

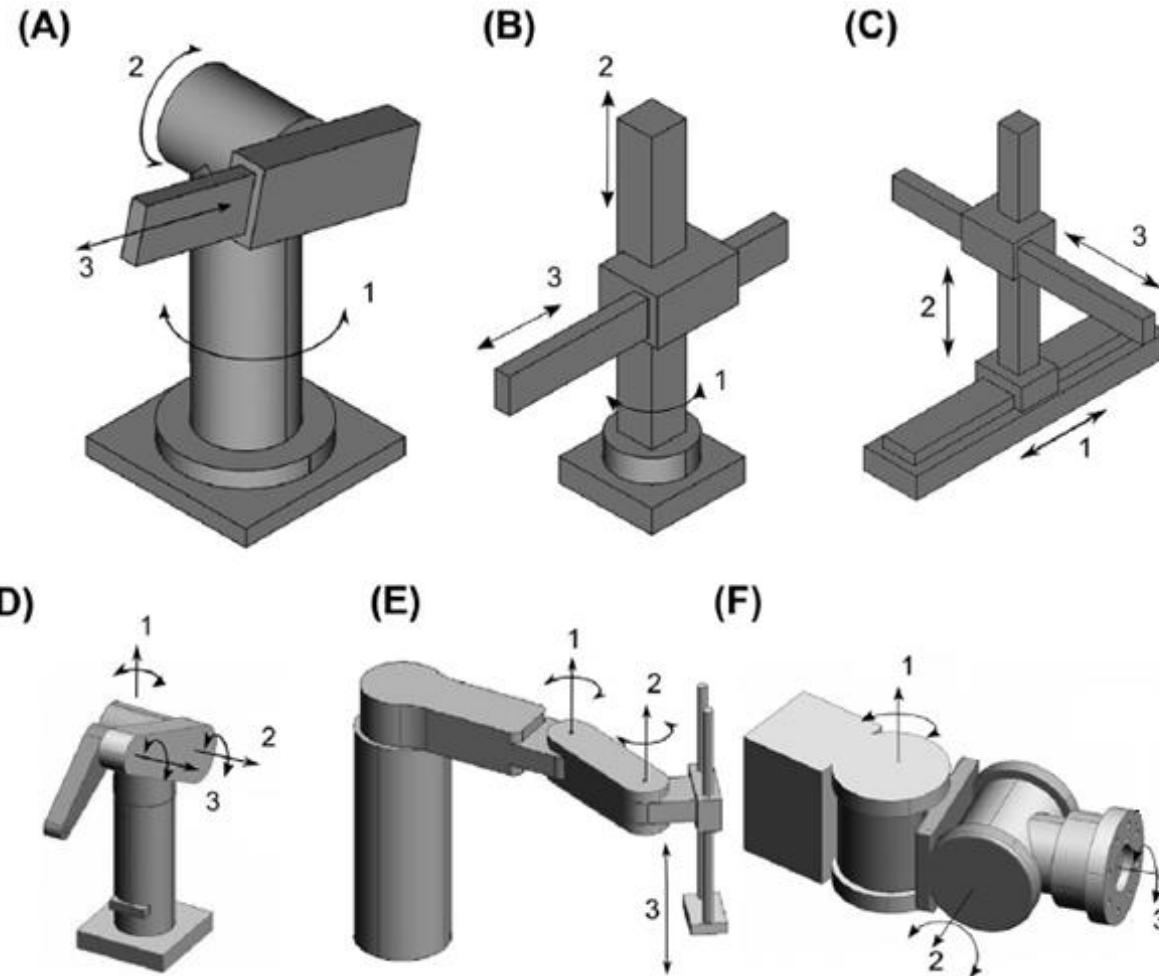
Современные преобразователи робототехнических и энергетических систем и комплексов

Электромеханические преобразователи

Лукичев Дмитрий Вячеславович, к.т.н., доцент



Типовые конструкции промышленных роботов



Стандартные конфигурации промышленных манипуляторов

- Вращательное движение
- Линейное движение



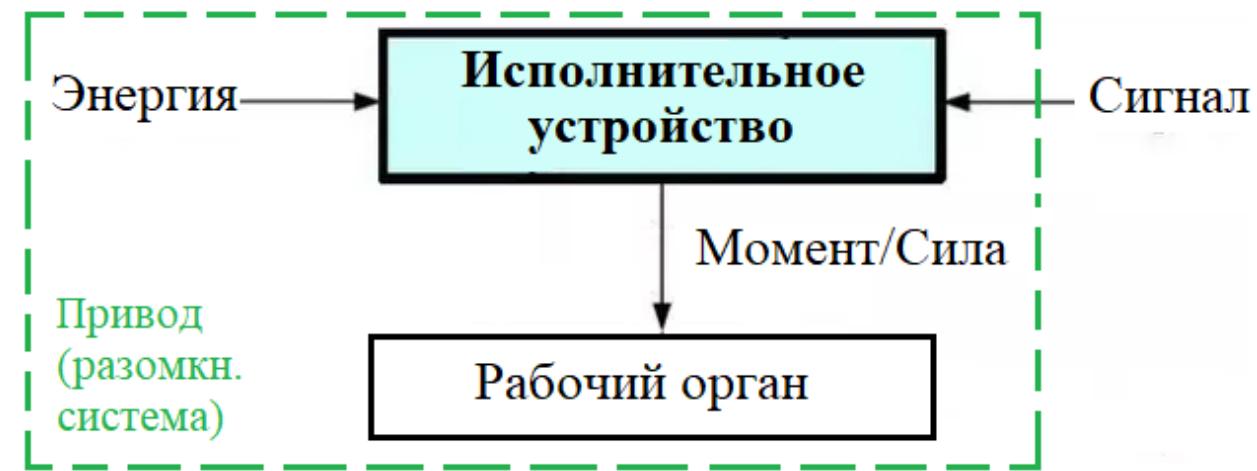
Промышленный манипулятор

Исполнительные устройства. Понятие привода

В технике **исполнительные устройства (ИУ)** представляют собой преобразователи, превращающие входной сигнал (электрический, оптический, механический, пневматический и др.) в выходной сигнал (обычно в движение), воздействующий на объект управления (рабочий орган).

К устройствам такого типа относят:

- электрические двигатели;
- электромеханические (двигатель + редуктор), пневматические или гидравлические устройства;
- электромагнитные (сolenоидные) приводные устройства и т.д.



Разомкнутая система привода

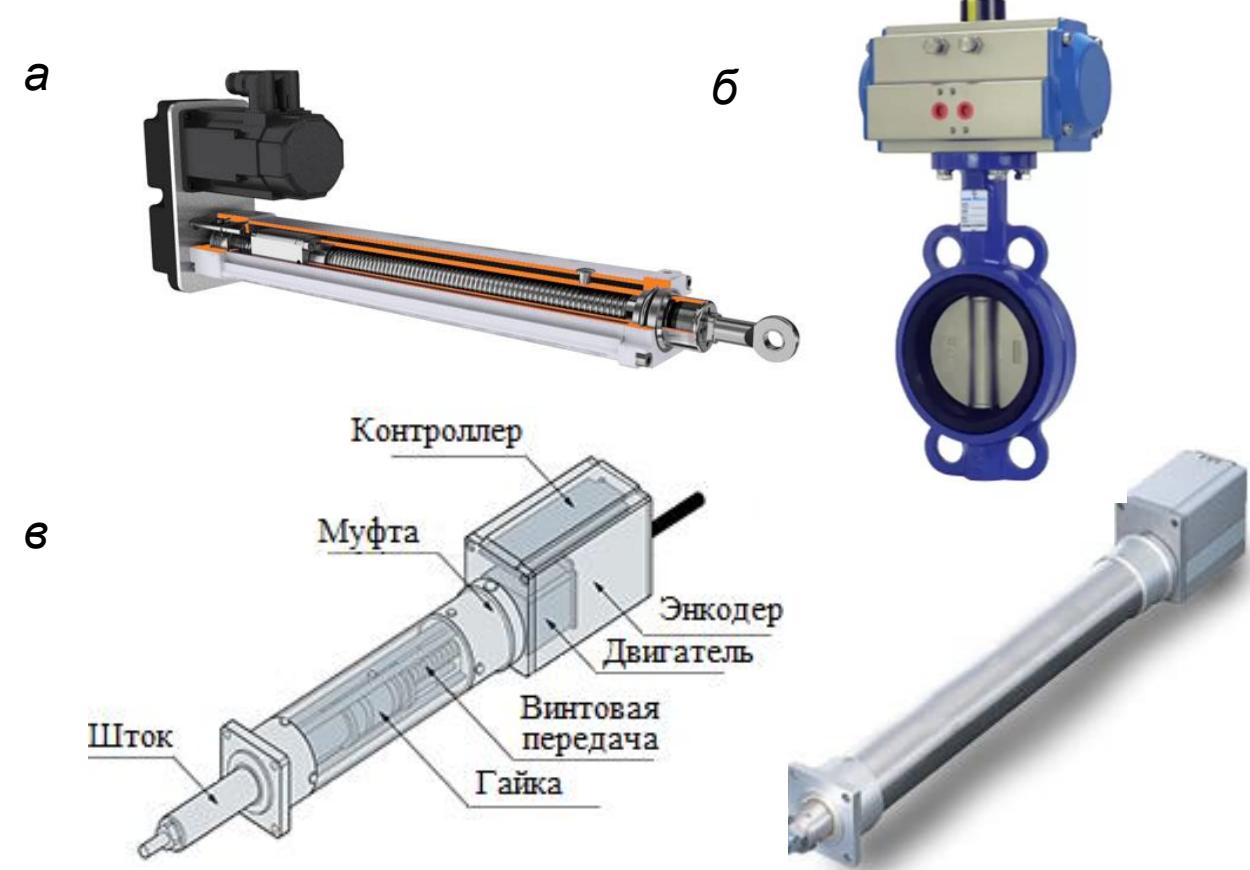
- Привод вращения**
- Линейный привод**

Понятие актуатора

Актуатор (актиuator) – это приводное устройство, который позволяет выполнять круговые либо линейные перемещения, воздействуя на объект управления, путем изменения потока энергии или материалов.

Особенности:

- как правило, термин «актуатор» относится к устройствам, обеспечивающим линейное движение (линейный привод);
- «актуатор» предназначен не для постоянного движения/вращения вала, а для точного позиционирования;
- большинство вращающихся «актуаторов» устанавливаются «медленно» и не поворачиваются более чем на 90 градусов;
- некоторые «актуаторы» предназначены для нахождения только в двух положениях (открыто-закрыто)



Примеры актуаторов

Линейный электрический привод (актуатор)



Актуатор с шарико-винтовой парой (ШВП) (а), линейный привод (б) и представление линейного двигателя (в)

Преимущества:

- **Высокая точность** позиционирования, **полное управление** параметрами движения
 - **Быстрая подключение** к системе
- Экологичность:** электричество - это чистый источник энергии.

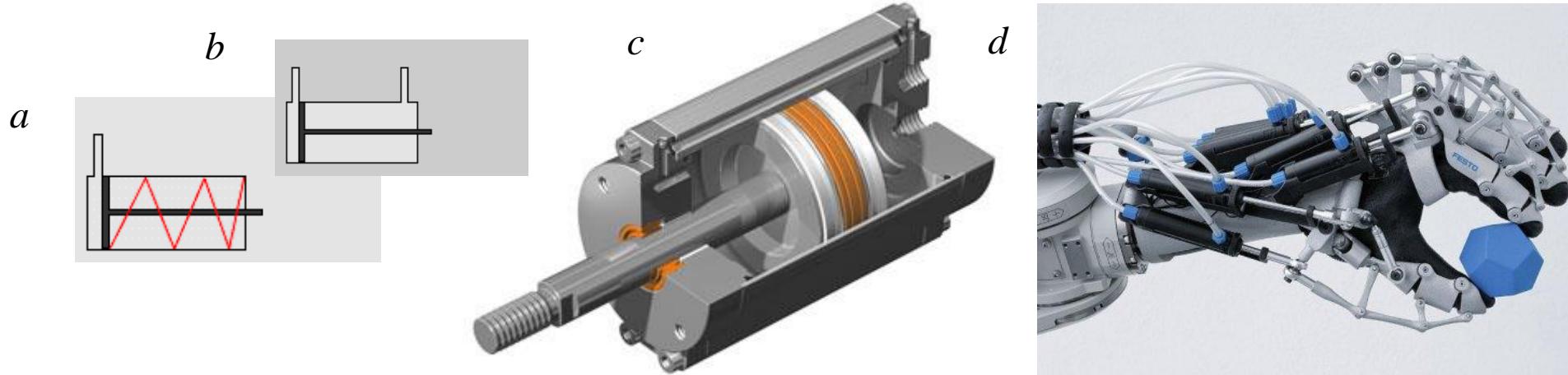
Недостатки

- **Высокая начальная стоимость**
- **Низкое соотношение** мощности к весу / объему
- Без специсполн. не подходят для применения **во взрывоопасных** местах

- Электродвигательные привода
- Электромагнитные (соленоидные) привода



Линейный пневматический привод (актуатор)



Пневматический привод: принцип работы привода двойного действия (а)
одностороннего привода с возвратной пружиной (б) пневмоцилиндр (с) роборука (д)

Преимущества

- Простота, надежность, дешевизна, большая скорость движения
- Пожаробезопасны, не создают магнитные поля

Недостатки

- Ограниченнaя мощность (воздух больше сжимается, чем масло в гидравлической системе) и сильная зависимость от температуры воздуха
- Более короткий жизненный цикл (питание от сжатого воздуха)

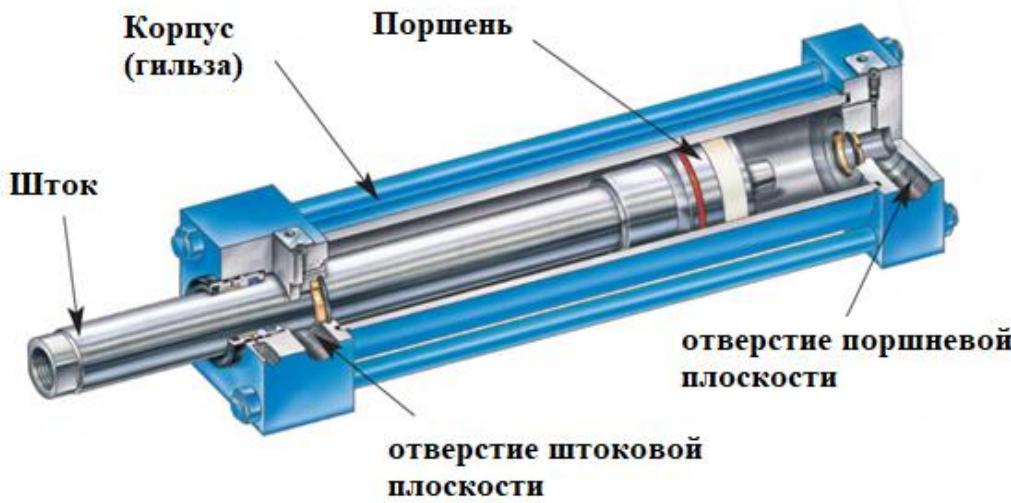
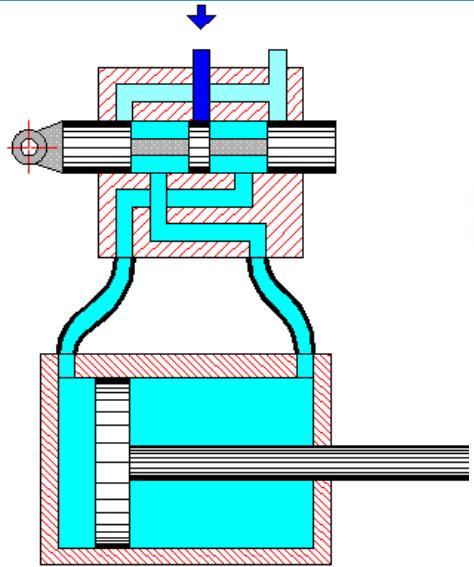
Компрессор /
баллон со сжатым
газом

Пневмодвигатель
(пневмоцилиндр)



- блок подготовки (очищения) воздуха
- блок распределения сжатого воздуха,
- система передачи сжатого воздуха в исполнительные устройства.

Линейный гидравлический привод (актуатор)



Гидравлический привод

Преимущества:

- **Высокое соотношение мощности к массе**
- **Безопасность и надежность конструкции**

Недостатки

- Большие начальные вложения
- Требуется обслуживание и много составляющих компонентов
- Утечка гидравлического масла - загрязнения

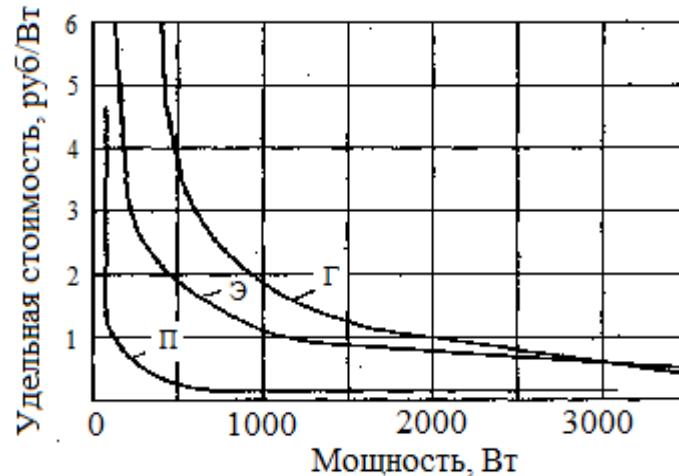
Насос

Гидродвигатель



- резервуар для жидкости;
- гидролинии, включая напорную магистраль (трубы, рукава);
- гидрорегулирующие устройства, такие как дроссель или гидрораспределитель;
- фильтрующие устройства
- системы регулирования температуры (теплообменники).

Сравнение различных типов приводов (актуаторов)



Удельная мощность (отнесенная к весу) и стоимость электрических (Э), гидравлических (Г) и пневматических (П) приводов

	Электропривод	Гидропривод	Пневмопривод
ПРЕИМУЩЕСТВА	<ul style="list-style-type: none"> - Высокая точность позиционирования, полное управление параметрами движения - Быстрота подключения к системе - Экологичность 	<ul style="list-style-type: none"> - Высокое соотношение мощности к массе - Безопасность и надежность конструкции 	<ul style="list-style-type: none"> -Простота, надежность, дешевизна - Большая скорость движения -Пожаробезопасны - Не создают магнитные поля
НЕДОСТАКИ	<ul style="list-style-type: none"> - Низкая удельная мощность - Без спец. корпуса не подходят для применения во взрывоопасных местах 	<ul style="list-style-type: none"> - Большие начальные вложения - Требуется обслуживание и много составляющих компонентов - Утечка гидравлического масла - загрязнения 	<ul style="list-style-type: none"> -Ограниченнная мощность -Сильная зависимость от температуры воздуха -Более короткий жизненный цикл (питание от сжатого воздуха)

Преобразование энергии с помощью электрических машин

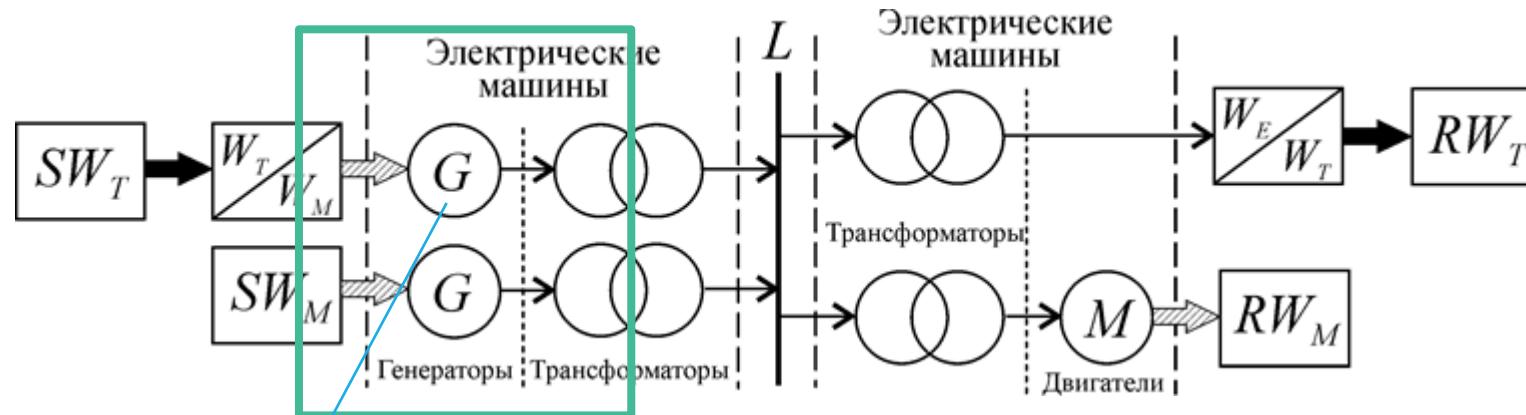
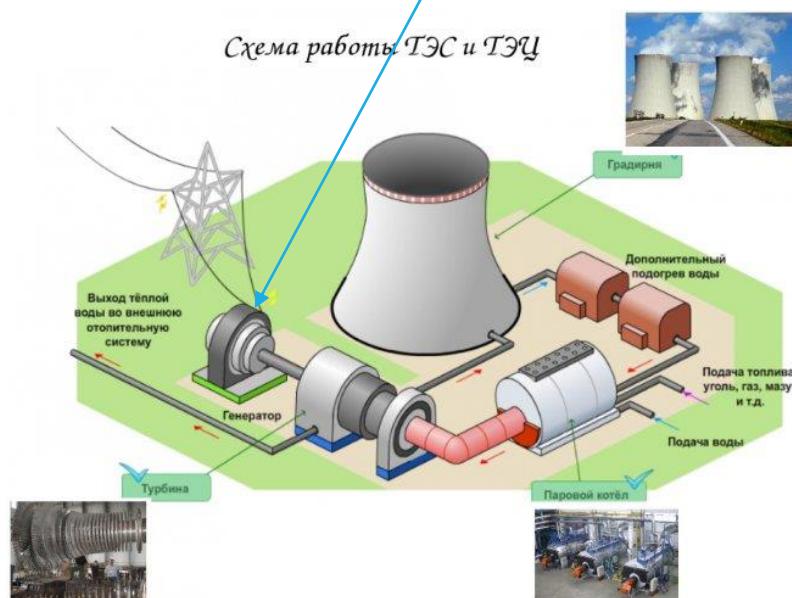


Рисунок – Структура преобразования энергии



К 2020 году план Европейской комиссии предусматривал:

- 20% экономии энергии
- Сокращение выбросов парниковых газов на 20%
- 20% доля возобновляемых источников энергии в общем потреблении энергии в ЕС
- 10% компонента возобновляемой энергии в транспортном топливе

Преобразование энергии с помощью электрических машин

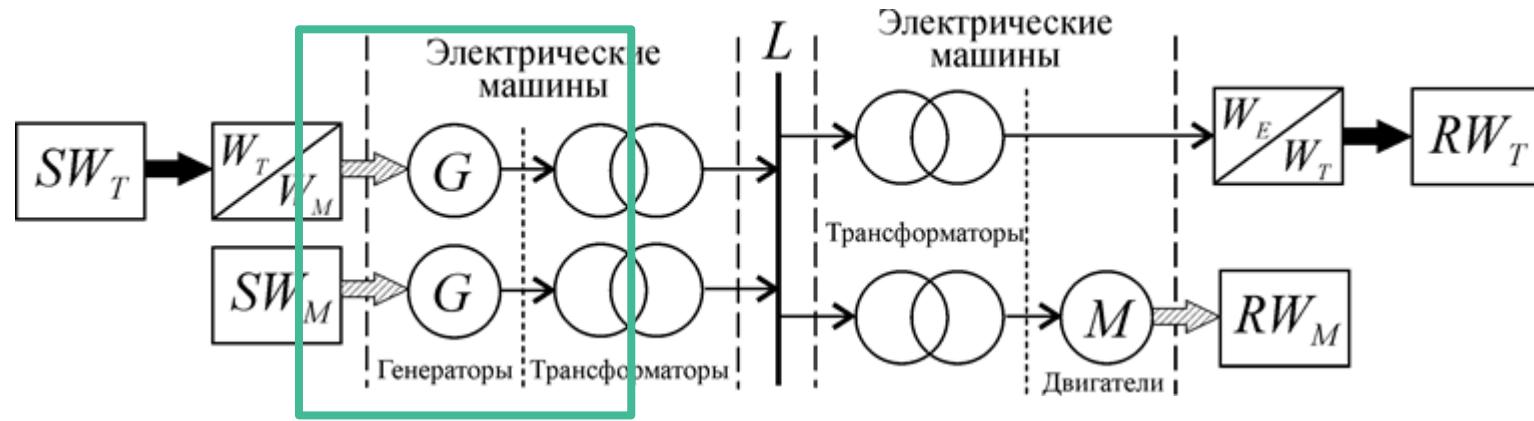
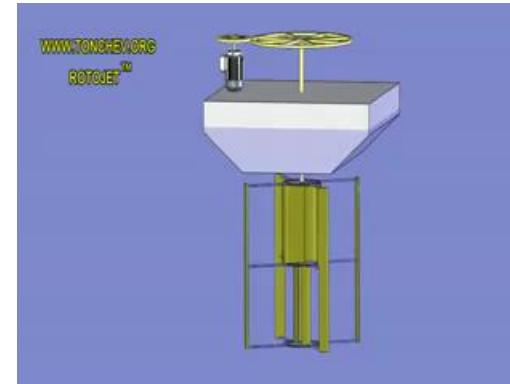
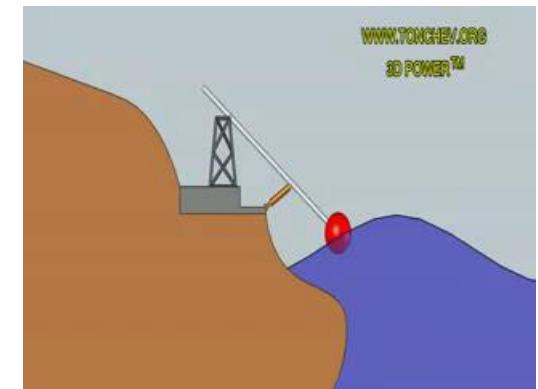
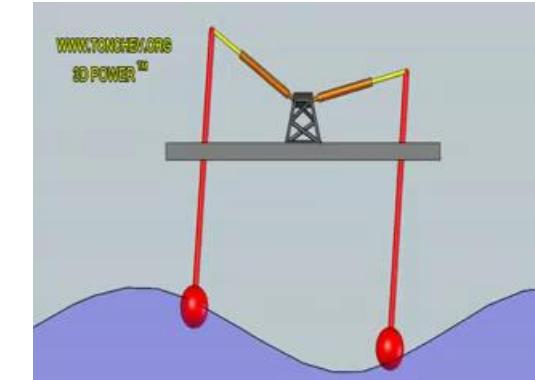
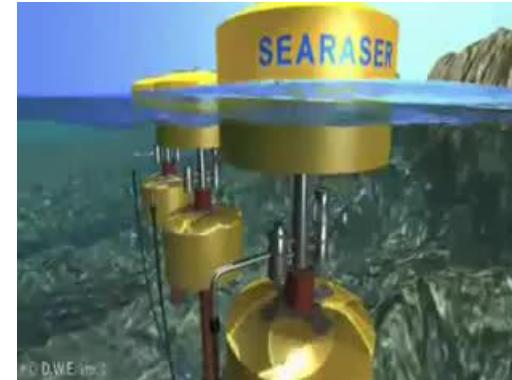


Рисунок – Структура преобразования энергии



Преобразование энергии с помощью электрических машин

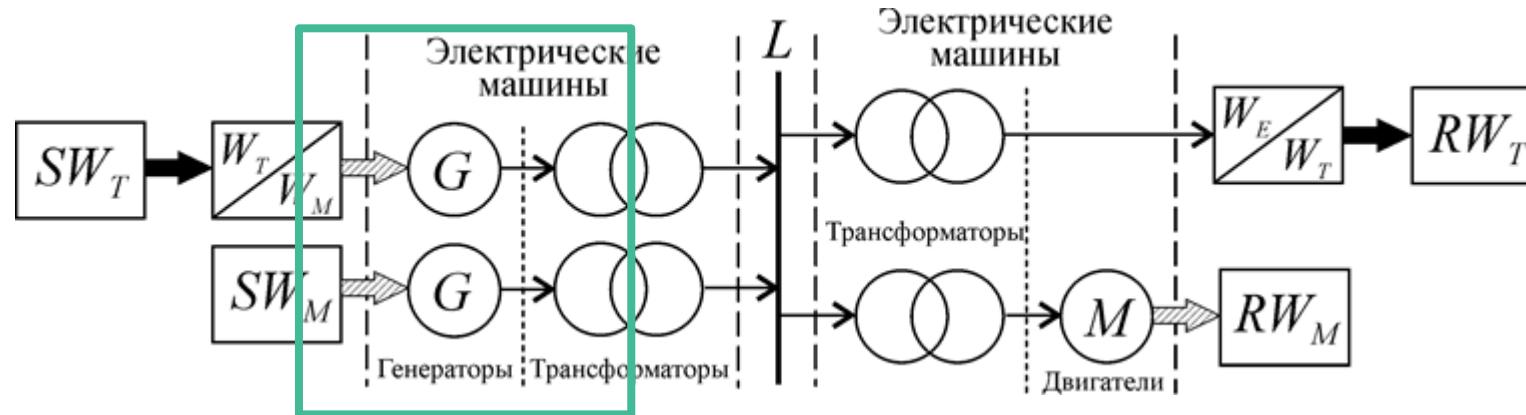
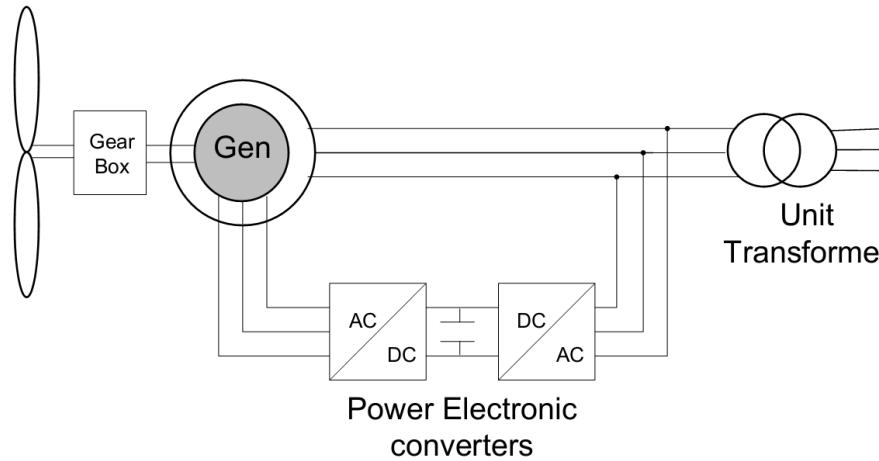
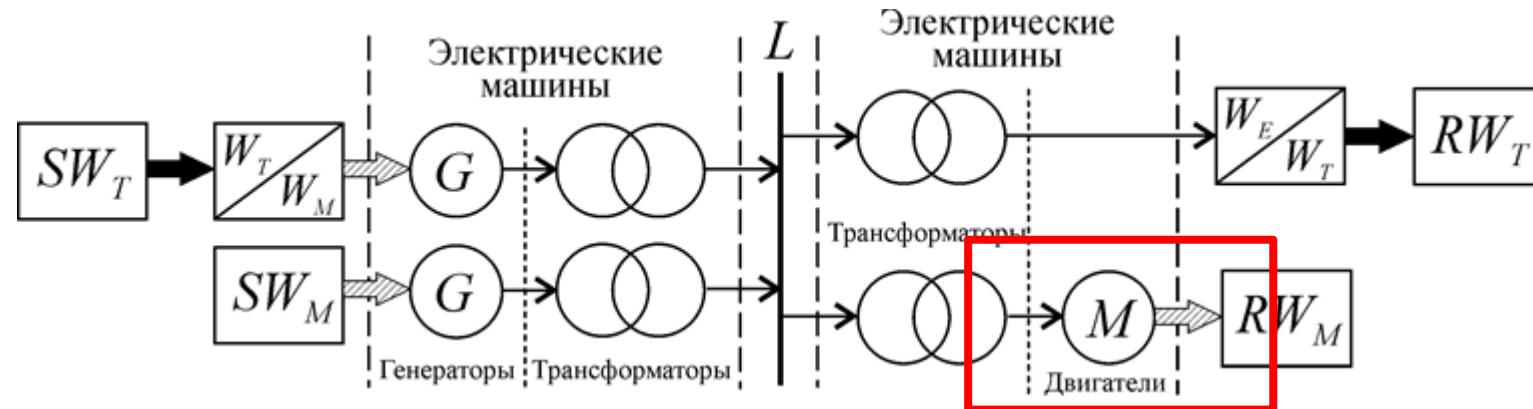


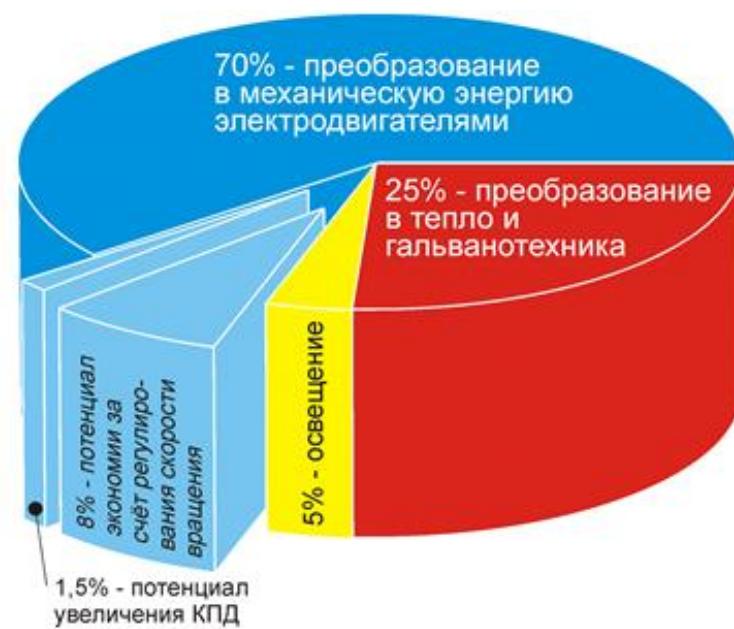
Рисунок – Структура преобразования энергии



Диаграммы использования электропривода



Структура преобразования энергии



Структура потребления электроэнергии

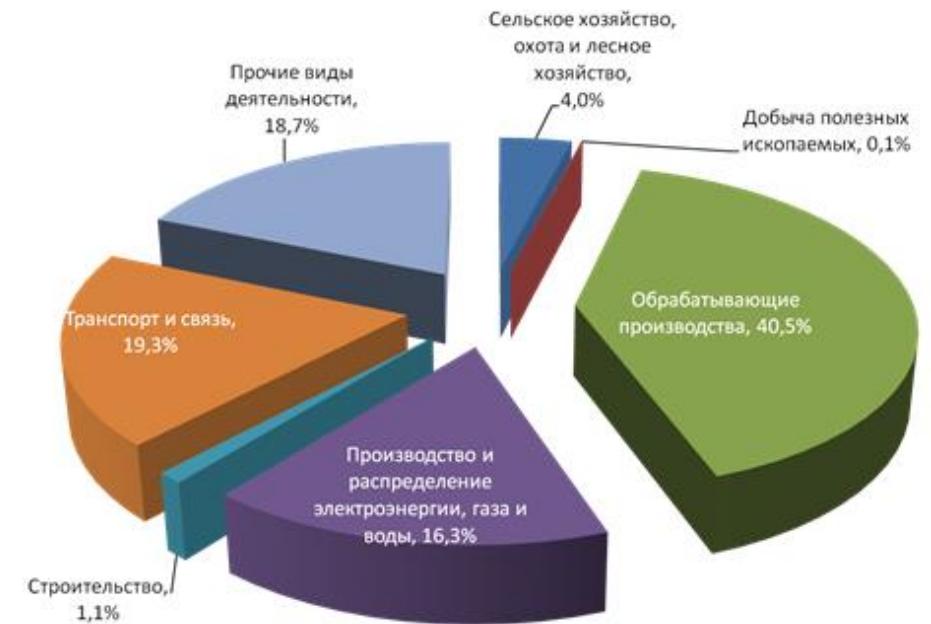
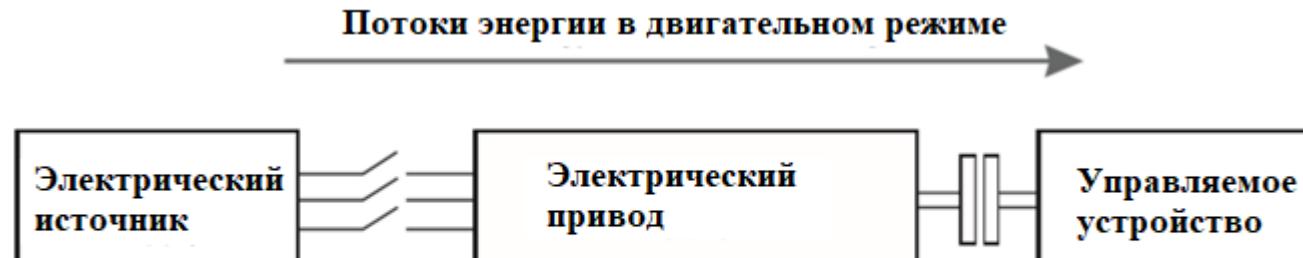
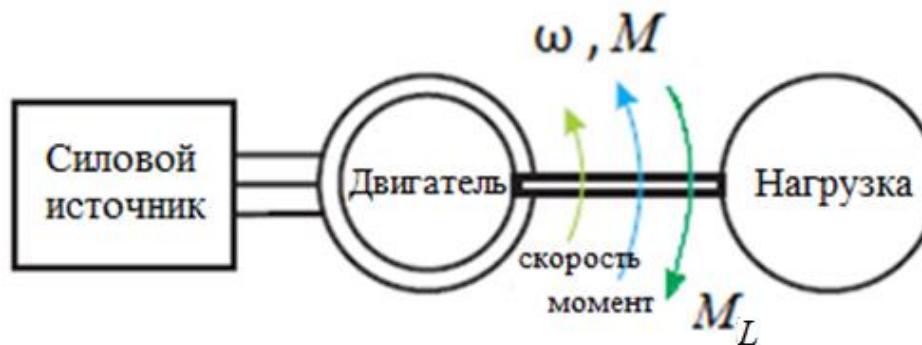


Диаграмма использования электроприводов в различных областях

Режимы работы двигателя



Потоки энергии в генераторном режиме



M – момент двигателя

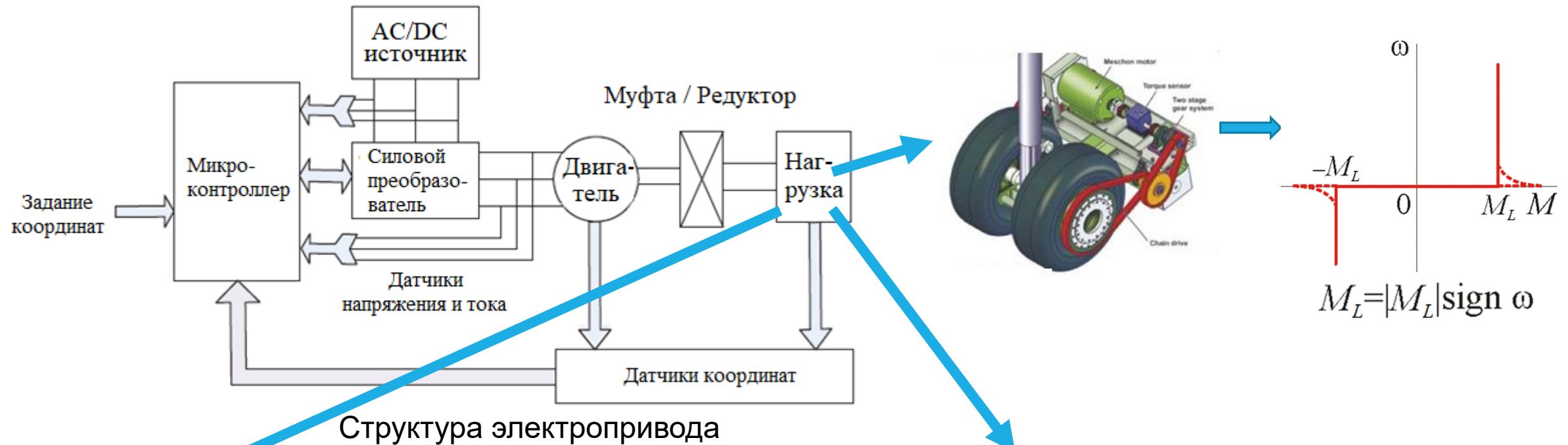
M_L – момент нагрузки (подключаемого механизма – управляемого устройства)

Потоки энергии в приводе и простейшая структура привода

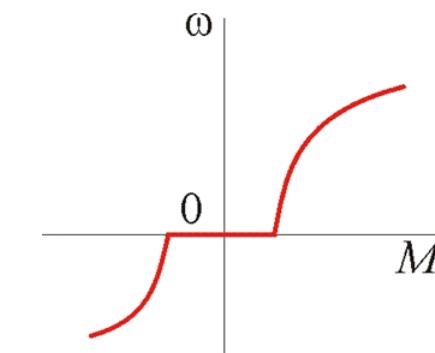


Режимы работы двигателя

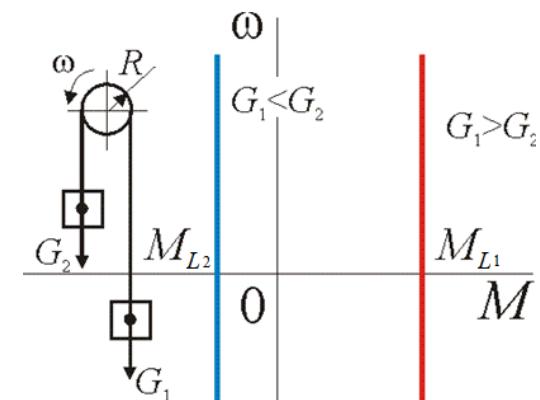
Структура электропривода



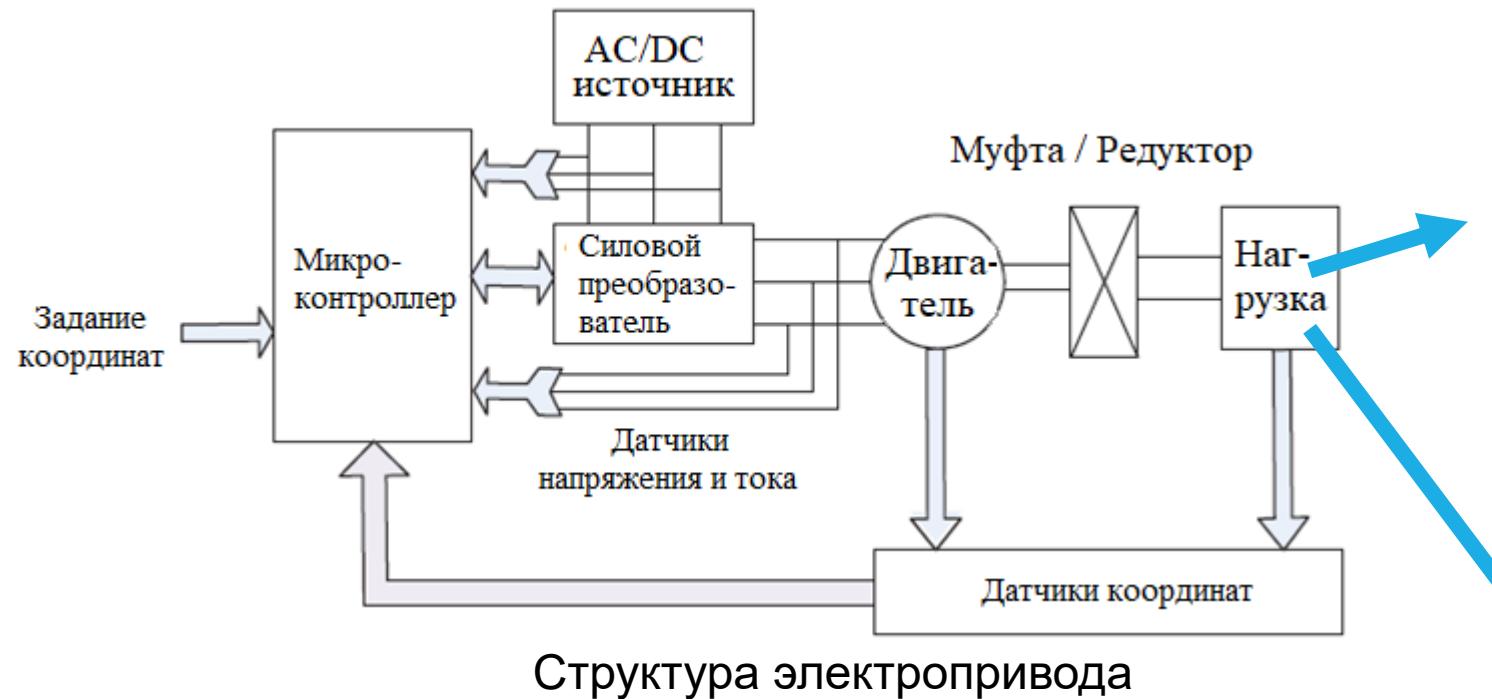
$$M_L = |M_L| \text{sign } \omega + \beta \omega^n$$



$$M_L = (G_1 - G_2)R = (m_1 - m_2)gR$$

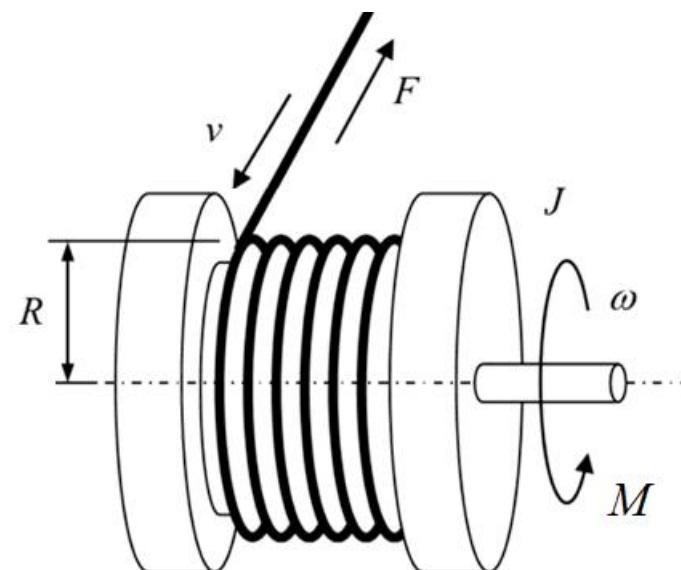


Структура электропривода

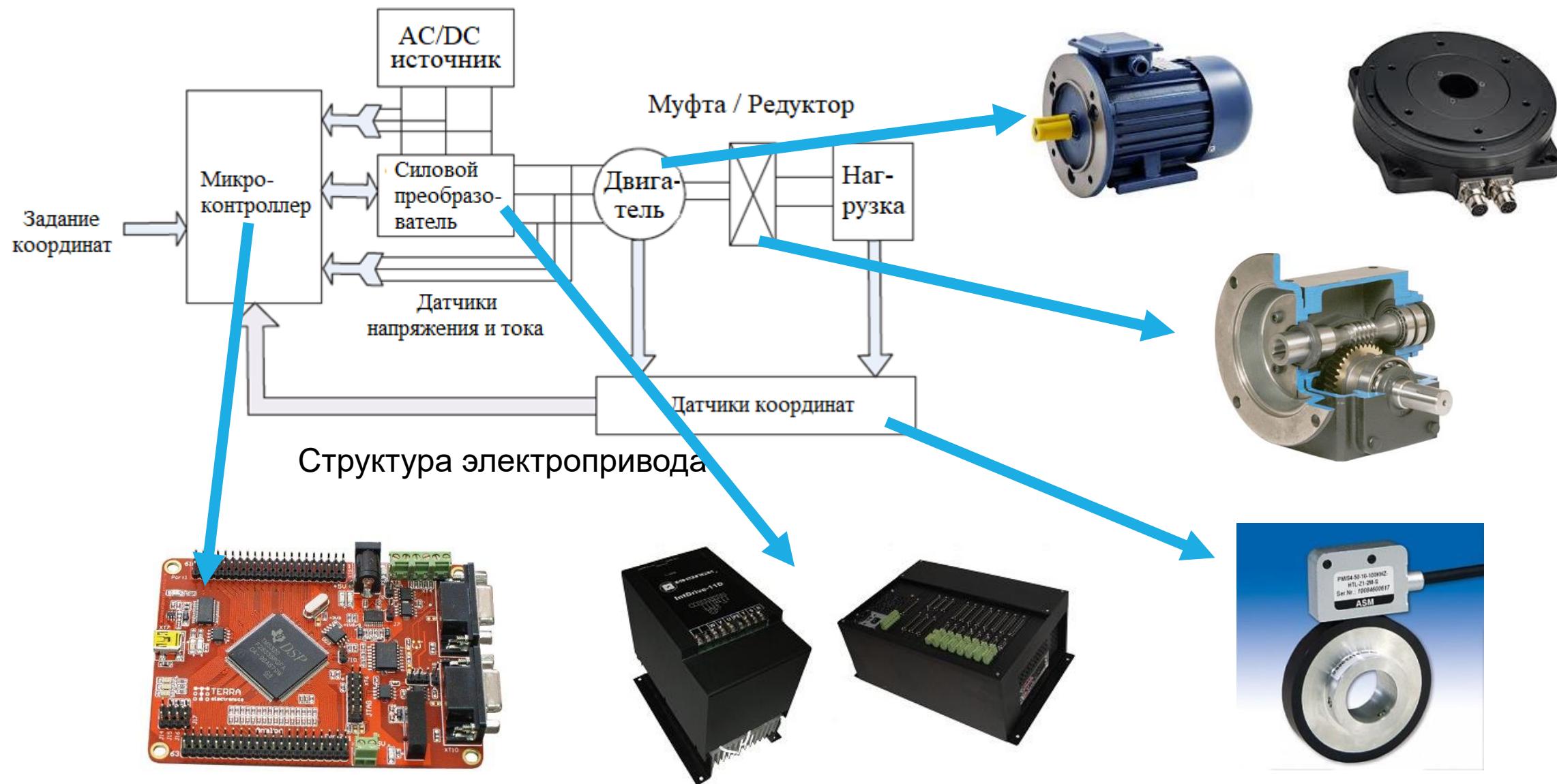


Прокатный стан

✓ изменение момента инерции



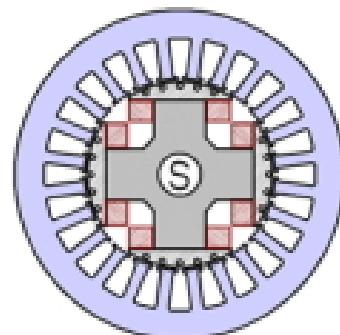
Структура электропривода



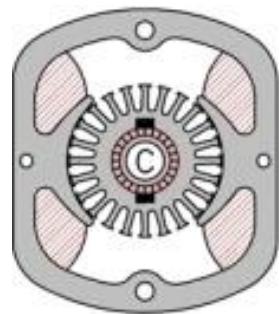
Электрические машины



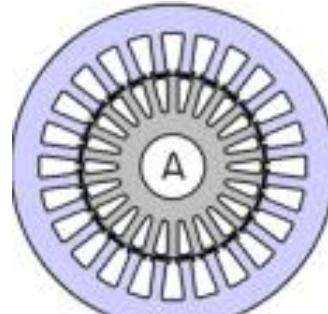
ДПТ с возб. от ПМ



СД



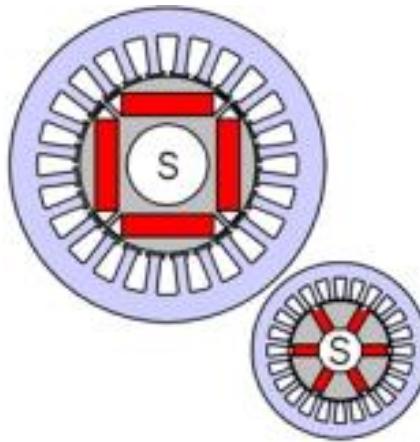
ДПТ с обмоткой
возбуждения



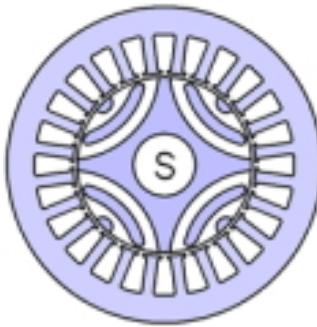
АД

Классические

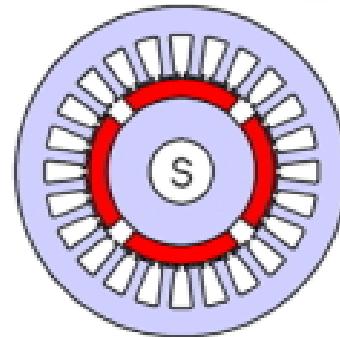
СД со
встроенным
магнитами



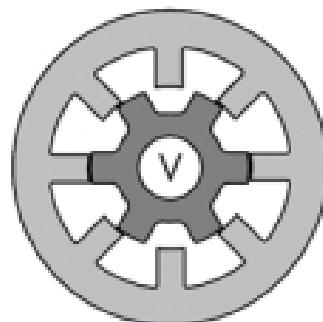
вид



СД с
поверхностной
установкой
постоянных
магнитов



шд



Требующие наличия преобразователя

Классификация электрических машин

Основные узлы конструкции электрических машин

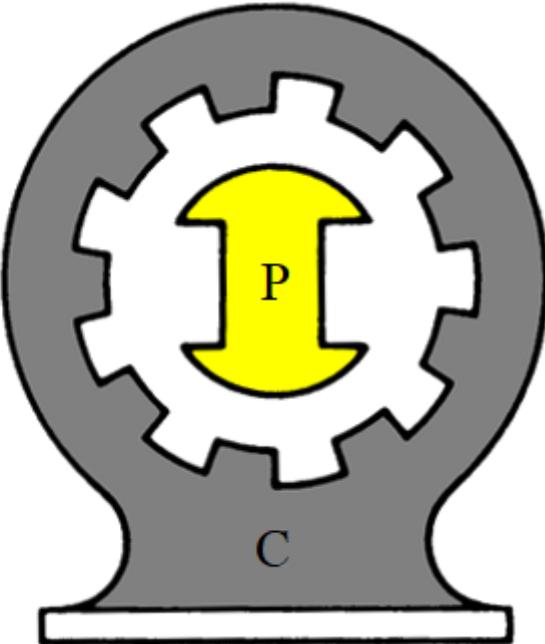
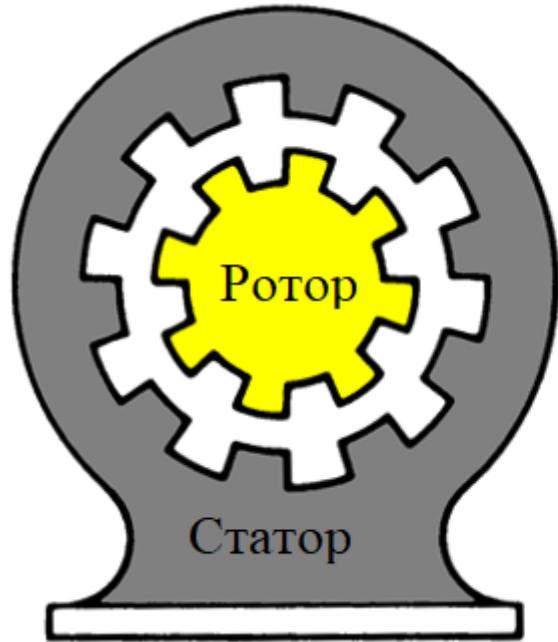


Рисунок - Неянополюсная машина
Равномерный воздушный зазор

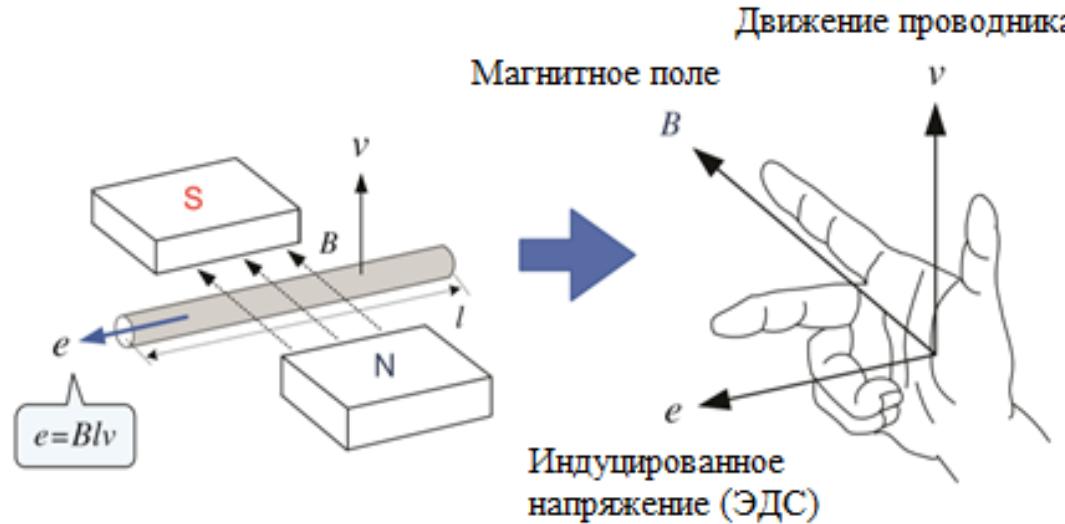
Рисунок - Янополюсная машина
Неавномерный воздушный зазор

- Пазы с проводниками обмотки
- Материал –электротехническая сталь



Основные законы электромагнитного поля

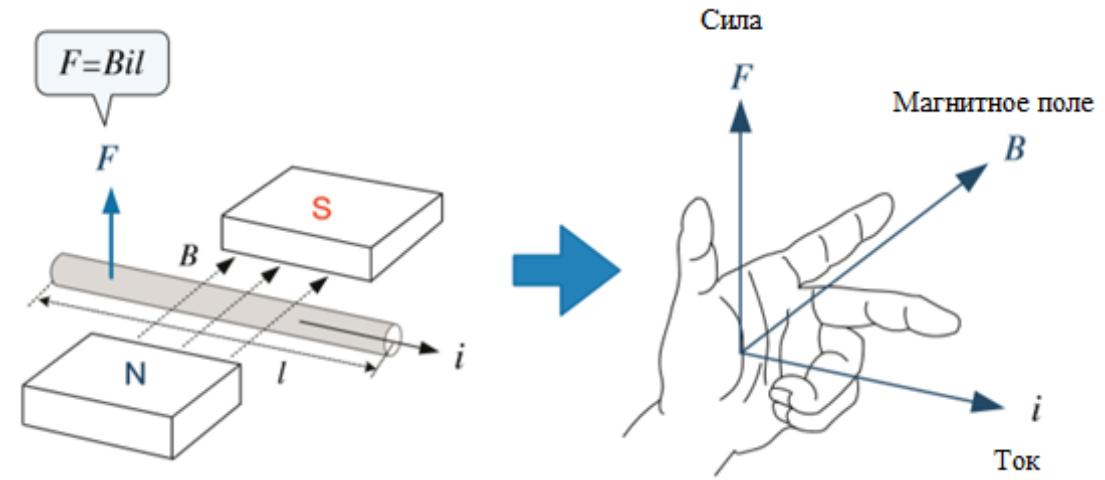
Индукционное действие поля (закон электромагнитной индукции Фарадея)



Наводимое ЭДС при движении проводника

Если поток вектора магнитной индукции через замкнутый контур меняется во времени, в этом контуре возникает ЭДС электромагнитной индукции

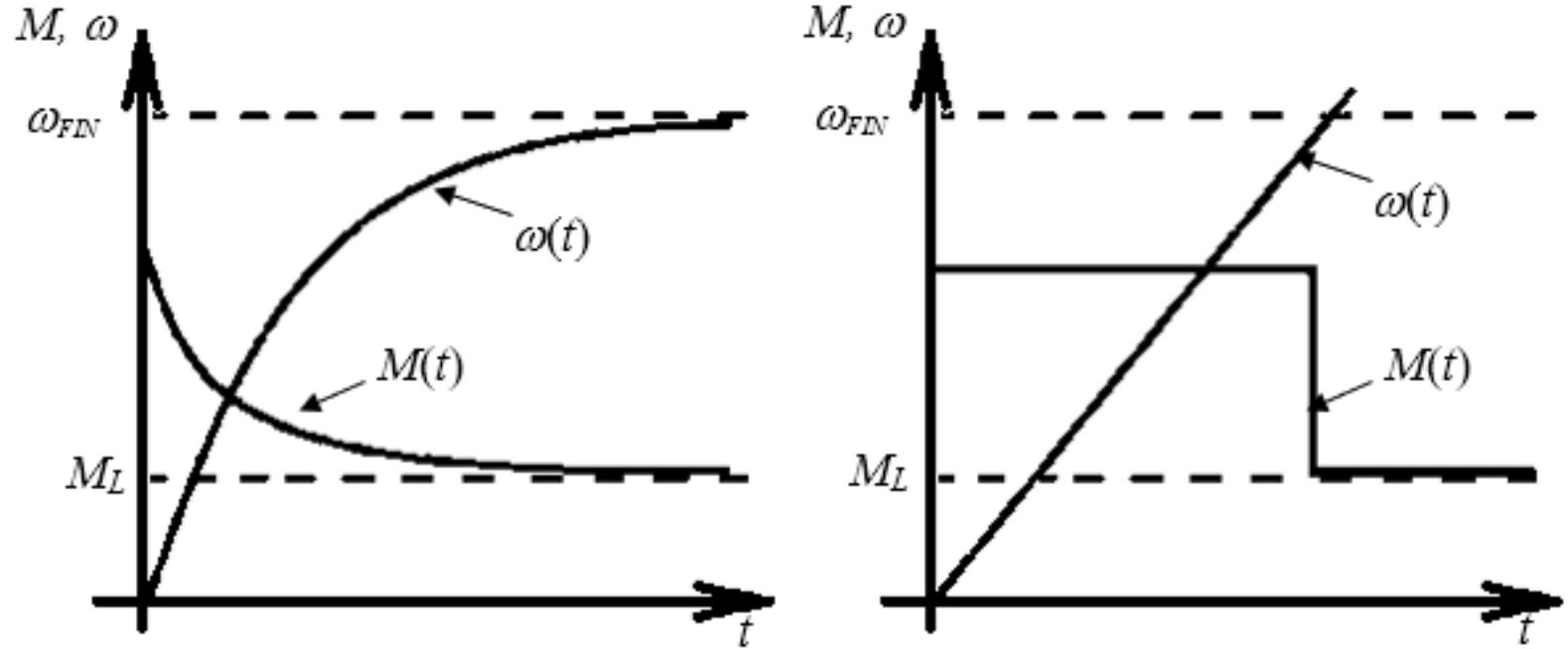
Электромеханическое действие поля (закон Ампера)



Сила действующая на проводник с током

Основы электрических машин

$$M - M_L = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}$$



Инерция:

Рисунок – Механические переходные процессы электропривода

- механическая инерция, связанная с накоплением или высвобождением кинетической энергии; его влияние на переходные процессы оценивается электромеханической постоянной времени T_m ;
- электромагнитная инерция, связанная с накоплением (или высвобождением) энергии в электромагнитном поле; электромагнитная инерция с точки зрения ее влияния на переходный процесс оценивается электромагнитной постоянной времени $T_e = L/R$

Классификация электрических машин

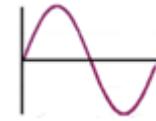
Электрические машины

Род тока

Постоянный ток
англ, D.C. (direct current)



Переменный ток
англ, A.C. (Alternating current)



Тип
электри-
ческих
машин

Двигатель
постоянного
тока - ДПТ
(англ, Direct
Current
Commutator
Machine)

Бесконтактный
двигатель
постоянного
тока - БДПТ
англ, BLDC
(Brushless DC
motor)

Синхронная
машина - СД
(англ,
Synchronous
Machine)

Асинхронная
машина - АД
(англ,
Induction
Machine)

Шаговый
Двигатель
ШД (англ,
Stepper
Motor)

Вентильный
двигатель
англ, PMSM
(Permanent Magnet
Synchronous Motor)

Вентильно-
индукторный
двигатель
(англ, Stepper
Motor)

Классификация электрических
машин

Классификация электрических машин

Электрические машины

Род тока

Постоянный ток
англ, D.C. (direct current)



Переменный ток
англ, A.C. (Alternating current)



Тип
электри-
ческих
машин

Двигатель
постоянного
тока - ДПТ
(англ, Direct
Current
Commutator
Machine)

Бесконтактный
двигатель
постоянного
тока - БДПТ
англ, BLDC
(Brushless DC
motor)

Синхронная
машина - СД
(англ,
Synchronous
Machine)

Асинхронная
машина - АД
(англ,
Induction
Machine)

Шаговый
Двигатель
ШД (англ,
Stepper
Motor)

Вентильный
двигатель
англ, PMSM
(Permanent Magnet
Synchronous Motor)

Вентильно-
индукторный
Двигатель - ВИД
(англ, SynRM
Synchronous
reluctance motors)

Классификация электрических
машин

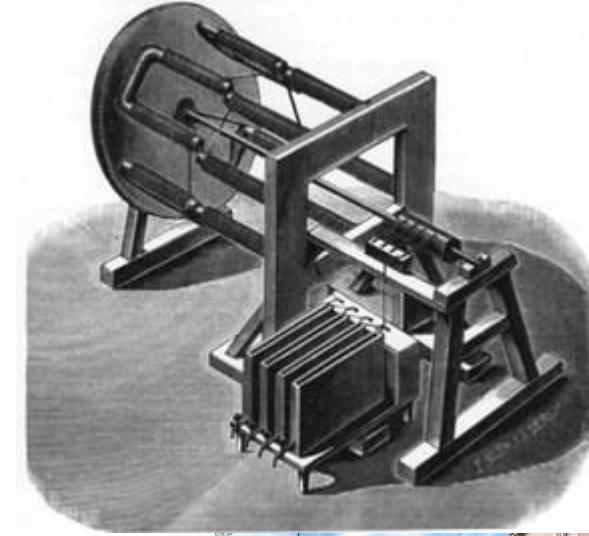
Машина постоянного тока

Достоинства:

- Управление: $\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{R_a}{K\Phi} I$
- Пусковой ток: $I_p = (5 - 10)I_n$
- Линейная механическая характеристика

Недостатки:

- Щеточно-коллекторный узел
 - Искрение
 - Дорогостоящее обслуживание
 - Недолговечность
 - Потери



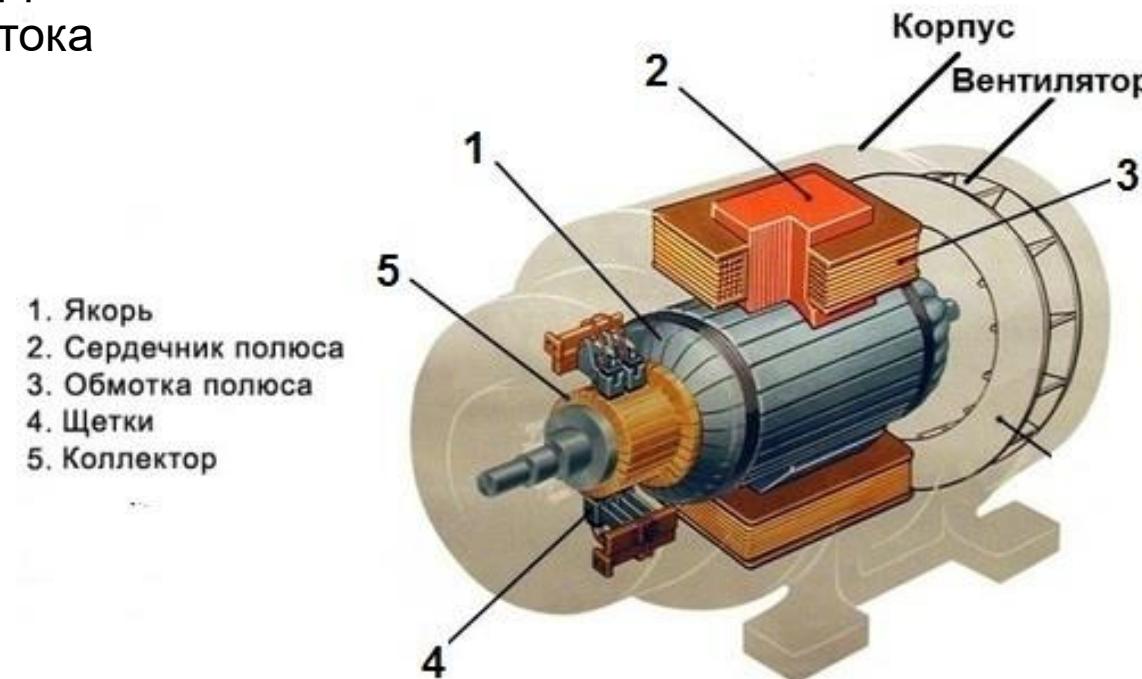
Первый
вращающийся
электродвигатель.
Якоби, 1834



Трамвай ЛМ-99

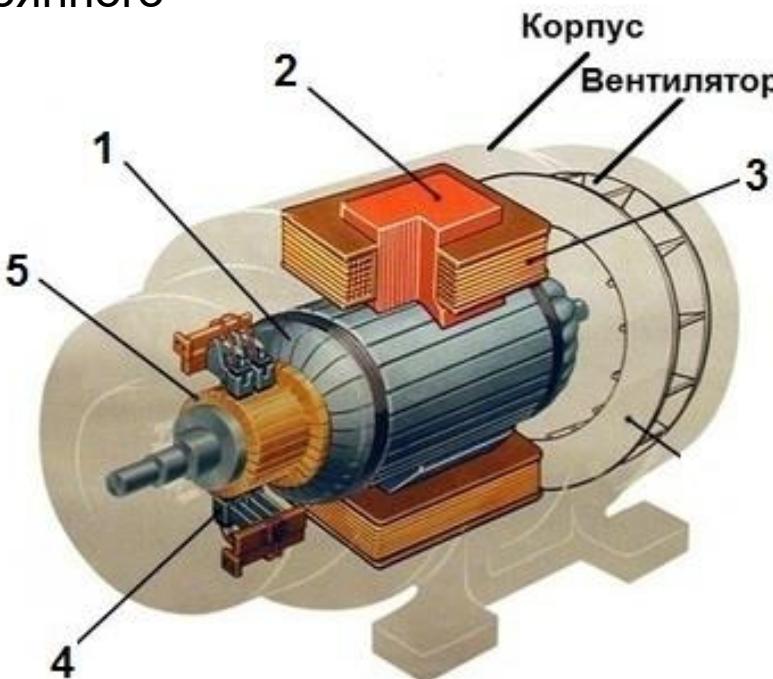
Конструкция и типы машин постоянного тока

Двигатель постоянного тока



Конструкция и типы машин постоянного тока

Двигатель постоянного тока



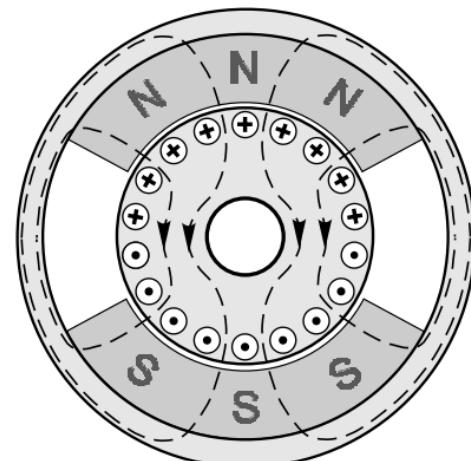
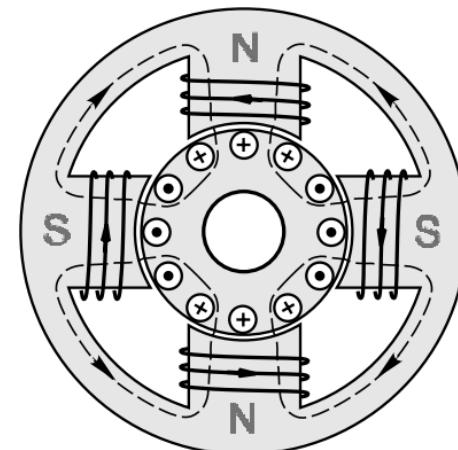
- 1. Якорь
- 2. Сердечник полюса
- 3. Обмотка полюса
- 4. Щетки
- 5. Коллектор

Электрические машины

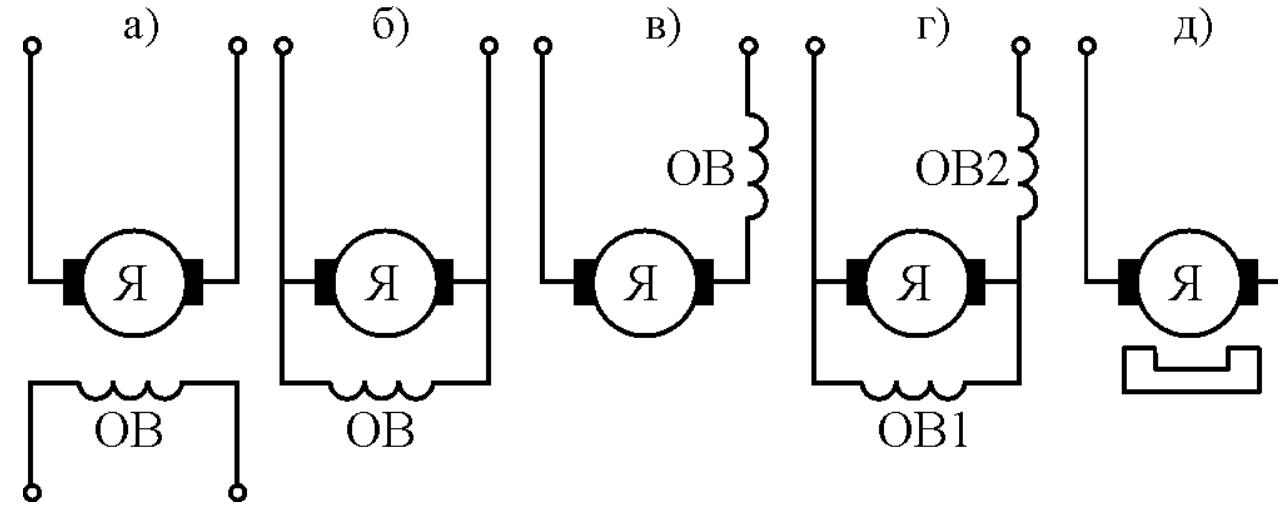
Машины постоянного тока (DC Machines)

Машины с
электромагнитным
возбуждением
Field Winding

Машины с
магнитоэлектрическим
возбуждением
Permanent Magnet



Типы (возбуждения) машин постоянного тока



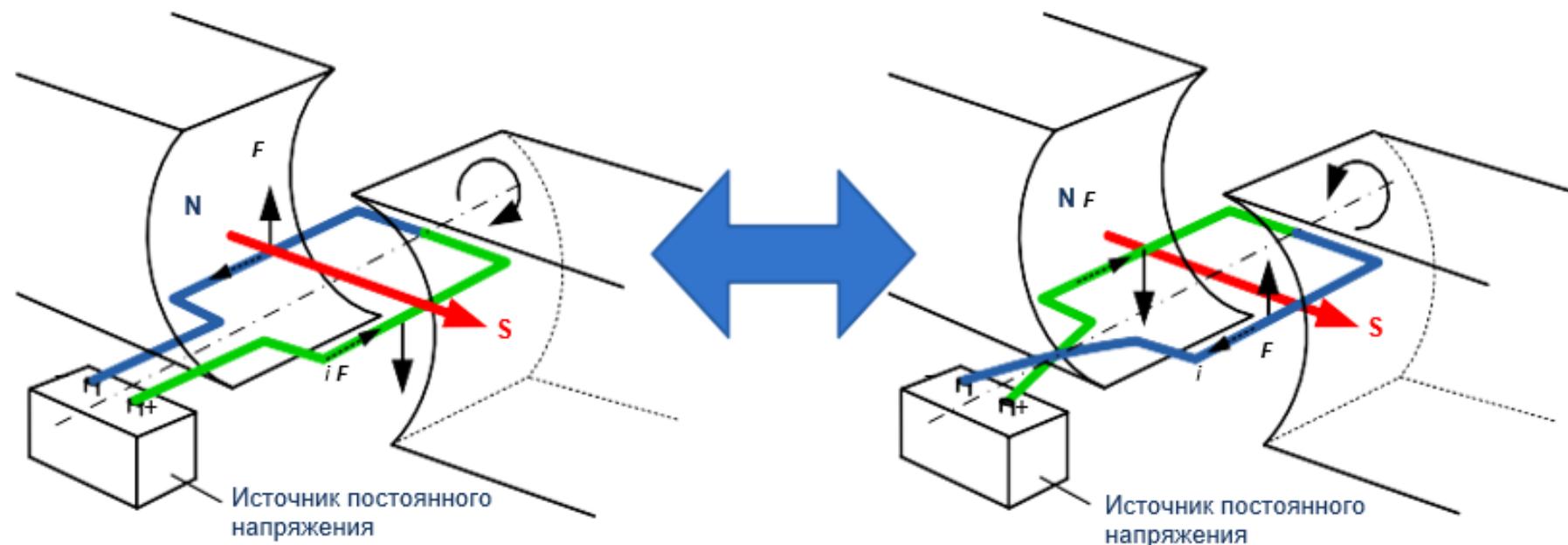
электромагнитное возбуждение (*англ, Field Winding*)

- а – независимое (*separately excited DC machine*)
- б – параллельное (*шунтовая DC machine*)
- в – последовательное (*series wound DC machine*)
- г – смешанное (*compound wound DC machine*)

магнитоэлектрическое возбуждение

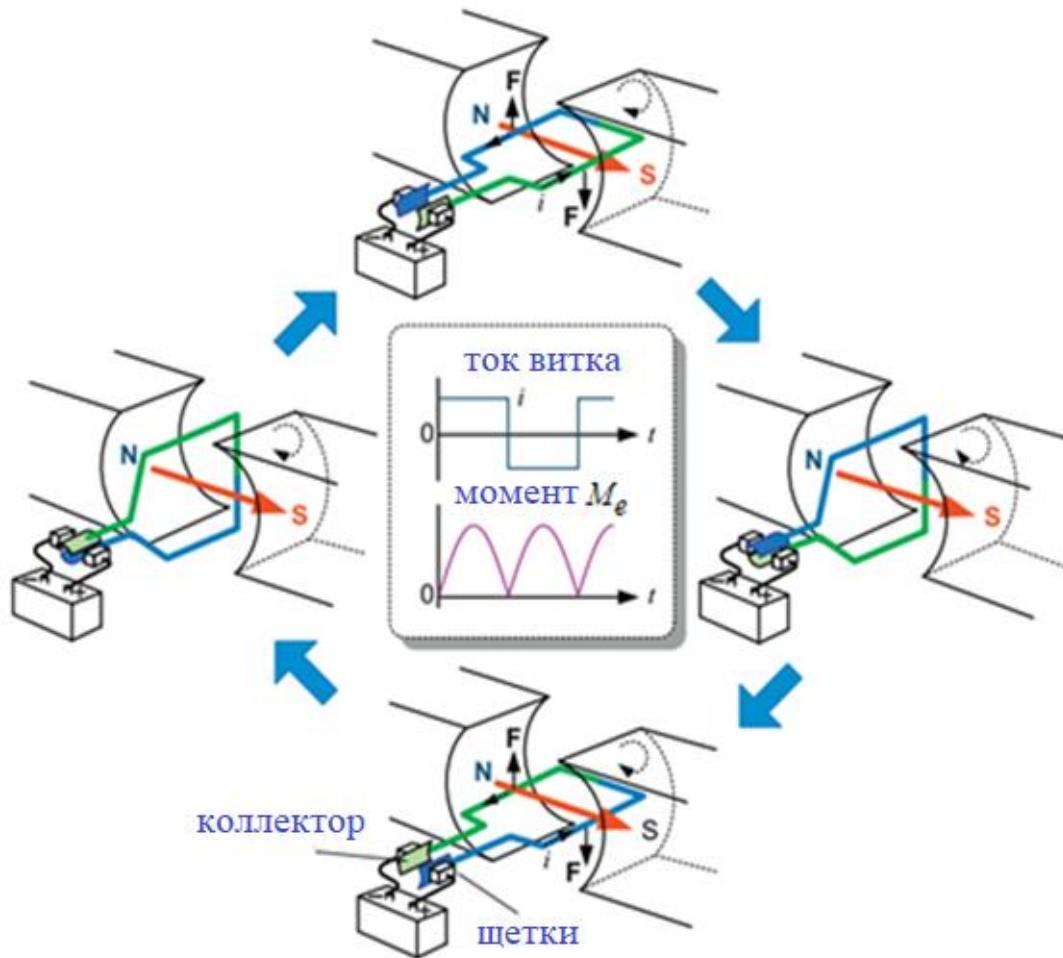
- д – независимое (*Permanent Magnet DC Motor – PMDC Motor*)

Принцип работы машины постоянного тока

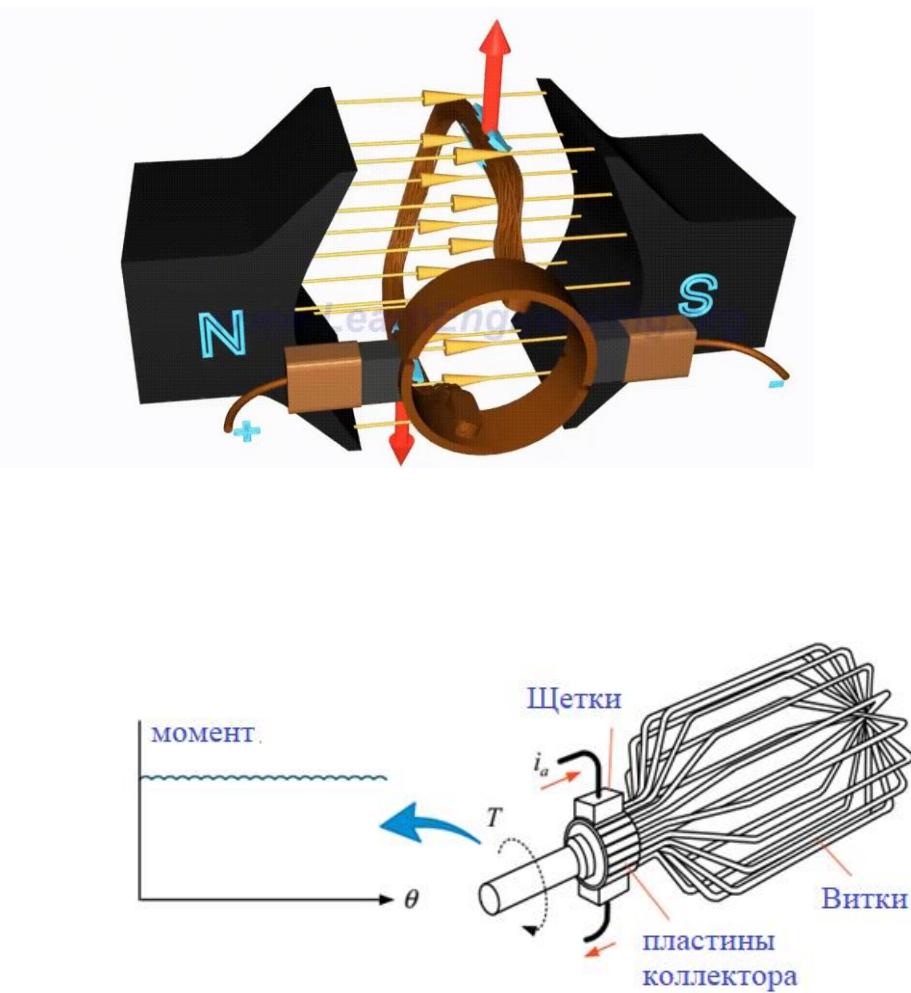


Действие силы на один виток

Принцип работы машины постоянного тока

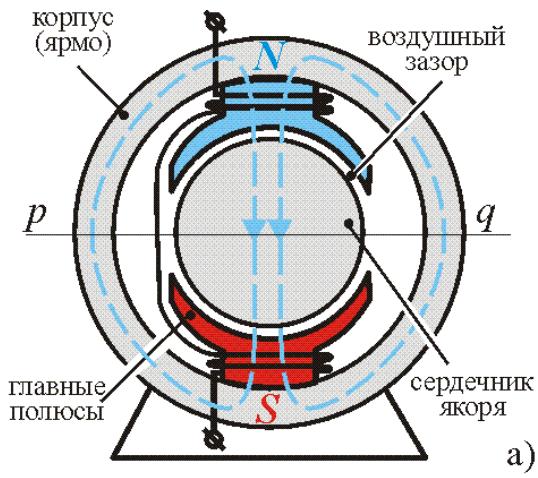


Постоянное вращение с использованием
щеточно-коллекторного узла

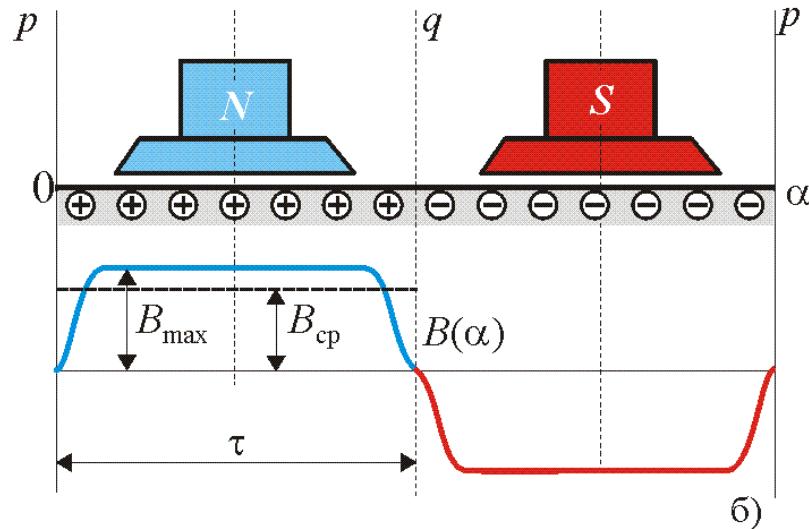


Обмотка якоря

Принцип работы машины постоянного тока

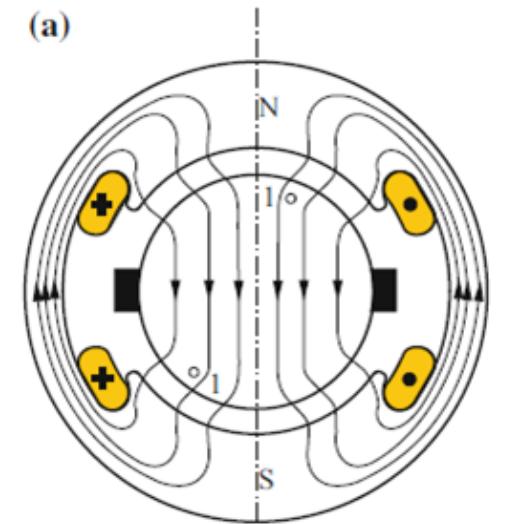


a)

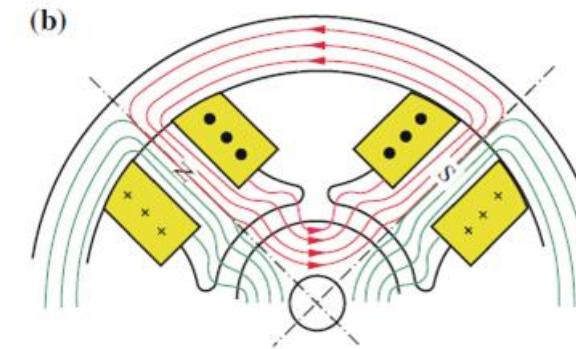


б)

Распределение индукции в зазоре



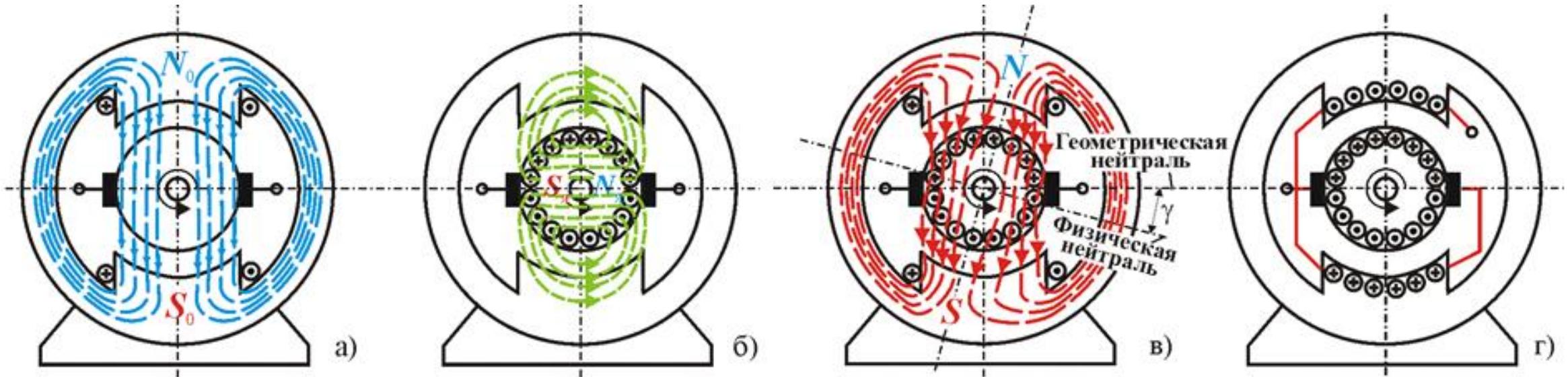
(а)



(б)

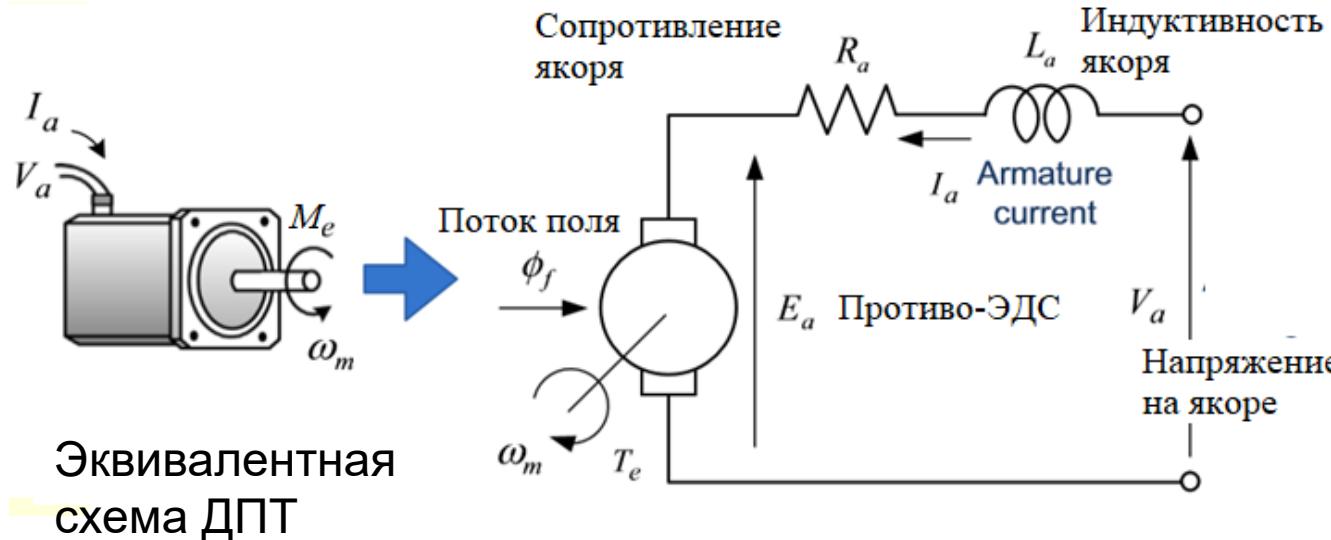
Силовые линии в
двигателе

Принцип работы машины постоянного тока



Реакция якоря в ДПТ: а) – магнитное поле главных полюсов б – магнитное поле якоря в) – результирующее магнитное поле двигателя г) – компенсационная на главных полюсах

Цепь якоря и электромагнитный момент



$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1.1)$$

где i_a - ток обмотки, L_a - индуктивность обмотки, R_a - сопротивление обмотки, e_a - противо-ЭДС, индуцированная вращением обмотки якоря в магнитном поле.

$$e_a = k_e \phi_f \omega_m \quad (\leftarrow e = Blv) \quad (1.2)$$

где k_e - постоянная противо- ЭДС (Вс/рад/Вб).

$$M_e = k_M \cdot \phi_f \cdot i_a \quad (\leftarrow F = Bli) \quad (1.3)$$

где k_M - постоянная момента (Нм/Вб/А). Величины k_M и k_e констант равны в единицах СИ, т.е., $k_M = k_e$.

$$M_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m + M_L \quad (1.4)$$

где ω_m – угловая скорость ротора, M_L – момент нагрузки, J – момент инерции и B –коэффициент трения .

Механическая характеристика ДПТ

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \\ M_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m + M_L \end{array} \right. \quad \text{установившийся режим} \Rightarrow di_a/dt = 0, d\omega_m/dt = 0$$

$$\boxed{\omega_m = \frac{V_a}{k\phi_f} - \frac{R_a}{(k\phi_f)^2} M_L} \quad (k = k_M = k_e) \quad (1.5)$$

здесь коэффициентов B пренебрегли.

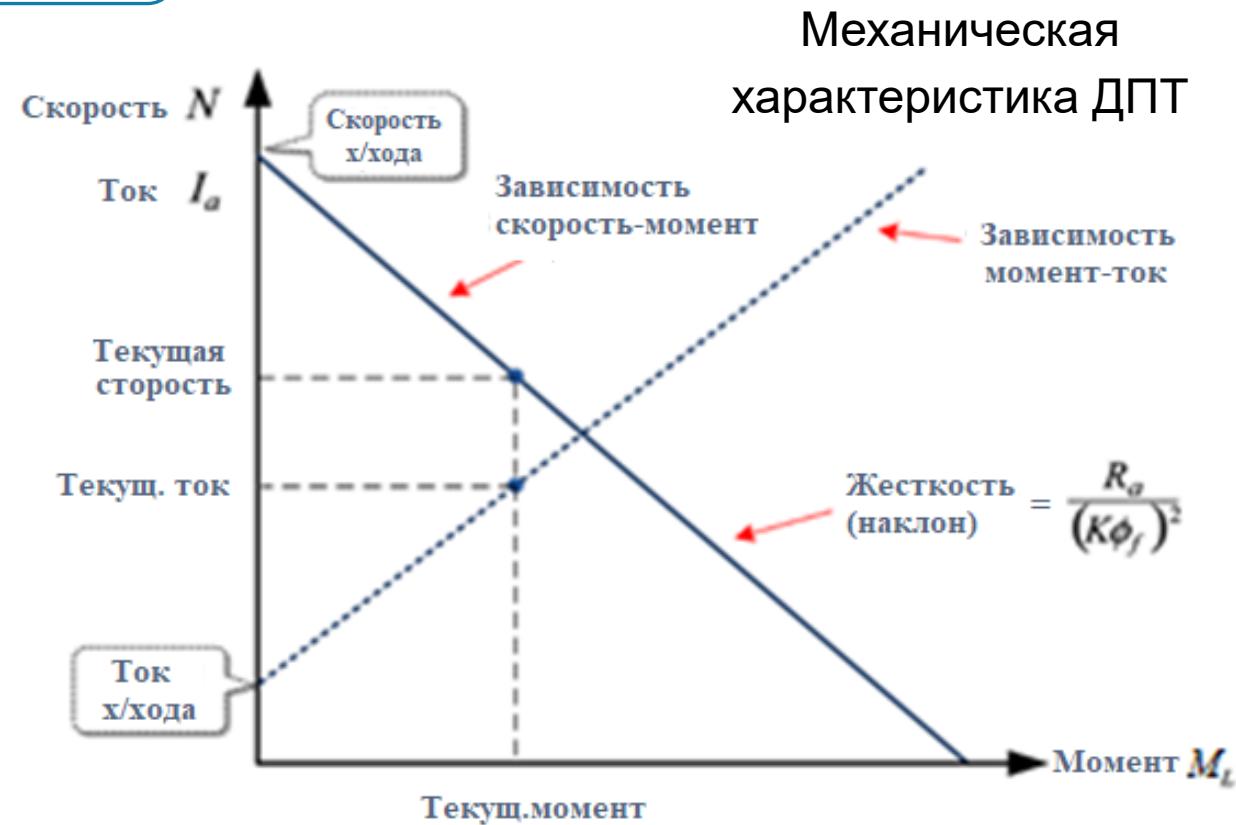
- управление напряжением якоря
- управление магнитным потоком

$$\omega_{m0} = \frac{V_a}{k\phi_f}$$

Скорость холостого хода
no-load speed (при $M_L = 0$)

$$M = \frac{(k\phi_f)V_a}{R_a}$$

Момент пусковой
stall torque (при $\omega_m = 0$)

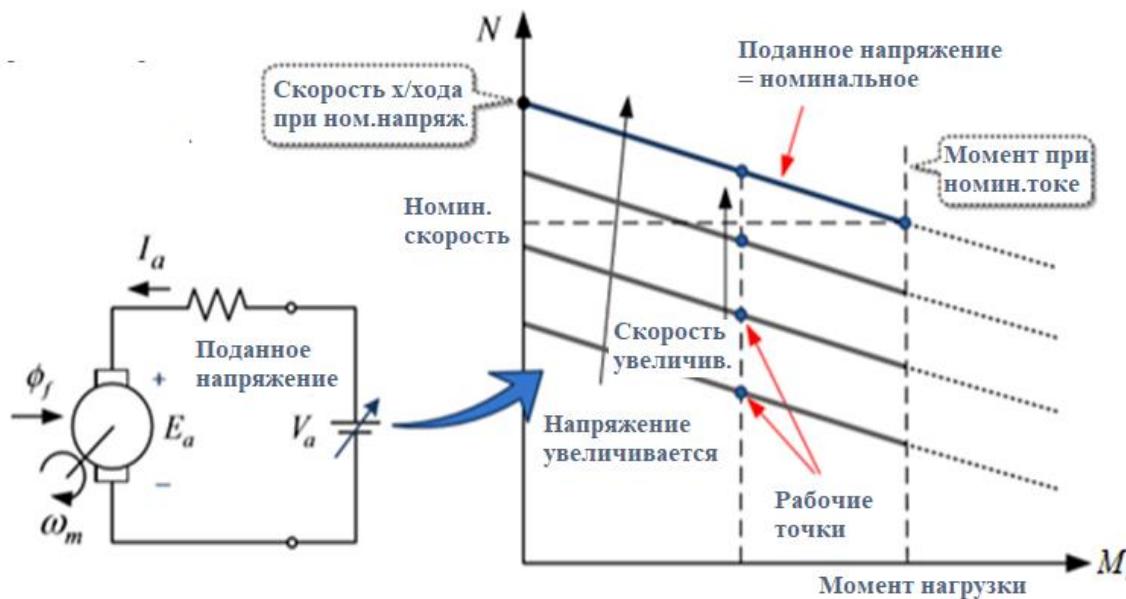


Управление напряжением на якоре

При постоянном потоке поля статора из уравнение (1.5) перепишется:

$$\omega_m = \frac{V_a}{k\phi_f} - \frac{R_a}{(k\phi_f)^2} M_L = K_1 V_a - K_2 M_L \quad (1.6)$$

где $K_1 = 1/k\phi_f$ и $K_2 = R_a/(k\phi_f)^2$



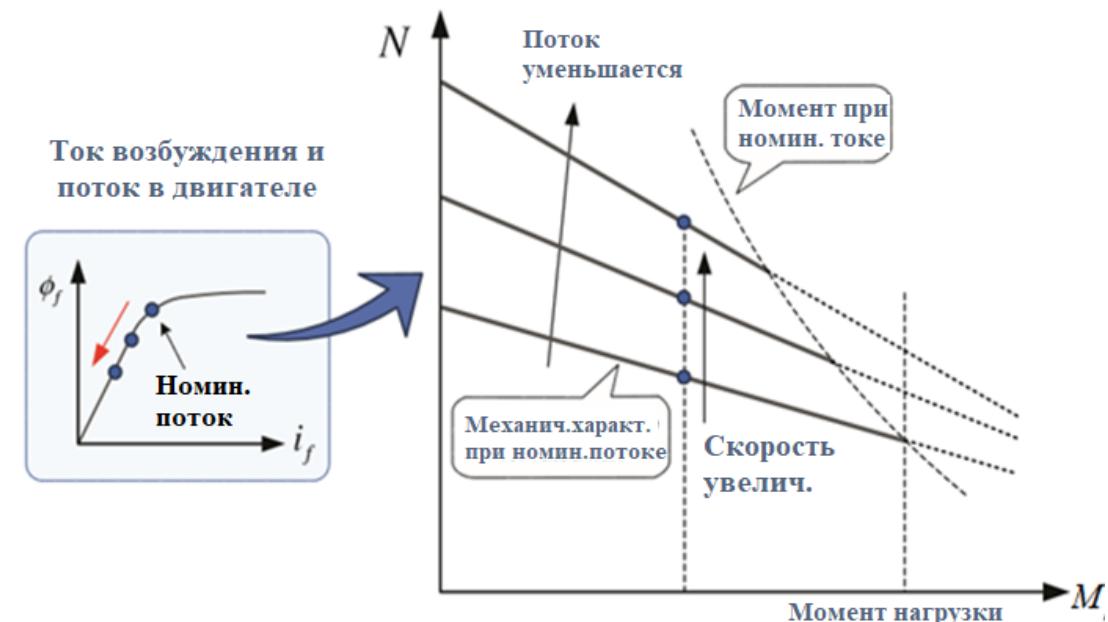
Регулирование только до номинального напряжения!

Управление потоком

При постоянном напряжении якоря уравнение (1.5) можно переписать :

$$\omega_m = \frac{V_a}{k\phi_f} - \frac{R_a}{(k\phi_f)^2} M_L = \frac{K'_1}{\phi_f} - \frac{K'_2}{\phi_f^2} M_L \quad (1.7)$$

где $K'_1 = V_a/k$ и $K'_2 = R_a/k^2$.



Поток поля должен регулировать вниз от номинального значения, чтобы избежать магнитного насыщения!

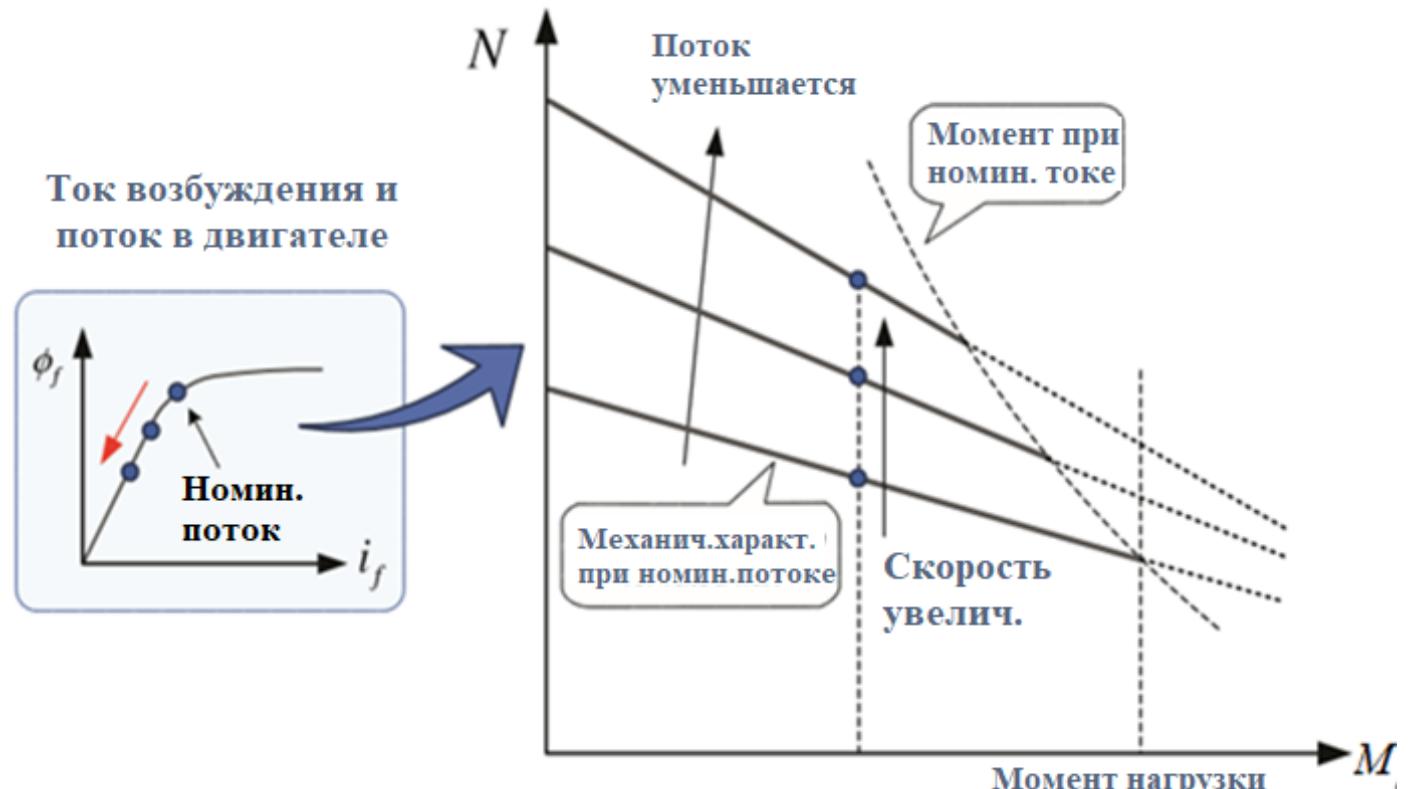
Управление потоком

При постоянном напряжении якоря
уравнение (1.5) можно переписать :

$$\omega_m = \frac{V_a}{k\phi_f} - \frac{R_a}{(k\phi_f)^2} M_L = \frac{K_1}{\phi_f} - \frac{K_2}{\phi_f^2} M_L \quad (1.7)$$

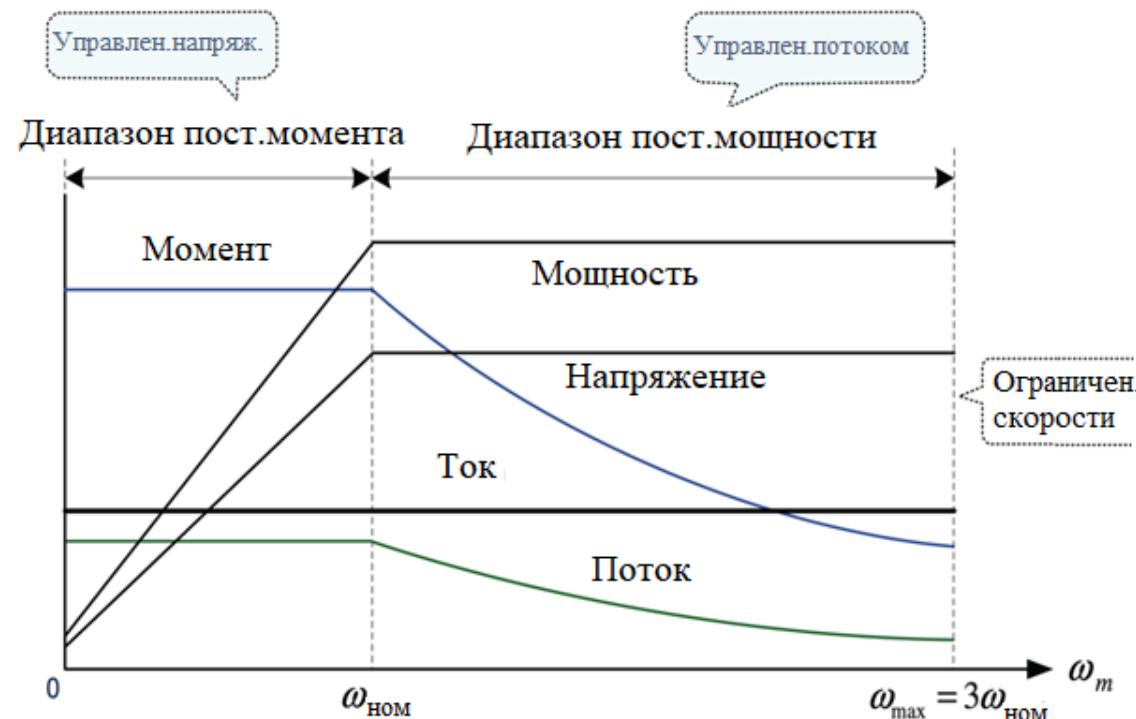
где $K_1 = V_a/k$ и $K_2 = R_a/k^2$.

Поток поля должен регулировать вниз от номинального значения, чтобы избежать магнитного насыщения железного сердечника !



Управление потоком

Диапазоны регулирования для ДПТ



Характеристики управления ДПТ

Диапазон постоянного момента
($0 \leq \omega_m \leq$ базовая/номинальная скорость ω_b)

Диапазон постоянной мощности
($\omega_m \geq$ базовая /номинальная скорость):
диапазон ослабления потоком

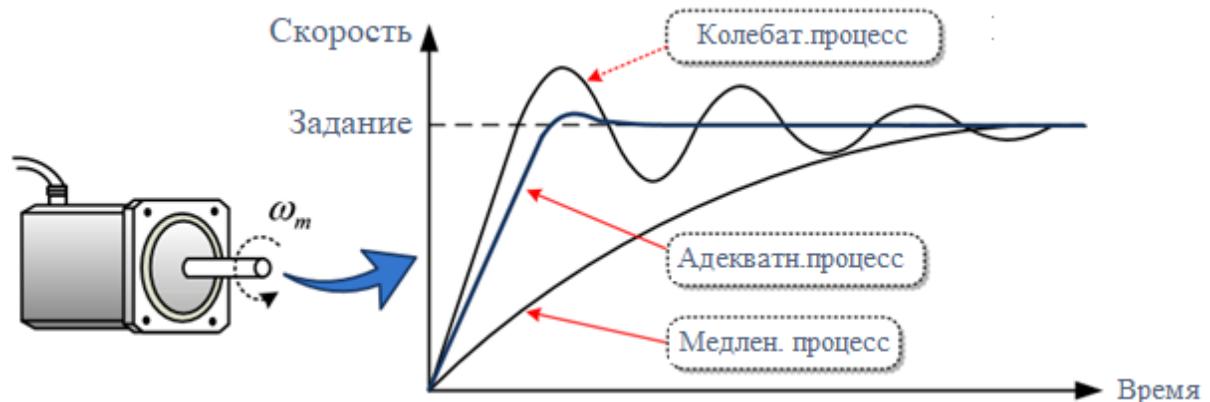
$$P = V_a \cdot I_a = M_e \cdot \omega_m = \text{const}$$

Переходные характеристики в ДПТ

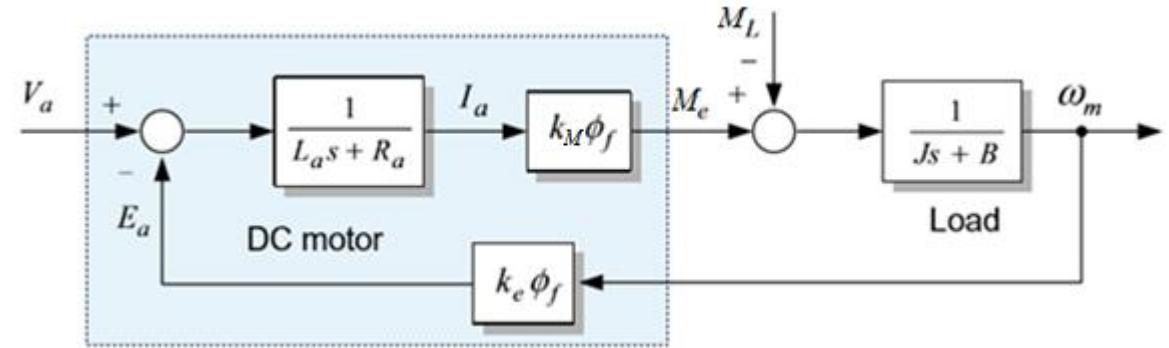
$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \rightarrow \\ V_a(s) = (R_a + sL_a)I_a(s) + E_a(s) = \\ = (R_a + sL_a)I_a(s) + k_e \phi_f \omega_m(s) \quad (1.8)$$

$$M_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m + M_L \rightarrow \\ M_e(s) = (J_s + B) \omega_m(s) + M_L = k_M \phi_f I_a(s) \quad (1.9)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{\frac{1}{L_a s + R_a} \cdot k_e \phi_f \cdot \frac{1}{J s + B}}{1 + \left(\frac{1}{L_a s + R_a} \cdot k_e \phi_f \cdot \frac{1}{J s + B} k_M \phi_f \right)} \\ = \frac{\frac{k}{J L_a}}{s^2 + \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{B}{J} \right) s + \left(\frac{R_a B}{L_a J} + \frac{k^2}{J L_a} \right)} \quad (k = k_M \phi_f = k_e \phi_f) \quad (1.10)$$



Переходный процесс при скачке задания



Блок-схема математической модели ДПТ

Переходные характеристики в ДПТ

Пусть $B=0$ в (1.10) тогда упрощен. передат. функция

$$\frac{\omega_m}{V_a} = \frac{\frac{k}{JL_a}}{s^2 + \left(\frac{R_a}{L_a}\right)s + \left(\frac{k^2}{JL_a}\right)} = \frac{\frac{1}{k} \left(\frac{R_a}{L_a} \cdot \frac{k^2}{JR_a}\right)}{s^2 + \left(\frac{R_a}{L_a}\right)s + \left(\frac{R_a}{L_a} \cdot \frac{k^2}{JR_a}\right)} \quad (1.11)$$

Электромеханич. постоянная $T_m = \frac{JR_a}{k^2}$,

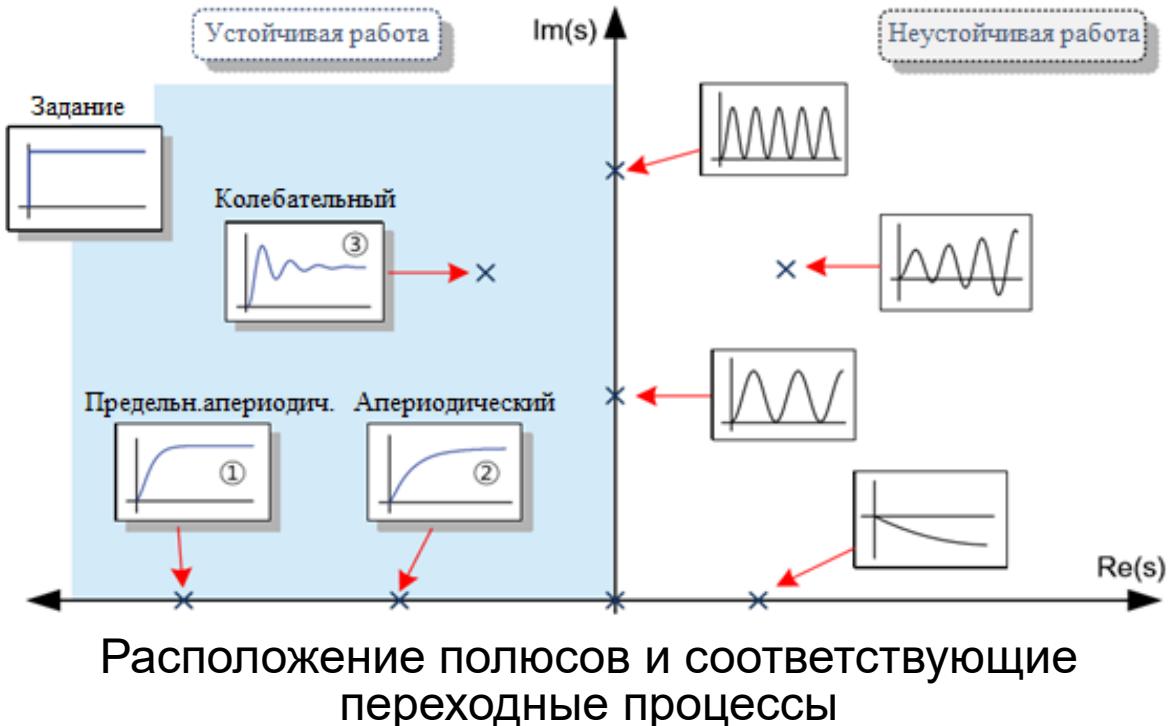
электромагнитная постоянная $T_a = L_a/R_a$, тогда (1.11) записывается:

$$\frac{\omega_m}{V_a} = \frac{\frac{1}{k} \left(\frac{1}{T_m T_a}\right)}{s^2 + \frac{1}{T_a}s + \frac{1}{T_m T_a}} \quad (1.12)$$

Полюса могут быть получены из корней знаменателя

- характеристического уравнения (1.12) как

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2T_a} \pm \frac{1}{T_a} \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{T_a}{T_m}} \quad (1.13)$$



Если $T_m \geq 4T_a$, то получим два действит.корня \Rightarrow ДПТ обладает большими значениями J или $R_a \Rightarrow$ апериодич. процесс ① or ②

Если $T_m < 4T_a$, то получим два комплексно-сопряжен.корня \Rightarrow колебат. процесс ③

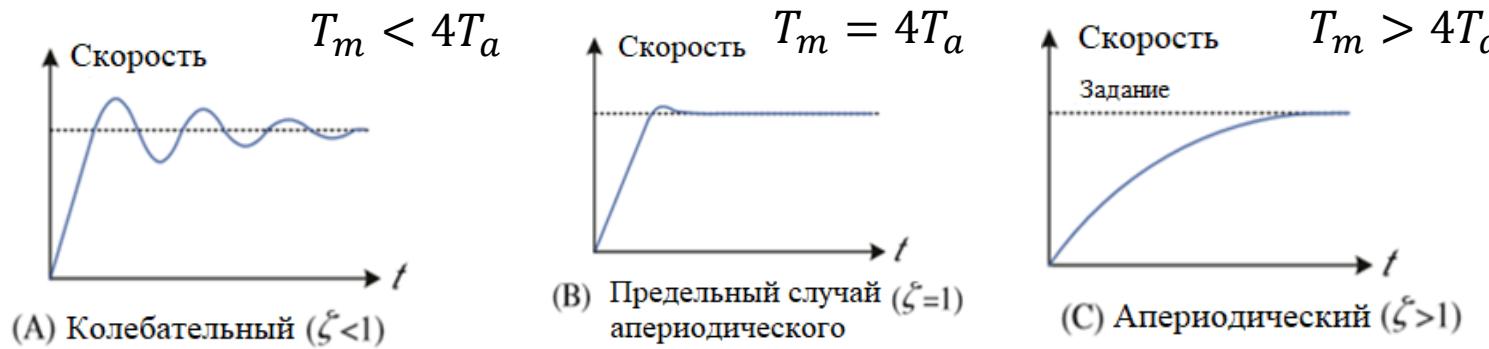
Переходные характеристики в ДПТ

$$\frac{\omega_m}{V_a} = \frac{\frac{1}{k} \left(\frac{1}{T_m T_a} \right)}{s^2 + \frac{1}{T_a} s + \frac{1}{T_m T_a}} \quad \longleftrightarrow \quad G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.14)$$

ω_n - собственн.частота колеб., ζ – коэффициент демпфирования

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{T_a T_m}} = \frac{k}{\sqrt{J L_a}} \quad (1.15)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_m}{T_a}} = \frac{1}{2} \frac{R_a}{k} \sqrt{\frac{J}{L_a}} \quad (1.16)$$



Реакция системы в соответствии с
коэф.демпфирования (A) Колебательные ($\zeta < 1$), (B)
предельный апериодич. ($\zeta = 1$), и (C) апериодический
($\zeta > 1$).

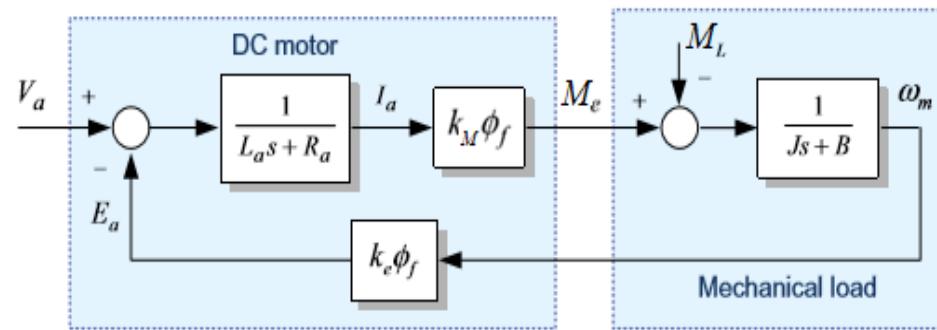
$$L_a = 0.$$

$$\frac{\omega_m}{V_a} = \frac{k}{R_a J s + k^2} = \frac{1}{k} \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

$$\omega_c = \frac{k^2}{R_a J} \quad \longrightarrow \quad \omega_c = \frac{\beta}{J}$$

$$\omega_m \sim V_a$$

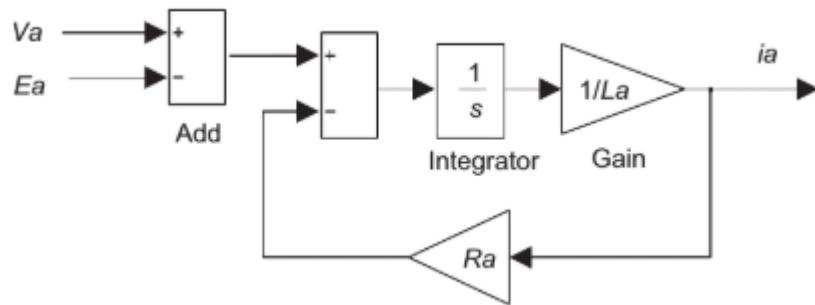
Математическая модель двигателя постоянного тока



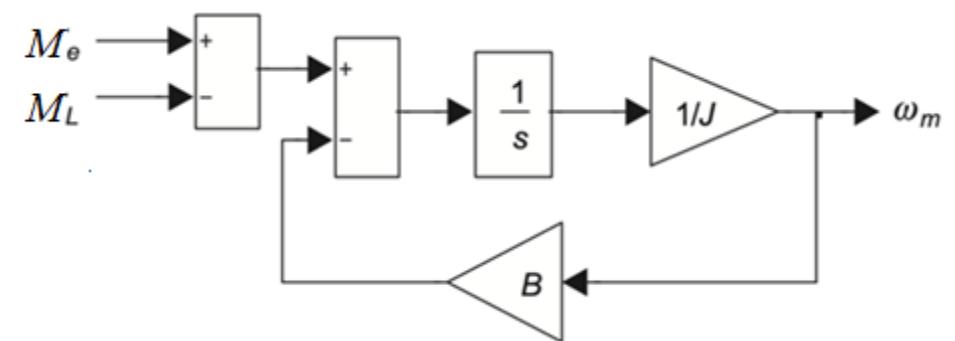
Блок-схема двигателя постоянного тока.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \rightarrow M_e = k_M \phi_i_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m + M_L \quad (19)$$

$$i_a(t) = \frac{1}{L_a} \int [V_a(\tau) - R_a i_a(\tau) - e_a(\tau)] d\tau \quad (18) \quad \rightarrow \omega_m(t) = \frac{1}{J} \int [M_e(\tau) - B \omega_m(\tau) - M_L(\tau)] d\tau$$

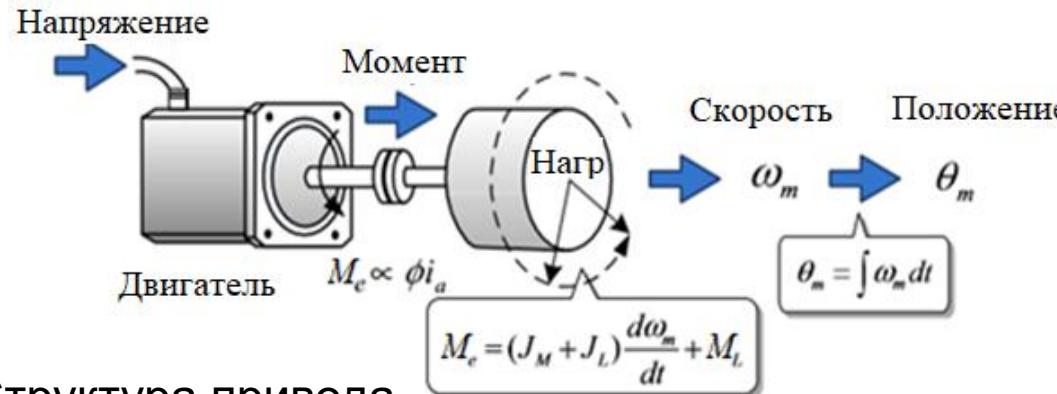


Блок-схема Simulink электрической цепи в двигателе постоянного тока

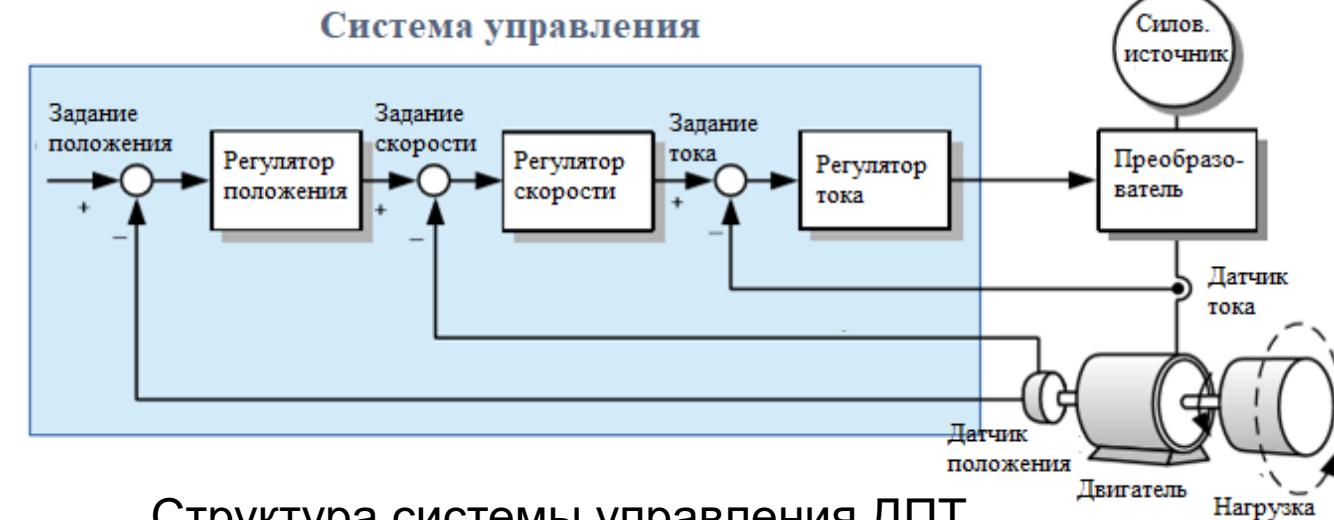


Блок-схема Simulink системы механической нагрузки

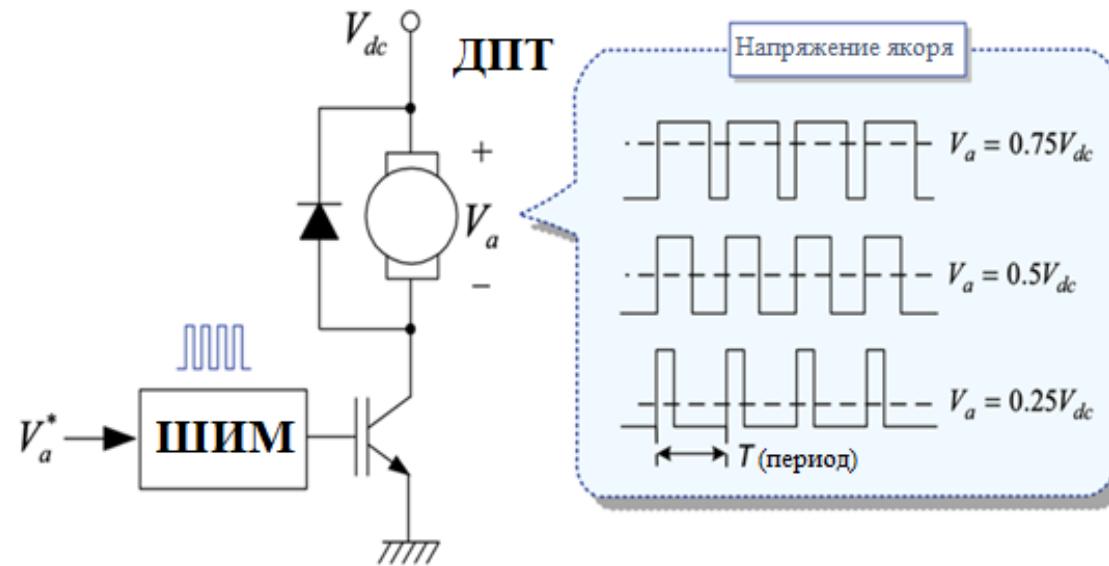
Структура системы управления ДПТ



Структура привода



Структура системы управления ДПТ



Простейшая схема управления ДПТ

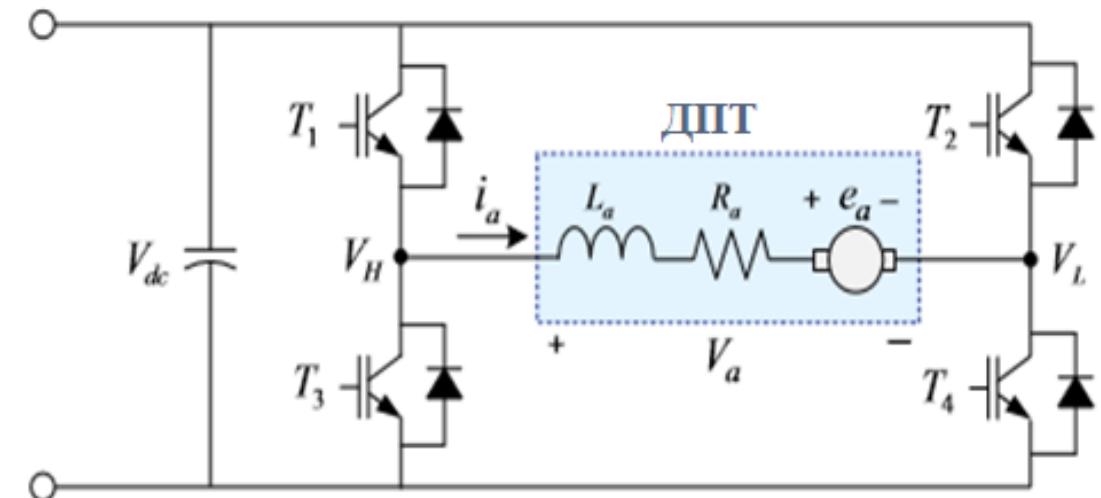
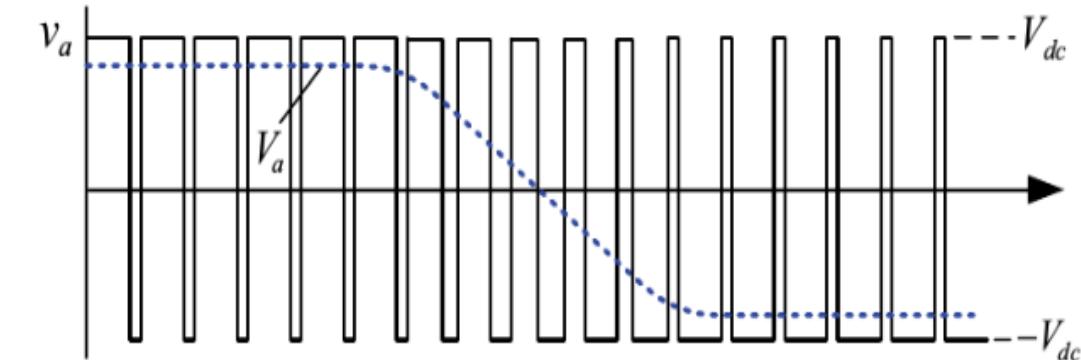
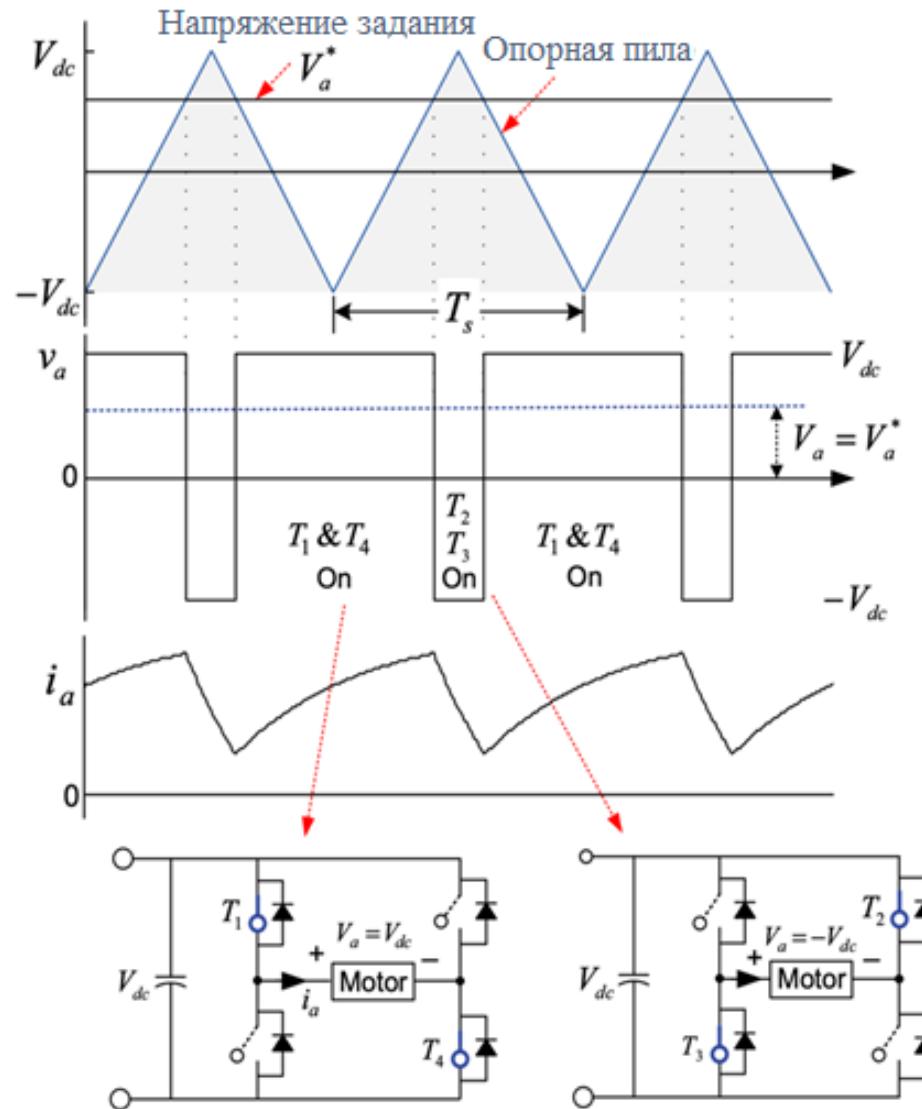


Схема с Н-мостом

Силовой преобразователь для двигателя постоянного тока



Симметричный режим ШИП (биполярн.импульсы)

Схема для симметричного режима ШИП

Силовой преобразователь для двигателя постоянного тока

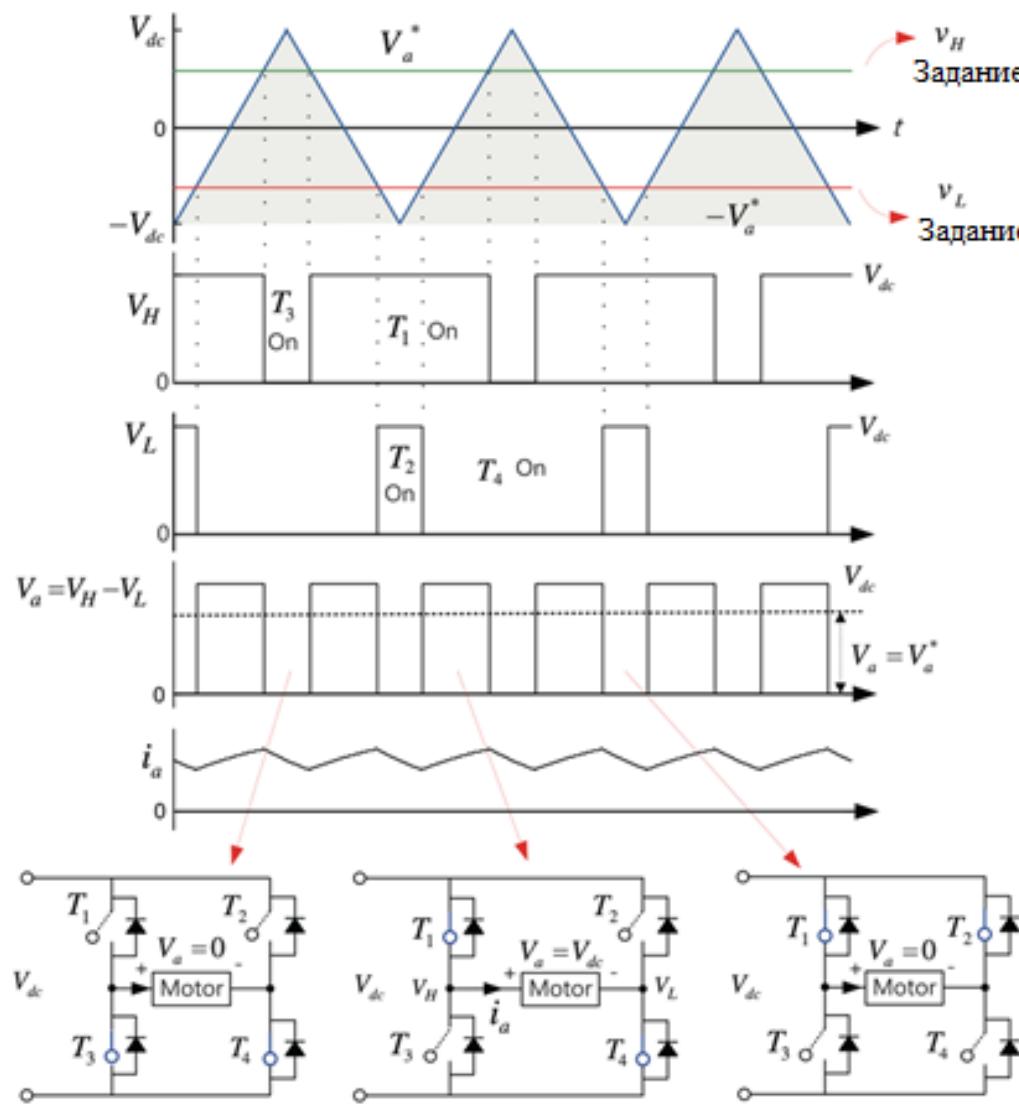
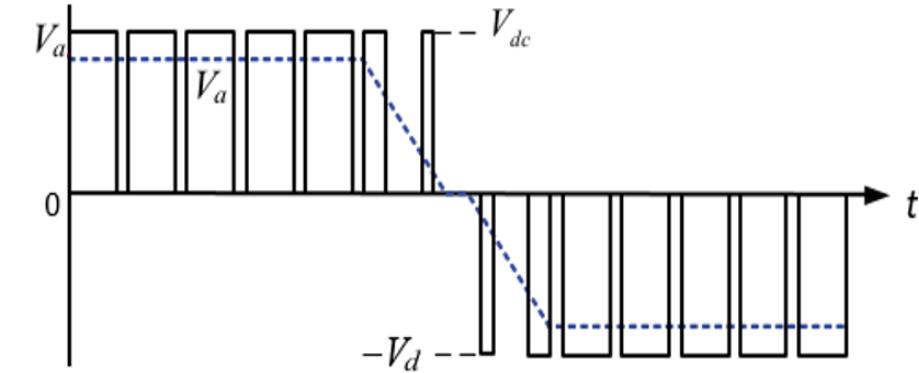
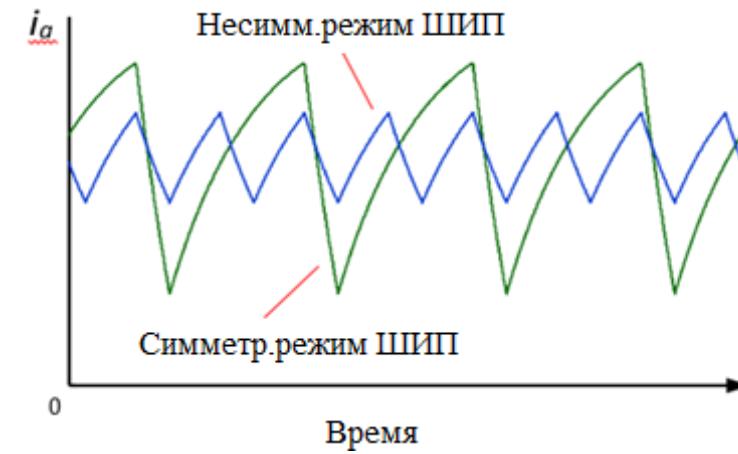


Схема для несимметричного режима ШИП



Несимметричный режим ШИП (однополярн.импульсы)



Сравнение пульсаций тока якоря при симметричном и несимметричном режиме ШИП

Классификация электрических машин

Электрические машины

Род тока

Постоянный ток
англ, D.C. (direct current)



Переменный ток
англ, A.C. (Alternating current)



Тип
электри-
ческих
машин

Двигатель
постоянного
тока - ДПТ
(англ, Direct
Current
Commutator
Machine)

Бесконтактный
двигатель
постоянного
тока - БДПТ
англ, BLDC
(Brushless DC
motor)

Синхронная
машина - СД
(англ,
Synchronous
Machine)

Асинхронная
машина - АД
(англ,
Induction
Machine)

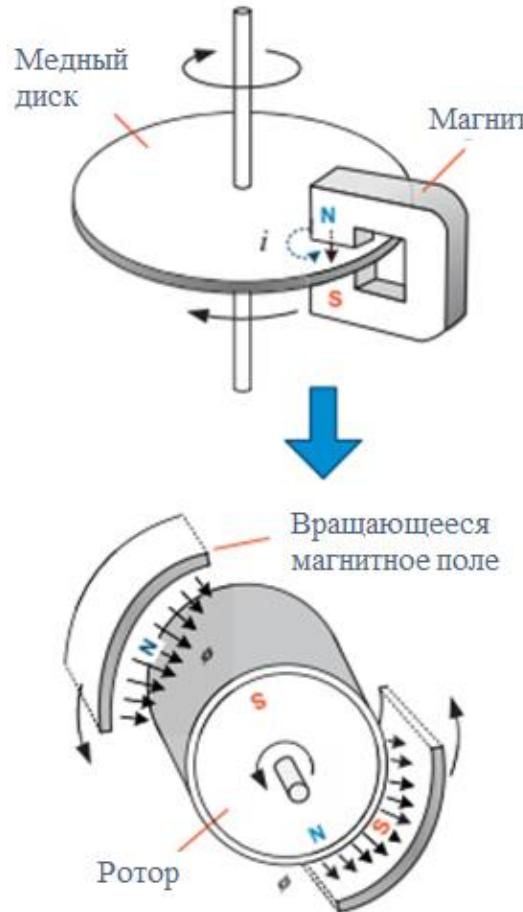
Шаговый
Двигатель
ШД (англ,
Stepper
Motor)

Вентильный
двигатель
англ, PMSM
(Permanent Magnet
Synchronous Motor)

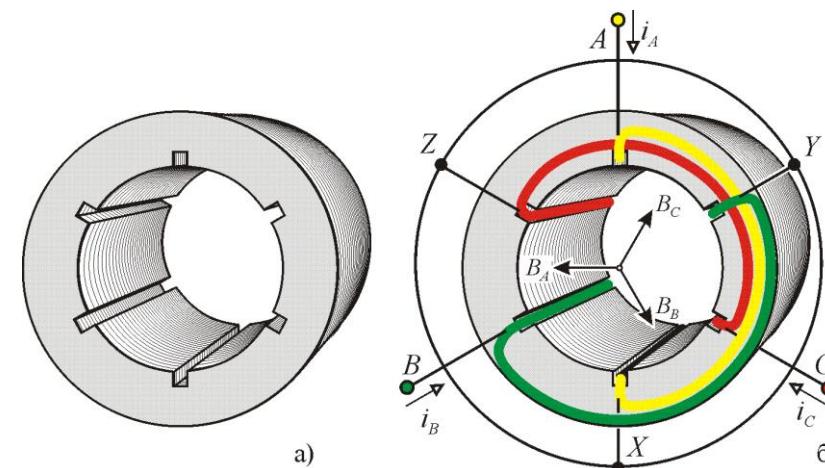
Вентильно-
индукторный
Двигатель - ВИД
(англ, SynRM
Synchronous
reluctance motors)

Классификация электрических
машин

Принцип работы асинхронного двигателя



Эксперимент с диском Арго
(1824г.) и принцип работы
Асинхронного двигателя



Статор асинхронного двигателя

Условия создания вращающегося магнитного поля:

- Оси трёх фазных обмоток статора смещены в пространстве по окружности пакета статора на 120°
- На статор подано трехфазное напряжение:
$$e_A = E_m \sin \omega_1 t;$$
$$e_B = E_m \sin(\omega_1 t - 2\pi / 3);$$
$$e_C = E_m \sin(\omega_1 t + 2\pi / 3)$$

Вращающееся магнитное поле

$$e_A = E_m \sin \omega_1 t;$$

$$e_B = E_m \sin(\omega_1 t - 2\pi / 3); \rightarrow$$

$$e_C = E_m \sin(\omega_1 t + 2\pi / 3)$$

$$i_A = I_m \sin \omega_1 t;$$

$$i_B = I_m \sin(\omega_1 t - 2\pi / 3); \rightarrow$$

$$i_C = I_m \sin(\omega_1 t + 2\pi / 3)$$

$$B_A = B_m \sin \omega_1 t;$$

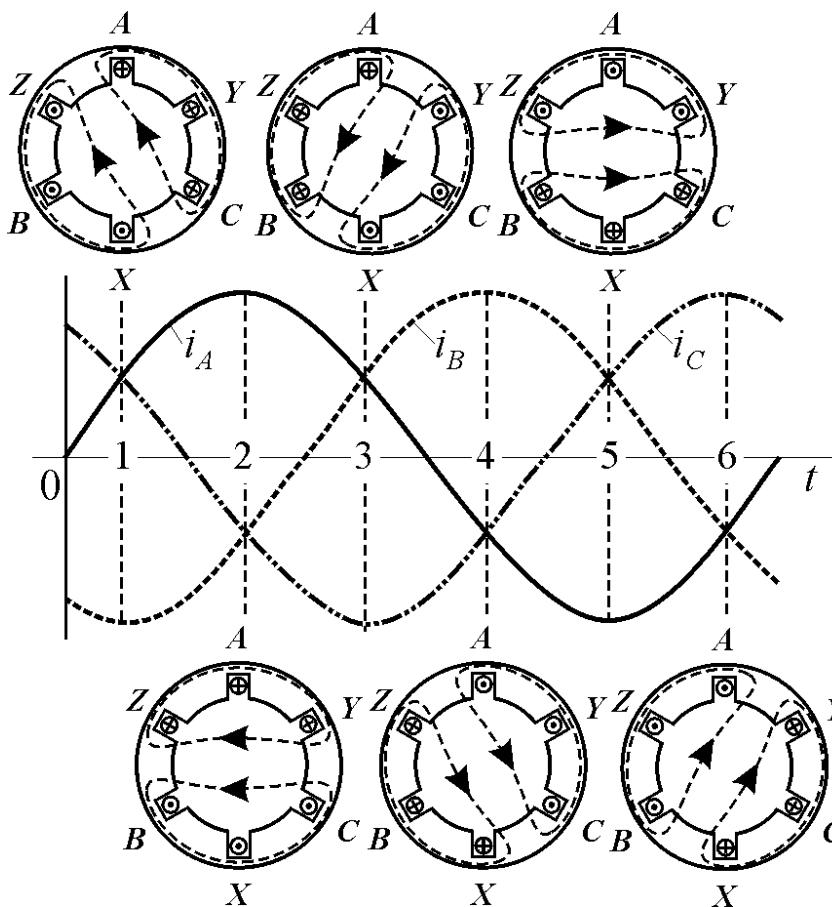
$$B_B = B_m \sin(\omega_1 t - 2\pi / 3); \rightarrow$$

$$B_C = B_m \sin(\omega_1 t + 2\pi / 3)$$

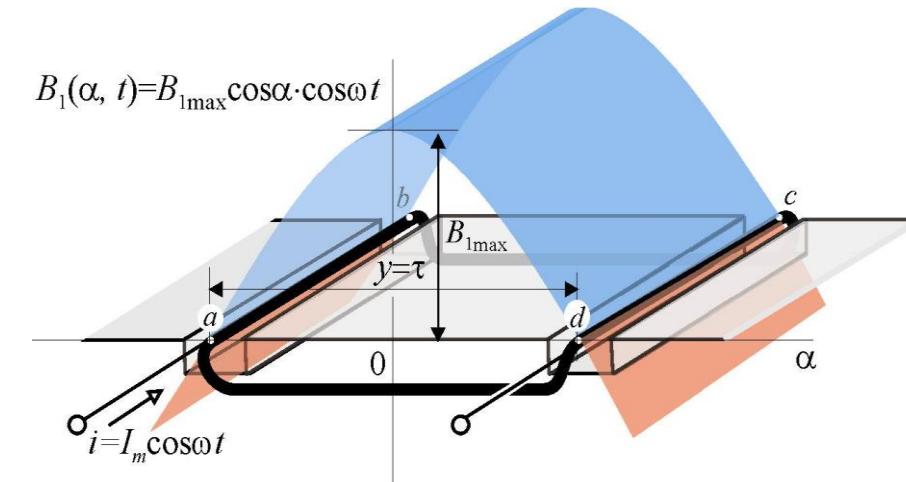
$$\underline{B} = \underline{B}_A + \underline{B}_B + \underline{B}_C$$

$$B(\alpha) = \frac{3}{2} B_m \sin(\omega_1 t - \alpha)$$

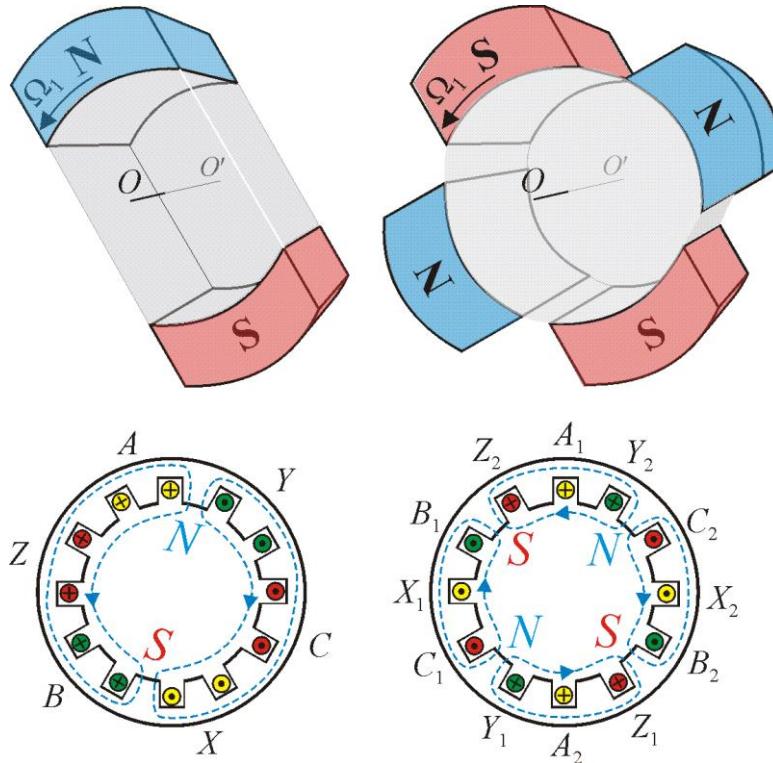
$$B_{\max} = \frac{3}{2} B_m$$



- единое электромагнитное поле.
круговое поле



Вращающееся магнитное поле



Магнитные поля с одной и двумя парами полюсов

$\theta_e = p \cdot \theta_m$ – соотношение между электрическим углом и механическим

Скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость)

$$\Omega_1 = 2\pi f_1 / p$$

$$n_1 = 60 f_1 / p$$

[рад/с]

[об/мин]

где ω_1 – частота питающей сети [рад/с], p – число пар полюсов магнитного поля, f_1 – частота питающей сети в герцах

Стандартный ряд значений: 3000, 1500, 1000, 750, 600... об/мин

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$$

- скольжение

$$\Omega_1 = \Omega + s \cdot \Omega_1 = \Omega + \Omega_2$$

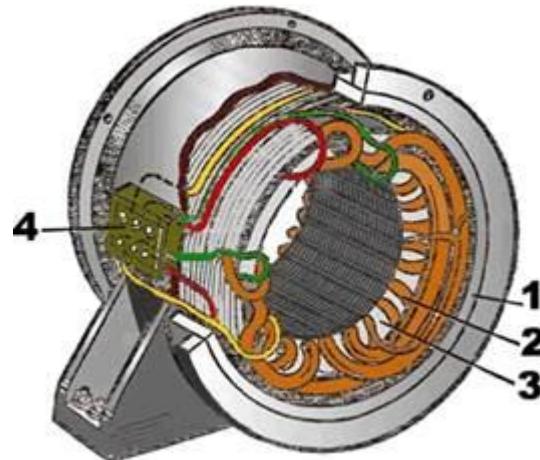
$$s = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}$$

ω_1 и ω_2

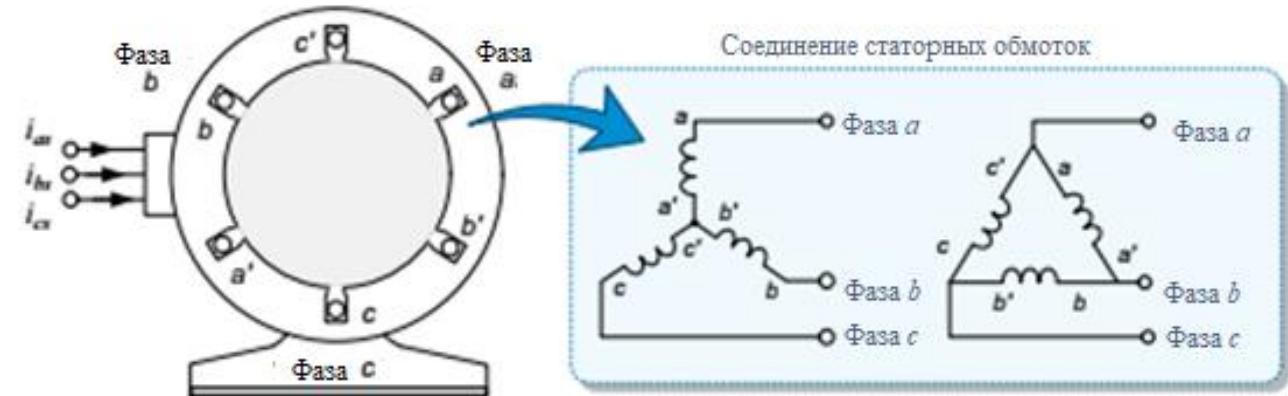
– частоты токов статора и ротора.

$\omega = \Omega \cdot p$ – угловая частота вращения ротора электрической машины с одной парой полюсов.

Статор асинхронного двигателя

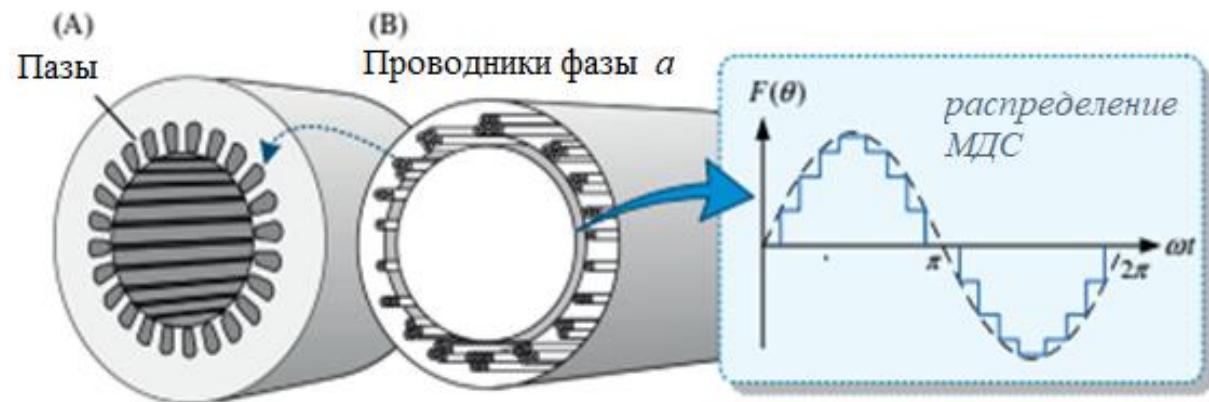


1 - сердечник, 2 - обмотка, 3 - станина, 4 – щиток



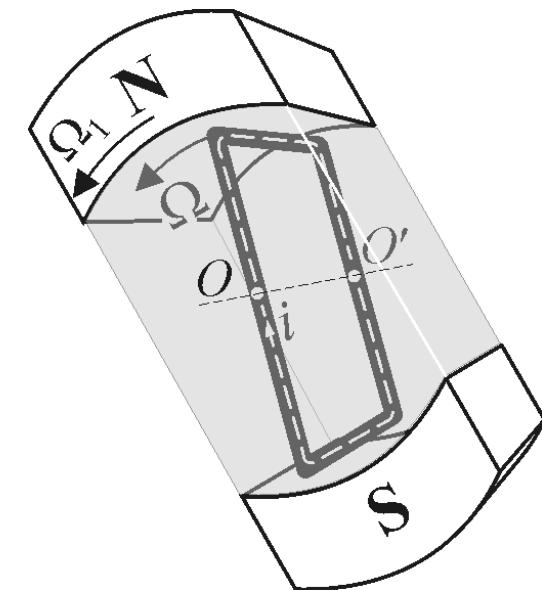
Соединение обмоток статора

Звезда	Треугольник
$U_L = \sqrt{3}U_\phi$	$U_L = U_\phi$
$I_L = I_\phi$	$I_L = \sqrt{3}I_\phi$
$S = 3S_\phi = \sqrt{3}I_L U_L$	$S = \sqrt{3}I_L U_L$
$P = \sqrt{3}I_L U_L \cos\varphi$	$P = \sqrt{3}I_L U_L \cos\varphi$



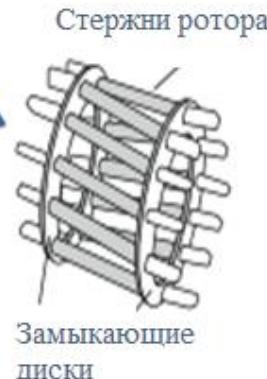
Сердечник статора (А) Синусоидальное распределение МДС (В) $F = I * w$

Устройство ротора и принцип действия АД

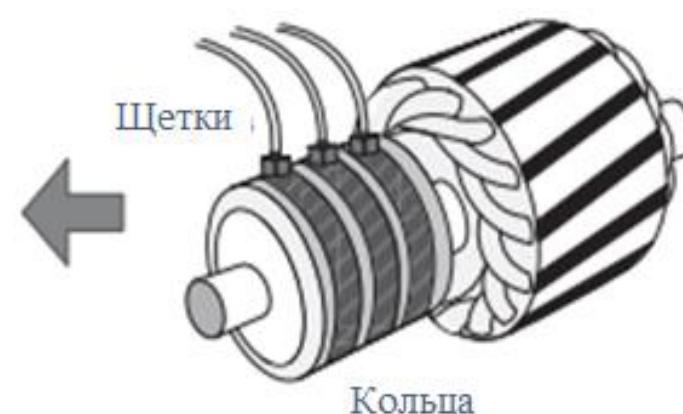
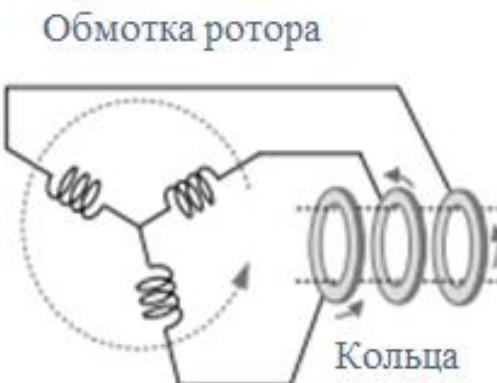


$$I_1 \rightarrow \Phi_0 \rightarrow \Omega_1 \xrightarrow{\Omega_1 \neq \Omega} F = Bl \sin \alpha$$
$$\rightarrow E_2 \rightarrow I_2 \rightarrow F \rightarrow M \rightarrow \Omega \quad e = -w \frac{d\Phi}{dt}$$

- электромагнитная сила
- наводимое в роторе ЭДС



Короткозамкнутый
ротор



Фазный ротор



Фазный ротор

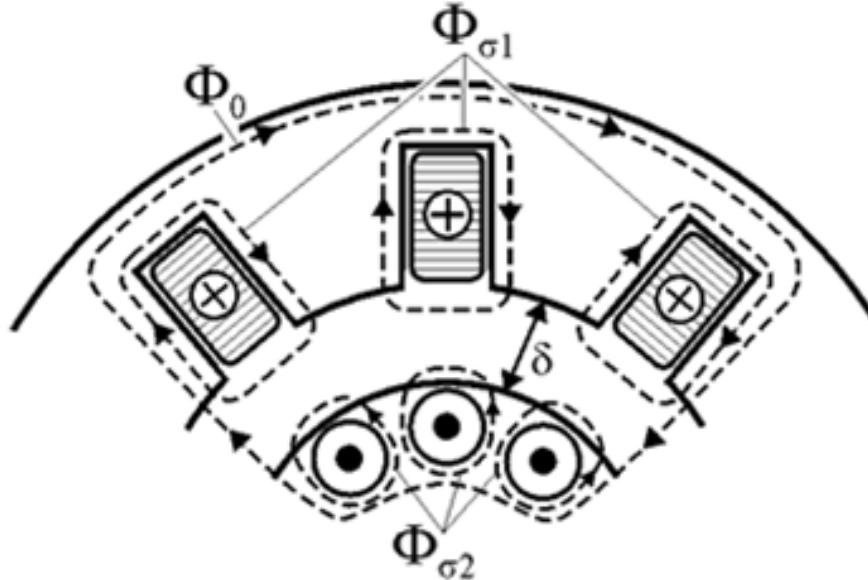
Электродвижущие силы и магнитные потоки обмоток

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} \Rightarrow E_1 = E_{1m} / \sqrt{2} = 2\pi f_1 k_{ob1} w_1 \Phi_{0m} / \sqrt{2} = 4,44 k_{ob1} w_1 f_1 \Phi_{0m}$$

$E_2 = 4,44 k_{ob2} w_2 f_1 \Phi_{0m}$ - ЭДС неподвижного ротора - ЭДС наводимое в статоре

$$E_{2s} = 4,44 k_{ob2} w_2 f_2 \Phi_{0m} = 4,44 k_{ob2} w_2 s f_1 \Phi_{0m} = s E_2 \text{ - ЭДС вращающегося ротора}$$

$$f_2 = s f_1 \Leftrightarrow \omega_2 = s \omega_1$$

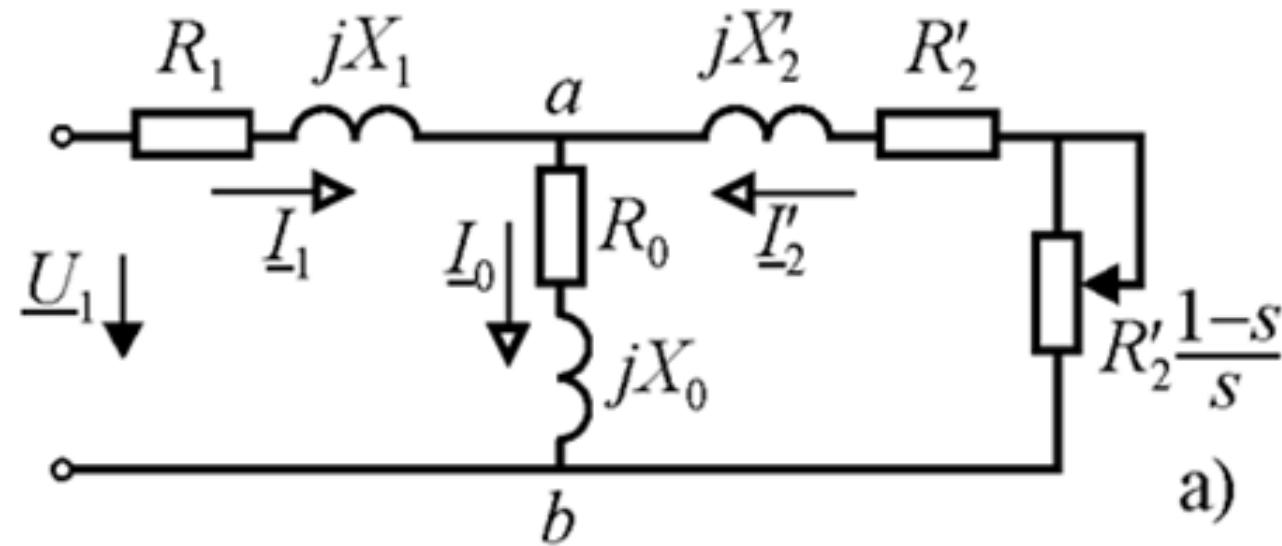


$$e_{\sigma 1} = -\frac{d\Psi_{\sigma 1}}{dt} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \quad e_{\sigma 2} = -\frac{d\Psi_{\sigma 2}}{dt} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}$$

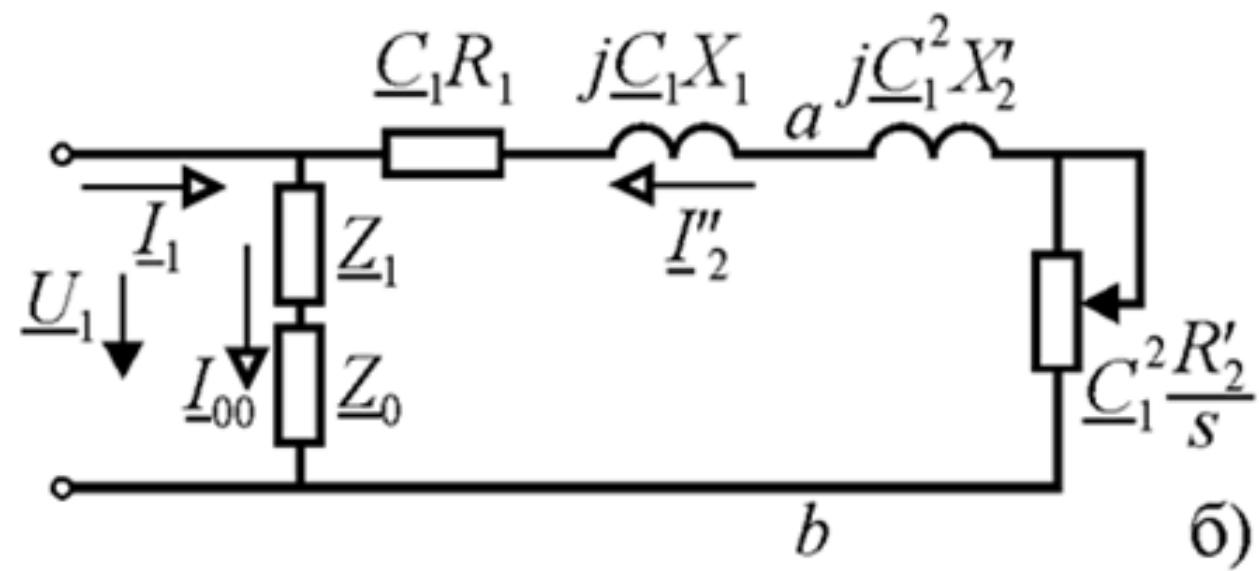
$$\underline{E}_{\sigma 1} = -j\omega_1 L_{\sigma 1} \underline{I}_1 = -jX_1 \underline{I}_1; \\ \underline{E}_{\sigma 2} = -j\omega_2 L_{\sigma 2} \underline{I}_2 = -jX_{2s} \underline{I}_2 = -jsX_2 \underline{I}_2,$$

где $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ – индуктивности потокосцеплений рассеяния статора и ротора.

Схема замещения асинхронного двигателя

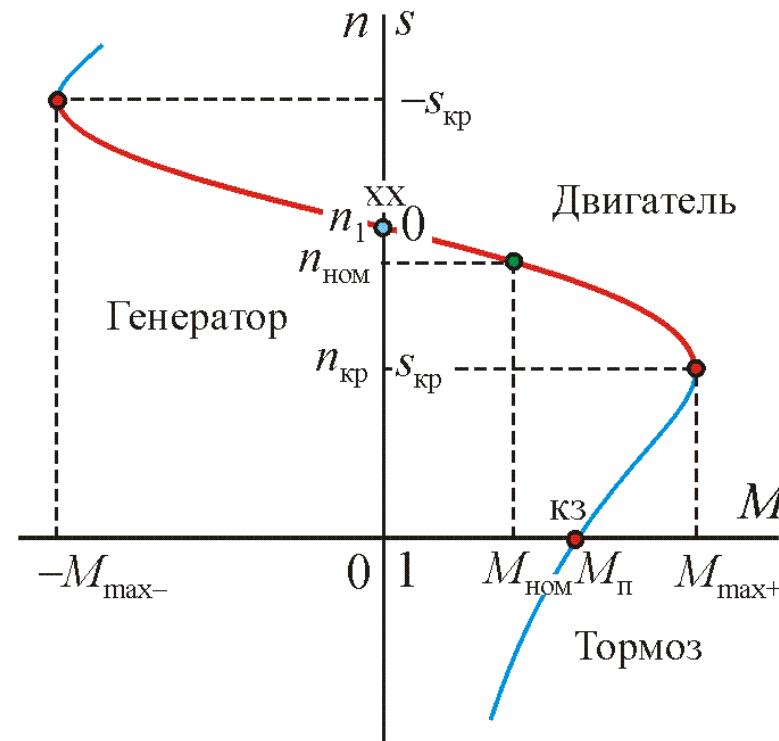
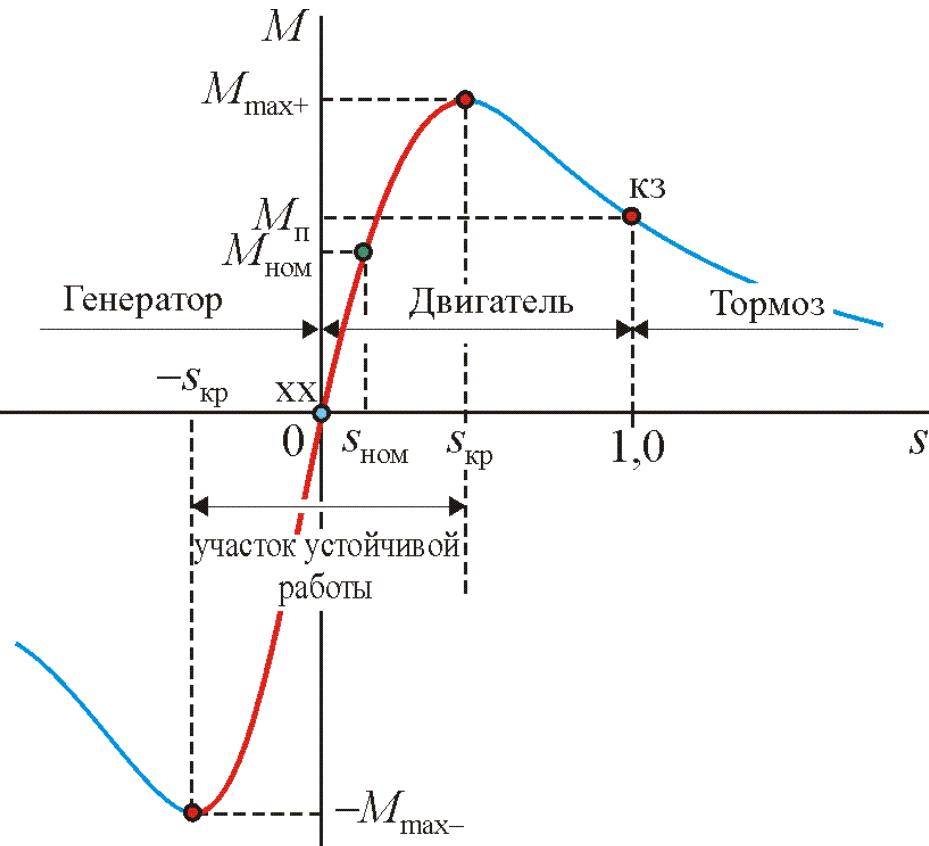


а)



б)

Вращающий момент и механическая характеристика



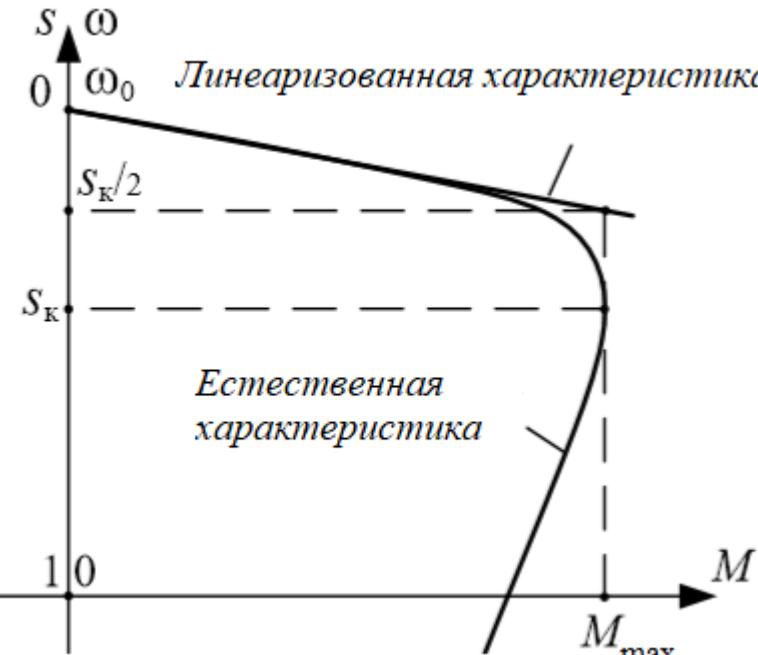
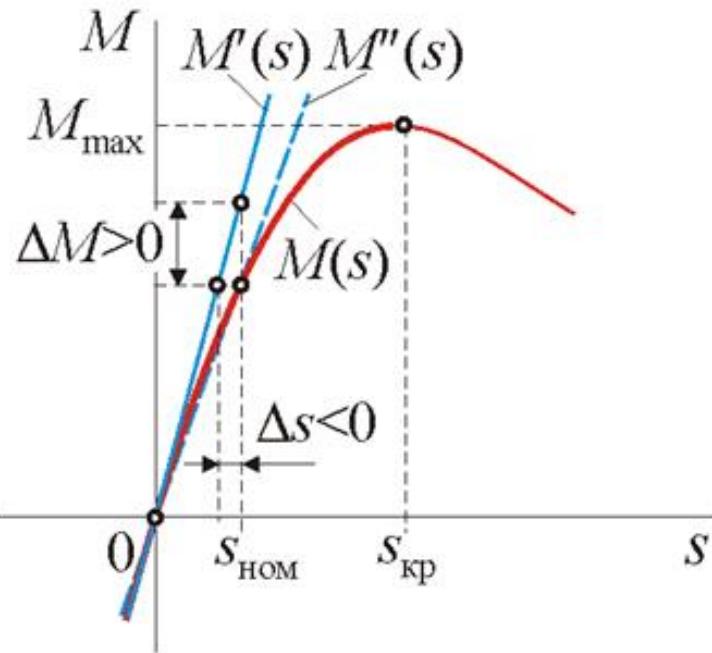
$M_{\max} / M_{\text{ном}} = k_M$
- кратность макс. момента.

$M_{\pi} / M_{\text{ном}} = k_{\pi}$
- кратность пускового момента

$$M = \frac{p m_1 R'_2 U_1^2}{\omega_1 s \left[\left(R_1 + c_1 R'_2 / s \right)^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2 \right]}$$

$$M_{\max} = \frac{p m_1 U_1^2}{2 \omega_1 c_1 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2} \right]} \approx \frac{p m_1 U_1^2}{2 \omega_1 (X_{s1} + X'_{s2})}; \quad s_{\text{кр}} = \pm \frac{c_1 R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2}} \approx \pm \frac{R'_2}{X_{s1} + X'_{s2}}$$

Линеаризация механической характеристики АД



$$\frac{\partial M}{\partial s} = \frac{2M_{\max}(1+as_{kp})}{\left(\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s} + 2as_{kp}\right)^2} \left(\frac{s_{kp}}{s^2} - \frac{1}{s_{kp}} \right); \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{\partial M}{\partial s} \right) = \frac{2M_{\max}(1+as_{kp})}{s_{kp}} \approx \frac{2M_{\max}}{s_{kp}} \quad |_{R_i \approx 0 \rightarrow a \approx 0}$$

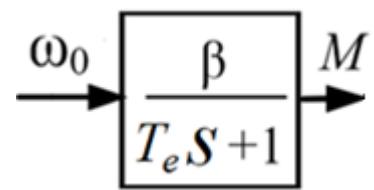
$$M'(s) = \frac{\partial M}{\partial s} s = \frac{2M_{\max}(1+as_{kp})}{s_{kp}} s \approx \frac{2M_{\max}}{s_{kp}} s; \quad M''(s) = \frac{M_{\text{ном}}}{s_{\text{ном}}} s$$

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \quad - \text{жесткость}$$

$$M = \beta(\omega_0 - \omega)$$

- линеаризованная характеристика

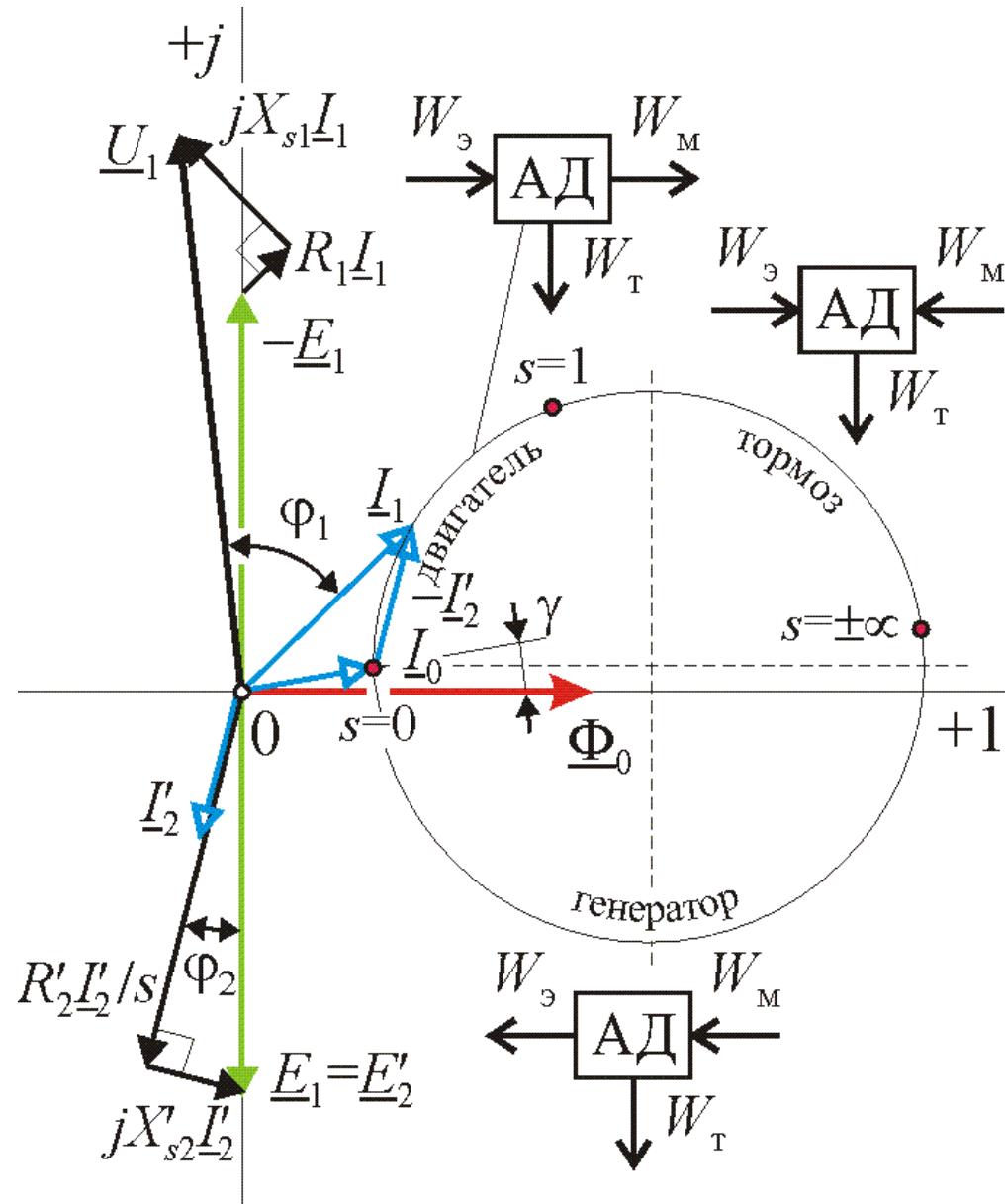
Для АД с частотным управлением и линеаризацией участка МХ со стабильной работой $s < s_{kp}$



$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}; \beta = \frac{2M_{\max}}{\omega_{0\text{ном}} s_{kp}}; T_e = \frac{1}{\omega_{0\text{ном}} s_{kp}}$$

где f_1 – частота питания статора, M_{\max} – максимальный (критический) момент, s_{kp} – критическое скольжение

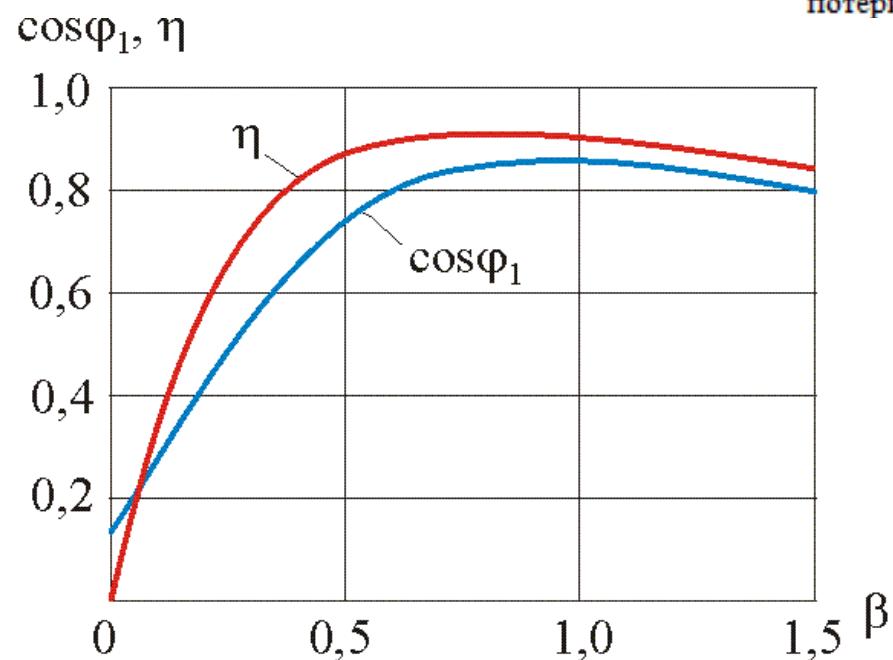
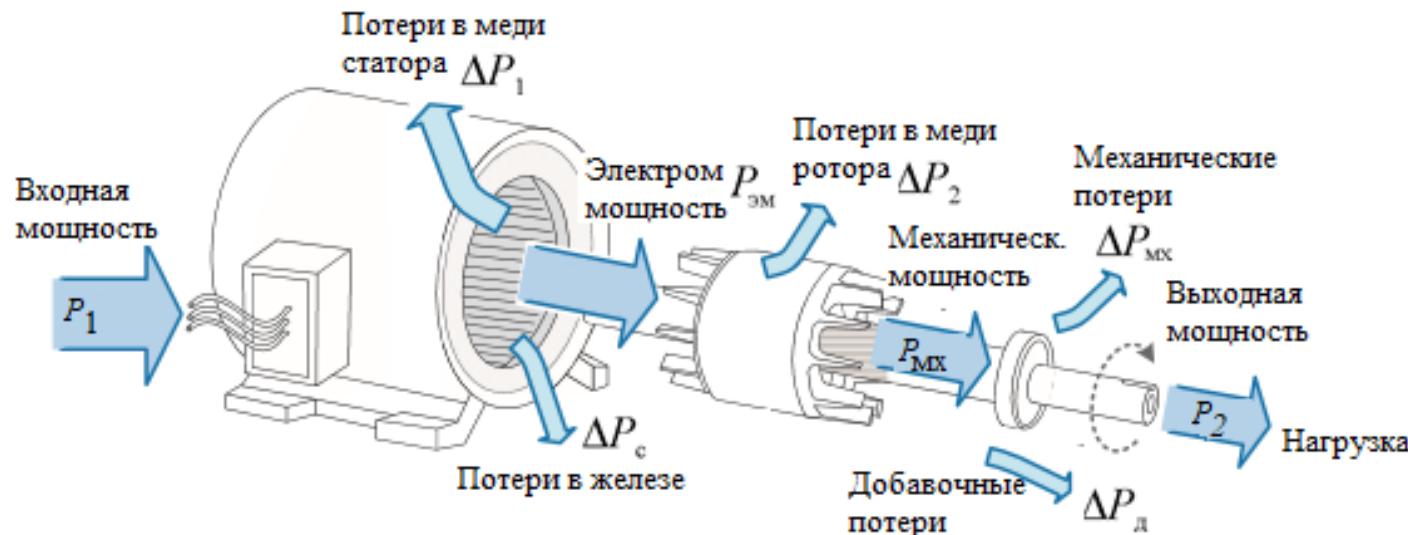
Режимы работы асинхронного двигателя



- Режим двигателя $0 < s < 1$,
 $W_\vartheta \Rightarrow W_m$, $W_\tau = W_\vartheta - W_m$
- генераторный режим $s < 0 \Rightarrow n > n_1$
 $W_m \Rightarrow W_\vartheta$, $W_\tau = W_\vartheta - W_m$
- режим электромагнитного торможения
или противовключения $n < 0 \Rightarrow s > 1$

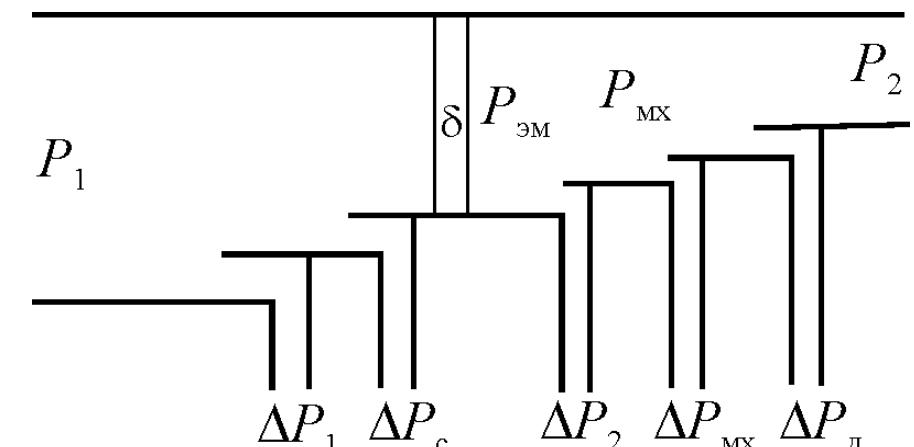
$$W_m, W_\vartheta \Rightarrow W_\tau = W_m + W_\vartheta$$

Энергетический баланс



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1}$$

$$\beta = P_2 / P_{\text{ном}}$$



$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1$$

$$\Delta P_1 = m_1 R_1 I_1^2$$

$$\Delta P_c = m_1 R_0 I_0^2$$

$$P_{\text{эм}} = m_1 R'_2 I'_2 / s = m_2 R_2 I_2^2 / s$$

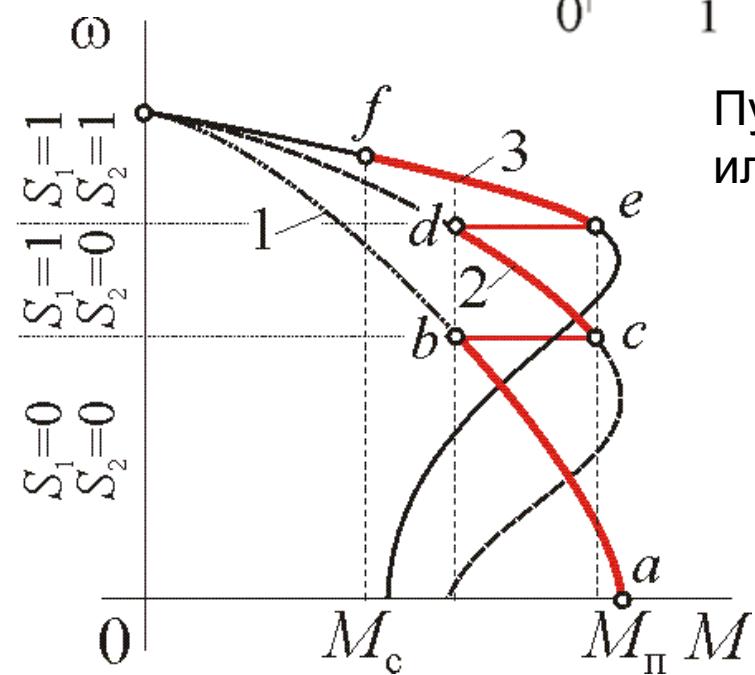
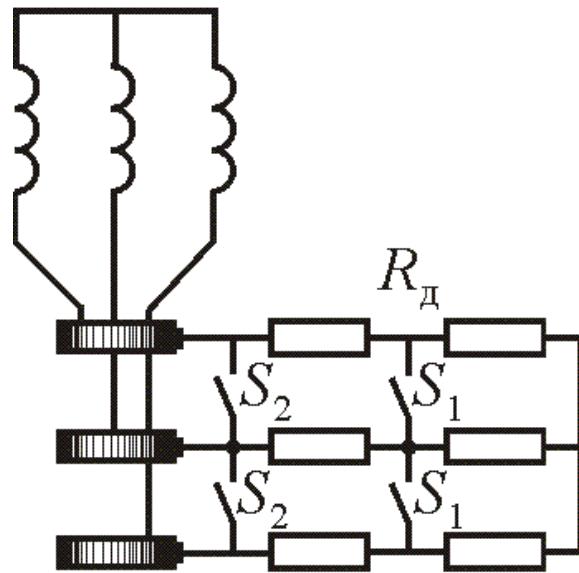
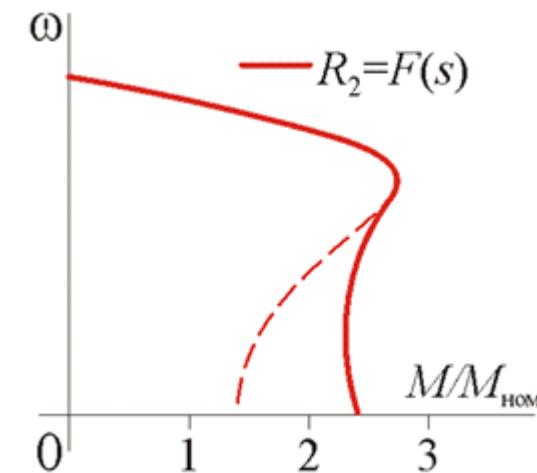
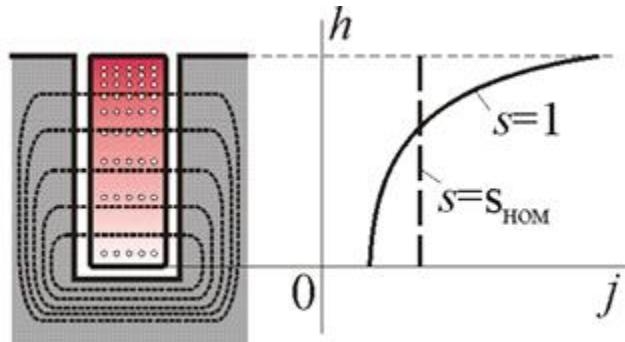
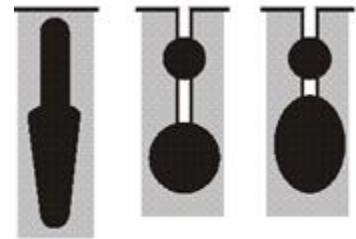
$$\Delta P_2 = m_1 R'_2 I'_1 / s = m_2 R_2 I_2^2$$

$$P_{\text{мх}} = m_1 R'_2 I'_2 (1-s) / s = m_2 R_2 I_2^2 (1-s) / s$$

$$P_2 = P_{\text{мх}} - \Delta P_{\text{мх}} - \Delta P_d$$

$$P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_c + \Delta P_2 + \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_d$$

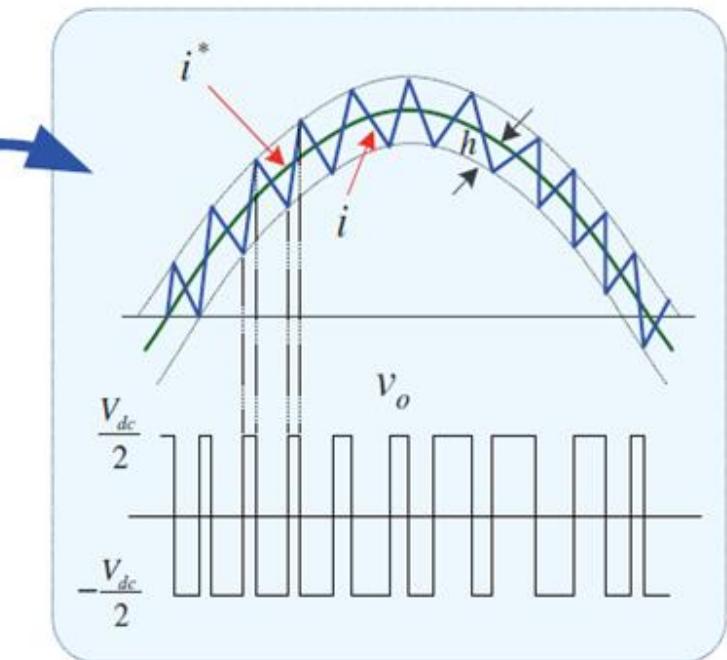
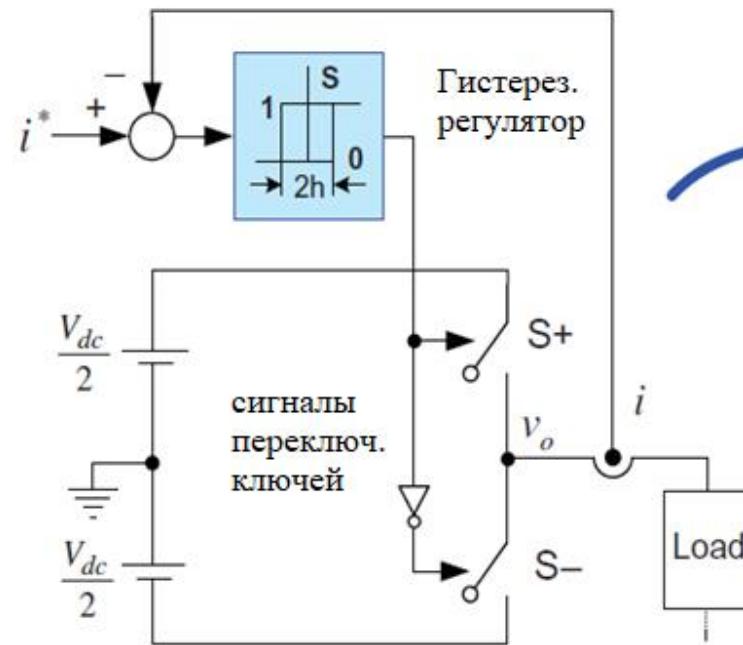
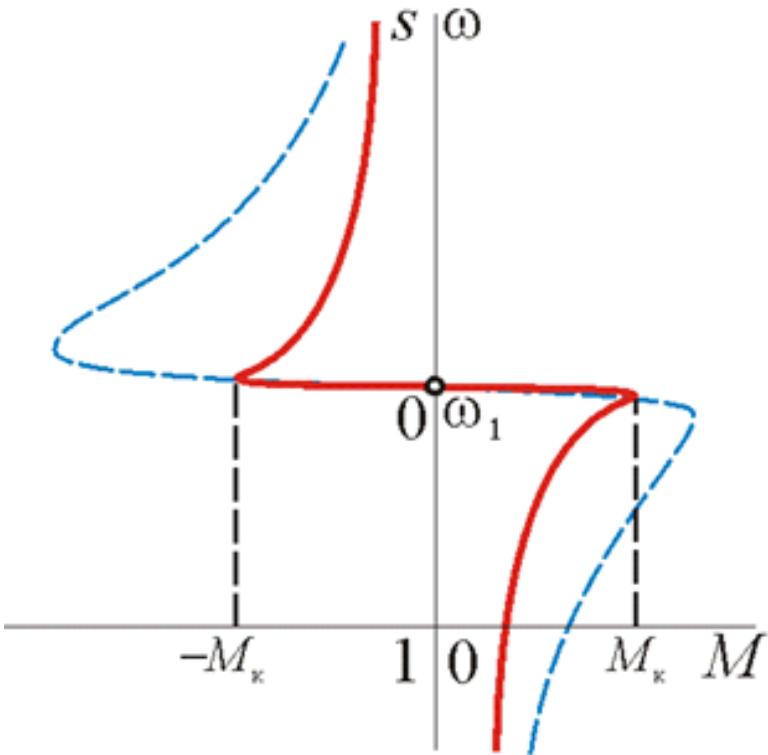
Пуск двигателя с глубокопазным и фазным ротором



Пуск двигателя с глубокопазным ротором
или ротором с двойной беличей клеткой

Пуск двигателя с фазным ротором

Механические характеристики при питании от источника тока



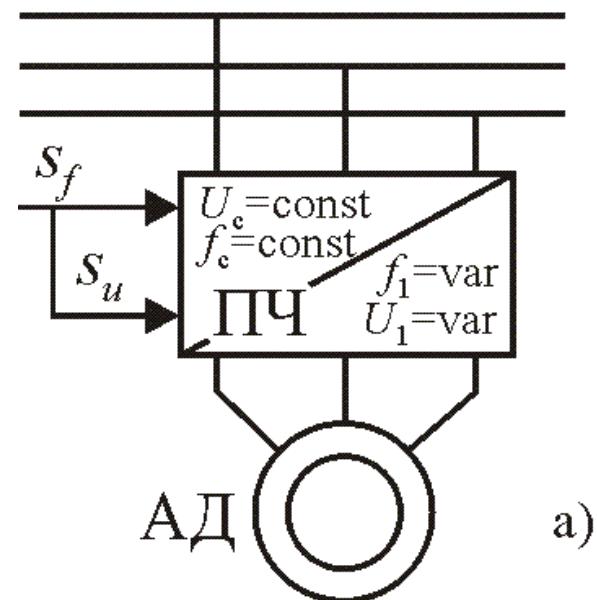
$$\frac{M_{\max U}}{M_{\max I}} = \frac{U_{1\text{ном}}^2}{I_{1\text{ном}}^2} \frac{L'_{s2} + L_0}{\omega_{1\text{ном}}^2 L_0^2 (L_{s1} + L'_{s2})} = 3\dots 1$$

$$\frac{s_{kU}}{s_{kI}} = \frac{X'_{s2} + X_0}{\sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + X'_{s2})^2}} = 3\dots 20$$

Частотное регулирование

$$U_1 \approx E_1$$

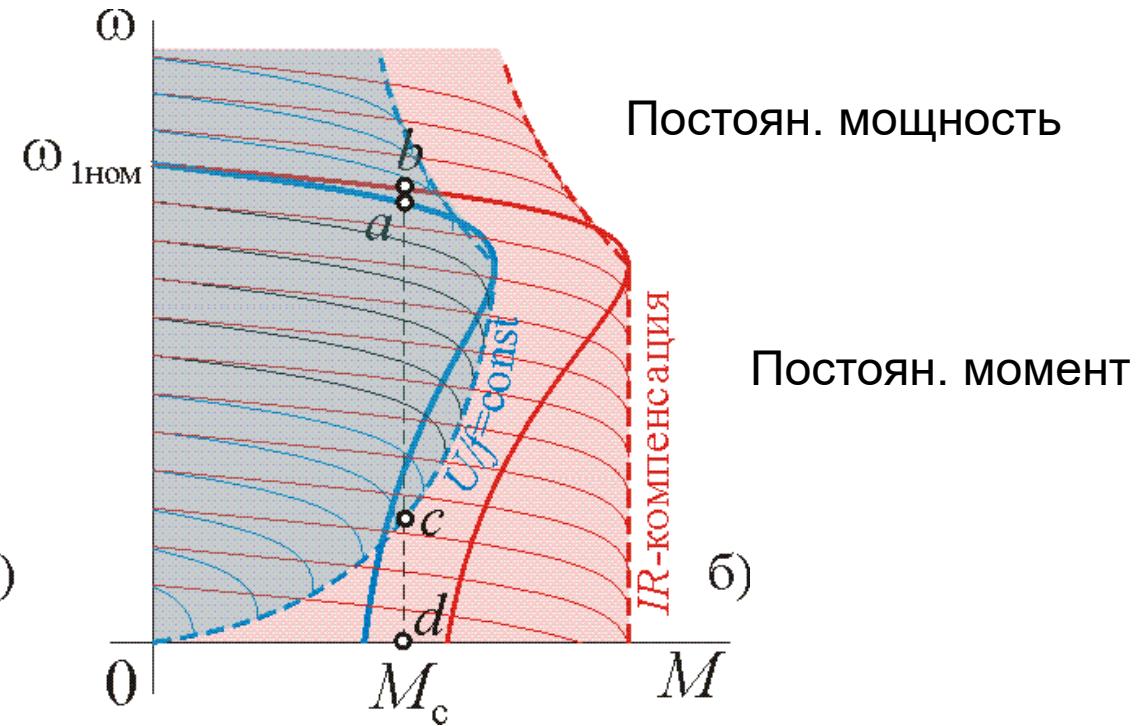
$$E_1 = 4,44 k_{\text{об}1} w_1 f_1 \Phi_{0m}$$



a)

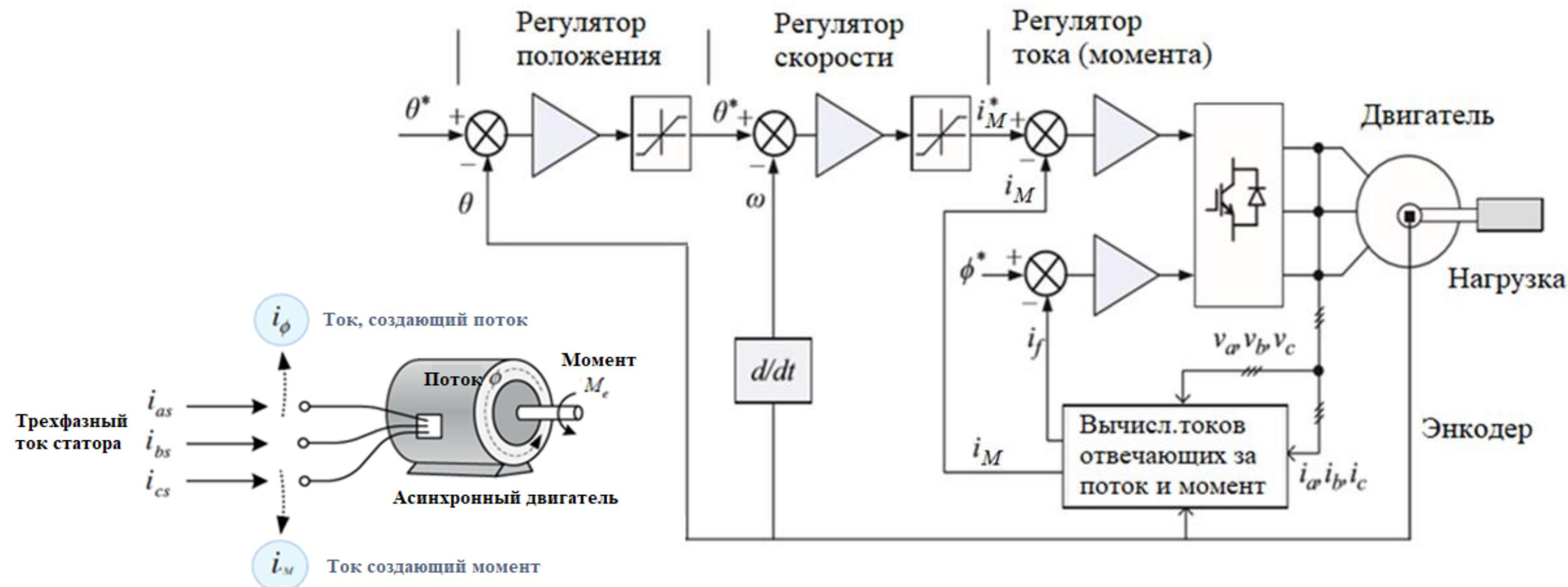
Закон М.П.Костенко

$$M_h = \text{const} \Rightarrow \gamma = \alpha \Leftrightarrow U_1 / f_1 = \text{const}$$
$$P_h \approx c_p M_h f_1 \Rightarrow \gamma = \sqrt{\alpha}$$
$$M_h \approx c_w f_1^n \Rightarrow \gamma = \alpha^{1+n/2} \Rightarrow \gamma = \alpha^2 \Big|_{n=2}$$



б)

Регулирование с помощью преобразования координат



Классификация электрических машин

Электрические машины

Род тока

Постоянный ток
англ, D.C. (direct current)



Переменный ток
англ, A.C. (Alternating current)



Тип
электри-
ческих
машин

Двигатель
постоянного
тока - ДПТ
(англ, Direct
Current
Commutator
Machine)

Бесконтактный
двигатель
постоянного
тока - БДПТ
англ, BLDC
(Brushless DC
motor)

Синхронная
машина - СД
(англ,
Synchronous
Machine)

Асинхронная
машина - АД
(англ,
Induction
Machine)

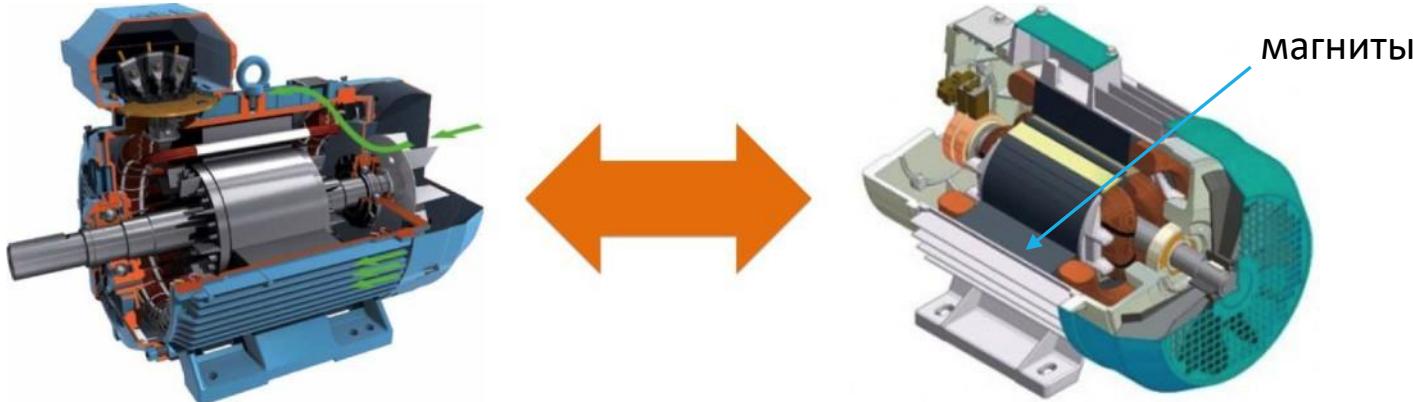
Шаговый
Двигатель
ШД (англ,
Stepper
Motor)

Вентильный
двигатель
англ, PMSM
(Permanent Magnet
Synchronous Motor)

Вентильно-
индукторный
Двигатель - ВИД
(англ, SynRM
Synchronous
reluctance motors)

Классификация электрических
машин

Сравнение асинхронного и синхронного двигателя

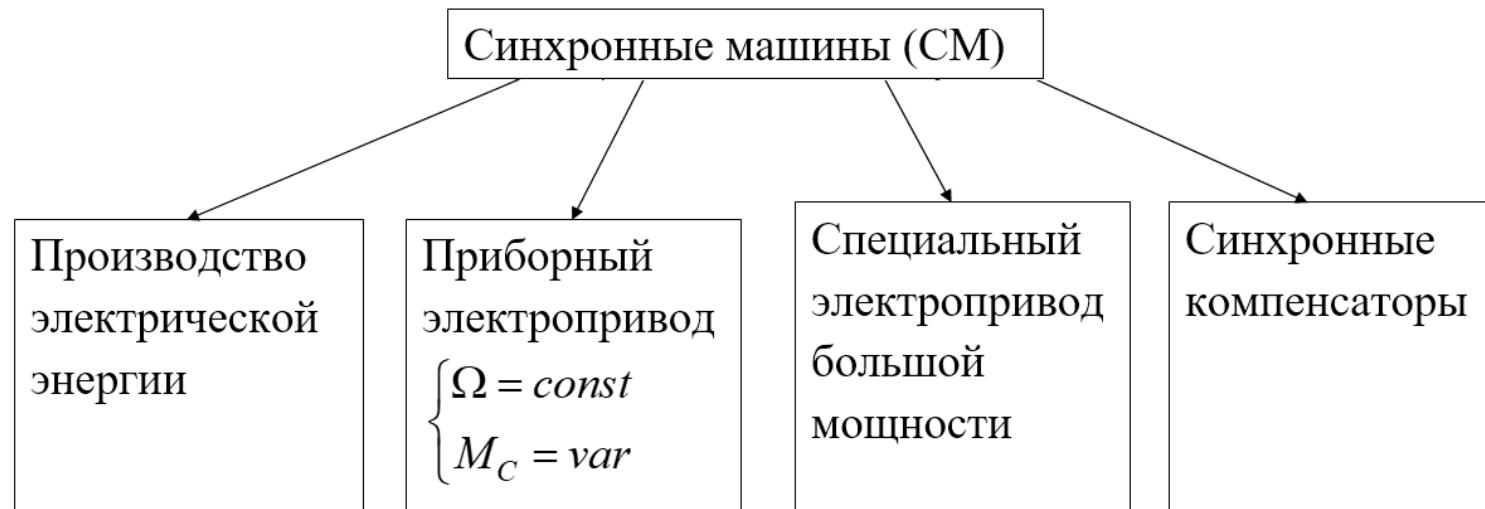


Сравнение асинхронных и синхронных двигателей

Асинхронный двигатель	Синхронный двигатель
<ul style="list-style-type: none">простота конструкции и невысокая стоимость;нет скользящих контактов, надежность в эксплуатации;напряжение прикладывается к неподвижным катушкам статора;ротор очень прост по конструкции;при запуске и разгоне постепенно наращивает мощность;возможность реверсировать направление вращения, просто поменяв местами две питающих фазы;при остановке движения (слишком большая механическая нагрузка на вал ротора) никакой аварии не происходит, может произойти перегрев беличьей клетки.	<ul style="list-style-type: none">стабильная скорость вращения вне зависимости от нагрузки на вал;невысокая чувствительность к перепадам напряжения в сети;при уменьшении механической нагрузки способен по инерции работать как генератор, не забирая энергию, а отдавая ее в сеть;высокий КПД;способен компенсировать реактивную мощность сети.

Применение синхронных машин

Синхронными - электрические машины переменного тока, у которых в рабочем режиме скорость вращения ротора Ω равна скорости вращения магнитного поля Ω_1 , т.е. поле и ротор вращаются синхронно Ω_0

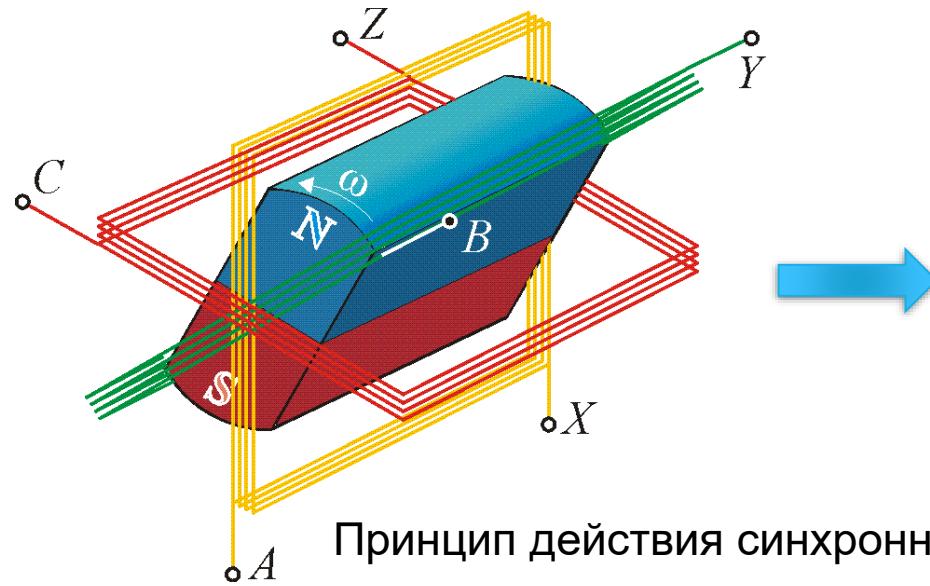


Достоинства

- Возможность работы при $\cos\varphi=1$
 - Менее чувствительны к колебаниям сети ($M \sim U$), чем АД ($M \sim U^2$)
- ## Недостатки
- Невозможность прямого пуска
 - Необходимость вхождения в синхронизм



Принцип действия синхронного двигателя



Принцип действия синхронного двигателя: а - холостой ход; б – генератор $M_C < 0$; в – двигатель $M_C > 0$

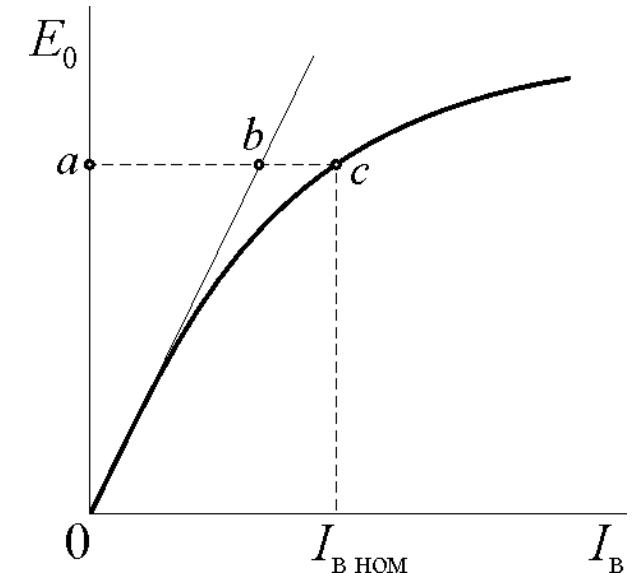
При вращении активного ротора с частотой Ω его магнитный поток Φ_0 | наводит в обмотке статора синусоидальную ЭДС с действующим значением $E_0 = 4,44 p \Omega k_{об} w \Phi_{0m}$,

где p – число пар полюсов магнитного поля; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент; w – число витков фазной обмотки; Φ_{0m} – амплитуда магнитного потока ротора

$E_0 = f(I_B)$ - характеристика холостого хода

$$n_1 = 60 f_1 / p \text{ [об/мин]}$$

- скорость вращения магнитного поля



Принцип действия синхронного двигателя

В зависимости от конструкции ротора СД можно разделить на группы:

1. СД с активным ротором (ротор содержит обмотку возбуждения (ОВ), которая создает поток Φ_0)

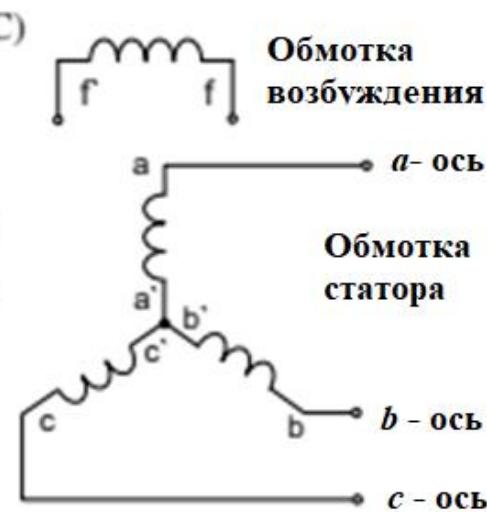
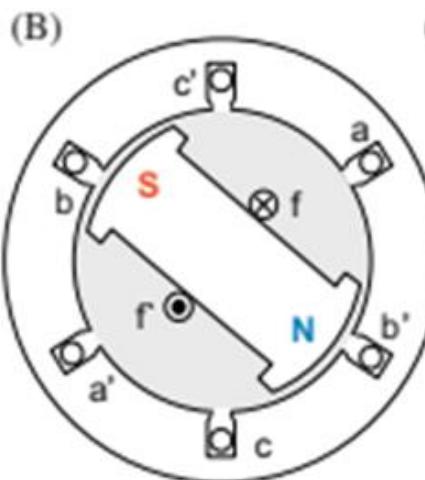
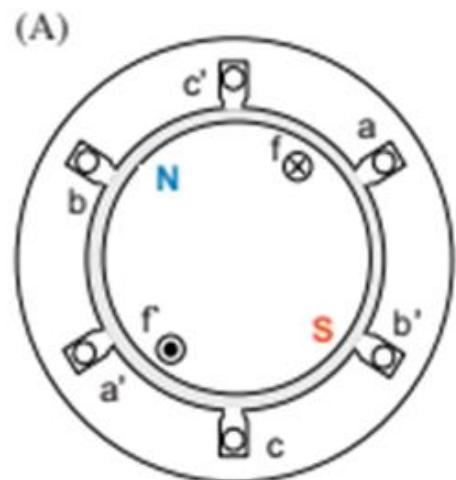
а) с электромагнитным возбуждением

- явнополюсные

- неявнополюсные

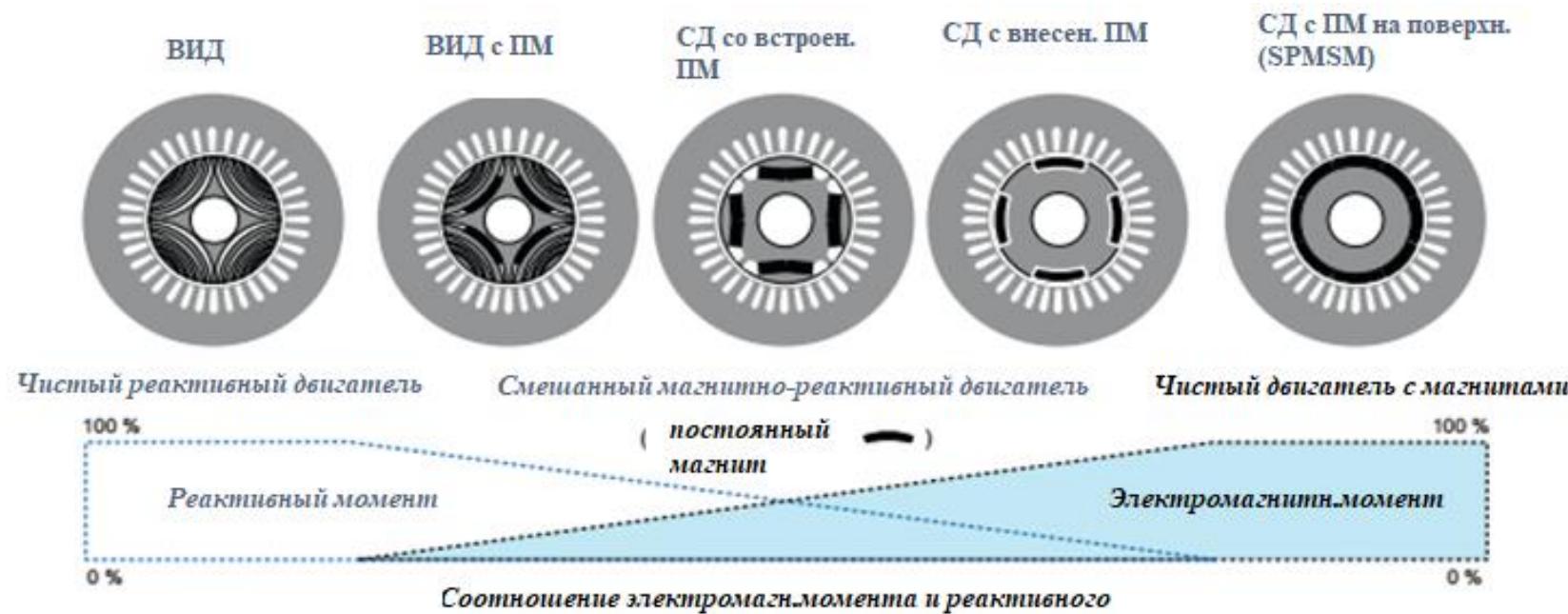
б) магнитоэлектрическое возбуждение (с помощью пост.магнитов (< сотен кВт)

2. Синхронные реактивные двигатели

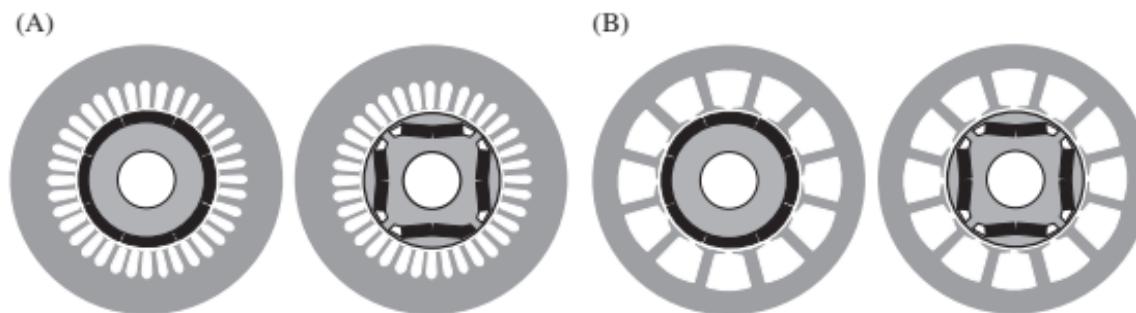


Структура статора и ротора синхронного двигателя.
(А) неявнополюсного типа,
(Б) явнополюсного типа и
(С) обмотки статора.

Типы синхронных машин

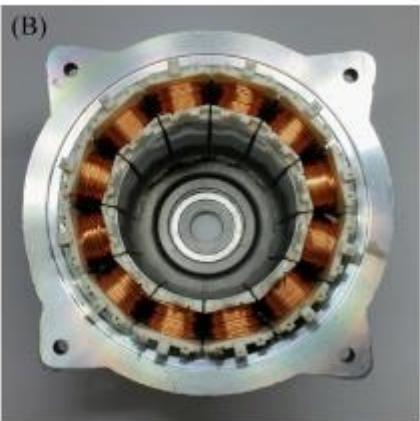
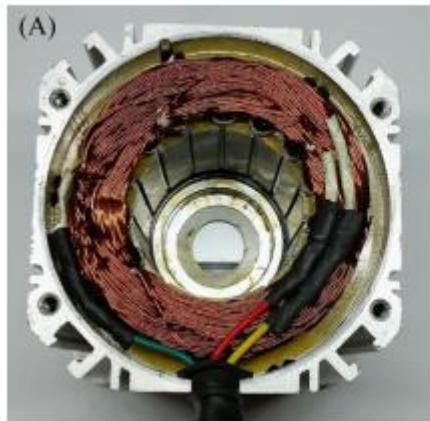


Некоторые типы синхронных машин

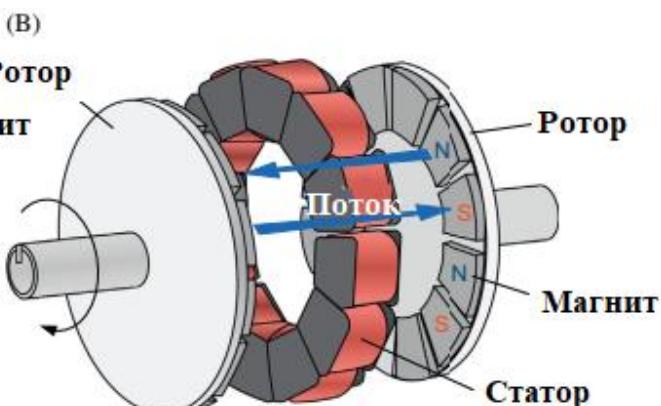
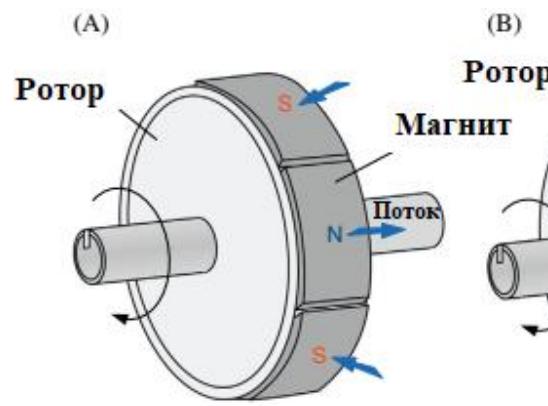


Различные структуры для статора и ротора СДПМ: (A) распределенная обмотка
(B) концентрированная обмотка

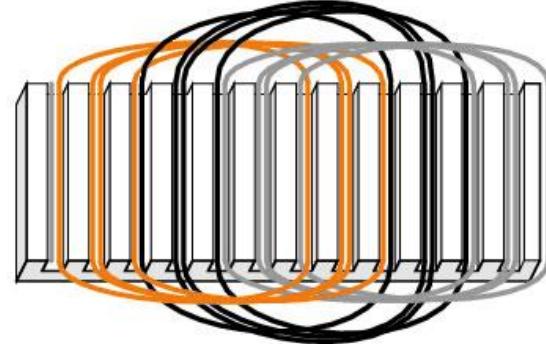
Типы синхронных машин



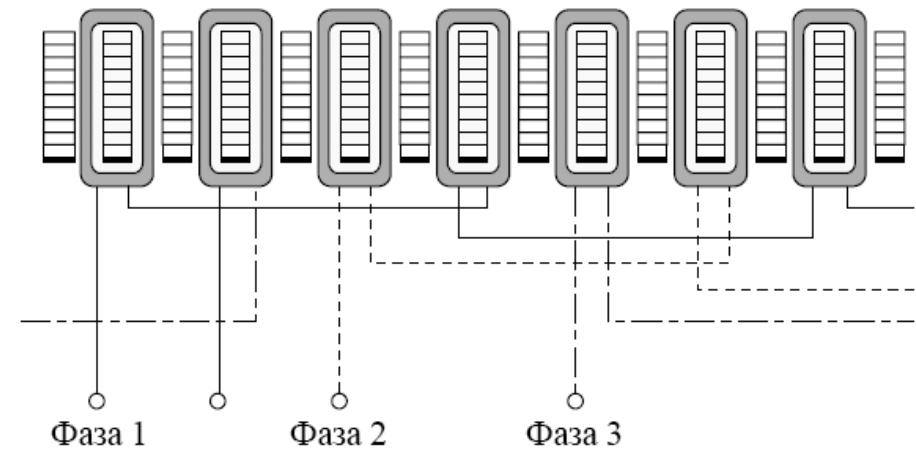
Вид распределенной и сосредоточенной обмоток:
(A) Распределенная и сосредоточенная.



СДПМ конфигурация: (A) Радиальный тип и (B) аксиальный тип

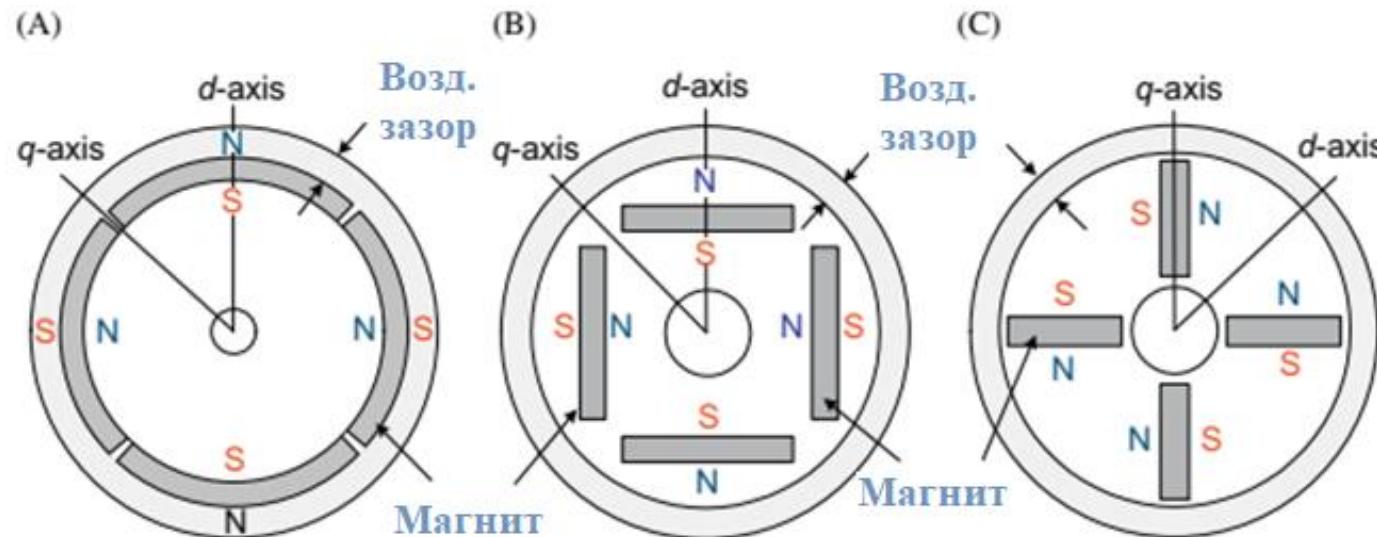


Укладка распределенной обмотки

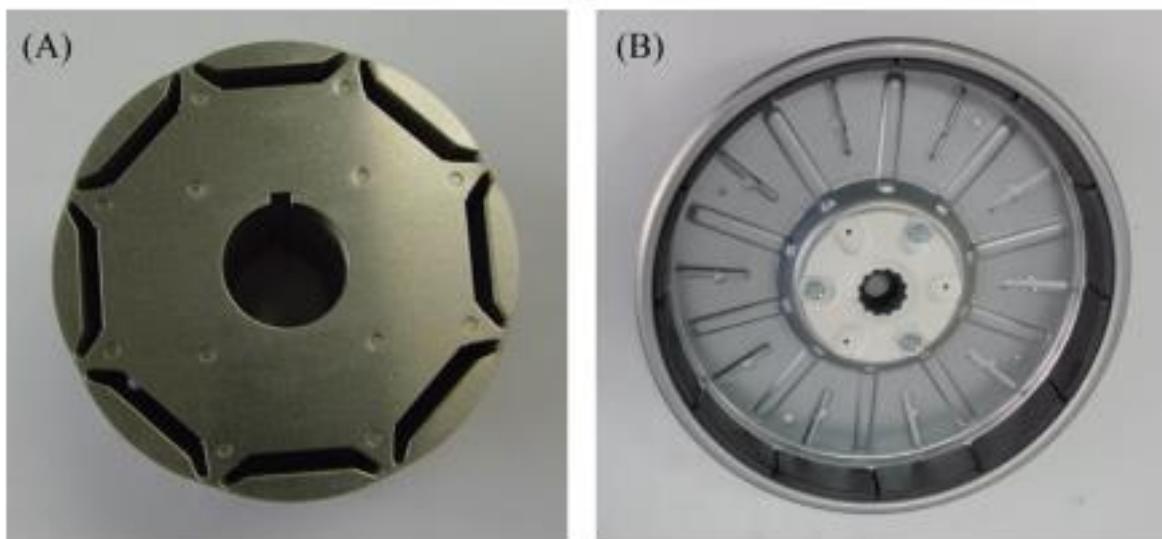


Укладка сосредоточенной обмотки

Типы синхронных машин

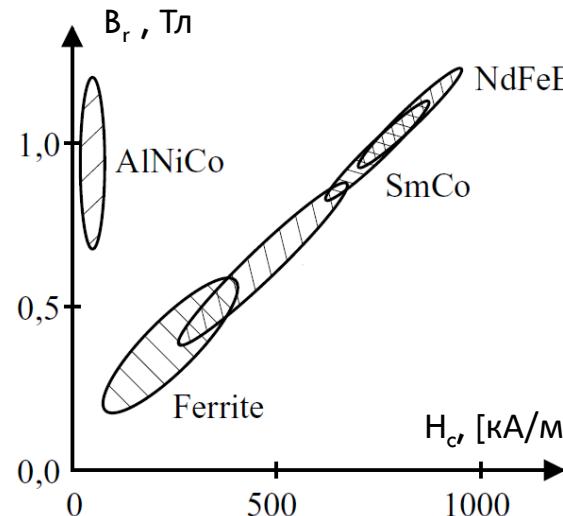


Топология ротора СДПМ (4х-полюсного): (A) Неявлнополюсный, *Surface mounted* (B) С магнитами, встроеннымми в параллель *interior (parallel)*, и (C) с магнитами, встроеннымми в перпендикулярн. Направлении *interior (perpendicular)*

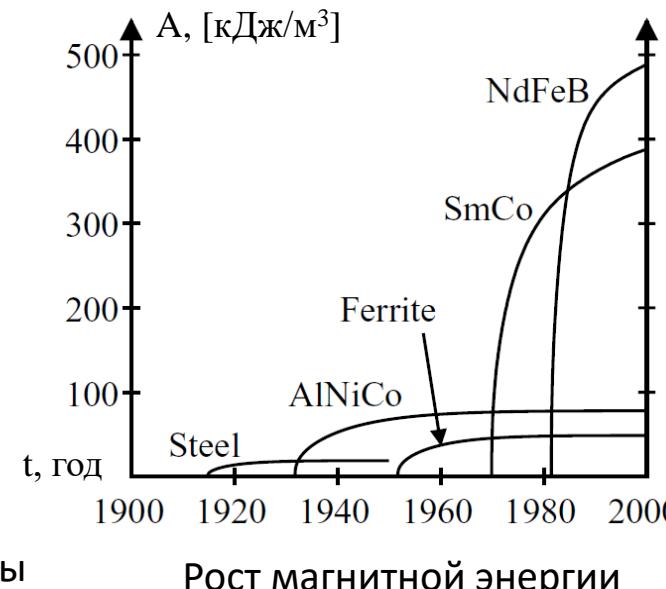


Конфигурация ротора СДПМ
(A) внутренний по отношению к статору (англ. *inner rotor*) (B) внешний по отношению к статору (англ. *Outside*)

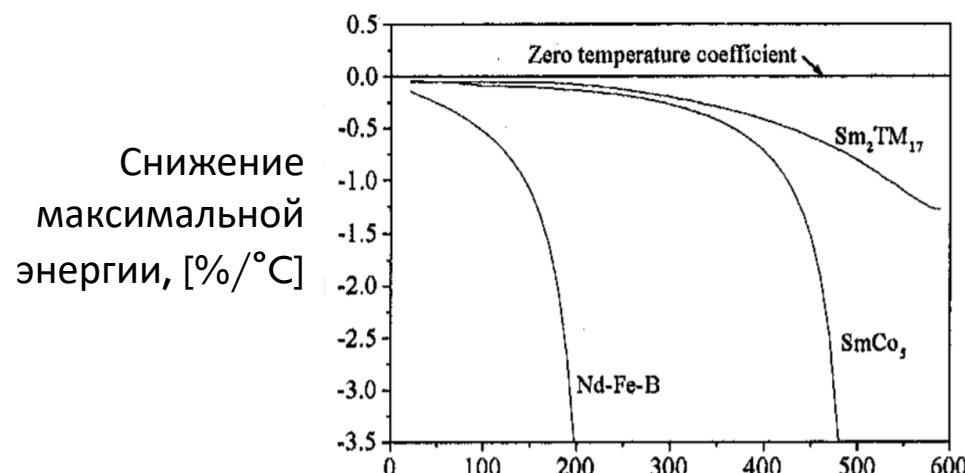
Типы магнитов для синхронных машин



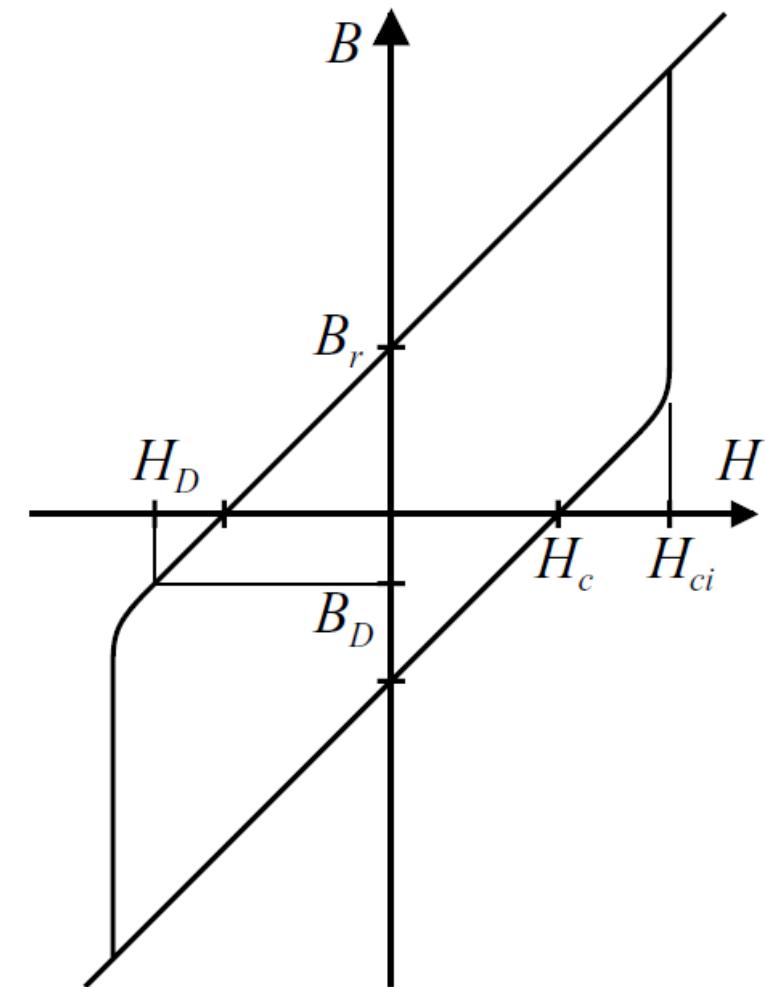
Рост магнитной индукции и коэрцитивной силы



Рост магнитной энергии

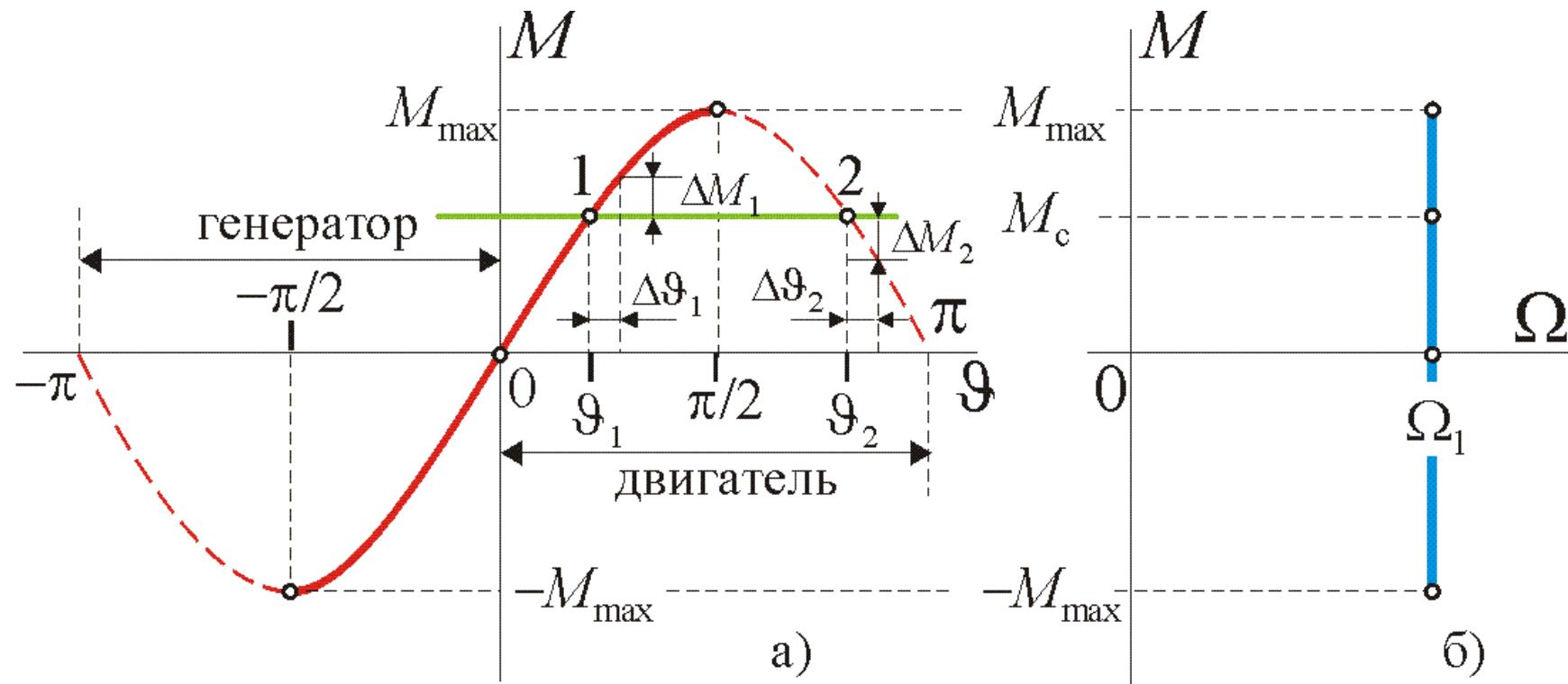


Температура, °C



Характерная кривая петли гистерезиса

Угловая (а) и механическая (б) характеристики неявнополюсной синхронной машины

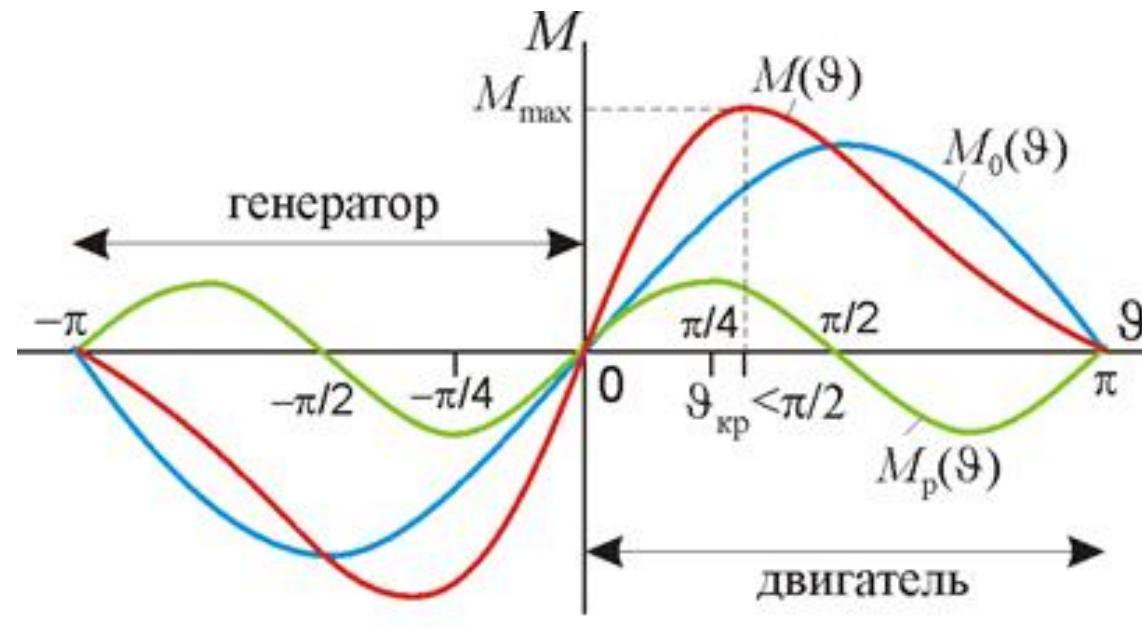


$$M = \frac{mz_p E_0 U_1}{\omega_1 X_d} \sin \vartheta = M_{\max} \sin \vartheta \Big|_{X_d = X_q}$$

$$\Delta M_1 = M - M_c = J\varepsilon > 0 \Rightarrow \varepsilon > 0 \Rightarrow \Delta\vartheta_1 \rightarrow 0$$

$$\Delta M_2 = M - M_c = J\varepsilon < 0 \Rightarrow \varepsilon < 0 \Rightarrow \Delta\vartheta_2 \rightarrow \pi + 2\Delta\vartheta_1$$

Угловые характеристики явнополюсной синхронной машины



$$M(\vartheta) = \frac{mz_p U_1 E_0}{\omega_1 X_d} \sin \vartheta + \frac{mz_p U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\vartheta = M_0(\vartheta) + M_p(\vartheta)$$

Классификация электрических машин

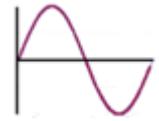
Электрические машины

Род тока

Постоянный ток
англ, D.C. (direct current)



Переменный ток
англ, A.C. (Alternating current)



Тип
электри-
ческих
машин

Двигатель
постоянного
тока - ДПТ
(англ, Direct
Current
Commutator
Machine)

Бесконтактный
двигатель
постоянного
тока - БДПТ
англ, BLDC
(Brushless DC
motor)

Синхронная
машина - СД
(англ,
Synchronous
Machine)

Асинхронная
машина - АД
(англ,
Induction
Machine)

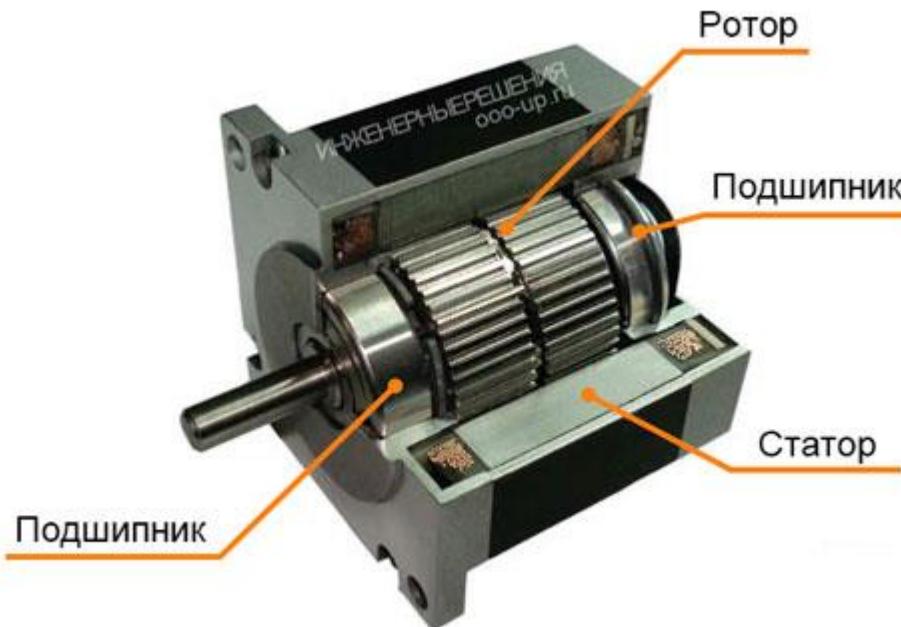
Шаговый
Двигатель
ШД (англ,
Stepper
Motor)

Вентильный
двигатель
англ, PMSM
(Permanent Magnet
Synchronous Motor)

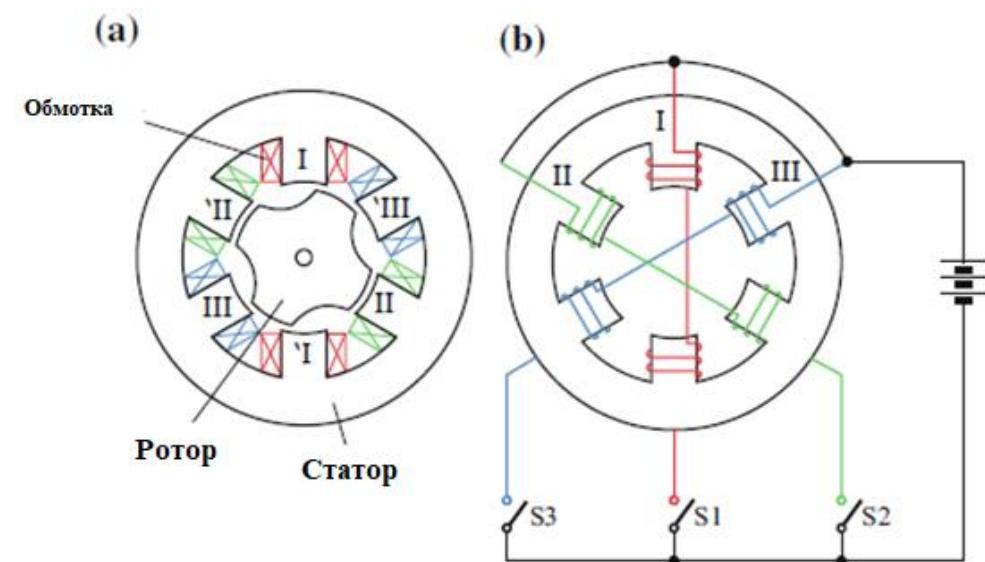
Вентильно-
индукторный
Двигатель - ВИД
(англ, SynRM
Synchronous
reluctance motors)

Классификация электрических
машин

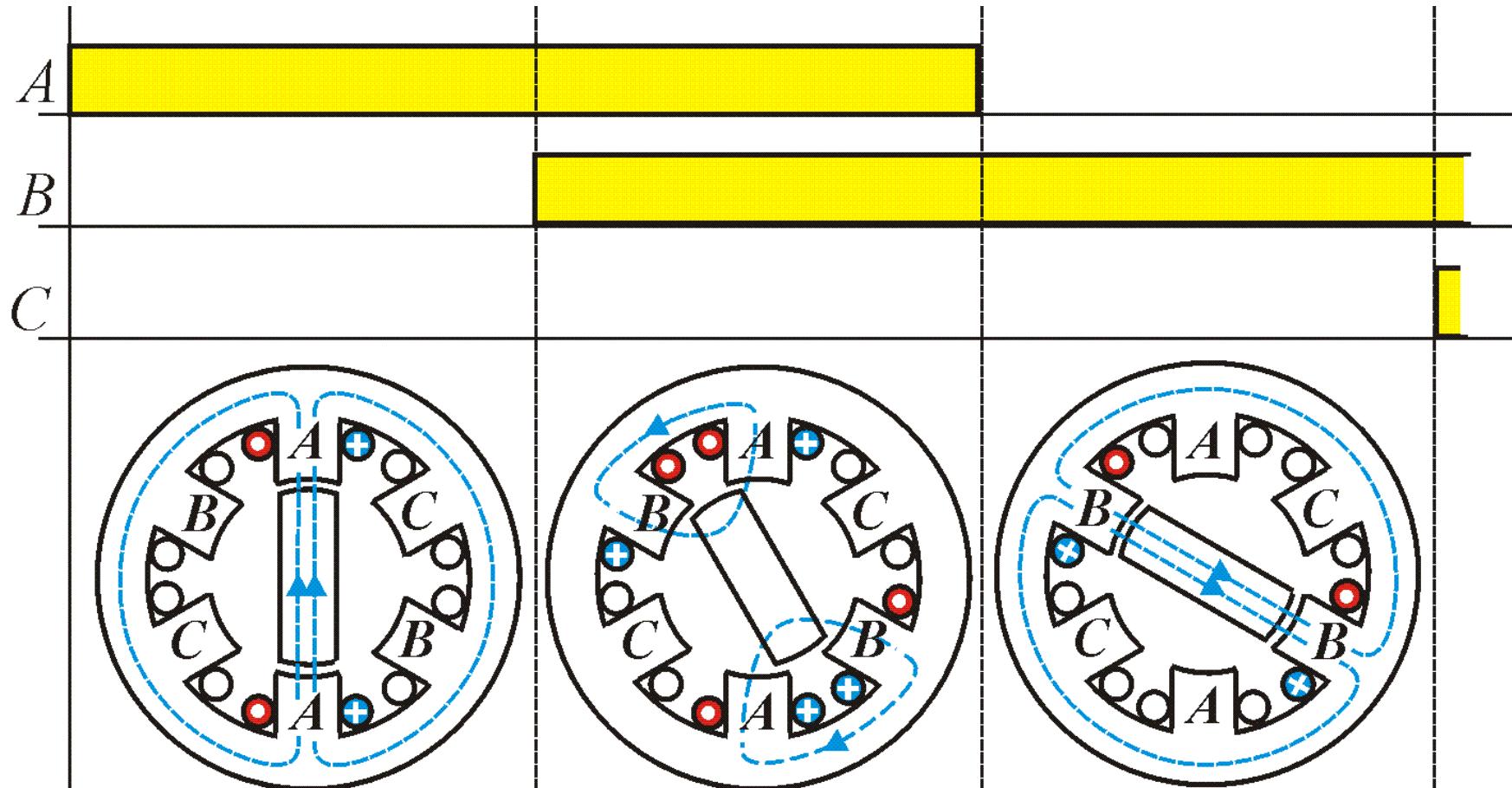
Конструкция и принцип действия шагового двигателя



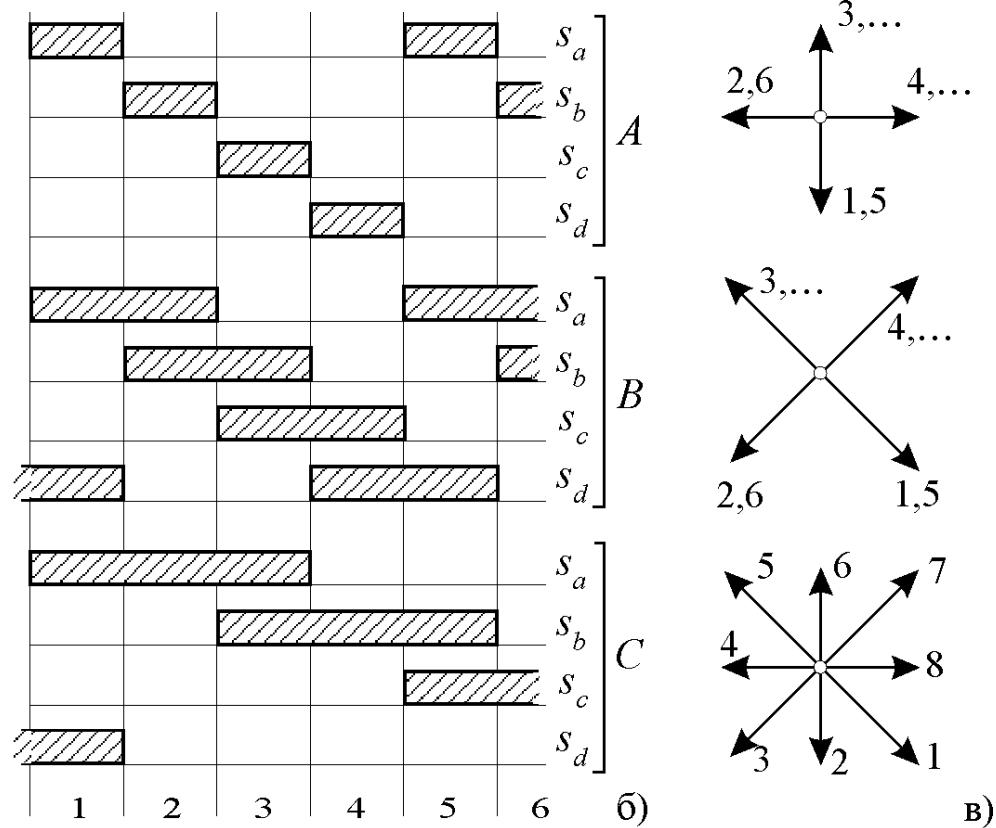
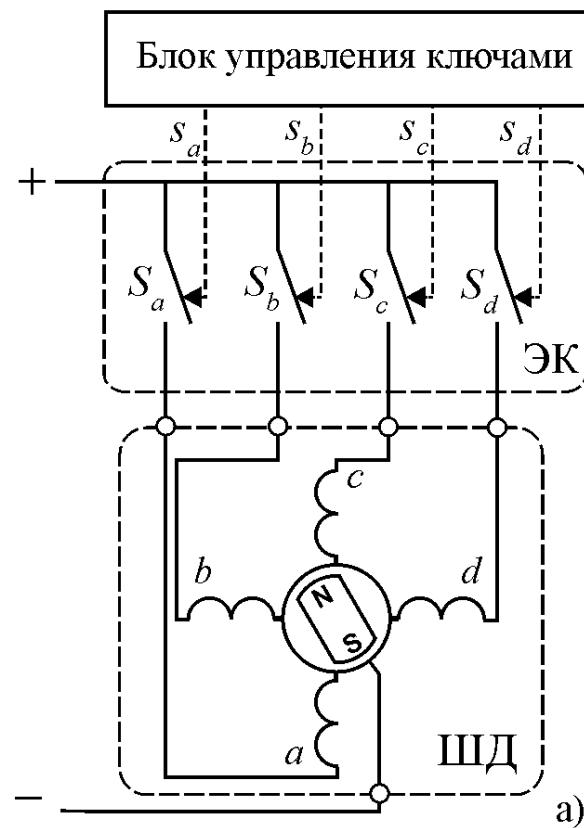
- Реактивный шаговый двигатель
- Шаговый двигатель с постоянными магнитами
- Гибридный шаговый двигатель



Управление шаговым двигателем



Управление шаговым двигателем



Принцип действия шагового двигателя

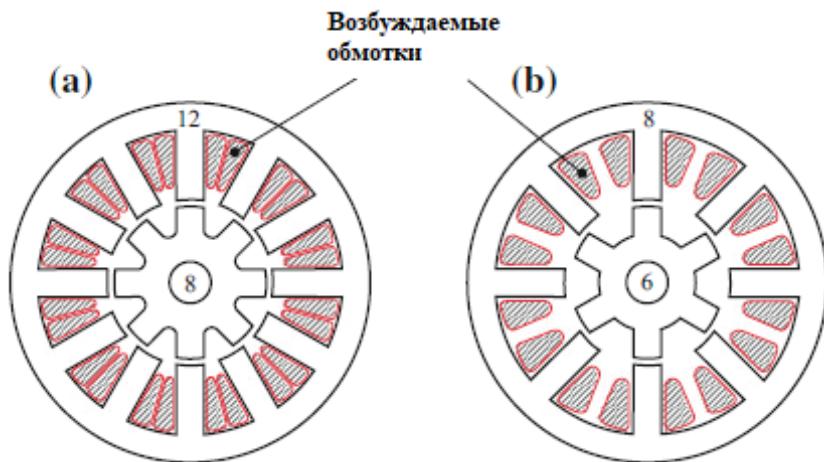
Выпускаемые
серийно шаговые
двигатели с активным
ротором имеют
механический шаг до
3...1,5°.

$$\alpha = \frac{\alpha_y}{z_p} = \frac{2\pi}{kmz_p}$$

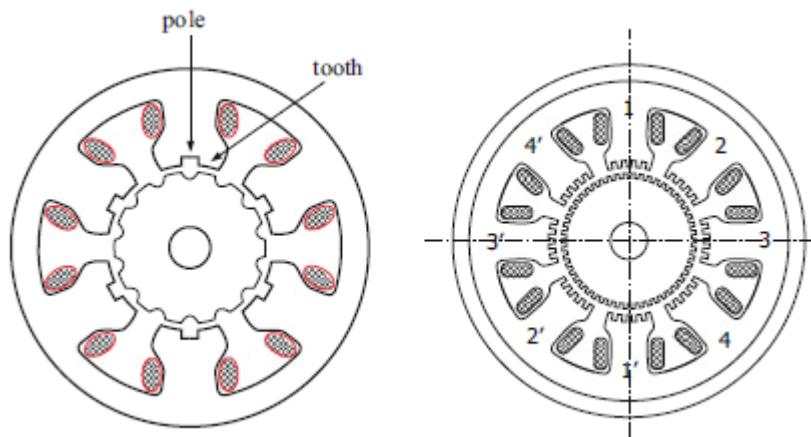
$$n = mk$$

– число устойчивых
электрических состояний на
периоде изменения
магнитного поля, а k –
коэффициент, определяемый
алгоритмом коммутации

Управление шаговым двигателем



12/8 и 8/6 Шаговый двигатель



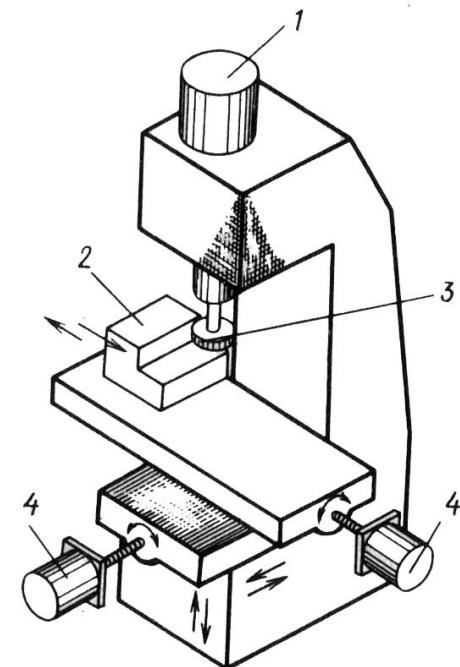
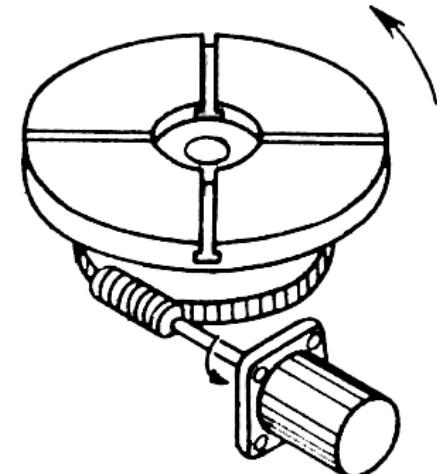
Зубчатые ротор и статор

N_r количество зубьев ротора

N_s количество зубьев статора

$$\epsilon_r = \min_n [|q \cdot \lambda_s - n \cdot \lambda_r|] = \min_n \left[|q \cdot \frac{2\pi}{N_s} - n \cdot \frac{2\pi}{N_r}| \right]$$

$$\epsilon_r = 2\pi / m N_r$$



Шаговые двигатели в устройствах позиционирования станков

Классификация электрических машин

Электрические машины

Род тока

Постоянный ток
англ, D.C. (direct current)



Переменный ток
англ, A.C. (Alternating current)



Тип
электри-
ческих
машин

Двигатель
постоянного
тока - ДПТ
(англ, Direct
Current
Commutator
Machine)

Бесконтактный
двигатель
постоянного
тока - БДПТ
англ, BLDC
(Brushless DC
motor)

Синхронная
машина - СД
(англ,
Synchronous
Machine)

Асинхронная
машина - АД
(англ,
Induction
Machine)

Шаговый
Двигатель
ШД (англ,
Stepper
Motor)

Вентильный
двигатель
англ, PMSM
(Permanent Magnet
Synchronous Motor)

Вентильно-
индукторный
Двигатель - ВИД
(англ, SynRM
Synchronous
reluctance motors)

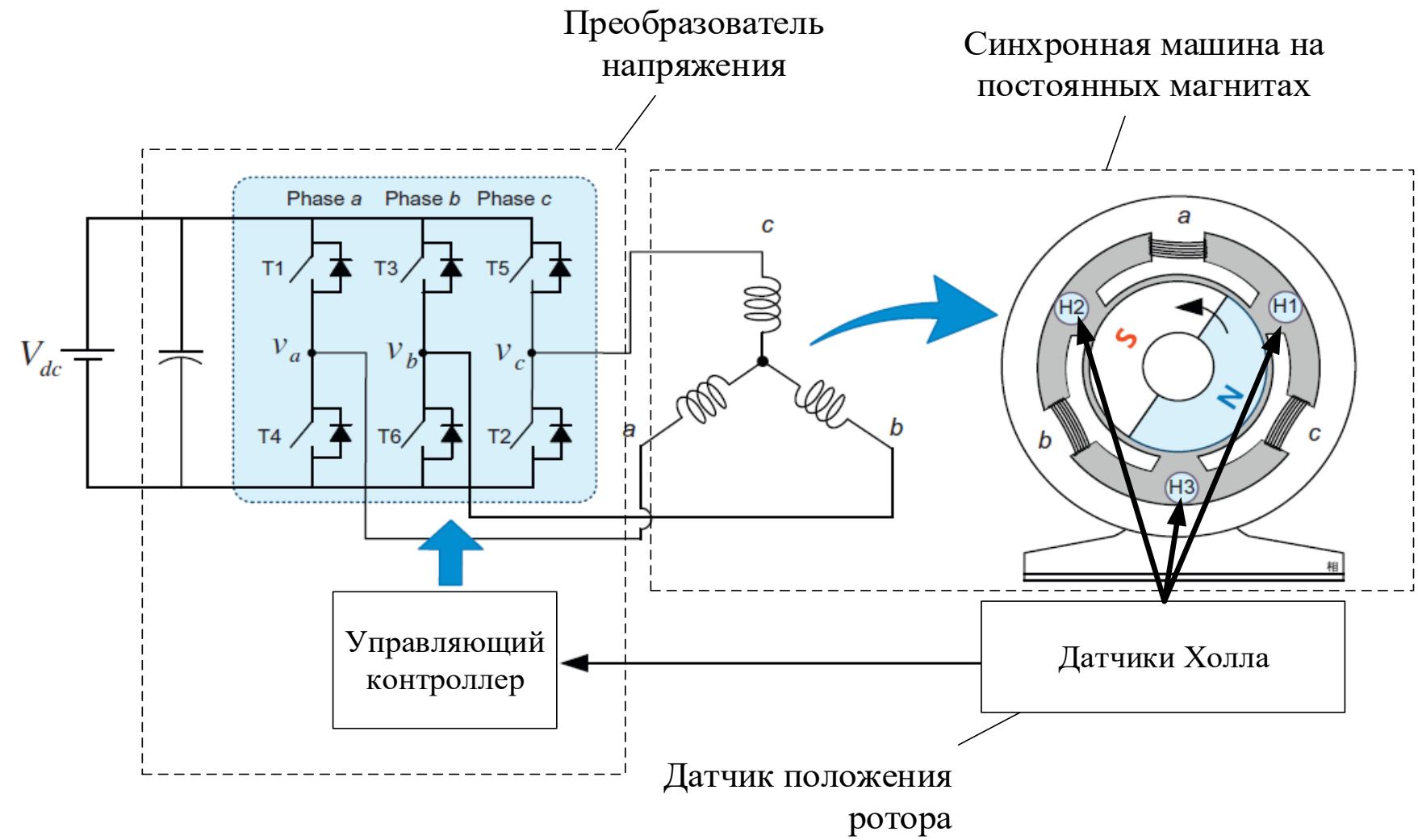
Классификация электрических
машин

Функциональная схема БДПТ

Функциональные узлы

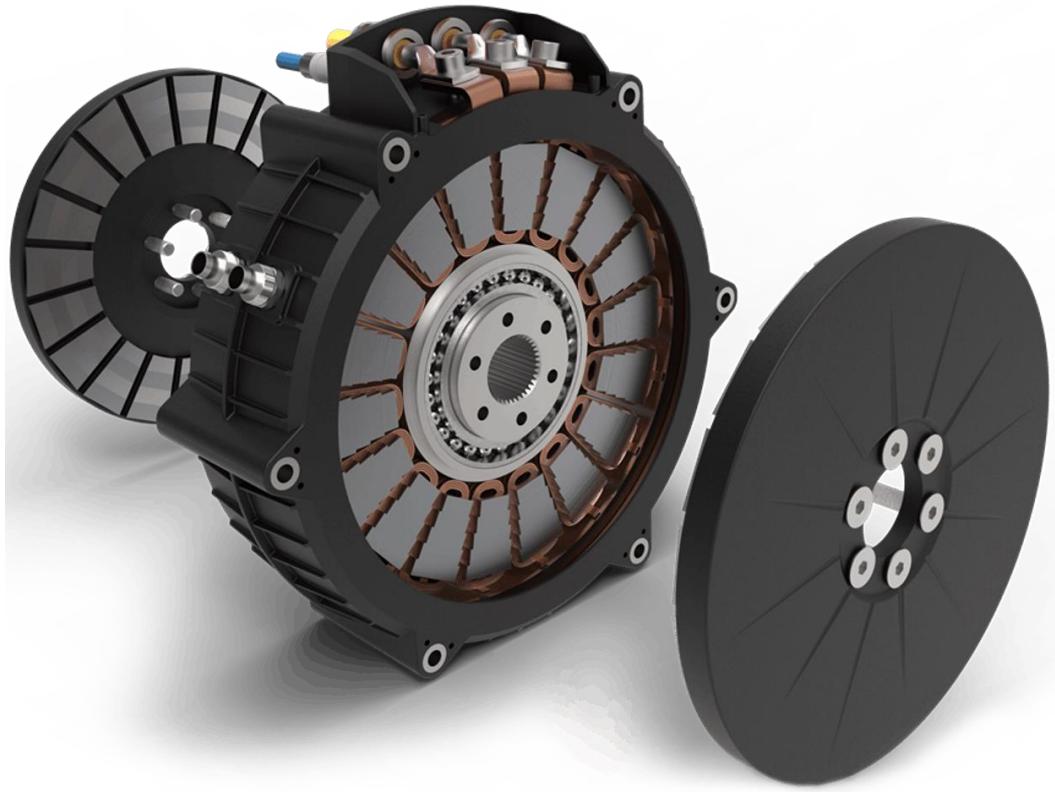
БДПТ:

- Преобразователь напряжения
- ДПР
- Синхронная машина на постоянных магнитах

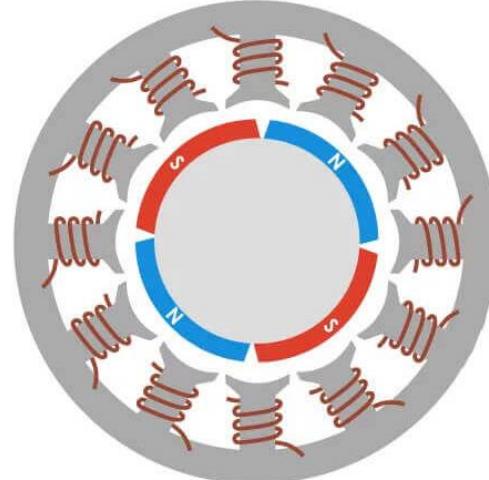


Функциональная схема работы БДПТ

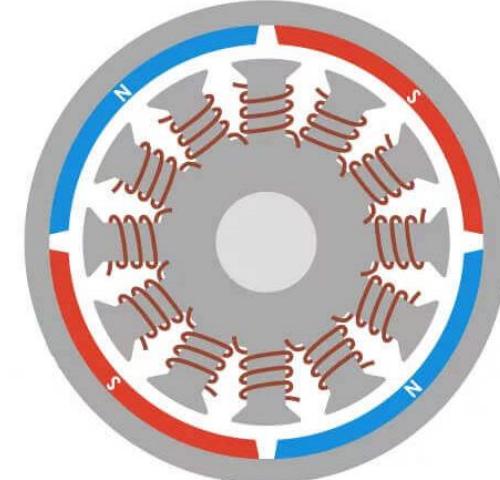
Конструкция БДПТ



БДПТ аксиального направления магнитного потока

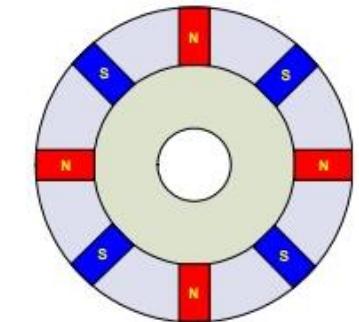
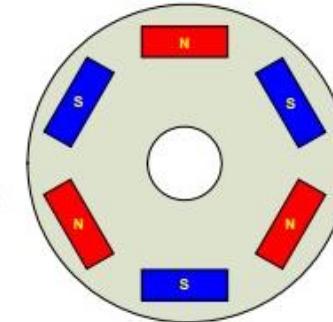
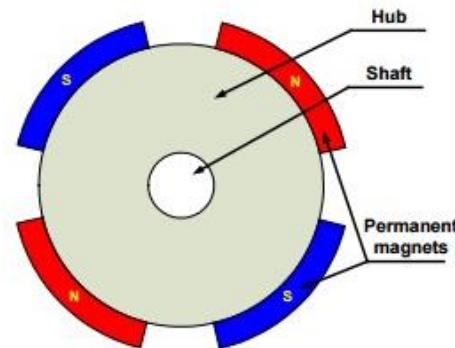


а)



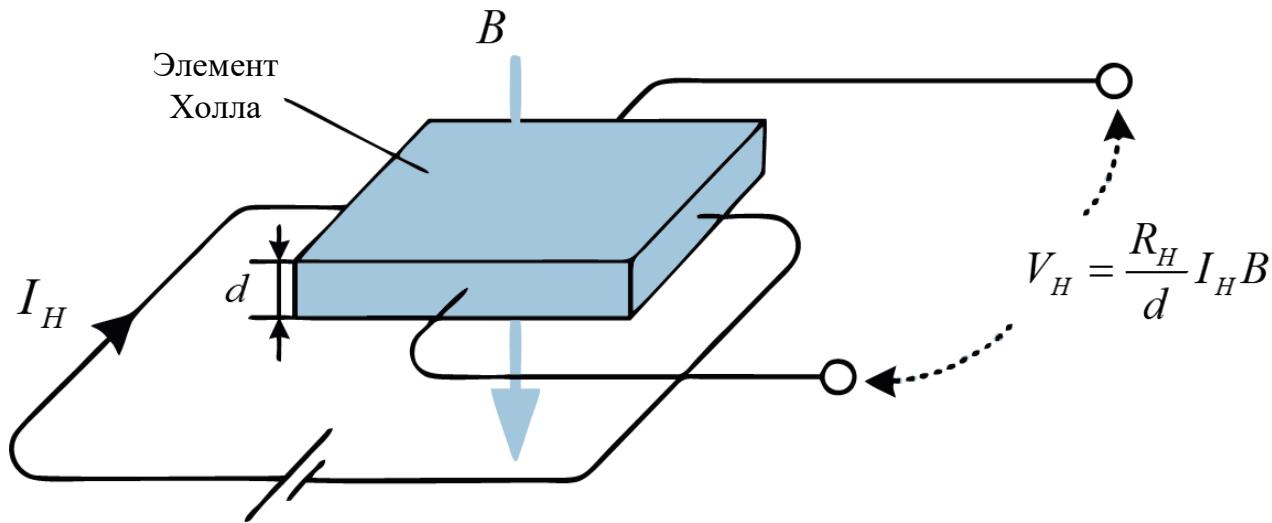
б)

Статор радиального БДПТ с а) внутренним ротором и б)
внешним

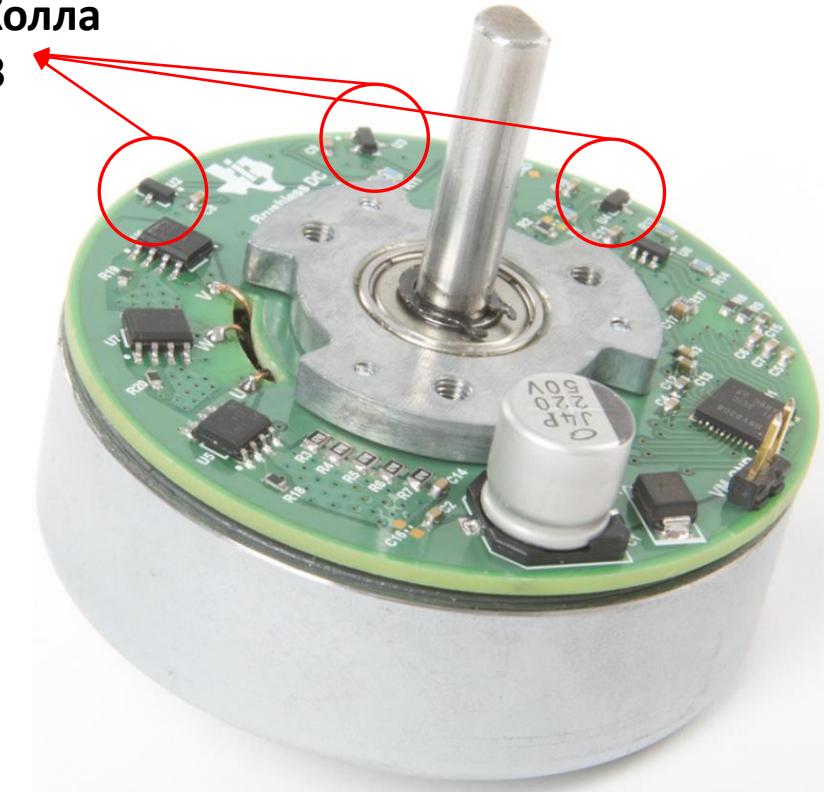


Ротор БДПТ а) с внешними магнитами; б) с встроенными;
в) со вставленными магнитами

Конструкция БДПТ: датчики Холла



Датчик Холла
DRV5013

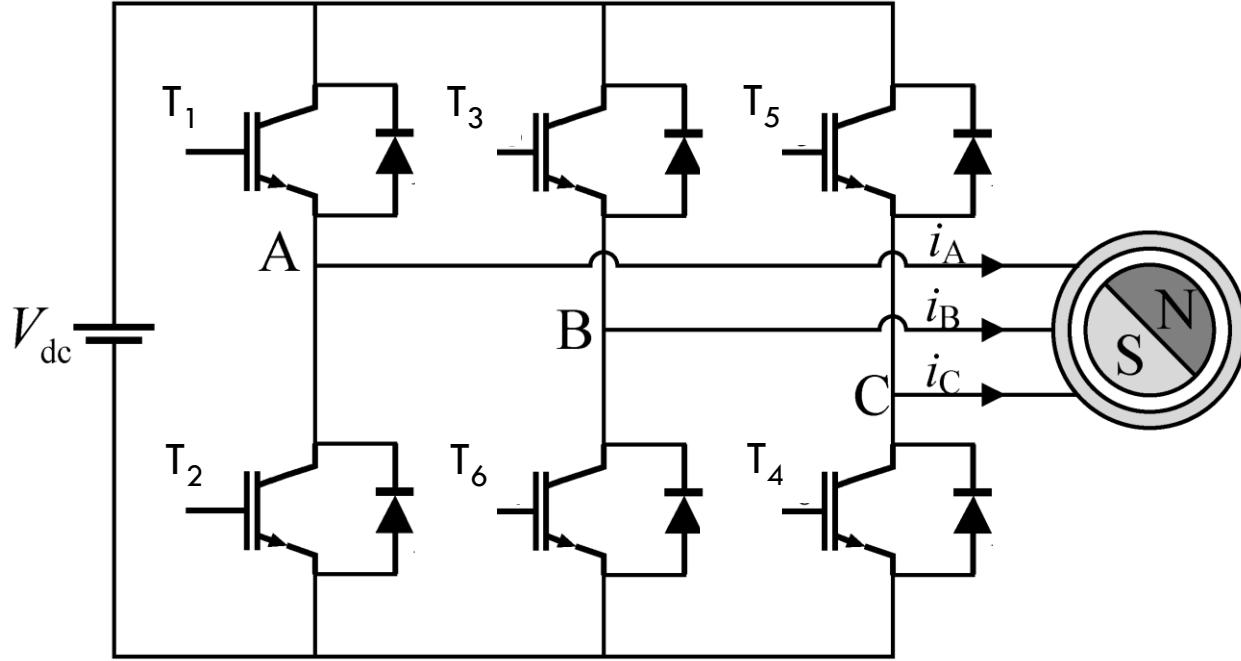


$$\nu = \frac{2\pi}{3p}$$

- геометрический угол между датчиками Холла для трехфазного двигателя

БДПТ с платой управления

Конструкция БДПТ: инвертор

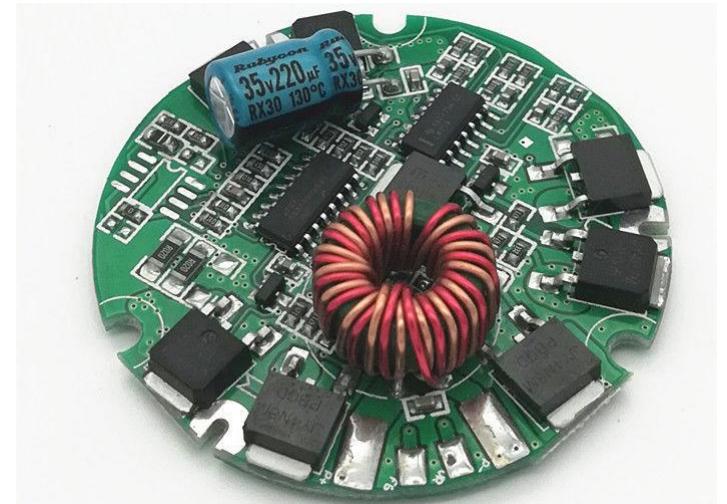


Трехфазный преобразователь напряжения

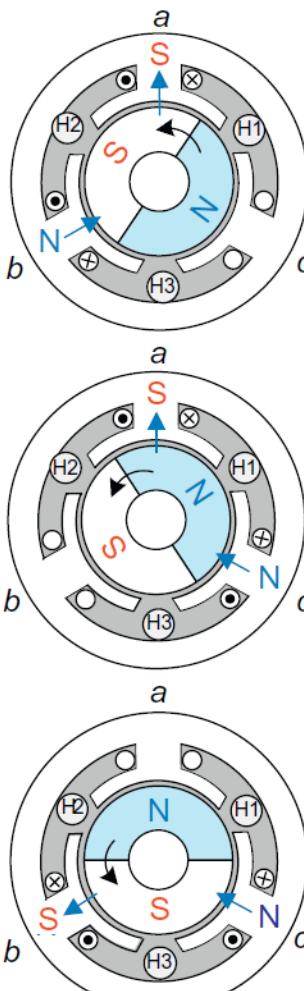
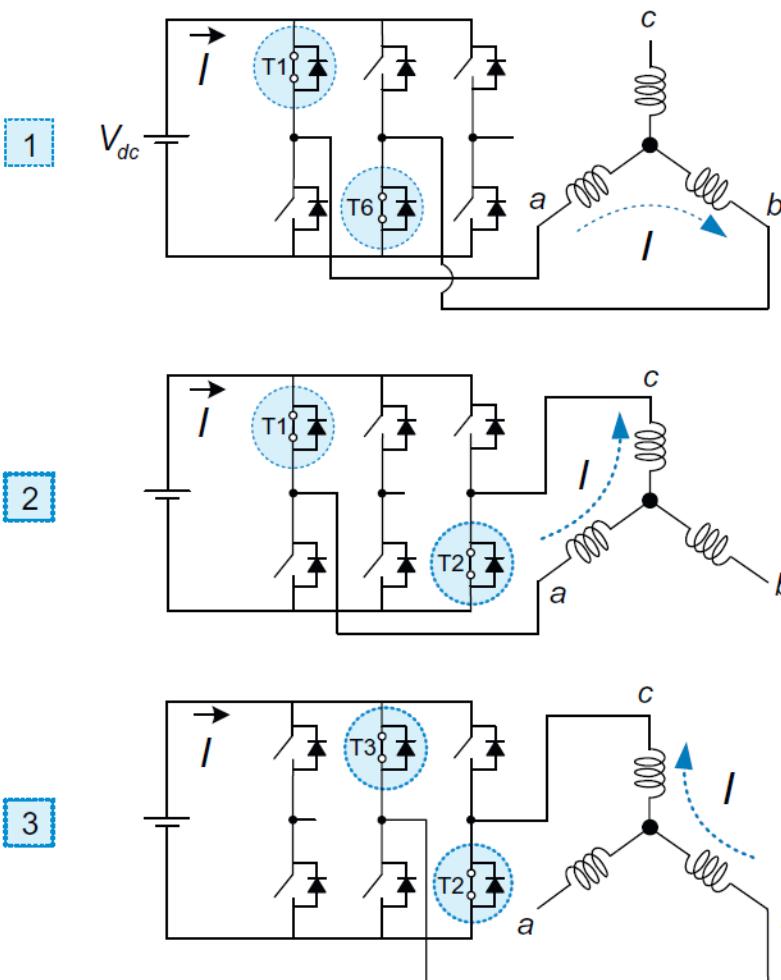
Плата
преобразователя
для отдельного
монтажа



Плата
преобразователя для
монтажа на статор



БДПТ: коммутация ключей



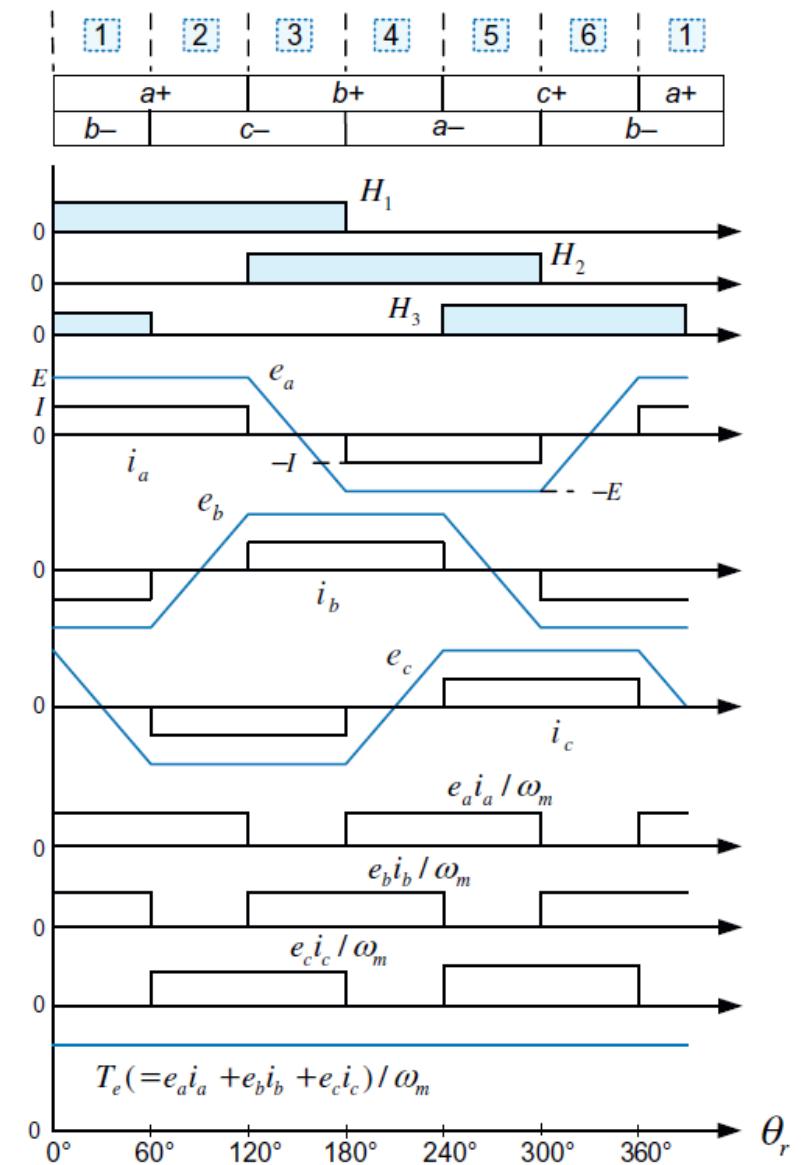
Коммутация фаз

Сигналы датчиков

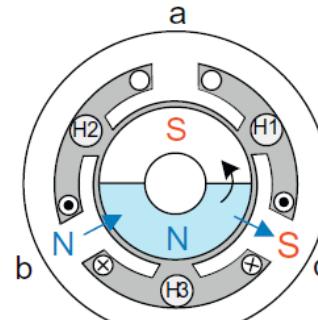
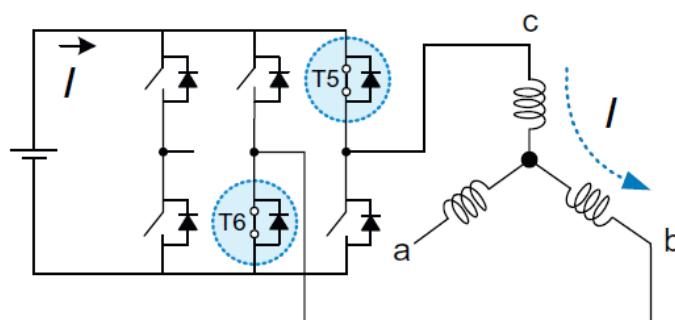
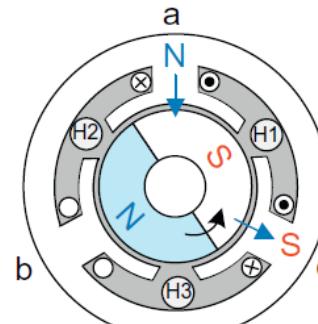
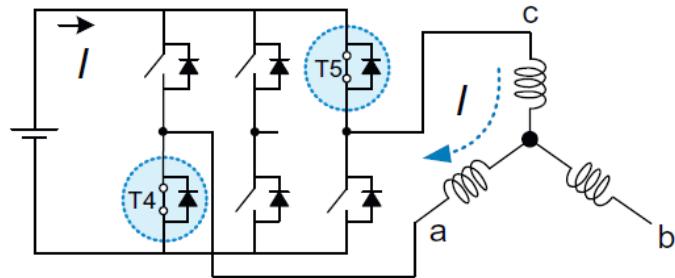
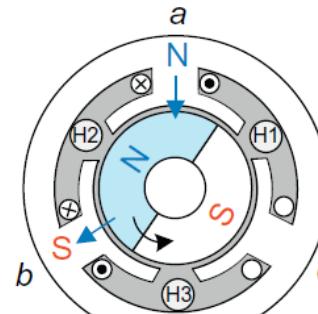
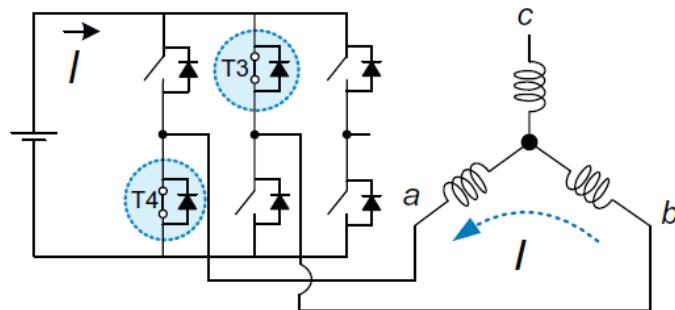
Фазный ток и ЭДС
в обмотках

Электромагнитный
момент каждой
фазы

Суммарный
развиваемый
момент



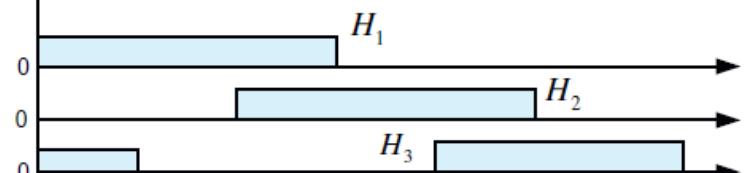
БДПТ: коммутация ключей



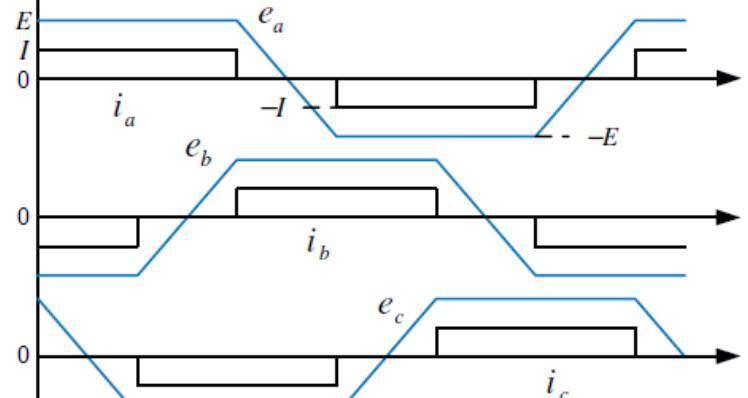
Коммутация фаз

1	2	3	4	5	6	1
a+		b+		c+		a+
b-	c-	a-		b-		

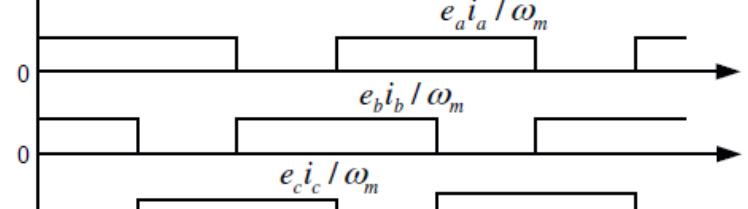
Сигналы датчиков



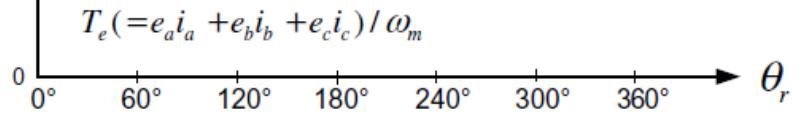
Фазный ток и ЭДС
в обмотках



Электромагнитный
момент каждой
фазы



Суммарный
развиваемый
момент



БДПТ: механич. характеристика

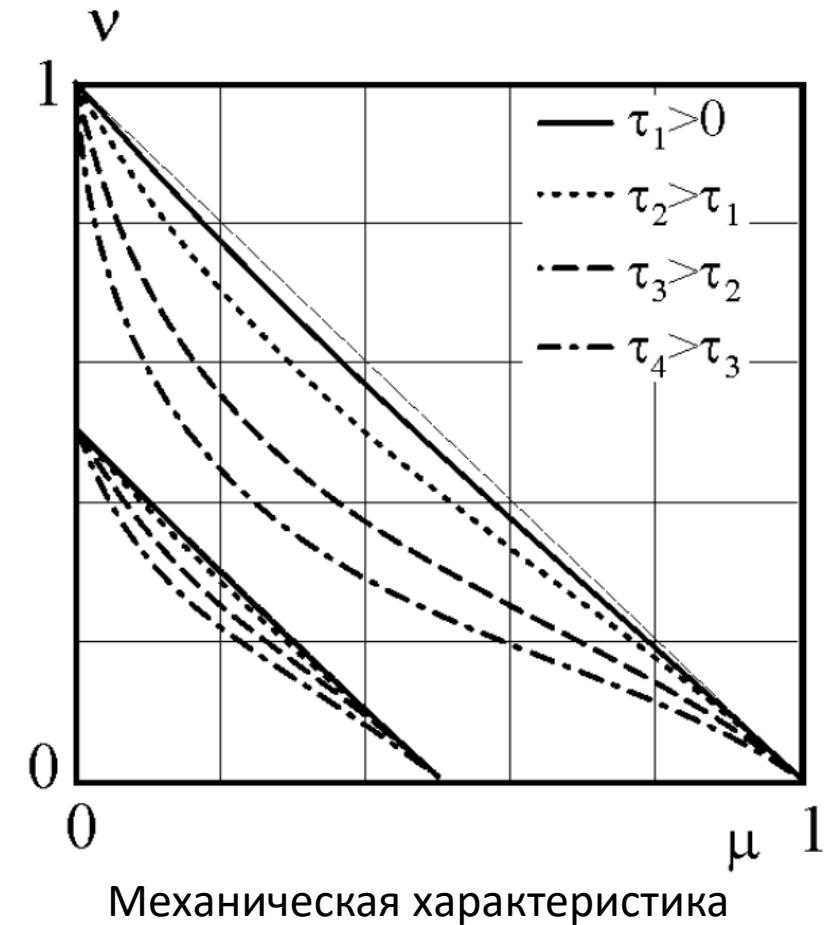
$$\Omega = \frac{U_1}{c\Phi_{0m}} - \frac{r_1}{m_1(c\Phi_{0m})^2} M \quad \text{- без учета индуктивности}$$

$$\Omega = \frac{U_1}{c\Phi_{0m}} - \frac{r_1(1 + (\tau\Omega)^2)}{m_1(c\Phi_{0m})^2} M \quad \text{- с учетом индуктивности}$$

$$\tau = \frac{pL_1}{r_1} \quad \text{- электромагнитная постоянная времени обмотки статора}$$

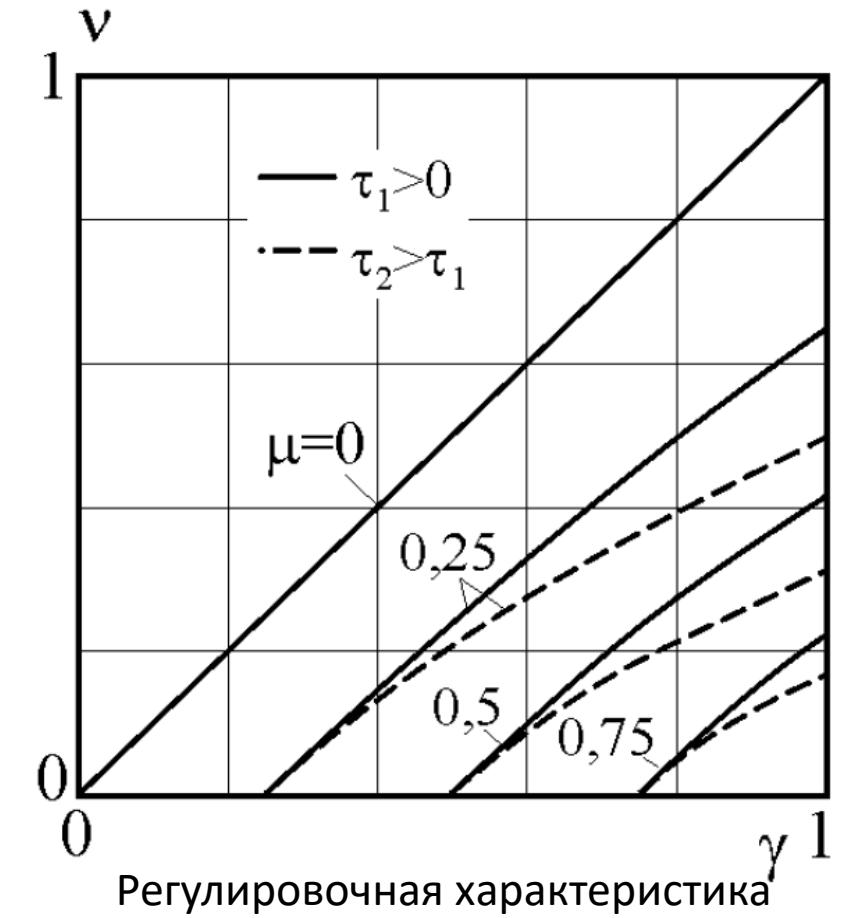
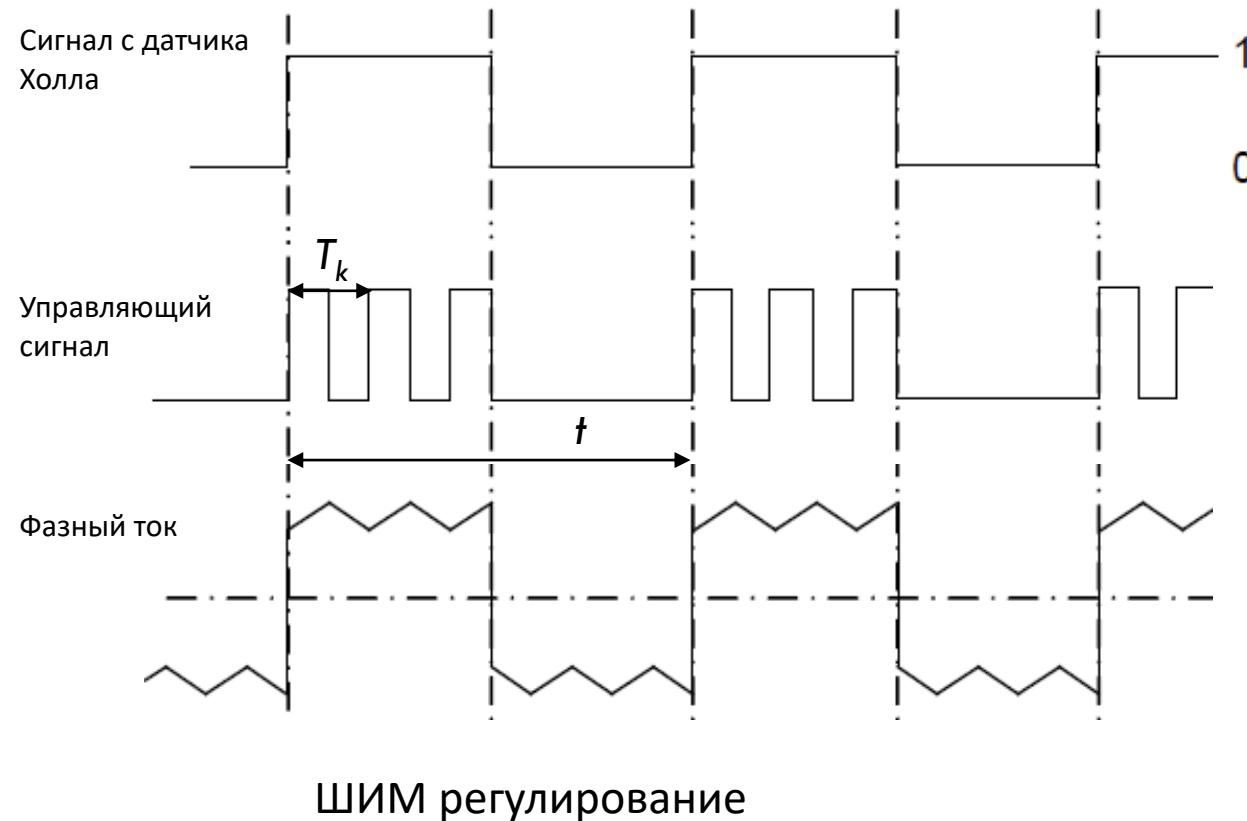
$$\Omega_{0h} = \frac{U_1}{c\Phi_{0m}} \quad M_{k0} = \frac{m_1 c \Phi_{0m} U_{1h}}{r_1}$$

$$\nu = \frac{\Omega}{\Omega_{0h}} \quad \mu = \frac{M}{M_{k0}}$$

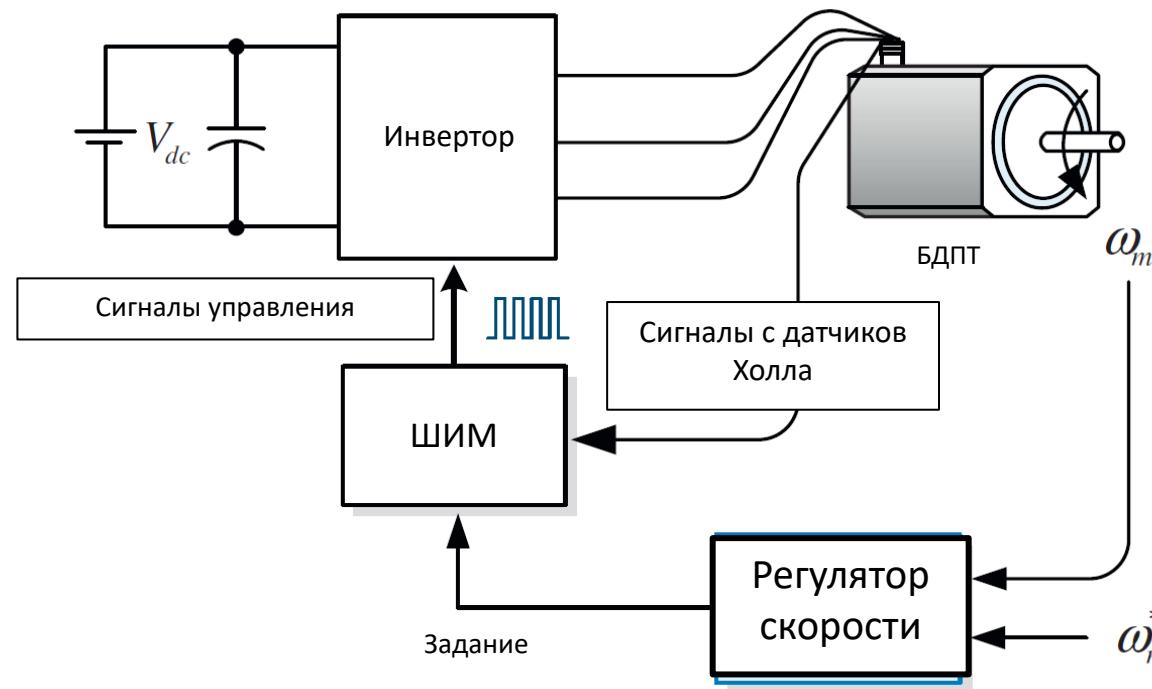


БДПТ: регулировочная характеристика и ШИМ

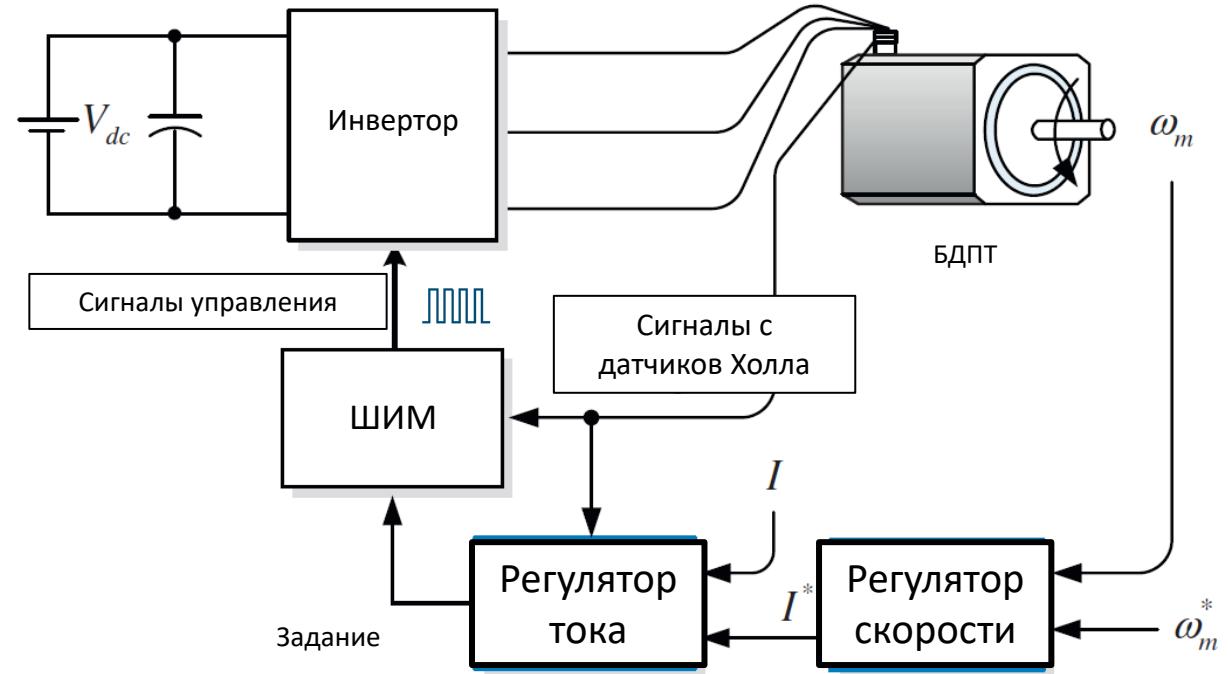
$$U_{1cp} = \frac{t}{T_k} U_1 = \gamma U_1 \quad \tau = \frac{pL_1}{r_1}$$



Схемы управления БДПТ



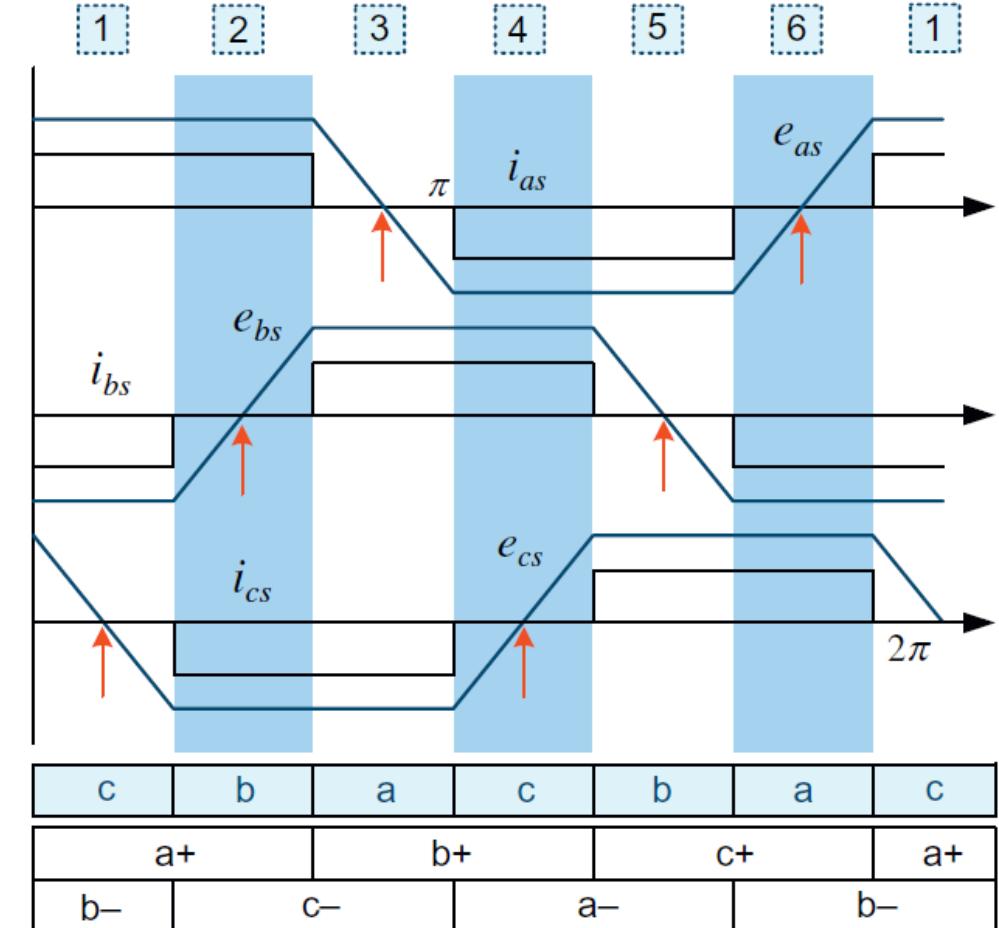
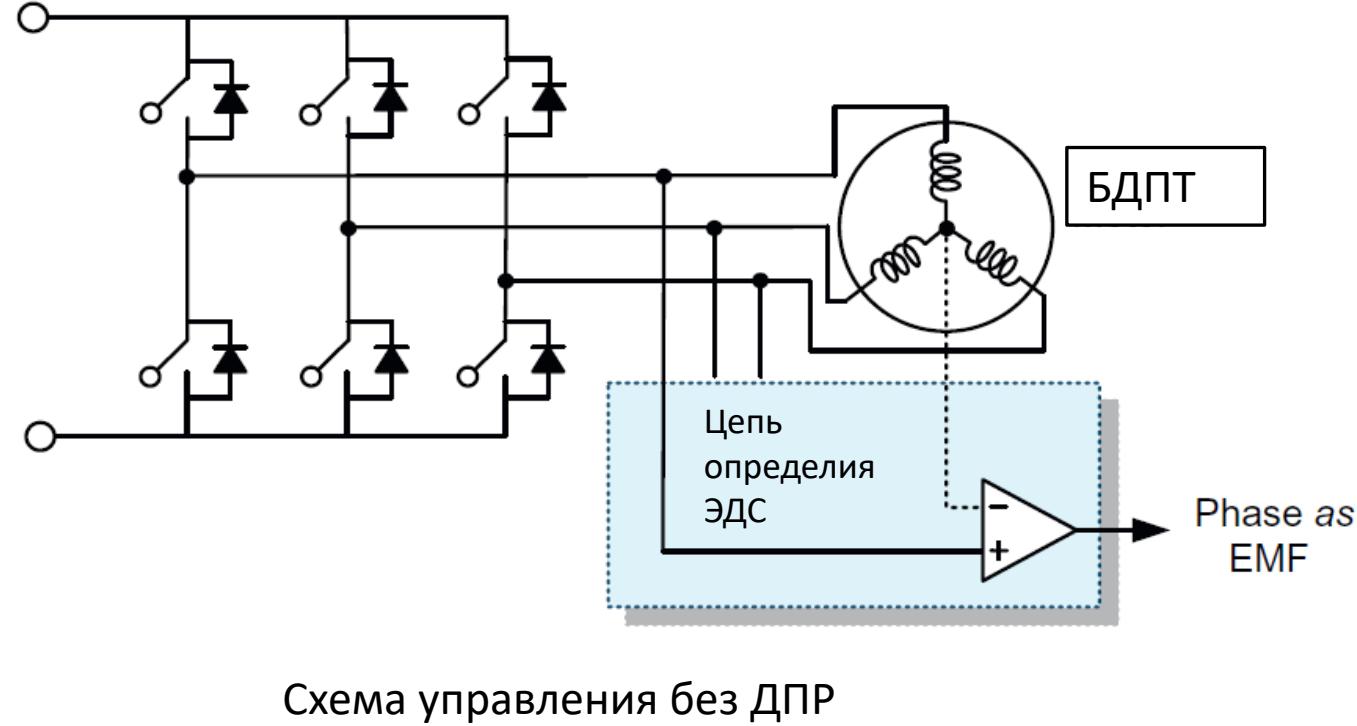
$$V' = (K_{p\omega} + \frac{K_{i\omega}}{s})(\omega_m' - \omega_m)$$



$$I' = (K_{p\omega} + \frac{K_{i\omega}}{s})(\omega_m' - \omega_m)$$

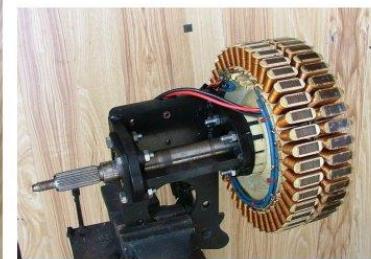
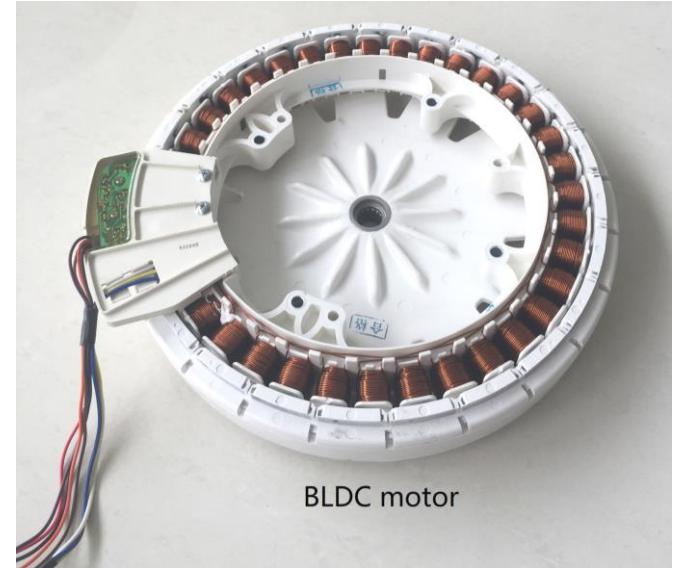
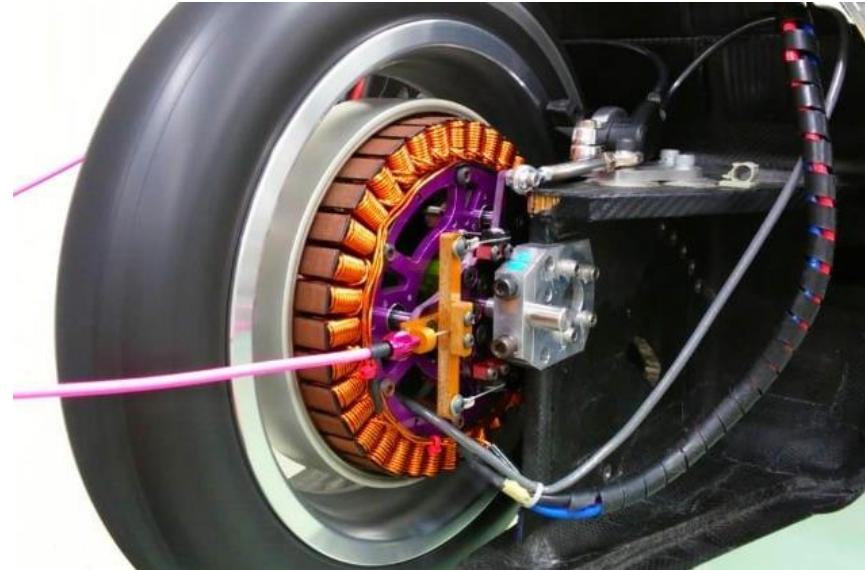
$$V' = (K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s})(I' - I)$$

Схема управления БДПТ без энкодера



Области применения БДПТ

- Стиральные машины
- Мотор-колесо
- Ветрогенераторы
- Приводы дисковых устройств
- Приводы вентиляторов
- Робототехнические комплексы



Классификация электрических машин

Электрические машины

Род тока

Постоянный ток
англ, D.C. (direct current)



Переменный ток
англ, A.C. (Alternating current)



Тип
электри-
ческих
машин

Двигатель
постоянного
тока - ДПТ
(англ, Direct
Current
Commutator
Machine)

Бесконтактный
двигатель
постоянного
тока - БДПТ
англ, BLDC
(Brushless DC
motor)

Классификация электрических
машин

Синхронная
машина - СД
(англ,
Synchronous
Machine)

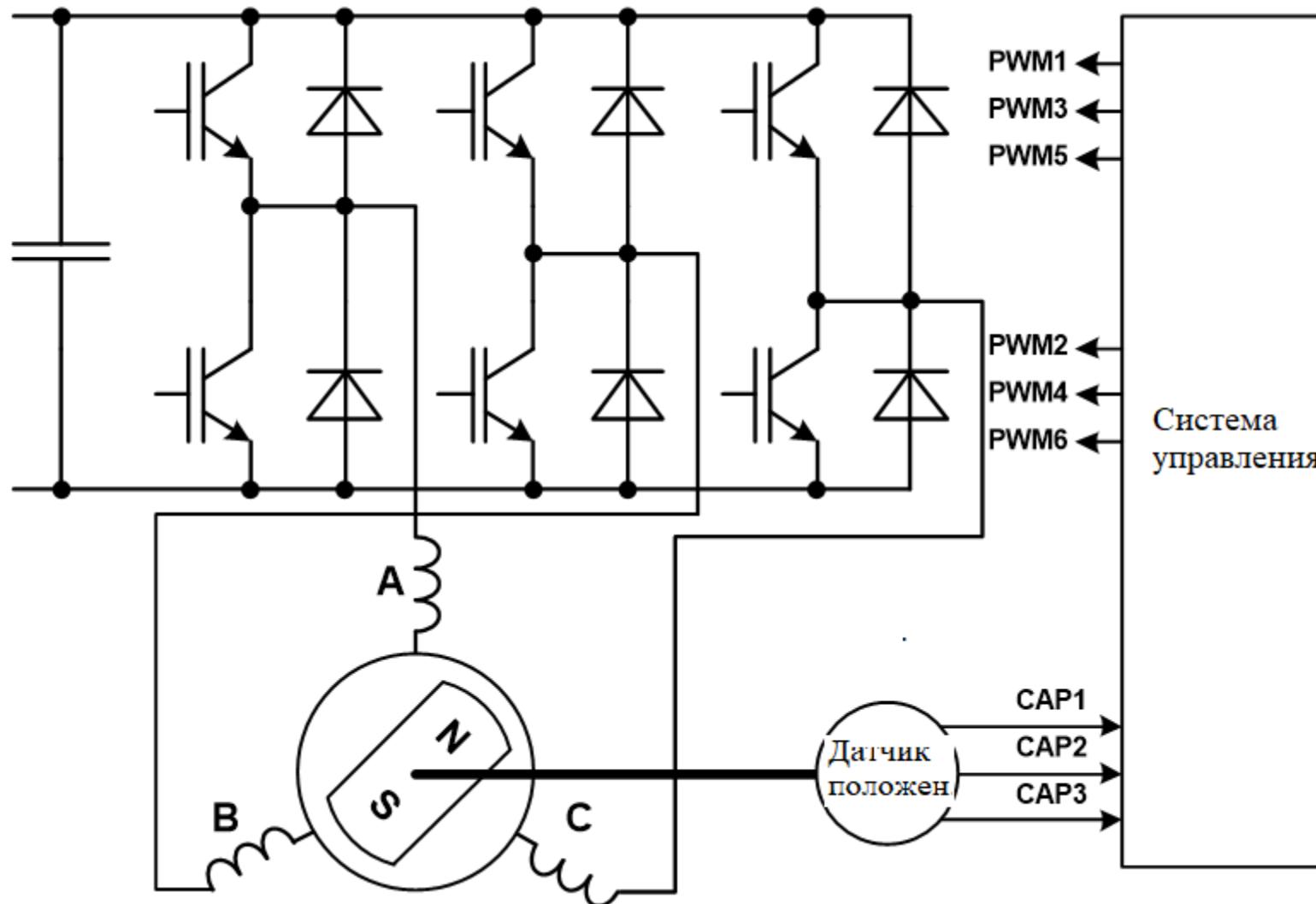
Асинхронная
машина - АД
(англ,
Induction
Machine)

Шаговый
Двигатель
ШД (англ,
Stepper
Motor)

Вентильный
двигатель
англ, PMSM
(Permanent Magnet
Synchronous Motor)

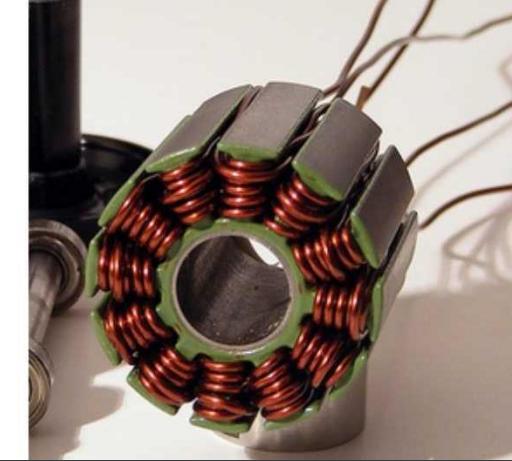
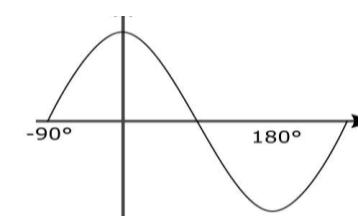
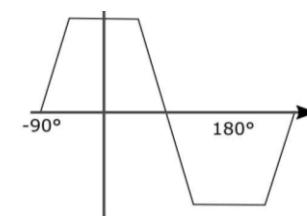
Вентильно-
индукторный
Двигатель - ВИД
(англ, SynRM
Synchronous
reluctance motors)

Вентильный режим работы синхронного двигателя (PMSM)



Путем переключения транзисторов и питания соответствующих обмоток статора создается вращающее поле и магнитный ротор «утягивается» за полем

БДПТ и ВД: сравнение

Параметр	ВД (PMSC)	БДПТ (BLDC)
Обмотка		
Датчик положения ротора	Энкодер, сельсин, вращающийся трансформатор	Датчики Холла
Форма противоэдс		

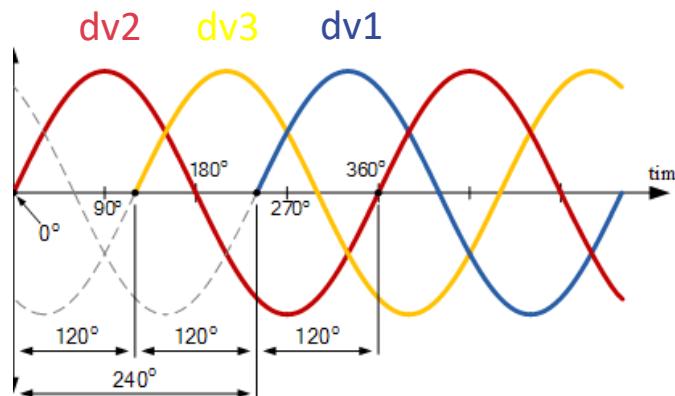
Сравнение ВД и БДПТ

ВД



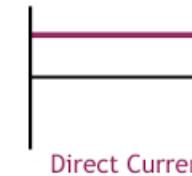
Питается
переменным током

ПротивоЭДС синусоидальная



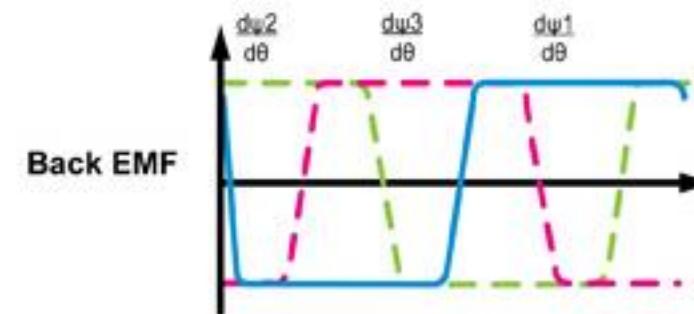
Токи синусоидальные (управление
контроллером более сложное и дорогостоящее)

БДПТ



Питается
постоянным током

ПротивоЭДС трапецидальной формы (driven by
winding and magnets design)



Токи трапецидальные (управляется
контроллером, что делает систему сложной, но
дешевой)

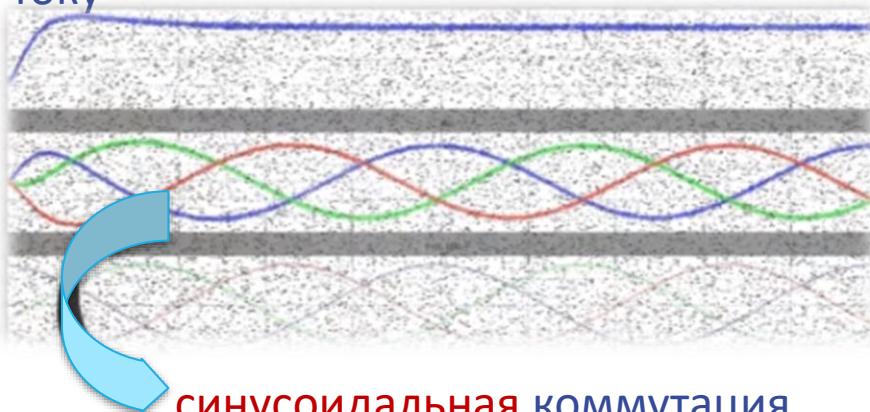
Сравнение ВД и БДПТ

ВД

- Низкий уровень шума благодаря значительно меньшему количеству гармоник в кривой тока

- Задача состоит в том, чтобы поддерживать **постоянный** крутящий момент мощности, что может быть достигнуто за счет синусоидальной обратной ЭДС

- Постоянный выходной крутящий момент благодаря **синусоидальному** напряжению и току



синусоидальная коммутация

БДПТ

- Относительно более **шумная** работа из-за наличия более высоких гармоник в форме сигнала тока

- Задача состоит в том, чтобы поддерживать **постоянный** крутящий момент мощности, что может быть достигнуто за счет трапециoidalной обратной ЭДС

- Постоянный выходной крутящий момент благодаря **трапециoidalному** напряжению и току



трапециoidalная коммутация

Сравнение ВД и БДПТ

ВД

Сложное управление (требуется 3-х фазный синусоидальный ШИМ) (**недостаток**)

Отсутствие пульсации крутящего момента при коммутации (**преимущество**)

Высокая стоимость (**недостаток**)

Высокая эффективность, более высокий крутящий момент (**преимущество**)

Используется датчик положения вала.
Бессенсорное управление также возможно, что повышает стоимость

БДПТ

Легче управлять (6 шагов) и требуется только постоянный ток (**преимущество**)

Пульсация крутящего момента при коммутации (**недостаток**)

Более низкая стоимость (**преимущество**), но относительно низкая производительность (**недостаток**)

Низкая эффективность работы (**недостаток**)

Нужен датчик Холла для определения положения. Также возможно использование без датчика, что увеличивает стоимость

Вентильтный двигатель

Преимущества



Более **высокий крутящий момент** и лучшие характеристики



Более **высокая эффективность**, чем у бесщеточного двигателя постоянного тока



Надежнее и менее шумно



Нет пульсации крутящего момента



Высокая производительность как на высокой, так и на низкой скорости работы



Простое в разработке решение для управления двигателем



Эффективный тепловой контроль

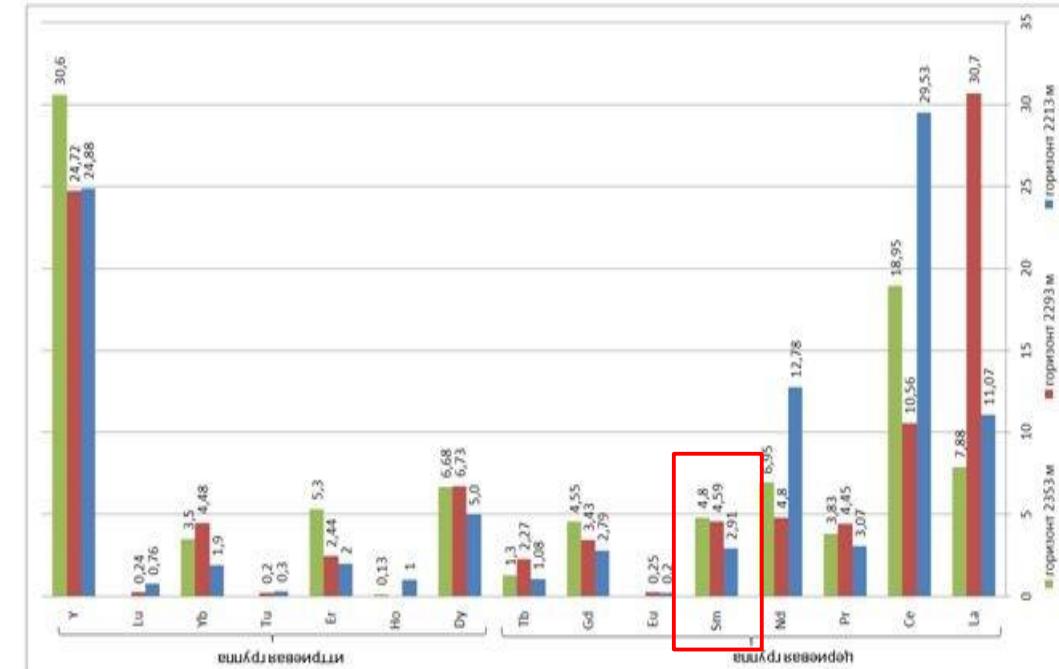


Уменьшенный размер двигателя

Затраты на изготовление РЗМ



$\Sigma \text{РЗM} \approx 100 \dots 500 \text{ г/т};$
 $C_o \approx 50 \text{ г/т}$
 $S_m \approx 5 \dots 25 \text{ г/т}$



Затраты на изготовление РЗМ

МЕТОДИКА ФИРМЫ PHILIPS, КАК ПРИМЕР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ



Затраты на изготовление РЭМ

Table 5.5. Power losses and efficiency of PM synchronous and cage induction motor drives rated at 50 kW, 6000 rpm and 200 Hz

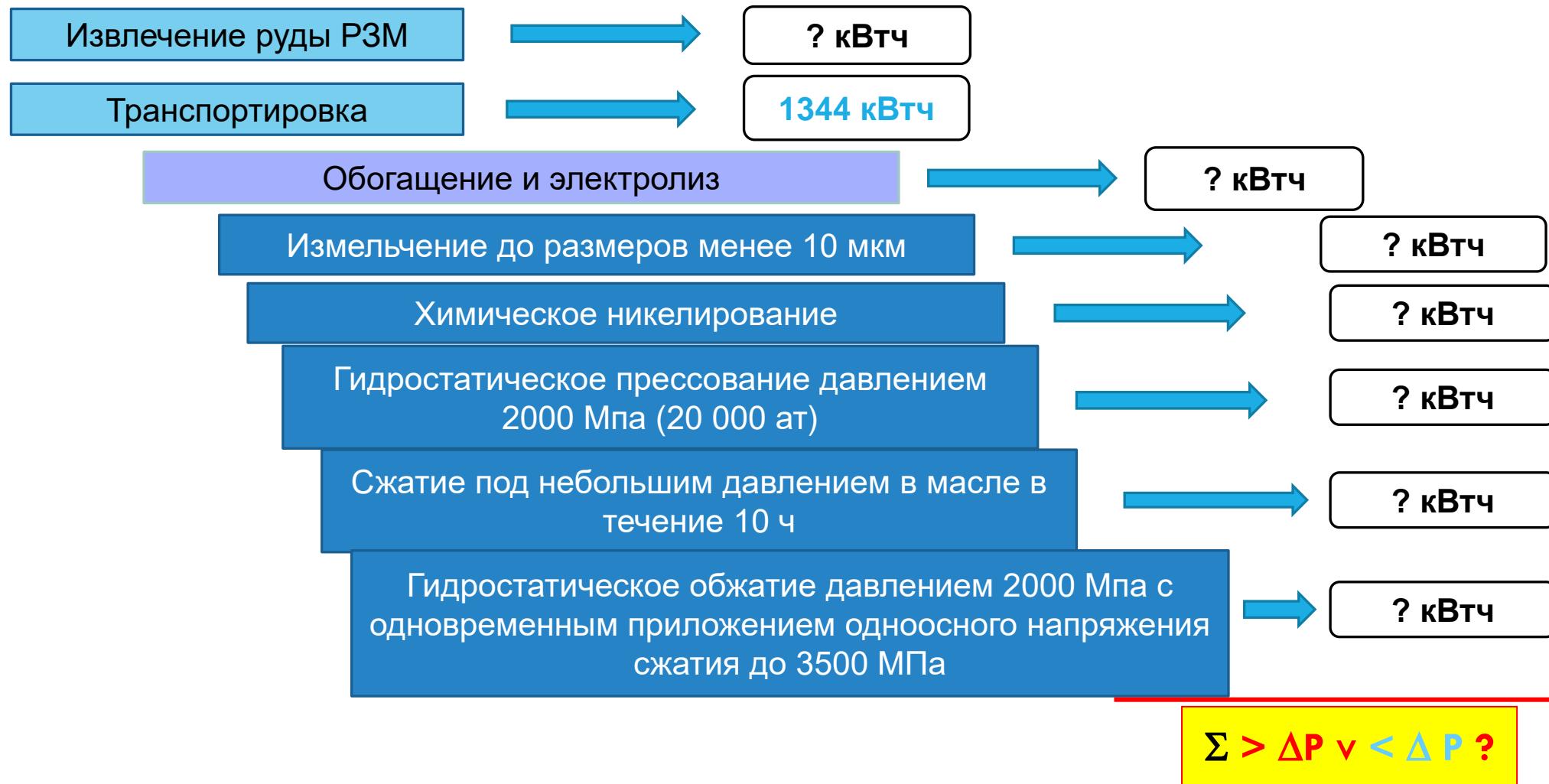
Losses	PM synchronous motor	Cage induction motor
Winding losses		
Stator winding	820 W	} 1198 W
Rotor winding	–	
Damper	90 W	–
Losses due to skin effect in the stator winding	30 W	
Losses due to skin effect in the rotor winding	–	} 710 W
Core losses	845 W	773 W
Higher harmonic losses		
Damper	425 W	–
Rotor surface	–	221 W
Flux pulsation	–	301 W
Rotational losses		
Bearing friction	295	
Windage	70	} 580 W
Total motor losses	2575 W	3783 W
Total inverter losses	537 W	1700 W
Total drive losses	3112	5483 W
Efficiency	95.1%	93.0%
Motor	94.1%	90.1%
Electromechanical drive system		

Table 14.2. Weibull database

Machines, devices or components	Shape factor β			MTTF, h		
	Low	Typical	High	Low	Typical	High
Motors, a.c. brushless	0.5	1.2	3.0	1000	100,000	200,000
Motors, d.c. brush	0.5	1.2	3.0	1000	50,000	100,000
Transformers	0.5	1.1	3.0	14,000	200,000	420,000
Solenoid valves	0.5	1.1	3.0	50,000	75,000	1,000,000
Transducers	0.5	1.0	3.0	11,000	20,000	90,000
Magnetic clutches	0.8	1.0	1.6	100,000	150,000	333,000
Ball bearing	0.7	1.3	3.5	14,000	40,000	250,000
Roller bearings	0.7	1.3	3.5	9000	50,000	125,000
Sleeve bearing	0.7	1.0	3.0	10,000	50,000	143,000
Couplings	0.8	2.0	6.0	25,000	75,000	333,000
Gears	0.5	2.0	6.0	33,000	75,000	500,000
Centrifugal pumps	0.5	1.2	3.0	1000	35,000	125,000
Coolants	0.5	1.1	2.0	11,000	15,000	33,000
Lube oils, mineral	0.5	1.1	3.0	3000	10,000	25,000
Lube oils, synthetic	0.5	1.1	3.0	33,000	50,000	250,000
Greases	0.5	1.1	3.0	7000	10,000	33,000

Снижение потерь $\Delta P=1,2 \text{ кВт}$
 1000 час $\equiv 1200 \text{ кВтч}$
 $50000/100000 \text{ час} \equiv 60/120 \text{ МВтч}$
 Содержание металлов в сплаве РЭМ
 $\text{SmCo} \approx 4,2 \text{ кг} = (\text{Sm}=1,4) + (\text{Co}=2,8) \text{ кг} \equiv (\text{Sm}=280) + (\text{Co}=56) \text{ т}$
 Энергозатраты только на транспортировку сырья
 $\text{Sm} \equiv 280 \text{ т} \times 10 \text{ км} \equiv 1120 \text{ кВтч}$
 $\text{Co} \equiv 56 \text{ т} \times 10 \text{ км} \equiv 224 \text{ кВтч}$
 $\Sigma=1344 \text{ кВтч}$

Затраты на изготовление РЗМ



Классификация электрических машин

Электрические машины

Род тока

Постоянный ток
англ, D.C. (direct current)



Переменный ток
англ, A.C. (Alternating current)



Тип
электри-
ческих
машин

Двигатель
постоянного
тока - ДПТ
(англ, Direct
Current
Commutator
Machine)

Бесконтактный
двигатель
постоянного
тока - БДПТ
англ, BLDC
(Brushless DC
motor)

Синхронная
машина - СД
(англ,
Synchronous
Machine)

Асинхронная
машина - АД
(англ,
Induction
Machine)

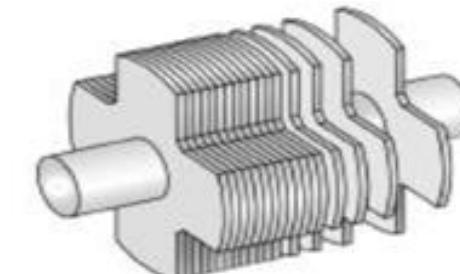
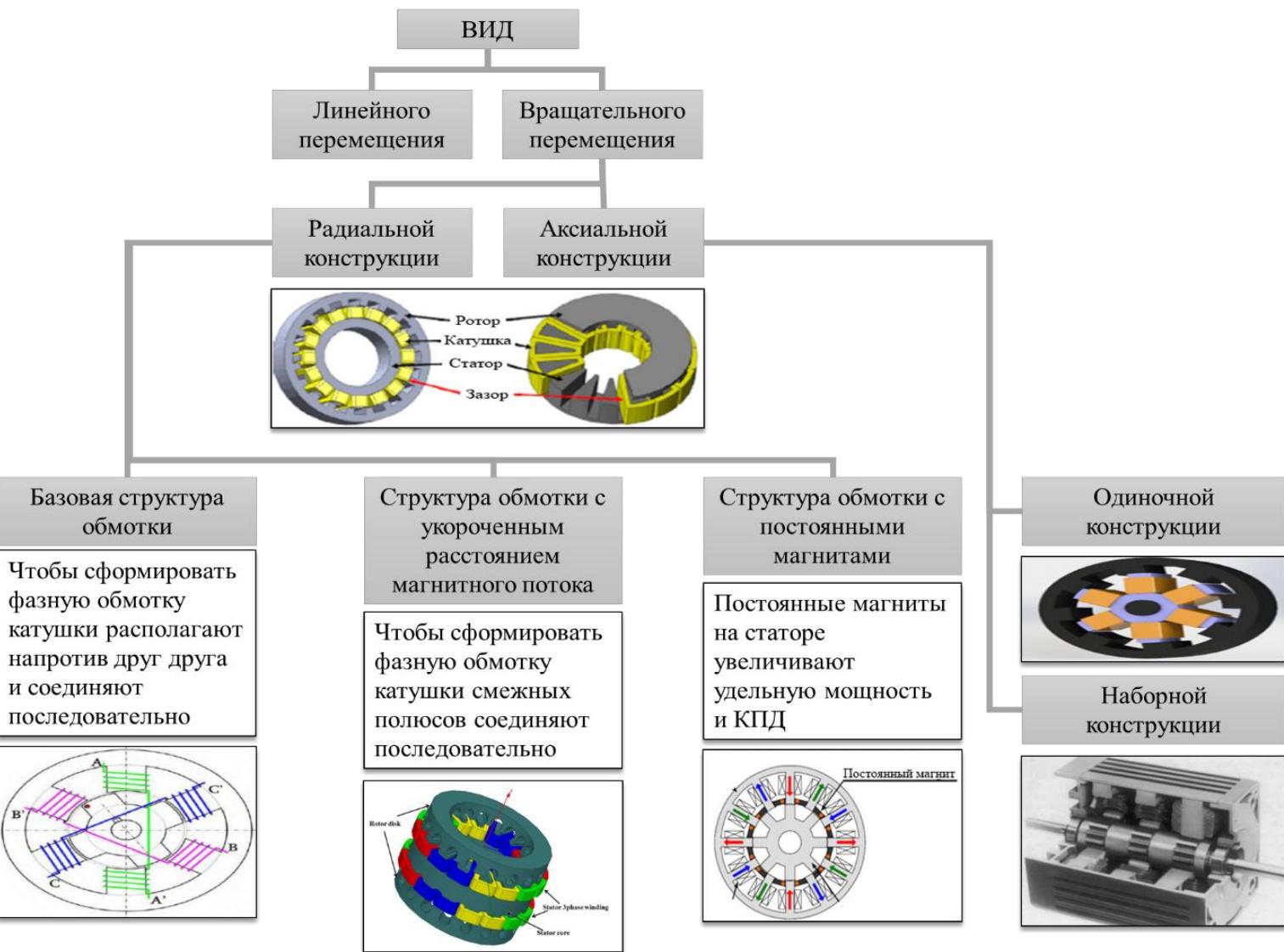
Шаговый
Двигатель
ШД (англ,
Stepper
Motor)

Вентильный
двигатель
англ, PMSM
(Permanent Magnet
Synchronous Motor)

Вентильно-
индукторный
Двигатель - ВИД
(англ, SynRM
Synchronous
reluctance motors)

Классификация электрических
машин

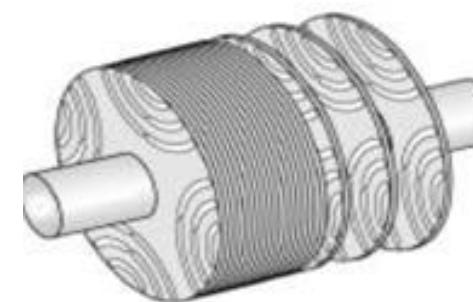
Вентильтрансформаторный двигатель



с простым
явнополюсным
ротором



с аксиально-
расслоенным
ротором



поперечно-
расслоенным
ротором

Вентильно-индукторный двигатель

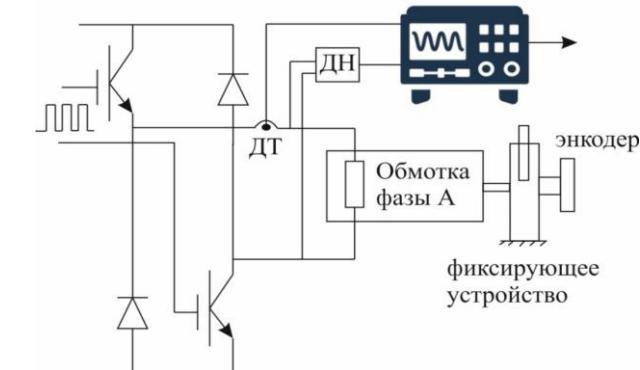
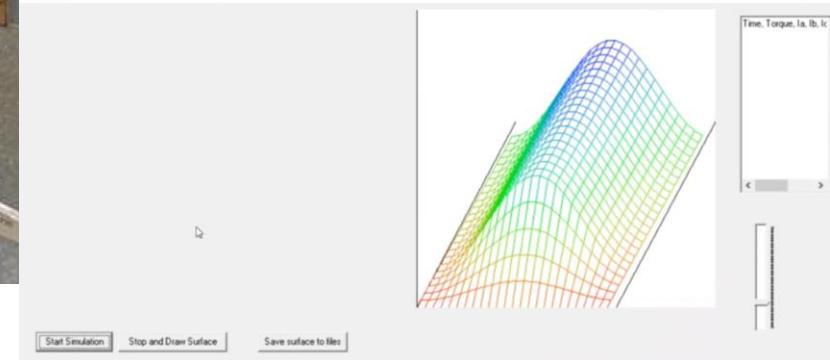
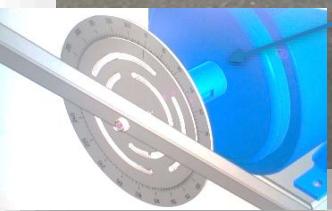
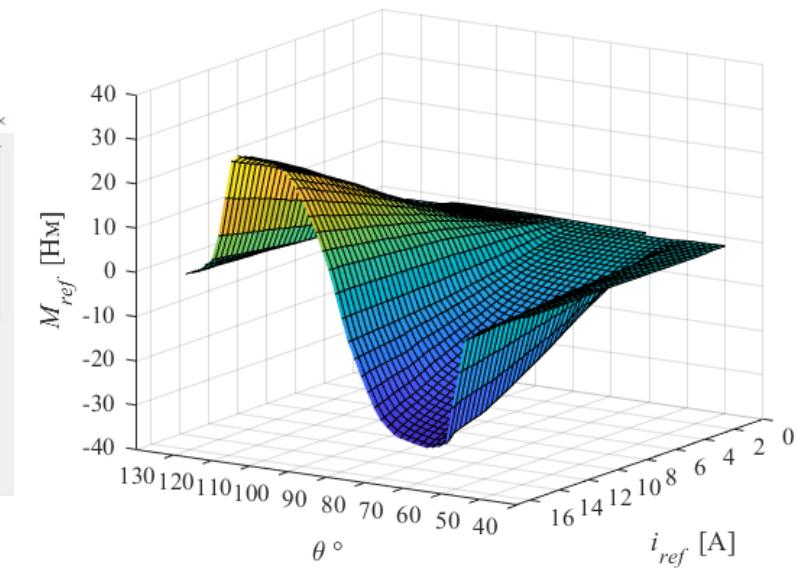
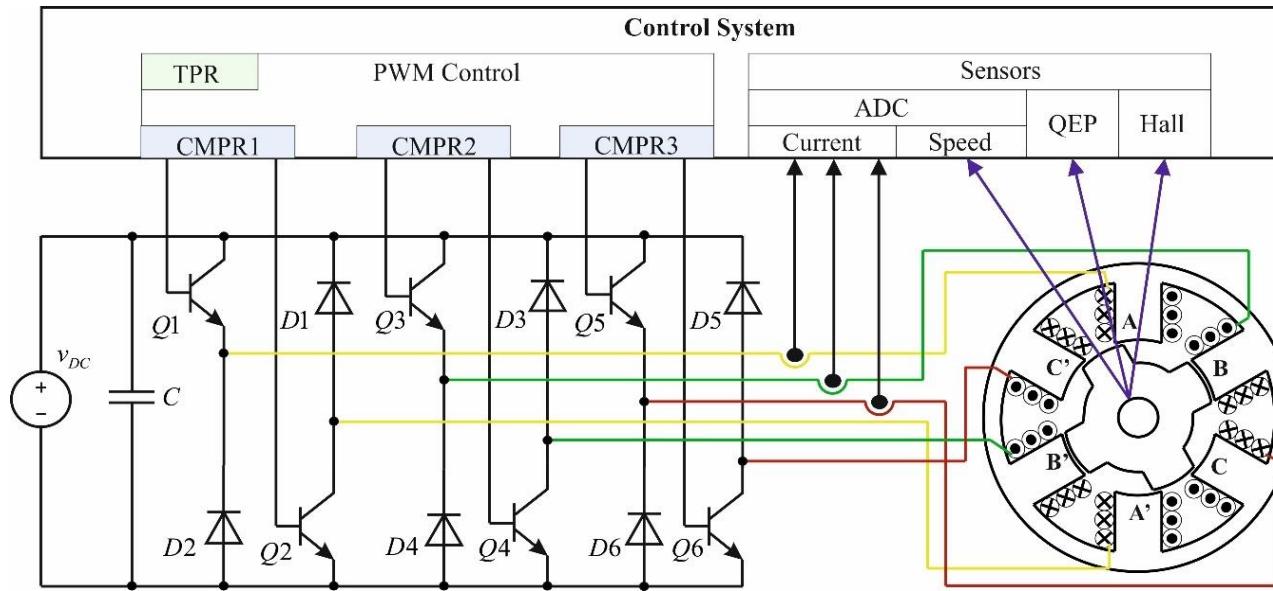


Схема экспериментального стенда для измерения карты намагничивания ВИД (автономный метод)

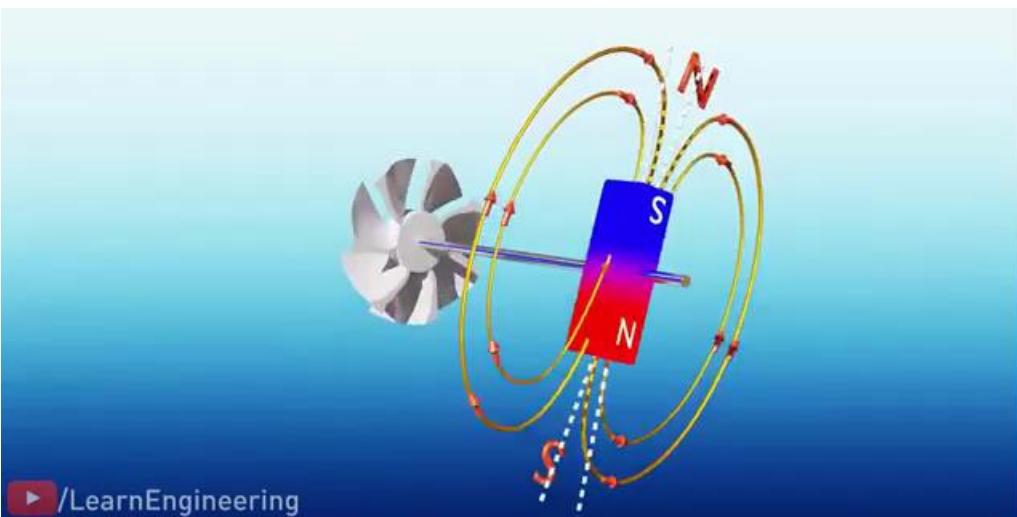


Зависимость момента от положения и тока для фазы А.

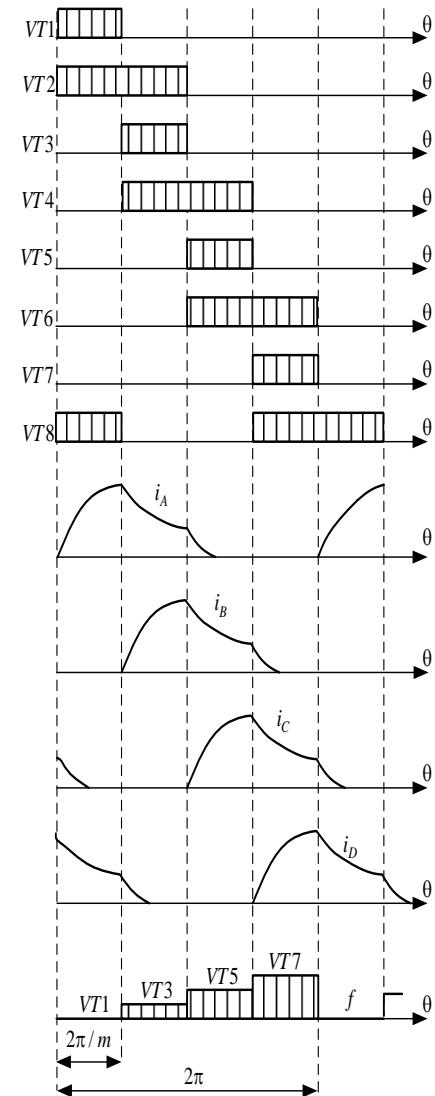
Вентильно-индукторный двигатель



Структурная схема типового преобразователя с ВИД



LearnEngineering



Формирование токов в обмотках фаз ВИД

Спасибо за внимание!

lukichev@itmo.ru