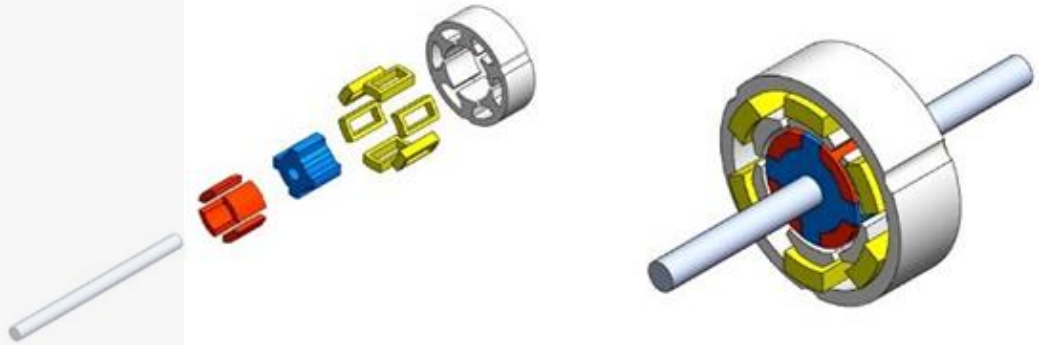
Синхронные микродвигатели

Виды, конструкции, характеристики



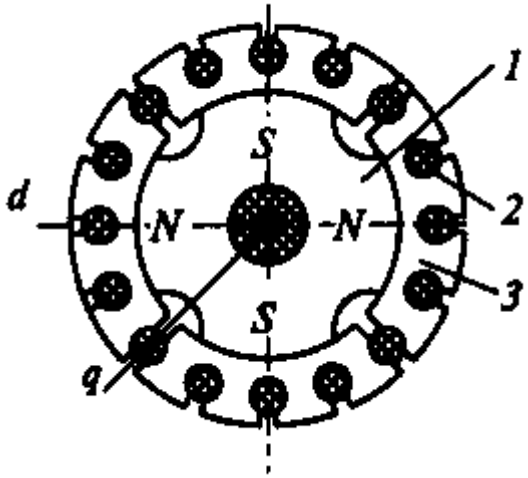
Синхронные двигатели с постоянными магнитами

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 («беличья клетка»)
3. Полюсные наконечники($\alpha \approx 0{,}95\tau$)

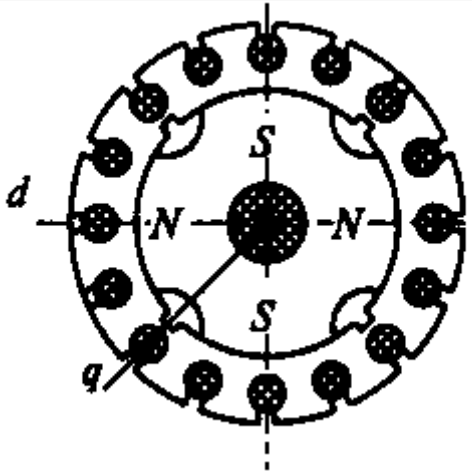
Большое α
$\rightarrow$ большая проводимость рассеяния между полюсами ротора
$\rightarrow$ предохраняет ПМ от размагничивания полем реакции якоря
$\rightarrow$ повышает потокосцепление обмоток статора и ротора при пуске

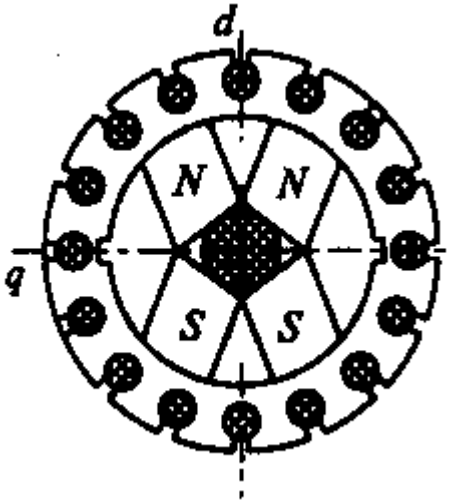
Пусковая обмотка – также демпферная обмотка
$\rightarrow$ защищает ПМ от размагничивания ударным током КЗ при включении двигателя

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

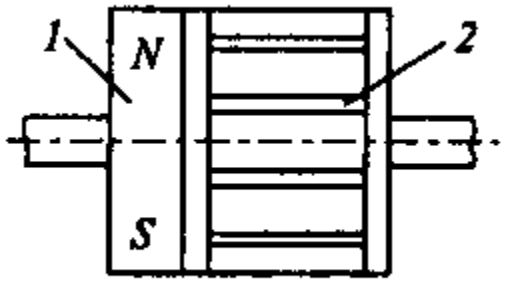
Конструкции СДПМ

Аксиальное расположение ПМ и пусковой обмотки

Применяется при ограничении внешнего диаметра

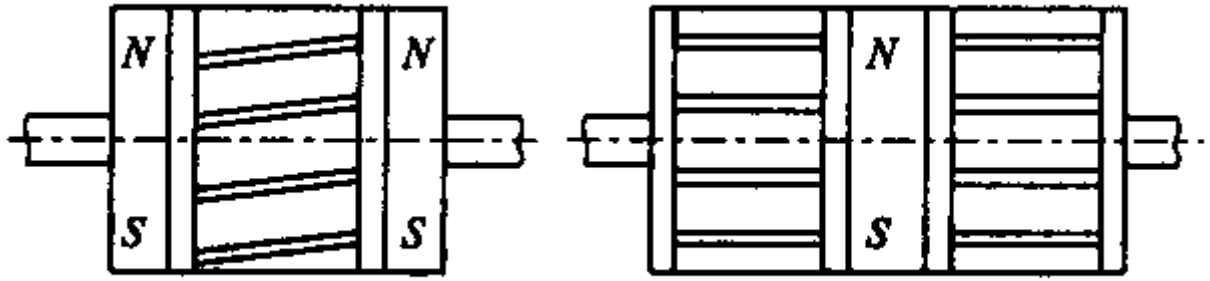
» Для обеспечения надежного пуска пусковая обмотка занимает 70-80% длины машины

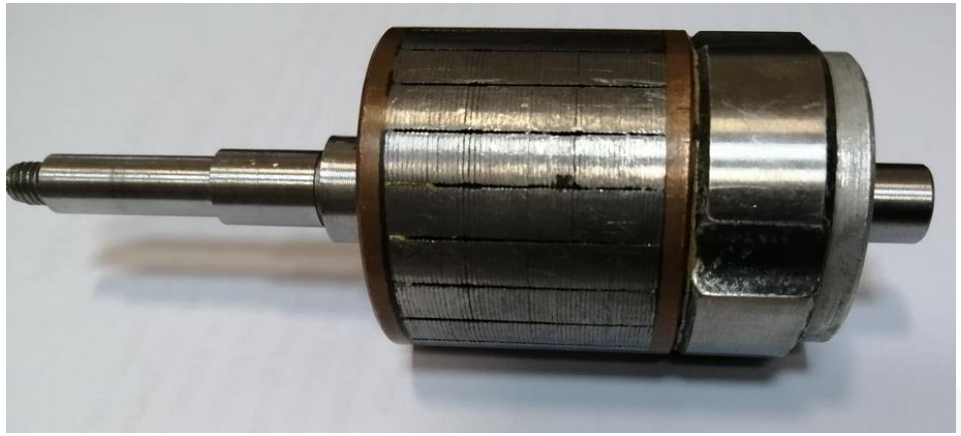
» Из-за малого $\mu_{пм}$ поток статора сосредоточен в зоне КЗ ротора $\rightarrow x_{ad} \approx x_{aq}$ и СДПМ аксиальной конструкции можно рассматривать как неявнополюсный



Недостаток аксиального СДПМ – осевые силы магнитного тяжения

» применяют симметричные конструкции

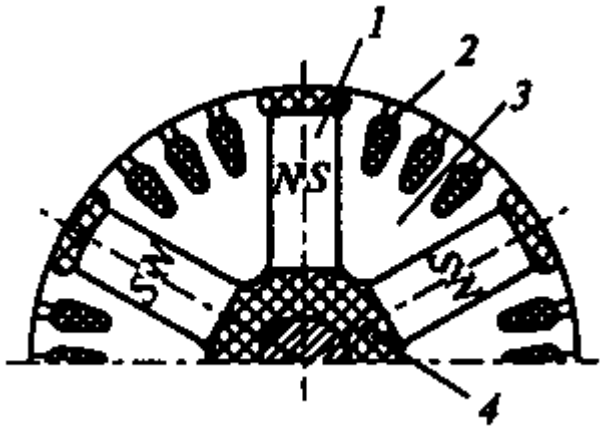




Конструкции СДПМ

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

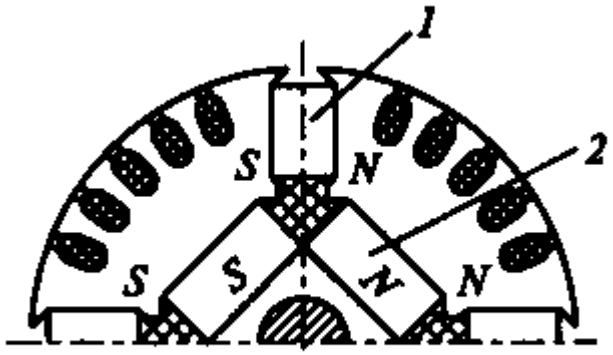
- Полюса-сегменты 3 концентрируют магнитный поток тангенциальных ПМ (если $b_м > b_p/2$, то $B_\delta > B_м$)
- Немагнитная втулка 4 снижает поток рассеяния магнитов через вал



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 $I_d = \dfrac{U}{r_S^2 + x_d x_q}\left(x_q \cos\theta_U - x_q\varepsilon - r_S \sin\theta_U\right)$ $\qquad I_q = \dfrac{U}{r_S^2 + x_d x_q}\left(r_S \cos\theta_U - r_S\varepsilon + x_d \sin\theta_U\right)$

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

Электромагнитная мощность $P_{\text{ЭМ}} = P_S - \Delta P_{\text{э}S} = P_S - mI^2 r_S$

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

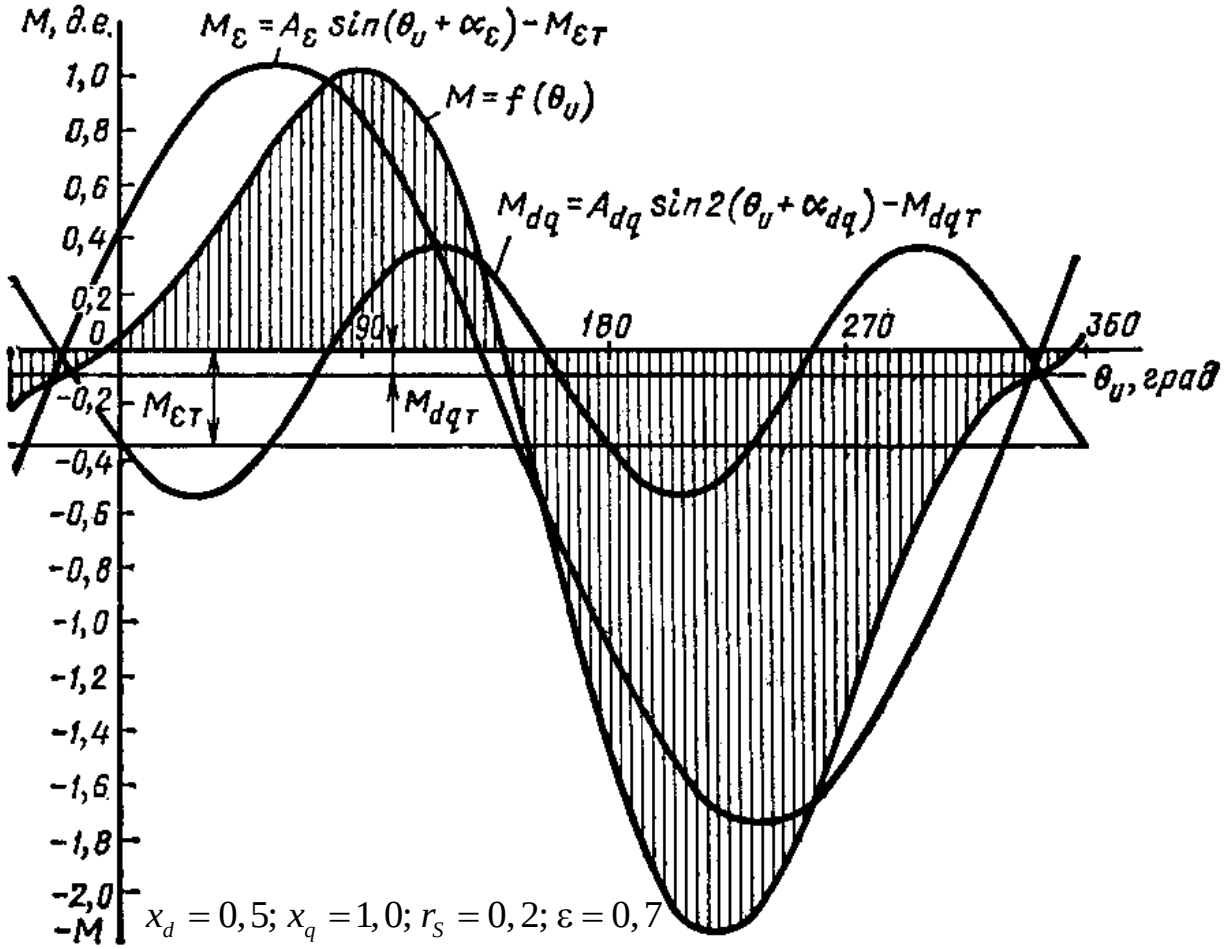
где амплитуда электромагнитного момента $A_\varepsilon = \dfrac{mU^2\varepsilon}{\Omega_{\text{с}}\left(r_S^2 + x_d x_q\right)^2}\sqrt{\left(x_d x_q^2 - r_S^2 x_q + 2r_S^2 x_d\right)^2 + r_S^2\left(2x_q^2 + r_S^2 - x_d x_q\right)^2}$

амплитуда реактивного момента $A_{dq} = \dfrac{mU^2(x_d - x_q)}{2\Omega_{\text{с}}\left(r_S^2 + x_d x_q\right)^2}\sqrt{\left(x_d x_q - r_S^2\right)^2 + r_S^2\left(x_d + x_q\right)^2}$

суммарный тормозной момент $M_{\text{т}} = \dfrac{mU^2 r_S}{\Omega_{\text{с}}\left(r_S^2 + x_d x_q\right)^2}\left[\varepsilon^2\left(r_S^2 + x_q^2\right) + \dfrac{\left(x_d - x_q\right)^2}{2}\right]$

Угловая характеристика СДПМ

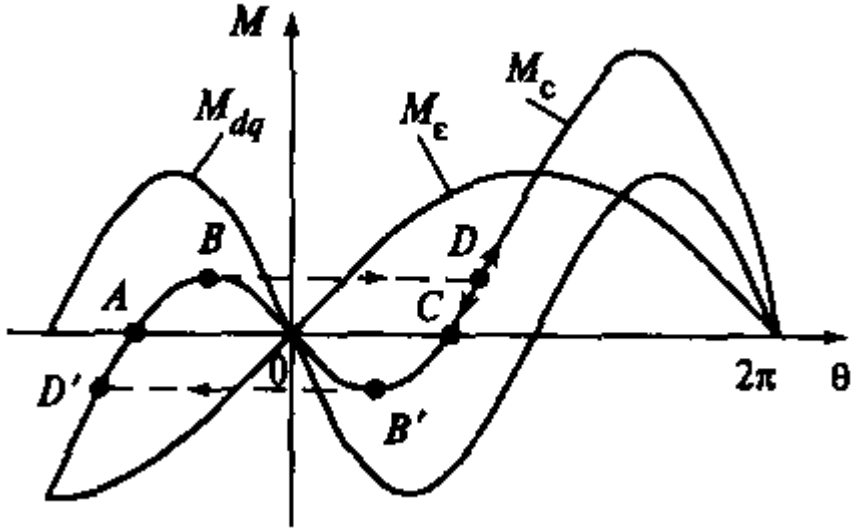
Угловая характеристика при $x_d < x_q$



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 $\varepsilon \geq \dfrac{x_q - x_d}{\sqrt{r_S^2 + x_q^2}}$

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:

- $E_0 = f(\Phi_{\delta м1}) \rightarrow$ 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

$$x_S = \frac{2m_1 f_1 w_1 k_{o1}^2}{p} \Lambda_S$$

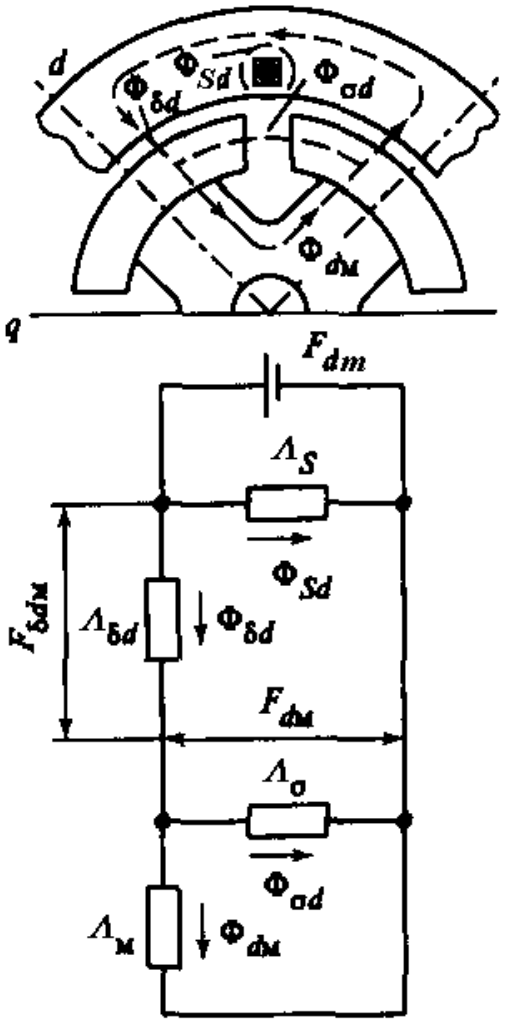
Магнитная проводимость рассеяния

$$\Lambda_S = \frac{2\mu_0 l_\delta}{pq}\left(\lambda_п + \lambda_л + \lambda_д\right)$$

где $\lambda_п$, $\lambda_л$, $\lambda_д$ – 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
- » $\Phi_{dм}$ – поток в магните вдоль продольной оси

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

$$\Phi_{\delta d1} = \frac{\Phi_{\delta d}}{k_{\Phi d}} = \frac{F_{dm}\Lambda_{ad}}{k_{\Phi d}} \qquad \text{где} \qquad F_{dm} = \frac{\sqrt{2}m_1 w_1 k_{o1} I_d}{\pi p}$$

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

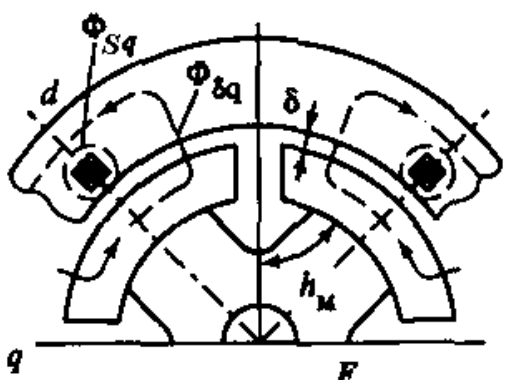
Λ_{ad} – магнитная проводимость для потока продольной реакции (с учетом всех ответвлений потока)

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

$$\Lambda_{ad} = \frac{\Lambda_{\delta d}\left(\Lambda_\sigma + \Lambda_м\right)}{\Lambda_{\delta d} + \Lambda_\sigma + \Lambda_м}$$

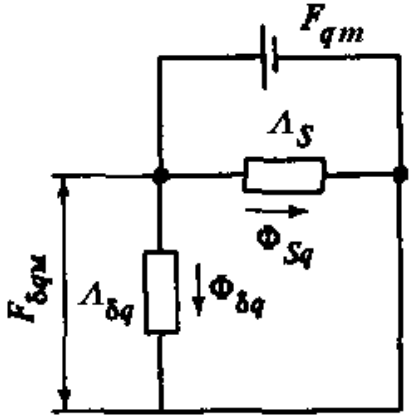
Расчет параметров СДПМ

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}

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

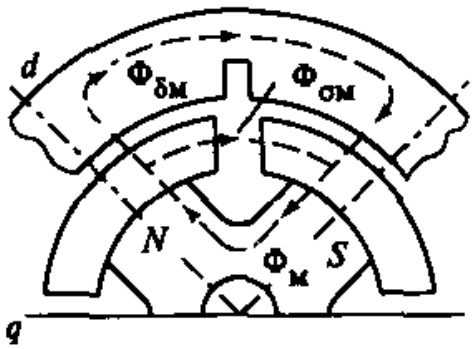
Здесь $k_{\Phi q}$ – коэффициент потока по оси q

Λ_{aq} – магнитная проводимость для потока поперечной реакции

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

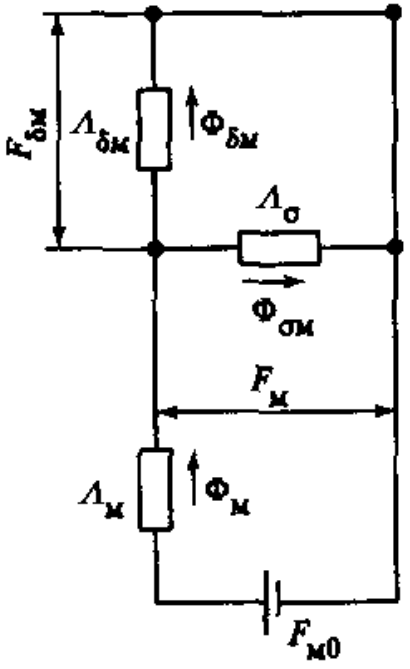
Расчет параметров СДПМ

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



Замыкание основного потока постоянного магнита

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



Поток основной гармонической индукции в зазоре $\Phi_{\delta м1} = \dfrac{\Phi_{\delta м}}{k_{\Phi м}} = \dfrac{F_м \Lambda_{dм}}{k_{\Phi м}}$

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

$\Lambda_{dм}$ – магнитная проводимость зазора для потока магнита

Величина проводимости $\Lambda_{dм}$ по схеме замещения $\Lambda_{dм} = \Lambda_{\delta м}$

МДС $F_м$ может быть найдена по схеме замещения как

МДС магнита $F_{м0} = H_c h_м$ за вычетом падения U_μ в теле магнита $F_м = F_{м0} - \Phi_м \dfrac{1}{\Lambda_м}$

Поток магнита $\Phi_м = F_{м0} \dfrac{\Lambda_м(\Lambda_\sigma + \Lambda_{\delta м})}{\Lambda_м + \Lambda_\sigma + \Lambda_{\delta м}}$ Таким образом $F_м = F_{м0} \dfrac{\Lambda_м}{\Lambda_м + \Lambda_\sigma + \Lambda_{\delta м}}$

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 $F_{\delta d}$

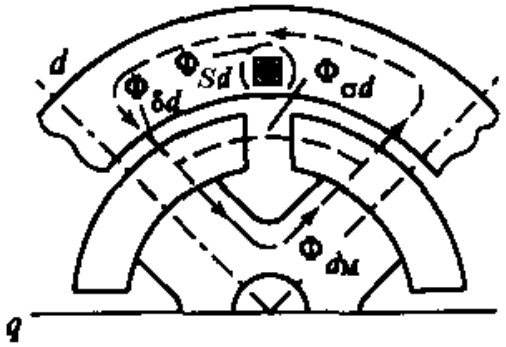
k_d – коэффициент формы поля якоря по продольной оси

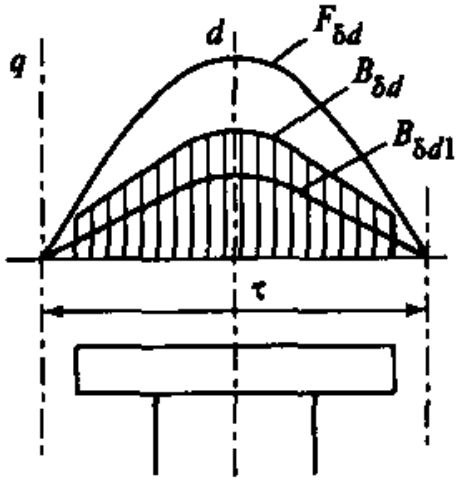
Максимальное значение индукции в зазоре $$B_{\delta dm} = \frac{\mu_0 F_{\delta dm}}{\delta k_\delta}$$

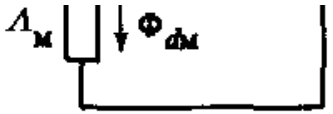
Тогда проводимость воздушного зазора

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

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 $\Lambda_{\delta q}$ для потока $\Phi_{\delta q}$ $$\Lambda_{\delta q} = \frac{\Phi_{\delta q}}{F_{\delta qm}} = \frac{k_{\Phi q}\Phi_{\delta q1}}{F_{\delta qm}}$$

Поток основной гармонической индукции $$\Phi_{\delta q1} = \frac{2}{\pi}\tau l_\delta B_{\delta q1m} = \frac{2}{\pi}\tau l_\delta k_q B_{\delta qm}$$

Здесь $B_{\delta q1m}$ – амплитуда основной гармонической индукции в зазоре

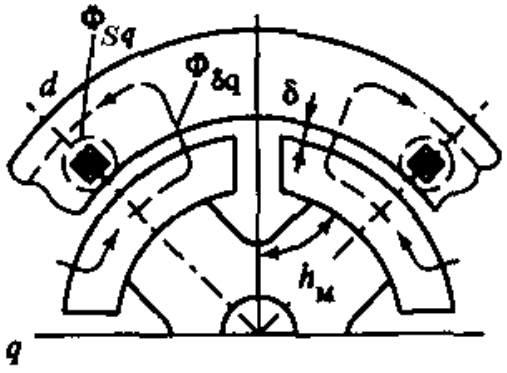
$B_{\delta qm}$ – максимальное значение индукции в зазоре, созданной $F_{\delta q}$

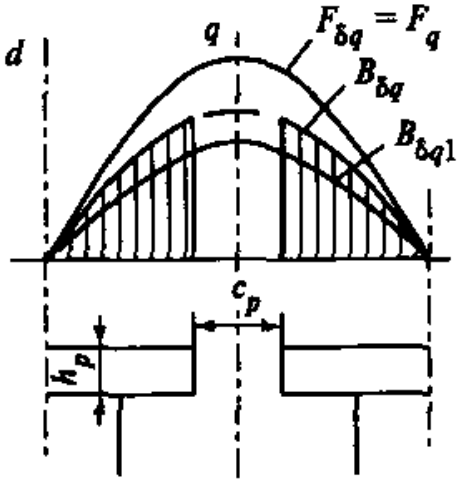
k_q – коэффициент формы поля якоря по поперечной оси

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

Тогда проводимость воздушного зазора

$$\Lambda_{\delta q} = \frac{2k_q k_{\Phi q}\mu_0 \tau l_\delta}{\pi \delta k_\delta}$$





Расчет параметров СДПМ

Найдем параметры схем замещения

Проводимость воздушного зазора $\Lambda_{\delta м}$ для потока ПМ $$\Lambda_{\delta м} = \frac{\Phi_{\delta м}}{F_{\delta м}} = \frac{k_{\Phi м}\Phi_{\delta м1}}{F_{\delta м}}$$

Поток основной гармонической индукции $$\Phi_{\delta м1} = \frac{2}{\pi}\tau l_{\delta} B_{\delta м1m} = \frac{2}{\pi}\tau l_{\delta} k_{м} B_{\delta мm}$$

Здесь $B_{\delta м1m}$ – амплитуда основной гармонической индукции в зазоре

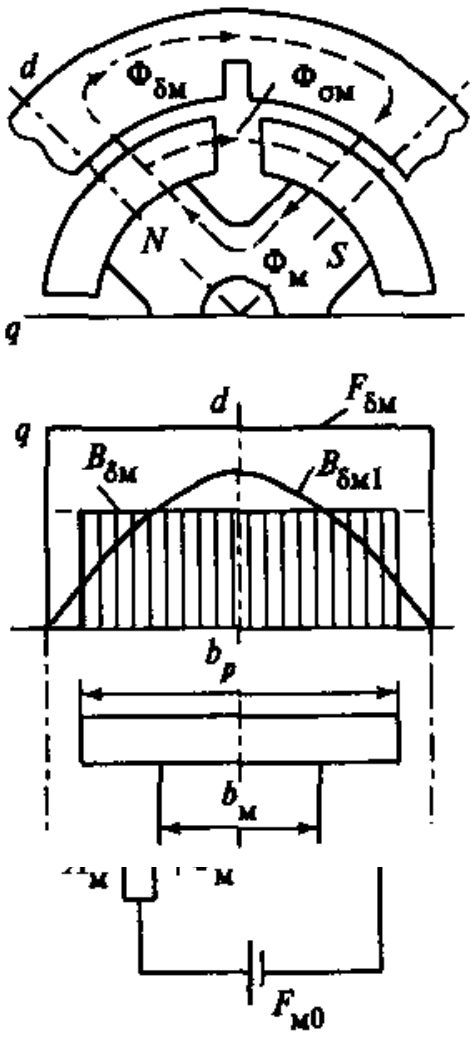
$B_{\delta мm}$ – максимальное значение индукции в зазоре, созданной ПМ

$k_{м}$ – коэффициент формы поля магнита

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

Тогда проводимость воздушного зазора

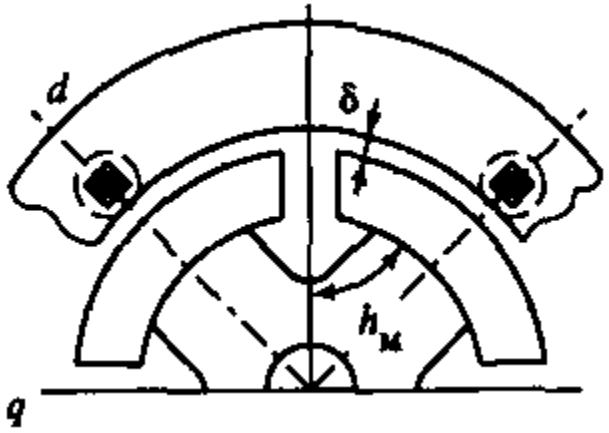
$$\Lambda_{\delta м} = \frac{2k_{м}k_{\Phi м}\mu_0 \tau l_{\delta}}{\pi \delta k_{\delta}}$$

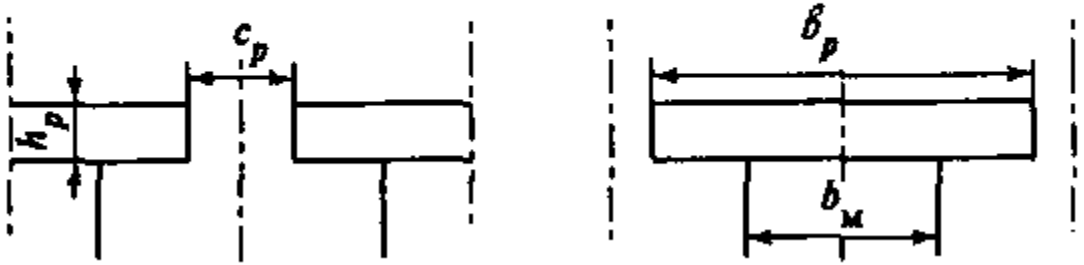


Расчет параметров СДПМ

Найдем параметры схем замещения

Остальные проводимости найдем по упрощенной геометрии СДПМ





Магнитная проводимость полюса магнита по продольной оси $\Lambda_м = \dfrac{\mu_м b_м l_м}{h_м}$

Магнитная проводимость рассеяния ротора на один полюс $\Lambda_\sigma = \Lambda_{\sigma м} + \Lambda_{\sigma p}$

Магнитная проводимость рассеяния полюса магнита между боковыми и торцевыми поверхностями $\Lambda_{\sigma м} = \dfrac{4}{\pi}\mu_0\left(pl_м + b_м \sin\dfrac{\pi}{2p} + 0,5h_м\right)$

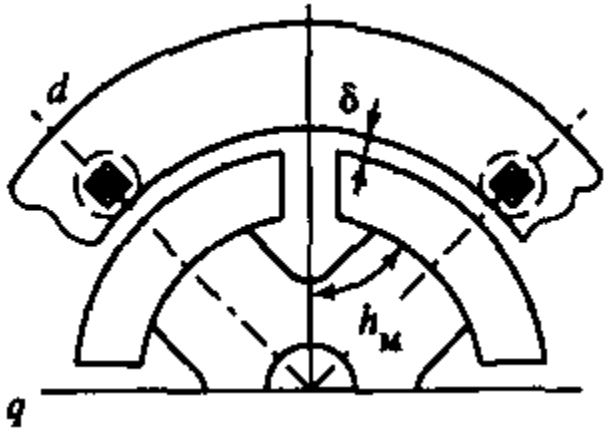
Магнитная проводимость рассеяния полюсных наконечников $\Lambda_{\sigma p} = 4\mu_0\left(\dfrac{h_p l_p}{c_p} + 0,64(h_p + l'_p)\gamma_1 + 0,32 l_м \gamma_2\right)$

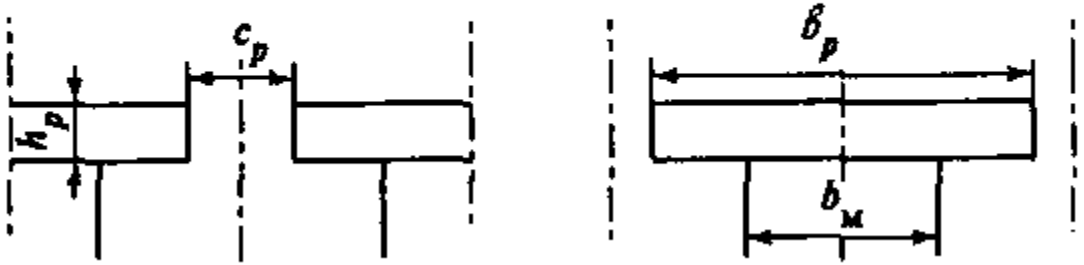
Здесь $l_м$, l_p – длина магнита и полюсного наконечника, а также $l'_p = \dfrac{l_p - l_м}{2}$ $\gamma_1 = \ln\left(1 + \dfrac{\pi b_p}{2c_p}\right)$ $\gamma_2 = \ln\left(1 + \dfrac{\pi(b_p - b_м)}{2c_p}\right)$

Расчет параметров СДПМ

Найдем параметры схем замещения

Остальные проводимости найдем по упрощенной геометрии СДПМ





Коэффициенты формы поля и потока

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

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

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

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

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

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

Расчет параметров СДПМ

Найдем параметры схем замещения

Окончательно найдем

ЭДС от поля возбуждения $E_0 = \sqrt{2}\pi f_1 w_1 k_{o1} \Phi_{\delta м1}$

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 $F_{dm} = \dfrac{\sqrt{2} m_1 w_1 k_{o1} I_d}{\pi p}$ запишем выражение $x_{ad} = \dfrac{2 m_1 f_1 \left(w_1 k_{o1}\right)^2}{k_{\Phi d}\, p} \Lambda_{ad}$

Аналогично

Главное индуктивное сопротивления якоря по поперечной оси $x_{aq} = \dfrac{2 m_1 f_1 \left(w_1 k_{o1}\right)^2}{k_{\Phi q}\, p} \Lambda_{aq}$

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 $R_д$)

В СДПМ нельзя «отключить» поле постоянных магнитов

- в процессе разгона ротора под действием асинхронного момента $M_а$ вращающееся поле ПМ наводит в якоре ЭДС E_E
- частота этой ЭДС E_E зависит от скорости ротора (скольжения): $f_E = (1\text{-}s)f_1$ (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) $\rightarrow$ ток имеет заметную величину
- взаимодействие тока I_E с полем возбуждения создает тормозной генераторный момент

$$M_т = \frac{mE_0 r_S}{\Omega_с} \cdot \frac{(1-s)\left(r_S^2 + (1-s)^2 x_q^2\right)}{\left(r_S^2 + (1-s)^2 x_d x_q\right)^2}$$

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

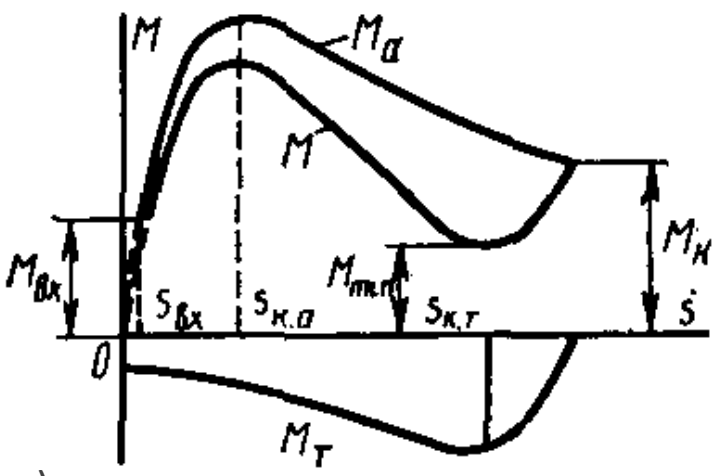
Характеристика тормозного момента $M_т = f(s)$ – как у обращенной асинхронной машины (у которой идеальный ХХ при $n = 0$ и режим КЗ при $n = n_с$)

Особенности пуска в ход СДПМ

Результирующий момент СДПМ при асинхронном пуске $M = M_а + M_т$

- » уменьшение результирующего момента
- » провал в кривой момента (при критических скольжениях тормозного момента $s_{к\,т}$)

$$M_т = \frac{mE_0 r_S}{\Omega_с} \cdot \frac{(1-s)\left(r_S^2 + (1-s)^2 x_q^2\right)}{\left(r_S^2 + (1-s)^2 x_d x_q\right)^2}$$

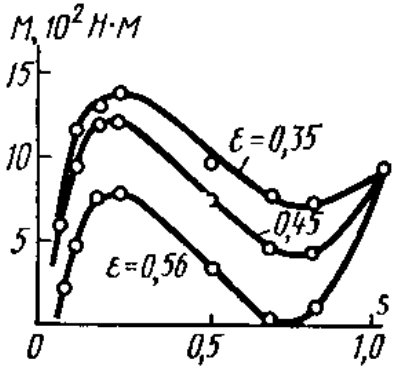


Тормозной момент зависит от величины E_0 (от степени возбужденности ε)

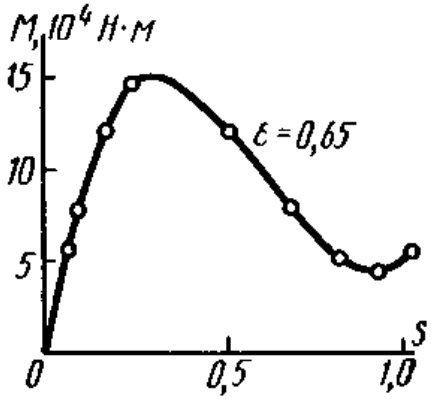
При больших значениях ε провал из-за $M_т$ большой

→ двигатель может не запуститься

СДПМ мощностью 2,5 Вт



При бóльшей мощности влияние ε слабее (меньше значения r_S)

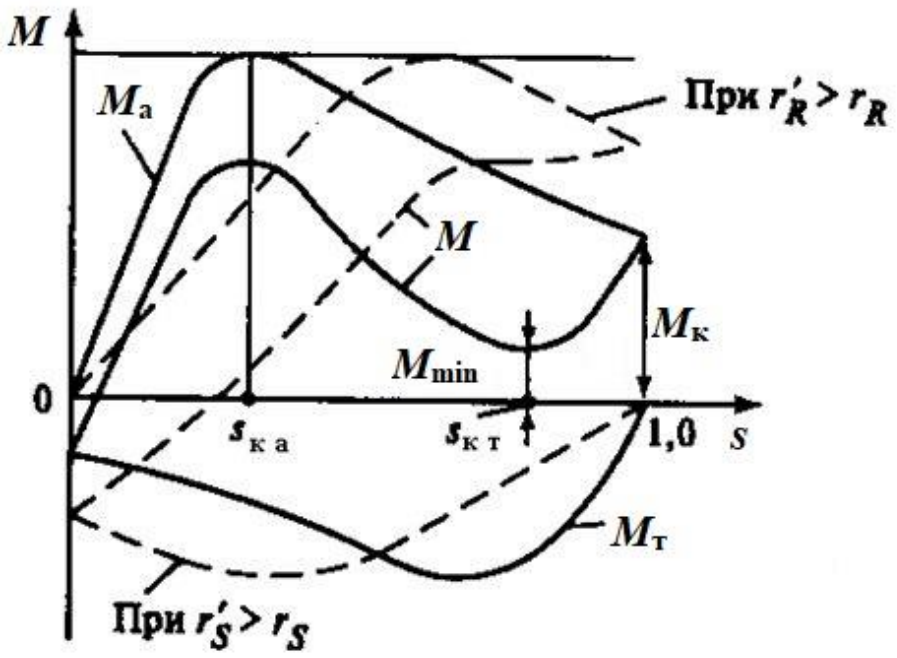


СДПМ мощностью 50 Вт

Особенности пуска в ход СДПМ

Величина провала в кривой момента зависит также от критического скольжения тормозного момента $s_{к\,т}$

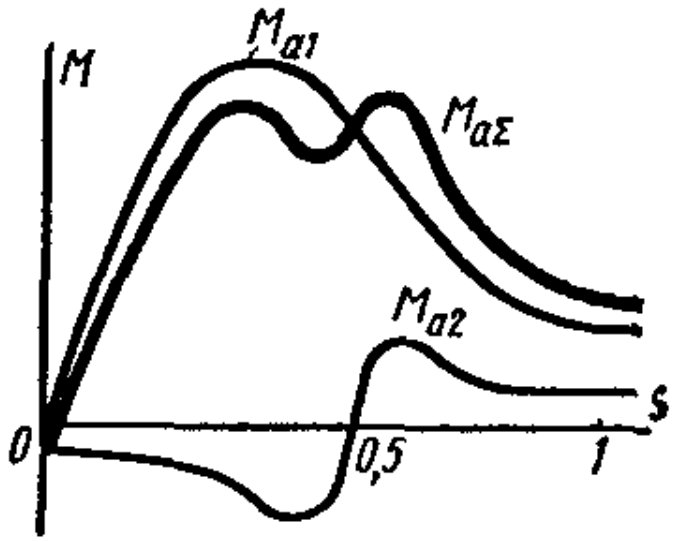
- по мере увеличения r_S изменяется $s_{к\,т}$, но величина $M_{тmax}$ остается постоянной (как и асинхронный момент в зависимости от r_2)
- в результате изменяется форма результирующей кривой момента



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)



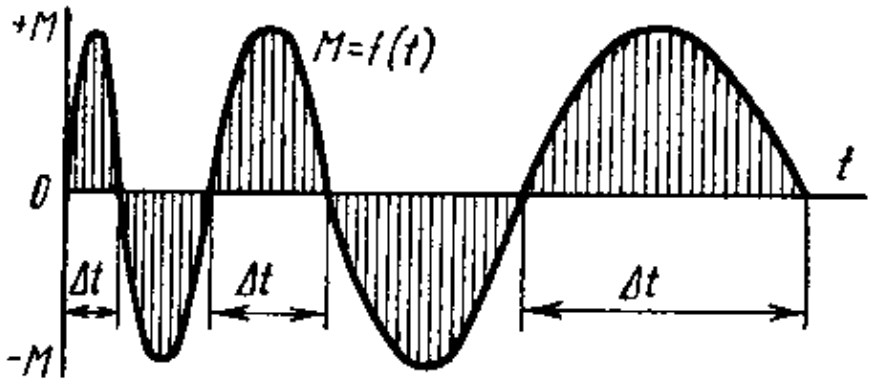
Электрическая несимметрия пусковой обмотки

- 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 $M_с$ изменяется и меняет знак «медленно» ($s \to 0$) и за время «положительного» момента его импульса $M_с \Delta t$ может хватить для разгона ротора до синхронной скорости $\Omega_с$ (происходит втягивания в синхронизм)

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



Противодействуют разгону
момент сопротивления механизма $M_м$ и
тормозной момент синхронного двигателя $M_т$

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

Условие втягивания в синхронизм:
«положительная» энергия, полученная за время Δt от синхронного и асинхронного моментов $M_с$ и $M_а$, должна быть больше прироста кинетической энергии ротора и механизма и «отрицательной» энергии противодействующих моментов сопротивления механизма и тормозного момента двигателя $M_м$ и $M_т$

Вхождение в синхронизм

Минимально необходимый баланс энергии для втягивания в синхронизм

$$A_с + A_а = \Delta A_к + (A_м + A_т)$$

Прирост кинетической энергии $\Delta A_к = \dfrac{J\left(\Omega_с^2 - \Omega^2\right)}{2}$

Энергия, полученная от вращающих моментов $A_с + A_а = \left(M_{с.ср} + M_{а.ср}\right)\Omega_{ср}\Delta t$

Энергия, полученная от тормозящих моментов $A_м + A_т = \left(M_{м.ср} + M_{т.ср}\right)\Omega_{ср}\Delta t$

Средняя скорость

$$\Omega_{ср} = \frac{\Omega_с + \Omega}{2}$$

Баланс энергии $\left(M_{с.ср} + M_{а.ср}\right)\Omega_{ср}\Delta t = \dfrac{J\left(\Omega_c^2 - \Omega^2\right)}{2} + \left(M_{м.ср} + M_{т.ср}\right)\Omega_{ср}\Delta t$

Разделим на Δt и $\Omega_{ср}$ $M_{с.ср} + M_{а.ср} = J\dfrac{\Delta\Omega}{\Delta t} + M_{м.ср} + M_{т.ср}$

Переходя от Δt к dt
получим уравнение движения $J\dfrac{d\Omega}{dt} = M_с + M_а - M_м - M_т$

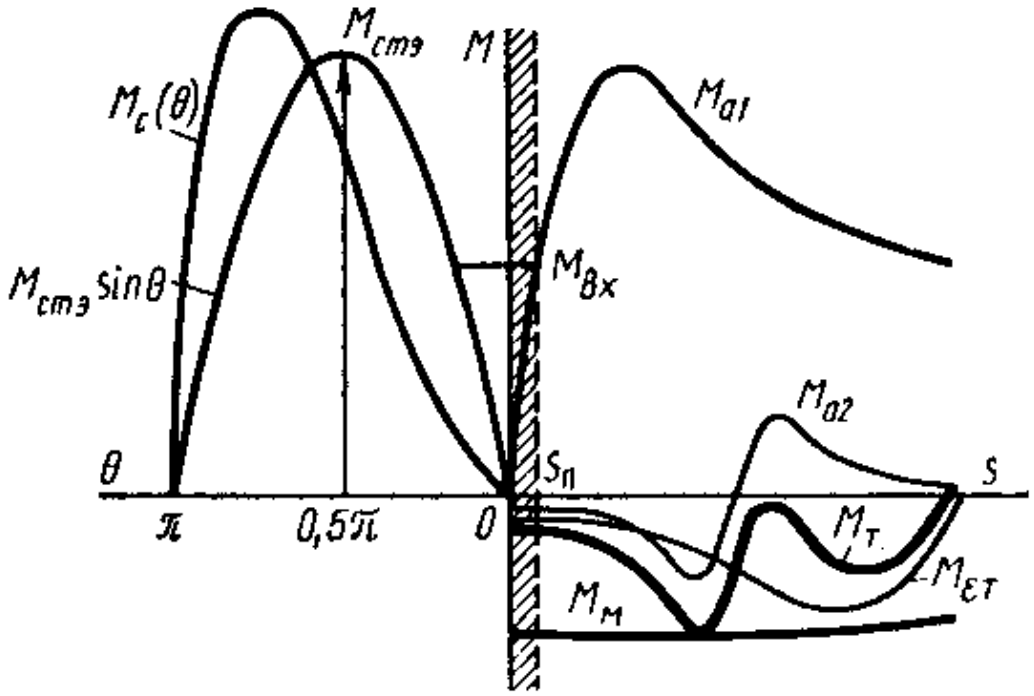
Анализ переходного процесса втягивания в синхронизм – решение уравнения

$$J\frac{d\Omega}{dt} = M_с(\theta, t) + M_а(s, t) - M_м(s) - M_т(s, t)$$

Вхождение в синхронизм

Для упрощения анализа примем допущения

- в процессе синхронизации момент сопротивления механизма $M_м$ и тормозной момент двигателя $M_т$ остаются постоянными ($M_м + M_т = M_{м,т}$)
- момент двигателя на угловой характеристике заменим эквивалентной по площади синусоидой $M_с = M_{стэ}\sin\theta$ (при невозбужденном роторе $M_c = M_{стэ}\sin 2\theta$)
- асинхронный момент при малых значениях s представим прямой $M_а = m_а s$ (где $m_а \to$ tg угла наклона механической характеристики)



Выразим производную скорости через угол θ $\quad \dfrac{d\Omega}{dt} = -\dfrac{1}{p}\dfrac{d^2\theta}{dt^2}$

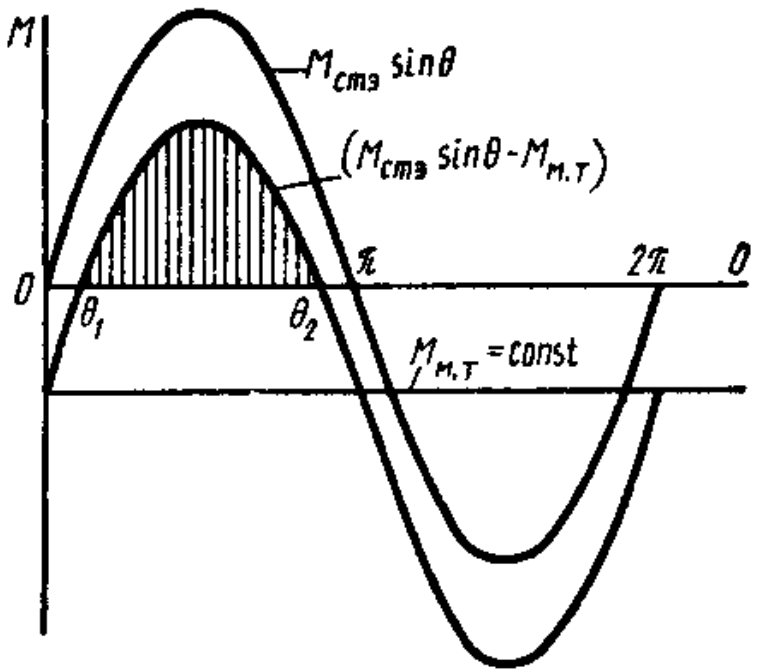
Тогда уравнение движения записывается как

$$\frac{1}{p} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{m_a}{\Omega_c} \cdot \frac{d\theta}{dt} + M_{стэ} \sin\theta = M_{м,т}$$

Вхождение в синхронизм

Еще один уровень упрощения для качественного анализа

- пренебрегаем асинхронным моментом $M_а$
- разницу синхронного момента и тормозных моментов заменим единым динамическим моментом



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

Перепишем через скольжение $$-J\frac{\Omega_1^2}{2p}d\left(s^2\right)=\left(M_{стэ}\sin\theta - M_{м,т}\right)d\theta$$

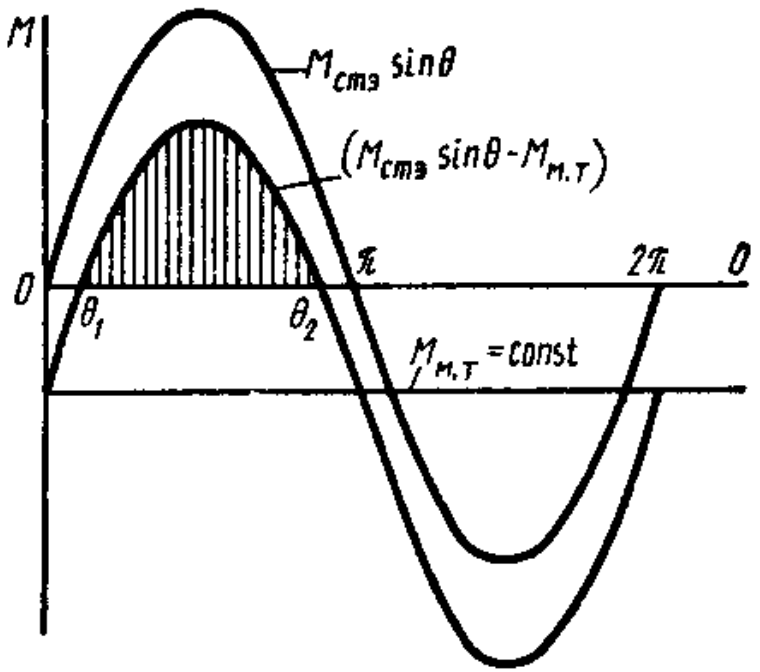
Баланс энергии:
энергия «положительного» динамического момента на участке от θ_1 до θ_2 равна приращению кинетической энергии при изменении скольжения от предельного $s_п$ (за счет $M_а$ при данной нагрузке) до 0

$$\int_{s_п}^{0} -J\frac{\Omega_1^2}{2p}d\left(s^2\right)=\int_{\theta_1}^{\theta_2}\left(M_{стэ}\sin\theta - M_{м,т}\right)d\theta$$

Вхождение в синхронизм

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

Проинтегрируем $$J\frac{\Omega_1^2}{2p}s_п^2=-M_{стэ}\left(\cos\theta_2-\cos\theta_1\right)-M_{м,т}\left(\theta_2-\theta_1\right)$$



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

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

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
$m_с = M_{м,т} / M_{стэ} = \sin\theta_1$

$$s_п^2=\frac{4pM_{стэ}}{\Omega_1^2 J}\left[\cos\theta_1-m_с\left(\frac{\pi}{2}-\theta_1\right)\right]$$

Вхождение в синхронизм

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

Тогда предельное скольжение $$s_п^2 = \frac{4pM_{стэ}}{\Omega_1^2 J}\left[\sqrt{1-m_с^2} - m_с\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin m_с\right)\right]$$

Момент входа в синхронизм у микродвигателей не превышает $0{,}5\ldots0{,}6\ M_{стэ}$
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 $\sqrt{1-m_с^2} = 1 - 0{,}5m_с^2$

Суммарная погрешность при этом не превысит 10%

В результате упрощенное выражение предельного скольжения

$$s_п^2 = \frac{4pM_{стэ}}{\Omega_1^2 J}\left[1 - 1{,}57m_с + 0{,}5m_с^2\right]$$

Для СД с невозбужденными явно выраженными полюсами

$$s_п^2 = \frac{2pM_{стэ}}{\Omega_1^2 J}\left[1 - 1{,}57m_с + 0{,}5m_с^2\right]$$

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

Если же принять $m_с = 0$

$$s_п = \frac{1}{\pi f}\sqrt{\frac{pM_{стэ}}{J}}$$

и

$$s_п = \frac{1}{\pi f}\sqrt{\frac{pM_{стэ}}{2J}}$$

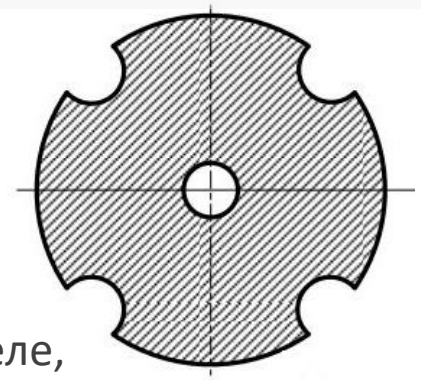
Синхронные реактивные двигатели

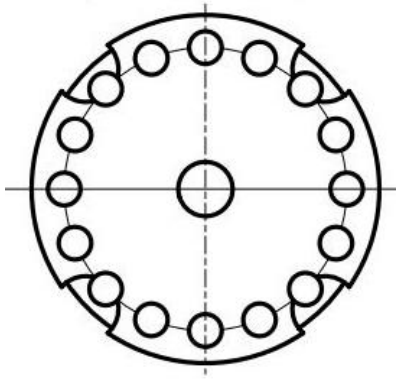
Конструкции, уравнения и характеристики

Синхронные реактивные двигатели

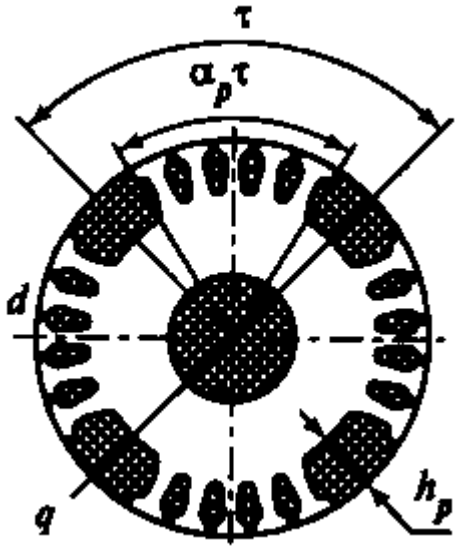
СРД – СД без возбуждения на роторе (не ни ОВ ни ПМ $\rightarrow E_0 = 0$, $\varepsilon = 0$),
но с разными магнитными проводимостями по осям d и q ($x_d > x_q$)

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 явновыраженных полюсов
за счет больших пазов по оси q (с заливкой Al для получения КЗ обмотки)

- коэффициент полюсного перекрытия k_p= 0,5…0,6
- относительная высота полюса h_p / δ = 10…12

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

Синхронные реактивные двигатели

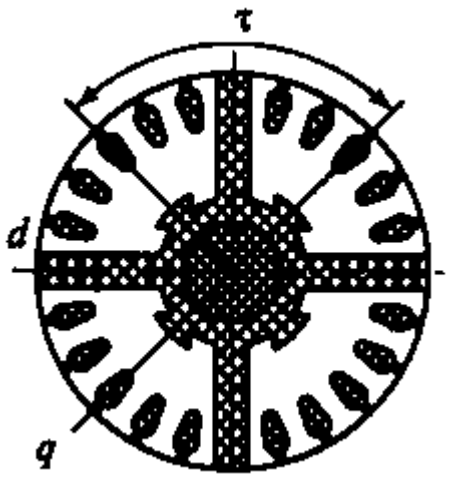
Отличительные особенности СРД

- малая перегрузочная способность $M_m / M_н = 1{,}2\ldots1{,}5$
- большая кратность пускового тока $I_п / I_н = 5\ldots7$
- низкие энергетические и синхронизирующие показатели

Достоинства СРД

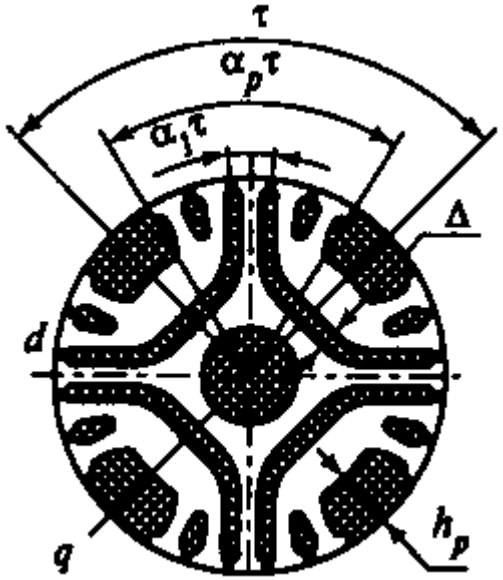
- простота и технологичность
- дешевизна
- надежность
- стабильность характеристик

Улучшение рабочих и пусковых свойств достигается за счет оптимизации ротора



Сегментный ротор

Ротор с внутренними пазами



Синхронные реактивные двигатели

Отличительные особенности СРД

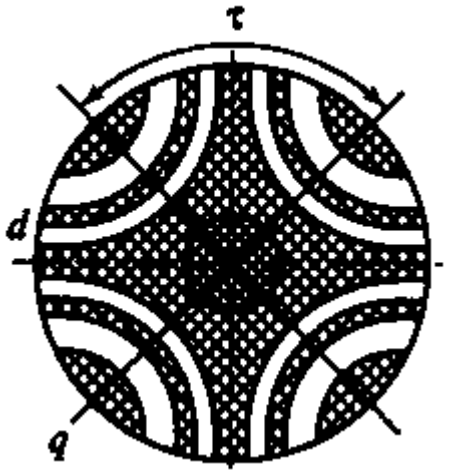
- малая перегрузочная способность $M_m / M_н = 1{,}2\ldots1{,}5$
- большая кратность пускового тока $I_п / I_н = 5\ldots7$
- низкие энергетические и синхронизирующие показатели

Достоинства СРД

- простота и технологичность
- дешевизна
- надежность
- стабильность характеристик

Улучшение рабочих и пусковых свойств достигается за счет оптимизации ротора

Секционированный ротор



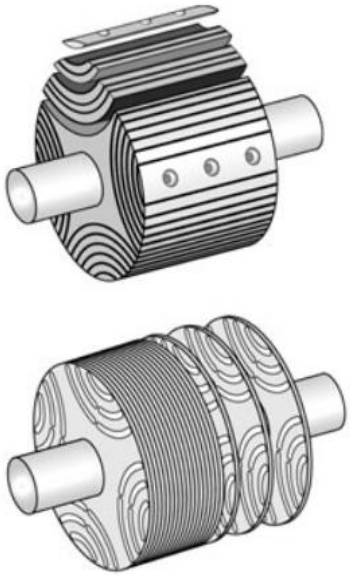


ABB: SynRM (IE4) +
электронный регулятор (ПЧ)

Принцип действия СРД

Принцип действия
- пуск за счет асинхронного момента $M_а$
- втягивание в синхронизм за счет реактивного момента M_{dq}
- работа на синхронной скорости $\Omega_с$

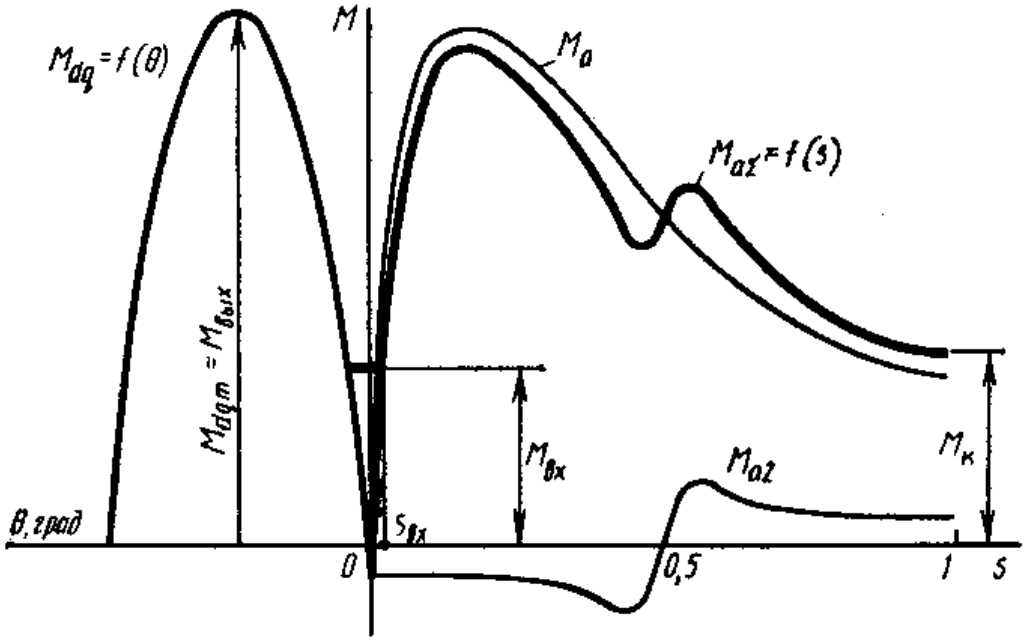
Из-за электрической несимметрии ротора
→ токи ротора прямой и обратной последовательности
→ составляющие момента $M_{а1}$ и $M_{а2}$
→ провал в кривой момента $M_{а\Sigma}$

Синхронный момент – момент явнополюсности (sin2θ)

Пусковые свойства СРД
- пусковой момент $M_к$
- момент входа в синхронизм $M_{вх}$

Особенность СРД – чувствительность к колебаниям $U_с$
- реактивный момент пропорционален U^2
- асинхронный момент пропорционален U^2

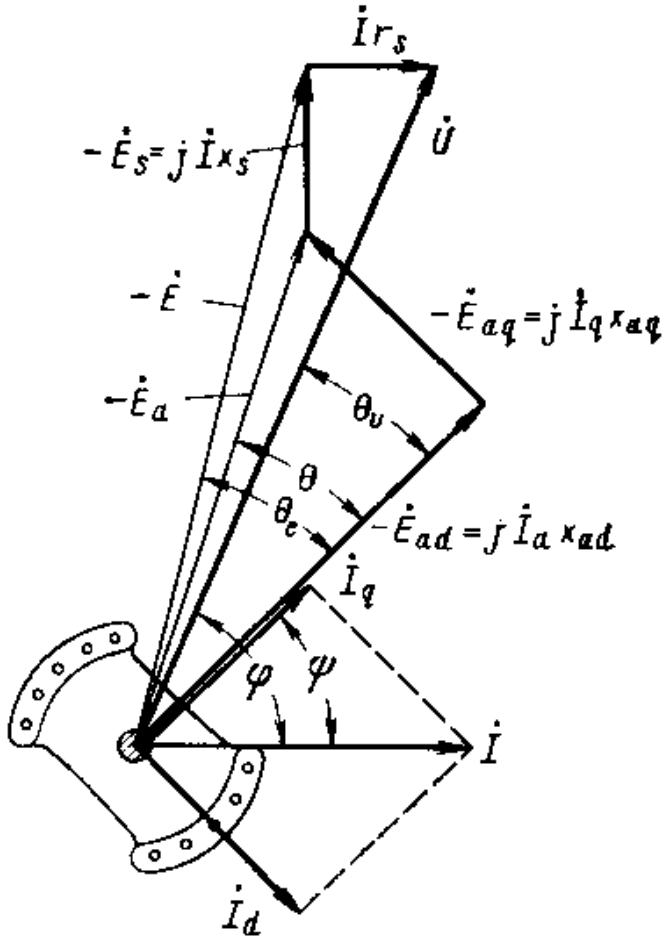
(при снижении U на 15%, момент снижается на 28%)



Уравнения СРД

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

Напряжение сети уравновешивается ЭДС от потока якоря E_a и ЭДС от потока рассеяния E_S, а также Ir_S

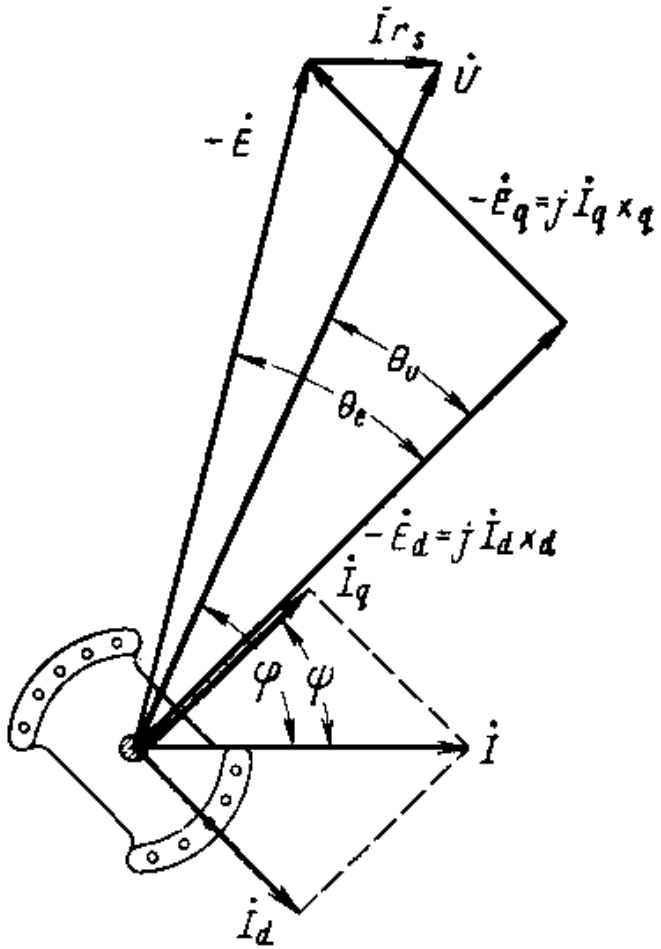


$$\dot{U} = -\dot{E}_a - \dot{E}_S + \dot{I}r_S \quad = -\dot{E}_{ad} - \dot{E}_{aq} - \dot{E}_S + \dot{I}r_S$$

Через индуктивные параметры уравнение баланса напряжений можно записать как

$$\dot{U} = j\dot{I}_{ad}x_{ad} + j\dot{I}_{aq}x_{aq} + jIx_S + \dot{I}r_S$$

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

$$I_d = \frac{U}{r_S^2 + x_d x_q}\left(x_q \cos\theta_U - r_S \sin\theta_U\right) \qquad I_q = \frac{U}{r_S^2 + x_d x_q}\left(r_S \cos\theta_U + x_d \sin\theta_U\right)$$

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

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

где амплитуда синусоидальной составляющей $A_{dq} = \frac{mU^2(x_d - x_q)}{2\Omega_{\text{с}}\left(r_S^2 + x_d x_q\right)^2}\sqrt{\left(x_d x_q - r_S^2\right)^2 + r_S^2\left(x_d + x_q\right)^2}$

тормозной момент $M_{dq\text{т}} = \frac{mU^2}{2\Omega_{\text{с}}\left(r_S^2 + x_d x_q\right)^2} r_S\left(x_d - x_q\right)^2$

Синхронные реактивные двигатели

Проектирование СРД – задача по оптимизации пусковых и рабочих свойств

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

- для увеличения момента надо увеличивать разницу $(x_d - x_q)$
- при этом увеличивается средний немагнитный зазор
  $\rightarrow$ увеличивается намагничивающий ток
  $\rightarrow$ увеличивается падение напряжения Ir_S
  $\rightarrow$ 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»

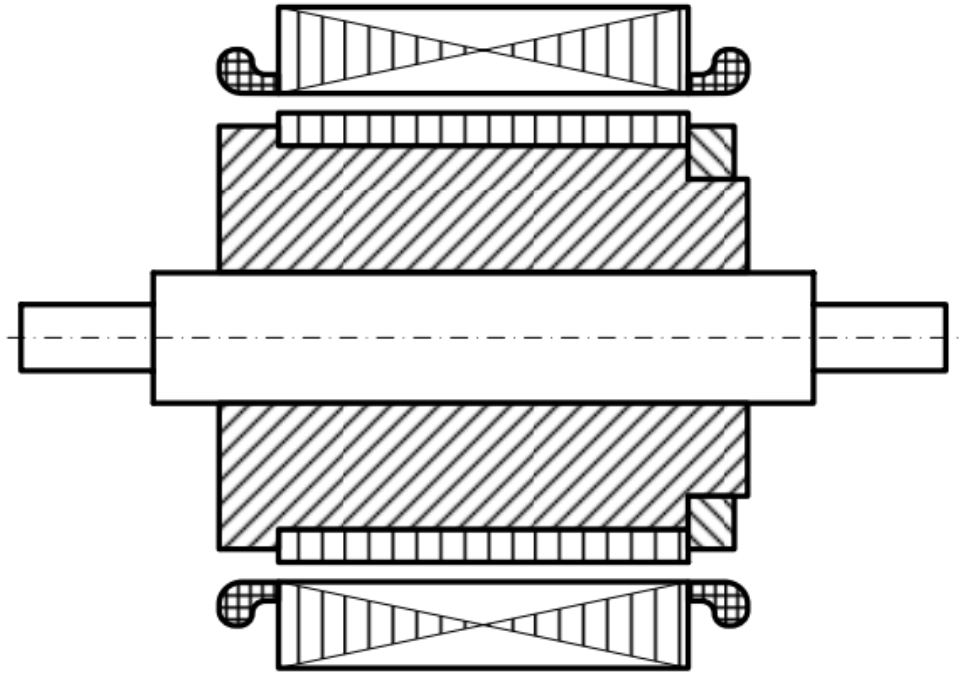
ABB (2014) SynRM motor

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)



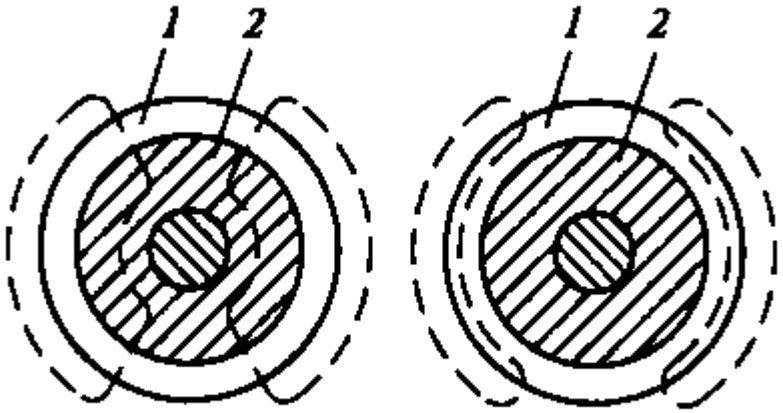
Конструкция статора аналогична всем двигателям переменного тока (задача – создание вращающегося поля)

На роторе – слой гистерезисного материала

- сплошной или набранный из колец цилиндр 1
- внутренняя втулка 2 (для экономии материала)

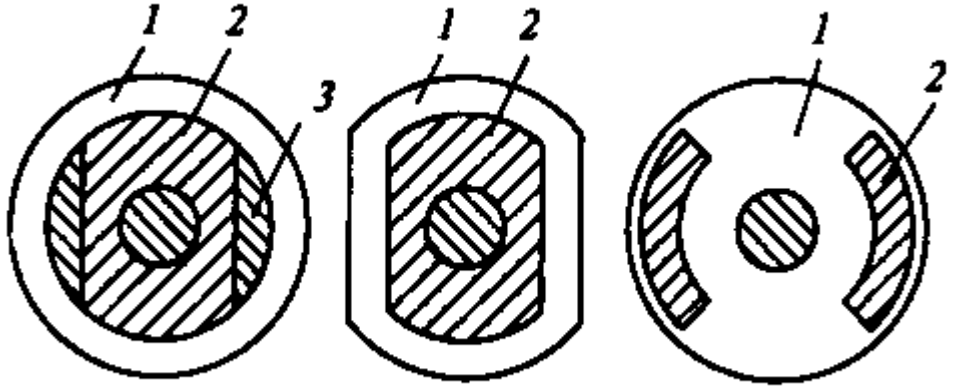
а) ферромагнитная втулка при малой μ материала

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 cosφ двигателя

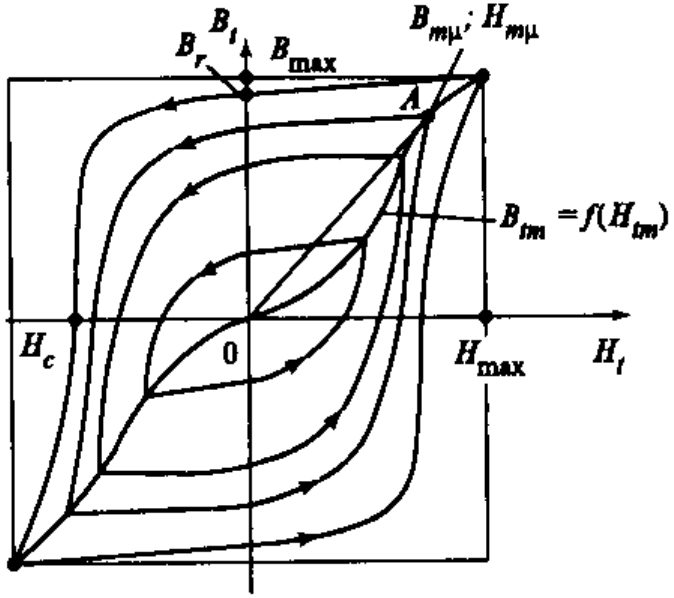
Гистерезисный материал характеризуется основной кривой намагничивания $B_{tm} = f(H_{tm})$ и широкими частичными кривыми перемагничивания

Предельная петля гистерезиса:

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

Магнитная проницаемость максимальная в точке *A*

Рабочая кривая перемагничивания должна проходить через точку *A*



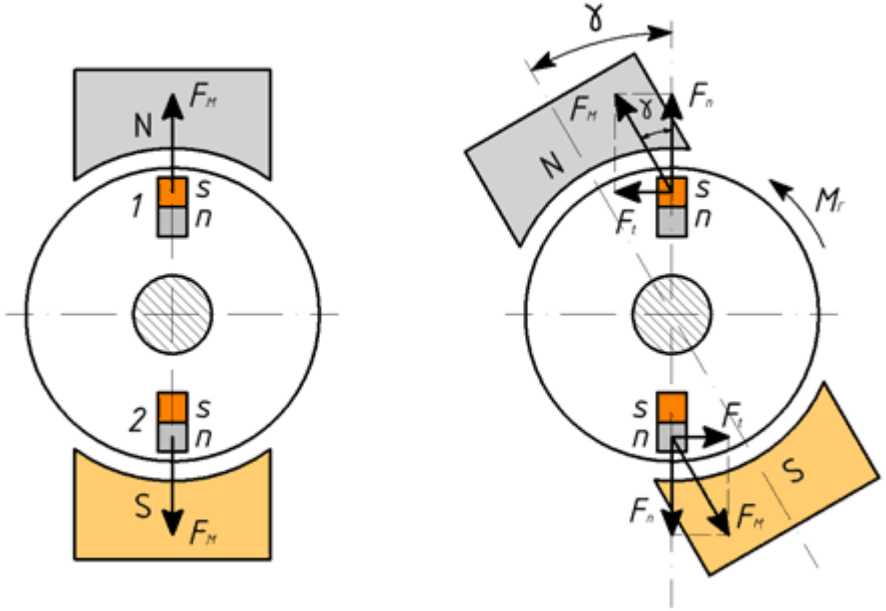
Принцип действия гистерезисного двигателя

Активный материал – гистерезисный момент (момент от остаточного магнетизма) $M_г$
Сплошной цилиндр – асинхронный момент (момент от вихревых токов) $M_в$

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

$$H_{\text{г}\alpha} = H_{\text{г}m}\cos(\alpha - \vartheta)$$

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

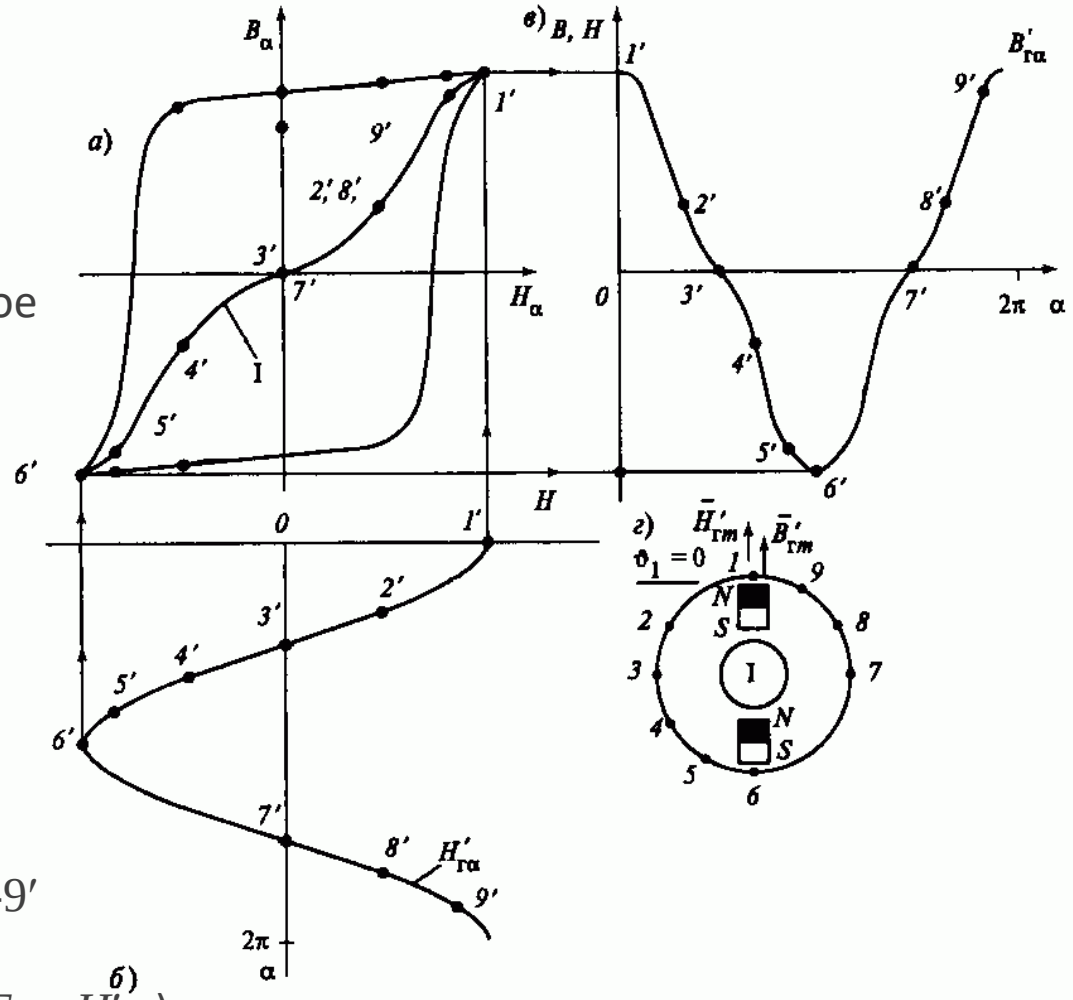
$\alpha = \pi x/\tau$ – электрический угол т. x на окружности ротора

$\vartheta = \omega t$ – электрический угол положения $H_{\text{г}m}$

$\underline{\vartheta = 0}$

При включении $U_\text{с}$ напряженность $H'_{\text{г}\alpha}$ распределена по **cos**

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



Принцип действия гистерезисного двигателя

$\vartheta = \pi/3$

Через 1/6 периода напряженность $H''_{\text{гα}}$

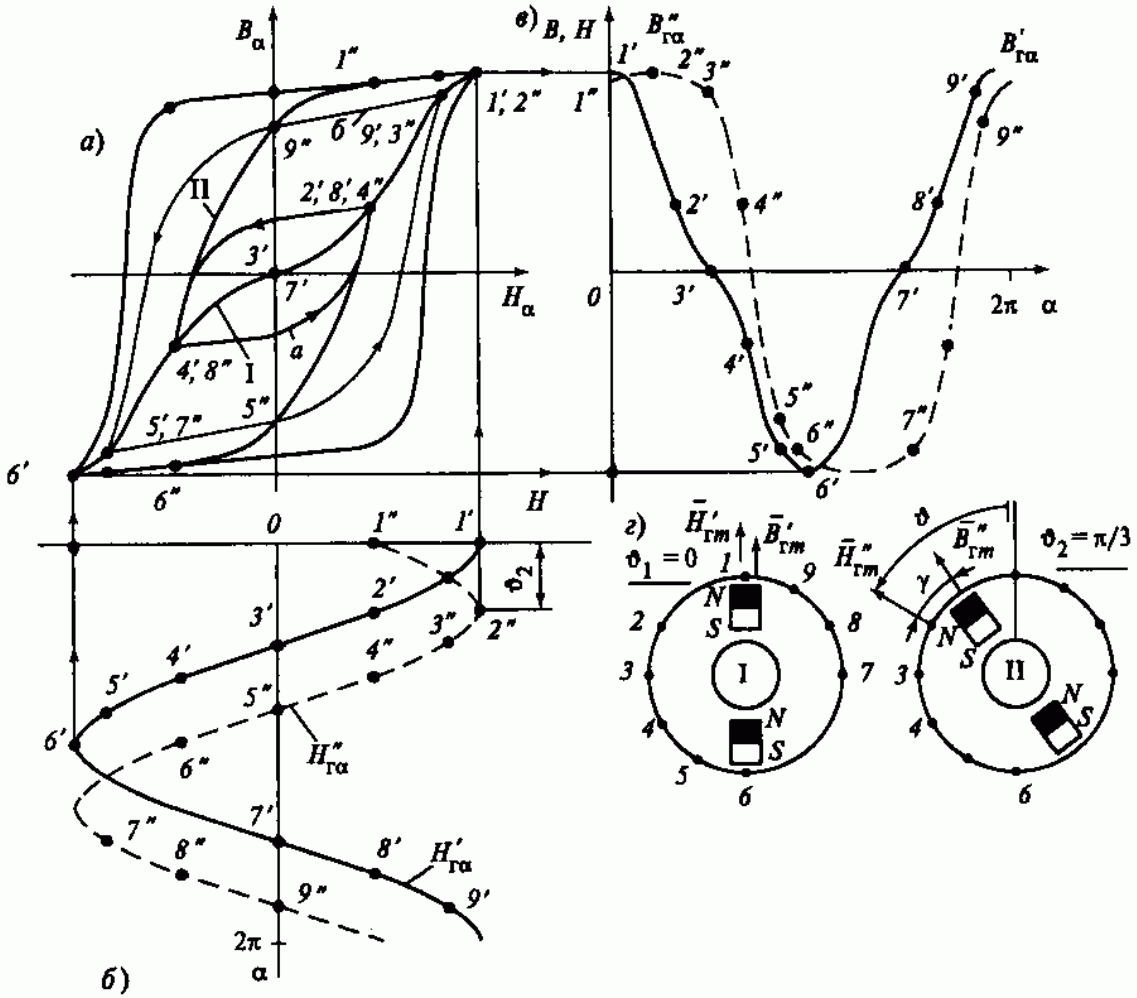
» убывает в т. 1, 7, 8, 9
- т. 1′-1″ – по предельной петле гистерезиса
- т.7′-7″ – по основной кривой намагничивания
- т.8′-8″ – по частичной петле а
- т.9′-9″ – по частичной петле б

» 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 $B''_{\text{гα}}$

» ось поля ротора ($B''_{\text{гα}}$) отстает от оси поля статора (F_1 и $H''_{\text{гα}}$) 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)

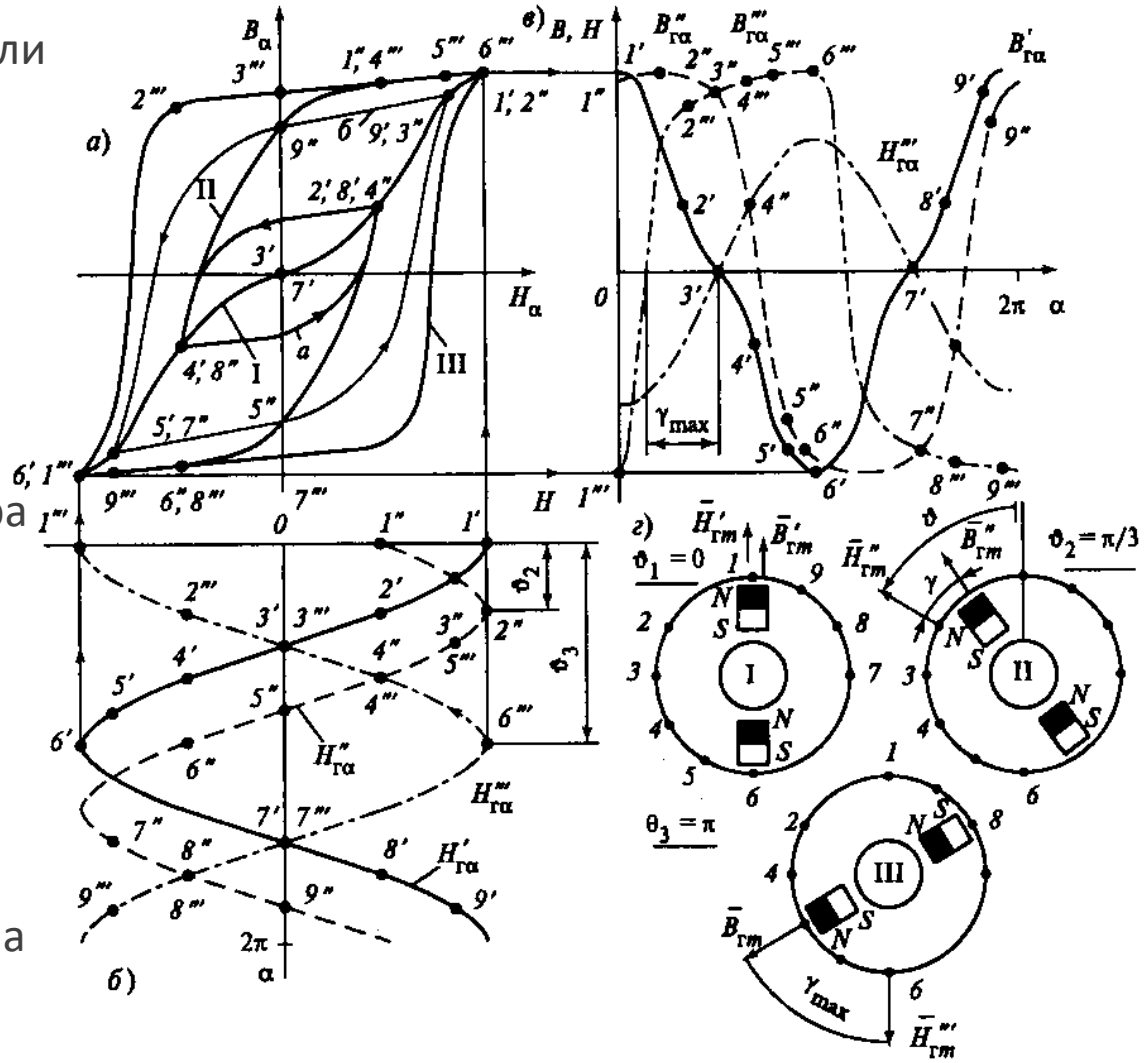
$\vartheta = \pi$

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

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

Величина гистерезисного момента $M_{\text{г}}$ 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 $P_R = P_г + P_в = sP_{г.к} + s^2 P_{в.к}$

Электромагнитную мощность можно выразить через P_R/s

$$P_{ЭМ} = \frac{P_г}{s} + \frac{P_в}{s} = P_{г.к} + sP_{в.к}$$

Тогда вращающий момент

$$M = \frac{P_{г.к}}{\Omega_с} + s\frac{P_{в.к}}{\Omega_с} = M_г + M_в$$

- Гистерезисный момент $M_г$ постоянен
- Момент от вихревых токов $M_в$ пропорционален s (сопротивление сплошного ротора велико)

Механическая характеристика СГД

Характеристики синхронного гистерезисного двигателя

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

Гистерезисный материал

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

$M_г$ можно выразить через удельные потери $p_г$ и объем активного материала V

$$M_г = \frac{p}{2\pi} p_г V$$

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)

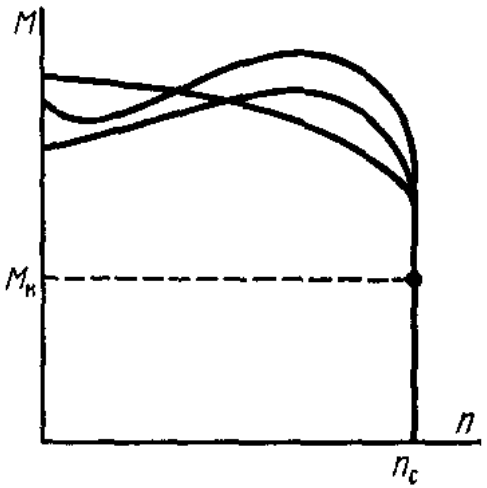
Механическая характеристика СГД

Характер перемагничивания гистерезисного материала

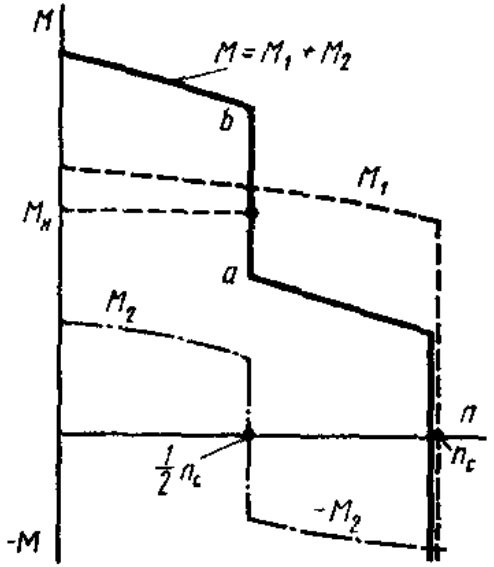
- ротор весь из гистерезисного материала – круговое перемагничивание (*B* меняется по направлению, но не величине)
- ротор с ферромагнитной втулкой – эллиптическое перемагничивание (*B* меняется и по направлению и по величине)
- ротор с немагнитной втулкой – линейное перемагничивание (*B* меняется только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

Характеристики синхронного гистерезисного двигателя

Реальные механические характеристики зависят от высших гармонических поля в зазоре



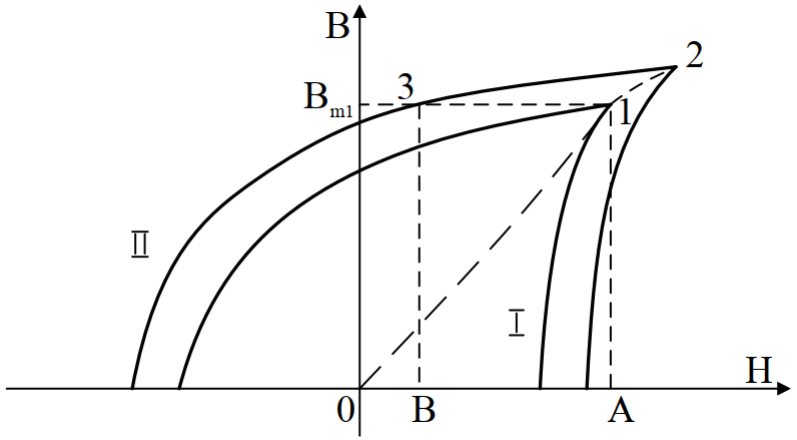
С помощью гармоник можно получить ступенчатую характеристику – возможность устойчиво работать на пониженных скоростях (при некоторых моментах)



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

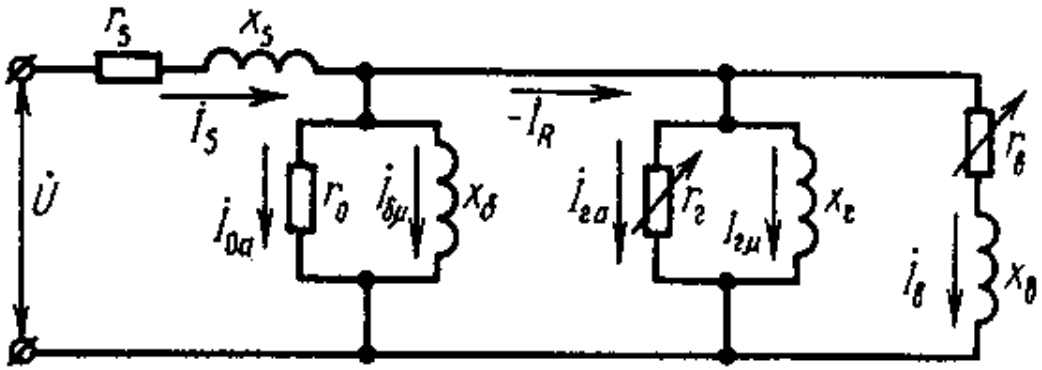
Намагниченный ротор в синхронном режиме действует как хороший ПМ

- » снижает намагничивающий ток, повышая cosφ
- » 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

- $r_г$ – учитывает потери на перемагничивание (мощность от гистерезисного момента) – зависит от нагрузки
- $x_г$ – учитывает магнитную проводимость ротора

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

- $r_в$ – учитывает потери от вихревых токов (мощность от асинхронного момента) – зависит от скольжения
- $x_в$ – 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

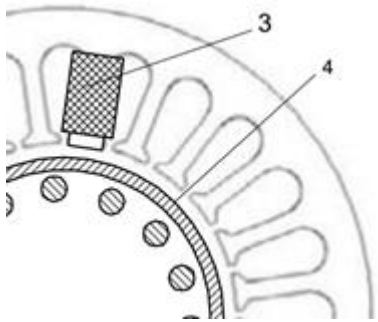
- большой пусковой момент $M_к$ и момент входа $M_{вх}$
- уверенный разгон и синхронизация
- независимость $M_{вх}$ от момента инерции J
- плавность входа в синхронизм (без скачка)
- малое изменение тока (на $20…30\%$ от $I_к$ до I_0 и на $1…3\%$ от I_0 до $I_н$)
- относительно высокий КПД (до 60%)
-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

Недостатки

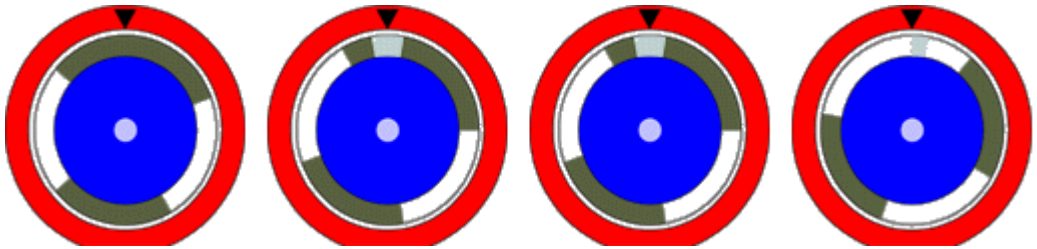
- низкий $\cos\varphi$ ($0{,}3…0{,}45$)
- малая стабильность мгновенной скорости вращения (качания ротора при изменении нагрузки или U)
- зависимость характеристик гистерезисного материала от соблюдения технологии изготовления
- высокая стоимость гистерезисных материалов
- сложность механической обработки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

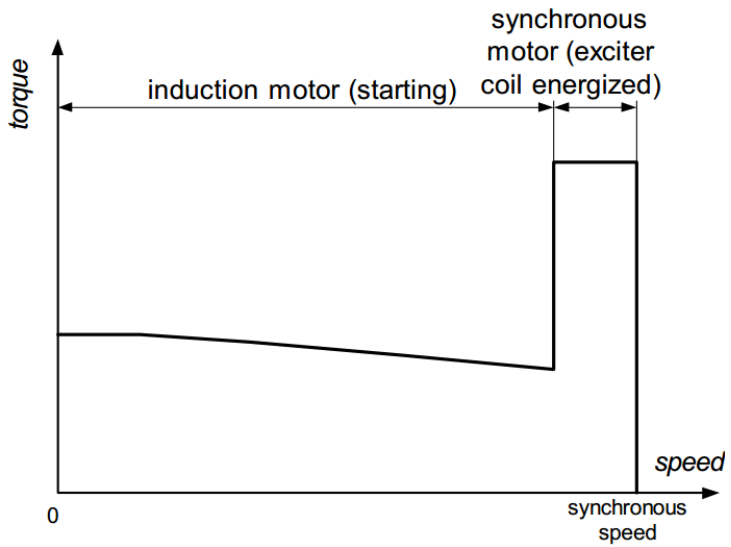
СГД “Written Pole”

Новая технология подмагничивания ротора от Precise Power Corporation



- обмотка подмагничивания включается на $f_{\text{сети}}$ при $n = (80\ldots100)\%$ от $n_{\text{с}}$
- 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 $\cos\varphi$, 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

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

Т.е. поле остается пульсирующим, нет пускового момента

Далее

Вентильные двигатели

Ширинский С.В.
каф. ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»
ShirinskiiSV@mpei.ru
https://e-200.ru/EMAU/