

Электрические машины

ЛИТЕРАТУРА

- 1 А.И. Вольдек, В.В. Попов «Электрические машины ч.1»**
- 2. А.И. Вольдек, В.В. Попов «Электрические машины ч.2»**
- 3. А.И. Вольдек «Электрические машины»**

Разделы курса:

- 1 Машины постоянного тока.**
- 2 Трансформаторы.**
- 3 Машины переменного тока.**
 - а) Асинхронные машины.**
 - б) Синхронные машины.**

Закон электромагнитной индукции и закон Ампера

$$e = - \frac{d\Psi}{dt}$$

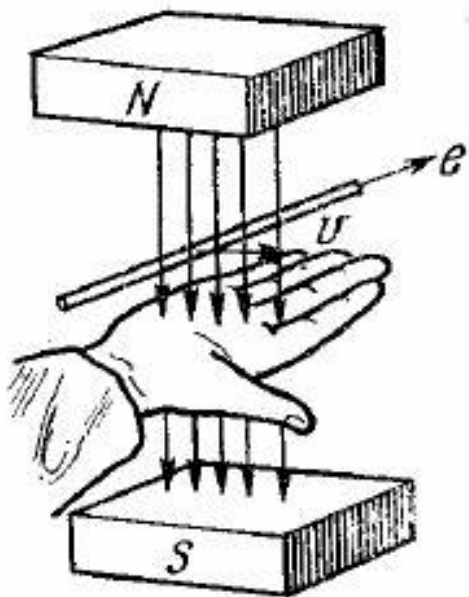
$$\psi = w \Phi$$

$$de = \overset{\nabla}{B} [d\overset{\nabla}{l} \overset{\nabla}{\nabla}]$$

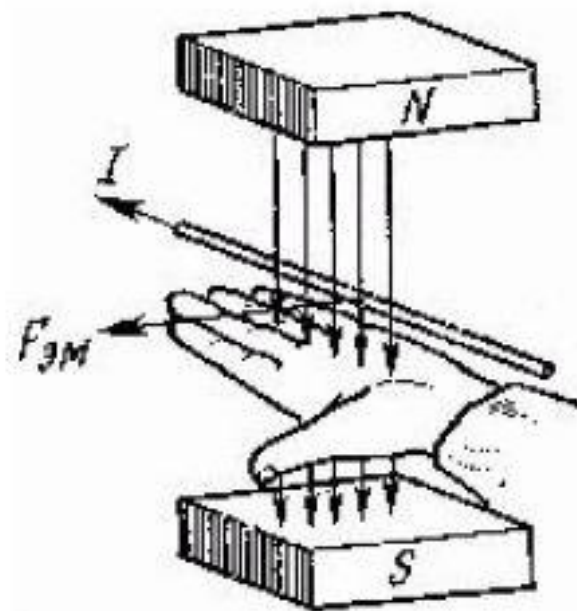
$$e_{\text{пр}} = B \cdot l \cdot v$$

$$\overset{\nabla}{f}_{\text{э}} = [d\overset{\nabla}{l} \overset{\nabla}{B}] \cdot i$$

$$f_{\text{э}} = Bli$$



Правило правой руки



Правило левой руки

ОЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1 Наличие ферромагнитного сердечника.

$$B = \mu H$$

2 Обратимость электрических машин

3 Высокий КПД $\eta = 98\% - 99\%$

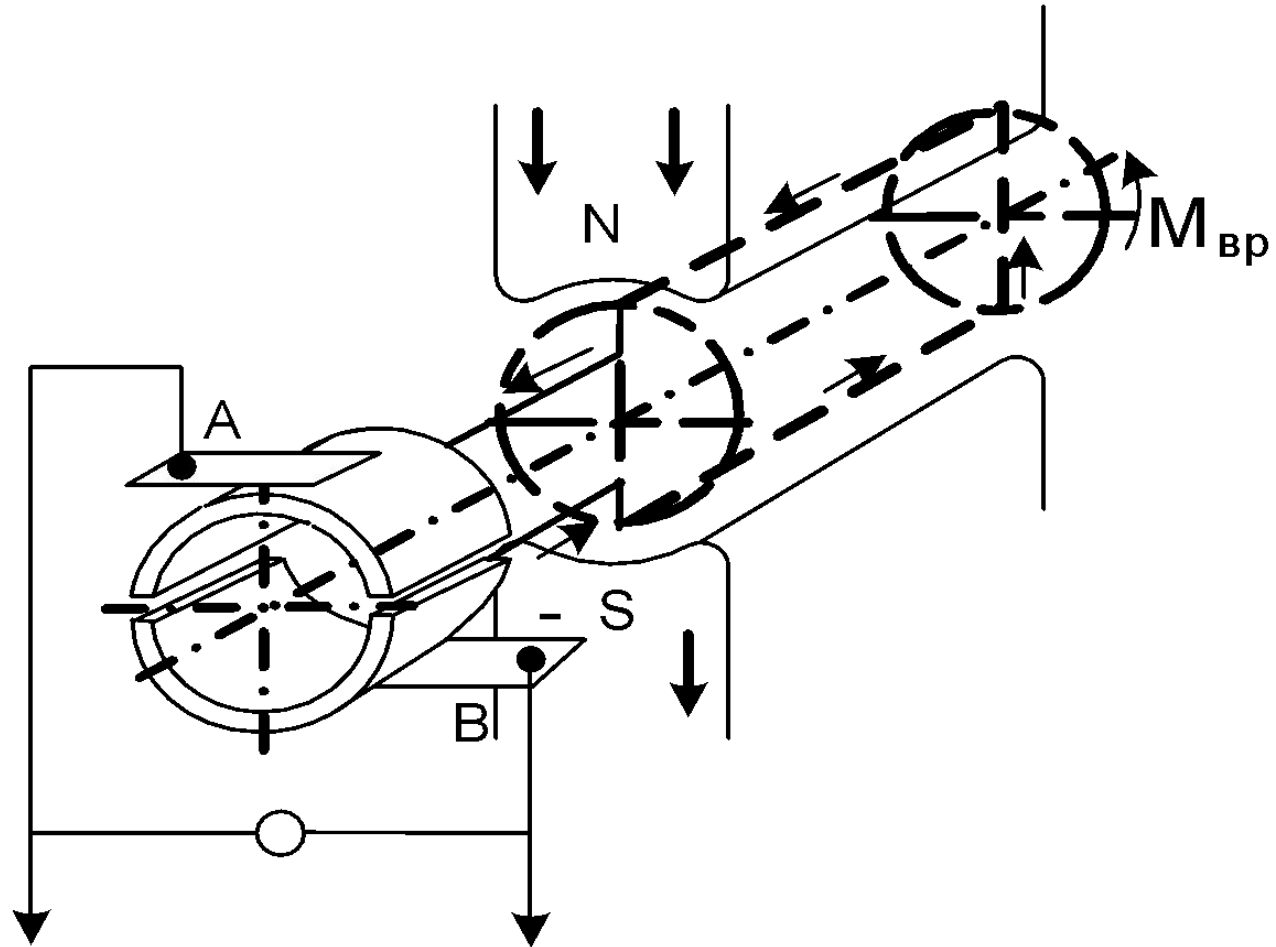
4 Нагрев машин

Номинальная мощность – полезная мощность на которую рассчитана машина.

Режим работы, при котором величины напряжения, тока, частоты вращения

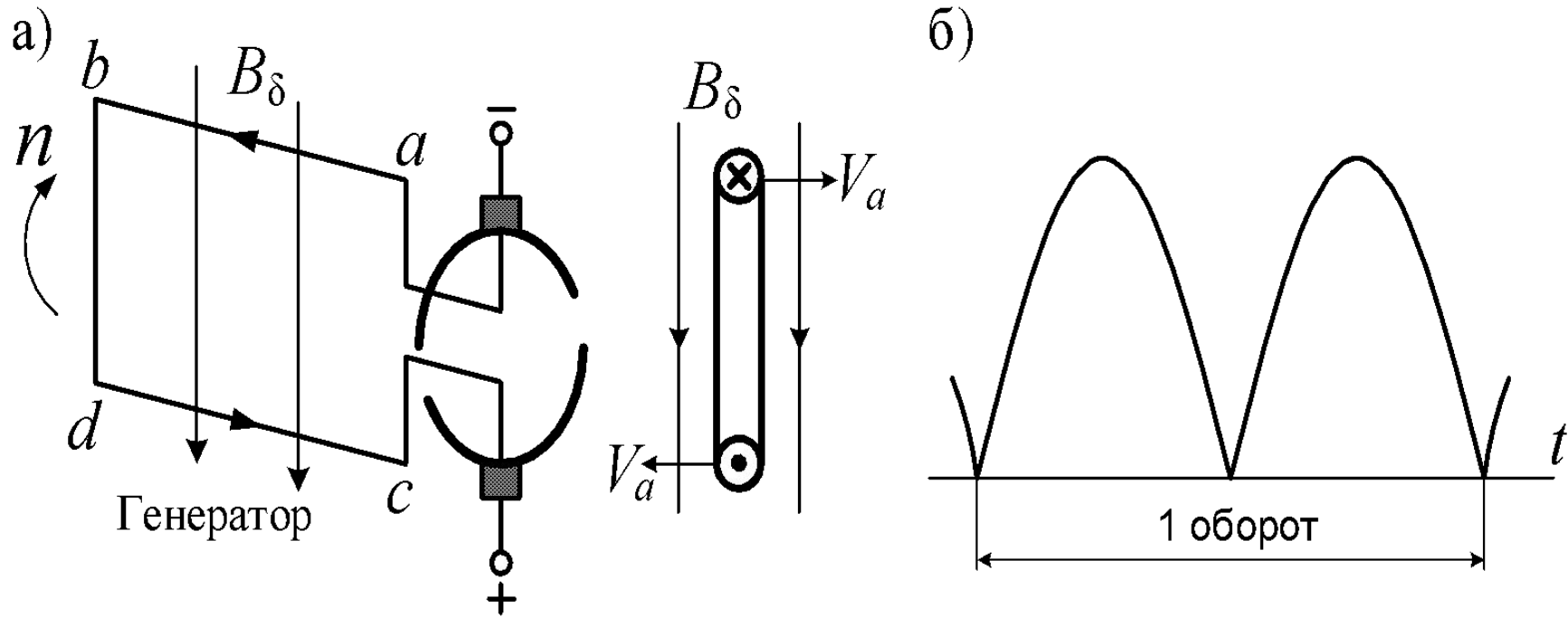
и др. достигают своих номинальных значений, называется номинальным.

Схема работы машины
ПОСТОЯННОГО ТОКА



Коллектор – выпрямитель (для генератора)
– инвертор (для двигателя)

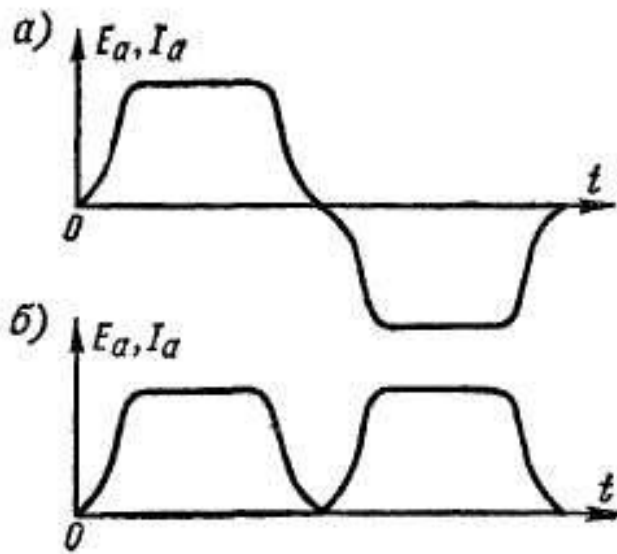
Принцип работы коллектора МПТ – генератора



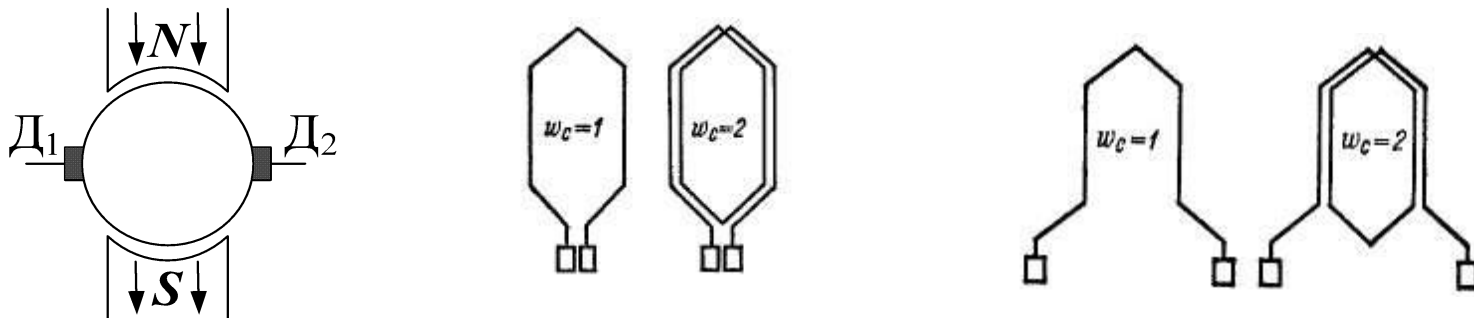
$$f = n$$

$$f = pn$$

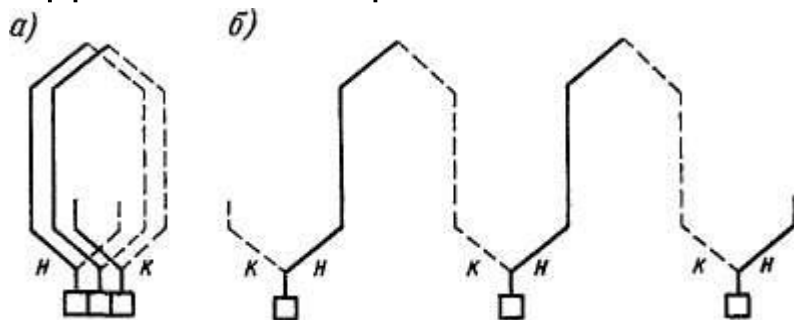
n – частота вращения
 p – число пар полюсов

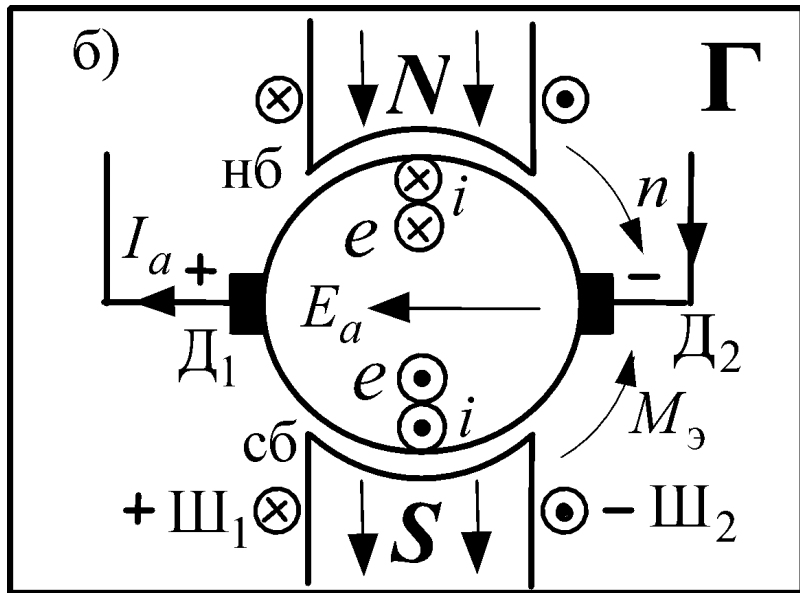


Упрощенное изображение машины постоянного тока



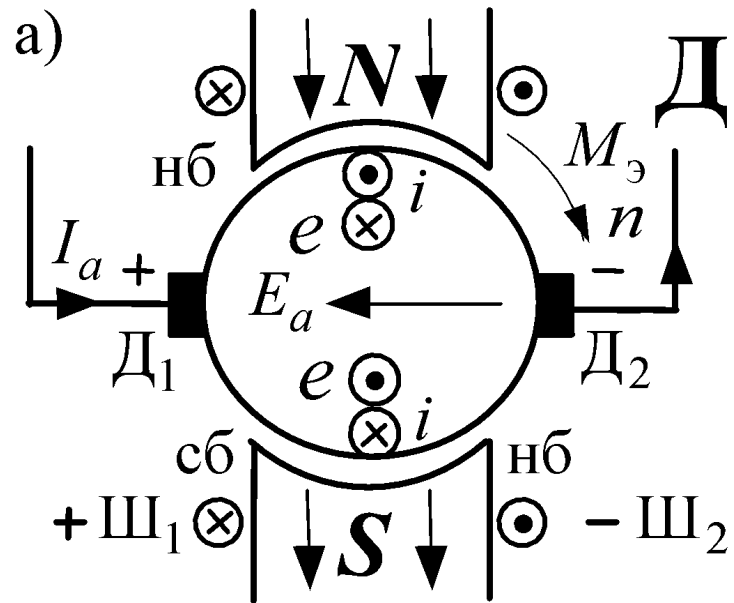
Соединение секций обмотки с коллектором





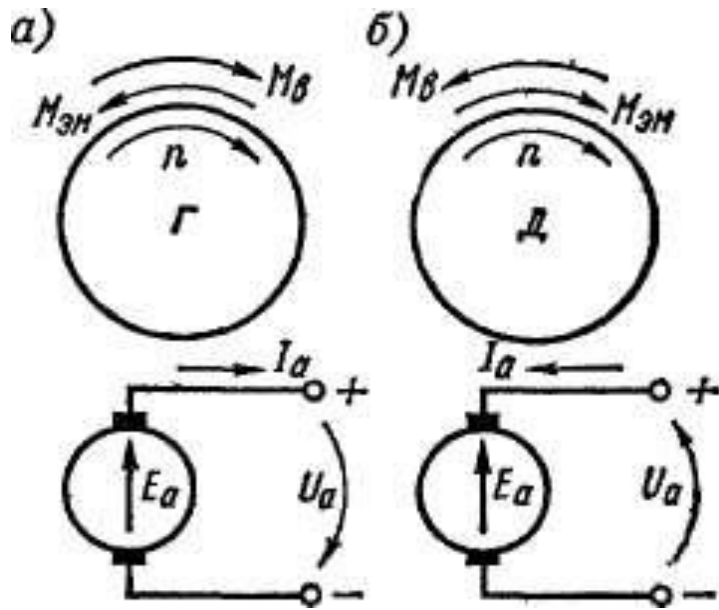
$$e_{пр} = BLV$$

$$E_a = 2BLV$$



$$F_{пр} = BLI_a$$

$$M_{эм} = BLD_a I_a$$



Уравнения
напряжений

$$\Gamma \quad U_a = E_a - I_a r_a$$

$$\Delta \quad U_a = E_a + I_a r_a$$

$$M_{\text{в}} = M_{\text{эм}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{с}}$$

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{в}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{с}}$$

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \Omega \quad \Omega = 2\pi n$$

$$P_{\text{эм}} = 2BLD_a I_a \pi n = 2BLV I_a = E_a I_a$$

$$P_a = E_a I_a$$

$$P_{\text{эм}} = P_a$$

$$\Gamma \quad U_a = E_a - I_a r_a$$

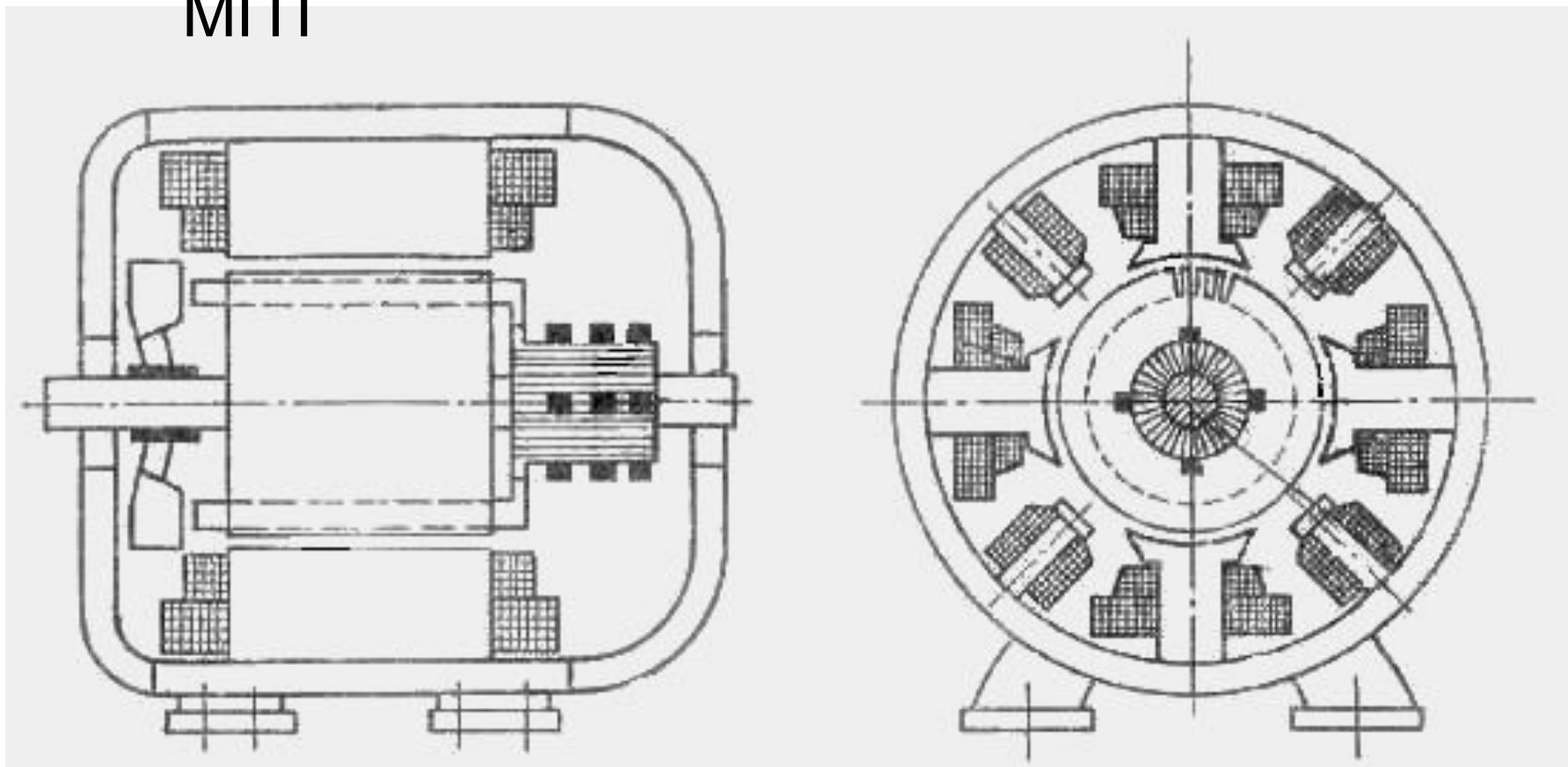
$$U_a I_a = E_a I_a - I_a^2 r_a$$

$$\Delta \quad U_a = E_a + I_a r_a$$

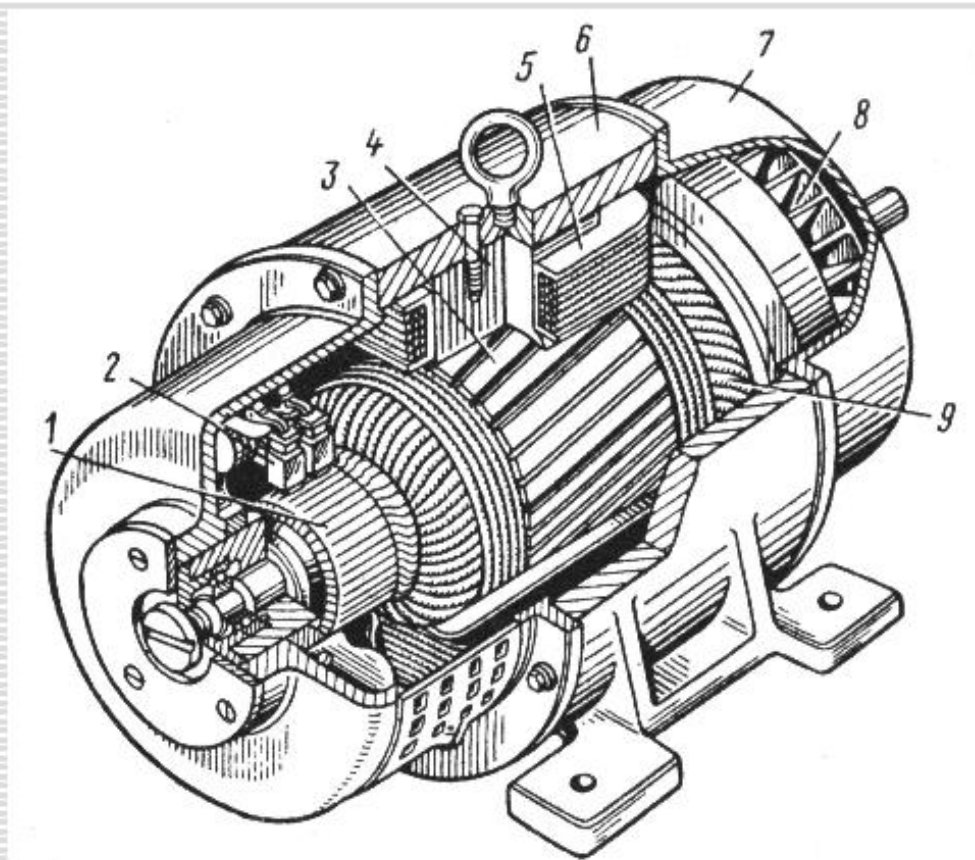
$$U_a I_a = E_a I_a + I_a^2 r_a$$

Схематичный разрез

МПТ



1. Устройство машины постоянного тока



- 1 - Коллектор
- 2 - Щеточный контакт
- 3 - сердечник якоря
- 4 - сердечник полюса
- 5 - обмотка возбуждения
- 6 - корпус (станина)
- 7 - крышка вентилятора
- 8 - вентилятор
- 9 - обмотка якоря

Закрепление материала



Подшипники

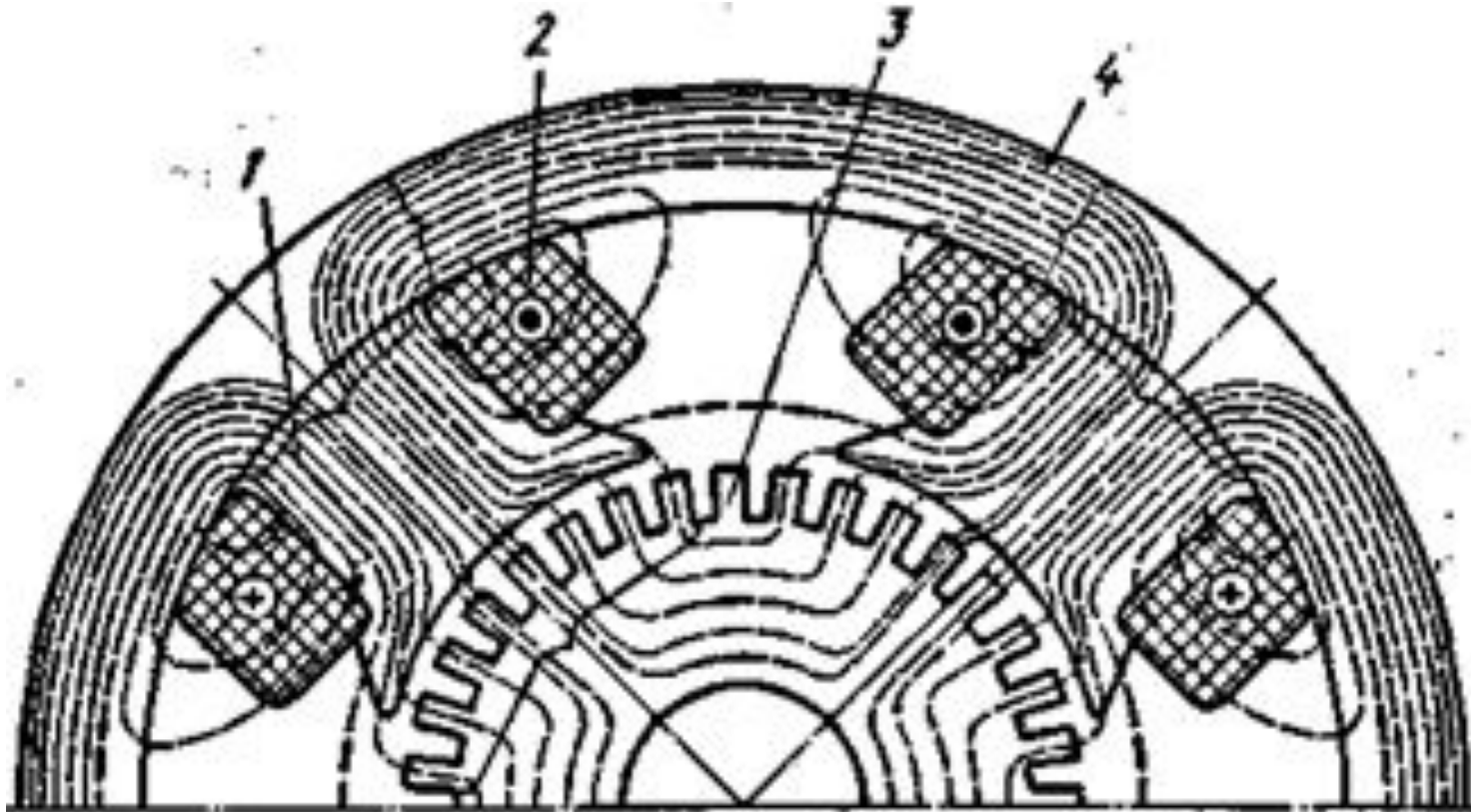
Коллектор

Магнитопровод

Вал

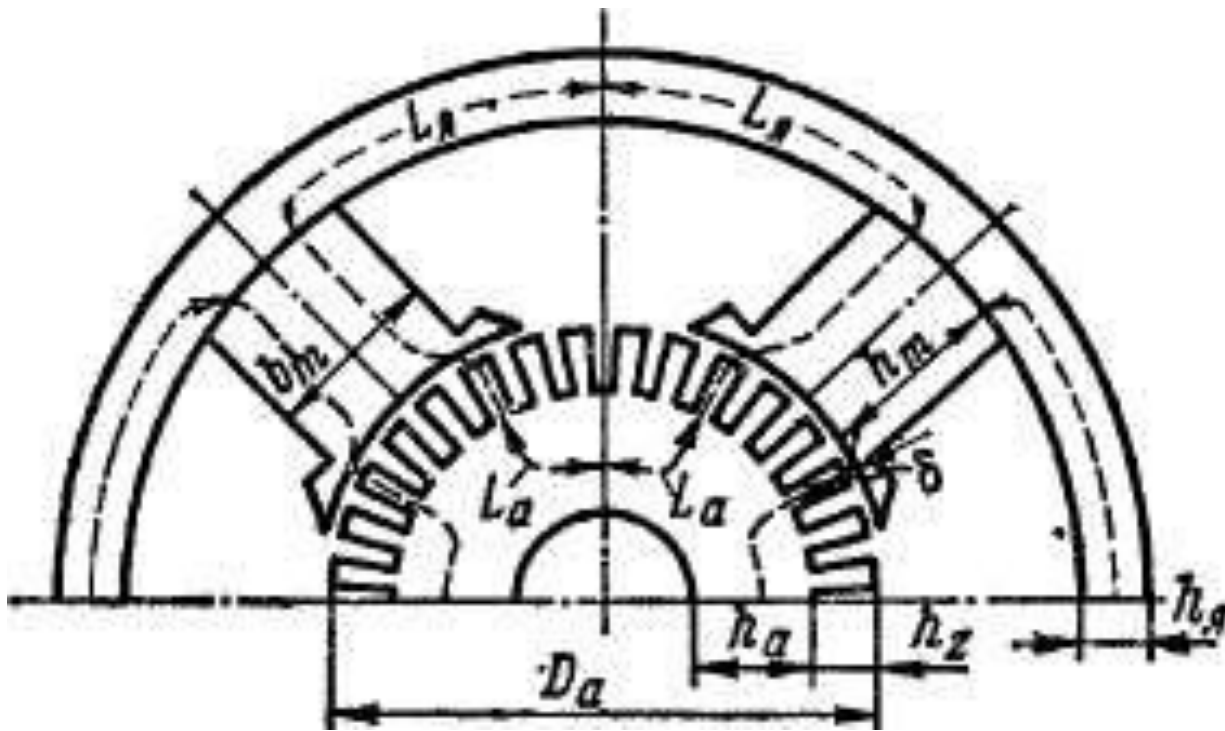
Лобовые части обмоток

Магнитная цепь МПТ при холостом ходе



$$\Phi_{\delta} = f(i_{\text{в}})$$

Φ_{δ} – поток в воздушном зазоре δ , приходящийся на один полюс

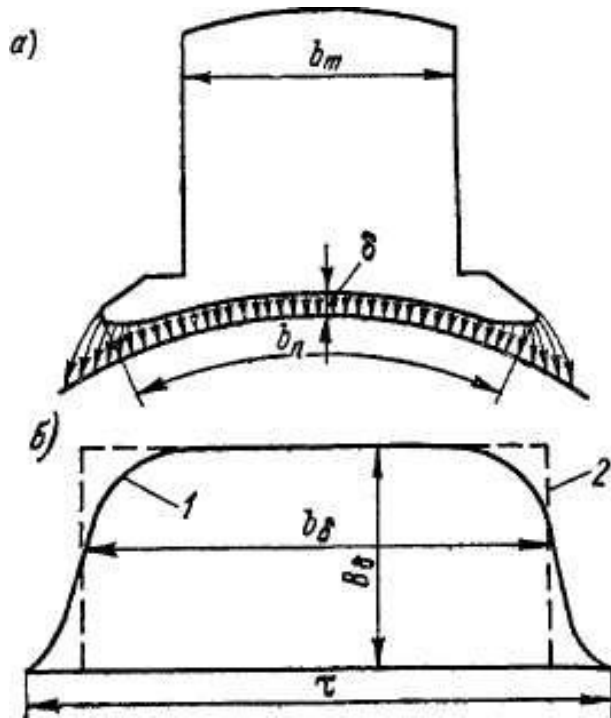


$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum i$$

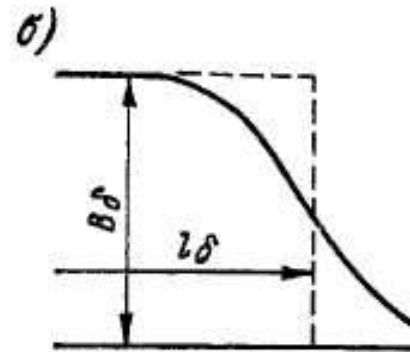
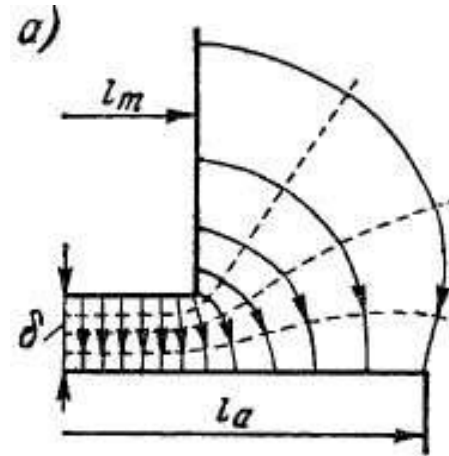
$$H_{\delta} 2\delta + H_z 2h_z + H_m 2h_m + H_a 2L_a + H_j 2L_j = 2w_B i_B$$

$$2F_{\delta} + 2F_z + 2F_m + 2F_a + 2F_j = 2F_{\delta} + 2F_c = 2F_B$$

Магнитное поле воздушного зазора



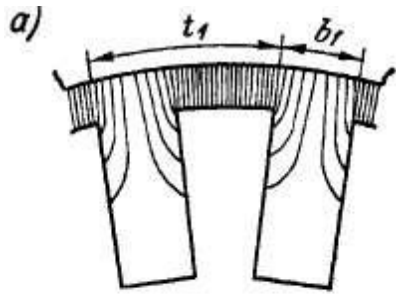
b_δ – расчетная полюсная дуга



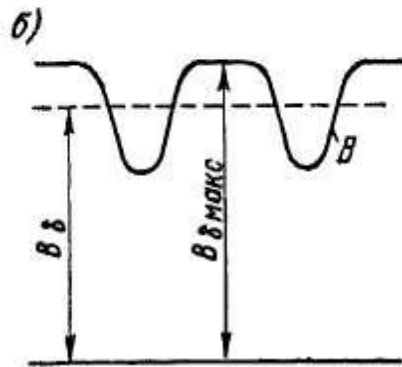
$$l_\delta = \frac{l_a + l_m}{2} \quad \tau = \frac{\pi D_a}{2p}$$

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{l_\delta b_\delta} \quad F_\delta = H_\delta \delta = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0}$$

τ – полюсное деление



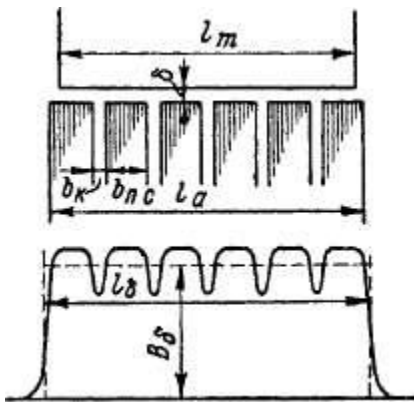
$$k_{\delta 1} = B_{\delta \text{ макс}} / B_{\delta}$$



$$F_{\delta} = \frac{B_{\delta} \delta k_{\delta 1}}{\mu_0}$$

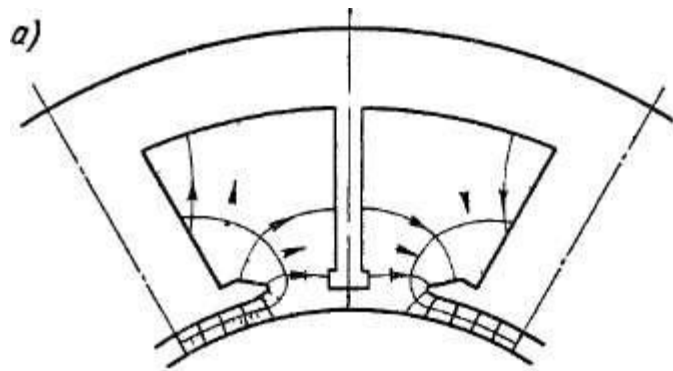
$$k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_{\delta 3} k_{\delta 4}$$

(2-12)



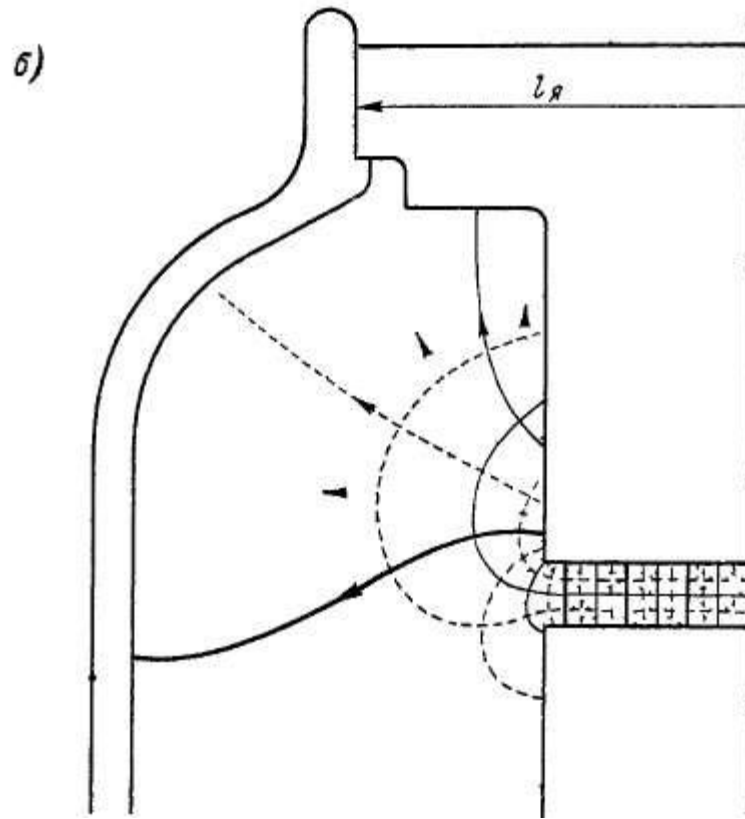
$$F_{\delta} = \frac{B_{\delta} \delta k_{\delta}}{\mu_0}$$

Эквивалентный воздушный зазор $\delta' = k_{\delta} \delta$



$$\sigma = \frac{\Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma}}{\Phi_{\delta}} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_{\delta}} \quad \Phi_m = \sigma \Phi_{\delta}$$

$$B_m = \frac{\sigma \Phi_{\delta}}{l_m b_m k_c} \quad F_m = H_m h_m$$



$$B_{\text{я}} = \frac{\sigma \Phi_{\delta}}{2l_{\text{я}} h_{\text{я}}}, \quad F_{\text{я}} = H_{\text{я}} L_{\text{я}}$$

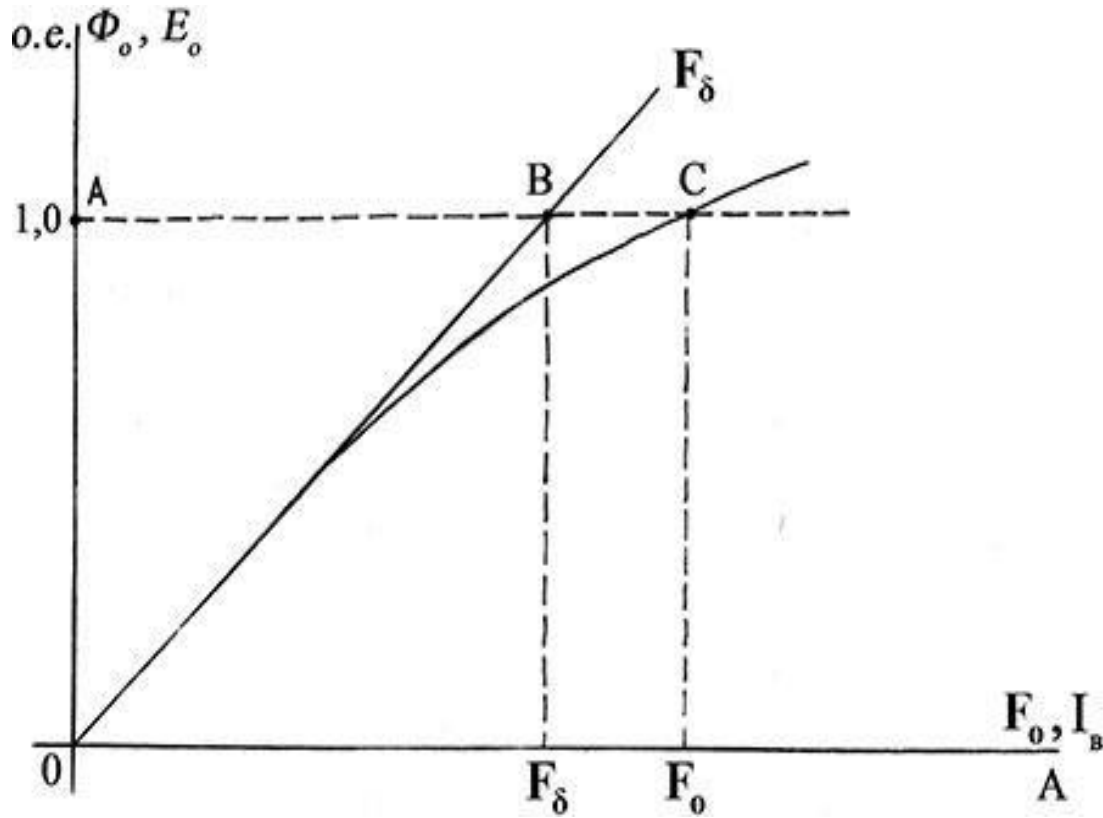
$$\sigma = 1,1 - 1,25$$

$$F_{\text{в}} = F_{\delta} + F_z + F_{\alpha} + F_m + F_{\text{я}}$$

$$F_{\text{в}} = \omega_{\text{в}} i_{\text{в}}$$

$$\Phi_{\delta} = f(F_{\text{в}}) \text{ или } \Phi_{\delta} = f(i_{\text{в}})$$

Кривая намагничивания МПТ

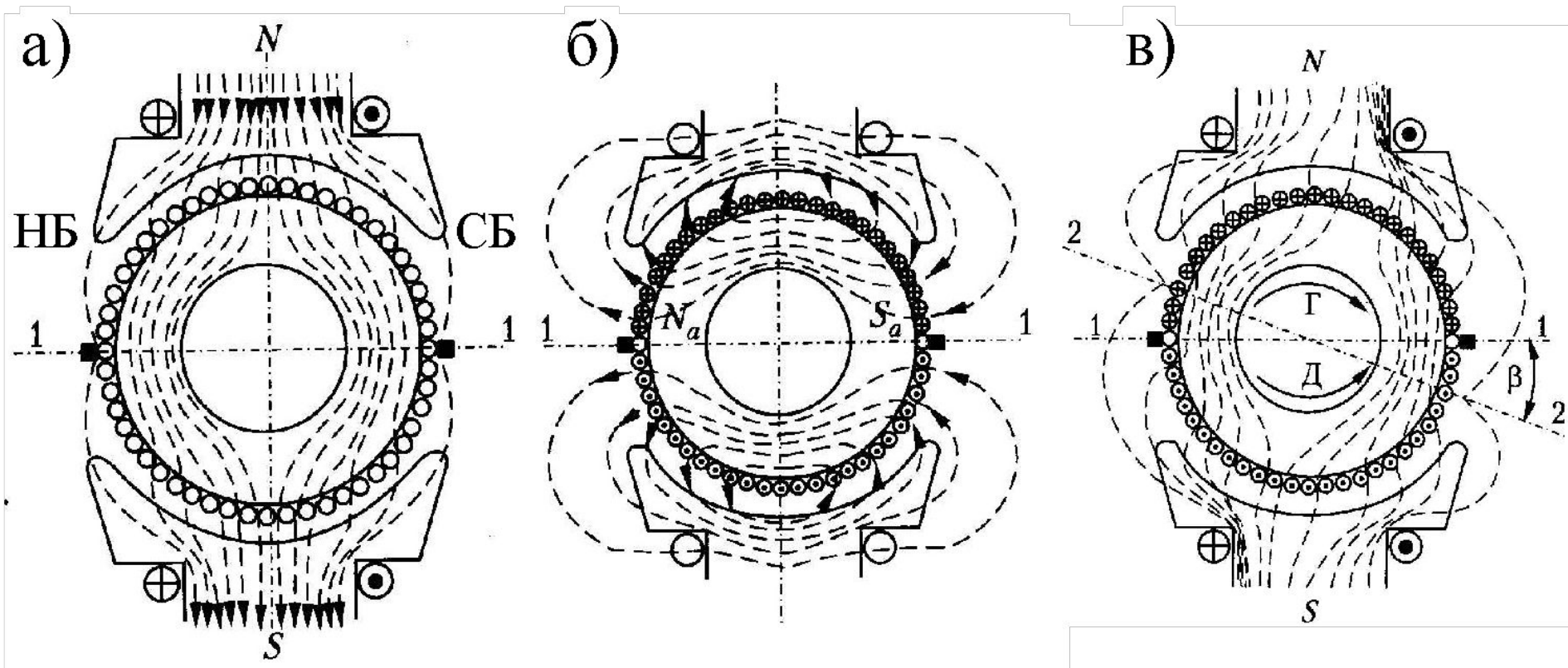


Коэффициент
насыщения

$$k_\mu = 1 + \frac{F_c}{F_\delta} = 1 + \frac{bc}{ab}$$

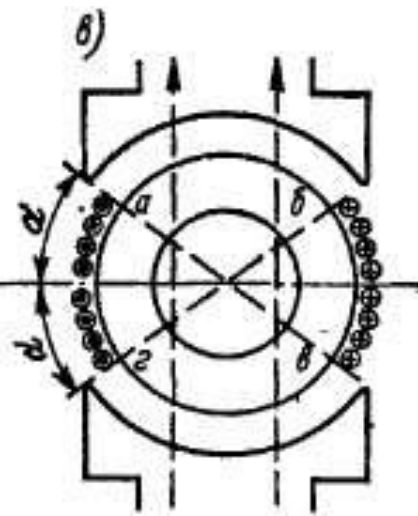
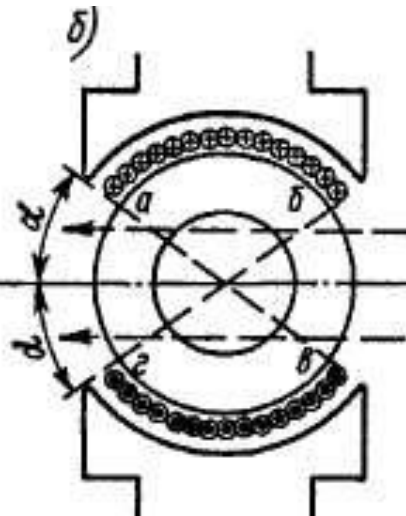
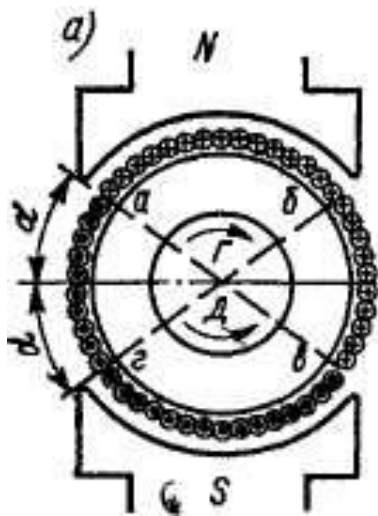
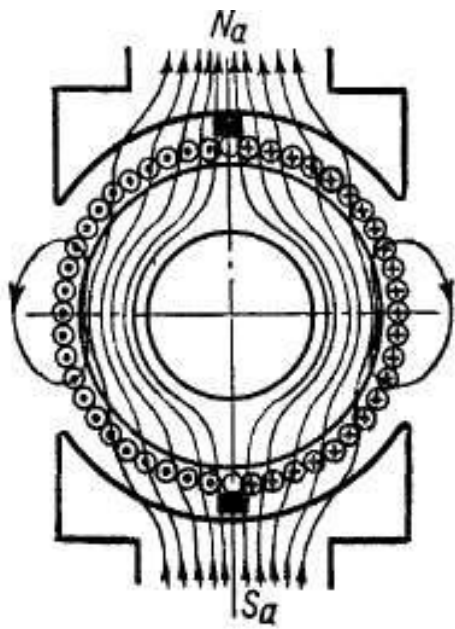
$$k_\mu = 1,25 - 1,45$$

Реакция якоря в машинах постоянного тока



. Картина магнитного поля:

а — продольное поле; б — поперечное поле; в — общее поле МПТ



Линейная токовая нагрузка

якоря

$$A_a = \frac{N \cdot i_a}{\pi D_a} = \frac{N}{\pi D_a} \cdot \frac{I_a}{2a} = \frac{c_M}{p} \cdot \frac{I_a}{D_a}$$

N – полное число проводников

МДС поперечной реакции якоря- это МДС *распределённой* обмотки

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum i \quad \mu_c = \infty$$

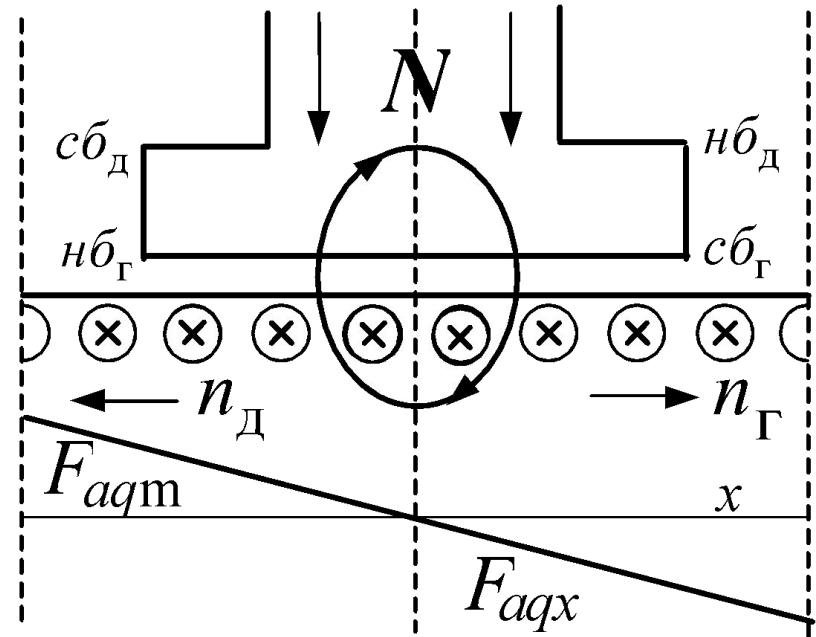
$$F_{aqx} = H_{aqx} \delta'$$

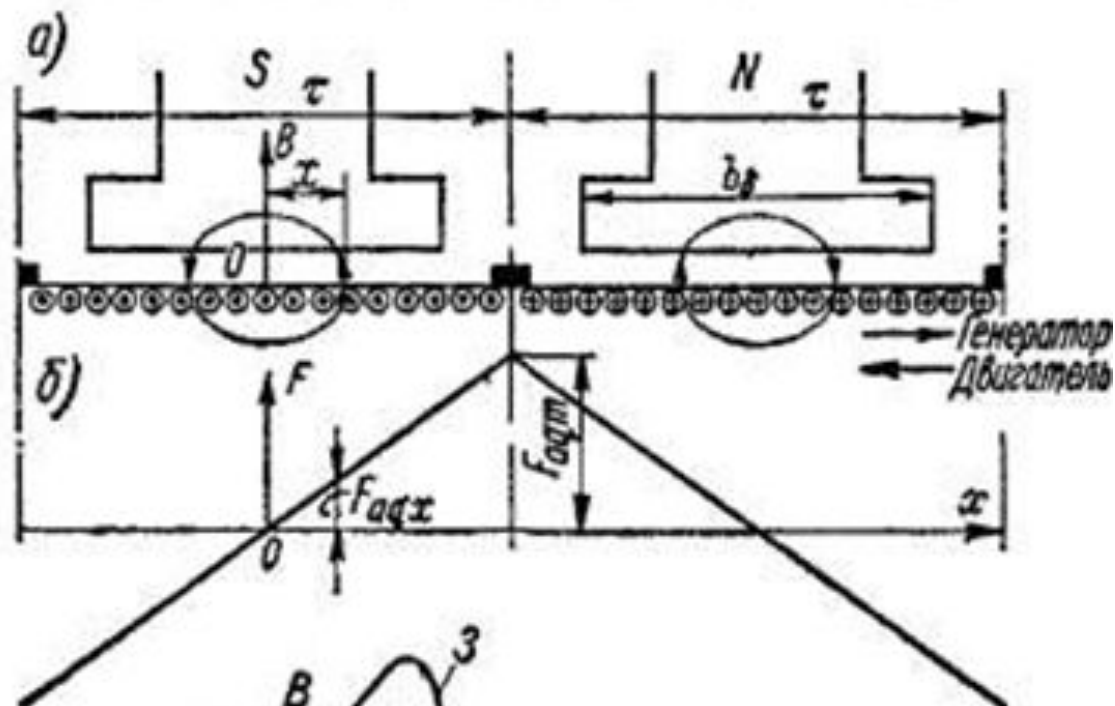
$$2F_{aqx} = 2 A_a x$$

x - расстояние от оси полюса

$$F_{aqm} = A_a \frac{\tau}{2}$$

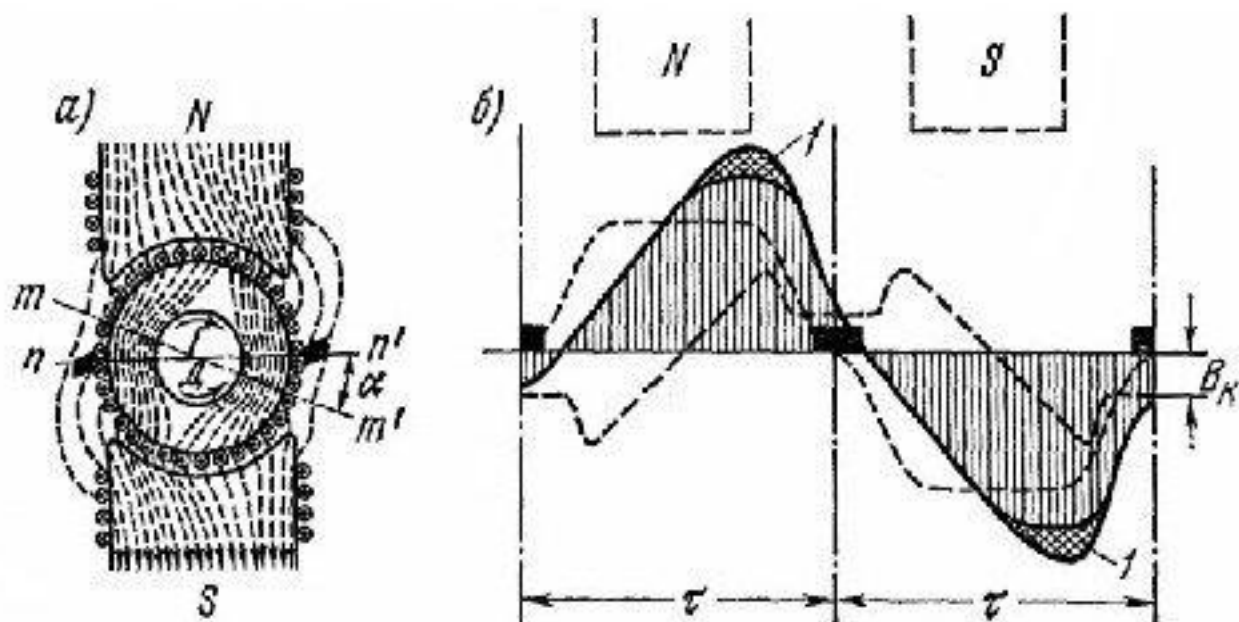
$$B_{aqx} = \mu_0 H_{aqx} = \frac{\mu_0 A_a x}{\delta'}$$



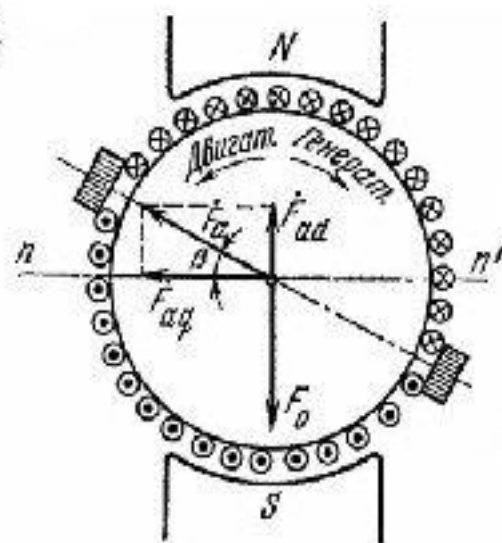


$$B_{aqx} = \mu_0 H_{aqx} = \frac{\mu_0 A_a x}{\delta'}$$

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

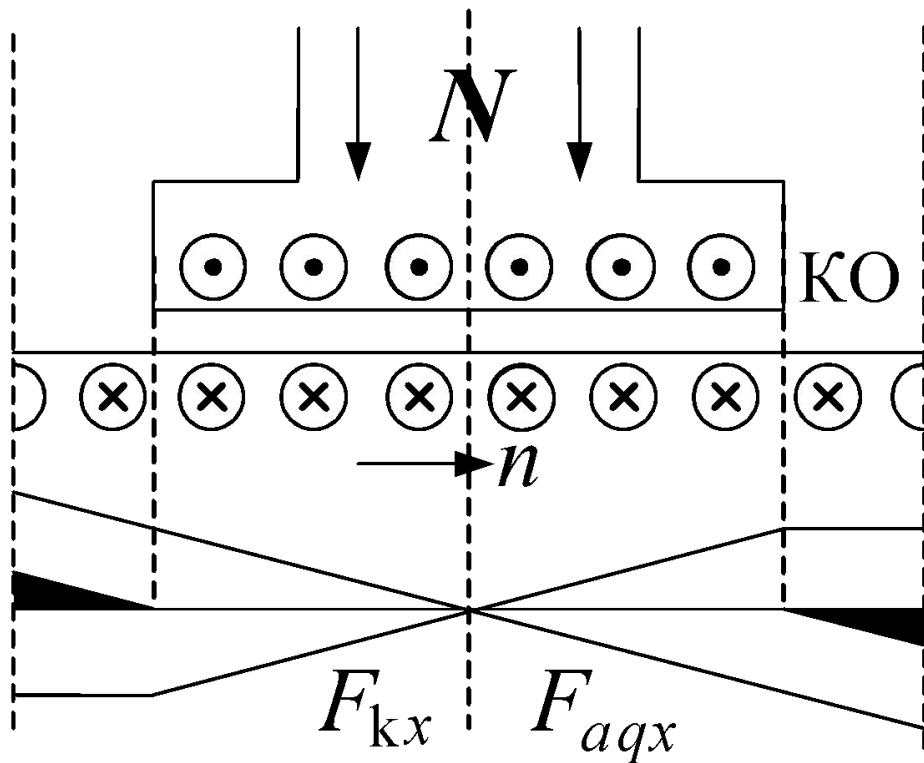


Результирующее магнитное поле (а)
и распределение индукции в зазоре (б)



Разложение н.с. обмотки
якоря на составляющие

Компенсационная обмотка

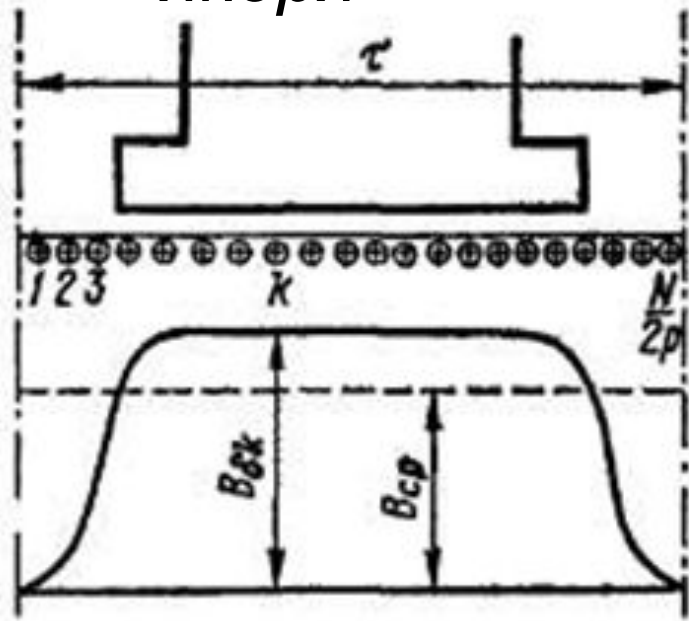


$$u_{к. макс} = 2B_{\delta макс} \omega_c l \delta v_a$$

w_c — ЧИСЛО ВИТКОВ
 СЕКЦИИ
 ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ
 ИСКРЕНИЕ

$$A_a = A_k$$

ЭДС обмотки якоря



$$y_1 = \tau$$

$$e_{пр} = B_{\delta} l_{\delta} v_a = B_{\delta} l_{\delta} \pi D_a n = B_{\delta} l_{\delta} \cdot 2p\tau \cdot n$$

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

N – полное число проводников обмотки якоря

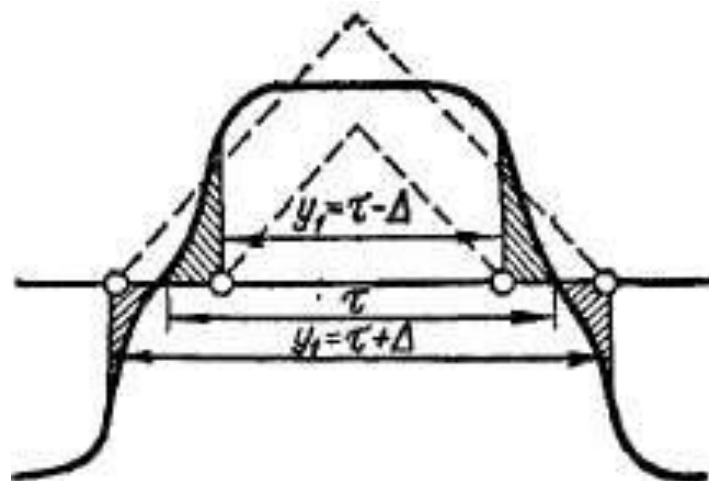
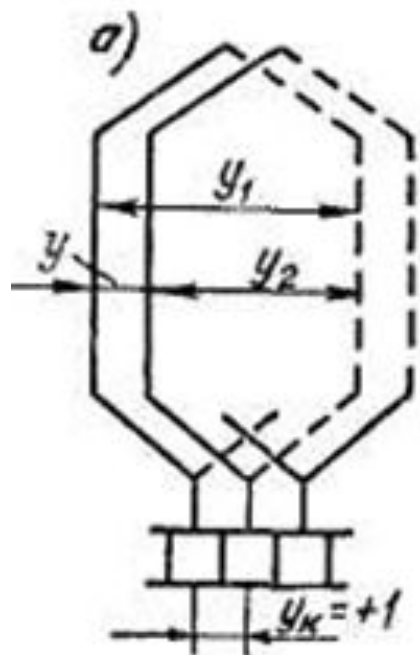
$$\sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k} = \frac{N}{2p} B_{ср}, \quad B_{\delta ср} = \frac{\Phi_{\delta}}{l_{\delta} \tau}$$

$$E_a = \frac{p l_{\delta} 2p \tau n N \Phi_{\delta}}{a 2p \tau l_{\delta}} = \frac{p N}{a} \Phi_{\delta} n = C_e \Phi_{\delta} n \quad C_e = \frac{p N}{a}$$

$$E_a = C_e \Phi_{\delta} n$$

$$\Omega = 2\pi n \quad E_a = C_M \Phi_{\delta} \Omega \quad C_M = \frac{C_e}{2\pi} = \frac{p N}{2\pi a}$$

При укороченном или удлиненном шаге обмотки



Электромагнитный момент МПТ

$$m_{\varepsilon} = \frac{D_a}{2} \cdot f_{\varepsilon} = \frac{D_a}{2} B_{\delta} l_{\delta} i_a$$

- элементарный момент, создаваемый током одного проводника

$$M_{\text{эм}} = 2p \sum_{k=1}^{N/2p} \frac{D_a}{2} B_{\delta k} l_{\delta} i_a.$$

Подставим сюда

$$D_a = \frac{2p\pi}{\pi}, \quad i_a = \frac{I_a}{2a}.$$

Тогда

$$M_{\text{эм}} = \frac{p}{2\pi a} \tau l_{\delta} I_a 2p \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k}.$$

Если выразить сумму в этом выражении, как и выше, через $B_{\text{ср}}$ и Φ_{δ} , то в окончательной форме получим

$$M_{\text{эм}} = c_m \Phi_{\delta} I_a,$$

(4-8)

$$M_{эм} = \frac{1}{2\pi} \left(N \frac{I_a}{2a} \right) (2p\Phi_\delta),$$

$2p\Phi_\delta$ - ПОТОК ВСЕХ ПОЛЮСОВ

$N \frac{I_a}{2a}$ - ТОК ВСЕХ ПРОВОДНИКОВ
якоря

$$E_a = C_M \Phi_\delta \Omega \quad M_{эм} = c_M \Phi_\delta I_a,$$

$$P_{эм} = E_a I_a = M_{эм} \Omega.$$

КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Коммутацией называется совокупность явлений, связанных с переходом секции из одной параллельной ветви в другую и изменением направления тока секции на противоположное.

Причины искрения между щётками и коллектором:

- а) механические (дефекты при изготовлении и эксплуатации — овальная форма коллектора, неплотное прилегание щёток к коллектору, вибрация щёток в щёткодержателе, выступание изоляционных прокладок из-за износа коллекторных пластин)
- б) электромагнитные (связаны с неравномерным распределением плотности тока под щёткой)

Потенциальное искрение

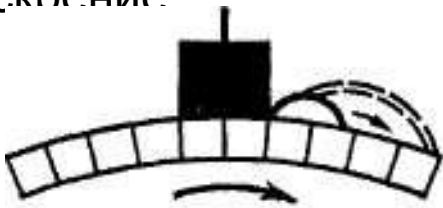
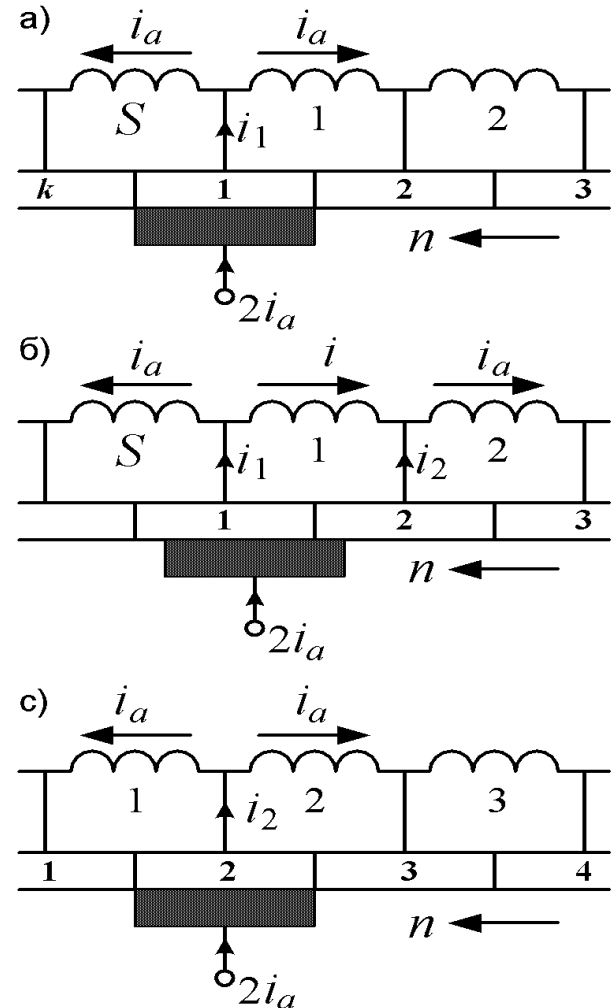


Рис. 6-2. Распространение кругового огня по коллектору



Положения секции в процессе коммутации

Уравнение коммутации

Допущение (классическая теория коммутации):

будем считать сопротивления щеточного контакта постоянными, не зависящими от тока и обратно пропорциональными площади перекрытия щёткой коллекторной пластины

Уравнение ЭДС секции, находящейся в процессе коммутации:

$$R_c i + R_{\Pi} i_1 + r_{щ1} i_1 - r_{щ2} i_2 - R_{\Pi} i_2 = \Sigma e$$

Σe - сумма ЭДС, индуцируемых в коммутируемой секции

Ток в коммутируемой секции

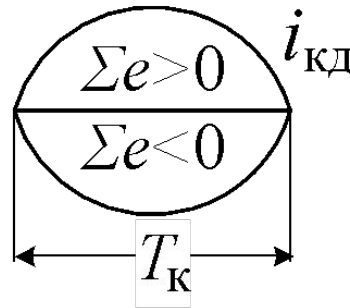
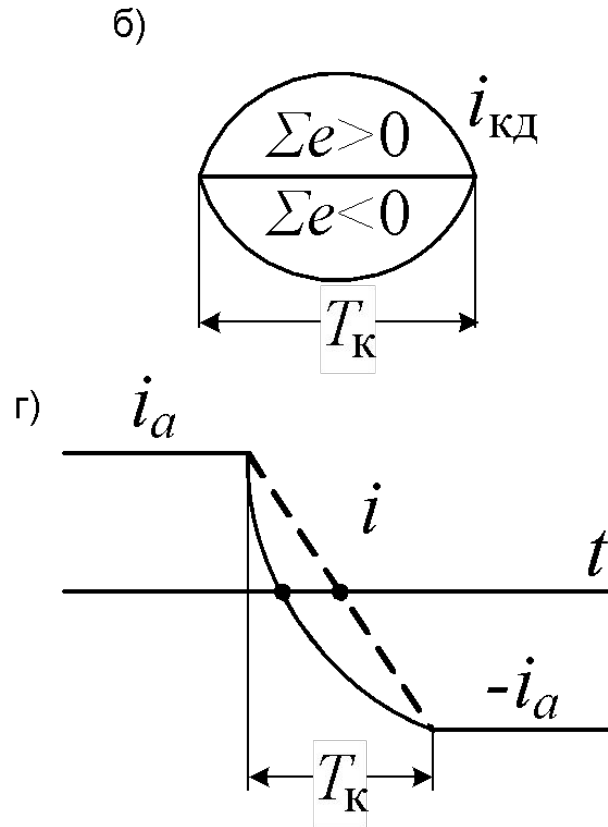
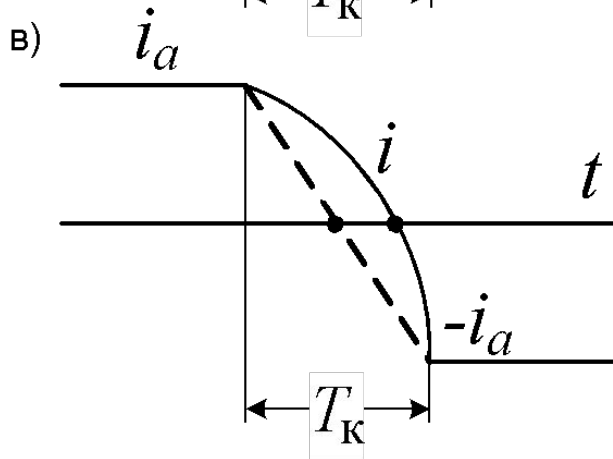
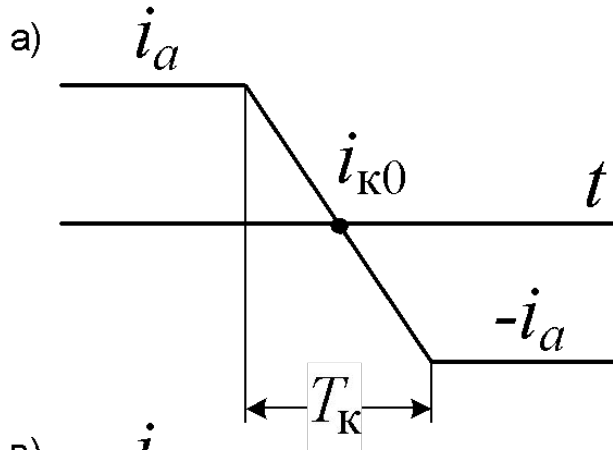
$$i = i_a \cdot \left(1 - 2 \frac{t}{T_K} \right) + i_{кд} = i_{ко} + i_{кд} \quad T_K \text{ - период коммутации (около 0,001сек)}$$

$i_{ко}$ - основной ток коммутации (изменяется по линейному закону)

$$i_{кд} = \frac{\Sigma e}{R_c + 2R_{\Pi} + r_{щ1} + r_{щ2}} \quad \text{-добавочный ток коммутации}$$

Изменение тока в коммутируемой секции

$$r_k = r_c + 2r_n + \frac{T_k^2}{(T_k - t)t} r_{ш}$$



a — основной ток коммутации; *б* — добавочный ток коммутации; *в* — замедленная коммутация; *г* — ускоренная коммутация

ЭДС в коммутируемой секции

1. ЭДС самоиндукции (всегда препятствует изменению тока в контуре):

$$e_L = -L_c \frac{di}{dt} > 0$$

2. ЭДС взаимоиנדукции

(существует если одновременно с данной секцией коммутируют другие секции, стороны которых находятся в одном пазу с рассматриваемой секцией) .

$$e_M = -M \frac{di}{dt} > 0$$

$$e_L + e_M = e_r \text{ - реактивная ЭДС}$$

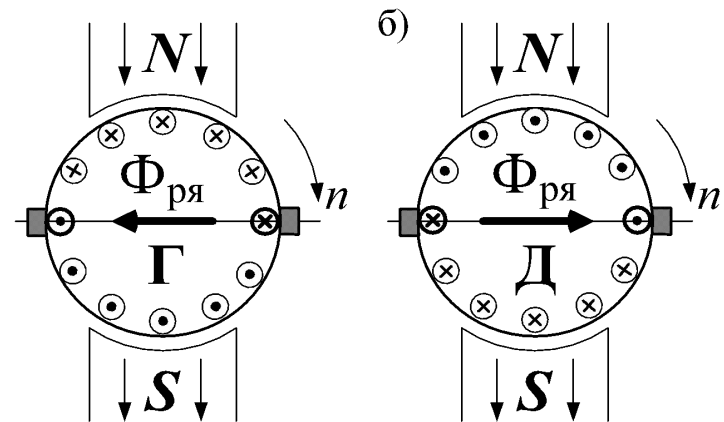
3. ЭДС от поля поперечной реакции якоря (поддерживает ток прежнего направления)

$$e_{aq} > 0$$

Для борьбы с этими ЭДС в контуре коммутируемой секции надо создать противоположную по направлению и компенсирующую их ЭДС пропорциональную току якоря.

Такая ЭДС называется **коммутирующей ЭДС**

$$e_K > e_r$$



Улучшение коммутации путем сдвига щеток

