

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

И

ЭЛЕКТРОНИКА

**Наглядные
пособия**

Таблицы

Схемы



Раздел 1. Электрические цепи постоянного тока

1. Электрическая цепь и схема электрической цепи
2. Электродвижущая сила (ЭДС) и электрическое напряжение
3. Электрический ток в проводниках
4. Электрическое сопротивление
5. Закон Ома
6. Законы Кирхгофа
7. Основные характеристики источников электропитания
8. Последовательное соединение источников и потребителей
9. Параллельное соединение источников
10. Параллельное соединение потребителей
11. Вольт-амперные характеристики нелинейных электрических цепей постоянного тока
12. Графический анализ простых нелинейных электрических цепей

Раздел 2. Однофазные цепи синусоидального тока

13. Емкость в цепи синусоидального тока
14. Расчет простых цепей при последовательном соединении элементов
15. Расчет общего случая последовательного соединения элементов
16. Расчет цепей при параллельном соединении ветвей
17. Основные положения
18. Активное сопротивление в цепи синусоидального тока
19. Индуктивность в цепи синусоидального тока
20. Комплексная форма представления синусоидальных величин
21. Второй закон Кирхгофа

Раздел 3. Трехфазные цепи синусоидального тока

22. Трехфазные генераторы
23. Соединение трехфазного генератора по схеме "звезда"
24. Соединение потребителя по схеме "звезда"
25. Соединение потребителя по схеме "звезда": расчет токов при несимметричной нагрузке
26. Соединение потребителя по схеме "треугольник"
27. Соединение потребителя по схеме "треугольник": расчет токов при симметричной нагрузке
28. Соединение потребителя по схеме "треугольник": расчет токов при несимметричной нагрузке
29. Мощность трехфазной цепи
30. Измерение активной мощности в трехфазной цепи

Раздел 4. Переходные процессы

31. Размыкание электрической цепи с индуктивностью.

32. Включение цепи с емкостью. Зарядка конденсатора.
33. Включение цепи с индуктивностью

Раздел 5. Магнитная цепь

34. Закон электромагнитной индукции
35. Закон электромагнитной индукции
36. Закон полного тока
37. Механические силы в магнитном поле
38. Примеры магнитных цепей
39. Сердечники электрических машин и аппаратов
40. Принцип действия однофазного трансформатора
41. Режимы работы трансформатора
42. Трехфазный трансформатор
43. Трехфазный трансформатор
44. Работа трансформатора в режиме нагрузки
45. Трансформаторы
46. Измерительные трансформаторы
47. Автотрансформатор

Раздел 6. Машины постоянного тока

48. Электродвижущая сила якоря (ЭДС) и электромагнитный момент
49. Искусственные характеристики двигателя с независимым возбуждением
50. Коммутация якоря
51. Реакция якоря
52. Естественные и искусственные характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения
53. Схемы возбуждения. Генератор независимого возбуждения
54. Естественные характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением
55. Генераторы параллельного и смешанного возбуждения
56. Преобразование энергии в электродвигателе
57. Преобразование энергии в электрическом генераторе

Раздел 7. Асинхронные машины

58. Расчет и построение механической характеристики асинхронного двигателя
59. Тормозные режимы работы асинхронного двигателя
60. Тормозные режимы работы асинхронного двигателя
61. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя
62. Энергетическая диаграмма и момент на валу асинхронного двигателя

Раздел 8. Основы электропривода

63. Динамический момент (внутренний момент)
64. Приведение моментов сопротивлений (усилий) и моментов инерции (движущихся масс) к валу двигателя

- | | |
|---|---|
| 65. Управление электрическим приводом. Пуск двигателя постоянного тока в функции скорости (ЭДС) | 101. Счетчики импульсов и регистры |
| 66. Управление электрическим приводом. Пуск двигателя постоянного тока в функции времени | 102. Триггеры |
| 67. Нагрев и режимы работы электродвигателя | 103. Полупроводниковые стабилизаторы |
| 68. Выбор мощности двигателя по нагреву | 104. Тиристоры |
| 69. Управление электрическим приводом | 105. Биполярные транзисторы |
| 70. Аппаратура релейно-контакторного управления электроприводом | 106. Характеристики биполярного транзистора |
| 71. Аппаратура релейно-контакторного управления электроприводом | |
| 72. Аппаратура релейно-контакторного управления электроприводом | |
| 73. Однополюсный контактор постоянного тока | |
| 74. Реле времени | |
| 75. Реле тока и напряжения | |
| 76. Понятие о приводе рабочей машины | |
| 77. Моменты, действующие в приводе | |

Раздел 9. Электроснабжение

- 78. Электроснабжение промышленного района
- 79. Электроснабжение крупного предприятия

Раздел 10. Электрические измерения

- 80. Измерение напряжения
- 81. Измерение активных сопротивлений
- 82. Измерения тока и мощности сопротивлений
- 83. Измерения. Электронный вольтметр постоянного тока. Электронный вольтметр переменного тока. Цифровой измерительный прибор. АЦП последовательного приближения
- 84. Измерения. Методы и погрешности
- 85. Измерения. Переходные процессы
- 86. Измерения. Структурная схема аналогового электроизмерительного прибора. Условные обозначения

Раздел 11. Основы промышленной электроники

- 87. Однофазный управляемый выпрямитель со средней точкой
- 88. Однофазный управляемый выпрямитель со средней точкой: Временные диаграммы напряжений и токов
- 89. Однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой
- 90. Однофазный мостовой выпрямитель
- 91. Трехфазный выпрямитель со средней точкой
- 92. Трехфазный управляемый выпрямитель со средней точкой
- 93. Инвертор, ведомый сетью
- 94. Работа выпрямителя на нагрузку различного характера
- 95. Трехфазная мостовая схема выпрямления
- 96. Выпрямители
- 97. Полупроводниковые диоды
- 98. Усилители
- 99. Автономные инверторы
- 100. Оптоны

Электрические цепи постоянного тока

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

Источники электропитания

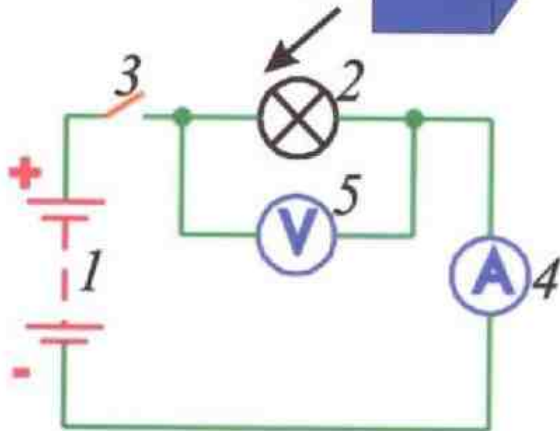
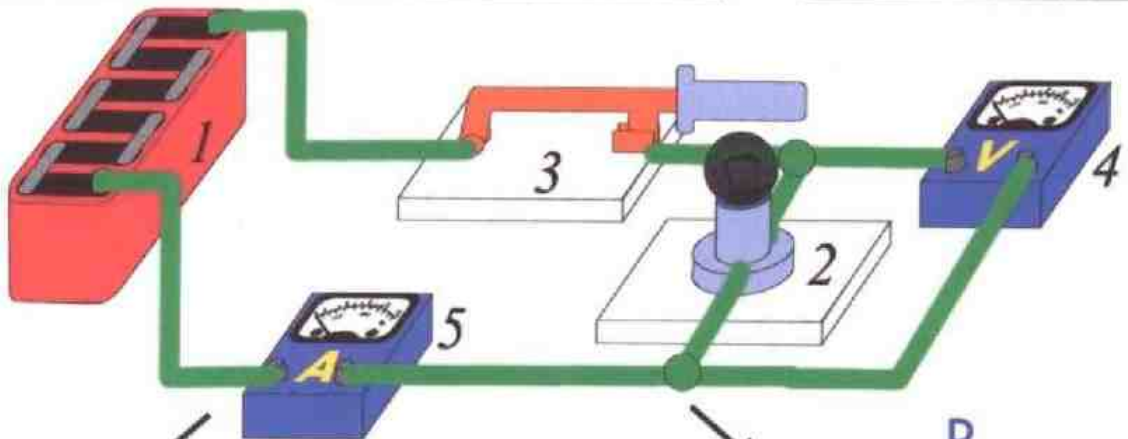
Потребители

Вспомогательная аппаратура

- Первичные**
- электромашинные генераторы
 - гальванические элементы
 - аккумуляторы**

- Вторичные**
- выпрямитель
 - инверторы
 - трансформатор

- провода**
- коммутационная аппаратура**
- измерительные приборы
- аппаратура защиты



Принципиальная схема

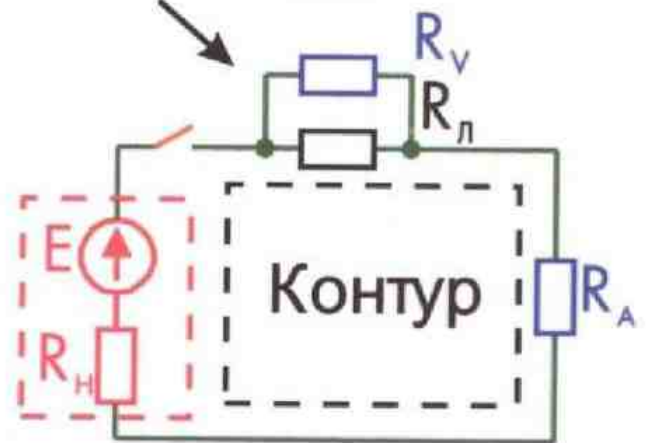


Схема замещения

Южно-Уральский Государственный университет

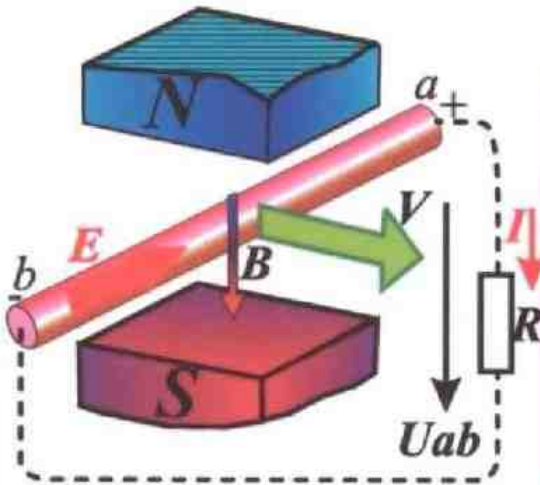
РНПО Росучприбор



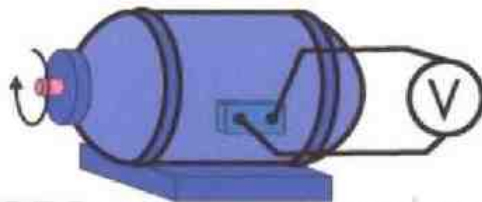
Электрические цепи постоянного тока

Электродвижущая сила (ЭДС) и электрическое напряжение

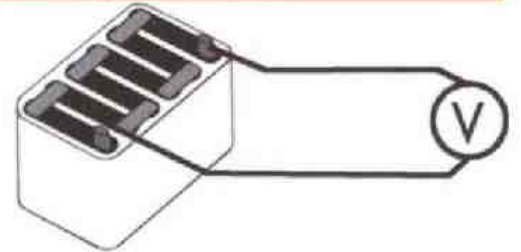
$$E = B l V, \text{ Вольт, В}$$



ЭДС (E) - работа неэлектростатических сил (сторонних) при перемещении единичного положительного заряда от одного зажима источника к другому, т.е. это работа сторонних сил, отнесенная к единице количества электричества

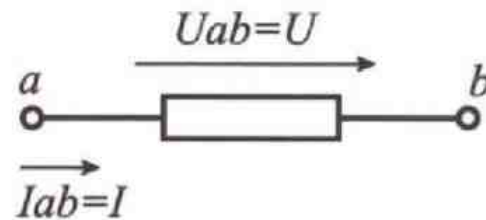
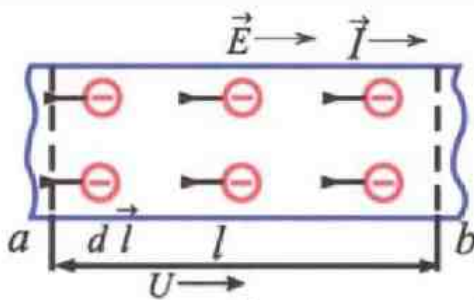


ЭДС электромашиного генератора $E = C_e n \Phi$



ЭДС аккумулятора

Электрическое напряжение (U) между точками а и в равно работе (A), совершаемой силами электрического поля при перемещении единичного положительного заряда между этими точками, т.е. это работа электрических сил отнесенная к единице количества электричества.



$$U = \int_a^b \vec{E} d\vec{l} = \frac{1}{q} \int_a^b \vec{F} d\vec{l} = \frac{A}{q} = \Phi_a - \Phi_b$$

Φ_a, Φ_b - потенциалы однородного постоянного электрического поля в поперечных сечениях а и в участка проводника

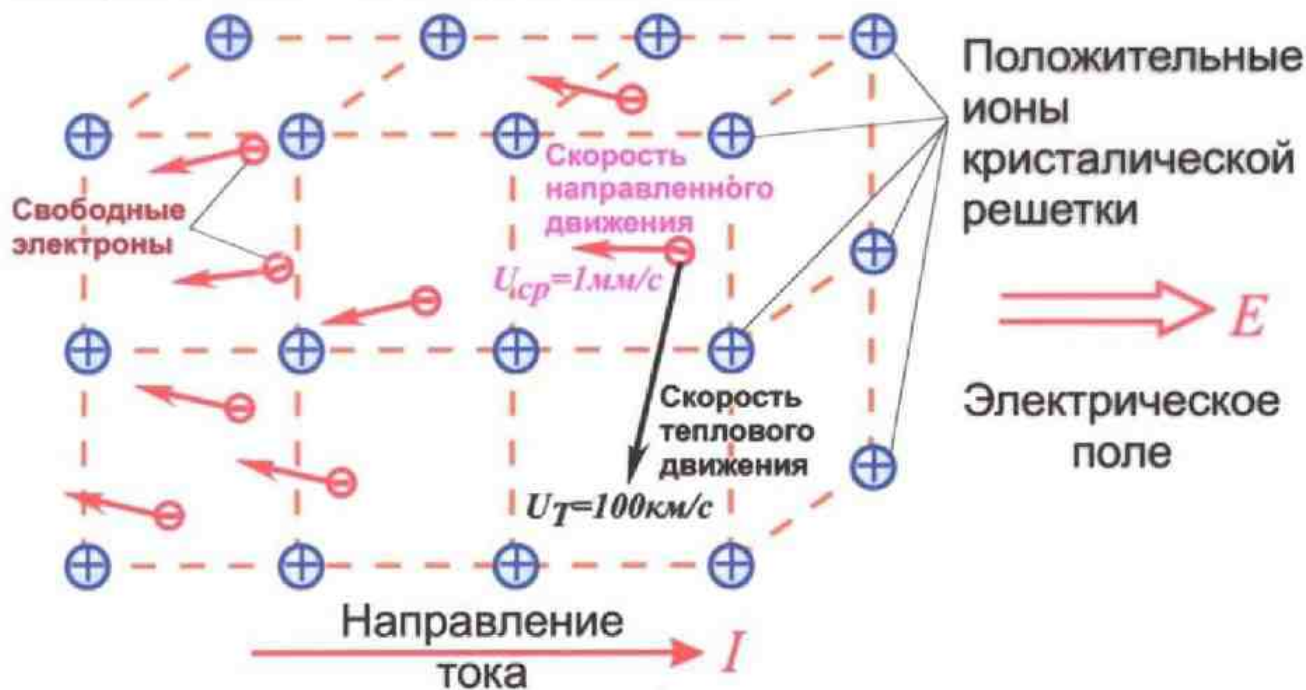
Южно-Уральский Государственный университет

РНПО Росучприбор



Электрические цепи постоянного тока

Электрический ток в проводниках

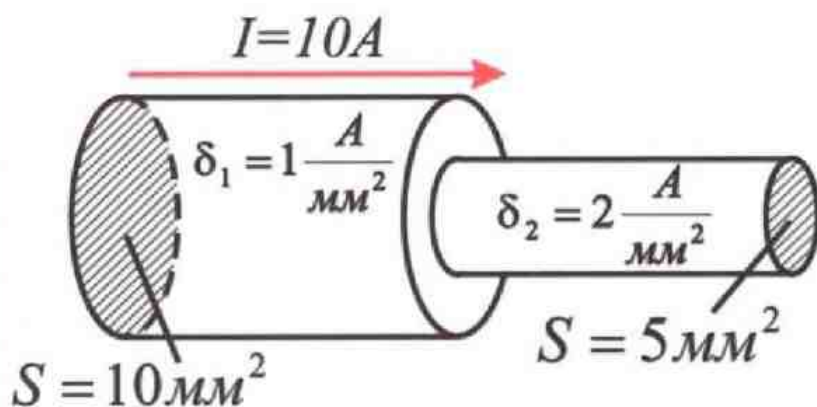


Электрический ток - упорядоченное движение электрических зарядов

$$i = \frac{dq}{dt}, \text{ Ампер [A]}$$

$$I = \frac{q}{t}, \text{ Ампер [A]}$$

Величина тока - количество зарядов q , прошедших через поперечное сечение проводника в единицу времени



Плотность тока

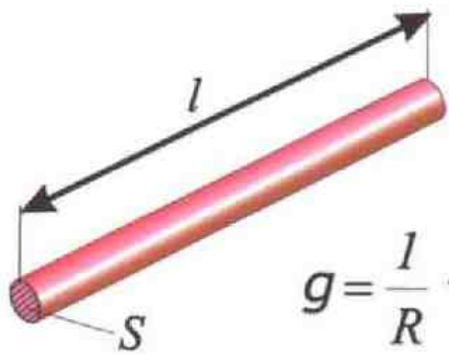
$$\delta = \frac{I}{S} = (1 \dots 5) \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$$



Электрические цепи постоянного тока

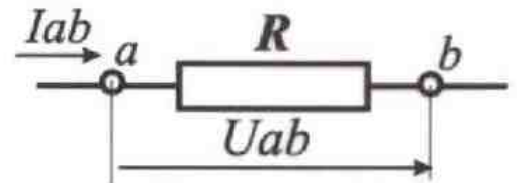
Электрическое сопротивление

Сопротивление - способность проводника оказывать противодействие направленному движению электрических зарядов.



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

$$g = \frac{l}{R} \text{ - проводимость}$$



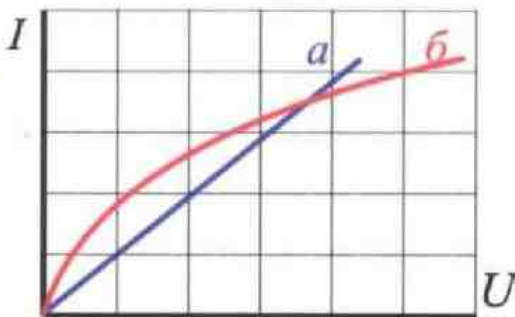
Закон Ома

$$U_{ab} = R \cdot I_{ab}$$



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

а-линейная



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

б-нелинейная

Вольт-амперные характеристики

Электрическая энергия - $W = U \cdot I \cdot t$ Дж [Вт·с]

$P = \frac{W}{t} = U \cdot I = I^2 \cdot R$ - **Электрическая мощность**
(секундный расход энергии)

Зависимость сопротивления от температуры
а- температурный коэффициент сопротивления

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)]$$



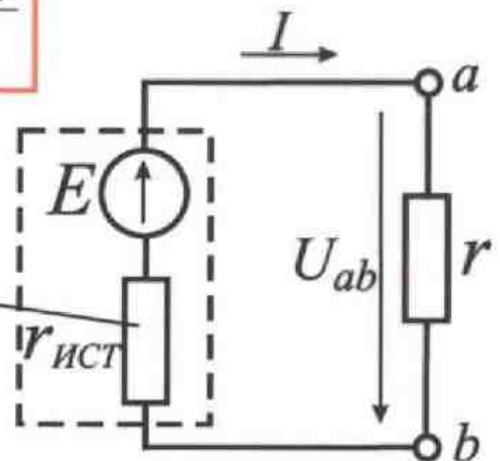
Электрические цепи постоянного тока

Закон Ома

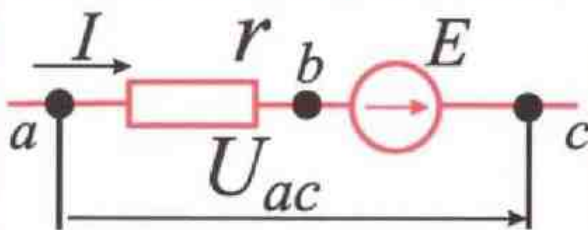
Закон Ома для пассивного участка цепи.

$$U_{ab} = I \cdot r \quad \text{или} \quad I = \frac{U_{ab}}{r} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{r}$$

Внутреннее сопротивление источника

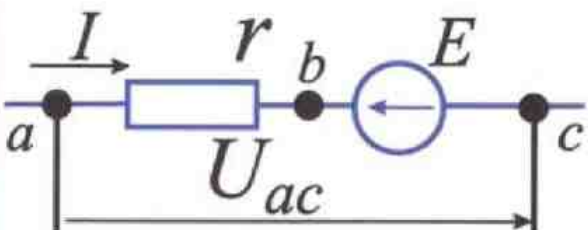


Закон Ома для активного участка



$$I = \frac{U_{ac} + E}{r}$$

В источнике ток направлен от (-) к (+)



$$I = \frac{U_{ac} - E}{r}$$

В потребителе ток направлен от (+) к (-)

Напряжение на зажимах потребителя больше его ЭДС на величину внутреннего падения напряжения $I \cdot r$

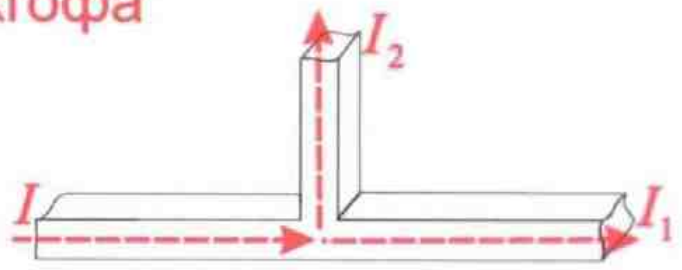


Электрические цепи постоянного тока

Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа

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



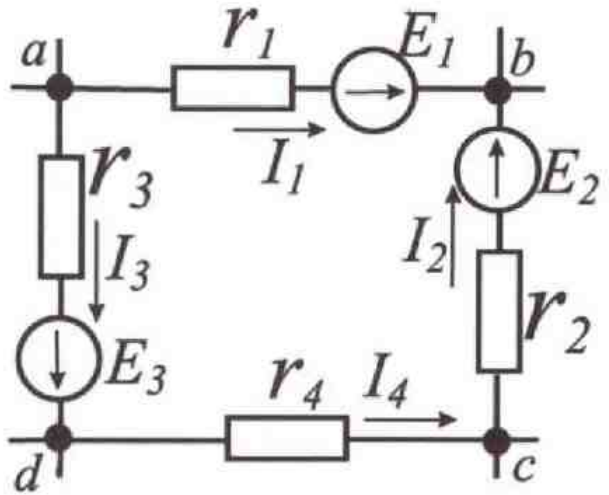
n - число токов в узле

$$I = I_1 + I_2$$

Алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю

Второй закон Кирхгофа

a-b-c-d-a - замкнутый контур в разветвленной цепи



$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m I_k \cdot r_k$$

n - число ЭДС в контуре

m - число сопротивлений в контуре

$$E_1 - E_2 - E_3 = I_1 \cdot r_1 - I_2 \cdot r_2 - I_4 \cdot r_4 - I_3 \cdot r_3$$

В замкнутом контуре алгебраическая сумма Э.Д.С. равна алгебраической сумме падений напряжений



Электрические цепи постоянного тока

Основные характеристики источников электропитания

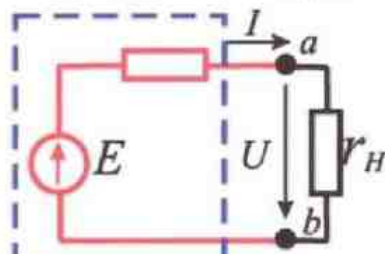
1. Электродвижущая сила (ЭДС) E , [В]

Примеры: ЭДС электромашиного генератора $E = C_e n \Phi$, где C_e - постоянная, n - частота вращения, Φ - магнитный поток; ЭДС свинцового аккумулятора $E = 0,84 + g$, где g плотность электролита [г/см³]

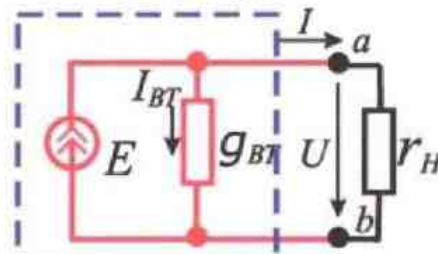
2. Внутреннее сопротивление r_{BT} , [Ом]

3. Мощность, развиваемая источником $P_{и} = E \cdot I$, [Вт].

4. Внешняя характеристика $U = f(I)$.



Источник ЭДС



Эквивалентный источник тока

$$J = I + I_{BT}$$

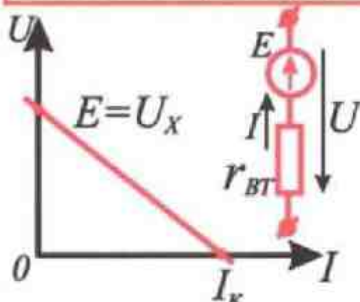
$$J = E / r_{BT} = E \cdot g_{BT}$$

$$I_{BT} = U / r_{BT} = U \cdot g_{BT}$$

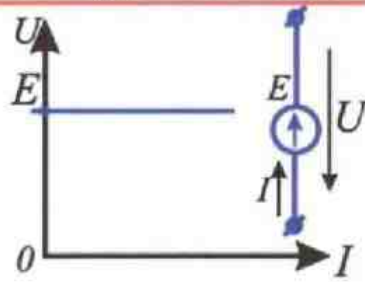
$$g = 1 / r_{BT}$$

$U = E - I r_{BT}$ - уравнение внешней характеристики

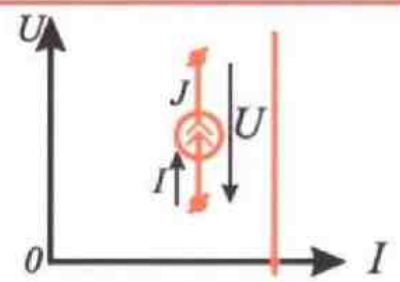
Направление на зажимах источника меньше его Э.Д.С. на величину внутреннего падения напряжения



Источник ЭДС



Идеальный источник напряжения ($r_H \gg r_{BT}$)



Идеальный источник тока ($r_{BT} \gg r_H$)

$$I_K = E / r_{BT}$$

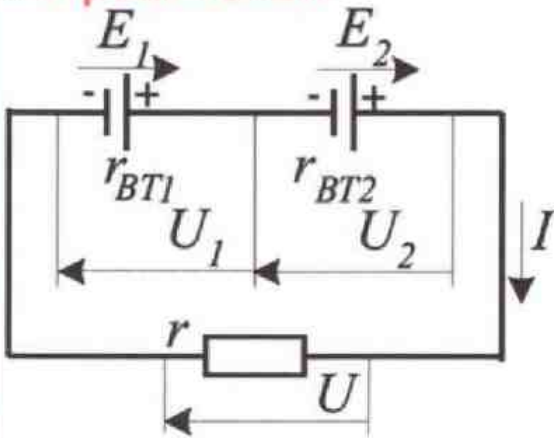
- ток короткого замыкания (величина тока ограничивается только внутренним сопротивлением источника)

$$UI = EI - I^2 \cdot r_{BT}$$

Мощность, отдаваемая источником, меньше развиваемой им мощности на величину внутренних потерь мощности



Электрические цепи постоянного тока
 Последовательное соединение источников и потребителей

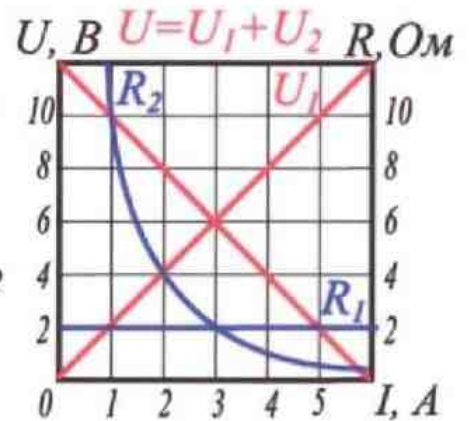
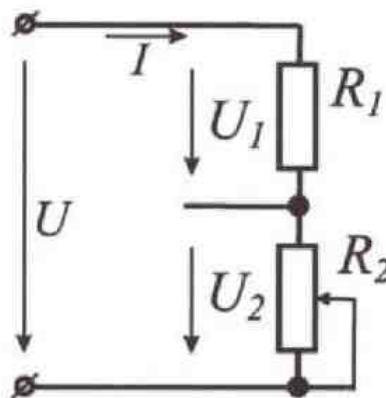
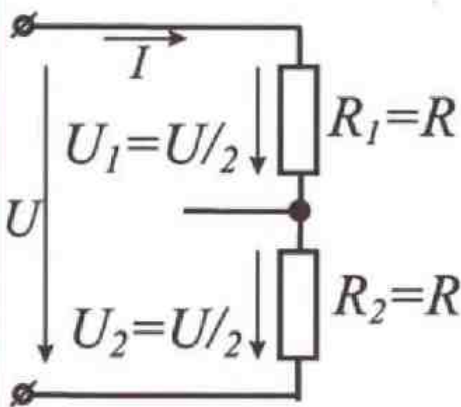


$E_{\Sigma} = E_1 + E_2$ Эквивалентная ЭДС цепи

$r_{\Sigma} = r + r_{BT1} + r_{BT2}$ Эквивалентное сопротивление цепи

$I = \frac{E}{r_{\Sigma}} = \frac{E_1 + E_2}{r_{\Sigma} + r_{BT1} + r_{BT2}}$

$U_1 = E_1 - I \cdot r_{BT1}$ - напряжение на зажимах первого источника
 $U_2 = E_2 - I \cdot r_{BT2}$ - напряжение на зажимах второго источника
 $U = U_1 + U_2$ - напряжение на зажимах потребителя



Перераспределение напряжений при изменении одного сопротивления

$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 = \sum_{k=1}^n R_k$ Эквивалентное (общее) сопротивление

$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{U}{\sum R_k}$ Ток в цепи

$U_1 = I \cdot R_1 ; U_2 = I \cdot R_2 ;$

$U = U_1 + U_2$

$U_1 : U_2 = R_1 : R_2$

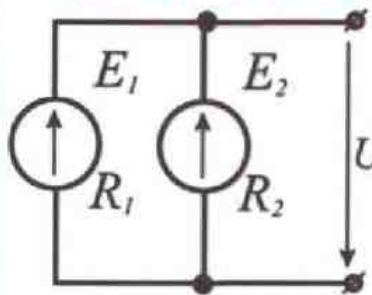
Южно-Уральский Государственный университет

РНПО Росучприбор

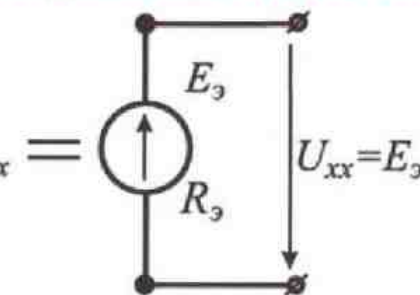


Электрические цепи постоянного тока

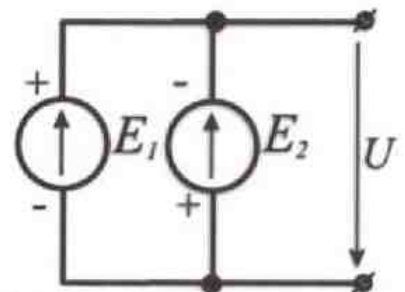
Параллельное соединение источников



U_{xx} - напряжение холостого хода



Эквивалентный источник ЭДС E_3 с внутренним сопротивлением R_3

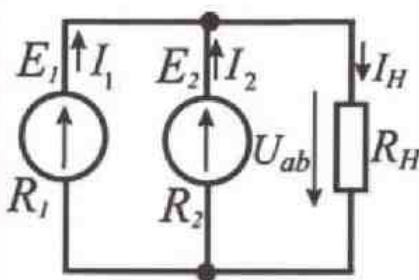


Неправильное включение на параллельную работу

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \sum \frac{1}{R_i} \quad \text{или} \quad g_3 = g_1 + g_2 = \sum g_i$$

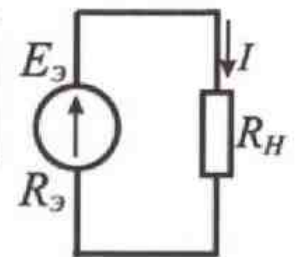
$$E_3 = U_{xx} = \frac{E_1 \cdot \frac{1}{R_1} + E_2 \cdot \frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2} = \frac{\sum E_k g_k}{\sum g_k}$$

ЭДС эквивалентного источника (напряжение холостого хода)



$$I_H = \frac{E_3}{R_H + R_3} = \frac{U_{ab}}{R_H}$$

I_H - ток нагрузки



Эквивалентная

$$U_{ab} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_H} = \frac{\sum E_k g_k}{\sum g_k}$$

- межузловое напряжение (напряжение на нагрузке)

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1}$$

- ток первого источника

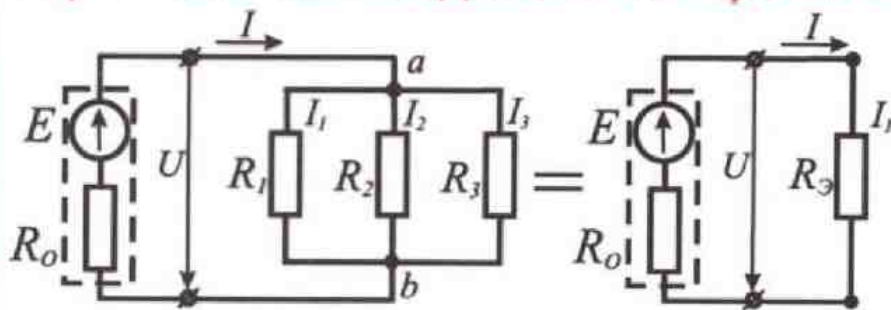
$$I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_2}$$

- ток второго источника



Электрические цепи постоянного тока

Параллельное соединение потребителей



$$I = \frac{U}{R_3} = I_1 + I_2 + I_3 = \sum I_k ;$$

- общий ток

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = U \cdot g_1 ;$$

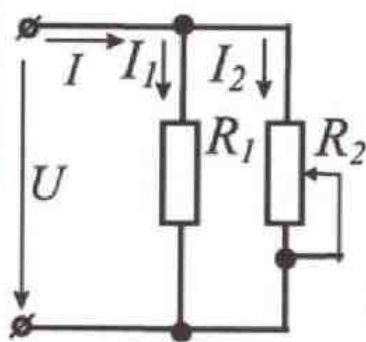
$$I_3 = \frac{U}{R_3} = U \cdot g_3 ;$$

- токи потребителей

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = U \cdot g_2 ;$$

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \sum \frac{1}{R_k} ;$$

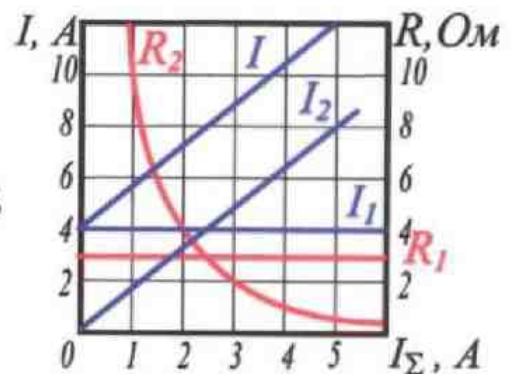
$$g_3 = g_1 + g_2 + g_3 = \sum g_k ;$$



$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} ;$$

$$I_1 = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} ;$$

$$I_2 = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} ;$$



Распределение токов при изменении сопротивления в R_2

Токи в ветвях распределяются обратно пропорционально сопротивлениям этих ветвей

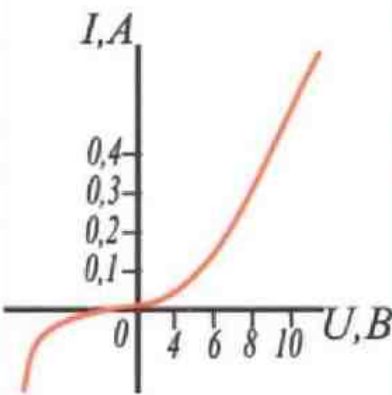
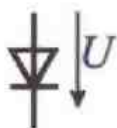
$$P = U \cdot I = \sum P_i = P_1 + P_2 = U \cdot I_1 + U \cdot I_2 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 \quad [Вт]$$



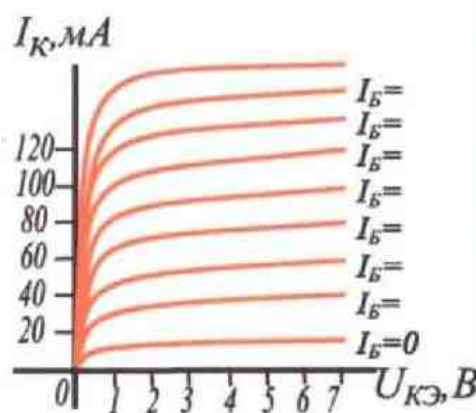
Электрические цепи постоянного тока

Вольт-амперные характеристики нелинейных электрических цепей постоянного тока

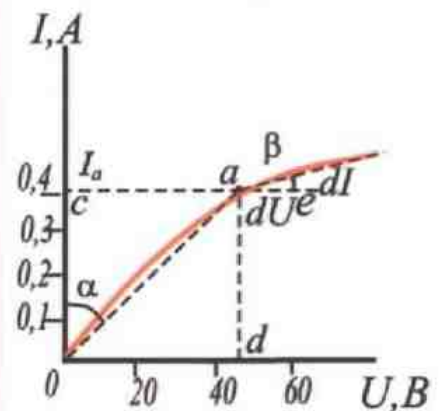
Нелинейная электрическая цепь содержит сопротивление с нелинейной зависимостью тока, протекающего через него, от приложенного к этому сопротивлению напряжения (с нелинейной В.А.Х.)



полупроводниковый диод



биполярный транзистор



лампа накаливания

$$R_{ст} = \frac{U_a}{I_a} = \frac{m_0 \cdot OC}{m_1 \cdot OC} = m_R \cdot tg\alpha$$

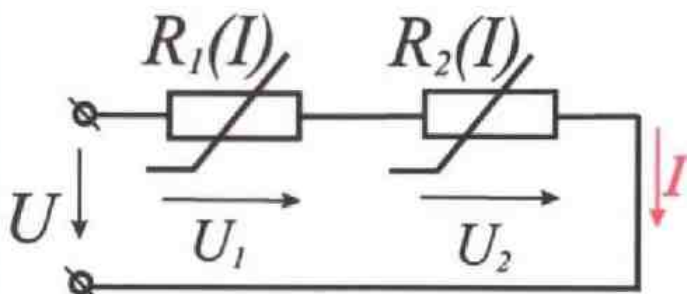
Статическое сопротивление в точке а

$$R_{дин} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{m_U \cdot ae}{m_i \cdot be} = m_R \cdot tg\beta$$

Динамическое сопротивление в точке а

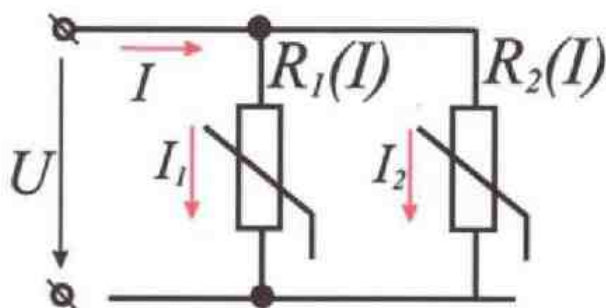
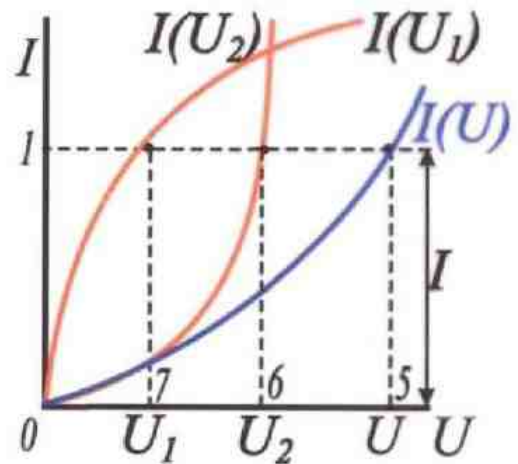


Электрические цепи постоянного тока
 Графический анализ простых нелинейных электрических цепей



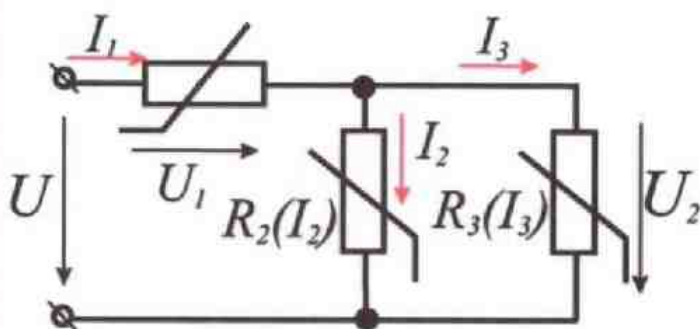
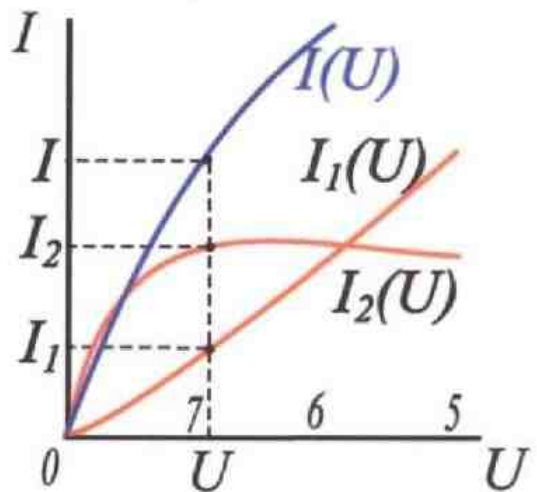
$I(U)$ - ВАХ цепи

$$U = U_1 + U_2$$

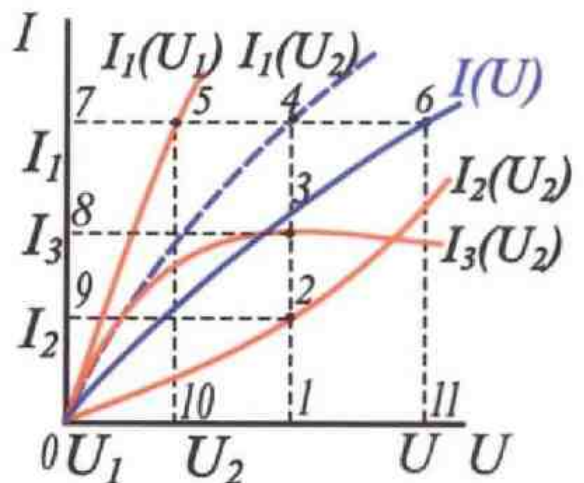


$I(U)$ - ВАХ цепи

$$I = I_1 + I_2$$



$$I_1 = I_2 + I_3 \quad U_1 = U_2 + U_3$$



$I_1(U_2)$ - ВАХ параллельного

$I_1(U)$ - ВАХ цепи

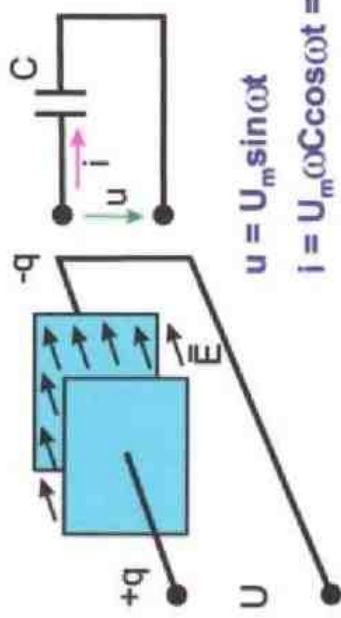




Однофазные цепи синусоидального тока

Емкость в цепи синусоидального тока

Ток конденсатора - ток периодического перезаряда его обкладок



$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU_c}{dt}$$

$$U_c = I_c X_c$$

напряжение на конденсаторе

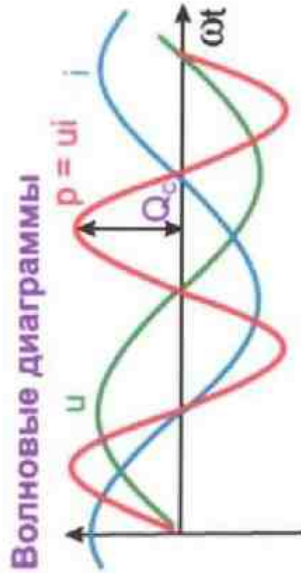
$$u = U_m \sin \omega t$$

$$i = U_m \omega C \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

емкостное реактивное сопротивление

На участке с емкостью ток опережает напряжение по фазе на 90°



$$U_c I_c = Q_c$$

емкостная реактивная мощность

Q_c характеризует периодический обмен энергией между электрическим полем конденсатора и источником

Векторная диаграмма

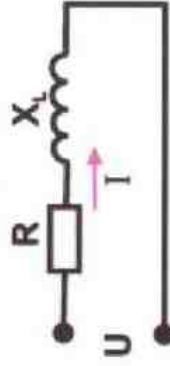


$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d\omega t = 0$$

Однофазные цепи синусоидального тока

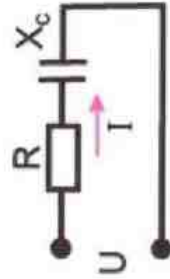
Расчет простых цепей при последовательном соединении элементов

Схема и уравнения



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

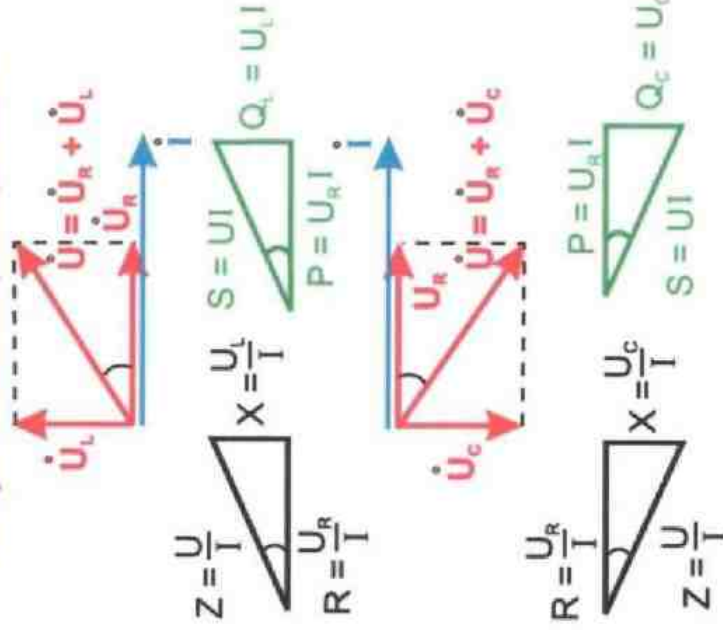
$$u = I_m Z_m \sin(\omega t + \phi)$$



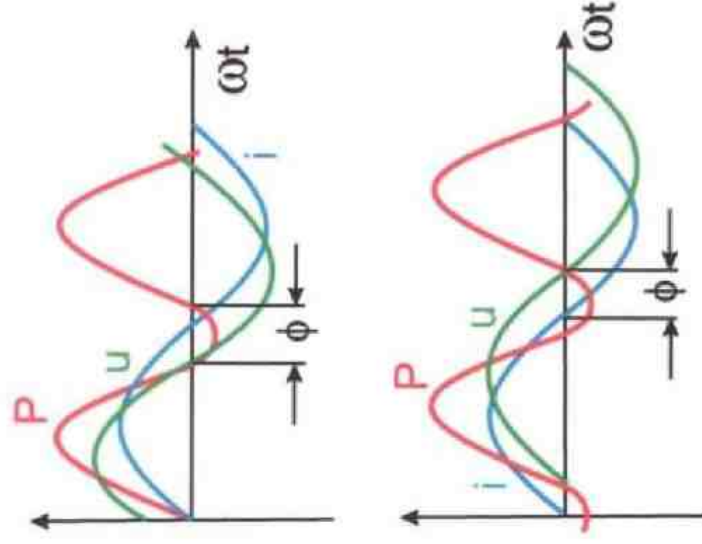
$$i = I_m \sin \omega t$$

$$u = I_m Z_m \sin(\omega t - \phi)$$

Треугольники напряжений, сопротивлений, мощностей



Волновые диаграммы



$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ Ом, полное сопротивление цепи}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ В}\cdot\text{А, полная мощность цепи}$$

Треугольники сопротивлений и мощностей подобны треугольнику напряжений цепи

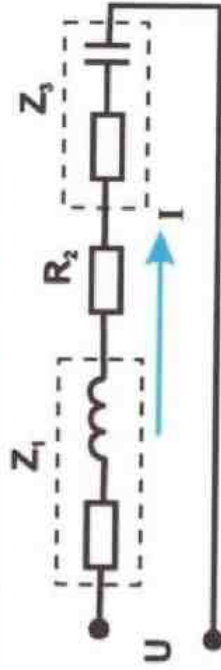
$$S = UI \quad P = UI \cos \phi \quad Q = UI \sin \phi$$





Однофазные цепи синусоидального тока

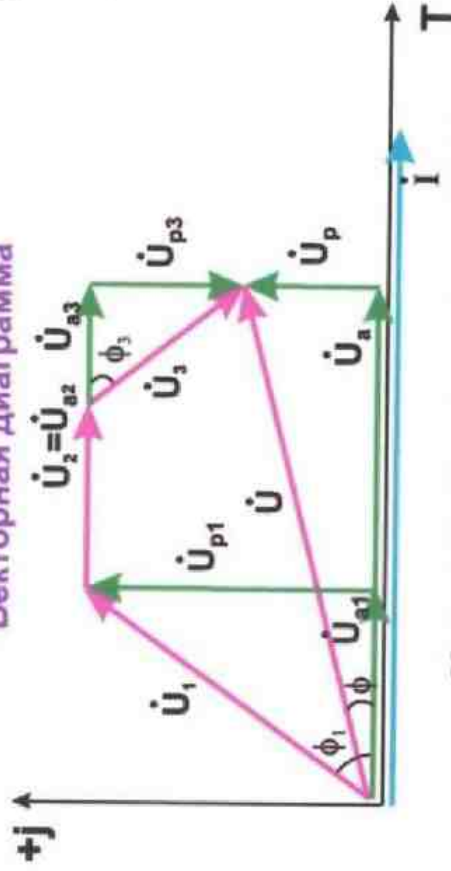
Расчет общего случая последовательного соединения элементов



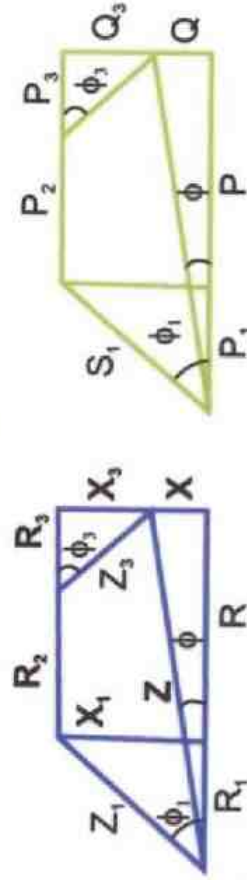
$$U = \sqrt{(\sum U_a)^2 + (\sum U_{pL} - \sum U_{pC})^2} = IZ$$

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_{L1} - X_{L2})^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Векторная диаграмма



Многоугольники сопротивлений и мощностей



U_a - падения напряжения на активных сопротивлениях (активные составляющие)

U_p - падения напряжения на реактивных сопротивлениях (реактивные составляющие)

$$\operatorname{tg} \phi = (\sum U_L - \sum U_C) / (\sum U_a) = X / R = Q / P$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = UI \cos \phi$$

$$Q = Q_{1L} - Q_{3C} = UI \sin \phi$$

Закон Ома в комплексной форме

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = \dot{I}Z$$

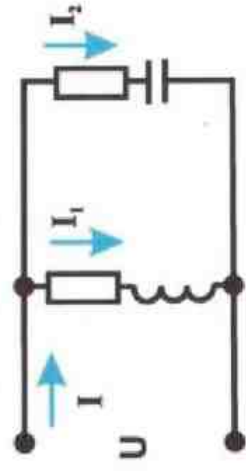
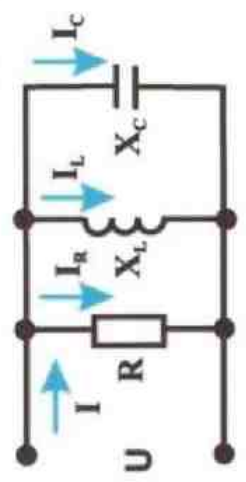
$$\dot{Z} = R_1 + R_2 + R_3 + j(X_{1L} - X_{3C}) = Ze^{j\phi}$$

\dot{Z} - комплексное сопротивление

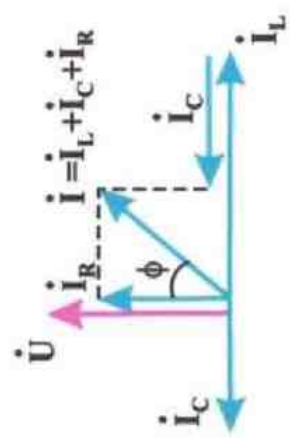
Однофазные цепи синусоидального тока

Расчет цепей при параллельном соединении ветвей

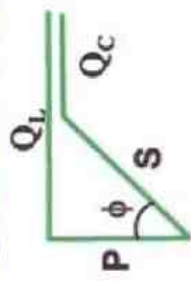
Ветви с идеальными элементами



Векторная диаграмма



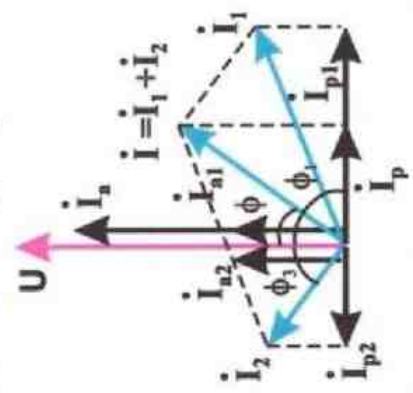
Многоугольник мощностей



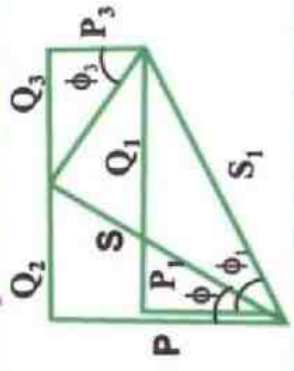
$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}$$

$$\operatorname{tg} \phi = (I_L - I_C) / I_R = (Q_L - Q_C) / P$$

Векторная диаграмма



Многоугольник мощностей



$$I_a = I \cos \phi = P / U$$

активная составляющая тока, характеризует активную мощность ветви

$$I_p = I \sin \phi = Q / U$$

реактивная составляющая тока, характеризует реактивную мощность в ветви

$$I = \sqrt{(\sum I_a)^2 + (\sum I_{pL} - \sum I_{pC})^2}$$

многоугольник мощностей цепи подобен многоугольнику ее токов

$$P = P_1 + P_2 = UI \cos \phi$$

$$Q = Q_{1L} - Q_{2C} = UI \sin \phi$$

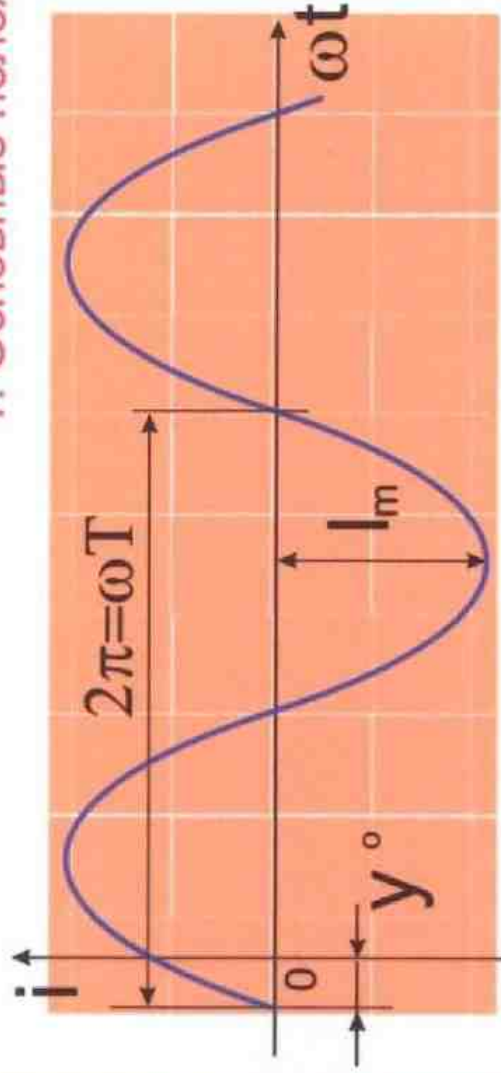
$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$





Синусоидальный ток

1. Основные положения

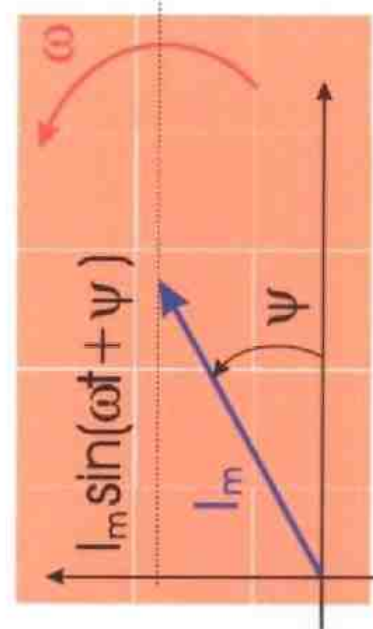


$$U = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

I_m - амплитудное значение тока
 T, c - период синусоиды
 $1/T = f, \Gamma_{ц}$ - циклическая частота
 $\omega = 2\pi f, 1/c$ - круговая частота
 $\psi, \Gamma_{рад(рад)}$ - начальная фаза

Действующее значение тока - это величина постоянного тока, эквивалентного данному переменному по механическому и тепловому воздействию.

2. Представление синусоиды вращающимся вектором



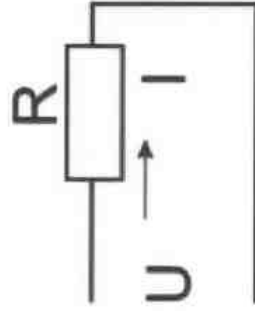
Проекция вращающегося вектора на неподвижную ось изменяется во времени по синусоидальному закону. Каждой синусоиде можно поставить в соответствие вращающийся вектор. Обычно векторные диаграммы строятся для действующих значений.

Положительное направление вращения векторов принято против часовой стрелки !



Однофазные цепи синусоидального тока

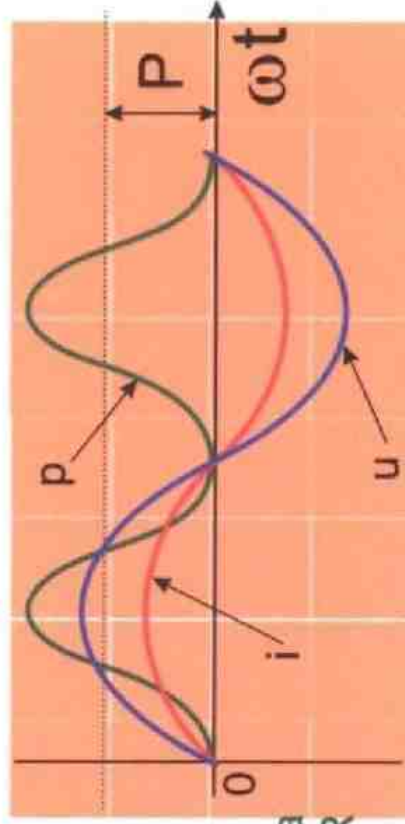
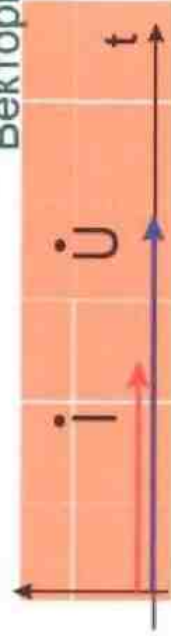
6. Активное сопротивление в цепи синусоидального тока



Закон Ома

$$u = U_m \sin \omega t \quad U = U \\ i = I_m \sin \omega t \quad I = I$$

Векторная диаграмма участка с R



Волновая диаграмма участка с R

На участке с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе !

7. Мощность участка с активным сопротивлением

$$P = UI$$

Формула расчета мощности

Мгновенное значение мощности:

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t = UI (1 - \cos 2\omega t)$$

В электрических схемах активным сопротивлением моделируют необратимое преобразование в электротехнических устройствах электрической энергии источника в механическую, тепловую, энергию излучения и химических реакций.

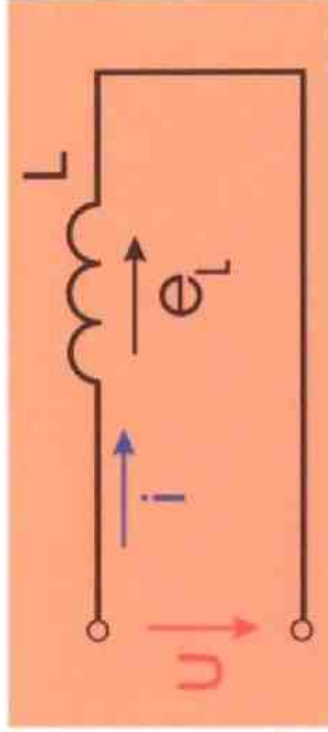
Среднее значение мощности:

$$P = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} p \, d\omega t = \frac{UI}{2p} \int_0^{2p} (1 - \cos 2\omega t) \, d\omega t = UI$$



Однофазные цепи синусоидального тока

8. Индуктивность в цепи синусоидального тока



Индуктивное реактивное сопротивление

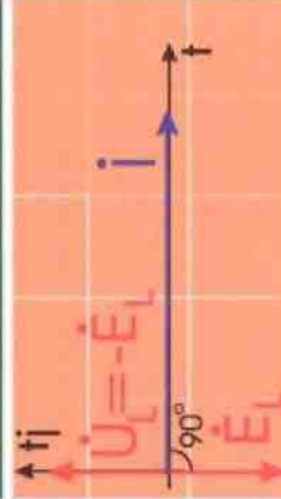
$$X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L$$

$$i = I_m \sin(\omega t); \quad u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Закон Ома

$$U_L = I_L \cdot X_L$$

Векторная диаграмма

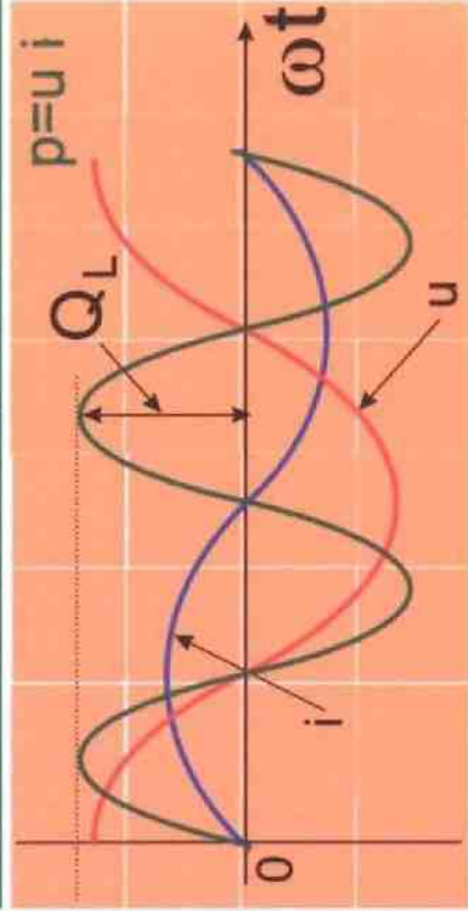


ЭДС самоиндукции

$$E_L = -L \frac{di}{dt}$$

На участке с индуктивностью ток отстает по фазе от напряжения на 90° .

Волновые диаграммы



Индуктивная реактивная мощность

$$Q_L = U_L \cdot I_L$$

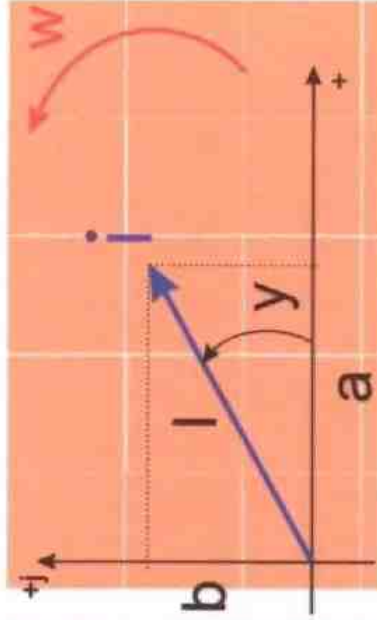
Q_L характеризует периодический обмен энергией между источником и магнитным полем катушки.

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p \, d\omega t = 0$$

Однофазные цепи синусоидального тока

3. Комплексная форма представления синусоидальных величин

Связь вектора с комплексной плоскостью



Формы записи вектора

Алгебраическая

$$\dot{I} = a + jb$$

Тригонометрическая

$$\dot{I} = I(\cos \psi + j \sin \psi)$$

Показательная

$$\dot{I} = I \cdot e^{j\psi}$$

$$I = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\cos \psi = a/I$$

$$\sin \psi = b/I$$

$$\operatorname{tg} \psi = b/a$$

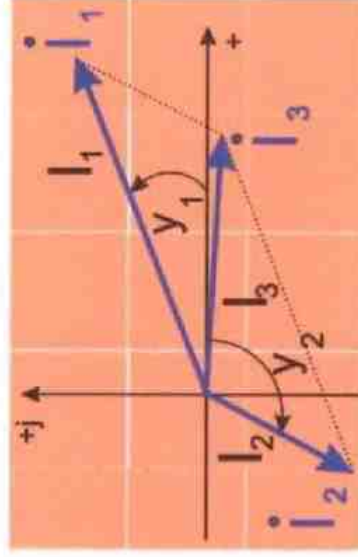
I - длина вектора

a, b - проекции на действительную и мнимую оси

ψ - начальная фаза вектора

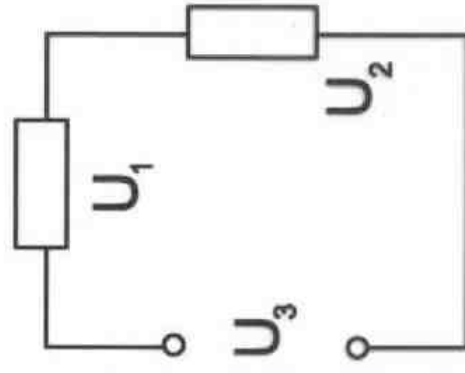
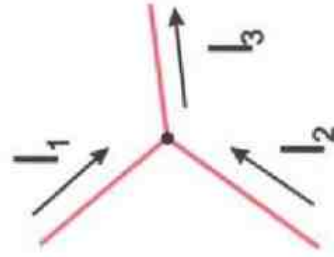
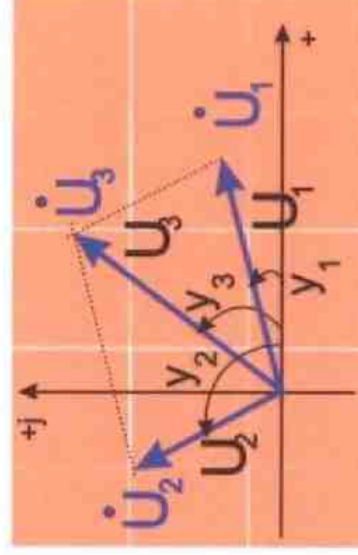
4. Первый закон Кирхгофа

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$



5. Второй закон Кирхгофа

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$$



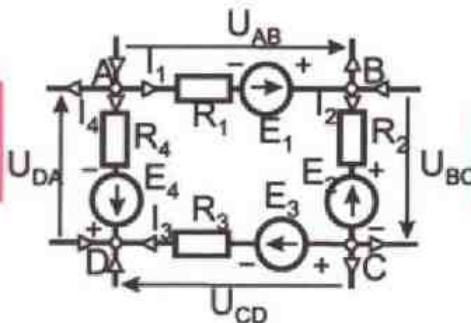
Однофазные цепи синусоидального тока

ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0$$

или $e_0 U = e_0 (IR - E) = 0$

Напряжение вдоль замкнутого контура



$$E_1 - E_2 - E_3 - E_4 = I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4$$

или $e_0 E = e_0 IR$

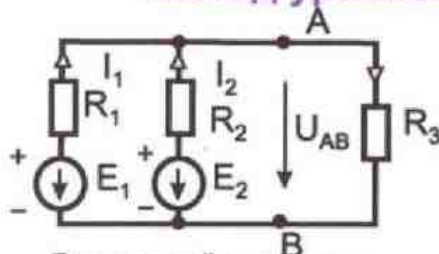
Второй закон Кирхгофа

Замкнутый контур в разветвлённой цепи

$$e_0 E = e_0 IR$$

В замкнутом контуре алгебраическая сумма э.д.с. равна алгебраической сумме падений напряжения

Метод уравнений Кирхгофа

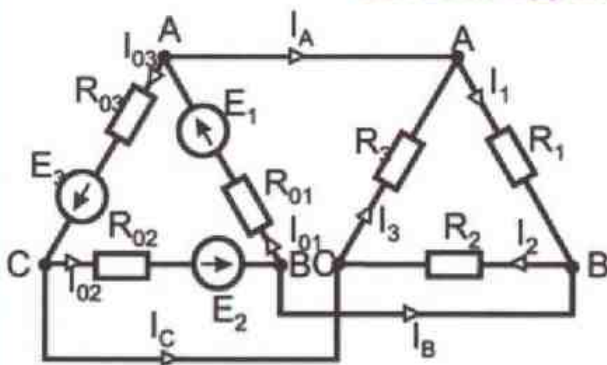


Разветвлённая цепь с несколькими источниками

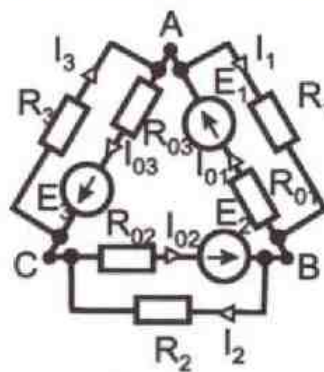
1. $I_3 = I_1 + I_2$
2. $E_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2$
3. $E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$

Уравнения Кирхгофа с тремя неизвестными

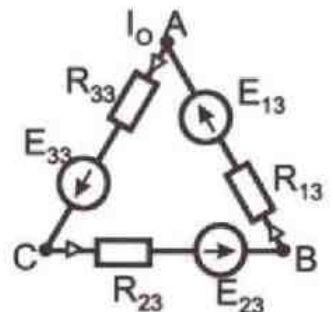
Метод замены нескольких параллельных ветвей одной эквивалентной



Соединение источников и приёмников треугольником



Видоизменённая схема



Эквивалентная схема

$$R_{13} = \frac{R_1 R_{01}}{R_1 + R_{01}} \text{ Ом}; E_{13} = \frac{E_1 g_{01}}{g_{01} + g_1} = R_{13} \frac{E_1}{R_{01}} \text{ В}; I_0 = \frac{E_{13} + E_{23} + E_{33}}{R_{13} + R_{23} + R_{33}} \text{ А};$$

Сопротивление и э.д.с. эквивалентного источника

Общий ток

$$U_{AB} = E_{13} - I_0 R_{13} \text{ В}; I_{01} = \frac{E_1 - U_{AB}}{R_{01}}; I_1 = \frac{U_{AB}}{R_1} \text{ А}.$$

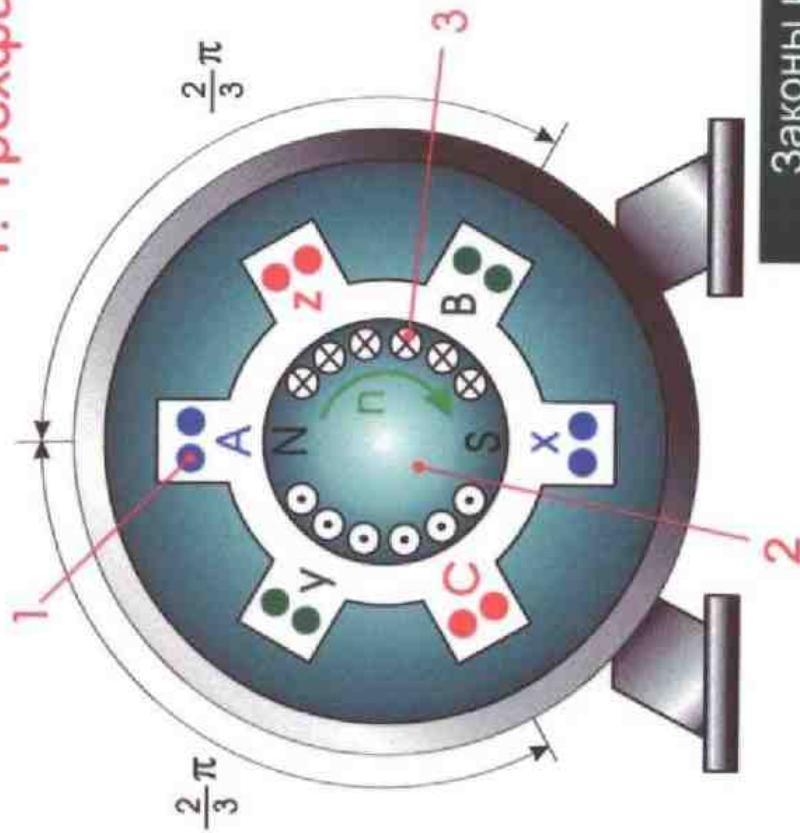
Напряжения и токи в исходной схеме





Трёхфазные электрические цепи

1. Трёхфазные генераторы



Условные обозначения:

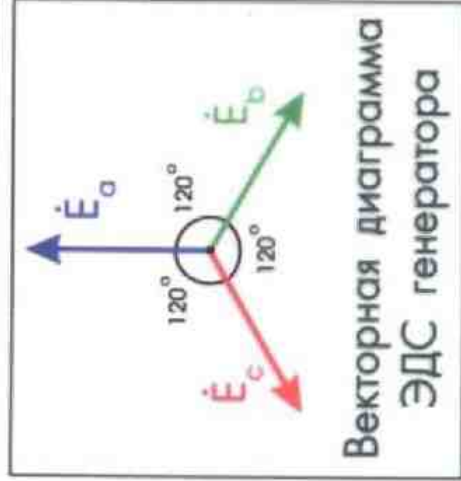
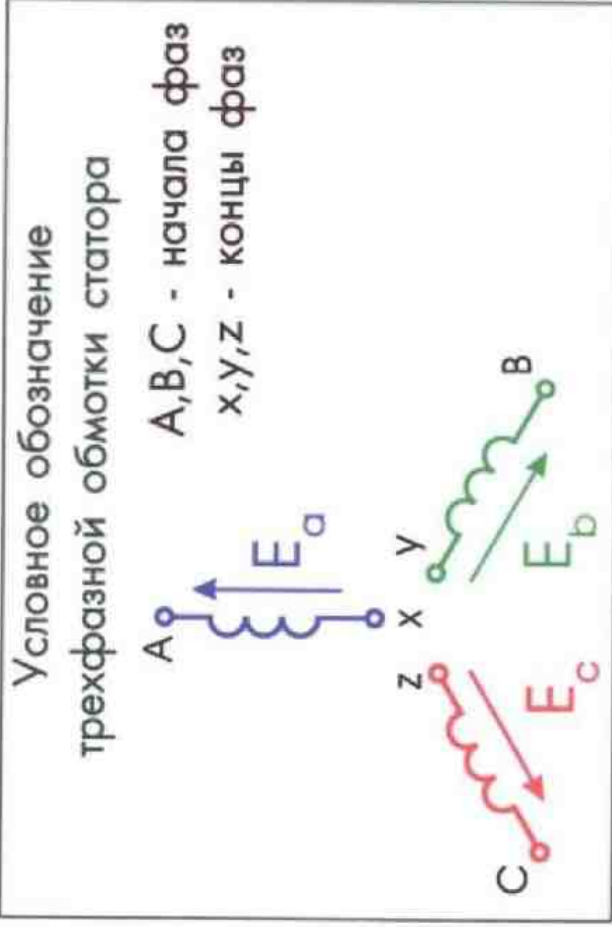
- 1 - трёхфазная обмотка статора
- 2 - сердечник ротора
- 3 - обмотка возбуждения

Законы изменения ЭДС при прямом порядке чередования фаз

$$e_a = E_m \sin \omega t$$

$$e_b = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

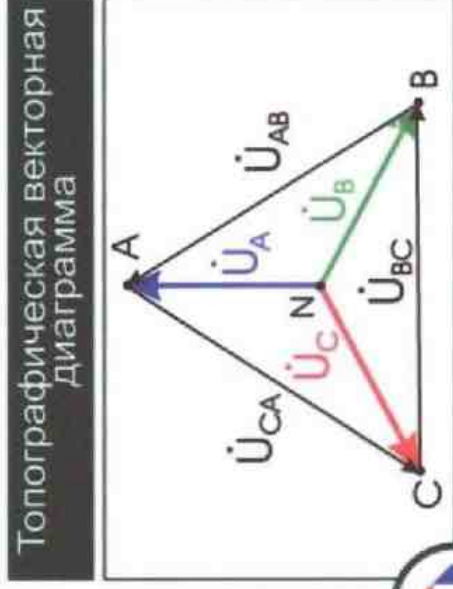
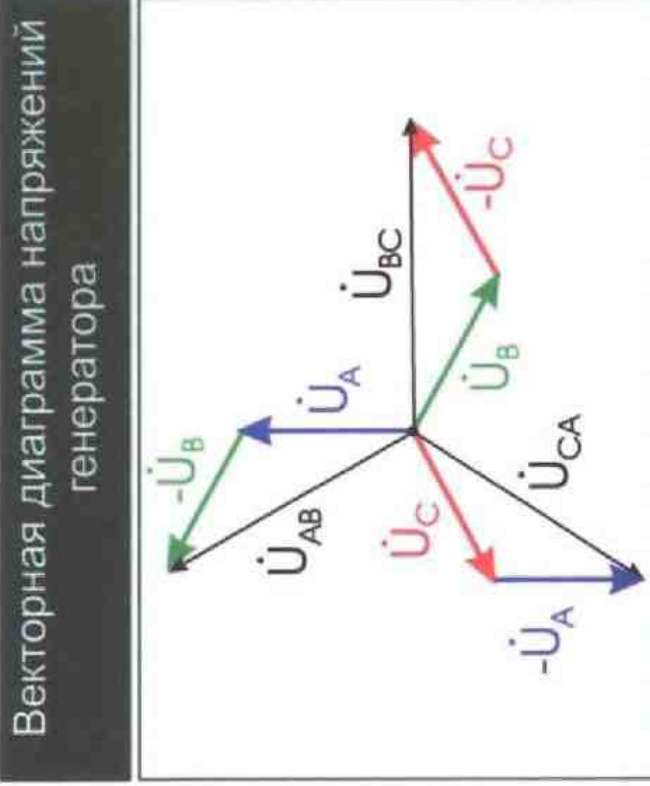
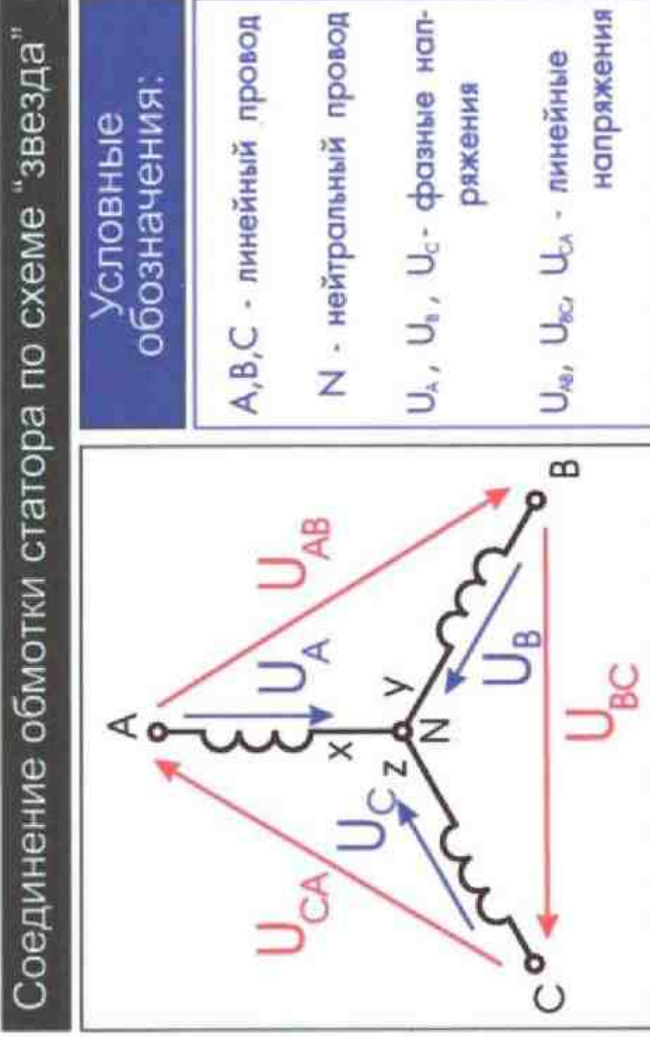
$$e_c = E_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$





Трёхфазные электрические цепи

2. Соединение трехфазного генератора по схеме "звезда"



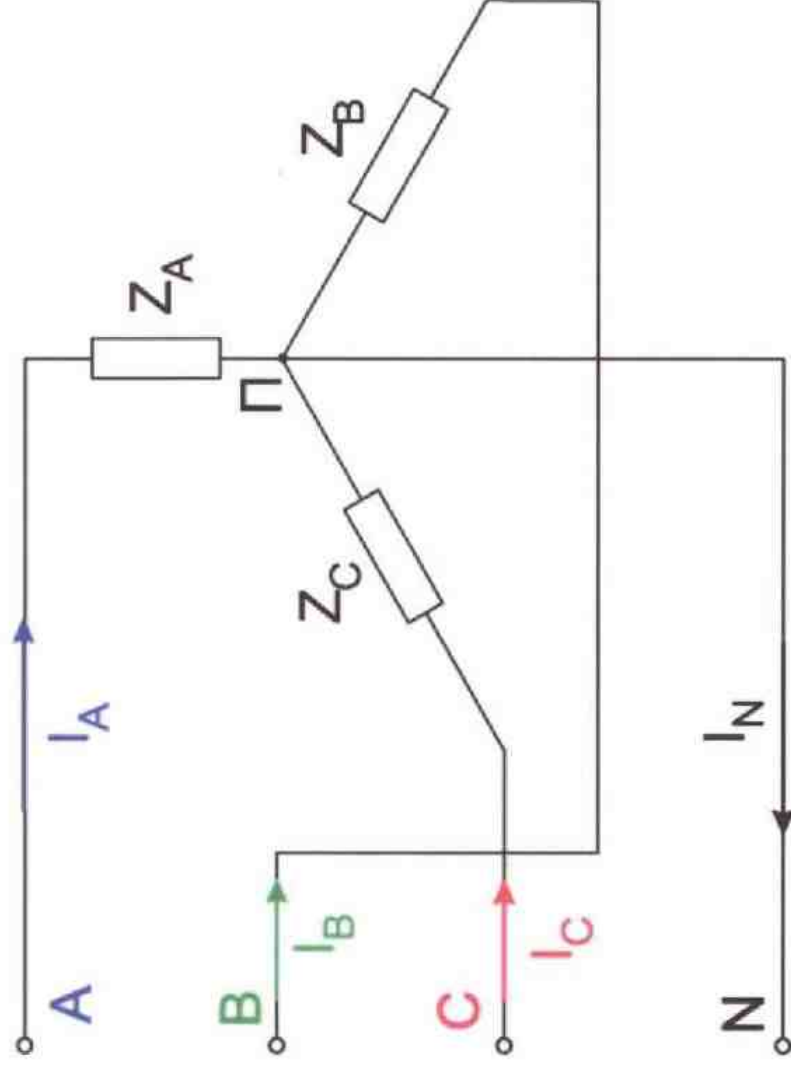
$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{cases}$$

При соединении генератора по схеме "звезда" на его зажимах создается симметричная система линейных и фазных напряжений, линейные напряжения больше фазных в $\sqrt{3}$ раз.



Трёхфазные электрические цепи

3. Соединение потребителя по схеме "звезда"



Уравнительный ток равен геометрической сумме фазных токов

$$i_N = i_A + i_B + i_C$$

На основании закона Ома

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} Z_{\phi}}$$

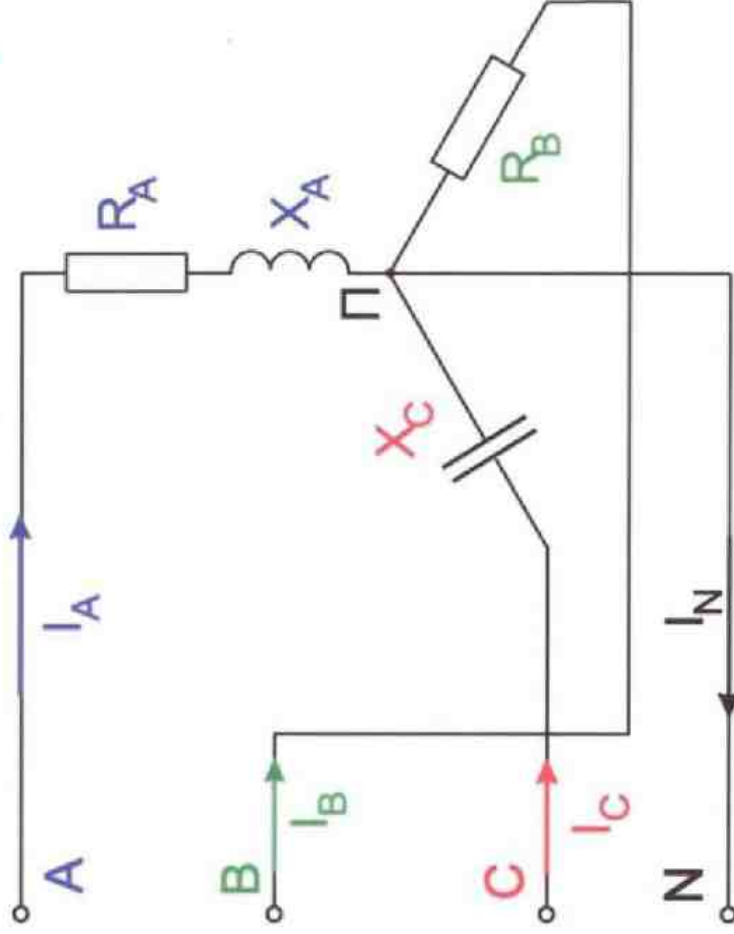
I_A, I_B, I_C - фазные (линейные) токи потребителей
 I_N - уравнительный ток
 п - нейтральная точка потребителя

В цепи с нейтральным проводом фазные напряжения потребителя равны фазным напряжениям источника!

При одинаковых сопротивлениях фаз нагрузка будет симметричной.

Трёхфазные электрические цепи

3. Соединение потребителя по схеме "звезда": расчет токов при несимметричной нагрузке



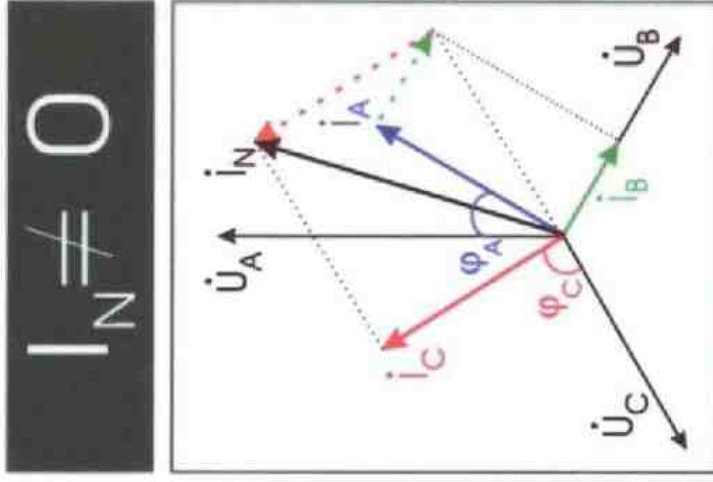
$$I_A = \frac{U_{\Lambda}}{\sqrt{3} Z_A}$$

$$I_B = \frac{U_{\Lambda}}{\sqrt{3} R_B}$$

$$I_C = \frac{U_{\Lambda}}{\sqrt{3} X_C}$$

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2}$$

$$\cos \varphi_A = \frac{R_A}{Z_A}$$



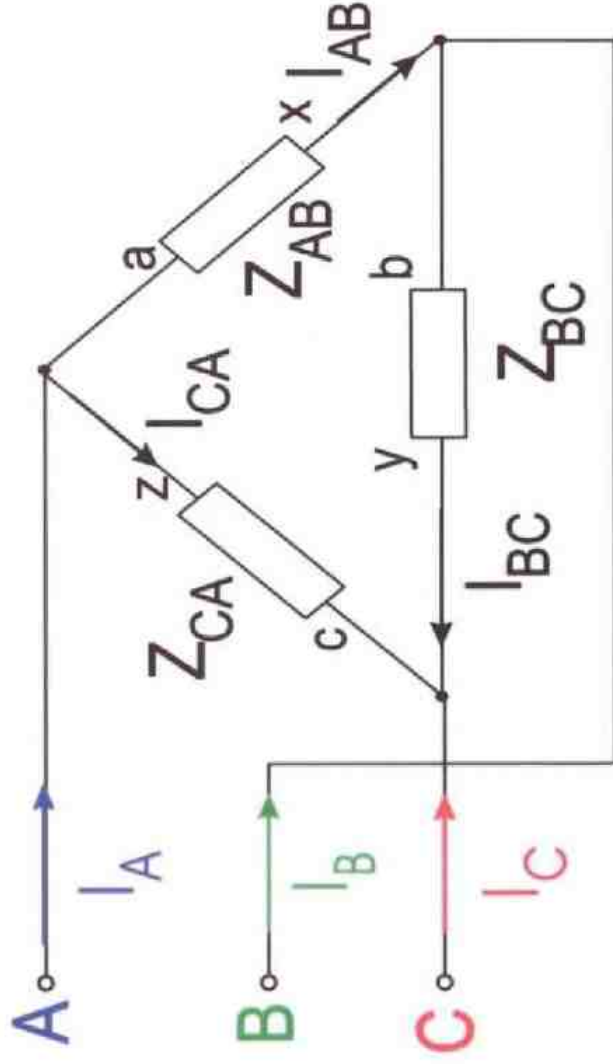
- 1 При несимметричной нагрузке в нейтральном проводе появляется уравнивающий ток
- 2 Обрыв нейтрального провода при несимметричной нагрузке не допустим, т.к. ведет к изменению фазных напряжений потребителей
- 3 В нейтральный провод нельзя ставить предохранители





Трёхфазные электрические цепи

4. Соединение потребителя по схеме "треугольник"



$$\begin{cases} I_A = I_{AB} - I_{CA} \\ I_B = I_{BC} - I_{AB} \\ I_C = I_{CA} - I_{BC} \end{cases}$$

I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} - фазные токи
 $I_{A'}, I_{B'}, I_{C'}$ - линейные токи

Для расчета линейных токов используют уравнения, составленные по 1-му закону Кирхгофа в векторной или комплексной форме.

При соединении потребителя по схеме "треугольник"

$$U_{\Phi} = U_{\Delta}$$

Расчет фазных токов производят на основании закона Ома

$$I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{\Phi}} = \frac{U_{\Delta}}{Z_{\Phi}}$$



Трёхфазные электрические цепи

3. Соединение потребителя по схеме "треугольник": расчет токов при симметричной нагрузке

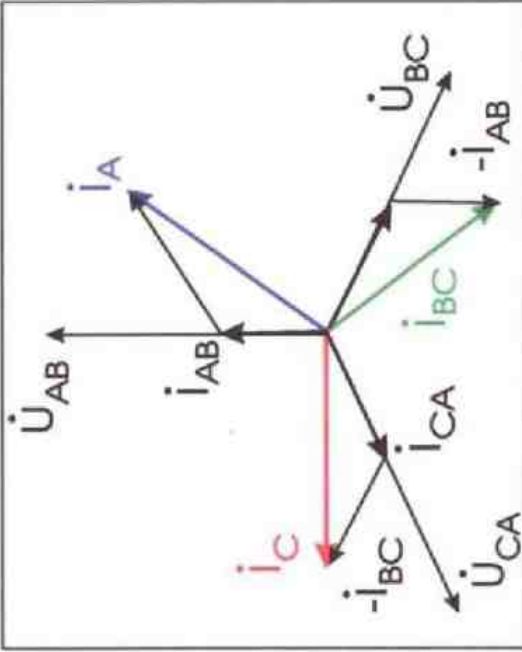
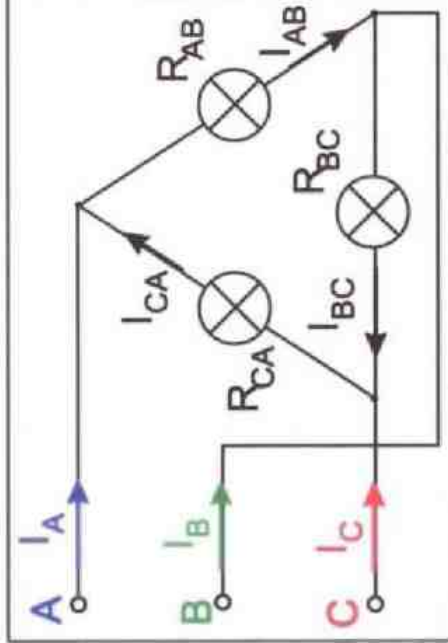
<p>Активная нагрузка</p>		<p>$R_{AB} \neq R_{BC} \neq R_{CA}$</p> <p>$I_{AB} = \frac{U_{\Pi}}{R_{AB}}$ $I_{BC} = \frac{U_{\Pi}}{R_{BC}}$</p> <p>$I_{CA} = \frac{U_{\Pi}}{R_{CA}}$</p>
<p>Активно-индуктивная нагрузка</p>		<p>$I_{AB} = \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{R_{AB}^2 + X_{AB}^2}}$</p> <p>$I_{BC} = \frac{U_{\Pi}}{R_{BC}}$ $I_{CA} = \frac{U_{\Pi}}{X_{CA}}$</p> <p>$\cos \varphi_{AB} = \frac{R_{AB}}{Z_{AB}}$</p>

При несимметричной нагрузке токи не равны!

Трёхфазные электрические цепи

3. Соединение потребителя по схеме "треугольник": расчет токов при несимметричной нагрузке

Однородная нагрузка

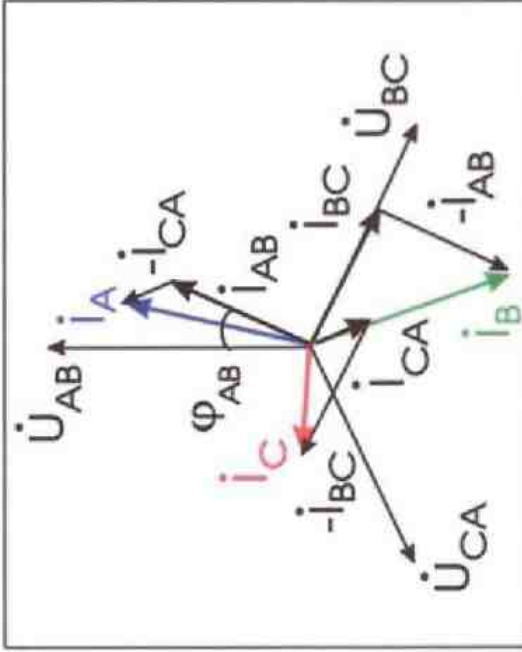
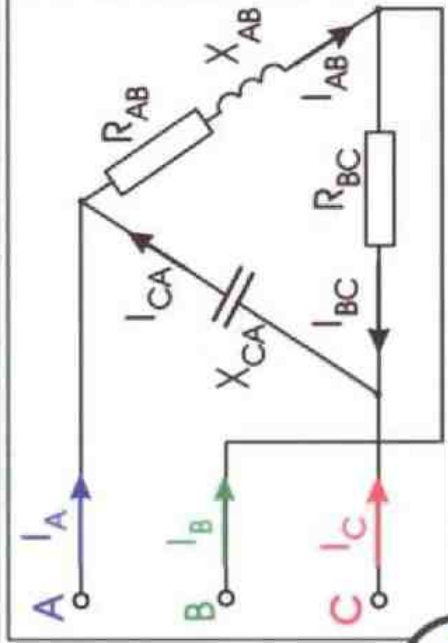


$$R_{AB} \neq R_{BC} \neq R_{CA}$$

$$I_{AB} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{AB}} \quad I_{BC} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{BC}}$$

$$I_{CA} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{CA}}$$

Неоднородная нагрузка



$$I_{AB} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{R_{AB}^2 + X_{AB}^2}}$$

$$I_{BC} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{BC}} \quad I_{CA} = \frac{U_{\text{л}}}{X_{CA}}$$

$$\cos \varphi_{AB} = \frac{R_{AB}}{Z_{AB}}$$

При несимметричной нагрузке токи не равны!





Трёхфазные электрические цепи

4. Мощность трехфазной цепи

Для соединения по схеме "звезда"

$$P = P_A + P_B + P_C$$

$$P_A = U_{AА} I_{AА} \cos \varphi_A$$

$$P_B = U_{BВ} I_{BВ} \cos \varphi_B$$

$$P_C = U_{CС} I_{CС} \cos \varphi_C$$

Активная мощность
цепи - сумма активных мощностей фаз

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$$

$$P_{AB} = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB}$$

$$P_{BC} = U_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC}$$

$$P_{CA} = U_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA}$$

Для соединения по схеме "треугольник"

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C$$

$$Q_A = U_{AА} I_{AА} \sin \varphi_A$$

$$Q_B = U_{BВ} I_{BВ} \sin \varphi_B$$

$$Q_C = U_{CС} I_{CС} \sin \varphi_C$$

Реактивная мощность
цепи - алгебраическая сумма реактивных мощностей фаз

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA}$$

$$Q_{AB} = U_{AB} I_{AB} \sin \varphi_{AB}$$

$$Q_{BC} = U_{BC} I_{BC} \sin \varphi_{BC}$$

$$Q_{CA} = U_{CA} I_{CA} \sin \varphi_{CA}$$

Полная мощность трехфазной цепи

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

Мощность цепи при симметричной нагрузке

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \cos \varphi_{\ell}$$

$$Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell} \sin \varphi_{\ell}$$

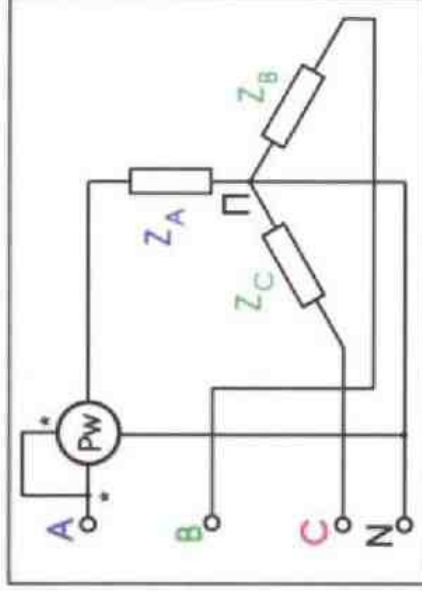
$$S = 3U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} U_{\ell} I_{\ell}$$



Трёхфазные электрические цепи

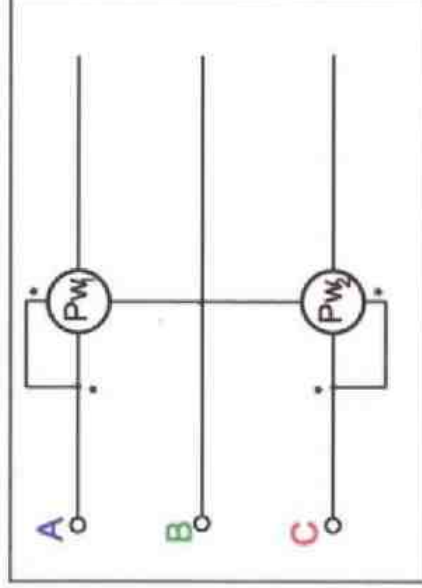
3. Измерение активной мощности в трехфазной цепи

При симметричной нагрузке в цепи с доступной нейтральной точкой



$$P_W = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = P_\phi$$

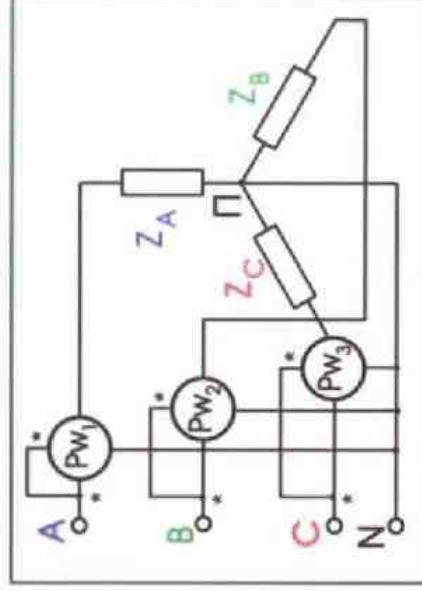
В трехпроводной фазной цепи при любой нагрузке



$$P_{W1} = U_{AB} I_A \cos(\angle U_{AB} \wedge I_A)$$

$$P_{W2} = U_{CB} I_C \cos(\angle U_{CB} \wedge I_C)$$

В четырехпроводной цепи при несимметричной нагрузке



$$P_{W1} = P_A, P_{W2} = P_B,$$

$$P_{W3} = P_C$$

Показания ваттметров

Активная мощность цепи

Алгебраическая сумма показаний ваттметров:

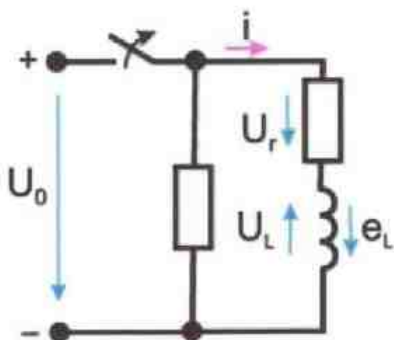
$$P = P_{W1} + P_{W2}$$

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}$$

$$P = 3 P_W$$

Переходные процессы

Размыкание электрической цепи с индуктивностью.



$$ir + ir_P + L \frac{di}{dt} = 0$$

- уравнение электрического состояния цепи после коммутации

$$i(0_-) = i(0_+) = \frac{U_0}{r}$$

- начальное значение тока

$$i_{пр} = 0$$

- принужденный ток

$$i(t) = i_{пр} + i_{св} = i_{св} = \frac{U}{r + r_P} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

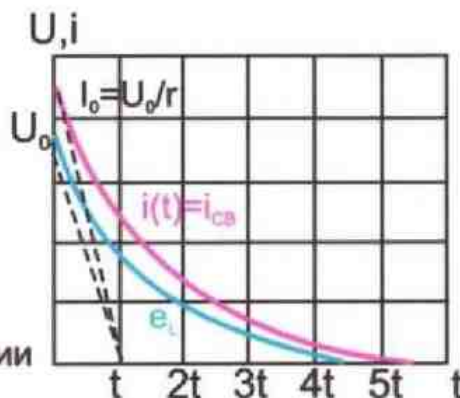
уравнение переходного тока

$$\tau = \frac{L}{r + r_P}$$

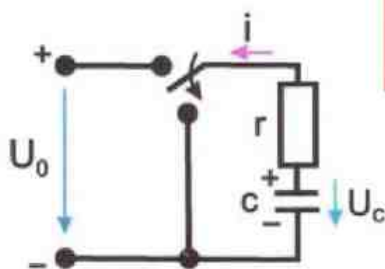
- постоянная времени

$$e_L(t) = -U_L(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- ЭДС самоиндукции



Разрядка конденсатора на сопротивление



$$r \cdot C \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0$$

- уравнение электрического состояния цепи

$$U_c(0) = U_0$$

- начальное значение напряжения на емкости

$$U_{спр} = 0$$

- принужденное напряжение

$$U_c(t) = U_{спр} + U_{св} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

уравнение переходного напряжения

$$\tau = rC$$

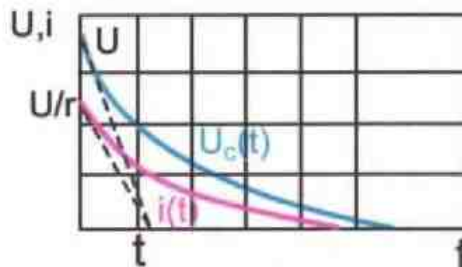
- постоянная времени

$$i(t) = -C \frac{dU_c}{dt} = \frac{-U_0}{r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- уравнение переходного тока

$$\left(\frac{dU_c}{dt}\right)_{t=0} = -\frac{U_0}{rC} = -\frac{U_0}{\tau}$$

- начальная скорость изменения напряжения на конденсаторе



Переходные процессы

Включение цепи с емкостью.
Зарядка конденсатора.



$$U_c(t) = U_{спр} + U_{ссв}$$

$$i(t) = i_{спр} + i_{св} = i_{св}$$

$$U_c(0) = 0 \quad U_{ссв}(0) = -U_{спр}(0) \quad i_{спр} = 0 \quad i(0) - i_{св}(0) = \frac{U_c(0)}{r}$$

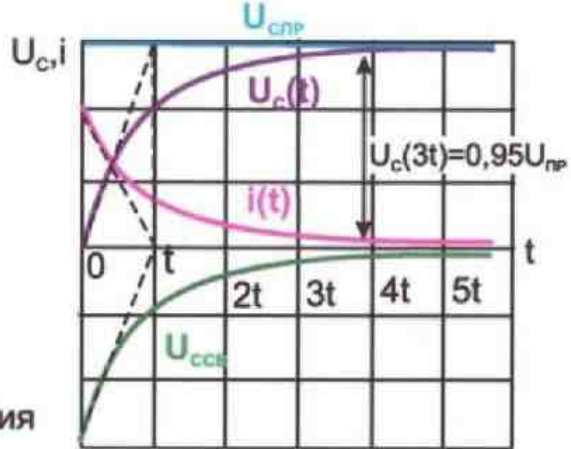
Уравнение переходного напряжения

$$U_c(t) = U_0 - U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

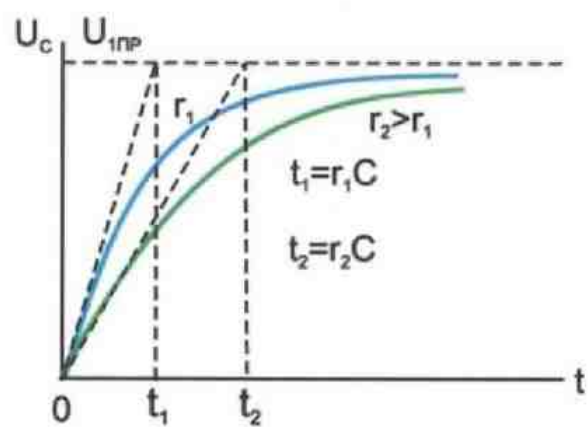
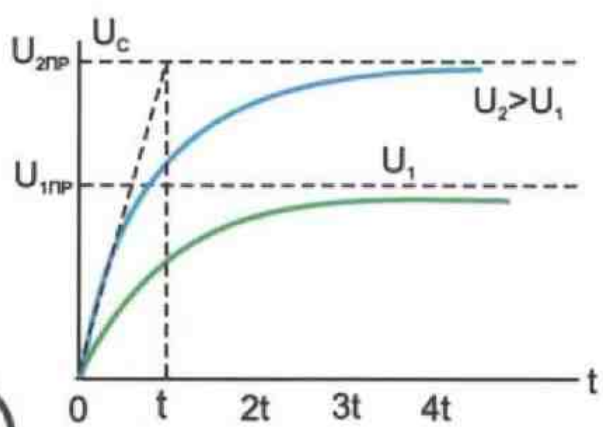
$$\tau = rC$$

$$i(t) = \frac{U_0}{r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{- переходный ток}$$

$$\left(\frac{dU_c}{dt}\right)_{t=0} = \frac{i(0)}{C} = \frac{U_0}{rC} \quad \text{- начальная скорость изменения напряжения на емкости}$$



Влияние величины напряжения источника и параметров цепи



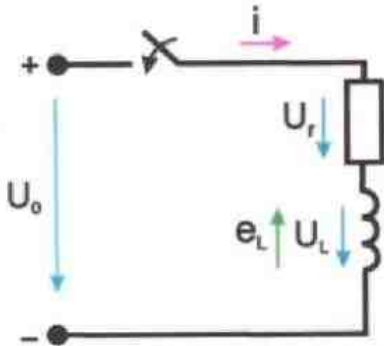
Южно-Уральский Государственный университет

РНПО Росучприбор



Переходные процессы

Включение цепи с индуктивностью



$$U_0 = U_r(t) + U_L(t) = ir + L \frac{di}{dt}$$

- уравнение электрического состояния цепи после коммутации (2-ой закон Кирхгофа)

$$i(t) = i_{\text{нп}} + i_{\text{св}}$$

- решение дифференциального уравнения

переходный ток принужденный (установившийся) ток свободный ток

$i(0_-) = i(0_+) = 0$ - начальное значение переходного тока (первый закон коммутации)

$$i_{\text{нп}} = \frac{U_0}{r}$$

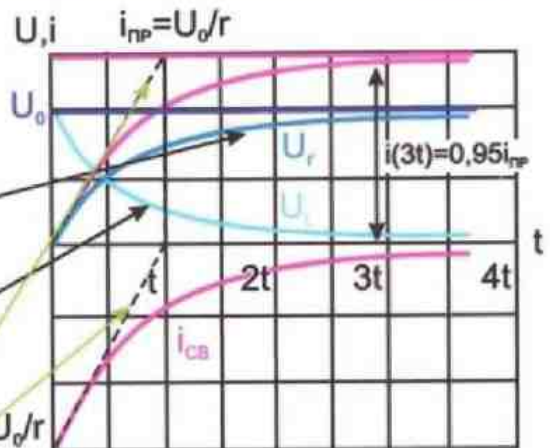
$$i_{\text{св}} = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\tau = \frac{L}{r}$ [с] - постоянная времени цепи

$$i(t) = \frac{U_0}{r} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

- уравнение переходного тока в цепи

Постоянная времени определяет скорость нарастания тока и равна времени, за которое ток i достиг бы установившегося значения $i_{\text{нп}} = U_0/r$, если бы скорость его изменения оставалась неизменной и равной начальному значению скорости



$$U_r(t) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

- изменение напряжения на резисторе

$$U_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- изменение напряжения на индуктивности

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} = \frac{U_0}{L}$$

- скорость изменения тока в начальный момент времени



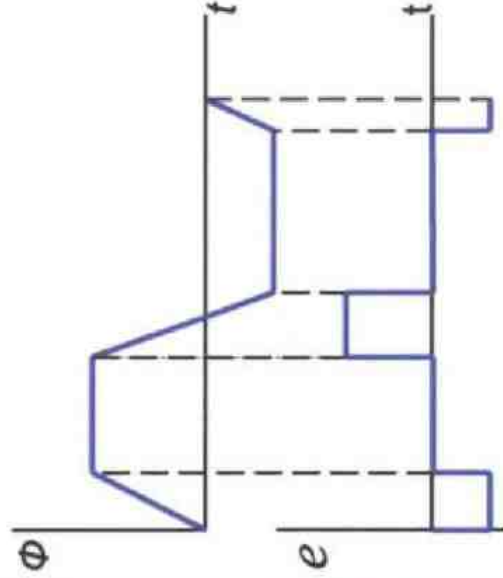
Магнитная цепь

Закон электромагнитной индукции

ЭДС, индуцируемая в проводнике при изменении магнитного потока, равна скорости изменения этого потока

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

- Знак — говорит о том, что ЭДС стремится ослабить причину, ее вызывающую

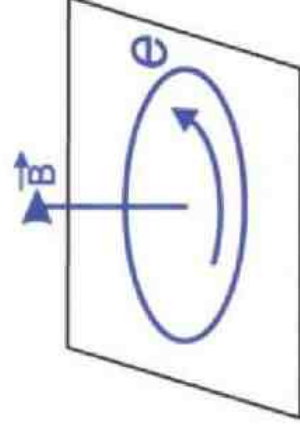


Зависимость ЭДС от изменения магнитного потока

ЭДС, наводимая в обмотке переменным магнитным полем

$$e = - \omega \frac{d\psi}{dt}, \text{ где}$$

- ω - число витков обмотки,
- ψ - потокосцепление



Положительное направление наведенной ЭДС определяется по правилу **правоходового винта**.

ЭДС самоиндукции ЭДС, наводимая в контуре при изменении тока в этом же контуре $\psi = Li$, где L индуктивность

$$e_L = - L \frac{di}{dt}$$



Магнитная цепь

Закон электромагнитной индукции

Постоянное магнитное поле может наводить в проводнике ЭДС при движении проводника относительно магнитного поля.

Величина ЭДС

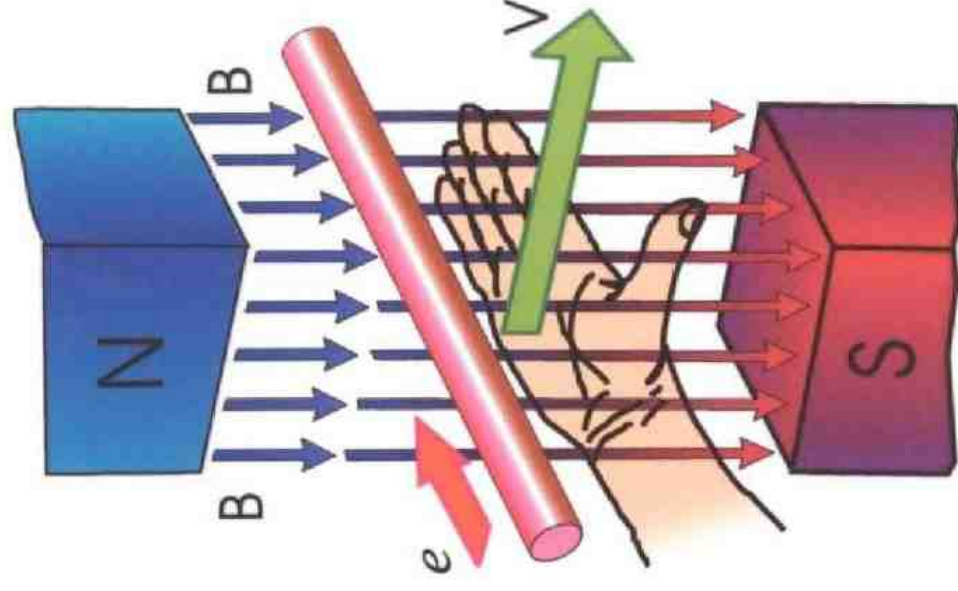
$$e = BlV, \text{ где}$$

B - магнитная индукция поля,

l - активная длина проводника,

V - скорость перемещения проводника.

Направление ЭДС

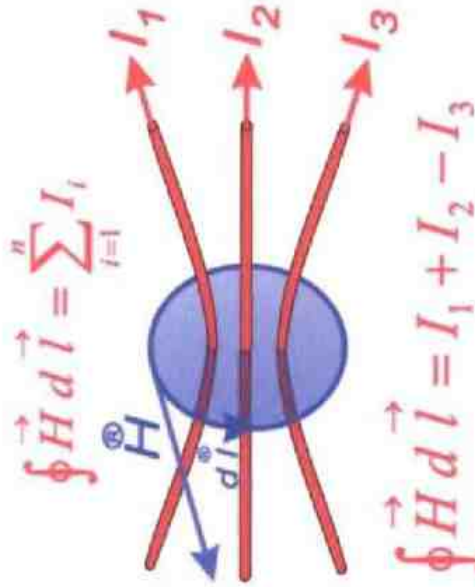


Правило правой руки.

Магнитная цепь

Закон полного тока

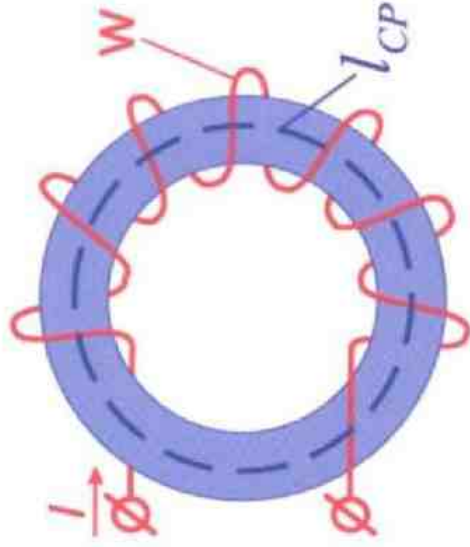
Интервал от вектора напряженности магнитного поля вдоль любого замкнутого контура равен алгебраической сумме токов, охваченных этим контуром.



$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I_1 + I_2 - I_3$$

Для обмотки

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I\omega$$



Для однородной магнитной цепи

$$Hl_{CP} = I\omega,$$

где l_{CP} - длина средней силовой линии

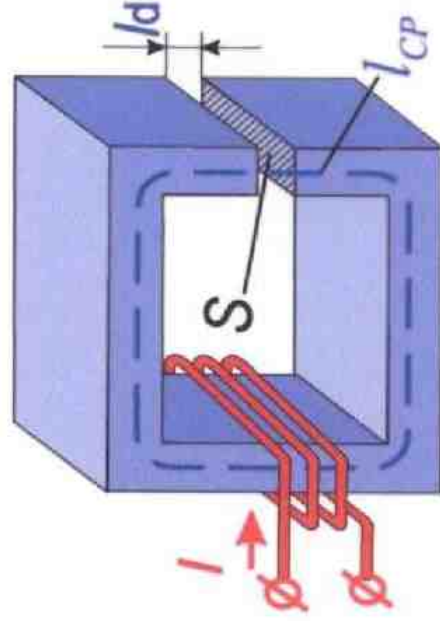
где $I\omega$ - магнитодвижущая сила (МДС)

Для неоднородной магнитной цепи с воздушным зазором

$$I\omega = Hl + H\delta l\delta$$

где H - напряженность магнитного поля в сердечнике,

$H\delta$ - напряженность магнитного поля в зазоре



Магнитная цепь

Механические силы в магнитном поле

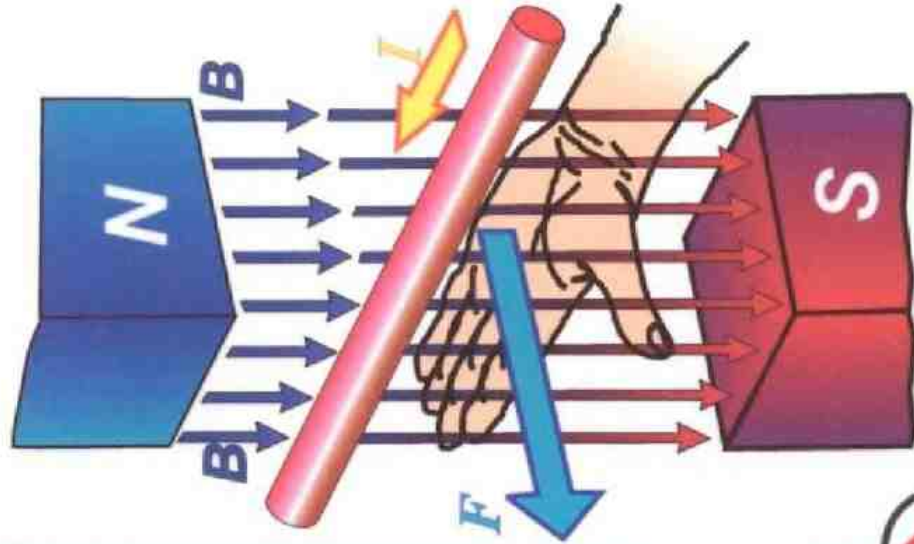
В магнитном поле на проводники с током, на заряженные частицы, на ферромагнитные тела действуют механические силы.

Направление силы определяется правилом левой руки.

Величина силы

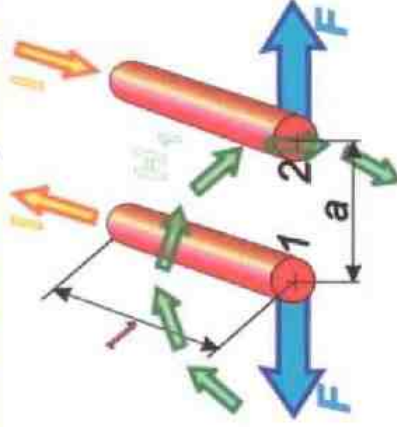
$$F = BIL, \text{ где}$$

l - активная длина проводника,
 L - ток в проводнике,
 B - магнитная индукция поля.



На проводнике с током действуют механические силы F , направление которых зависит от направления тока.

Два параллельных проводника с током



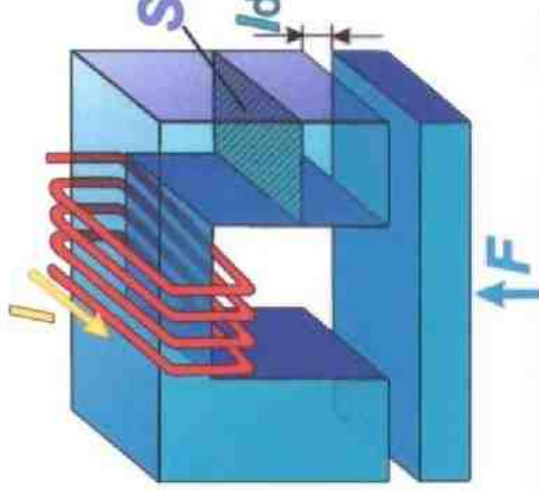
Подъемная сила электромагнита

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S, \text{ где}$$

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

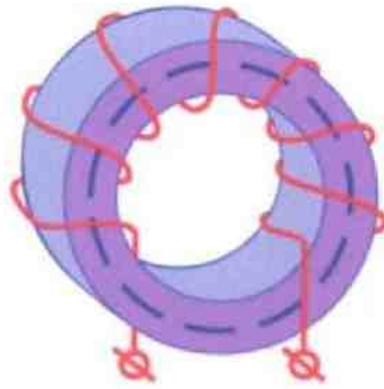
S - полное сечение воздушного зазора [м²],

B - магнитная индукция поля [Т]



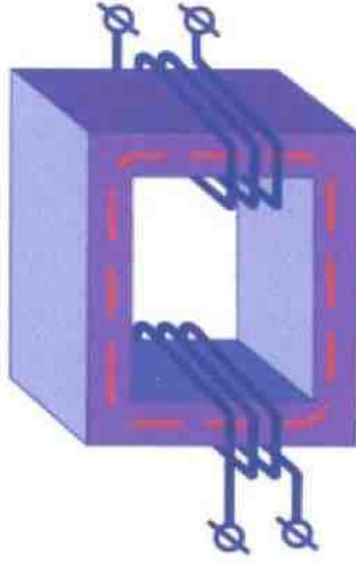
Магнитная цепь

Примеры магнитных цепей

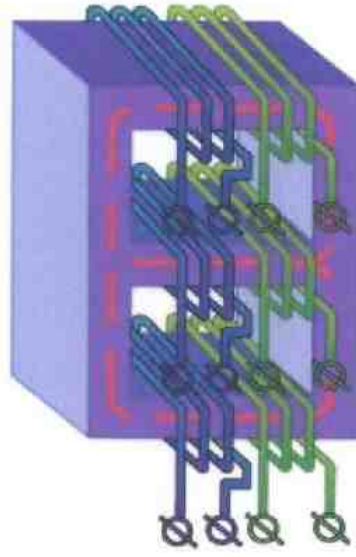


Катушка с тороидальным сердечником

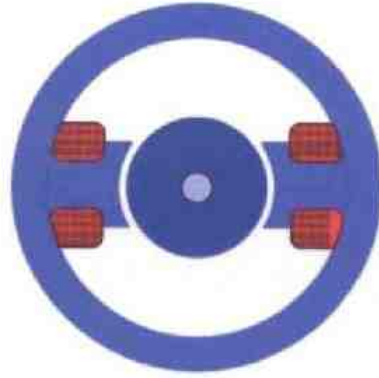
Однородная магнитная цепь



Однофазный трансформатор



Трехфазный трансформатор

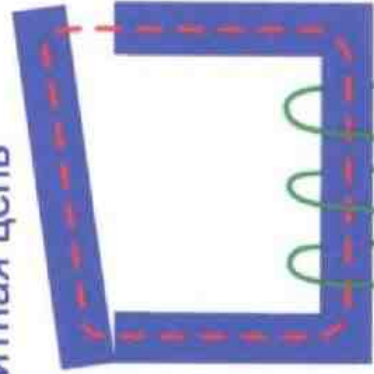


Машина постоянного тока

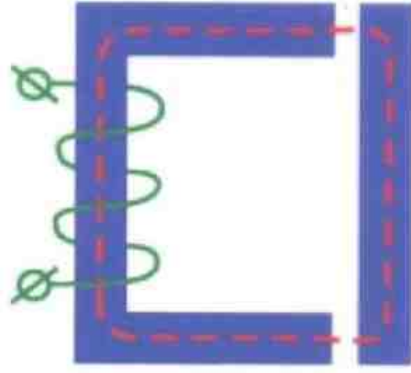
Неоднородная магнитная цепь



Магнитоэлектрический измерительный механизм



Электромагнитное реле

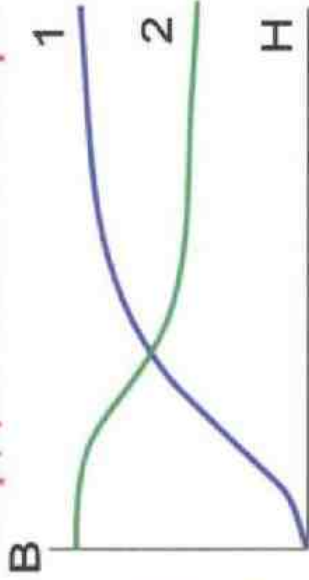


Подъемный электромагнит

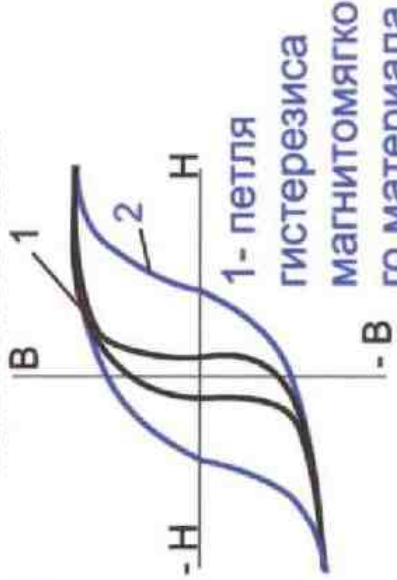


Магнитная цепь

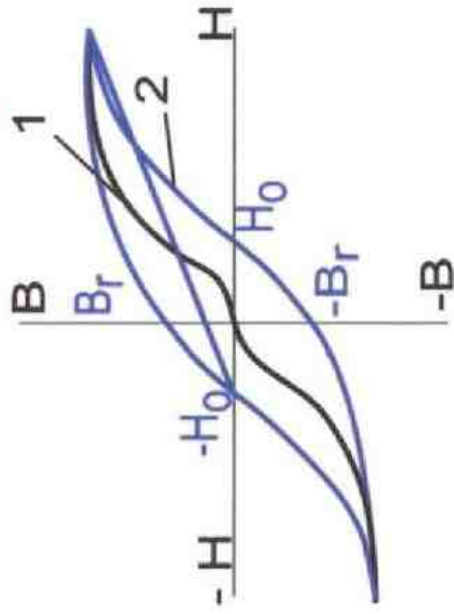
Сердечники электрических машин и аппаратов



- 1- кривая намагничивания
- 2- зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

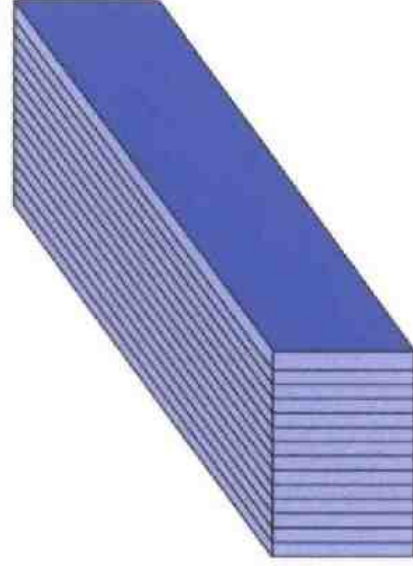


- 2- петля гистерезиса магнитотвердого материала

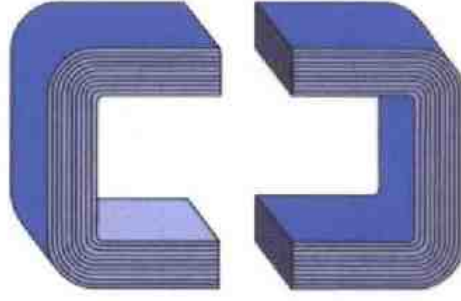


- 1- основная кривая намагничивания;
- 2- петля гистерезиса.

B_r - остаточная магнитная индукция
 H_0 - коэрцитивная сила



Шихтованный магнитопровод из листовой стали

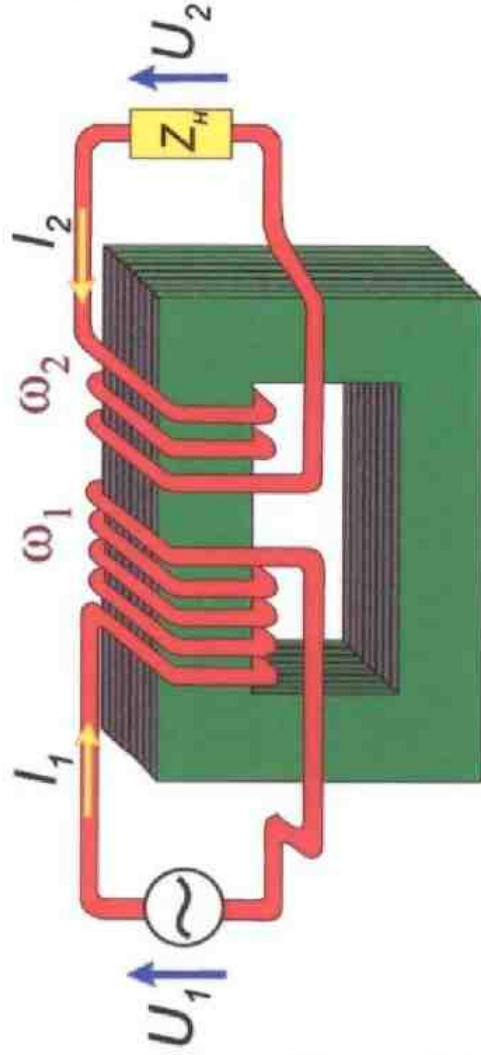


Шихтованный магнитопровод из ленточной стали



Магнитная цепь

Принцип действия однофазного трансформатора



Переменное магнитное поле наводит в обмотках ЭДС

$$E_1 = 4,44\omega_1 f\Phi_m$$

$$E_2 = 4,44\omega_2 f\Phi_m$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = n \quad \text{- коэффициент трансформации.}$$

Уравнение равновесия первичной обмотки

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1)$$

где R_1 - активное сопротивление первичной обмотки, связанное с потерями на нагрев обмотки.

X_1 - индуктивное сопротивление обмотки, связанное с потоком рассеяния.

Уравнение равновесия вторичной обмотки

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 + \dot{I}_2(R_2 + jX_2)$$

где R_2 связано с потерями на нагрев обмотки, X_2 связано с потерями рассеяния



Магнитная цепь

Режимы работы трансформатора

Режим холостого хода

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

$$U_{20} = E_2, I_1 = I_0 = (1 \div 10)\% \cdot I_{1H}$$

$$U_1 = E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m$$

Выводы

Амплитуда магнитного потока в сердечнике Ф_т пропорциональна приложенному к обмотке напряжению и не зависит от режима работы

Режим короткого замыкания

$$Z_H = 0, U_2 = 0, I_{2KЗ} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

$$I_{2KЗ} \gg I_{2H}$$

Для большинства трансформаторов режим короткого замыкания - аварийный режим

Режим нагрузки

$$0 < Z_H < \infty$$

Действует две МДС, каждая из которых создает свой магнитный поток

$$\Phi_1 = \frac{I_1 \omega_1}{R_{МАГН}}, \Phi_2 = \frac{I_2 \omega_2}{R_{МАГН}}$$

Результирующий магнитный поток

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2$$

Уравнение магнитодвижущих сил

$$\dot{I}_1 \omega_1 = \dot{I}_1 \omega_1 + \dot{I}_2 \omega_2$$

Ток первичной обмотки

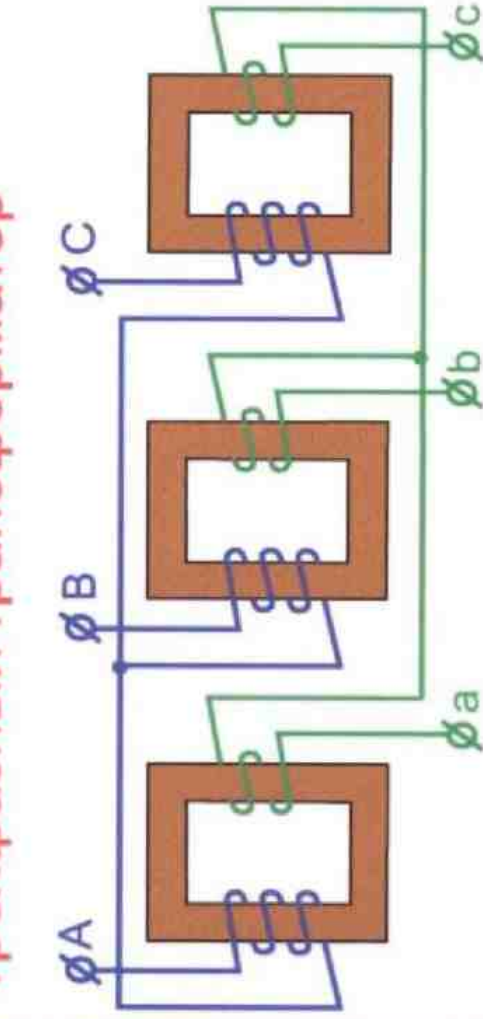
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2$$

Зависит от тока вторичной обмотки (тока нагрузки)

Чем больше ток нагрузки, тем больше потребляемый из сети ток.

Магнитная цепь

Трёхфазный трансформатор



Трансформатор с несвязанной магнитной цепью

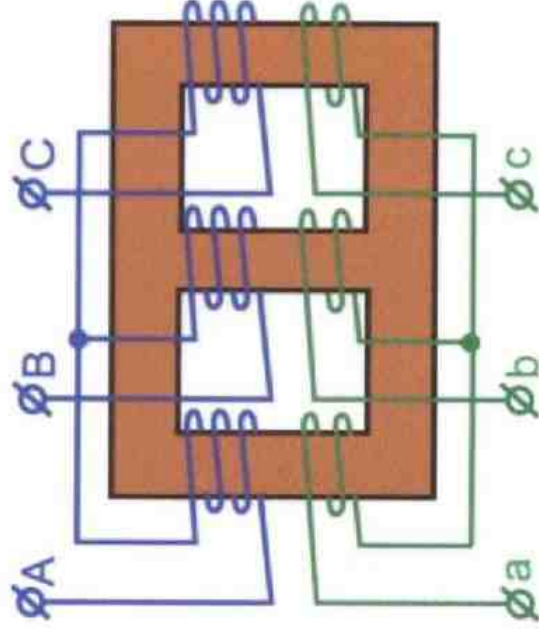
Схемы соединения обмоток

$Y/Y_0, Y_0/\Delta, \Delta/Y, \Delta/\Delta$

Коэффициенты трансформации

$$K \cdot K_\Phi = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad K_L = \frac{U_{1L}}{U_{2L}}$$

При схеме $Y/Y, \Delta/\Delta$ $K_\Phi = K_L$



Трансформатор со связанной магнитной цепью

Группа соединения обмоток - сдвиг по фазе между линейными на первичной и вторичной стороне, отсчитанному по часовой стрелке и деленному на 30.

Согласно ГОСТ допускается 0(12) и 11 группы соединения.



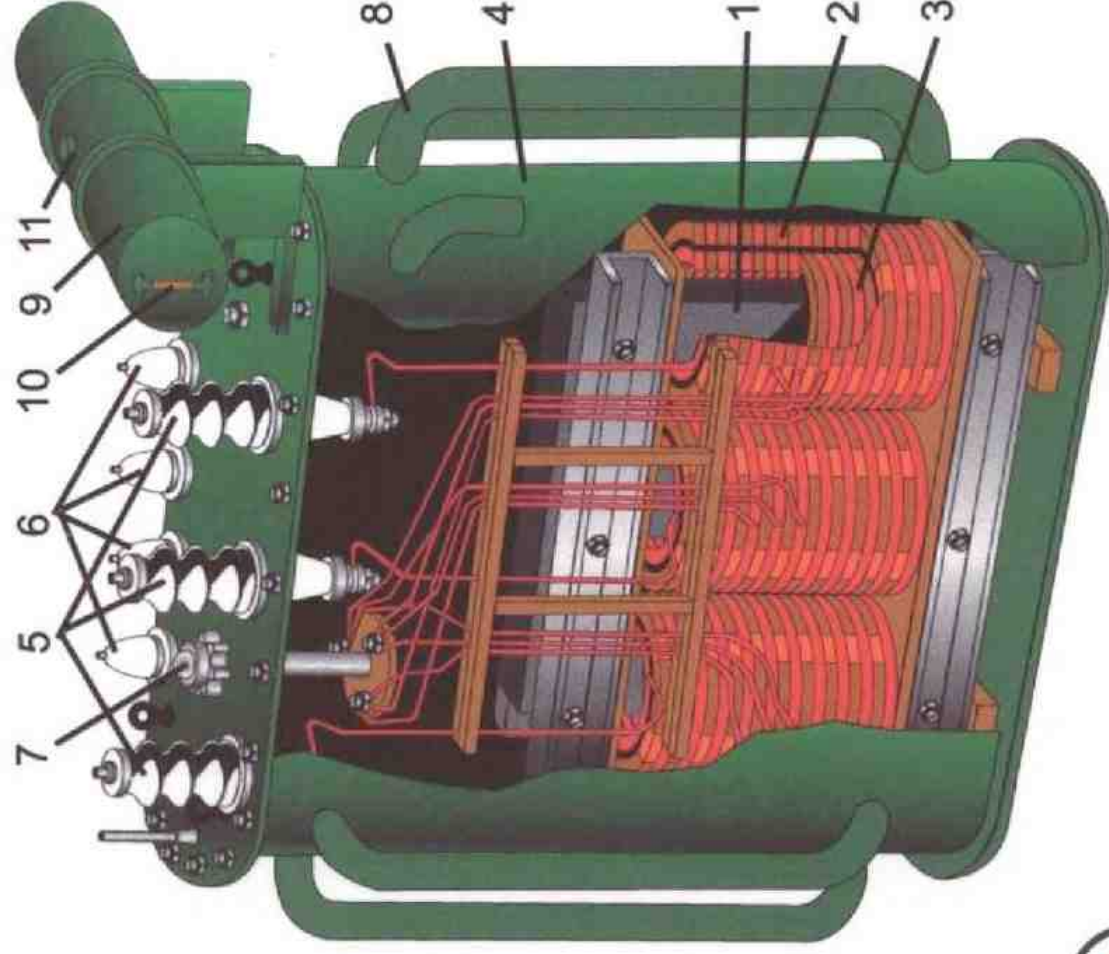


Магнитная цепь

Трехфазный трансформатор

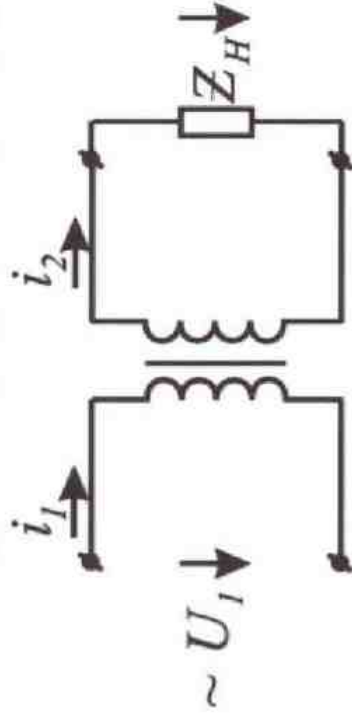
Силовой трехфазный трансформатор.

- 1- магнитопровод;
- 2- обмотка высокого напряжения;
- 3- обмотка низкого напряжения;
- 4 - стальной бак с трансформаторным маслом;
- 5,6 - изоляторы;
- 7 - переключатель;
- 8- охлаждающие трубы;
- 9- расширительный бачок;
- 10- измеритель уровня масла;
- 11- заливное отверстие.



Магнитная цепь

Работа трансформатора в режиме нагрузки



Магнитный поток в сердечнике Φ_m не зависит от режима работы трансформатора, в том числе от нагрузки, а зависит от подведенного напряжения U_1

$$\Phi_m \propto U_1$$

Ток вторичной обмотки зависит от сопротивления нагрузки Z_H . Чем больше Z_H , тем меньше ток I_2 .

Ток первичной обмотки

трансформатора I_1 зависит от тока I_2 . Чем больше I_2 , тем $I_1 > I_2$.

Это отражает свойство саморегулирования трансформатора.

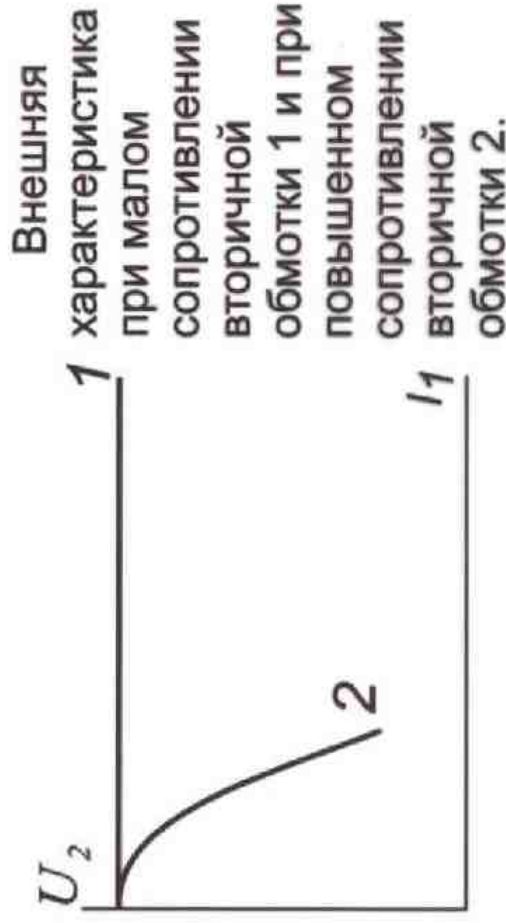
Внешняя характеристика трансформатора

Из уравнения равновесия вторичной обмотки

$$U_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2)$$

следует, что вторичное напряжение зависит от сопротивления вторичной обмотки

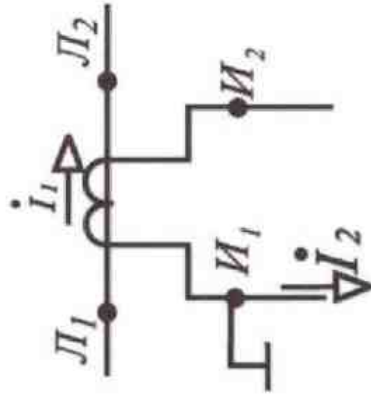
$$R_2 + jX_2$$



Магнитная цепь

Трансформаторы тока

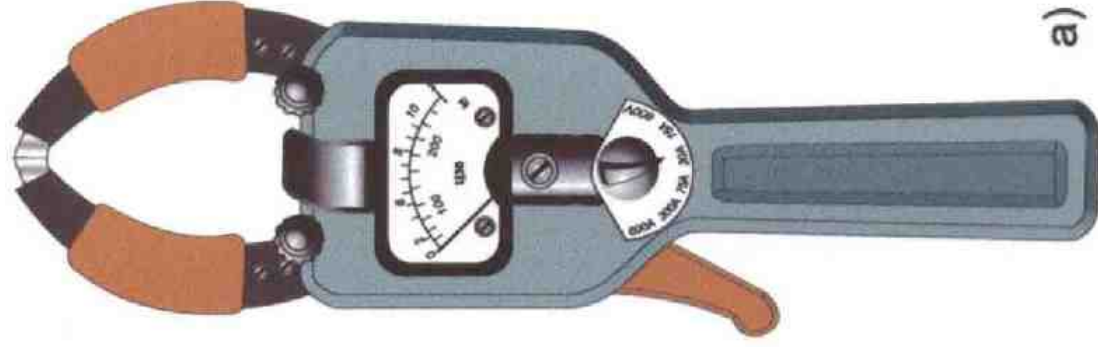
Условное обозначение



Ток в первичной обмотке I_1 не зависит от сопротивления приборов, включенных во вторичную обмотку



Внешний вид

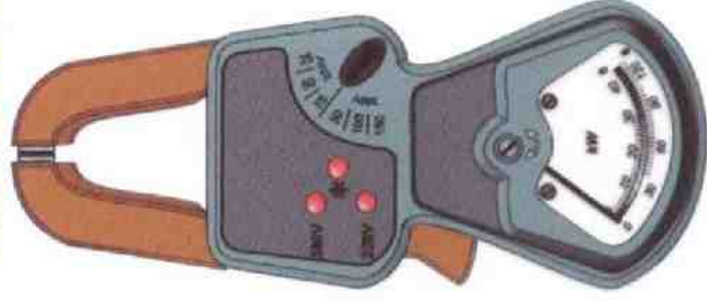


а)

Измерительные клещи

а) для измерения тока,

б) для измерения активной мощности.



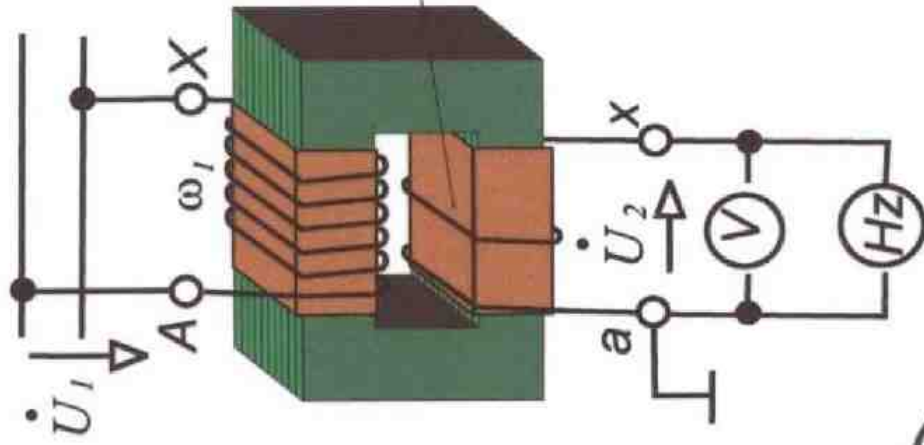
б)



Магнитная цепь

Измерительные трансформаторы

Используются для расширения пределов измерения приборов, для измерения в высоковольтных цепях.



Трансформаторы напряжения

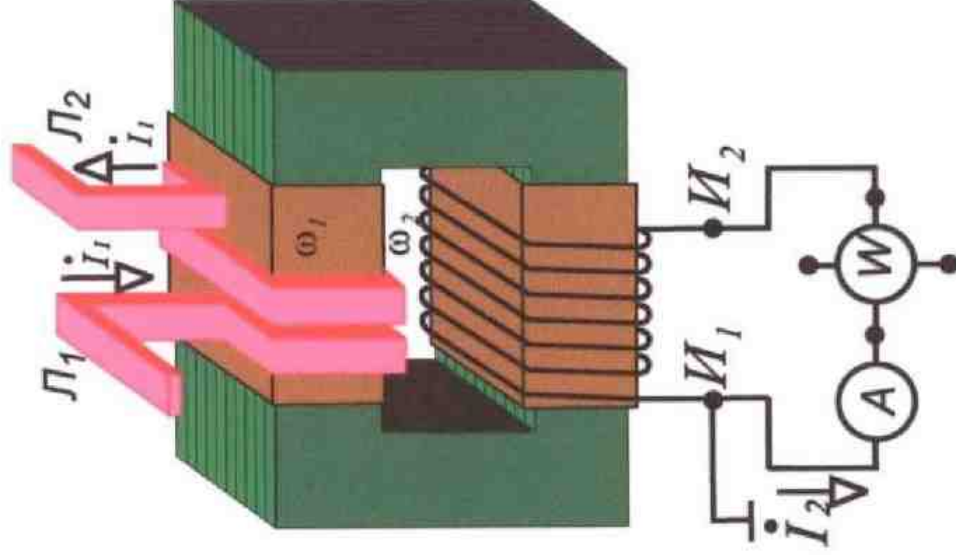
Это понижающие трансформаторы, имеющие $U_{2H}=100V$

В паспорте указываются S_H , U_{1H} , U_{2H} , класс точности.

Трансформатор тока

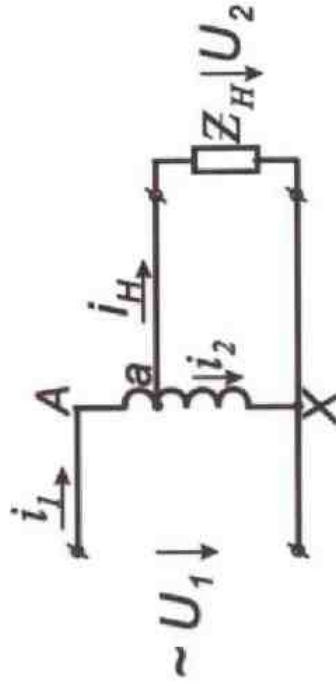
Это повышающий трансформатор, имеющий $I_{2H}=5A$.

В паспорте указывается I_{1H} , I_{2H} , класс точности, максимальное сопротивление измерительных приборов.



L_1-L_2 - первичная обмотка; U_1-U_2 - вторичная обмотка.

Магнитная цепь Авторансформатор



Бывают однофазные и трехфазные, понижающие и повышающие. Часть энергии передается с помощью магнитного поля, часть - по проводам.

Уравнение МДС

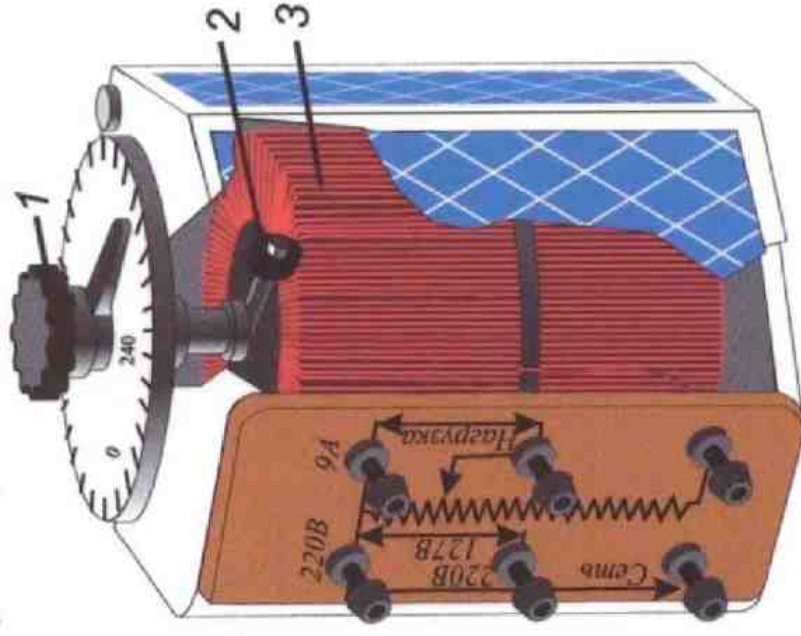
$$\dot{I}_1(\omega_1 - \omega_2) + \dot{I}_2 \omega_2 = 0$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_H$$

$$\text{Отсюда } I_2 = I_H \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$$

Ток вторичной обмотки авторансформатора I_2 меньше тока нагрузки.

На изготовление автотрансформатора идет меньше меди и стали, чем на трансформатор.



Общий вид лабораторного автотрансформатора

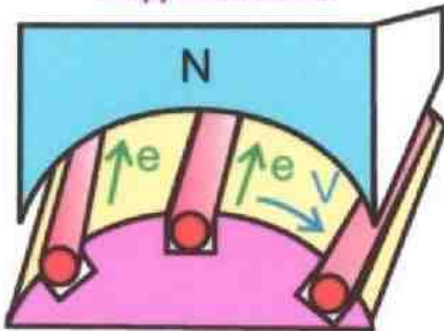
- 1 – ручка скользящего контакта;
- 2 – скользящий контакт;
- 3 – обмотка.



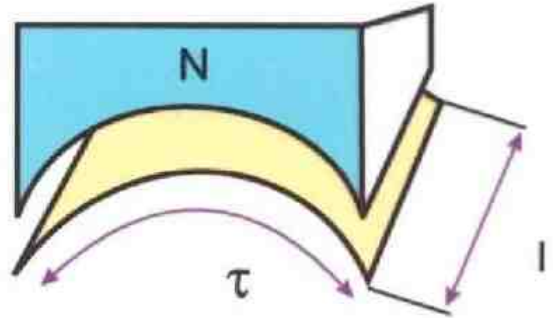
Машины постоянного тока

Электродвижущая сила якоря (ЭДС) и электромагнитный момент

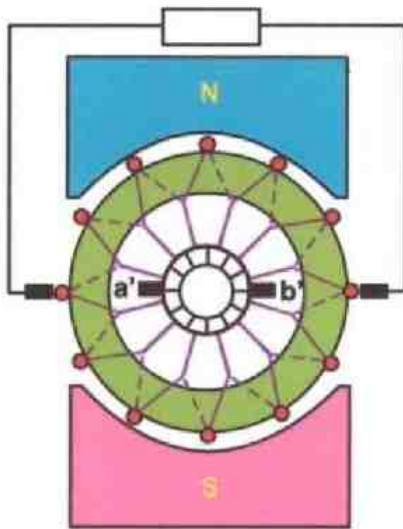
Схема движения проводника под полюсом



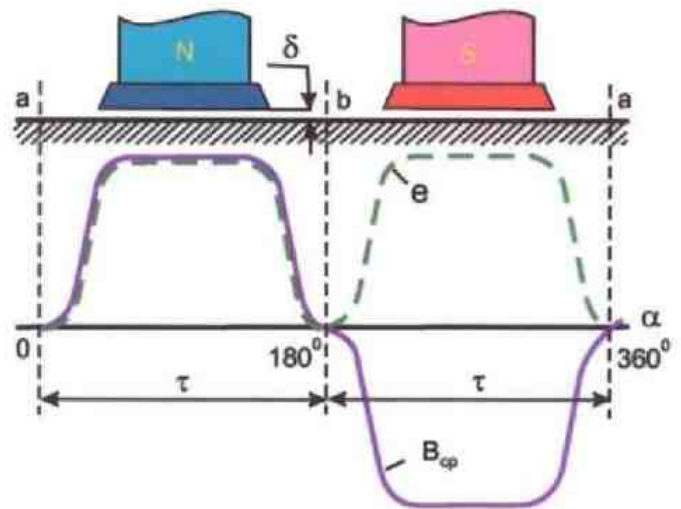
Площадь полюсного деления



Соединение обмотки якоря с пластинами коллектора



Распределение магнитной индукции в зазоре и ЭДС двухполюсной машины



ЭДС машины постоянного тока

$$E = \frac{pN}{60a} \Phi \omega = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \omega = k\Phi \omega$$

- 2p - число пар полюсов;
- N - число проводников обмотки якоря;
- Φ - магнитный поток одного полюса, Вб;
- 2a - число параллельных ветвей обмотки якоря;

Электромагнитный момент машины постоянного тока

$$M_{эм} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{я} = k\Phi I_{я}$$

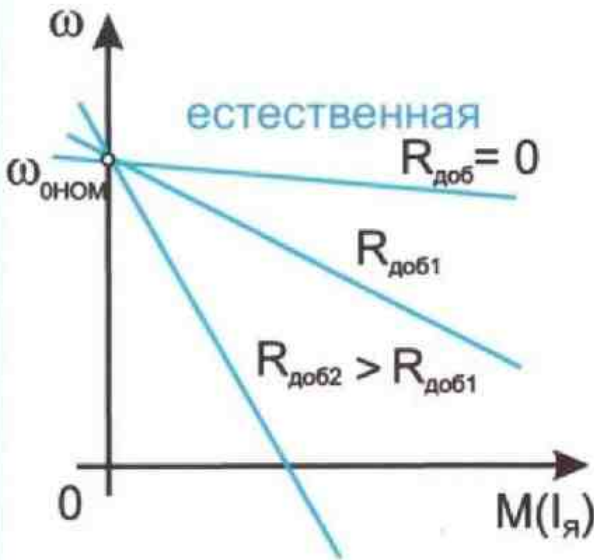
- ω - угловая скорость якоря, 1/с;
- M_{эм} - электромагнитный момент, Н·м;
- E - ЭДС машины, В;
- I_я - ток якоря, А;
- n - частота вращения якоря, об/мин;



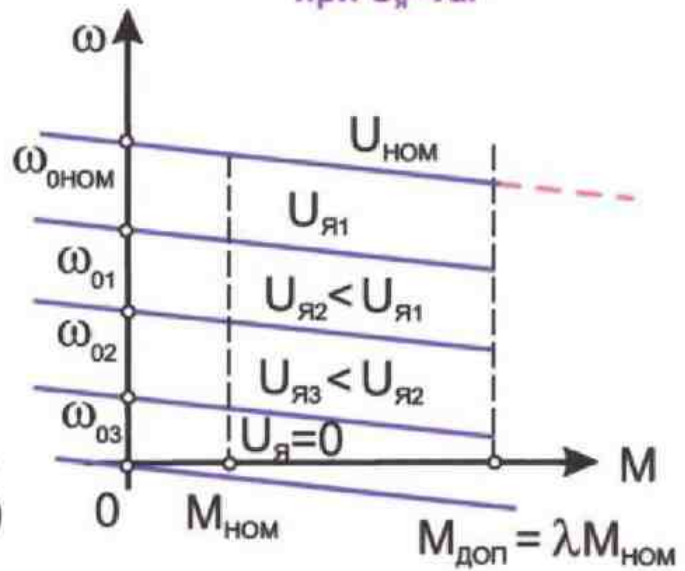
Машины постоянного тока

Искусственные характеристики двигателя с независимым возбуждением

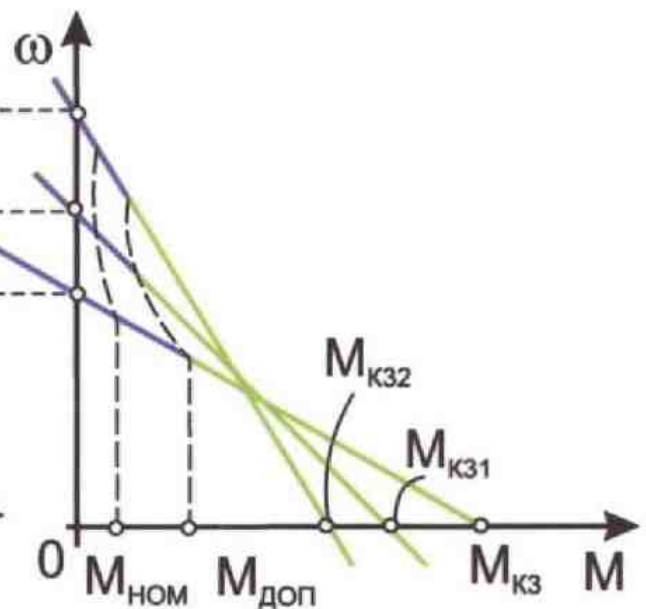
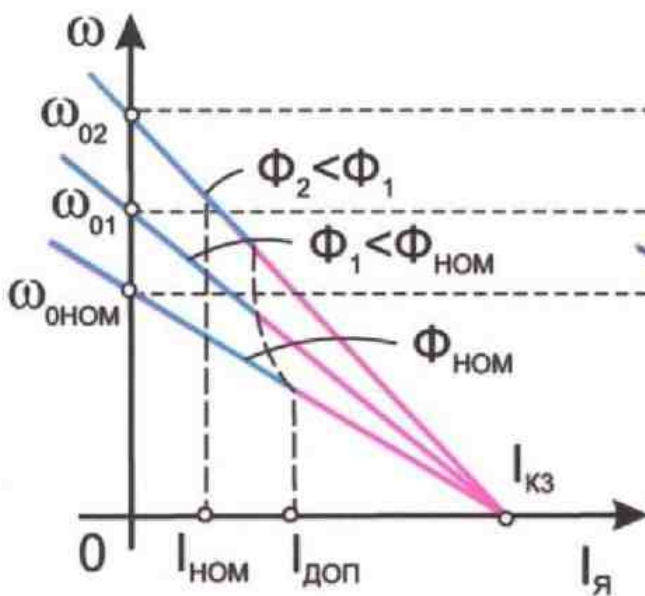
Реостатные



Механическая характеристика при $U_{я} = var$



Электромеханическая и механическая характеристики при ослаблении магнитного поля $\Phi = var$



Южно-Уральский Государственный университет

РНПО Росучприбор

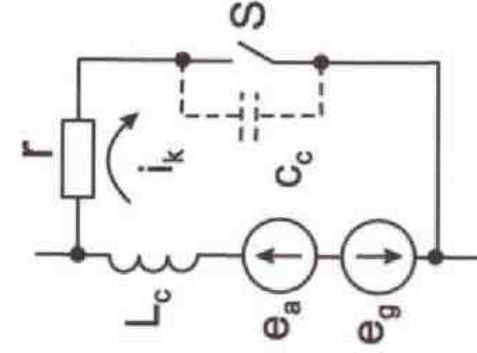
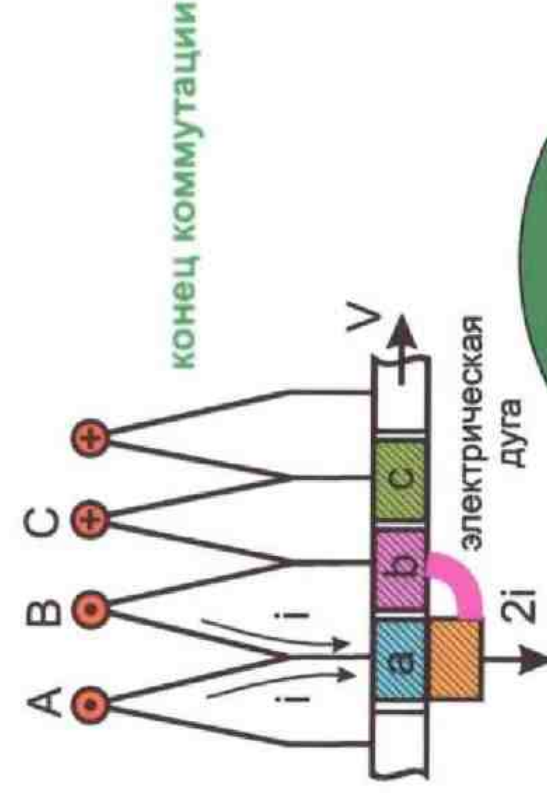
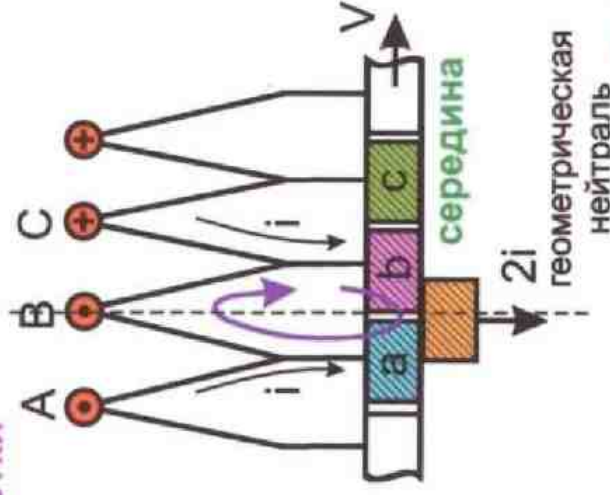
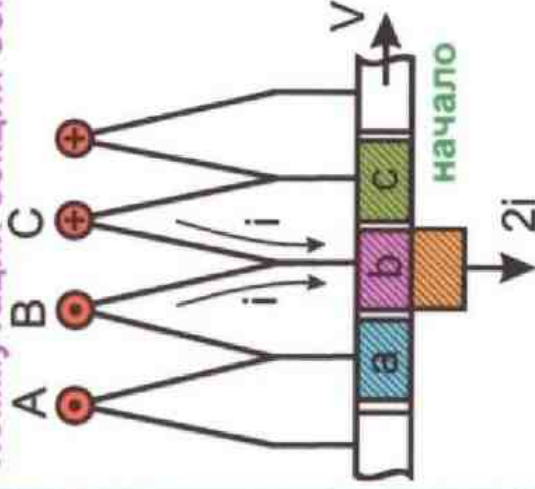




Машины постоянного тока

Коммутация якоря

Коммутация секций обмотки



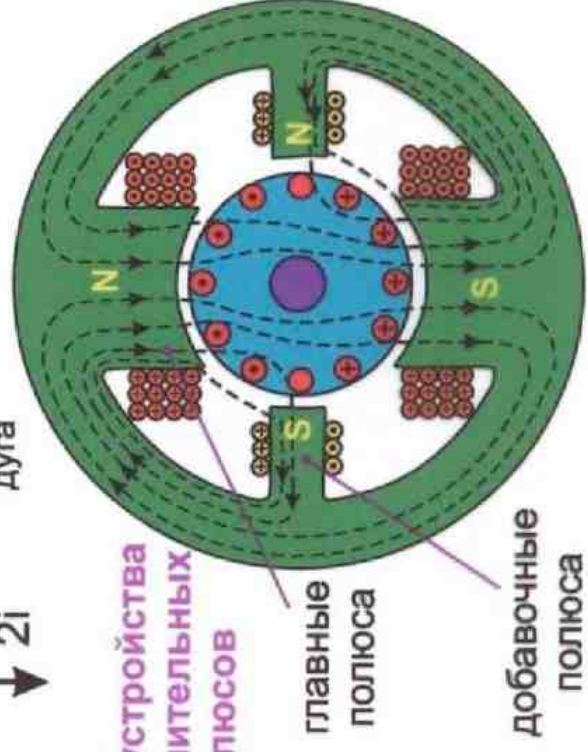
ЭДС от потока реакции якоря

$$e_a = B_a L_c V$$

e_D - ЭДС магнитного потока добавочных полюсов

$$e_D = -e_a$$

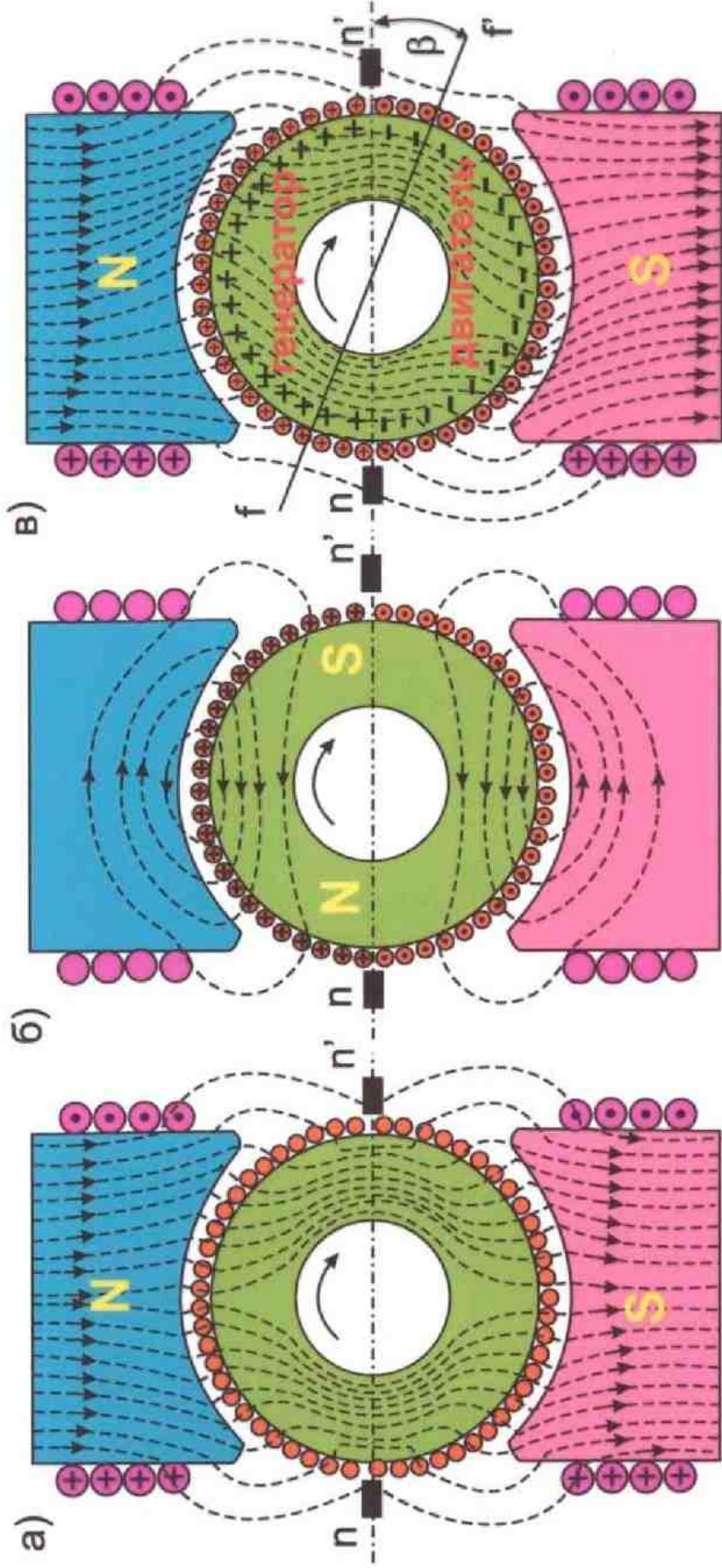
Схема устройства дополнительных полюсов



Машины постоянного тока

Реакция якоря

Реакция якоря - искажающее воздействие намагничивающей силы якоря на главное магнитное поле машины.



а) главное магнитное поле; б) поле якоря; в) результирующее поле.



Машины постоянного тока

Естественные и искусственные характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения

Южно-Уральский Государственный университет

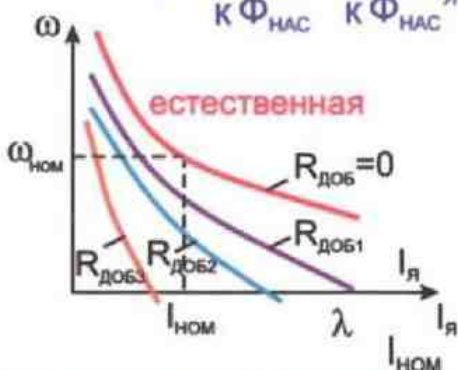


а) при $I_{я} < I_{гр}$ до насыщения магнитной цепи $\Phi = k_{\Phi} I_{я}$, $k_{\Phi} = \text{const}$

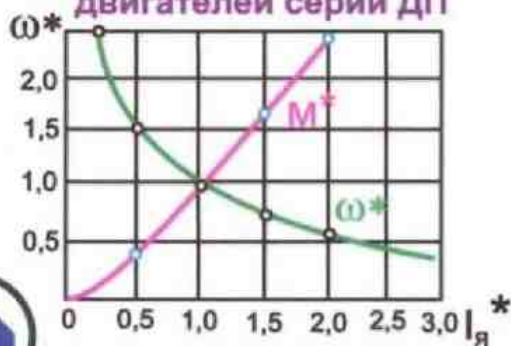
$$\omega = \frac{U_{я}}{k k_{\Phi} I_{я}} - \frac{R_{я\epsilon}}{k k_{\Phi}}$$

б) при $I_{я} > I_{гр}$ до насыщения магнитной цепи $\Phi = \Phi_{нас} = \text{const}$

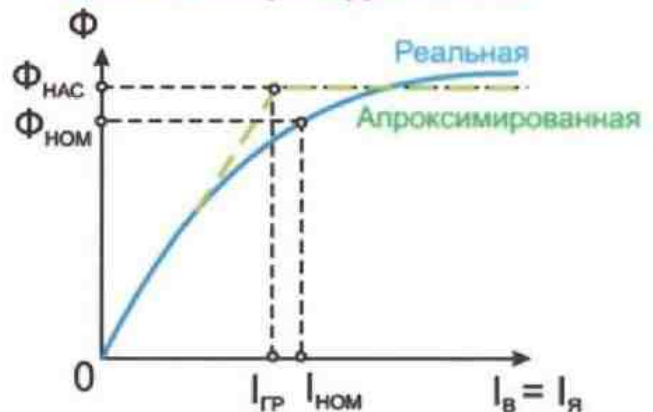
$$\omega = \frac{U_{я}}{k \Phi_{нас}} - \frac{R_{я\epsilon}}{k \Phi_{нас}} I_{я}$$



Универсальные характеристики двигателей серии ДП



Характеристика намагничивания магнитной цепи двигателя



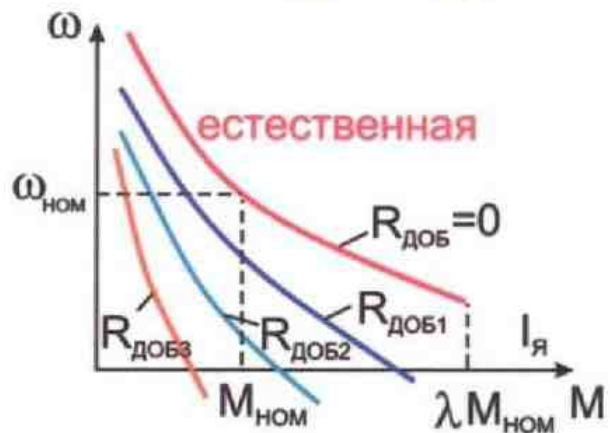
Механические характеристики

а) при $I_{я} < I_{гр}$ до насыщения магнитной цепи $\Phi = k_{\Phi} I_{я}$, $k_{\Phi} = \text{const}$

$$\omega = \frac{U_{я}}{\sqrt{k k_{\Phi} M}} - \frac{R_{я\epsilon}}{k k_{\Phi}}$$

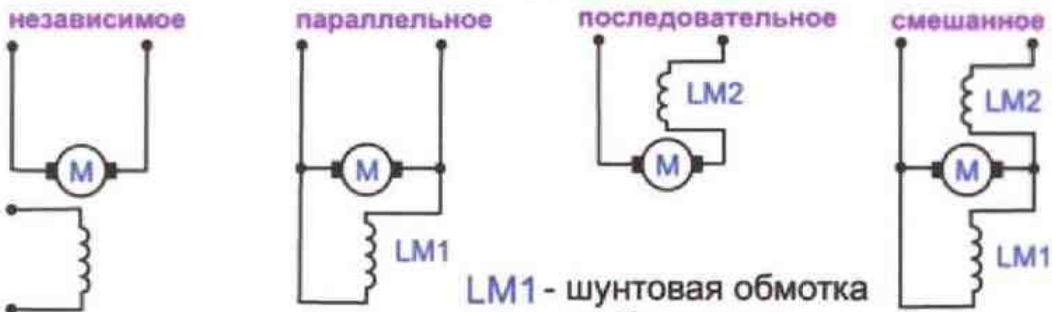
б) при $I_{я} > I_{гр}$ до насыщения магнитной цепи $\Phi = \Phi_{нас} = \text{const}$

$$\omega = \frac{U_{я}}{k \Phi_{нас}} - \frac{R_{я\epsilon}}{k^2 \Phi_{нас}^2} M$$



Машины постоянного тока

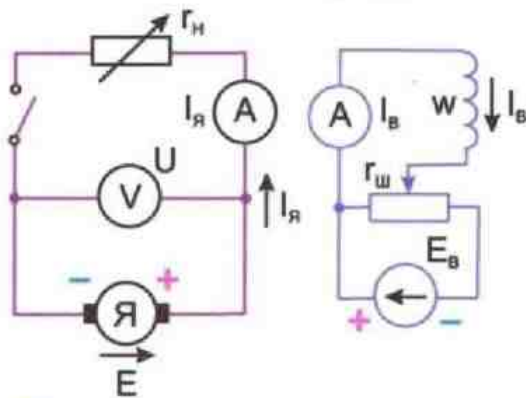
Схемы возбуждения. Генератор независимого возбуждения



LM1 - шунтовая обмотка возбуждения;
 LM2 - последовательная (серийная) обмотка возбуждения.

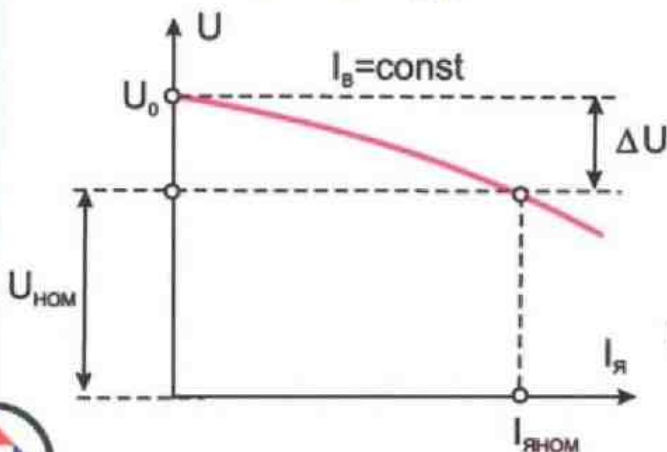
Генератор независимого возбуждения

Схема генератора независимого возбуждения

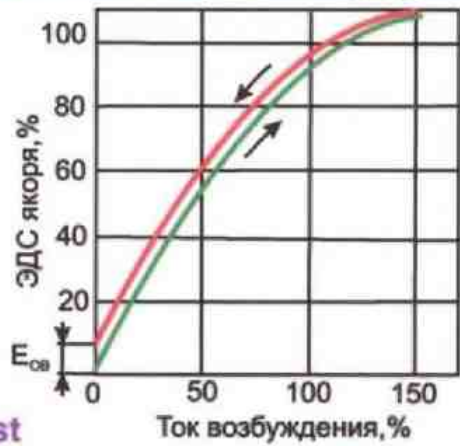


Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения $U=f(I_я), I_в=const$

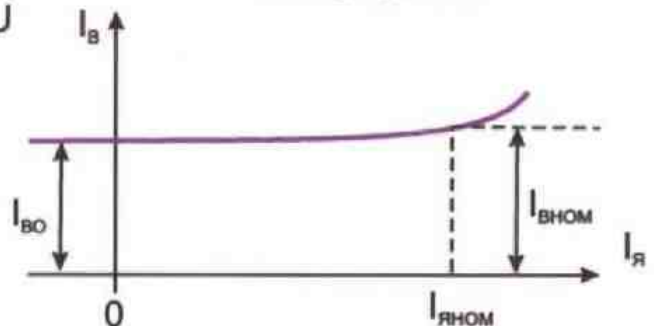
$$U = E - I_я r_я$$



Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения



Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения



Южно-Уральский Государственный университет

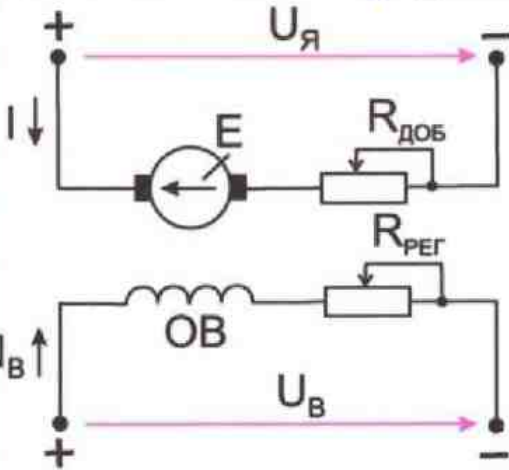
РНПО Росучприбор



Машины постоянного тока

Естественные характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Схема включения двигателя с независимым возбуждением



Электро-механическая характеристика

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k\Phi} I_{\text{я}} \quad k = \frac{pN}{2\pi a}$$

Механическая характеристика

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k^2\Phi^2} M$$

где

$$R_{\text{я}} = R_{\text{яДВ}} + R_{\text{ДОБ}} = R_{\text{яДВ}} + R_{\text{КО}} + R_{\text{ДЛ}} + R_{\text{ДОБ}}$$

полное сопротивление якорной цепи

Естественные электро-механическая (а) и механическая (б) характеристики двигателя при $U_{\text{я}} = U_{\text{НОМ}}$, $\Phi = \Phi_{\text{НОМ}}$, $R_{\text{ДОБ}} = 0$

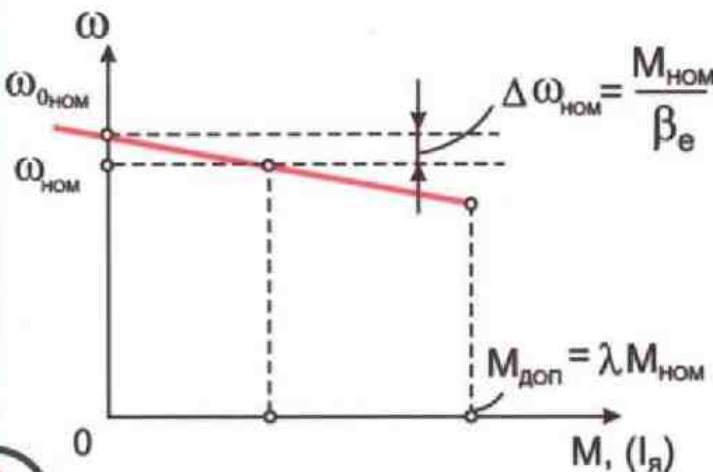
а) $\omega = \omega_{0\text{НОМ}} - \frac{R_{\text{я}}}{c} I_{\text{я}}$

где $\omega_{0\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{c}$

б) $\omega = \omega_{0\text{НОМ}} - \frac{M}{\beta_e} I_{\text{я}}$

$c = k\Phi_{\text{НОМ}}$

$\beta_e = \frac{c^2}{R_{\text{я}}}$ - модуль жесткости естественной характеристики



$M_{\text{НОМ}} = c I_{\text{НОМ}}$, (Н·м)

$E_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R_{\text{яДВ}}$, В

$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30}$, 1/с

$c = k\Phi_{\text{НОМ}} = \frac{E_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}$, В·с

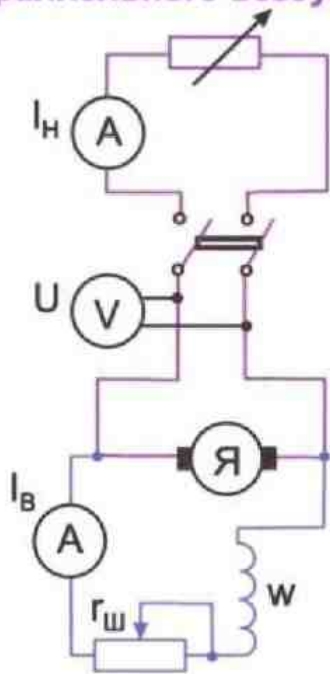
$\omega_{0\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{c}$, 1/с



Машины постоянного тока

Генераторы параллельного и смешанного возбуждения

Схема генератора параллельного возбуждения



Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

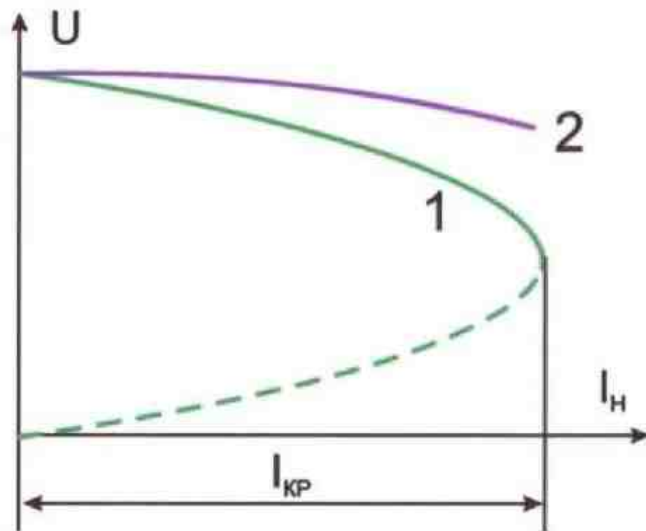
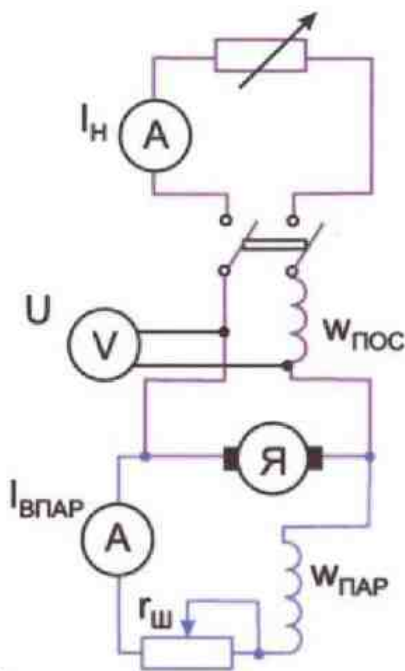
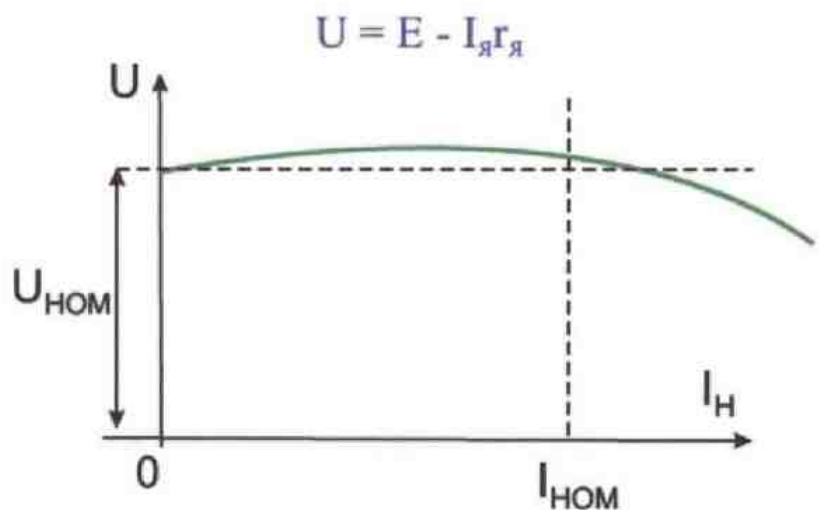


Схема генератора смешанного возбуждения



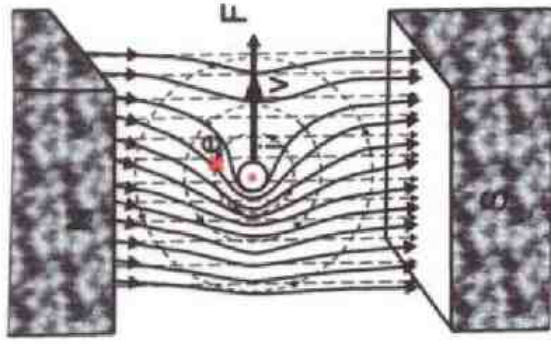
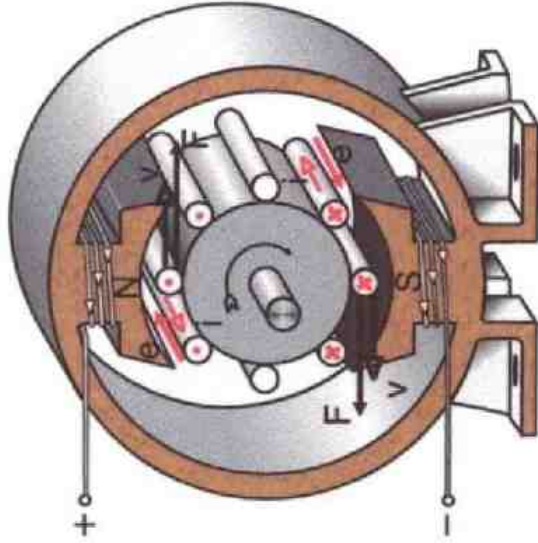
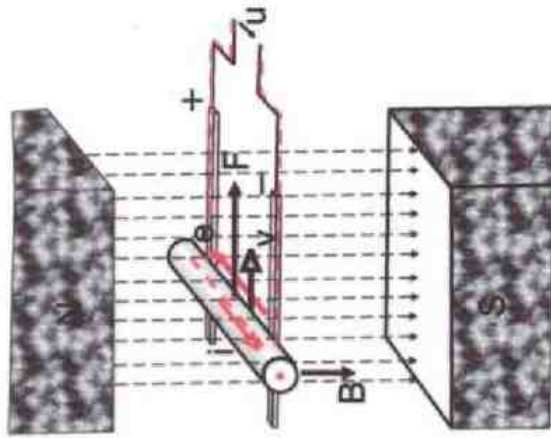
Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения при согласованном включении обмоток возбуждения





Машины постоянного тока

Преобразование энергии в электродвигателе



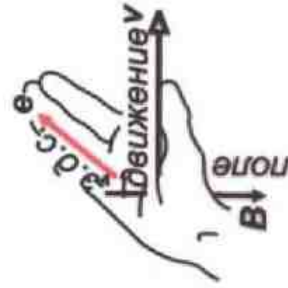
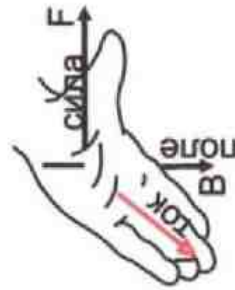
$$F = BLi;$$

$$e = BLv;$$

$$Fv = Li$$

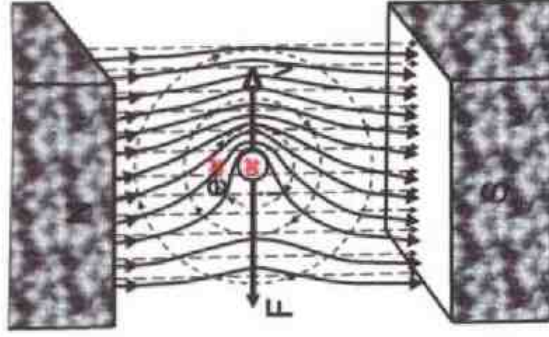
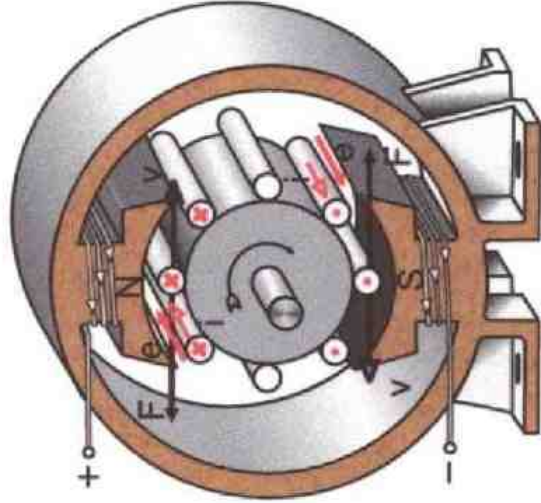
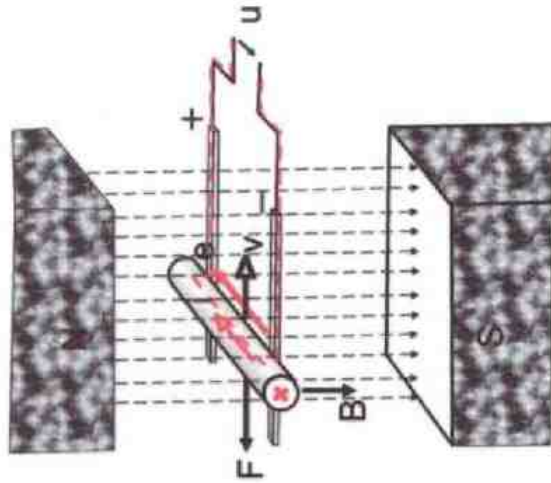
где L - длина проводника

ПРИНЦИП ОБРАТИМОСТИ
МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА



Применение правил правой и левой руки
к работе электродвигателя
(обращённого генератора)

Преобразование энергии в электрическом генераторе



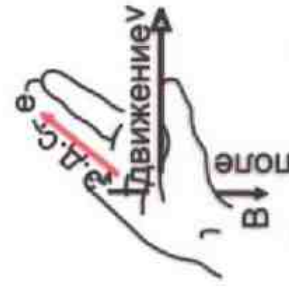
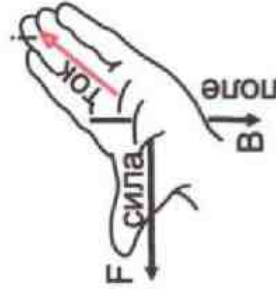
$$F = BLi;$$

$$e = BLv;$$

$$Fv = Li$$

где L - длина проводника

ПРИНЦИП ОБРАТИМОСТИ
МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА



Применение правил правой и левой руки
к работе генератора



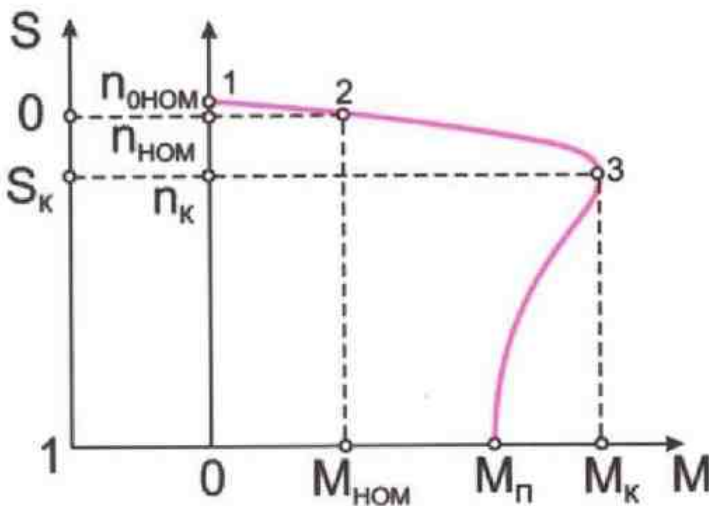
Асинронные машины

Расчет и построение механической характеристики асинхронного двигателя

Паспортные (номинальные) данные двигателя

$P_{НОМ}$ [кВт]; $U_{НОМ,ЛИН}$ [В]; 360/220 - Y/ Δ $I_{НОМ,ЛИН}$ [А]; $n_{НОМ}$ [об/мин];
 $\cos\phi_{НОМ}$; $\lambda = M_{т.ж} / M_{НОМ}$; $\beta = M_{ПУСК} / M_{НОМ}$; $I_{п} / I_{НОМ}$ - кратность
 пускового тока; $U_{2К}$ и $I_{2НОМ}$ - для двигателя с фазным ротором.

Естественная механическая характеристика двигателя



т.1 $n = n_{0НОМ} = \frac{60f}{p}$; $M = 0$

т.2 $n = n_{НОМ}$; $M = M_{НОМ}$ [Н·м]

$$M_{НОМ} = 9550 \frac{P_{НОМ} [\text{кВт}]}{n_{НОМ} [\text{об/мин}]}$$

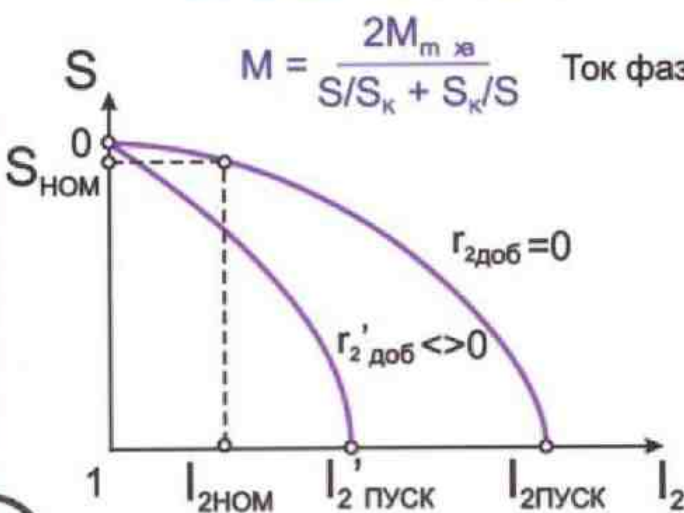
т.3 $n = n_К$; $M = M_К = M_{т.ж}$

$$n_К = n_{0НОМ} (1 - S_К)$$

$$S_К = S_{НОМ} (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}), S_{НОМ} = (n_{0НОМ} - n_{НОМ}) / n_{0НОМ}$$

т.4 $n = 0$; $M = M_П = \beta M_{НОМ}$

Естественная механическая характеристика двигателя



$M = \frac{2M_{т.ж}}{S/S_К + S_К/S}$ Ток фазы ротора $I_2 = \sqrt{\frac{M\omega_0 S}{3r_2}}$

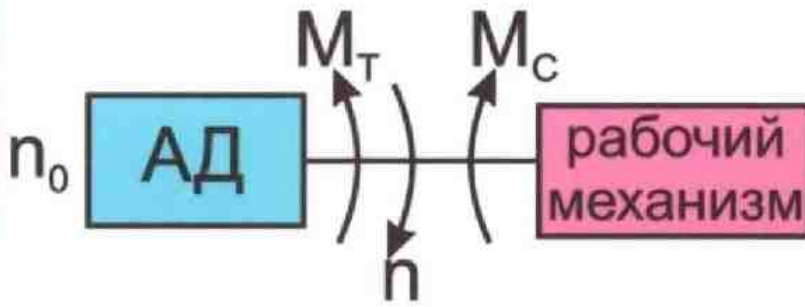
где $r_2 = \frac{M_{НОМ} \omega_0 S_{НОМ}}{3I_{2НОМ}^2}$

$r_{2доб}$ - добавочное сопротивление фазы ротора



Асинхронные машины

Тормозные режимы работы асинхронного двигателя

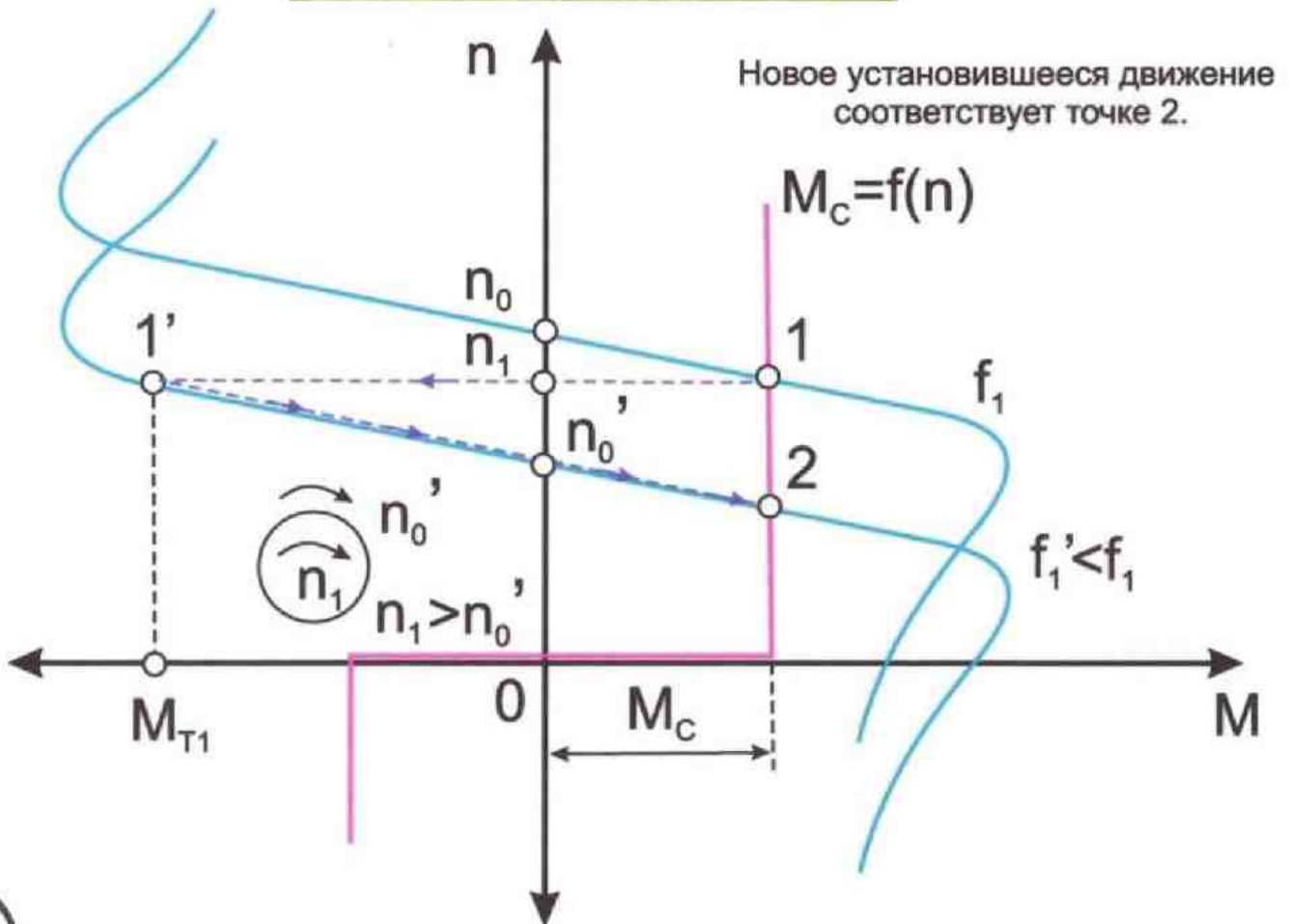


- Тормозные режимы:
- генераторный с отдачей энергии в сеть (параллельно с сетью);
 - противовключения (генераторный режим последовательно с сетью);
 - динамический (отдельно от сети).

Генераторный режим параллельно с сетью

$n > n_0$ где n_0 - частота вращения магнитного поля

Режим реализуется при снижении частоты токов статора $f_1' < f_1$

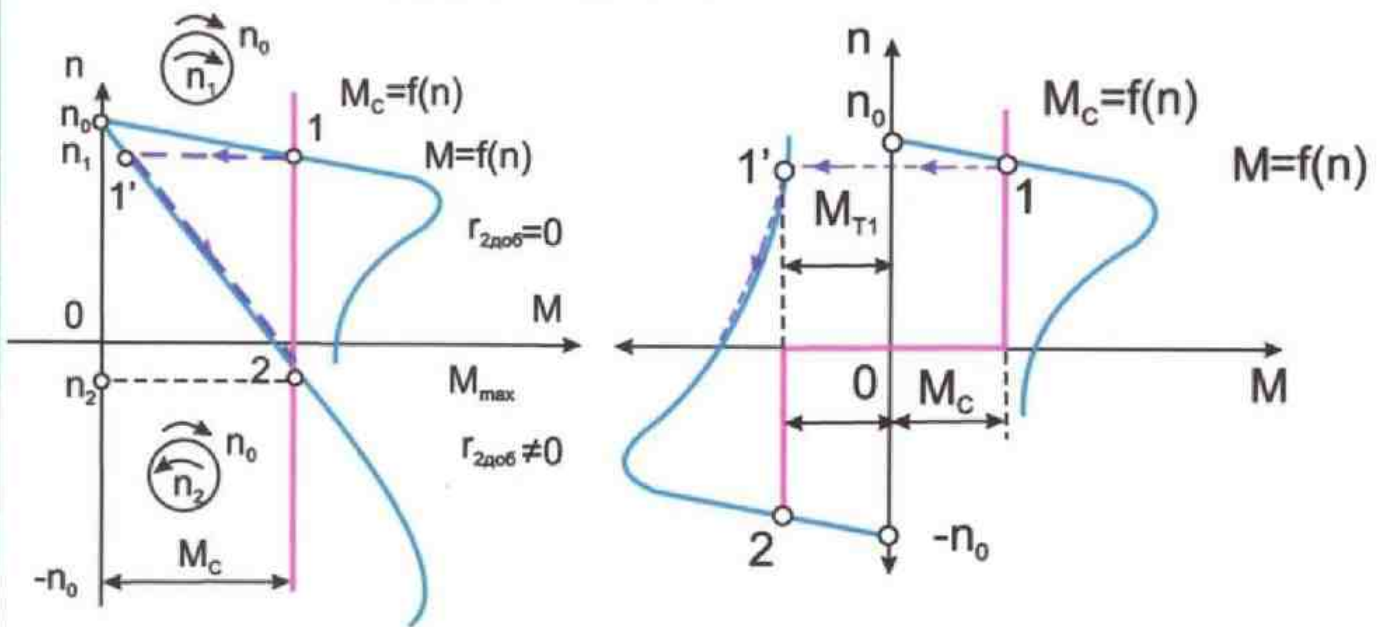


Асинхронные машины

Тормозные режимы работы асинхронного двигателя

Режим торможения противовключением

Имеет место, когда n и n_0 противоположно направлены



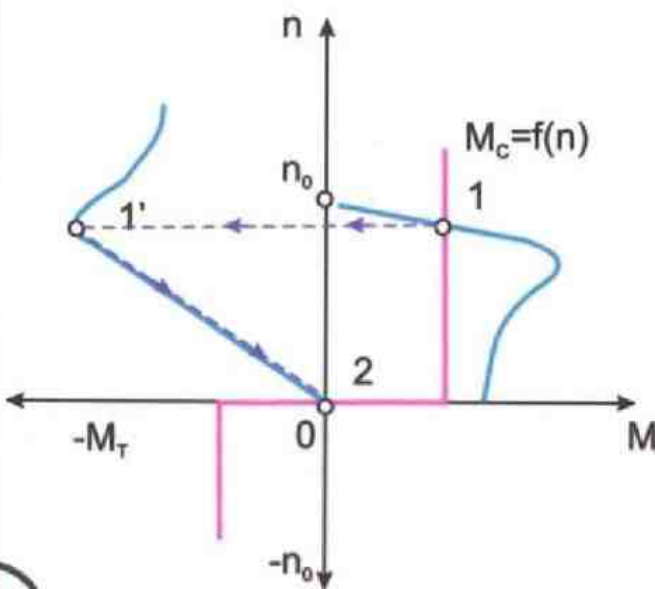
Активный статический момент $M_c > M$

При изменении порядка чередования фаз

Динамическое торможение

$n_0 = 0$ $n > 0$

Реализуется отключением обмоток статора от сети переменного тока и подключения их к сети постоянного тока



- На всех рисунках
- т.1 - двигательный режим работы электропривода;
 - т.1' - рабочая точка в момент начала торможения;
 - т.2 - точка нового установившегося режима работы двигателя.



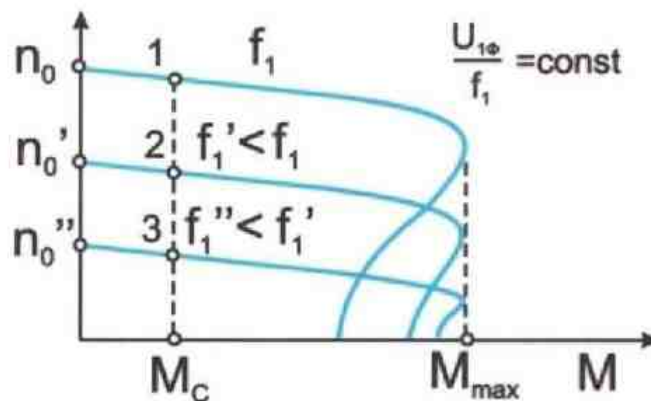
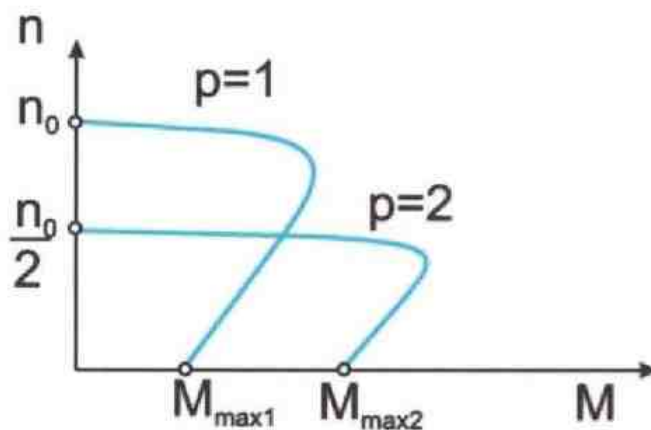
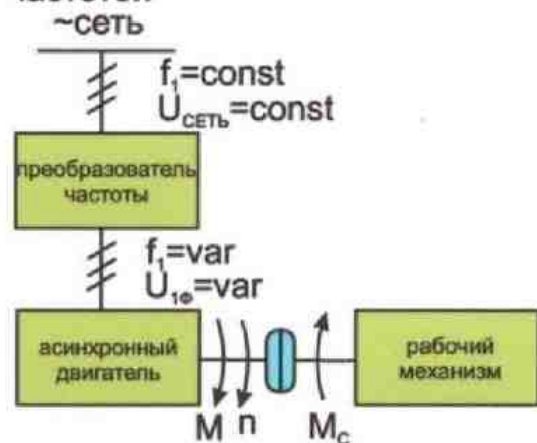
Асинхронные машины

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

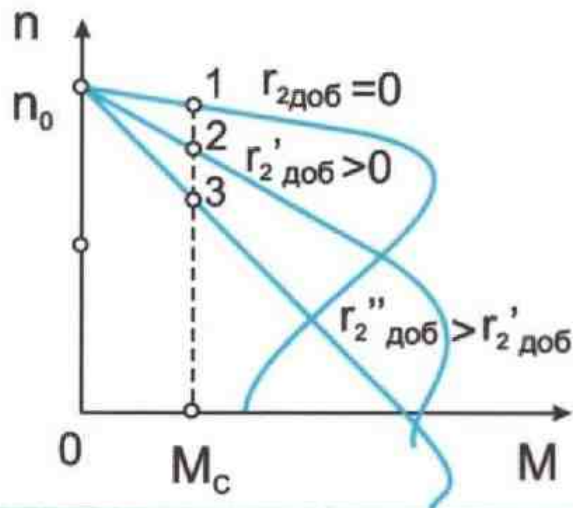
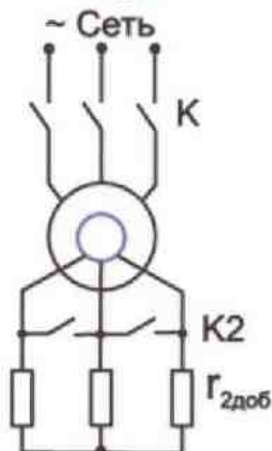
а) изменением числа пар полюсов параллельным ($p=1$), либо последовательным ($p=2$) способом двух частей каждой фазы обмоток статора

$$n_0 = \frac{60f_1}{p}$$

а) изменением частоты тока статора при наличии отдельного источника (преобразователя) энергии с регулируемой частотой



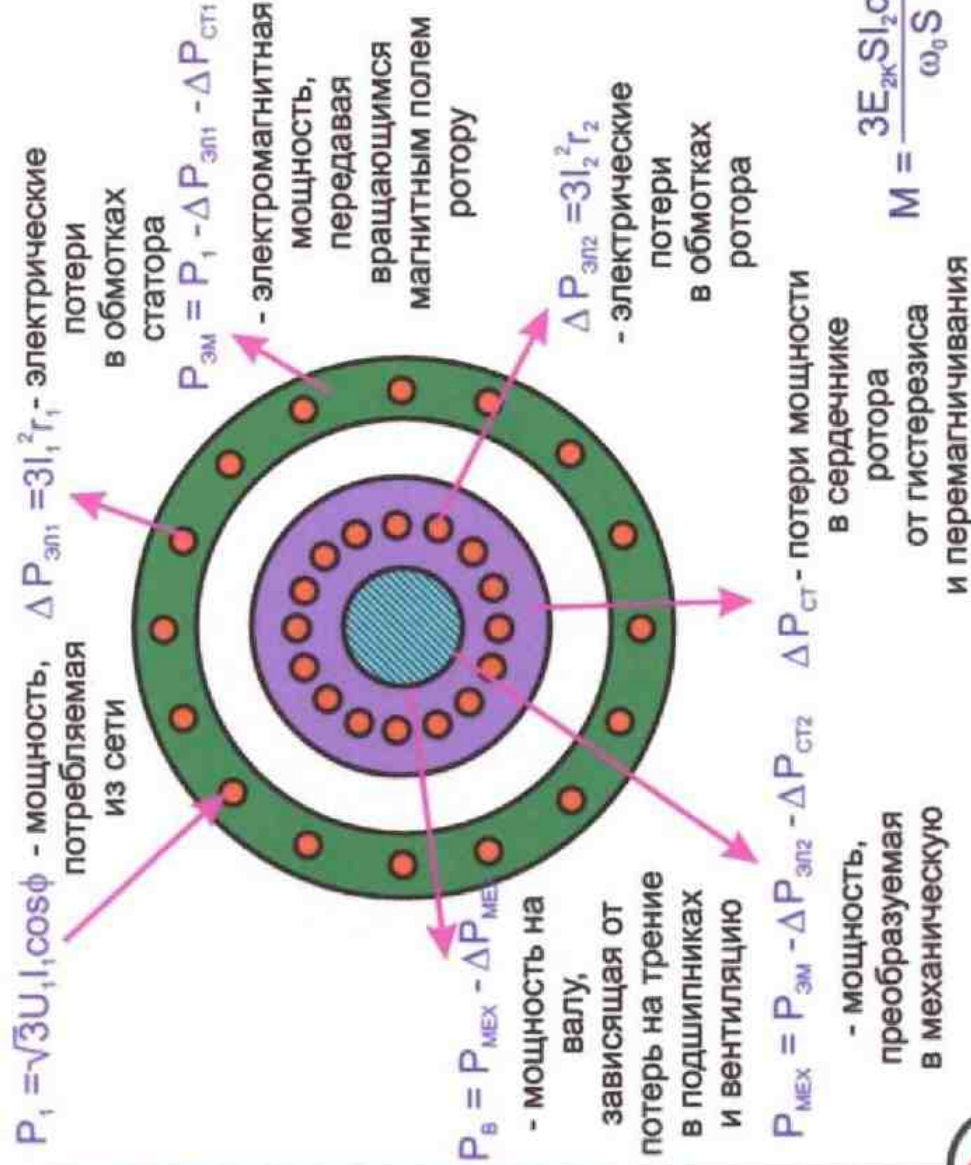
а) регулирование частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором путем введения в цепь обмотки ротора дополнительного сопротивления $\gamma_{2доб}$





Асинхронные машины

Энергетическая диаграмма и момент на валу асинхронного двигателя



Основные формулы и соотношения

$$P = P_{\text{в}} = M\omega$$

$$P_{\text{эм}} = M\omega_0$$

$$P_{\text{эм}} - P = \Delta P_{\text{эл2}} = 3I_2^2 r_2$$

$$\Delta P_{\text{эл2}} = P_{\text{эм}} S$$

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$$

$$M = \frac{3I_2^2 r_2}{\omega_0 - \omega} = \frac{3I_2^2 r_2}{\omega_0 S}$$

$$3I_2^2 r_2 = 3E_2 I_2 \cos(\widehat{E_2, I_2}) = 3E_2 I_2 \cos \phi_2$$

$$E_2 = 4,44f_2 W_2 \Phi K_{\text{об2}} = E_{2\text{к}} S$$

$$M = \frac{3E_{2\text{к}} S I_2 \cos \phi_2}{\omega_0 S} = \frac{13,32f_1 W_2 \Phi K_{\text{об2}} I_2 \cos \phi_2}{\omega_0} = c\Phi I_2 \cos \phi_2$$

Основы электропривода

Динамический момент (внутренний момент)

$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}$ – Обуславливает перераспределение энергии внутри системы привода

$M_{\text{дин}} > 0$, т. е. $\frac{d\omega}{dt} > 0$ система движется с ускорением, увеличивая запас кинетической энергии.

$M_{\text{дин}} < 0$, т. е. $\frac{d\omega}{dt} < 0$ система движется с замедлением, уменьшая запас кинетической энергии.

$M_{\text{дин}} = 0$, т. е. $\frac{d\omega}{dt} = 0$ система движется с постоянной скоростью, сохраняя запас кинетической энергии.

Время разгона и торможения электропривода

Из уравнения движения имеем

$$t = J \int_{\omega_1} \frac{d\omega}{M \pm M_{\text{сопр}}}$$

Если считать, что разгон или торможение идёт с постоянным моментом $M_{\text{сопр}} = \text{const}$, то: время разгона двигателя

$$t_p = J \frac{\omega_{\text{уст}}}{M - M_{\text{сопр}}}$$

время торможения двигателя

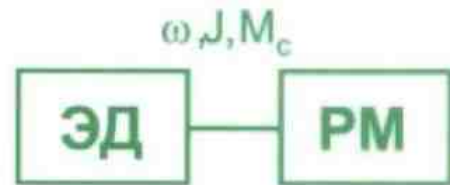
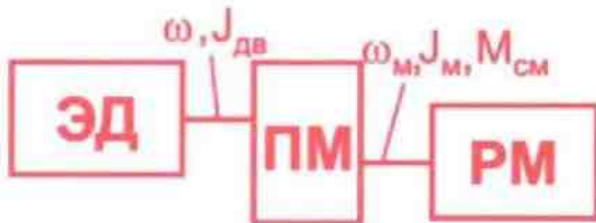
$$t_T = J \frac{\omega_{\text{уст}}}{M + M_{\text{сопр}}}$$

$\omega_{\text{уст}}$ – установившаяся скорость



Основы электропривода

Приведение моментов сопротивлений (усилий) и моментов инерции (движущихся масс) к валу двигателя



Реальная система

Из равенства мощностей при передаче энергии от двигателя к механизму

$$\frac{M_{см} \omega_м}{\eta} = M_c \omega \quad M_c = \frac{M_{см}}{i \eta}$$

Приведенная система

При передаче энергии от механизма к двигателю $P_{реал} = P_{пр}$ имеем:

$$M_{см} \omega_м \eta = M_c \omega \quad M_c = \frac{M_{см} \eta}{i}$$

$i = \omega / \omega_м$ передаточное число, η - КПД редуктора (ПМ).

При поступательном движении имеем

$$M_c = \frac{F_{см}}{\eta} \frac{V_м}{\omega}$$

$$M_c = \frac{F_{см} \eta V_м}{\omega}$$

Из равенства запаса кинетической энергии имеем

$$J \frac{\omega^2}{2} = J_{дв} \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_м \frac{\omega_м^2}{2}$$

$$J = J_{дв} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_2^2} + \dots + \frac{J_м}{i^2}; \quad i_1 = \frac{\omega}{\omega_1}; \quad i_2 = \frac{\omega}{\omega_2}; \quad \dots \quad i = \frac{\omega}{\omega_м}$$

$J_1, \omega_1, J_2, \omega_2$: параметры осей вращения передаточного механизма

В общем виде при наличии вращающихся и поступательно движущихся масс имеем

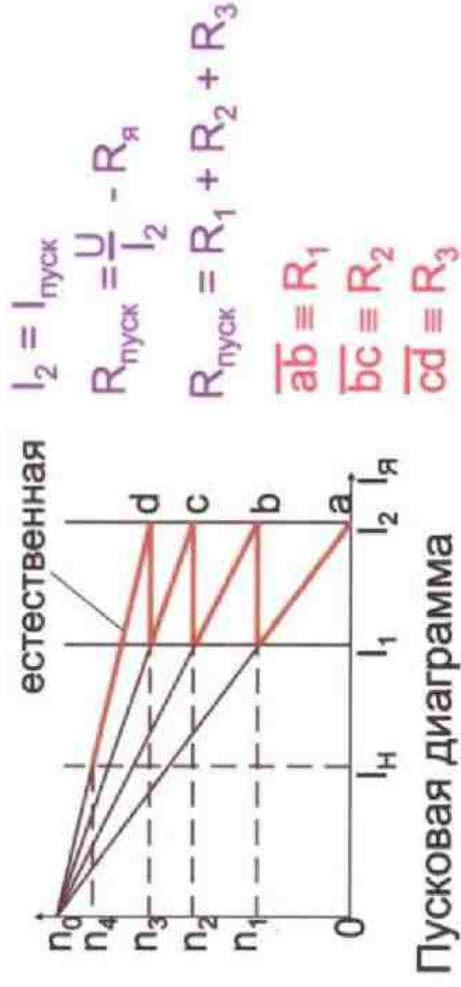
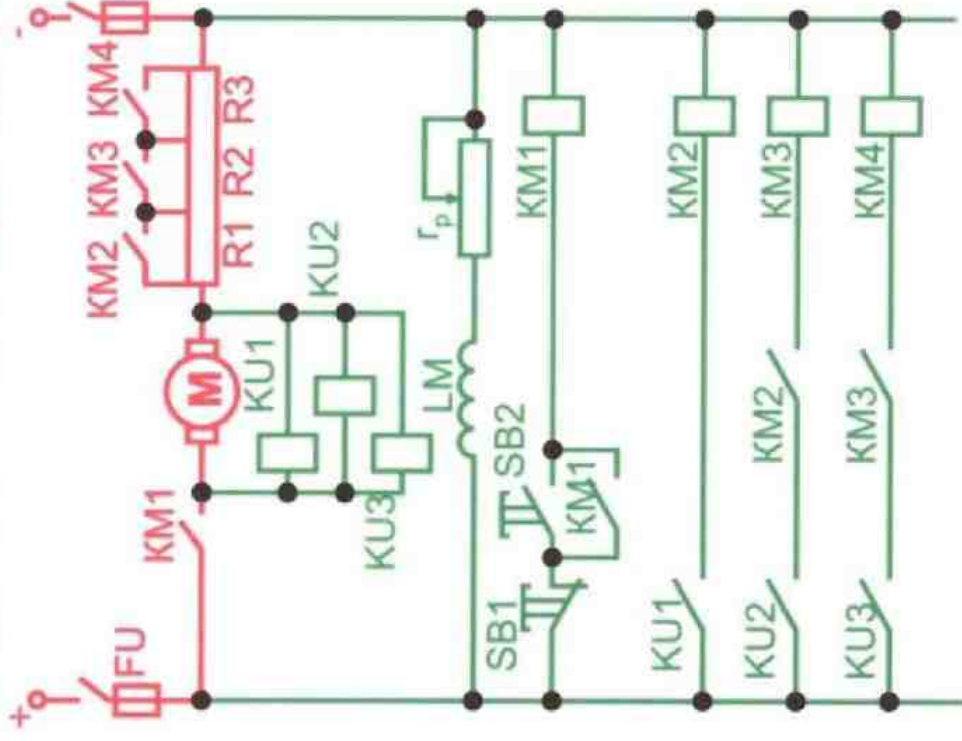
$$J = J_{дв} + \sum \frac{J_2}{i_2^2} + \frac{J_м}{i^2} + \frac{mV_м^2}{\omega^2}$$



Основы электропривода

Управление электрическим приводом

Пуск двигателя постоянного тока в функции скорости (ЭДС)



Пусковая диаграмма

$E_1 = C_e \Phi n_1 = U$ срабатывания реле КУ1

$E_2 = C_e \Phi n_2 = U$ срабатывания реле КУ2

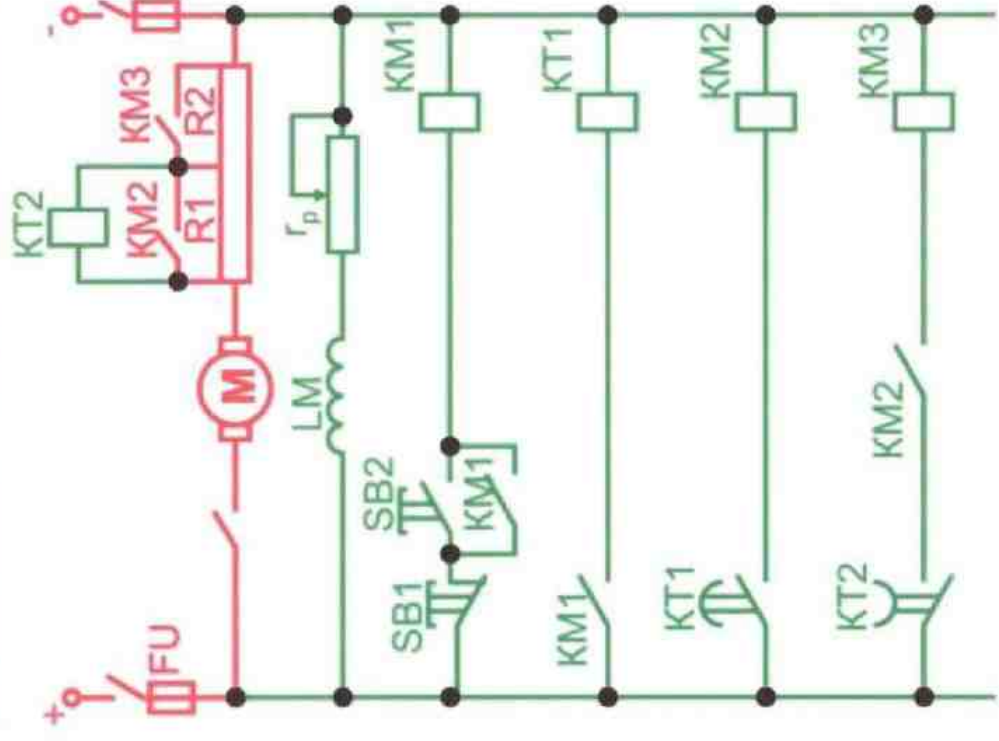
$E_3 = C_e \Phi n_3 = U$ срабатывания реле КУ3

М - двигатель постоянного тока,
КУ1, КУ2, КУ3 - реле напряжения,
КМ1 - линейный контактор,
КМ2, КМ3 - контакторы ускорения,
SB1, SB2 - электрокнопки.





Основы электропривода
 Управление электрическим приводом
 Пуск двигателя постоянного тока в функции времени

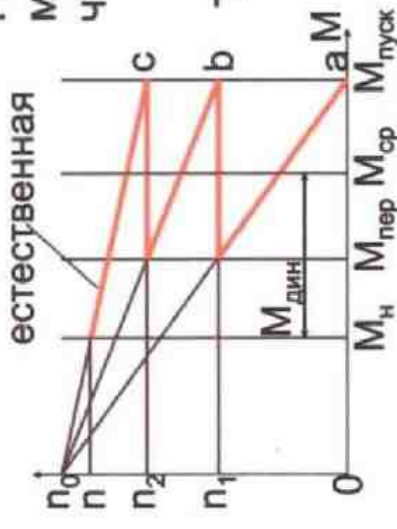


При линейном изменении момента можно считать, что пуск происходит при

$$M = M_{\text{пост}}$$

Тогда

$$M_{\text{пост}} = M_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{пуск}} + M_{\text{пер}}}{2}$$



Пусковая диаграмма

$$\overline{ab} \equiv R_1; \overline{bc} \equiv R_2$$

$$t_1 = J \frac{\Delta\omega_1}{M_{\text{дин}}} = t \text{ задержки КТ1}$$

$$\Delta\omega_1 = \omega_1 \quad \omega_1 = \frac{\pi n_1}{30}$$

$$t_2 = J \frac{\Delta\omega_2}{M_{\text{дин}}} = t \text{ задержки КТ2}$$

$$\Delta\omega_2 = \omega_2 \quad \omega_2 = \frac{\pi n_2}{30}$$

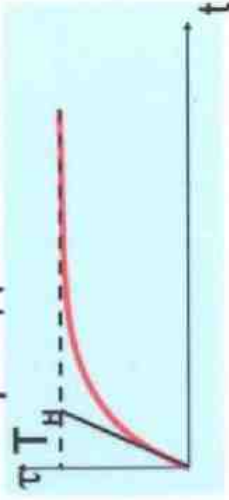
М - двигатель постоянного тока,
 КТ1, КТ2 - реле времени,
 КМ1 - линейный контактор,
 КМ2, КМ3 - контакторы ускорения

Основы электропривода

Нагрев и режимы работы электродвигателя

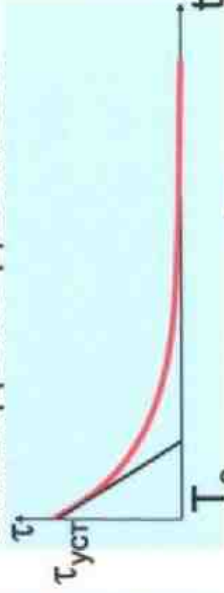
$$\tau = \theta^{\circ}_{\text{маш}} - \theta^{\circ}_{\text{окр. среды}}$$

Нагрев двигателя



$$\tau = \tau_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_n})$$

Охлаждение двигателя

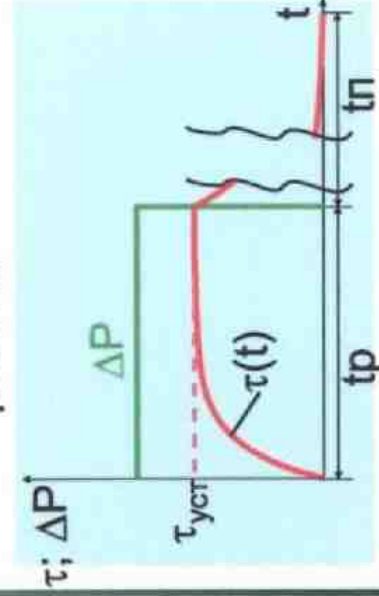


$$\tau = \tau_{\text{уст}}e^{-t/T_0}$$

Превышение температуры машины над температурой окружающей среды

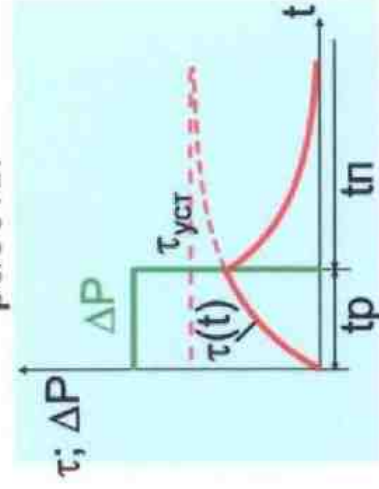
T_n, T_0 - постоянные времени нагрева и охлаждения

Длительный режим работы



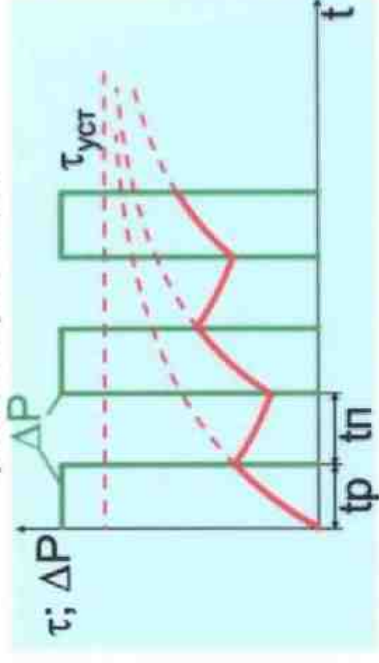
За время работы tp температура двигателя достигает $\tau_{\text{уст}}$, а за время паузы tp достигает температуры среды

Кратковременный режим работы



За время работы tp температура двигателя не достигает $\tau_{\text{уст}}$, а за время паузы tp достигает температуры среды

Повторно-кратковременный режим работы



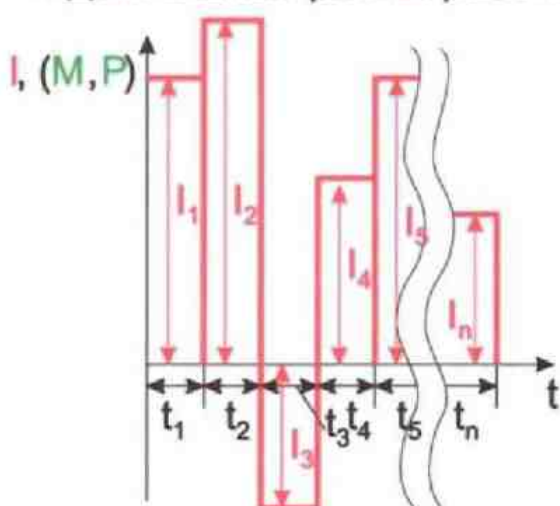
За время работы tp температура двигателя не достигает $\tau_{\text{уст}}$, а за время паузы tp не достигает температуры среды



Основы электропривода

Выбор мощности двигателя по нагреву

1. Длительный режим работы. а) метод эквивалентного тока



$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n I_k^2 t_k}{\sum_{k=1}^n t_k}}, \quad I_{\text{ЭКВ}} \leq I_H$$

б) метод эквивалентного момента

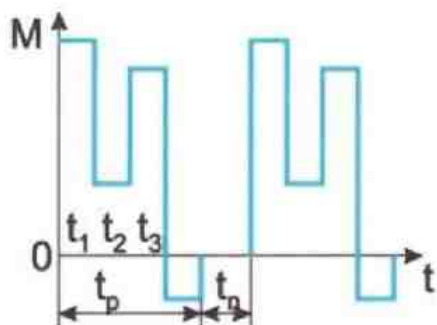
$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n M_k^2 t_k}{\sum_{k=1}^n t_k}}, \quad M_{\text{ЭКВ}} \leq M_H$$

в) метод эквивалентной мощности

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n P_k^2 t_k}{\sum_{k=1}^n t_k}}, \quad P_{\text{ЭКВ}} \leq P_H$$

I_H, M_H, P_H - номинальные параметры двигателя.

2. Повторно-кратковременный режим



Режим работы циклический, характеризуется продолжительностью включения ПВ % (ϵ)

$$\text{ПВ \%} = \frac{t_p}{t_p + t_n} * 100 = \frac{t_p}{t_c} * 100$$

$$\epsilon = \frac{t_p}{t_c} \quad \text{ПВ \%} = \epsilon * 100\%$$

Стандартные значения ϵ

0,15; 0,25; 0,40 (15%, 25%, 40%)

Порядок расчёта.

а) Определяют эквивалентный расчётный момент

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n M_k^2 t_k}{\sum_{k=1}^n t_k}}, \quad M_{\text{ЭКВ}} \leq M_H$$

б) определяют расчётные значения ПВ(ϵ)

$$\epsilon = \frac{\sum t_p}{\sum t_p + t_n}$$

в) расчётный момент пересчитывают на ближайшее стандартное ПВ(ϵ)

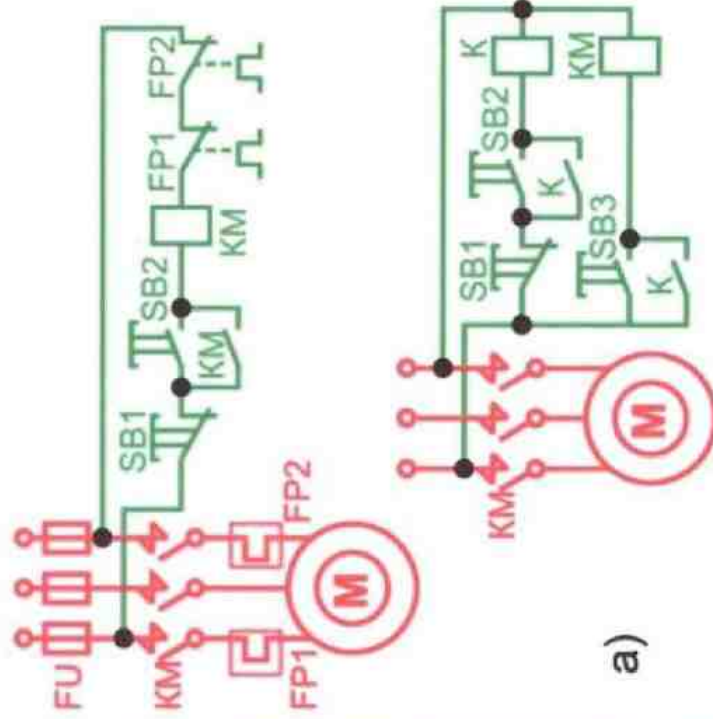
$$M_{\text{СТ}} = M_{\text{ЭКВ}} \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_{\text{СТ}}}}$$



Основы электропривода

Управление электрическим приводом

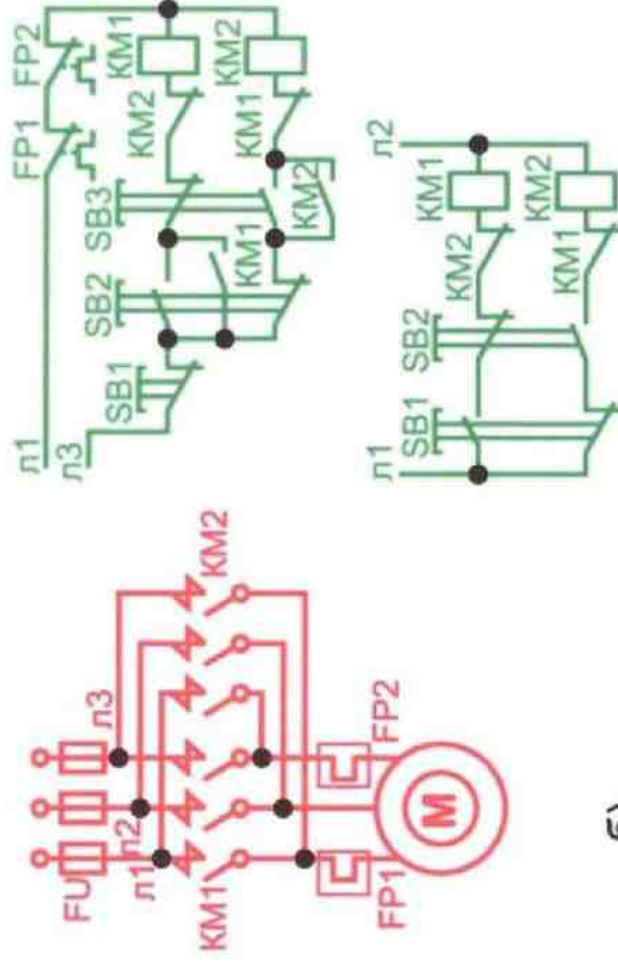
Управление нереверсивным приводом переменного тока



а)

Применяется нереверсивный магнитный пускатель. Включает трёхполюсный контактор **KM**, кнопочный пост с кнопками **SB1** и **SB2** предохранители **FU**, тепловые реле **FP1** и **FP2**.
Схема "а" обеспечивает длительную работу привода, схема "б" может обеспечивать и кратковременное включение нажатием на **SB3**.

Управление реверсивным приводом переменного тока



б)

Применяется реверсивный магнитный пускатель. Включает два трёхполюсных контактора **KM1** и **KM2**, кнопочный пост с кнопками **SB1**, **SB2** и **SB3**, предохранители **FU** и тепловые реле **FP1** и **FP2**.
Схема "б" - кратковременное включение привода в любом из направлений движения.

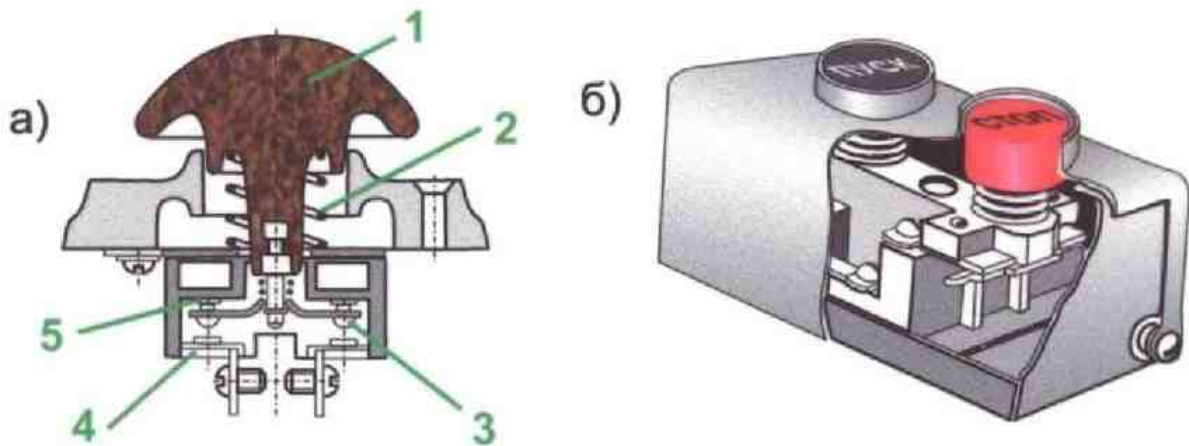


Основы электропривода

Аппаратура релейно-контакторного управления электроприводом

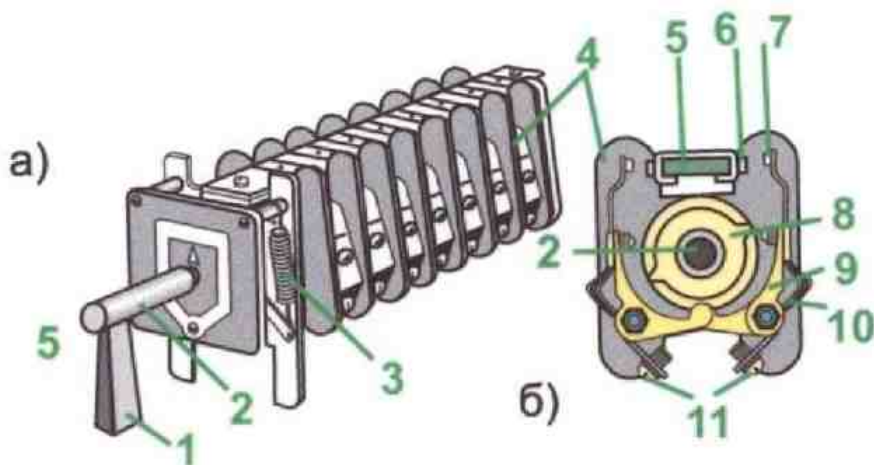
III Командная аппаратура

Кнопки управления



- а) 1-кнопка; 2-возвратная пружина; 3-мостиковый контакт; 4-замыкающий контакт; 5-размыкающий контакт.
 б) Кнопочный пост в сборе

Универсальный переключатель



- а) переключатель в сборе
 б) отдельная секция переключателя

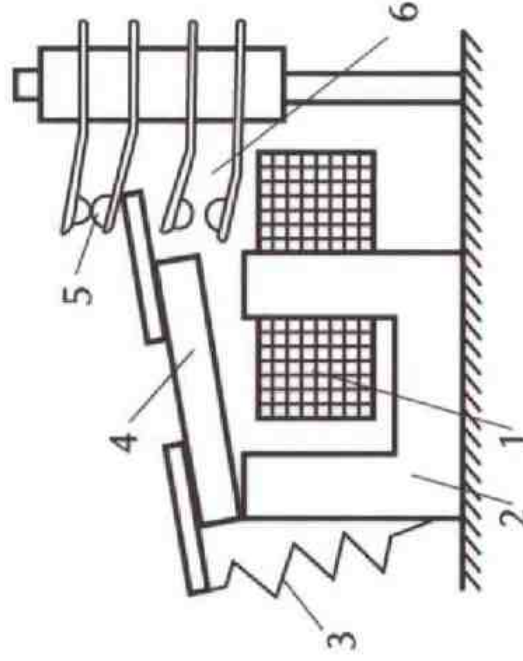
- 1-рукоятка; 2-центральный валик; 3-пружины; 4-перегородка секции; 5-контактная скоба; 6 и 7-контактные серебряные напайки; 8-кулачковая шайба; 9-скоба; 10-прижимы; 11-контактные винты.



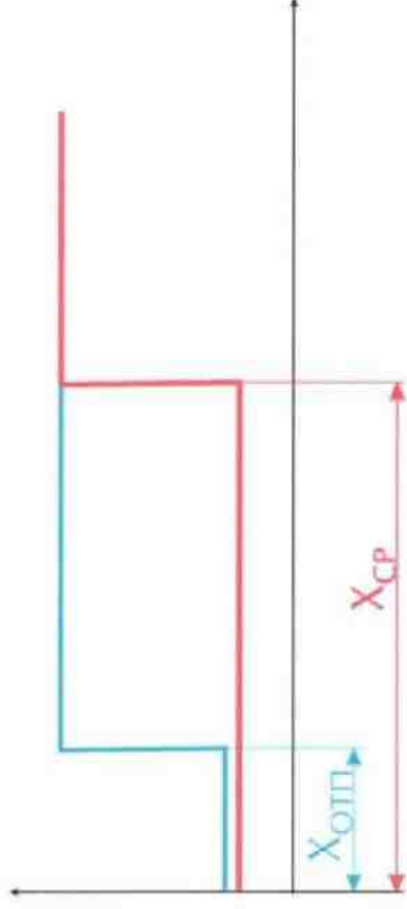
Основы электропривода

Аппаратура релейно-контакторного управления электроприводом

II Аппаратура оперативного управления (аппаратура вторичной коммутации)
 Электромагнитные реле



1. Катюшка электромагнита
2. Сердечник
3. Возвратная пружина
4. Якорь (подвижная часть магнитной системы)
5. Размыкающие контакты
6. Замыкающие контакты



$X_{СП}$ - значение величины срабатывания (уставка срабатывания) - значение воздействующей величины, при которой реле включается

$X_{ОТП}$ - значение величины отпущения (уставка отпадания) - значение воздействующей величины, при которой реле отключается

$$K_B = \frac{X_{ОТП}}{X_{СП}} < 1$$

K_B - коэффициент возврата реле



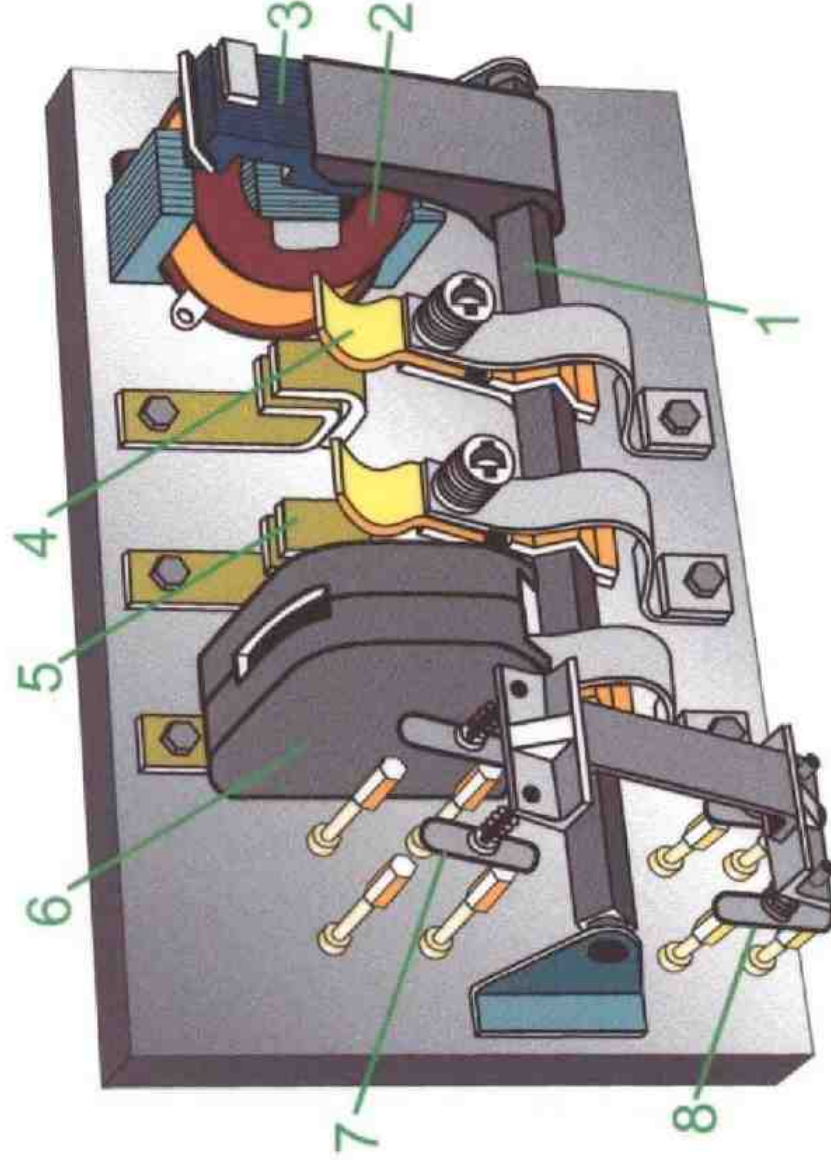


Основы электропривода

Аппаратура релейно-контакторного управления электроприводом

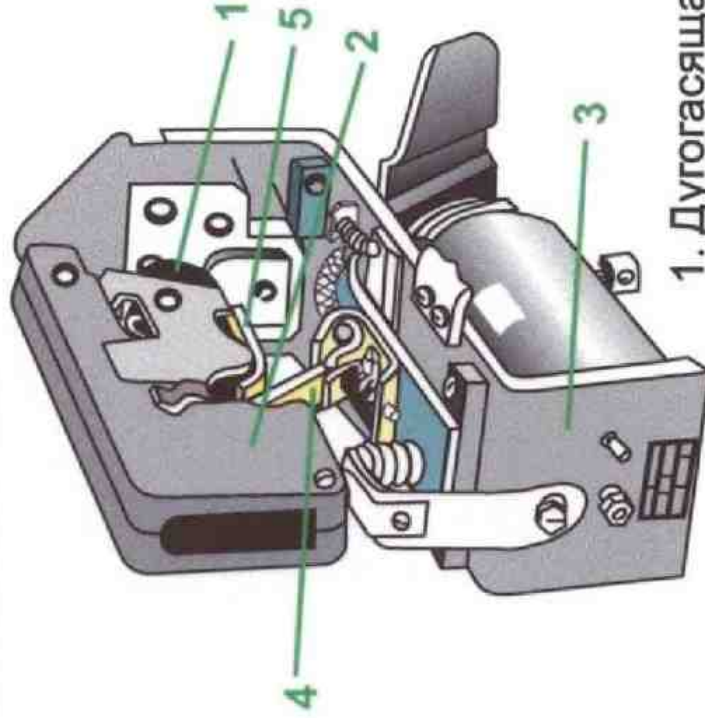
I Силовая аппаратура (аппаратура первичной коммутации)

Трёхполюсный контактор переменного тока



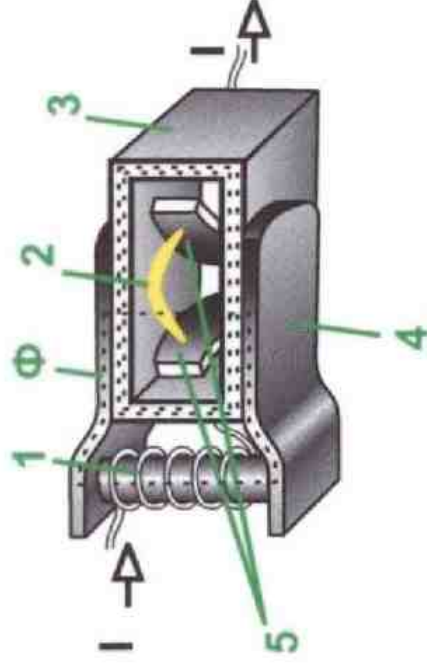
1. Поворотный валик.
2. Катушка электромагнита.
3. Подвижная часть магнитной системы - якорь.
4. Подвижные силовые контакты.
5. Неподвижные силовые контакты.
6. Дугогасящая камера.
- 7, 8. Замыкающие и размыкающие блок-контакты.

Однополюсный контактор постоянного тока



1. Дугогасящая катушка
2. Дугогасящая камера
3. Магнитная система
4. Неподвижный контакт
5. Подвижный контакт

Принцип магнитного дугогашения



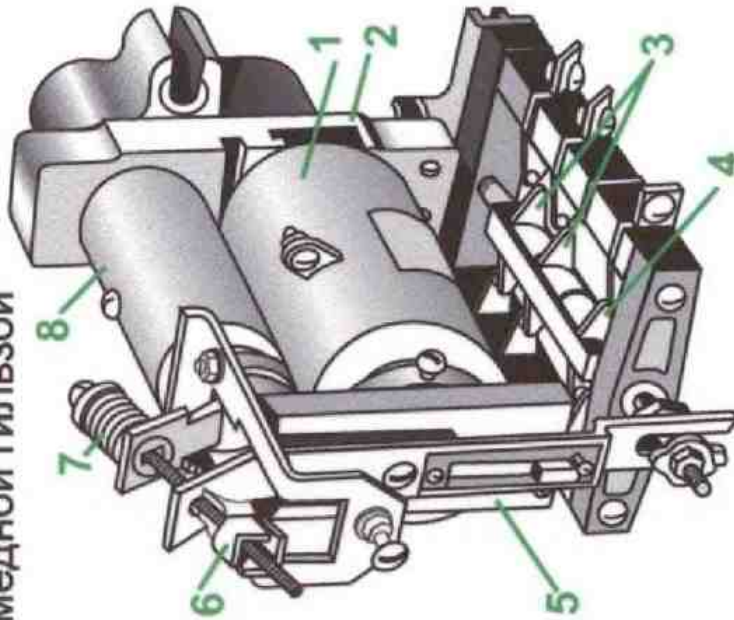
1. Дугогасящая катушка
2. Электрическая дуга
3. Дугогасящая камера
4. Массивные щеки
5. Рабочие контакты

Магнитный поток Φ замыкается по щекам 4 через промежутки между рабочими контактами

Основы электропривода

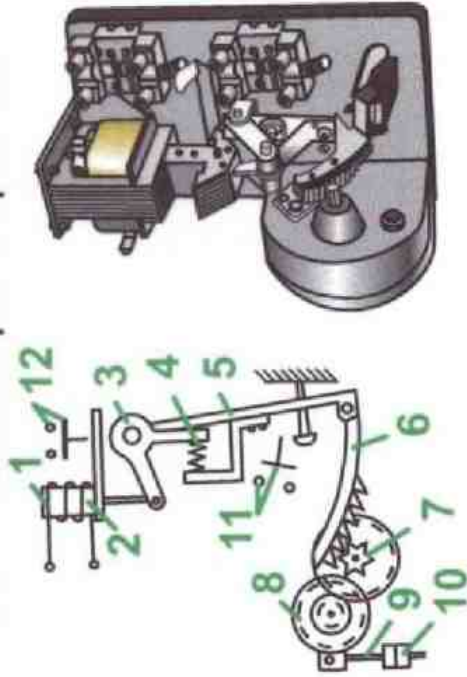
Реле времени

Электромагнитное реле времени с медной гильзой



- 1- Катушка электромагнита; 2- Неподвижный магнитопровод; 3- Замыкающие контакты; 4- Размыкающие контакты; 5- Якорь;
- 6- Регулировочный винт с гайкой; 7- Пружина;
- 8- Медная гильза.

Маятниковое реле времени

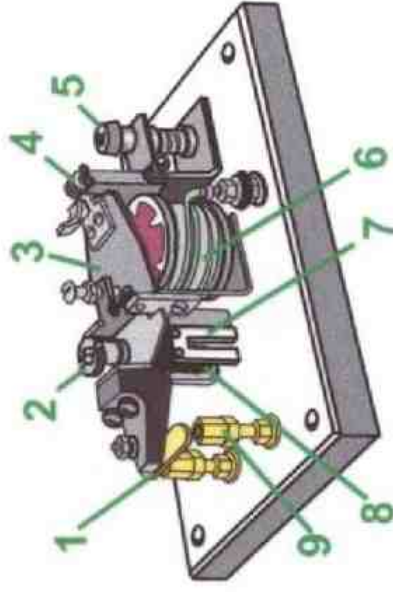


- 1- Электромагнит; 2- Якорь;
- 3 и 5- Рычаги; 4- Заводная пружина сжатия; 6- Храповой сегмент; 7- Шестерня;
- 8- Анкерная шестерня;
- 9- Маятник; 10- Груз;
- 11- Контактная система с замедлением; 12- Контактная система мгновенного действия.



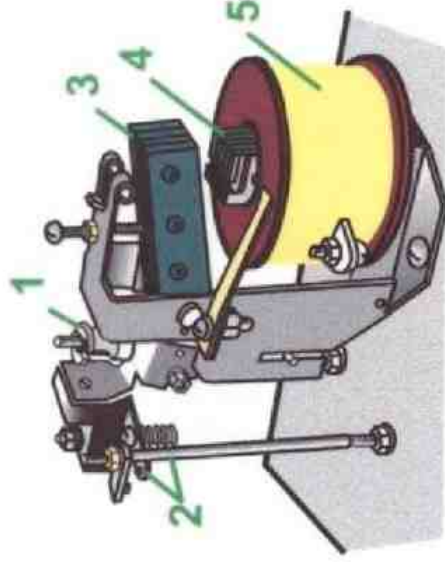
Основы электропривода
Реле тока и напряжения

Электромагнитное реле тока



1. Контактный мостик
2. Регулировочная гайка
3. Якорь
4. Ролик
5. Кнопка ручного возврата
6. Втягивающая катушка
7. Отключающая пружина
8. Шкала установки тока срабатывания
9. Неподвижный контакт

Электромагнитное реле напряжения



1. Регулировочная гайка
2. Контактная система мостикового типа
3. Якорь магнитопровода из листовой стали
4. Сердечник магнитопровода из листовой стали
5. Катушка напряжения (имеет большое число витков)



Основы электропривода

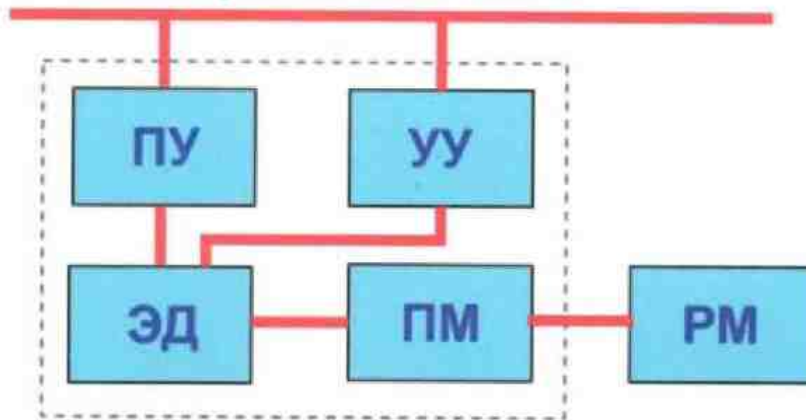
Понятие о приводе рабочей машины



привод рабочей машины
 МД - машина-двигатель;
 ПМ - передаточный механизм;
 МО - машина-орудие (рабочая машина).

Электрический привод

электрическая сеть



ПУ - преобразовательное устройство (может отсутствовать);
 РМ - рабочая машина;
 ЭД - электрический двигатель;
 УУ - управляющее устройство;
 ПМ - передаточный механизм.

электрический привод рабочей машины

Уравнение движения электропривода

$$M - M_{\text{сопр}} = J \frac{d\omega}{dt}$$

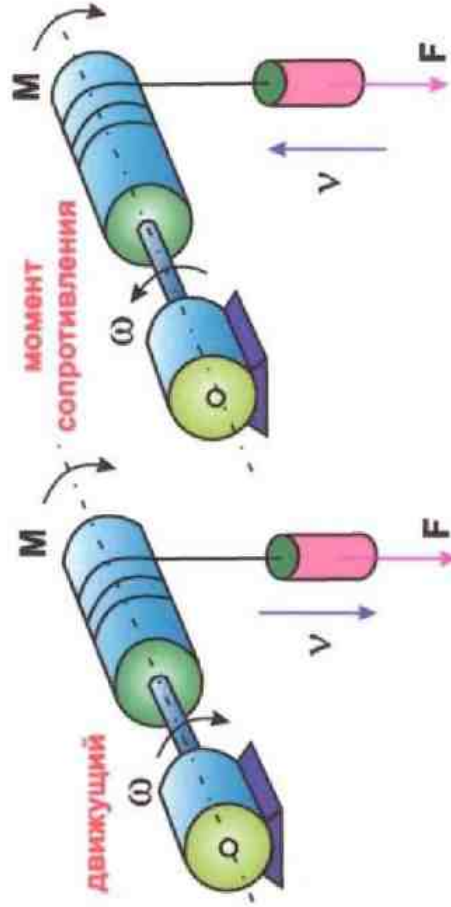
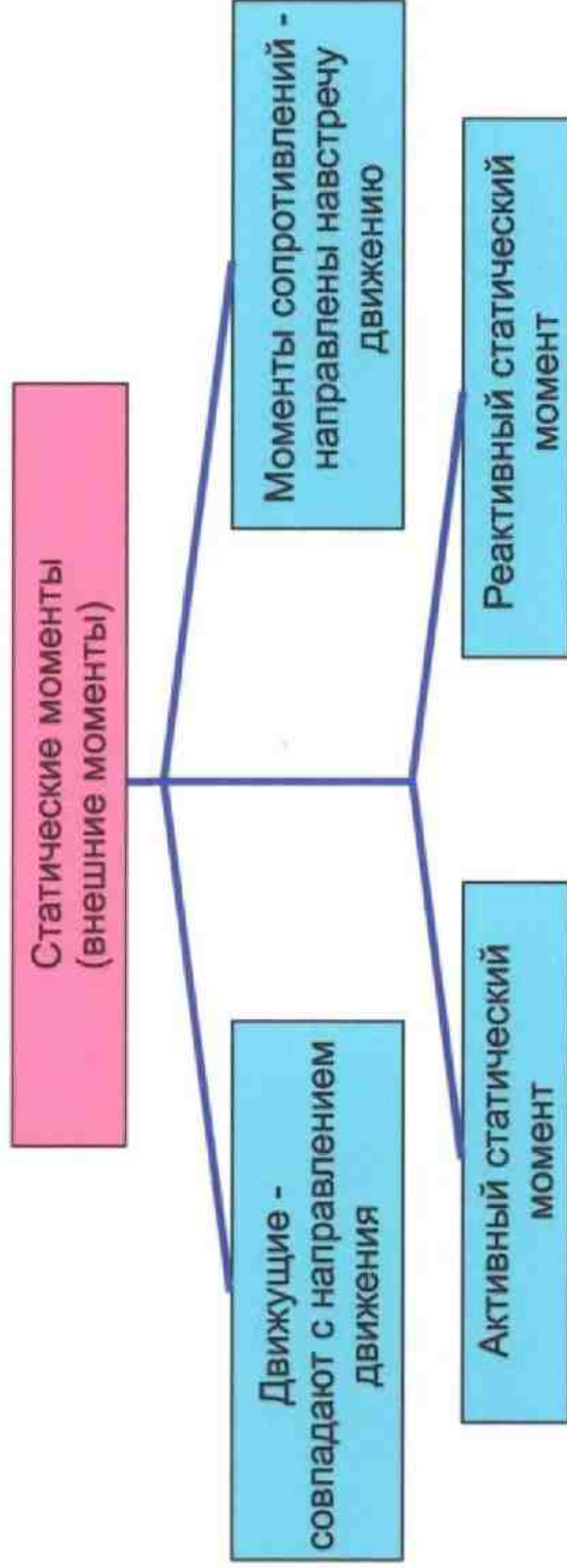
M - движущий момент привода; **M_{сопр}** - момент сопротивления;
J - момент инерции системы привода; **J $\frac{d\omega}{dt}$** - динамический момент.
 ω - угловая скорость;

Южно-Уральский Государственный университет

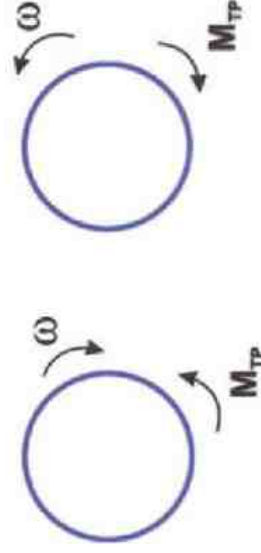
РНПО Росучприбор



Основа электропривода Моменты, действующие в приводе



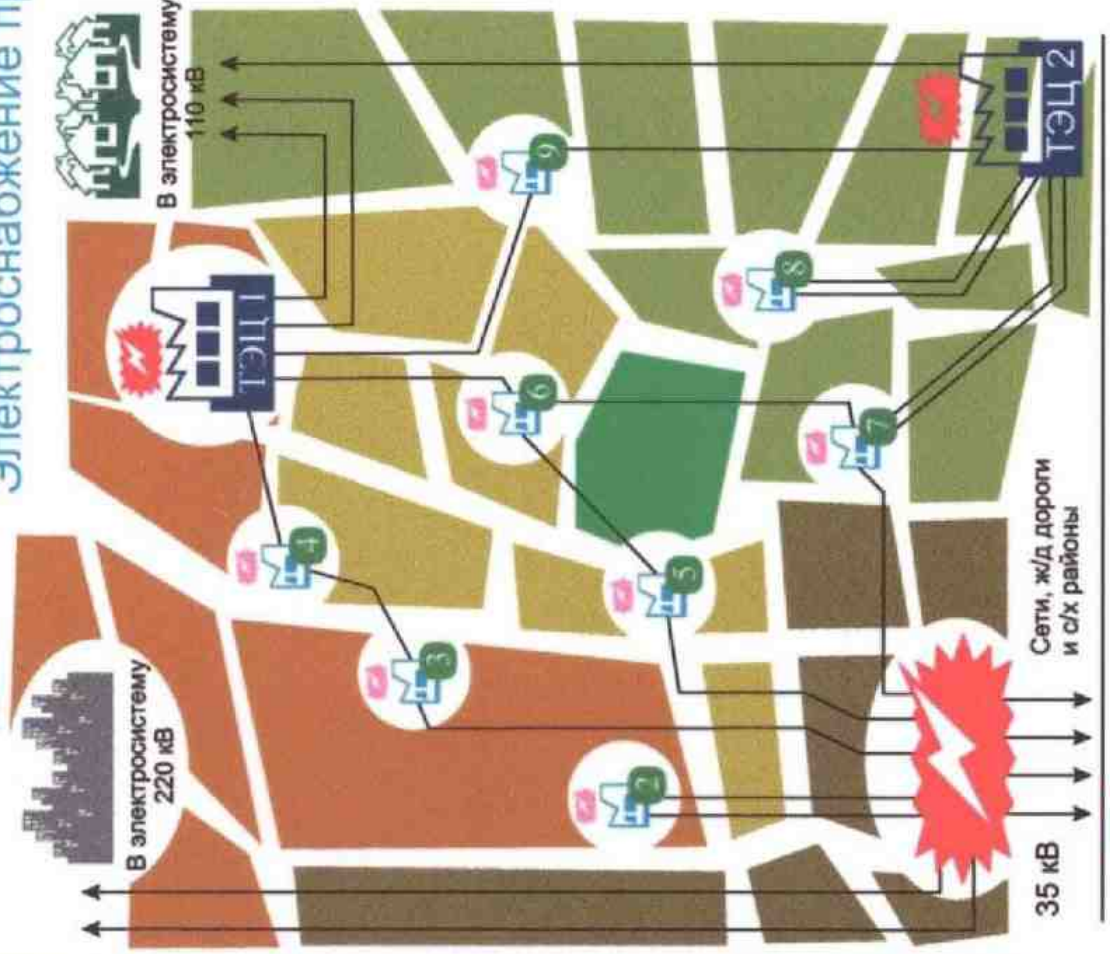
Момент потенциальной силы F (вес груза)



Момент сил трения всегда направлен против движения и, следовательно, всегда - сопротивлению.



Электроснабжение промышленного района



- Системная п/ст 220/110/35/10 кВ
- Районные и заводские п/ст 110/10 кВ, 110/6 кВ, главные районные сети 110 кВ

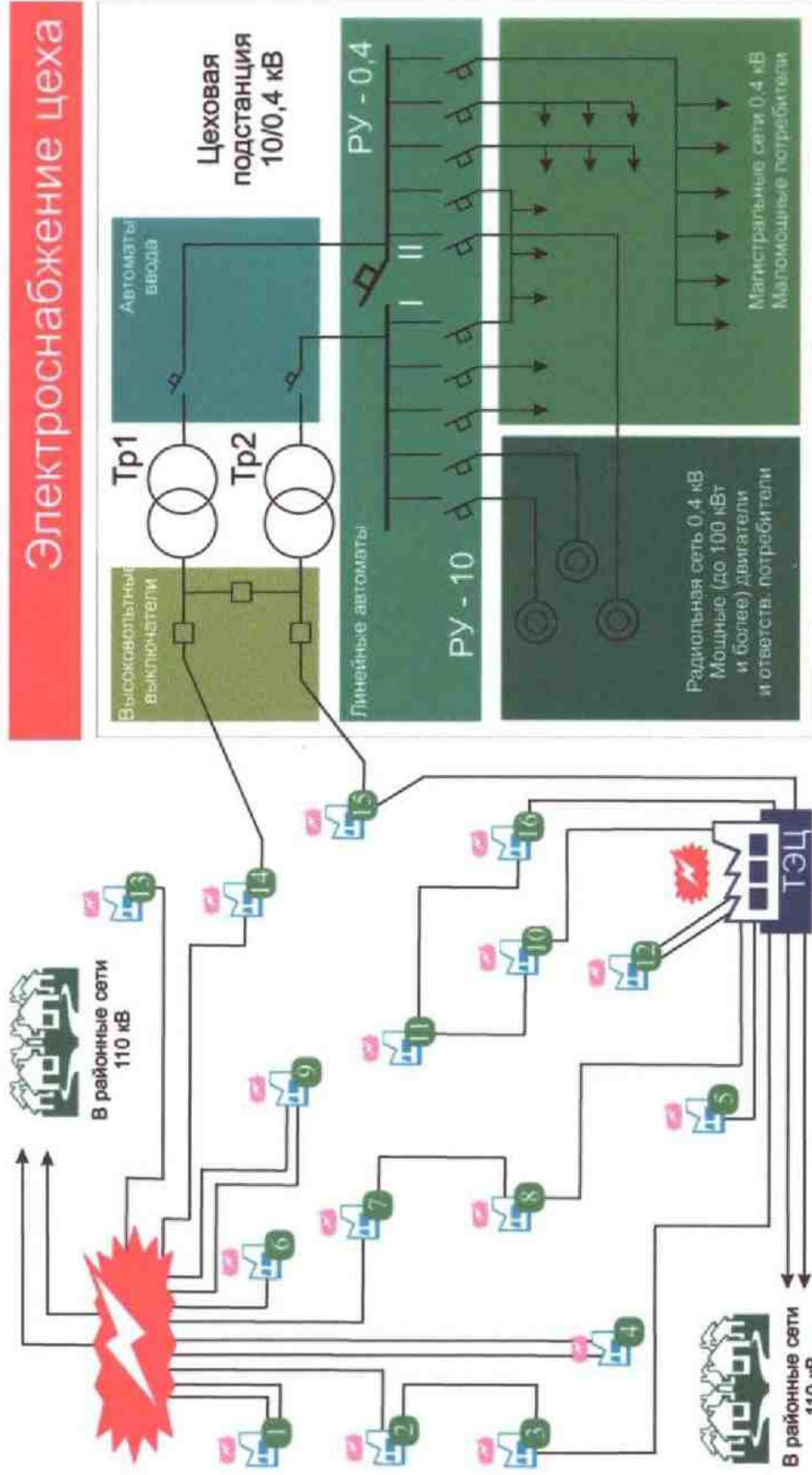
Категории потребителей по требованиям к надежности электроснабжения

1 категория	<p>Питание от 2х источников по 2 ЛЭП</p> <p style="text-align: center;">t</p> <p>Перерыв - доли секунды (время работы АВР)</p>	<p>Аэропорты, ж/д узлы, плавка металла, хим. пр-во, больницы с операционными.</p>
2 категория	<p>Питание по одной ЛЭП при наличии резерва</p> <p style="text-align: center;">S</p> <p>Перерыв - до 10-15 сек (ручное включение резерва)</p>	<p>Цеха со станочным парком, цеха холодной прокатки, жилые кварталы, зрелищные и торговые предприятия.</p>
3 категория	<p>Питание по одной ЛЭП</p> <p style="text-align: center;">C</p> <p>Перерыв - до 2 часов</p>	<p>Вспомогательные цеха, мелкие предприятия и отдельные потребители.</p>





Электроснабжение крупного предприятия



Электроснабжение цеха

- Главная понизительная подстанция 110/10 кВ

- Цеховые подстанции 10/0,4 кВ

Электрические измерения

Измерение напряжения

Низкоомные электрические цепи

Цепи постоянного тока

Магнитоэлектрические вольметры класс точности до 0,05

Цепи переменного тока

Электромагнитные и ферродинамические приборы (до 1..2кГц)

Электродинамические приборы (до 2..3кГц)

Выпрямительные приборы (до 20..30кГц)

Электростатические приборы (до 10МГц)

Термоэлектрические приборы (до 10..100МГц)

Высокоомные электрические цепи

Цепи постоянного тока

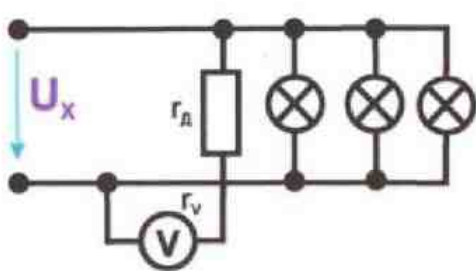
Электронные аналоговые вольметры постоянного тока (погрешность 1,5..6%)

Цифровые вольметры постоянного тока (погрешность 0,1..0,001%, диапазон измерений от долей мкВ до единиц кВ)

Цепи переменного тока

Электронные аналоговые вольметры переменного тока (от 10Гц до 1000МГц)

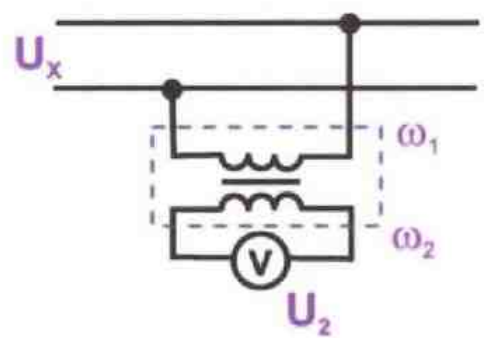
Цифровые вольметры переменного тока (погрешность 0,1..0,5%)



$r_d = r_v(n-1)$ - добавочное сопротивление из манганина

$U_x = n U_v$

U_v - показание вольметра



$U_x = K$

$K = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ - коэффициент трансформации измерительного трансформатора

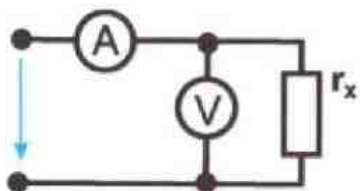
РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет



Электрические измерения

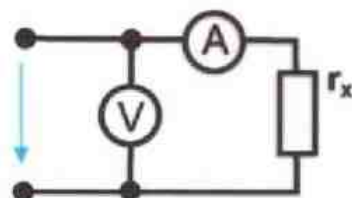
Измерение активных сопротивлений

а) методом амперметра и вольтметра



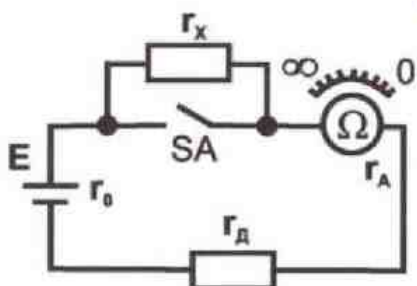
$$r_x = \frac{U}{I}$$

при измерении небольших сопротивлений ($r_x \sim 1 \text{ Ом}$)

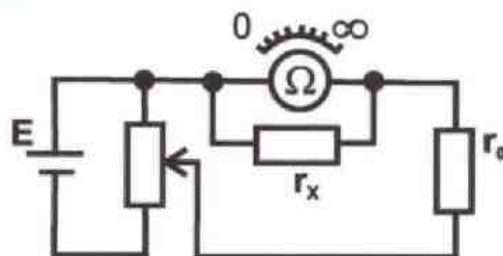


при измерении средних и больших сопротивлений ($r_x \sim 100 \text{ Ом} \dots 100 \text{ кОм}$)

б) омметром



последовательная схема ($r_x > 1 \text{ КОм}$)



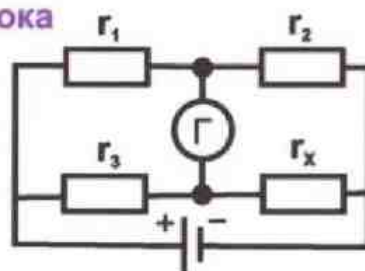
параллельная схема ($r_x < 1 \text{ КОм}$)

$$I = \frac{E}{r_x + r_0 + r_d + r_A}$$

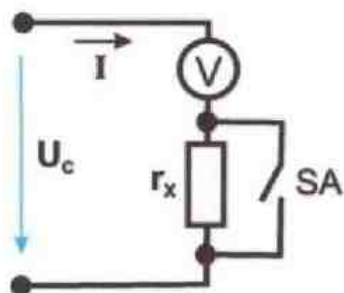
в) мостом постоянного тока

$$r_x = \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1}$$

(при равновесии моста)



г) одним вольтметром



$$I r_x = (U_v / r_v) r_x = U_c - U_v$$

$$r_x = (U_c / U_v - 1) r_v$$



Электрические измерения

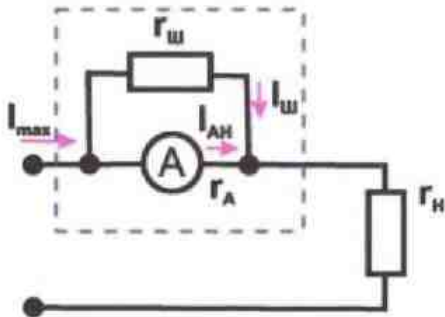
Измерения тока и мощности

Измерение тока

$$I_{max} = I_{АН} + I_{Ш} \quad \text{- первый закон Кирхгофа}$$

$I_{АН}$ - номинальное (предельное) значение тока амперметра в отсутствии шунта $r_{Ш}$

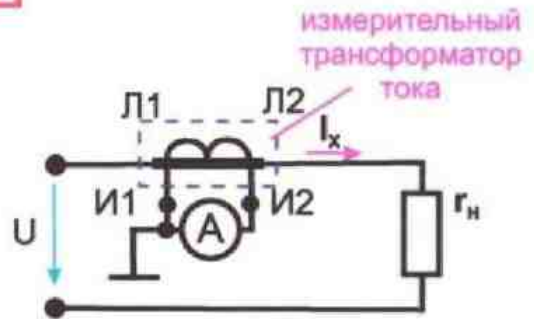
$$r_{Ш} = r_A / (n - 1) \quad \text{- сопротивление шунта}$$



$$n = \frac{I_{max}}{I_{АН}} = \frac{I_{АН} + I_{Ш}}{I_{АН}} = \frac{r_A + r_{Ш}}{r_{Ш}} \quad \text{- коэффициент шунтирования}$$

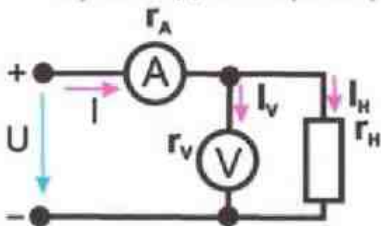
$$I_x = K_{ТТ} I_A$$

$$K_{ТТ} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad \text{- коэффициент трансформации трансформатора тока}$$



Измерение мощности

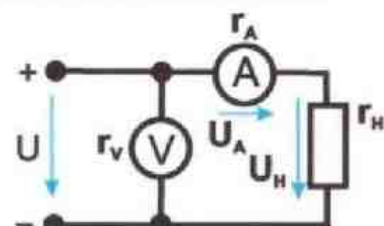
а) метод амперметра и вольтметра в цепи постоянного тока



$$P = U * I$$

при $r_Н \ll r_v$

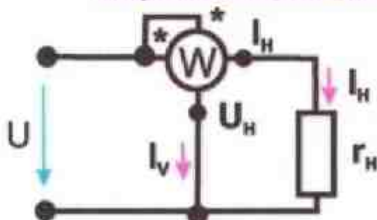
r_v - внутреннее сопротивление вольтметра



при $r_Н \gg r_v$

r_A - внутреннее сопротивление амперметра

б) электродинамическим (ферродинамическим) ваттметром в цепях постоянного и переменного тока



$U_Н$ - предел по напряжению ваттметра

$I_Н$ - предел по току ваттметра

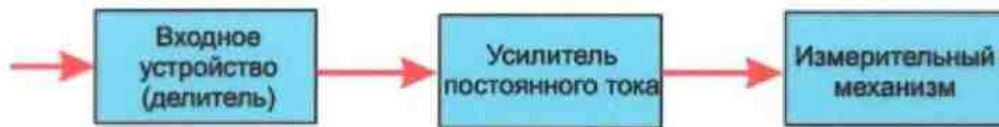
$P_Н = U_Н I_Н$ - предел измерения ваттметра по мощности

$C\omega = U_Н I_Н / n$ - цена деления ваттметра

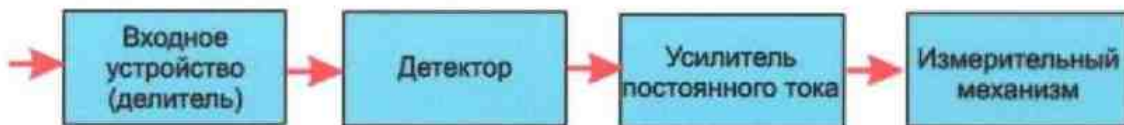


Измерения

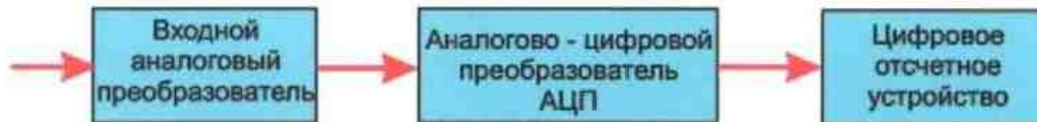
Электронный вольтметр постоянного тока



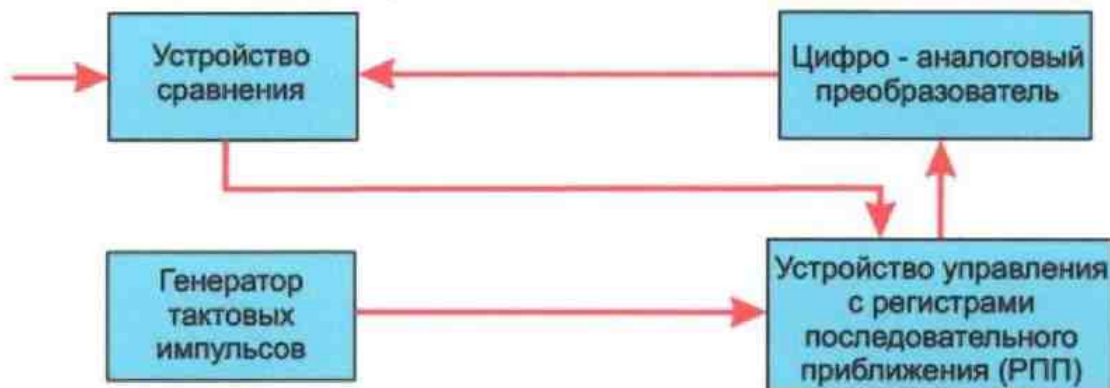
Электронный вольтметр переменного тока (10Гц...1000МГц)



Цифровой измерительный прибор



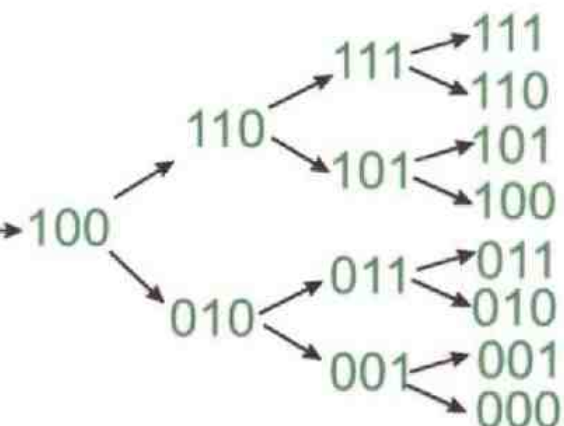
Аналогово - цифровой преобразователь последовательного приближения



Временная диаграмма работы АЦП

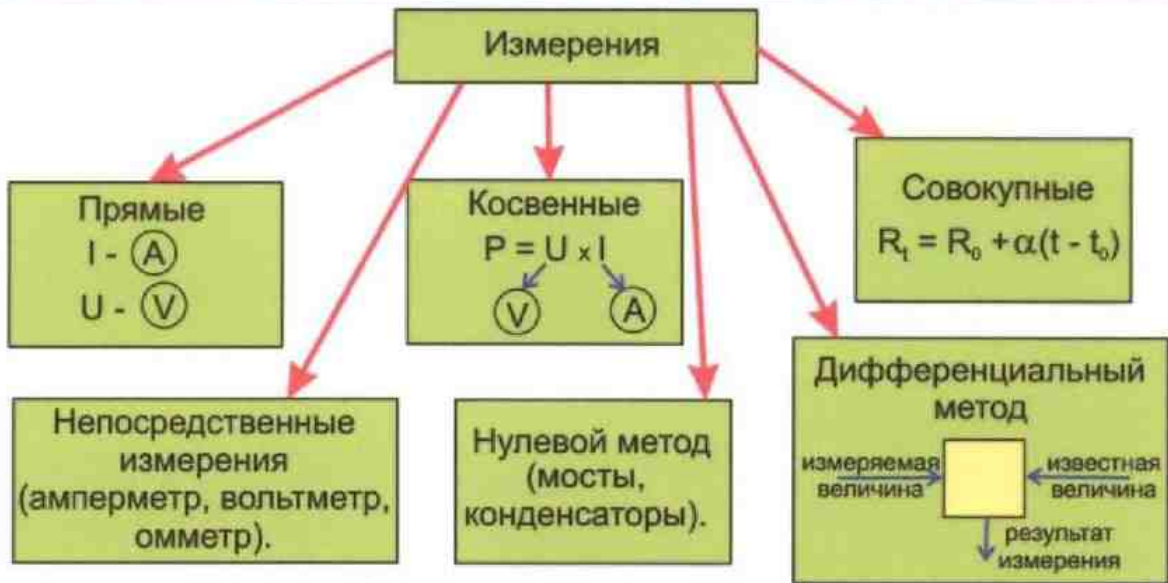


Логическая схема работы АЦП



Электрические измерения

Измерение - нахождение значения физической величины опытным путем с помощью мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, измерительных систем.



Погрешности измерений

$$\Delta A = A_{изм} - A$$

ΔA - абсолютная погрешность
 $A_{изм}$ - измеренное значение физической величины
 A - действительное (истинное) значение величины

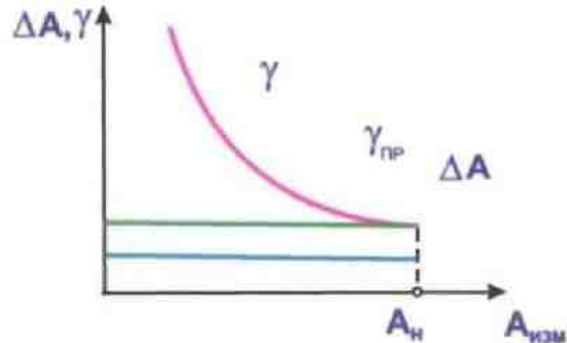
$\Delta P = - \Delta A$ - поправка

$$A = A_{изм} + \Delta P$$

$\gamma = \frac{\Delta A}{A} 100\% = \frac{A_{изм} - A}{A} 100\%$ - относительная погрешность

$\gamma_{пр} = \frac{\Delta A}{A_{изм}} 100\%$ - приведенная погрешность

A_n - нормирующее значение (предел измерения, диапазон измерений, длина шкалы)



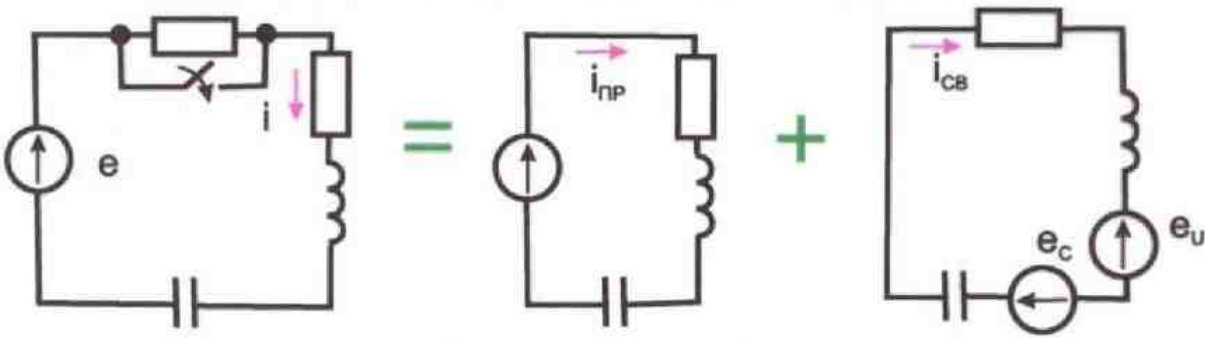
Класс точности - допускаемая (максимальная) основная приведенная погрешность электроизмерительного прибора.
 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1; 1.5; 2.5; 4

РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет



Электрические измерения

Переходные процессы происходят при изменении режима в электрической цепи



i - переходный ток $i_{пр}$ - принужденный (установившийся) ток $i_{св}$ - свободный ток

$$i = i_{пр} + i_{св}$$

Изменение энергии, накопленной в магнитном поле катушки $W_L = \frac{1}{2}Li^2$ и электрическом поле конденсатора $W_C = \frac{1}{2}CU^2$ не может происходить скачком

$$I_L(0_-) = I_L(0_+)$$

Ток в ветви с индуктивностью не может изменяться скачком

$$U_C(0_-) = U_C(0_+)$$

Напряжение на емкости не может изменяться скачком

$$L \frac{di}{dt} + ri + \frac{1}{C} \int idt = e \rightarrow L \frac{d^2i}{dt^2} + r \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{de}{dt}$$

Электрическое состояние цепи после коммутации описывается дифференциальным уравнением

$$i_{св}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$$

- свободный ток (решение однородного дифференциального уравнения)

Южно-Уральский Государственный университет

РНПО Росучприбор



Измерения

Структурная схема аналогового электроизмерительного прибора



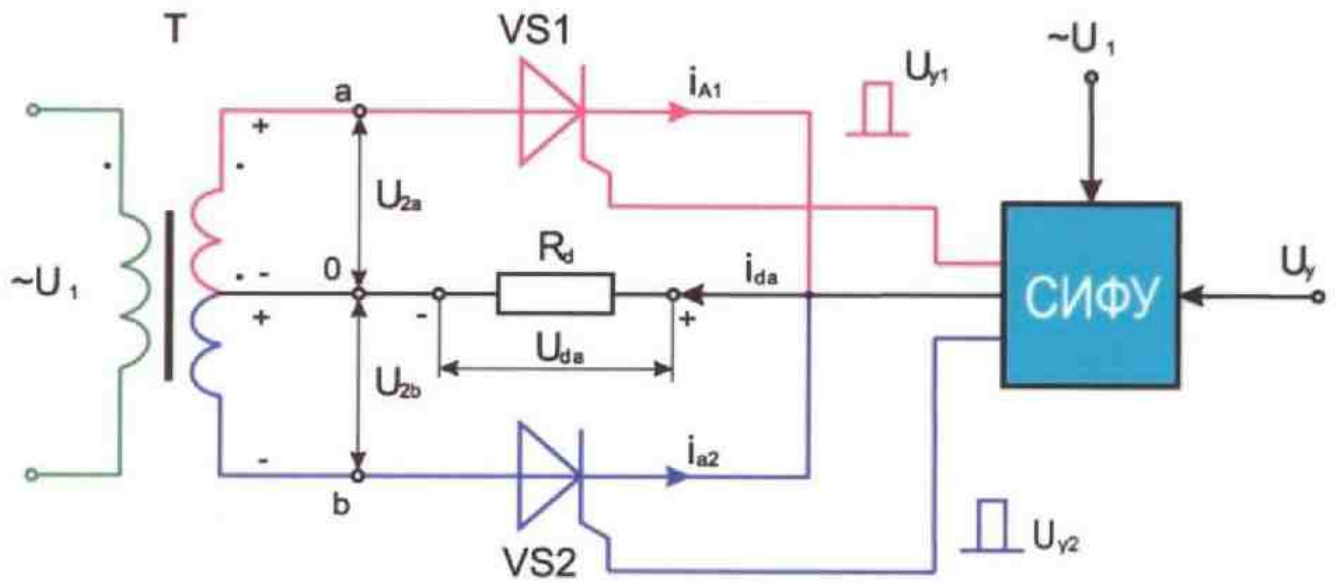
Условное обозначение	Значение условного обозначения	Условное обозначение	Значение условного обозначения
	Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой и механическим противодействующим моментом		Магнитоэлектрический прибор с электронным преобразователем в измерительной цепи (электронный прибор)
	Магнитоэлектрический логометр с подвижной рамкой		Электростатический прибор
	Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом и механическим противодействующим моментом		Прибор для работы в цепях постоянного тока
	Магнитоэлектрический логометр с подвижным магнитом		переменного тока
	Электромагнитный прибор с механическим противодействующим моментом		постоянного и переменного тока
	Электромагнитный логометр		трехфазного переменного тока
	Электродинамический прибор с механическим противодействующим моментом без экрана		Рабочее положение прибора горизонтальное
	Электродинамический логометр без экрана		вертикальное
	Ферродинамический прибор с механическим противодействующим моментом		под углом 60°
	Индукционный прибор с механическим противодействующим моментом	A и V	Наименование прибора Амперметр и Вольтметр
	Магнитоэлектрический прибор с выпрямителем (выпрямительный прибор)	VA и W	Вольтамперметр и Ваттметр
		mA MA	Миллиамперметр и микроамперметр
		W	Омметр
		Wh	Счетчик Ватт - часов
		0,05;0,1;0,2; 0,5;1,0;1,5; 2,5;4,0	Класс точности
			Защита от внешних магнитных полей 3 мТл
			Защита от внешних электрических полей 10 кВ/м
			Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 3 кВ

РНПО Росучпрбор Южно-Уральский Государственный университет

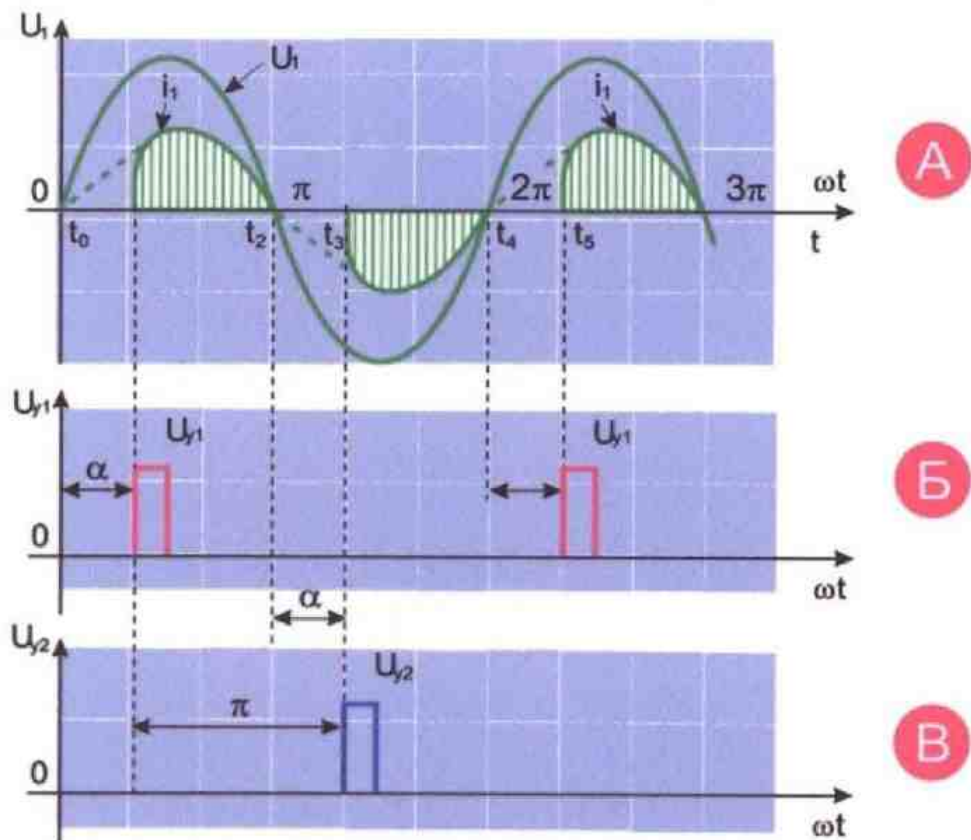


Однофазный управляемый выпрямитель со средней точкой

1. Схема включения элементов

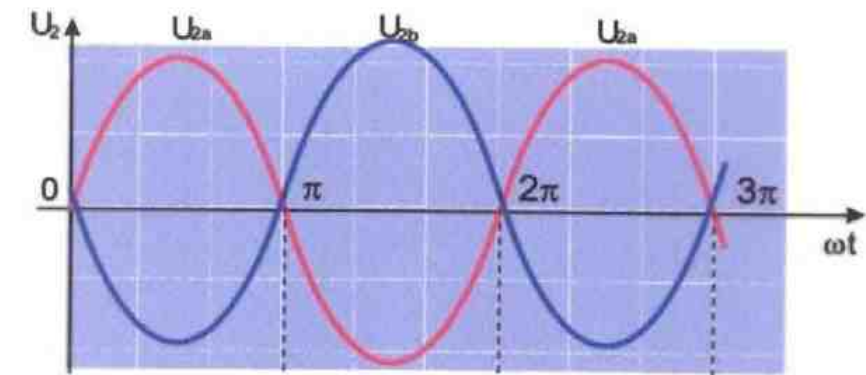


2. Временные диаграммы напряжений и токов

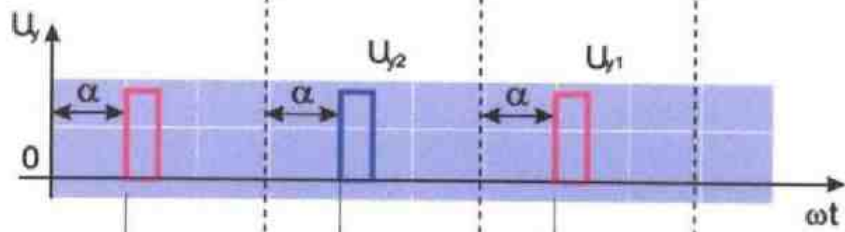


Однофазный управляемый выпрямитель со средней точкой:

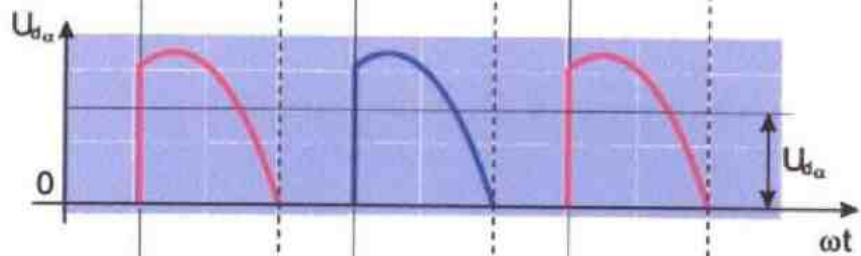
Временные диаграммы напряжений и токов



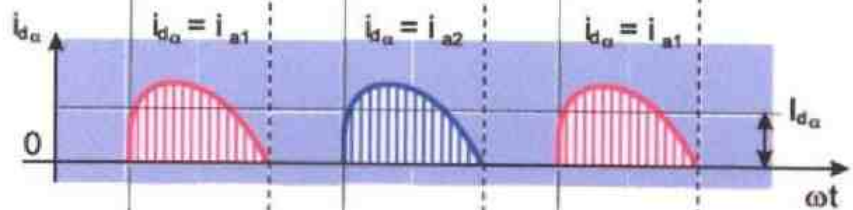
А



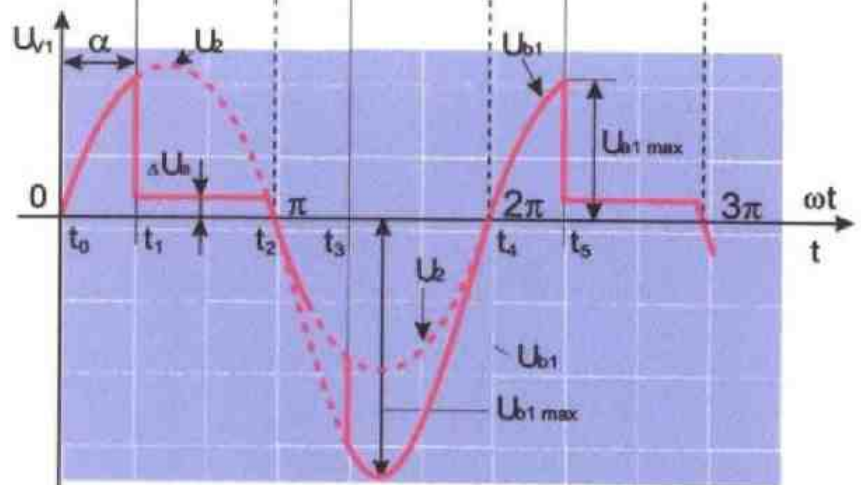
Б



В



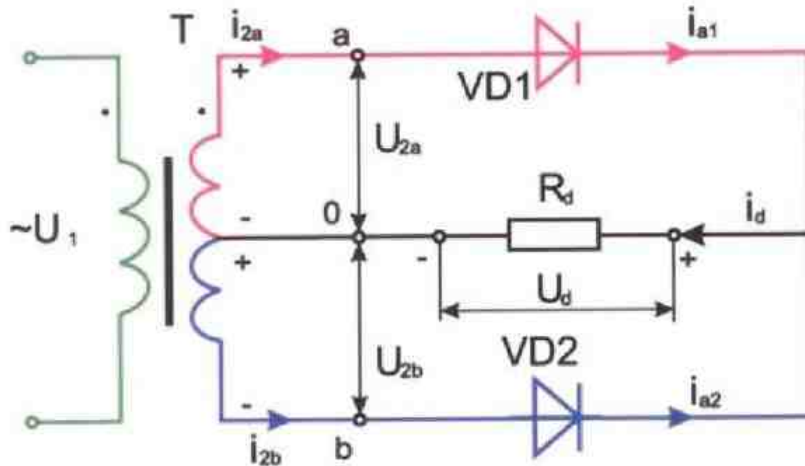
Г



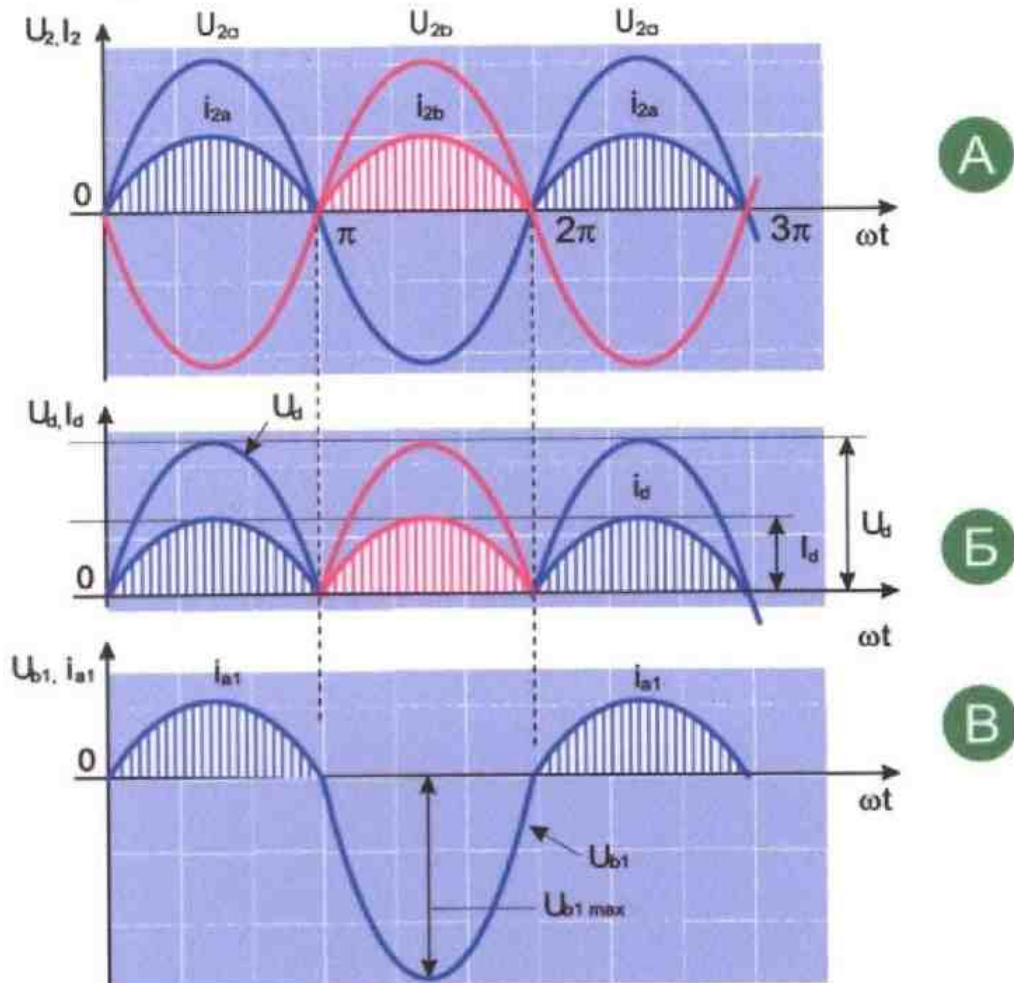
Д

Однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

1. Схема включения

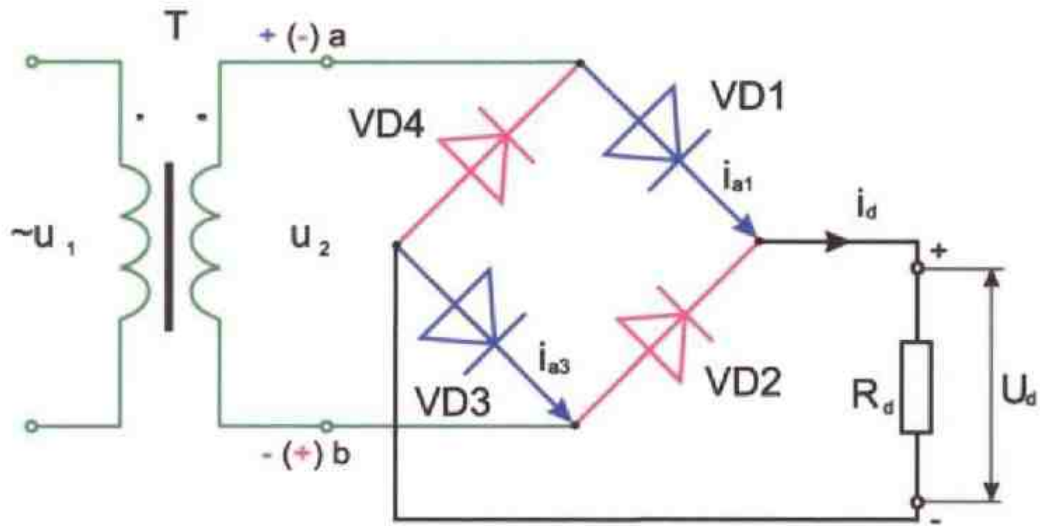


2. Временные диаграммы напряжений и токов

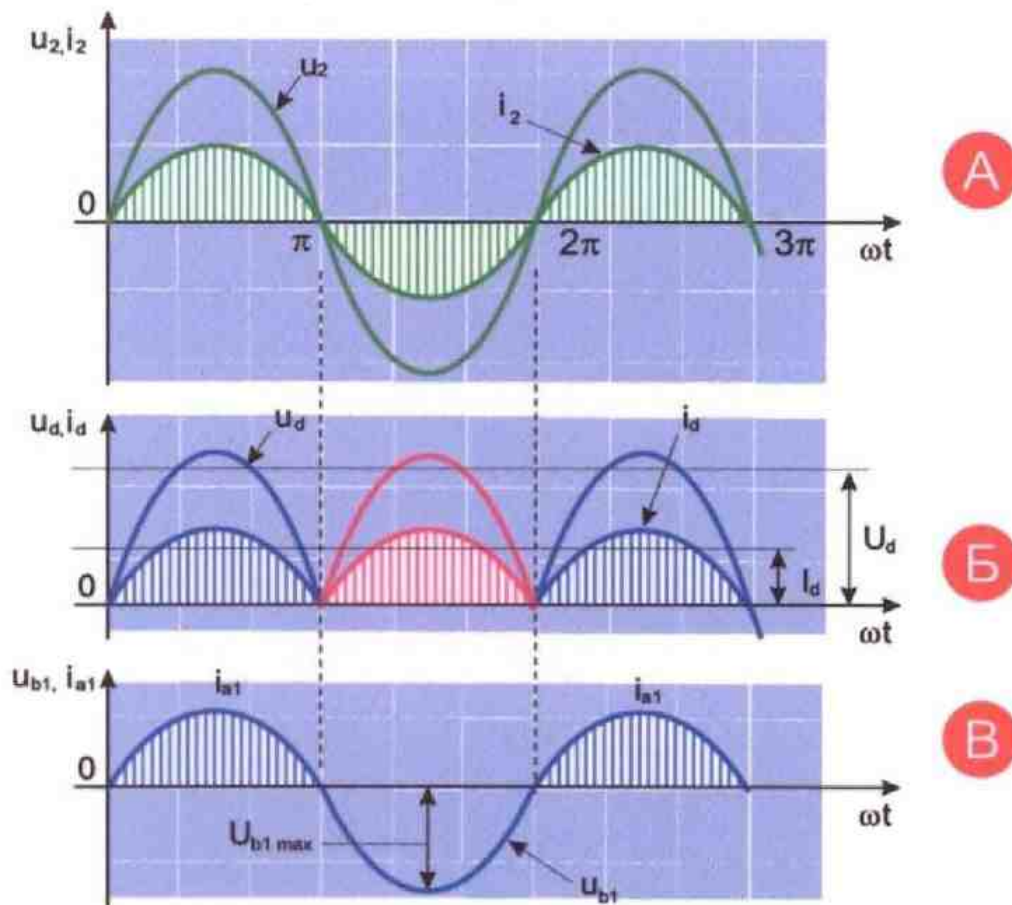


Однофазный мостовой выпрямитель

1. Схема включения



2. Временные диаграммы напряжений и токов



Трёхфазный выпрямитель со средней точкой

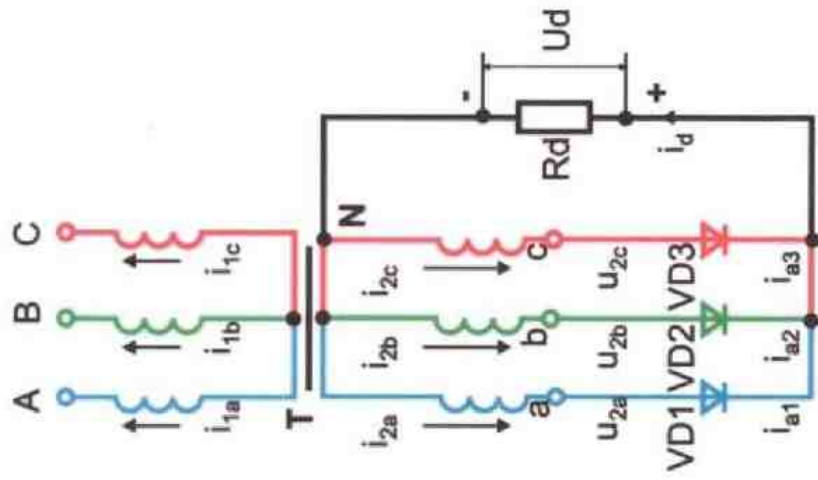
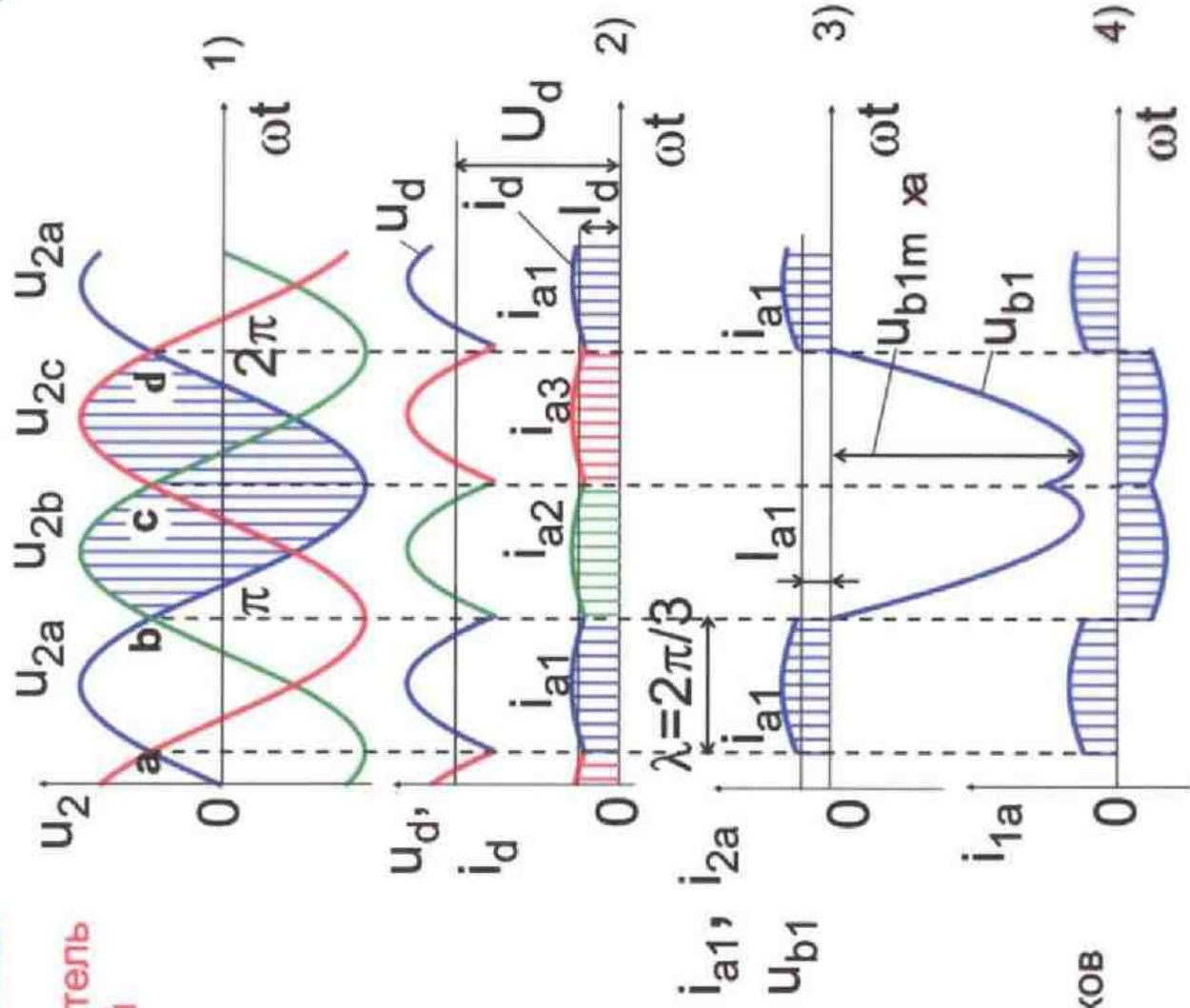


Схема включения и временные диаграммы токов и напряжений



Основы промышленной электроники

Трёхфазный управляемый выпрямитель со средней точкой

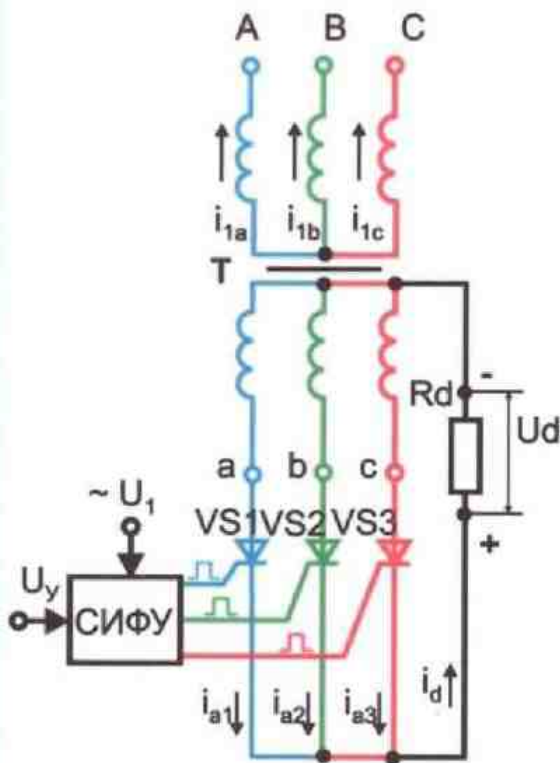


Схема включения

СИФУ - система импульсно-фазового управления

α - угол управления

При $30^\circ \geq \alpha \geq 0$

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{da} = U_{d0} \cos \alpha$$

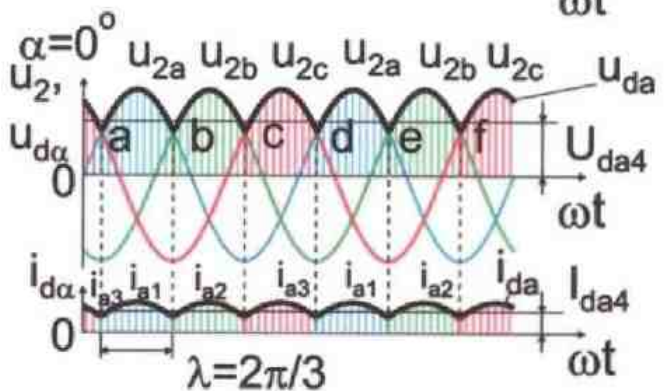
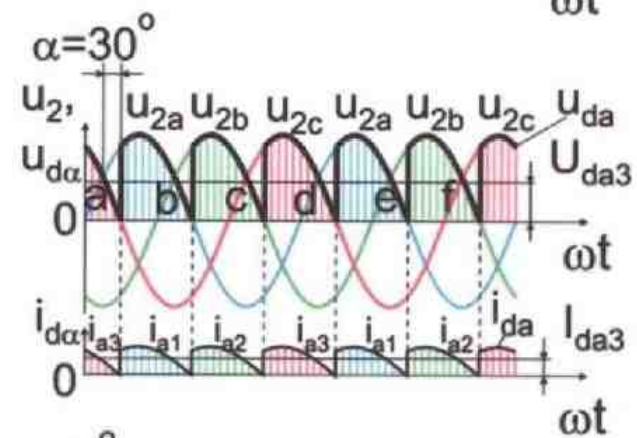
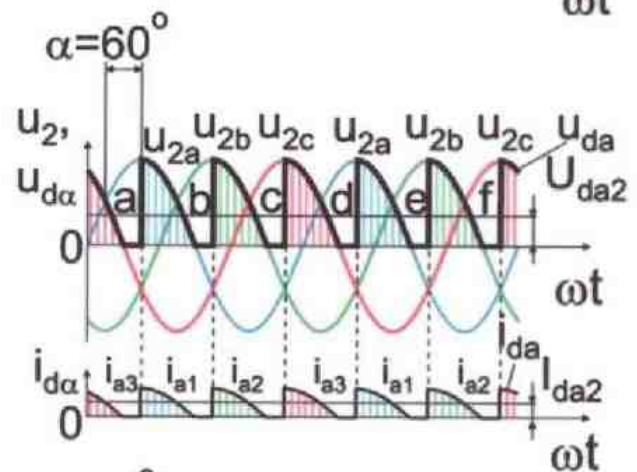
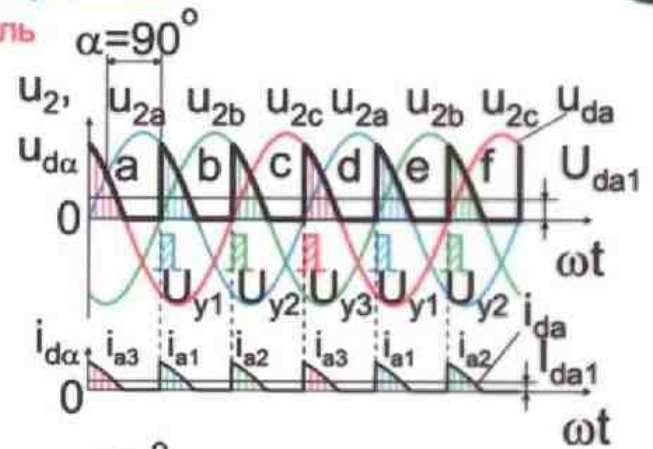
При $\alpha \geq 30^\circ$

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{da} = \sqrt{3}/3 U_{d0} [1 + \cos(\alpha + 30^\circ)]$$

$$U_{d0} = 1.77 U_2$$

U_2 действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки напряжения

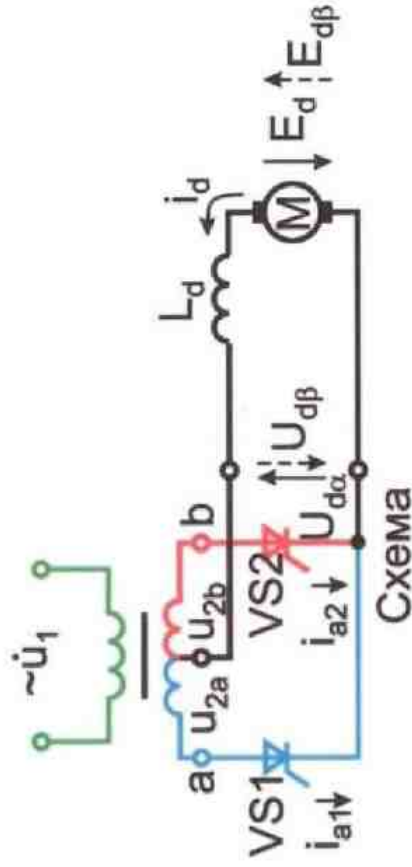


Временные диаграммы напряжений и токов



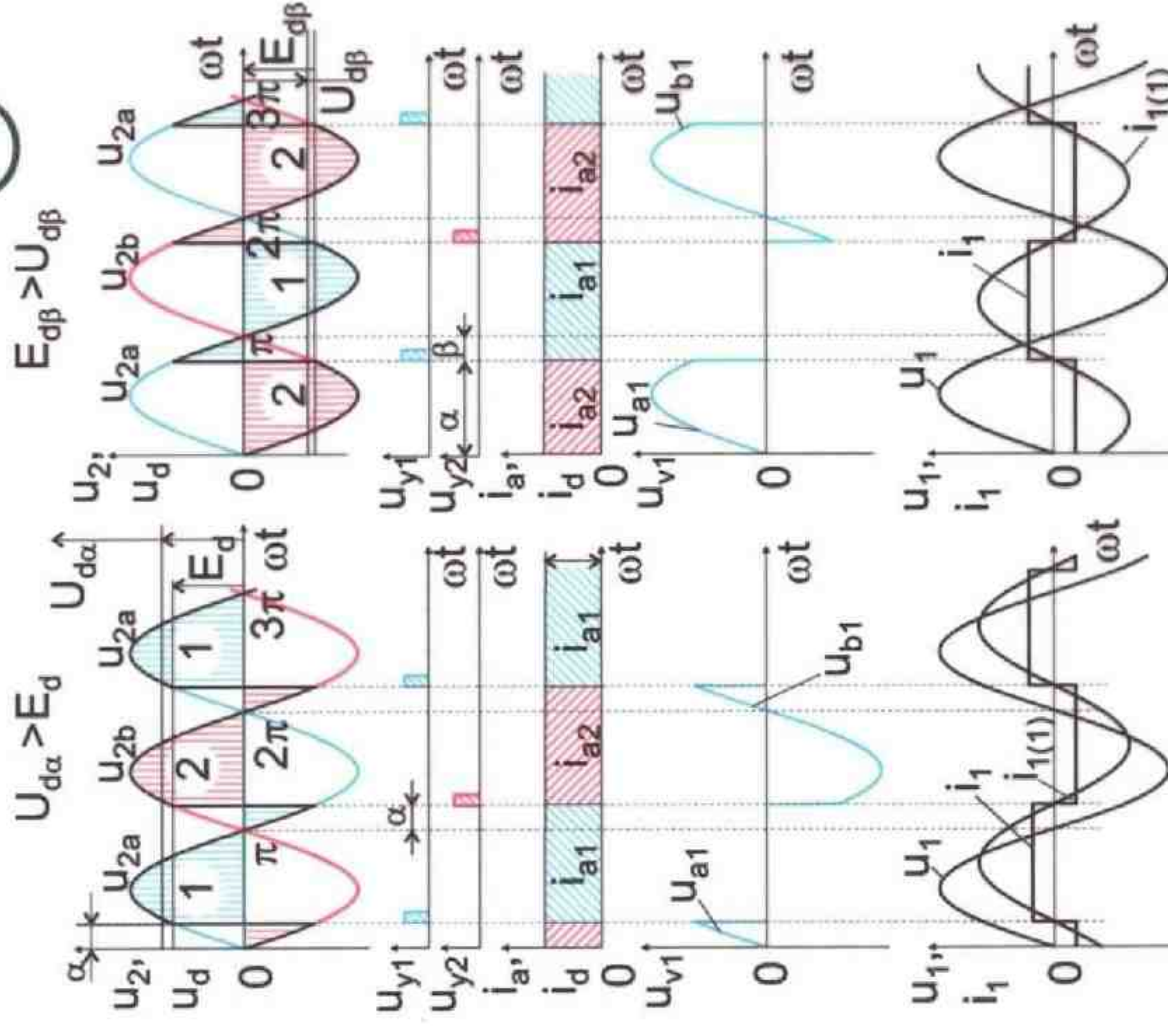
Основы промышленной электроники

Инвертор, ведомый сетью



Инвертор, ведомый сетью передаёт энергию из сети постоянного тока в сеть переменного тока, напряжение и частота в которой заданы другими, более мощными источниками переменного тока. Ведомые инверторы выполняют по тем же самым схемам, что и управляемые выпрямители. Для перевода управляемого преобразователя из режима выпрямления в режим инвертирования необходимо:

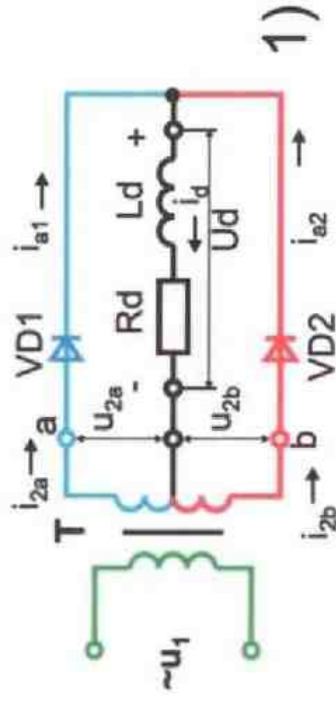
- 1) подключить источник постоянного тока с полярностью, обратной режиму выпрямления;
- 2) обеспечить протекание тока через тиристоры преимущественно при отрицательной полярности вторичных напряжений u_2 , проводя их отпирание с углом опережения $b = \pi + \alpha$. Запирание тиристоров осуществляется под действием обратного напряжения вторичных обмоток трансформатора.



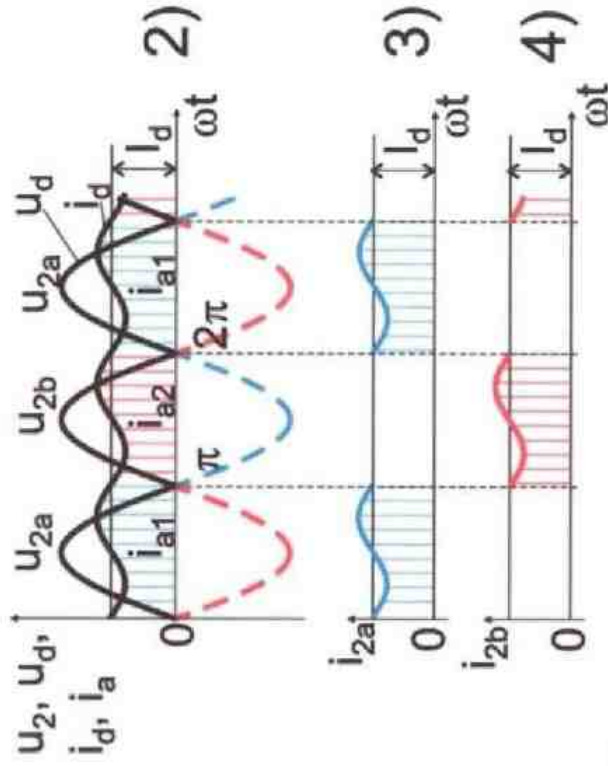
Временные диаграммы режима выпрямления

Временные диаграммы режима инвертирования

Работа выпрямителя на нагрузку различного характера



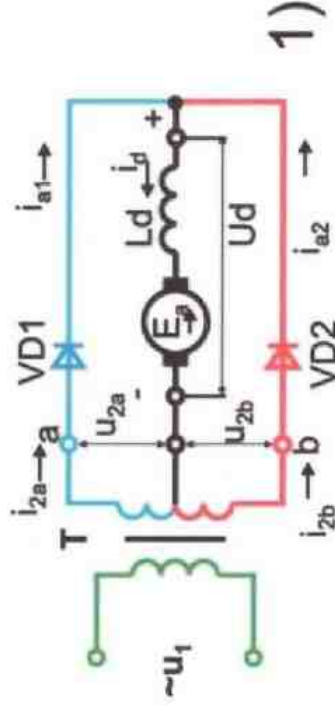
1)



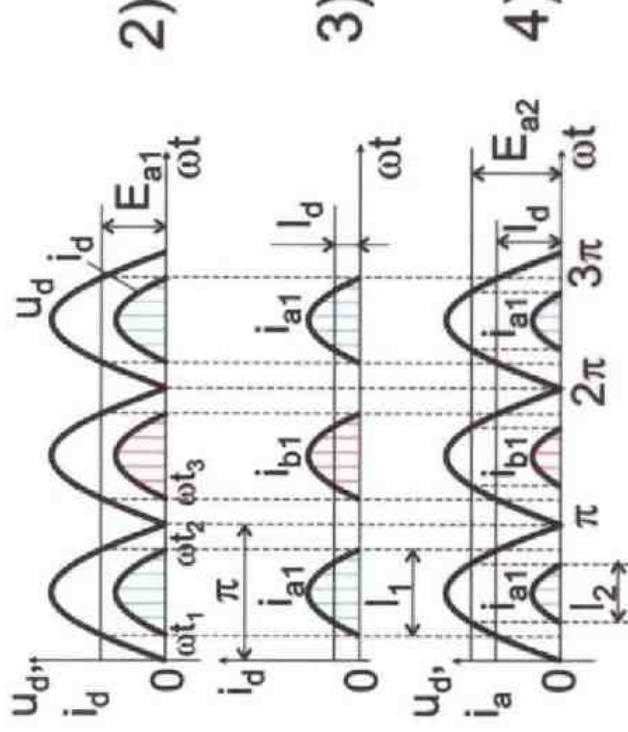
Двухполупериодное выпрямление при активно-индуктивной нагрузке

1) - схема включения

2)-4) - временные диаграммы напряжений и токов



1)



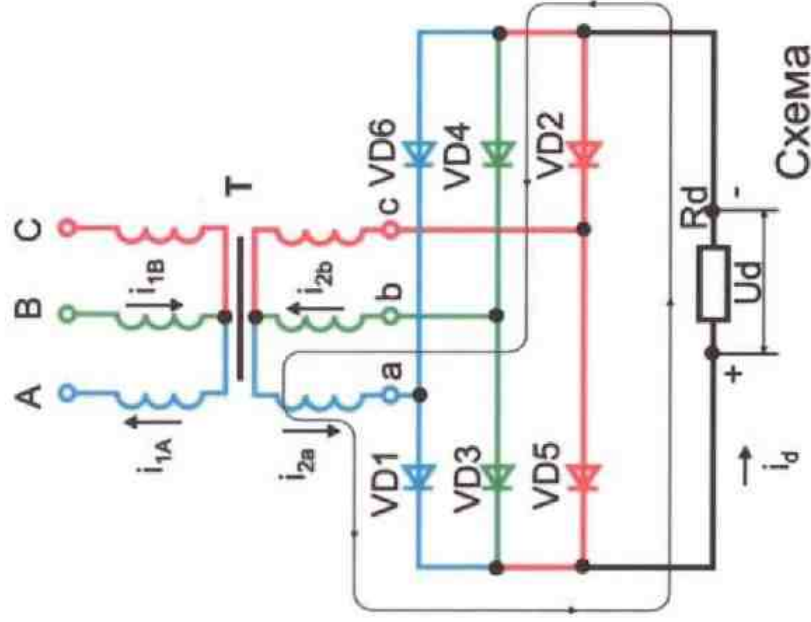
Работа однофазного выпрямителя на противо-ЭДС

1) - схема включения

2)-4) - временные диаграммы напряжений и токов



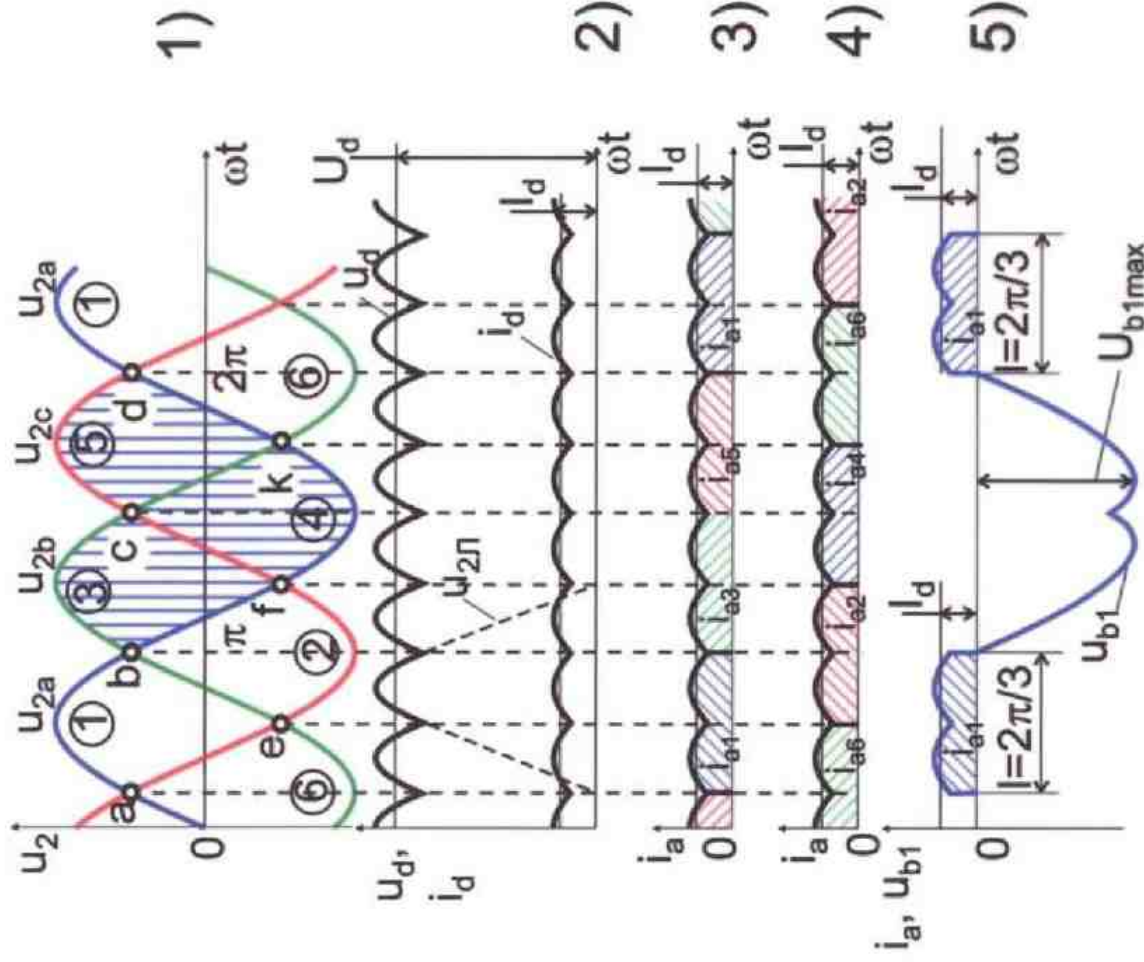
**Трёхфазная мостовая
схема выпрямления**



Схема

VD1 } катодная
VD3 } группа
VD5 }

VD2 } анодная
VD4 } группа
VD6 }



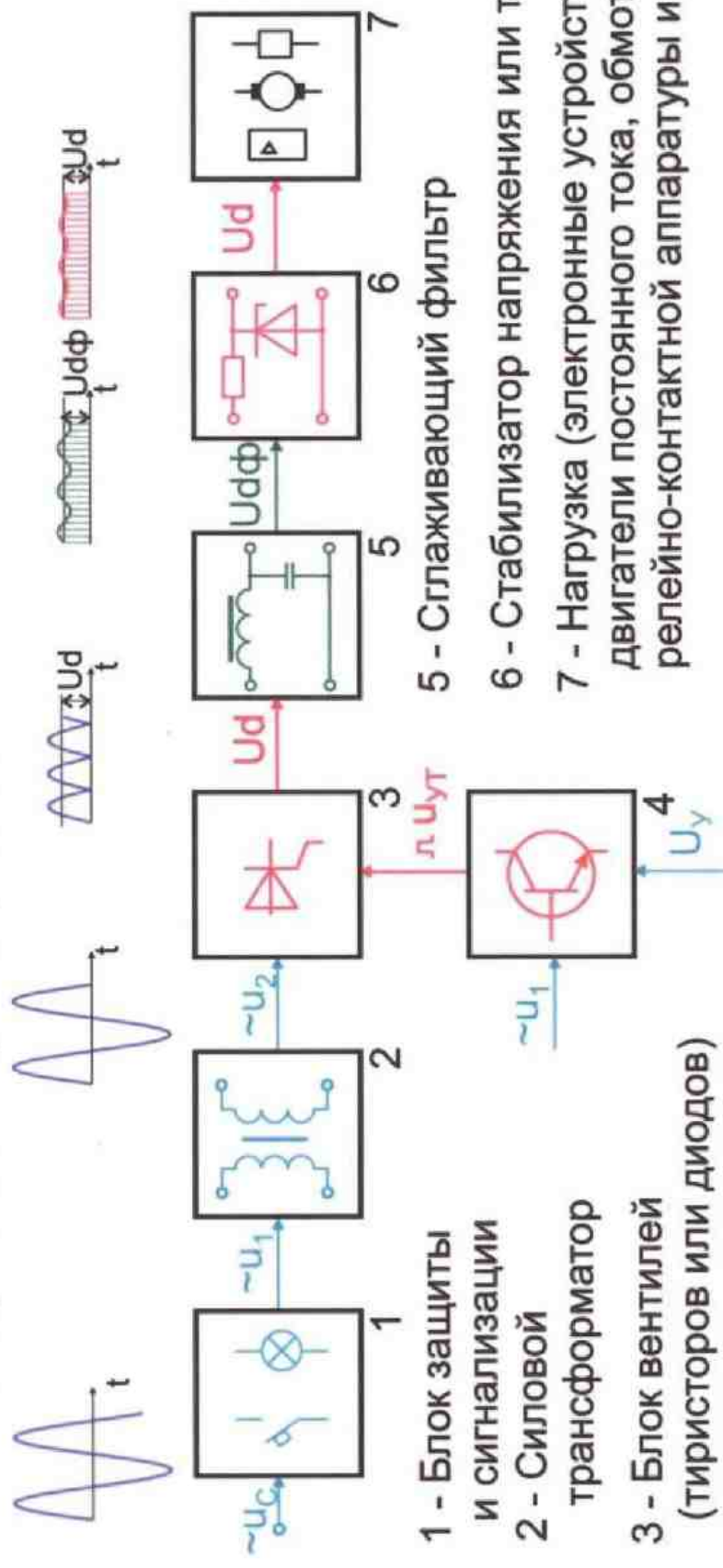
Временные диаграммы напряжений и токов





Выпрямители

Выпрямитель - статическое устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока в постоянный



5 - Сглаживающий фильтр

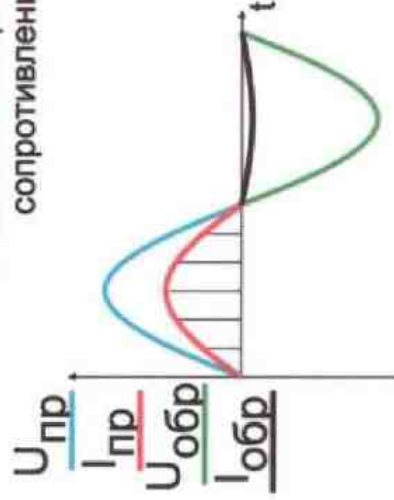
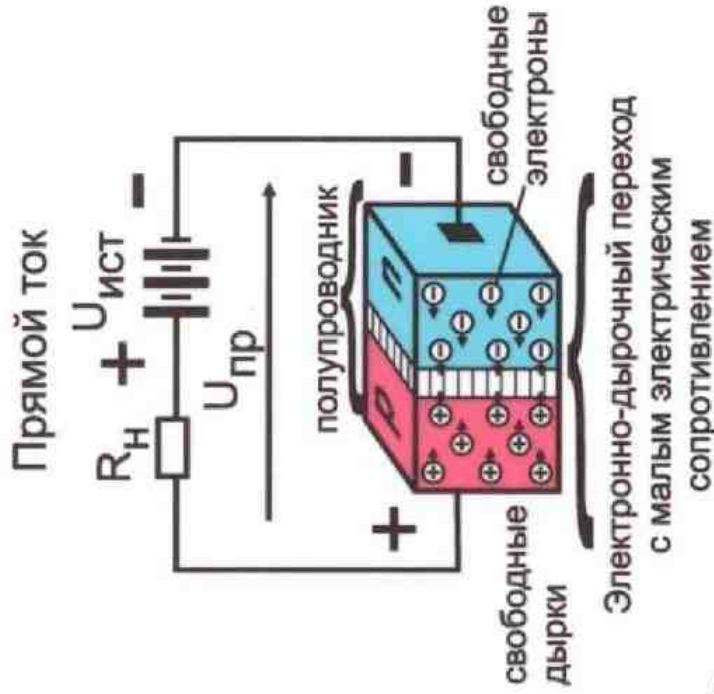
6 - Стабилизатор напряжения или тока

7 - Нагрузка (электронные устройства, двигатели постоянного тока, обмотки релейно-контактной аппаратуры и т. д.)

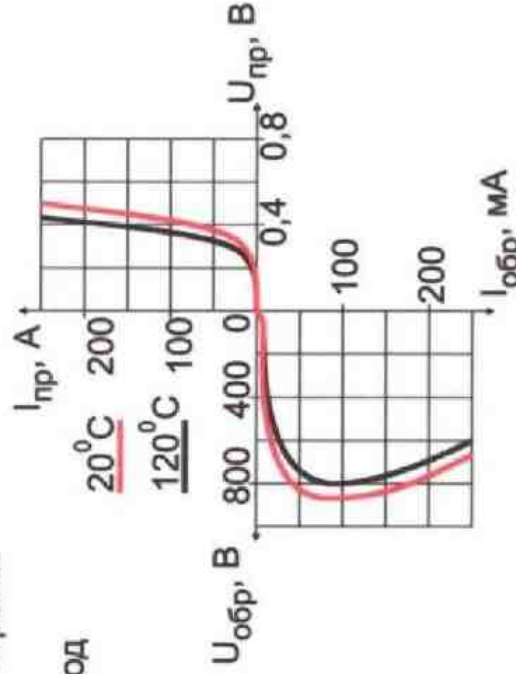
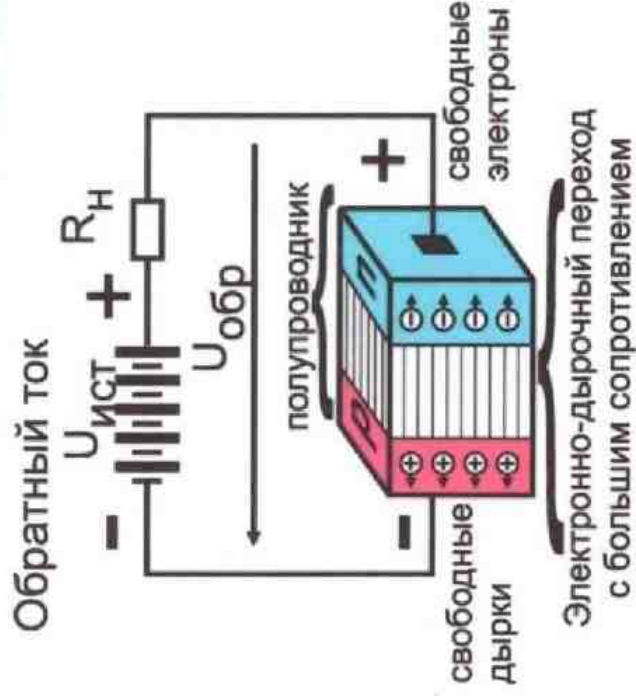
Структурная схема выпрямителя

4 - Система управления тиристорами (система импульсно-фазового управления, СИФУ)

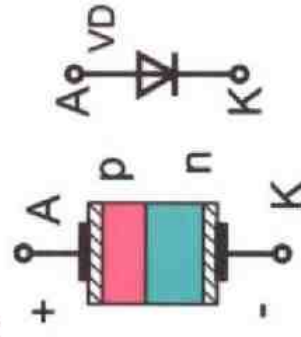
Основы промышленной электроники
Полупроводниковые диоды



Кривая выпрямленного тока



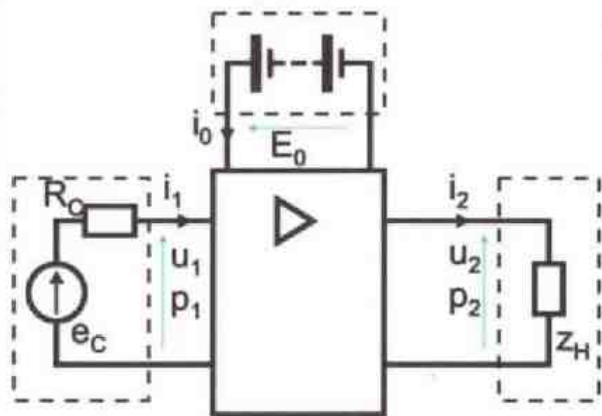
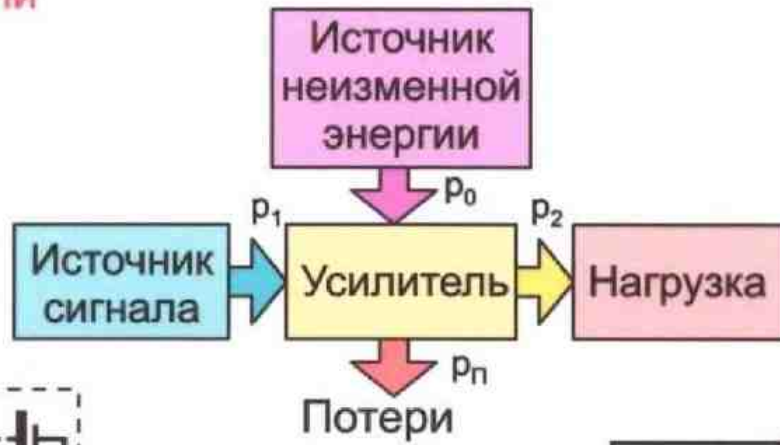
Статические вольт-амперные характеристики диода при различных температурах р-п перехода



Схематическое устройство диода и его обозначение



Основы промышленной электроники
Усилители



Структурная и функциональная схемы усилителя

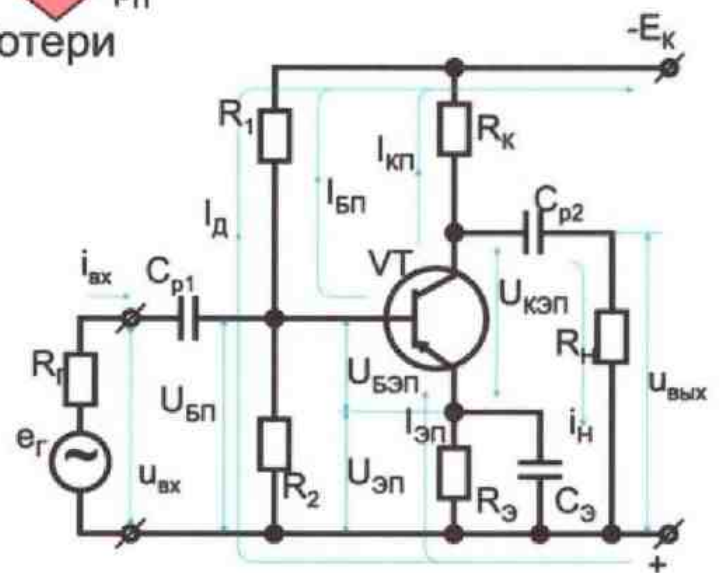


Схема усилительного каскада ОЭ

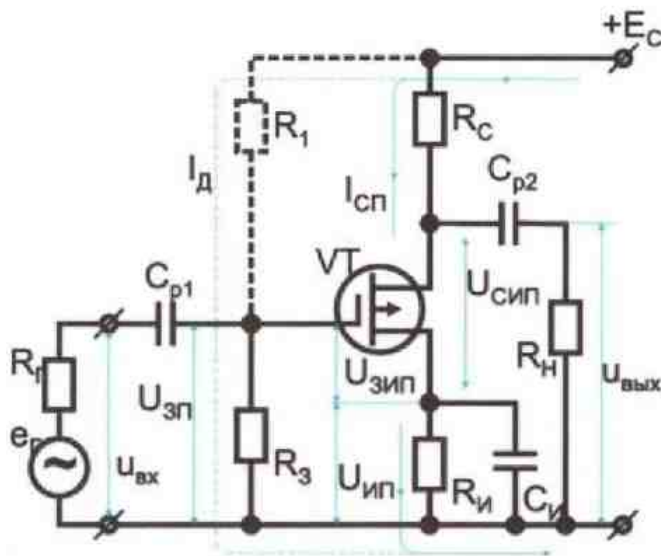


Схема усилительного каскада ОИ

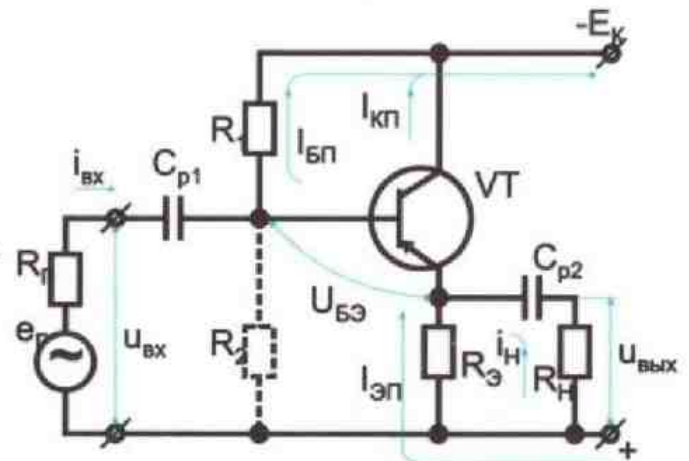


Схема усилительного каскада ОК

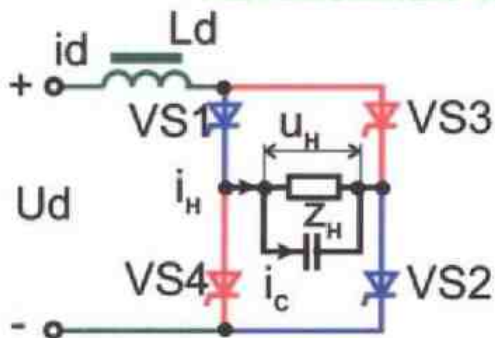


Основы промышленной электроники

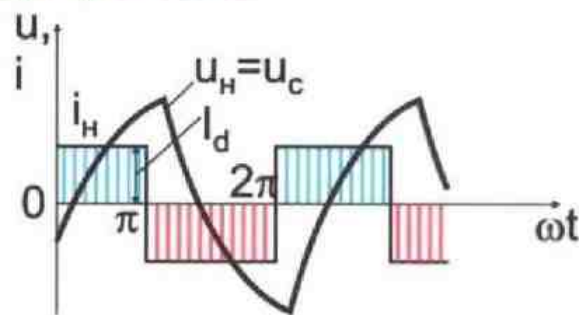
Автономные инверторы

Автономные инверторы осуществляют преобразование постоянного тока в переменный с неизменной или регулируемой частотой и работой на автономную нагрузку.

Автономные инверторы тока

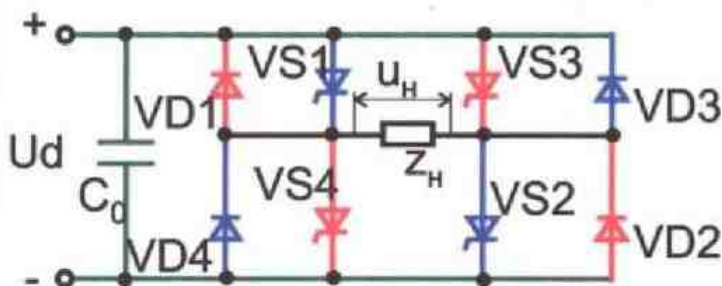


Однофазная мостовая схема инвертора тока

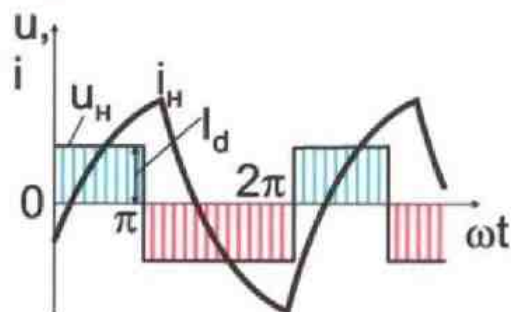


Временные диаграммы тока и напряжения на выходе инвертора

Автономные инверторы напряжения



Однофазная мостовая схема инвертора напряжения



Временные диаграммы тока и напряжения на выходе инвертора

Автономные резонансные инверторы

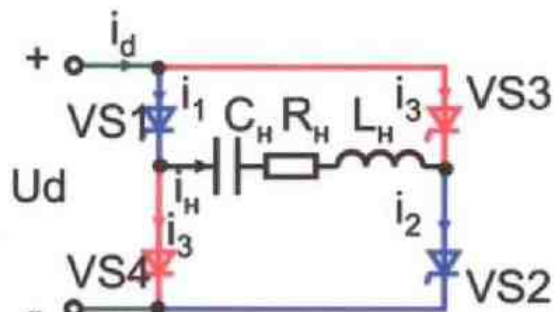
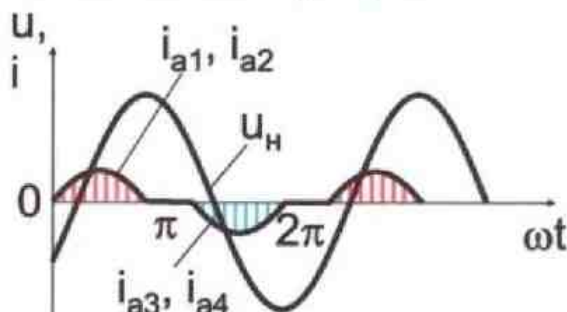


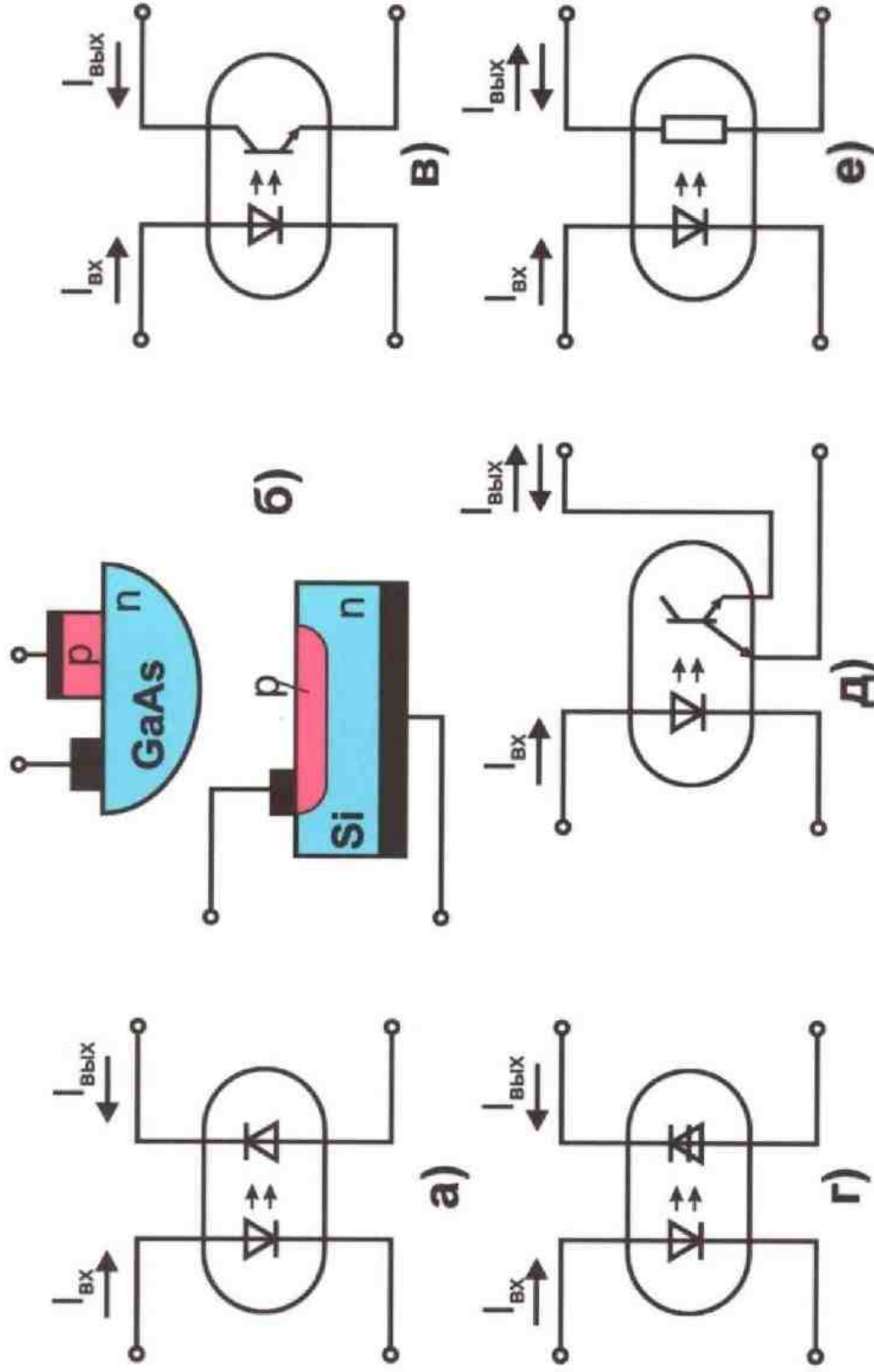
Схема резонансного инвертора с обратными диодами



Временные диаграммы тока и напряжения на выходе инвертора



Оптроны



Простейшие оптроны: диодный (а) и его структура (б); транзисторный (в); тиристорный (г); с двухэмиттерным фототранзистором (д); резисторный (е).





Основы промышленной электроники

Счетчики импульсов и регистры

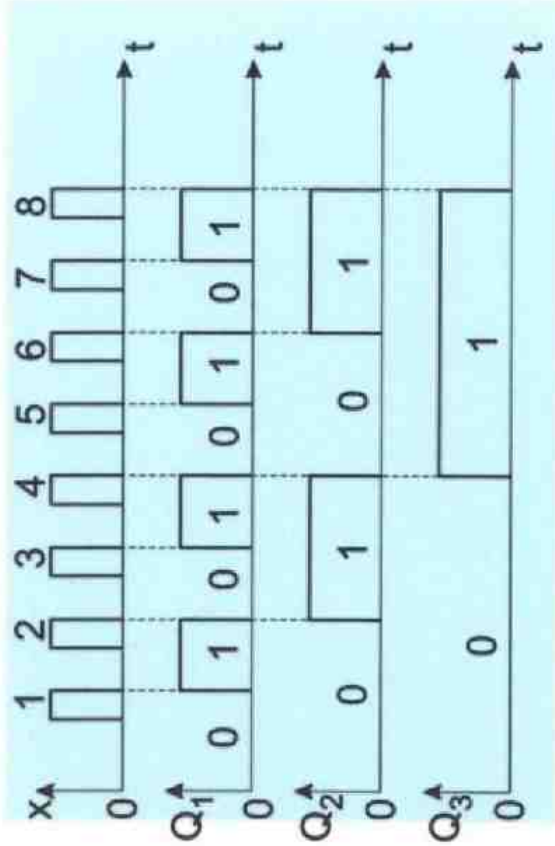
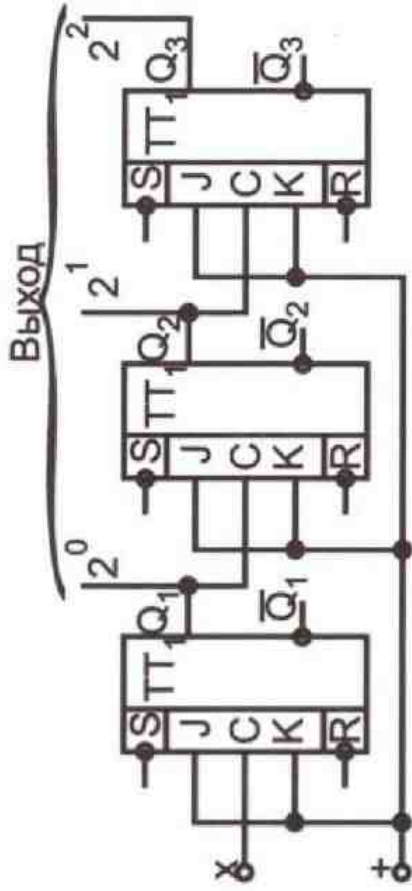
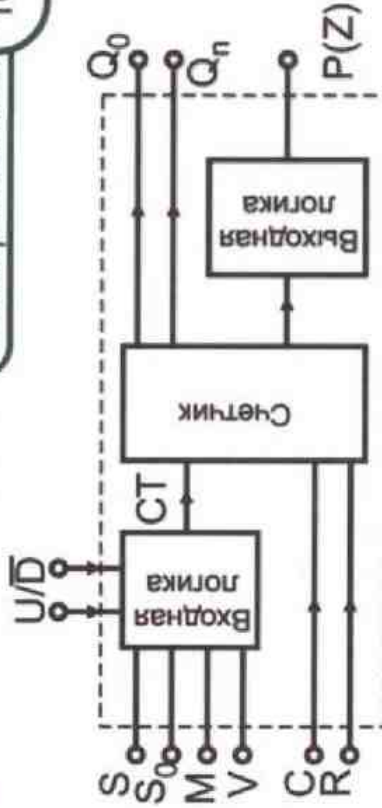


Схема и графики выходных сигналов асинхронного суммирующего счетчика на JK-триггерах



Обобщенная схема счетчика импульсов

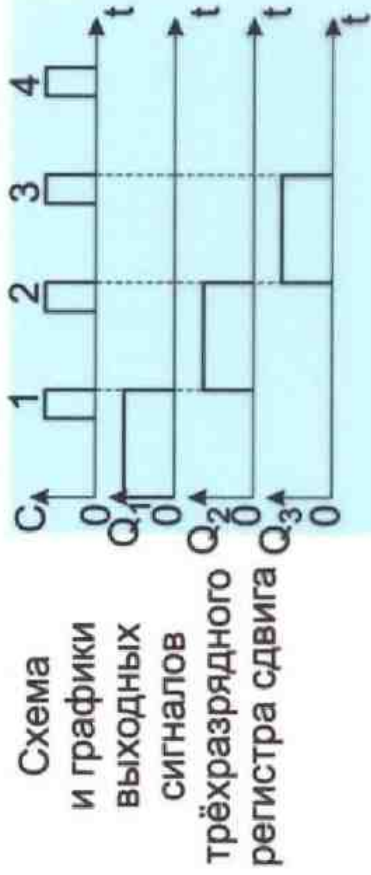
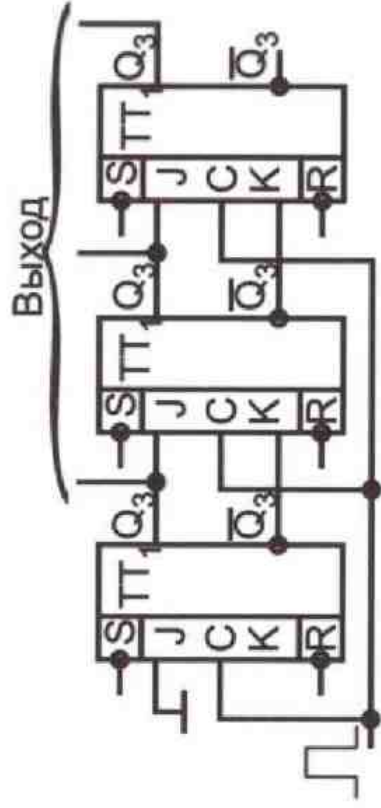
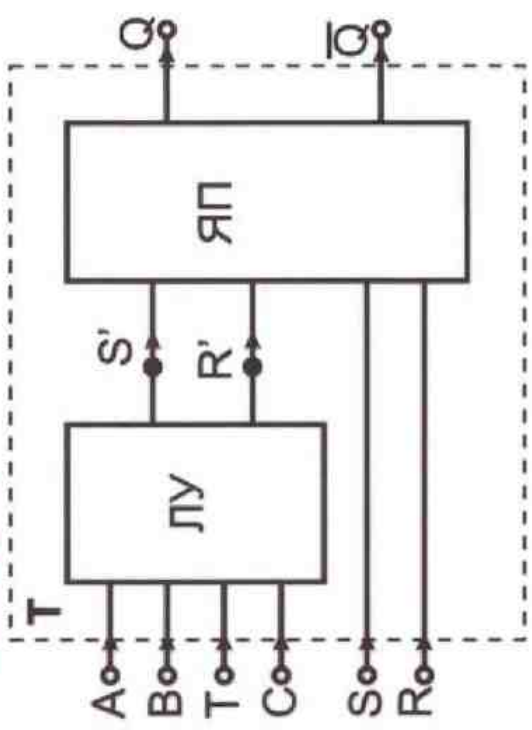


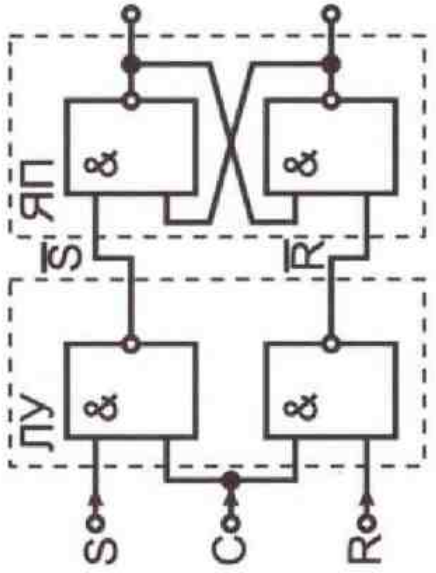
Схема и графики выходных сигналов трёхразрядного регистра сдвига

Основы промышленной электроники

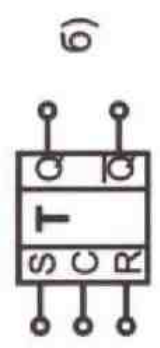
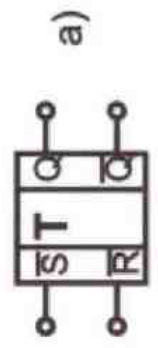
Триггеры



Обобщенное устройство триггера

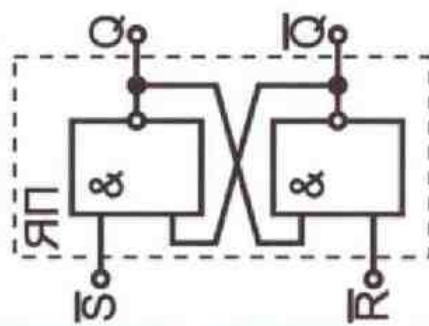


Синхронный RS триггер.

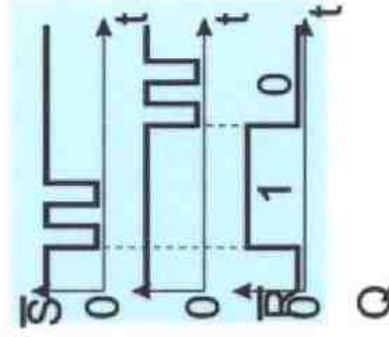


Условные схематические обозначения:

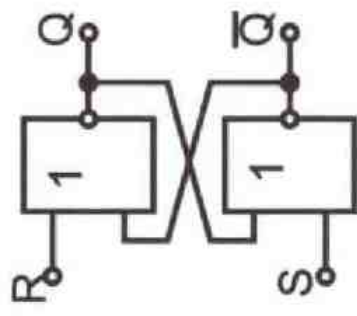
асинхронного (а) и синхронного (б) RS триггеров.



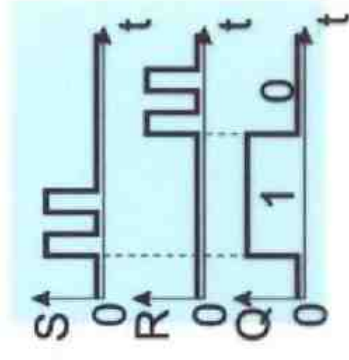
t	t+1	RS	Q
		1 0	1
		0 1	0
		1 1	Q ^t
		0 0	x



Асинхронный RS триггер на основе элементов И-НЕ, таблица истинности и временные диаграммы.



t	t+1	RS	Q
		1 0	0
		0 1	1
		0 0	Q ^t
		1 1	x

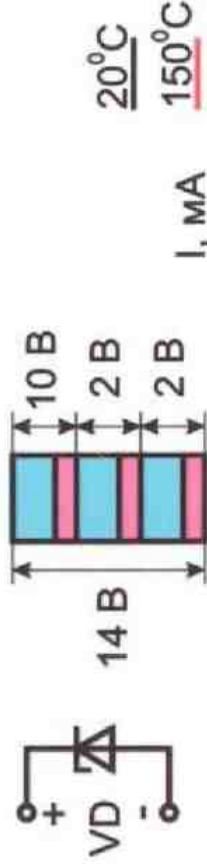


Асинхронный RS триггер на основе элементов ИЛИ-НЕ, таблица истинности и временные диаграммы.

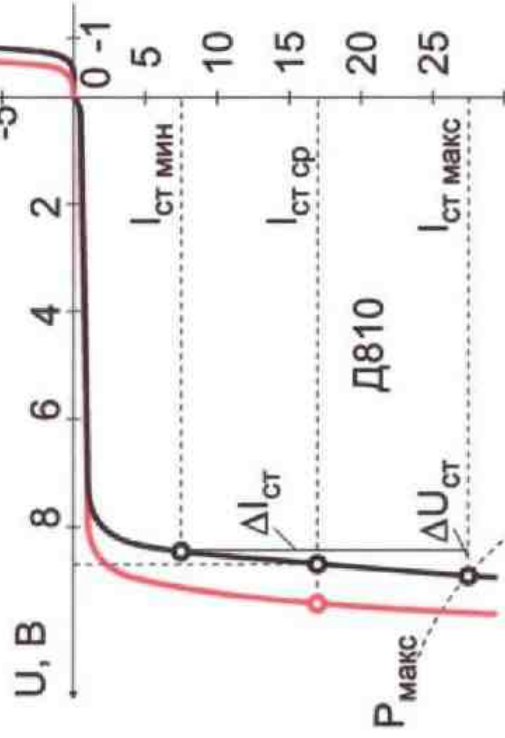


Основы промышленной электроники

Полупроводниковые стабилизаторы



Условное изображение стабилитрона и комбинация p-n переходов для увеличения температурной стабилизации.



Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона

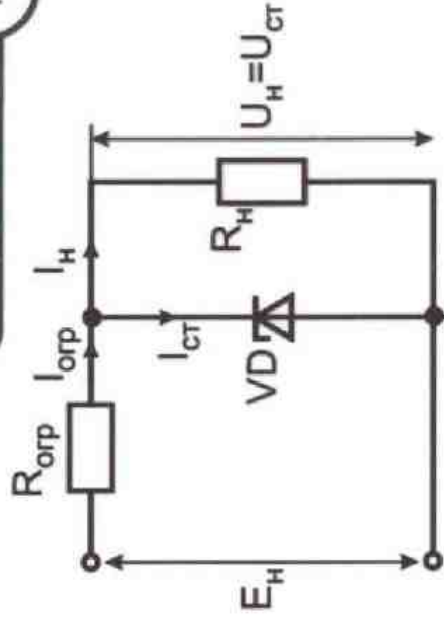
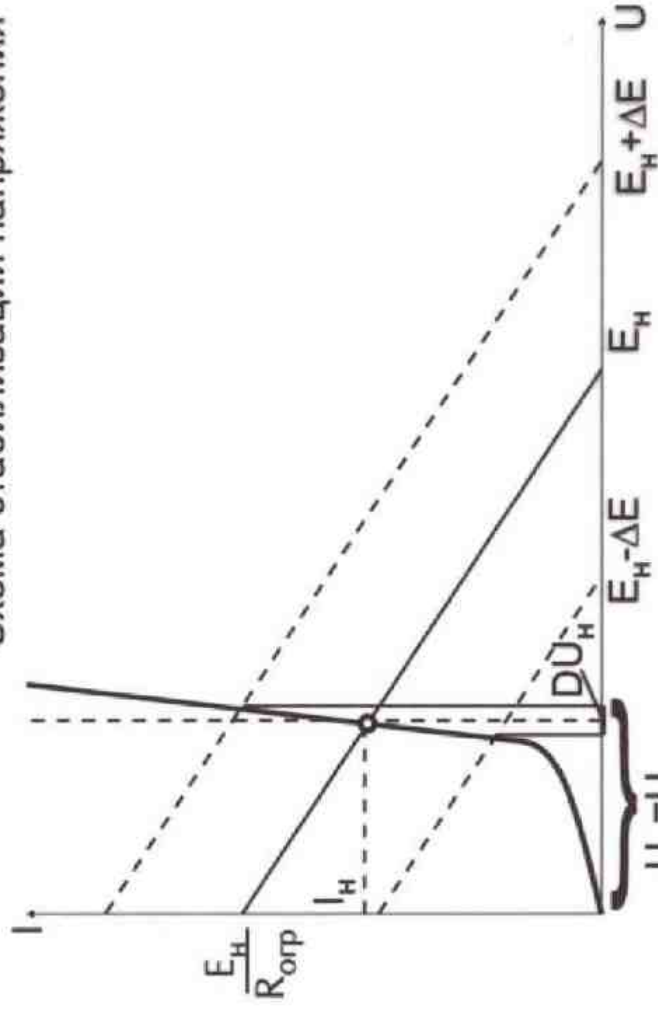


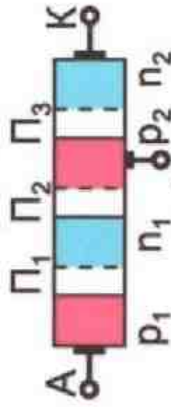
Схема стабилизации напряжения



Графическое пояснение работы стабилизирующего устройства

Основы промышленной электроники

Тиристоры



Управляемый тиристор
 Динистор, триодный, фотодиодный и оптронный тиристоры

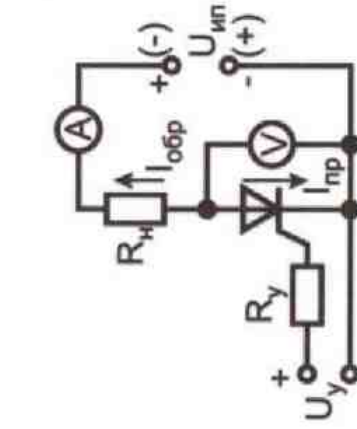
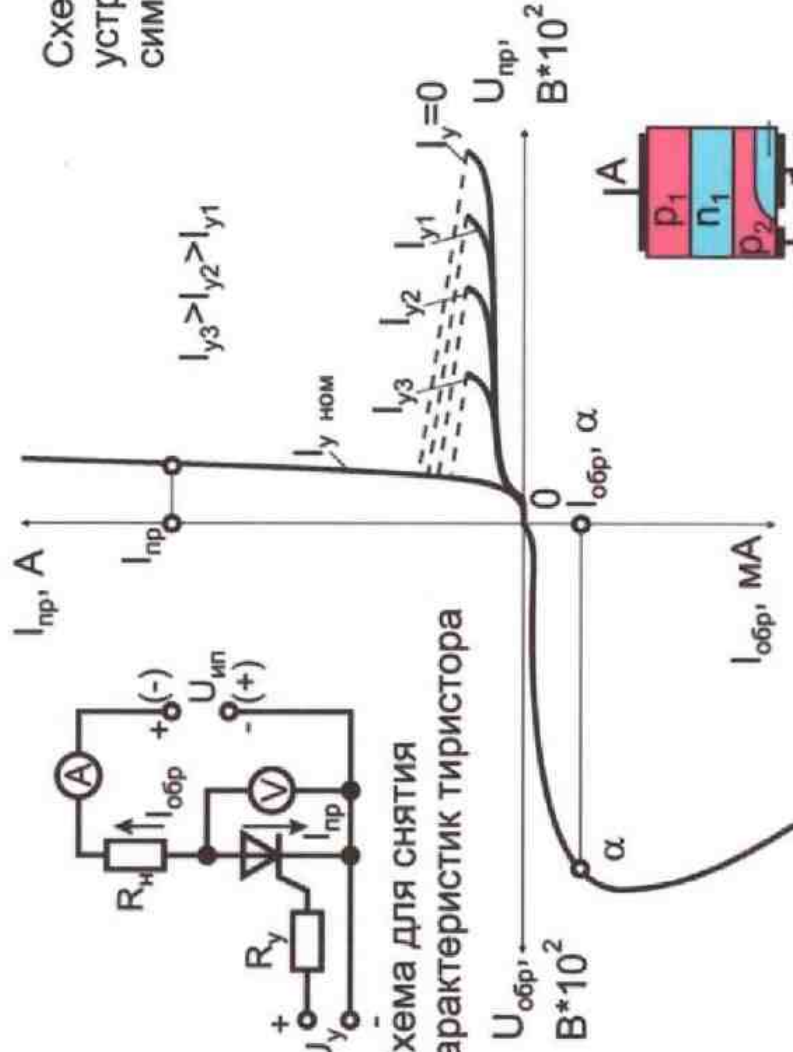
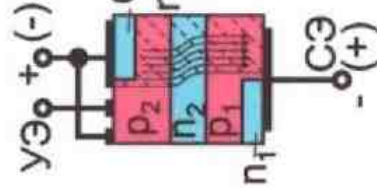


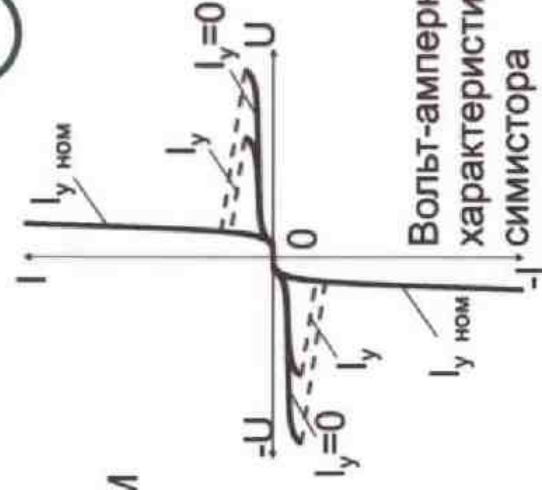
Схема для снятия характеристик тиристора



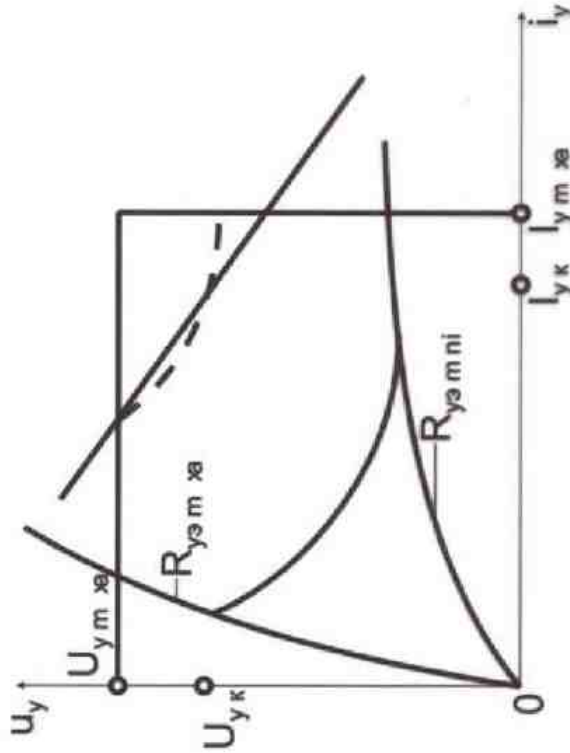
Вольт-амперные характеристики тиристора



Схематическое устройство симистора



Вольт-амперные характеристики симистора



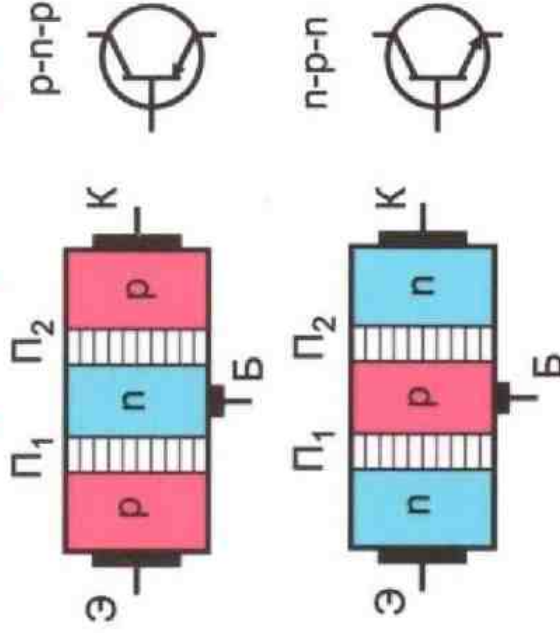
Характеристики цепи управления тиристора

Схематическое устройство тиристора

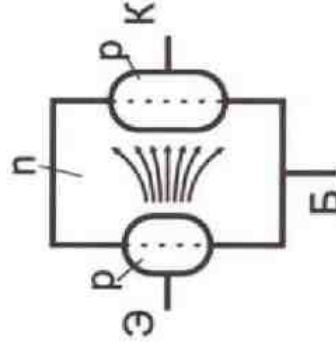


Основы промышленной электроники

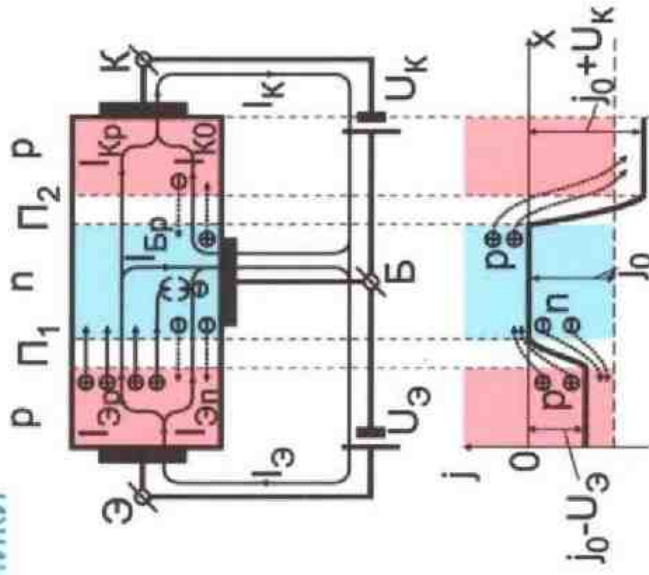
Биполярные транзисторы



Полупроводниковая структура транзисторов типа p-n-p и n-p-n, их условное обозначение.



Сплавная транзисторная структура типа p-n-p



Транзисторная структура типа p-n-p, распределение внутренней разности потенциалов.

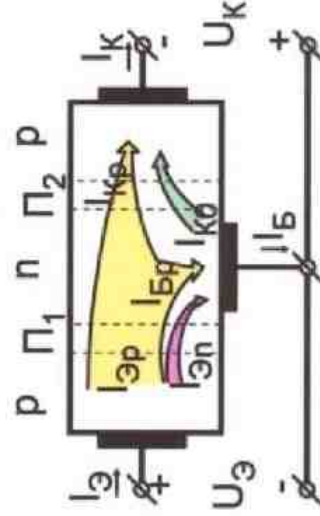
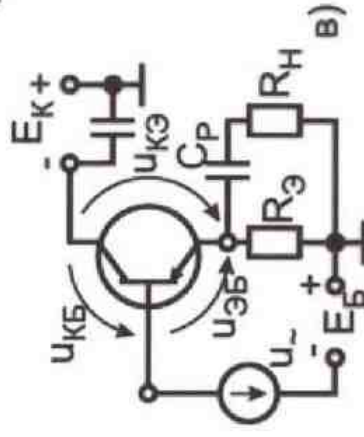
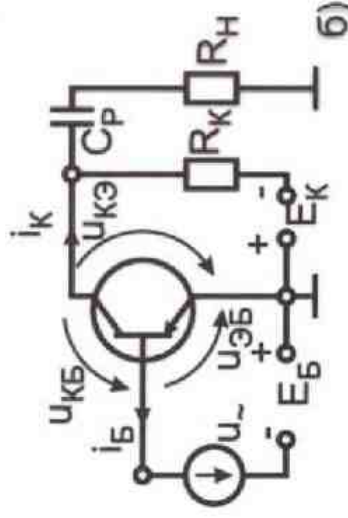
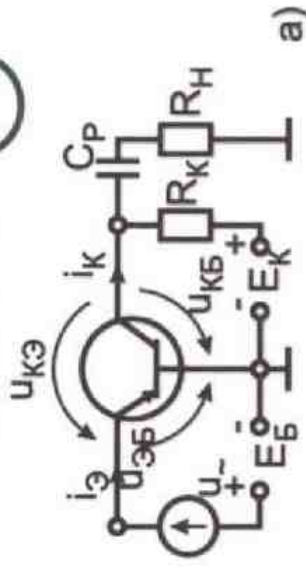
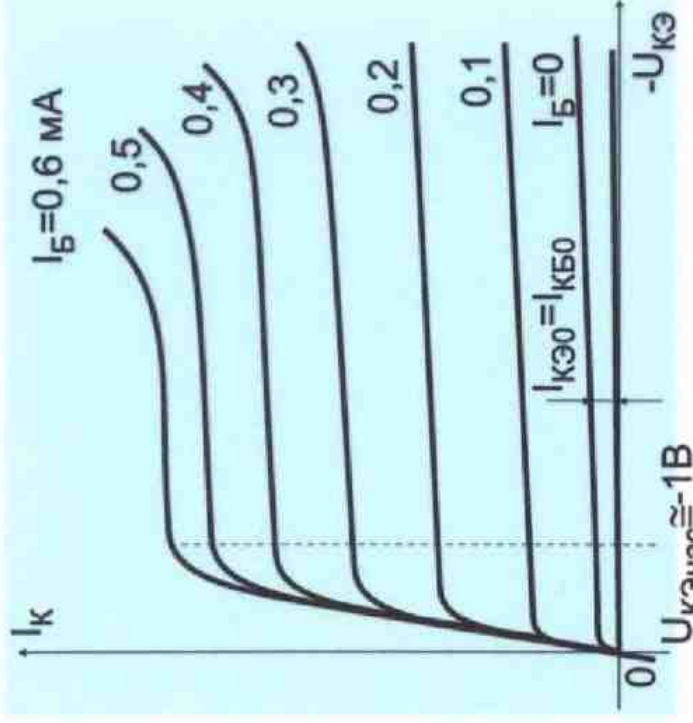
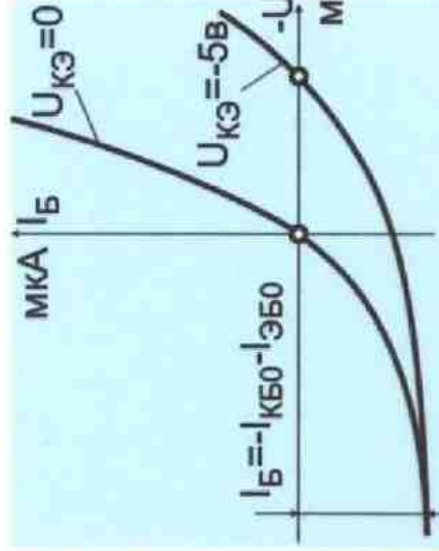
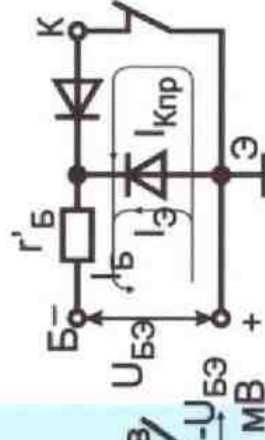
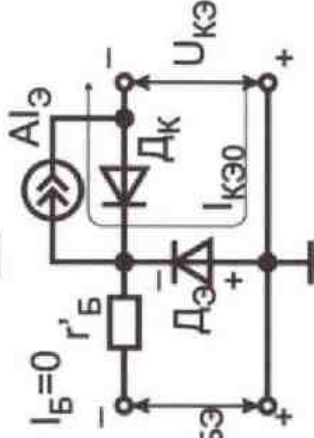
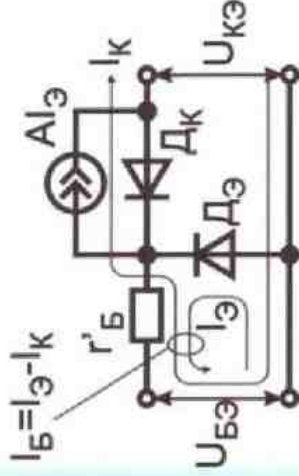
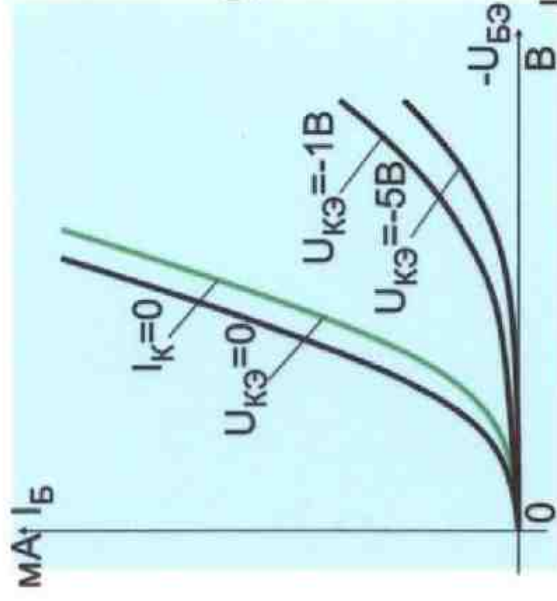


Диаграмма составляющих токов в транзисторе.

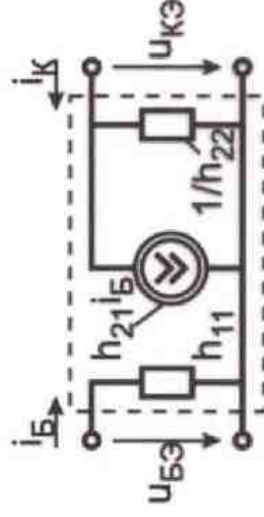


Основные схемы включения транзисторов по переменному току: а-с общим эмиттером в-с общим коллектором.

Характеристики биполярного транзистора



Выходные характеристики транзистора в схеме с ОЭ



Входные характеристики транзистора в схеме с ОЭ и эквивалентные схемы, их поясняющие.

Упрощённая схема замещения биполярного транзистора в h-параметрах

