

# Электротехника

Электрические машины

Электрические машины

постоянного и переменного тока

---

РОДЮКОВ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

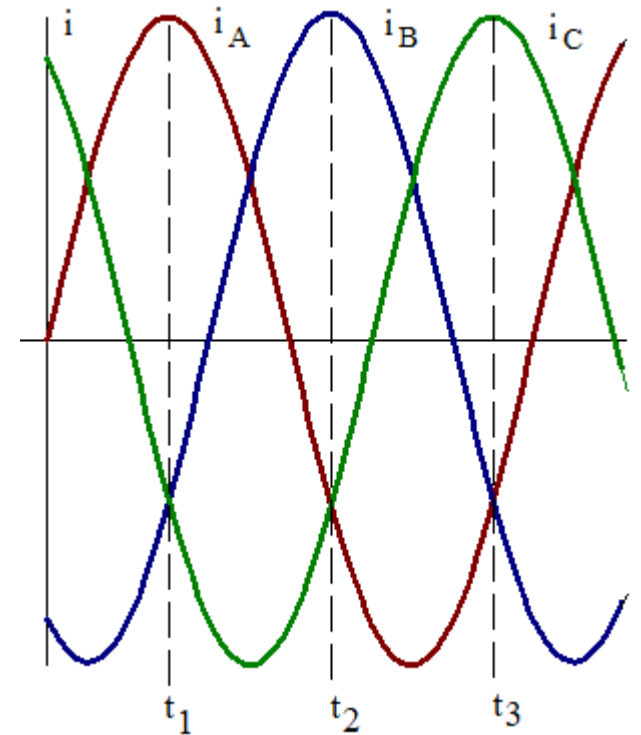
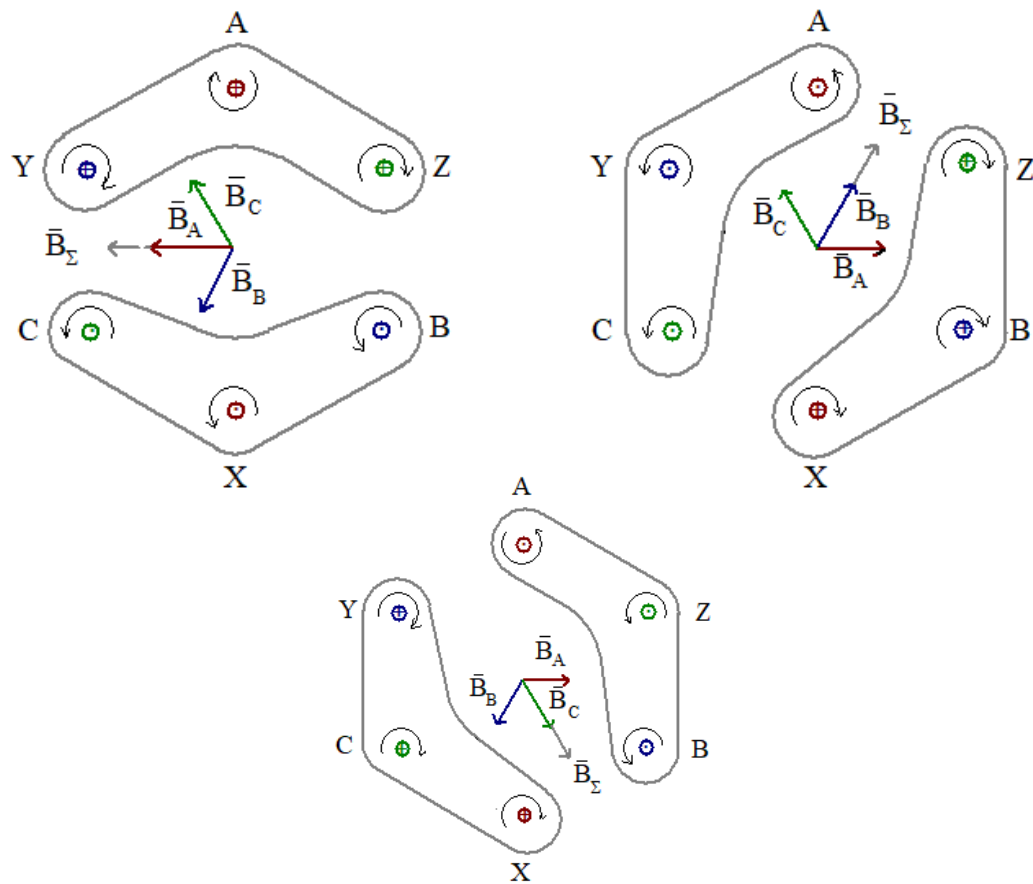
КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАТИКИ

# Машины переменного тока

---

# Вращающееся магнитное поле



# Вращающееся магнитное поле

На основании рассмотрения этих трех частных случаев можно сделать заключение, что три неподвижные обмотки, сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$  и обтекаемые токами, сдвинутыми на  $120^\circ$  во времени создают **вращающееся магнитное поле**, чья индукция постоянна. Такое поле является двухполюсным. Если конструкция содержит **2p** полюсов, то синхронная угловая скорость будет:

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p}, \text{ рад/с}$$

и соответствующая ей частота вращения  $n = \frac{60f}{p}$ , об/мин

Шкала синхронных скоростей ( $f = 50$  Гц):

Число пар полюсов p	1	2	3	4	5	6
Синхронная частота Вращения n [об/мин]	3000	1500	1000	750	600	500

# Конструкция асинхронного двигателя

**Асинхронная машина** – двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна (первичная) получает питание от сети с частотой  $f_1$ , а вторая обмотка (вторичная) замыкается накоротко или на сопротивления. Токи во вторичной обмотке появляются в результате индукции. Их частота  $f_2$  является функцией частоты вращения ротора.

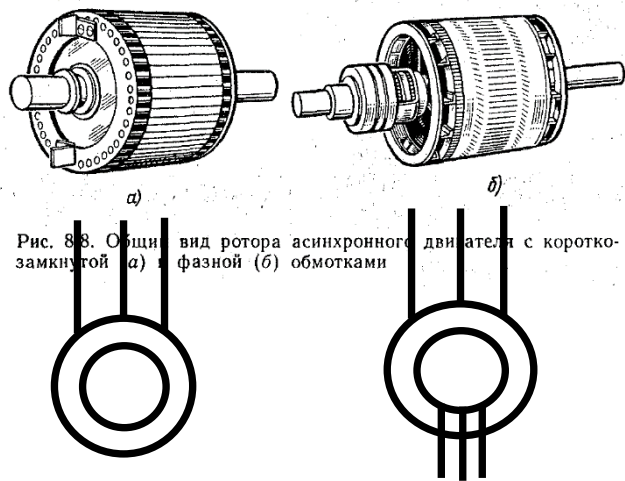
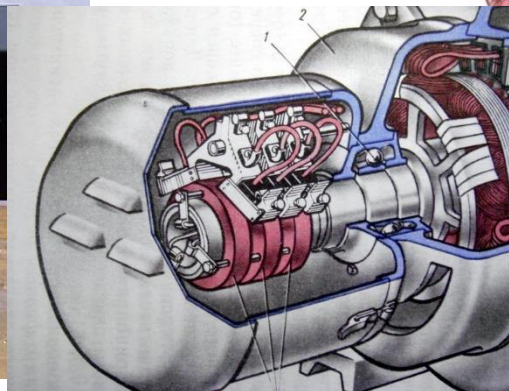
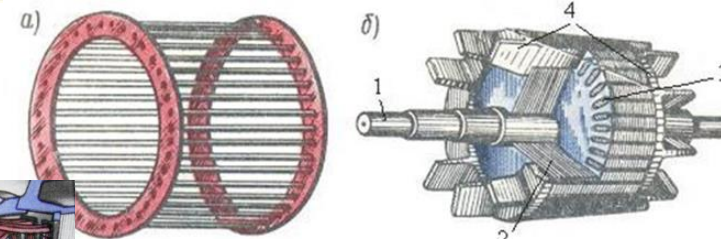
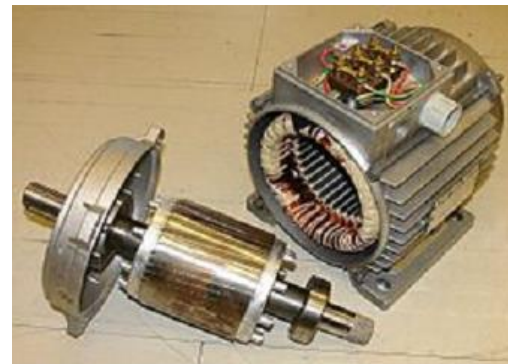


Рис. 8.8. Общий вид ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутой (а) и фазной (б) обмотками



# Скольжение

Ротор асинхронного двигателя вращается с частотой  $n$  меньшей чем синхронная частота вращения  $n_s$ , поэтому для оценки разности частот используется относительная величина, называемая скольжение:

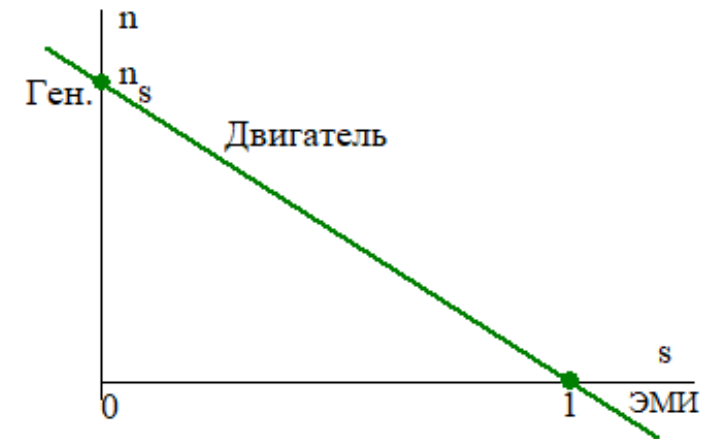
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \text{или} \quad n = n_s(1 - s).$$

На этой линии имеется две характерные точки:

- 1)  $n = n_s, s = 0$  — функционирование без нагрузки (физически данная точка не существует);
- 2)  $n = 0, s = 1$  — пуск двигателя.

Эти точки делят линию на три интервала:

- 1)  $s < 0$  — функционирование в качестве генератора;
- 2)  $0 < s < 1$  — функционирование в качестве двигателя;
- 3)  $s > 1$  — функционирование в качестве электромагнитного тормоза.



# Механическая характеристика

Зависимость  $M = f(s)$  имеет кубический характер и имеет четыре характерных точки:

- 1)  $s = 0$ ,  $M = 0$  холостой ход;
- 2)  $s = s_{кр}$ ,  $M = M_{\max}$ ;
- 3)  $s = s_H$ ,  $M = M_H$ ;
- 4)  $s = 1$ ,  $M = M_{\Pi}$ .

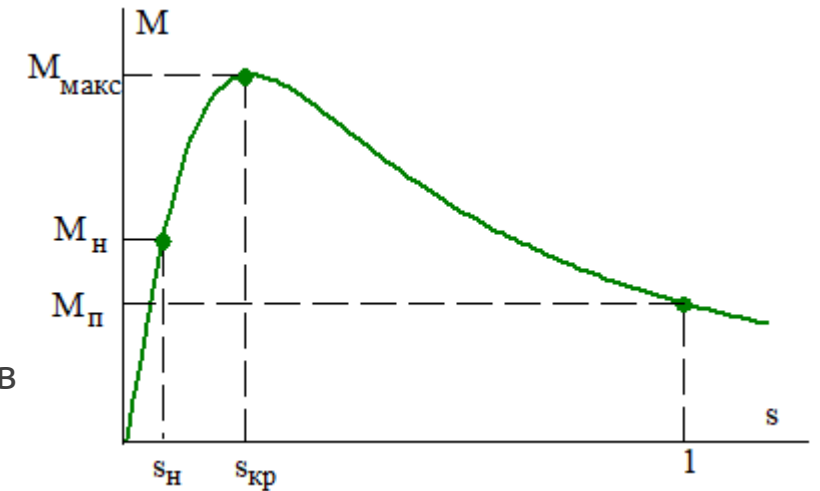
В интервале  $0 < s < 1$  электрическая машина работает в режиме двигателя и вращающий момент достигает максимума при  $s = s_{кр} = R_2 / X_2$ .

Для скольжения больше чем **критическое  $s_{кр}$**  работа двигателя носит неустойчив характер, поэтому на участке  $s_{кр} > s > 1$  происходит пуск двигателя.

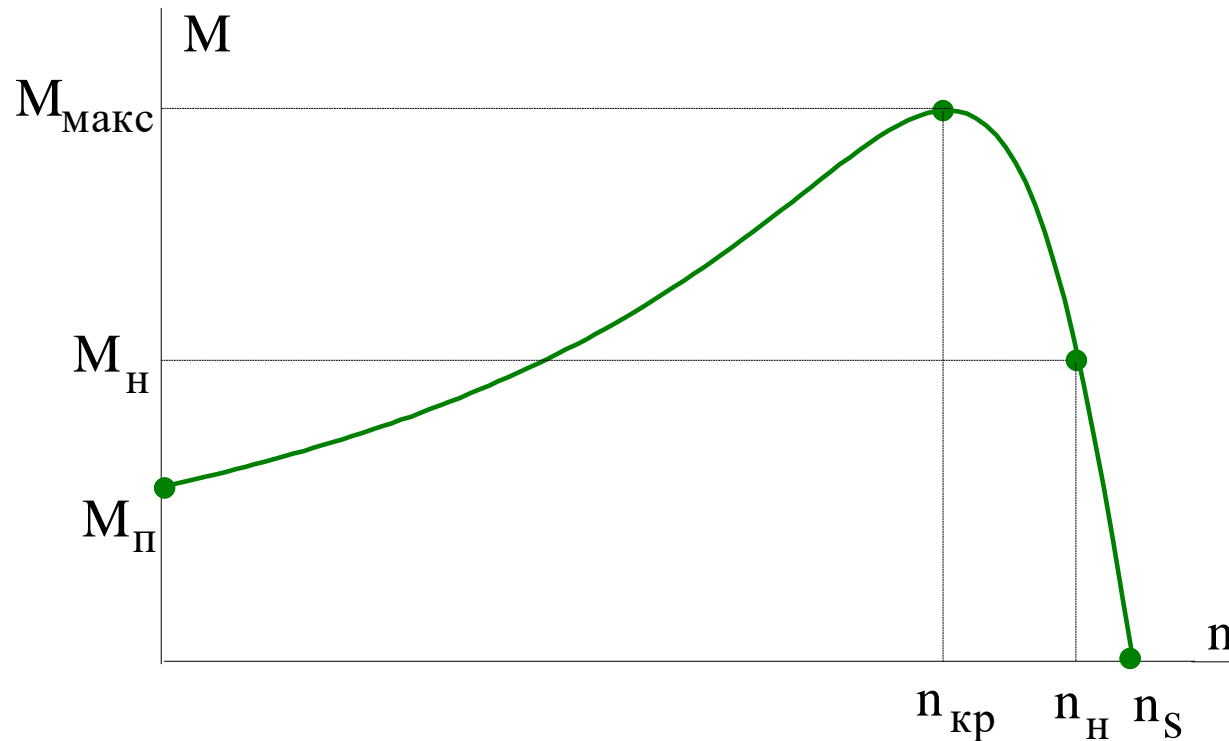
Зная  **$s_{кр}$**  и  **$M_{\max}$**  можно записать эмпирическую формулу **Клосса** для вращающего момента:

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

На практике номинальный момент двигателя достигает половины максимального момента, при этом скольжение составляет около 5%.



# Характеристика момент-частота

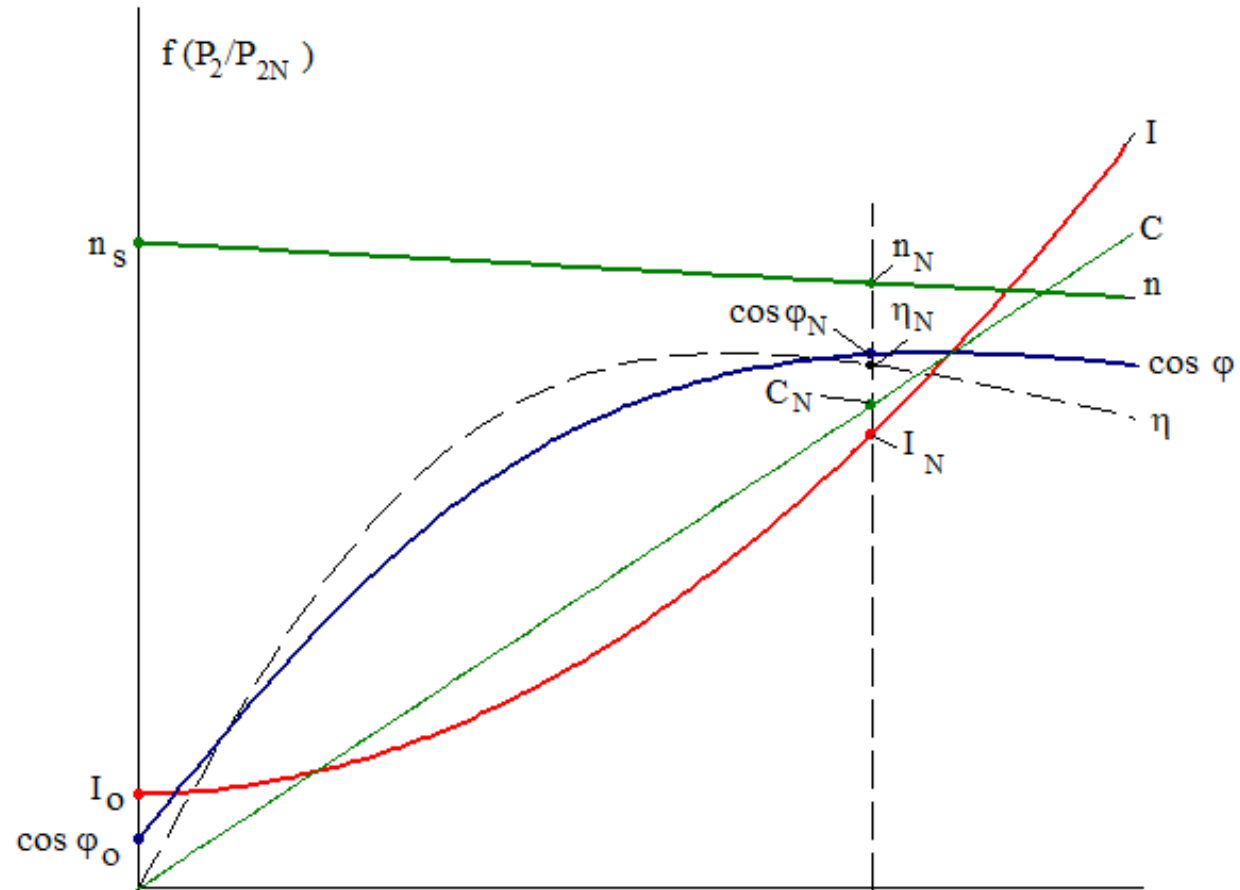


## Характерные точки

- 1)  $n = 0$  ,  $M = M_{\text{П}}$
- 2)  $n = n_{\text{кр}}$  ,  $M = M_{\text{макс}}$
- 3)  $n = n_{\text{н}}$  ,  $M = M_{\text{н}}$
- 4)  $n = n_{\text{с}}$  ,  $M = 0$



# Рабочие характеристики

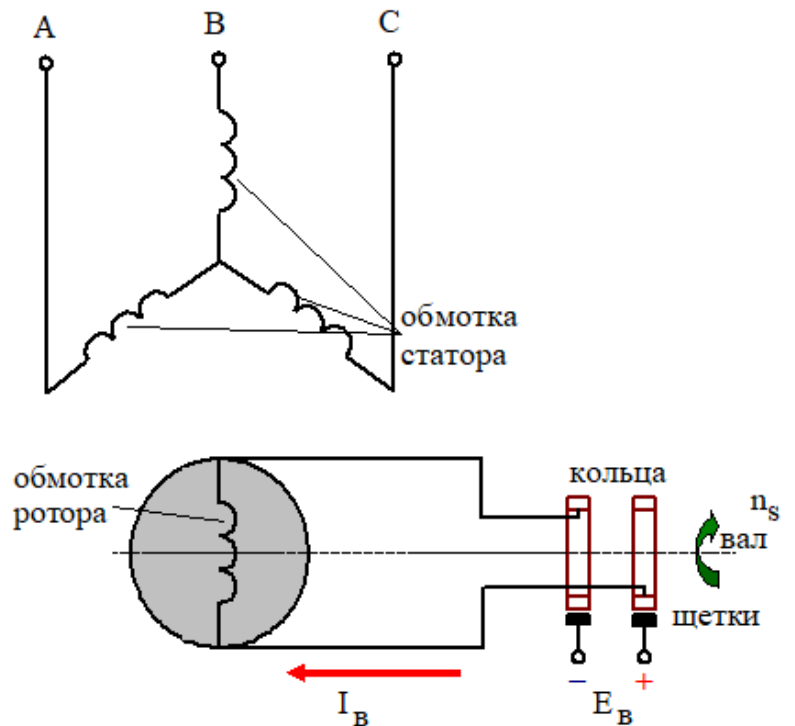


# СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Синхронными машинами называют электрические машины переменного тока, у которых частота вращения ротора находится в строго постоянном соотношении с частотой тока электрической сети.

## Преимущества:

- способность вырабатывать как активную, так и реактивную мощность (с возможностью ее регулирования);
- возможность регулирования выходного напряжения;
- возможность работы как с сетью, так и в автономном режиме без применения каких-либо сложных дополнительных устройств;
- высокий КПД.



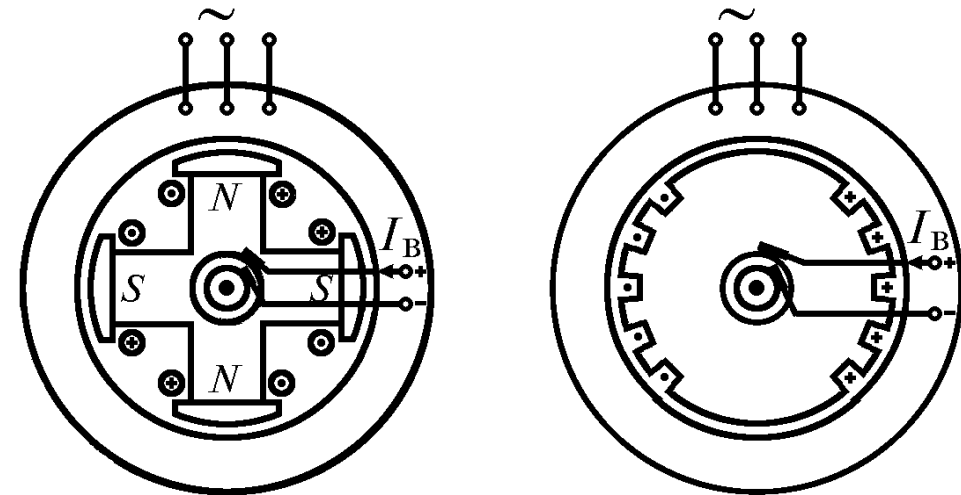
# Конструкция ротора

два типа роторов:

1. Явнополюсный а)
2. Неявнополюсный б)

**Явнополюсный ротор** – имеет выступающие полюсы, применяют у машин с частотой вращения до 1000, 1500 *об/мин*.

**Неявнополюсный ротор** – имеет вид цилиндра, применяют при скоростях 1500 и 3000 *об/мин*



# Характеристики двигателя

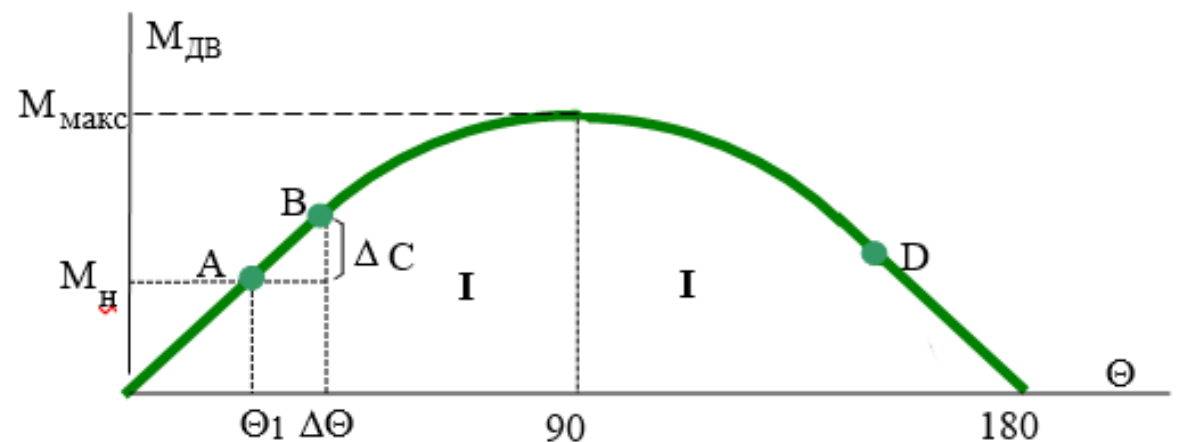
## Угловая характеристика

Угловая характеристика  $M_{ДВ} = f(\Theta)$  имеет два интервала функционирования: **I** - интервал стабильной работы, **II** - интервал нестабильной работы.

Когда угол  $\Theta$  меньше  $90^\circ$ , двигатель работает стабильно (т.А), то есть двигатель находится в режиме авторегулирования. Если момент нагрузки увеличивается  $M_n + \Delta M$ , угол  $\Theta_1$  увеличивается тоже  $\Theta_1 + \Delta \Theta$ . Согласно формуле вращающего момента  $M_{ДВ}$  также увеличится и равновесие установится в точке В.

Когда угол  $\Theta$  больше  $90^\circ$ , двигатель работает нестабильно (т.Д), то есть двигатель **теряет синхронизм**. Поэтому угол  $\Theta = 90^\circ$  называется **критическим**.

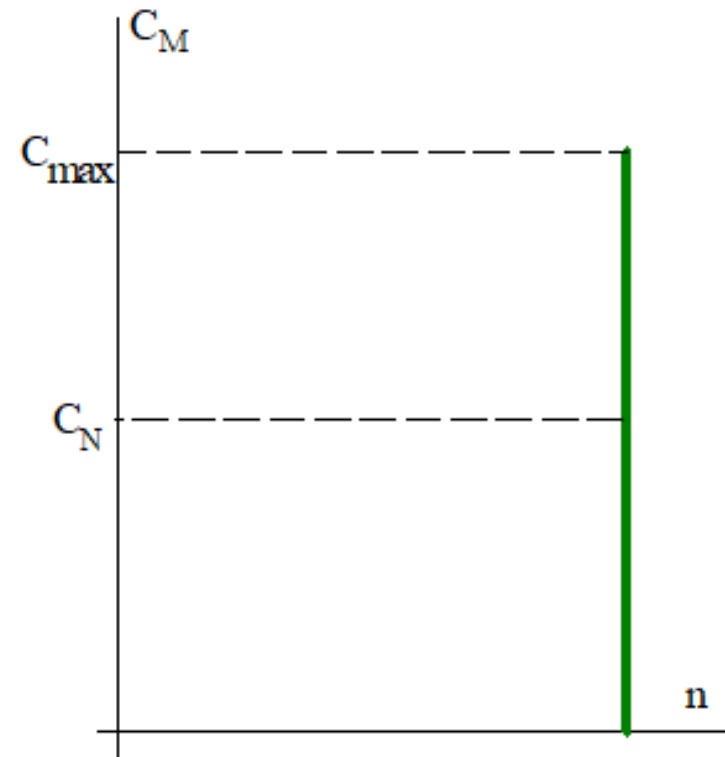
Практически величина этого угла находится в пределах от  $30^\circ$  до  $40^\circ$ .



# Характеристики двигателя

## Механическая характеристика

Механическая характеристика  $M = f(n)$  синхронного двигателя – это прямая линия параллельная оси X. В таком случае частота вращения постоянна и не зависит от нагрузки



# Характеристики двигателя

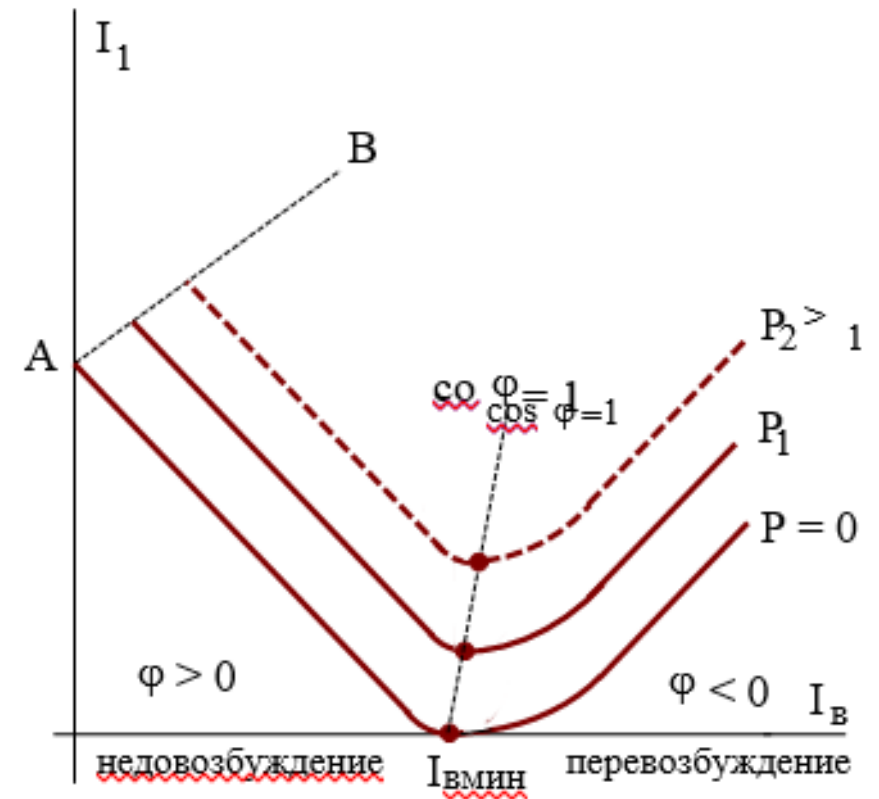
## Семейство U – образных характеристик

Семейство **U** – образных характеристик наиболее важно для промышленного применения синхронных двигателей.

Этот рисунок показывает, что существует минимальный ток возбуждения  $I_{в.мин}$  для каждой кривой, при котором коэффициент мощности  $\cos\varphi = 1$ , и что существуют интервалы недовозбуждения и перевозбуждения.

В первом интервале синхронный двигатель работает, имея характер **индуктивного** сопротивления, а во втором **емкостного**.

Это свойство позволяет использовать синхронный двигатель для коррекции коэффициента мощности в промышленных установках, применяя **синхронный компенсатор** вместо батареи конденсаторов.



# Электрические машины ПОСТОЯННОГО ТОКА

---

# Машины постоянного тока

Машины постоянного тока были первыми электрическими машинами.

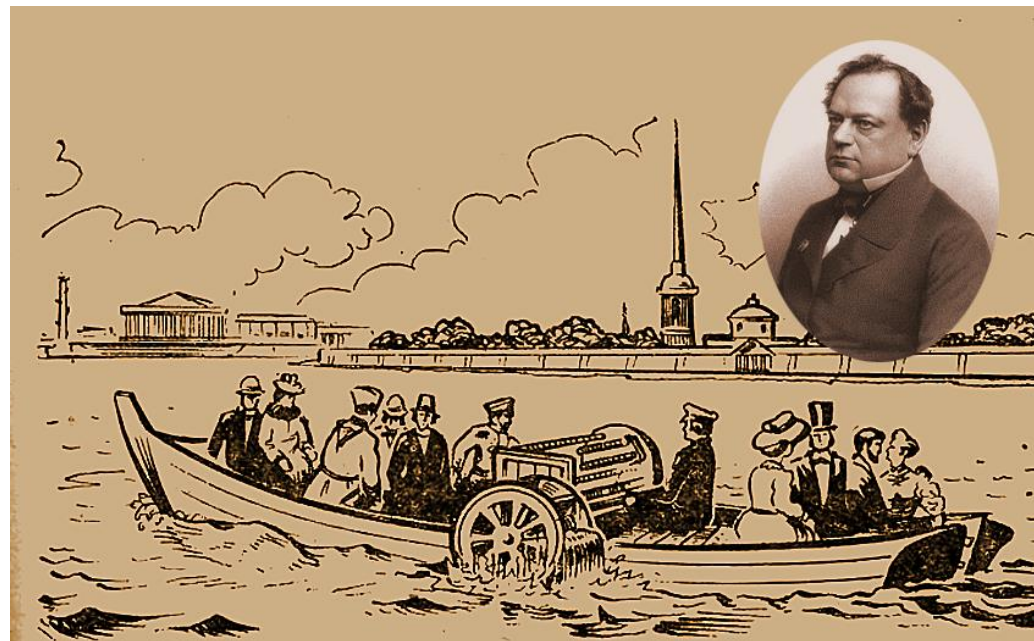
Академик Б.С. Якоби, в 1838 г. использовал двигатель постоянного тока для привода лодки на Неве.

Преимущества: возможность плавной регулировки.

Недостатки: более сложная конструкция, наличие механического контакта

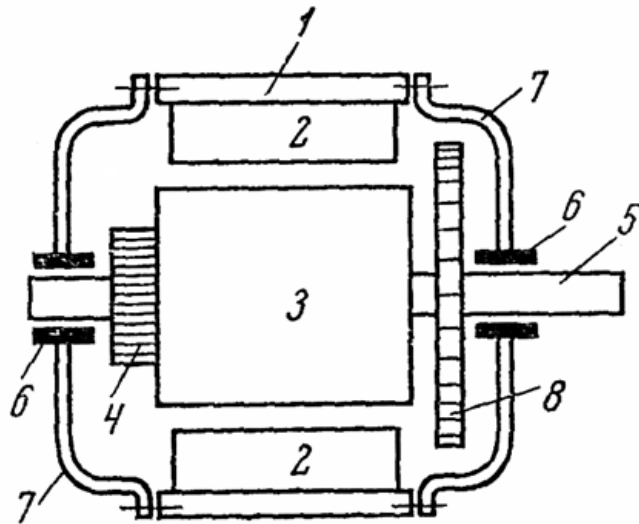
Важное свойство:

**ОБРАТИМОСТЬ** – способность работать в режиме двигателя и генератора.

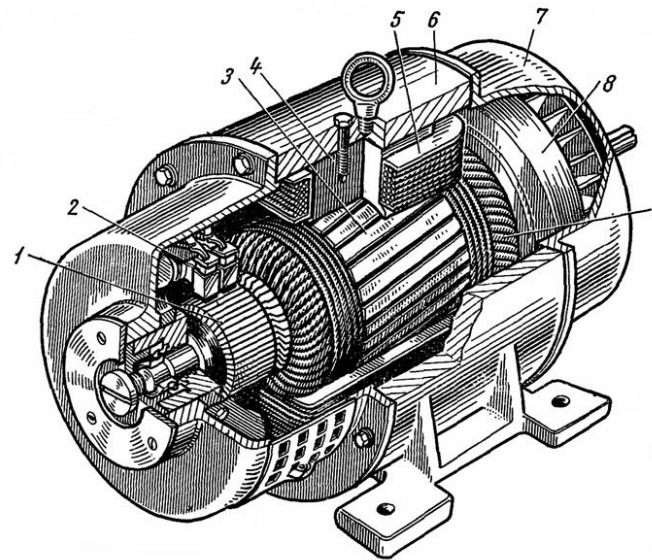




# Конструкция МПТ

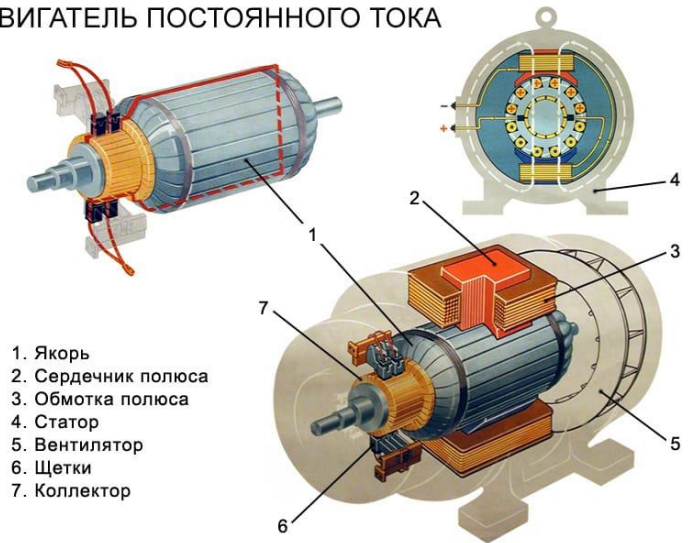


1 – станина; 2 – главные полюсы;  
3 – сердечник якоря; 4 – коллектор;  
5 – вал; 6 – подшипник;  
7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор



1 – коллектор; 2 – щетки;  
3 – сердечник якоря; 4 – сердечник  
главного полюса; 5 – полюсная катушка;  
6 – станина; 7 – подшипниковый щит;  
8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

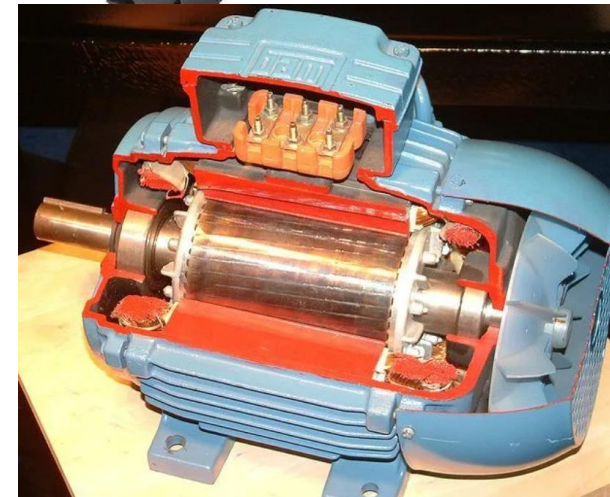
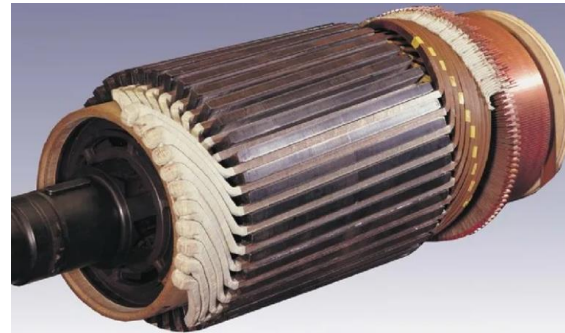
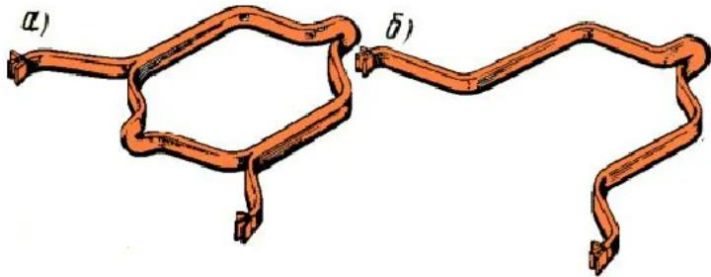
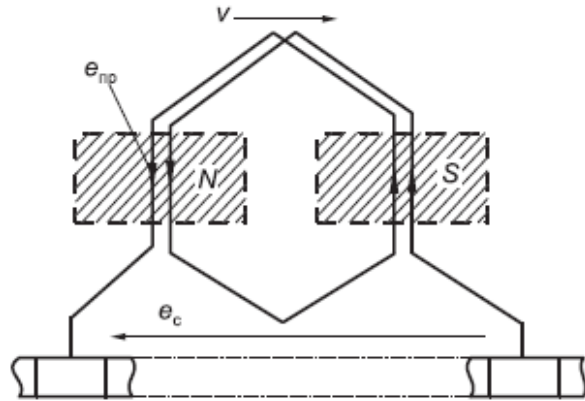
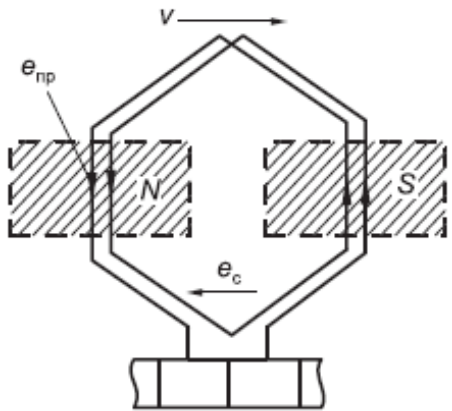
ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА



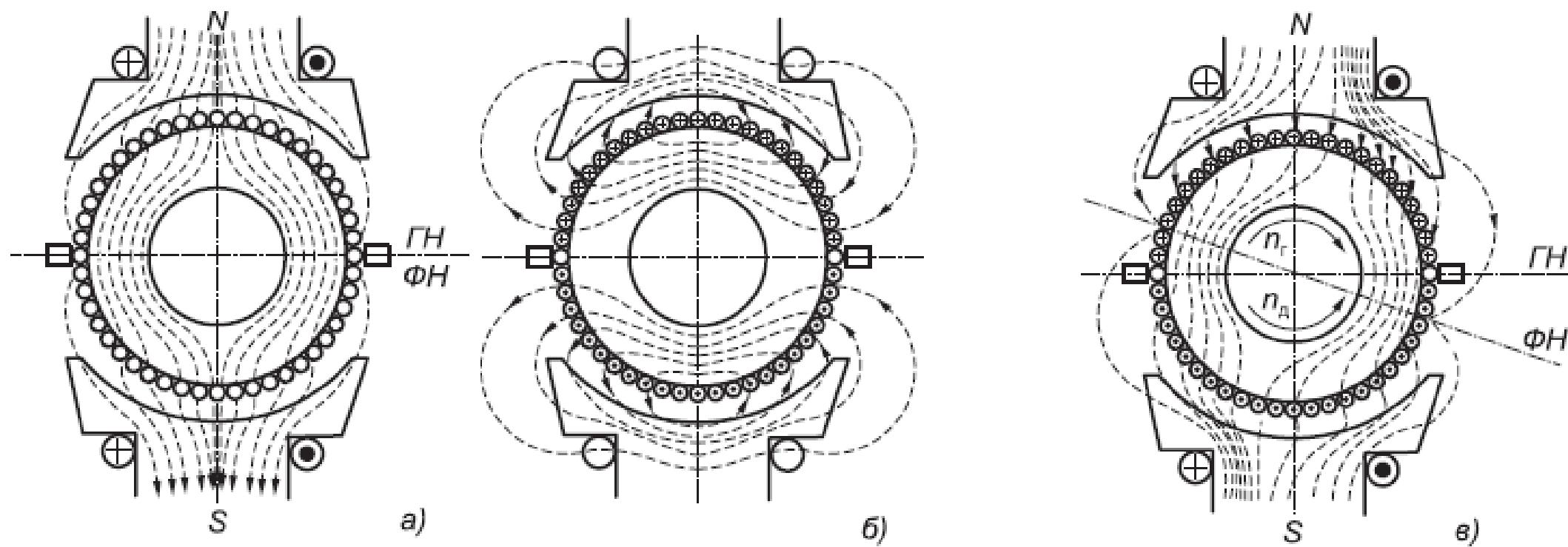
1. Якорь  
2. Сердечник полюса  
3. Обмотка полюса  
4. Статор  
5. Вентилятор  
6. Щетки  
7. Коллектор

# Обмотка ротора (якоря)

ПЕТЛЕВАЯ ОБМОТКА    ВОЛНОВАЯ ОБМОТКА



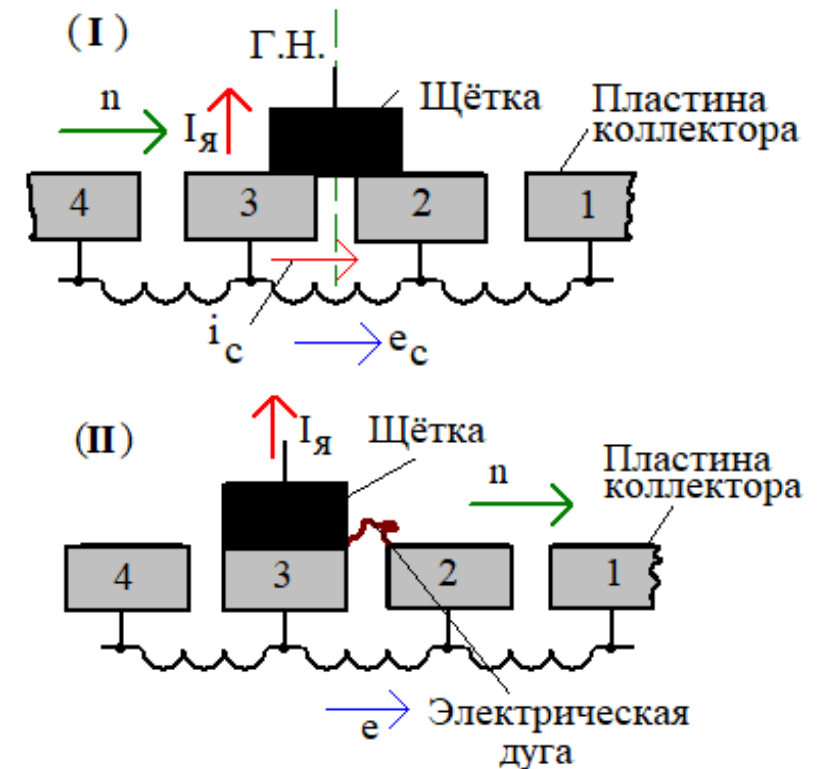
# Реакция якоря



# Коммутация в МПТ

Для подавления разряда применяют:

- 1) смещение щёток на **физическую нейтраль** в направлении вращения для генератора и в противоположном для двигателя. Однако э.д.с.  $e_c$  зависит от нагрузки и возрастает по мере деформации магнитного поля. Практически невозможно изменять положение щёток в процессе работы, и поэтому этот метод применим для машин малой мощности и с постоянной нагрузкой.
- 2) для нейтрализации электродвижущих  $e_c$  и  $e$  необходимо противопоставить им э.д.с., которая изменяет свою величину в процессе работы. С этой целью создаются **дополнительные полюса**, расположенные на геометрической нейтральной линии и включенные последовательно со щётками.

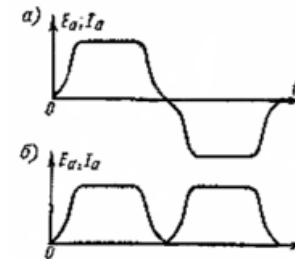
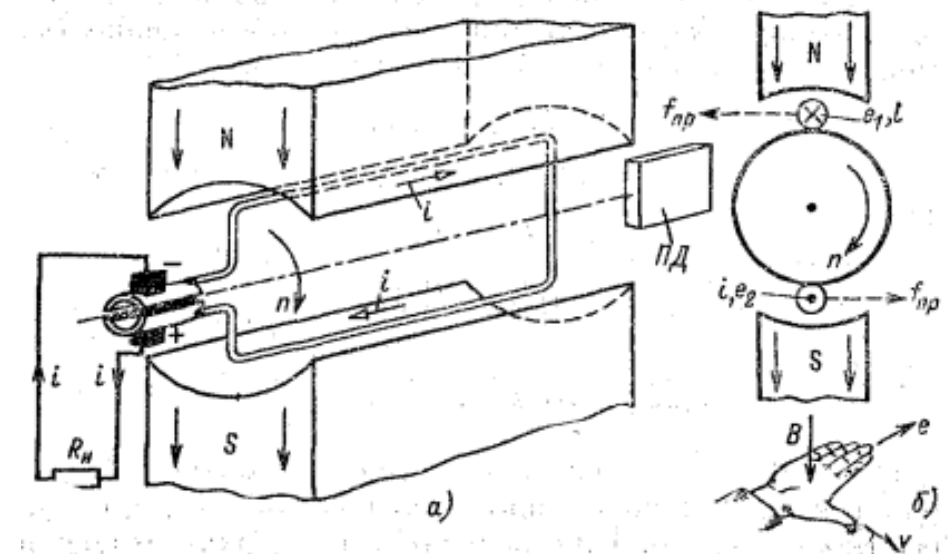


# Принцип действия ГПТ

В общем случае генератор можно представить в виде витка, вращающегося в магнитном поле, концы которого подключены к пластинам коллектора.

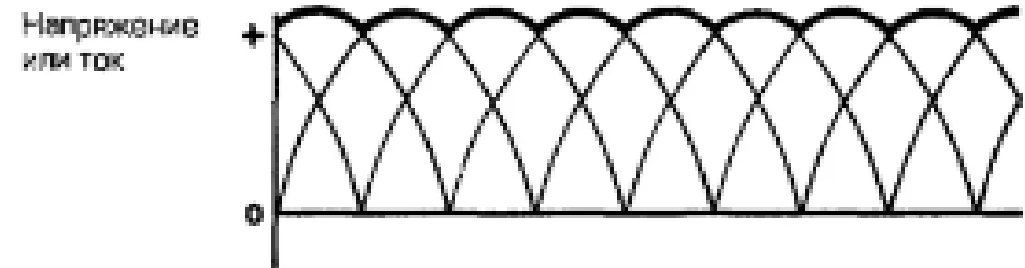
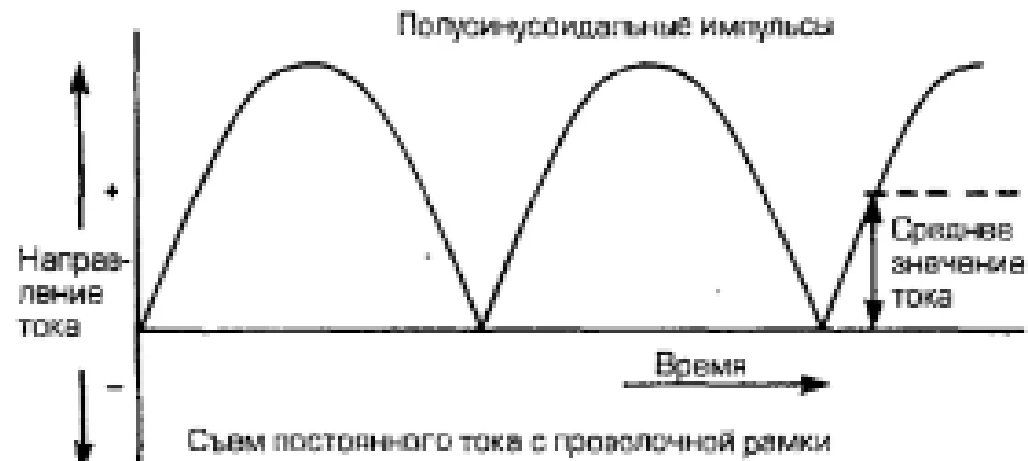
Виток приводится во вращение внешним приводом.

В витке возникает синусоидальное напряжение, благодаря переключению пластин коллектора между щётками, направление тока во внешней цепи не меняется, т.о. щёточно-коллекторный узел является простейшим механическим выпрямителем.



Кривые э.д.с. и тока простейшей машины в ядре (а) и во внешней цепи (б)

# Пульсации напряжения ГПТ



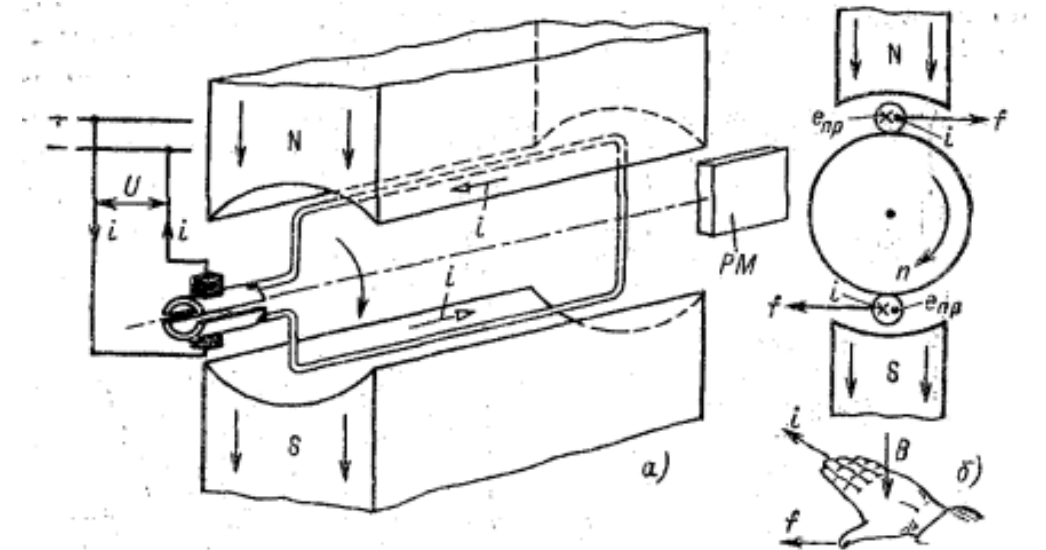
25 витков — пульсации 0,4% от среднего значения ЭДС



# Принцип действия ДПТ

Если к щёткам подвести постоянное напряжение, то в роторе возникнет постоянное магнитное поле, которое будет взаимодействовать с полем статора, и приведёт во вращение ротор.

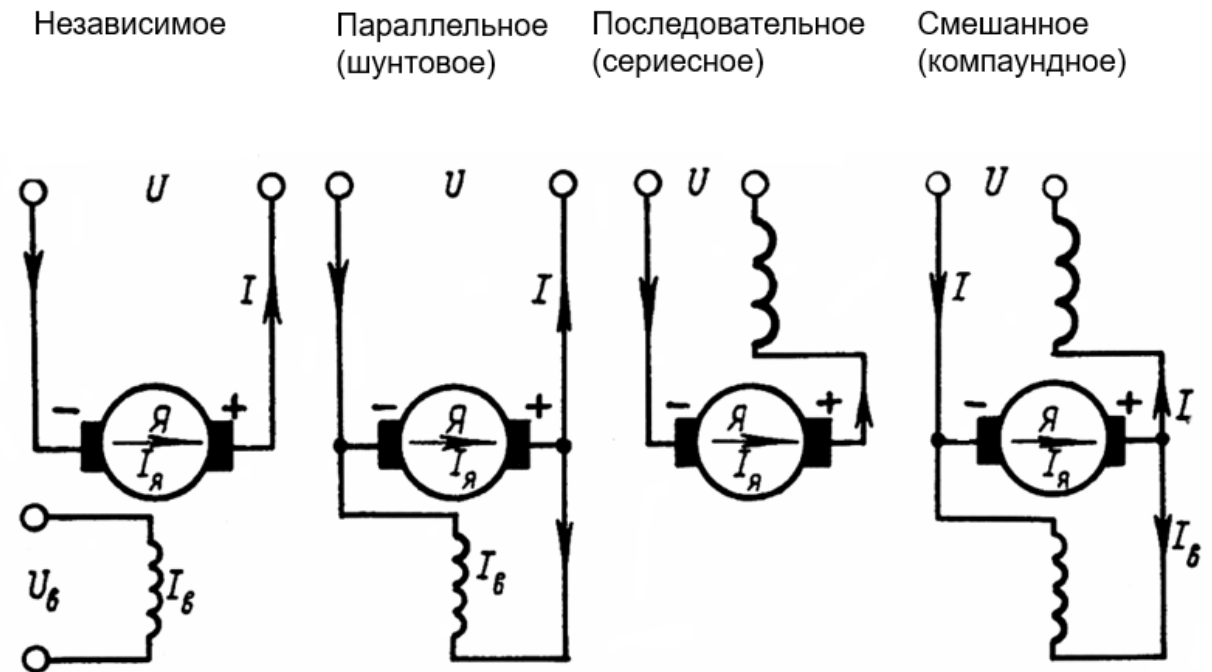
Необходимая полярность поля ротора обеспечивается переключением направления тока в щёточно-коллекторном узле.



# Генераторы постоянного тока

Свойства генераторов постоянного тока зависят от числа и способа подключения обмоток возбуждения или, как говорят, от способа возбуждения генераторов. В зависимости от способа возбуждения различают генераторы:

- 1) независимого возбуждения;
- 2) параллельного возбуждения (ранее шунтовые);
- 3) Последовательного (сериесного) возбуждения
- 4) генераторы смешанного возбуждения (ранее компаундные).

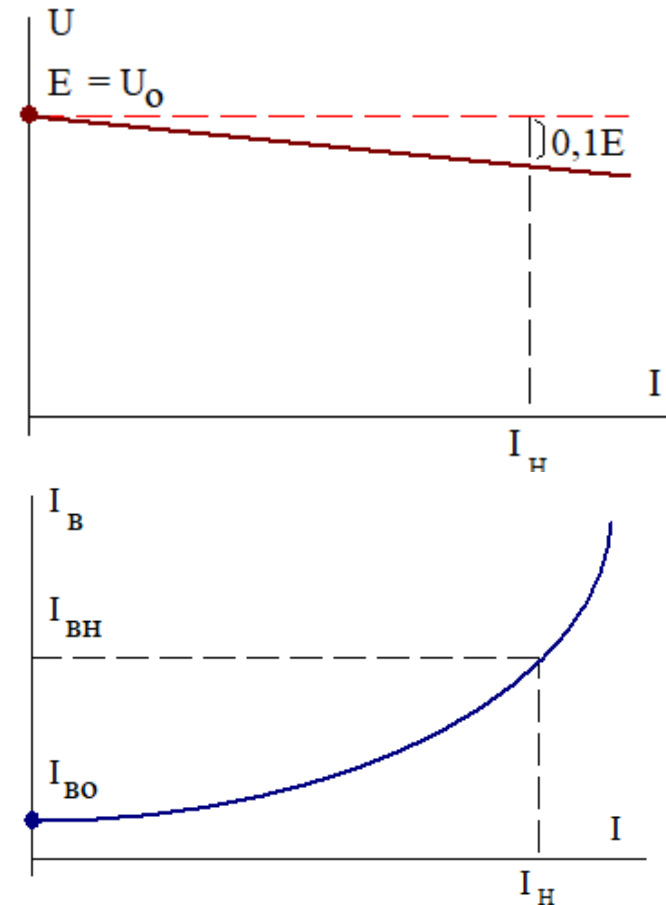




# Генератор независимого возбуждения

Обмотка возбуждения питается от внешнего источника. Обеспечивает наилучший режим работы.

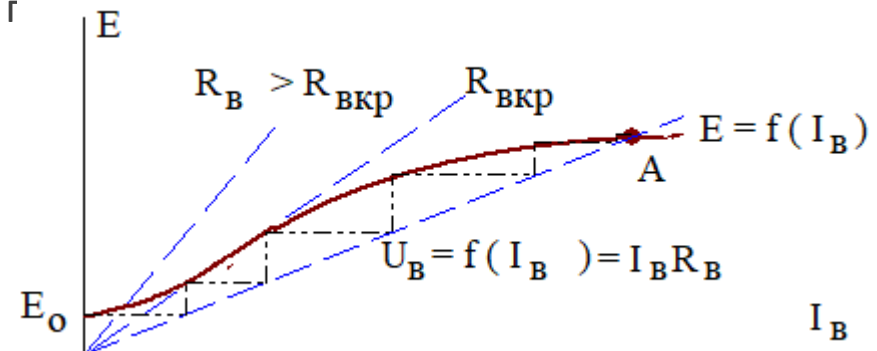
Падение напряжения под нагрузкой можно компенсировать током возбуждения.



# Самовозбуждение генератора постоянного тока

Все остальные типы генераторов постоянного тока относятся к генераторам с самовозбуждением.

- 1) существование остаточного намагничивания, которому соответствует э.д.с.  $E_0$ . Под действием этой э.д.с. протекает небольшой ток намагничивания, который создает магнитный поток больший, чем остаточный. Этот поток наводит э.д.с. большую, чем  $E_0$  и т.д. Э.д.с. растет, когда растет ток возбуждения;
- 2) направление остаточного магнитного потока должно совпадать с направлением потока создаваемого. Этот процесс закончится, когда пересекутся две характеристики: холостого хода  $E = f(I_B)$  и цепи возбуждения  $U_B = f(I_B)$ .  
Точка А, представленная на рисунке называется рабочей точкой холостого хода.
- 3) если увеличивать сопротивление  $R_B$  характеристика  $U_B = f(I_B)$  начнет поворачиваться и для некоторого сопротивления  $R_{Bкр}$ , называемого критическим, эта линия станет касательной к характеристике холостого хода. В этом случае процесс самовозбуждения не происходит. Следовательно, третье условие таково  $R_B < R_{Bкр}$ .

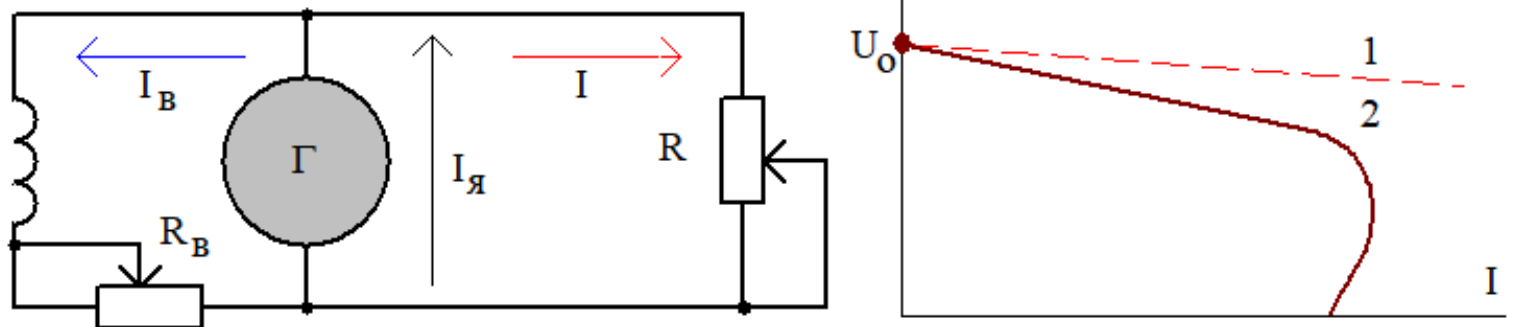


# Генератор с параллельным возбуждением

Конструкция генератора с параллельным возбуждением идентична генератору с независимым возбуждением, однако обмотка возбуждения включена параллельно якорю.

Сравнивая характеристики можно заключить, что при одном и том же токе  $I$ , падение напряжения больше для генератора с параллельным возбуждением.

Если продолжать увеличивать ток нагрузки, то при определенном его значении ток начнет падать также как и напряжение. В этом случае говорят, что машина "сбросила" нагрузку, потому что для такого генератора падение напряжения провоцирует уменьшение  $I_B$  и э.д.с. Как результат напряжение уменьшается быстрее чем при независимом возбуждении. Чтобы поддерживать напряжение в этом случае необходимо увеличивать ток возбуждения, для чего в цепи имеется реостат.

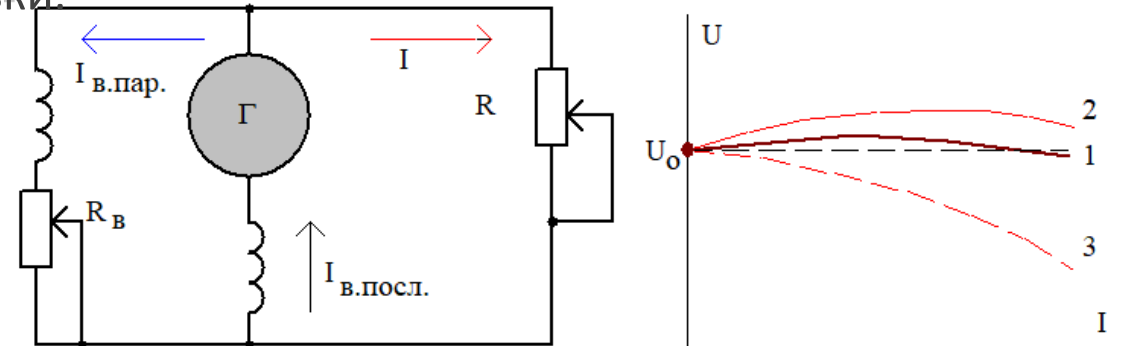


# Генератор со смешанным возбуждением

Этот тип генератора универсален, так как возбуждение создается двумя обмотками последовательной и параллельной, что позволяет получить семейство внешних характеристик.

Рассмотрим три кривые из этого семейства:

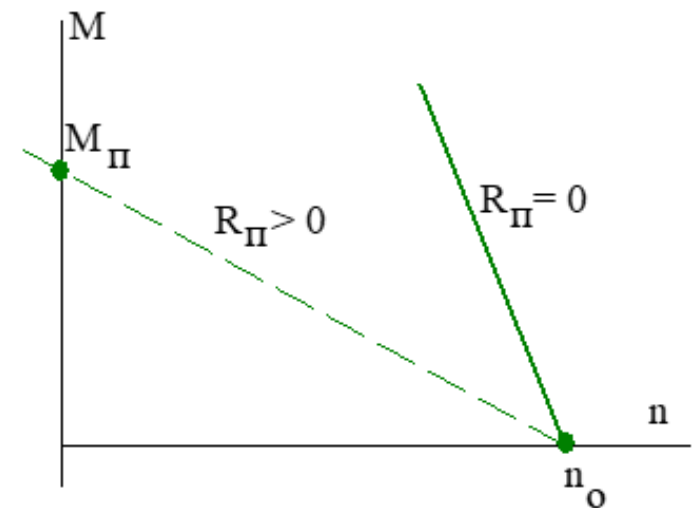
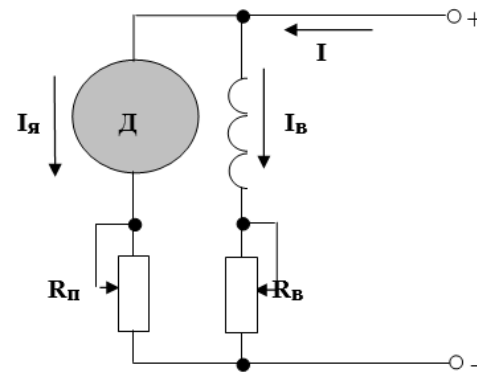
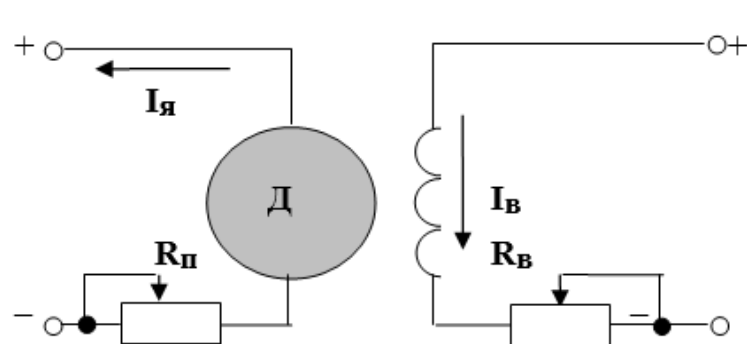
- для нормальной работы генератора (кривая 1) последовательное возбуждение как бы автоматически поддерживает напряжение и оно изменяется незначительно.
- для "перевозбужденного" генератора (кривая 2) намагничивающие силы последовательной и параллельной обмоток суммируются и напряжение может быть больше чем э.д.с.  $E=U_0$ ;
- для "недовозбужденного" генератора (кривая 3) намагничивающие силы вычитаются и напряжение резко падает при увеличении нагрузки.



# ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## Двигатель с независимым и параллельным возбуждением

Согласно схеме, имеем две изолированные электрические цепи с соответствующими резисторами. Цепь возбуждения с  $R_B$  предназначена для создания магнитного поля и цепь якоря с пусковым реостатом,  $R_{\Pi}$ , для ограничения пускового тока.



# Пусковой ток

---

Ток якоря без пускового реостата определяется согласно II закону Кирхгофа:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{U - kn\Phi_{\text{р}}}{R_{\text{я}}}$$

В момент пуска частота вращения якоря  $n$  и соответственно ЭДС  $E$  равны нулю, ток якоря ограничивается лишь небольшим сопротивлением якоря:

$$I_{\text{пя}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$$

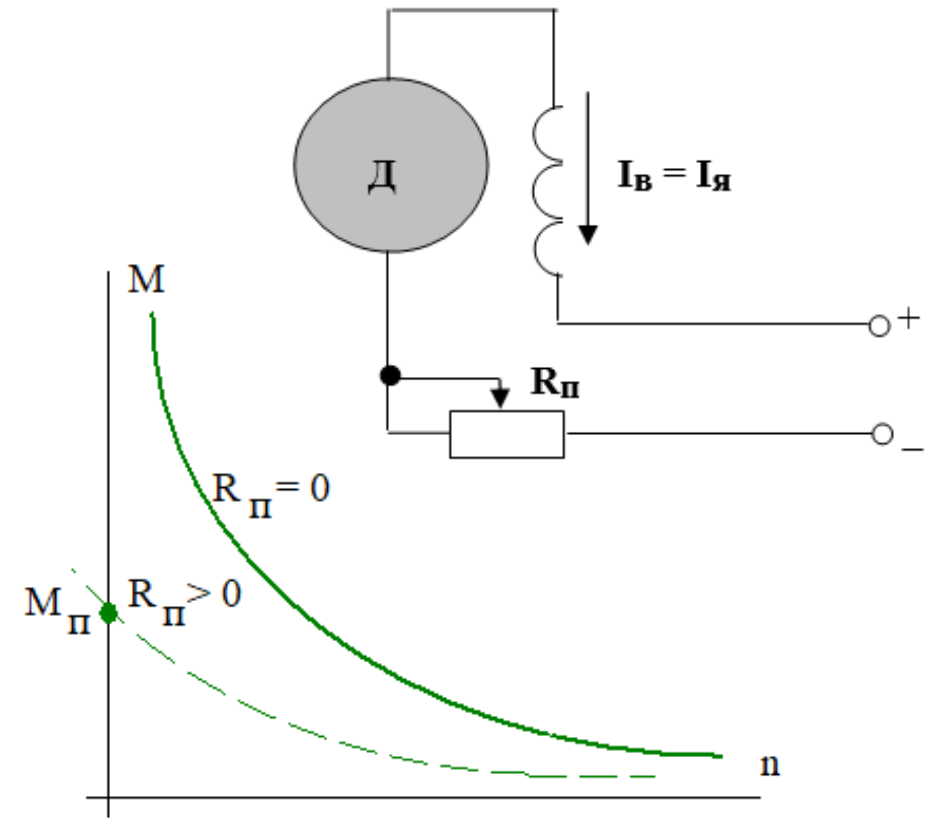
и может достигать **12-кратной** величины от номинального значения.

Для ограничения пускового тока используют пусковой реостат.

# Двигатель с последовательным возбуждением

Механическая характеристика такого двигателя имеет гиперболический характер.

На практике двигатель с последовательным возбуждением не может работать без нагрузки при номинальном напряжении.

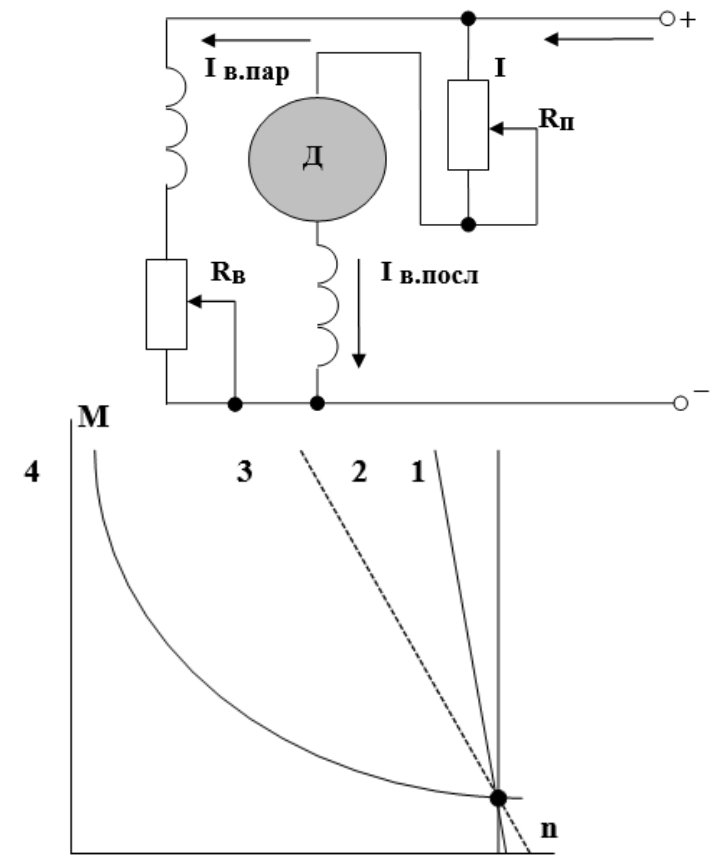


# Двигатель со смешанным возбуждением

Этот двигатель имеет семейство характеристик промежуточных между характеристиками двигателей с параллельным и последовательным возбуждением. Такой двигатель нормально работает без нагрузки при номинальном напряжении и имеет хороший пусковой момент.

В качестве примера представим на рисунке механические характеристики четырех типов ДПТ :

- 1 - двигатель смешанного возбуждения, когда магнитные потоки от двух обмоток вычитаются. В этом случае рабочий магнитный поток уменьшается пропорционально  $U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ , то есть, получаем практически постоянную частоту вращения якоря;
- 2 - двигатель с независимым или параллельным возбуждением;
- 3 - двигатель смешанного возбуждения, когда магнитные потоки от двух обмоток складываются. В этом случае получается характеристика более мягкая, чем для двигателей с независимым или параллельным возбуждением;
- 4 - двигатель с последовательным возбуждением.





---

Конец лекции