

Электрические машины постоянного тока

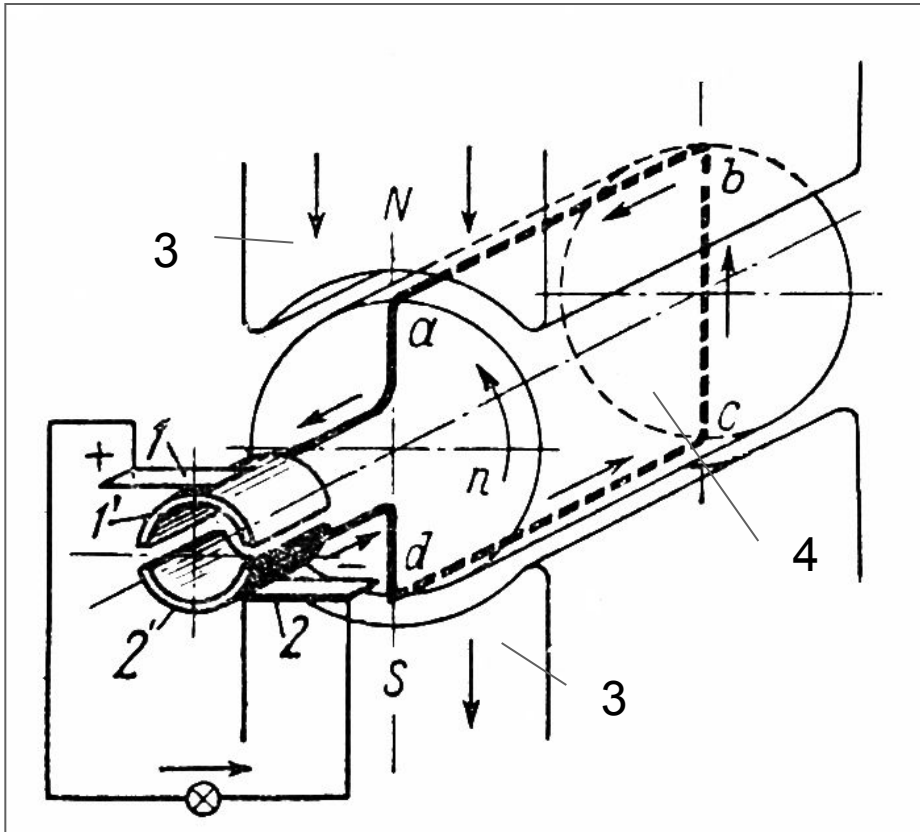
- Принцип действия и конструкция
- Системы возбуждения
- Обмотки
- Реакция якоря
- Коммутация
- Характеристики

Основные элементы конструкции МПТ

- **Статор** – неподвижная часть электрической машины.
- **Ротор** – подвижная (вращающаяся) часть электрической машины.
- **Индуктор** – часть электрической машины, обеспечивающая создание основного магнитного потока. В машине постоянного тока индуктор неподвижен и имеет явно выраженные полюса чередующейся полярности.
- **Якорь** – часть электрической машины в которой наводится э. д.с. В машине постоянного тока якорь вращается.
- **Щеточно-коллекторный узел** – механический преобразователь переменного тока в постоянный и обратно.
- **Возбуждение** – создание основного магнитного потока электрической машины.

Принцип действия МПТ

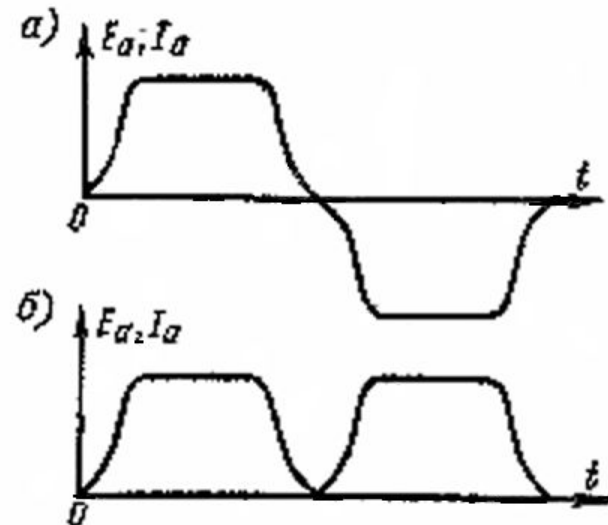
Простейший генератор постоянного тока



- 1,2 – щетки
- 1',2' – коллектор
- 3 – полюса индуктора
- 4 – якорь

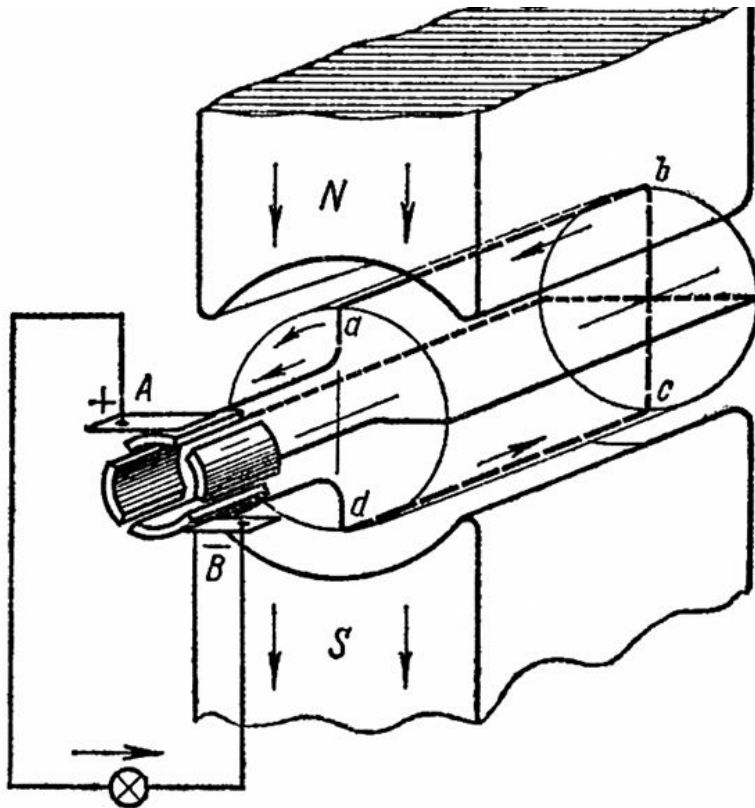
$$e_a = \frac{d\Phi}{dt} \text{ витков} -$$

$$f = pn \text{ частота наводимой ЭДС}$$

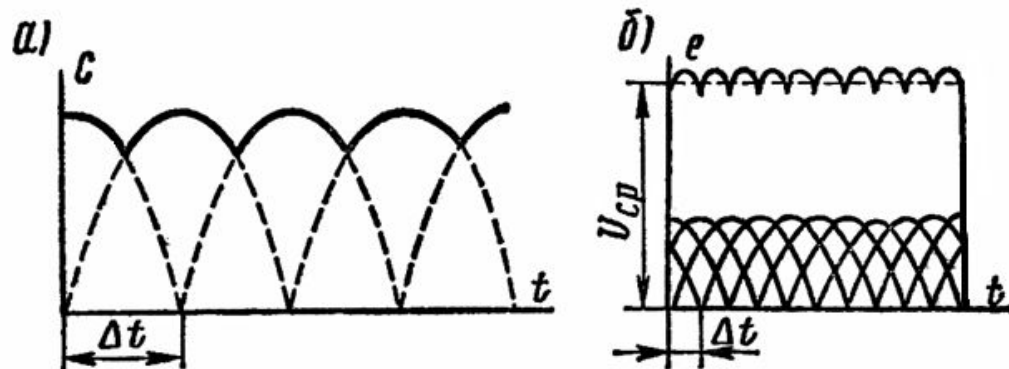


Кривые э.д.с. и тока простейшей машины в якоре (а) и во внешней цепи (б)

Уменьшение пульсаций напряжения и момента МПТ



Модель машины постоянного тока
с двумя витками на якоре



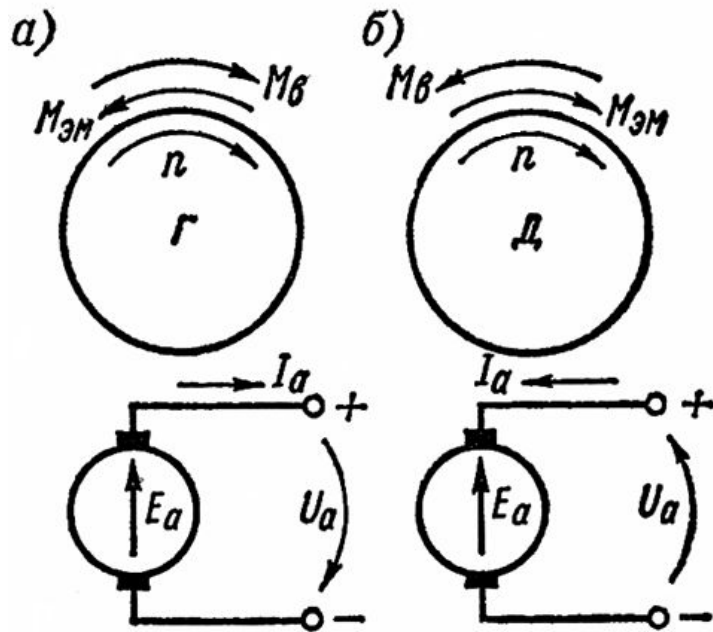
Пульсация напряжения на щетках
генератора постоянного тока:

а – при двух витках на полюс;

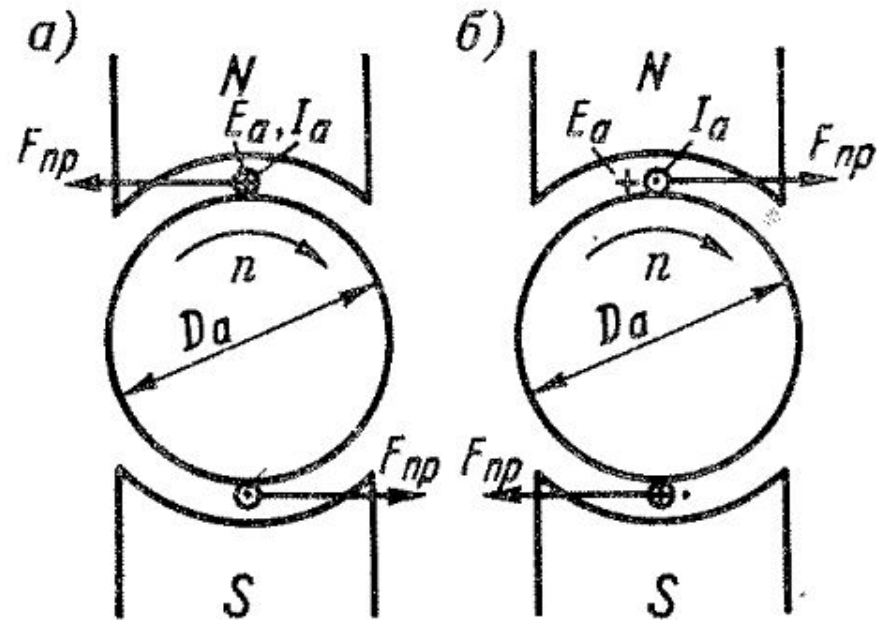
б – при большом количестве витков

Для сглаживания пульсаций тока и момента в МПТ необходимо разместить на якоре несколько витков, равномерно распределенных по окружности, и увеличить количество коллекторных пластин.

Генераторный и двигательный режим работы МПТ



Направления э.д.с. тока и моментов в генераторе (а) и двигателе (б) постоянного тока



Работа простейшей машины постоянного тока в режиме генератора (а) и двигателя (б)

~~$$P_{\text{ген}} = E_a I_a$$~~

~~$$P_{\text{двиг}} = E_a I_a$$~~

$$F_{np} = B \cdot l \cdot i - \text{сила действующая на проводник}$$

$$M_{эм} = 2F_{np} \frac{D_a}{2} = B \cdot l \cdot D_a \cdot i$$

Электромагнитный момент

Преобразование энергии в МПТ

Электромагнитный момент

$$M_{эм} = B \cdot l \cdot D_a \cdot i$$

Генератор

$$M_{эм} = M_в - M_{тр} - M_c$$

$M_в$ – момент на валу

$M_{тр}$ – момент трения

M_c – тормозной момент обусловленный потерями в сердечнике якоря.

Потери энергии в якоре возникают в результате его вращения в неподвижном магнитном поле. Возникающие при этом электромагнитные силы оказывают на якорь тормозящее действие и проявляют себя подобно силам трения.

Двигатель

$$M_{эм} = M_в + M_{тр} + M_c$$

Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = M_{эм} \cdot \omega = E_a \cdot I_a$$

$\omega = \frac{n}{60}$ – угловая частота вращения якоря

$n = \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$ – частота вращения якоря

Частота э.д.с. (тока) в якоре

$$f = p \cdot \frac{n}{60}$$

p – число пар полюсов

Энергетические соотношения

■ Генератор

$$U_a I_a = E_a I_a - I_a^2 R_a$$

$U_a I_a$ отдаваемая электрическая

мощность $P_{2эл}$

$$P_{2эл} = P_{эм} - I_a^2 R_a$$

Подводимая механическая

мощность

$$P_в = P_{2эл} + P_{мех} + P_c + P_д + I_a^2 R_a$$

■ Двигатель

$$U_a I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

$U_a I_a$ подводимая электрическая

мощность $P_{1эл}$

$$P_{1эл} = P_{эм} + I_a^2 R_a$$

Подводимая электрическая

мощность

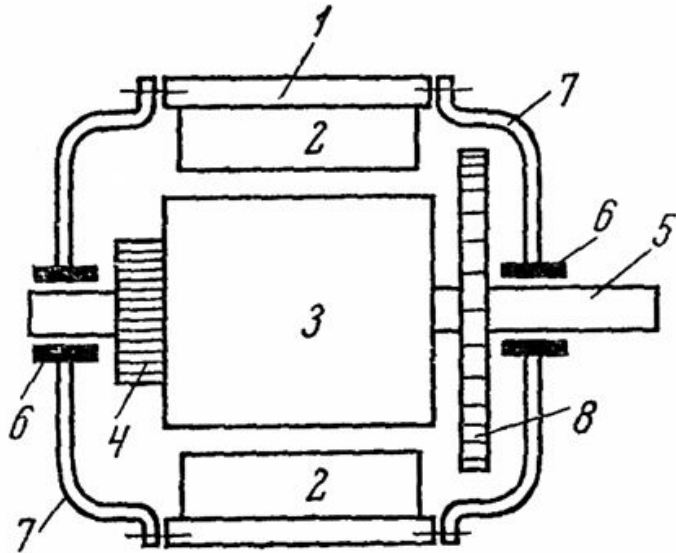
$$P_{1эл} = P_в + P_{мех} + P_c + P_д + I_a^2 R_a$$

Основные конструктивные элементы

Электромеханическое преобразование энергии в электрической машине происходит в результате взаимодействия магнитного, электрического и механического процессов.

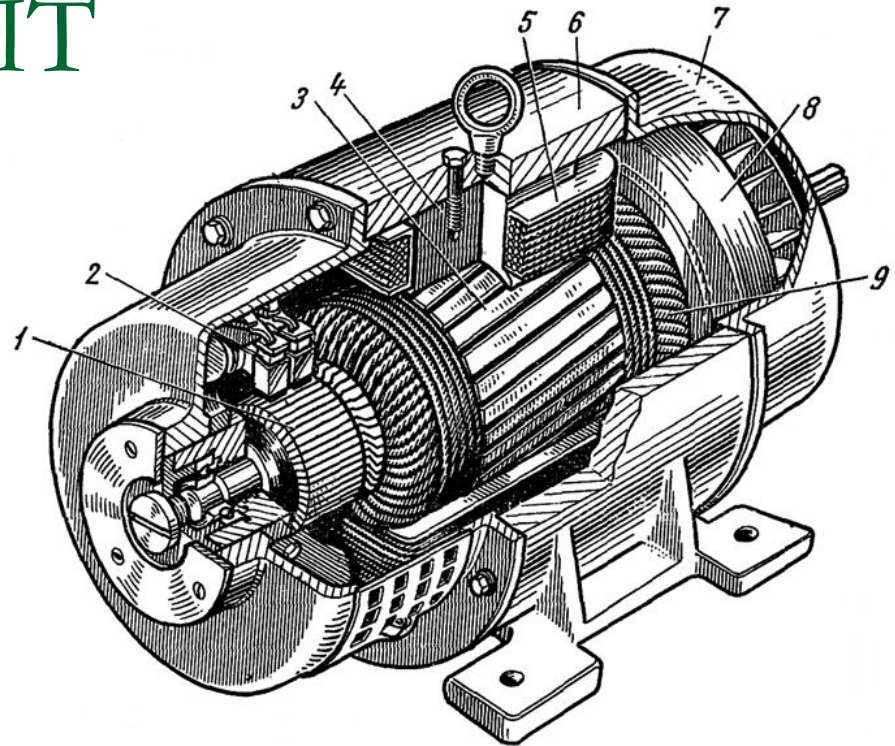
- Магнитные процессы в электрической машине формируются с помощью магнитопровода, который обеспечивает необходимую конфигурацию магнитного поля.
- Электрические процессы электрических машин формируются с помощью токопроводов, называемых обмотками.
- Механические процессы организуются посредством вращающегося ротора (якоря МПТ).

Конструкция МПТ



Основная конструктивная схема
машины постоянного тока

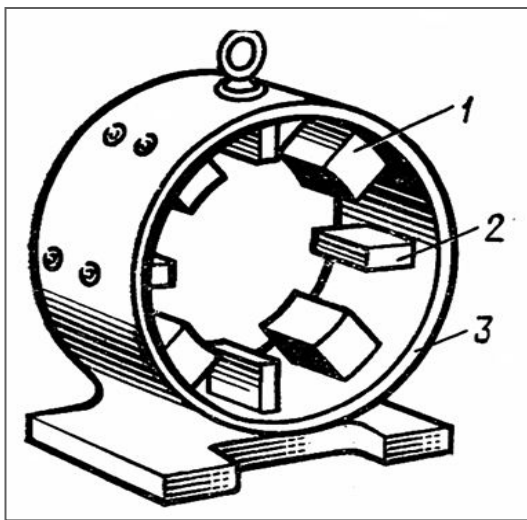
1 – станина; 2 – главные полюсы;
3 – сердечник якоря; 4 – коллектор;
5 – вал; 6 – подшипник;
7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор



Устройство электрической машины
постоянного тока

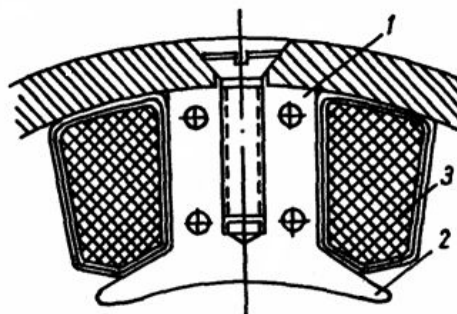
1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря;
4 – сердечник главного полюса; 5 – полюсная
катушка; 6 – станина; 7 – подшипниковый щит;
8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

Элементы конструкции статора МПТ



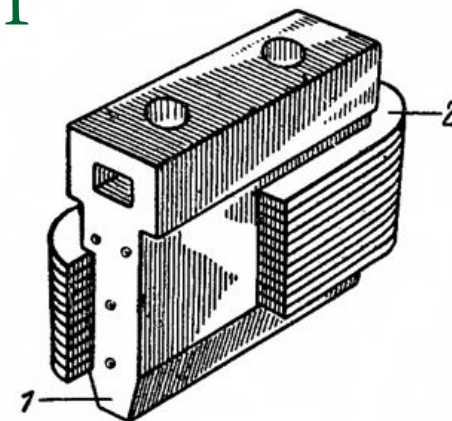
Неподвижная часть
машины постоянного тока:

1. Главный полюс
2. Добавочный полюс
3. Станина



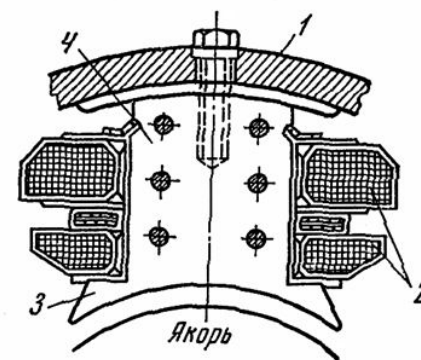
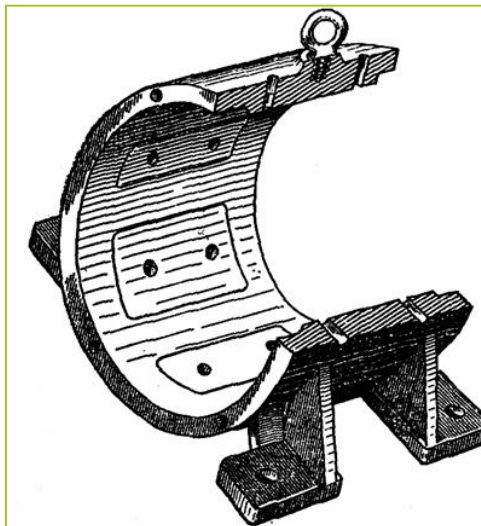
Главный полюс

- 1 – сердечник полюса;
- 2 – полюсный наконечник;
- 3 – полюсная катушка.

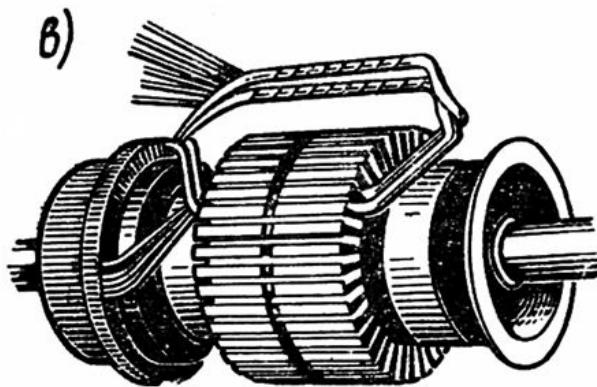
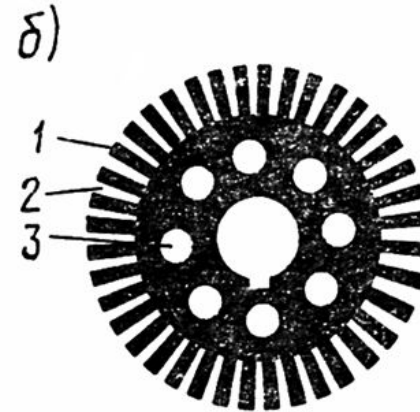
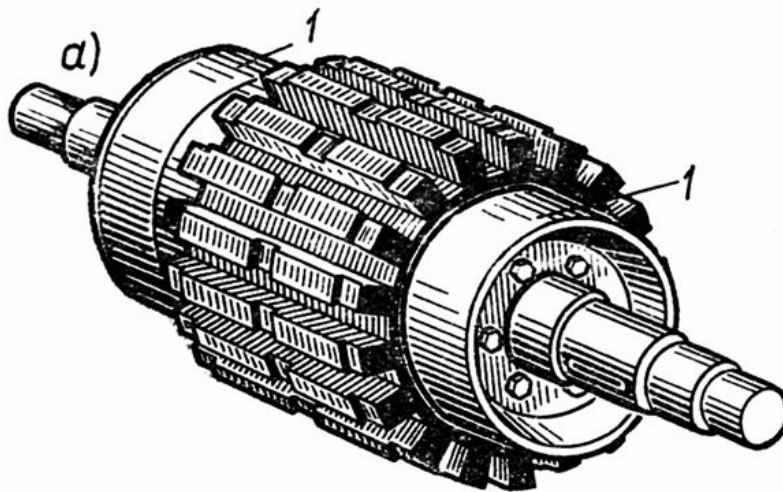


Добавочный полюс

- 1 – сердечник;
- 2 – полюсная катушка



Сердечник якоря МПТ

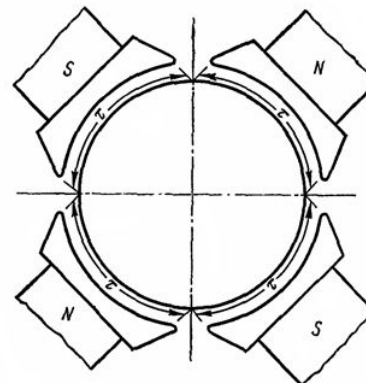
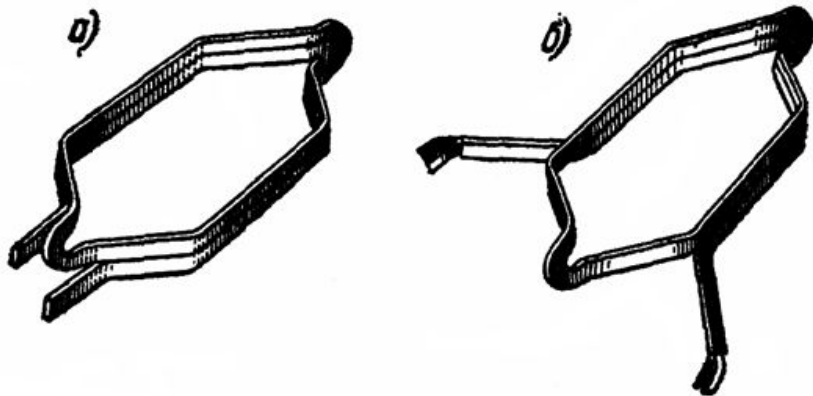


Сердечник якоря:

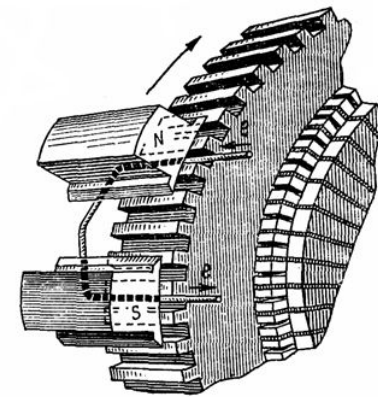
- а - якорь без обмотки;
- б - стальной лист сердечника якоря;
- в - необмотанный якорь машины постоянного тока.

Обмотки якоря МПТ

Основным элементом обмотки является секция – наименьшая часть обмотки содержащая один или несколько витков и присоединенная своими концами к коллекторным пластинам.



Полусное деление

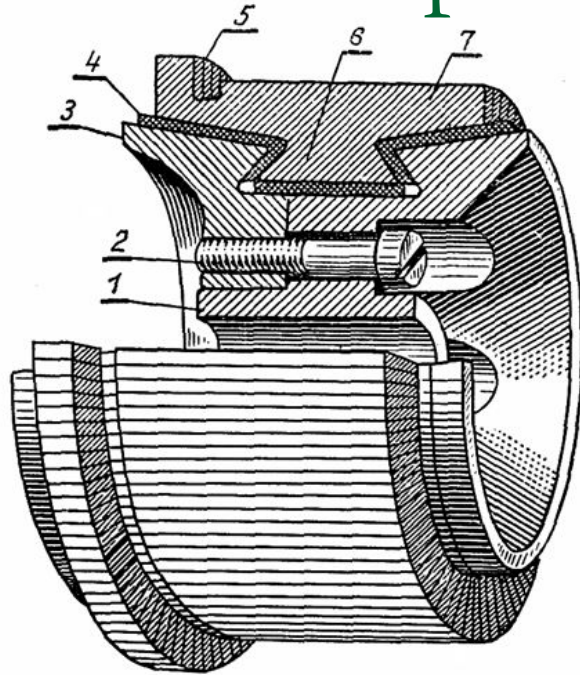


Расположение активных сторон секций на сердечнике якоря

Требования к якорной обмотке:

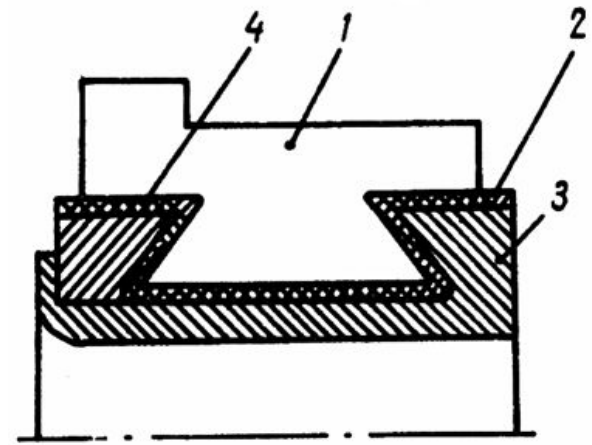
1. Выдерживать напряжение и ток нагрузки, соответствующие номинальной мощности
2. Электрическая, механическая и термическая прочность, обеспечивающую необходимый срок службы машины (до 15-20 лет)
3. Обеспечение токосъема с коллектора без вредного искрения
4. Минимальный расход материалов
5. Простая технология изготовления

Коллектор МПТ



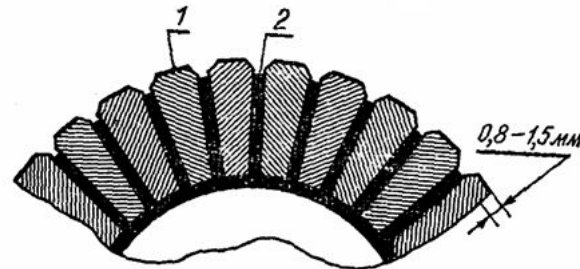
Устройство коллектора:

- 1 – корпус коллектора; 2 – стяжной болт
- 3 – нажимное кольцо; 4 – изоляция (мик
- 5 – «петушок»; 6 – «ласточкин хвост»;
- 7 – пластины.

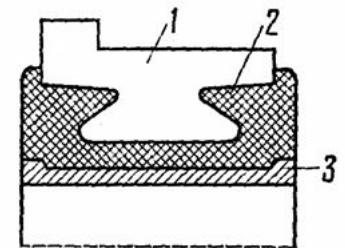


Коллектор:

- 1 – коллекторная пластина;
- 2 – изоляционная прокладка;
- 3 – конусная втулка;
- 4 – нажимная шайба.

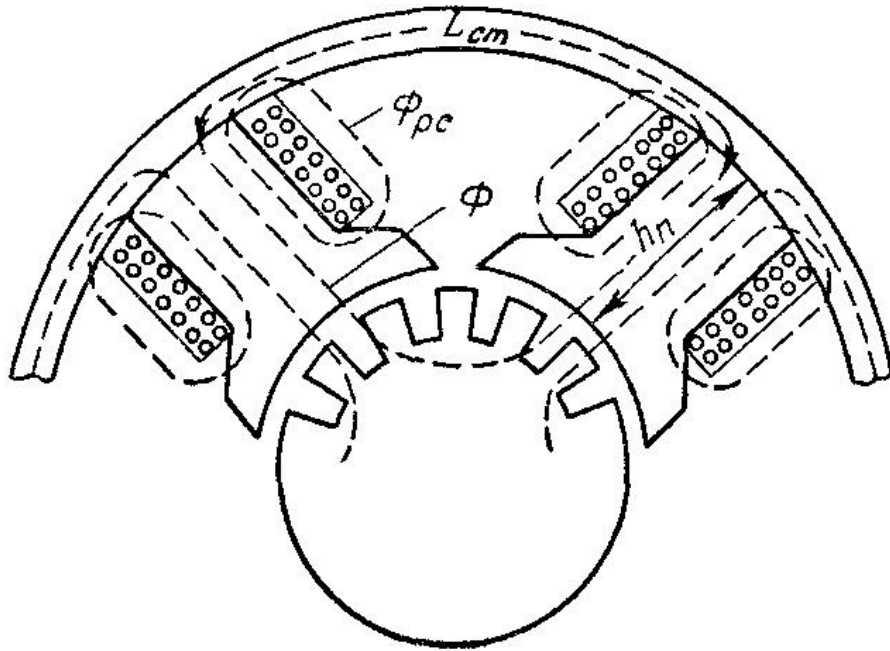


Расположение коллекторных пластин (1)
и изоляционных прокладок (2) в коллекторе



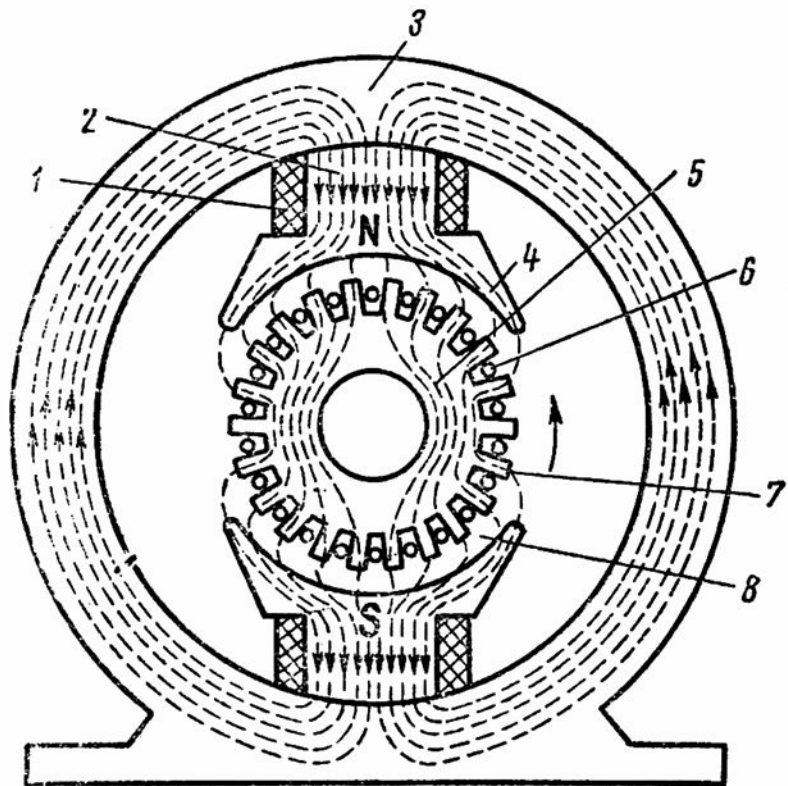
Коллектор на пластмассе:
1 – коллекторная пластина;
2 – пластмасса;
3 – стальная втулка.

Система возбуждения МПТ



- Магнитное поле возбуждения создается обмотками расположенными на полюсах МПТ.
- Магнитное поле формируется с помощью магнитопровода.
- Основной магнитный поток Φ - создается полюсами и проходит через якорь.
- Поток рассеяния Φ_{pc} — создается полюсами и замыкается минуя якорь.

Магнитная цепь МПТ в режиме холостого хода



Магнитная цепь машины постоянного тока

- 1 – обмотка возбуждения; 2 – полюсы; 3 – ярмо;
 4 – полюсный наконечник; 5 – якорь; 6 – проводники
 якорной обмотки; 7 – зубец якорного сердечника;
 8 – воздушный зазор машины.

Магнитный поток полюса

$$\Phi_{II} = \Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma} = k_{\sigma} \Phi_{\delta}$$

Φ_{δ} – основной магнитный поток

Φ_{σ} – магнитный поток рассеяния

k_{σ} – коэффициент рассеяния

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I; \quad B = \int \vec{H}; \quad \mu = \mu_0$$

$$\sum H_i \cdot l_i = \sum I; \quad = \cdot$$

$F_i = H_i \cdot l_i$ – намагнитчивающая сила

Общая намагнитчивающая сила

$$F_0 = F_{\delta} + F_{\text{ЭД}} + F_{\text{а2}} + F_{\text{а1}} + F_1$$

$$F_{\delta} \approx (0.6 \div 0.8) F_0$$

Многополюсные МПТ

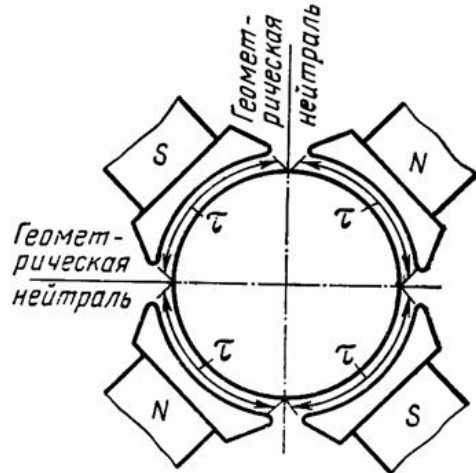
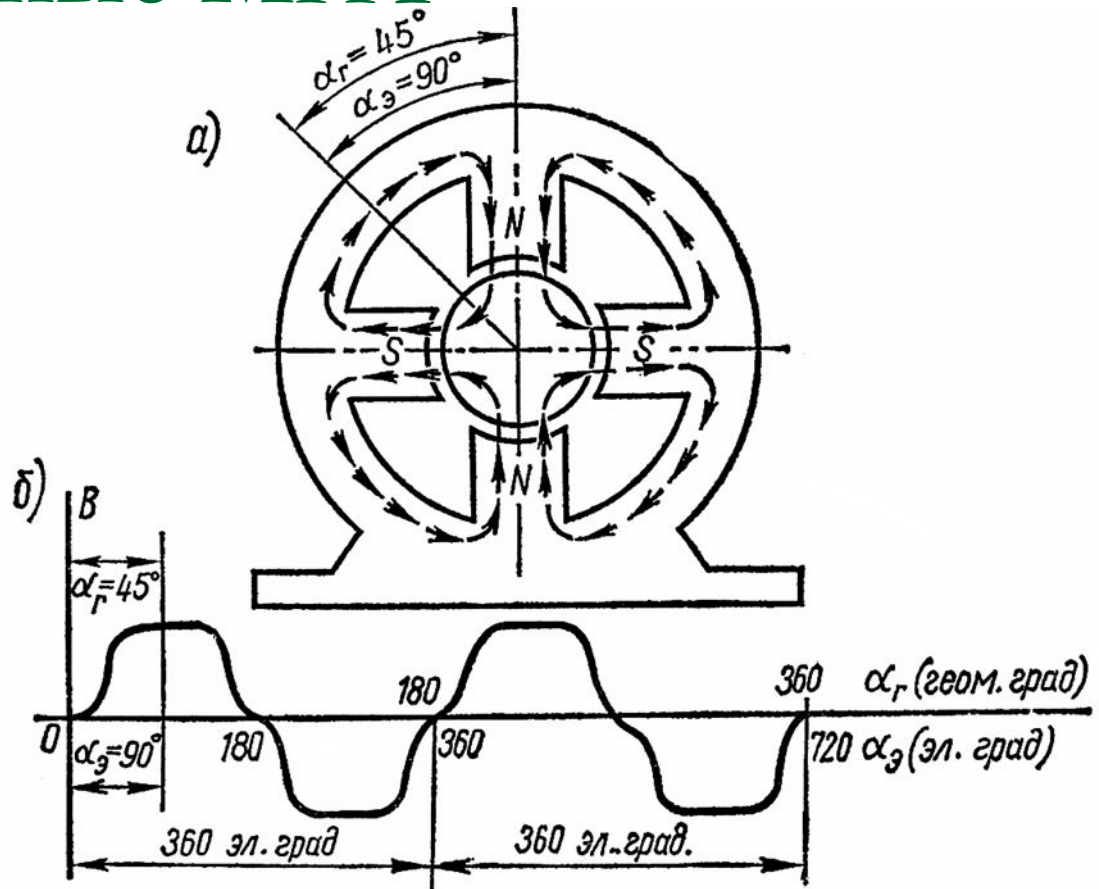


Схема четырехполюсной МПТ

Воображаемую линию, проходящую посередине между полюсами называют **геометрической нейтралью**.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p} - \text{полюсное деление -}$$

длина дуги между двумя геометрическими нейтральными



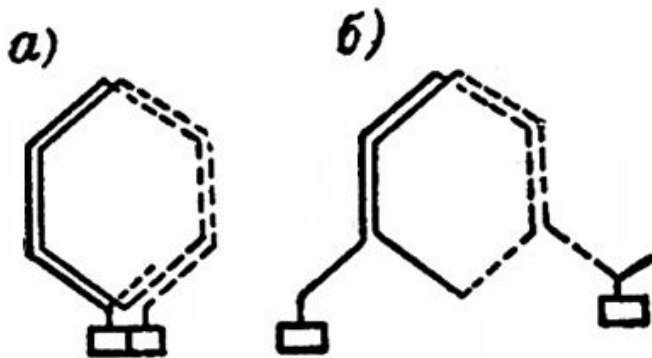
Распределение потока в четырехполюсной машине:

а – чередование полюсов; б – распределение индукции в воздушном зазоре.

Обмотка якоря МПТ

- Обмотка якоря МПТ представляет собой замкнутую систему проводников, уложенных в пазах якоря и соединенных с коллектором.
- Основным элементом обмотки является секция – наименьшая часть обмотки, присоединенная к двум коллекторным пластинам.
- Форма секций и порядок их подключения к коллекторным пластинам определяется типом обмотки.

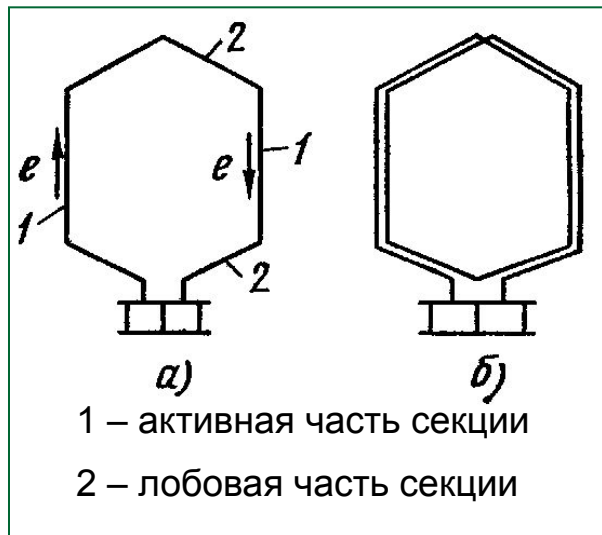
Наиболее распространены петлевая и волновая обмотки



- Двухвитковые секции:
 - а) Простая петлевая обмотка – концы секций подключаются к соседним коллекторным пластинам
 - б) Простая волновая обмотка – концы секций подключаются к коллекторным пластинам расположенным на расстоянии двойного полюсного деления.

Простая петлевая обмотка

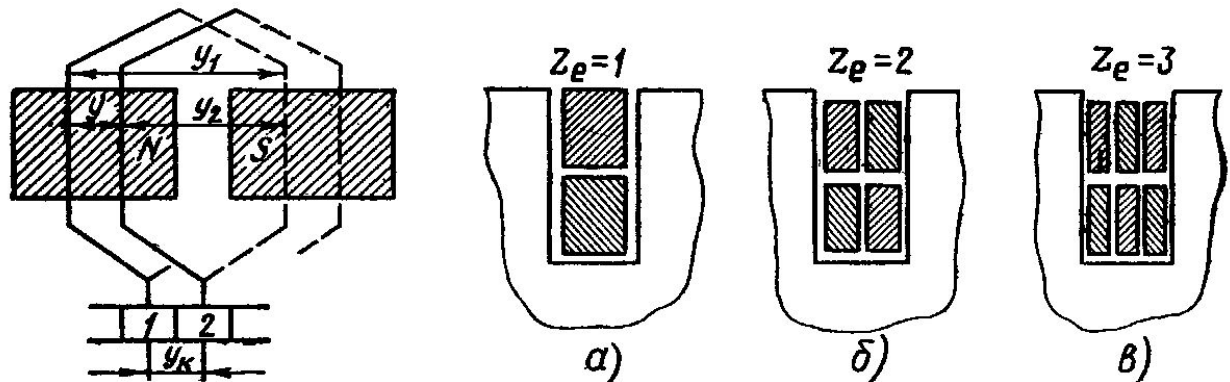
Простыми петлевыми называют обмотки, у которых последовательно соединяются рядом расположенные секции.



Активные части секций располагают под полюсами разной полярности на расстоянии приблизительно равном полюсному делению τ , это обеспечивает суммирование э.д.с., наводимых в активных частях.

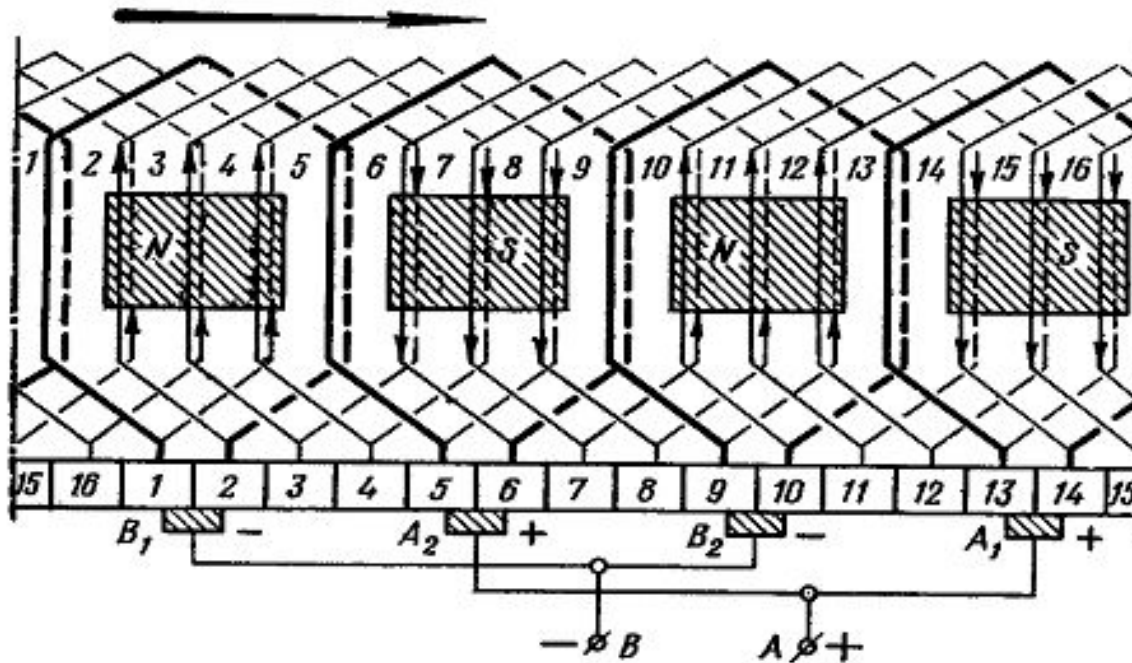
Размещение нескольких элементарных пазов в одном реальном

y_1, y_2, y, y_k – шаги обмотки



Развертка простой петлевой обмотки

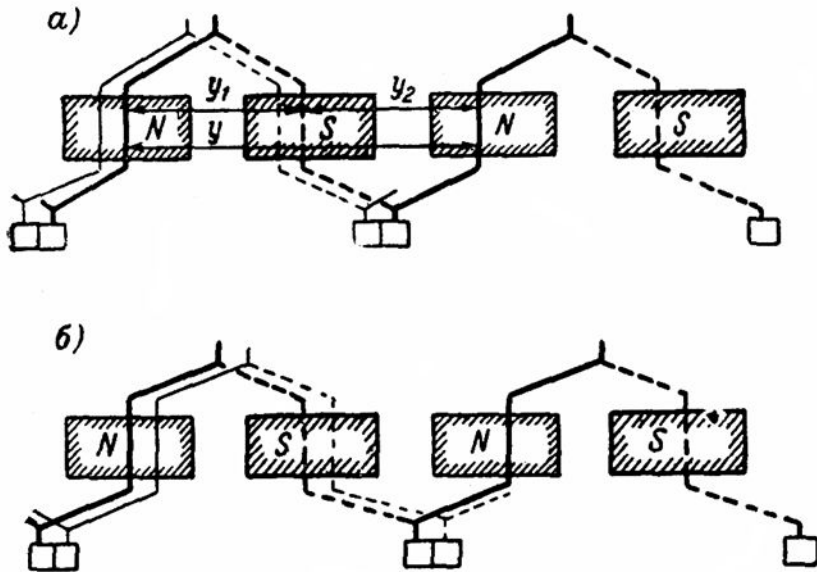
Схема простой петлевой обмотки с $2p=4$, числом пазов $Z=16$. Первый шаг по якорю $y_1=4$



- Число щеток равно числу полюсов.
- Щетки одинаковой полярности соединяются параллельно.
- Секции образуют параллельные ветви, число которых равно числу полюсов: $2a=2p$.

Простая волновая обмотка

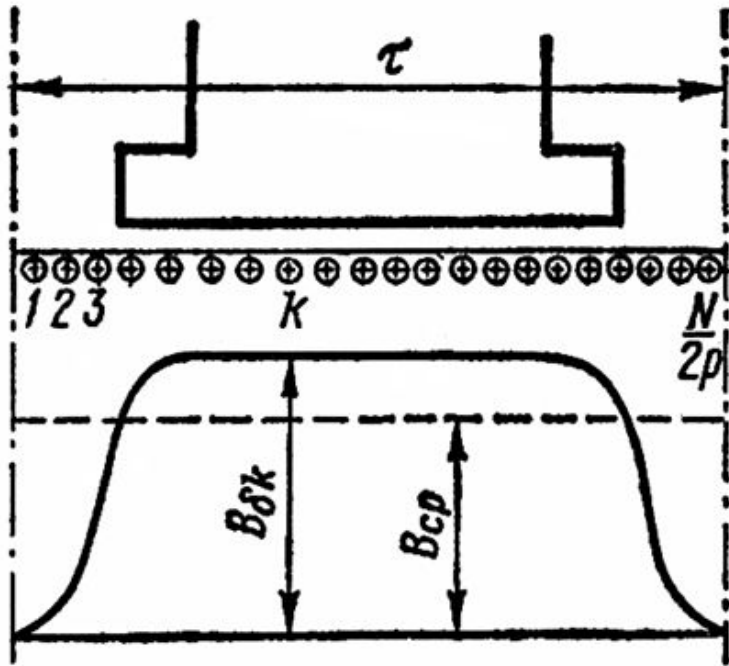
Простой волновой называют обмотку, у которой последовательно соединяются секции, находящиеся в равных магнитных условиях и не расположенные рядом. Форма секций волновой обмотки напоминает волну.



- a) Неперекрестная обмотка
- b) Перекрестная обмотка

Волновую обмотку применяют в электрических машинах для получения большего напряжения, а петлевую для получения больших токов

ЭДС обмотки якоря



Определение э.д.с. якоря
и электромагнитного момента

Э.Д.С. проводника при перемещении в поле

$$E = B \cdot l \cdot v$$

Э.Д.С. якоря

$$E_a = \frac{2p}{2a} \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k} l_{\delta} v = \frac{p l_{\delta} v}{a} \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k}$$

Выдужия под к ым проводником

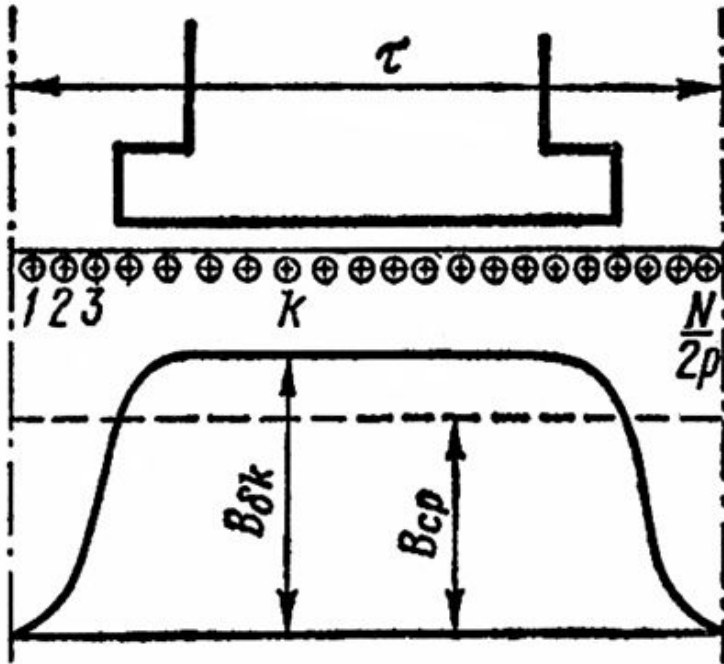
$$B_{cp} = \frac{\Phi}{\tau l_{\delta}} \text{ — большим } \frac{N}{2p}$$

$$\sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k} \tau \frac{N}{2p} = \frac{2p\tau n}{60}$$

$$\Phi_a \approx \frac{pN}{60a} \Phi_{\delta n} = e_{\delta}$$

$$C_e = \frac{pN}{60a} \text{ — конструктивная постоянная машины}$$

Электромагнитный момент



Определение э.д.с. якоря
и электромагнитного момента

$$f_k = B_k l_{\delta} i_a \rightarrow M_k = f_k \frac{D_a}{2} = B_k l_{\delta} i_a \frac{D_a}{2}$$

$$M_a = 2p \sum_1^{N/2p} M_k = 2p l_{\delta} i_a \frac{D_a}{2} \sum_1^{N/2p} B_k$$

$$\sum_1^{N/2p} B_{kp} = B \frac{N}{2p}$$

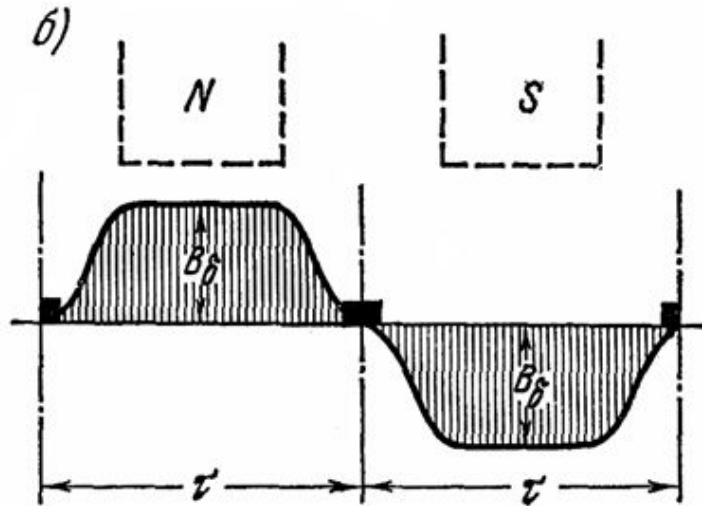
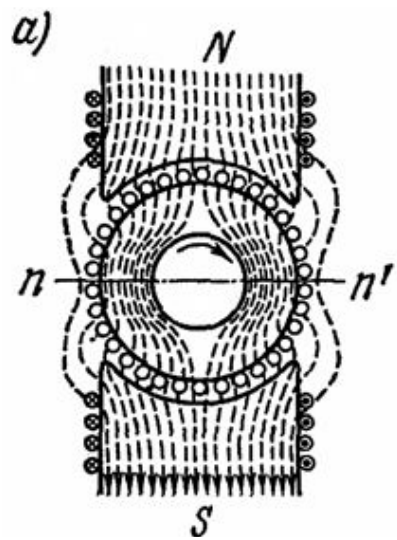
$$B_{cpr} = \frac{\Phi_{\delta}}{\tau l_{\delta}} = \frac{\Phi_{\delta}}{\frac{\pi D_a l_{\delta}}{2p}} = 2p \frac{\Phi_{\delta}}{\pi D_a l_{\delta}} \quad i_a = \frac{I_a}{2a}$$

$$M_a = 2p l_{\delta} i_a \frac{D_a}{2} N \frac{\delta p}{\pi D_a l_{\delta}} = \frac{1}{2\pi a} N I_a \delta$$

$$M_a = \frac{1}{\pi} \left(N \frac{I_a}{2a} \right) (p \delta)$$

$$M_M = C_a \Phi_{\delta} I \quad M \ C = \frac{p N}{2\pi a}$$

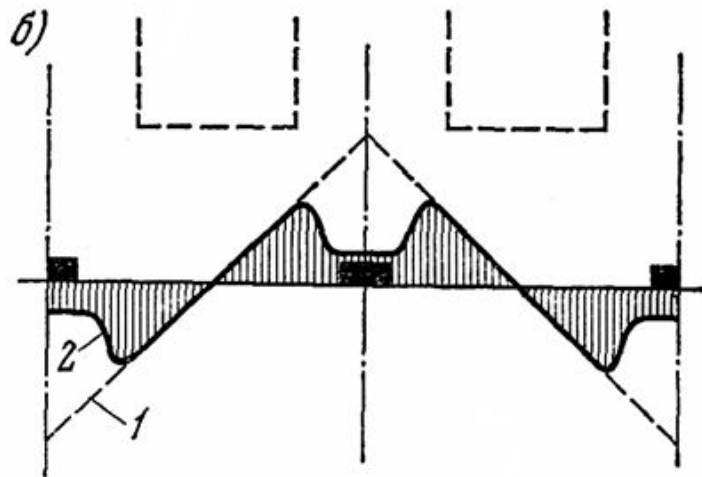
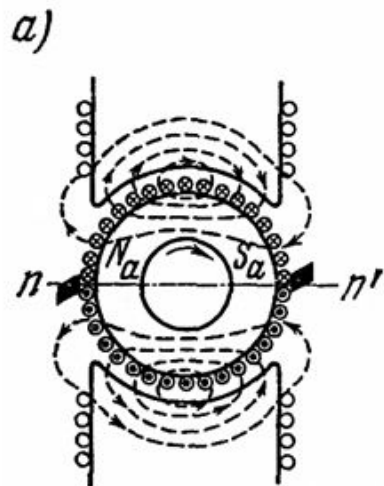
Реакция якоря – воздействие магнитного поля якоря на основное магнитное поле полюсов



Магнитное поле в режиме холостого хода:

а – магнитное поле машины;

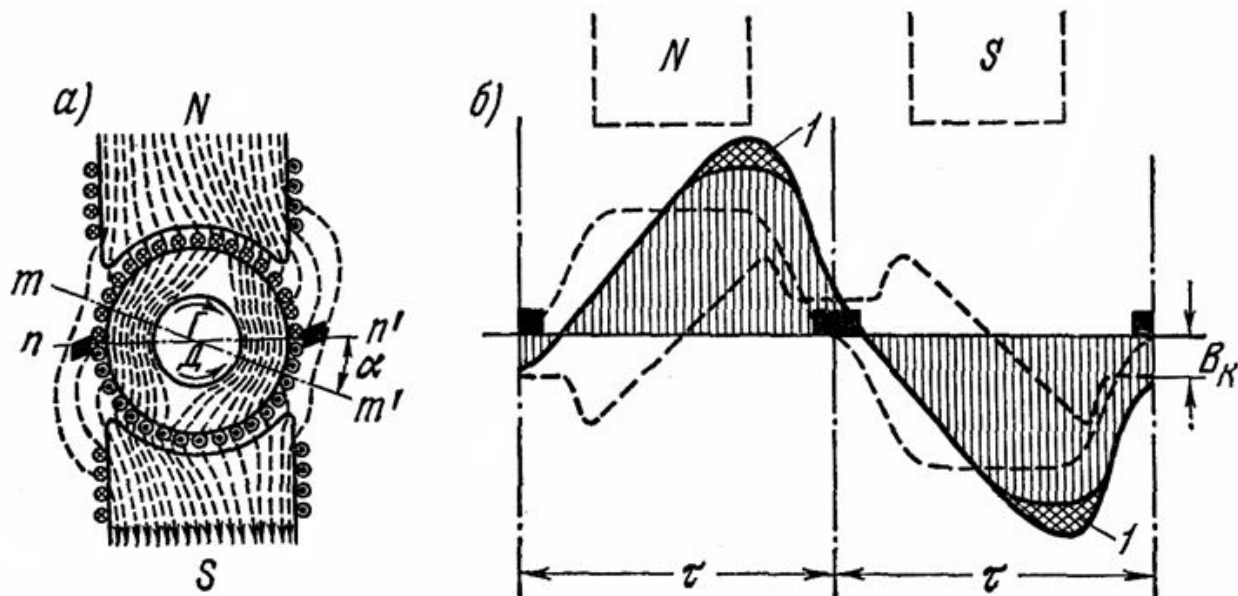
б – распределение индукции в зазоре.



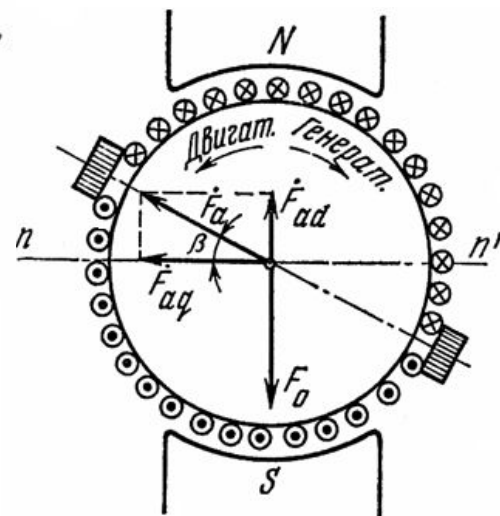
Магнитное поле реакции якоря (а) и распределение индукции в зазоре (б)

1-Ф, 2-В

Реакция якоря – воздействие магнитного поля якоря на основное магнитное поле полюсов



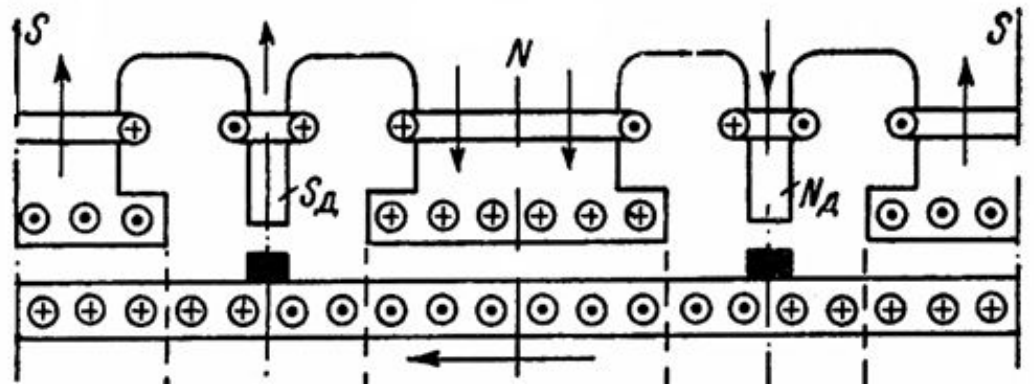
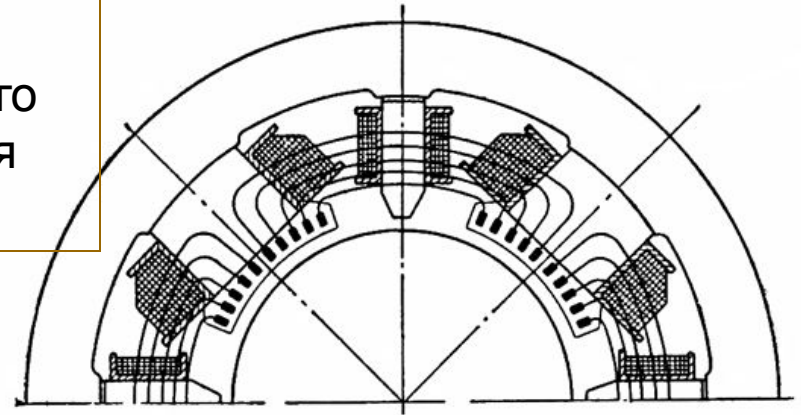
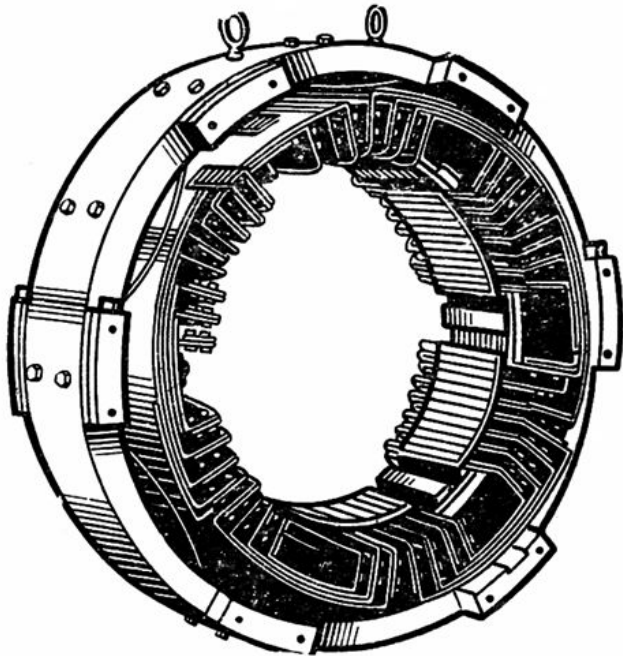
Результирующее магнитное поле (а)
и распределение индукции в зазоре (б)



Разложение н.с. обмотки
якоря на составляющие

Компенсационные обмотки

Применение компенсационной обмотки позволяет устранить искажение магнитного поля в зазоре за счет негативного влияния реакции якоря.



Станина машины постоянного тока с компенсационной обмоткой

Компенсационную обмотку соединяют последовательно с якорем. При таком соединении через них проходит один и тот же ток, обеспечивая автоматическую компенсацию при любой нагрузке

Коммутация

Коммутацией называется процесс переключения секций обмотки из одной параллельной ветви в другую путем замыкания этих секций щетками при переходе с одной коллекторной пластины на другую. При этом ток меняет знак на противоположный.

Секция замкнутая щеткой – коммутируемая секция.

Время в течении которого проходит замыкание - период коммутации (T_k).

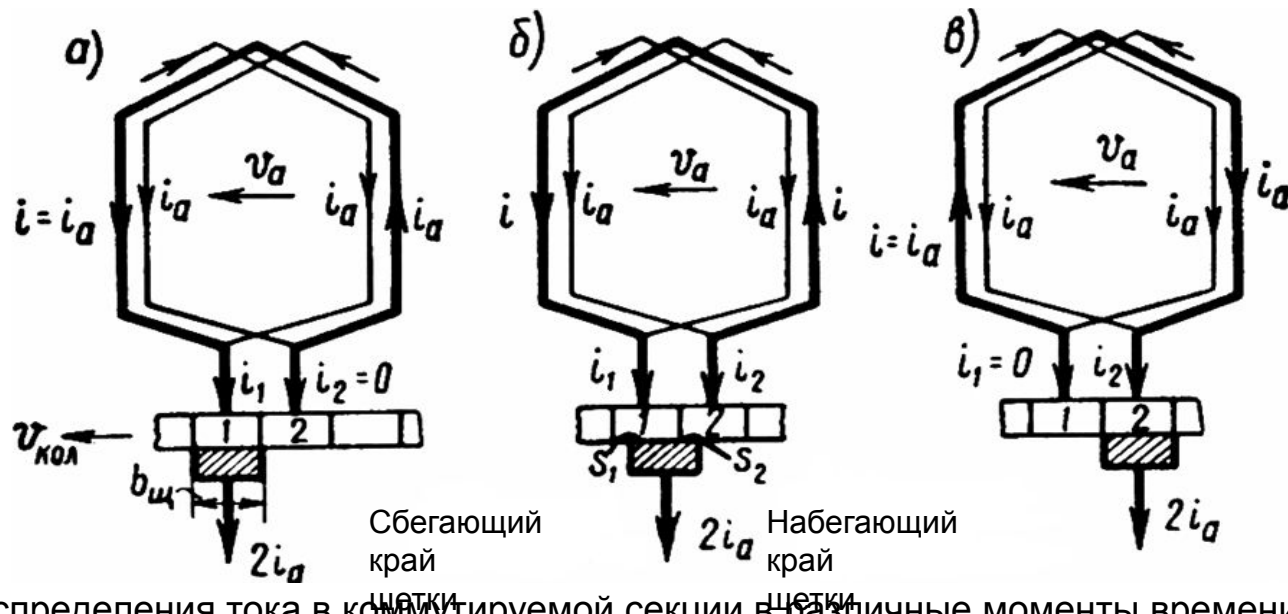


Схема распределения тока в коммутируемой секции в различные моменты времени при $\gamma=1$

Коммутация

$$T_k = \frac{\left[\beta_{щ} - \left(\frac{a}{p} - 1 \right) \right] 60}{K_n}$$

$$\beta_{щ} = \frac{b_{щ}}{b_k} \text{ коэффициент щеточного перекрытия}$$

$b_{щ}$ ширина щетки, b_k ширина коллекторной пластины

K число коллекторных пластин

Причины искрения во время коммутации:

- механические (качество изготовления коллектора и щеточного узла),
- электромагнитные (добавочный ток, вызванный результирующей ЭДС),
- потенциальные (повышенное напряжение между коллекторными пластинами).

$$i_1 = i_a + i;$$

$$i_2 = i_a - i$$

$$i_1 r_1 - i_2 r_2 = \sum e; \quad i = i_a \left(\frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} \right) + \frac{\sum e}{r_1 + r_2}$$

r_1 и r_2 переходные сопротивления щеточных контактов

Коммутация

$$e_L = -L_S \frac{di}{dt} \text{ ЭДС самоиндукции}$$

L_S индуктивность секции

$$e_M = -M_S \frac{di}{dt} \text{ ЭДС взаимной индукции}$$

$e_p = e_L + e_M$ реактивная ЭДС

$e_K = B_K$ коммутационная ЭДС

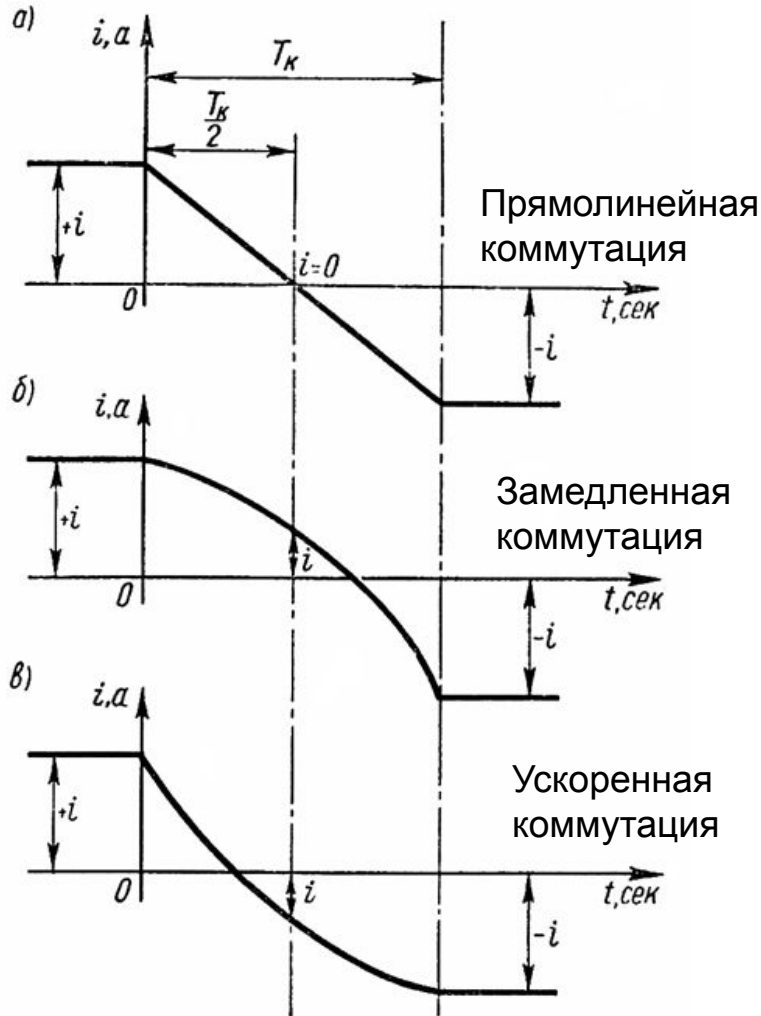
$$\sum e = e_p + e_K$$

$$S_2 = b_{щ} l_{щ} \frac{t}{T_K} \quad S_1 = b_{щ} l_{щ} \frac{T_K - t}{T_K}$$

В общем случае

$$i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T_K} \right) + \frac{\sum e}{r_1 + r_2} = i + i$$

Ток в коммутируемой секции



Графики изменения тока в коммутирующей секции

дондеп вэ вкот рнненэмен рэткэвэХ
 N рннэвнэ то тнэвээ нндтүммож
 э \sum вкнэ
 рнндтүммож рвнйэннпомррП •
 нрп) $\epsilon_k = \epsilon_q = 0, \epsilon \sum$
 .(хэсопюп хннпэтннпопод
 йэя оп рэвожнндо вкот тсонтопП
 .нктэш эннрнш
 рвннэдэмэЭ •
 ээд) $0 < \epsilon_k \pm \epsilon_q = \epsilon \sum$ рнндтүммож
 со нпн восоюп хннпэтннпопод
 доп вкот тсонтопП .) .п.д нмьдвэс
 .эшподо нктэш мэвэж мншнэтэдс
 рнндтүммож рвннэорэвэУ •
 эыннпнэ) $0 > \epsilon_k \pm \epsilon_q = \epsilon \sum$
 тсонтопП .) (попюс) эыннэорэвэ
 нктэш мэвэж мншнэтэдвн доп вкот
 .эшподо

Способы улучшения коммутации

$$i = \frac{\sum e}{r_{\text{щ}}} \downarrow$$

Увеличение сопротивления цепи коммутационной секции $r_{\text{щ}}$

Уменьшают число витков в секции $\left(\frac{\Phi_p}{L_{\text{с}}} = w_{\text{с}} \right)^2$

Уменьшают частоту вращения $n \left(\frac{di}{dt} \equiv n \right)$

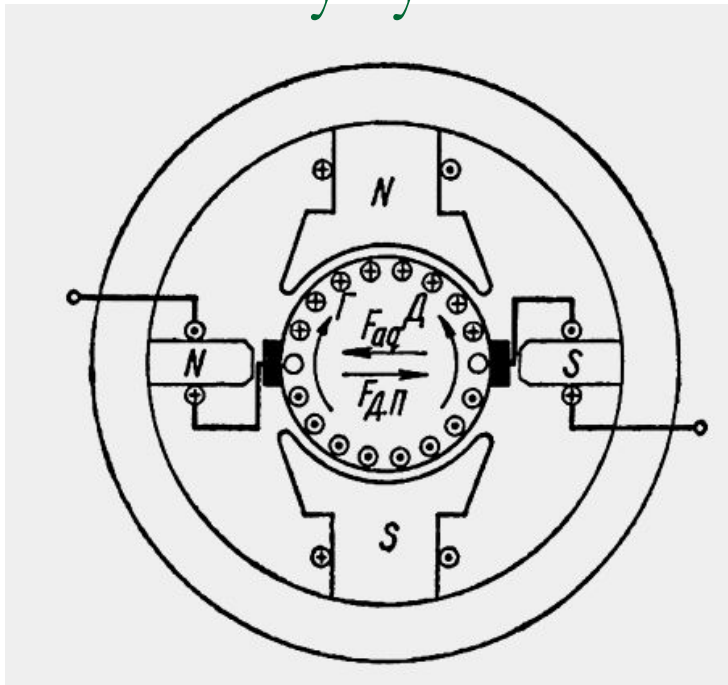
Применение более широких щеток $T_{\text{к}} \uparrow \left(\frac{di}{dt} \downarrow \right)$

Сдвиг щёток с линии геом. нейтрали

Применение добавочных полюсов

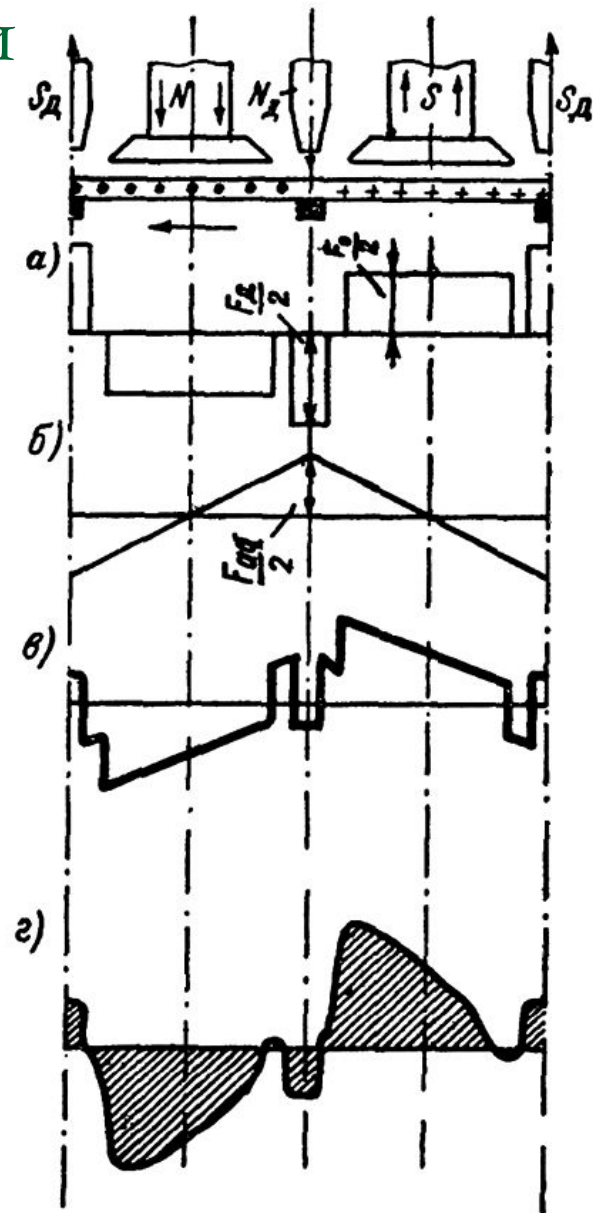
Применение компенсационной обмотки (уменьшение поля реакции якоря)

Способы улучшения коммутации



Расположение и полярность добавочных полюсов

Н.с. и кривая результирующего поля машины с добавочными полюсами без компенсационной обмотки



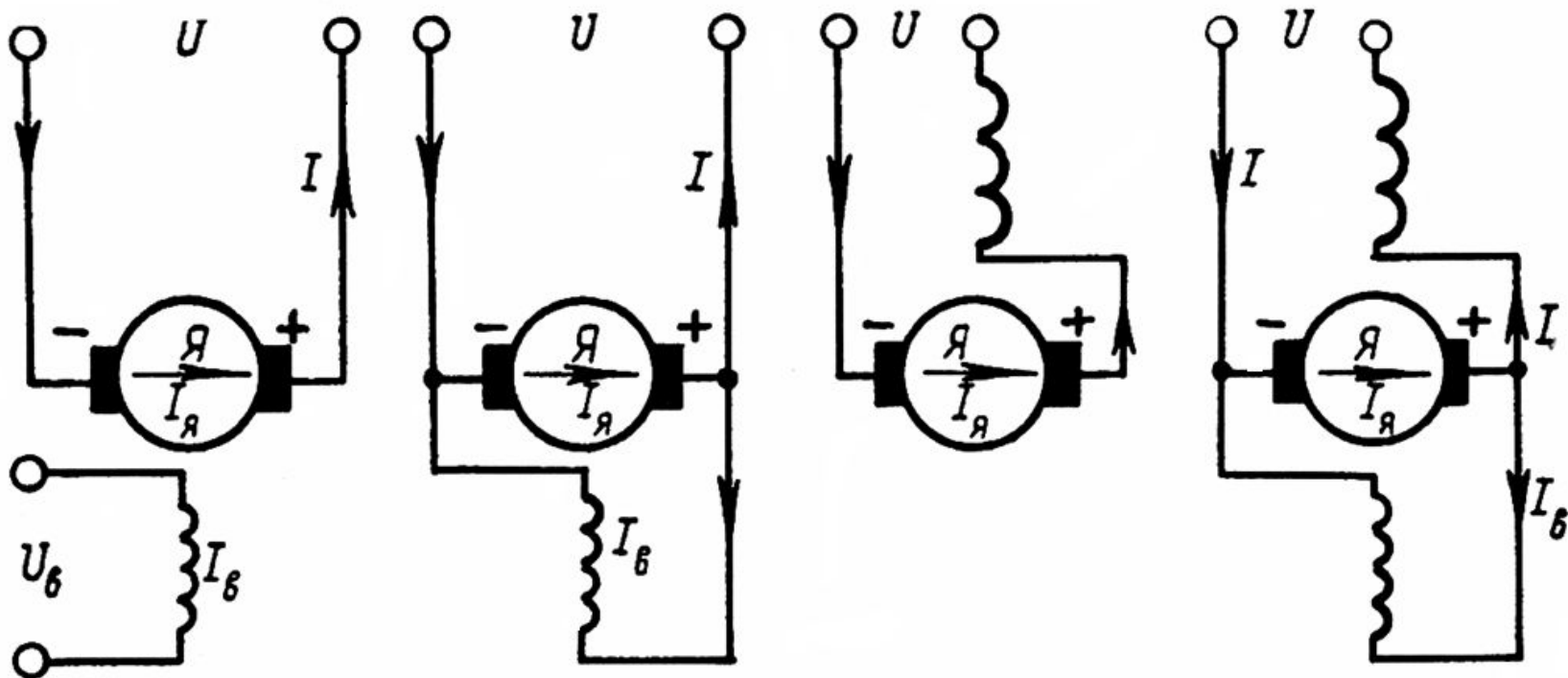
Варианты электромагнитного возбуждения МПТ

Независимое

Параллельное
(шунтовое)

Последовательное
(сериесное)

Смешанное
(компаундное)

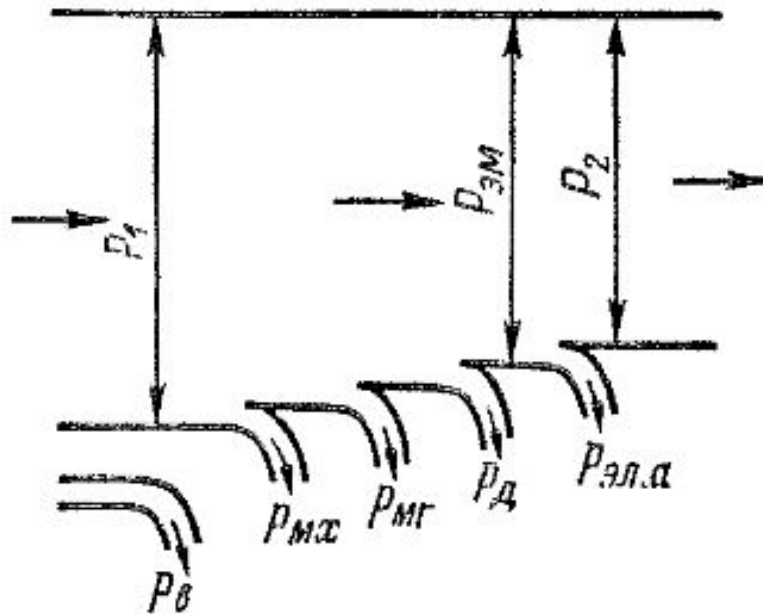


Схемы включения обмоток возбуждения генераторов постоянного тока

Характеристики электрических машин постоянного тока

-
- Характеристики генераторов
 - Характеристики двигателей

- Энергетическая диаграмма генератора независимого возбуждения



1. Характеристика холостого хода ГПТ

$k_{\Phi} \neq f(I_B)$ и $\text{const} \neq 0, =$

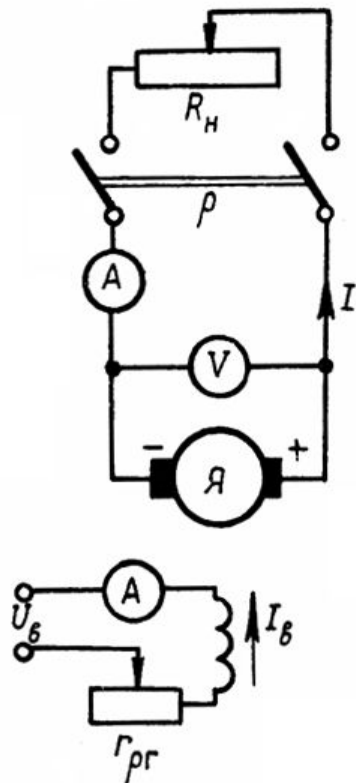
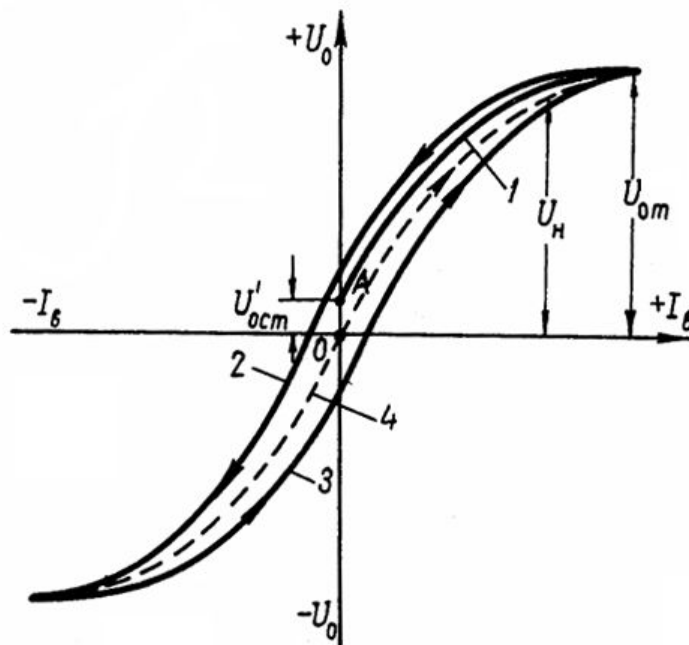


Схема для испытания генераторов независимого возбуждения

$$U_a = E - I_a r_a$$

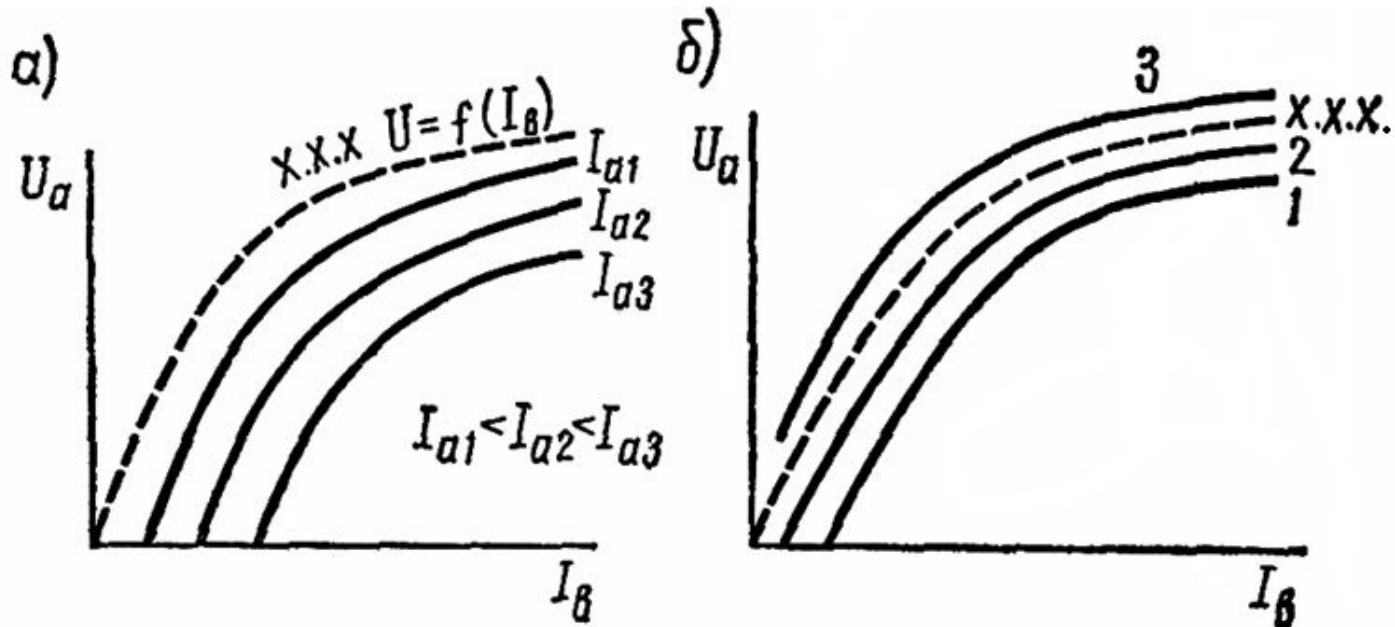


Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

$$E_a = C_e \Phi_{\delta} n \quad \Phi = \frac{F}{R_{\mu}} = \frac{I_B w_B}{R_{\mu}}$$

2. Нагрузочные характеристики ГПТ

$$k_{p\neq} f(I_B) \text{ const } n_a \in \text{const} , =$$



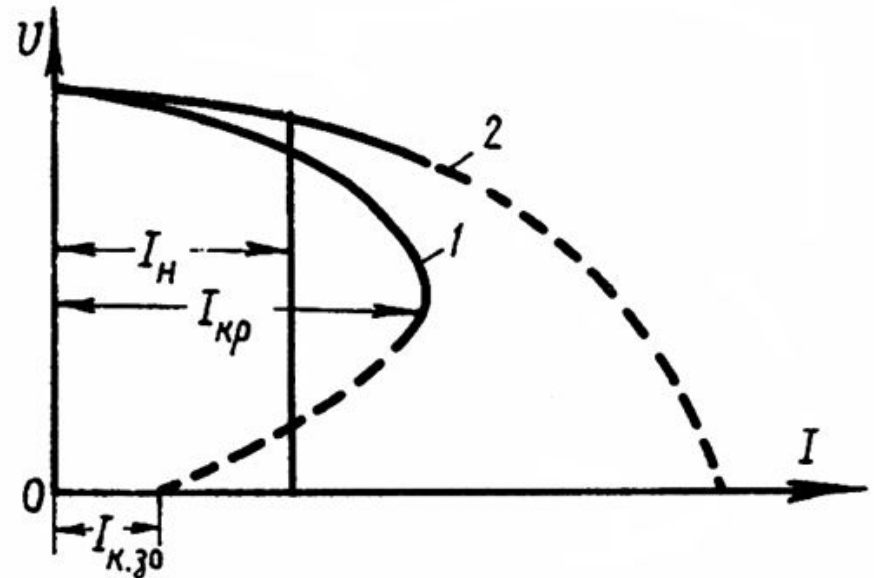
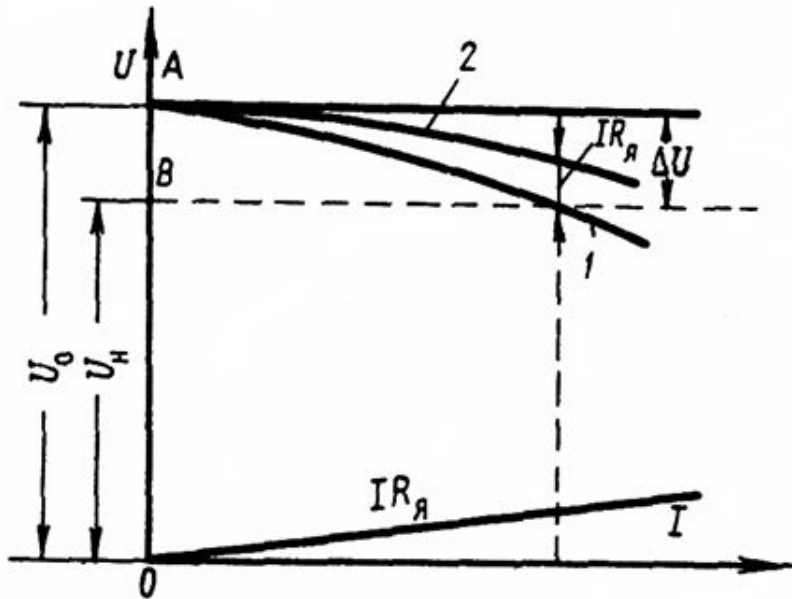
Нагрузочные характеристики генератора постоянного тока:

- а – при независимом и параллельном возбуждении;
- б – при одинаковом токе нагрузки для различных систем смешанного возбуждения.

$$U_a = E - I_a r_a$$

3. Внешние характеристики ГПТ

$$I_{кр} = f(I_B) \text{ const } R_B = \text{const } (n = \text{const}) =$$



Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения
 1 – влияние падения напряжения в цепи якоря
 2 – влияние падения напряжения и размагничивающей реакции якоря

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (1) и генератора последовательного возбуждения (2)

$$U_a = E - I_a r_a$$

3. Внешние характеристики ГПТ

$$U_a = f(I_B) \text{ const } R_B = \text{const } (n = \text{const}) =$$

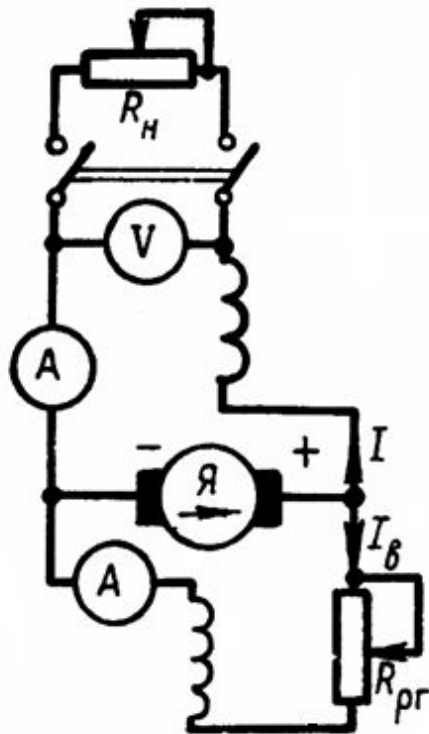
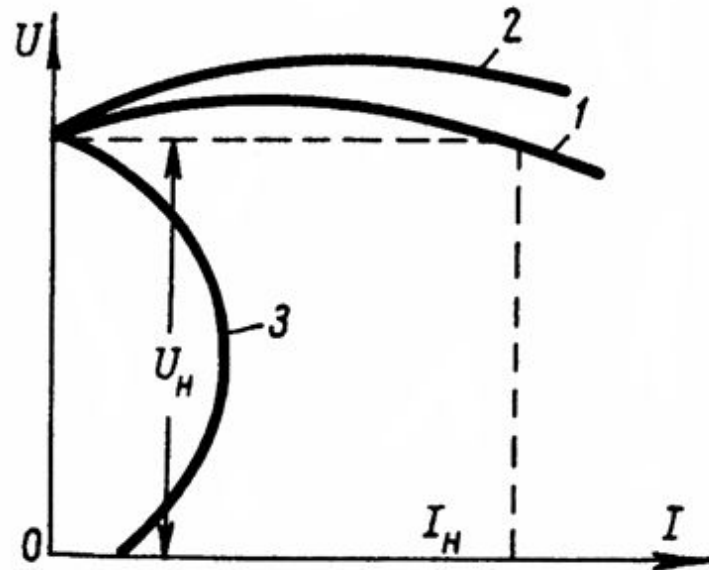


Схема для испытания генератора смешанного возбуждения

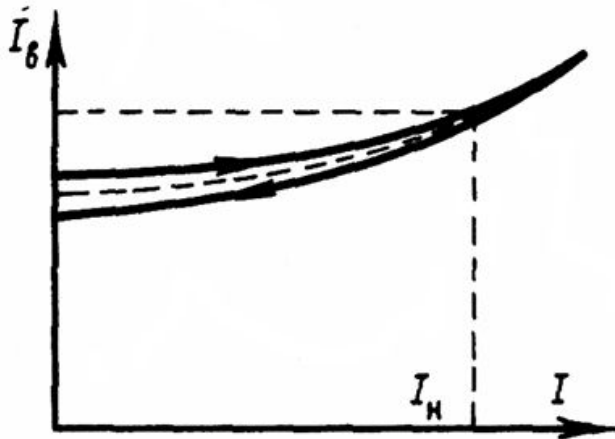


Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения
1,2 – согласное, 3 – встречное

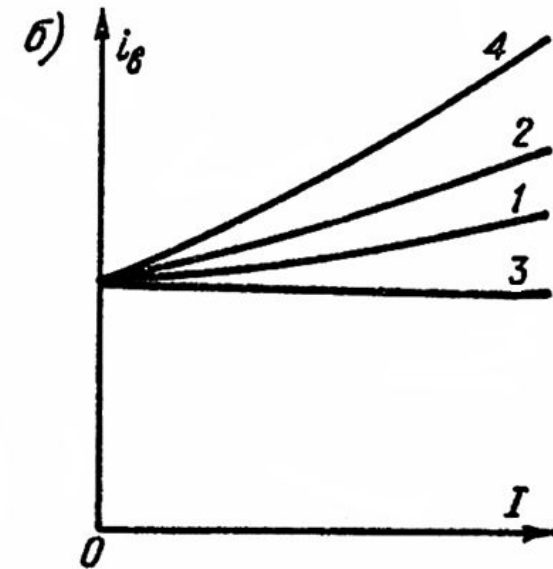
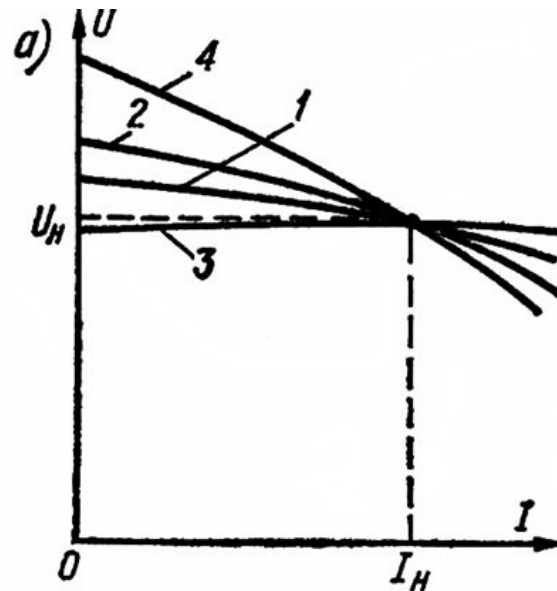
$$U_a = E - I_a r_a$$

4. Регулировочные характеристики ГПТ

$$I_B = f(I_a) \quad \text{при} \quad U = const \quad U_a = E - I_a r_a = const$$



Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения



Сравнение внешних (а) и регулировочных (б) характеристик генераторов независимого (1), параллельного (2), смешанного возбуждения с согласным (3) и встречным (4) включением последовательной обмотки

Характеристики генератора последовательного возбуждения

$i_e = I_a = I$ Генератор имеет только одну характеристику $U = f(I)$

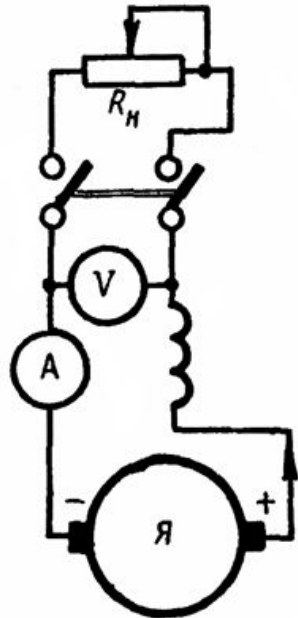
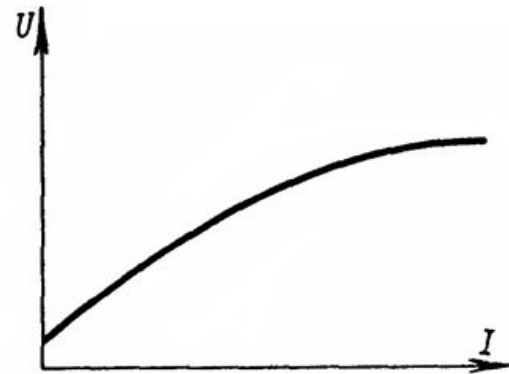


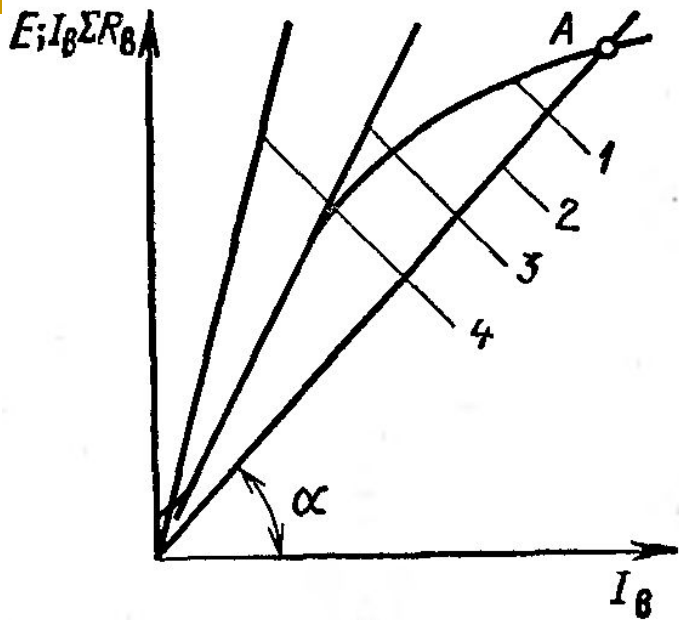
Схема генератора с последовательным возбуждением



Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением

Применяются редко в следствии сильного изменения напряжения с изменением нагрузки.

Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения

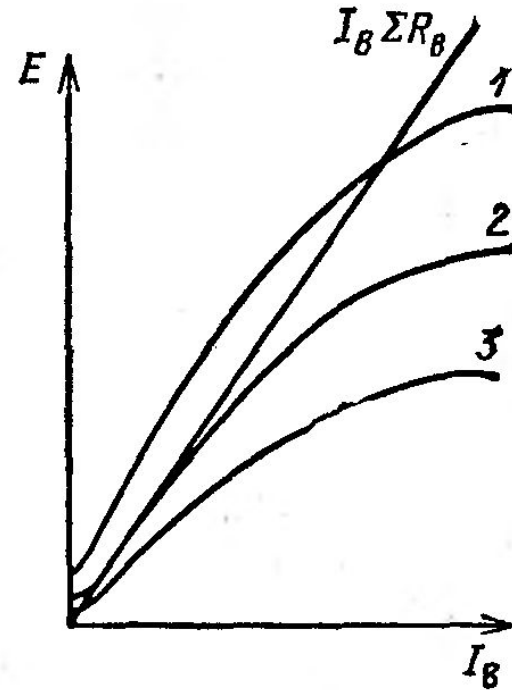


При постоянной частоте вращения
1-XXX, 2-Характеристика цепи возбуждения

$$I_B \sum R_B = f(I_B)$$

$$\sum R_{B2} \boxtimes \sum R_{B3} \boxtimes \sum R_{B4}$$

$$\sum R_{B3} = \sum R_{кр}$$



При переменной частоте вращения
1, 2, 3 -XXX

$$n_1 \boxtimes n_2 \boxtimes n_3$$

$$E = I_B \sum R_B + \frac{d(L_B I_B)}{dt}$$

Условия для самовозбуждения ГПТ

- Наличие остаточного магнитного потока.
- Ток обмотки возбуждения направлен согласно с потоком остаточного магнетизма.
- Сопротивление обмотки возбуждения меньше критического для данной частоты вращения

Двигатели постоянного тока

$$U_a = E + I_a r_a;$$

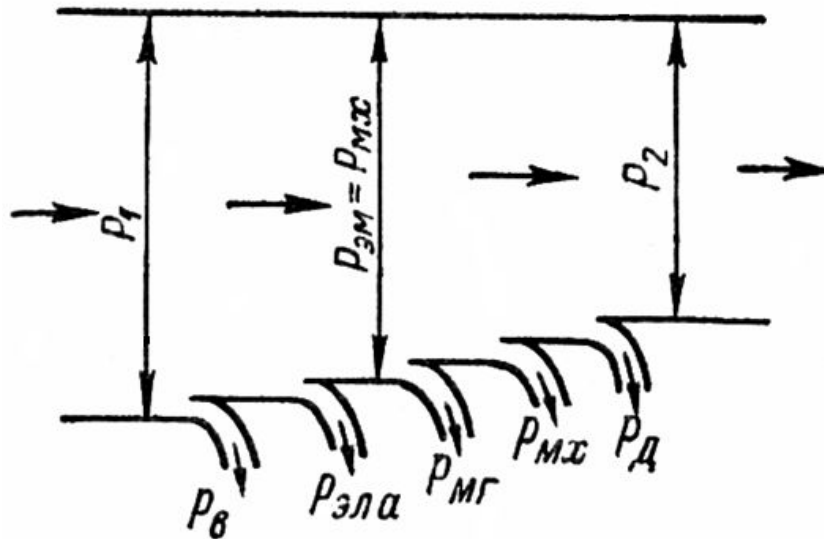
$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a};$$

$$M_M = C_a \Phi_\delta I_M \quad C = \frac{p N}{2\pi a};$$

$$n = \frac{U - I_a R_a}{\Phi_e \delta}$$

$$\Phi_a \neq C_e \zeta; \quad e = \frac{pN}{60a};$$

$$n = \frac{U}{\Phi_e \delta} - \frac{R_a M}{\Phi_e C_M \delta^2}$$



Энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения

Пуск двигателей постоянного тока

Задачи пуска

1. Обеспечить необходимый пусковой момент – $M_{\text{п}}$
2. Уменьшить пусковой ток

Способы пуска

1. Прямой пуск
2. С помощью пускового реостата, включаемого последовательно в цепь якоря.
3. При пониженном напряжении цепи якоря

$$\text{при } n = 0, E_a = 0, \quad I_a = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{U}{R_a}$$

$$R_{\text{н}}^{\bullet} = 0,02 \div 0,1 \quad I_a = (50 \div 10)I$$

Пуск с помощью пускового реостата

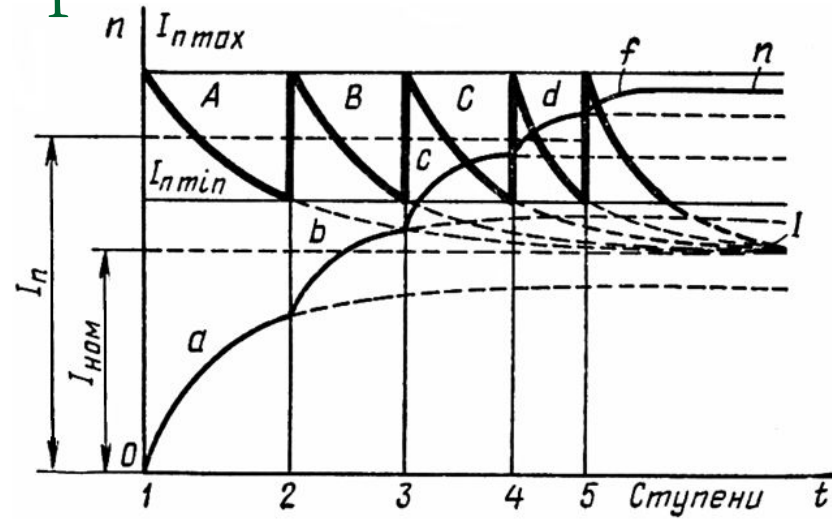
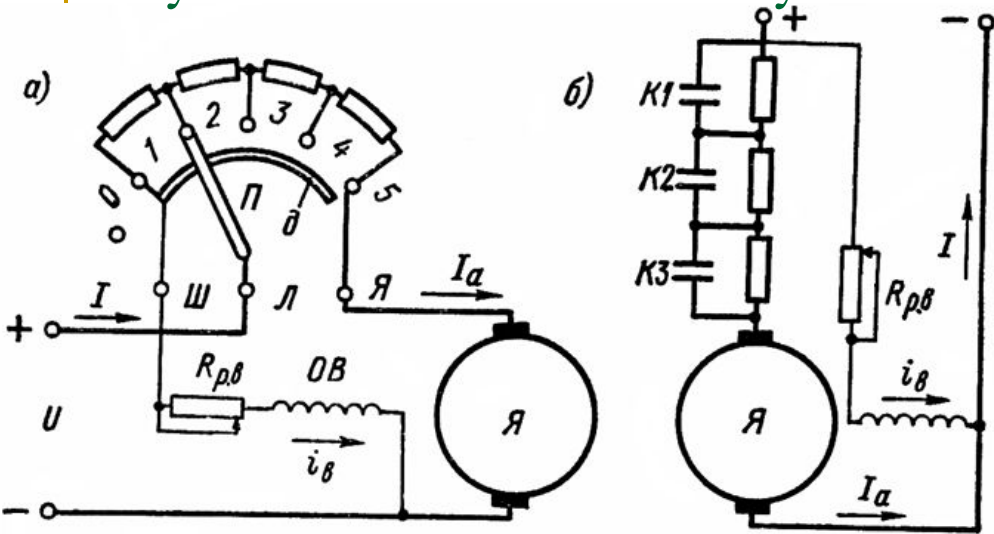


Диаграмма процесса пуска двигателя в ход

Схема пуска двигателя параллельного возбуждения с помощью пускового реостата (а) и пусковых сопротивлений (б)

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R} \text{ при } n=0 \quad I_a = \frac{U}{R_n + R}$$

R_n сопротивление пускового реостата

$$I_a = 1,4 \div 1,7 I$$

Для ДПТ с последовательным возб.

недопустим пуск без нагрузки

$$M = 0 \Rightarrow I_a \rightarrow 0, \Phi_\delta \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$$

$$M_M = C_a \Phi_\delta I_{max}$$

максимальное,

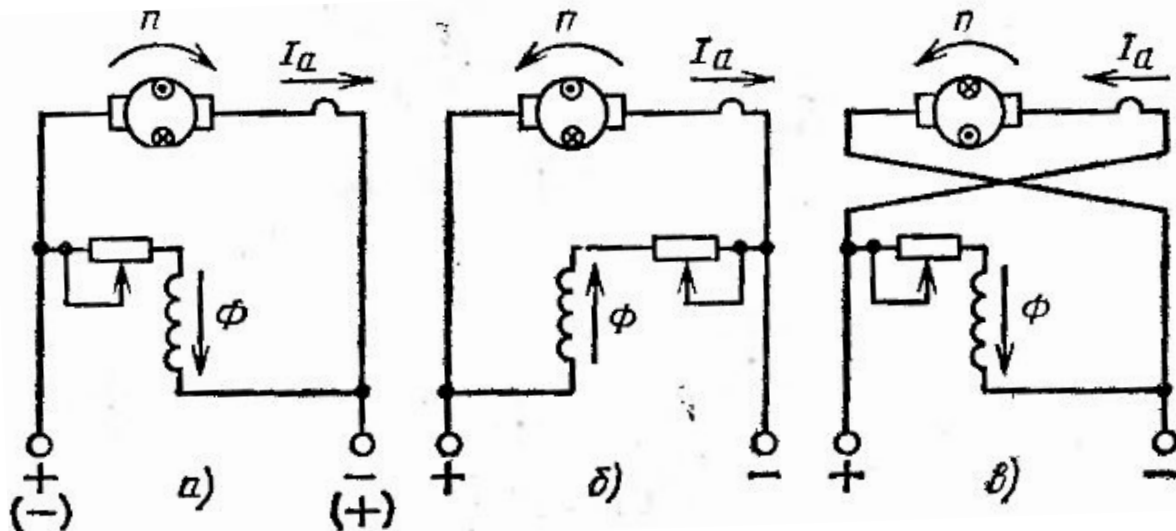
ОВ подключена на полное напряжение

Нельзя допускать разрыва в цепи ОВ

$$\Phi_\delta = \text{разносе } 0, = \frac{U - I_a R_a}{\Phi_e \delta} \rightarrow \infty$$

$E_a = \text{круговой огонь}$

Изменение направления вращения ДПТ



Схемы для изменения направления вращения двигателя

Для изменения направления вращения необходимо изменить направление тока в якоре (вместе с добавочными полюсами и компенсационной обмоткой) или в обмотках возбуждения.

Регулирование частоты вращения ДПТ

$$n = \frac{U - I_a R_a}{\Phi_e \delta} \quad n = f(\delta) \text{ (скоростная характеристика)}$$

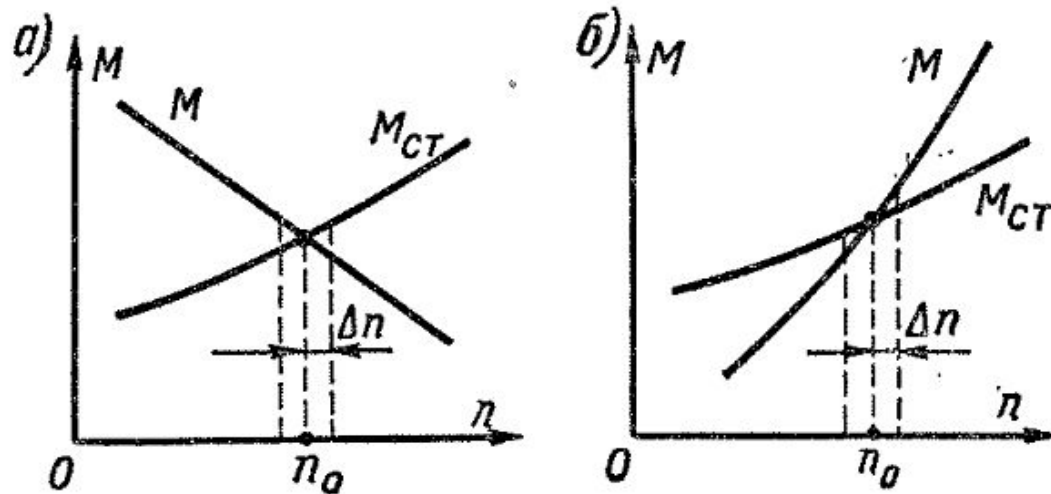
$$n = f \frac{U}{\Phi_e \delta} - \frac{R_a M}{\Phi_e C_M \delta^2} = \text{(механическая характеристика)}$$

$$R_a = R + R_d$$

Способы регулирования

- 1. Изменением тока возбуждения (потока).** Двигатели рассчитаны на номинальную работу с $\max \Phi$, следовательно практически можно только уменьшать Φ (увеличивать частоту вращения). Верхний предел ограничивается мех. прочностью и условиями коммутации. «+» Экономичность
- 2. Изменением добавочного сопротивления цепи якоря.** Регулирование скорости вниз от номинальной. При увеличении сопротивления снижается жесткость характеристик. «-» Значительные потери на сопротивлении, снижение КПД.
- 3. Изменением напряжения цепи якоря.** Т.к. работа двигателя при $U > U_n$ недопустима, то регулирование частоты вращения ниже номинальной. «+» КПД остается высоким, «-» дороговизна (отдельный источник тока с регулируемым напряжением).

Условия устойчивости работы двигателя



Механические характеристики ДПТ $M=f(n)$ и приводного механизма $M_{ст}=f(n)$
Устойчивый (а) и неустойчивый (б) режим работы двигателя

Под устойчивостью работы двигателя понимается его способность вернуться к исходному, установившемуся режиму работы при малых возмущениях, когда действие этих возмущений прекратится.

Установившийся режим работы ($M = M_{ст}, n = n_0$)

рис а $\frac{dM}{dn} \boxtimes \frac{dM_{ст}}{dn}$ – устойчивая работа,

рис б $\frac{dM}{dn} \boxtimes \frac{dM_{ст}}{dn}$ – не устойчивая работа,

Двигатели параллельного возбуждения

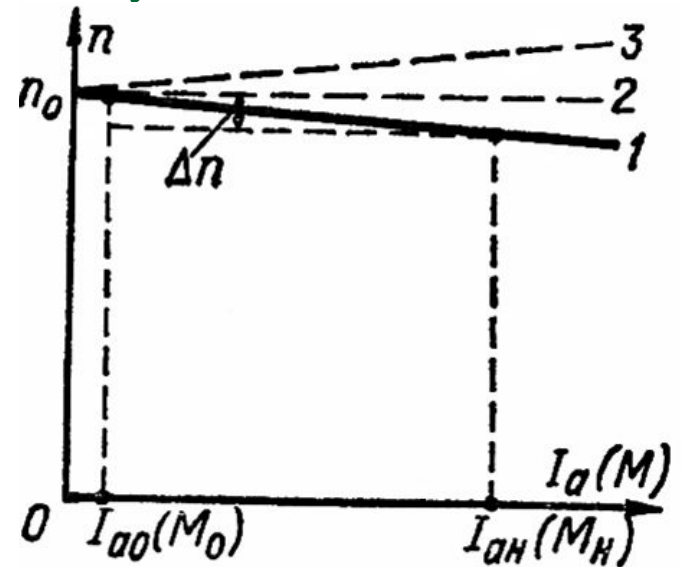
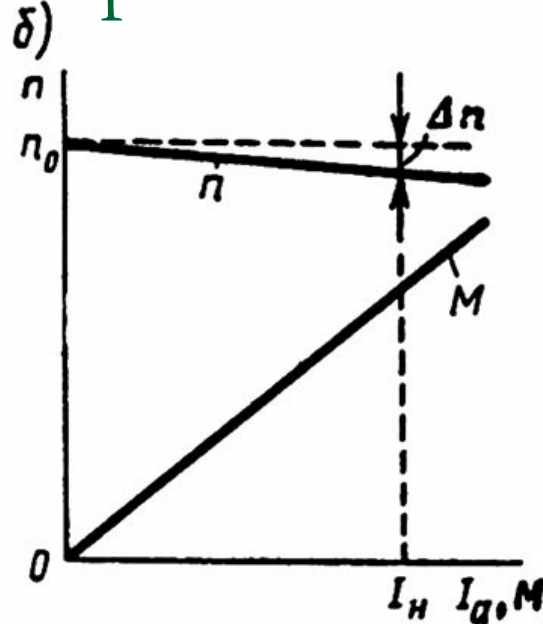
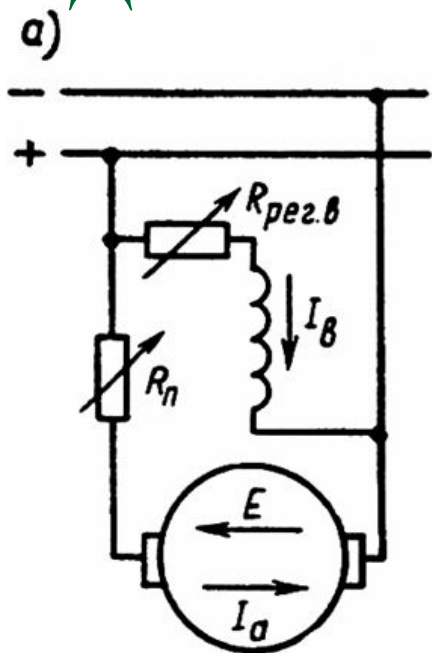


Схема двигателя с параллельным возбуждением (а) и зависимости его момента и частоты вращения от тока якоря (б)

Виды естественных скоростных и механических характеристик двигателя параллельного возбуждения

Скоростная характеристика $n = f(I_a)$ при $U = const$ и $i_e = const$

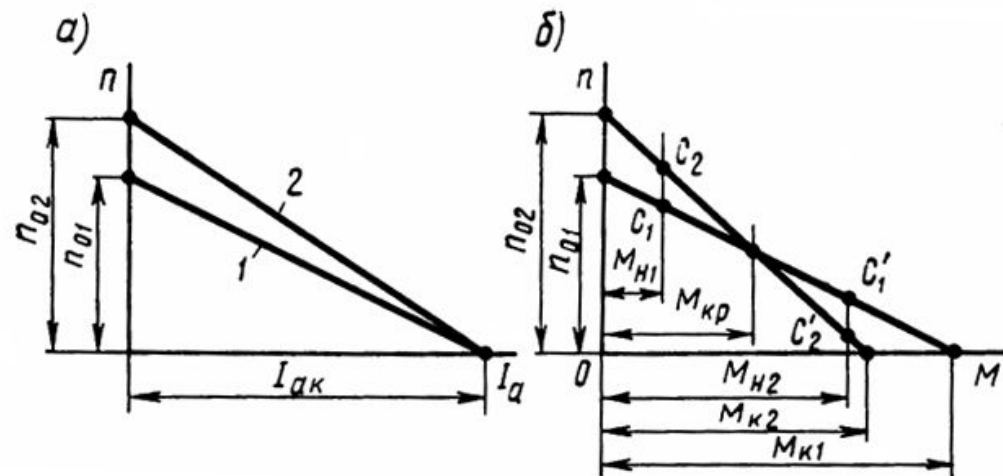
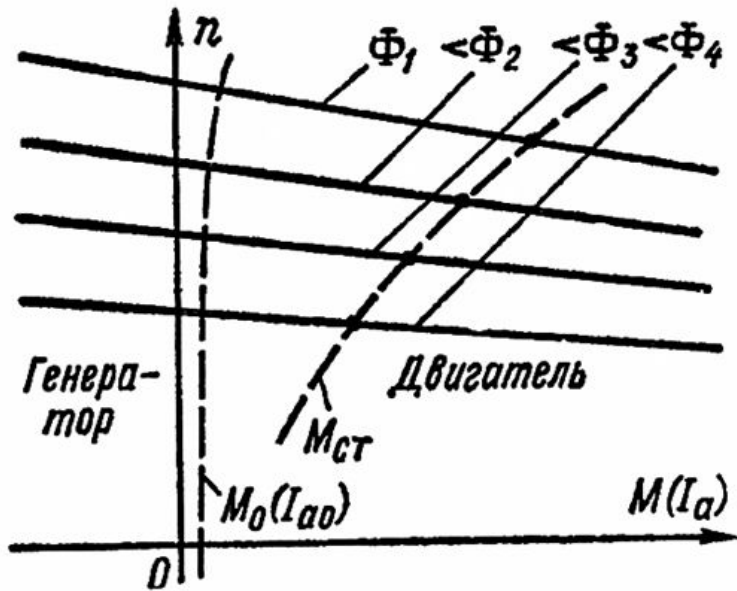
$$n = \frac{U - I_a R_a}{\Phi_e \delta}$$

Механическая характеристика $n = f(M)$ при $U = const$ и $i_e = const$

$$n = \frac{U}{\Phi_e \delta} - \frac{R_a M}{\Phi_e C_M \delta^2}$$

Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения путем изменения тока возбуждения (магнитного потока)

$$n = \frac{U - I_a R_a}{\Phi_e \delta} \quad n = \frac{U}{C \Phi_e \delta} - \frac{R_a M}{\Phi_e C_M \delta^2} \quad I_a = \frac{U}{R_a}$$



Механические и скоростные характеристики двигателя параллельного возбуждения при разных потоках возбуждения

Скоростные (а) и механические (б) характеристики двигателя с параллельным возбуждением при разных значениях магнитного потока

Регулирование скорости вращения до 1:8

Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения путем изменения сопротивления в цепи якоря

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R)}{\Phi_e \delta} \quad n = \frac{U}{C \Phi_e \delta} \frac{\partial(R_a + R)M}{\Phi_e C_M \frac{2}{\delta}}$$

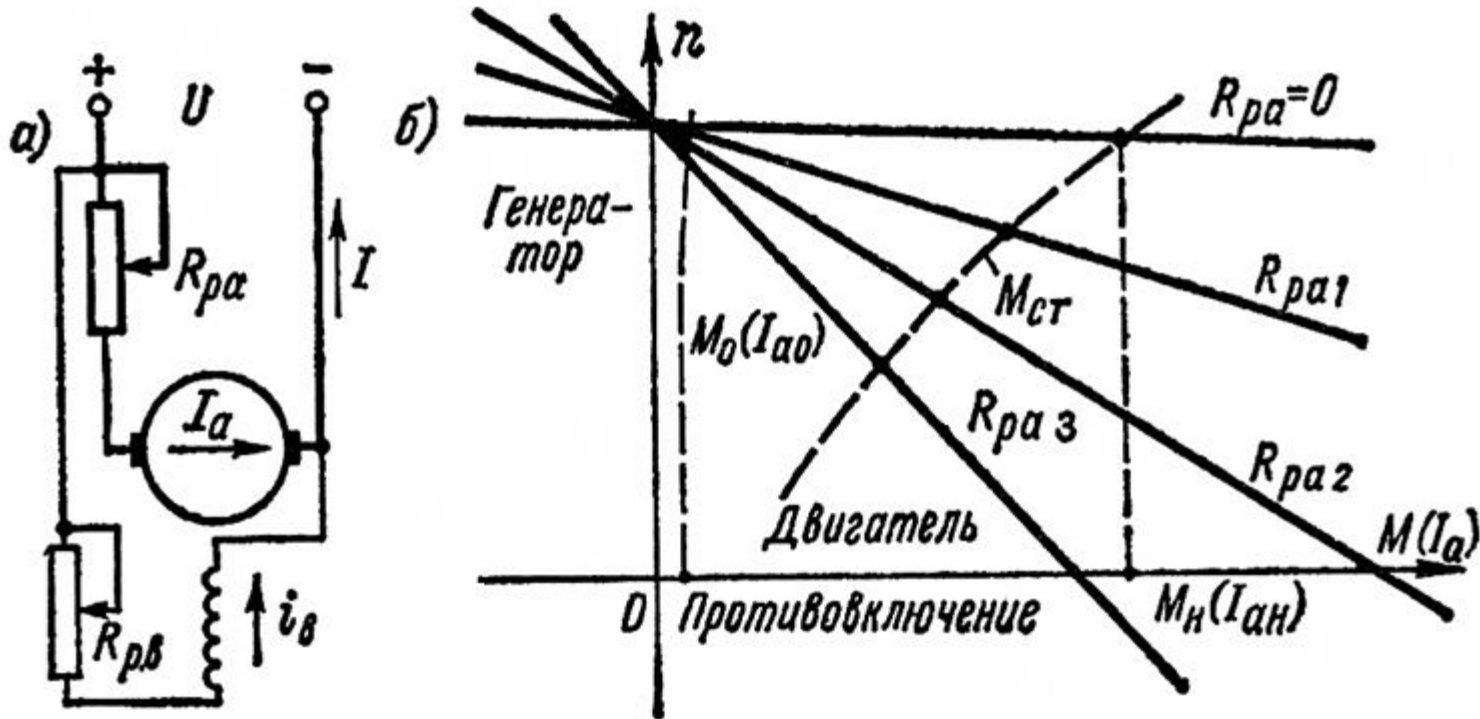
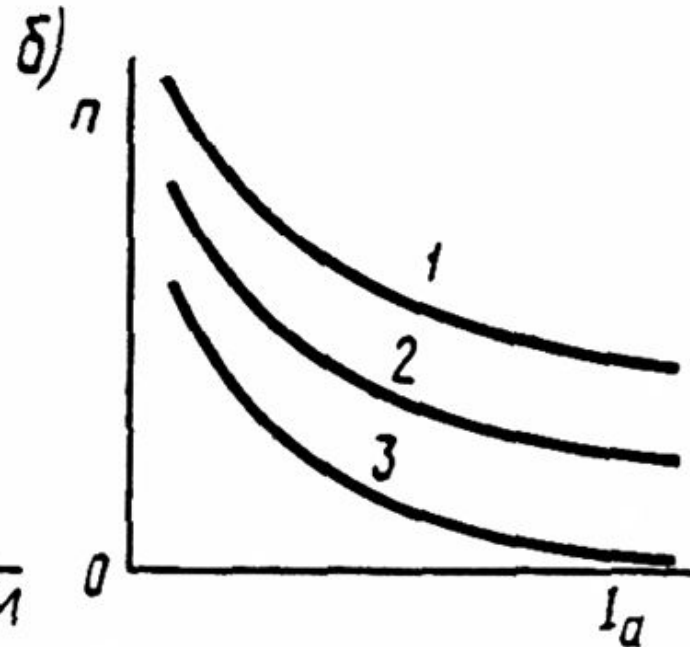
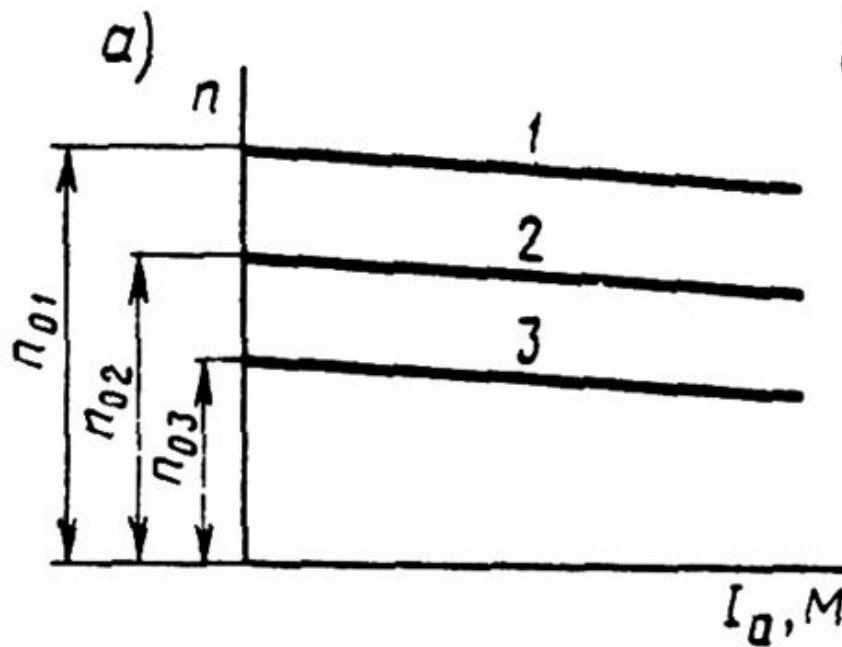


Схема регулирования скорости вращения двигателя параллельного возбуждения с помощью сопротивления в цепи якоря (а) и соответствующие механические и скоростные характеристики (б)

Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения путем изменения напряжения якоря при $I_b = \text{const}$

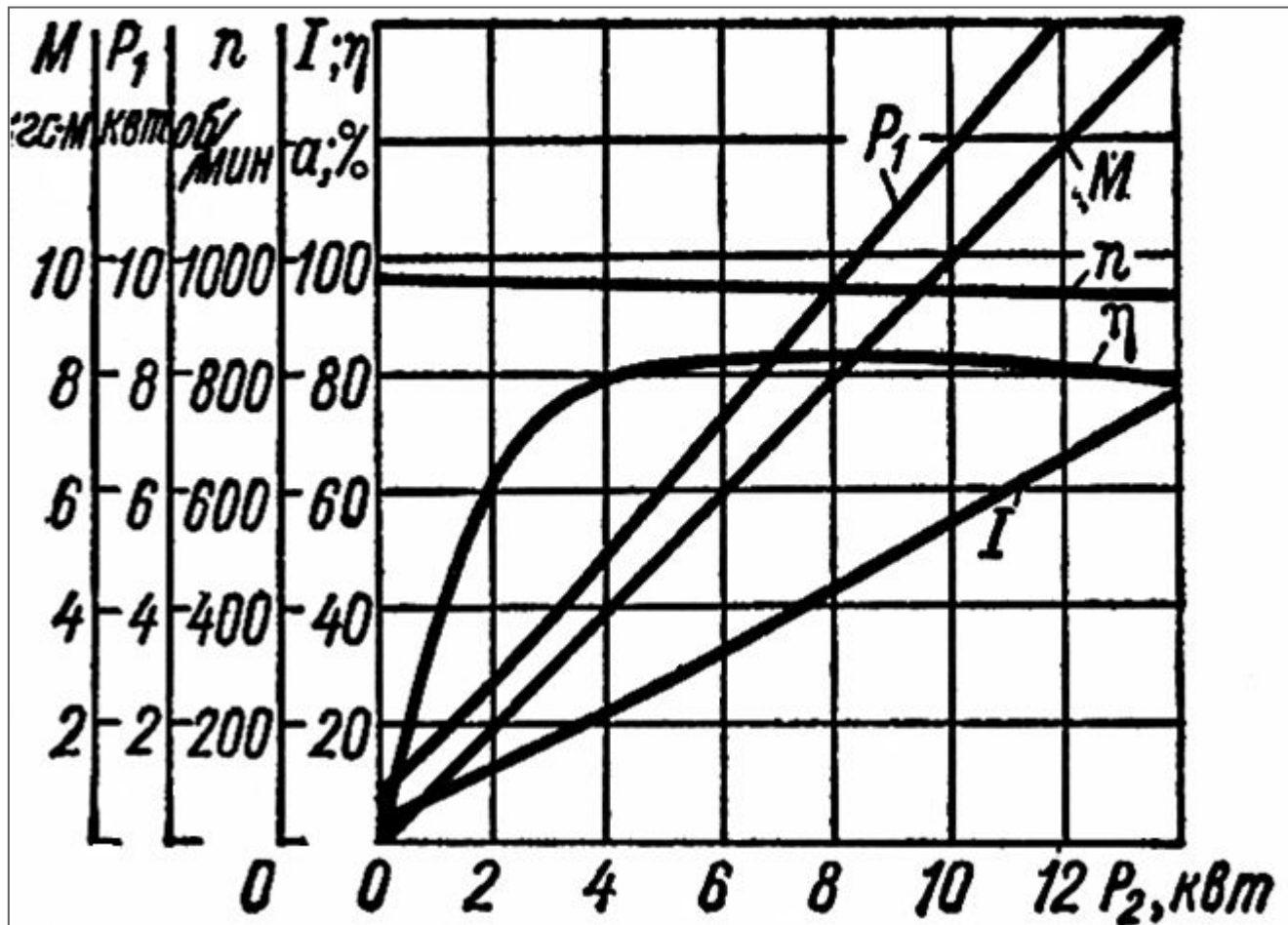
$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi_\delta}$$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_\delta} - \frac{R_a M}{C_e C_M \Phi_\delta^2}$$



Скоростные характеристики двигателей с параллельным (а) и последовательным (б) возбуждением при различных напряжениях на якоре

Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения



$$P_2 \uparrow \Rightarrow I_a \uparrow \Rightarrow n \downarrow$$

$$M \propto \frac{P_2}{n} \uparrow$$

$$P_1 = UI_a \uparrow$$

Двигатели последовательного возбуждения

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi_\delta}$$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_\delta} - \frac{R_a M}{C_e C_M \Phi_\delta^2}$$

$$n = \frac{U - R_a I}{C_e k_\Phi I}$$

$$n = \frac{\sqrt{C_M U}}{C_e \sqrt{k_\Phi} \sqrt{M}} - \frac{R_a}{C_e k_\Phi}$$

$$I_B = I_a = I$$

$$\Phi_\delta = k_\Phi I$$

k_Φ коэффициент пропорциональности

$$M = C_M k_a I_\delta = M \quad 2 = \frac{\Phi_M}{k_\Phi \delta}$$

При малых I скорость n недопустимо большая
 работа на ХХ не допускается

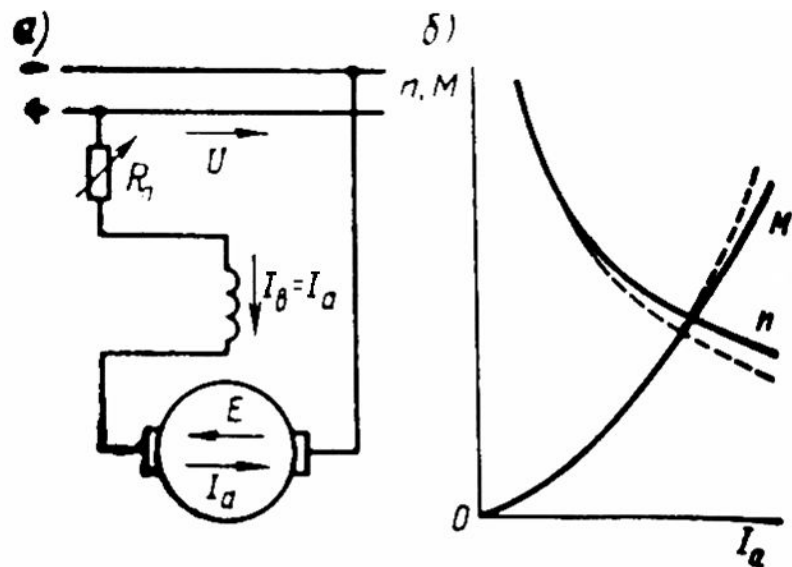


Схема двигателя с последовательным возбуждением (а), зависимости его момента и частоты вращения от тока якоря (б)

Способы регулирования частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения

ДПТ парал.возб.

$$M \propto I$$

$$n \approx const$$

$$P_2 = 2\pi n M \propto M$$

ДПТ посл.возб.

$$M \propto I^2$$

$$n \propto U/I \propto U/\sqrt{M}$$

$$P_2 = 2\pi n M \propto \sqrt{M}$$

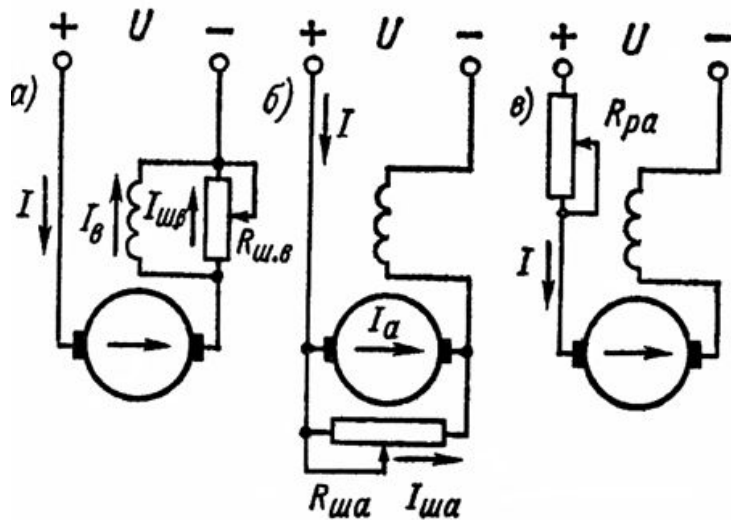
ДПТ посл.возб.

- развивают больший пусковой момент,
- при изменении момента нагрузки в широких пределах, мощность изменяется в меньших пределах чем у ДПТ парал.возб.

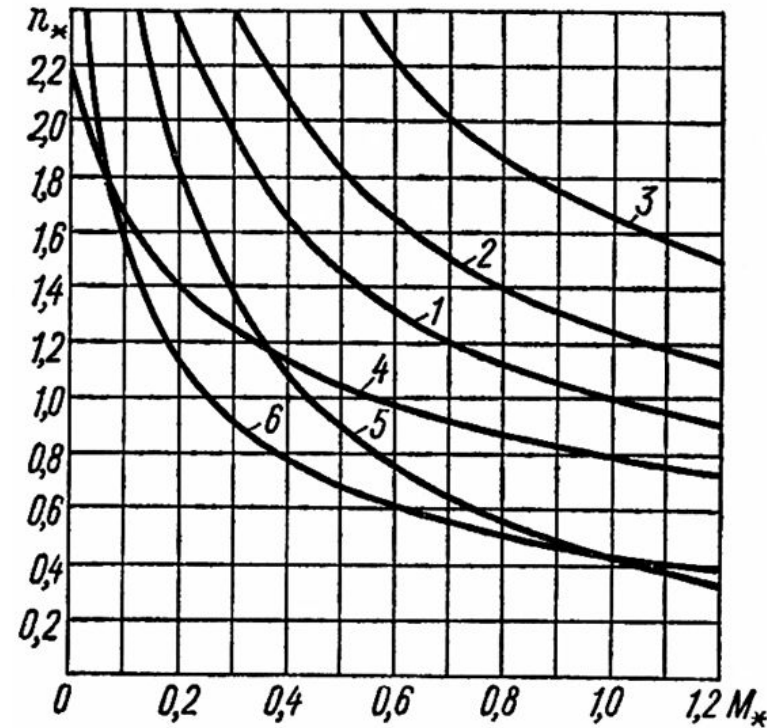
Область применения ДПТ посл.возб. – тяжелые условия пуска, изменение момента нагрузки в широких пределах (электротранспорт, подъемно-транспортные установки).

Способы регулирования частоты вращения

1. Посредством ослабления поля ($n > n_H$) «+» высокий КПД.
2. Шунтирование якоря ($n < n_H$) «-» низкий КПД.
3. Включение сопротивления в ОЯ ($n < n_H$) «-» низкий КПД.
4. Изменение напряжения.

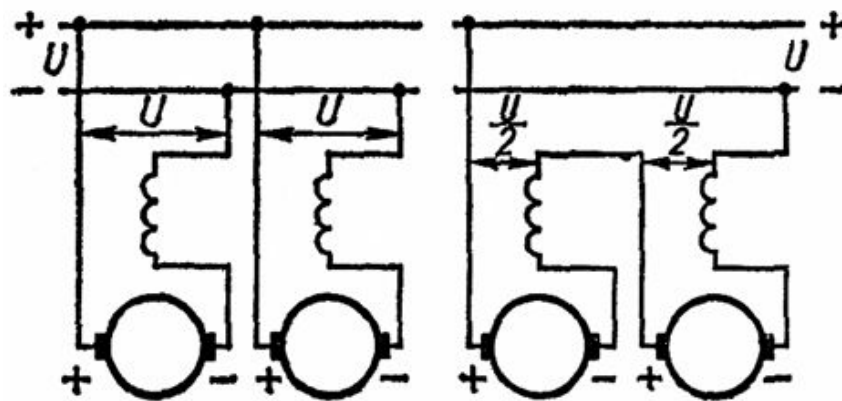


Схемы регулирования скорости вращения двигателя последовательного возбуждения посредством шунтирования обмотки возбуждения (а), шунтирования якоря (б) и включения сопротивления в цепь якоря (в)



Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

- 1 – естественная характеристика
- 2,3 – шунтирование обмотки возбуждения
- 4 – шунтирование якоря
- 5 – сопротивление в цепи якоря
- 6 – последовательное включение двигателей

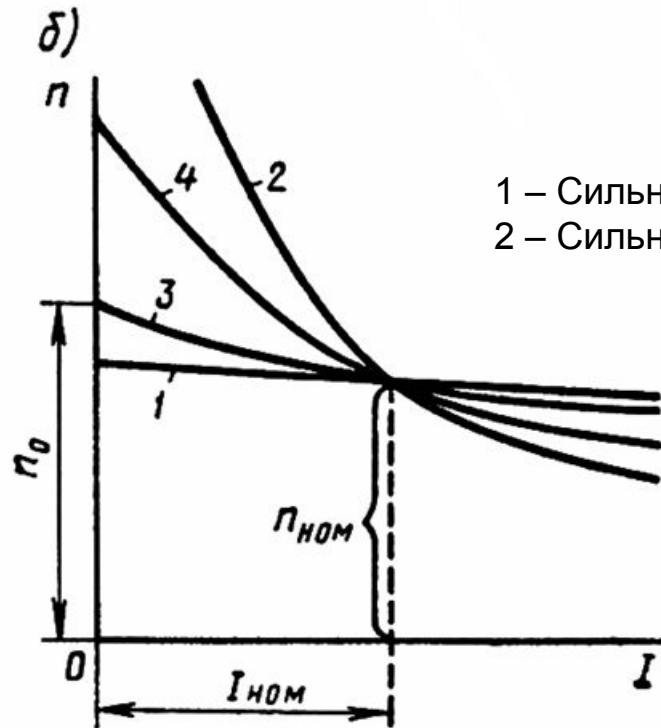
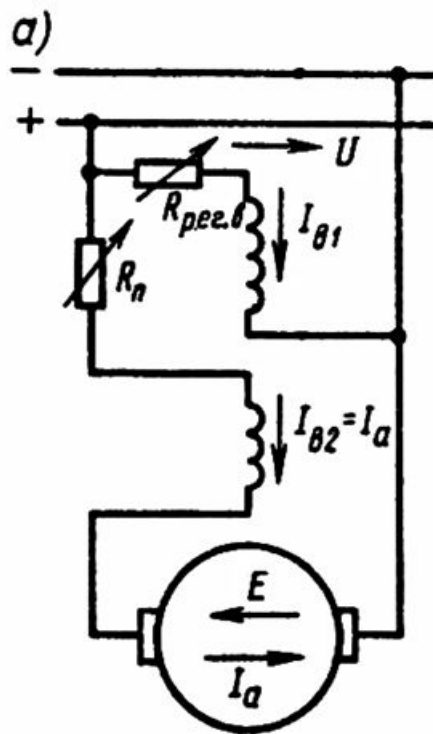


Параллельное и последовательное включение двигателей последовательного возбуждения для изменения скорости вращения

Двигатель смешанного возбуждения

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e (\Phi_{Ш} + \Phi_C)}$$

$$n = \frac{U}{C_e (\Phi_{Ш} + \Phi_C)} - \frac{R_a M}{C_e C_M (\Phi_{Ш} + \Phi_C)^2} \quad \Phi_C = k_\Phi I_a$$



- 1 – Сильная параллельная обмотка
- 2 – Сильная последовательная обмотка

Схема двигателя со смешанным возбуждением (а)
и его скоростные характеристики (б)