
Электрические машины

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока



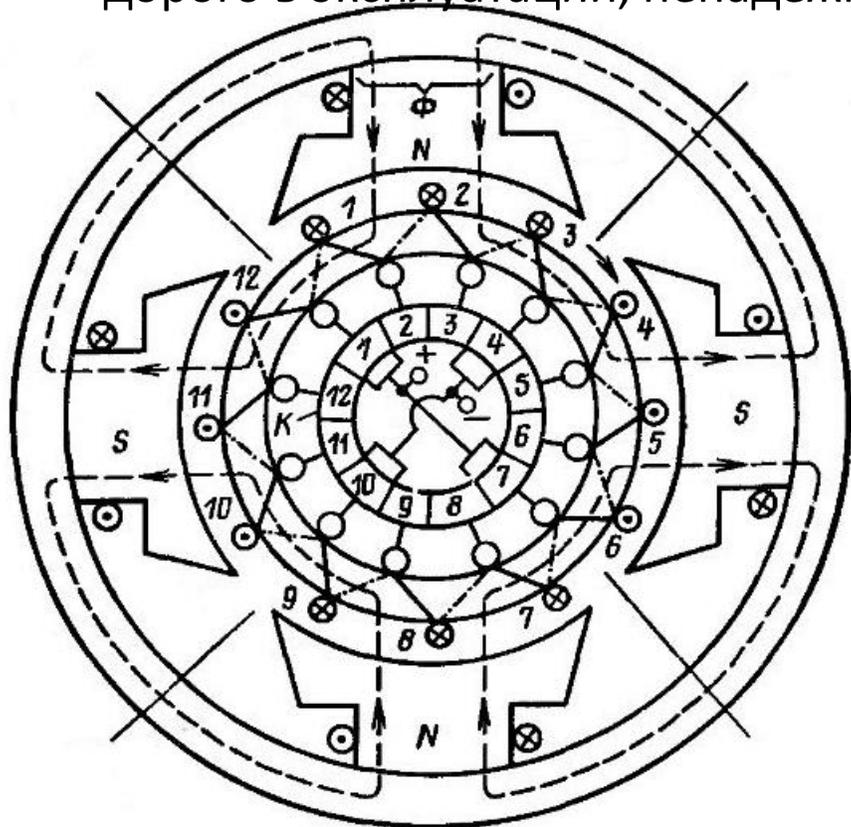
5.1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Конструкция и принцип действия МПТ

МПТ – работает с сетью постоянного тока

Обычно – коллекторная машина

Щеточно-коллекторный узел: дорого в производстве, дорого в эксплуатации, ненадежно, искрение, радиопомехи.



- Высокая удельная мощность
- Простой пуск и реверс
- Любая частота вращения
- Экономичное регулирование n
- Допускает большие перегрузки

Статор – индуктор:

- станина
- полюсы
- обмотка возбуждения

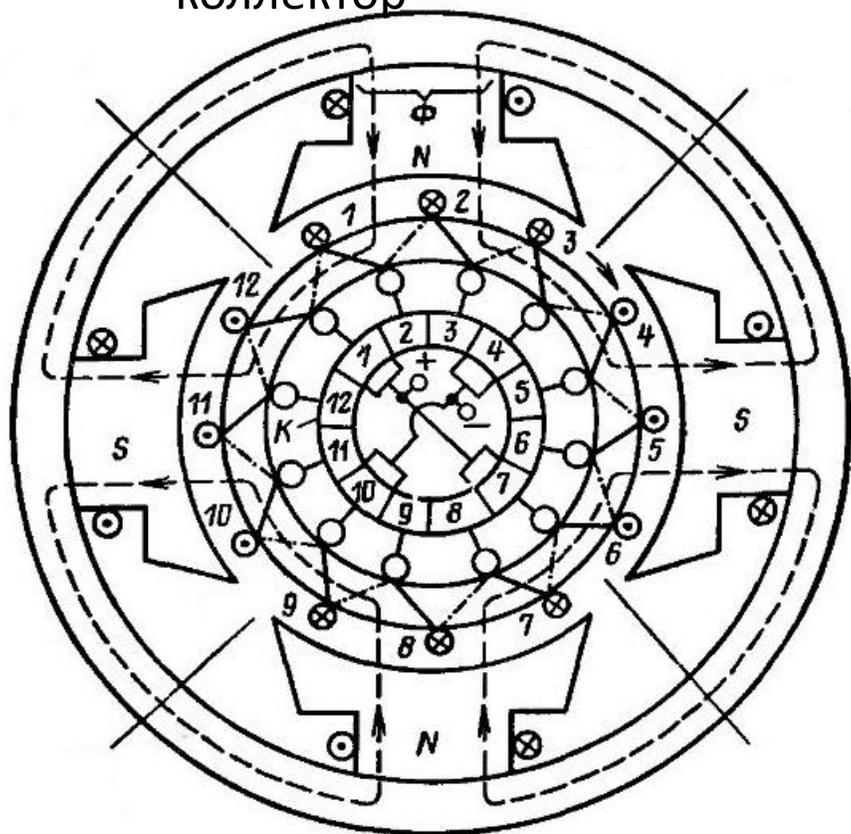
$I_B \rightarrow \Phi$ чередующейся полярности
2 оси симметрии: d и q



Конструкция и принцип действия МПТ

Ротор – якорь:

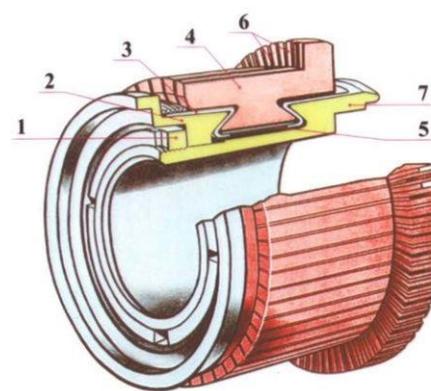
- сердечник (здесь – полый цилиндр)
- обмотка якоря (здесь – кольцевая)
- коллектор



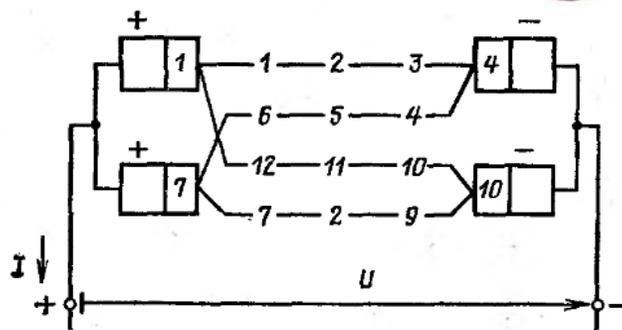
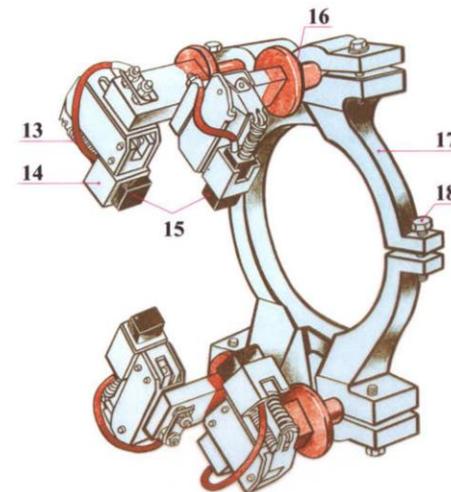
Обмотка якоря

- секции (несколько витков)
- последовательно соединены в кольцо
- концы секции – к пластинам коллектора

Коллектор



Щеткодержатели

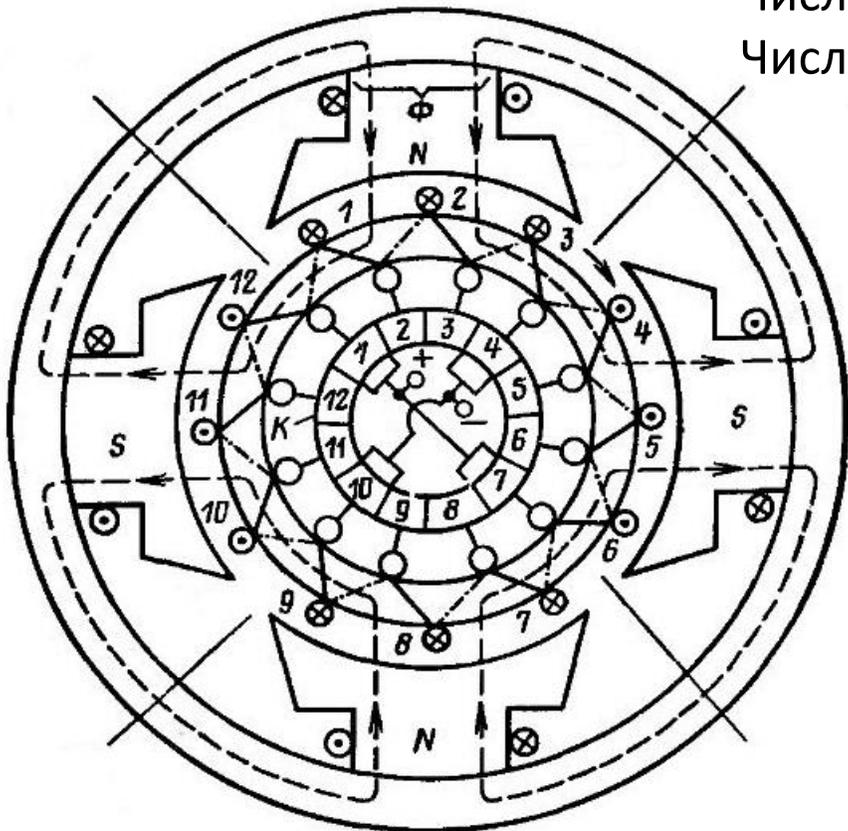


Между щетками – $2p$ парал. ветвей
ЭДС между щетками = Σ ЭДС секций
в парал. ветви

Конструкция и принцип действия МПТ

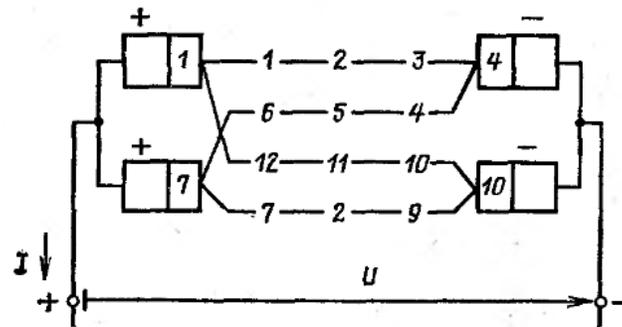
ЭДС между щетками = Σ ЭДС секций в парал.ветви
 Для max ЭДС – щетки там, где ЭДС меняет знак
 – на оси q (геометрическая нейтраль)

Число нейтралей = $2p$
 Число щеток = $2p$



Секции вращаются \rightarrow ЭДС переменная
 Щетки неподвижны \rightarrow между ними всегда
 вкл. секции под одним полюсом
 (одно направление ЭДС)
 \rightarrow полярность щетки неизменна
 Коллектор «выпрямляет» переменную ЭДС
 (щетка «собирает» ток одного направления)

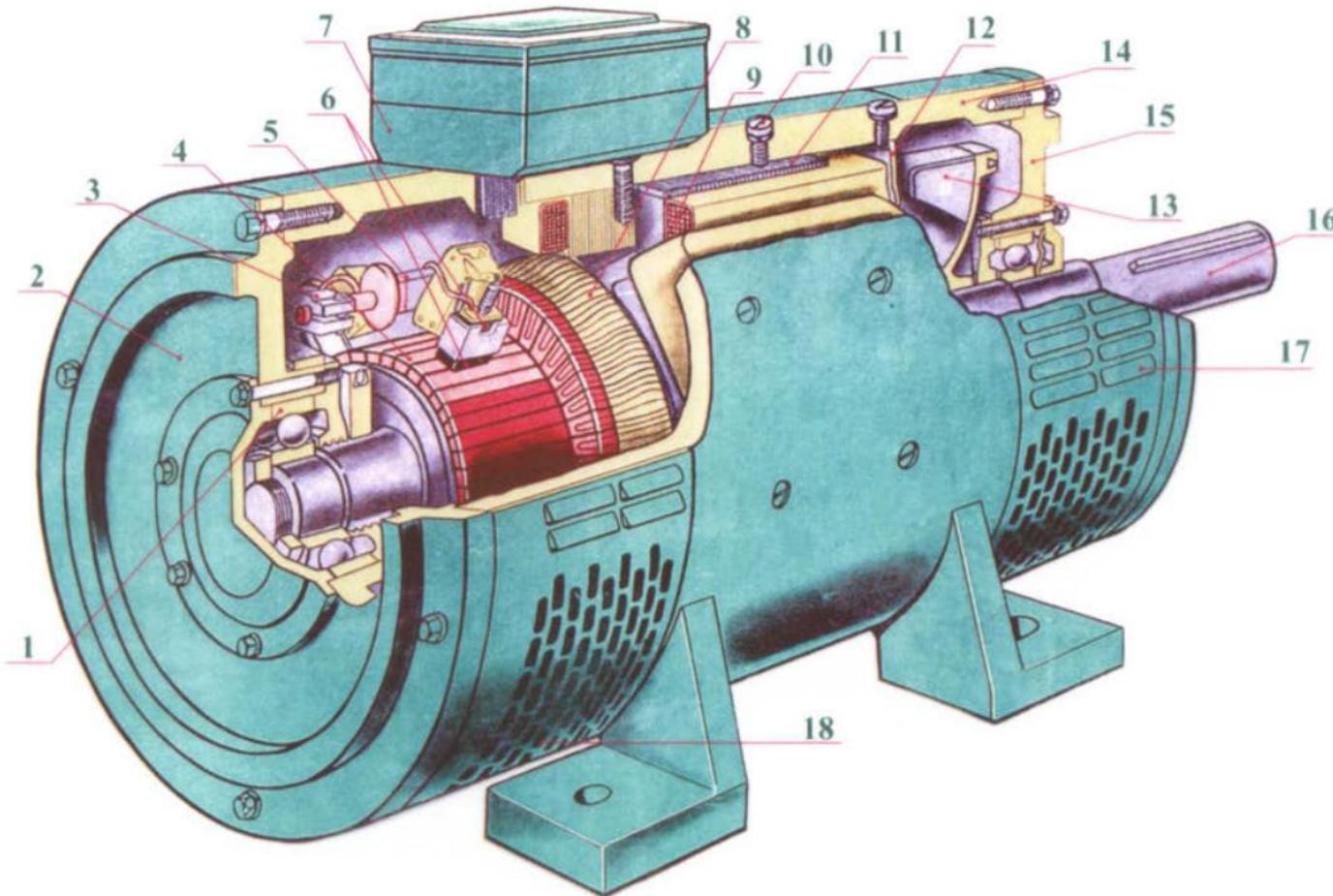
В двигателе: пост.ток через щетки и коллектор в секции якоря
 \rightarrow под каждым полюсом направление тока всегда неизменно
 \rightarrow неизменно и направление вращающего момента



Внутри замкнутой обмотки якоря
 Σ ЭДС = 0 (на ХХ генератора $I_{я} = 0$)

Конструкция и принцип действия МПТ

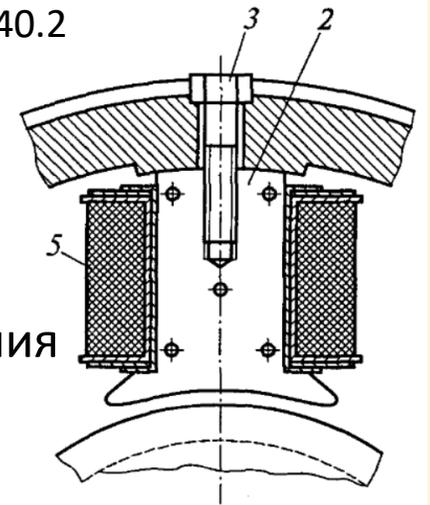
Современная конструкция МПТ



Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. – параграф 18.2
Токарев Б.Ф. – параграф 40.2

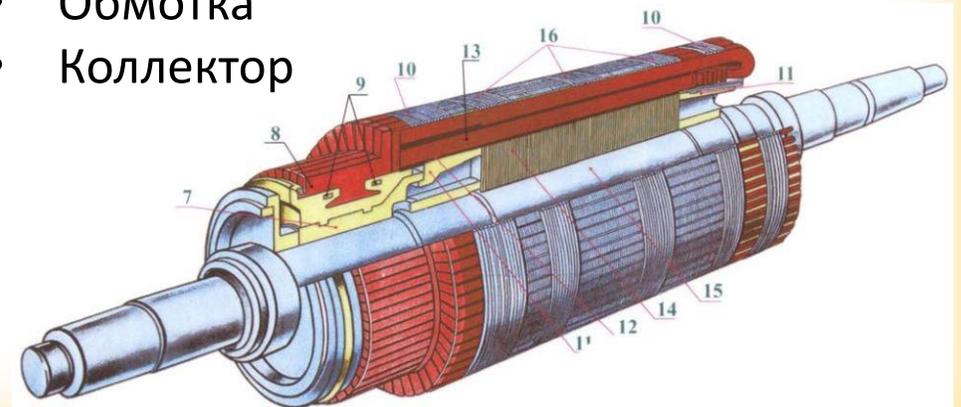
Статор:

- Станина (Сталь 10)
- Полюсы
- Обмотка возбуждения



Якорь:

- Сердечник
- Обмотка
- Коллектор

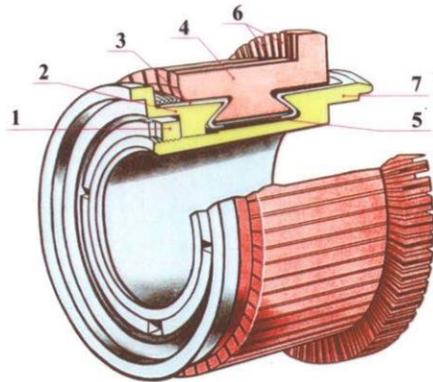
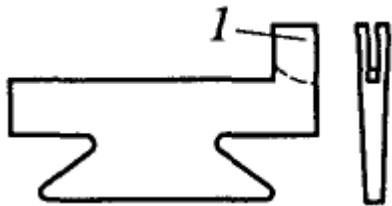


Конструкция и принцип действия МПТ

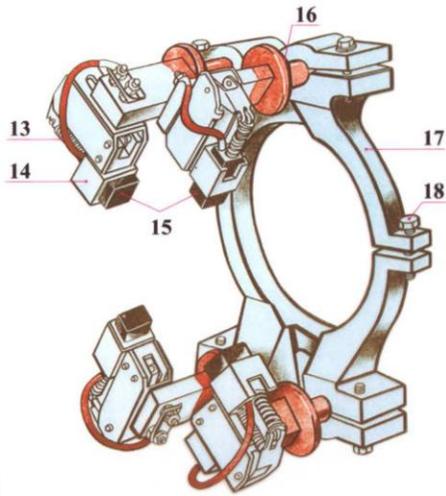
Современная конструкция МПТ

Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. – параграф 18.2
Токарев Б.Ф. – параграф 40.2

- Коллектор



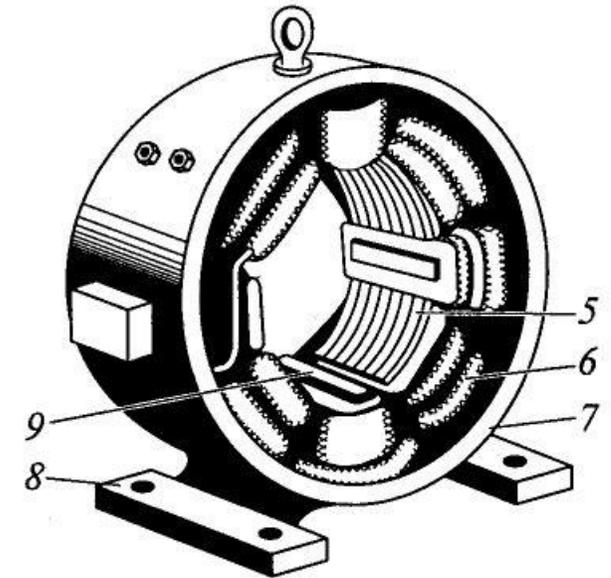
- Щеткодержатели



- Обмотка якоря (двухслойная)



- Главные полюсы
- Добавочные полюсы



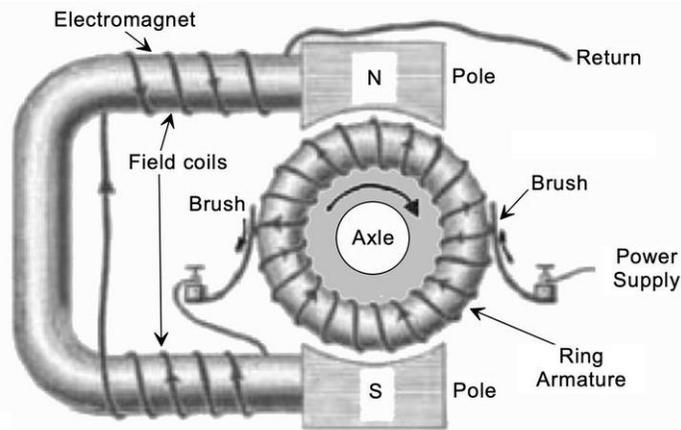
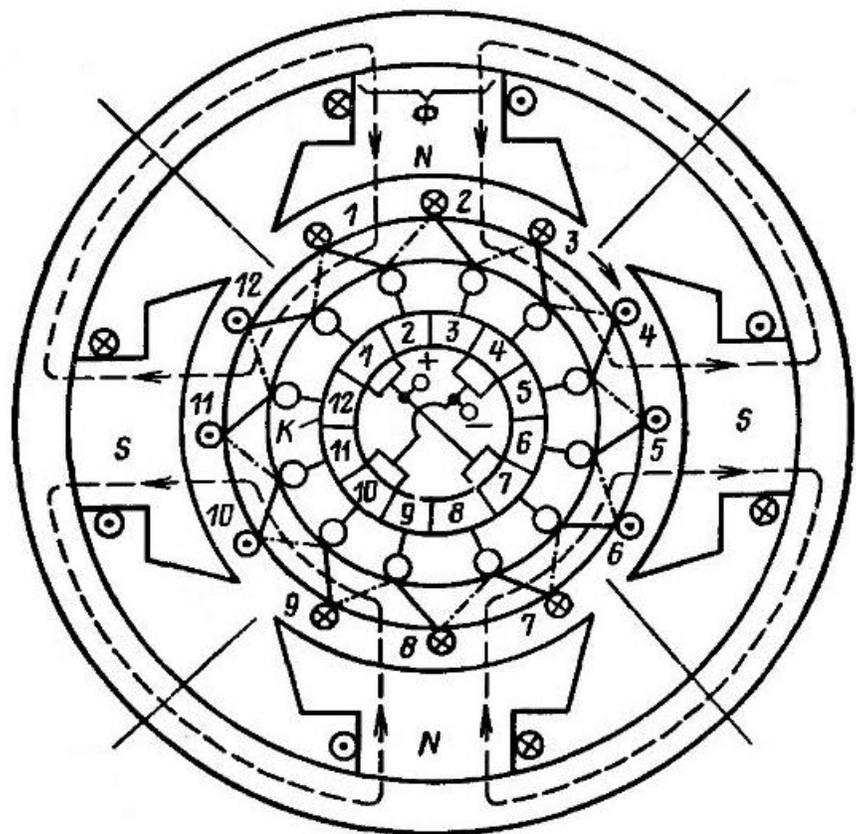
Машины постоянного тока



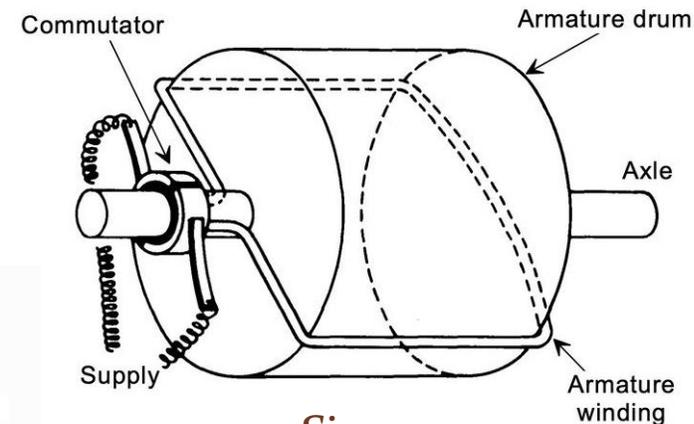
5.2. ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Кольцевая → барабанная обмотка якоря

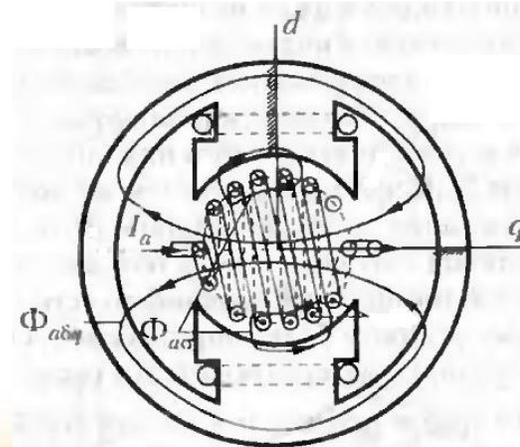
Кольцевая (граммовская) обмотка: часть проводников не используется
Барабанная обмотка: «обратный» проводник на внешней поверхности, но под противоположным полюсом (ЭДС суммируются)



Zenobe Gramme



Siemens



Основные элементы обмотки

Секции обмотки (одно- / многовитковые) – в пазах в 2 слоя
 Часто в реальном пазу – несколько элементарных (z_3)

Обмотки петлевые / волновые / комбинированные

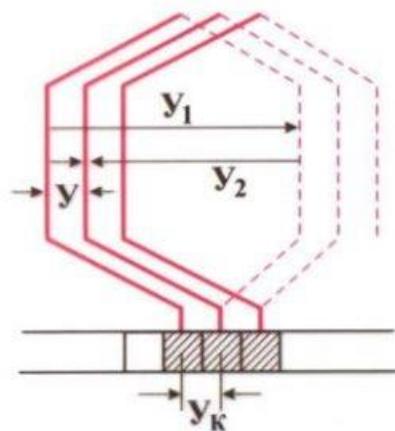
Обмоточные шаги:

y_1 – первый частичный шаг (между сторонами секции)

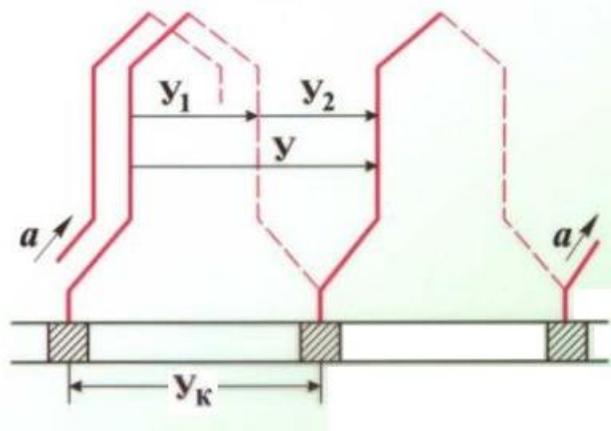
y_2 – второй частичный шаг (между конечной стороной 1 секции и начальной стороной 2 секции)

y – результирующий шаг (между началами последовательных секций)

y_k – шаг обмотки по коллектору



Петлевая обмотка



Волновая обмотка

Сплошная линия – верхняя сторона секции

Пунктирная линия – нижняя сторона секции

Шаг – целое число элементарных пазов

$$y_1 = \frac{z_3}{2p} \pm \varepsilon \quad (\varepsilon - \text{прав. дробь, чтобы } y_1 = \text{ц.ч.})$$

$y_1 = \tau$ (диаметральный) или
 $y_1 < \tau$ (укороченный шаг)

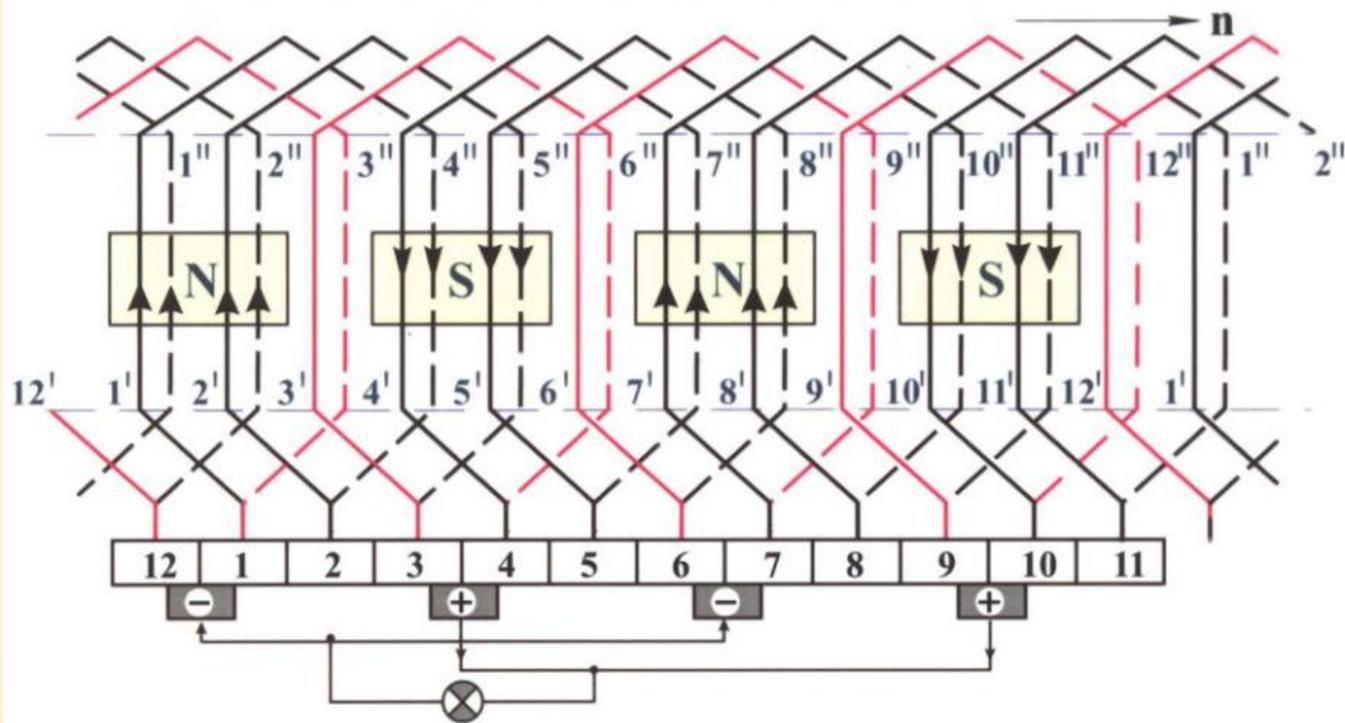
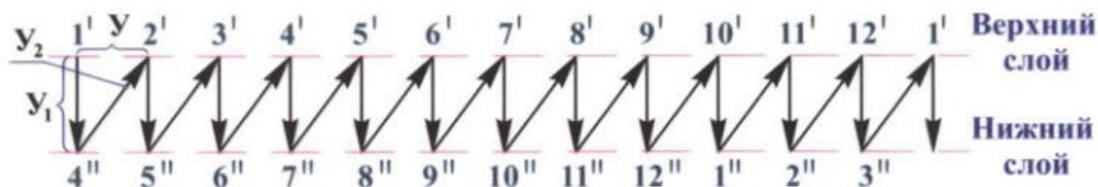
Число секций $S = z_3 =$ число коллект. пластин K

Кол. пластина: конец одной секции и начало следующей $\rightarrow y_k = y$

Петлевые обмотки

Простая петлевая обмотка – последовательное соединение соседних секций

Пример: $2p = 4, z = z_э = 12: y = y_k = 1, y_1 = z_э/2p = 3, y_2 = y - y_1 = -2$



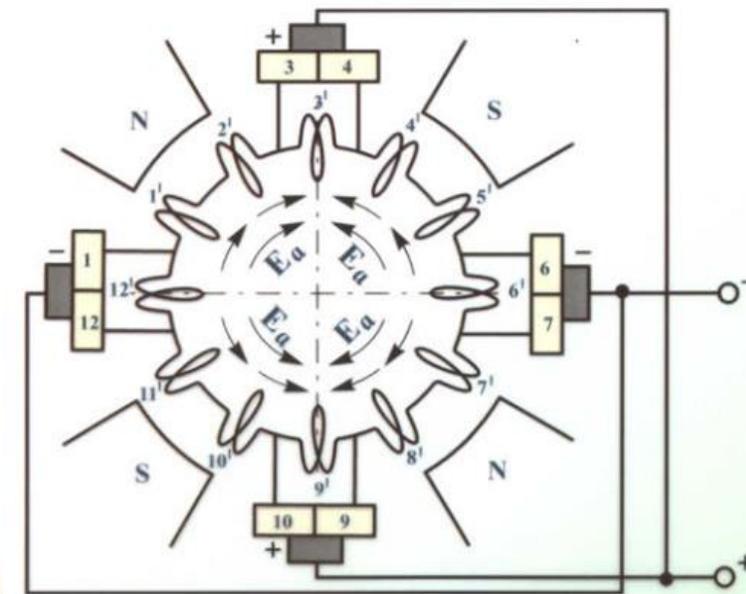
Между полюсами – геометрич.нейтраль

Щетки подключены к секциям на ГН

В коммутируемых секциях $E = 0$

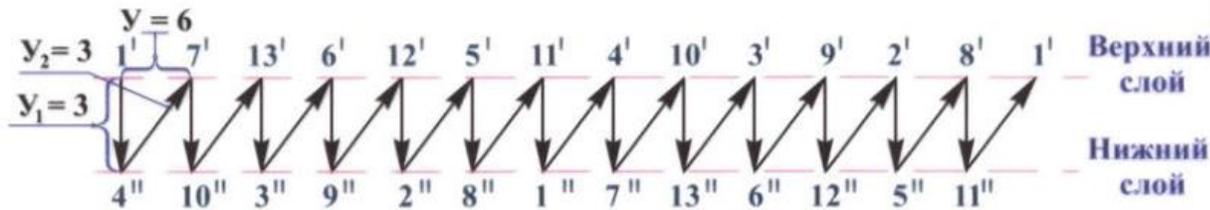
(их стороны – на ГН)

Направления ЭДС, парал.ветви ($2a = 2p$)



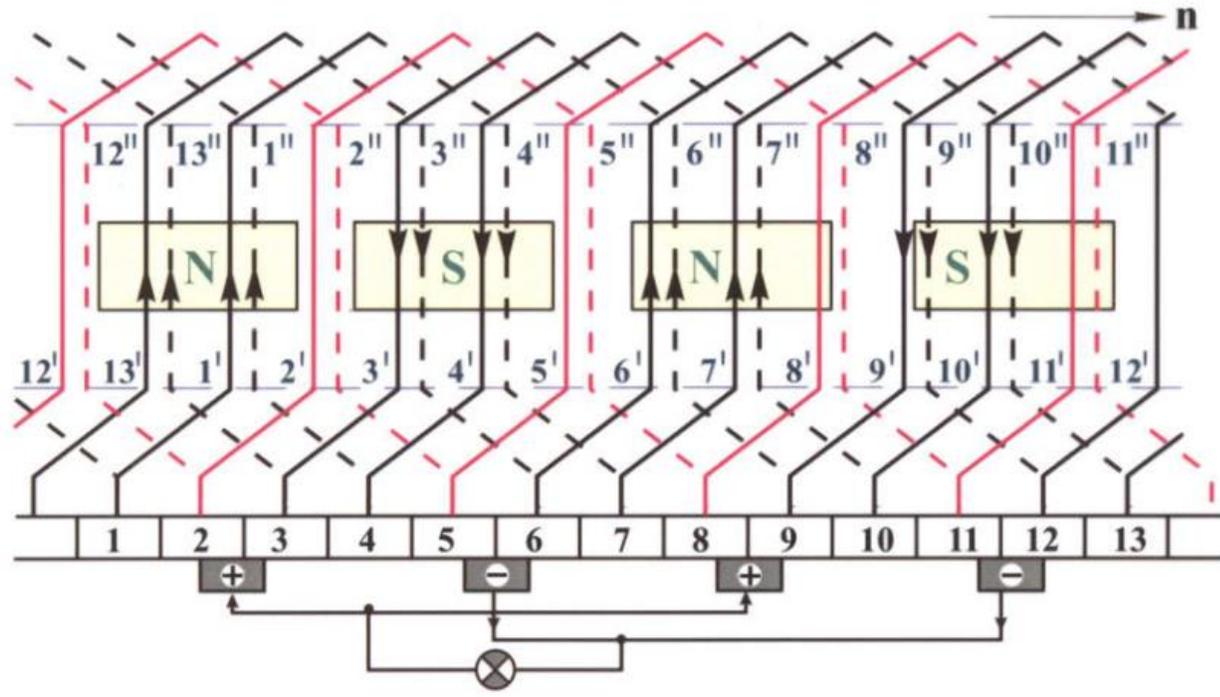
Волновые обмотки

Простая волновая обмотка – последовательное соединение секций, начала которых лежат под одноименными полюсами

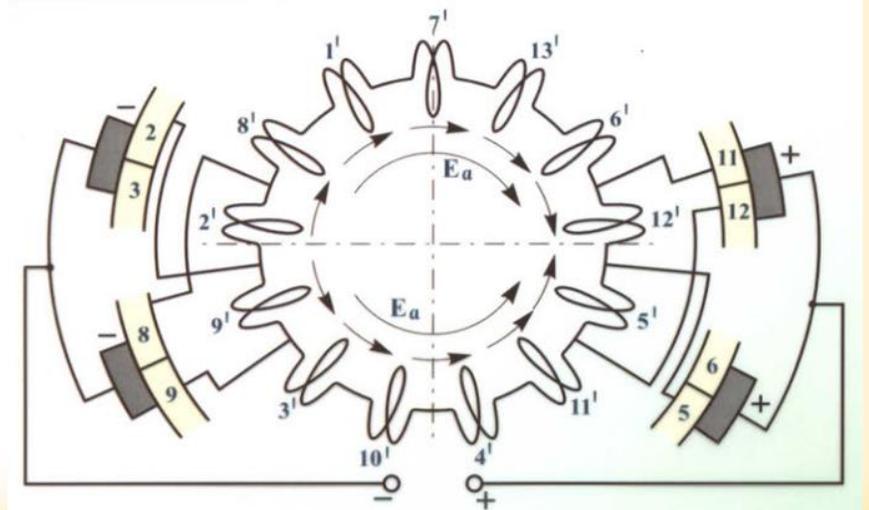


Пример: $2p = 4$, $z = z_p = 13$: $y = \frac{z_p \pm 1}{p} = \frac{13-1}{2} = 6$

$$y_1 = \frac{z_p}{2p} \pm \varepsilon = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3 \quad y_2 = y - y_1 = 3$$



Щетки подключены к секциям на ГН
Секции объединены в 2 парал.ветви $2a = 2$
(при любом числе полюсов)



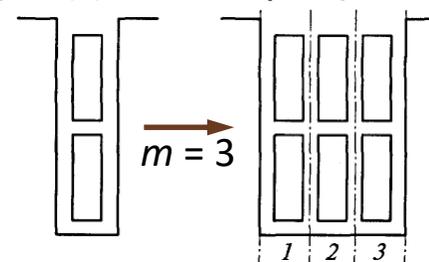
Сложные якорные обмотки

Сложная петлевая обмотка = m простых в соседних элементарных пазах (тогда $2a = 2pm$)

Соединяются секции, отстоящие на m элементарных пазов

$$y = y_k = m, y_1 = z_3/2p - \varepsilon, y_2 = y - y_1 = m - y_1$$

Щетки более широкие – замыкать минимум m кол.пластин



Сложная волновая обмотка = m простых в соседних элементарных пазах (тогда $2a = 2m$)

После обхода якоря проводник идет не к соседнему эл. пазу, а со сдвигом на m эл.пазов

Так как $z_3 = S$, то $py = z_3 - m$, $y = (z_3 - m)/p = (S - m)/p$, $y_2 = y - y_1$, $y_k = y$

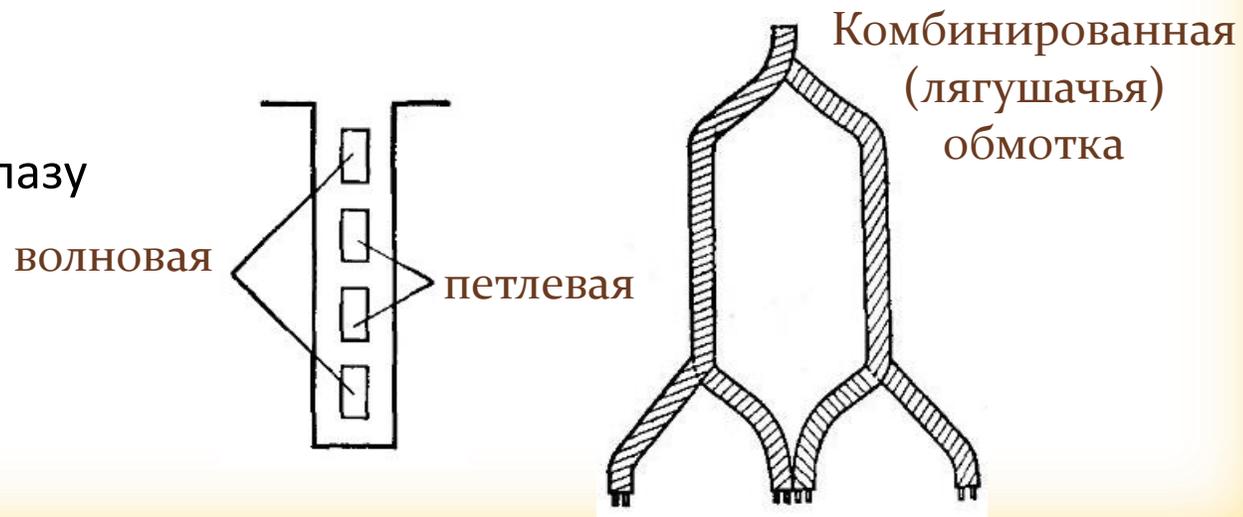
Щетки также более широкие

Комбинированная обмотка

– сочетание петлевой и волновой обмоток в пазу

Для равномерного распределения тока число парал. ветвей должно быть одинаково

$$2pm_{\text{петл.}} = 2m_{\text{волн.}}$$



Условия симметрии якорных обмоток

ЭДС и сопротивления параллельных ветвей всегда должны быть одинаковы (иначе – уравнительные токи)

1. В каждом реальном пазу якоря – одинаковое число сторон секций:

$$S/z = [\text{ц.ч.}]$$

2. ОЯ с $2a$ парал.ветвей = a параллельных элементарных ОЯ с 2 парал.ветвями

Тогда у всех ОЯ_э одинаковое число секций, кол.пластин, элемент.пазов:

$$S/a = K/a = z_{\text{э}}/a = [\text{ц.ч.}]$$

3. Симметричное расположение ОЯ_э в магнитном поле:

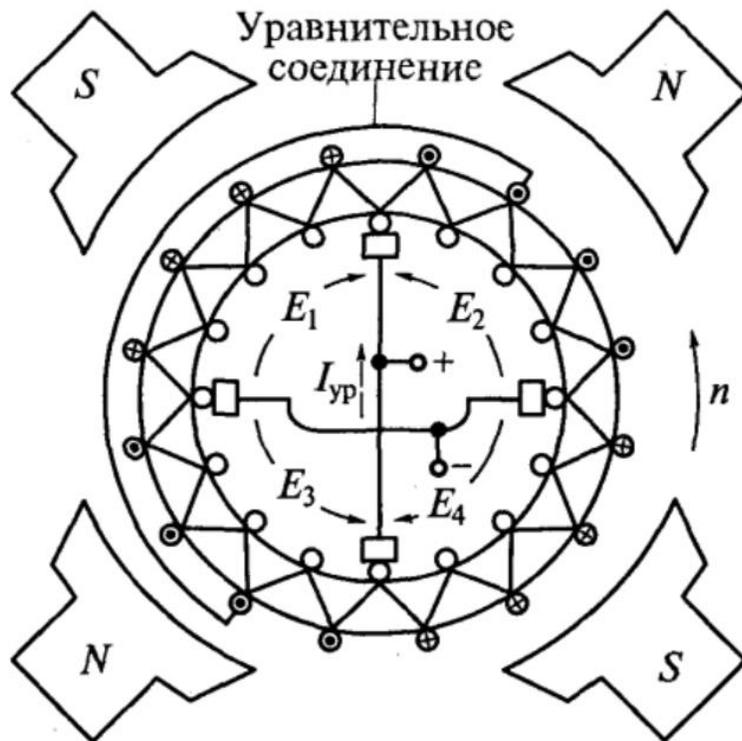
$$Z/a = [\text{ц.ч.}] \text{ и } 2p/a = [\text{ц.ч.}]$$

Уравнительные соединения якорных обмоток

Уравнительные соединения 1-го рода (для петлевых обмоток)

Из-за магн. несимметрии Φ полюсов могут различаться (разные δ , неоднородность стали)

Например: δ верхних полюсов $>$ δ нижних полюсов $\rightarrow \Phi$ верхних полюсов $<$ Φ нижних полюсов



\rightarrow различаются ЭДС $E_1 = E_2 < E_3 = E_4$

$\rightarrow \Delta U$ между верхней «+» и нижней «+» щетками

\rightarrow уравнительный ток через щетки и ОЯ
(доп. потери + перегрузка одной щетки)

Т.к. R_a мало, то $I_{ур}$ м.б. большой

Уравнительное соединение – проводник между точками ОЯ на периоде (теоретически одинаковый потенциал)

\rightarrow уравнительный ток – мимо щеток

В волновой обмотке парал. ветвь = секции под всеми полюсами

\rightarrow их ЭДС всегда одинаковы

Уравнительные соединения якорных обмоток

Уравнительные соединения 2-го рода (для сложных обмоток)

В сложной обмотке m простых соединены параллельно широкой щеткой

Если $R_{щ}$ разное по ширине щетки, то ток распределяется по m неравномерно

→ неравномерное распределение U кол.пластин → искрение

Уравнительное соединение – проводники между m разных простых обмоток
(теоретически одинаковые ЭДС)

→ ток нагрузки распределяется равномерно

Машины постоянного тока



5.3. РАБОТА ПРИ НАГРУЗКЕ

ЭДС обмотки якоря

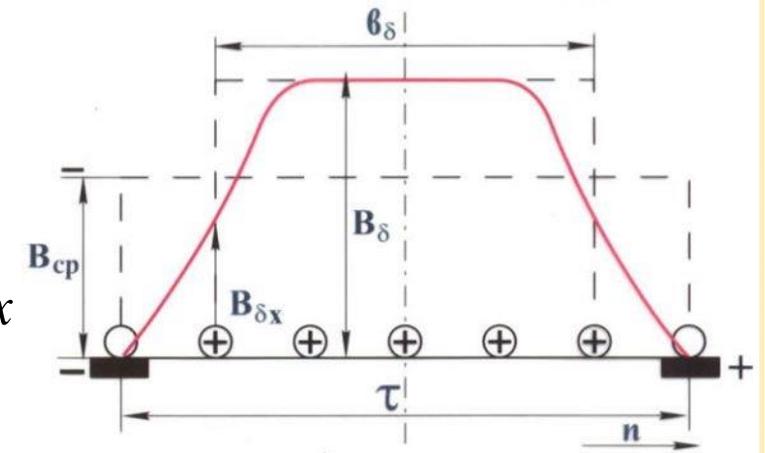
При работе МПТ проводники якоря движутся с v_a в магнитном поле возбуждения

В каждом из N проводников длиной l_δ наводится ЭДС $e_i = B_{\delta i} v_a l_\delta$
 ЭДС параллельной ветви с $N/2a$ последовательных проводников

$$E = \sum_{i=1}^{N/2a} e_i = v_a l_\delta \sum_{i=1}^{N/2a} B_{\delta i}$$

Заменим B_δ на B_{cp} , сохранив поток $B_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau B_\delta(x) dx$

Тогда $\sum_{i=1}^{N/2a} B_{\delta i} = \frac{N}{2a} B_{cp}$ а поток $\Phi = B_{cp} \tau l_\delta$



Окружная скорость $v_a = \pi D_a \frac{\Omega}{2\pi} = 2p\tau \frac{\Omega}{2\pi}$ или $v_a = 2p\tau \frac{n}{60}$

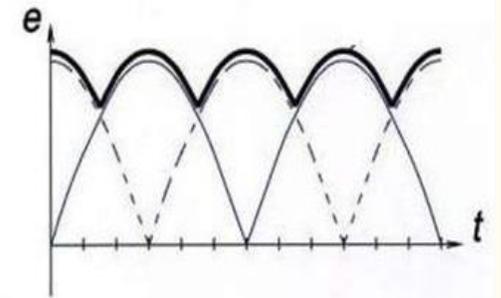
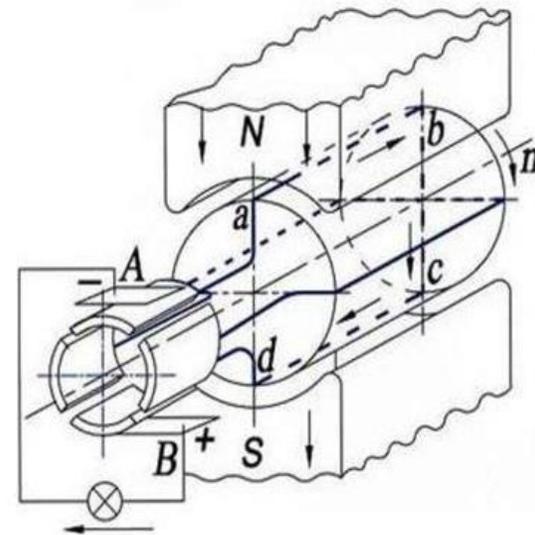
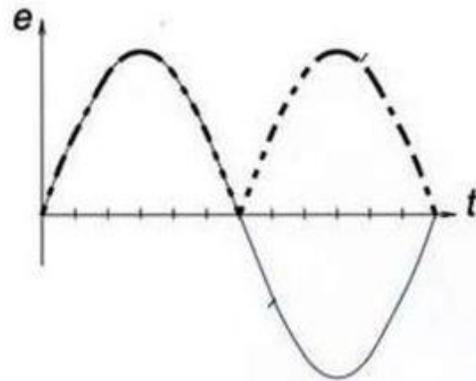
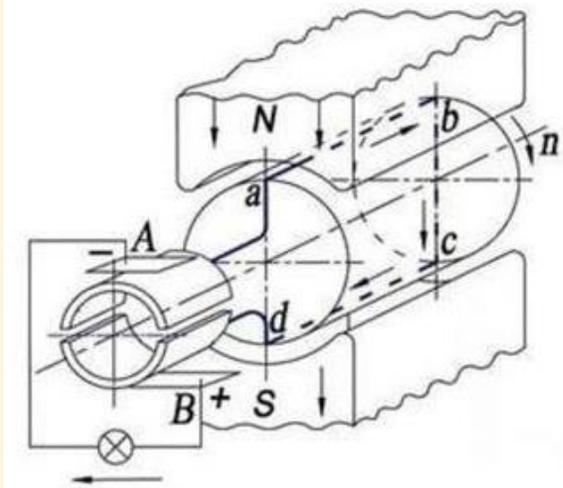
ЭДС $E = 2p\tau \frac{\Omega}{2\pi} l_\delta \frac{N}{2a} B_{cp} = \frac{pN}{2\pi a} \Omega \Phi = c \Omega \Phi$ или $E = 2p\tau \frac{n}{60} l_\delta \frac{N}{2a} B_{cp} = \frac{pN}{60a} n \Phi = c_e n \Phi$

$E = c_e n \Phi$ – не зависит от формы кривой B_δ

«Выпрямленная» ЭДС – пульсирующая

ЭДС обмотки якоря

Пульсации «выпрямленной» ЭДС



Пульсации ЭДС $\Delta E = (E_{\max} - E_{\min})/2$
зависят от числа коллекторных пластин K/p

K/p	2	4	8	10	20	40
$\Delta E, \%$	100	17,2	4,0	2,5	0,62	0,16

Частота ЭДС якоря $f_a = pn/60$
Частота пульсаций больше в K/p раз

Электромагнитный момент

Под нагрузкой ток параллельной ветви ОЯ $I_{\Pi} = \frac{I}{2a}$

в магнитном поле B_{δ} создает силу $f_i = B_{\delta i} I_{\Pi} l_{\delta}$

На плече $D_a/2$ действует момент $m_i = f_i \cdot D_a / 2$

Полный электромагнитный момент $M = \sum_{i=1}^N B_{\delta i} I_{\Pi} l_{\delta} \frac{D_a}{2} = \frac{D_a}{2} \frac{I}{2a} l_{\delta} \sum_{i=1}^N B_{\delta i}$

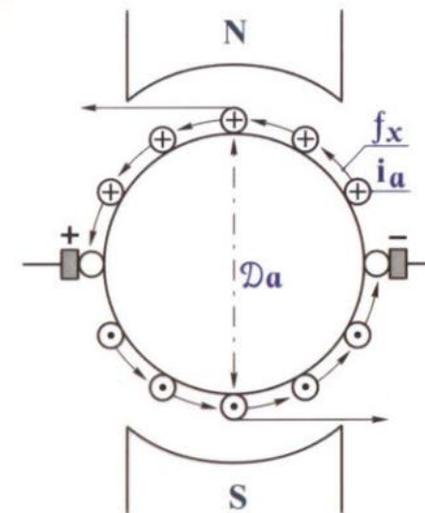
Переходя к средней индукции $\sum_{i=1}^N B_{\delta i} = N B_{cp}$

Заменяем $D_a = \frac{2\rho\tau}{\pi}$ и $B_{cp} \tau l_{\delta} = \Phi$

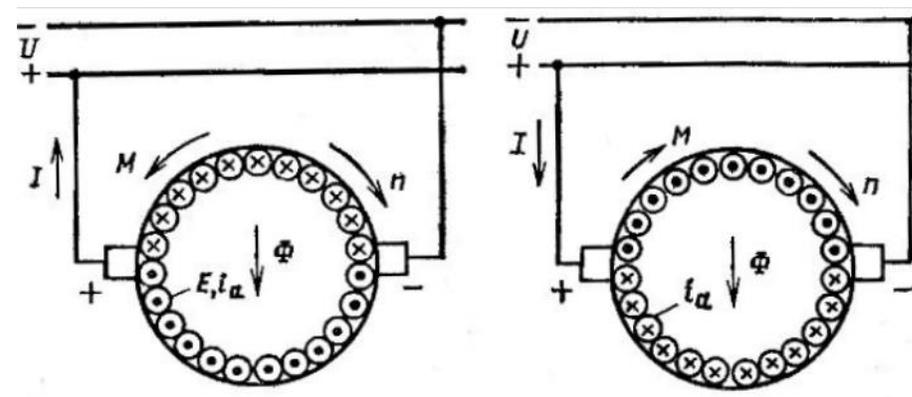
Тогда момент $M = \frac{\rho N}{2\pi a} I \Phi = c_m I \Phi$

Электромагнитный момент МПТ $M = c_m I \Phi$

определяется полным током якоря и магнитным потоком



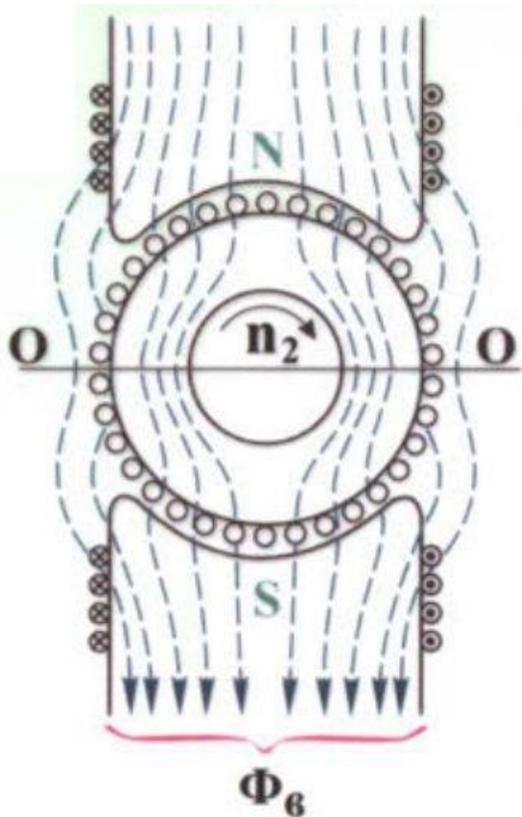
В генераторном режиме $E > U_c$ и ток течет в направлении ЭДС \rightarrow момент против n



В двигательном режиме $E < U_c$ и ток течет против ЭДС \rightarrow момент в сторону n

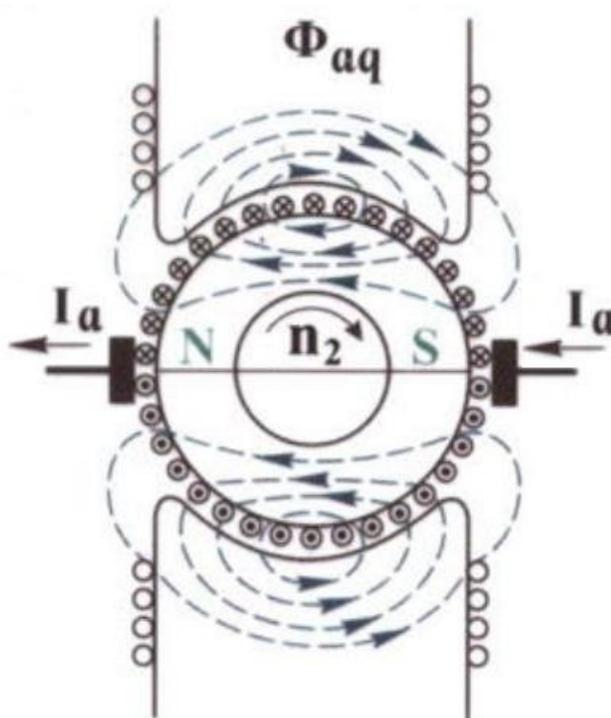
Реакция якоря – воздействие магнитного поля якоря на магнитное поле машины

Ток ОВ → поток возбуждения



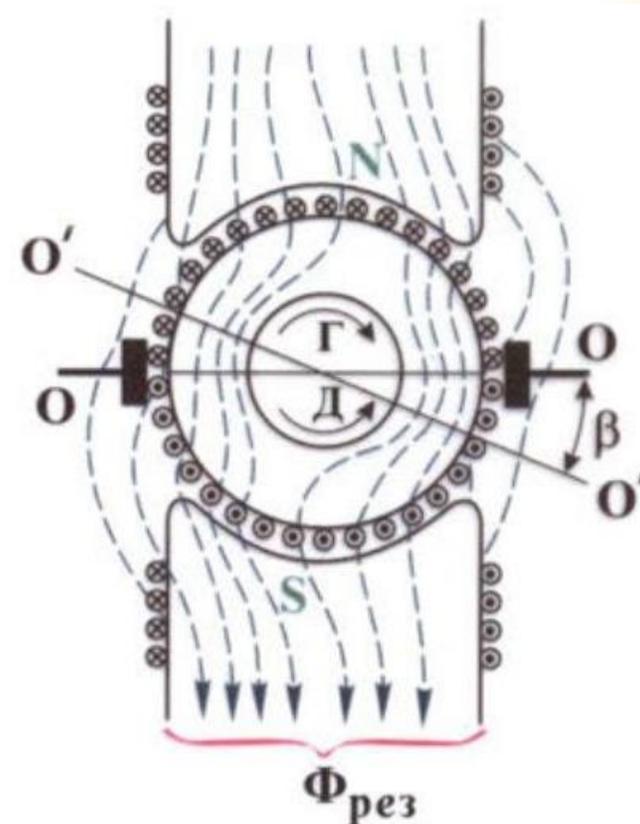
Поперечная ось поля – на ГН

Ток якоря → поток якоря



Продольная ось поля – по оси щеток
Здесь – поперечное поле якоря

Результирующий поток



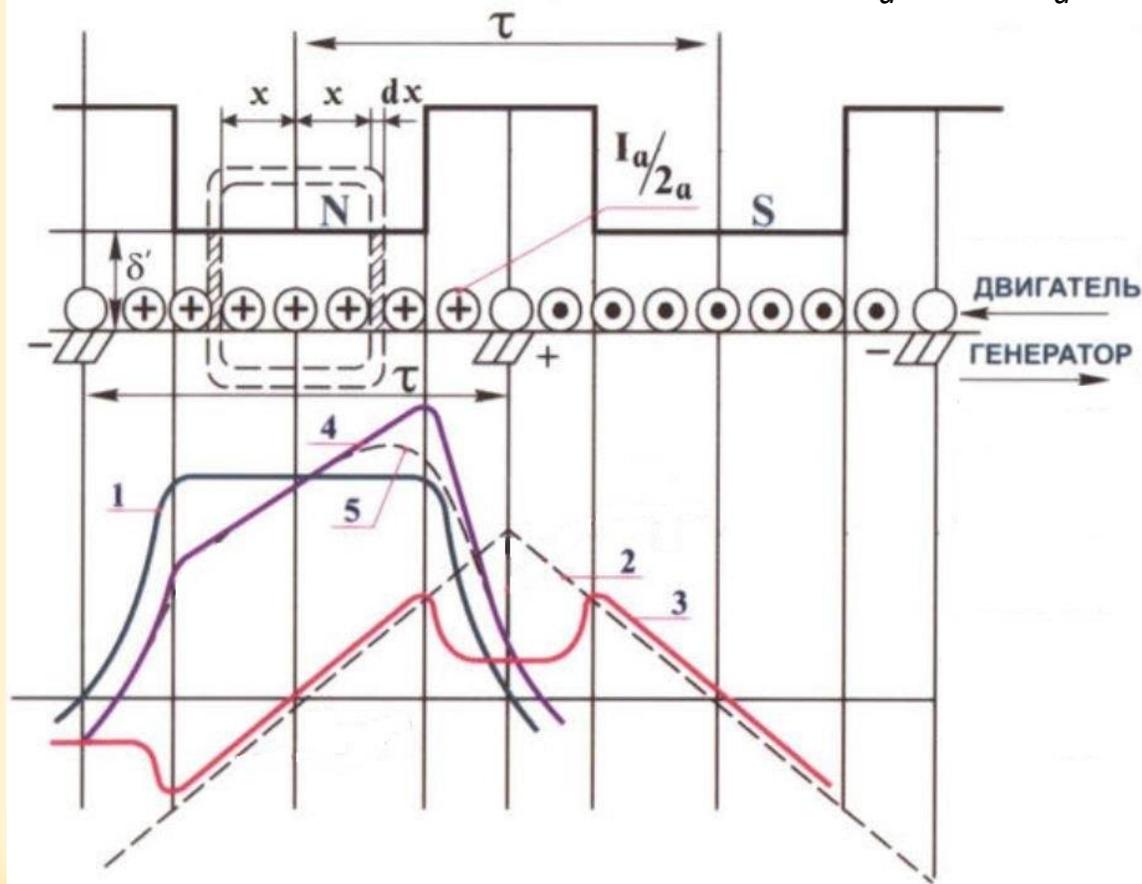
Поле искажается
Ось поля смещается
(физическая нейтраль)

Реакция якоря

Поперечная реакция якоря (щетки на ГН)

Пусть ток $I_a = I/(2a)$ в N проводников равномерно распределен по окружности

Т.е. линейная нагрузка якоря $A = I_a N / (\pi D_a)$



1 – B_δ при ХХ (только поле возбуждения)

2 – МДС поперечной реакции якоря F_{qx}

Силовая линия на x от оси (замкнута вокруг тока)

Охваченный ток $2xA = 2F_{qx}$

МДС на 1 полюс линейна от $F_{qx} = 0$ при $x = 0$

до $F_{qx} = A\tau/2$ при $x = \tau/2$

МДС на 1 полюс $F_{qx} = F_{\delta x} + \sum F_{стx}$

Падение м.напряжения в зазоре $F_{\delta x} = H_{\delta x} \delta_x = \frac{B_{\delta x} \delta_x}{\mu_0}$

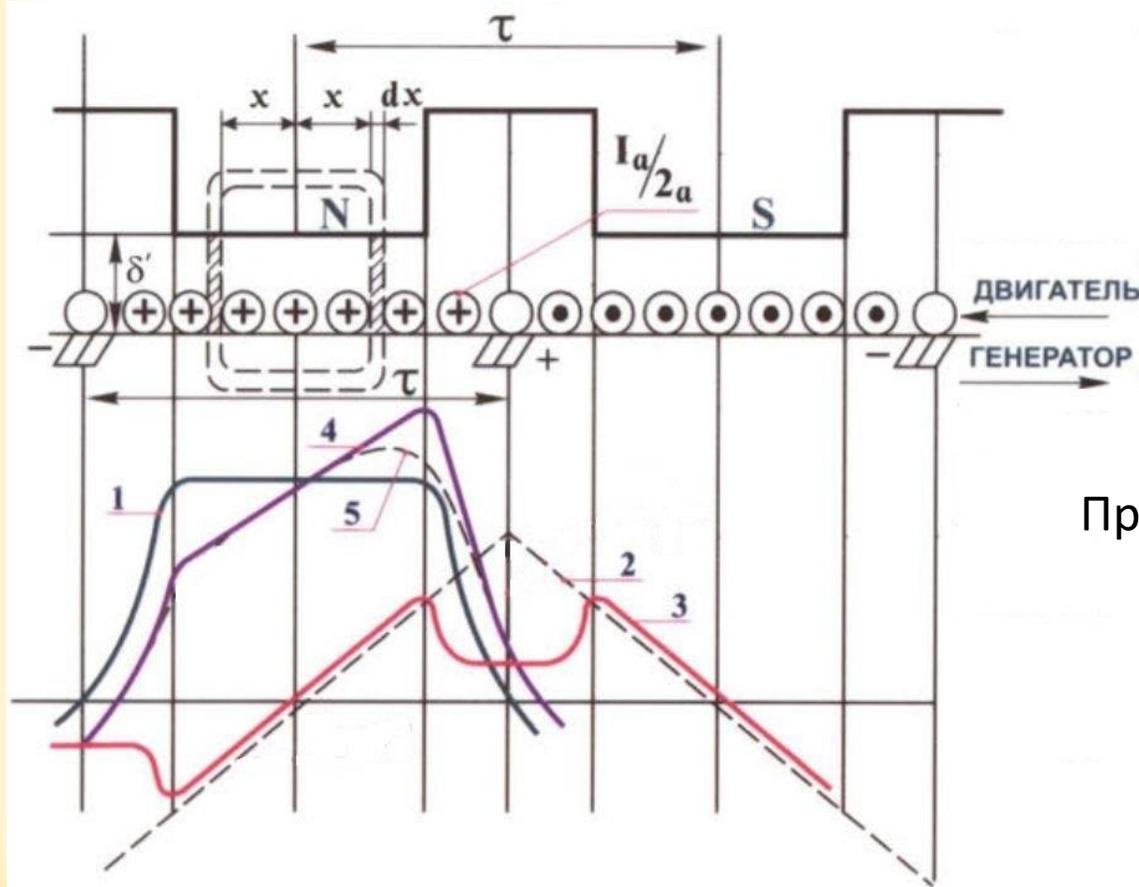
тогда $B_{qx} = \frac{F_{qx} - \sum F_{стx}}{\delta_x / \mu_0}$

В ненасыщенной машине ($\mu_{ст} = \infty$) $B_{qx} = \frac{\mu_0 F_{qx}}{\delta_x}$

3 – Индукция поля поперечной реакции якоря B_{qx}

Реакция якоря

Поперечная реакция якоря (щетки на ГН)



В ненасыщенной машине используем суперпозицию

4 – B_δ результирующего поля ($B_{\delta_{xx}} + B_{qx}$)

а) искажение поля

- на набегающем крае полюса – ослабление
- на сбегающем крае – усиление поля (для ген-ра)

б) смещение физической нейтрали ($B_\delta = 0$)
(сдвиг зависит от I_a)

в) полный поток Φ не изменится

При насыщении рост B_δ ограничен

5 – B_δ результирующего поля при насыщении

- полный поток Φ снизится → размагничивающее действие поперечной реакции якоря
- снизится и ЭДС в ОЯ

Реакция якоря

Продольная реакция якоря

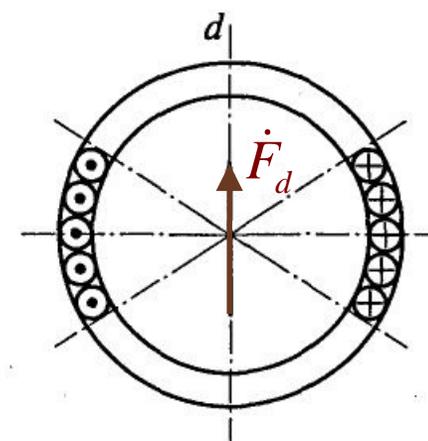
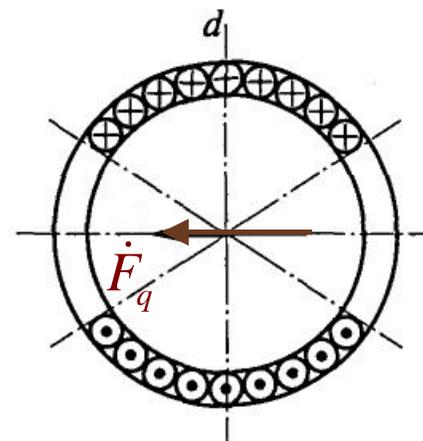
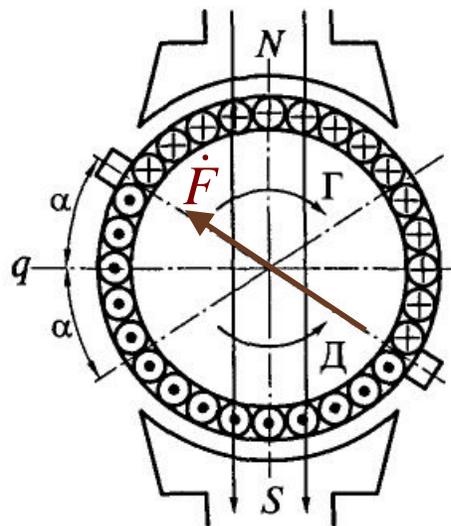
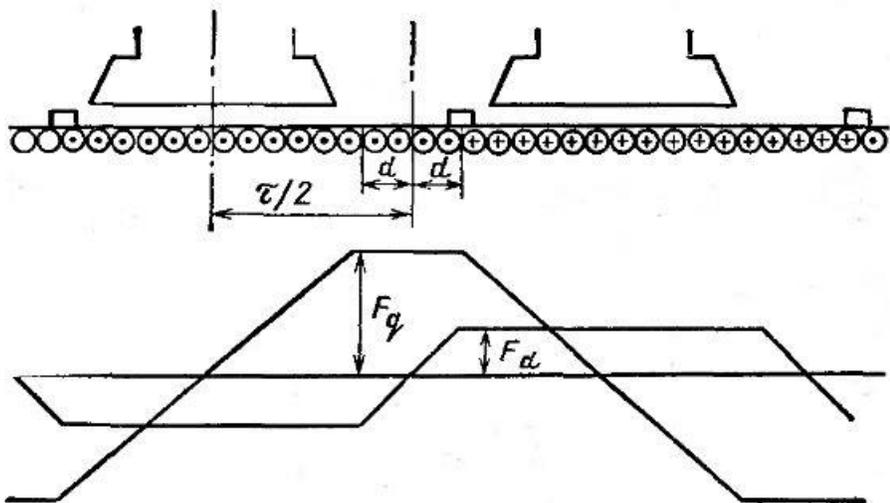
при сдвиге щеток с ГН на α

МДС р.я. направлена по линии щеток

Разложим F на составляющие F_q и F_d

Им соответствуют сектора ОЯ

- F_q – поперечная р.я.
- F_d – продольная р.я.



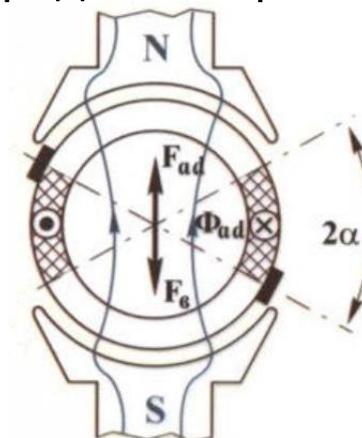
Продольная р.я.

Линейный сдвиг щеток $d = \alpha\tau / \pi$

Тогда максимум МДС

$$F_q = \left(\frac{\tau}{2} - d \right) A = \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\pi} \right) \tau A$$

$$F_d = dA = \alpha \frac{\tau}{\pi} A$$



- размагничивающая
- намагничивающая

Реакция якоря

Влияние р.я. на напряжение между кол.пластинами

$U_k = \Sigma$ ЭДС секций между кол.пластинами

- в петлевой обмотке – 1 секция
- в волной обмотке – p секций
- в сложной обмотке U_k уменьшается в m раз

В общем случае $U_{k\max} = 2pw_s l_\delta v_1 B_{\delta\max} / a$

При нагрузке местами повышается $B_{\delta\max}$

→ повышается $U_{k\max}$

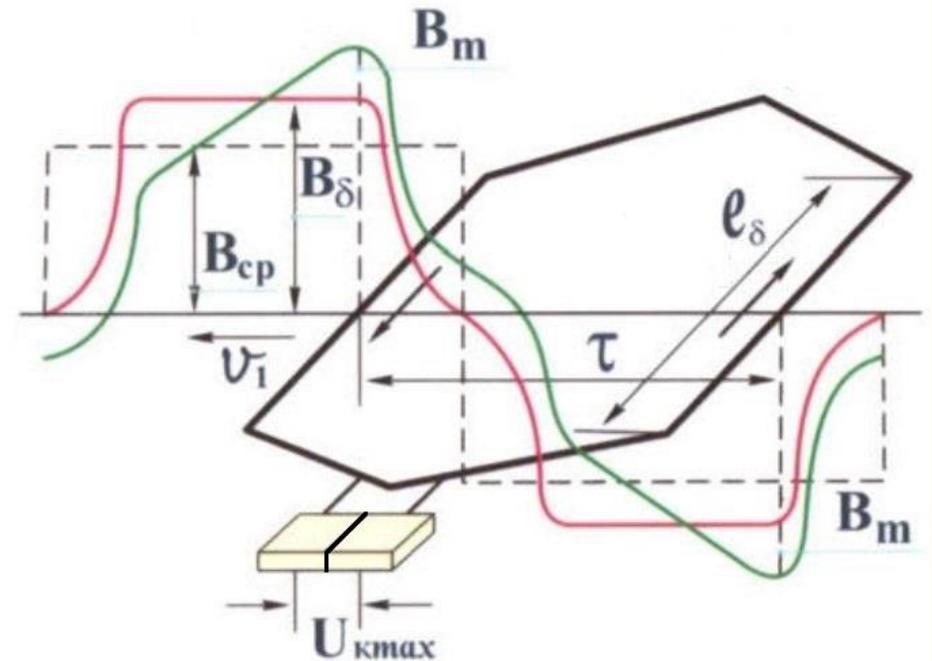
Истирание щеток → угольная пыль

→ разряды между пластинами под действием U_k (потенциальное искрение)

При большом U_k → разряды растягиваются → круговой огонь на коллекторе:
эл. дуга между щетками (КЗ ОЯ в генераторе, КЗ сети в двигателе)

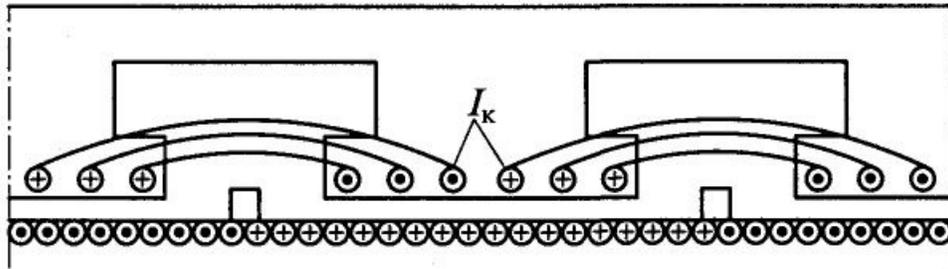
Допустимые $U_{k\max}$: 25...28 В (большая мощность); 30...35 В (средняя); 40...50 В (малая мощность)

Слишком маленький δ нельзя: большая B_δ → большое $U_{k\max}$ – приходится завышать δ



Реакция якоря

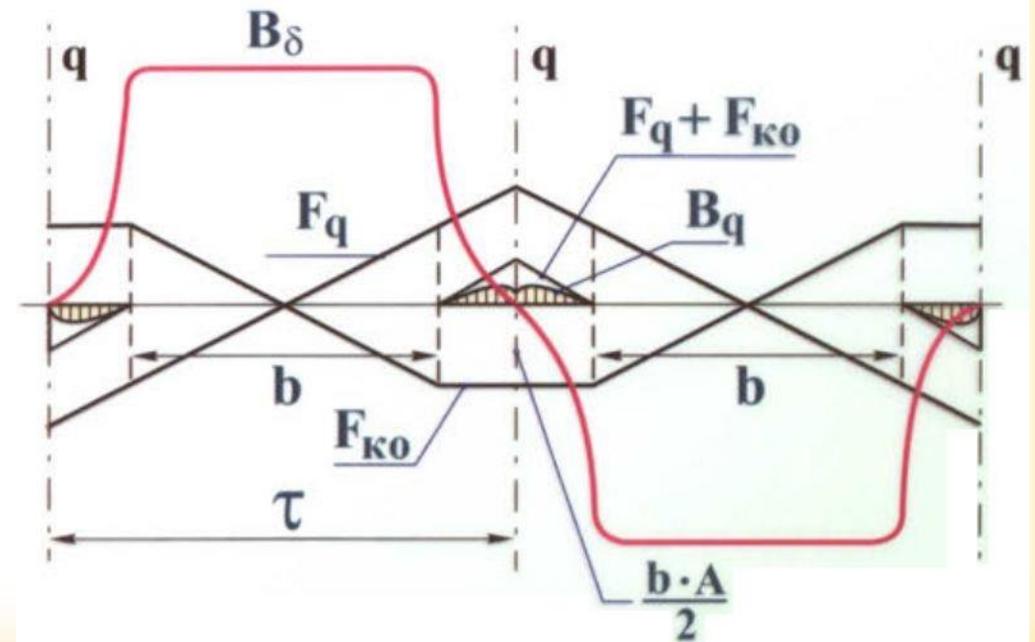
Компенсационная обмотка – компенсация р.я. по поперечной оси
– распределенная обмотка в пазах полюсных наконечников
Для автоматической компенсации КО вкл. последовательно с ОЯ



КО применяют в машинах большой мощности и ДПТ с резкопеременной нагрузкой

- минимальный зазор → уменьшение ОВ, ее габаритов и размеров полюсов

МДС компенсационной обмотки $F_{ко}$
Полная компенсация – только под полюсом



Машины постоянного тока

5.4. КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Коммутация

– процесс переключения секции из одной парал. ветви в другую

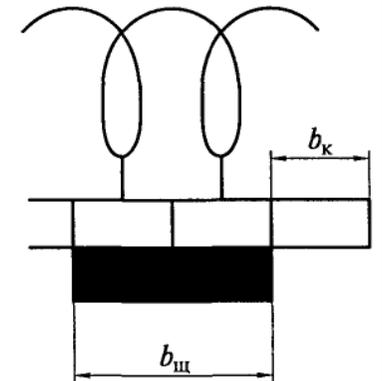
Коммутируемая секция

Период коммутации

$$T_K = \frac{b_{щ}}{v_K}$$

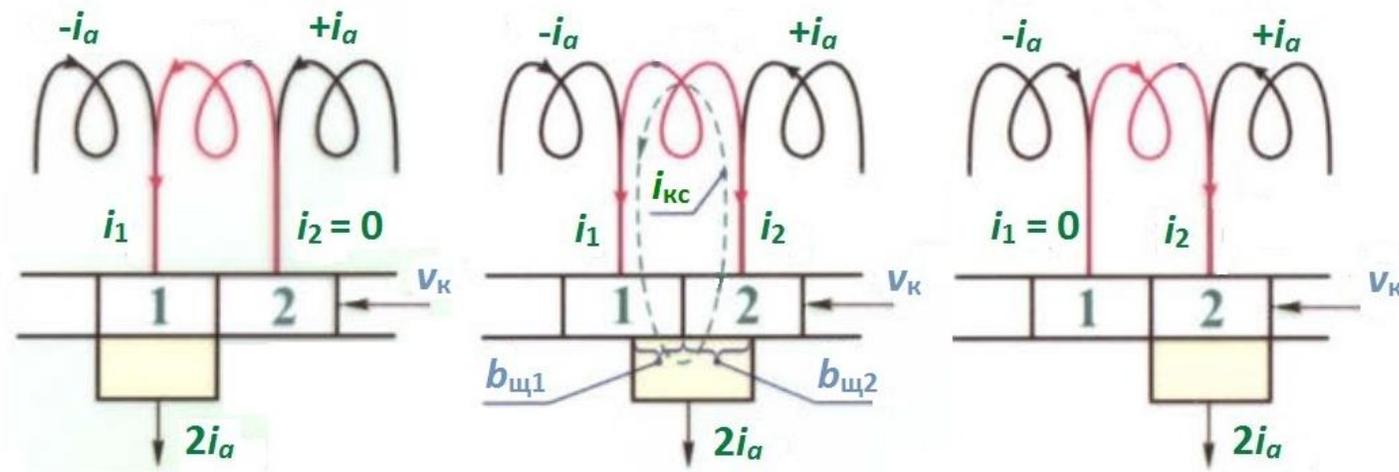
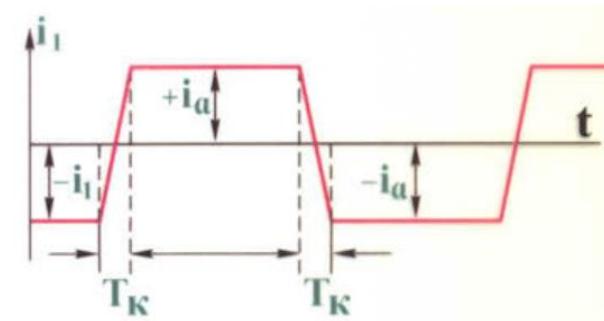
$$v_K = \pi D_K \frac{n}{60} = K b_K \frac{n}{60} \quad \text{тогда} \quad T_K = \frac{60 \beta_{щ}}{K n}$$

где $\beta_{щ} = \frac{b_{щ}}{b_K}$ – коэф-т щеточного перекрытия (1,5...3,0)



Для $K = 120$, $\beta_{щ} = 2$, $n = 1000$ об/мин $T_K = 0,001$ с

Ток в коммутируемой секции: $+i_a \rightarrow$ перех. процесс $\rightarrow -i_a$



При коммутации – искрение на коллекторе

- портит поверхность щеток и коллектора

Причины искрения

- Механические (неровности, биения коллектора, вибрация щеток)
- Потенциальные (повышение напряжения $U_{\text{кmax}}$)
- Электромагнитные

При изменении тока с $+i_a$ на $-i_a \rightarrow$ ЭДС самоиндукции $e_s = -L_s \frac{di_a}{dt}$
+ ЭДС взаимоиндукции с соседними коммутируемыми секциями

$$\text{Реактивная ЭДС} \quad e_p = e_s + \sum e_M$$



Поперечная р.я. \rightarrow сдвиг физической нейтрали $\rightarrow B_\delta \neq 0$ в зоне коммутации \rightarrow ЭДС вращения

Результирующая ЭДС $\Sigma e = e_p \pm e_{вр}$ \rightarrow добавочный ток коммутации i_d

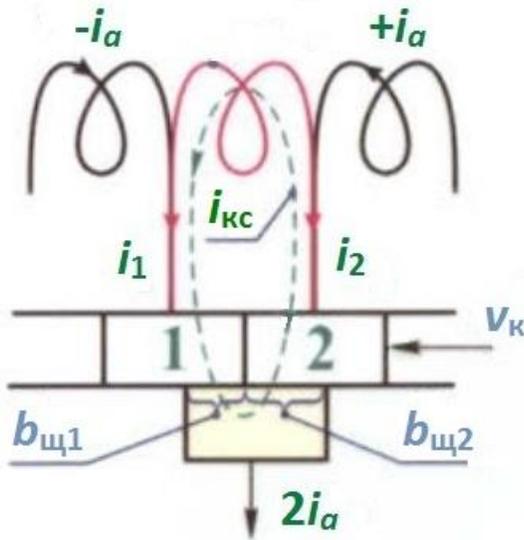
Если при $t = T_k$ $i_d \neq 0$, разрыв тока, высвобождение запасенной энергии $\frac{1}{2} L_s i_d^2 \rightarrow$ искровой разряд

Влияет на процесс и переходное сопротивление щеточного контакта (ВАХ)

- графитные, угольно-графитные щетки: $\Delta U_{щ} = 1,5...3$ В (на пару)
- металлографитные щетки: $\Delta U_{щ} = 0,5...2$ В (на пару) – микромашины

Виды коммутации

Классическая теория коммутации – пусть переходное сопротивление $r_{щ} = \text{Const}$
 Простая петлевая обмотка, $b_{щ} = b_k$, ток коммутируемой секции $i_{кc}$ от $+i_a$ до $-i_a$



По 2 з-ну Кирхгофа для кс (пренебрегая $r_{кc}$) $i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = \Sigma e$

По 1 з-ну Кирхгофа $i_1 = i_a + i_{кc}$ $i_2 = i_a - i_{кc}$

тогда
$$i_{кc} = i_a \frac{r_{щ2} - r_{щ1}}{r_{щ1} + r_{щ2}} + \frac{\Sigma e}{r_{щ}} = i_a \frac{1 - r_{щ1} / r_{щ2}}{1 + r_{щ1} / r_{щ2}} + \frac{\Sigma e}{r_{щ}}$$

где $r_{щ} = r_{щ1} + r_{щ2}$; $r_{щi} \sim 1 / S_{щi}$ ($S_{щi} = b_{щi} l_{щ}$)

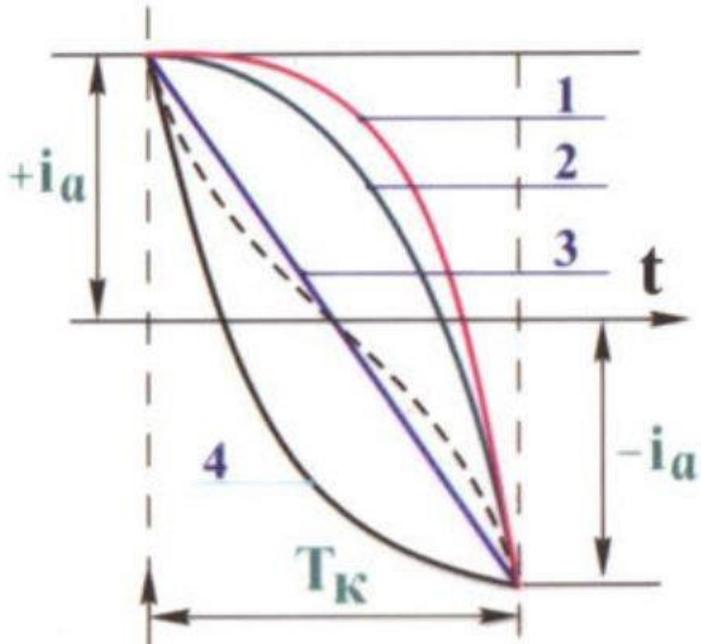
$$\frac{r_{щ1}}{r_{щ2}} = \frac{S_{щ2}}{S_{щ1}} = \frac{b_{щ2} l_{щ}}{b_{щ1} l_{щ}} = \frac{v_k t}{v_k (T_k - t)} = \frac{t}{T_k - t}$$

Ток в коммутируемой секции
$$i_{кc} = i_a \left(1 - 2 \frac{t}{T_k} \right) + \frac{\Sigma e}{r_{щ}}$$

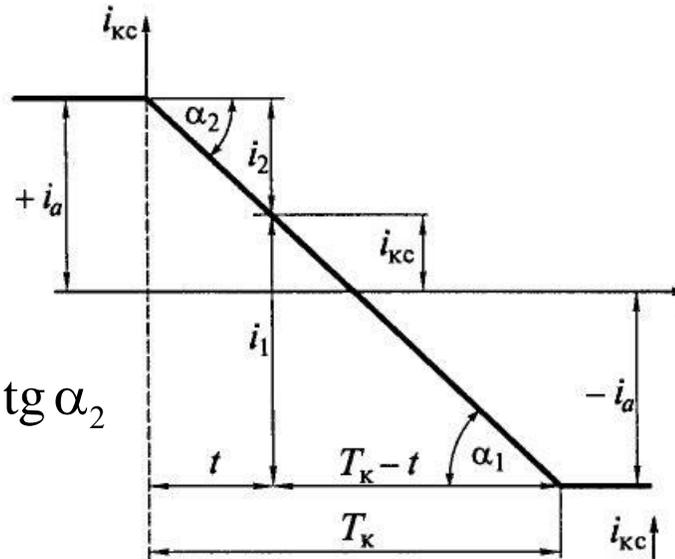
– зависит от величины и знака $\Sigma e = e_p \pm e_{вр}$

Виды коммутации

- **Прямолинейная (3)**
($\Sigma e = 0$, когда e_p скомпенсирована $e_{вр}$)



Плотность тока
 $J_{щ1} \sim \text{tg } \alpha_1$; $J_{щ2} \sim \text{tg } \alpha_2$
 – равномерно
 распределена

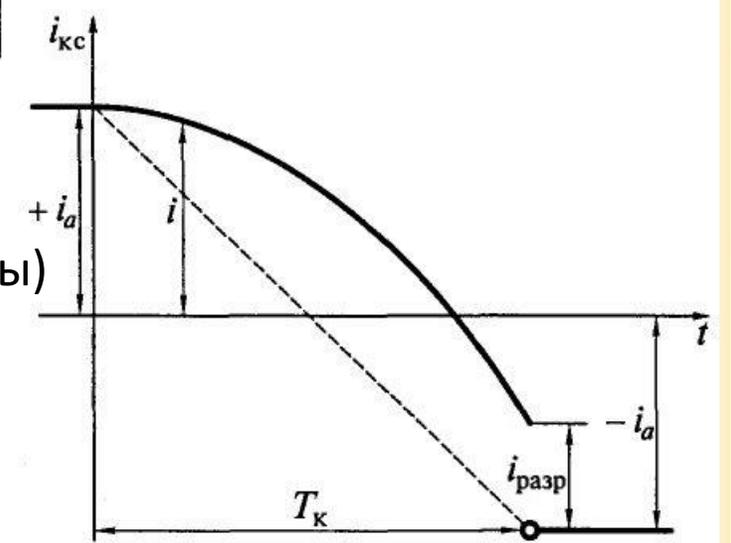


$$i_{кc} = i_a \left(1 - 2 \frac{t}{T_k} \right) + \frac{\Sigma e}{r_{щ}}$$

- **Замедленная (1, 2)**
($\Sigma e > 0$, когда $e_p > e_{вр}$ или сонаправлены)

- $i_{доб}$ задерживает изменение $i_{кc}$
- искрение сбегающего края щетки

$$J_{щ1} > J_{щ2}$$



- **Ускоренная (4)**
($\Sigma e < 0$, когда $e_p < e_{вр}$ и противоположны)
 • добавочный ток ускоряет изменение $i_{кc}$
 • предпочтительный вид коммутации!

Способы улучшения коммутации

Искрение – разрыв $i_{\text{доб}}$ → надо уменьшать $i_{\text{доб}}$

$$i_{\text{доб}} \approx \Sigma e / r_{\text{щ}} = (e_p \pm e_{\text{вр}}) / r_{\text{щ}}$$

- **Увеличение сопротивления коммутируемой секции**

r_s мало и влияет на КПД → подбирают щетки с большим $\Delta U_{\text{щ}}$

$i_{\text{доб}}$ замыкается поперек щетки → анизотропные щетки

- **Уменьшение реактивной ЭДС**

$$e_p = 2w_s l_{\delta} A v_a \xi$$

ξ – удельная магнитная проводимость для потоков рассеяния коммутируемых секций (ф-ла Пихельмайера)

Увеличивают число секций, чтобы уменьшить w_s (до 1)

Уменьшают l_{δ} за счет увеличения D_a

Уменьшают v_a (уменьшать A нецелесообразно)

Для уменьшения ξ – широкие неглубокие пазы, укорочение y_1

Применяют более широкие щетки (увеличивается T_k → уменьшается $di_{\text{КС}}/dt$)

Желательно иметь $\Sigma e = 0,5 \dots 0,7$ В

Способы улучшения коммутации

Искрение – разрыв $i_{\text{доб}} \rightarrow$ надо уменьшать $i_{\text{доб}}$

$$i_{\text{доб}} \approx \Sigma e / r_{\text{щ}} = (e_p \pm e_{\text{вр}}) / r_{\text{щ}}$$

- **Создание коммутирующего поля**

Магнитное поле в зоне коммутируемых секций так, чтобы $e_{\text{вр}} = -e_p$,
лучше $e_{\text{вр}} = -(1,1...1,15)e_p$

1. Сдвиг щеток с нейтрали (при отсутствии ДП)

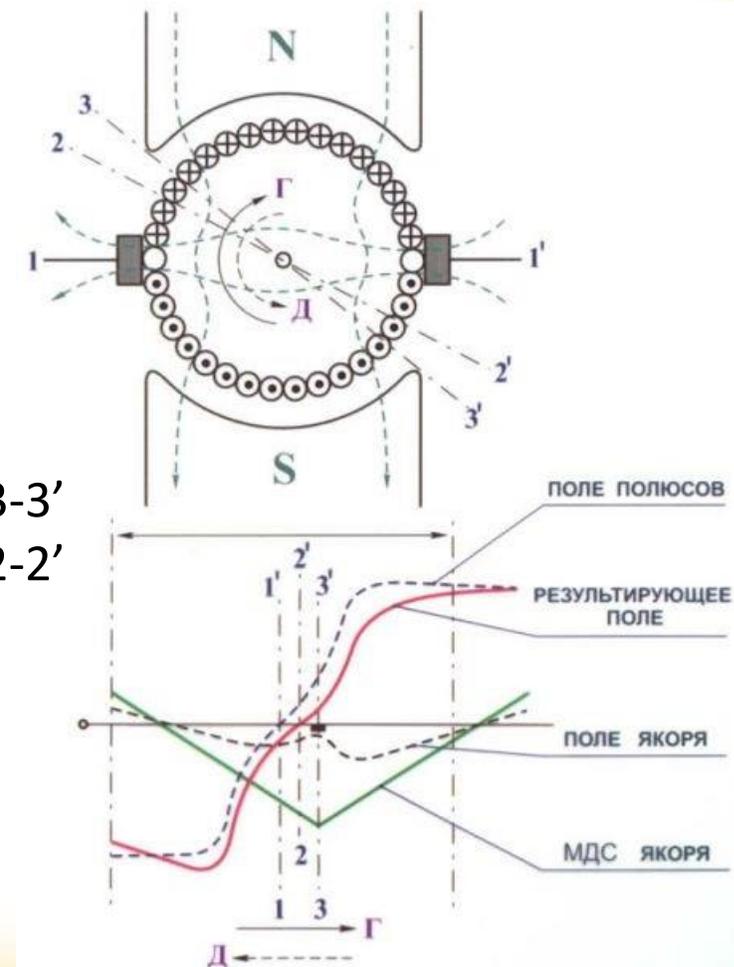
- Поперечная р.я. смещает нейтраль \rightarrow надо сдвинуть щетки так, чтобы коммутируемые секции оказались за физической нейтралью

Проблемы заводской настройки сдвига щеток:

- компенсация возможна только для одного I_a
- нельзя реверсировать машину
- в Γ и Δ разное направление $I_a \rightarrow$ требуется разное направление сдвига

Щетки на 3-3'

Физическая нейтраль на 2-2'



Способы улучшения коммутации

Искрение – разрыв $i_{\text{доб}}$ → надо уменьшать $i_{\text{доб}}$

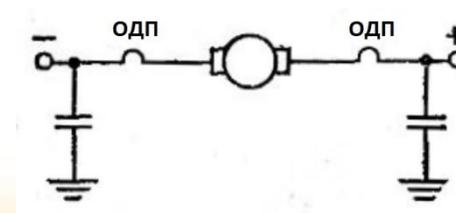
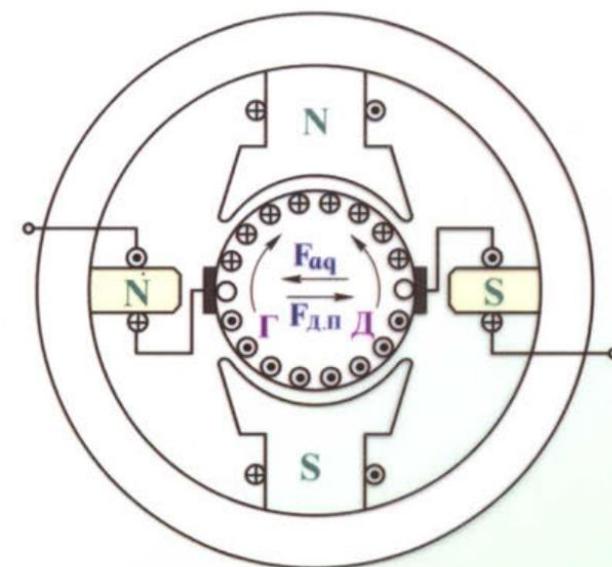
$$i_{\text{доб}} \approx \Sigma e / r_{\text{щ}} = (e_p \pm e_{\text{вр}}) / r_{\text{щ}}$$

- **Создание коммутирующего поля**

Магнитное поле в зоне коммутируемых секций так, чтобы $e_{\text{вр}} = -e_p$,
лучше $e_{\text{вр}} = -(1,1...1,15)e_p$

- 2. Применение дополнительных полюсов (во всех МПТ более 1 кВт)

- расположены на поперечной оси
 - включены последовательно с ОЯ
 - полярность так, чтобы $e_{\text{вр}}$ противоположно e_p
(поток Φ_d встречно Φ_q от ОЯ)
 - магнитная цепь ненасыщена (тогда B_d и $e_{\text{вр}}$ пропорциональны I_a)
 - зазор увеличен (ради линейности и снижения пульсаций B)
-
- Для борьбы с ВЧ помехами обмотки ДП включают симметрично и используют фильтры



Машины постоянного тока



5.5. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Генераторы постоянного тока

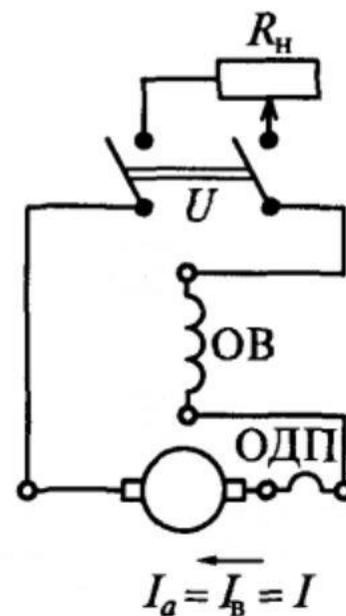
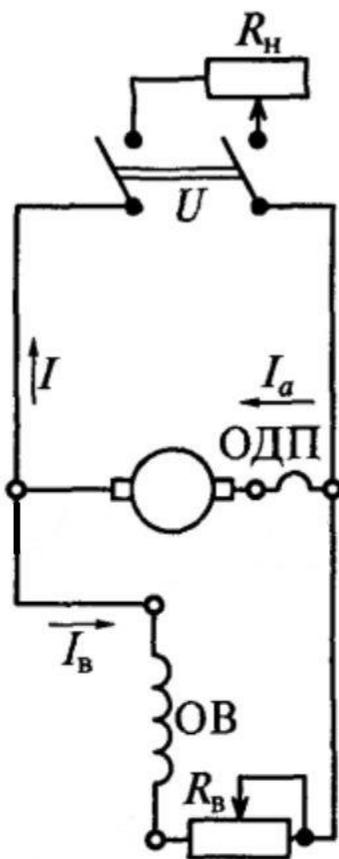
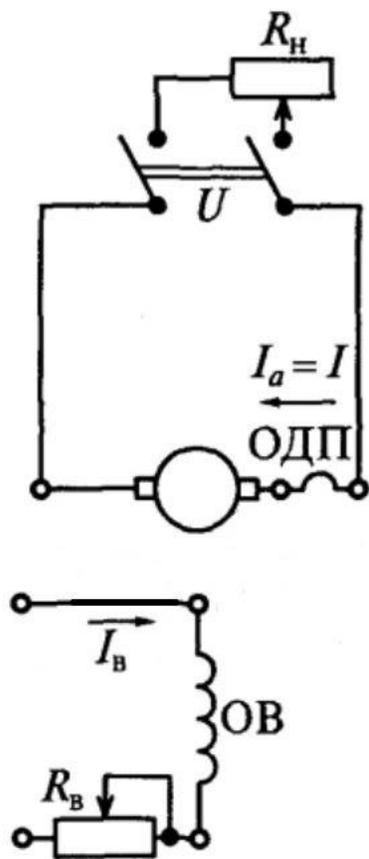
Классификация ГПТ (по способу возбуждения)

- с независимым возбуждением (электромагнитное / магнитоэлектрическое)
- с самовозбуждением (параллельное / последовательное / смешанное)

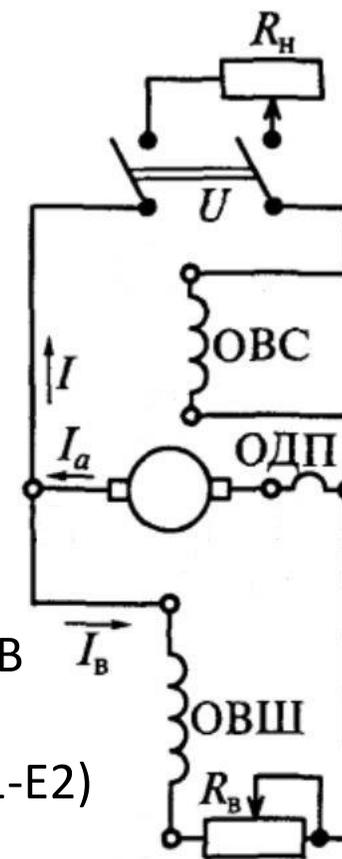
ОЯ (А1-А2)
ОДП (В1-В2)
КО (С1-С2)

Независимая ОВ (F1-F2)

Мощность возб.
– 1...5 % от P_2



Последовательная ОВ
(D1-D2) (сериесная)
Параллельная ОВ (E1-E2)
(шунтовая)



Уравнения генераторов постоянного тока

Уравнение равновесия напряжений (цепь якоря генератора)

$$U = E - I_a \Sigma r_a - \Delta U_{\text{щ}}$$

Сопротивление цепи якоря $\Sigma r_a = r_a + r_d + r_c + r_k$

$\Delta U_{\text{щ}} = 1,7 \dots 3$ В (на пару щеток)

Упрощенно $\Delta U_{\text{щ}} \approx 0$ или $r_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} / I_H = \text{Const}$, тогда $U = E - I_a \Sigma R_a$, где $\Sigma R_a = \Sigma r_a + r_{\text{щ}}$

Ток якоря ГПТ обусловлен ЭДС генератора
(и направлен в сторону E) $I_a = \frac{E - U}{\Sigma R_a}$

Уравнение баланса мощности $UI_a = EI_a - I_a^2 \Sigma r_a - \Delta U_{\text{щ}} I_a$

Подводимая мощность

Отдаваемая мощность ГПТ $UI_a = P_{\text{ЭМ}} - P_{\text{эа}} - P_{\text{э,щ}}$

$$P_1 = P_{\text{ЭМ}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{доб}}$$

ГПТ независимого возбуждения

$$U_B = I_B \Sigma r_B, \text{ где } \Sigma r_B = r_B + R_B \quad \text{Полезная мощность} \quad P_2 = UI_a$$

ГПТ параллельного и смешанного возбуждения

$$I_B \Sigma r_B = U; \quad I_a = I + I_B \quad \text{Полезная мощность} \quad P_2 = UI_a - P_B = UI$$

Условия самовозбуждения генераторов

В ГПТ параллельного и смешанного возбуждения ОВ питается от ОЯ

Процесс самовозбуждения:

$n = \text{Const}: \Phi_{\text{ост}} \rightarrow E_{\text{ост}} (1...3 \% \text{ от } U_{\text{н}}) \rightarrow I_{\text{в1}} = E_{\text{ост}} / \Sigma r_{\text{в}} \rightarrow \Phi_{\text{в1}}$

Если направление $\Phi_{\text{в1}}$ совпадает с $\Phi_{\text{ост}}$, то $E_1 > E_{\text{ост}}$

$E_1 \rightarrow I_{\text{в2}} \rightarrow \Phi_{\text{в2}} \rightarrow E_2 \rightarrow \dots$

Установившийся режим при $E = I_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в}}$ (точка А)

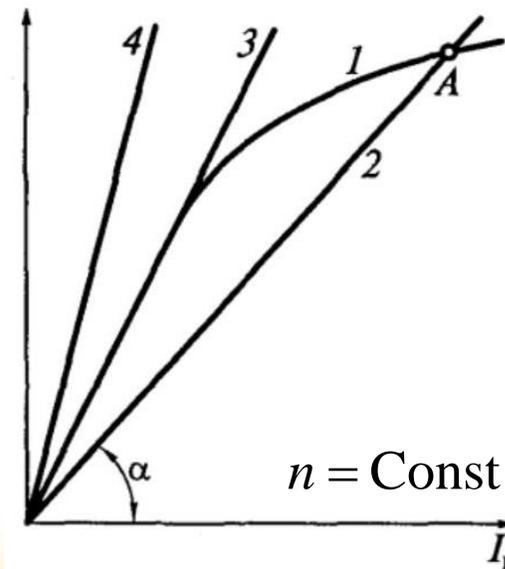
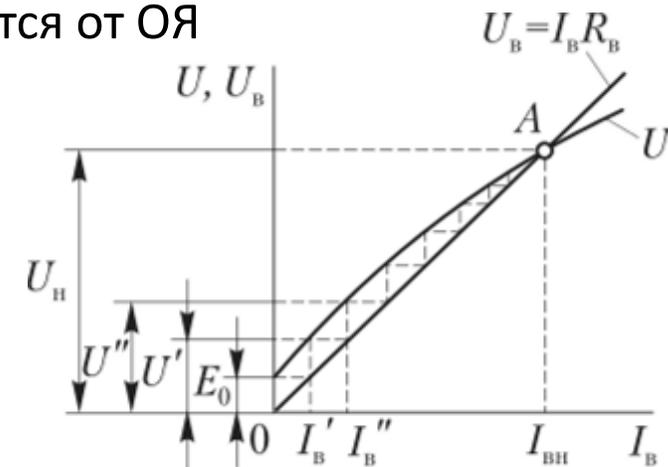
Условия самовозбуждения:

- Наличие $\Phi_{\text{ост}}$
- $\Phi_{\text{в}}$ сонаправлен с $\Phi_{\text{ост}}$
- $\Sigma r_{\text{в}} <$ критического r (или $n >$ критической n)

При увеличении $\Sigma r_{\text{в}}$ растёт $I_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в}} \rightarrow$

(4) – нет пересечения (нет самовозбуждения)

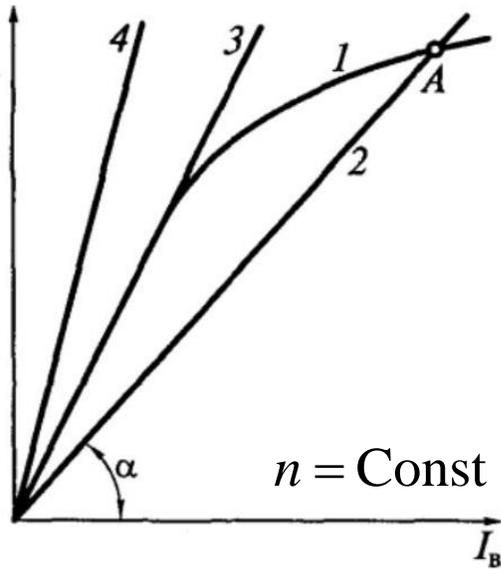
(3) – критическое $\Sigma r_{\text{в}}$



1 – $E = f(I_{\text{в}})$ (XXX)
 2,3,4 – $I_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в}} = f(I_{\text{в}})$ (ВАХ ОВ)
 ($\Sigma r_{\text{в}(2)} < \Sigma r_{\text{в}(3)} < \Sigma r_{\text{в}(4)}$)

Условия самовозбуждения генераторов

ЭДС (и характеристика ХХ) зависит от n

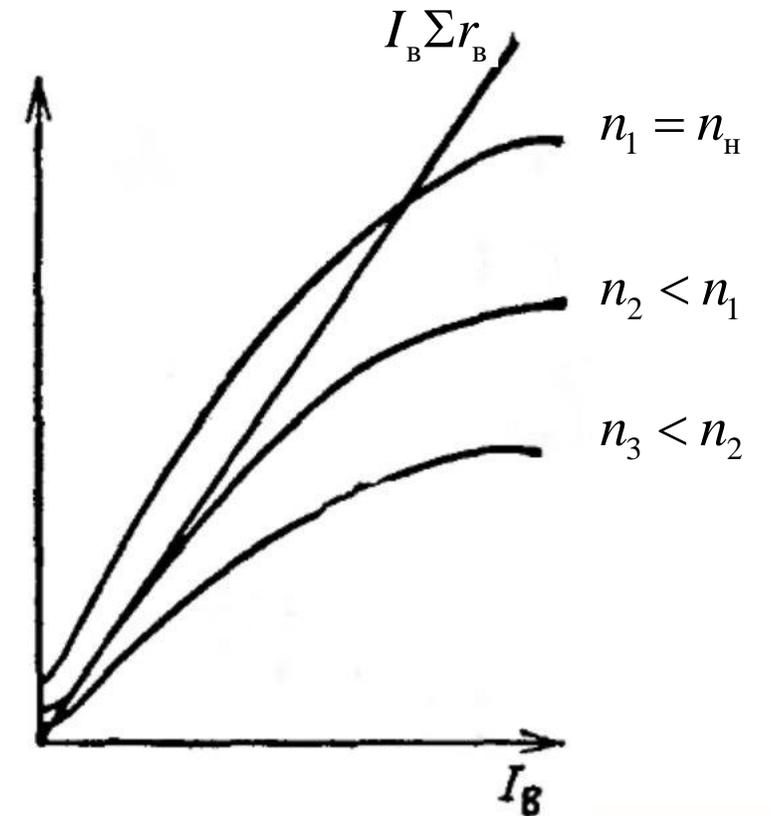


$$1 - E = f(I_B) \quad (\text{ХХХ})$$

$$2, 3, 4 - I_B \Sigma r_B = f(I_B) \quad (\text{ВАХ ОВ})$$

$$(\Sigma r_{B(2)} < \Sigma r_{B(3)} < \Sigma r_{B(4)})$$

- Для данного Σr_B своя критическая n
- Для каждой n свое критическое Σr_B



Характеристики генераторов постоянного тока

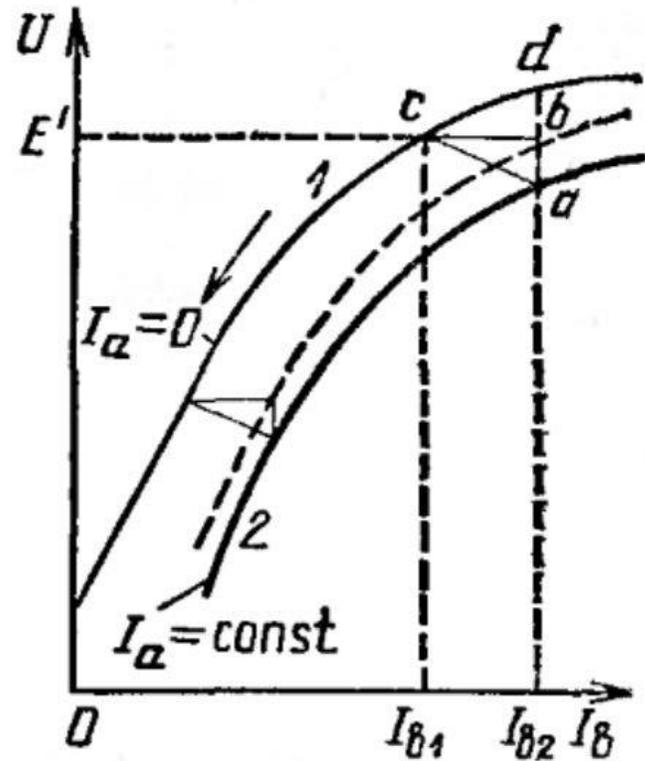
Характеристика ХХ $E = f(I_B)$ при $I_a = 0$ и $n = \text{const}$

(оценка степени насыщения магнитной цепи)

При $I_B = 0$ – остаточная ЭДС (1...3% от U_H)

При снятии характеристики I_B изменять монотонно

(гистерезис стали)



всегда $n = \text{Const}$

Нагрузочная характеристика

$U = f(I_B)$ при $I_a = \text{Const}$

(оценка размагничивающего действия реакции якоря)

При нагрузке $U < E$ из-за $I_a \Sigma r_a$ (отрезок ab) и размагничивающей р.я. (отрезок bd)

I_{B1} обеспечивает E' при ХХ $I_a = 0$

I_{B2} обеспечивает E' при нагрузке I_a

Размагничивающая составляющая

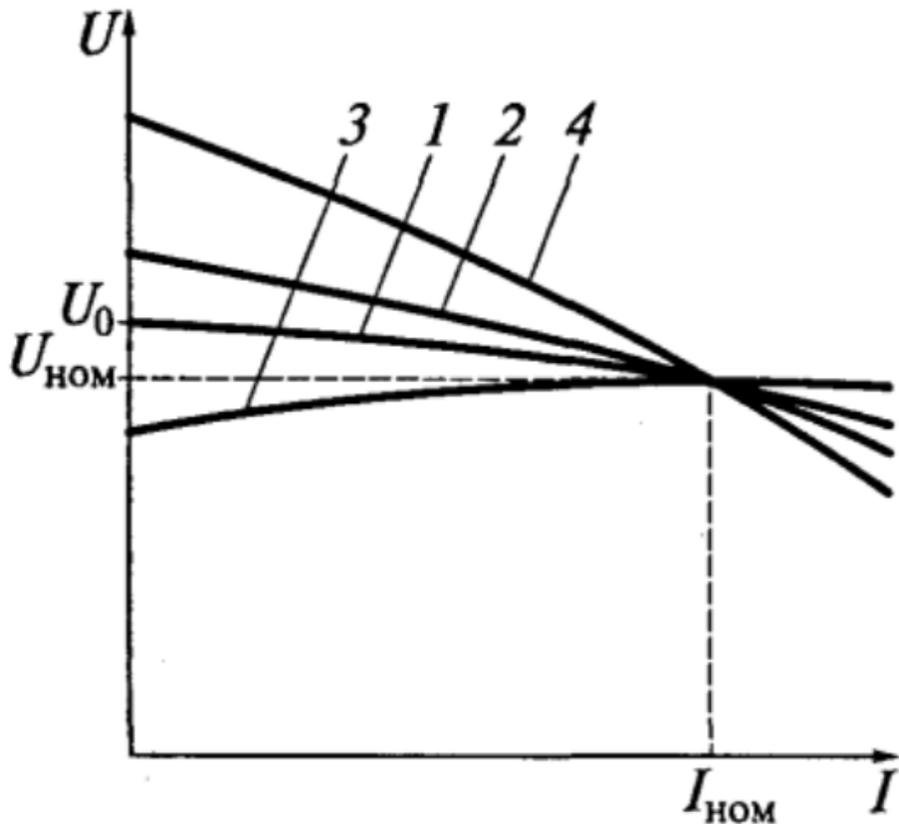
поперечной р.я. $F_{aq} \sim (I_{B2} - I_{B1})$

abc – характеристический треугольник

Характеристики генераторов постоянного тока

Внешняя характеристика $U = f(I_a)$ при $I_B = \text{Const}$ или $\Sigma r_B = \text{Const}$ (и $n = \text{Const}$)

Характеристика при уменьшении нагрузки: от точки U_H при I_H (и I_{BH})



1 – независимое возб. ($I_B = \text{Const}$)

- изменение напряжения $\Delta U = 10...15\%$ ($I\Sigma R$ и р.я.)
- ток КЗ $I_K = (5...10)I_H$

2 – параллельное возб. ($\Sigma r_B = \text{Const}$)

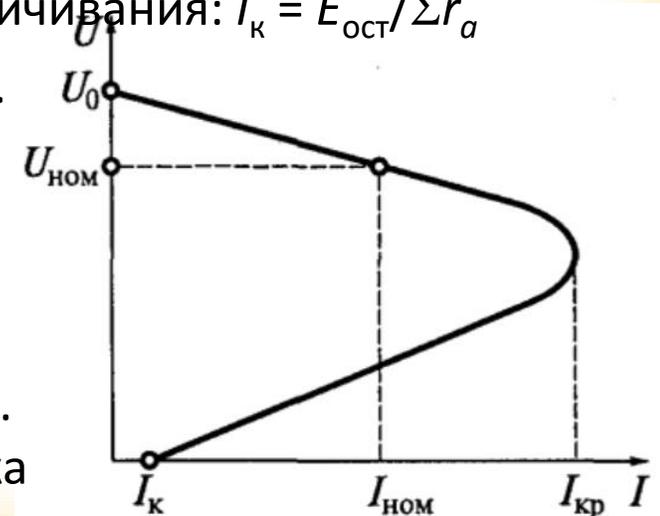
- $\Delta U = 15...20\%$, так как $I_B = U/\Sigma r_B$ определяет E
- при уменьшении R_H ток растет до $I_{кр} = (1,5...2)I_H$, затем падает из-за размагничивания: $I_K = E_{\text{ост}}/\Sigma r_a$

3 – смешанное согласное возб.

- основная МДС от параллельной ОВ, последовательная ОВ компенсирует р.я.

4 – смешанное встречное возб.

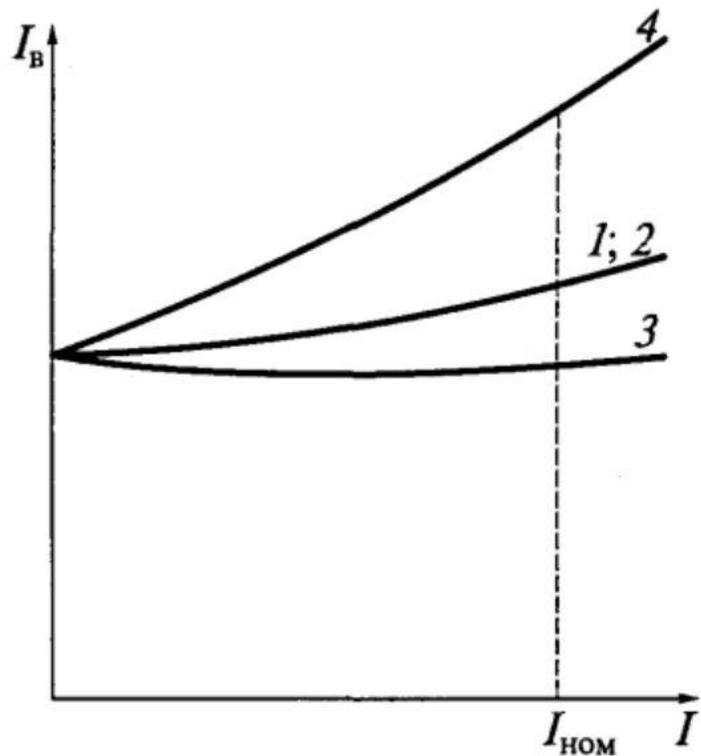
- «падающая» характеристика



Характеристики генераторов постоянного тока

Регулировочная характеристика $I_B = f(I_a)$ при $U = U_n$ (и $n = \text{Const}$)

Характеристика при увеличении нагрузки: от точки ХХ



- 1 – независимое возб.
- противоположно внешней характеристике
- 2 – параллельное возб.
- совпадает с 1, т.к. $U = \text{Const}$
- 3 – смешанное согласное возб.
- 4 – смешанное встречное возб.

Применение ГПТ

Независимое возб. – регулятор U пост.тока
(регулирование n в ДПТ)

Параллельное и смешанное согласное возб. –
автономный источник пост.тока

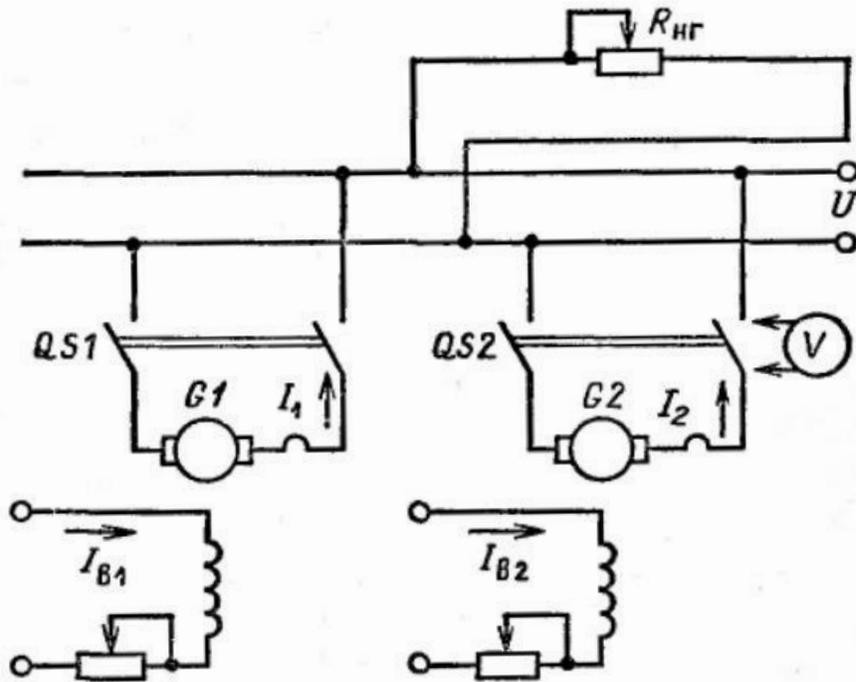
Смешанное согласное возб. – автоматическое
поддержание U при резком изменении нагрузки

Смешанное встречное возб. – сварочный генератор

Параллельная работа генераторов постоянного тока

Причины включения ГПТ на параллельную работу – аналогичны трансформаторам

- резервирование мощности
- колебания нагрузки
- предельная единичная мощность генератора



Включение генератора на параллельную работу
– не должно вызывать броски тока и напряжения

- ЭДС равна напряжению сети
- При включении $G2$ ток $I_2 = (E_2 - U)/R_{a2}$
Регулирование ЭДС E_2 с помощью I_{B2}
- Полярность ЭДС соответствует сети (+ к + / - к -)
- Иначе ЭДС суммируются $I_k = (E_2 + E_1)/(R_{a2} + R_{a1})$
– короткое замыкание!

Проверка полярности

- магнитоэлектрический вольтметр
- ΔU между $G2$ и сетью (д.б. = 0)

Параллельная работа генераторов постоянного тока

Перевод нагрузки с одного генератора на другой

(в том числе снижение нагрузки до 0 перед отключением)

Ток нагрузки $I_1 = (E_1 - U)/R_{a1}$ и $I_2 = (E_2 - U)/R_{a2}$

→ необходимо регулировать E_1 и E_2 с помощью $I_{в1}$ и $I_{в2}$ (согласованно, чтобы $U = \text{const}$)

Распределение нагрузки между генераторами

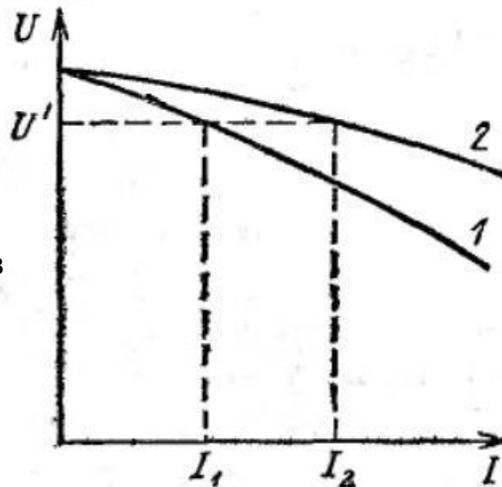
– зависит от внешней характеристики генератора

Если при набросе нагрузки

U сети снизится до U' ,

токи будут разные: I_1 и I_2

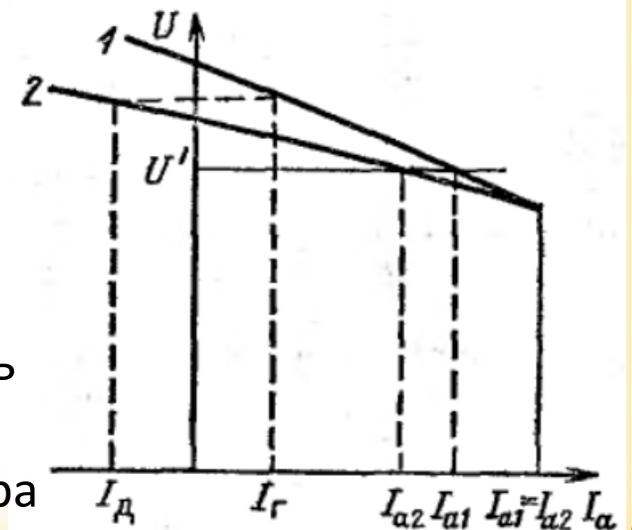
Регулирование – с помощью $I_{в}$



Для сравнения характеристик лучше использовать

относительные токи $I_1/I_{1н}$ и $I_2/I_{2н}$

При сбросе нагрузки возможен переход G2 в двигательный режим, если $E_2 < U_c$ (нежелательно)



Надо регулировать ток возбуждения каждого генератора

Машины постоянного тока



5.6. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока

Область применения → регулирование n в широком диапазоне

Классификация ДПТ (по способу возбуждения)

- с независимым возбуждением (электромагнитное / магнитоэлектрическое)
- с самовозбуждением (параллельное / последовательное / смешанное)

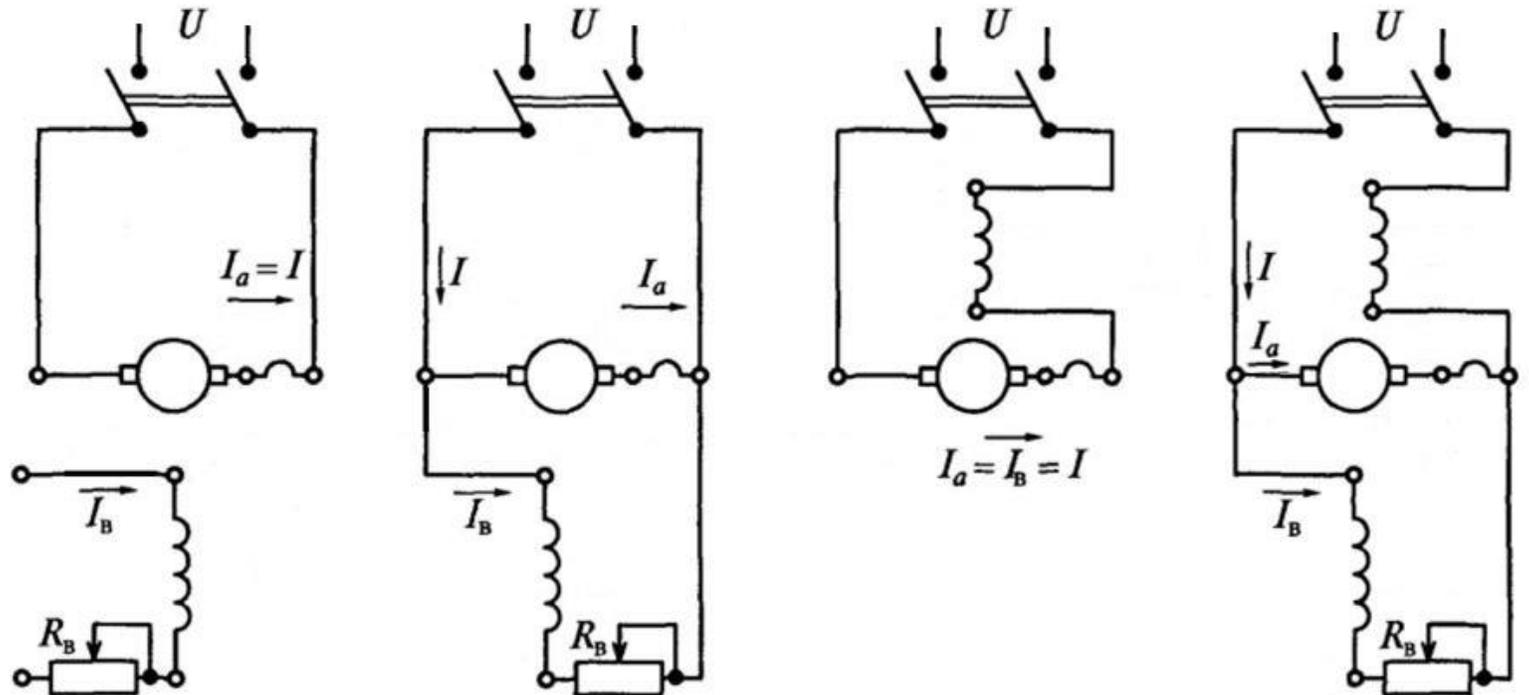
Ток якоря ДПТ обусловлен $U_{\text{сети}}$
(и направлен против E)

ДПТ независимого и
последовательного
возбуждения

$$I_a = I$$

ДПТ параллельного и
смешанного
возбуждения

$$I_a = I - I_B$$



Уравнения двигателей постоянного тока

Уравнение равновесия напряжений

$$U = E + I_a \Sigma r_a + \Delta U_{\text{щ}} \quad \text{где } \Sigma r_a = r_a + r_d + r_c + r_k$$

Также можно упростить $U = E + I_a \Sigma R_a$ где $\Sigma R_a = \Sigma r_a + r_{\text{щ}}$

Ток якоря ДПТ $I_a = \frac{U - E}{\Sigma R_a}$

Уравнение баланса мощности $UI_a = EI_a + I_a^2 \Sigma r_a + \Delta U_{\text{щ}} I_a$

Подводимая мощность $P_1 = UI_a = P_{\text{ЭМ}} + P_{\text{эа}} + P_{\text{э,щ}}$ (для парал. и смеш. возб. $P_1 = UI_a + UI_B$)

Отдаваемая мощность ДПТ $P_2 = P_{\text{ЭМ}} - P_{\text{мех}} - P_{\text{ст}} - P_{\text{доб}}$

Уравнение движения ДПТ $J \frac{d\Omega}{dt} = M - M_c$, где $M = c_m I_a \Phi$, $M_c = M_2 + M_0$

При $M > M_c$ – разгон, при $M < M_c$ – торможение, при $M = M_c$ – устойчивая работа при $\Omega = \text{Const}$

Если $E = c_e n \Phi$, то $E = U - I_a \Sigma R_a \rightarrow n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi}$

Характеристики двигателей постоянного тока

Двигатели независимого и параллельного возбуждения

Скоростная характеристика $n = f(I_a)$ при $U = U_H$ и $I_B = I_{BH}$

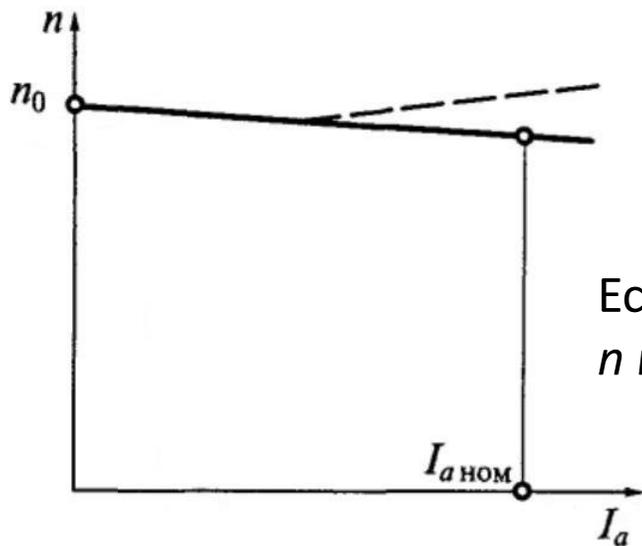
$$n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi} \quad (\text{сплошная линия})$$

При насыщении

размагничивающее действие р.я.: $\Phi = \Phi_0 - \Delta\Phi$

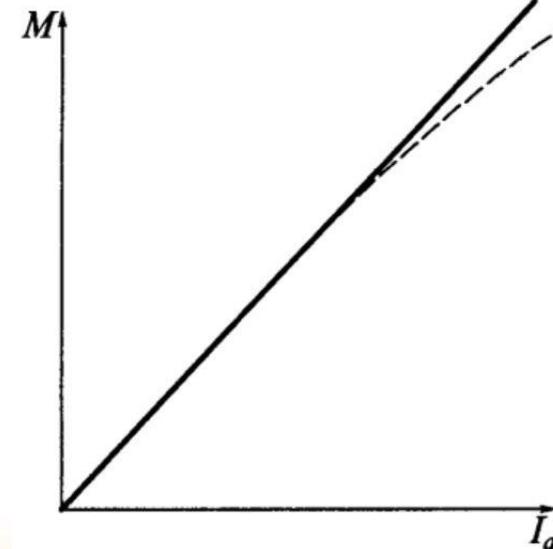
$$\text{Тогда } n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e (\Phi_0 - \Delta\Phi)}$$

Если влияние ΣR_a слабее, чем $\Delta\Phi$,
 n может возрастать с ростом I_a



Моментная характеристика $M = f(I_a)$
при $U = U_H$ и $I_B = I_{BH}$

$$M = c_m I_a \Phi \quad \text{или} \quad M = c_m I_a (\Phi_0 - \Delta\Phi)$$



Характеристики двигателей постоянного тока

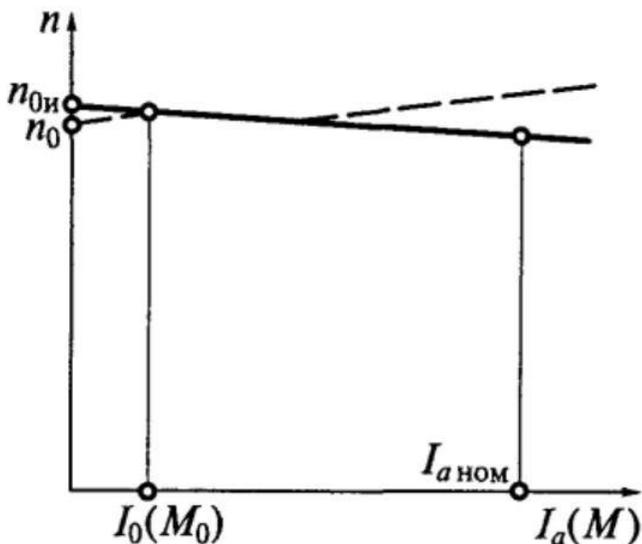
Двигатели независимого и параллельного возбуждения

Механическая характеристика $n = f(M)$ при $U = U_H$ и $I_B = I_{BH}$

Поскольку $n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e (\Phi_0 - \Delta\Phi)}$ и $M = c_m I_a (\Phi_0 - \Delta\Phi)$

запишем $n = \frac{U}{c_e (\Phi_0 - \Delta\Phi)} - \frac{M \Sigma R_a}{c_e c_m (\Phi_0 - \Delta\Phi)^2}$

(похоже на скоростную)



Только падающая характеристика обеспечивает устойчивую работу

При больших A и B_δ включают стабилизирующую ОВ на полюсах последовательно с ОЯ (компенсация р.я. $\rightarrow \Phi = \text{Const} \rightarrow$ падающая хар-ка)

Идеальный ХХ при $I = 0$ ($M = 0$)

$$n_{0и} = \frac{U}{c_e \Phi_0}$$

Реальный ХХ

с учетом M_0 и $I_a = I_0$ $M_0 = c_m I_0 \Phi_0$

$$\rightarrow n_0 < n_{0и}$$

В диапазоне M от 0 до M_H

n изменяется на 2...5 %

\rightarrow «жесткая» механическая характеристика



Уменьшение ω :
2 \rightarrow 2'; 1 \rightarrow 1'

Характеристики двигателей постоянного тока

Двигатели последовательного возбуждения

Особенность:

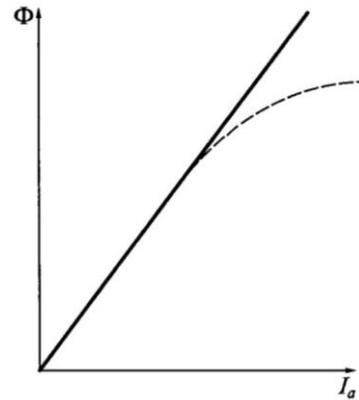
ток возбуждения $I_B = I_a$,

поэтому $\Phi = f(I_a)$

магнитная характеристика

Без учета насыщения

$$\Phi = k_{\Phi} I_a$$



Скоростная характеристика $n = f(I_a)$ при $U = U_H$

Без учета насыщения $n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi} = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e k_{\Phi} I_a}$

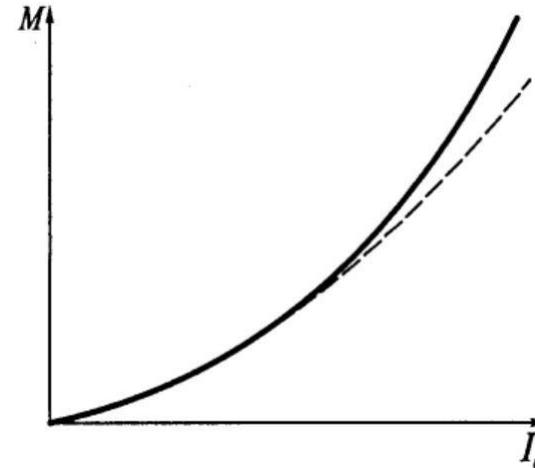
Т.к. $I_a \Sigma R_a$ составляет 2...4 % от U_H ,
то $n = f(I_a)$ – гипербола



Влияние насыщения –
повышение n при больших I_a

Моментная характеристика $M = f(I_a)$ при $U = U_H$

$$M = c_m I_a \Phi \rightarrow M = c_m k_{\Phi} I_a^2$$



Влияние насыщения –
снижение M при
больших I_a

Характеристики двигателей постоянного тока

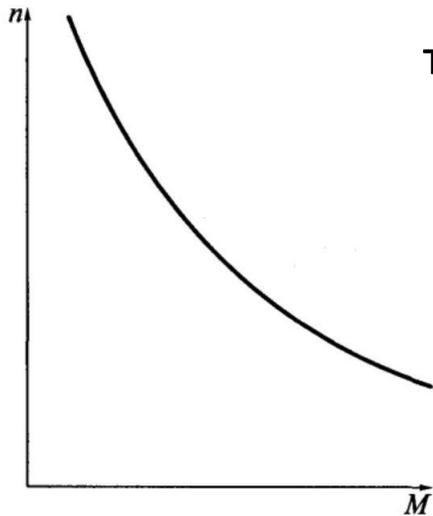
Двигатели последовательного возбуждения

Механическая характеристика $n = f(M)$ при $U = U_H$

Поскольку $I_a = \sqrt{\frac{M}{c_m k_\Phi}}$ и $n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e k_\Phi I_a}$

запишем $n = \frac{U}{c_e \sqrt{k_\Phi / c_m} \sqrt{M}} - \frac{\Sigma R_a}{c_e k_\Phi}$

т.е. $n \sim \frac{1}{\sqrt{M}}$ – гипербола



Поскольку n сильно зависит от нагрузки
→ «мягкая» характеристика

При $M = 0$ и $I_a = 0$ теоретически $n \rightarrow \infty$
(двигатель идет вразнос)
Допускается использовать ДПТ
последовательного возб. при $M_* > 0,25 \dots 0,3$
(кроме микродвигателей)

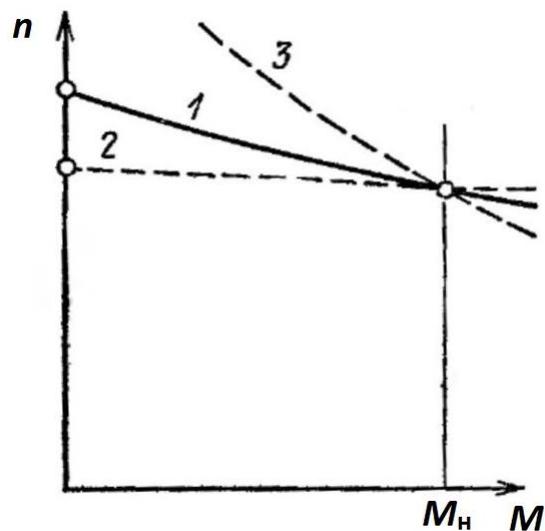
Характеристики двигателей постоянного тока

Двигатели смешанного согласного возбуждения

Последовательная ОВ увеличивает Φ при увеличении I_a

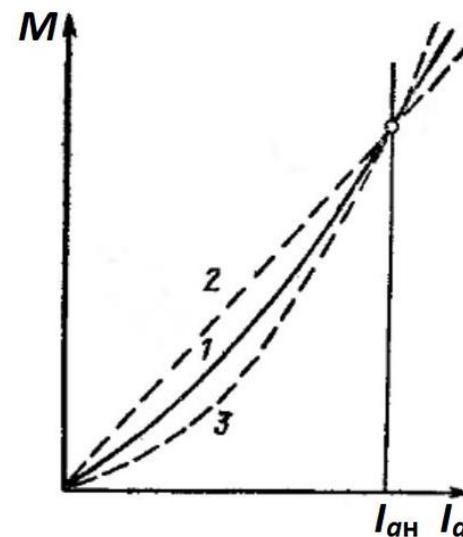
Ее влияние зависит от числа витков

Характеристики занимают промежуточное положение



- 1 – ДПТ смешанного возбуждения
- 2 – ДПТ параллельного возбуждения
- 3 – ДПТ последовательного возбуждения

Механическая
характеристика



Моментная
характеристика

Характеристики двигателей постоянного тока

Применение двигателей постоянного тока

- ДПТ независимого и параллельного возбуждения
(жесткая характеристика) – нагрузка постоянной скорости
- ДПТ независимого возбуждения
– привод с широким регулированием скорости
($U = \text{var}, I_{\text{в}} = \text{const}$ в системе Г-Д)
- ДПТ последовательного возбуждения
(мягкая характеристика) – нагрузка с большим $M_{\text{п}}$
или частыми перегрузками
зато ток $I_{\text{а}} \sim \sqrt{M}$, а не $M \rightarrow$ экономия энергии при перегрузке – электрический транспорт

Пуск двигателей постоянного тока

Ток якоря ДПТ
$$I_a = \frac{U - E}{\Sigma R_a}$$

При пуске $n = 0 \rightarrow E = 0 \rightarrow I_a = U / \Sigma R_a$ ($I_k = 10...50 I_n$)

\rightarrow проблемы: j щеток, f_d обмоток, M_d на валу, $U_{\text{сети}}$

Допустимый пусковой ток $I_{ап} < 2,5 I_{ан}$

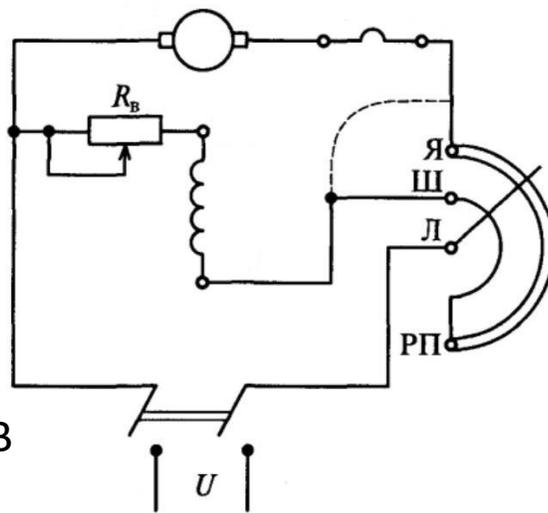
- Прямой пуск – только для маломощных ДПТ (большое ΣR_a)
- Пуск при пониженном напряжении с плавным повышением U (система Г-Д)
- Пуск через пусковой реостат

Полное сопротивление $R_{п}$ такое, чтобы
$$I_a = \frac{U}{\Sigma R_a + R_{п}} < 2...2,5 I_{ан}$$

Я – к ОЯ

Ш – к шунтовой ОВ

Л – к линии (сети)



Условия пуска ДПТ

параллельного и смешанного возб.

- Ограничение пускового тока
- Получение максимально $M_{п}$

$M = c_m I_a \Phi \rightarrow$ при ограничении I_a

надо максимизировать Φ

\rightarrow Включать ОВ на полное U

(зажим «Ш» на РП, но не пунктир)

и выводить $R_{в}$

Условия пуска ДПТ

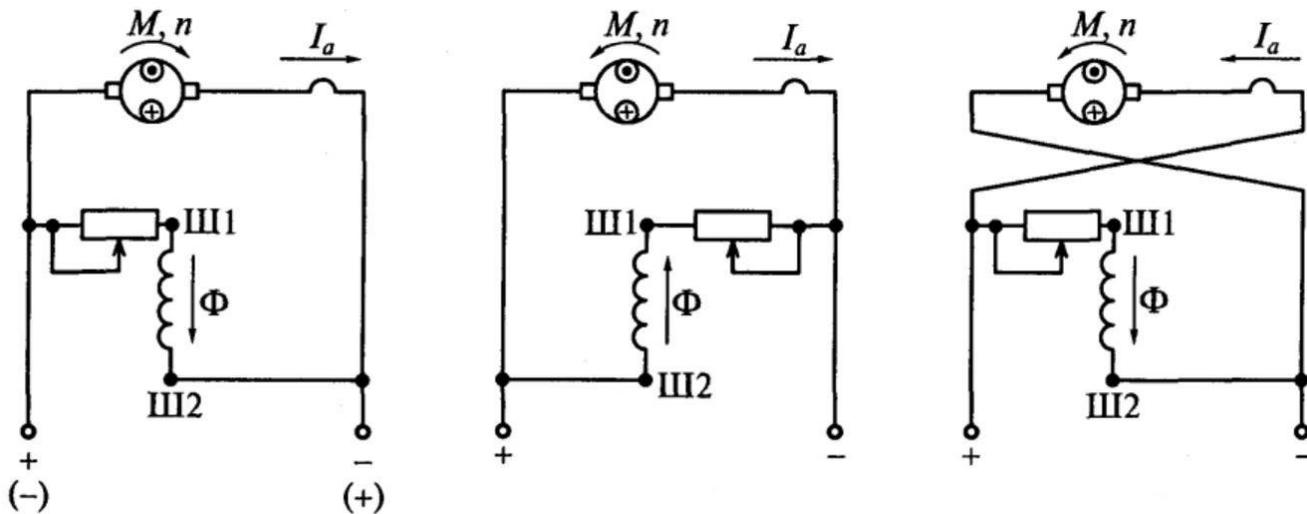
последовательного возб.

- Ограничение пускового тока
- Обеспечение $M_c > 0,2...0,3 M_n$ (запрет пуска на ХХ)

Реверсирование двигателей постоянного тока

Направление вращения – по направлению момента

$M = c_m I_a \Phi \rightarrow$ надо менять направление I_a (полярность U) или Φ



В ДПТ смешанного возбуждения надо переключать как параллельную, так и последовательную ОВ одновременно

При изменении направления Φ
 $E \rightarrow -E$

$$U = -E + I_a \Sigma R_a$$

$$I_a = \frac{U + E}{\Sigma R_a}$$

I_{ap} вдвое больше пускового тока
 \rightarrow нужен вдвое больший R_n

При изменении полярности U
сначала сохраняется знак n и E

$$-U = E + I_a \Sigma R_a$$

$$I_a = \frac{-(U + E)}{\Sigma R_a}$$

\rightarrow также нужен вдвое больший R_n

Регулирование частоты вращения ДПТ

Частота вращения ДПТ

$$n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi}$$

→ способы регулирования:

- $U = \text{var}$
- $\Sigma R_a = \text{var}$
- $\Phi = \text{var}$

Для сравнения

– естественные характеристики
(при $U = U_n, I_B = I_{BH}, R_{доб} = 0$)

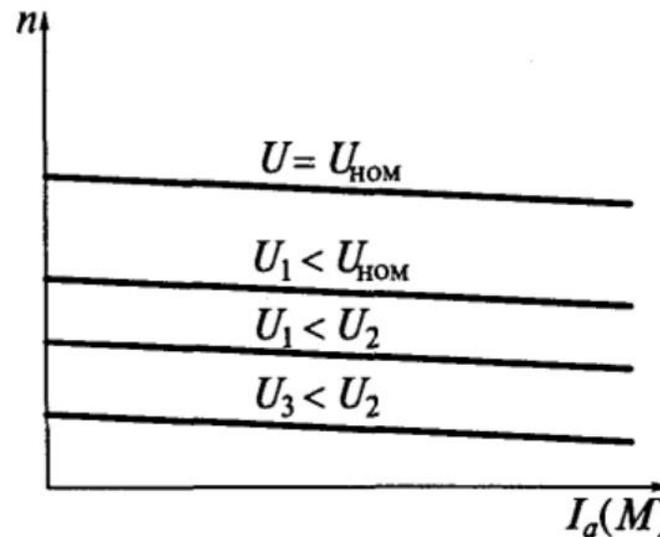
Регулирование изменением напряжения

при $I_B = I_{BH}$ и $\Sigma R_a = \text{const}$

Возможно только снижение U от U_n

Частота вращения $n \sim U$

→ скоростные и механические характеристики параллельны естественной



Диапазон регулирования n
– от 10:1 до 100:1

При этом КПД = const

Жесткость хар-к сохраняется

Регулирование частоты вращения ДПТ

Способы изменения питающего напряжения ДПТ

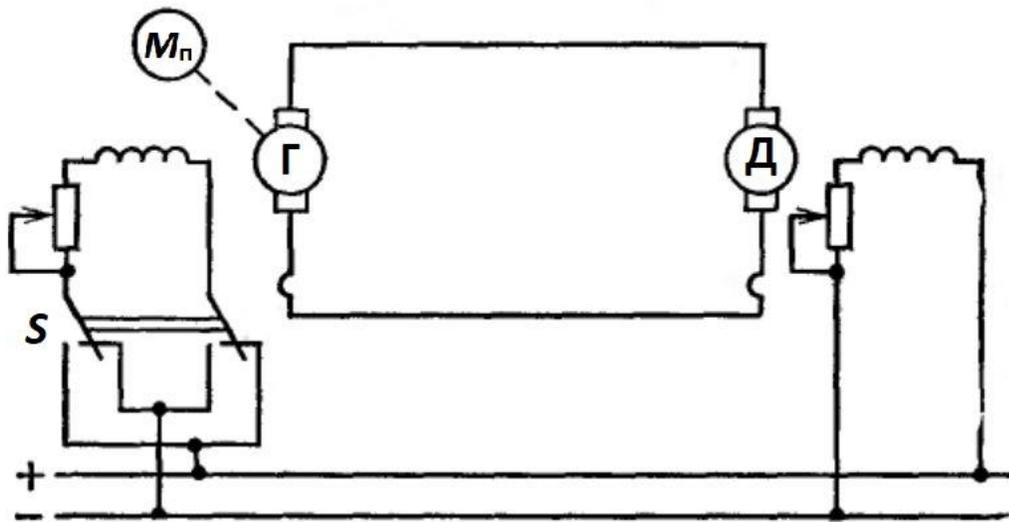
Система «Генератор – Двигатель»

Приводной двигатель с M_n и $n = \text{const}$

Регулирование $I_{вг}$ генератора \rightarrow изменение U двигателя

S меняет полярность $I_{вг}$ \rightarrow полярность U

Пуск ДПТ – с плавным повышением U

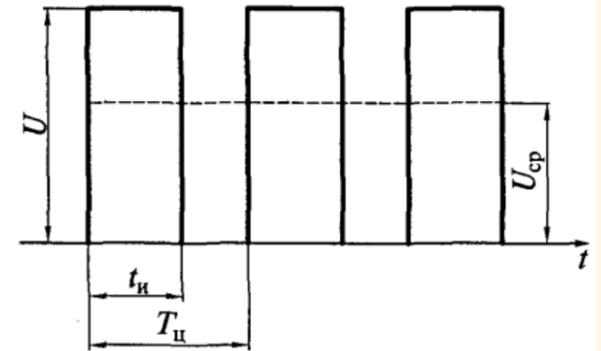


Все регулировки – в маломощных цепях ОВ

Вариант: вместо Γ – силовая электроника
(активный выпрямитель)

Вариант: импульсное регулирование

$$U_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{ц}}} U$$



Недостаток – пульсирующий ток I_a

- $I_{a\text{ср}}$ – вращающий момент
- $I_{a\text{var}}$ – потери, пульсации момента, хуже коммутация

Регулирование частоты вращения ДПТ

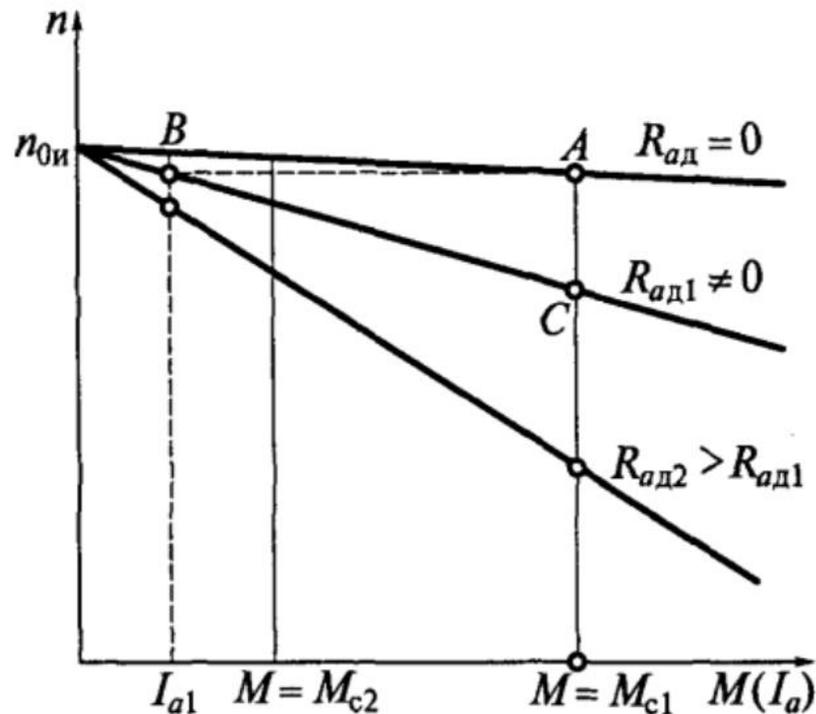
$$n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi}$$

Регулирование изменением ΣR_a

при $I_B = I_{вн}$ и $U = \text{const}$

Возможно только увеличить R →
($R_{адоб}$ / регулировочный реостат)

- уменьшение n
- сохранение n идеального ХХ
- уменьшение жесткости характеристики



$R_{ад} \rightarrow R_{ад1}$: сначала n (и E) большая, снижается $I_a = (U - E) / \Sigma R_{a1}$ → снижается $M = c_m I_a \Phi$ ($A \rightarrow B$). Из-за $M_{c1} > M$ падает n (и E) → растет I_a и M до $M = M_{c1}$ при меньшей n ($B \rightarrow C$)

При больших $R_{ад}$ «мягкие» хар-ки → неустойчивая работа ДПТ (большие колебания n при колебаниях M_c)

Диапазон регулирования зависит от нагрузки:
при M_{c1} предел регулирования больше, чем при M_{c2}

КПД зависит от скорости (неэкономично)
При постоянной нагрузке $I_a = \text{Const}$ и $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M_c \Omega}{U I_a} \sim \Omega$

Диапазон регулирования n – 10:1

Регулирование частоты вращения ДПТ

$$n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi}$$

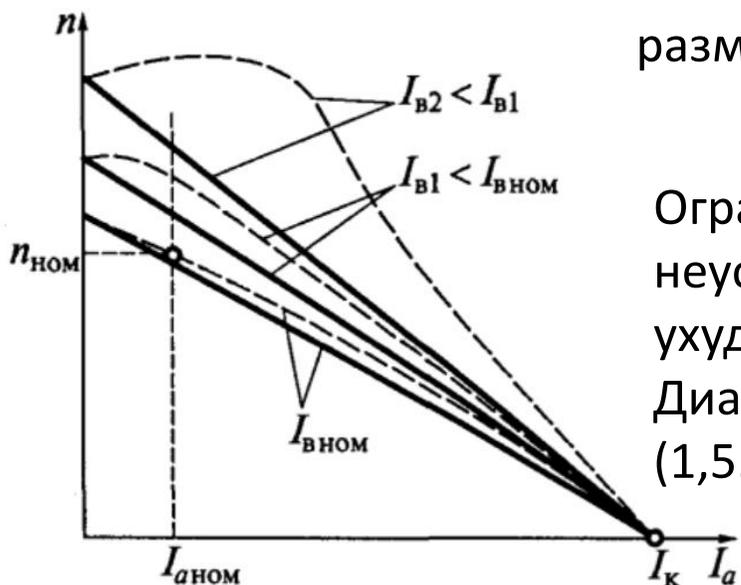
Регулирование изменением Φ

при $\Sigma R_a = \text{const}$ и $U = \text{const}$

Возможно только уменьшать Φ (реостат в цепи ОВ)

- увеличение n (в том числе $n_{\text{ХХ}}$)
- ток ХХ растет (растут $P_{\text{мех}}$ с n)
- при КЗ ($n = 0 \rightarrow E = 0$) ток $I_k = U/\Sigma R_{a1}$ одинаков

Пунктиром – учет размагничивающей р.я.



Ограничение n_{max} – неустойчивость и ухудшении коммутации
 Диапазон регулирования (1,5...2,5):1

Снижение КПД – только из-за роста $P_{\text{мех}}$

Механические характеристики:

- скорости идеального ХХ аналогичны
- пусковые моменты (при одном I_k) разные



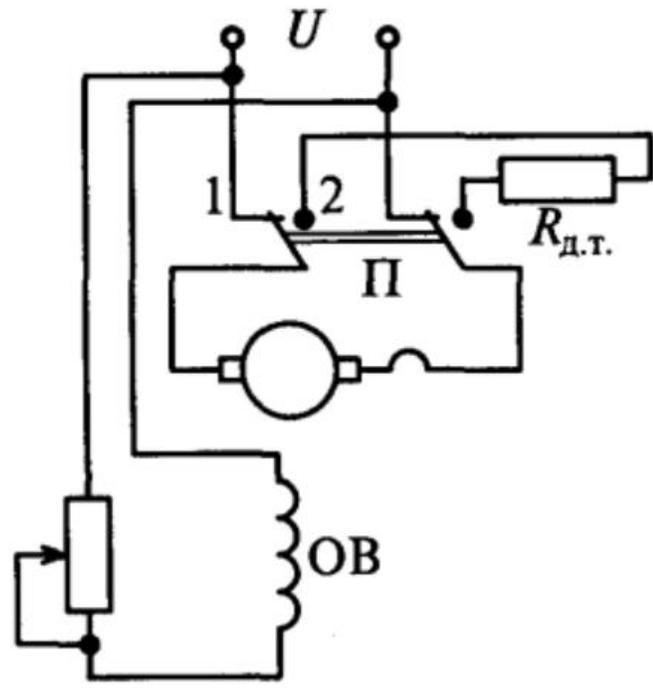
Пересечение хар-к – изменение направления регулирования (для микромашин)

Торможение двигателей постоянного тока

Электрическое торможение – перевод МПТ из двигательного в генераторный режим

Динамическое торможение (режим автономного генератора):

- ОЯ переключается с $U_{\text{сети}}$ на внешнее сопротивление $R_{\text{дт}}$ ($U = 0$)
- ОВ остается включенной параллельно ОЯ



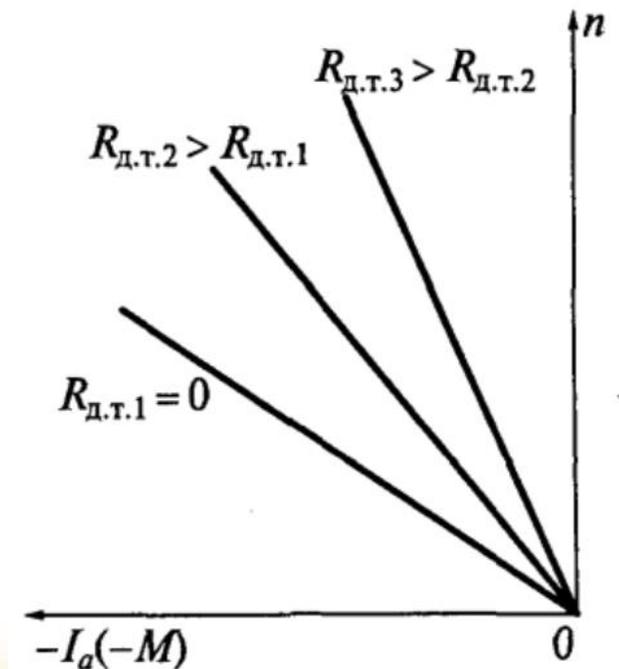
$$\text{Ток якоря } I_a = \frac{-E}{\Sigma R_a + R_{\text{дт}}} = \frac{-c_e n \Phi}{\Sigma R_a + R_{\text{дт}}}$$

$$\text{Момент } M = c_m I_a \Phi = \frac{-c_e c_m n \Phi^2}{\Sigma R_a + R_{\text{дт}}}$$

(тормозной)

Выбор $R_{\text{дт}}$ ограничен величиной I_a

Недостаток – небольшой M при малых n
(можно постепенно снижать $R_{\text{дт}}$)



Торможение двигателей постоянного тока

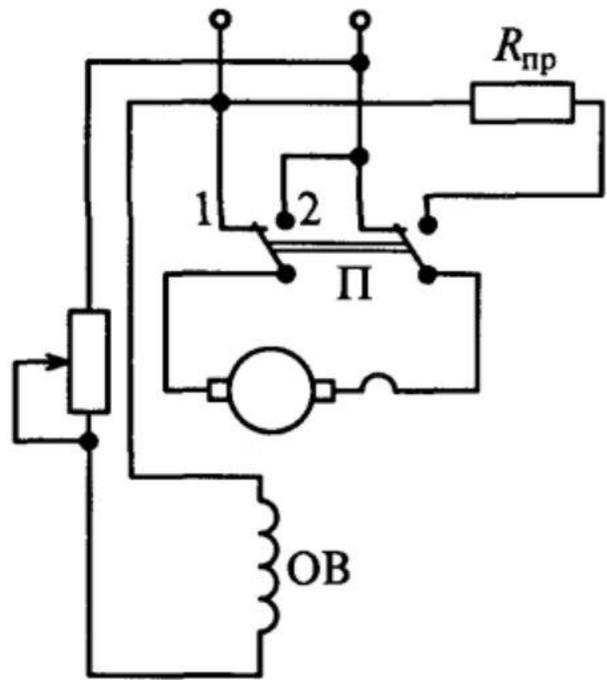
Рекуперативное торможение (режим генератора параллельно с сетью):

- происходит при повышении n свыше $n_{0и}$
- при этом $E > U$ и I_a меняет знак
 - генератор на сеть с U
 - тормозной момент
- Кинетическая энергия ротора → в электрическую энергию (в сеть)
- Остановка ДПТ невозможна, только подтормаживание (подъемные устройства при спуске груза, эл.транспорт под уклон)

Торможение двигателей постоянного тока

Торможение противовключением (режим электрического тормоза):

- изменение полярности $U_{\text{сети}}$ на ОЯ



Изначально – характеристика 1

В точке А ток якоря $I_a = \frac{U - E}{\Sigma R_a}$

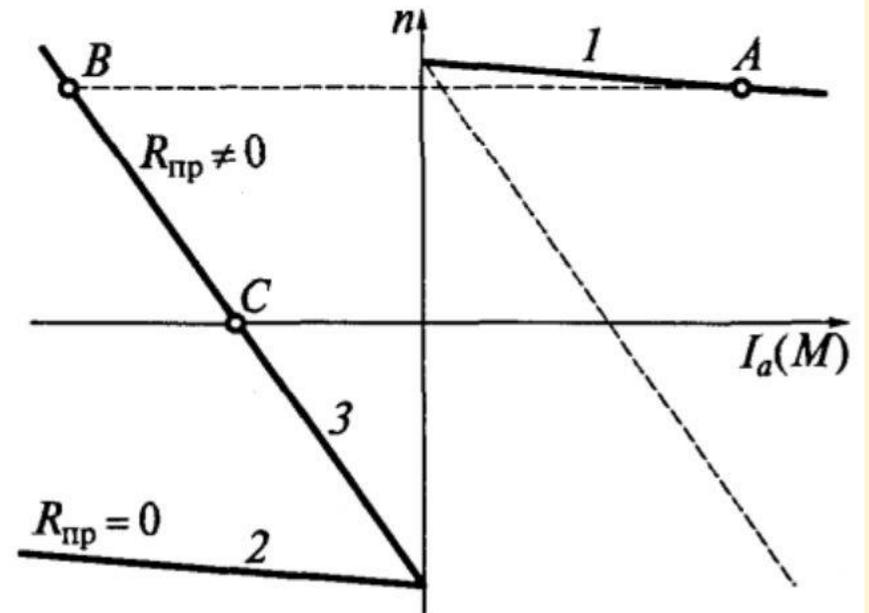
При изменении полярности U
вначале сохр. n и E : $I_a = \frac{-U - E}{\Sigma R_a}$

→ характеристика 2

Для ограничения тока вводят $R_{\text{пр}}$

→ характеристика 3

Тогда рабочая точка $A \rightarrow B \rightarrow$ торможение до т. C
(если не отключить в т. C , продолжится разгон с $-n$)



ДРУГИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ