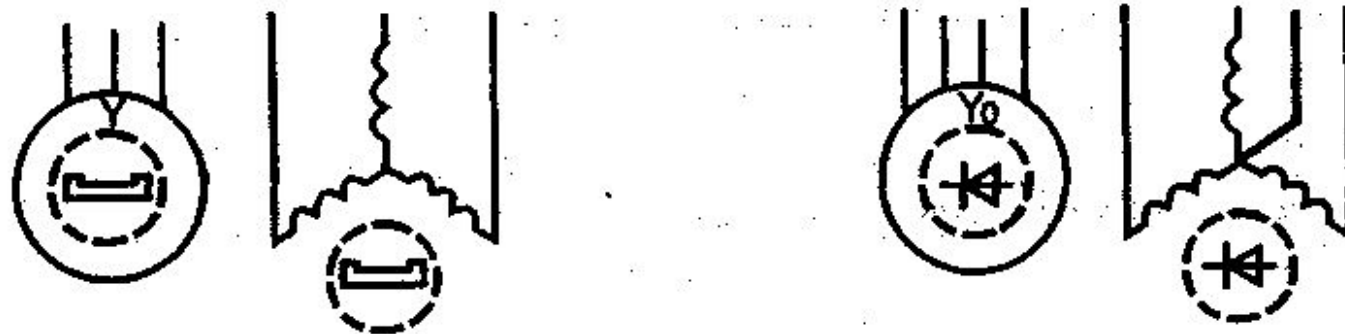
Недостатки синхронных машин:

- сложная конструкция;
- необходимость использования двух источников напряжения (переменного трехфазного и постоянного) для двигателя;
- затруднения с пуском двигателя.

Графические обозначения синхронных машин



Графические обозначения синхронных машин (пунктирной окружностью обозначают явнополюсный ротор)



Графическое обозначение трехфазной синхронной машины с вращающимся выпрямителем

Графическое обозначение синхронной машины, которая возбуждается постоянными магнитами