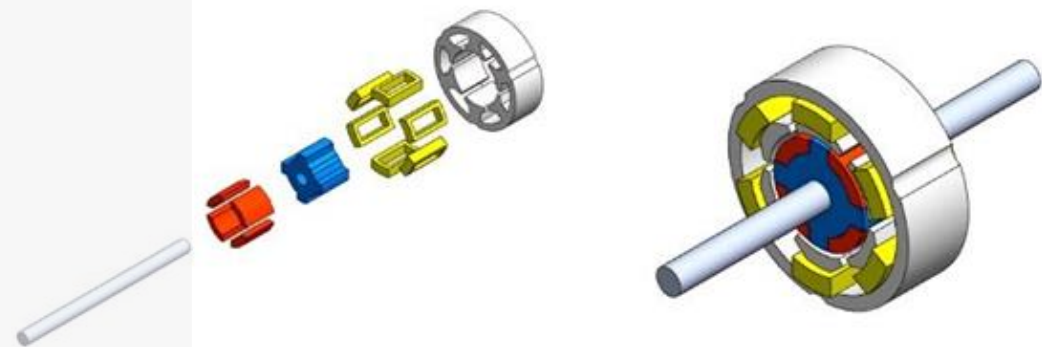


Синхронные микродвигатели

Виды, конструкции, характеристики



Синхронные двигатели с ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Конструкции СДПМ

Конструкции СДПМ

Наибольшее распространение получили СДПМ с асинхронным пуском

- » конструкция статора – аналогично АД
- » конструкция ротора – ПМ + пусковая КЗ обмотка
 - радиальная
 - аксиальная
 - тангенциальная

Радиальное расположение ПМ и пусковой обмотки

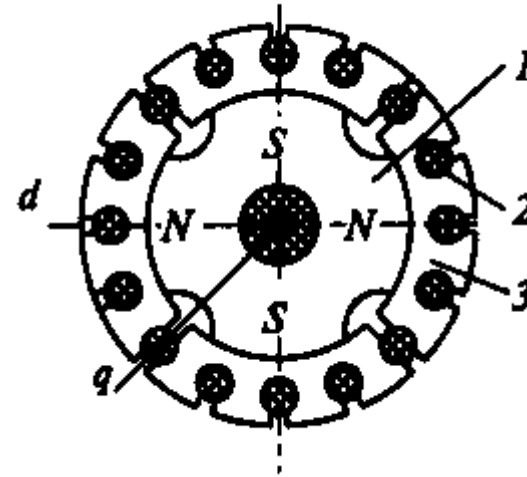
1. ПМ («звездочка»)
2. КЗ обмотка («белчья клетка»)
3. Полюсные наконечники ($\alpha \approx 0,95\tau$)

Большое α

- большая проводимость рассеяния между полюсами ротора
- предохраняет ПМ от размагничивания полем реакции якоря
- повышает потокосцепление обмоток статора и ротора при пуске

Пусковая обмотка – также демпферная обмотка

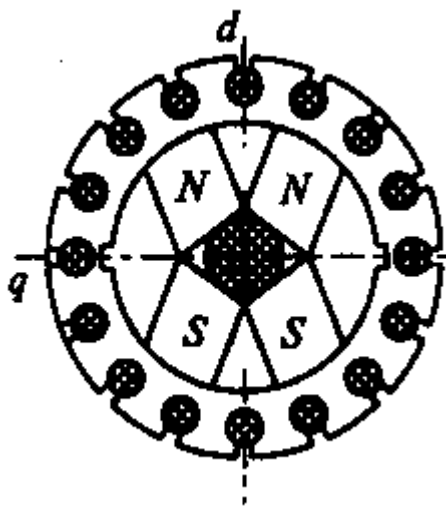
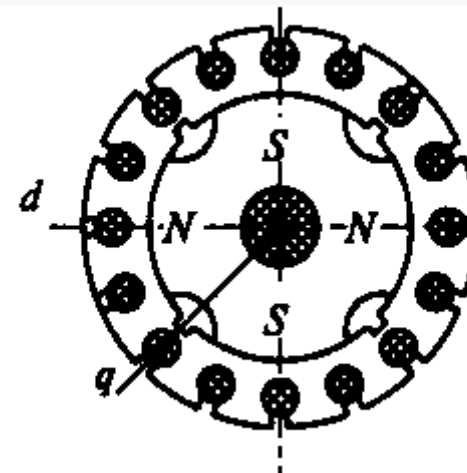
- защищает ПМ от размагничивания ударным током КЗ при включении двигателя



Конструкции СДПМ

В СДПМ малой мощности при больших n между полюсными башмаками – мостики насыщения

- » улучшают пусковые свойства
- » формируют единый сердечник – прочный и технологичный



Редкоземельные магниты – в форме брусков с магнитной анизотропией

Для них

- ромбовидный вал (или втулка)
- сплошной сердечник пусковой обмотки

Конструкции СДПМ

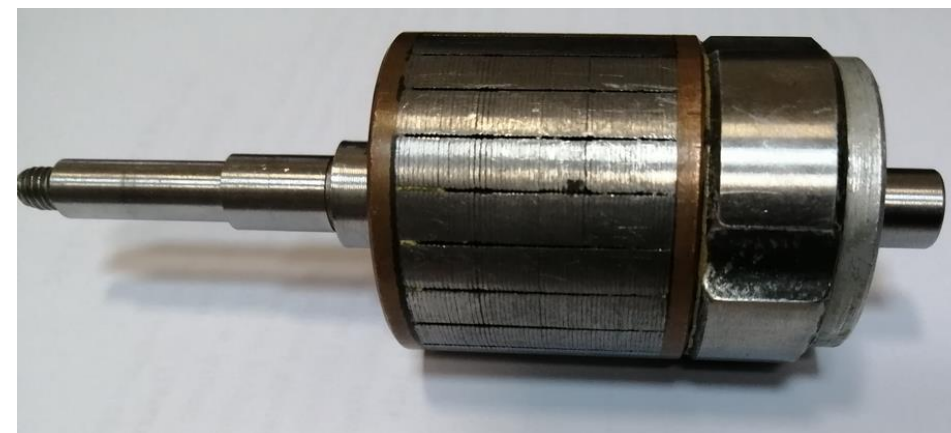
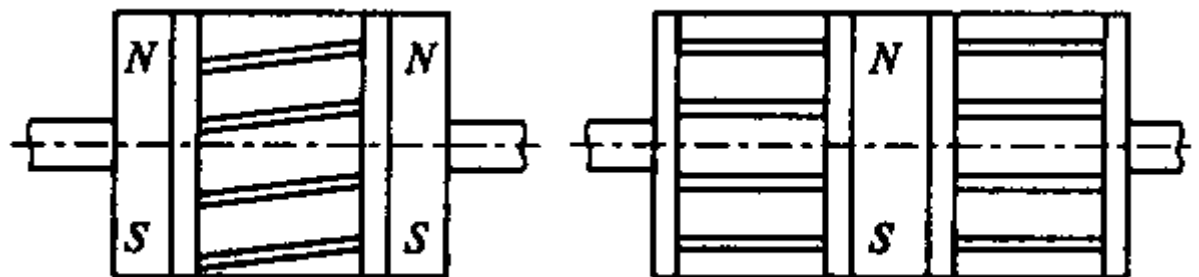
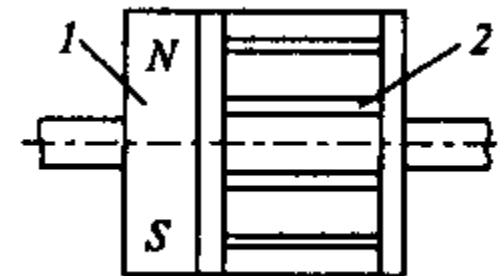
Аксиальное расположение ПМ и пусковой обмотки

Применяется при ограничении внешнего диаметра

- » Для обеспечения надежного пуска пусковая обмотка занимает 70-80% длины машины
- » Из-за малого $\mu_{\text{пм}}$ поток статора сосредоточен в зоне КЗ ротора $\rightarrow x_{ad} \approx x_{aq}$ и СДПМ аксиальной конструкции можно рассматривать как неявнополюсный

Недостаток аксиального СДПМ – осевые силы магнитного тяжения

- » применяют симметричные конструкции



Конструкции СДПМ

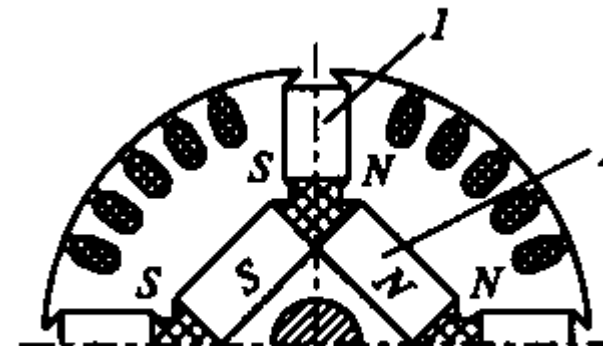
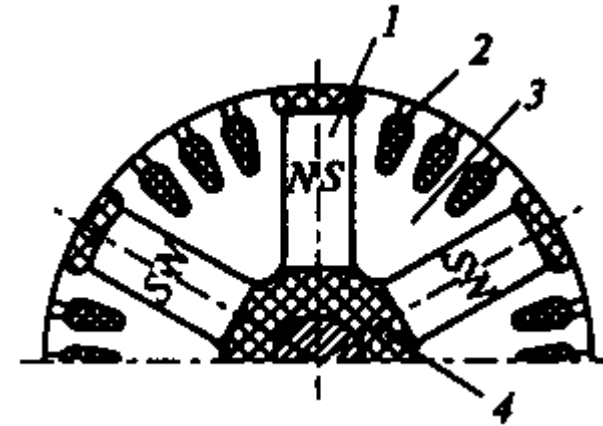
Тангенциальное расположение ПМ и пусковой обмотки
(двигатель с ротором коллекторного типа)

- » Полюса-сегменты 3 концентрируют магнитный поток тангенциальных ПМ (если $b_m > b_p/2$, то $B_\delta > B_m$)
- » Немагнитная втулка 4 снижает поток рассеяния магнитов через вал

Недостатки

- » сложность конструкции
- » малая доля магнитов в объеме ротора
- » паразитные воздушные зазоры

Вариант – комбинация тангенциальных и радиальных ПМ



Синхронные двигатели с ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Уравнения и
характеристики

Основные уравнения СДПМ

К СДПМ полностью приложима общая теория СД с возбужденными явно выраженными полюсами (при учете соотношения x_d / x_q)

Составляющие токов
$$I_d = \frac{U}{r_s^2 + x_d x_q} (x_q \cos \theta_U - x_q \varepsilon - r_s \sin \theta_U) \quad I_q = \frac{U}{r_s^2 + x_d x_q} (r_s \cos \theta_U - r_s \varepsilon + x_d \sin \theta_U)$$

Потребляемая из сети мощность
$$P_S = \frac{mU^2}{r_s^2 + x_d x_q} \left[\varepsilon (x_q \sin \theta_U - r_s \cos \theta_U) + \frac{1}{2} (x_d - x_q) \sin 2\theta_U + r_s \right]$$

Электромагнитная мощность
$$P_{ЭМ} = P_S - \Delta P_{\varepsilon S} = P_S - mI^2 r_s$$

Вращающий момент
$$M = A_\varepsilon \sin(\theta_U + \alpha_\varepsilon) + A_{dq} \sin 2(\theta_U + \alpha_{dq}) - M_\tau$$

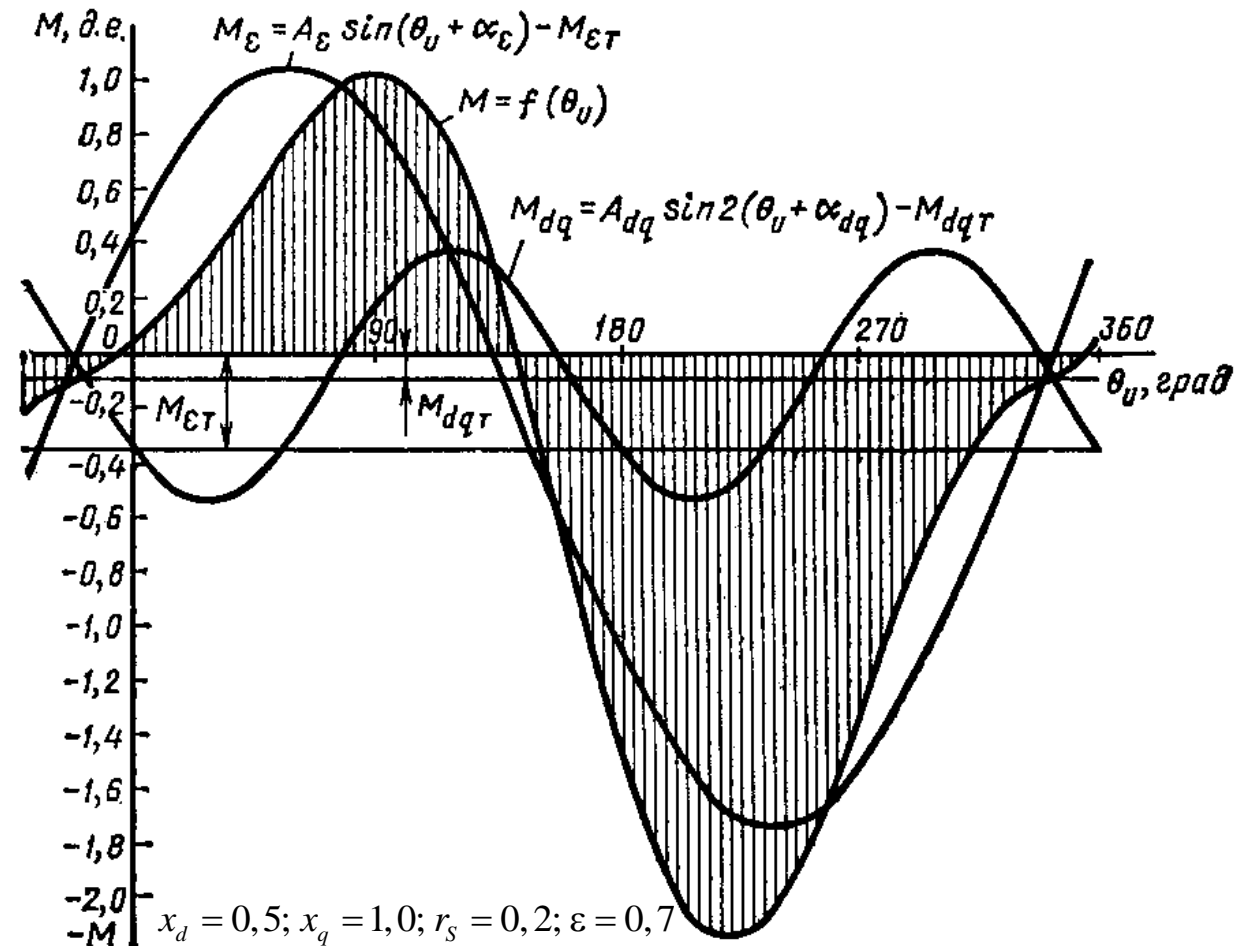
где амплитуда электромагнитного момента
$$A_\varepsilon = \frac{mU^2 \varepsilon}{\Omega_c (r_s^2 + x_d x_q)^2} \sqrt{(x_d x_q^2 - r_s^2 x_q + 2r_s^2 x_d)^2 + r_s^2 (2x_q^2 + r_s^2 - x_d x_q)^2}$$

амплитуда реактивного момента
$$A_{dq} = \frac{mU^2 (x_d - x_q)}{2\Omega_c (r_s^2 + x_d x_q)^2} \sqrt{(x_d x_q - r_s^2)^2 + r_s^2 (x_d + x_q)^2}$$

суммарный тормозной момент
$$M_\tau = \frac{mU^2 r_s}{\Omega_c (r_s^2 + x_d x_q)^2} \left[\varepsilon^2 (r_s^2 + x_q^2) + \frac{(x_d - x_q)^2}{2} \right]$$

Угловая характеристика СДПМ

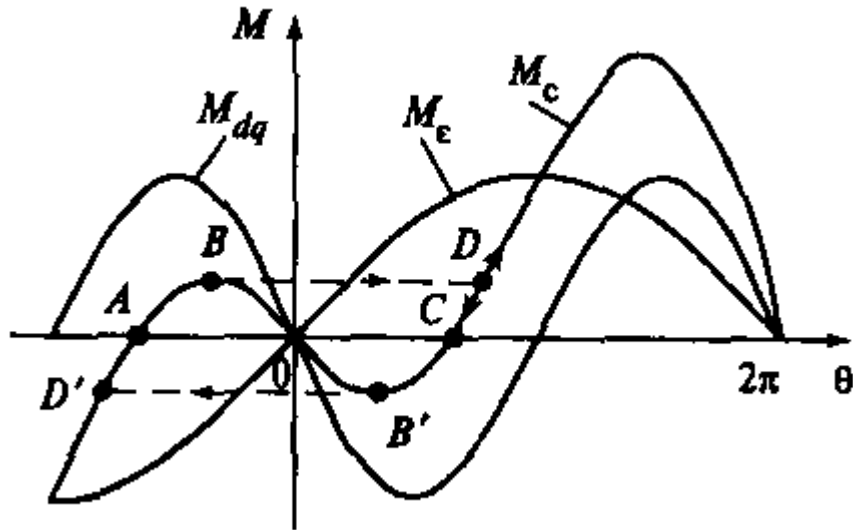
Угловая характеристика при $x_d < x_q$



Угловая характеристика СДПМ

В СДПМ при малой степени возбужденности ε реактивный момент M_{dq} становится соизмерим с основным моментом M_ε

Тогда при отрицательных углах нагрузки появляется зона двигательного режима (участок AB)



При малой нагрузке СД может устойчиво работать как на участке CD , так и на участке AB

При работе на участке AB СДПМ имеет низкие энергетические показатели

Кроме того, возникает проблема синфазности вращения нескольких СД

Для исключения такой ситуации надо иметь $\varepsilon \geq \frac{x_q - x_d}{\sqrt{r_s^2 + x_q^2}}$

Синхронные двигатели с ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Расчет параметров

Расчет параметров СДПМ

Для того, чтобы воспользоваться уравнениями СД, необходимо знать ЭДС E_0 , наводимую основным потоком ПМ, и параметры машины $x_d = x_{ad} + x_s$, $x_q = x_{aq} + x_s$

Как ЭДС, так и индуктивные параметры ЭМ определяются соответствующими потоками:

- » $E_0 = f(\Phi_{\delta m1}) \rightarrow$ основная гармоника потока в зазоре, создаваемого ПМ
- » $x_{ad} = f(\Phi_{\delta d1}) \rightarrow$ основная гармоника потока в зазоре, созданного продольной МДС якоря F_{dm}
- » $x_{aq} = f(\Phi_{\delta q1}) \rightarrow$ основная гармоника потока в зазоре, созданного поперечной МДС якоря F_{qm}
- » $x_s = f(\Phi_s) \rightarrow$ поток рассеяния обмотки якоря

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря x_s может быть найдено по инженерным формулам

$$x_s = \frac{2m_1 f_1 w_1 k_{o1}^2}{p} \Lambda_s$$

Магнитная проводимость рассеяния $\Lambda_s = \frac{2\mu_0 l_{\delta}}{pq} (\lambda_{\Pi} + \lambda_{Л} + \lambda_{Д})$

где λ_{Π} , $\lambda_{Л}$, $\lambda_{Д}$ – коэффициенты удельной проводимости для потокосцепления пазового, лобового и дифференциального рассеяния обмотки якоря

Расчет параметров СДПМ

Для определения потоков в зазоре рассмотрим упрощенную картину магнитного поля в СДПМ радиальной конструкции

Потоки продольной реакции якоря F_{dm}

- » Φ_{Sd} – поток рассеяния обмотки якоря
- » $\Phi_{\delta d}$ – полный поток в зазоре, созданный F_{dm}
- » $\Phi_{\sigma d}$ – поток межполюсного рассеяния ротора
- » Φ_{dM} – поток в магните вдоль продольной оси

Поток основной гармонической индукции в зазоре, созданный продольной МДС якоря F_{dm}

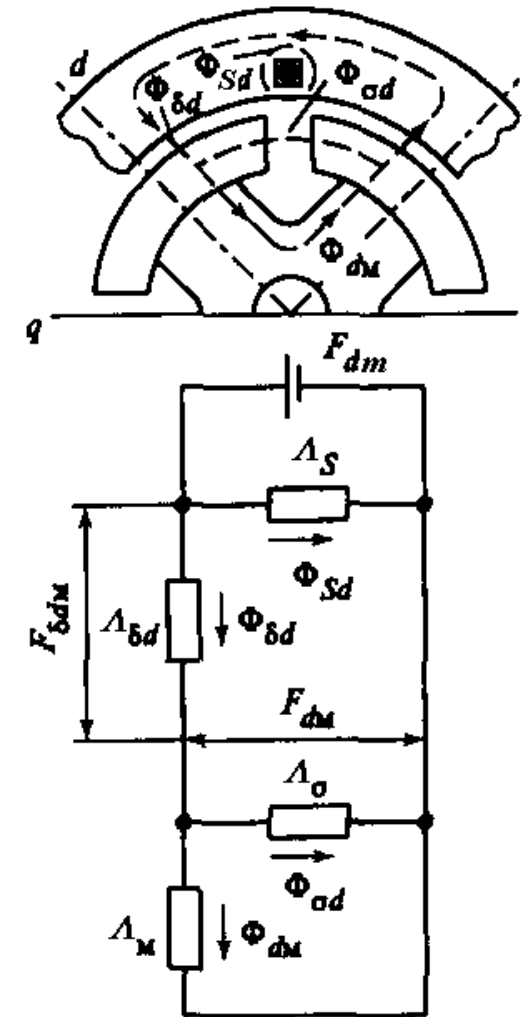
$$\Phi_{\delta d1} = \frac{\Phi_{\delta d}}{k_{\Phi d}} = \frac{F_{dm} \Lambda_{ad}}{k_{\Phi d}} \quad \text{где} \quad F_{dm} = \frac{\sqrt{2} m_1 w_1 k_{ol} I_d}{\pi p}$$

Здесь $k_{\Phi d}$ – коэффициент потока по оси d

Λ_{ad} – магнитная проводимость для потока продольной реакции
(с учетом всех ответвлений потока)

Величина проводимости Λ_{ad} может быть найдена по схеме замещения

$$\Lambda_{ad} = \frac{\Lambda_{\delta d} (\Lambda_{\sigma} + \Lambda_M)}{\Lambda_{\delta d} + \Lambda_{\sigma} + \Lambda_M}$$



Расчет параметров СДПМ

Для определения потоков в зазоре рассмотрим упрощенную картину магнитного поля в СДПМ радиальной конструкции

Потоки поперечной реакции якоря F_{qm}

- » Φ_{Sq} – поток рассеяния обмотки якоря
- » $\Phi_{\delta q}$ – полный поток в зазоре, созданный F_{qm} (поток замыкается по полюсным наконечникам)

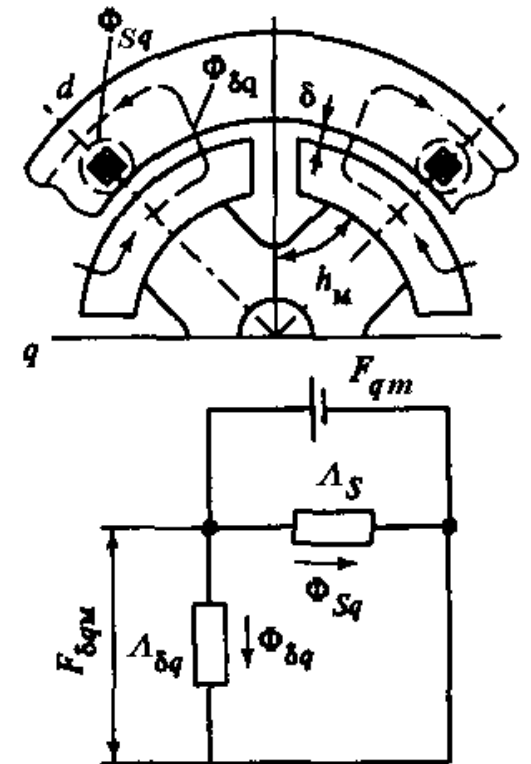
Поток основной гармонической индукции в зазоре, созданный поперечной МДС якоря F_{qm}

$$\Phi_{\delta q1} = \frac{\Phi_{\delta q}}{k_{\Phi q}} = \frac{F_{qm} \Lambda_{aq}}{k_{\Phi q}} \quad \text{где} \quad F_{qm} = \frac{\sqrt{2} m_1 w_1 k_{o1} I_q}{\pi r}$$

Здесь $k_{\Phi q}$ – коэффициент потока по оси q

Λ_{aq} – магнитная проводимость для потока поперечной реакции

Величина проводимости Λ_{aq} по схеме замещения $\Lambda_{aq} = \Lambda_{\delta q}$



Расчет параметров СДПМ

Для определения потоков в зазоре рассмотрим упрощенную картину магнитного поля в СДПМ радиальной конструкции

Замыкание основного потока постоянного магнита

- » Φ_M – поток постоянного магнита
- » $\Phi_{\sigma M}$ – поток межполюсного рассеяния ротора
- » $\Phi_{\delta M}$ – полный поток в зазоре, созданный ПМ (замыкается по стали с $\mu_{ст} = \infty$)

Поток основной гармонической индукции в зазоре

Здесь $k_{\Phi M}$ – коэффициент потока магнита

Λ_{dM} – магнитная проводимость зазора для потока магнита

Величина проводимости Λ_{dM} по схеме замещения

$$\Lambda_{dM} = \Lambda_{\delta M}$$

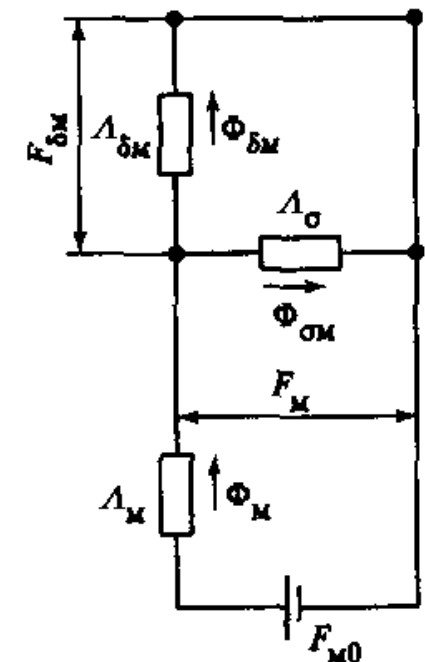
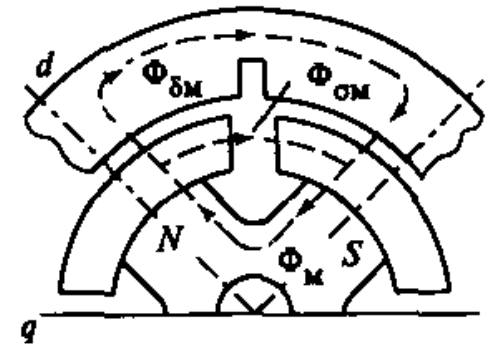
МДС F_M может быть найдена по схеме замещения как

МДС магнита $F_{M0} = H_c h_M$ за вычетом падения U_μ в теле магнита

$$F_M = F_{M0} - \Phi_M \frac{1}{\Lambda_M}$$

Поток магнита
$$\Phi_M = F_{M0} \frac{\Lambda_M (\Lambda_\sigma + \Lambda_{\delta M})}{\Lambda_M + \Lambda_\sigma + \Lambda_{\delta M}}$$

Таким образом
$$F_M = F_{M0} \frac{\Lambda_M}{\Lambda_M + \Lambda_\sigma + \Lambda_{\delta M}}$$



Расчет параметров СДПМ

Найдем параметры схем замещения

Проводимость воздушного зазора $\Lambda_{\delta d}$ для потока $\Phi_{\delta d}$
$$\Lambda_{\delta d} = \frac{\Phi_{\delta d}}{F_{\delta dm}} = \frac{k_{\Phi d} \Phi_{\delta d1}}{F_{\delta dm}}$$

Поток основной гармонической индукции
$$\Phi_{\delta d1} = \frac{2}{\pi} \tau l_{\delta} B_{\delta d1m} = \frac{2}{\pi} \tau l_{\delta} k_d B_{\delta dm}$$

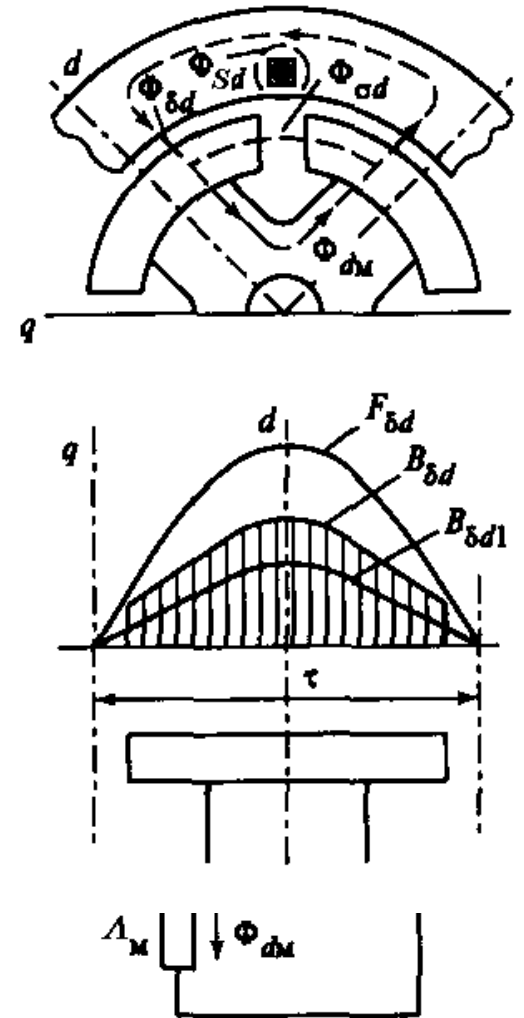
Здесь $B_{\delta d1m}$ – амплитуда основной гармонической индукции в зазоре
 $B_{\delta dm}$ – максимальное значение индукции в зазоре, созданной $F_{\delta d}$
 k_d – коэффициент формы поля якоря по продольной оси

Максимальное значение индукции в зазоре
$$B_{\delta dm} = \frac{\mu_0 F_{\delta dm}}{\delta k_{\delta}}$$

Тогда проводимость воздушного зазора

$$\Lambda_{\delta d} = \frac{k_{\Phi d} \Phi_{\delta d1}}{F_{\delta dm}} = \frac{k_{\Phi d}}{F_{\delta dm}} \cdot \frac{2}{\pi} \tau l_{\delta} k_d B_{\delta dm} = \frac{k_{\Phi d}}{F_{\delta dm}} \cdot \frac{2}{\pi} \tau l_{\delta} k_d \frac{\mu_0 F_{\delta dm}}{\delta k_{\delta}}$$

или
$$\Lambda_{\delta d} = \frac{2k_d k_{\Phi d} \mu_0 \tau l_{\delta}}{\pi \delta k_{\delta}}$$



Расчет параметров СДПМ

Найдем параметры схем замещения

Проводимость воздушного зазора $\Lambda_{\delta M}$ для потока ПМ $\Lambda_{\delta M} = \frac{\Phi_{\delta M}}{F_{\delta M}} = \frac{k_{\Phi M} \Phi_{\delta M1}}{F_{\delta M}}$

Поток основной гармонической индукции $\Phi_{\delta M1} = \frac{2}{\pi} \tau l_{\delta} B_{\delta M1m} = \frac{2}{\pi} \tau l_{\delta} k_M B_{\delta Mm}$

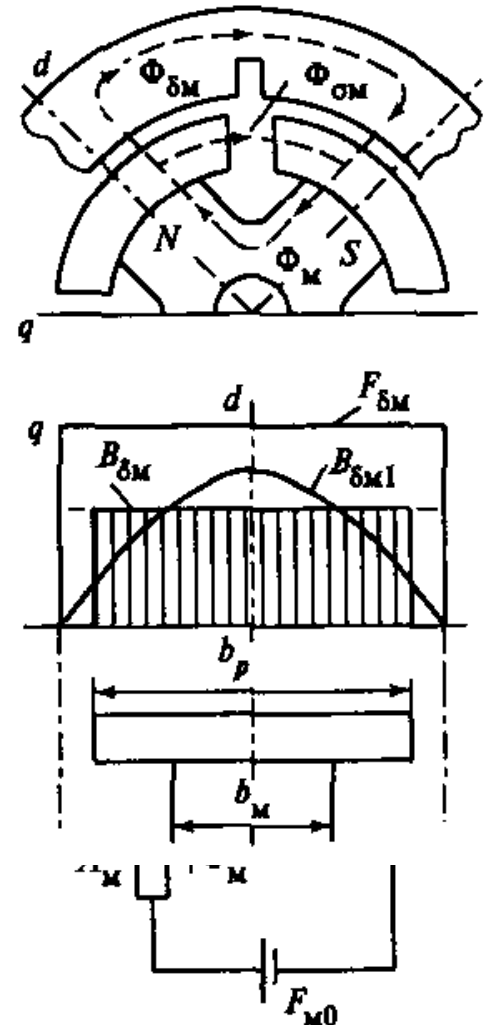
Здесь $B_{\delta M1m}$ – амплитуда основной гармонической индукции в зазоре
 $B_{\delta Mm}$ – максимальное значение индукции в зазоре, созданной ПМ
 k_M – коэффициент формы поля магнита

Максимальное значение индукции в зазоре

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

Тогда проводимость воздушного зазора

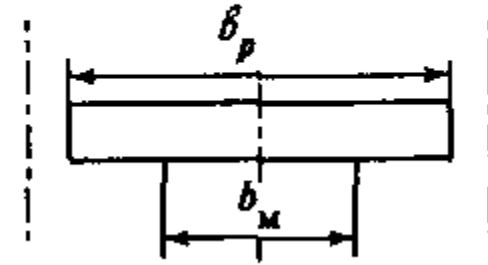
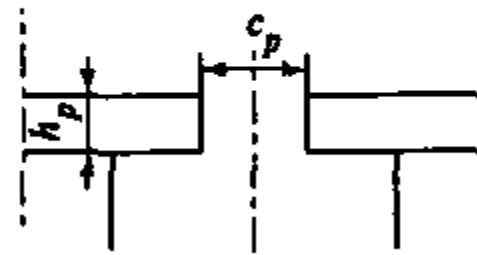
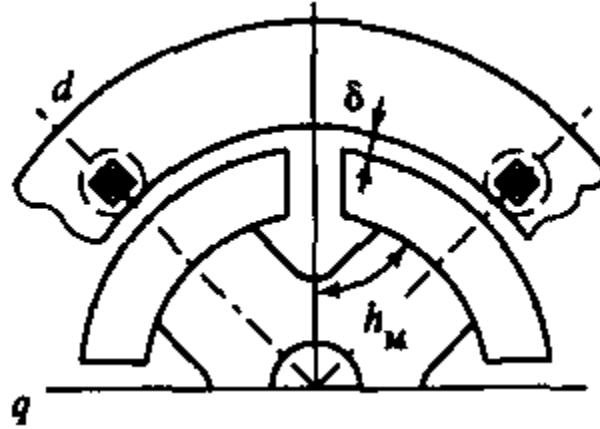
$$\Lambda_{\delta M} = \frac{2k_M k_{\Phi M} \mu_0 \tau l_{\delta}}{\pi \delta k_{\delta}}$$



Расчет параметров СДПМ

Найдем параметры схем замещения

Остальные проводимости найдем по упрощенной геометрии СДПМ



Магнитная проводимость полюса магнита по продольной оси

$$\Lambda_M = \frac{\mu_M b_M l_M}{h_M}$$

Магнитная проводимость рассеяния ротора на один полюс

$$\Lambda_\sigma = \Lambda_{\sigma M} + \Lambda_{\sigma p}$$

Магнитная проводимость рассеяния полюса магнита между боковыми и торцевыми поверхностями

$$\Lambda_{\sigma M} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \left(p l_M + b_M \sin \frac{\pi}{2p} + 0,5 h_M \right)$$

Магнитная проводимость рассеяния полюсных наконечников

$$\Lambda_{\sigma p} = 4 \mu_0 \left(\frac{h_p l_p}{c_p} + 0,64 (h_p + l'_p) \gamma_1 + 0,32 l_M \gamma_2 \right)$$

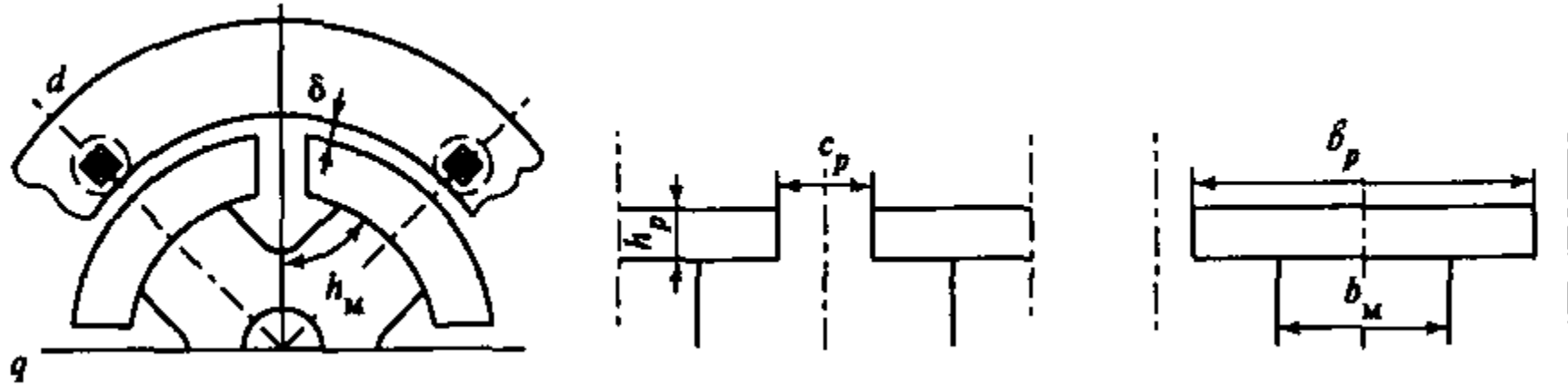
Здесь l_M , l_p – длина магнита и полюсного наконечника, а также

$$l'_p = \frac{l_p - l_M}{2} \quad \gamma_1 = \ln \left(1 + \frac{\pi b_p}{2c_p} \right) \quad \gamma_2 = \ln \left(1 + \frac{\pi(b_p - b_M)}{2c_p} \right)$$

Расчет параметров СДПМ

Найдем параметры схем замещения

Остальные проводимости найдем по упрощенной геометрии СДПМ



Коэффициенты формы поля и потока

$$k_d = \frac{\alpha_p \pi + \sin \alpha_p \pi}{\pi}$$

$$k_{\Phi d} = \frac{\pi \sin \alpha_p \frac{\pi}{2}}{\alpha_p \pi + \sin \alpha_p \pi}$$

$$k_M = \frac{4 \sin \alpha_p \frac{\pi}{2}}{\pi}$$

$$k_q = \frac{\alpha_p \pi - \sin \alpha_p \pi}{\pi}$$

$$k_{\Phi q} = \frac{\pi \left(1 - \cos \alpha_p \frac{\pi}{2} \right)}{\alpha_p \pi + \sin \alpha_p \pi}$$

$$k_{\Phi M} = \frac{\alpha_p \pi^2}{8 \sin \alpha_p \frac{\pi}{2}}$$

Расчет параметров СДПМ

Найдем параметры схем замещения

Окончательно найдем

ЭДС от поля возбуждения $E_0 = \sqrt{2}\pi f_1 w_1 k_{o1} \Phi_{\delta m1}$

Главное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси

$$x_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_d} = \frac{\sqrt{2}\pi f_1 w_1 k_{o1} \Phi_{\delta d1}}{I_d} = \frac{\sqrt{2}\pi f_1 w_1 k_{o1}}{I_d} \cdot \frac{F_{dm}}{k_{\Phi d}} \Lambda_{ad}$$

с учетом $F_{dm} = \frac{\sqrt{2}m_1 w_1 k_{o1} I_d}{\pi p}$ запишем выражение

$$x_{ad} = \frac{2m_1 f_1 (w_1 k_{o1})^2}{k_{\Phi d} p} \Lambda_{ad}$$

Аналогично

Главное индуктивное сопротивления якоря по поперечной оси

$$x_{aq} = \frac{2m_1 f_1 (w_1 k_{o1})^2}{k_{\Phi q} p} \Lambda_{aq}$$

ЭДС и параметры нашли, теперь можно рассчитывать характеристики СДПМ

Синхронные двигатели с ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Пуск и синхронизация

Способы пуска в ход СДПМ

Основной недостаток СДПМ – невозможность прямого пуска включением в сеть

Электромагнитная постоянная времени много меньше электромеханической

→ вращающееся поле устанавливается за доли периода, а ротор повернуться не успевает

→ при $f = 50$ Гц ротор «дрожит»

- » Частотный пуск – хорошо, но дорого
- » Разгонный двигатель в микромашинах – нецелесообразно
- » Асинхронный пуск – самый распространенный среди синхронных микродвигателей (разгон с помощью пусковой КЗ обмотки и втягивание в синхронизм)

Пусковые свойства СД

- » пусковой ток
- » пусковой момент (минимальное значение асинхронного момента)
- » момент входа в синхронизм (максимальный допустимый момент нагрузки, при котором СД еще втягивается в синхронизм после разгона)

Особенности пуска в ход СДПМ

Асинхронный пуск обычного СД – при отключенной ОВ (замкнута на R_d)

В СДПМ нельзя «отключить» поле постоянных магнитов

- » в процессе разгона ротора под действием асинхронного момента M_a вращающееся поле ПМ наводит в якоре ЭДС E_E
- » частота этой ЭДС E_E зависит от скорости ротора (скольжения): $f_E = (1-s)f_1$ (при неподвижном роторе ($s = 1$) ЭДС не наводится)
- » под действием ЭДС E_E в обмотках через источник питания замыкается ток I_E
- » поскольку частота этого тока не совпадает с частотой сети, сопротивление источника питания этому току отсутствует (аналогично режиму КЗ генератора) → ток имеет заметную величину
- » взаимодействие тока I_E с полем возбуждения создает тормозной генераторный момент

$$M_T = \frac{mE_0 r_s}{\Omega_c} \cdot \frac{(1-s)(r_s^2 + (1-s)^2 x_q^2)}{(r_s^2 + (1-s)^2 x_d x_q)^2}$$

Здесь E_0 – ЭДС в обмотке якоря от поля возбуждения при $n = n_c$

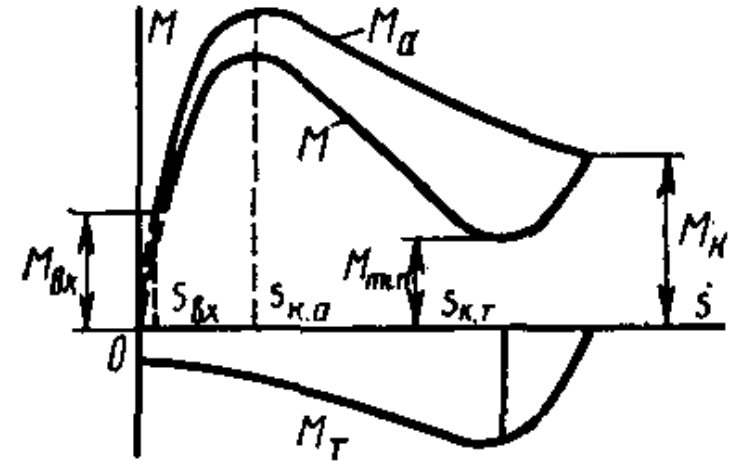
Характеристика тормозного момента $M_T = f(s)$ – как у обращенной асинхронной машины (у которой идеальный ХХ при $n = 0$ и режим КЗ при $n = n_c$)

Особенности пуска в ход СДПМ

Результирующий момент СДПМ при асинхронном пуске $M = M_a + M_T$

- » уменьшение результирующего момента
- » провал в кривой момента (при критических скольжениях тормозного момента $s_{кТ}$)

$$M_T = \frac{mE_0 r_s}{\Omega_c} \cdot \frac{(1-s)(r_s^2 + (1-s)^2 x_q^2)}{(r_s^2 + (1-s)^2 x_d x_q)^2}$$

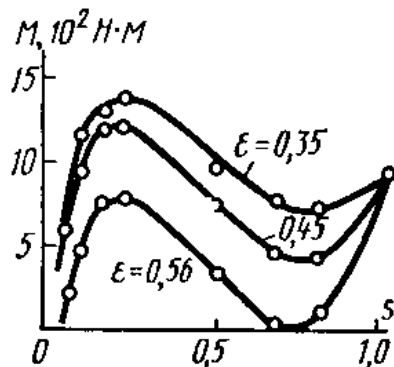


Тормозной момент зависит от величины E_0 (от степени возбужденности ϵ)

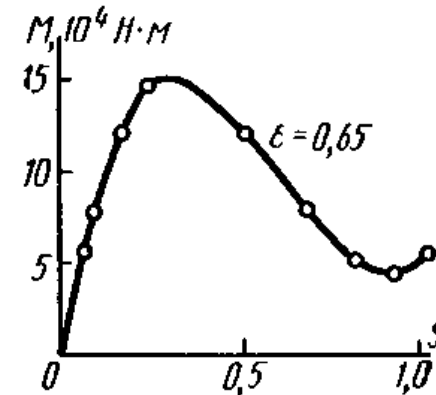
При больших значениях ϵ провал из-за M_T большой

→ двигатель может не запуститься

СДПМ
мощностью
2,5 Вт



При бóльшей мощности
влияние ϵ слабее
(меньше значения r_s)

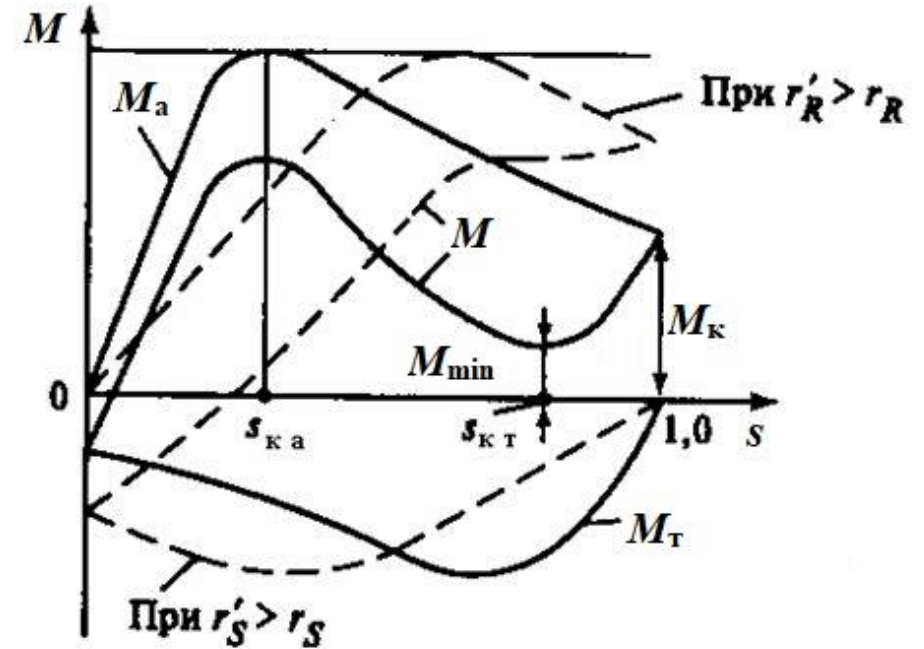


СДПМ
мощностью
50 Вт

Особенности пуска в ход СДПМ

Величина провала в кривой момента зависит также от критического скольжения тормозного момента $s_{кТ}$

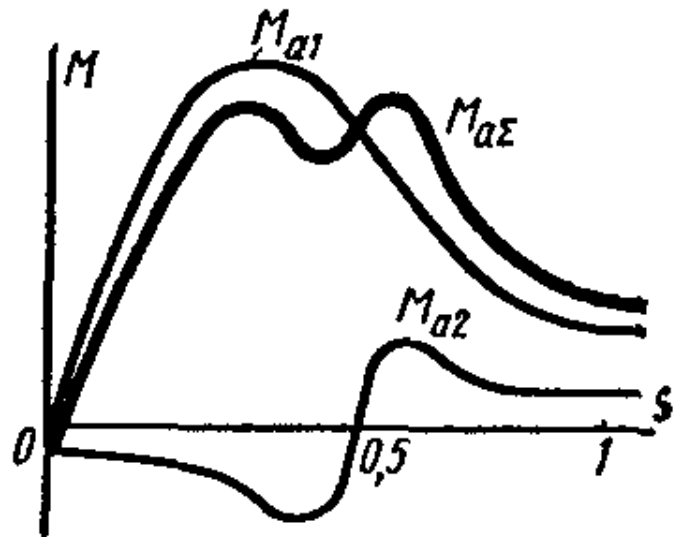
- » по мере увеличения r_S изменяется $s_{кТ}$, но величина M_{Tmax} остается постоянной (как и асинхронный момент в зависимости от r_2)
- » в результате изменяется форма результирующей кривой момента



Для улучшения пусковых свойств СДПМ радиальной конструкции при уменьшении мощности/габаритов рекомендуется увеличивать диаметр D_a и уменьшать длину машины l_δ

Особенности пуска в ход СДПМ

Другая проблема пуска СДПМ радиальной конструкции – неодинаковое x стержней пусковой обмотки (из-за прорезей / мостиков насыщения между полюсными наконечниками)



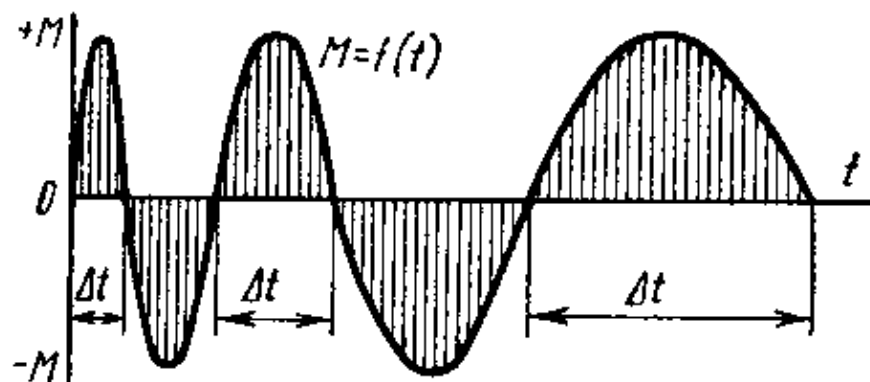
Электрическая несимметрия пусковой обмотки

- » прямая и обратная составляющие токов ротора
- » асинхронный момент от поля статора и прямой составляющей токов ротора M_{a1}
- » асинхронный момент от поля статора и обратной составляющей токов ротора M_{a2} (его синхронная скорость – при половинной n)
- » провал в кривой результирующего момента при половинной n ($s = 0,5$)
- » снижение результирующего момента на подсинхронной скорости

Вхождение в синхронизм

На подсинхронной скорости синхронный момент M_c изменяется и меняет знак «медленно» ($s \rightarrow 0$) и за время «положительного» момента его импульса $M_c \Delta t$ может хватить для разгона ротора до синхронной скорости Ω_c (происходит втягивания в синхронизм)

За время «положительного» синхронного момента ему также помогает асинхронный момент M_a (хоть и уменьшающийся с уменьшением s)



Противодействуют разгону момент сопротивления механизма M_M и тормозной момент синхронного двигателя M_T

Кроме того, для втягивания в синхронизм необходимо обеспечить прирост кинетической энергии (разгон от Ω до Ω_c)

Условие втягивания в синхронизм:

«положительная» энергия, полученная за время Δt от синхронного и асинхронного моментов M_c и M_a , должна быть больше прироста кинетической энергии ротора и механизма и «отрицательной» энергии противодействующих моментов сопротивления механизма и тормозного момента двигателя M_M и M_T

Вхождение в синхронизм

Минимально необходимый баланс энергии для втягивания в синхронизм

$$A_c + A_a = \Delta A_k + (A_m + A_T)$$

Прирост кинетической энергии $\Delta A_k = \frac{J(\Omega_c^2 - \Omega^2)}{2}$

Энергия, полученная от вращающихся моментов $A_c + A_a = (M_{c.c.p.} + M_{a.c.p.})\Omega_{c.p.}\Delta t$

Энергия, полученная от тормозящих моментов $A_m + A_T = (M_{m.c.p.} + M_{T.c.p.})\Omega_{c.p.}\Delta t$

Баланс энергии $(M_{c.c.p.} + M_{a.c.p.})\Omega_{c.p.}\Delta t = \frac{J(\Omega_c^2 - \Omega^2)}{2} + (M_{m.c.p.} + M_{T.c.p.})\Omega_{c.p.}\Delta t$

Разделим на Δt и $\Omega_{c.p.}$ $M_{c.c.p.} + M_{a.c.p.} = J \frac{\Delta\Omega}{\Delta t} + M_{m.c.p.} + M_{T.c.p.}$

Переходя от Δt к dt
получим уравнение движения $J \frac{d\Omega}{dt} = M_c + M_a - M_m - M_T$

Средняя скорость

$$\Omega_{c.p.} = \frac{\Omega_c + \Omega}{2}$$

Анализ переходного процесса
втягивания в синхронизм
– решение уравнения

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_c(\theta, t) + M_a(s, t) - M_m(s) - M_T(s, t)$$

Вхождение в синхронизм

Для упрощения анализа примем допущения

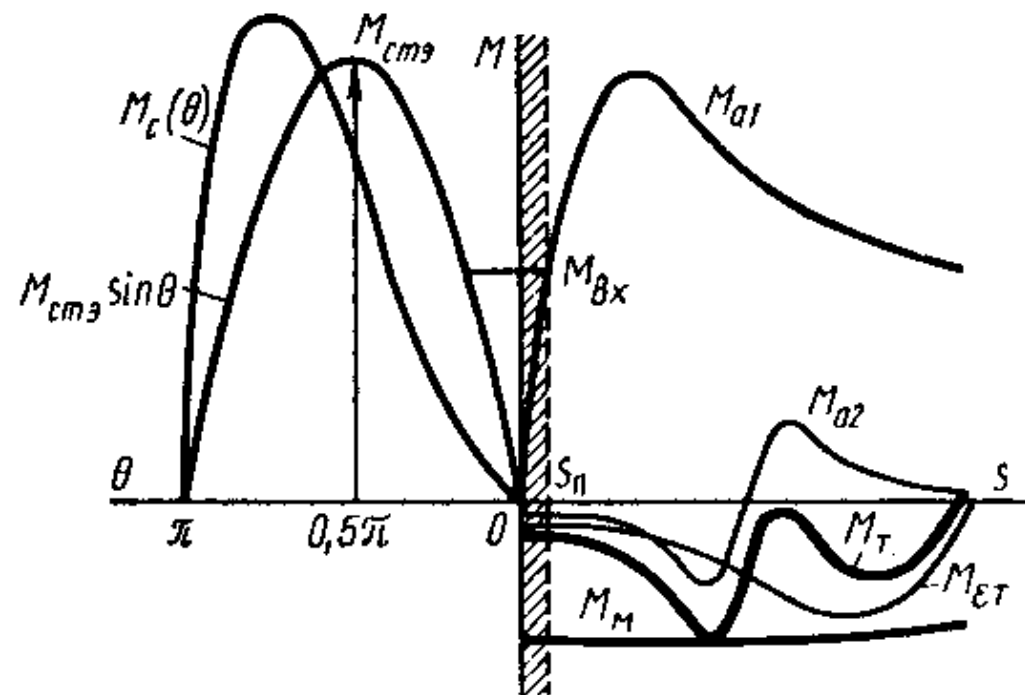
- » в процессе синхронизации момент сопротивления механизма M_M и тормозной момент двигателя M_T остаются постоянными ($M_M + M_T = M_{M,T}$)
- » момент двигателя на угловой характеристике заменим эквивалентной по площади синусоидой $M_c = M_{cm\theta} \sin\theta$ (при возбужденном роторе $M_c = M_{cm\theta} \sin 2\theta$)
- » асинхронный момент при малых значениях s представим прямой $M_a = m_a s$ (где $m_a \rightarrow \text{tg}$ угла наклона механической характеристики)

Выразим производную скорости через угол θ

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{1}{p} \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Тогда уравнение движения записывается как

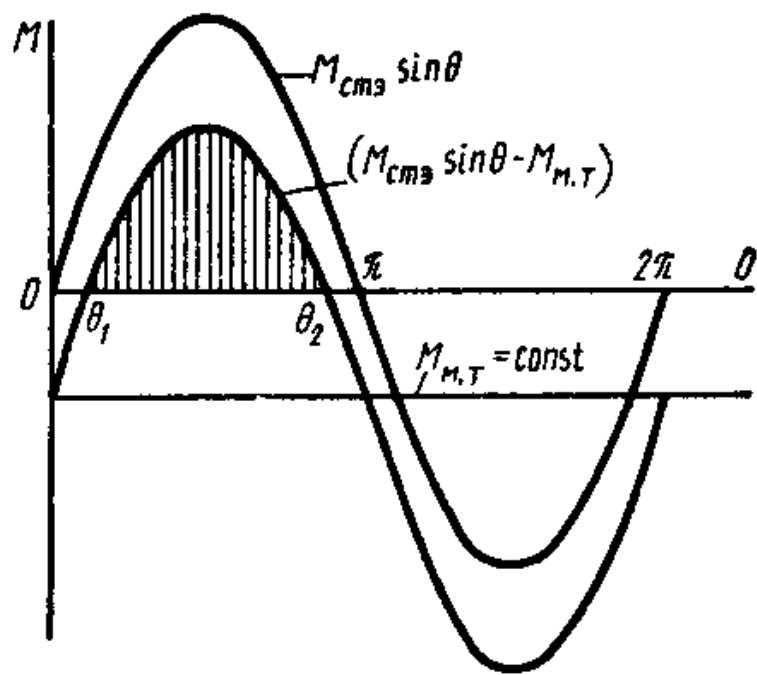
$$\frac{1}{p} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{m_a}{\Omega_c} \cdot \frac{d\theta}{dt} + M_{cm\theta} \sin\theta = M_{M,T}$$



Вхождение в синхронизм

Еще один уровень упрощения для качественного анализа

- » пренебрегаем асинхронным моментом M_a
- » разницу синхронного момента и тормозных моментов заменим единым динамическим моментом



Уравнение движения

$$J \frac{1}{p} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + (M_{смэ} \sin \theta - M_{м,т}) = 0$$

Перепишем через скольжение

$$-J \frac{\Omega_1^2}{2p} d(s^2) = (M_{смэ} \sin \theta - M_{м,т}) d\theta$$

Баланс энергии:

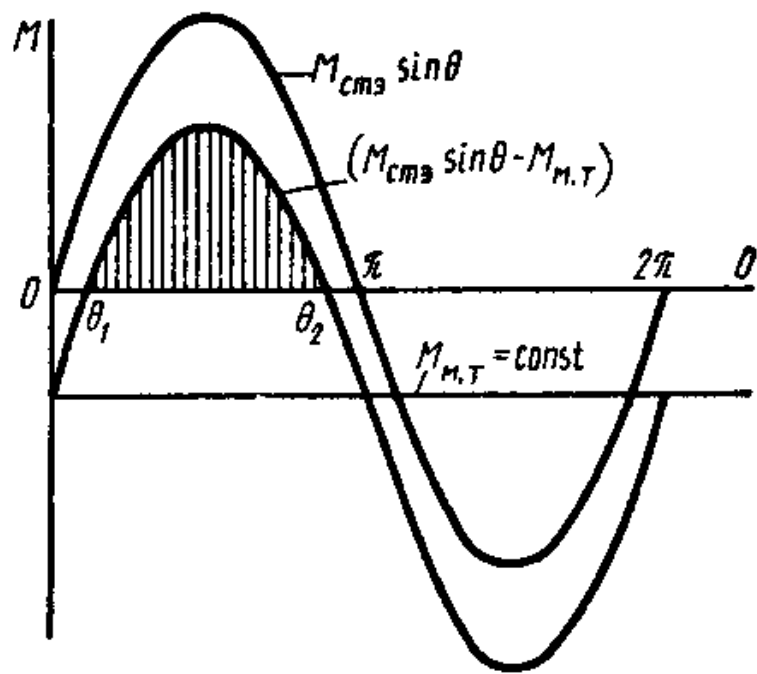
энергия «положительного» динамического момента на участке от θ_1 до θ_2 равна приращению кинетической энергии при изменении скольжения от предельного s_{II} (за счет M_a при данной нагрузке) до 0

$$\int_{s_{II}}^0 -J \frac{\Omega_1^2}{2p} d(s^2) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (M_{смэ} \sin \theta - M_{м,т}) d\theta$$

Вхождение в синхронизм

Баланс энергии
$$\int_{s_{\Pi}}^0 -J \frac{\Omega_1^2}{2p} d(s^2) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (M_{смэ} \sin \theta - M_{м,т}) d\theta$$

Проинтегрируем
$$J \frac{\Omega_1^2}{2p} s_{\Pi}^2 = -M_{смэ} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) - M_{м,т} (\theta_2 - \theta_1)$$



Найдем предельное скольжение, при котором ротор с данной нагрузкой еще втягивается в синхронизм

$$s_{\Pi}^2 = \frac{2p}{\Omega_1^2 J} \left[-M_{смэ} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) - M_{м,т} (\theta_2 - \theta_1) \right]$$

Перепишем с учетом соотношений $\theta_2 = \pi - \theta_1$ и $\theta_2 - \theta_1 = \pi - 2\theta_1$, а также используем значение относительного тормозного момента $m_c = M_{м,т} / M_{смэ} = \sin \theta_1$

$$s_{\Pi}^2 = \frac{4pM_{смэ}}{\Omega_1^2 J} \left[\cos \theta_1 - m_c \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) \right]$$

Вхождение в синхронизм

Для большей наглядности выразим угол θ_1 через относительный тормозной момент ($m_c = \sin\theta_1$)

Тогда предельное скольжение $s_{\Pi}^2 = \frac{4pM_{смэ}}{\Omega_1^2 J} \left[\sqrt{1-m_c^2} - m_c \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin m_c \right) \right]$

Момент входа в синхронизм у микродвигателей не превышает $0,5 \dots 0,6 M_{смэ}$

При этом угол θ_1 не превышает 35°

Тогда $\sin\theta_1$ можно заменить на θ_1 (рад.)

Кроме того, квадратный корень можно представить как $\sqrt{1-m_c^2} = 1 - 0,5m_c^2$

Суммарная погрешность при этом не превысит 10%

В результате упрощенное выражение предельного скольжения

$$s_{\Pi}^2 = \frac{4pM_{смэ}}{\Omega_1^2 J} [1 - 1,57m_c + 0,5m_c^2]$$

Для СД с невозбужденными явно выраженными полюсами

$$s_{\Pi}^2 = \frac{2pM_{смэ}}{\Omega_1^2 J} [1 - 1,57m_c + 0,5m_c^2]$$

s_{Π} в $\sqrt{2}$ раз меньше, т.е. нагрузка должна быть меньше в реактивных СД

Если же принять $m_c = 0$

$$s_{\Pi} = \frac{1}{\pi f} \sqrt{\frac{pM_{смэ}}{J}}$$

и

$$s_{\Pi} = \frac{1}{\pi f} \sqrt{\frac{pM_{смэ}}{2J}}$$

Синхронные реактивные двигатели

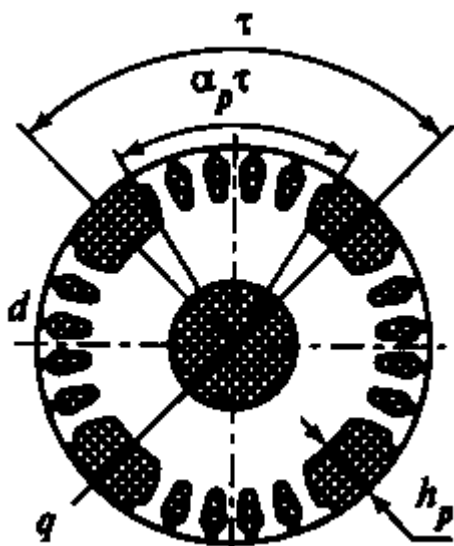
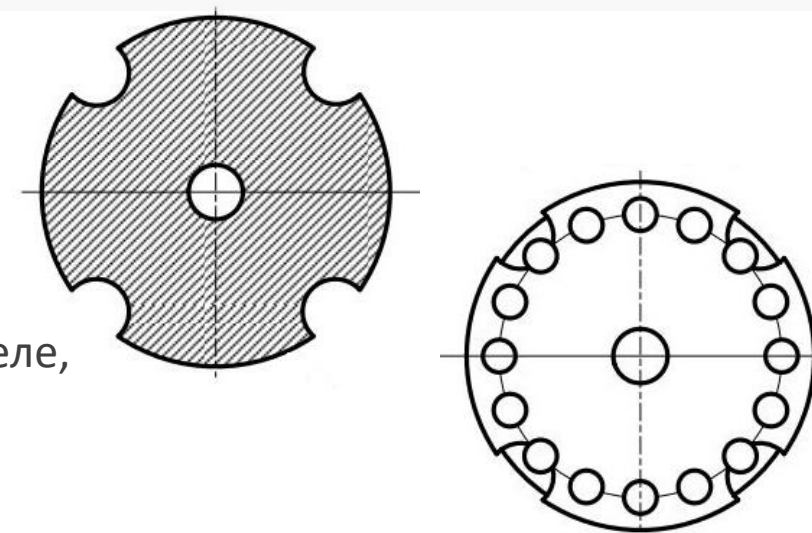
Конструкции,
уравнения и
характеристики

Синхронные реактивные двигатели

СРД – СД без возбуждения на роторе (не ни ОВ ни ПМ $\rightarrow E_0 = 0, \varepsilon = 0$), но с разными магнитными проводимостями по осям d и q ($x_d > x_q$)

При этом в микродвигателе должна быть пусковая КЗ обмотка ротора

Простейшая конструкция ротора – аналог КЗ ротора в асинхронном двигателе, но с впадинами на поверхности сердечника для получения полюсов (получения разных Λ_μ по разным осям)



Современный вариант – формирование явно выраженных полюсов за счет больших пазов по оси q (с заливкой Al для получения КЗ обмотки)

- » коэффициент полюсного перекрытия $k_p = 0,5 \dots 0,6$
- » относительная высота полюса $h_p / \delta = 10 \dots 12$

Дальнейшее увеличение больших пазов увеличивает средний немагнитный зазор и повышает намагничивающий ток

Синхронные реактивные двигатели

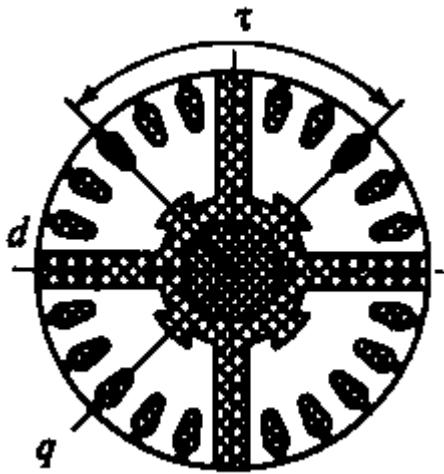
Отличительные особенности СРД

- » малая перегрузочная способность $M_m / M_H = 1,2 \dots 1,5$
- » большая кратность пускового тока $I_{II} / I_H = 5 \dots 7$
- » низкие энергетические и синхронизирующие показатели

Достоинства СРД

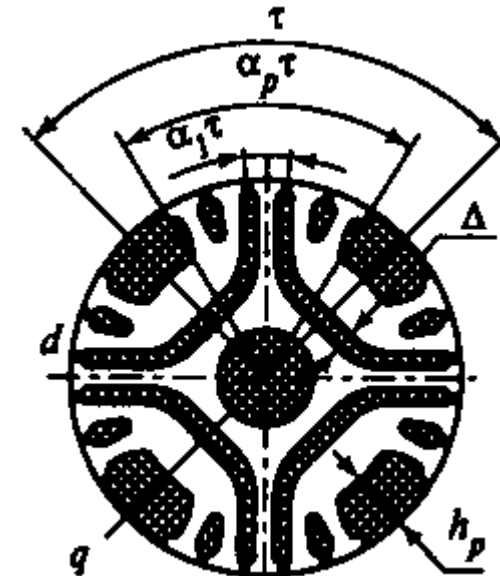
- » простота и технологичность
- » дешевизна
- » надежность
- » стабильность характеристик

Улучшение рабочих и пусковых свойств достигается за счет оптимизации ротора



Сегментный ротор

Ротор с внутренними пазами



Синхронные реактивные двигатели

Отличительные особенности СРД

- » малая перегрузочная способность $M_m / M_H = 1,2 \dots 1,5$
- » большая кратность пускового тока $I_{\Pi} / I_H = 5 \dots 7$
- » низкие энергетические и синхронизирующие показатели

Достоинства СРД

- » простота и технологичность
- » дешевизна
- » надежность
- » стабильность характеристик

Улучшение рабочих и пусковых свойств достигается за счет оптимизации ротора

Секционированный ротор

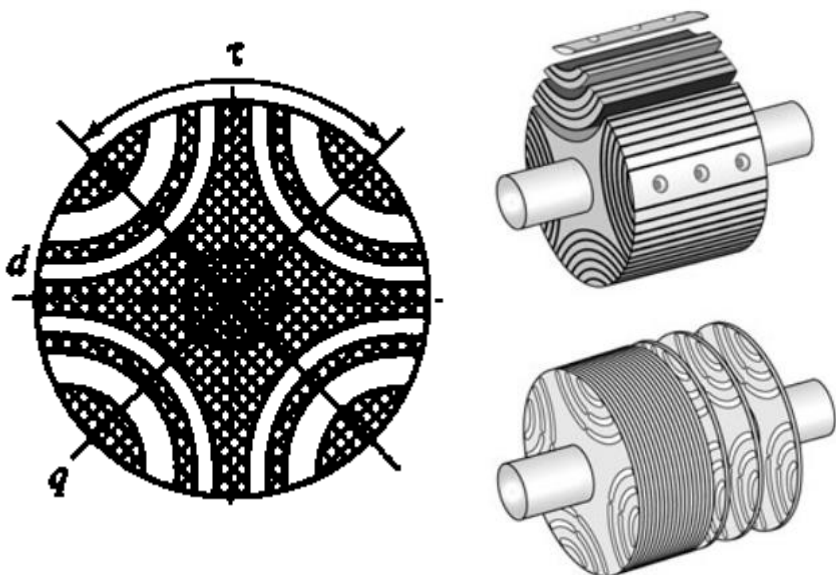


ABB: SynRM (IE4) +
электронный регулятор (ПЧ)



Принцип действия СРД

Принцип действия

- » пуск за счет асинхронного момента M_a
- » вытягивание в синхронизм за счет реактивного момента M_{dq}
- » работа на синхронной скорости Ω_c

Из-за электрической несимметрии ротора

- токи ротора прямой и обратной последовательности
- составляющие момента M_{a1} и M_{a2}
- провал в кривой момента $M_{a\Sigma}$

Синхронный момент – момент явнополюсности ($\sin 2\theta$)

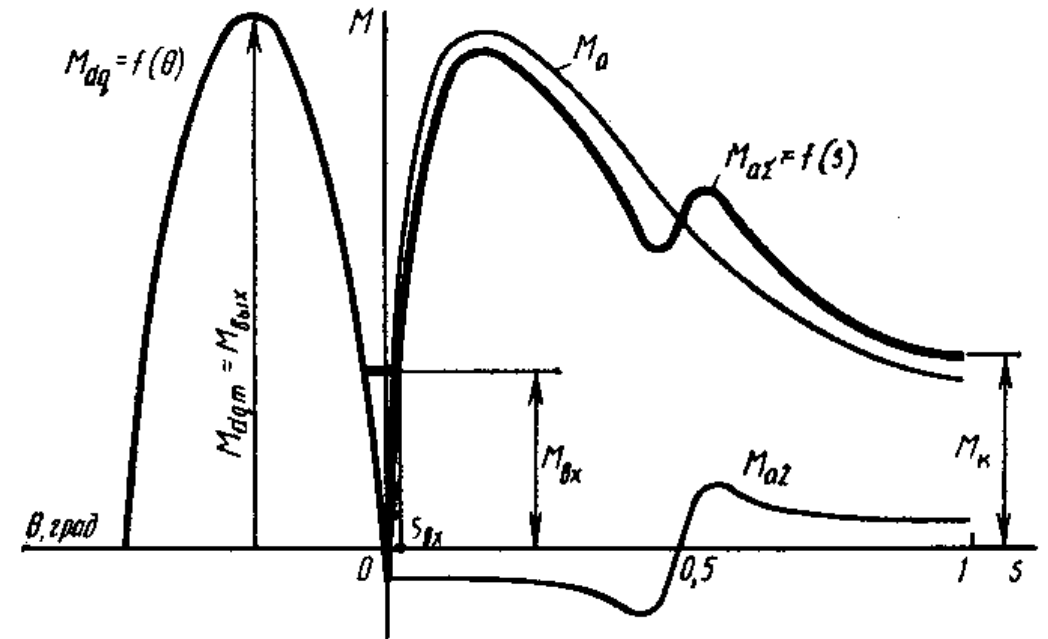
Пусковые свойства СРД

- » пусковой момент M_K
- » момент входа в синхронизм M_{BX}

Особенность СРД – чувствительность к колебаниям U_c

- » реактивный момент пропорционален U^2
- » асинхронный момент пропорционален U^2

(при снижении U на 15%, момент снижается на 28%)



Уравнения СРД

Уравнения СРД получаются из общих уравнений СД подстановкой $\varepsilon = E_0/U = 0$

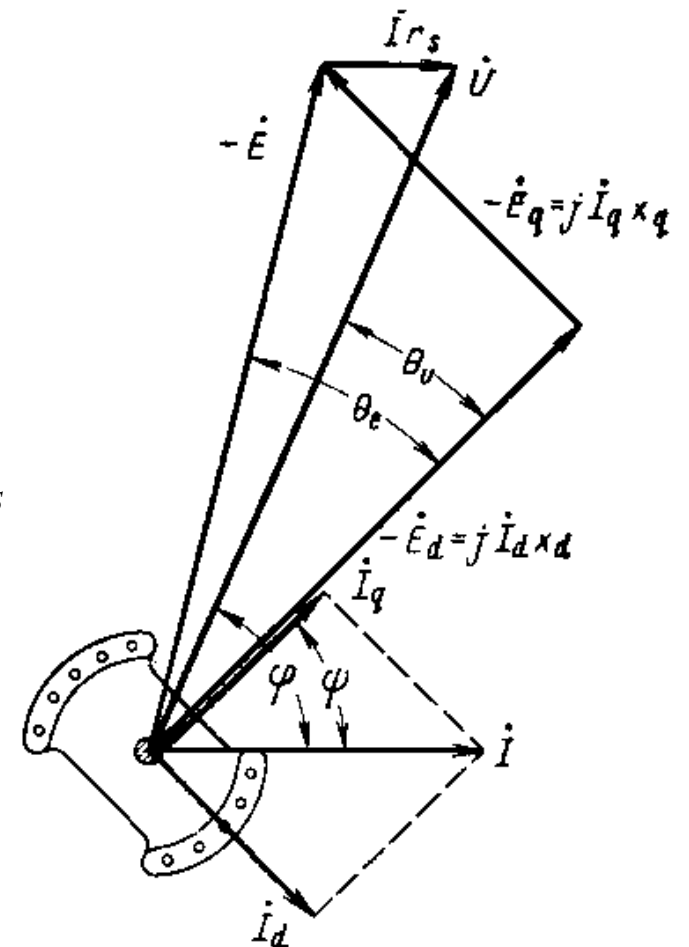
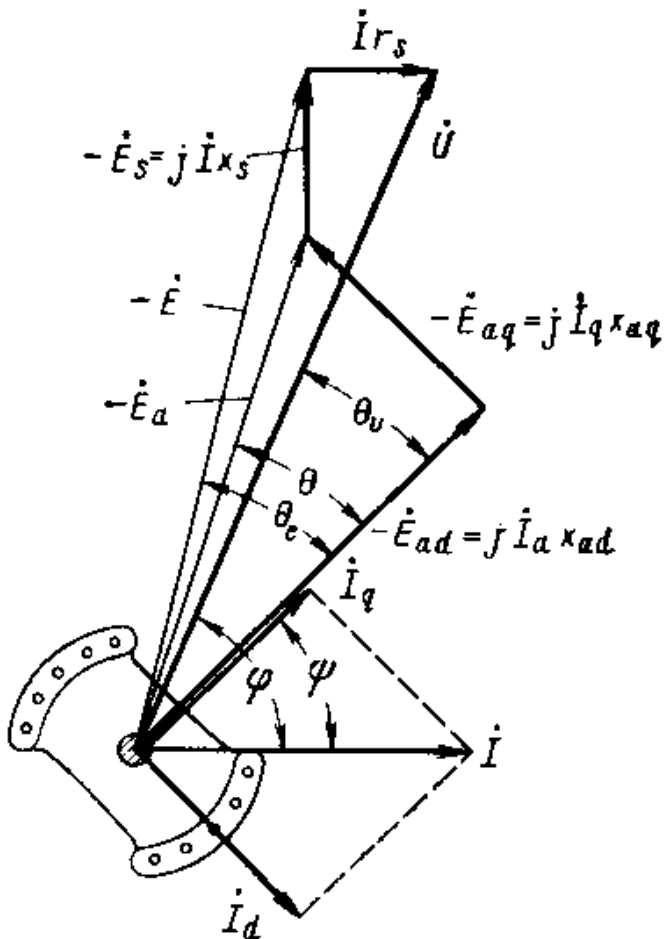
Напряжение сети уравнивается ЭДС от потока якоря E_a и ЭДС от потока рассеяния E_s , а также $I r_s$

$$\dot{U} = -\dot{E}_a - \dot{E}_s + \dot{I} r_s = -\dot{E}_{ad} - \dot{E}_{aq} - \dot{E}_s + \dot{I} r_s$$

Через индуктивные параметры уравнение баланса напряжений можно записать как

$$\dot{U} = j\dot{I}_{ad}x_{ad} + j\dot{I}_{aq}x_{aq} + jI x_s + \dot{I} r_s$$

или
$$\dot{U} = j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + \dot{I} r_s$$



Уравнения СРД

Выражения для составляющих тока двигателя

$$I_d = \frac{U}{r_s^2 + x_d x_q} (x_q \cos \theta_U - r_s \sin \theta_U) \quad I_q = \frac{U}{r_s^2 + x_d x_q} (r_s \cos \theta_U + x_d \sin \theta_U)$$

Полный ток статора $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

Мощность, потребляемая двигателем из сети $P_s = mUI \cos \varphi = \frac{mU^2}{r_s^2 + x_d x_q} \left(r_s + \frac{x_d - x_q}{2} \sin 2\theta_U \right)$

Электромагнитная мощность $P_{ЭМ} = \frac{mU^2 (x_d - x_q)}{2(r_s^2 + x_d x_q)} \left((x_d x_q - r_s^2) \sin 2\theta_U - 2r_s (x_d + x_q) \sin^2 \theta_U + 2r_s x_q \right)$

Вращающий момент записывают в виде $M_{dq} = A_{dq} \sin 2(\theta_U + \alpha_{dq}) - M_{dqT}$

где амплитуда синусоидальной составляющей $A_{dq} = \frac{mU^2 (x_d - x_q)}{2\Omega_c (r_s^2 + x_d x_q)^2} \sqrt{(x_d x_q - r_s^2)^2 + r_s^2 (x_d + x_q)^2}$

тормозной момент $M_{dqT} = \frac{mU^2}{2\Omega_c (r_s^2 + x_d x_q)^2} r_s (x_d - x_q)^2$

Синхронные реактивные двигатели

Проектирование СРД – задача по оптимизации пусковых и рабочих свойств

поскольку
$$A_{dq} = \frac{mU^2(x_d - x_q)}{2\Omega_c(r_s^2 + x_d x_q)^2} \sqrt{(x_d x_q - r_s^2)^2 + r_s^2(x_d + x_q)^2}$$

- » для увеличения момента надо увеличивать разницу $(x_d - x_q)$
- » при этом увеличивается средний немагнитный зазор
 - увеличивается намагничивающий ток
 - увеличивается падение напряжения Ir_s
 - уменьшается основной поток
- » также несимметрия пусковой обмотки увеличивает тормозной момент от обратной составляющей токов ротора

Осин И.Л., Юферов Ф.М.
«При невысоких пусковых свойствах СРД имеют и низкие энергетические показатели»

ABB (2014)
SynRM motor



Super premium efficiency from same frame size



Same power from smaller size

ЭМАУ

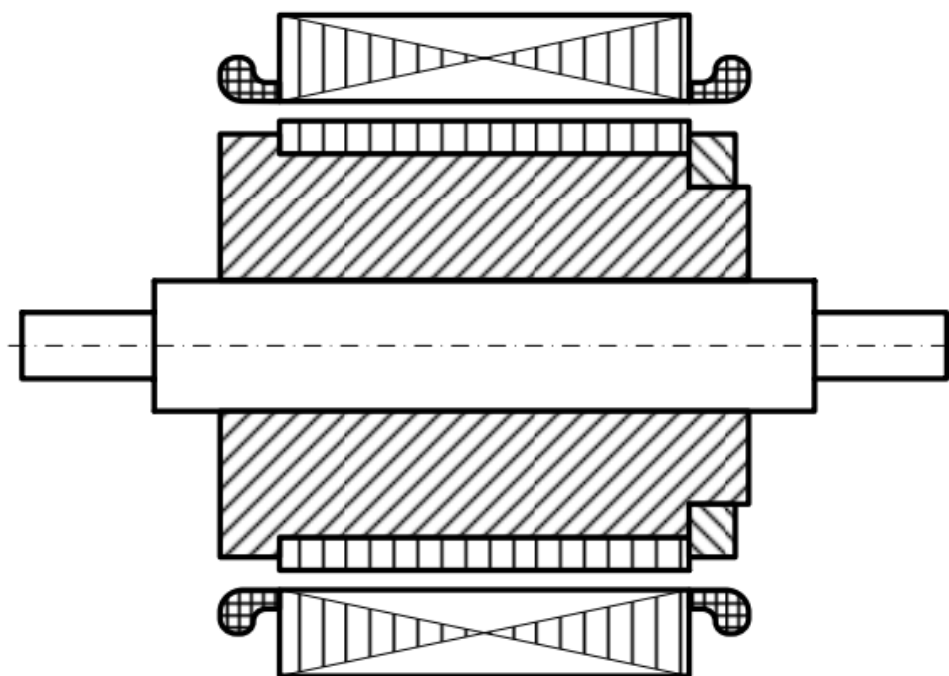
Ширинский С.В., каф.ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

Синхронные гистерезисные двигатели

Конструкции и
принцип действия

Синхронные гистерезисные двигатели

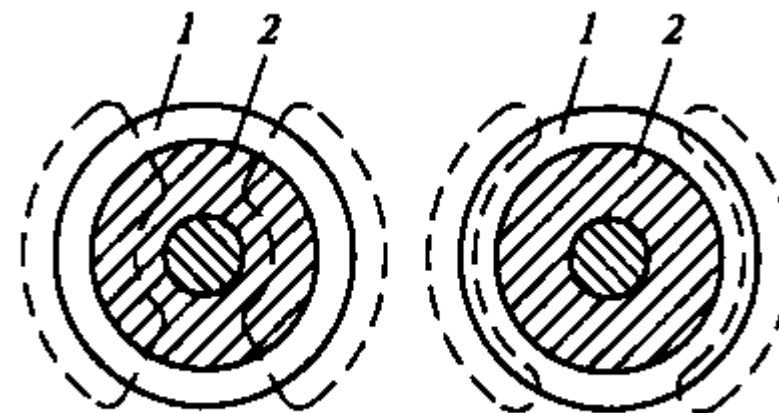
Гистерезисные двигатели содержат на роторе активный слой магнитотвердого материала, однако намагничивается он полем статора, а его остаточная намагниченность несопоставима с ПМ ($H_c < 40$ кА/м)



Конструкция статора аналогична всем двигателям переменного тока (задача – создание вращающегося поля)

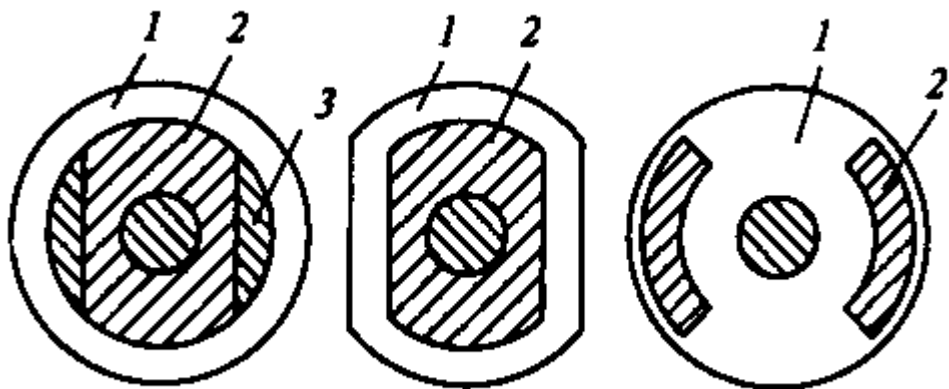
На роторе – слой гистерезисного материала

- » сплошной или набранный из колец цилиндр 1
- » внутренняя втулка 2 (для экономии материала)
 - а) ферромагнитная втулка при малой μ материала
 - б) немагнитная втулка при большой μ материала



Синхронные гистерезисные двигатели

Для увеличения синхронного момента ротор СГД делают явнополюсным



- » Активный слой 1 на немагнитной втулке 2 с ферромагнитными сегментами 3
- » Профилированный активный слой 1 на профилированной немагнитной втулке 2
- » Пазы 2 в пластинах из активного материала 1 (заполнены немагнитным материалом)

Дополнительный реактивный момент позволяет снизить намагничивающий ток и повысить $\cos\phi$ двигателя

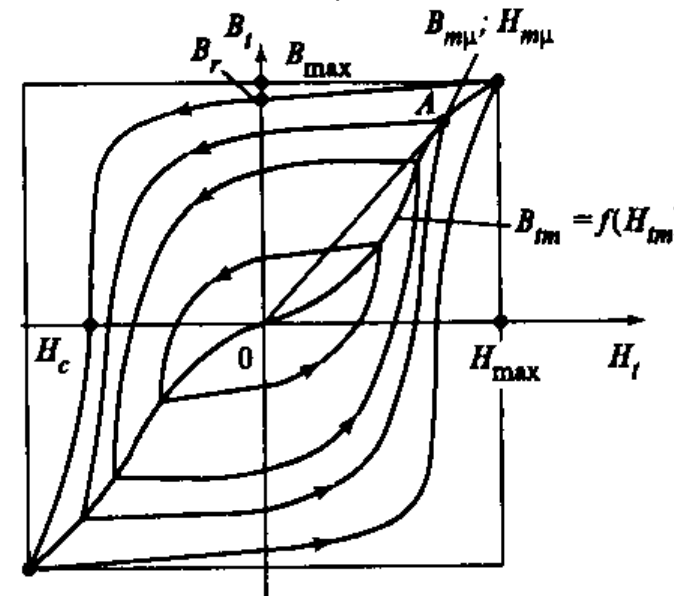
Гистерезисный материал характеризуется основной кривой намагничивания $B_{tm} = f(H_{tm})$ и широкими частичными кривыми перемагничивания

Предельная петля гистерезиса:

- » B_{max}, H_{max}
- » B_r, H_c
- » коэффициент выпуклости $k_{вып} = (\text{площадь петли}) / (4B_{max}H_{max})$

Магнитная проницаемость максимальная в точке А

Рабочая кривая перемагничивания должна проходить через точку А



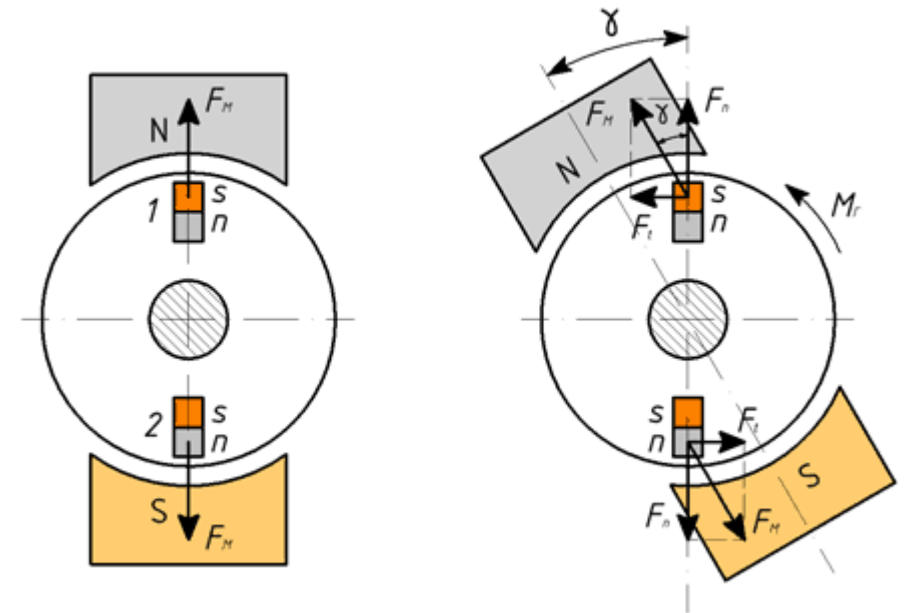
Принцип действия гистерезисного двигателя

Активный материал – гистерезисный момент (момент от остаточного магнетизма) M_T
Сплошной цилиндр – асинхронный момент (момент от вихревых токов) M_B

Асинхронный момент
максимален при пуске, равен нулю при синхронизме и изменяется линейно
($s_{кр} > 1$ из-за большого активного сопротивления материала)

Гистерезисный момент

- » при включении питания ротор намагничивается полем статора (силы притяжения радиальны, момент отсутствует)
- » при повороте поля статора материал ротора перемагничивается, но с задержкой (из-за широкой петли гистерезиса)
- » появляется тангенциальная составляющая сил притяжения и вращающий момент



Принцип действия гистерезисного двигателя

Рассмотрим перемагничивание активного материала на ферромагнитной втулке

Пренебрегая падением U_μ в стали и в зазоре полагаем, что косинусная МДС статора приложена к гистерезисному слою. Тогда и напряженность магнитного поля в гистерезисном слое изменяется по \cos вдоль окружности

$$H_{r\alpha} = H_{gm} \cos(\alpha - \vartheta)$$

Здесь амплитуда напряженности $H_{gm} = F_{1m}/\delta$

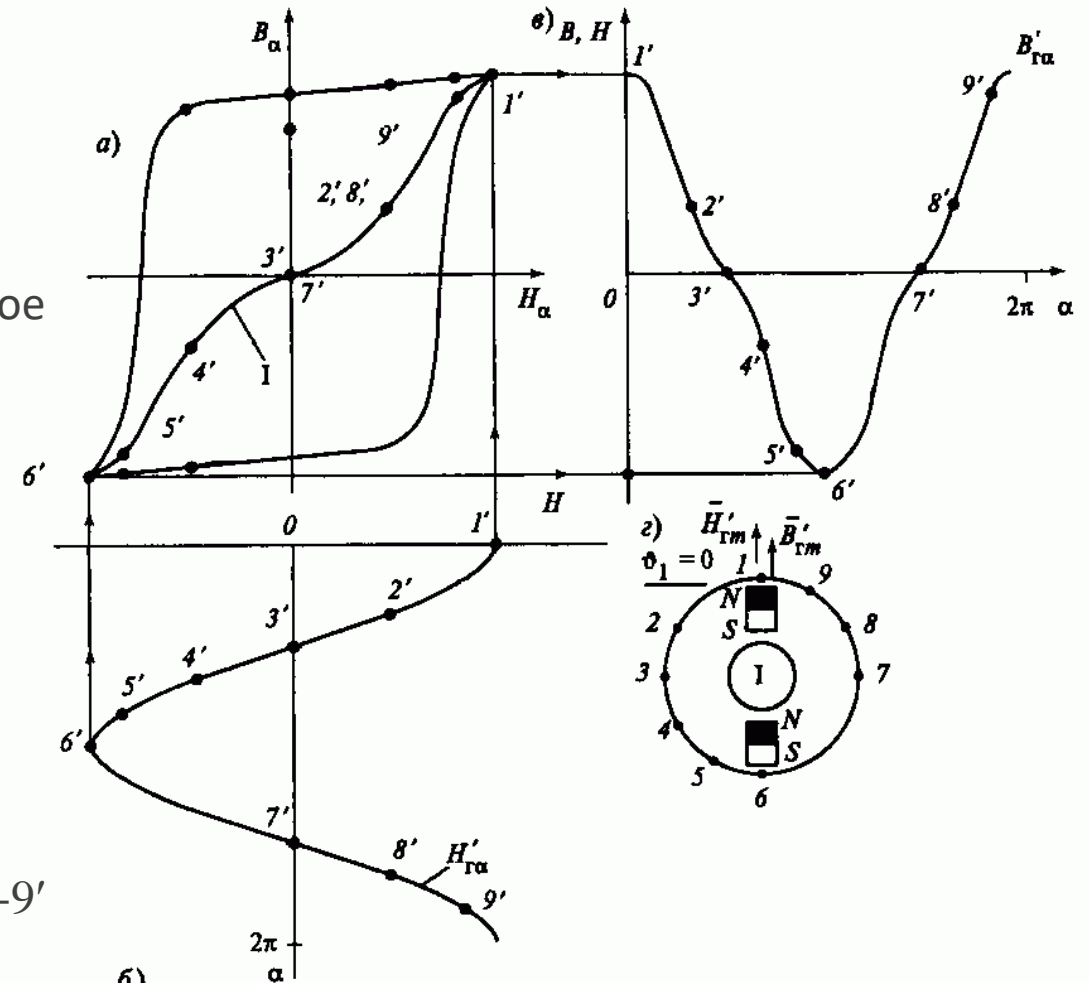
$\alpha = \pi x/\tau$ – электрический угол т. x на окружности ротора

$\vartheta = \omega t$ – электрический угол положения H_{gm}

$$\vartheta = 0$$

При включении U_c напряженность $H'_{r\alpha}$ распределена по \cos

- » намагничивание материала – по основной кривой намагничивания (кривая I) по точкам 1'-2'-3'-4'-5'-6'-7' 8'-9'
- » получившаяся индукция $B'_{r\alpha}$ – не \cos
- » но ось поля ротора ($B'_{r\alpha}$) совпадает с осью поля статора (F_1 и $H'_{r\alpha}$)
- » момент отсутствует



Принцип действия гистерезисного двигателя

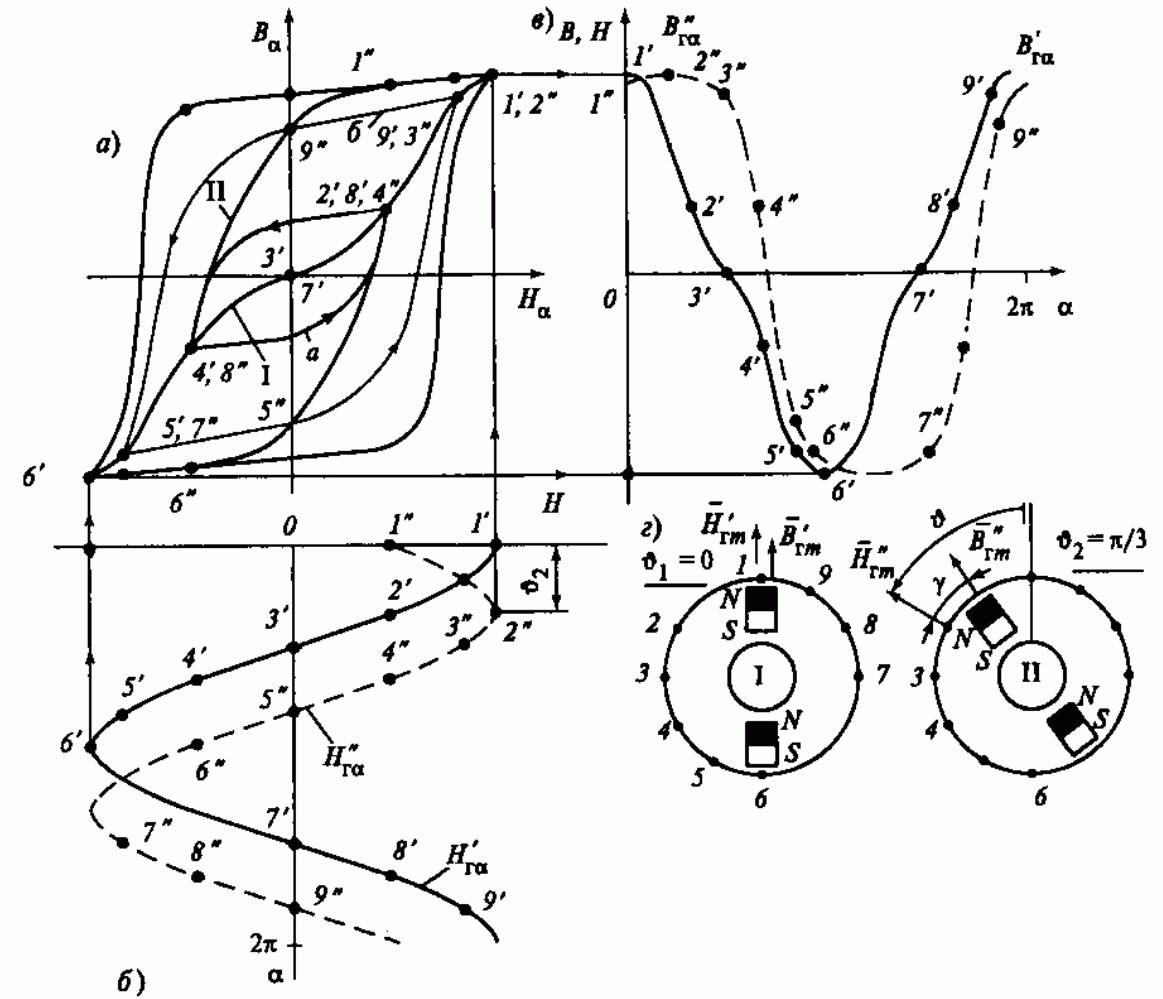
$$\vartheta = \pi/3$$

Через 1/6 периода напряженность $H''_{\Gamma\alpha}$

- » убывает в т. 1, 7, 8, 9
 - т. 1'-1'' – по предельной петле гистерезиса
 - т. 7'-7'' – по основной кривой намагничивания
 - т. 8'-8'' – по частичной петле а
 - т. 9'-9'' – по частичной петле б
- » возрастает в т. 2, 3, 4, 5, 6
 - т. 2'-2'' – по основной кривой намагничивания
 - т. 3'-3'' – по основной кривой намагничивания
 - т. 4'-4'' – по частичной петле а
 - т. 5'-5'' – по частичной петле б
 - т. 6'-6'' – по предельной петле гистерезиса

Из-за гистерезиса происходит запаздывание перемагничивания (кривая II) – кривая индукции $B''_{\Gamma\alpha}$

- » ось поля ротора ($B''_{\Gamma\alpha}$) отстает от оси поля статора (F_1 и $H''_{\Gamma\alpha}$) на угол γ
- » появляется момент (гистерезисный момент – притяжение полюсов ротора к полюсам поля статора)



Принцип действия гистерезисного двигателя

Поворот МДС приводит к увеличению площади рабочей петли гистерезиса (вплоть до предельной кривой III)

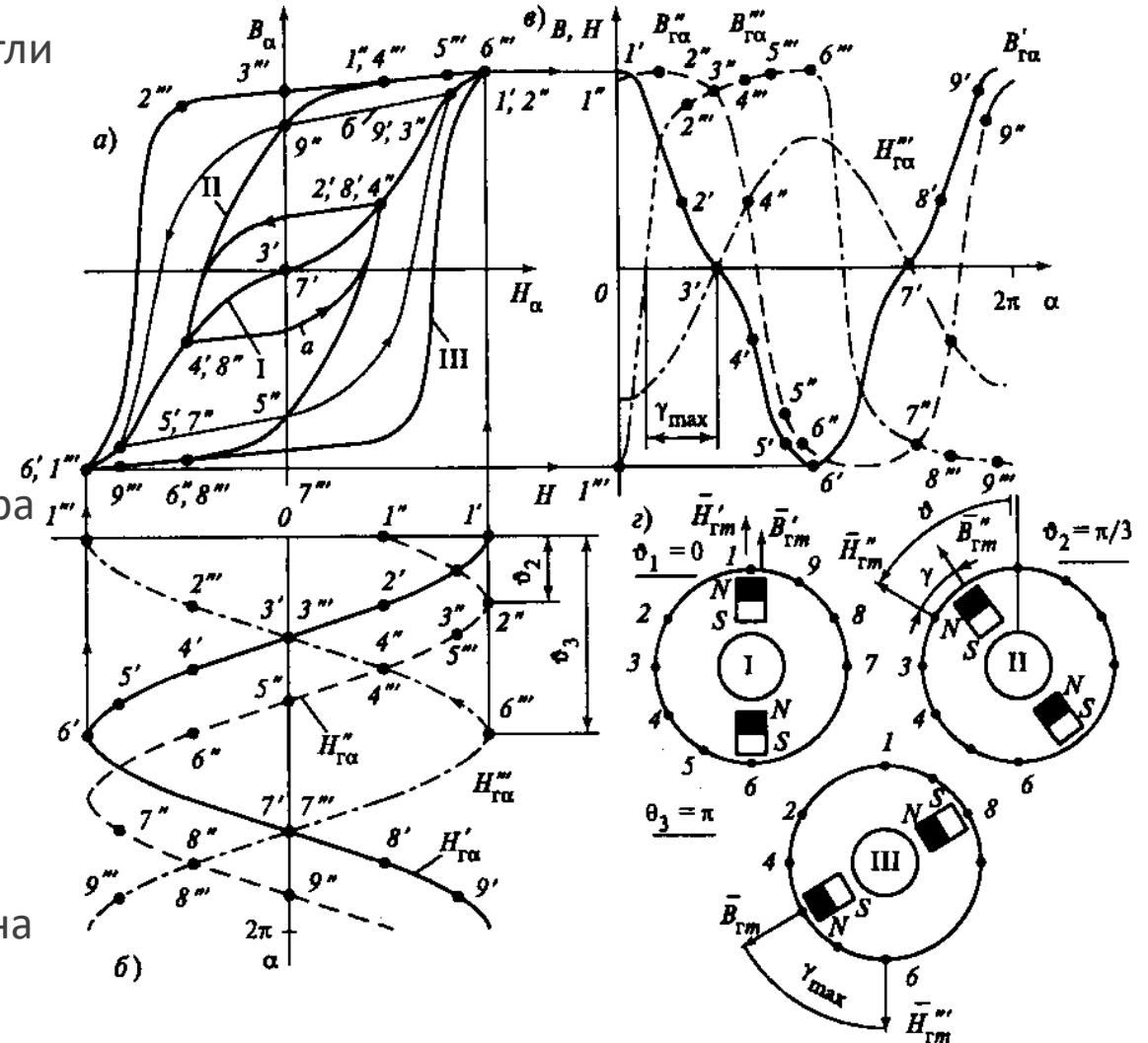
$$\vartheta = \pi$$

Через 1/2 периода напряженность $H'''_{г\alpha}$

- » все точки перемагничиваются по предельной петле гистерезиса
- » кривая индукции $B'''_{г\alpha}$ сформирована по кривой III (больше не меняется по форме, лишь смещается)
- » угол отставания оси поля ротора ($B'''_{г\alpha}$) от оси поля статора (F_1 и $H'''_{г\alpha}$) максимален $\gamma = \gamma_{\max}$ и остается таким
- » гистерезисный момент максимален и остается таким

Величина гистерезисного момента $M_{г}$ зависит от материала ротора (ширины петли гистерезиса) и величины МДС F_1

Это справедливо для любой скорости ротора (любого s) – гистерезисный момент остается постоянным по мере разгона



Характеристики синхронного гистерезисного двигателя

В процессе разгона (асинхронный режим работы) возникают потери в роторе:

- » потери на гистерезис – пропорциональны f_2
- » потери на вихревые токи – пропорциональны f_2^2

Частота перемагничивания ротора $f_2 = sf_1$, при неподвижном роторе $f_2 = f_1$ (КЗ)

Потери в роторе $P_R = P_\Gamma + P_B = sP_{\Gamma.К} + s^2P_{B.К}$

Электромагнитную мощность можно выразить через P_R/s

$$P_{ЭМ} = \frac{P_\Gamma}{s} + \frac{P_B}{s} = P_{\Gamma.К} + sP_{B.К}$$

Тогда вращающий момент

$$M = \frac{P_{\Gamma.К}}{\Omega_c} + s \frac{P_{B.К}}{\Omega_c} = M_\Gamma + M_B$$

- » Гистерезисный момент M_Γ постоянен
- » Момент от вихревых токов M_B пропорционален s (сопротивление сплошного ротора велико)

Механическая характеристика СГД



Характеристики синхронного гистерезисного двигателя

Момент от вихревых токов M_B невелик, а в СГД с шихтованным ротором его нет вообще, т.е. момент СГД можно считать постоянным при любой частоте вращения $M = M_T$

M_T можно выразить через удельные потери p_T и объем активного материала V

$$M_T = \frac{p}{2\pi} p_T V$$

Удельные потери пропорциональны площади петли гистерезиса и зависят от индукции B_{\max} и характера перемагничивания (линейное, круговое, эллиптическое)

Наибольшие удельные потери – при B_{\max} в точке с наибольшей μ (на колене основной кривой намагничивания)

Характер перемагничивания гистерезисного материала

- » ротор весь из гистерезисного материала – круговое перемагничивание (B меняется по направлению, но не величине)
- » ротор с ферромагнитной втулкой – эллиптическое перемагничивание (B меняется и по направлению и по величине)
- » ротор с немагнитной втулкой – линейное перемагничивание (B меняется только по величине, но всегда тангенциальна)

Гистерезисный материал

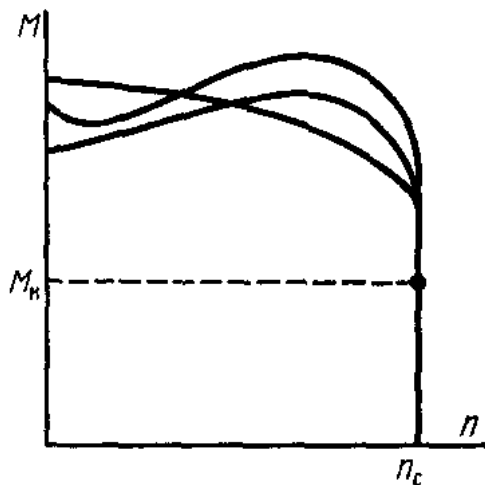
- » Викалой (Fe-Co-V) – при мощностях до 100 Вт
- » Альни (Al-Fe-Ni) – при мощностях больше 100 Вт

Механическая характеристика СГД

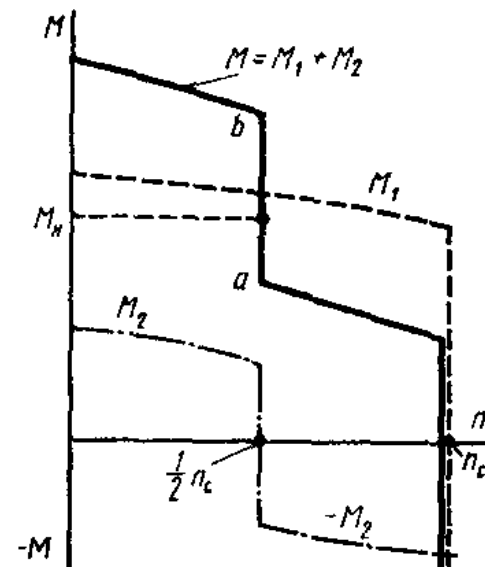


Характеристики синхронного гистерезисного двигателя

Реальные механические характеристики зависят от высших гармонических поля в зазоре



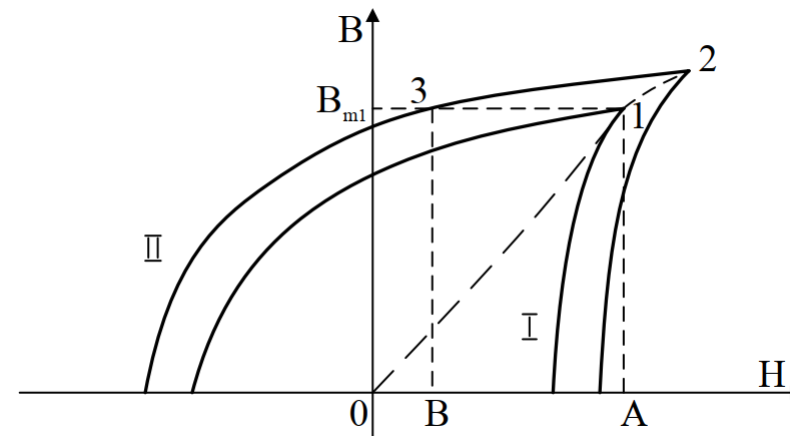
С помощью гармоник можно получить ступенчатую характеристику – возможность устойчиво работать на пониженных скоростях (при некоторых моментах)



Энергетические показатели СГД можно повысить путем подмагничивания – кратковременное (2...3 периода) повышение потока статора (повышение U_1 или включение подмагничивающей обмотки)

Намагниченный ротор в синхронном режиме действует как хороший ПМ

- » снижает намагничивающий ток, повышая $\cos\varphi$
- » снижает полный ток в 1,5...2 раза
- » повышает максимальный момент в 3...5 раз
- » повышает КПД



Расчет синхронного гистерезисного двигателя

Схема замещения СГД – три параллельные цепи разветвления

r_s, x_s – обмотка статора

1-я цепь разветвления – моделирует зазор

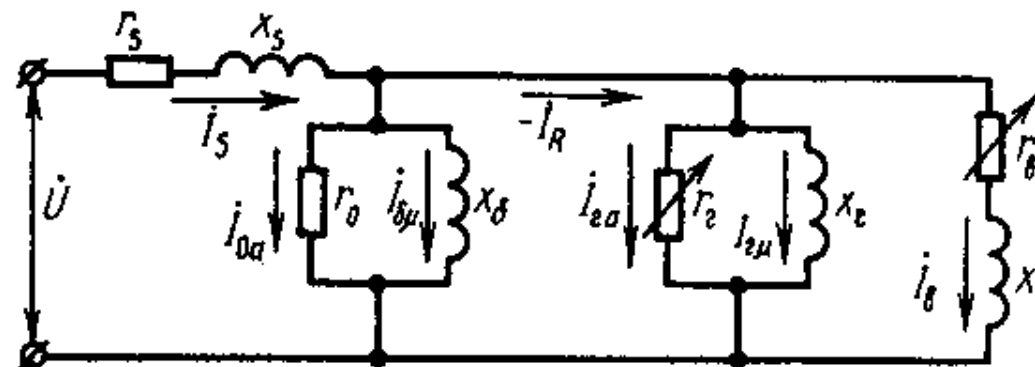
- » r_0 – учитывает потери в стали
- » x_δ – учитывает магнитную проводимость зазора

2-я цепь разветвления – моделирует гистерезисный слой

- » r_r – учитывает потери на перемагничивание (мощность от гистерезисного момента) – зависит от нагрузки
- » x_r – учитывает магнитную проводимость ротора

3-я цепь разветвления – моделирует вихревые токи (если нет шихтовки)

- » r_b – учитывает потери от вихревых токов (мощность от асинхронного момента) – зависит от скольжения
- » x_b – учитывает магнитную проводимость рассеяния ротора



После синхронизации СГД работает как СД с ПМ
Но СГД не имеет явных полюсов и его магнитные оси d, q могут перемещаться относительно ротора

Достоинства и недостатки СГД

Достоинства

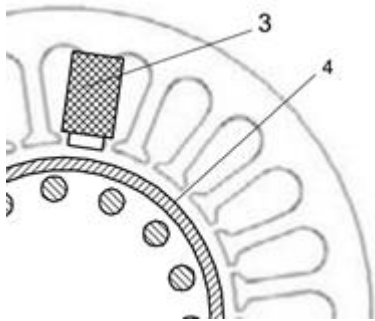
- » большой пусковой момент M_k и момент входа $M_{вх}$
- » уверенный разгон и синхронизация
- » независимость $M_{вх}$ от момента инерции J
- » плавность входа в синхронизм (без скачка)
- » малое изменение тока (на 20...30% от I_k до I_0 и на 1...3% от I_0 до I_H)
- » относительно высокий КПД (до 60%)
- » большая механическая прочность ротора
- » бесполосный ротор (годится для статоров с любым p)
- » высокая температурная стабильность характеристик
- » высокая надежность
- » малый шум
- » небольшие габариты и масса

Недостатки

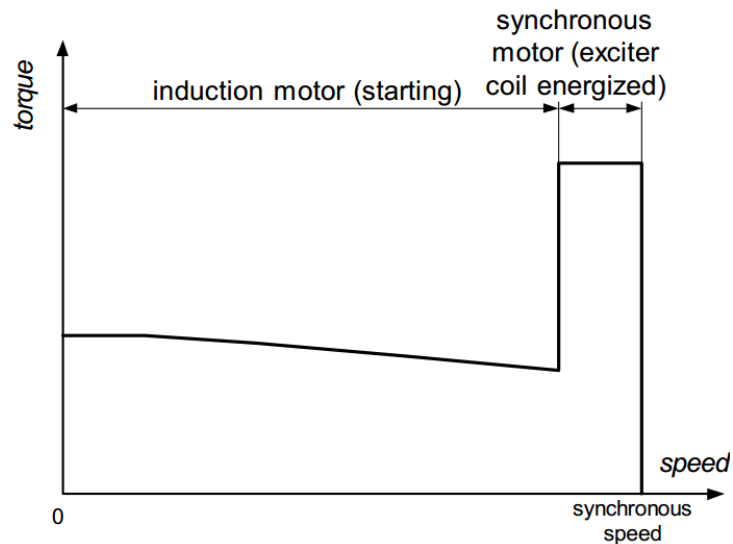
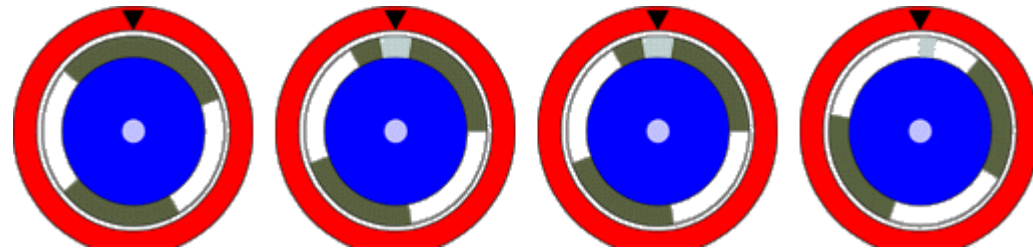
- » низкий $\cos\varphi$ (0,3...0,45)
- » малая стабильность мгновенной скорости вращения (качания ротора при изменении нагрузки или U)
- » зависимость характеристик гистерезисного материала от соблюдения технологии изготовления
- » высокая стоимость гистерезисных материалов
- » сложность механической обработки гистерезисных материалов

СГД “Written Pole”

Новая технология подмагничивания ротора от Precise Power Corporation



- » обмотка подмагничивания включается на $f_{\text{сети}}$ при $n = (80...100)\%$ от n_c
- » в синхронном режиме она не используется, может лишь увеличить B_{max}
- » в асинхронном режиме она «прописывает» рисунок полюсов
- » при $s > 0$ получается «дробное» число полюсов



В результате на подсинхронной скорости можно получить постоянный синхронный момент (с учетом подмагничивания)

В режиме генератора – сохраняет частоту f_1 при снижении n (при отключении питания приводного двигателя)

Используется в крупных машинах (до 75 кВт)

Однофазные синхронные двигатели

Исполнения и
особенности
расчета

Однофазные синхронные двигатели

При наличии только однофазной сети в СД применяют те же решения, что и в АД:

- » конденсаторные двигатели (с рабочей или рабочей и пусковой емкостями)
- » двигатели с экранированными полюсами

При этом в СД обычно эллиптическое поле, в некоторых режимах возможно круговое

- » Если круговое поле получают в асинхронном режиме при малых n , то СД имеет хорошие пусковые свойства, но эллиптическое поле в синхронном режиме \rightarrow низкие КПД и $\cos\phi$, шумы и вибрации, нестабильность мгновенной скорости
- » Если круговое поле получают при больших n , то в СД увеличивается момент входа в синхронизм, повышаются энергетические показатели
- » Если круговое поле получают в синхронном режиме, то рабочие характеристики СД наилучшие, но ухудшаются пусковые свойства

Влияние обратного поля на работу СД с развитой КЗ обмоткой (пусковой/демпферной)

Недостаток конденсаторных СД – возможность «залипания» ротора при пуске:

если ось q совпадает с осью конденсаторной обмотки,

то x''_{Bq} – мало (а x_C всегда велико) и при пуске ток пусковой обмотки

$$i_B = \frac{\dot{U}}{j(x''_{Bq} - x_C)} \approx \frac{\dot{U}}{-jx_C} \approx 0$$

Т.е. поле остается пульсирующим, нет пускового момента

Далее

Вентильные двигатели

👤 Ширинский С.В.
каф. ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

✉ ShirinskiiSV@mpei.ru

🔗 elmech.mpei.ac.ru/EMAU/
(srv0-5.mpei.ac.ru/EMAU/)

