

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Электрические машины преобразуют механическую энергию в электрическую и наоборот.

Классификация электрических машин по назначению

Электрические генераторы – преобразуют механическую энергию в электрическую. Применяют в электростанциях, автомобилях, самолетах, кораблях, автономных генераторах.

Электрические двигатели – преобразуют электрическую энергию в механическую. Применяют в качестве электрического привода в станках, электротранспорте, машинах и механизмах. В системах автоматического управления их используют в качестве исполнительных, регулирующих, программируемых органов.

Электрические микромашины небольшой мощности (до 600 Вт) применяют в бытовой технике и автоматических устройствах и разде-

ляются на группы:

1. Силовые микродвигатели – привод механических узлов автоматических приборов (компьютеры, принтеры, бытовая техника, робототехника).

2. Управляемые (исполнительные двигатели) – преобразуют подводимый электрический сигнал в механическое перемещение вала и отрабатывают определенные команды (робототехника, системы наведения (антенн, видеокамер и т.п.)

3. Тахогенераторы – преобразуют механическое вращение вала в электрическое напряжение, пропорциональное частоте вращения вала.

4. Сельсины – машины синхронной связи, осуществляют синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механических не связанных между собой осей.

5. Микромашины гироскопических приборов – осуществляют вращение роторов гироскопов с высокой частотой и коррекцию их

положения.

Классификация электрических машин по роду тока и принципу действия

Электрические машины по роду тока делятся на *машины переменного тока* и *машины постоянного тока*.

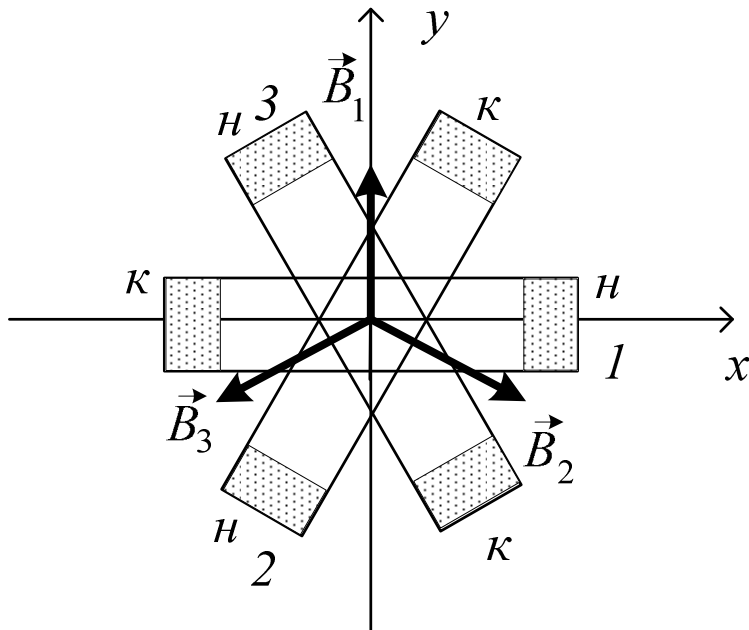
1. К машинам переменного тока относятся: трансформаторы, асинхронные двигатели, синхронные генераторы и двигатели, синхронные микромашины, шаговые двигатели.

2. К машинам постоянного тока относятся генераторы постоянного тока, электродвигатели постоянного тока.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Создание вращающегося магнитного поля

Вращающееся магнитное поле (**ВМП**) трехфазного тока создается с помощью трех катушек, сдвинутых в пространстве на 120° и питаемых трехфазным током.



Токи в катушках:

$$i_1(t) = I_m \sin \omega t,$$

$$i_2(t) = I_m \sin(\omega t - 120^\circ),$$

$$i_3(t) = I_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

Каждый ток создает пульсирующее магнитное поле, направленное вдоль оси катушек. Магнитная индукция пропорциональна токам. Вектора магнитной индукции сдвинуты во времени и пространстве.

$$B_1(t) = B_m \sin \omega t, B_2(t) = B_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\ B_3(t) = B_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

Направление B_i определяем по правилу Буравчика.

Найдем проекции результирующего вектора магнитной индукции на оси x и y :

$$B_x(t) = B_2 \cos 30^\circ - B_3 \sin 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} [B_m (\sin \omega t - 120^\circ) - B_m \sin(\omega t + 120^\circ)] =$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} B_m [2 \cos \omega t \sin(-120^\circ)] =$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} B_m 2 \cos \omega t \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -\frac{3}{2} B_m \cos \omega t.$$

$$B_y(t) = B_1 - B_2 \cos 60^\circ - B_3 \cos 60^\circ =$$

$$= B_m \sin \omega t - B_m \sin(\omega t - 120^\circ) \cos 60^\circ - B_m \sin(\omega t + 120^\circ) \cos 60^\circ =$$

$$B_m \sin \omega t - 0,5 B_m [\sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t + 120^\circ)] =$$

$$B_m \sin \omega t - 0,5 B_m [2 \sin \omega t \cos(-120^\circ)] =$$

$$B_m \sin \omega t + 0,5 B_m \sin \omega t = \frac{3}{2} B_m \sin \omega t.$$

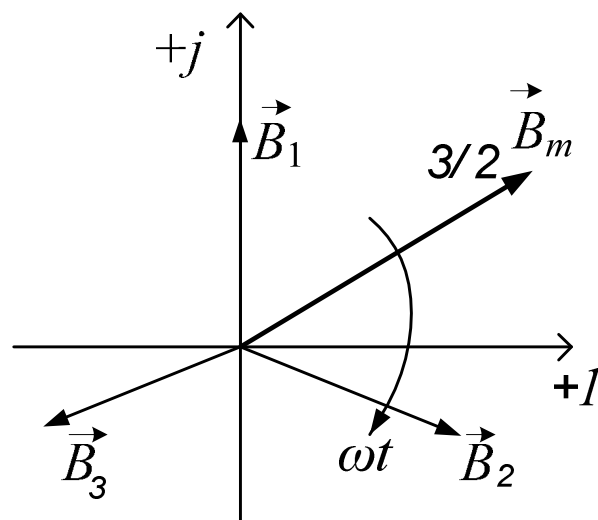
Модуль результирующего вектора:

$$|B(t)| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 B_m^2 \cos^2 \omega t + \left(\frac{3}{2}\right)^2 B_m^2 \sin^2 \omega t} = \frac{3}{2} B_m$$

$$\text{Фаза: } \operatorname{tg} \alpha = \frac{B_y}{B_x} = \frac{\frac{3}{2} \sin \omega t}{-\frac{3}{2} \cos \omega t} = -\operatorname{tg} \omega t.$$

Следовательно, результирующий вектор магнитной индукции

$\vec{B}(t) = \frac{3}{2} B_m e^{-j\omega t}$ вращается в сторону катушки с отстающим током с угловой скоростью ω .



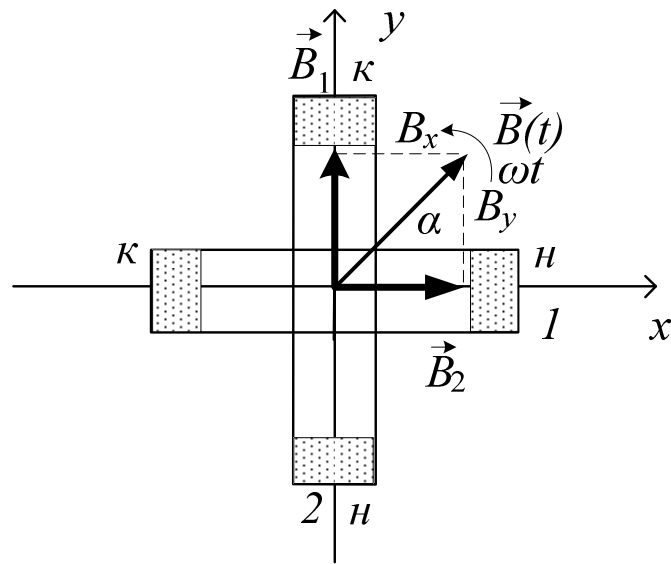
Направление вращения определяется порядком следования фаз токов.

Для изменения направления вращения на противоположное можно поменять местами включение любых двух фаз на противоположное.

Вращающееся магнитное поле двухфазного тока

Можно получить с помощью двух катушек с магнитными индукциями: $B_y = B_1(t) = B_m \sin \omega t$, $B_x = B_2(t) = B_m \cos \omega t$.

Модуль вращающегося вектора $|B(t)| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = B_m$.



Фаза:
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_y}{B_x} = \frac{\sin \omega t}{\cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t.$$

$\vec{B}(t) = B_m e^{j\omega t}$. Вектор вращается в сторону катушки с отстающим током.

Устройство асинхронного двигателя трехфазного тока.

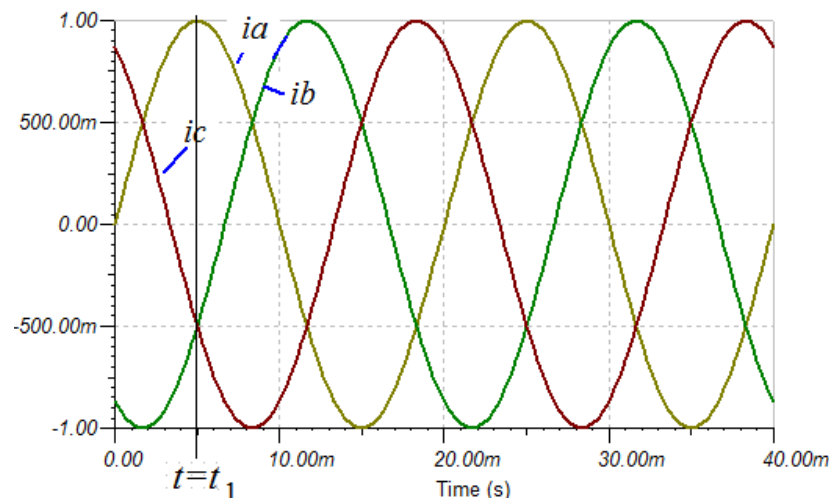
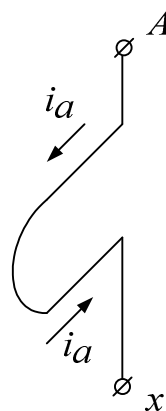
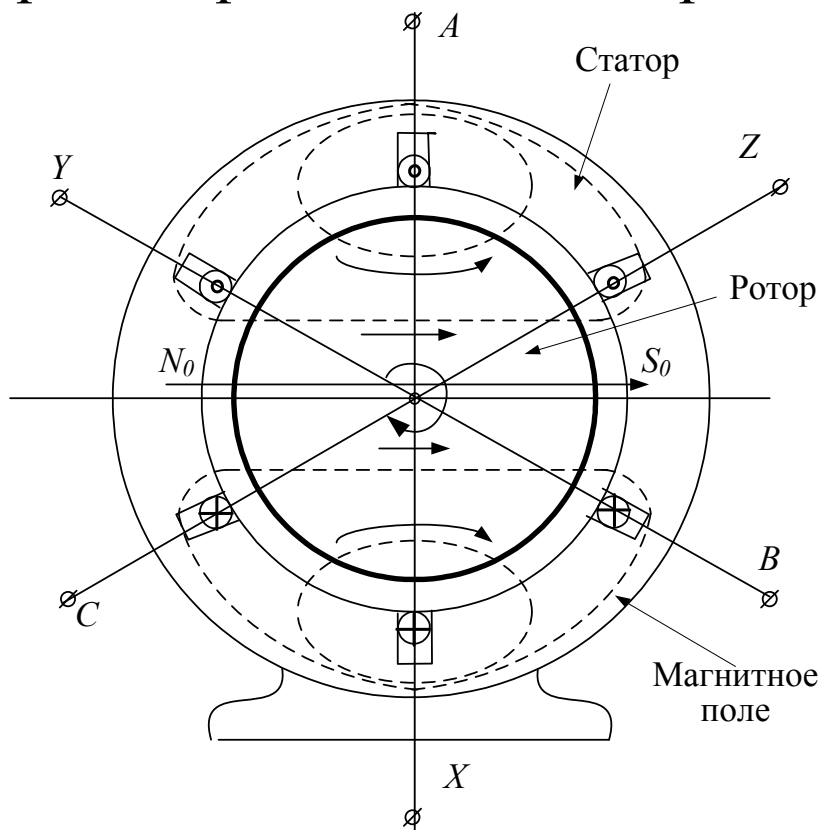
Асинхронные машины (АСМ) относятся к электрическим машинам переменного тока. Магнитное поле АСМ создается трех-, двух- или однофазным источником переменного напряжения. Потому АСМ бывают трех-, двух-, однофазные.

Трехфазный асинхронный двигатель (АСД) разработан в 1889 г. русским изобретателем, ученым и инженером Доливо-Добровольским

и до сих пор используется благодаря простоте конструкции.

Мощность асинхронных двигателей от 60 Вт до 400 кВт.

Статор трехфазной АСМ – состоит из чугуновой станины, в которой закреплен магнитопровод с пазами для обмоток.



Все внешние провода подходят сзади.

Три обмотки асинхронного двигателя создают вращающийся вектор магнитного поля N_0S_0 с двумя полюсами N_0 и S_0 .

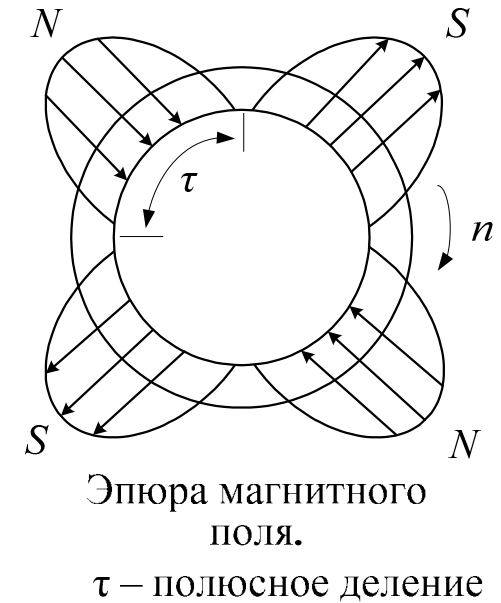
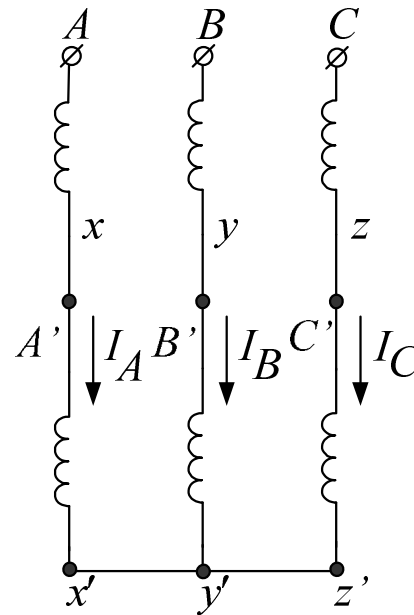
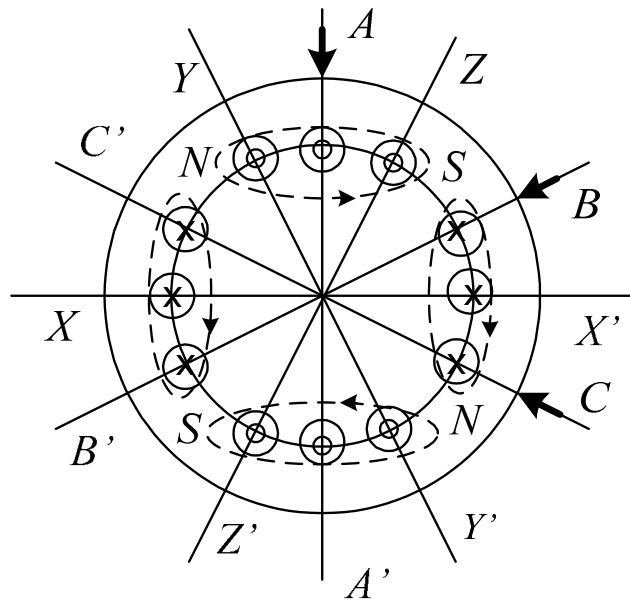
Так как существуют 2 полюса (N_0 и S_0), то машина называется двухполюсная.

P – количество пар полюсов магнитного поля. В двухполюсной машине $P=1$.

ВМП вращается с частотой токов в статоре f_1 . Период вращения $T = 1/f_1$.

$n_1 = 60 f_1$ - количество оборотов в минуту.

Четырехполюсная АСМ имеет обмотку статора из шести катушек. Магнитное поле имеет две пары полюсов ($P=2$).



Для фазы А в момент t_1 ток проходит по проводникам $A \rightarrow x \rightarrow A' \rightarrow x'$.

Магнитные линии исходят из N и направлены к S . Магнитное поле вращается с частотой $n = \frac{60f}{p}$, $p = 2$.

Изменяя конструкцию обмоток число полюсов можно сделать любым. В результате снижается скорость вращения.

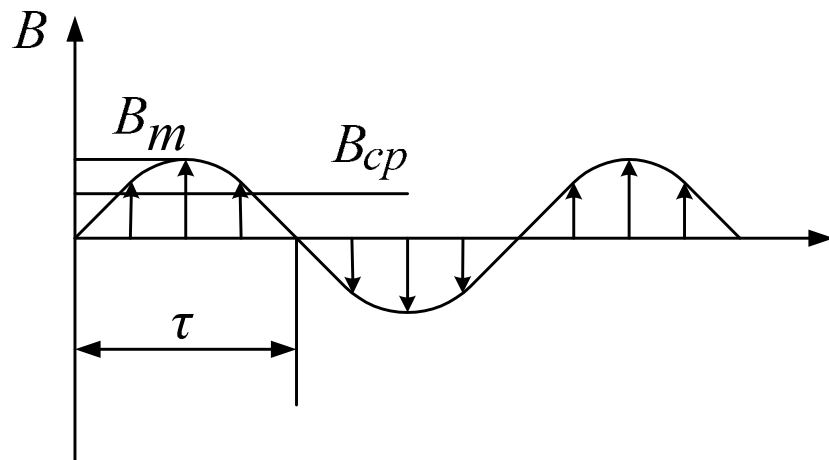
Магнитный поток полюса

Магнитный поток одного полюса $\Phi_n = B_{cp} \tau \cdot l$, где:

τ - полюсное значение,

l – активная длина проводника,

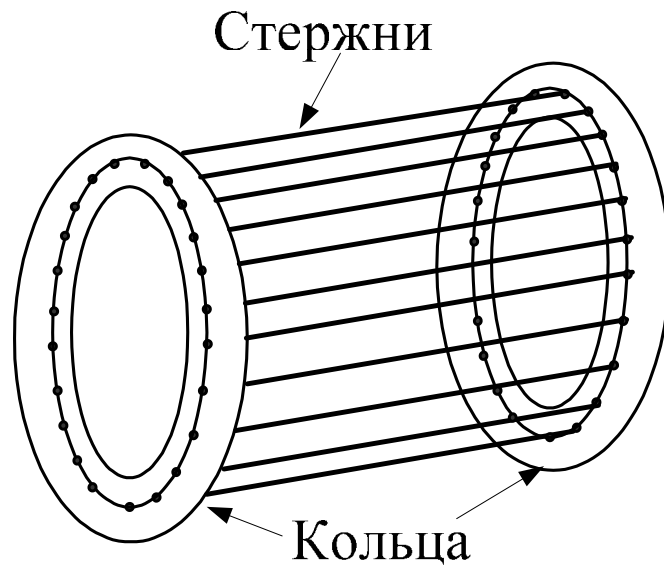
B_{cp} – среднее значение магнитной индукции.



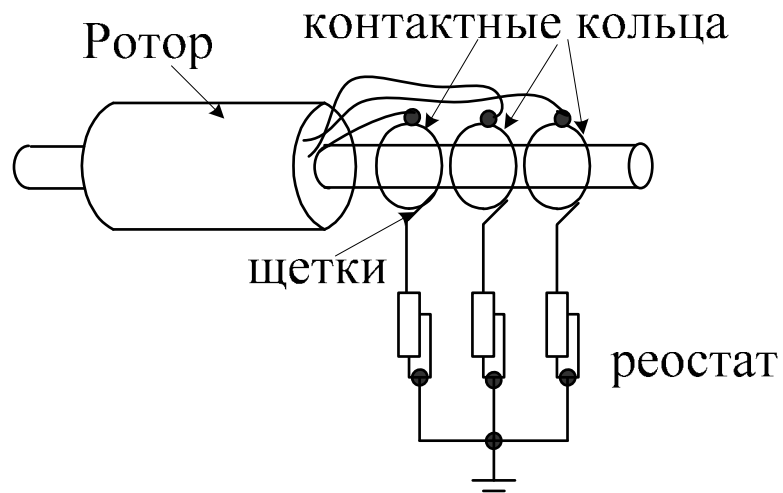
$B_{cp} = \frac{2B_m}{\pi}$ - средняя магнитная индукция,
 τ - определяет длину окружности статора, формирующей один магнитный полюс.

Конструкция ротора АСМ

1. *Короткозамкнутый ротор* (типа «Беличье колесо»). Стержни ротора приварены к кольцам из латуни.

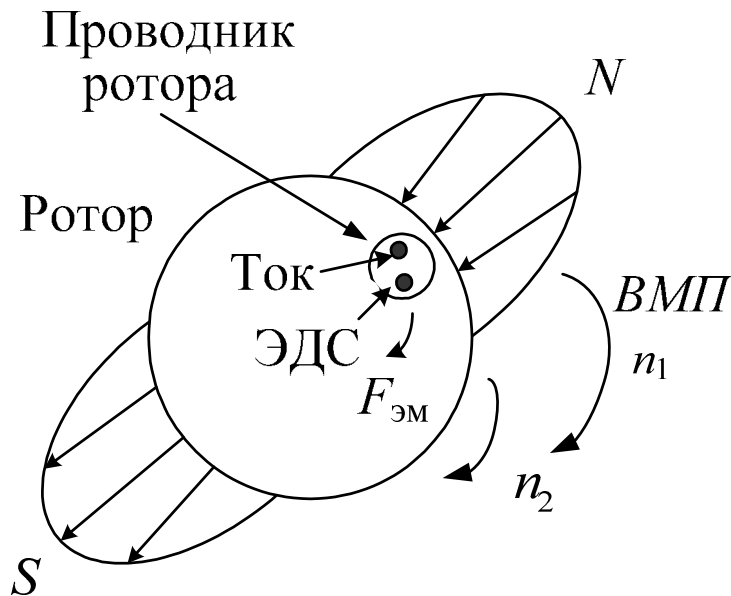


2. Фазный ротор имеет на роторе трехфазную обмотку, соединенную звездой.



Контакты выведены к контактными кольцам. Кольца подключены к трехфазному реостату. Это позволяет улучшить пусковые характеристики.

Принцип действия асинхронного двигателя



Принцип действия асинхронного двигателя основан на силовом взаимодействии ВМП статора с токами, возникающими в обмотке ротора под действием наведенной в ней ЭДС. ВМП вращается с частотой n_1 , пересекает проводники ротора, наводит в них ЭДС. В замкнутых проводниках возникает ток. Направление тока определяем по

правилу правой руки. На проводник с током действует электромагнитная сила $F_{эм}$, направленная по правилу левой руки. В результате проводник и ротор вращаются в направлении вращения ВМП со скоростью $n_2 < n_1$ (если $n_2 = n_1$, то ЭДС = 0).

В установившемся режиме электромагнитные силы будут уравновешены механическими силами торможения.

Скольжение характеризует неравенство частот вращения ротора и ВМП:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \text{ В процентах: } S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%.$$

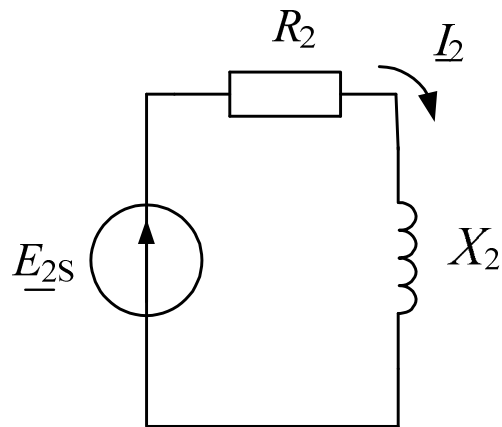
В номинальном режиме S составляет несколько процентов.

Схема замещения обмоток ротора

В неподвижном роторе наводится ЭДС $E_{2н} = C_{E_2} \cdot f_1 \cdot \Phi_{\pi}$, где C_{E_2} - коэффициент, зависящий от геометрических размеров АСМ, числа витков в обмотках статора и ротора и т.п.

Для подвижного ротора

$$E_{2s} = S \cdot E_{2н} = C_{E_2} \cdot f_1 \cdot \Phi_{\pi} \cdot S.$$



Если частота скольжения $f_2 = S \cdot f_1$, реактивное сопротивление ротора

$$X_2 = S \cdot 2\pi f_1 L_2 = S \cdot X_{2н}.$$

Находим ток ротора:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{S \cdot E_{2H}}{\sqrt{R_2^2 + (X_{2H} \cdot S)^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\left[\frac{R_2}{S}\right]^2 + X_{2H}^2}}.$$

В неподвижном роторе ($S=1$) $I_{2H} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2H}^2}}.$

По мере раскручивания двигателя скольжение S уменьшается и при синхронной частоте ($S=0$) $I_2=0$.

Сдвиг фаз между током и ЭДС ротора:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{S \cdot X_{2H}}{R_2} = \frac{S \cdot \omega_1 L_2}{R_2}, \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (S \cdot X_{2H})^2}}.$$

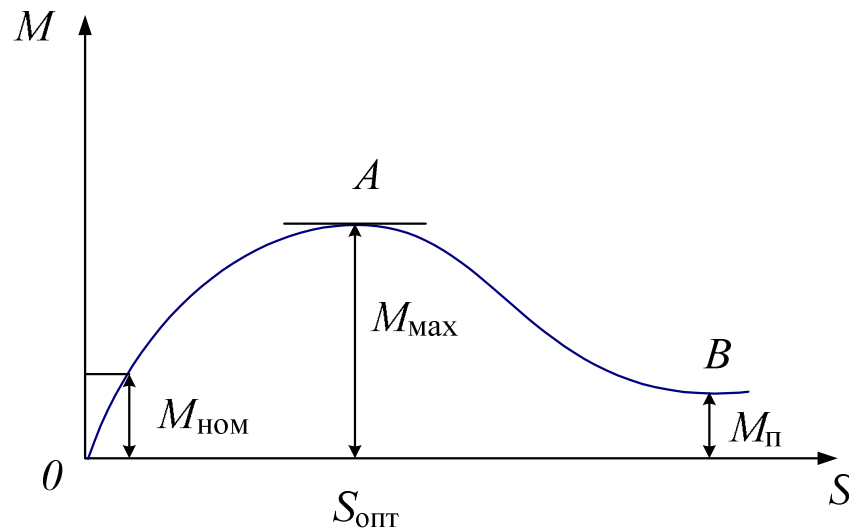
Вращающий момент асинхронного двигателя

В общем случае $M = \frac{P}{\omega}$, где $P = E_{2s} I_2 \cos \varphi_2$ – активная мощность, выделенная в роторе, ω – угловая скорость.

Вращающий момент зависит от скольжения:

$$M = C\Phi \frac{E_{2н} \cdot R_2}{\frac{R_2^2}{S} + SX_{2н}^2}.$$

Зависимость вращающего момента от скольжения



$M_{\text{ном}}$ – номинальный момент ($S \approx 3 \div 5\%$),

M_{max} – максимальный момент ($S \approx 10 \div 14\%$),

$M_{\text{п}}$ – пусковой момент ($S = 100\%$).

$$M_{\text{max}} \approx (2 \div 3) \cdot M_{\text{ном}}.$$

$$M_{\text{п}} \approx M_{\text{ном}}.$$

На кривой два участка:

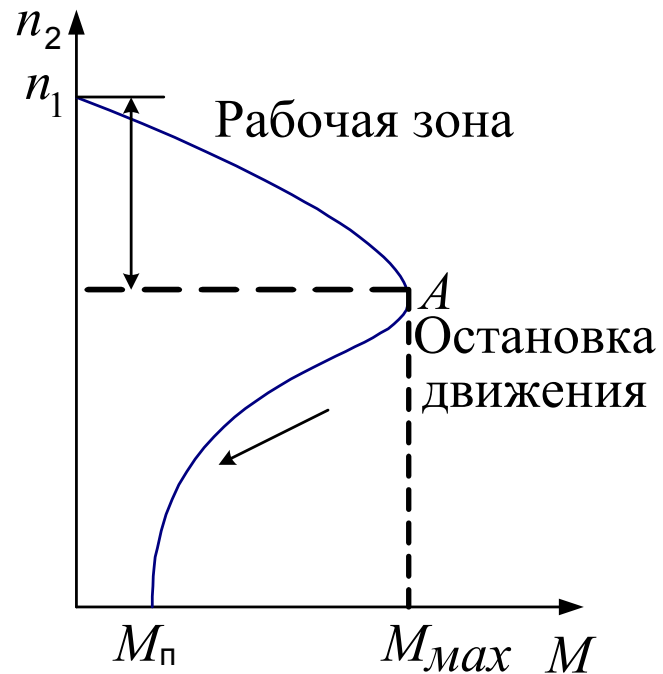
ОА – устойчивая работа двигателя под нагрузкой. С ростом нагрузки увеличивается S , ток ротора увеличивается, момент M - тоже увеличивается.

АВ – неустойчивая работа двигателя, снижение оборотов. С ростом скольжения уменьшается момент, двигатель замедляется и останавливается. Возникает перегрев двигателя.

Механическая характеристика асинхронного двигателя

Это зависимость частоты вращения n_2 от момента на валу.

Вращающий момент M пропорционален квадрату напряжения сети.



Оптимальное скольжение

Соответствует максимальному вращающему моменту.

$$M = C\Phi \frac{E_{2\text{н}} \cdot R_2}{\frac{R_2^2}{S} + SX_{2\text{н}}^2}.$$

Найдем минимум знаменателя:

$$\frac{d}{dS} \left[\frac{R_2^2}{S} + SX_{2H}^2 \right] = -\frac{R_2^2}{S^2} + X_{2H}^2 = 0. \text{ Следовательно:}$$

$$S_{opt} = \frac{R_2}{X_{2H}}.$$

Меняя R_2 можно изменить зависимость M от S .

При оптимальном скольжении получим максимальный момент:

$$M_{max} = C\Phi \frac{E_{2H}}{2X_{2H}}.$$

КПД и коэффициент мощности асинхронного двигателя

$$\text{КПД} \quad \eta = \frac{P_1 - (P_m + P_c + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}})}{P_1},$$

P_1 – мощность, потребляемая из сети;

P_m – мощность потерь в обмотках (в меди);

P_c – мощность потерь в стали магнитопровода;

$P_{\text{мех}}$ – мощность механических потерь;

$P_{\text{доб}}$ – мощность добавочных потерь за счет пульсации магнитного поля в ребристых конструкциях ротора и статора.

$$\eta = 0,9 \div 0,95.$$

Коэффициент мощности: $\cos \varphi = 0,7 \div 0,9$ – в номинальном режиме.

$$\text{В холостого хода: } \cos \varphi = 0,2 \div 0,3.$$

Синхронные машины переменного тока

С синхронных электрических машинах ротор и магнитное поле тока статора вращаются синхронно с одно и той же частотой.

Синхронные машины (СМ) обратимы и могут работать в генераторном и двигательном режиме.

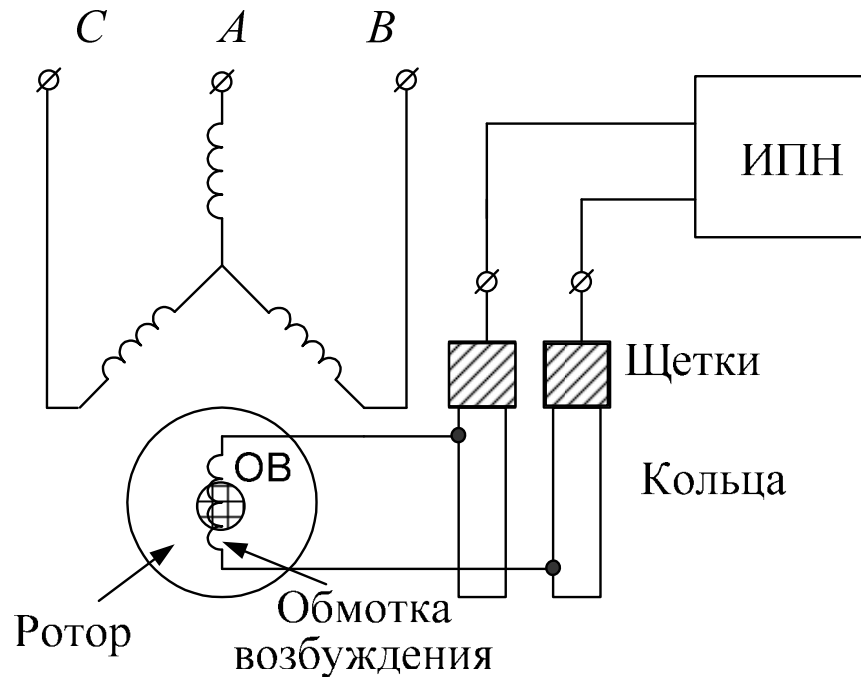
Применение:

Трехфазные синхронные генераторы (ГЭС, ТЭС) мощностью до 1200МВт.

Синхронные двигатели - прокатные станы, насосы, компрессоры (до десятков мегаватт),

Синхронные генераторы и двигатели малой мощности, микро-двигатели применяют в автомобилях, автономных источниках питания, автоматических устройствах, робототехнике, бытовой технике.

Устройство трехфазной СМ



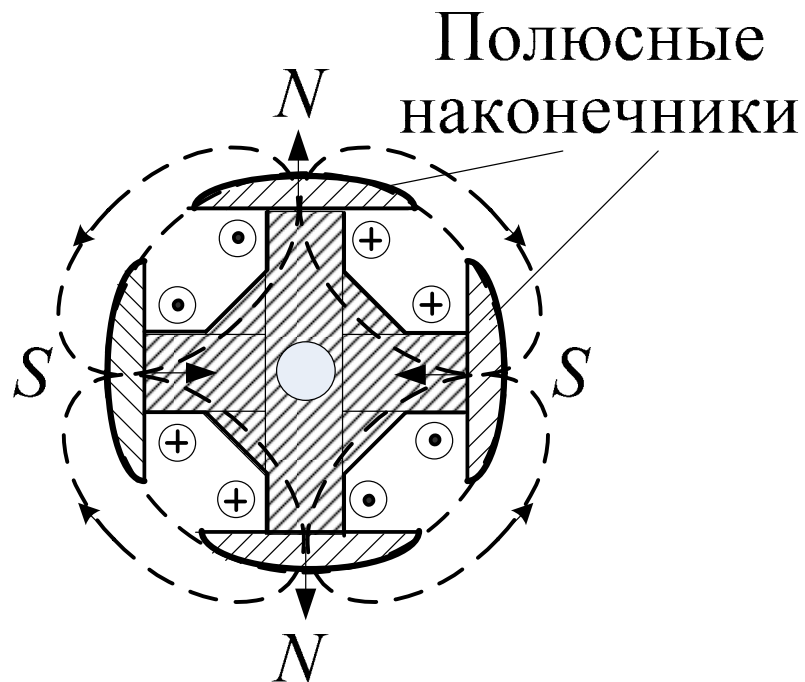
Статор СМ аналогичен статору АСМ.

Ротор является электромагнитом.

ОВ – обмотки возбуждения подключаются к источнику постоянного напряжения через контактные кольца и щетки.

Роторы бывают:

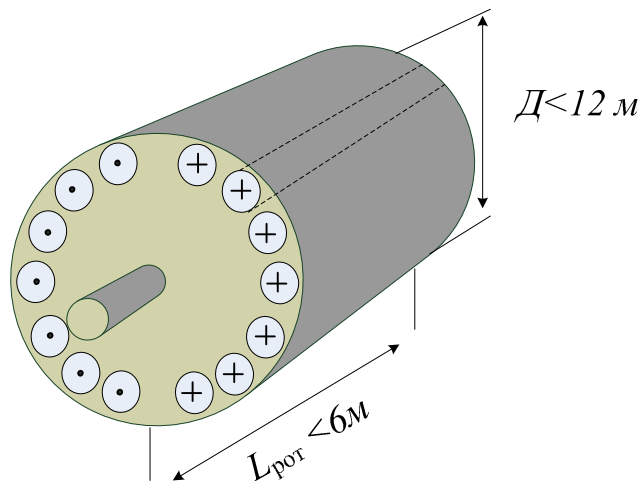
Явнополюсный – имеет выступающие полюсы, на которые надеются катушки.



Имеет выступающие полюсы, на которые надеты катушки.

Неявнополюсный ротор

Имеет распределенную обмотку возбуждения, уложенную в пазы цельной стальной поковки. Применяют в больших генераторах и двигателях.



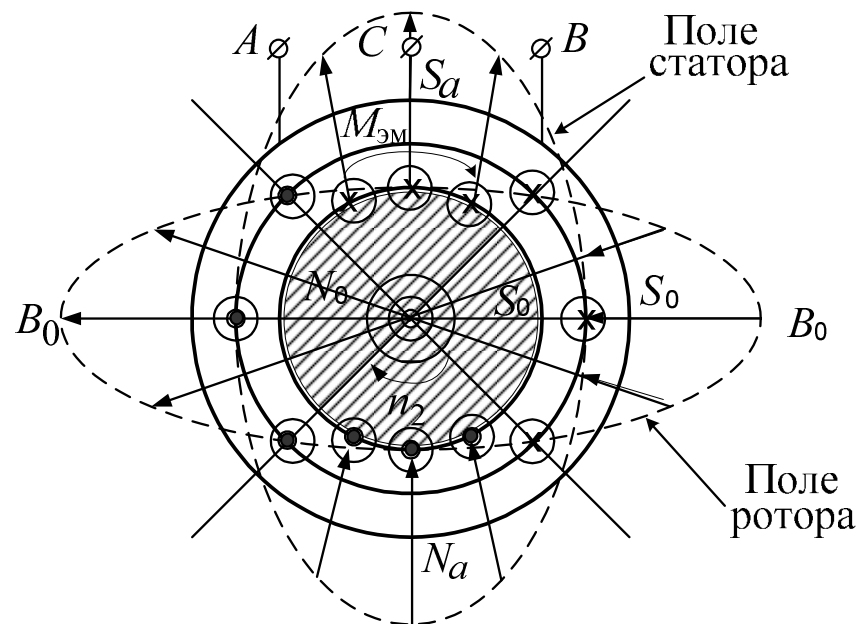
Число пар полюсов ротора и статора одинаково.

$$\text{Число оборотов в минуту } n_2 = \frac{60f}{p}.$$

Для гидроэлектростанции – $D = 12$ м, $L = 2,5$ м, число пар полюсов $2p = 42$ ($p = 21$), $n = 143$ об/мин, $f = \frac{143 \cdot 21}{60} = 50$ Гц.

Мощность источника постоянного напряжения (ИПН) составляет $1 \div 3\%$ от $P_{\text{ген.}}$

Принцип действия синхронного генератора



Силловые линии магнитного поля ротора (основные поля) возбуждают в трехфазной обмотке статора синусоидальные ЭДС e_{0A}, e_{0B}, e_{0C} , сдвинутые по фазе на 120° . Направление ЭДС определяют по правилу правой руки.

Частота ЭДС: $f = \frac{pn_2}{60}$, n_2 – частота вращения ротора, p – число пар полюсов.

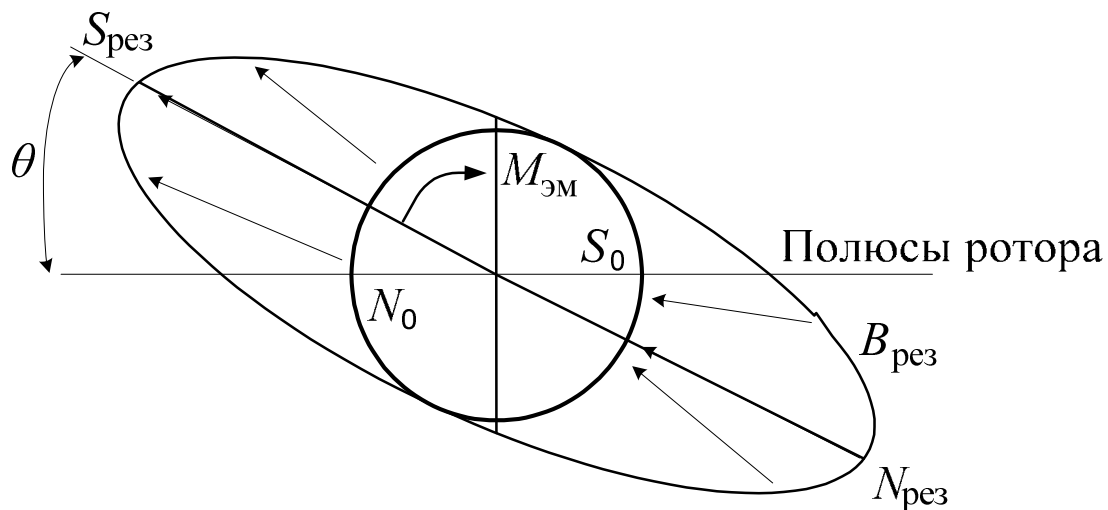
Если к обмоткам статора подключить симметричный активный приемник, то возникнут токи i_{0A}, i_{0B}, i_{0C} , которые создадут вращающееся магнитное поле статора.

Частота вращения поля статора: $n_1 = \frac{60f}{p} = n_2$ – в этом синхронность.

ВМП статора воздействует на проводники ротора и вызывает тормозящий электромагнитный момент $M_{эм}$. В установившемся режиме: $M_{эм} = M_{вращ.}$ первичного двигателя.

Ориентация магнитного поля статора в пространстве зависит от характера нагрузки.

Сложение ВМП статора и поля ротора дает результирующее поле, сдвинутое в пространстве на угол θ относительно оси полюсов ротора.



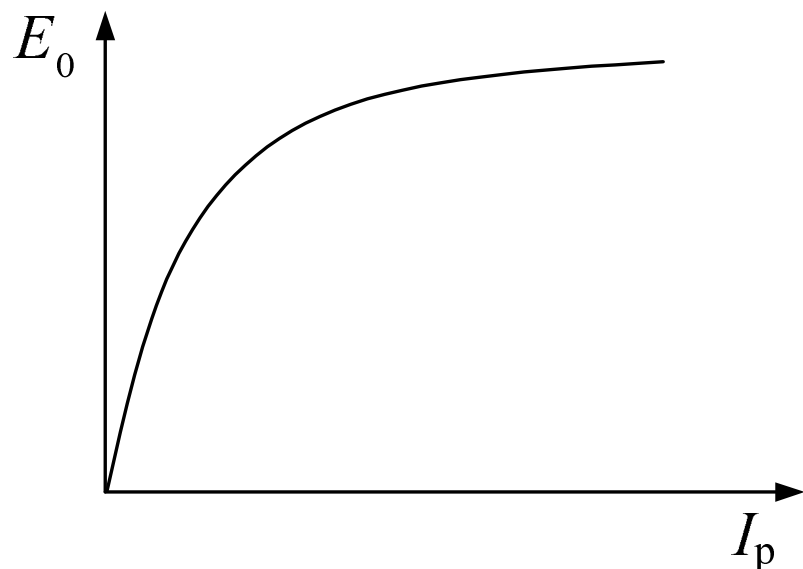
θ - угол рассогласования

В генераторе полюса ротора являются ведущими, тянущими.

Уравнение электрического состояния и схема замещения фазы синхронного генератора

В фазной обмотке статора основное магнитное поле ротора индуцирует ЭДС самоиндукции
$$e_0(t) = -\frac{d\psi_0(t)}{dt} = -\omega\psi_{0m} \cos \omega t$$
 с действующим значением $E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \psi_{0m} = 4,44 f \psi_{0m}$, где ψ_{0m} - амплитуда потокосцепления поля ротора с обмоткой статора.

Характеристика холостого хода синхронного генератора



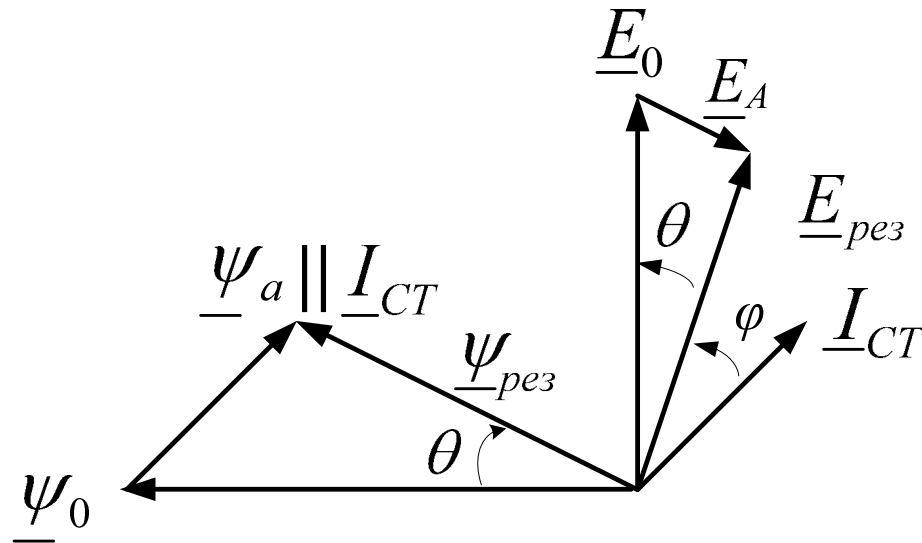
Позволяет оценить насыщение магнитопровода.

Токи обмотки статора создают ВМП. Результирующее потокосцепление с фазой обмотки статора: $\psi_{рез} = \psi_o + \psi_a$, где ψ_a - потокосцепление магнитного поля токов статора с фазой обмотки статора, которое наводит в обмотке статора ЭДС самоиндукции

$$e_a(t) = -\frac{d\psi_a(t)}{dt}.$$

Результирующая ЭДС статорной обмотки: $\underline{E}_{рез} = \underline{E}_o + \underline{E}_a$.

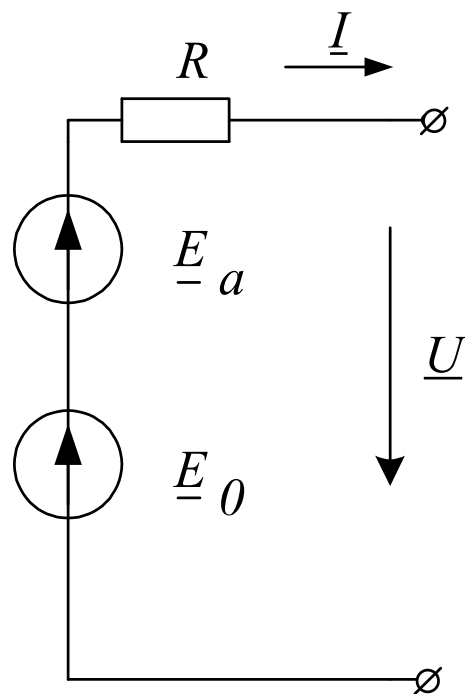
Векторная диаграмма



Строим $\underline{\psi}_o$, \underline{E}_o , $\underline{I}_{ст}$, $\underline{\psi}_a \parallel \underline{I}_{ст}$, \underline{E}_a , $\underline{\psi}_{рез}$, $\underline{E}_{рез}$.

Направление $\underline{\psi}_{рез}$ (резльтирующего поля) отстает от $\underline{\psi}_o$ (основного поля) на угол рассогласования θ .

Схема замещения фазы обмотки статора



По второму закону Кирхгофа: $\underline{U} + R\underline{I} = \underline{E}_0 + \underline{E}_a$.

По теореме замещения заменим $\underline{E}_a = -jX\underline{I}$ падением напряжения на индуктивном сопротивлении. X называют синхронным индуктивным сопротивлением.

Обычно $R \ll X$, тогда $\underline{E}_0 = \underline{U} + jX\underline{I}$.

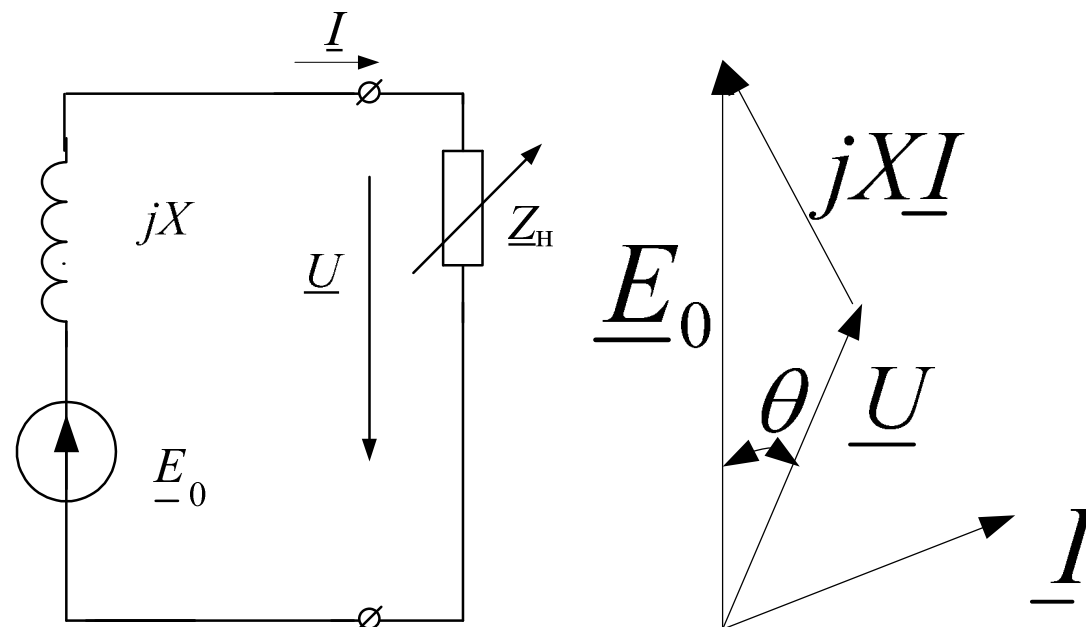
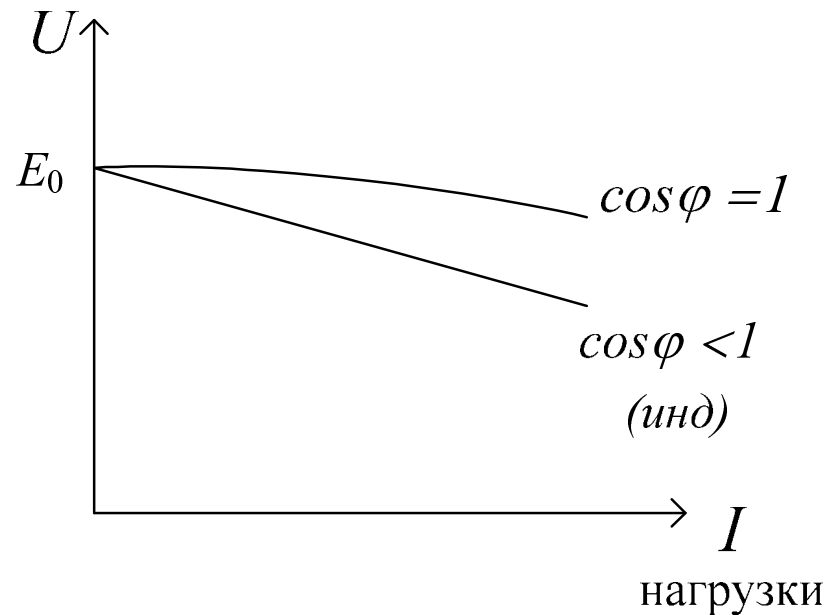


Схема замещения фазы генератора. Внутреннее сопротивление синхронного генератора имеет индуктивный характер. Вектор \underline{E}_0 опережает \underline{U} на угол θ .

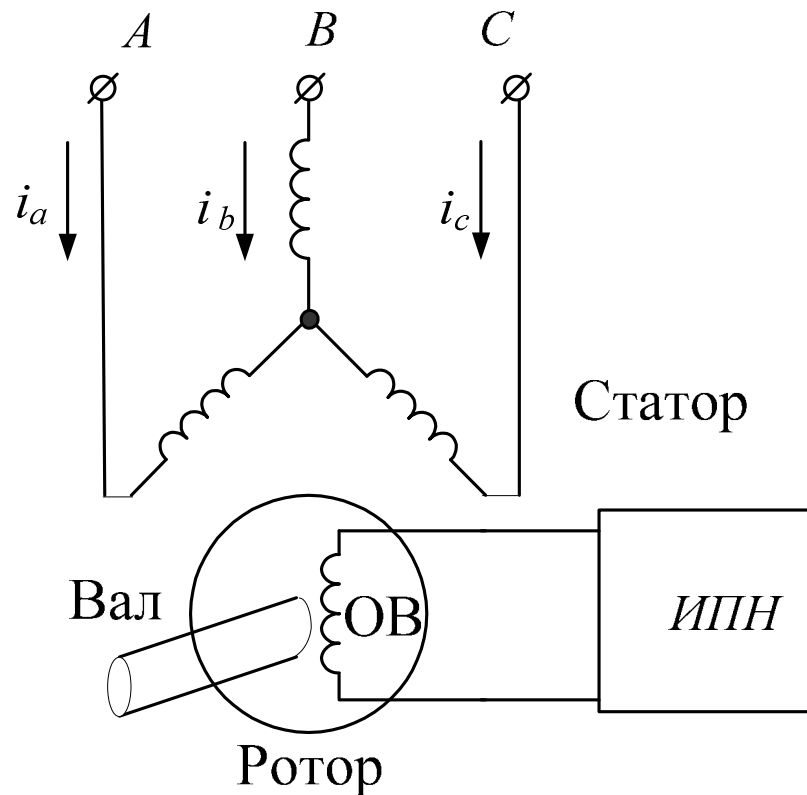
Внешние характеристики синхронных генераторов



Изменения напряжения генератора от тока нагрузки могут достигать десятков процентов.

Для стабилизации напряжения регулируют ток возбуждения $I_{\text{возб}}$.

Принцип действия и особенности работы синхронного двигателя



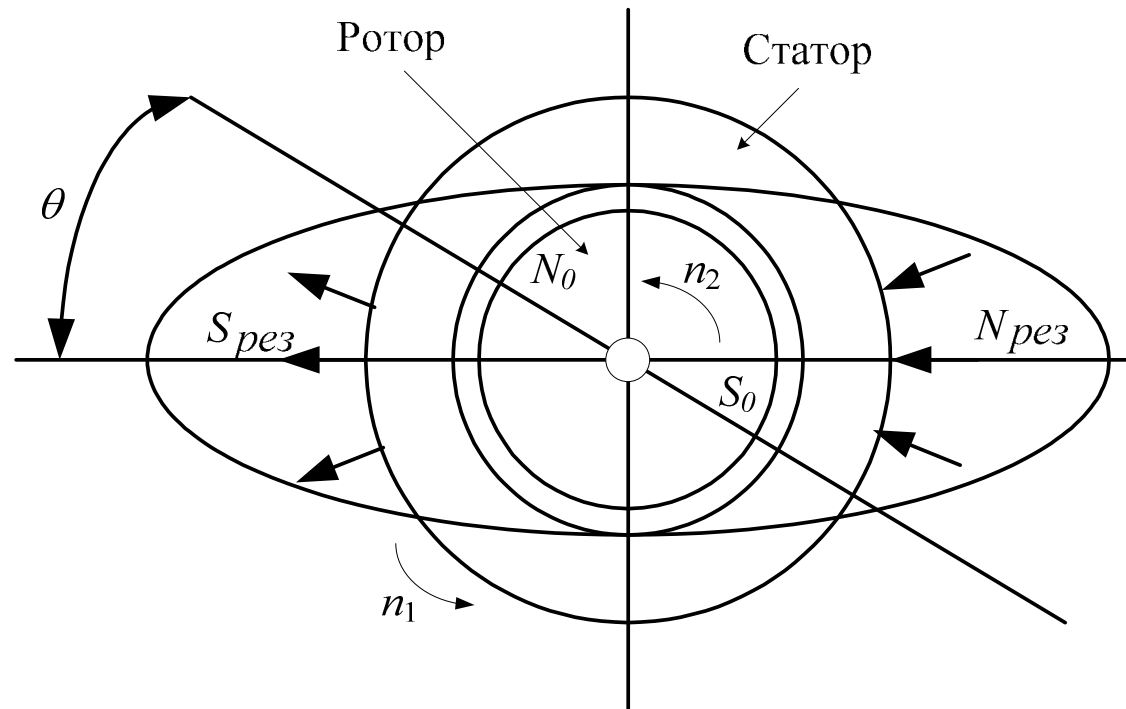
Обмотки статора подключены к трехфазной цепи и создают ВМП с частотой

$$n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Ток возбуждения обмоток ротора создает постоянное магнитное поле. Взаимодействие ВМП статора и ВМП ротора создает вращающий электромагнитный момент. Ротор вращается с ча-

стотой $n_1 = \frac{60f}{p}.$

Если есть момент сопротивления ($M_c > 0$), ось магнитного поля ротора смещается на угол θ в сторону отставания.



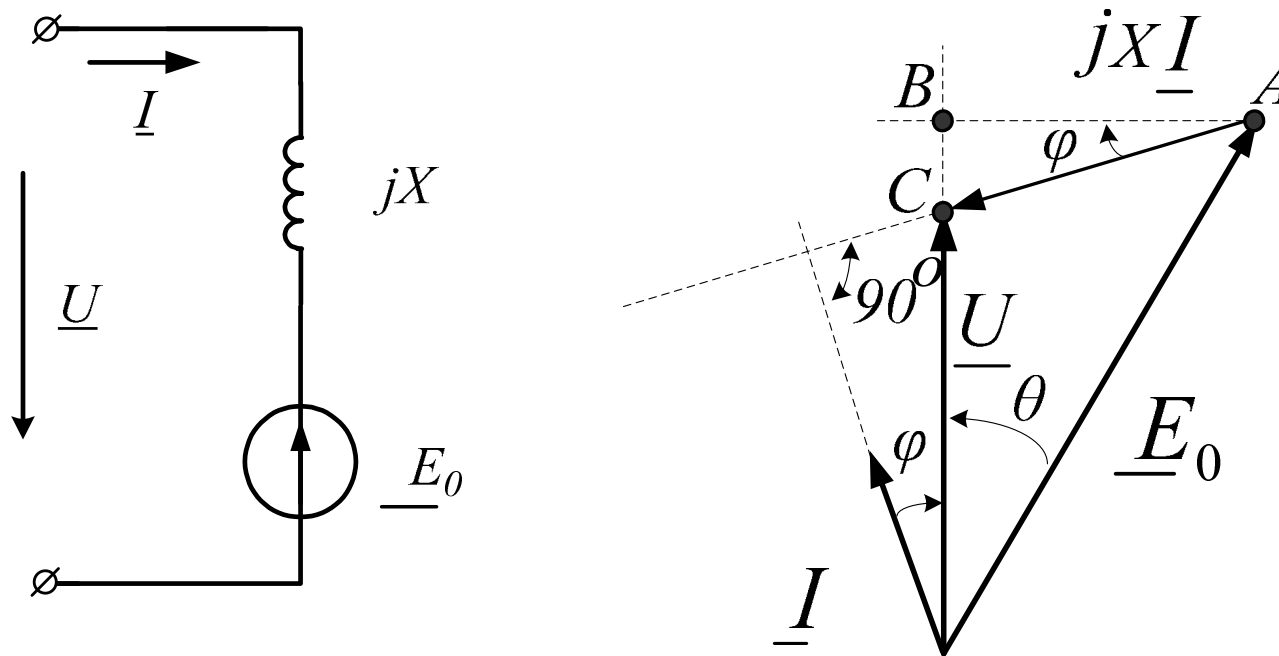
В установившемся режиме момент сопротивления
 $M_c = M_{эм},$

$$M_{эм} = M = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{3E_o U \sin \theta}{\Omega_1 X} = M_{max} \cdot \sin \theta, \text{ где}$$

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} - \text{угловая скорость ВМП статора,}$$

$$M_{max} = \frac{3E_o U}{\Omega_1 X}.$$

Схема замещения статора синхронного двигателя



E_0 - противо-ЭДС, наводимая в статоре, X - синхронное сопротивление,

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + jX\underline{I}.$$

Вектор ЭДС E_0 , связанный с положением полюсов ротора, при наличии нагрузки на валу отстает от вектора напряжения сети, с которым связано положение полюсов результирующего ВМП.

$$\text{В треугольнике } \triangle ABC \quad XI \cos \varphi = E_0 \sin \theta, \quad I \cos \varphi = \frac{E_0 \sin \theta}{X}.$$

Угловые характеристики синхронного двигателя

Это зависимости электромагнитной мощности P или электромагнитного момента M от θ .

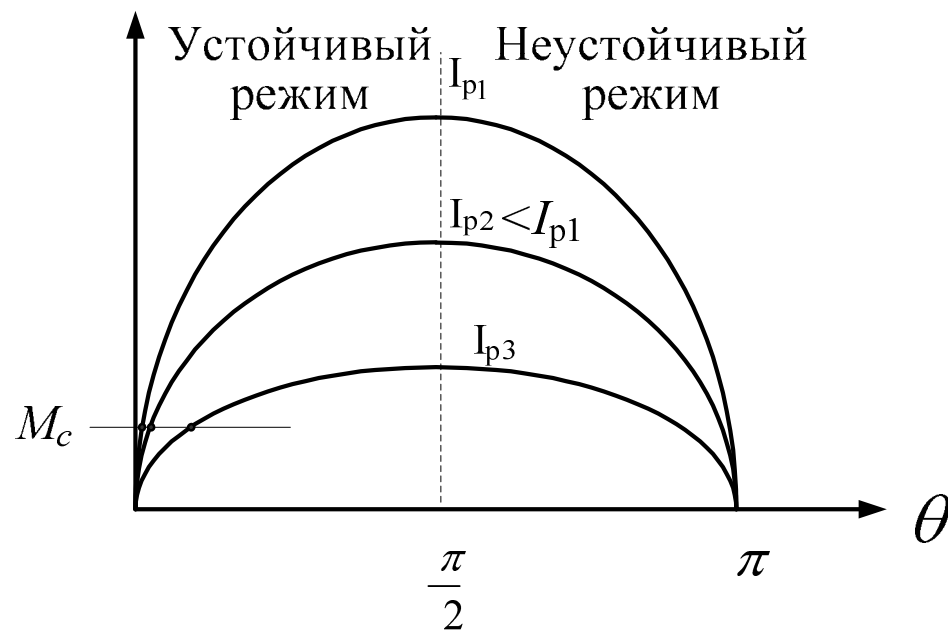
$$P = 3UI \cos \varphi, \quad P = \frac{3E_0 U}{X} \sin \theta = P_{\max} \sin \theta.$$

Электромагнитный момент:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{3E_0 U}{X \Omega_1} \sin \theta = M_{\max} \sin \theta.$$

Перегрузочная способность двигателя: $\lambda_{max} = \frac{M_{max}}{M_{ном}} = \frac{1}{\sin \theta}$ за-

висит от напряжения сети и тока возбуждения ротора. Номинальный момент $M_{ном}$ соответствует углу рассогласования $\theta \leq 30^\circ$. Поэтому $\lambda > 2$.



На нисходящих ветвях работа невозможна.

С увеличением тока ротора, магнитное поле становится сильнее и угол согласования уменьшается.

Пуск синхронного двигателя

Быстровращающееся ВМП поле статора не может разогнать неподвижный ротор.

Для предварительного разгона применяют короткозамкнутую обмотку типа «беличье колесо».

После асинхронного разгона ротор подключают к ИПН и двигатель переходит в синхронный режим.

Синхронные микродвигатели

Применяют в автоматических устройствах для приводов механизмов с постоянной частотой вращения.

Мощность P – от долей до сотен Вт

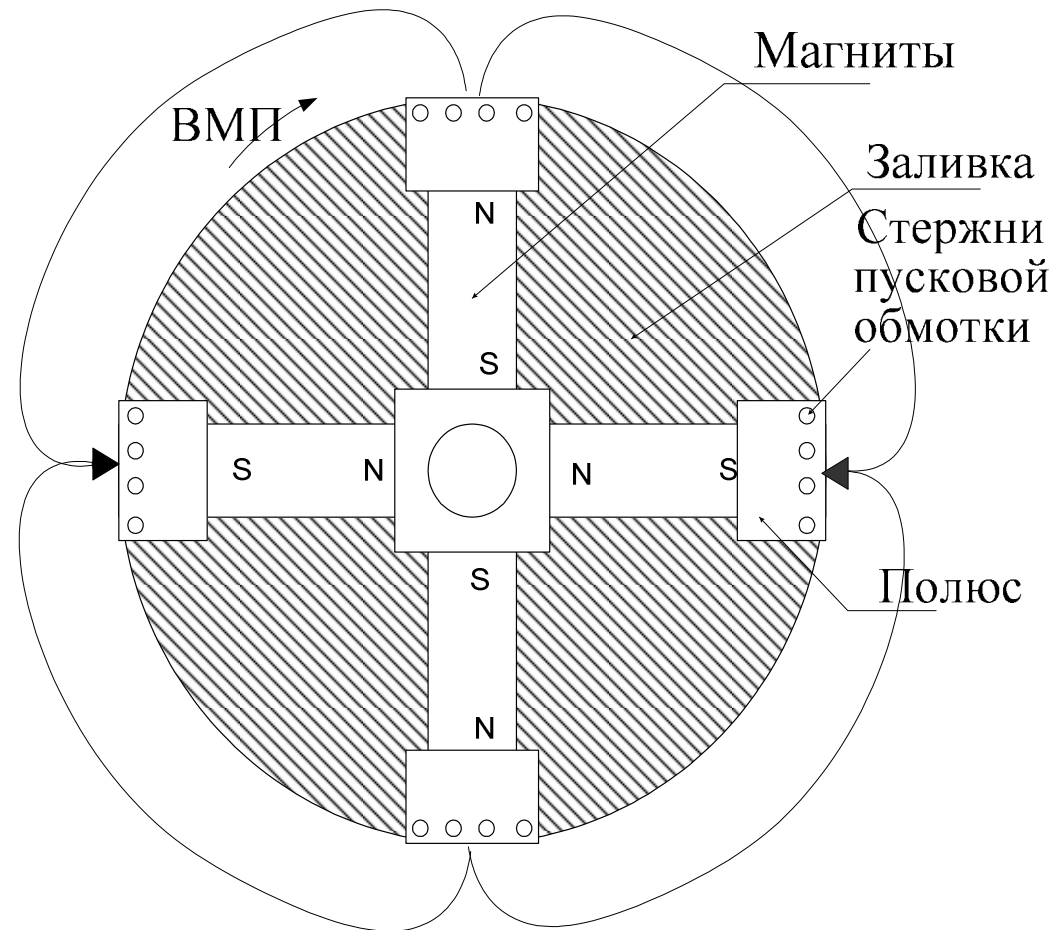
Эти двигатели не имеют обмотки возбуждения на роторе.

В зависимости от типа ротора различаются микродвигатели:

1. С постоянными магнитами;
2. Гистерезисные;

3. Реактивные.

Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами

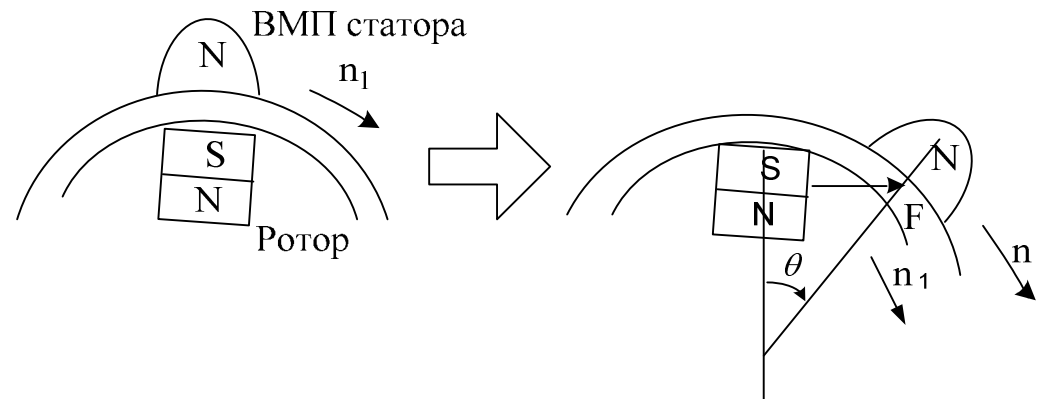


Для создания магнитного поля возбуждения на роторе помещают постоянные магниты с большой коэрцитивной силой ($H_c \geq 50 \text{ кА/м}$). Свойства близки к двигателю с электромагнитным возбуждением.

Для разгона имеется короткозамкнутая обмотка.

Гистерезисные двигатели

Вращательный момент возникает за счет явления гистерезиса при перемагничивании ротора.

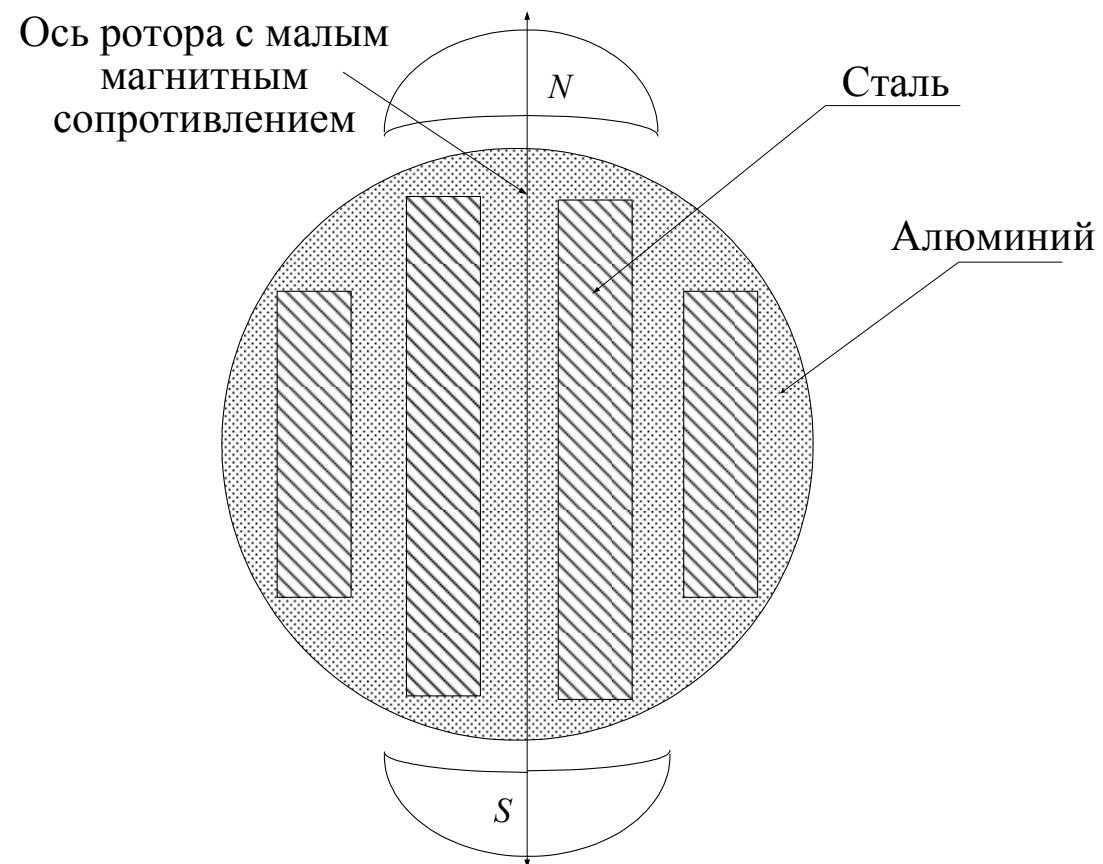


Если $M_C < M_G$, гистерезисный ротор не перемагничивается и вращается синхронно (M_C -момент сопротивления, M_G - гистерезисный вращающий момент).

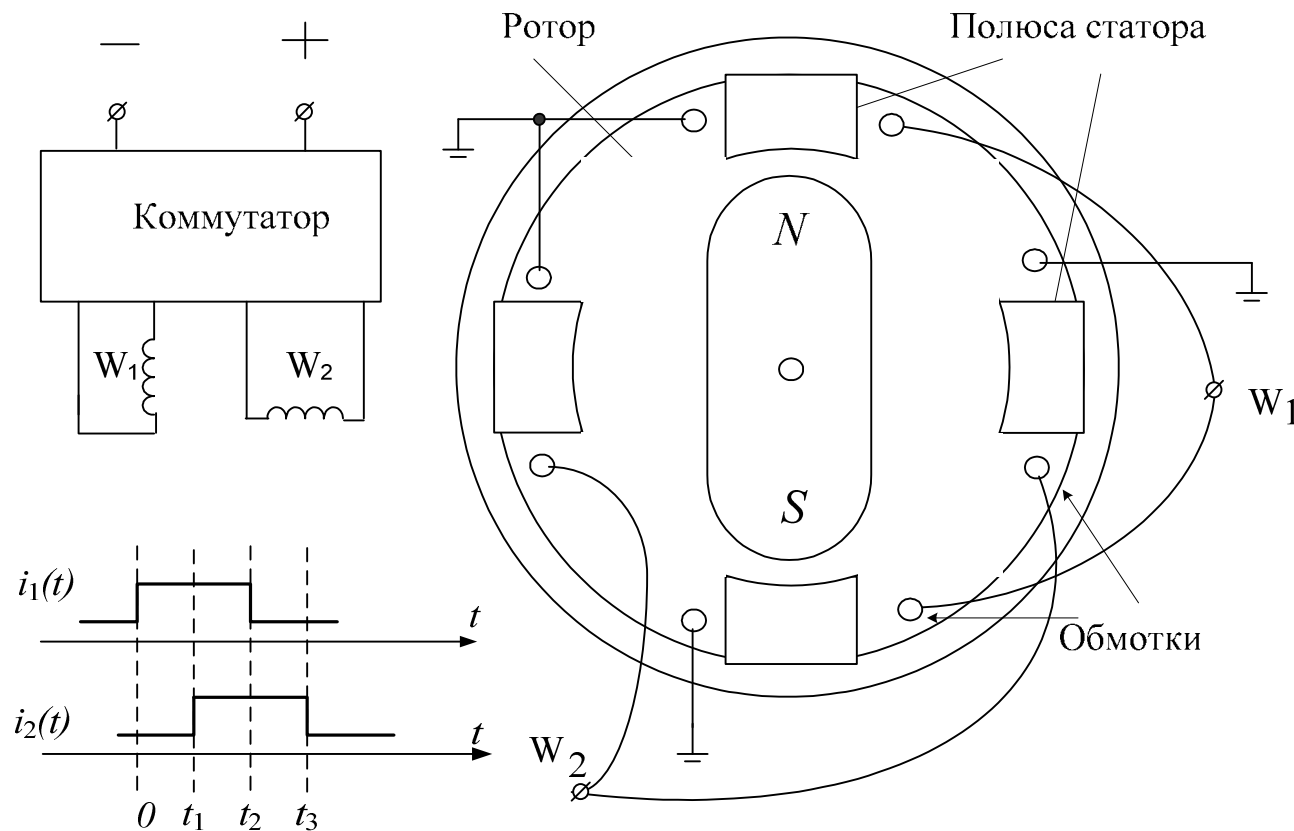
Если $M_C > M_G$, ротор перемагничивается и двигается асинхронно. Этот режим не экономичен, так как потери на перемагничивание достаточно велики.

Реактивные двигатели

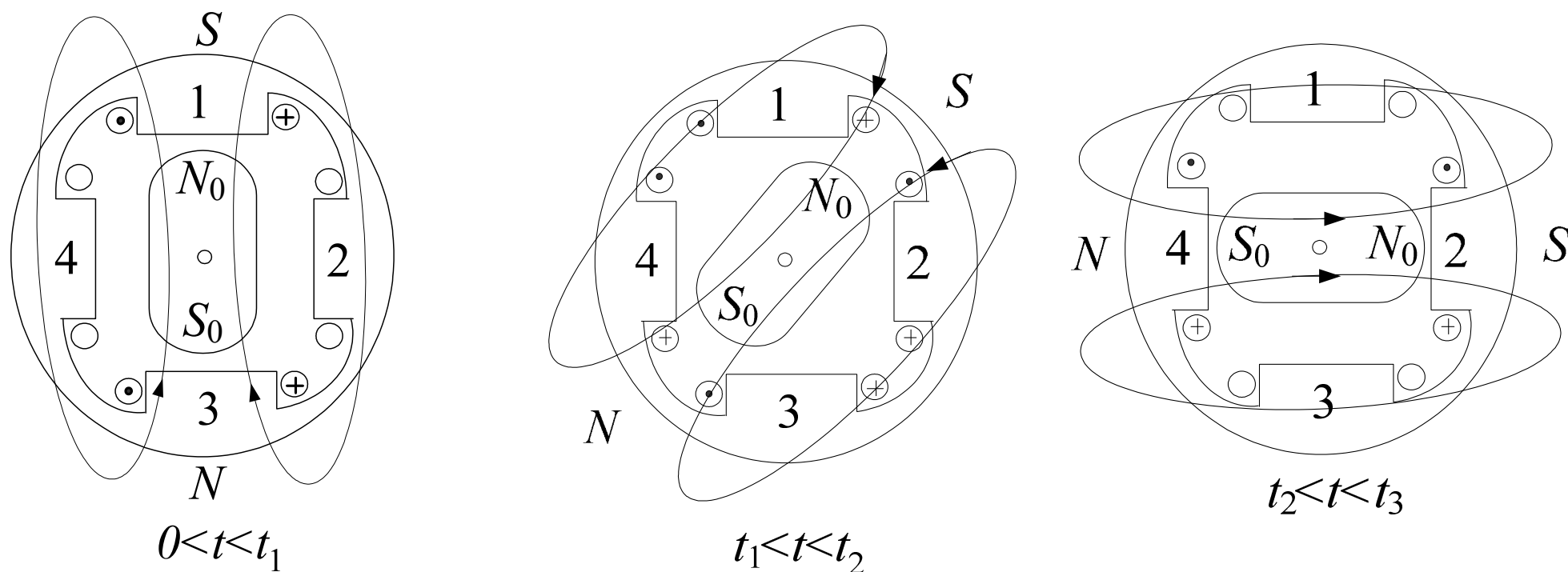
Стальные зоны имеют малое магнитное сопротивление и ротор стремится занять положение, при котором магнитный поток ВМП проходит через зоны с малым магнитным сопротивлением. Простая конструкция, низкая стоимость, но малый вращающий момент.



Шаговый двигатель (ШД)



Микродвигатель, у которого поворот ротора на фиксированный угол происходит после подачи на статорные обмотки управляющих импульсов прямоугольной формы, которые формируются коммутатором.



Принцип действия ШД: Ротор явнополюсный с постоянными магнитами. При переключении токов в катушках статора по определенной диаграмме магнитное поле статора занимает определенное поло-

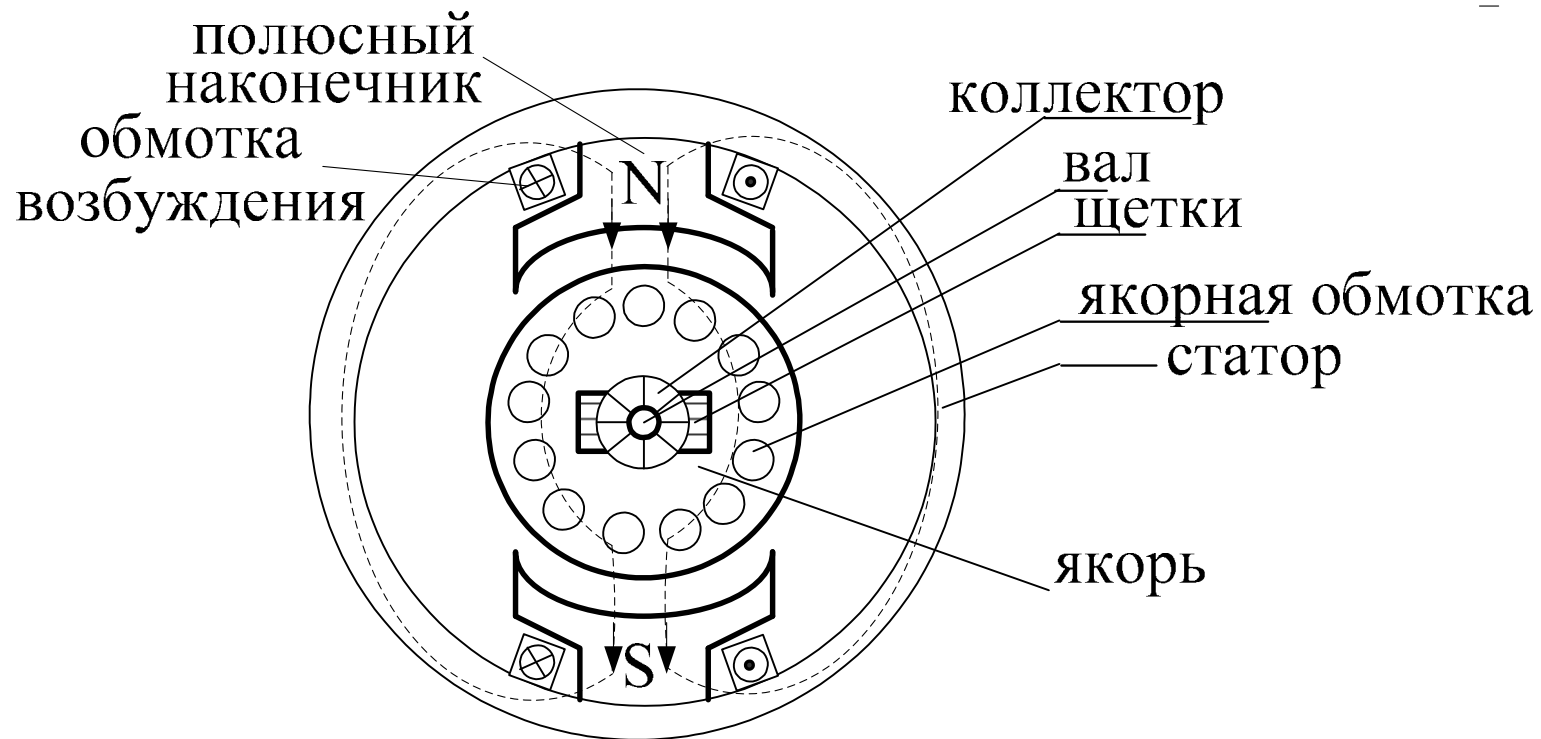
жение. Ротор поворачивается на фиксированный угол $\nu = \frac{360^\circ}{2p}$, $2p$ – число полюсов (ν от $1,8^\circ$ до 15°).

Шаговые двигатели широко применяются в устройствах автоматизации, робототехники, вычислительной техники и управляются от микроконтроллеров.

Электрические машины постоянного тока

Применяются в устройствах электроприводов с высокой частотой вращения. Входят в состав автомобильного, корабельного, самолетного оборудования. Двигатели имеют мощность от долей ватта до десятков киловатт (используется для вращения винтов больших судов, в прокатных станах).

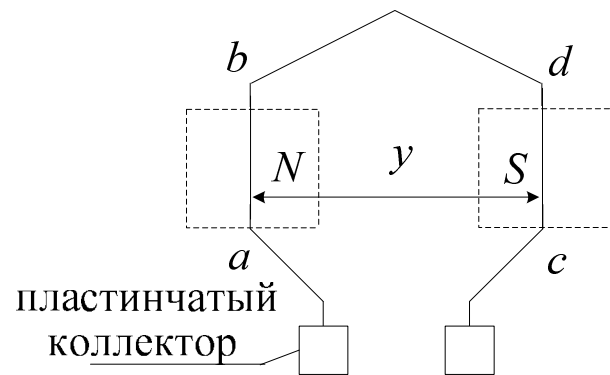
Устройство машин постоянного тока (МПТ)



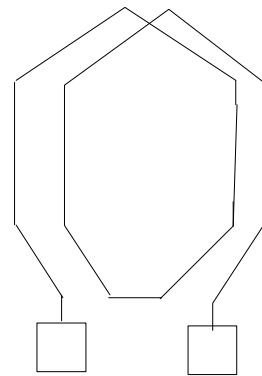
Неподвижная часть – статор содержит полюсные наконечники с обмотками возбуждения.

Подвижная часть - якорь представляет собой цилиндр, на поверхности которого в пазах расположена якорная обмотка.

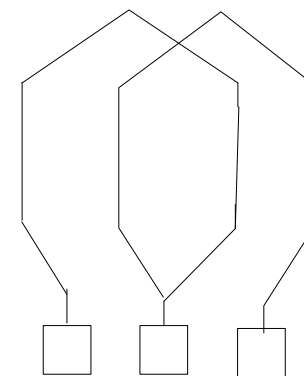
Обмотка якоря состоит из витков, охватывающих якорь вдоль оси, витки объединяются в секции. Секция – часть обмотки якоря, состоящих из одного или нескольких последовательно соединенных витков, присоединенных своими концами к медным коллекторным пластинам, которые следуют друг за другом по схеме обмотки и изолированы друг от друга. Секция состоит из двух активных сторон (ab, cd) которые располагаются вдоль оси машины под полюсами разной полярности.



Одновитая секция

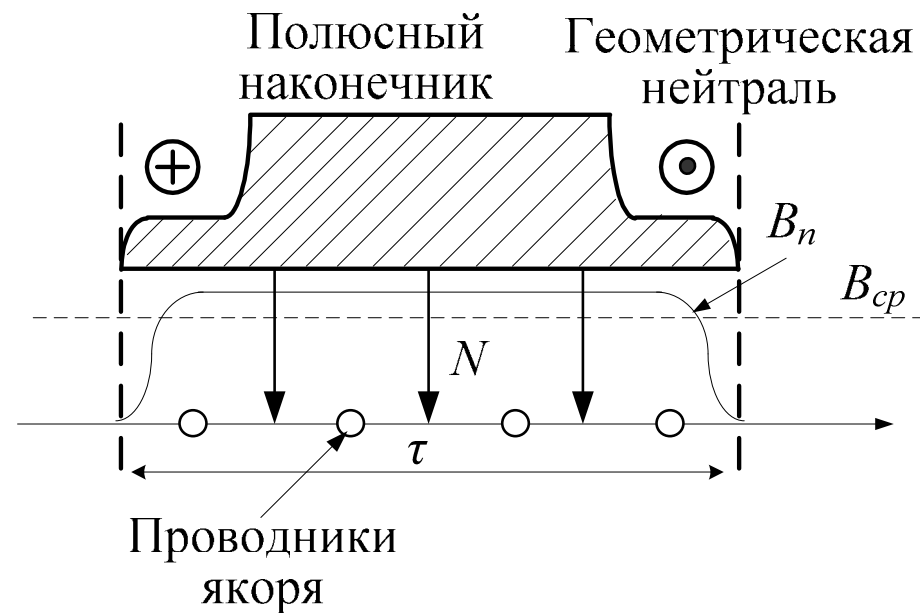


Двухвитая секция



Простая петловая обмотка

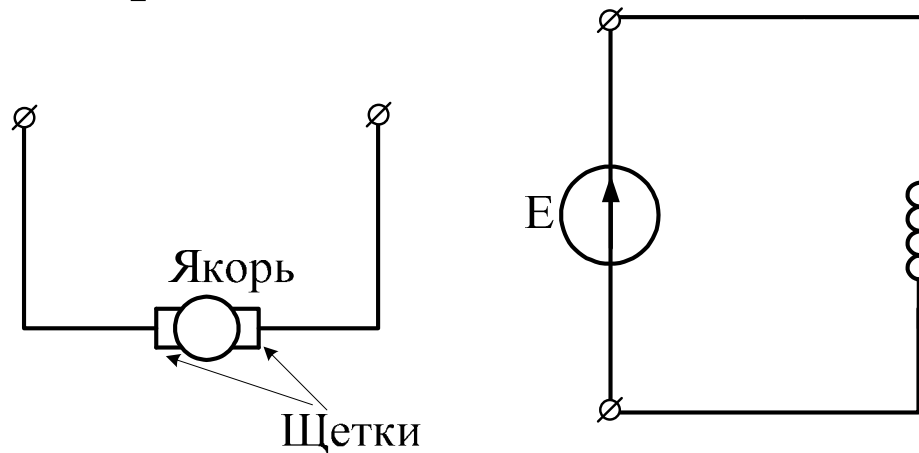
В секциях при вращении возникает ЭДС. ЭДС максимально, если шаг обмотки соответствует полюсному делению $\tau = \frac{\pi D_{\text{я}}}{2p}$, $D_{\text{я}}$ - диаметр якоря, p - число пар полюсов..



Под полюсным наконечником B_n почти постоянно, а вне его равно нулю.

Геометрической нейтралью называют линию, проведенная между магнитными полюсами в точке, где $B=0$.

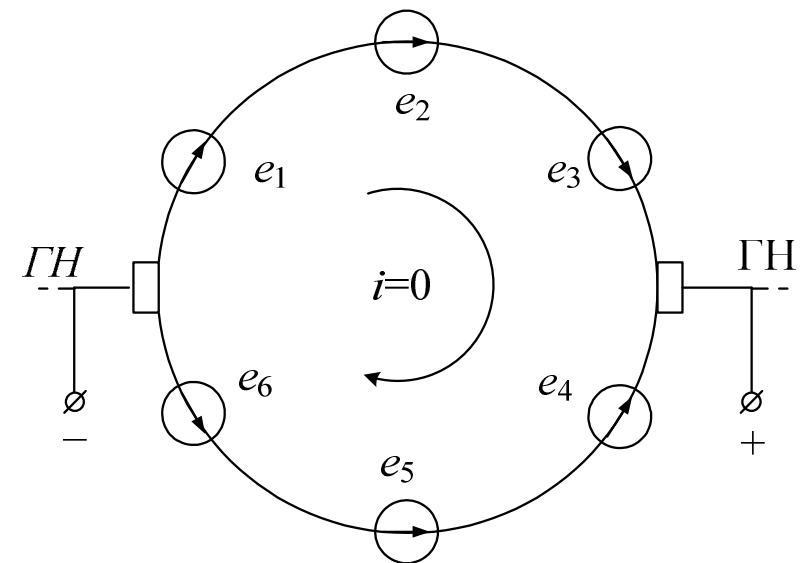
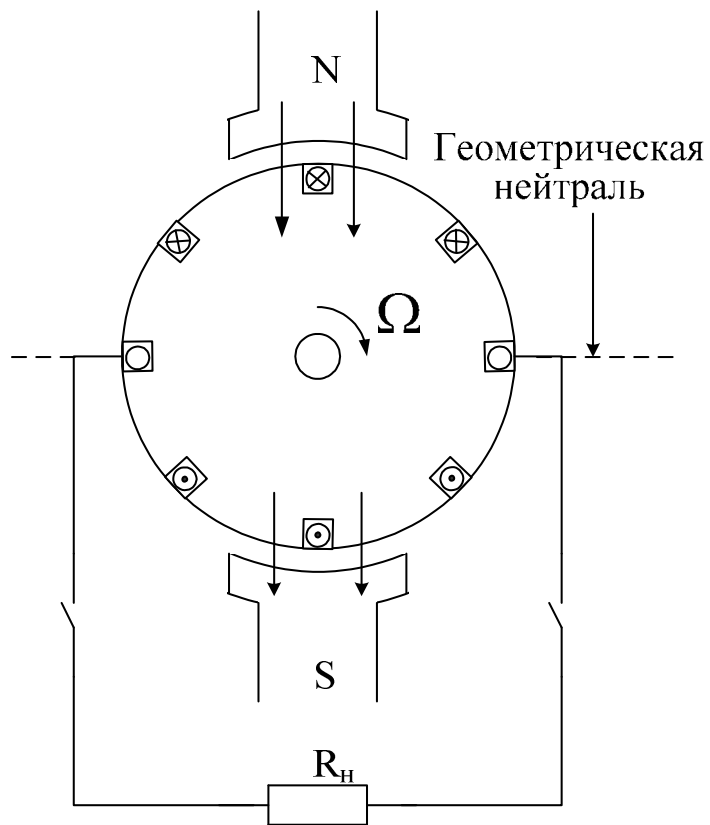
Электрический контакт с вращающимся коллектором осуществляется с помощью щеток, причем щетки установлены на геометрических нейтральных.



Схематическое изображение
МПТ

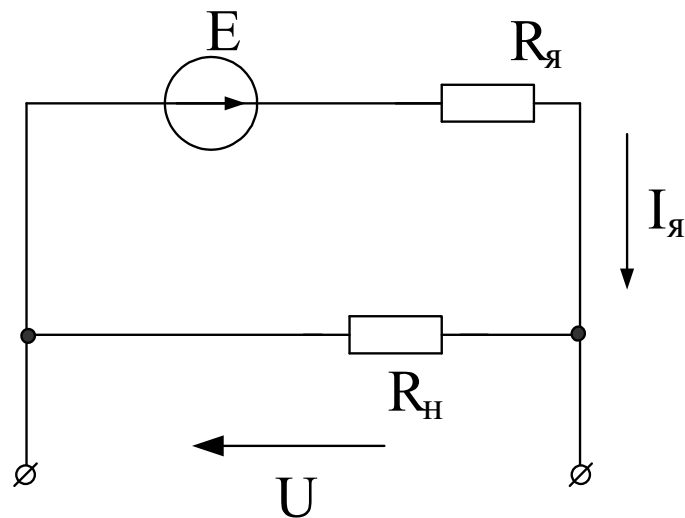
Принцип действия машин постоянного тока в генераторном и двигательном режиме

Генератор постоянного тока (ГПТ)



Якорь ГПТ приведен во вращение с угловой скоростью Ω . Проводники якоря пересекают магнитное поле с индукцией B . Обмотка якоря является замкнутым контуром, т.к. все секции соединены через коллектор. Под каждым полюсом находится одинаковое число проводников, поэтому алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС всех последовательно соединенных проводников равна нулю.

Щетки расположены на геометрической нейтрали и делят обмотку якоря на две параллельные ветви с равными алгебраическими суммами ЭДС. Поэтому ток в контуре равен нулю при размыкании нагрузки.



$R_{я}$ - эквивалентное сопротивление параллельно соединенных ветвей обмотки. Ток в проводке якоря создает тормозящий электромагнитный момент равный вращающему моменту привода.

Уравнение электрического состояния

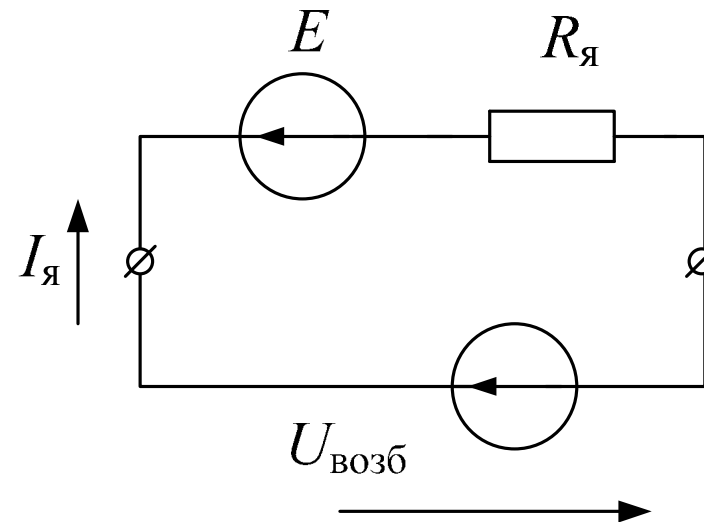
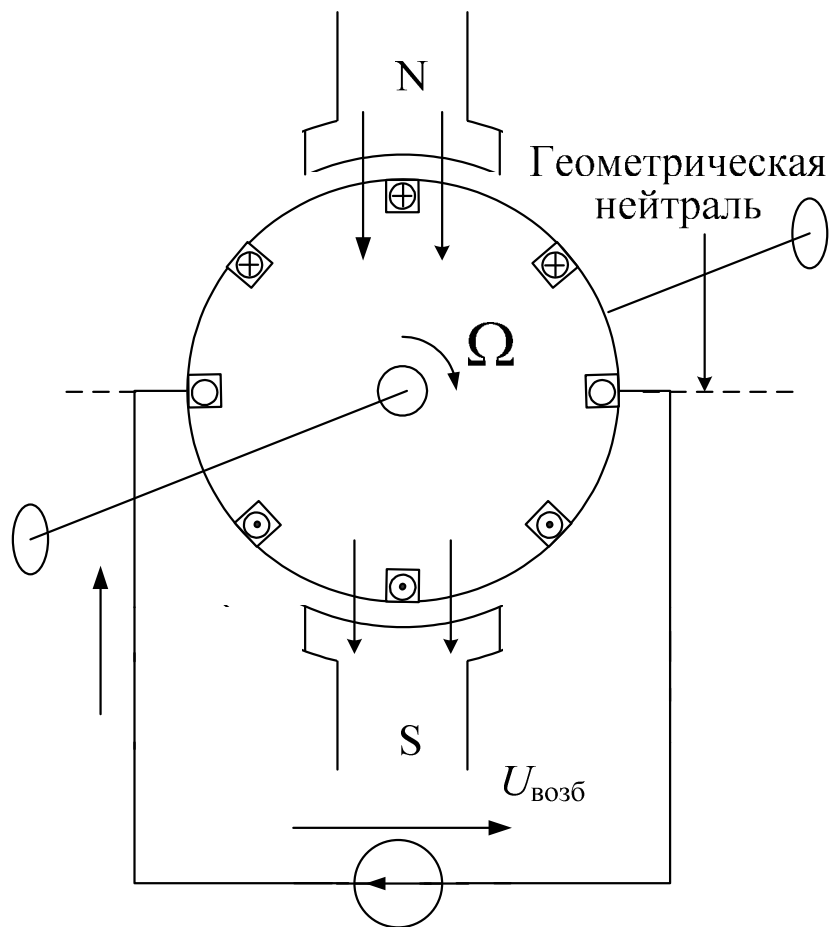
$$E = U + R_{я}I_{я}.$$

Умножаем на $I_{\text{я}}$: $E I_{\text{я}} = U I_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 = P + \Delta P_{\text{эл}}$.

Здесь: P - мощность приемника, $\Delta P_{\text{эл}}$ - мощность потерь в обмотках якоря; $E I_{\text{я}} = P_{\text{эм}} = P_{\text{мех}} = M \Omega$ - электромагнитная мощность, равная механической мощности привода.

Принцип действия двигателя постоянного тока (ДПТ)

Обмотки возбуждения и якоря подключены к источнику постоянного напряжения. По правилу левой руки определяем направление электромагнитных сил $F_{\text{эм}}$, создающих вращающий электромагнитный момент. Якорь двигателя вращается с угловой скоростью Ω , если $M_{\text{эм}} = M_{\text{с}}$ (момент сопротивления). В обмотке якоря наводится противо-ЭДС E , противоположная направлению тока.



Уравнение ДПТ

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

$$I = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}.$$

Баланс мощностей цепи якоря: $UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} + R_{\text{я}}I_{\text{я}}^2$.

$P_{\text{э}} = P_{\text{эм}} + P_{\text{эя}}$, где: $P_{\text{эм}}$ - электромагнитная мощность, $P_{\text{эя}}$ - мощ-

ность потерь в якоре.

Электромагнитная мощность равна механической мощности:

$$EI_{\text{я}} = P_{\text{эм}} = P_{\text{мех}}.$$

ЭДС якоря и электромагнитный момент

ЭДС якоря равна сумме мгновенных ЭДС проводников одной из параллельных ветвей обмотки якоря:

$$E = \frac{pN}{2\pi a} \Omega \Phi_{\text{п}} = \frac{pN}{60a} n \Phi_{\text{п}},$$

p – число пар полюсов;

N – общее количество проводников якоря;

$2a$ – количество параллельных ветвей;

$a = p$ – количество щеточных узлов, равное числу пар полюсов статора;

$n = \frac{60\Omega}{2\pi}$ – количество оборотов в минуту;

Φ_{Π} – магнитный поток в зазоре под полюсом.

Обозначим $C_E = \frac{pN}{60a}$, тогда: $E = C_E n \Phi_{\Pi}$, C_E – электрическая

константа, коэффициент двигателя.

E – пропорциональна скорости вращения и магнитному потоку.

Электромагнитный момент:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega} = \frac{EI_{\text{я}}}{\Omega} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi_{\Pi} I_{\text{я}} = C_M \Phi_{\Pi} I_{\text{я}}, \text{ где: } C_M = \frac{pN}{2\pi a} - \text{ме-}$$

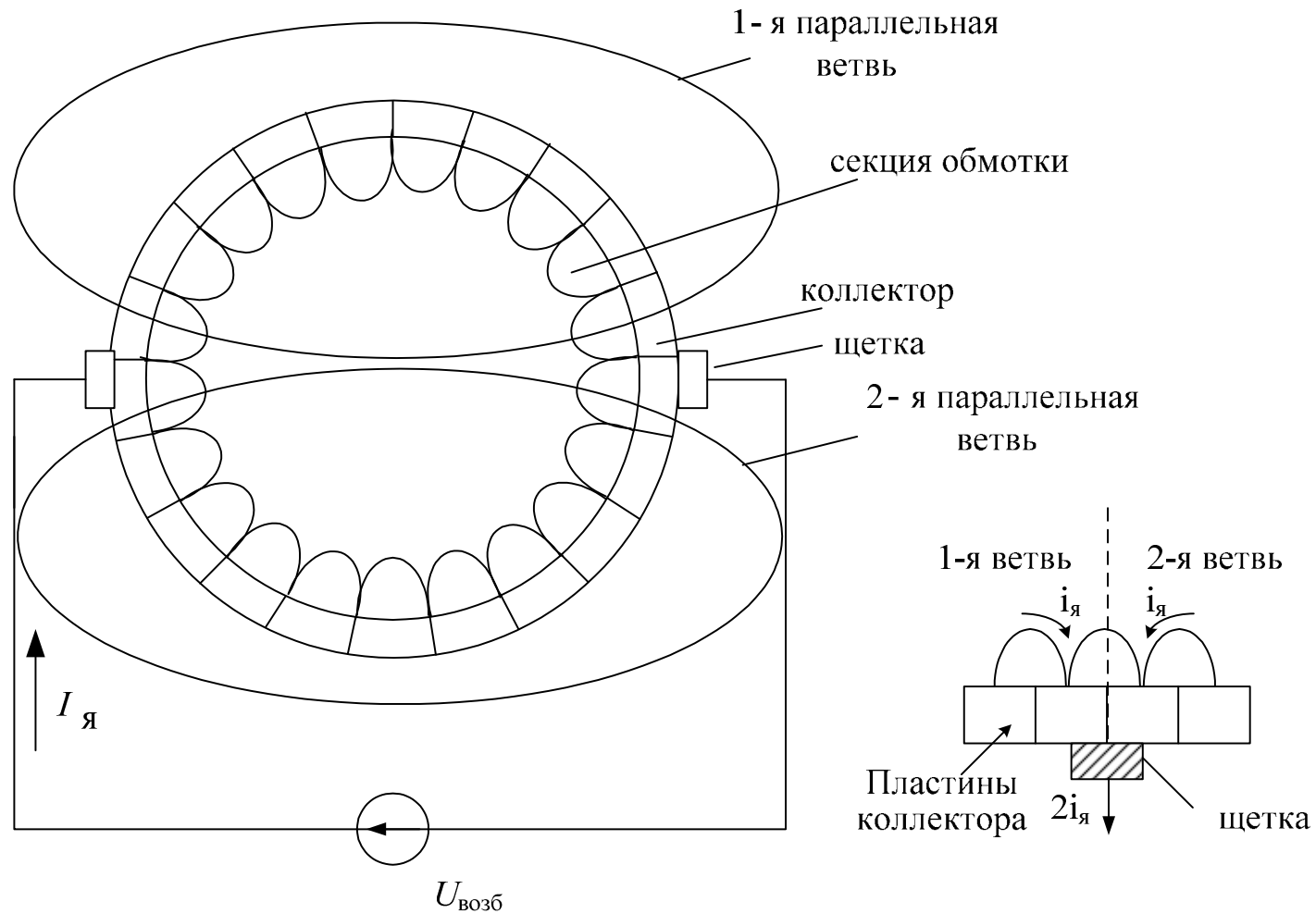
ханический коэффициент.

Электромагнитный момент МПТ пропорционален магнитному потоку полюса и току ротора. Он является тормозящим в генераторе и вращающим в двигателе.

Если указана номинальная мощность $P_{НОМ}$ (кВт) то

$$M_{НОМ} = 9,55 \frac{P_H}{n_{НОМ}} (н \cdot м).$$

Искрение в щеточном контакте



При вращении якоря коллекторные пластины якоря соприкасаются со щеткой, секции замыкаются щеткой и переходят из одной параллельной ветви в другую.

При коммутации может наблюдаться искрение в щеточном контакте.

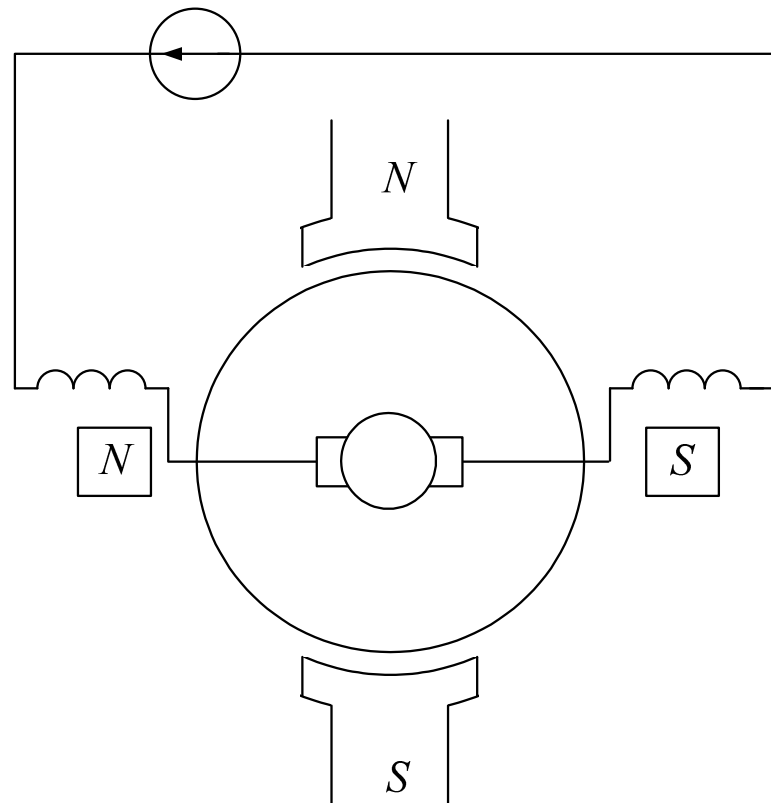
Причины:

1. Механические причины: некачественное изготовление коллектора, загрязнение.

2. Электромагнитные причины: секция имеет индуктивность L_s и накапливает электромагнитную энергию; в момент разрыва тока возникает искра.

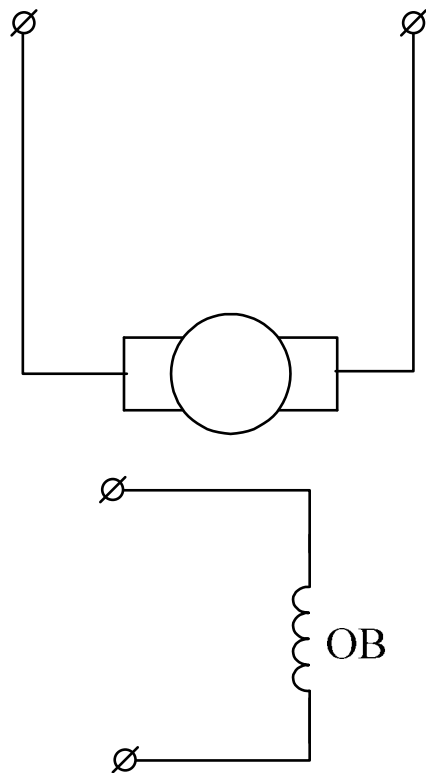
Для уменьшения искрения в двигателе устанавливают дополнительные полюсы статоров на геометрических нейтралях. Катушки возбуждения включают последовательно в цепь якоря. Магнитный поток дополнительных полюсов компенсирует реактивную ЭДС в но-

минальных режимах.

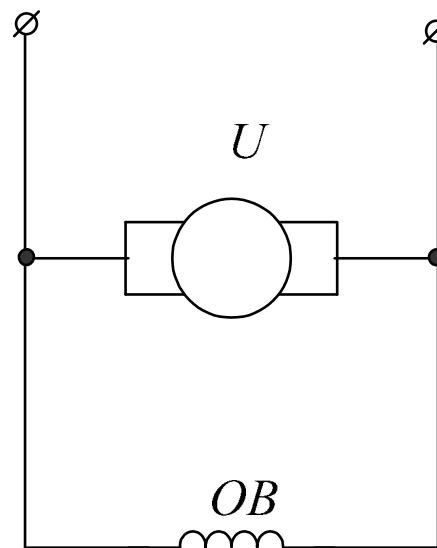


Способы возбуждения машин постоянного тока

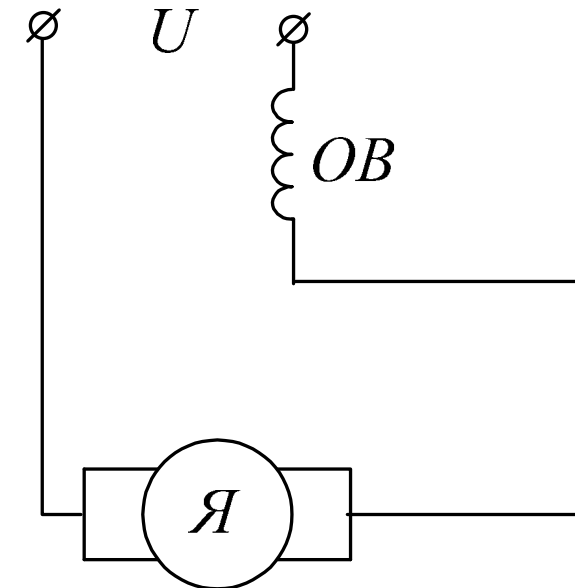
1. Независимое



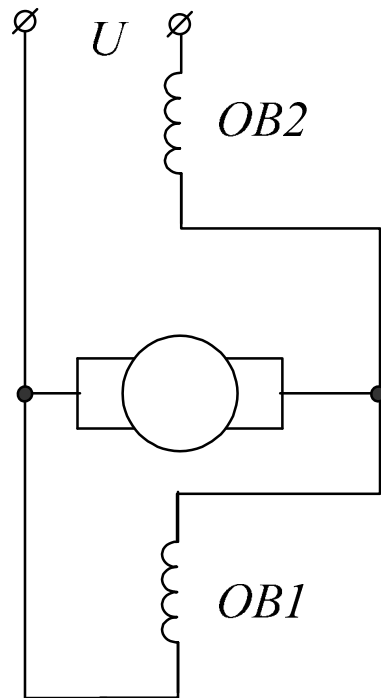
2. Параллельное



3. Последовательное

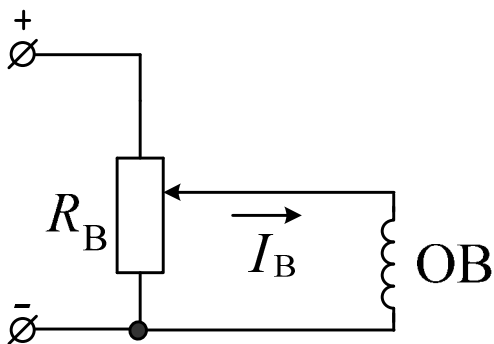
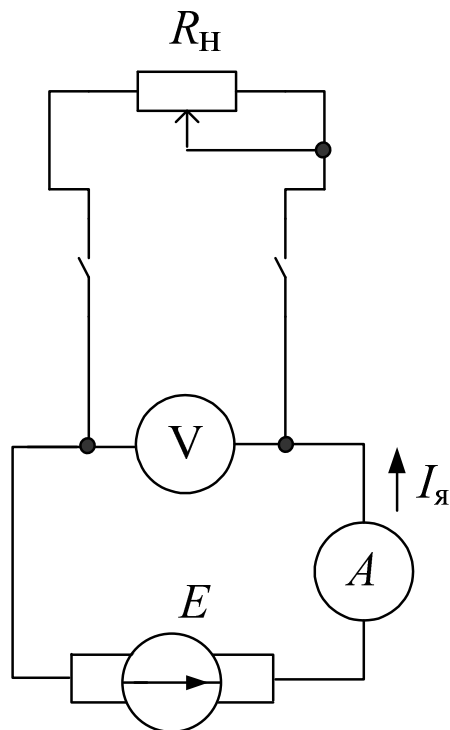


4 Смешанное возбуждение



Способы возбуждения сильно влияют на электрические свойства генераторов и двигателей постоянного тока.

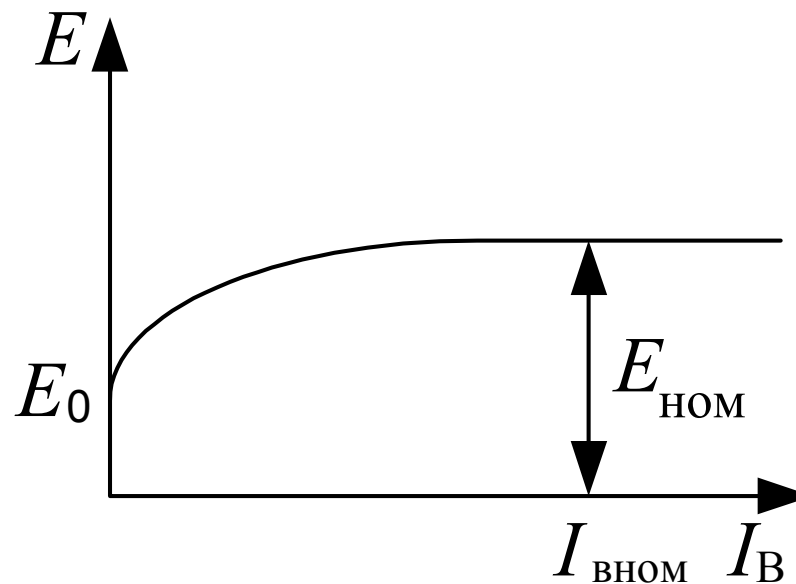
Генераторы постоянного тока независимого возбуждения



Ток возбуждения и магнитный поток не зависят от нагрузки генератора.

Характеристика холостого хода ($R_H = \infty$)

$$E = f(I_B); I_{\text{я}} = 0; n = \text{const}.$$

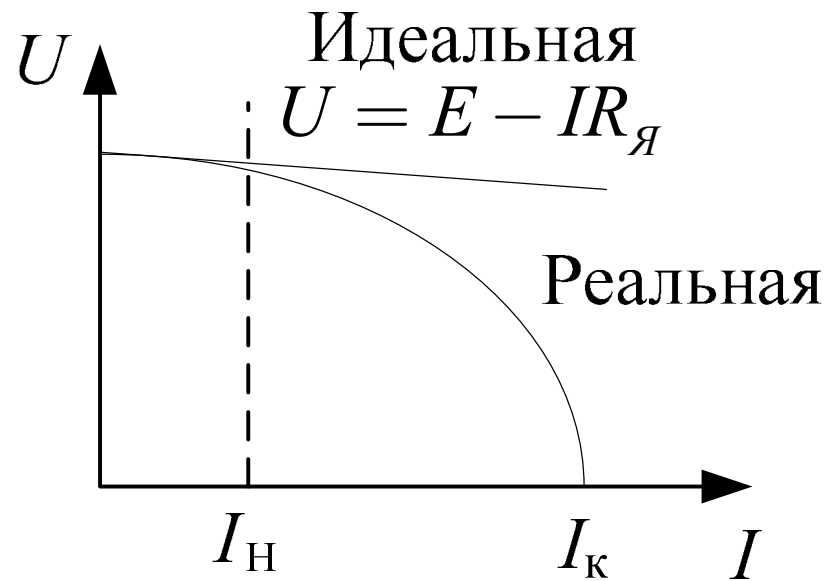


При $I_B = 0$ возникает остаточная ЭДС.

Внешняя характеристика

Это зависимость напряжения генератора от тока нагрузки:
 $U = f(I) (n = \text{const}, R_B = \text{const})$.

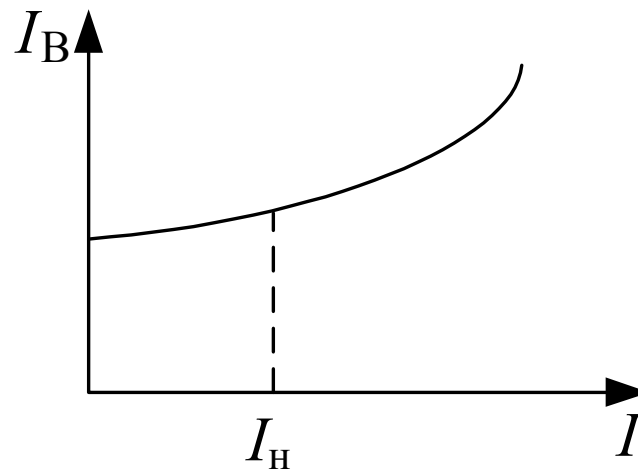
При отсутствии размагничивающего действия якоря и насыщения магнитной системы.



Регулировочная характеристика

Это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянном напряжении.

$$I_B = f(I) \quad (n = \text{const}; U = \text{const})$$



Недостаток генератора с независимым возбуждением: требуется отдельный источник питания, поэтому чаще применяют генераторы с самовозбуждением.

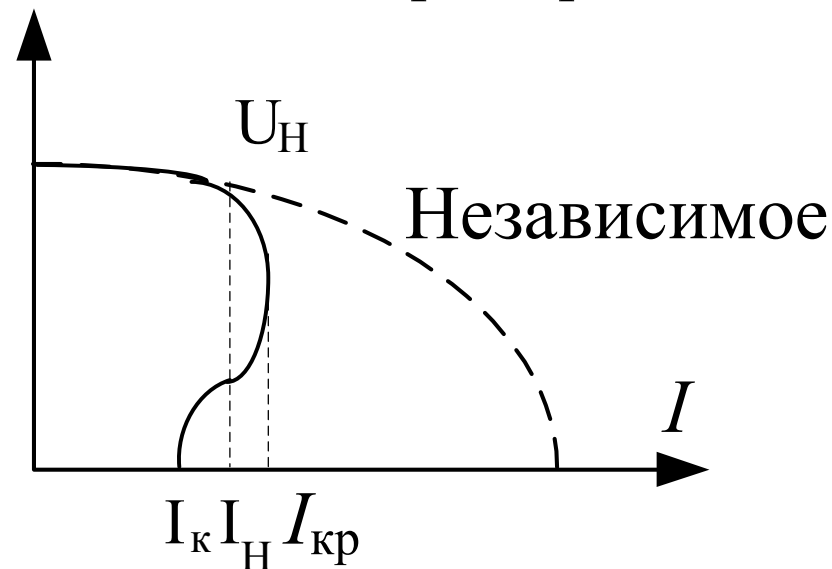
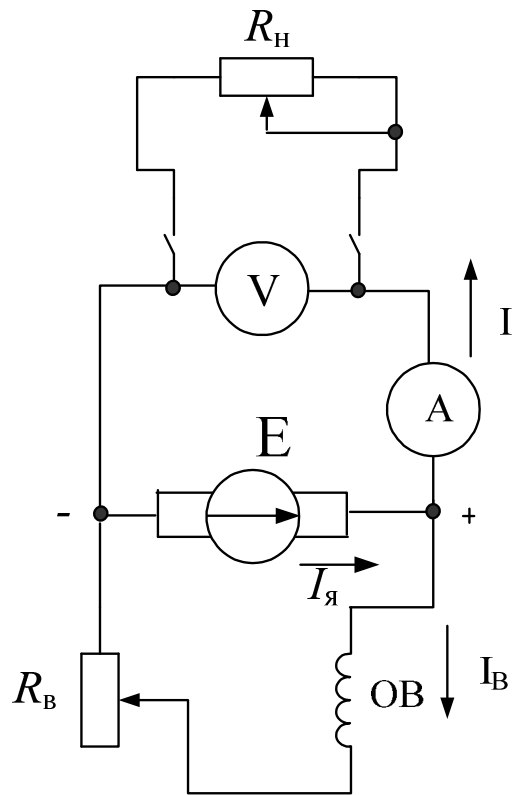
Генераторы постоянного тока с самовозбуждением.

Питание обмотки возбуждения главных полюсов осуществляется самим генератором.

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{в}}, \text{ причем: } I_{\text{в}} \cong 1 \div 3\% I_{\text{я}}.$$

Характеристика ХХ аналогична генератору с независимым возбуждением.

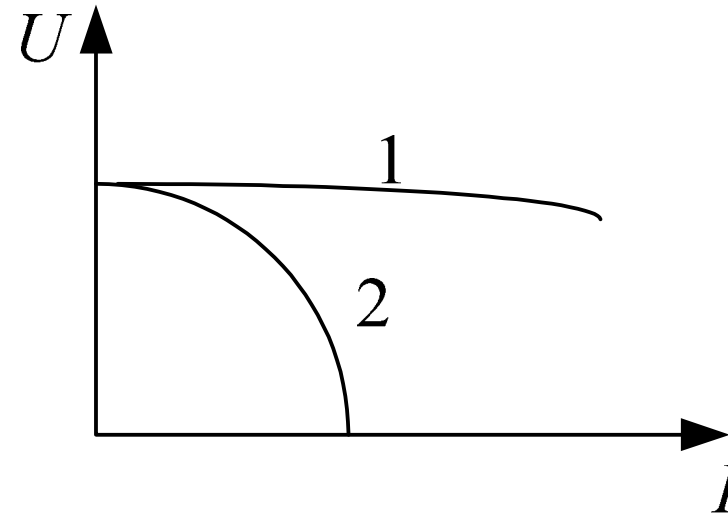
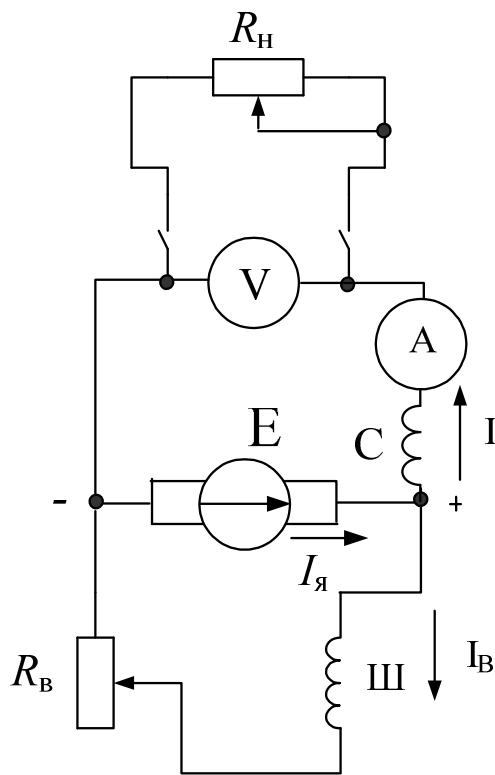
Внешняя характеристика



Напряжение на зажимах падает быстрее, чем у генератора с независимым возбуждением.

ГПТ смешанного возбуждения

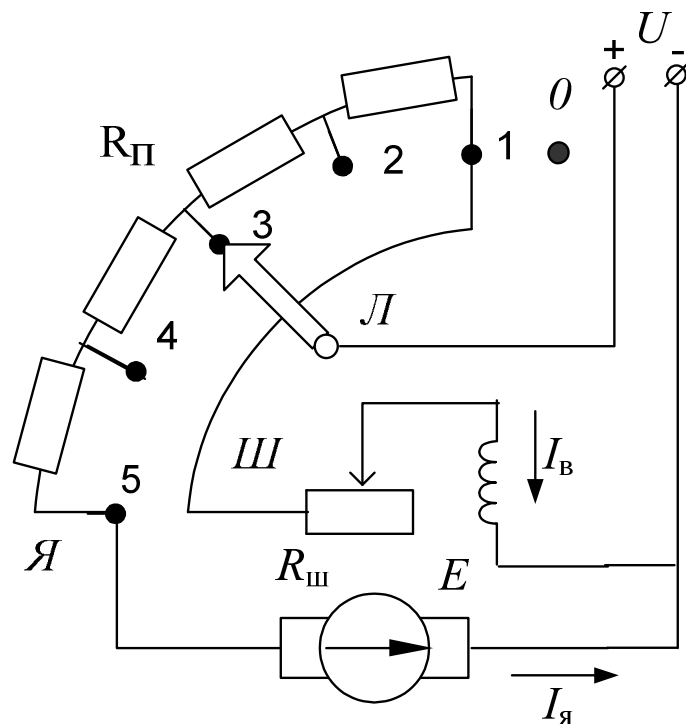
Последовательная обмотка С – серийная.
Параллельная обмотка Ш – шунтовая.



1 – согласное включение обмоток – высокая стабильность напряжения;

2 – встречное включение обмоток – постоянство тока при изменении напряжения (для сварки).

Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения



На схеме: Л – линия; Я – якорь; Ш – шунт; $R_{\text{п}}$ – пусковой реостат; $R_{\text{ш}}$ – реостат шунта возбуждения.

Из положения 0 ручку переводят в положение 5 (Я), ток якоря увеличивается, двигатель увеличивает обороты.

Цепь возбуждения подключена к сети непосредственно через дуговой контакт Ш.

Вращающий момент: $M = F \frac{DN}{2} = B_{CP} l I_1 \frac{DN}{2}$, где:

F – сила, действующая на один проводник обмотки якоря;

D – диаметр якоря; N – общее число проводников якоря; I_1 – ток в одном проводнике якоря; l – действующая длина проводника; B_{CP} – среднее значение индукции в зазоре.

Второй способ расчета момента:

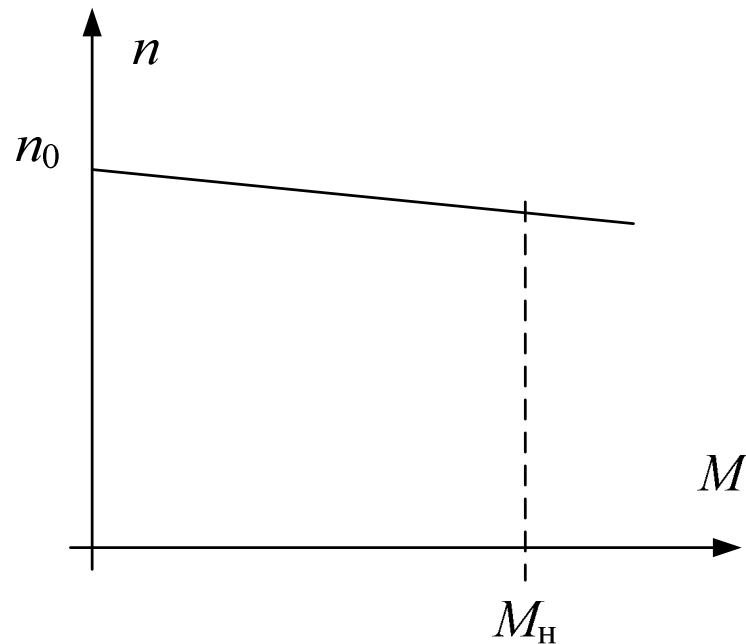
$$M = C_M \Phi I_{\text{я}}.$$

Механические характеристики ДПТ

Это зависимость частоты вращения от момента на валу двигателя при условии ($U_{\text{я}} = \text{const}, I_{\text{в}} = \text{const}$).

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = C_E n \Phi + \frac{M}{C_M \Phi} R_{\text{я}} \quad (E - \text{противо-ЭДС}).$$

Выразим n :
$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{C_E C_M \Phi^2} M = n_0 - kM.$$

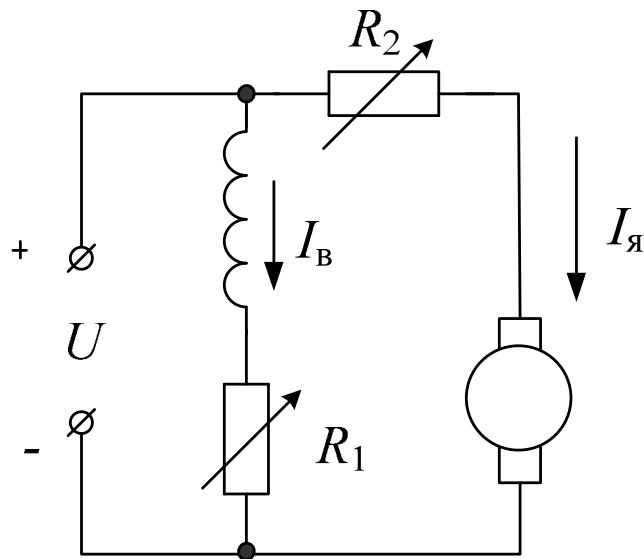


Частота изменяется незначительно.
Характеристика жесткая.

Регулировка частоты вращения ДПТ независимого и параллельного возбуждения

Из уравнения двигателя: $n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E \Phi} \cong \frac{U}{C_E \Phi}$, так как $R_{\text{я}} \ll$

(сотые доли Ома).



Регулируют ток возбуждения и ток якоря.
Реверсирование получают изменением
направления тока возбуждения или тока
якоря.

Возможна плавная регулировка в боль-
ших пределах (до 1000 раз).