

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО “ОГУ имени И. С. Тургенева”

Институт приборостроения автоматизации и информационных технологий

Кафедра ”Электрооборудование и электросбережение”

## РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

На тему ”Нелинейные цепи”

По дисциплине “Электротехническое и конструкционное материаловедение”

Выполнил студент Андреев Егор Сергеевич

Шифр 13.03.02 Группа 81-ЭЭ № зачётной книги 180886

Подпись

Проверил к. т. н., доцент Филина Анна Владимировна

Отметка о зачёте \_\_\_\_\_ Дата сдачи

Подпись

Орёл, 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО “ОГУ имени И. С. Тургенева”

Институт приборостроения автоматизации и информационных технологий

Кафедра ”Электрооборудование и электросбережение”

## РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

На тему ”Нелинейные цепи”

По дисциплине “Электротехническое и конструкционное материаловедение”

Выполнил студент Андреев Егор Сергеевич

Шифр 13.03.02 Группа 81-ЭЭ № зачётной книги 180886

Подпись

Проверил к. т. н., доцент Филина Анна Владимировна

Отметка о зачёте \_\_\_\_\_ Дата сдачи

Подпись

Орёл, 2018

# 1. Нелинейные элементы, их характеристики и параметры

В теории линейных цепей предполагалось, что параметры всех элементов цепи являются постоянными величинами, не зависящих от токов и напряжений. Каждому идеальному элементу цепи приписывалось определенное значение его параметра: резистору - сопротивление  $R$ , катушке  $K$  индуктивность  $L$ , конденсатору - емкость  $C$ . Физические характеристики таких элементов ( $u= Ri$  - для резистора,  $\psi = Li$  - для катушки,  $q=Cu$  - для конденсатора) описываются уравнением прямой линии  $y = ax$ , поэтому такие элементы получили общее название линейных, а электрические цепи, состоящие из таких элементов, также называются линейными.

Идеальных линейных элементов в природе не существует. В действительности параметры всех элементов в той или иной мере зависят от их физического состояния, т.е. от тока, напряжения, температуры. Если эта зависимость выражена незначительно, то ею при расчете цепей пренебрегают и элементы считают линейными.



Однако существует обширный класс элементов электрических цепей, параметры которых существенно зависят от тока и напряжения и эту зависимость необходимо учитывать при расчете электрических цепей. Такие элементы получили название нелинейных, так как их физические характеристики не могут быть описаны уравнением прямой линии. Таким элементам нельзя придать определенное значение параметра сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$ . С целью отличия нелинейных элементов от линейных на электрических схемах на обозначение элемента наносится дополнительный знак “ключка”.

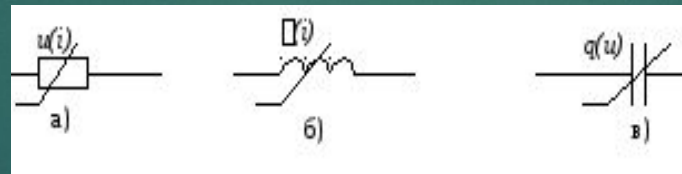


Рис. 1 - Пример обозначения нелинейных элементов

При расчете электрических цепей нелинейные элементы задаются их физическими характеристиками в исследуемом диапазоне значений физических параметров. Эти характеристики получили следующие названия:

- ▶ а) для нелинейного резистора  $u=f(i)$  или  $i=f(u)$  - вольт-амперная характеристика или сокращенно ВАХ;
- ▶ б) для нелинейной катушки  $K=f(i)$  или  $i=f(\psi)$  - вебер-амперная характеристика или сокращенно ВАХ;
- ▶ в) для нелинейного конденсатора  $q=f(u)$  или  $u=f(q)$  - кулон-вольтная характеристика или сокращенно КВХ.

Физические характеристики нелинейных элементов могут быть заданы тремя способами:

- ▶ 1) графической диаграммой функции  $y=f(x)$  с указанием масштабов физических величин по координатным осям, например, для нелинейного резистора ВАХ  $u=f(i)$

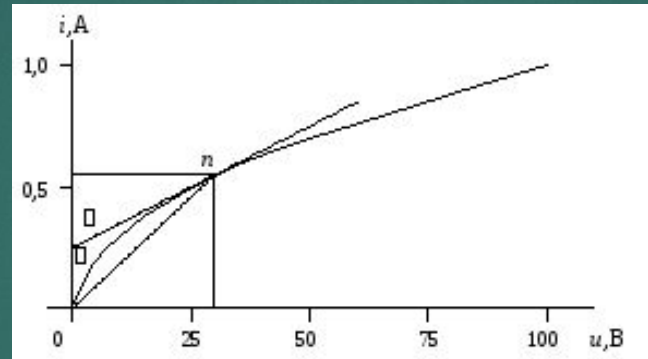


Рис. 2 - Графическая диаграмма функции  $y=f(x)$

- 2) таблицей координат точек функции  $y=f(x)$  в исследуемом диапазоне значений физических величин, например, для нелинейного резистора ВАХ  $u=f(i)$

Таблица 1 - таблица координат точек функции  $u=f(i)$

$i, A$	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
$u, B$	9	25	49	64	81	100	121



3) в виде нелинейного математического уравнения  $y=f(x)$ , которое приближенно описывает функцию в исследуемом диапазоне значений физических величин, например, для нелинейного резистора ВАХ  $u=f(i)$  задана уравнением  $u = 100i^2$

Для каждой точки характеристики нелинейного элемента могут быть определены статические и дифференциальные параметры. Для рассматриваемого примера нелинейного резистора в каждой точке характеристики  $u=f(i)$  могут быть определены статическое и дифференциальное сопротивления:

$$R_{ст} = \frac{u}{i} = \frac{m_u}{m_i} * tga$$
$$R_d = \frac{du}{di} = \frac{m_u}{m_i} * tgb$$



Ниже приводятся графические диаграммы ВАХ некоторых нелинейных элементов, наиболее часто встречающихся в цепях электроэнергетики (рис. 3 а, б, в, г).

На рис. 3 а представлена графическая диаграмма ВА  $i=f(u)$  для лампы накаливания. Характерная особенность ВАХ: увеличение  $R_{ст}$  с ростом тока, что объясняется зависимостью сопротивления металлов от температуры. Для ламп накаливания  $R_{гор}/R_{хол} \approx 10$

На рис. 3, б представлена графическая диаграмма ВАХ  $i=f(u)$  тиритового (вилитового) элемента разрядника. Характерная особенность ВАХ: уменьшение  $R_{ст}$  с ростом тока. Элементы такого типа используются в разрядниках для гашения дуги.

На рис. 3, в представлена графическая диаграмма ВАХ  $i=f(u)$  электрической дуги. Характерная особенность ВАХ - падающая форма с отрицательным значением дифференциального сопротивления ( $R_d < 0$ ).

На рис. 3, г представлена графическая диаграмма ВАХ  $i=f(u)$  полупроводникового диода. ВАХ имеет ярко выраженную несимметричную форму в положительной и отрицательной областях, при этом  $R_{\text{п}} \ll R_{\text{о}}$ . Элементы такого типа применяются для преобразования переменного тока в постоянный.

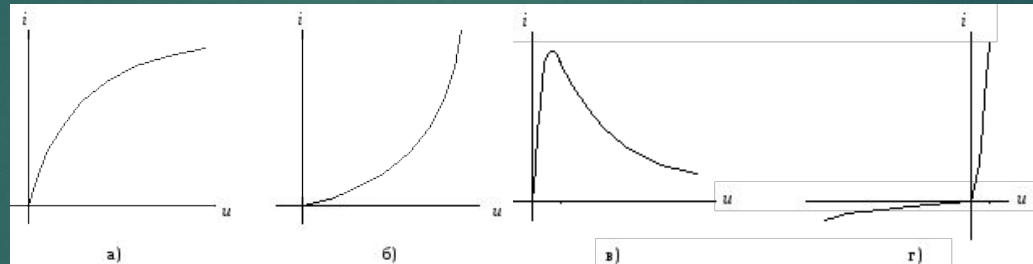


Рис. 3 - Графические диаграммы ВАХ

**В нелинейных цепях могут возникать особые процессы, которые в принципе невозможны в линейных цепях.** Многообразием таких процессов объясняется широкое применение устройств на нелинейных элементах в различных областях современной техники.

Перечислим некоторые явления, имеющие место в нелинейных цепях, которые находят практическое применение в электроэнергетике:

1. преобразование переменного тока в постоянный или выпрямление;
2. преобразование постоянного тока в переменный произвольной частоты или инвертирование;
3. преобразование переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты;
4. стабилизация режимных параметров (напряжения или тока) на некоторых участках цепи при изменении этих параметров на других участках;
5. трансформация постоянного тока и напряжения;



6. усиление сигналов по напряжению, по току или по мощности;

7. возможность существования нескольких установившихся режимов цепи при одних и тех же параметрах элементов;

8. скачкообразные изменения режима цепи; и т.д.

## 2.Расчёт нелинейных цепей постоянного тока

Электрическое состояние нелинейных цепей описывается на основании законов Кирхгофа, которые имеют общий характер. При этом следует помнить, что для нелинейных цепей принцип наложения неприменим.

Общих методов расчета нелинейных цепей не существует. Известные приемы и способы имеют различные возможности и области применения. В общем случае при анализе нелинейной цепи описывающая ее система нелинейных уравнений может быть решена следующими методами:

- ▶ графическими;
- ▶ аналитическими;
- ▶ графо-аналитическими;

## Графический метод решения

Сущность графического метода расчета состоит в том, что решение **нелинейных** уравнений, составленных для схемы по законам Кирхгофа, выполняется графически путем графического сложения соответствующих ВАХ элементов.

Пусть нелинейная цепь состоит из двух нелинейных элементов НЭ1 и НЭ2, включенных последовательно с источником ЭДС (рис. 4,а). ВАХ нелинейных элементов заданы графически (рис. 4,б).

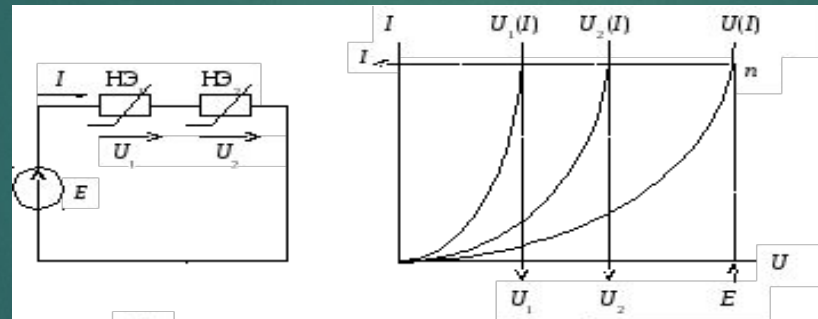


Рис. 4 - а) нелинейная цепь с НЭ1 и НЭ б) графически заданная ВАХ нелинейных элементов

Уравнения Кирхгофа для схемы:  $U_1 + U_2 = E$ ;  $I_1 = I_2 = I$ .



Пусть нелинейная цепь состоит из двух нелинейных элементов НЭ<sub>1</sub> и НЭ<sub>2</sub>, включенных параллельно с источником ЭДС  $E$  (рис. 5, а). ВАХ нелинейных элементов заданы графически (рис. 5, б).

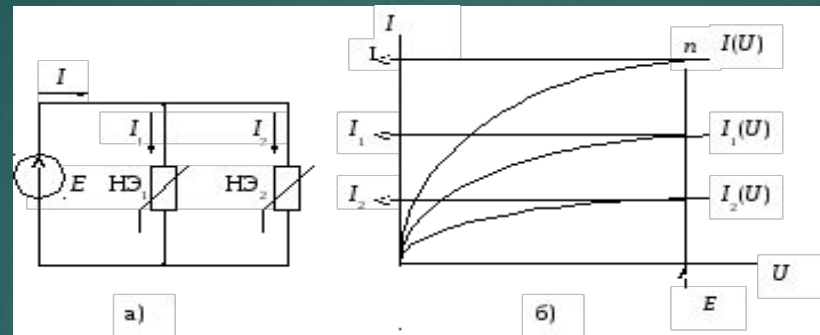


Рис. 5 - а) цепь б) графически заданная ВАХ нелинейных элементов

Уравнения Кирхгофа для схемы:  $I_1 + I_2 = I$ ;  $U_1 = U_2 = E$ .

Пусть нелинейная цепь состоит из двух нелинейных элементов НЭ1 и НЭ2 и линейного резистора  $R_3$ , включенных по смешанной схеме (рис. 6, а). ВАХ нелинейных элементов заданы графически (рис. 6, б), а резистор - своим сопротивлением  $R_3$ . Диаграмма ВАХ для линейного резистора строится в той же системе координат согласно уравнению закона Ома

$$U_3 = I_3 \cdot R_3$$

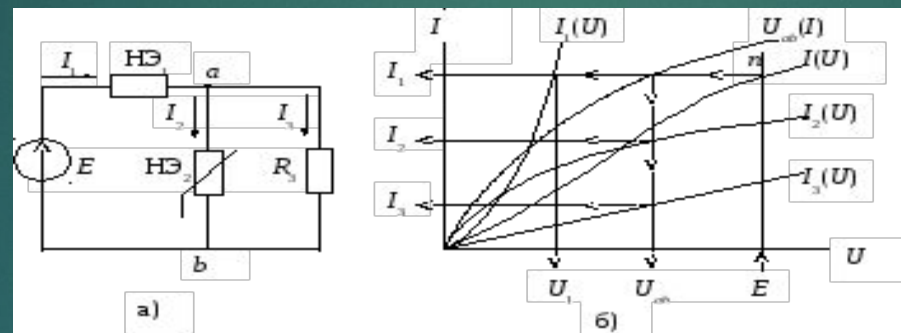


Рис. 6 - а) цепь б) графически заданная ВАХ нелинейных элементов

Уравнения Кирхгофа для схемы:

$$\begin{cases} I_2 + I_3 = I_1 \\ U_1 + U_{23} = E \\ U_2 = U_3 = U_{23} \end{cases}$$

# Графоаналитический метод расчета нелинейной цепи с одним или двумя нелинейными элементами

Если схема нелинейной цепи содержит только один нелинейный элемент НЭ с заданной ВАХ, то расчет токов и напряжений в такой схеме может быть выполнен комбинированным методом в три этапа.

- ▶ 1-й этап. Выделяется ветвь с нелинейным элементом НЭ, а оставшаяся часть схемы заменяется эквивалентным генератором (рис. 7, а).



► 2-м этап: выполняется графический расчет эквивалентной схемы рис. 7, а, как правило, методом встречного построения диаграмм. Из уравнения 2-го закона Кирхгофа для схемы рис. 7а, следует, что  $U(I) = E - IR_0$ . Для графического решения данного уравнения проводится прямая линия по уравнению  $U = E - IR_0$  в той же системе координат, где задана диаграмма ВАХ  $U(I)$  нелинейного элемента. Положение рабочей точки  $n$  соответствует точке пересечения прямой с заданной диаграммой ВАХ  $U(I)$ . Достоинство данного метода состоит в том, что не требуется графическое сложение диаграмм ВАХ отдельных элементов. В результате графического расчета определяется напряжение  $U$  и ток  $I$  нелинейного элемента

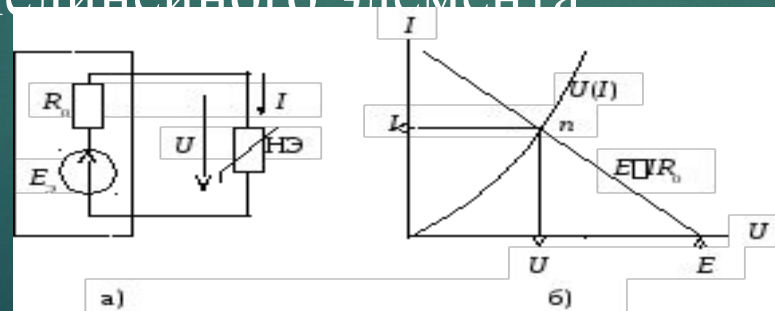


Рис. 7 - а) цепь б) графический расчет эквивалентной схемы

► 3-м этап: нелинейный элемент НЭ в исходной схеме в соответствии с теоремой о компенсации заменяется идеальным источником ЭДС с  $E=U$ , направленной навстречу току  $I$ . Такая замена позволяет превратить исходную схему из нелинейной в линейную.

Комбинированный метод расчета может быть применен к сложной схеме с двумя и более нелинейными элементами.

Пусть сложная схема содержит два нелинейных элемента  $\text{НЭ}_1$  и  $\text{НЭ}_2$  (рис. 8,а).

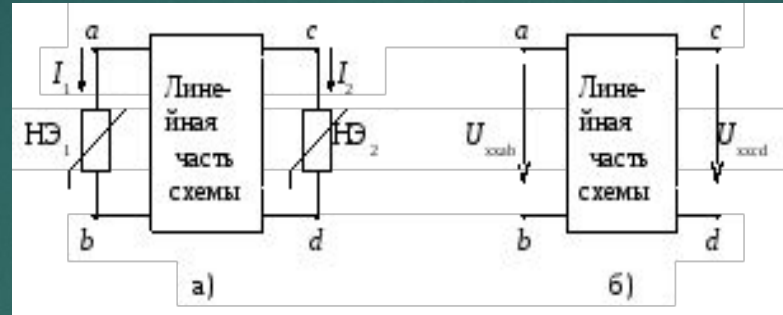


Рис. 8 - а) схема с  $\text{НЭ}_1$  и с  $\text{НЭ}_2$  б) схема без  $\text{НЭ}$



► На 1-м этапе из сложной схемы выделяются одновременно оба нелинейных элемента (рис. 8, а). Выполняется режим холостого хода одновременно для обеих ветвей (рис. 8, б) и аналитическим путем определяются напряжения холостого хода  $U_{\text{ххаб}} = \phi_a - \phi_b$  и  $U_{\text{хxcd}} = \phi_c - \phi_d$ . В соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе линейная часть схемы заменяется эквивалентным генератором (активным четырехполюсником) по схеме рис. 9.

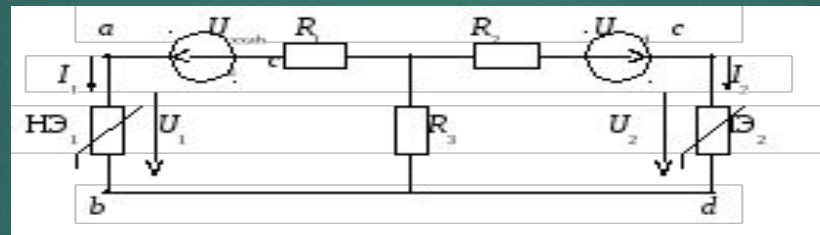


Рис. 9 - Активный четырёх полюсник с НЭ

Внутреннее сопротивление генератора ( $R_1, R_2, R_3$ ) рассчитываются путем свертки линейной части схемы (без источников) к эквивалентной схеме звезды.

► На 2-м этапе выполняется графический расчет эквивалентной схемы (рис. 14) одним из графических методов, рассмотренных ранее, в результате графического расчета определяются токи и напряжения нелинейных элементов ( $U_1, U_2, I_1, I_2$ ). На заключительном этапе определяются токи и напряжения на элементах линейной части схемы.

# Аналитические методы расчета нелинейных цепей

Точность расчетов графическими методами мала и существенно **зависит** от субъективных факторов.

Основной метод решения системы нелинейных уравнений - численный. Численное решение получают, как правило, многократным использованием одних и тех же уравнений, уточняя искомое решение шаг за шагом. Такой способ называют **методом последовательных приближений** или **итераций**



Решение находится следующим образом: на основе первой, достаточно грубой, оценки определяется начальное значение корня (корней), после чего производится уточнение по выбранному алгоритму до вхождения в область заданной погрешности.

- ▶ 1. Исходное нелинейное уравнение электрической цепи  $f(x)=0$ , где  $x$  - искомая переменная, представляется в виде  $x=h(x)$ .
- ▶ 2. Производится расчет по алгоритму  $x_{m+1}=h(x_m)$  где  $m=0,1,2,\dots$  - шаг итерации.

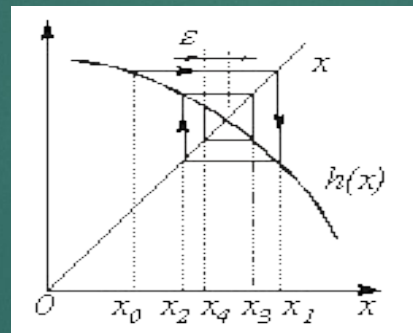


Рис. 10 - Геометрическая иллюстрация алгоритма

На интервале между приближенным и точным значениями корня должно выполняться неравенство  $|dh(x)/dx|<1$

- ▶ 1. Начальное приближение  $x_0$  обычно находится из уравнения  $f(x)=0$  при пренебрежении в нелинейными членами.
- ▶ 2. Метод распространим на систему нелинейных уравнений  $n$ -го порядка. Например, при решении системы 2-го порядка
  - ▶  $x_1 = h_1(x_1, x_2)$
  - ▶  $x_2 = h_2(x_1, x_2)$
  - ▶ итерационные формулы имеют вид  $x_{1(m+1)} = h_1(x_{1m}, x_{2m});$
  - ▶  $x_{2(m+1)} = h_2(x_{1m}, x_{2m});$

# 3.Расчёт нелинейных цепей переменного тока

## Графические методы расчета

Графические методы расчета позволяют проводить анализ нелинейных цепей переменного тока для частных значений параметров с использованием характеристик нелинейных элементов для мгновенных значений, по первым гармоникам и действующим значениям (см. табл. 2).

Таблица 2-таблица анализа нелинейных цепей для частных параметров

Тип	Определение	Примечание
<b>характеристики</b>		
Динамическая характеристика (характеристика для мгновенных значений)	Характеристика, связывающая мгновенные значения основных определяющих величин	Используется при анализе цепи по мгновенным значениям



**Характеристика по первым гармоникам**

**Характеристика, связывающая амплитуды (действующие значения) первых гармоник основных определяющих величин. Если воздействующая величина содержит постоянную составляющую, то нелинейный элемент характеризуется семейством зависимостей, для которых постоянная составляющая является параметром.**

**Определяется по соответствующей характеристике для мгновенных значений или экспериментально. Применяется при использовании метода расчета по первым гармоникам**

<b>Характеристик а для действующих значений</b>	<b>Характеристик а, связывающая действующие значения синусоидальных и несинусоидальных величин.</b>	<b>Определяется по соответствующей характеристике для мгновенных значений или экспериментально.</b>
	<b>Если воздействующая величина содержит постоянную составляющую, то нелинейный элемент характеризуется семейством зависимостей, для которых постоянная составляющая - параметр</b>	<b>Применяется при использовании метода расчета по действующим значениям</b>

# Графический метод с использованием характеристик для мгновенных значений

В общем случае методика анализа нелинейной цепи данным методом включает в себя следующие этапы:

- исходя из физических соображений находят (если он не задан) закон изменения одной из величин, определяющих характеристику  $y(x)$  нелинейного элемента;
- по нелинейной характеристике  $y(x)$  для известного закона изменения переменной  $x(t)$  путем графических построений определяют кривую  $y(t)$  (или наоборот);
- с использованием полученной зависимости  $y(t)$  проводят анализ остальной (линейной) части цепи.



В качестве примера построим при синусоидальной ЭДС  $e(t) = E_m * \sin(\omega)t$  кривую тока в цепи на рис. 11, ВАХ  $U_v(i)$  диода в которой представлена на рис. 12.

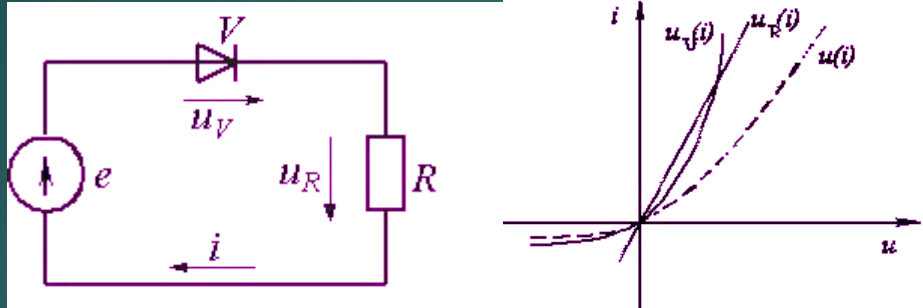


Рис. 11 - Простейшая цепь. Рис. 12 - График зависимости  $U_v(i)$  в диоде

1. Строим результирующую ВАХ  $U_v(i)$  цепи (см. рис. 12) согласно соотношению

$$U(i) = U_v(i) + U_R = U_v(i) + R i$$

2. Находя для различных значений  $e(t)$  с использованием полученной кривой соответствующие им значения тока, строим по точкам (см. рис.13) кривую искомой зависимости  $i(t)$ .

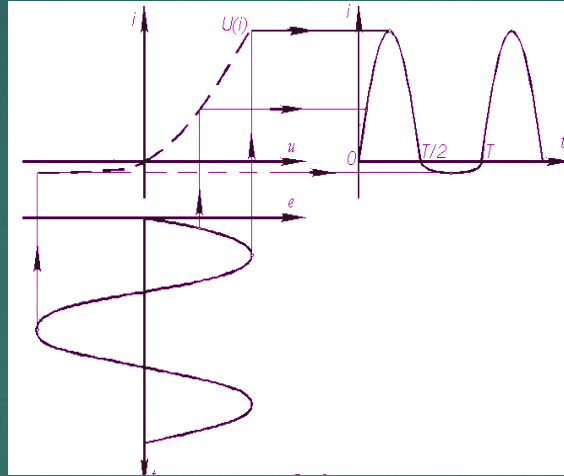


Рис. 13 - Кривая искомой зависимости  $i(t)$

Важнейшим элементом в цепях переменного тока является катушка с ферромагнитным сердечником. В общем случае кривая зависимости  $\psi(i)$  имеет вид гистерезисной петли, но, поскольку в устройствах, работающих при переменном напряжении, используются магнитные материалы с узкой петлей гистерезиса, в большинстве практических случаев допустимо при расчетах использовать основную (или начальную) кривую намагничивания.

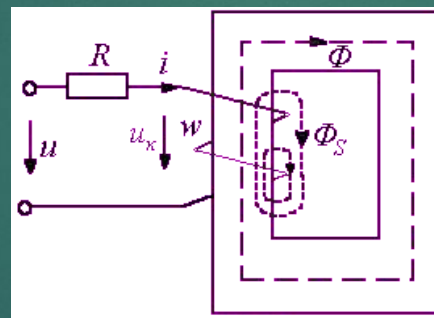


Рис. 14 - Схема катушки с ферромагнитным сердечником

Для схемы на рис. 14 справедливо уравнение

$$u = R_i i + \frac{d\psi}{dt} + L_s \frac{di}{dt}$$



#### 4. Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство,

преобразующие электрическую энергию переменного тока с параметрами  $U_1, I_1$  в электрическую энергию переменного тока с параметрами  $U_2, I_2$  той же частоты.

Основное назначение трансформаторов - согласование уровней номинальных (рабочих) напряжений или токов источников и приёмников электрической энергии. Кроме согласования трансформаторы применяются для выполнения разделительных, измерительных, дифференцирующих и некоторых других функций, а также специальных функций

## Трансформаторы широко используют для следующих целей.

- ▶ 1. Для передачи и распределения электрической энергии. Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6—24 кВ.
- ▶ 2. Питания различных цепей радио- и телевизионной аппаратуры; устройств связи, автоматики в телемеханики, электробытовых приборов; для разделения электрических цепей различных элементов этих устройств; для согласования напряжений

3. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов, например, реле, в электрические цепи высокого напряжения или в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности. Трансформаторы, применяемые для этой цели, называют измерительными (см. рис 15). Они имеют сравнительно небольшую мощность, определяемую мощностью, потребляемой электроизмерительными приборами, реле и др.



Рис. 15 - Измерительный трансформатор



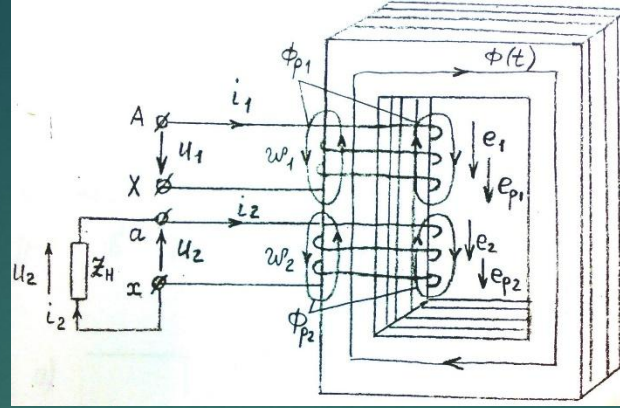


Рис. 16 - Общее устройство трансформатора

Трансформатор состоит из замкнутого ферромагнитного магнитопровода (сердечника), на котором расположены две обмотки, выполненные из медного или алюминиевого провода. Для уменьшения потерь в стали, сердечник собирается из изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Обмотка, с числом витков  $W_1$ , подключаемая к источнику питания, называется первичной. К другой обмотке с числом витков  $W_2$ , называемой вторичной, подключается приёмник  $Z_H$ .



▶ Трансформатор, у которого  $W_2 < W_1$ , называется понижающим

Если  $W_2 > W_1$ , то трансформатор называется повышающим.

Величина  $k = \frac{W_1}{W_2}$  называется коэффициентом трансформации трансформатора.

По мощности трансформаторы подразделяются на трансформаторы:

- малой мощности - до 50 - 1000 В·А;

- средней мощности - до 20 - 500 кВ·А;

- большой мощности - до 500000 - 1000000 кВ·А.

Трансформаторы средней и большой мощности, используемые в системах передачи и распределения электроэнергии, а также при её использовании в промышленных установках называются **силовыми**.

Трансформаторы, устанавливаемые на электрических станциях и подстанциях, называются **силовыми трансформаторами общего назначения**. В промышленности широко распространены также **силовые трансформаторы** (см. рис. 17) специального назначения



Рис. 17 - Силовой трансформатор

## Принцип действия трансформатора

Если к первичной обмотке трансформатора подвести напряжение  $U_1$ , изменяющееся во времени, то в ней возникнет переменный ток  $i_1$  (рис. 16). Переменная МДС  $i_1 W_1$  создаёт переменные МП, характеризуемые переменным магнитным потоком  $\Phi_1(t)$ , сосредоточенным в сердечнике. Магнитный поток  $\Phi_1(t)$ , возбуждённый током  $i_1$ , индуцирует в первичной обмотке трансформатора ЭДС самоиндукции  $E_1$ , а во вторичной обмотке - ЭДС взаимной индукции  $E_2$ . Если ко вторичной обмотке подключен приёмник, то во вторичном контуре под действием ЭДС  $E_2$  возникнет ток  $i_2$ . МДС  $i_2 W_2$  вторичной обмотки трансформатора создаёт своё переменное МП, характеризуемое магнитным потоком  $\Phi_2(t)$ , которое взаимодействует с полем первичной обмотки.



В магнитопроводе возбуждается переменный поток  $\Phi(t)$ , созданный результирующей МДС обеих обмоток. Этот поток, сцеплённый со всеми витками обмоток, называется основным, или рабочим потоком трансформатора. Передача энергии от сети к приёмнику происходит посредством магнитного потока  $\Phi(t)$ .

Кроме основного потока  $\Phi(t)$ , в трансформаторе имеются переменные магнитные потоки рассеяния  $\Phi_{r1}$  и  $\Phi_{r2}$ , которые замыкаются вокруг витков обмоток, в основном через воздух и поэтому линейно связаны с токами в обмотках.

Говоря о принципе работы трансформатора, следует обратить внимание на то, что первичная и вторичная обмотки трансформатора электрически изолированы друг от друга. Обмотки связаны через  $\Phi(t)$  только магнитно, находясь на общем магнитопроводе.



## 5. Классификация электрических машин

**Классификация по назначению.** Электрические машины по назначению подразделяют на следующие виды:

**Электромашинные генераторы,** преобразующие механическую энергию в электрическую. Их устанавливают на электрических станциях и различных транспортных установках. На электростанциях они приводятся во вращение с помощью мощных паровых и гидравлических турбин, а на транспортных установках - от двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. В ряде случаев генераторы используют в качестве источников питания.



Рис. 18 - Электрогенератор на ГЭС

Электрические двигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую; они приводят во вращение различные машины, механизмы. В современных системах автоматического управления их используют в качестве исполнительных, регулирующих и программирующих органов



Рис. 19 - Электродвигатель квадрокоптера

Электромашинные преобразователи, преобразующие переменный ток в постоянный и, наоборот, изменяющие величину напряжения переменного и постоянного тока, частоту, число фаз и др. Их широко используют в промышленности хотя в последнее десятилетие роль электромашинных преобразователей существенно уменьшилась вследствие применения статических полупроводниковых преобразователей

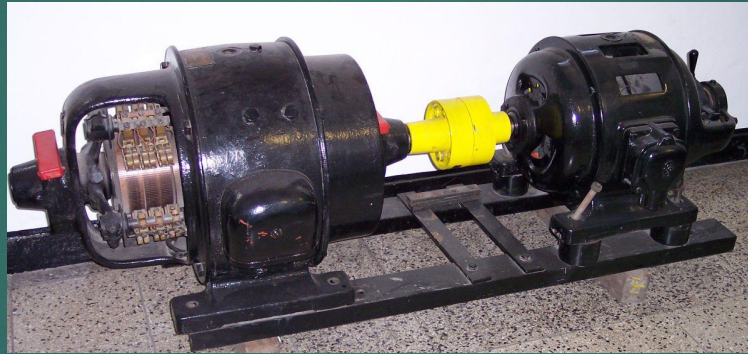


Рис. 20 - Электромашинный преобразователь



Электромашинные компенсаторы, осуществляющие генерирование реактивной мощности в электрических установках для улучшения энергетических показателей источников и приемников электрической энергии;



Рис. 21 - Электромашинные синхронные компенсаторы



Электромашинные усилители, используемые для управления объектами относительно большой мощности посредством электрических сигналов малой мощности, подаваемых на их обмотки возбуждения (управления). Роль электромашинных усилителей в последнее время также уменьшилась из-за широкого применения усилителей, выполненных на полупроводниковых элементах (транзисторах, тиристорах)



Рис. 22 - ЭМУ-50 АЗС

Электромеханические преобразователи сигналов, генерирующие, преобразующие и усиливающие различные сигналы. Их выполняют обычно в виде электрических микромашин и широко используют в системах автоматического регулирования.



Рис. 23 - Электромеханический преобразователь сигналов

## 6. ЭМ постоянного тока: устройство и принцип работы; основные характеристики

Несмотря на преимущественное распространение электроэнергии переменного тока в ряде отраслей промышленности широко используется и постоянный ток. В связи с этим находят широкое применение электрические машины постоянного тока.

Двигатели постоянного тока предназначены для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую энергию, которая передается через вал рабочему органу приводного механизма.

Двигатели постоянного тока обладают важным преимуществом перед другими электродвигателями: они позволяют плавно и в широких пределах регулировать скорость вращения и обладают большим пусковым и перегрузочными моментами, сравнительно высоким быстродействием, что важно при реверсировании и торможении.



Двигатели постоянного тока применяются:

- в электроприводах главного движения и подач металлорежущих станков, штамповочных машин, роботов и манипуляторов, прокатных станов металлургического производства, некоторых типов грузоподъемных механизмов;
- в тяговых электроприводах транспортных средств мощных тягачей различного назначения, трамваев, троллейбусов, тепловозов;
- в электроприводах роторов мощных снегоочистителей;
- как исполнительные элементы автоматических систем управления технологическими процессами и производственными установками.



# Конструкция машин постоянного тока

Машины постоянного тока - обратимые. Они могут работать и как генератор и как двигатель. Конструктивно генераторы и двигатели постоянного тока устроены одинаково. На рис. 26 показан продольный разрез двигателя постоянного тока.

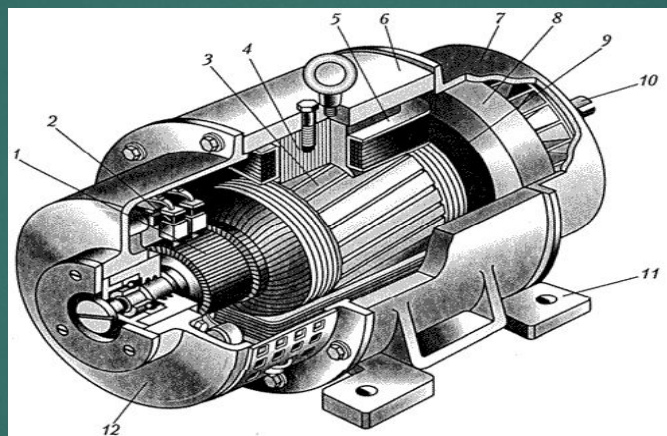


Рис. 24 - Общий вид двигателя постоянного тока

1-коллектор, 2 - щеточный аппарат, 3 - якорь, 4 - главные полюса, 5 - катушка обмотки возбуждения, 6 - станина, 7 и 12 подшипниковые щиты, 8 - вентилятор, 9 - лобовые части обмотки статора, 10 - вал, 11 - лапы

## Принцип действия

В основе принципа действия электрических машин лежит закон электромагнитной индукции. Согласно этому закону, в проводнике, перемещающемся относительно магнитного поля в плоскости, перпендикулярной к направлению магнитных силовых линий, индуцируется электродвижущая сила — э. д. с. величину которой определяют из формулы:  $E = v * L * B$

Между двумя полюсами поместим виток, намотанный на стальной цилиндр. Силовые линии направлены радикально по отношению к стальному цилиндру, причем полюса имеют такую форму, что магнитная индукция в воздушном зазоре между полюсами и стальным цилиндром распределена синусоидально. При такой конструкции направление движения проводника везде перпендикулярно к направлению магнитных силовых линий.

При вращении витка в нем индуцируется э. д. с, синусоидальная по форме кривой, так как магнитная индукция в зазоре синусоидальна. Когда виток *ab* расположен горизонтально, индуцируемая в нем э.д.с. равна нулю, так как стороны витка движутся в пространстве, где магнитная индукция равна нулю. При вертикальном положении витка его стороны движутся в поле с максимальной магнитной индукцией, поэтому и э.д.с. имеет максимальное значение. Когда провод *аб* проходит под северным полюсом, э.д.с. в этом проводе направлена от нас; если провод *аб* проходит под южным полюсом, то э.д.с. в проводе изменяет свое направление, таким образом, в витке индуцируется переменный ток.



Для выпрямления тока применяют коллектор. Простейший коллектор — это два изолированных полукольца, к которым присоединяют концы витка (рис. 25). Щетки на коллекторе устанавливают так, чтобы они переходили с одного полукольца на другое, когда индуцируемая э.д.с. в витке равна нулю.

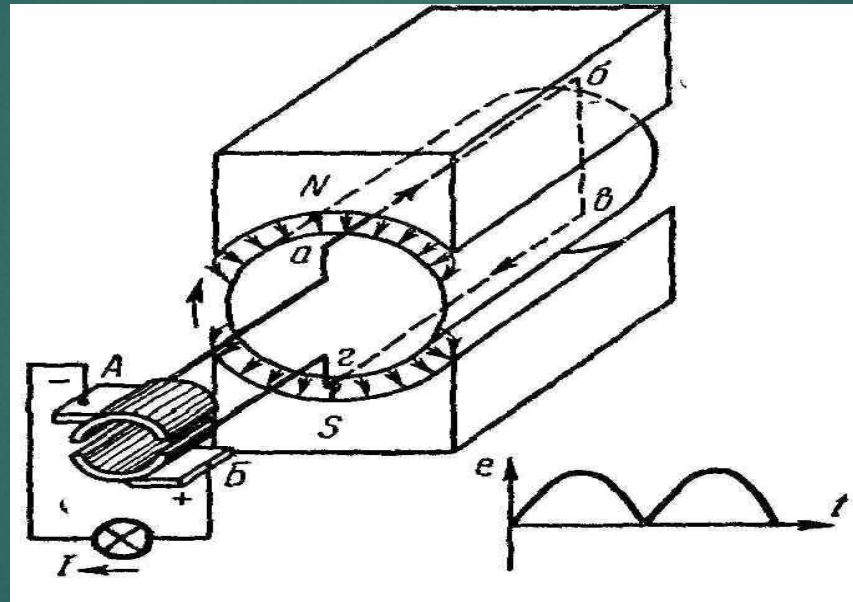


Рис. 25 - Принцип действия генератора постоянного тока



Щетка  $A$  соприкасается всегда с тем полукольцом, провод от которого проходит под северным полюсом, а щетка  $B$  с полукольцом, провод от которого проходит под южным полюсом. Поэтому во внешней цепи ток тянет в одном направлении от щетки  $B$  к щетке  $A$ . Щетка, с которой ток стекает в сеть, имеет знак плюс (+), а к которой ток притекает, — знак минус (—).

Выпрямленный ток пульсирует. При одном витке величины э. д. с. и тока изменяются от нуля до максимума. Для уменьшения пульсации на барабан наматывают большое число ВИТКОВ.

# Двигатель постоянного тока

Принцип действия электрических двигателей основан на взаимодействии магнитных полей полюсов машины и проводников обмотки якоря, по которым проходит ток.

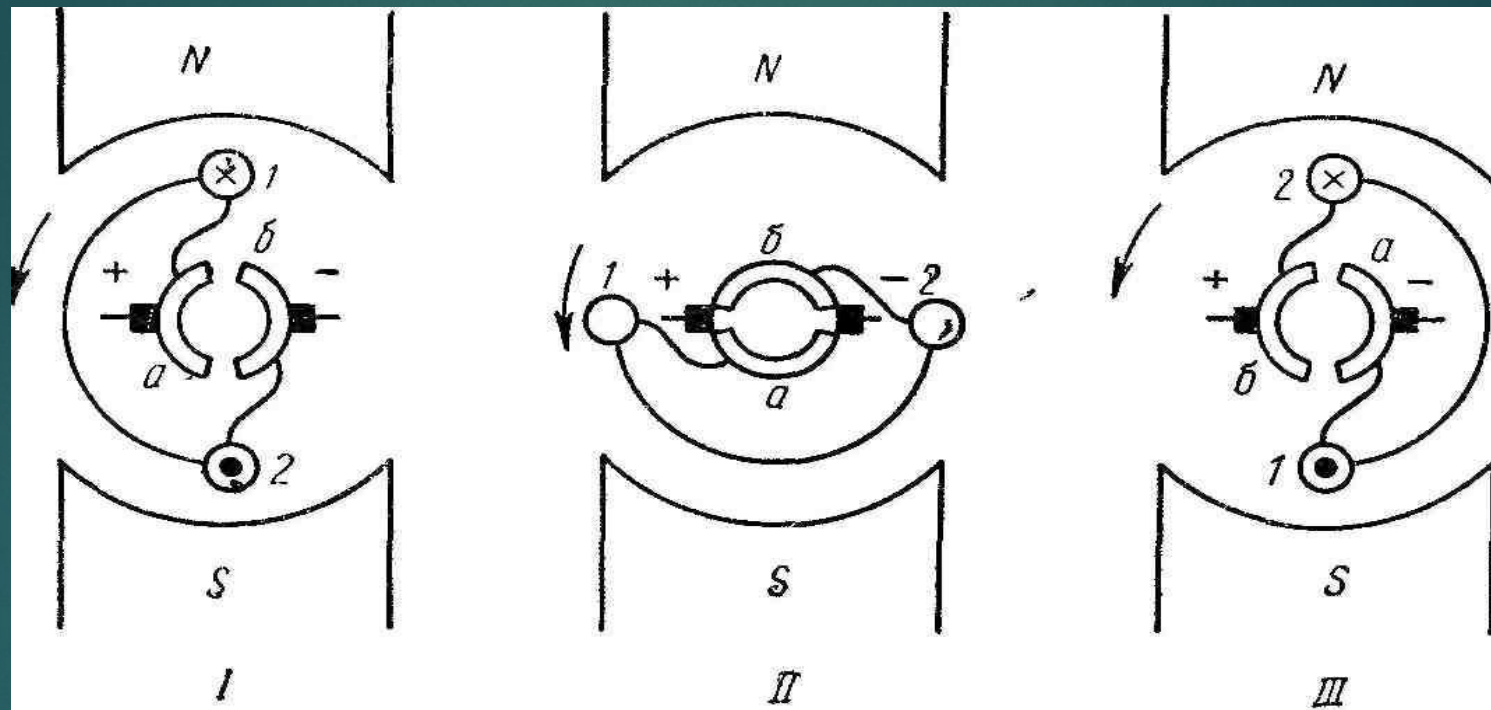


Рис. 26 - Принцип работы электрического двигателя

## Основные характеристики

ДПТ независимого возбуждения

Механическая характеристика выражает пропорциональную зависимость между  $\omega$  и  $M$ .

Смотря на уравнение механической характеристики

$$\omega = \frac{U}{k\phi} - \frac{MR}{(k\phi)^2}$$



Частоту вращения двигателя можно изменять тремя способами:

- ▶ 1. Изменением напряжения цепи якоря, что ведёт к изменению нагрузочной характеристики. (см. рис. 27(1))
- ▶ 2. Изменением напряжения обмотки возбуждения, в результате чего изменяется ток обмотки возбуждения, а изменение тока обмотки возбуждения ведёт к изменению магнитного потока ДПТ. (см. рис. 27(2))
- ▶ 3. Добавление в цепи ротора добавочного сопротивления. (см. рис. 27(3))

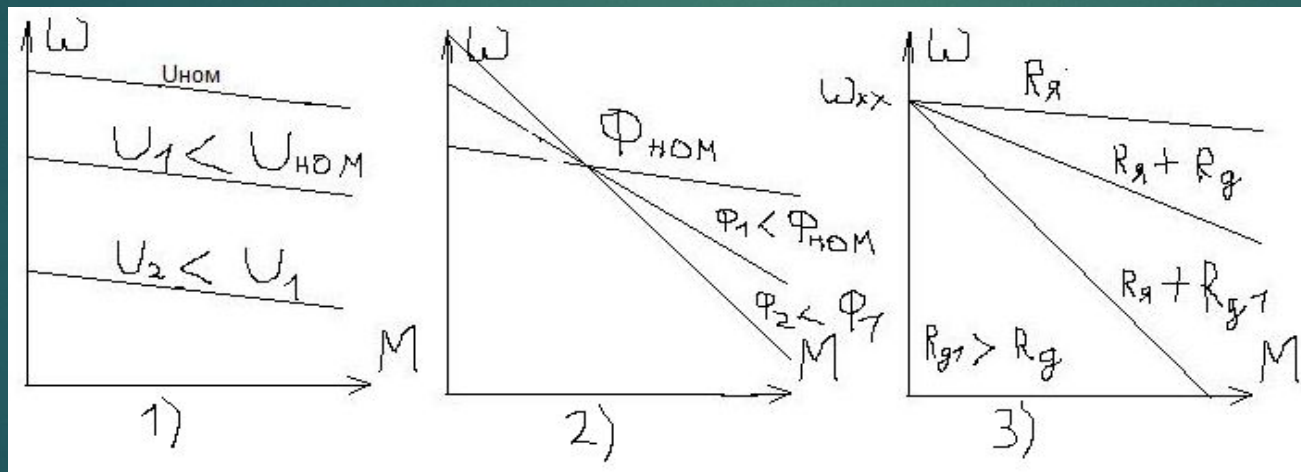


Рис. 27 - Графики изменения величин

ДПТ параллельного возбуждения.

Обмотка возбуждения этого двигателя соединяется параллельно обмотке якоря, механические характеристики те же что и у ДПТ независимого возбуждения.

ДПТ последовательного возбуждения.

Ток, протекающий по якорю ЭД является в то же время и током возбуждения.

Магнитный поток у этих электродвигателей зависит от значения тока якоря.

Естественная характеристика ЭД последовательного возбуждения более мягкая. При большом уменьшении нагрузки угловая скорость ЭД чрезмерно увеличивается, а при идеальном холостом ходе становится бесконечно большой.

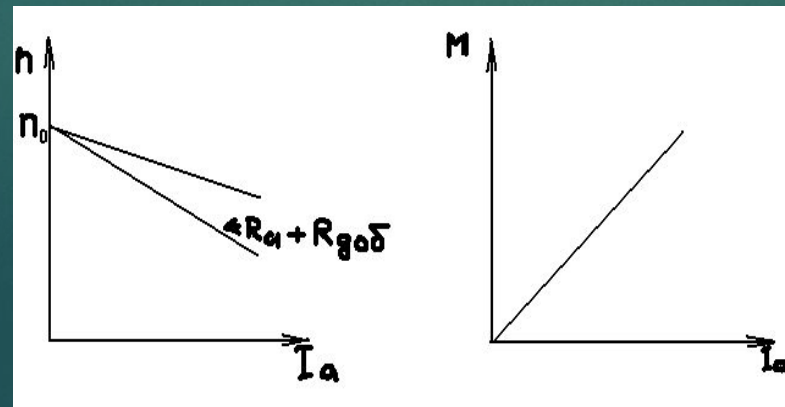


Рис. 28 - Графики зависимости магнитного потока

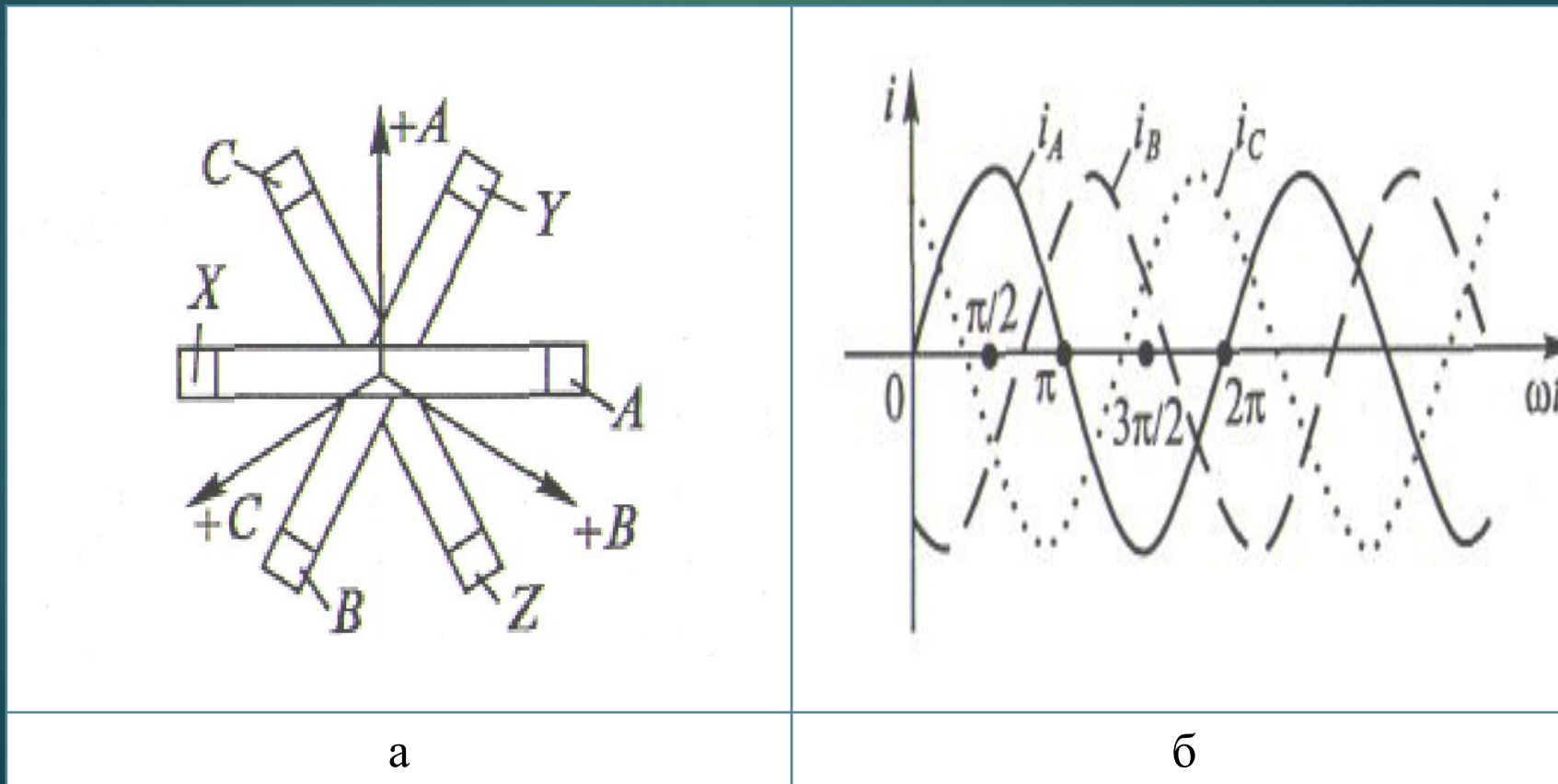
## 7. ЭМ переменного тока: устройство и принцип действия

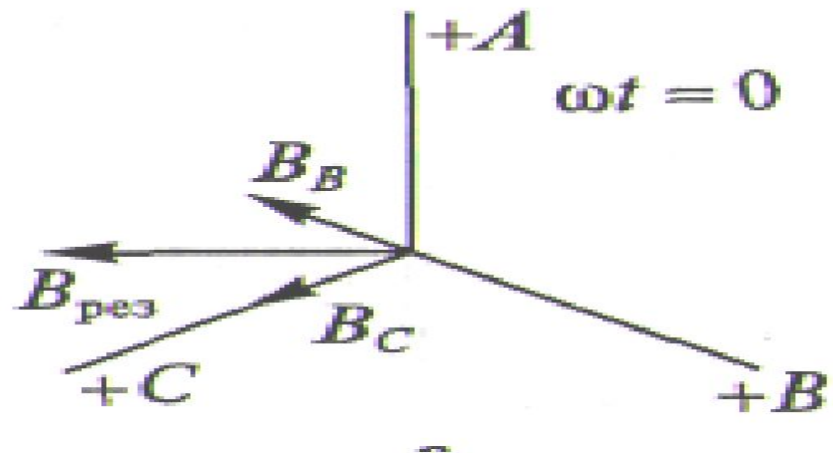
Как и машины постоянного тока, электрические машины переменного тока состоят из статора и ротора. По способу образования магнитного поля статора и ротора машины переменного тока делятся на две группы: асинхронные и синхронные. В основе работы асинхронных и синхронных машин лежит образование вращающегося магнитного поля.

Обмотки статора обычно присоединяются к сети переменного тока и создают вращающееся магнитное поле, поэтому устройство этой части асинхронных и синхронных машин получается одинаковым

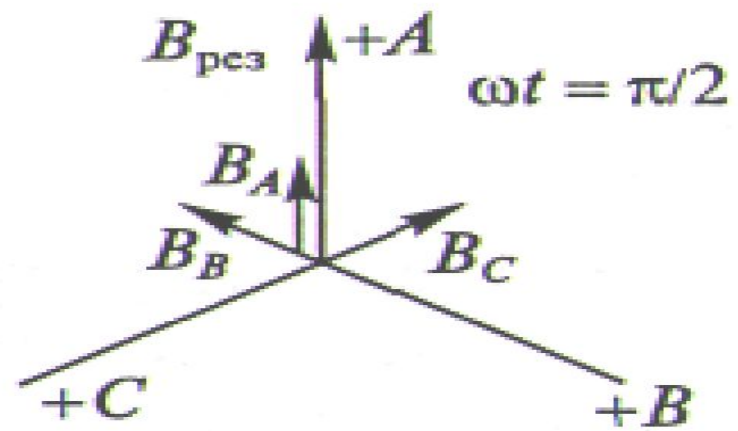


**Получение вращающегося магнитного поля.** В асинхронных и синхронных машинах вращающееся магнитное поле статора образуется при протекании трехфазного тока в трех обмотках, оси которых сдвинуты в пространстве на  $120/p$ , где  $p$  — число пар полюсов обмотки. При  $p = 1$  получается двухполюсное вращающееся магнитное поле, образование которого можно пояснить с помощью рис. 29

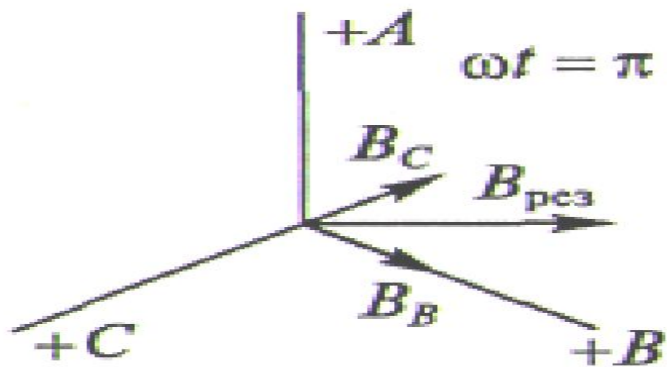




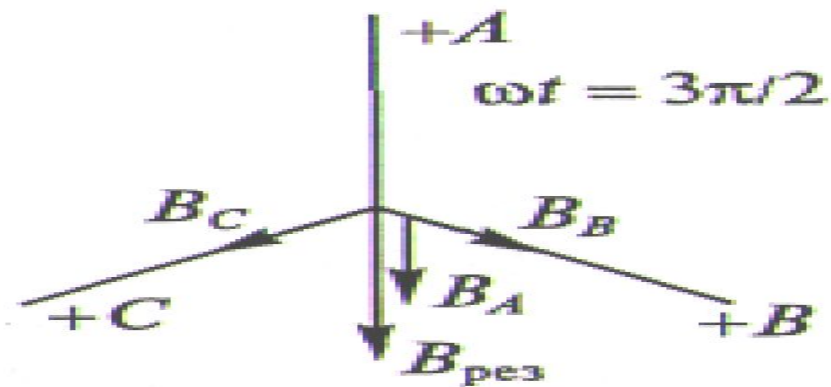
В



Г



Д



е

Рис . 29 - Вращение магнитного поля

**Принцип действия и устройство асинхронного двигателя.** Вращающееся поле статора пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. При замкнутой обмотке ротора под действием ЭДС в обмотке возникают токи, направление которых определяется по правилу правой руки (рис. 30).

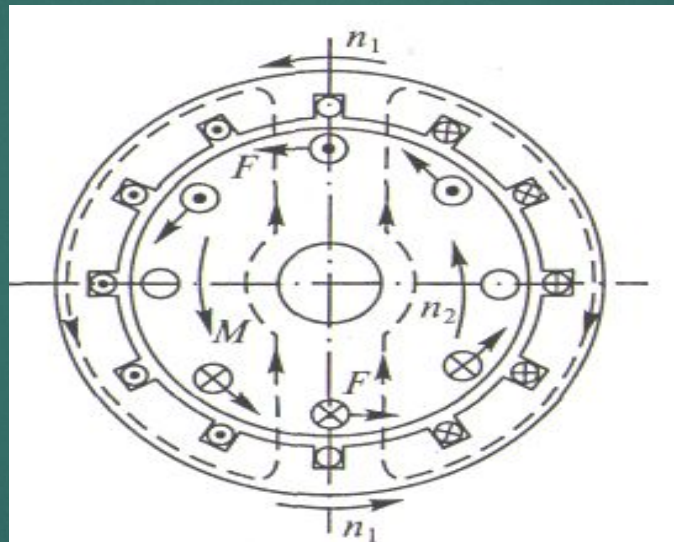


Рис. 30 - Принцип работы асинхронного двигателя



Взаимодействие токов с полем статора создает действующие на проводники электромагнитные силы  $F$ , направление которых определяется по правилу левой руки. Как видно из рис. 32, эти силы стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил  $F$ , приложенных к отдельным проводникам, создает на роторе электромагнитный момент  $M$ , приводящий его в движение с частотой вращения  $n_2$

Токи обмотки ротора создают свое собственное магнитное поле.

в любом режиме асинхронной машины магнитные поля статора и ротора взаимно неподвижны друг относительно друга. Этим и обеспечивается электромеханическое преобразование энергии в асинхронной машине.

**Асинхронные двигатели являются самыми распространенными электрическими машинами в промышленности и сельском хозяйстве.**

## Принцип действия и устройство синхронных машин

Синхронной называется такая машина переменного тока, частота вращения ротора которой равна частоте вращения магнитного поля статора

Ротор такой машины представляет электромагнит, возбуждаемый постоянным током. В синхронных машинах малой мощности вместо обмотки на роторе могут использоваться постоянные магниты.

В режиме генератора ротор синхронной машины приводится во вращение первичным двигателем с номинальной скоростью, которая поддерживается постоянной автоматическим регулятором. После этого генератор возбуждается подачей постоянного тока в обмотку ротора.

Вращающийся с постоянной скоростью поток полюсов (рис. 34,а), пересекая трехфазную обмотку статора, наводит в ней ЭДС, одинаковые по амплитуде и частоте, сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол 120 (рис. 34,б).

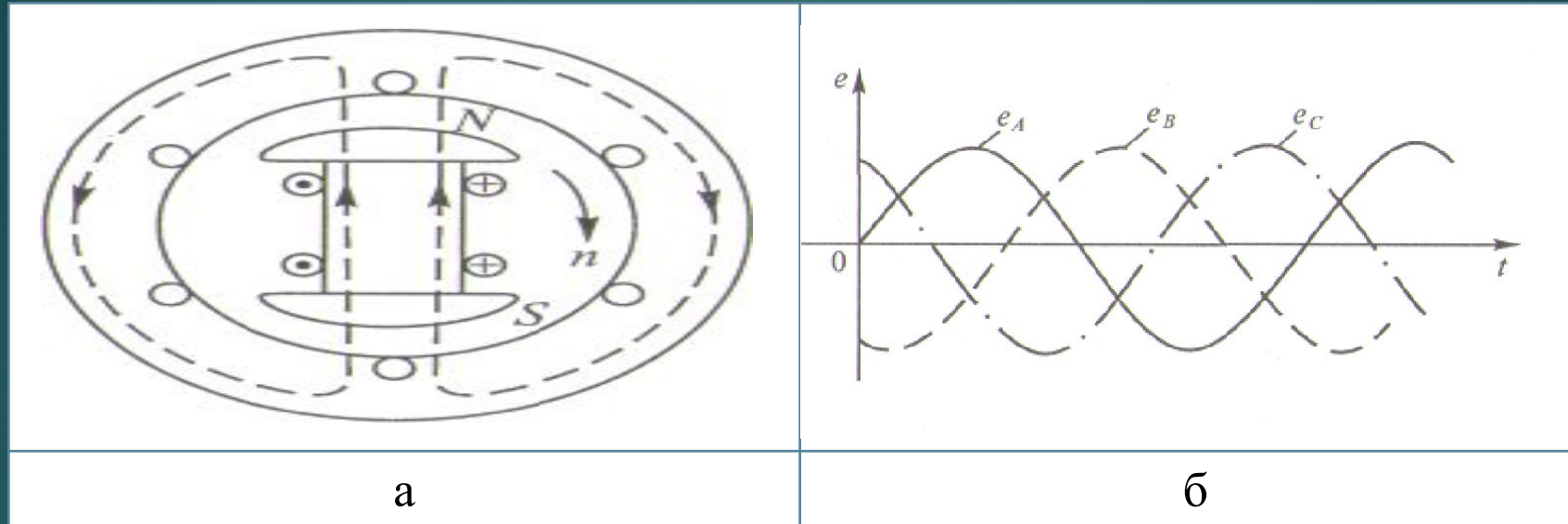


Рис. 31 - Принцип работы синхронной машины



## 8. Типы выпрямителей. Основные схемы выпрямителя: принцип работы, основные параметры

**Выпрямитель** - это электротехническое устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное.

**Основными элементами** полупроводниковых выпрямителей являются трансформатор и вентили, с помощью которых обеспечивается одностороннее протекание тока в цепи нагрузки, в результате чего переменное напряжение преобразуется в пульсирующее. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения к выходным зажимам выпрямителя подключают электрический сглаживающий фильтр. Для регулирования или стабилизации выпрямленного напряжения и тока потребителя к выходным зажимам фильтра подключают регулятор или стабилизатор.

# Структурная схема и классификация выпрямителей

Выпрямитель можно представить в виде обобщенной структурной схемы (рис. 32) и структурной схемы с протекающими в нем напряжениями и токами (рис. 33), в которую входят:

- ▶ силовой трансформатор (СТ),
- ▶ вентильный блок (ВБ),
- ▶ фильтрующее устройство (ФУ),
- ▶ цепь нагрузки (Н), в которую может входить стабилизатор напряжения (СН)

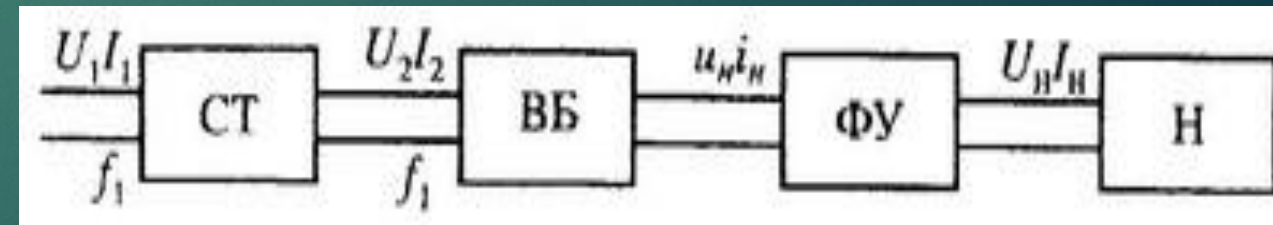


Рис. 33 - Структурная схема с протекающими в ней токами

Рис. 32 - Обобщенная структурная схема выпрямителя

**Силовой трансформатор** служит для согласования входного и выходного напряжений выпрямителя. Возможны различные соединения обмоток трансформатора соответственно с различными схемами выпрямления. Напряжение вторичной обмотки трансформатора  $U_2$  определяет значение выпрямленного напряжения  $U_n$  (или  $U_d$ ).

**Вентильный блок** выпрямляет переменный ток, подключая вторичное напряжение соответствующей фазы трансформатора к цепи постоянного тока. В вентильном блоке используются, как правило, полупроводниковые диоды или сборки на их основе. На выходе вентильного блока получают знакопостоянное напряжение с высоким уровнем пульсаций, определяемым только числом фаз питающей сети и выбранной схемой выпрямления.



**Фильтрующее устройство** обеспечивает требуемый уровень пульсаций выпрямленного тока в цепи нагрузки. В качестве ФУ используются последовательно включаемые резистор или сглаживающий дроссель и параллельно включаемые конденсаторы. Иногда ФУ строится по более сложным схемам. В выпрямителях малой мощности установка резистора или дросселя не обязательна.

**Стабилизатор напряжения** служит для уменьшения внешних воздействий, таких как: изменение напряжения питающей сети, изменение температуры, частоты и т.д.

# Полупроводниковые выпрямители можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) по выходной мощности (маломощные - до 600 Вт, средней мощности - до 100 кВт, и большой мощности - более 100 кВт);
- 2) по числу фаз источника (однофазные, многофазные);
- 3) по пульсности ( $p$ ) выпрямителя, определяемой числом полупериодов протекания тока во вторичной обмотке трансформатора за полный период напряжения  $U_1$ ;
- 4) по числу знакопостоянных импульсов в кривой выпрямленного напряжения  $U_2$  за период питающего напряжения:
  - однополупериодные;
  - двухполупериодные;
  - $m$ -полупериодные.

Выпрямители могут быть построены на управляемых вентилях (тиристорах, транзисторах) - управляемые выпрямители и на неуправляемых вентилях (диодах) - неуправляемые выпрямители.

Для работы и расчета выпрямителя принципиальное значение имеет характер нагрузки включенной на выходе выпрямителя. Различают следующие режимы работы выпрямителя:

- ▶ а) на активную нагрузку;
- ▶ б) на активно-индуктивную нагрузку;
- ▶ в) на активно-емкостную нагрузку;



Выбор схемы выпрямителя зависит от ряда факторов, которые должны учитываться в зависимости от требований, предъявляемых к выпрямительному устройству. К ним относятся:

- величины выпрямленного напряжения и мощности;
- частота и величина пульсации выпрямленного напряжения;
- число диодов и величина обратного напряжения на них;
- коэффициент полезного действия (к.п.д.);
- коэффициент мощности и другие энергетические показатели.

При расчете выпрямителя большое значение имеет также **коэффициент использования трансформатора по мощности**, который определяется как:

$$K_a = \frac{P_d}{S_{\text{габ}}} = \frac{2U_d I_d}{(U_1 I_1 + U_2 I_2)}$$

где  $U_d, I_d$  - средние значения выпрямленного напряжения и тока,  $U_1, I_1$  - действующие значения первичного напряжения и тока,  $U_2, I_2$  - действующие значения вторичного напряжения и тока.

При увеличении коэффициента использования трансформатора габариты выпрямителя в целом уменьшаются, а коэффициент полезного действия возрастает.

## **Основные схемы выпрямления.**

### **Однофазные выпрямители.**

Схемы выпрямителей однофазного питания применяются в основном для питания бытовых потребителей (бытовых устройств) и используют однофазные трансформаторы, в которых ток течет по двум проводам - фаза и ноль. Первичная и вторичная обмотка трансформаторов таких выпрямителей является однофазной.



## Однофазная, однополупериодная схема.

Самым простым считается однофазный выпрямитель с одним полупериодом (рис. 34, а)

Согласно данной схеме (рис. 34, б), с помощью диода отсекается отрицательная полуволна. При переворачивании диода, происходит перемена местами выводов - анода и катода. В этом случае происходит отсечение положительной полуволны. Такие выпрямители применяют схемы выпрямления, при потреблении слабых токов и импульсном питании. Они совершенно непригодны для выпрямления сетевого напряжения с большим значением.

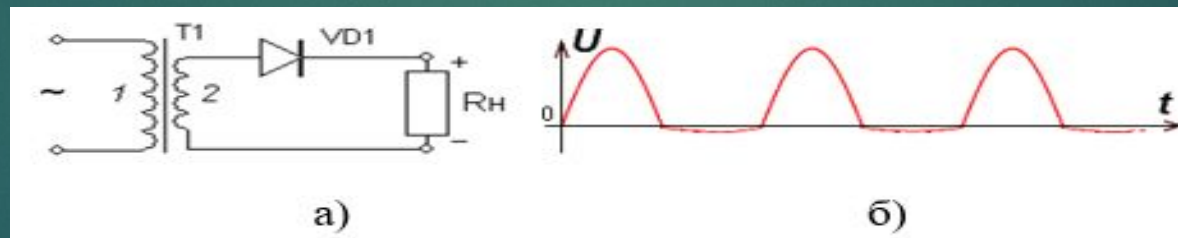


Рис. 34 - Однофазная, однополупериодная схема выпрямления (а) и диаграмма напряжений (б).

Самым распространенным, является однофазный выпрямитель на два полупериода (рис. 35, а)

Здесь электрический ток с вторичной обмотки поступает по маршруту «А - В» и в обратном направлении, через определенные диоды и нагрузку. Направление постоянно изменяется в таком быстром темпе, что на выходе выпрямителя его нулевое значение, практически, отсутствует. Для нормального преобразования напряжения, кроме выпрямителей, используются сглаживающие фильтры питания, которые окончательно устраняют резкие колебания выходного напряжения.

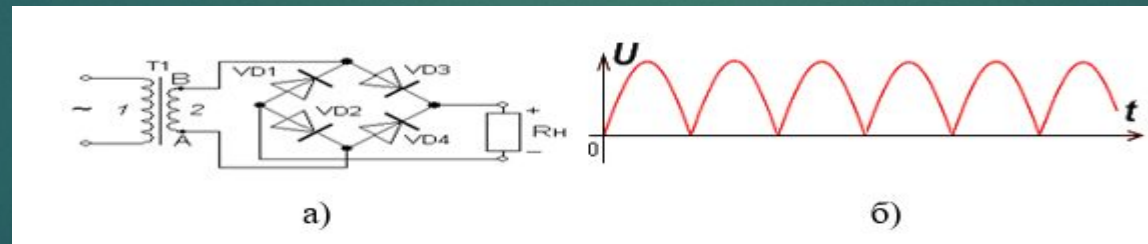


Рис. 35 - Схема однофазного выпрямителя на два полупериода (а) и диаграмма напряжений (б).

Таким образом, в отличие от простейшего однополупериодного выпрямителя в выпрямителе со средней точкой выпрямленный ток проходит через нагрузку в течение обоих полупериодов переменного тока, но каждая из половин вторичной обмотки трансформатора оказывается нагруженной током только в течение полупериода. В результате встречного направления м.д.с. постоянных составляющих токов вторичных обмоток  $i_{21}$  и  $i_{22}$  в сердечнике трансформатора нет вынужденного подмагничивания.



## 9. Полупроводниковые диоды принцип работы характеристики параметры

Полупроводниковые диоды широко применяются в электронике и электронной промышленности. Они используются как самостоятельно, так и в качестве р-n-перехода транзисторов и многих других устройств. Как дискретный компонент диоды являются ключевой частью многих электронных схем. Они находят множество применений, начиная от маломощных приложений до выпрямителей тока. В переводе с греческого название данного электронного элемента буквально обозначает «два вывода». Они называются анодом и катодом.

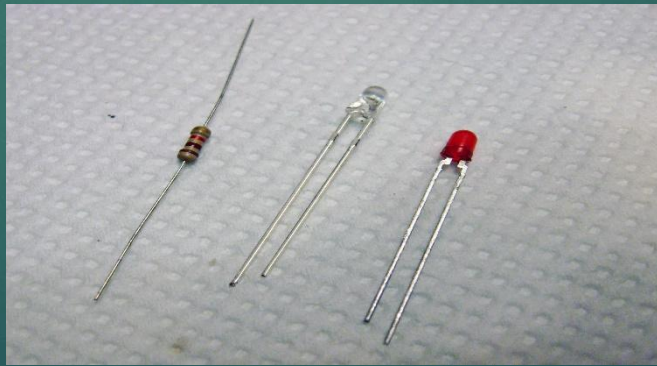


Рис. 36 - Диоды

**Устройство** полупроводниковых диодов очень разное. Это является причиной того, что существует много их типов, которые различаются как по номиналу, так и по исполняемым ими функциям. Тем не менее, в большинстве случаев основной принцип работы полупроводниковых диодов одинаков.

Диоды составляют основу современной электронной промышленности.

Принцип действия полупроводникового диода основан на свойствах полупроводников. Технология опирается на группу материалов, внесение примесей в кристаллическую решетку которых позволяет получить участки, в которых носителями заряда являются дырки и электроны.

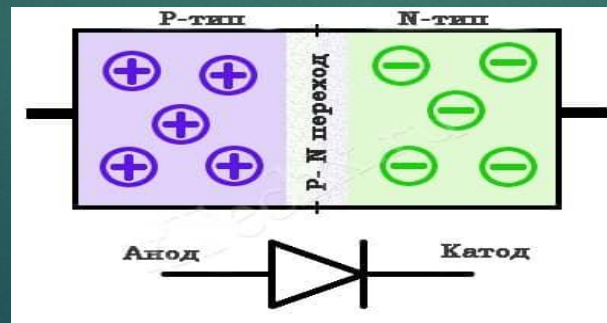


Рис. 37 - Принцип работы

P-n-переход. Диод p-n-типа получил свое название потому, что в нем используется p-n-переход, который позволяет току течь только в одном направлении. Элемент обладает и другими свойствами, которые также находят широкое применение. Полупроводниковые диоды, например, способны излучать и регистрировать свет, изменять емкость и регулировать напряжение. P-n-переход является базовой полупроводниковой структурой.



## Характеристики и параметры

Материал полупроводника Материал, используемый в р-n-переходах, имеет первостепенное значение, поскольку он влияет на многие основные характеристики полупроводниковых диодов. Наиболее широко применяется кремний, поскольку он отличается высокой эффективностью и низкими производственными издержками. Еще одним часто используемым элементом является германий. Другие материалы, как правило, применяются в диодах специального назначения. Выбор полупроводникового материала важен, поскольку от него зависит порог проводимости - около 0,6 В для кремния и 0,3 В для германия.

## 10. Биполярные и полевые транзисторы тип работы и характеристики

Среди полупроводниковых приборов существуют две большие группы, в состав которых входят полевые и биполярные транзисторы. Они широко используются в электронике и радиотехнике в качестве генераторов, усилителей и преобразователей электрических сигналов. Чтобы понять, в чем основное различие этих устройств, необходимо рассмотреть их более подробно.

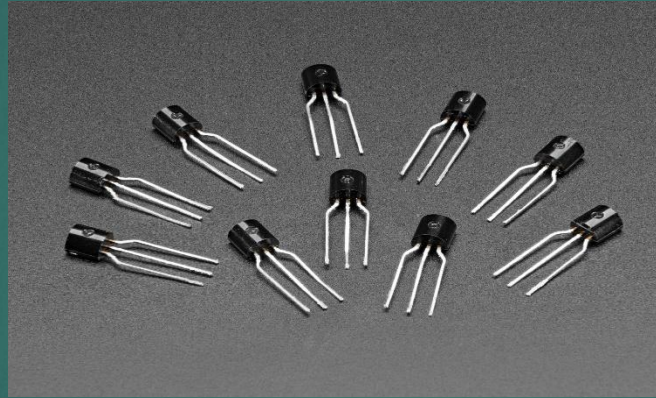


Рис. 38 - Биполярные транзисторы

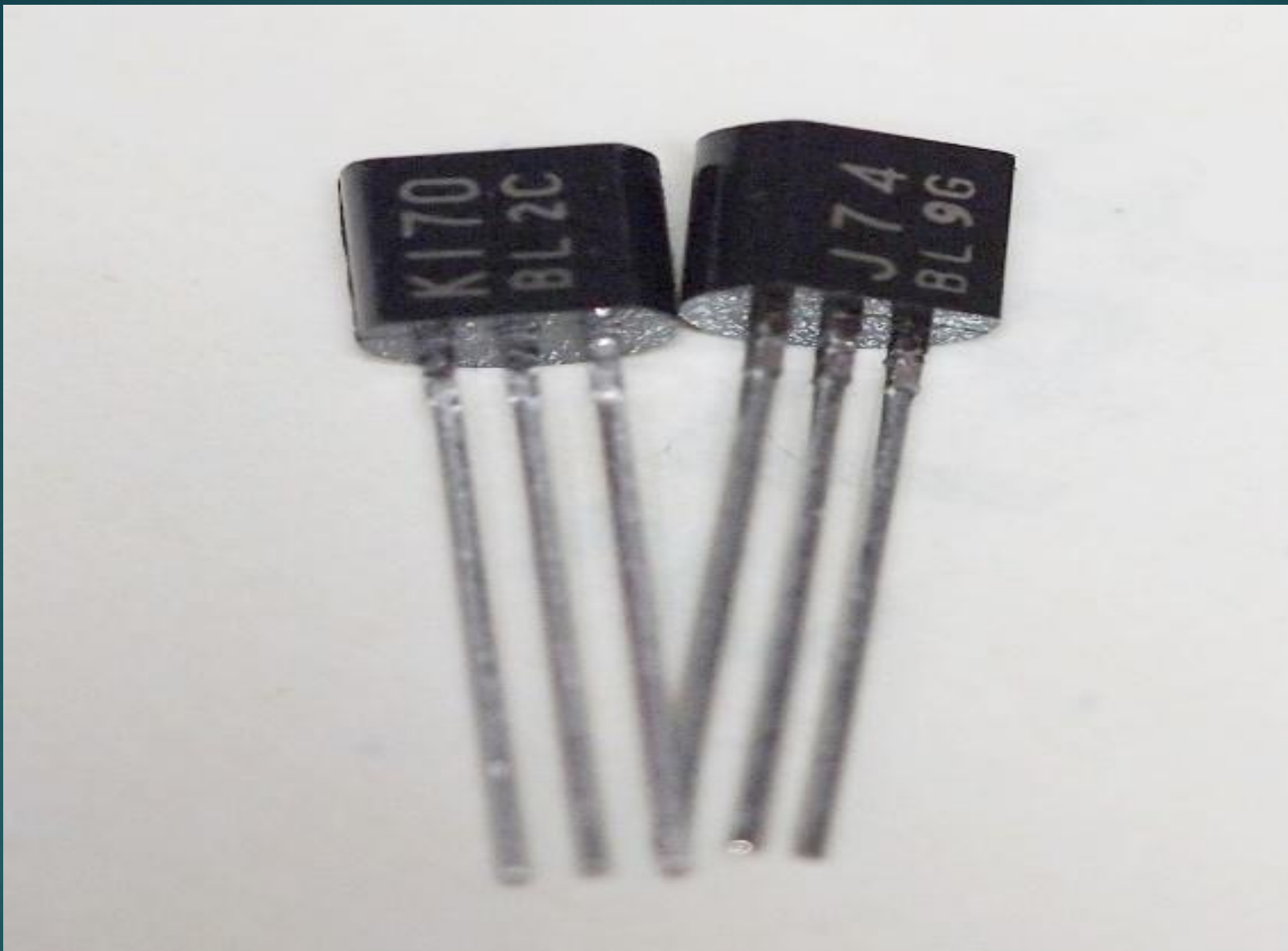


Рис. 39 - Полевые транзисторы



# Биполярные транзисторы

Биполярные транзисторы относятся к группе полупроводниковых приборов. Они имеют три вывода и два p-n-перехода. Принцип работы этих устройств позволяет использовать и положительные и отрицательные заряды, то есть, дырки и электроны. Управление током, протекающим через них, осуществляется специально выделенным управляющим током. Благодаря своим качествам, этот активный прибор получил широкое распространение.



Рис. 40 - Схема классификации основных типов транзистора

Основой биполярных транзисторов являются трехслойные полупроводники, типа «р-п-р» и «п-р-п», а также р-п-переходы, в количестве двух. Каждый полупроводниковый слой соединяется с внешним выводом через невыпрямляющий металло-полупроводниковый контакт. В качестве базы используется средний слой, подключенный к соответствующему выводу. Два крайних слоя также соединяются с выводами и называются эмиттером и коллектором. На схемах эмиттер обозначается стрелкой, которая показывает направление тока, проходящего через транзистор.



Рис. 41 - Строение биполярного транзистора

В различных приборах, носители электричества дырки и электроны **выполняют** собственные индивидуальные функции. Тип n-p-n транзисторов получил **наибольшее** распространение, по сравнению с p-n-p-типом, благодаря лучшим характеристикам и параметрам. Это связано с тем, что в n-p-n устройствах основная роль отводится электронам, обеспечивающим все электрические процессы. Их подвижность в 2-3 раза выше, чем у дырок, таким образом, они проявляют более высокую активность.



Рис. 42 - Принцип работы биполярного n-p-n транзистора



# Свойства полевых транзисторов

К полевым транзисторам относятся устройства, в которых управление всеми процессами осуществляется действующим электрическим полем, направленным перпендикулярно току. Они еще носят название униполярных транзисторов. В своей конструкции эти приборы имеют три контакта, называемые истоком, стоком и затвором. Кроме этого, существует проводящий слой, называемый каналом, по которому происходит течение тока.



Рис. 43 - Схема полевых транзисторов

## 11. Тиристоры: структура, характеристики параметры

**Тиристоры** - полупроводниковые приборы, имеющие три и более p-n-переходов.

**Тиристор** - электронный ключ, т. е имеет два состояния: включен (открыт) и выключен (закрит). VS1 – динистор ; VS2, VS3 – тринистор ; VS4 - симистор.

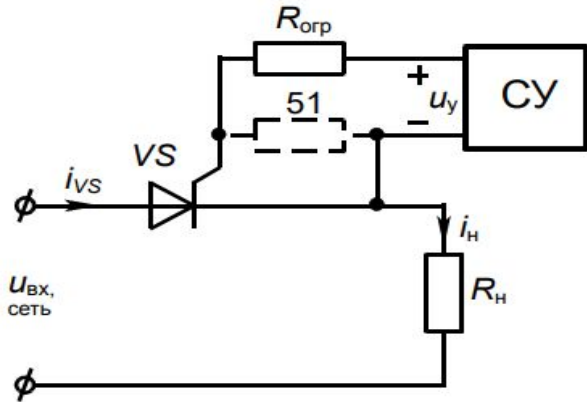


Рис. 44 - Тиристоры

Максимальное напряжение, прикладываемое к тиристору составляет в пределах до нескольких сотен (тысяч) вольт, а максимальный ток лежит в диапазоне от нескольких ампер до тысячи ампер

# Применение тиристоров

## Тиристорный регулятор мощности



$R_H$  – нагрузки (эл. лампа, эл. плита и т.д.);  
51 – резистор 51 Ом для повышения помехоустойчивости;  
СУ – система управления – вырабатывает импульсы, отпирающие тиристор.

Рис. 45 - Тиристорный регулятор мощности

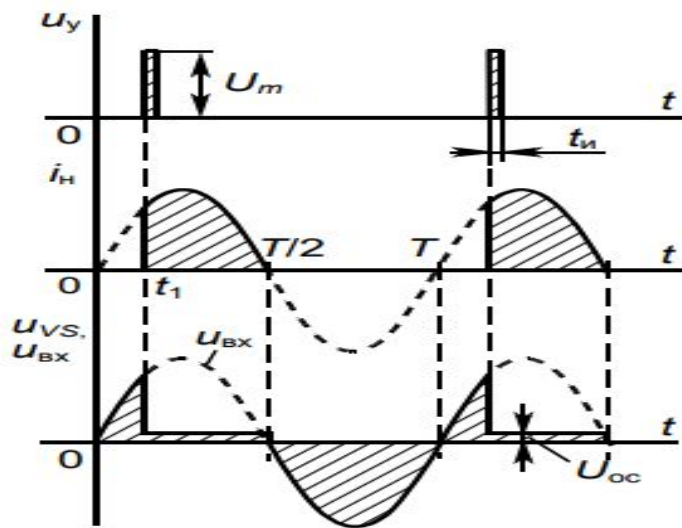


Рис. 46 - График работы тиристора



## Заключение

Нелинейная электрическая цепь - это если хотя бы один из её элементов обладает нелинейной характеристикой. Все электрические цепи являются нелинейными. Они могут считаться линейными в ограниченных диапазонах значений токов и напряжений. Активные нелинейные сопротивления характеризуются вольтамперной характеристикой. Примером активного нелинейного сопротивления является полупроводниковый диод. Примером управляемого активного нелинейного сопротивления является транзистор. Другим примером управляемого активного нелинейного сопротивления является тиристор.