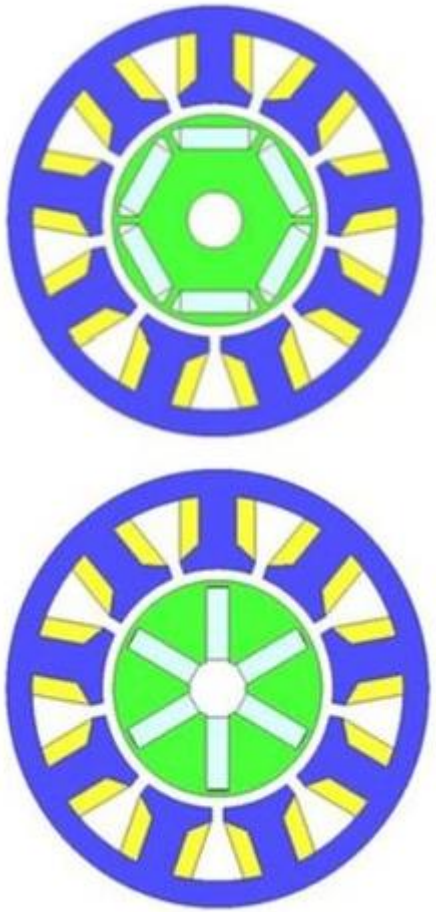
Теория синхронных микромашин

Теория, конструкции, характеристики



Синхронные микродвигатели

Главная особенность СД – постоянная частота вращения $n = n_c$ при колебаниях U и M_c

$$n_c = \frac{60 f}{p}$$

Основные требования к СД

» общие для силовых двигателей
  - высокие энергетические показатели
  - малые габариты и масса

» специфические для СД
  - постоянство средней или мгновенной скорости

Питание

» 3-фазное или 1-фазное

» частота напряжения f = 50 / 400 / 1000 Гц

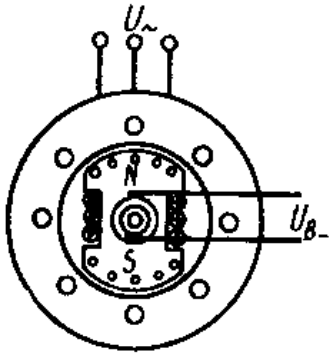
Конструкция статора

» классическая: сердечник с обмотками

» аналогична асинхронным микродвигателям

Синхронные микродвигатели

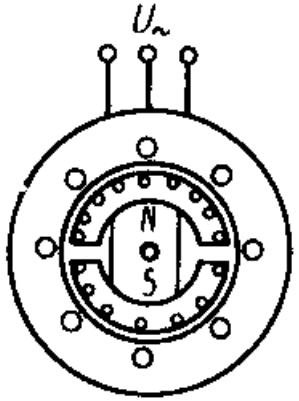
Конструкция ротора



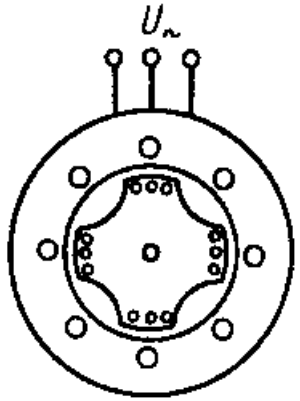
СД с электромагнитным возбуждением

- сложность конструкции (в микромашинах)
- сложность пуска
- необходимость источника постоянного тока для ОВ
- передача тока ОВ к вращающемуся ротору

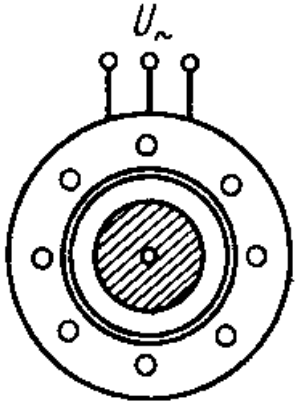
Применяются в микромашинах очень редко



с постоянными магнитами



реактивные



гистерезисные

А также тихоходные

- многополюсные (реактивные/гистерезисные)
- индукторные (с электромагнитной редукцией)
- редукторные (со встроенным редуктором)
- СД с катящимся / волновым ротором

Общая теория синхронных микродвигателей

Уравнения и векторная диаграмма

Уравнение напряжений синхронного микродвигателя

Основное отличие – значительная величина активного сопротивления r_S
(им нельзя пренебрегать)

Уравнение баланса напряжений для статора СД $\dot{U} = -\dot{E}_\delta - \dot{E}_\sigma + \dot{I}r_S$

где E_δ – ЭДС, наведенная в обмотке статора результирующим потоком в зазоре Φ,

E_σ – ЭДС, наведенная в обмотке статора потоком рассеяния статора $\dot{E}_\sigma = -j\dot{I}x_S$

Т.е. уравнение баланса напряжений $\dot{U} = -\dot{E}_\delta + j\dot{I}x_S + \dot{I}r_S = -\dot{E}_\delta + \dot{I}Z_S$

Т.к. напряжение питания уравновешивается в основном ЭДС, а $E = 4,44\, fw\Phi$

То при работе СД от сети с постоянным напряжением поток остается неизменным

Результирующий поток в зазоре Φ:

- поток возбужденного ротора $\Phi_в$
- поток реакции статора Φ_a (от намагничивающего тока статора)

При постоянном напряжении питания (и $\Phi \approx \text{const}$) доля Φ_a зависит от величины возбужденности ротора (т.е. $\Phi_в$)

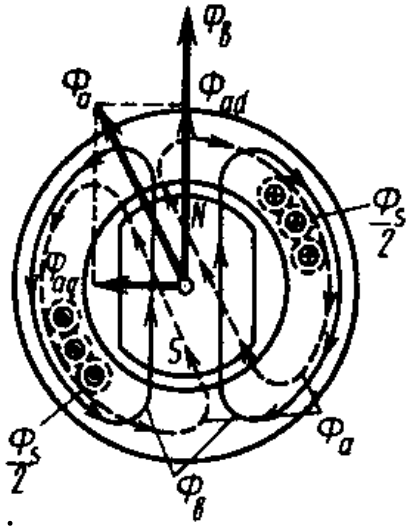
- в СД можно увеличить $\Phi_в$ так, чтобы $\Phi_a = 0$ (тогда $\cos\varphi = 1$)
- при дальнейшем увеличении $\Phi_в$ поток Φ_a поменяет знак (реактивная мощность $\rightarrow$ в сеть)
- в СД с ПМ величина возбужденности ротора постоянна (и обычно $\Phi_в < \Phi$)

Уравнение напряжений синхронного микродвигателя

ЭДС от результирующего потока в зазоре $\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_a$

где E_0 – ЭДС, наводимая основным потоком ротора $\Phi_в$

E_a – ЭДС, наводимая потоком реакции статора Φ_a



Т.к. потоки $\Phi_в$ и Φ_a смещены в пространстве,

ЭДС E_0 и E_a сдвинуты по фазе во времени

Уравнение баланса напряжений $\dot{U} = -\dot{E}_\delta + \dot{I}Z_S \ = -\dot{E}_0 - \dot{E}_a - \dot{E}_\sigma + \dot{I}r_S$

В СД с явновыраженными полюсами проводимость зазора не постоянна, поэтому для анализа магнитной цепи применяют метод двух реакций, раскладывая Φ_a на составляющие Φ_{ad} и Φ_{aq}

Тогда и наводимую ЭДС E_a можно заменить суммой $\dot{E}_a = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}$

Уравнение баланса напряжений $\dot{U} = -\dot{E}_0 - \dot{E}_{ad} - \dot{E}_{aq} - \dot{E}_\sigma + \dot{I}r_S$

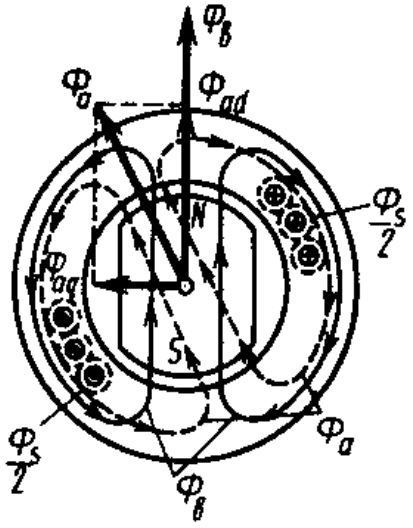
Уравнение напряжений синхронного микродвигателя

Ток статора, создающий поток Φ_a,
также удобно разложить на составляющие

$$I_d = I\sin\psi$$

$$I_q = I\cos\psi$$

где ψ - угол между током I и ЭДС -E_0 (или между I и осью q)



В ненасыщенной машине удобно выразить

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d x_{ad}$$

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q x_{aq}$$

Здесь x_{ad} – синхронное индуктивное сопротивление фазы статора по продольной оси (обусловлено проводимостью зазора для потока Φ_{ad})

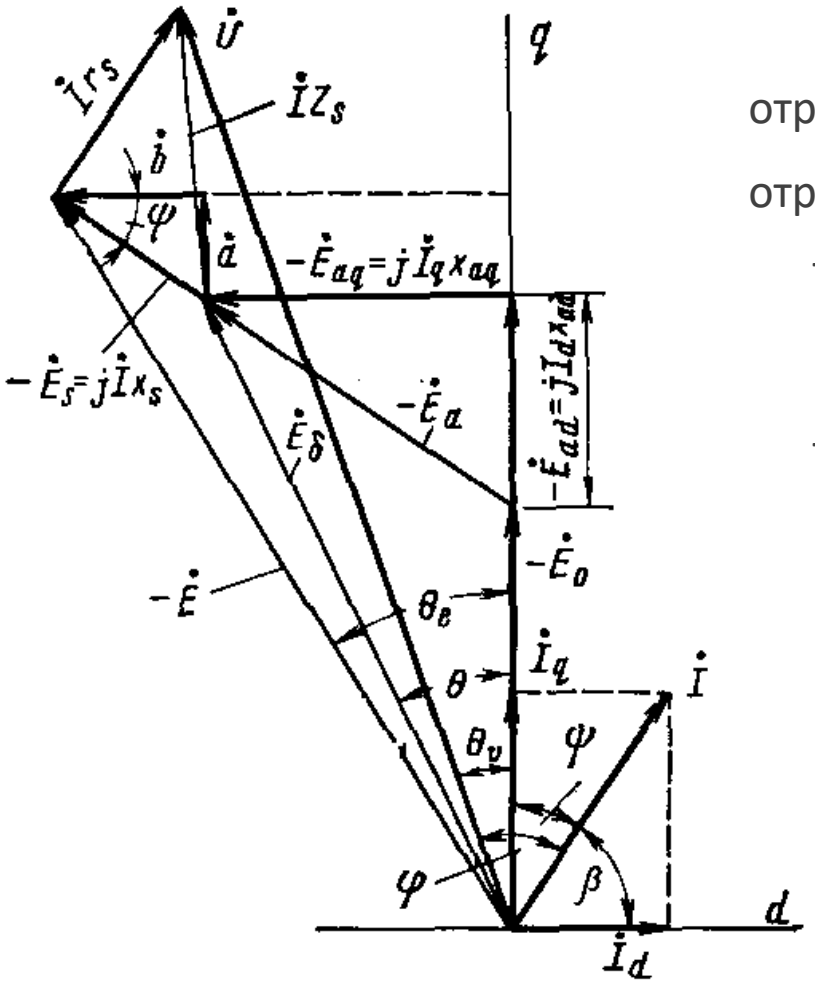
x_{aq} – синхронное индуктивное сопротивление фазы статора по поперечной оси (обусловлено проводимостью зазора для потока Φ_{aq})

Уравнение баланса напряжений $\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_{ad} + j\dot{I}_q x_{aq} + j\dot{I}x_S + \dot{I}r_S$

Векторная диаграмма ненасыщенного синхронного микродвигателя

Уравнение баланса напряжений $\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_{ad} + j\dot{I}_q x_{aq} + j\dot{I}x_S + \dot{I}r_S$

Соответствующая векторная диаграмма



Из векторной диаграммы:

отрезок $|\dot{a}| = I\,x_S \sin\psi = I_d x_S \qquad \dot{a} = j\dot{I}_d x_S$

отрезок $|\dot{b}| = I\,x_S \cos\psi = I_q x_S \qquad \dot{b} = j\dot{I}_q x_S$

Т.е. падение напряжения

$$j\dot{I}\,x_S = \dot{a} + \dot{b} = j\dot{I}_d x_S + j\dot{I}_q x_S$$

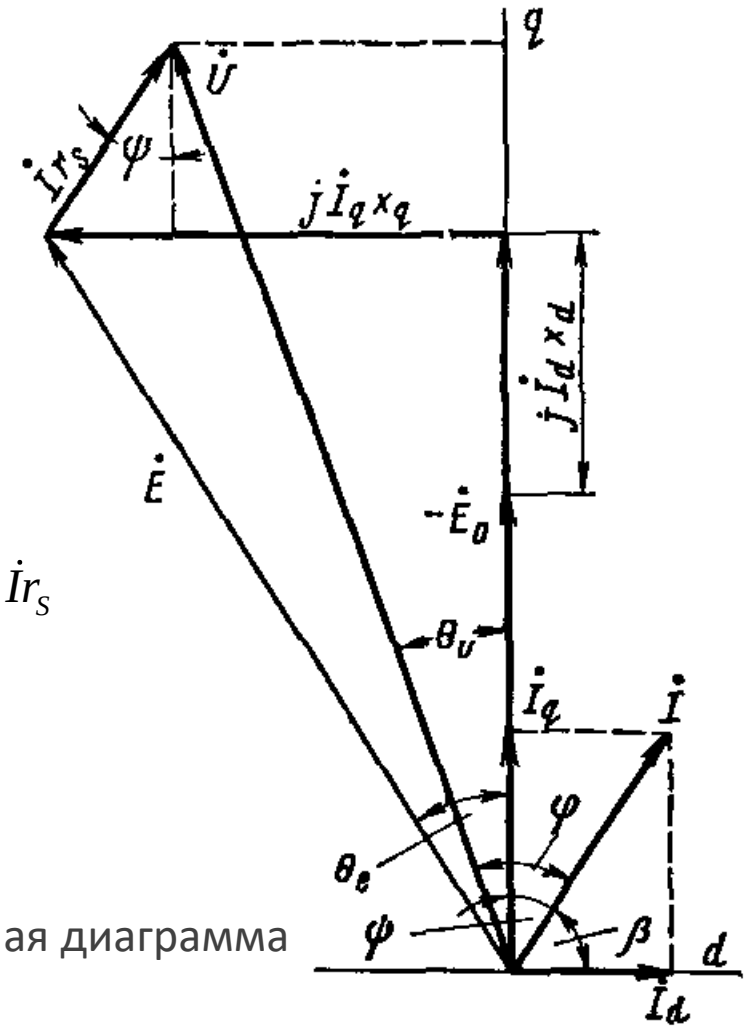
Тогда уравнение баланса напряжений

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_{ad} + j\dot{I}_q x_{aq} + j\dot{I}_d x_S + j\dot{I}_q x_S + \dot{I}r_S$$

или $\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + \dot{I}r_S$

где $x_d = x_{ad} + x_S$

$x_q = x_{aq} + x_S$



Соответствующая векторная диаграмма

Общая теория синхронных микродвигателей

Токи, мощности и электромагнитный момент

Ток статора синхронного микродвигателя

С помощью векторной диаграммы найдем выражения для токов

Запишем проекции вектора U на оси d и q

$$U\cos\theta_U = E_0 + I_d x_d + I r_S \cos\psi$$

$$I_q x_q = U\sin\theta_U + I r_S \sin\psi$$

Перепишем с учетом $I\cos\psi = I_q$ $\quad I\sin\psi = I_d$

$$U\cos\theta_U - E_0 = I_d x_d + I_q r_S$$

$$-U\sin\theta_U = I_d r_S - I_q x_q$$

Выразим составляющие токов

$$I_d = \frac{(U\cos\theta_U - E_0)x_q - U r_s \sin\theta_U}{r_S^2 + x_d x_q} \qquad I_q = \frac{(U\cos\theta_U - E_0)r_S + U x_d \sin\theta_U}{r_S^2 + x_d x_q}$$

Для СД с ПМ введем понятие степени возбужденности ротора $\varepsilon = \dfrac{E_0}{U}$

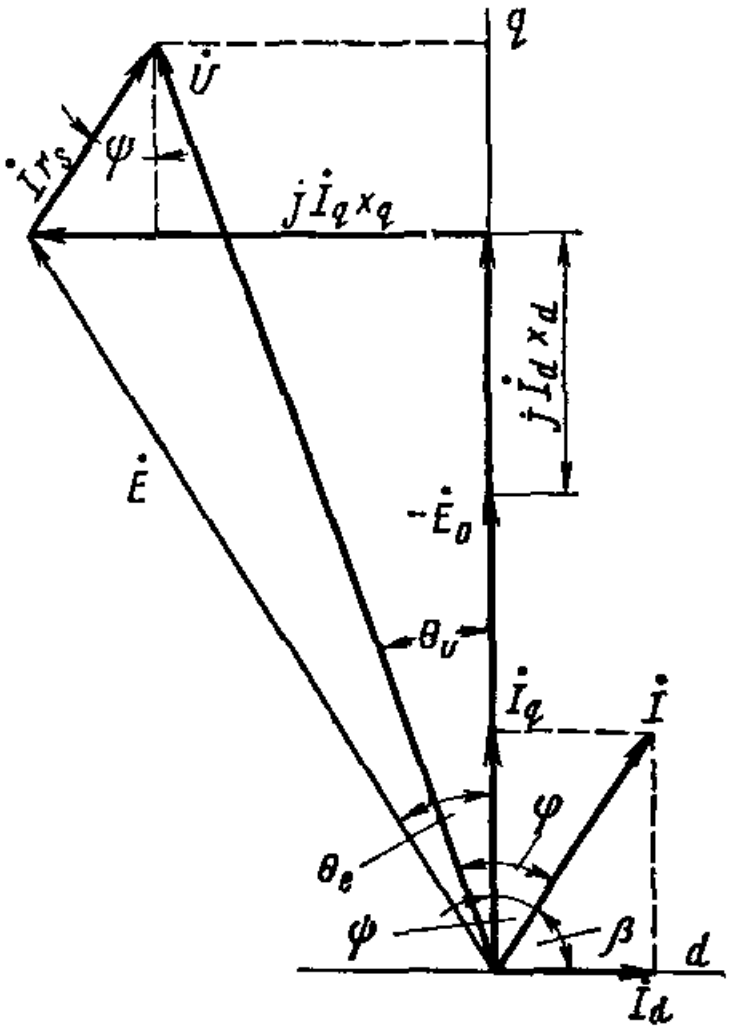
Тогда составляющие токов

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

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

Полный ток статора

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



Мощность и момент синхронного микродвигателя

Мощность, потребляемая двигателем из сети
(через фазные величины) $P_S = mUI\cos\varphi$

С помощью векторной диаграммы выразим угол $\varphi = \theta_U + \psi$

Тогда мощность $P_S = mUI\cos(\theta_U + \psi) = mUI\cos\psi\cos\theta_U - mUI\sin\psi\sin\theta_U$

С учетом $I\cos\psi = I_q$ $\quad I\sin\psi = I_d$

электрическая мощность $P_S = mUI_q\cos\theta_U - mUI_d\sin\theta_U$

Подставив выражения для I_d, I_q получим

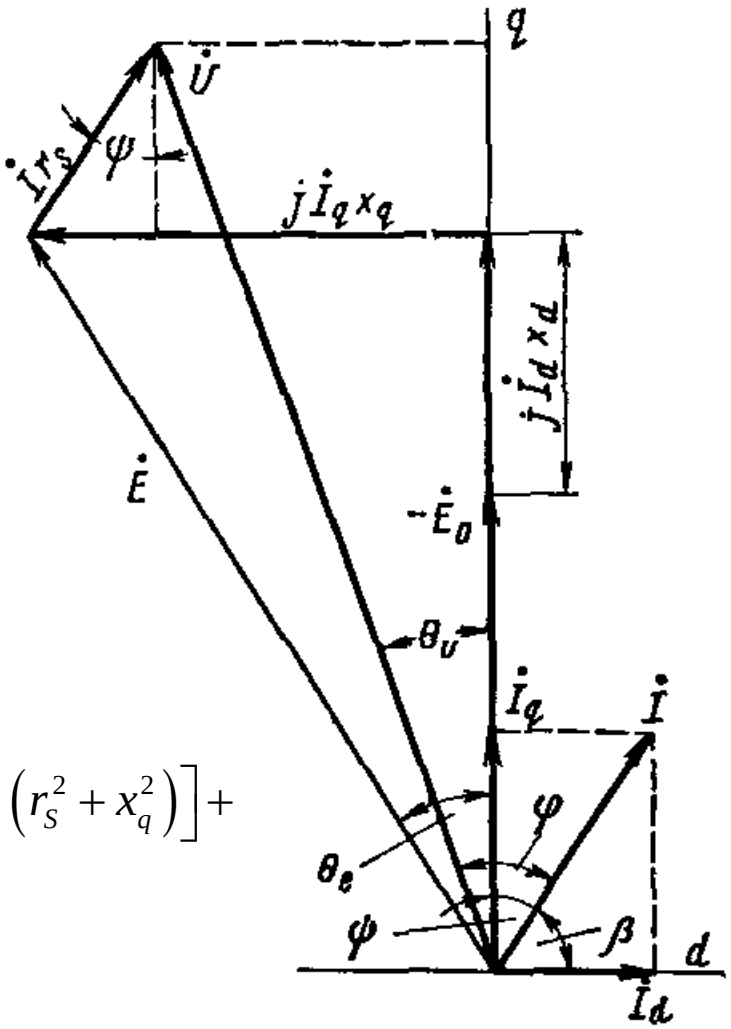
$$P_S = \frac{mU^2}{r_S^2 + x_d x_q}\left[\varepsilon\left(x_q\sin\theta_U - r_S\cos\theta_U\right) + \frac{1}{2}\left(x_d - x_q\right)\sin 2\theta_U + r_S\right]$$

Электромагнитная мощность $P_{ЭМ} = P_S - \Delta P_{эS} = P_S - mI^2 r_S$
(без учета потерь в стали)

Электромагнитный момент СД $M = \dfrac{P_{ЭМ}}{\Omega_c}$

$$M = \frac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c(r_S^2 + x_d x_q)^2}\left[\left(x_d x_q^2 - r_S^2 x_q + 2r_S^2 x_d\right)\sin\theta_U + r_S\left(2x_q^2 + r_S^2 - x_d x_q\right)\cos\theta_U - \varepsilon r_S\left(r_S^2 + x_q^2\right)\right] +$$

$$+\frac{mU^2}{2\Omega_c}\cdot\frac{x_d - x_q}{(r_S^2 + x_d x_q)^2}\left[\left(x_d x_q - r_S^2\right)\sin 2\theta_U + r_S\left(x_d + x_q\right)\cos 2\theta_U - r_S\left(x_d - x_q\right)\right]$$



Электромагнитный момент синхронного микродвигателя

Момент синхронного микродвигателя

$$M = \frac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c (r_S^2 + x_d x_q)^2}\left[\left(x_d x_q^2 - r_S^2 x_q + 2r_S^2 x_d\right)\sin\theta_U + r_S\left(2x_q^2 + r_S^2 - x_d x_q\right)\cos\theta_U - \varepsilon r_S\left(r_S^2 + x_q^2\right)\right] +$$

$$+\frac{mU^2}{2\Omega_c}\cdot\frac{x_d - x_q}{(r_S^2 + x_d x_q)^2}\left[\left(x_d x_q - r_S^2\right)\sin 2\theta_U + r_S\left(x_d + x_q\right)\cos 2\theta_U - r_S\left(x_d - x_q\right)\right]$$

Вывод формулы проведен аналогично классической теории ЭМ
Но здесь нельзя пренебрегать активным сопротивлением обмотки r_s

Для ЭМ средней и большой мощности, полагая $r_S = 0$, получим $$M = \frac{mE_0 U}{\Omega_c x_d}\sin\theta + \frac{mU^2}{2\Omega_c}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta$$

Однако структура момента сохраняется: $M = M_\varepsilon + M_{dq}$

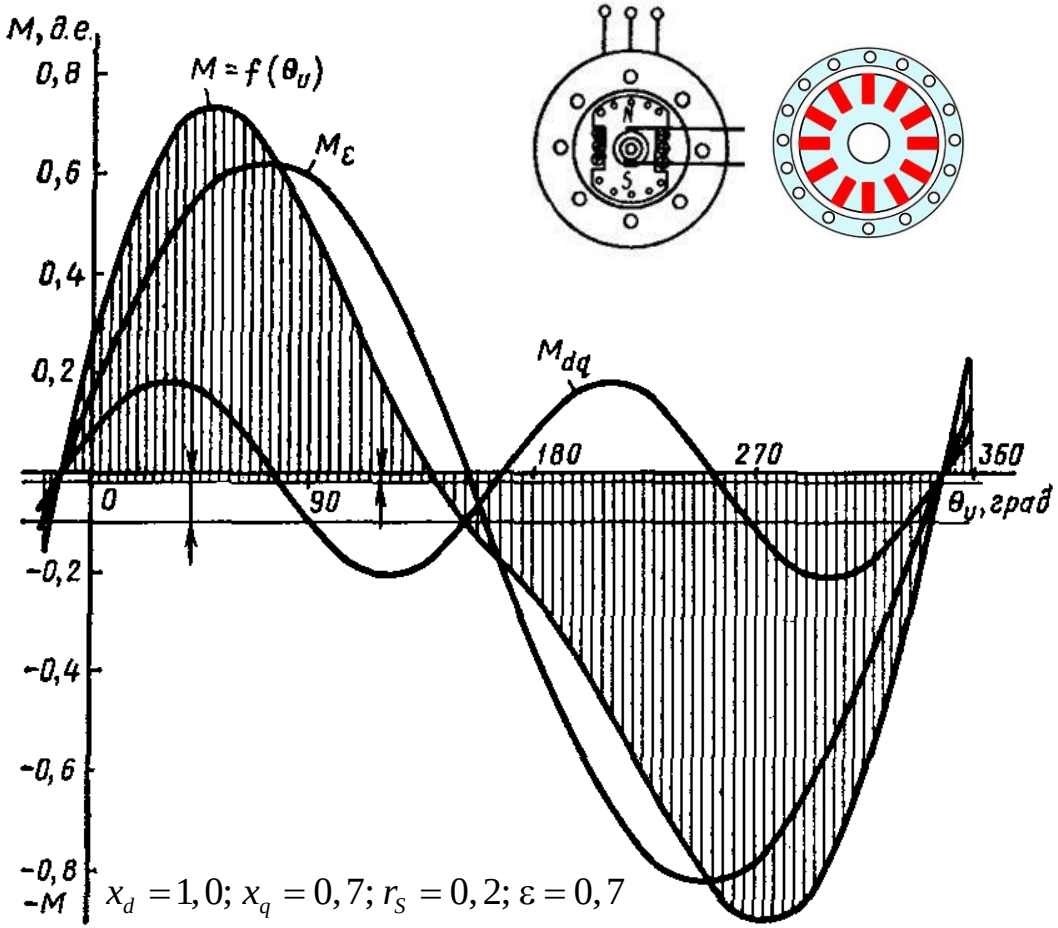
- M_ε – основной электромагнитный момент (зависит от степени возбужденности ротора ε)
- M_{dq} – реактивный момент / момент явнополюсности (зависит от соотношения x_d и x_q)

В СД с неявновыраженными полюсами (или с поверхностными ПМ) $x_d = x_q$ и реактивный момент $M_{dq} = 0$

Угловая характеристика синхронного микродвигателя

В СД с электромагнитным возбуждением
(или в СД с тангенциальными ПМ)
обычно $x_d > x_q$
и реактивный момент при малых нагрузках
(малых углах θ_U) положителен $M_{dq} > 0$

$$M = \frac{mE_0U}{\Omega_c x_d}\sin\theta + \frac{mU^2}{2\Omega_c}\frac{x_d - x_q}{x_d x_q}\sin 2\theta$$

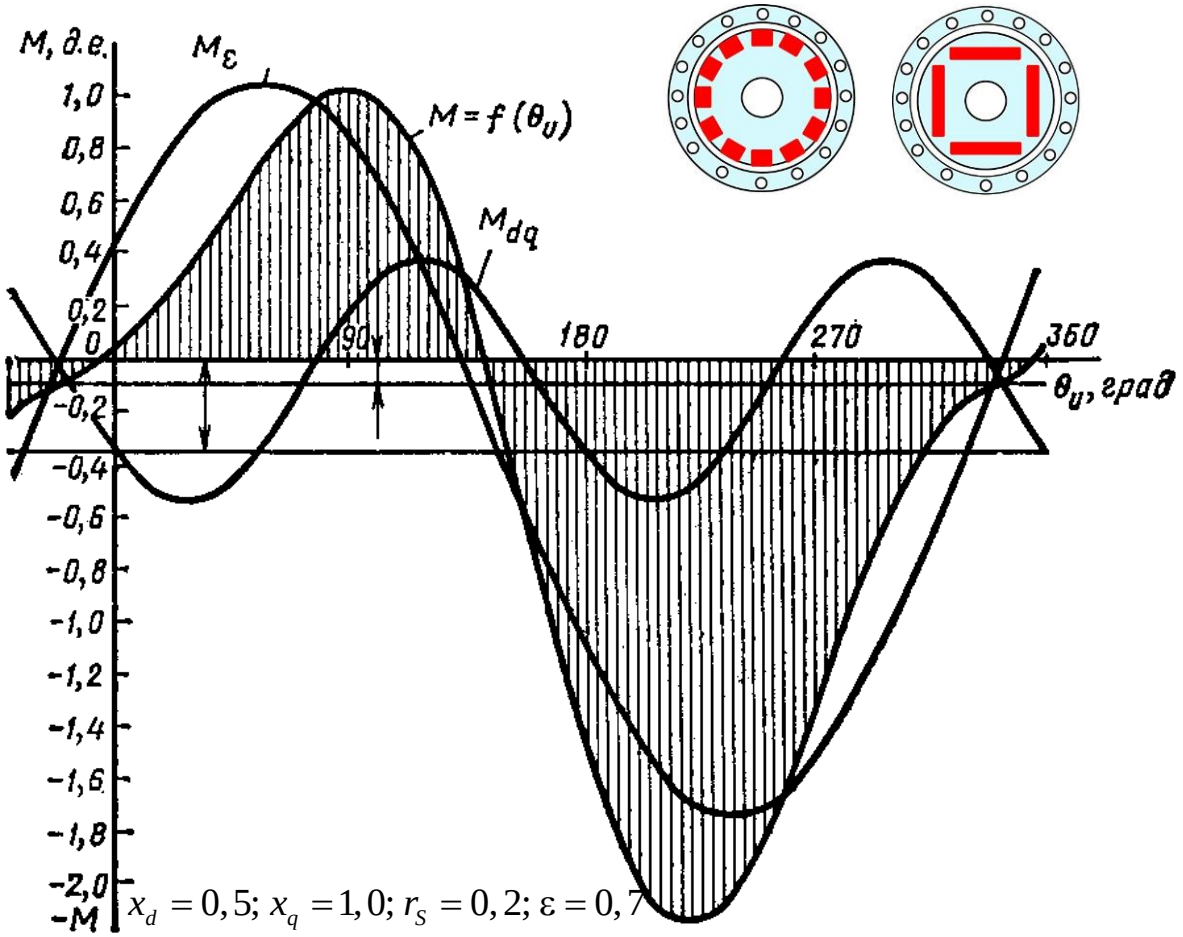


Угловая характеристика синхронного микродвигателя

В СД с внутренними ПМ из-за из малого μ_r оказывается $x_d < x_q$

и реактивный момент при малых нагрузках (малых углах θ_U) отрицателен $M_{dq} < 0$

$$M = \frac{mE_0U}{\Omega_c x_d}\sin\theta + \frac{mU^2}{2\Omega_c}\frac{x_d - x_q}{x_d x_q}\sin 2\theta$$



Составляющие момента

Электромагнитный момент (момент от поля возбуждения)

$$M_\varepsilon = \frac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c(r_S^2 + x_d x_q)^2}\left[\left(x_d x_q^2 - r_S^2 x_q + 2r_S^2 x_d\right)\sin\theta_U + r_S\left(2x_q^2 + r_S^2 - x_d x_q\right)\cos\theta_U - \varepsilon r_S\left(r_S^2 + x_q^2\right)\right]$$

Перепишем формулу электромагнитного момента в виде $M_\varepsilon = A\sin\theta_U + B\cos\theta_U + C = A_\varepsilon \sin(\theta_U + \alpha_\varepsilon) - M_{\varepsilon т}$

A_ε – амплитуда синусоиды $A_\varepsilon = \dfrac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c\left(r_S^2 + x_d x_q\right)^2}\sqrt{\left(x_d x_q^2 - r_S^2 x_q + 2r_S^2 x_d\right)^2 + r_S^2\left(2x_q^2 + r_S^2 - x_d x_q\right)^2}$

α_ε – фазовый сдвиг, определяемый как $\operatorname{tg}\alpha_\varepsilon = \dfrac{r_S\left(2x_q^2 + r_S^2 - x_d x_q\right)}{x_d x_q^2 - r_S^2 x_q + 2r_S^2 x_d}$

Последнее слагаемое не зависит от угла нагрузки и всегда отрицательно $\rightarrow$ тормозной момент $M_{\varepsilon т}$

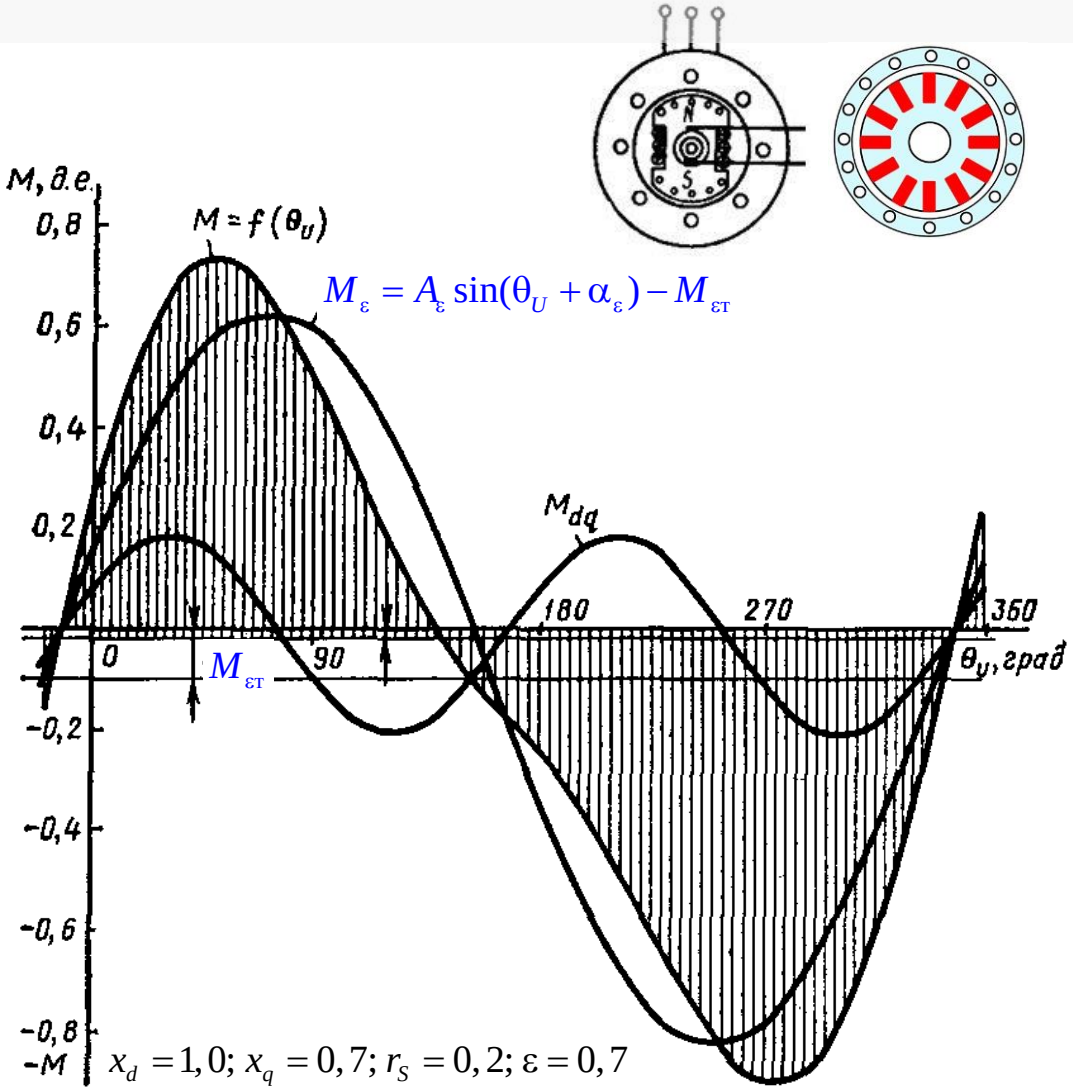
$$M_{\varepsilon т} = -\frac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c(r_S^2 + x_d x_q)^2}\varepsilon r_S\left(r_S^2 + x_q^2\right) = \frac{mE_0^2 r_S}{\Omega_c}\frac{r_S^2 + x_q^2}{\left(r_S^2 + x_d x_q\right)^2}$$

- $M_{\varepsilon т}$ зависит от возбуждения полюсов (E_0) и r_S, но не зависит от U
- причина возникновения $M_{\varepsilon т}$ – потери в обмотке статора от токов, наводимых полем возбуждения (генераторный момент)

Электромагнитный момент изменяется по закону **sin** от угла θ_U
Но за счет r_S синусоида смещается влево на угол α_ε и вниз на $M_{\varepsilon т}$

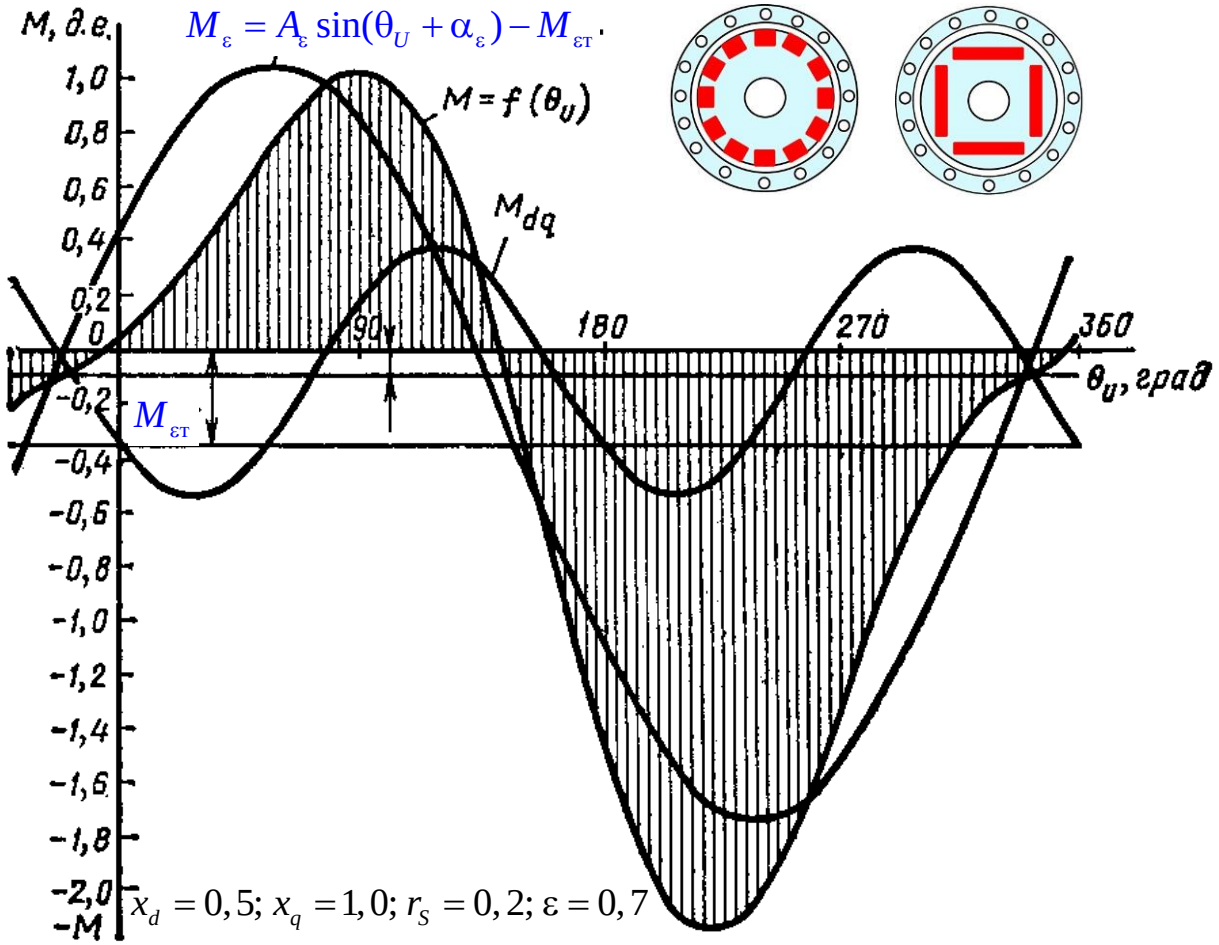
Составляющие момента

Вращающий момент при $x_d > x_q$



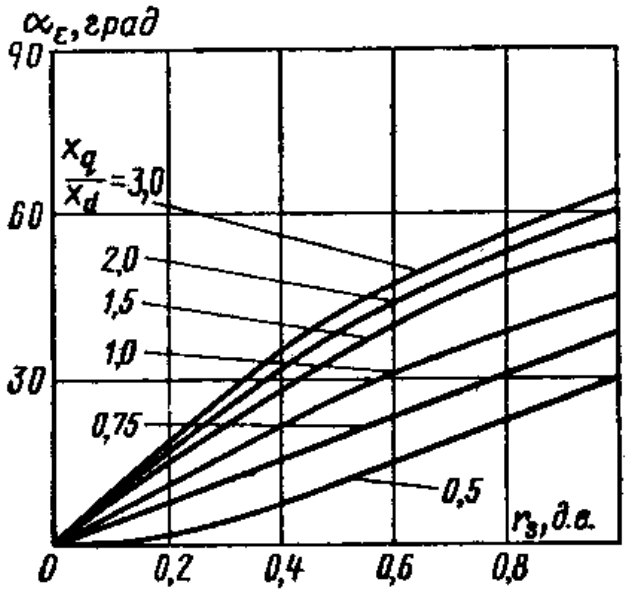
Составляющие момента

Вращающий момент при $x_d < x_q$

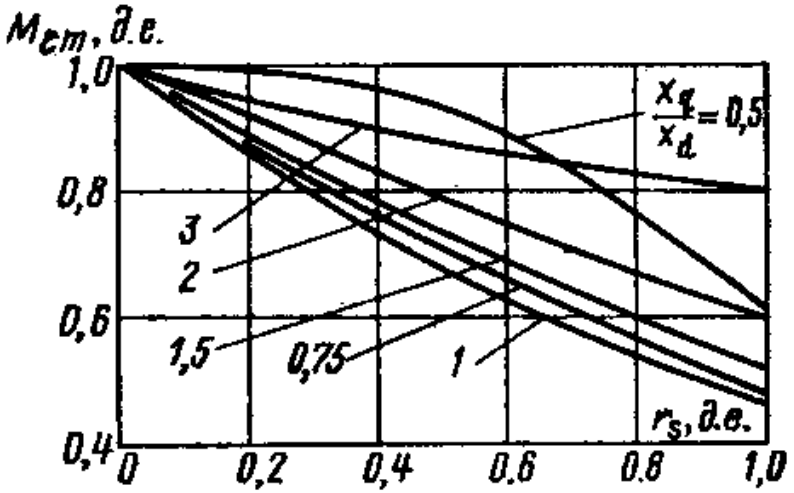


Составляющие момента

Угол смещения синусоиды α_ε
в зависимости от r_S
для разных СД



Величина максимального
электромагнитного момента $M_{\varepsilon m}$
в зависимости от r_S
для разных СД



Составляющие момента

Реактивный момент (момент явнополюсности)

$$M_{dq} = \frac{mU^2}{2\Omega_c} \cdot \frac{x_d - x_q}{(r_S^2 + x_d x_q)^2} \left[\left(x_d x_q - r_S^2 \right) \sin 2\theta_U + r_S \left(x_d + x_q \right) \cos 2\theta_U - r_S \left(x_d - x_q \right) \right]$$

Аналогично электромагнитному моменту представим в виде $M_{dq} = A \sin 2\theta_U + B \cos 2\theta_U + C = A_{dq} \sin 2(\theta_U + \alpha_{dq}) - M_{dq\text{т}}$

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

α_{dq} – фазовый сдвиг, определяемый как $$\operatorname{tg} 2\alpha_{dq} = \frac{r_S \left(x_d + x_q \right)}{x_d x_q - r_S^2}$$

Тормозной реактивный момент $M_{\varepsilon\text{т}}$

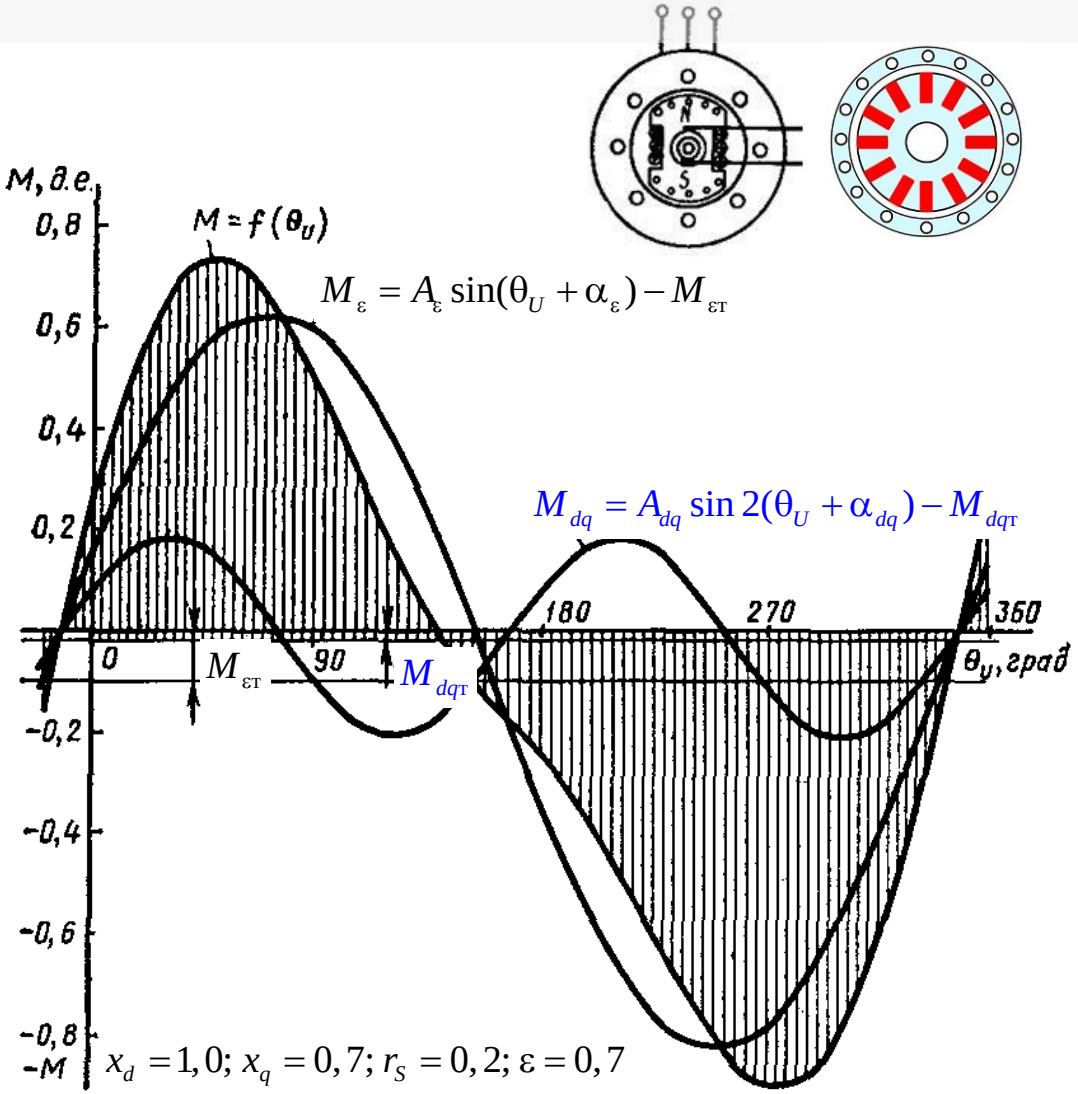
$$M_{dq\text{т}} = -\frac{mU^2}{2\Omega_c} \cdot \frac{x_d - x_q}{(r_S^2 + x_d x_q)^2} r_S \left(x_d - x_q \right) = \frac{mU^2 r_S}{2\Omega_c} \cdot \frac{\left(x_d - x_q \right)^2}{\left(r_S^2 + x_d x_q \right)^2}$$

» $M_{dq\text{т}}$ становится заметен лишь у СД с большим r_S

Реактивный момент изменяется по закону **sin** от двойного угла θ_U
Но за счет r_S синусоида смещается влево на угол α_{dq} и вниз на $M_{dq\text{т}}$

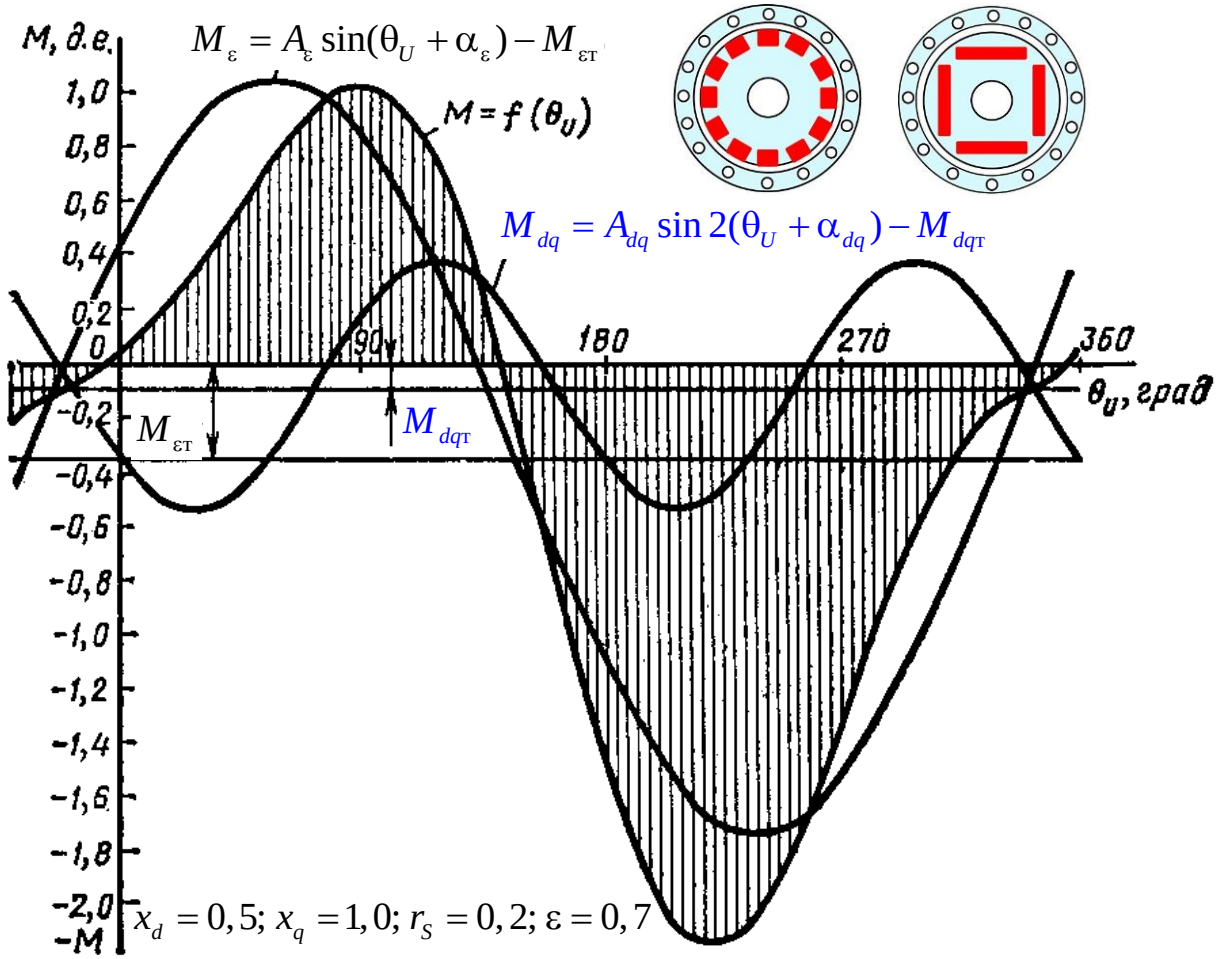
Составляющие момента

Вращающий момент при $x_d > x_q$



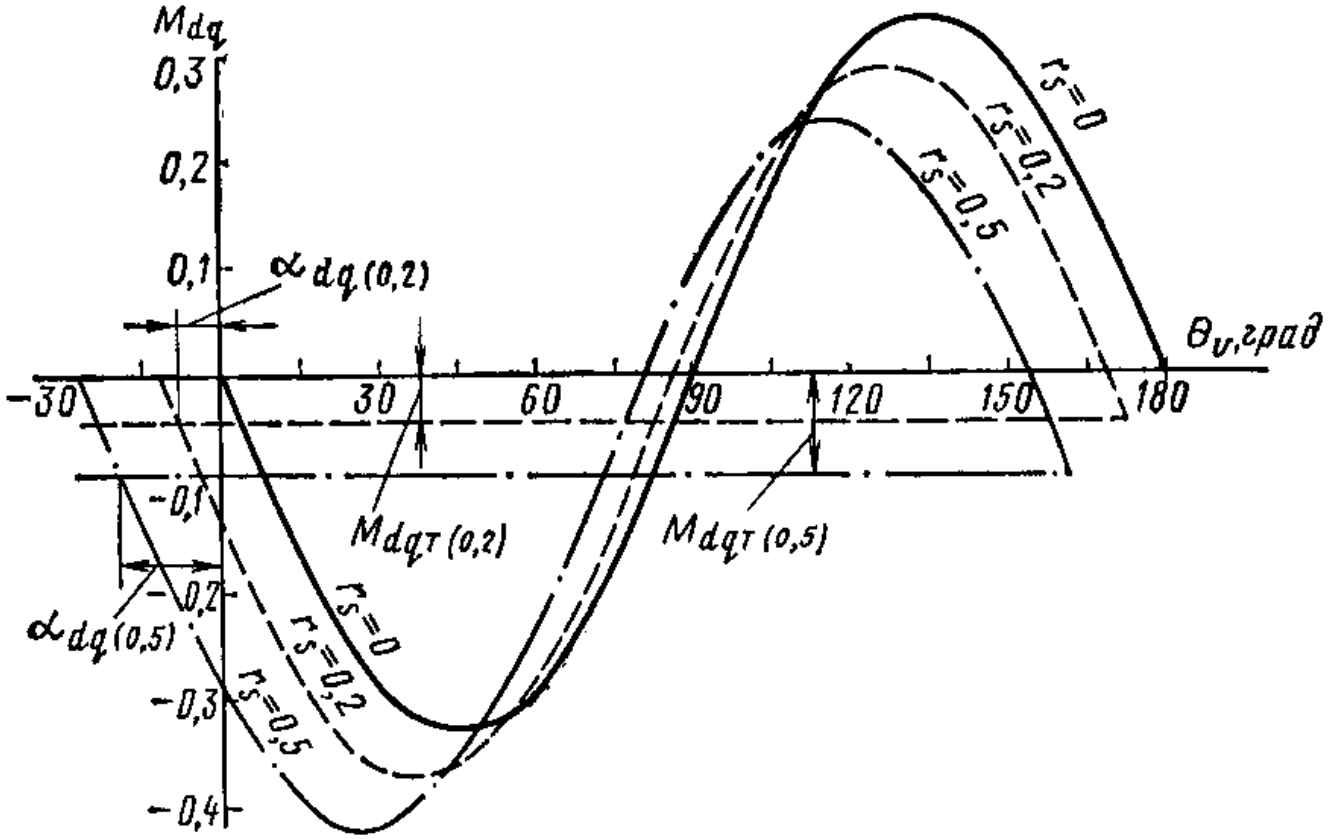
Составляющие момента

Вращающий момент при $x_d < x_q$



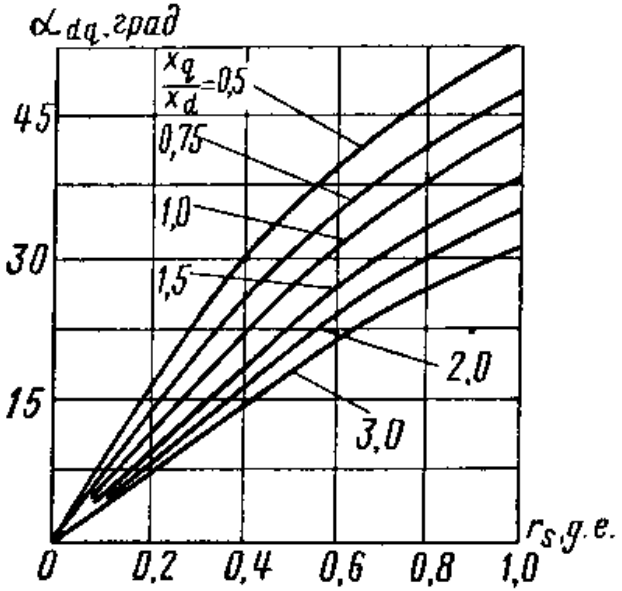
Составляющие момента

Кривые реактивного момента M_{dq} при различных r_S для СД с $x_d < x_q$

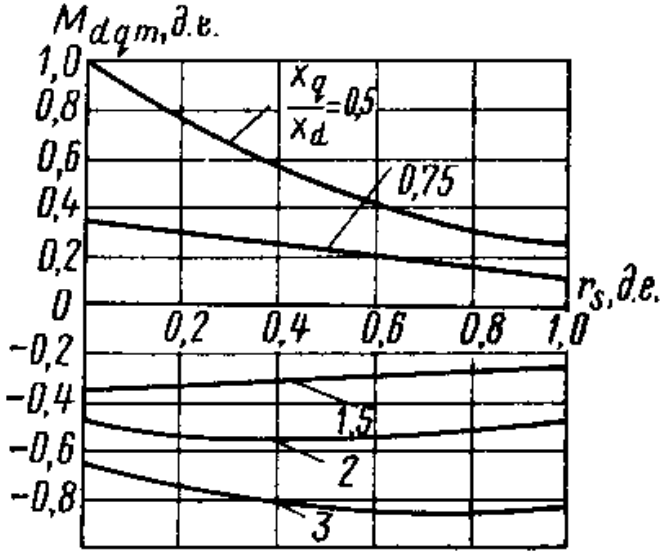


Составляющие момента

Угол смещения синусоиды α_{dq}
в зависимости от r_S
для разных СД



Величина максимального
реактивного момента M_{dqm} в
зависимости от $\underline{r_S}$
для разных СД



Результирующий момент

Итого, суммарный (результирующий) вращающий момент синхронного микродвигателя с возбужденными явновыраженными полюсами

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

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

$$\operatorname{tg}\alpha_{\varepsilon} = \frac{r_S\left(2x_q^2 + r_S^2 - x_d x_q\right)}{x_d x_q^2 - r_S^2 x_q + 2r_S^2 x_d}$$

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

$$\operatorname{tg}2\alpha_{dq} = \frac{r_S\left(x_d + x_q\right)}{x_d x_q - r_S^2}$$

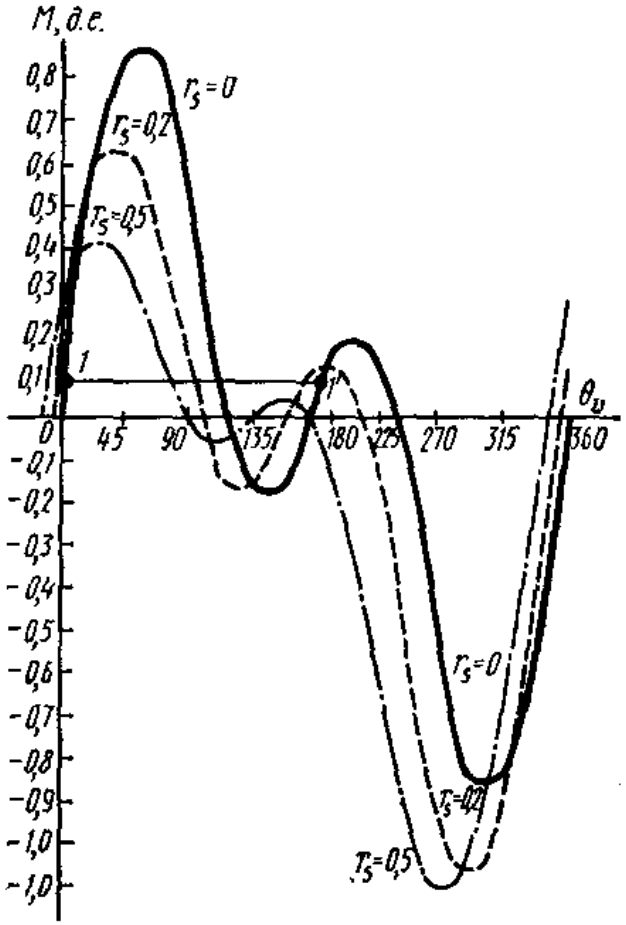
$$M_{\text{т}} = \frac{mU^2 r_S}{\Omega_{\text{с}}\left(r_S^2 + x_d x_q\right)^2}\left[\varepsilon^2\left(r_S^2 + x_q^2\right) + \frac{\left(x_d - x_q\right)^2}{2}\right]$$

При увеличении r_S синусоиды смещаются влево (на α_{ε} и α_{dq}) и вниз (на $M_{\varepsilon\text{т}}$ и $M_{dq\text{т}}$)

Результирующий момент

Если при слабой намагниченности
амплитуда электромагнитного момента M_ε
соизмерима с амплитудой реактивного момента M_{dq},
в результирующей кривой появляются
две зоны устойчивой работы:
рабочие точки 1 и $1'$ при разных углах нагрузки θ_U
$\rightarrow$ проблемы с синфазным вращением нескольких СД

$$M = A_\varepsilon \sin\left(\theta_U + \alpha_\varepsilon\right) + A_{dq} \sin 2\left(\theta_U + \alpha_{dq}\right) - M_т$$

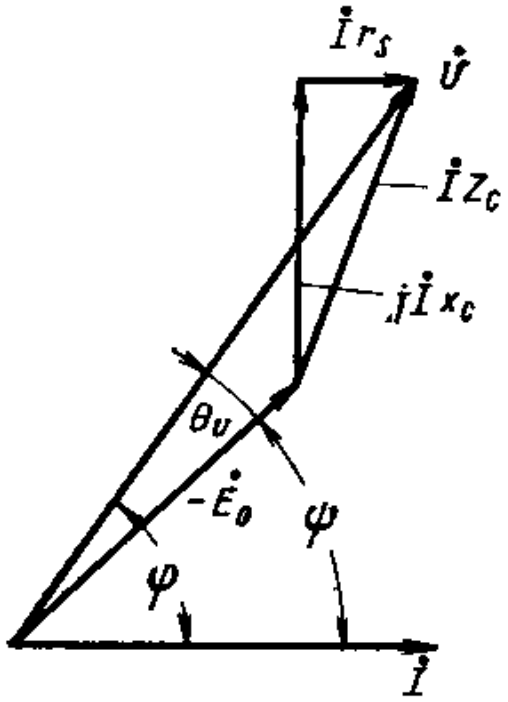


СД с неявновыраженными полюсами

В СД с неявновыраженными полюсами $x_d = x_q = x_c$

Уравнение баланса напряжений $\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}x_c + \dot{I}r_S = -\dot{E}_0 + \dot{I}Z_c$

где $Z_c = r_S + jx_c$ – полное синхронное сопротивление СД



Воспользуемся готовыми выражениями, подставив в них $x_d = x_q = x_c$

Полный ток статора $I = \dfrac{U}{Z_c}\sqrt{1 - 2\varepsilon\cos\theta_U + \varepsilon^2}$

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

Электромагнитная мощность $P_{ЭМ} = \dfrac{mU^2\varepsilon}{r_S^2 + x_c^2}\left[\left(x_c\sin\theta_U + r_S\cos\theta_U\right) - \varepsilon r_S\right]$

или после преобразований $P_{ЭМ} = \dfrac{mU^2\varepsilon}{Z_c}\left[\sin\left(\theta_U + \alpha\right) - \dfrac{\varepsilon r_S}{Z_c}\right]$ где фазовый сдвиг α определяется как $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{r_S}{x_c}$

Вращающий момент $M_c = \dfrac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c Z_c}\left[\sin\left(\theta_U + \alpha\right) - \dfrac{\varepsilon r_S}{Z_c}\right] = M_c' - M_{ст}$

Угловая характеристика – синусоида, смещенная влево на α и вниз на $M_{ст}$

СД с неявновыраженными полюсами

По формуле вращающего момента $M_{\text{c}} = \dfrac{mU^2\varepsilon}{\Omega_{\text{c}} Z_{\text{c}}}\left[\sin\left(\theta_U + \alpha\right) - \dfrac{\varepsilon r_S}{Z_{\text{c}}}\right]$

найдем максимальный момент $M_{\text{c}m} = \dfrac{mU^2\varepsilon}{\Omega_{\text{c}} Z_{\text{c}}}\left[1 - \dfrac{\varepsilon r_S}{Z_{\text{c}}}\right]$ – при угле $\theta_U + \alpha = 90°$ или $\operatorname{tg}\theta_{Um} = \operatorname{tg}(90° - \alpha) = \operatorname{ctg}\alpha = \dfrac{x_{\text{c}}}{r_S}$

Производную максимального момента по ε приравняем нулю
и найдем степень возбужденности ротора,
обеспечивающую максимально возможный максимальный момент

$$\varepsilon_{M_{\text{c}m}} = \frac{Z_{\text{c}}}{2r_S} \qquad M_{\text{c}\max} = \frac{mU^2}{4\Omega_{\text{c}} r_S}$$

Максимальный момент (и максимальная $P_{\text{ЭМ}}$) оптимально возбужденного СД не зависит от x_{c}
(x_{c} влияет на угол нагрузки θ_U, при котором достигается максимум момента)

На практике степень возбужденности ε выбирают так, чтобы

- получить наибольшее значение максимального момента
- получить максимальный КПД
- получить требуемый $\cos\varphi$
- получить хорошие пусковые свойства

(требуется оптимизация)

Свойства постоянных магнитов

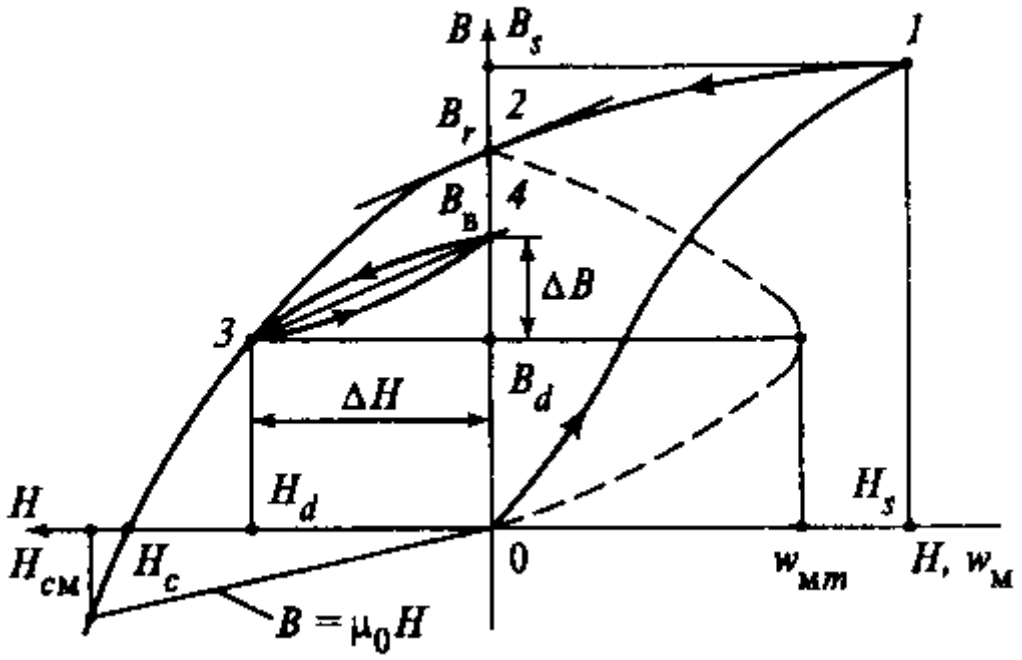
Для синхронных микродвигателей

Свойства постоянных магнитов

ПМ – предварительно намагниченное ферромагнитное тело, сохраняющее остаточную намагниченность и служащее источником постоянного магнитного поля

Материал ПМ – магнитотвердый сплав с малым $\mu_{пм} = (1\ldots25)\mu_0$, широкой петлей гистерезиса и большим эл. сопротивлением $\rho_{пм} = (0{,}5\ldots1{,}8)\cdot10^{-6}$ Ом·м ($\rho_{Cu}=0{,}02\cdot10^{-6}$ Ом·м)

Основная характеристика магнитного материала – петля гистерезиса $B(H)$



Намагничивание ПМ – внешним магнитным полем (пост. или переменный ток – импульсное намагничивание) до выхода на предельную петлю гистерезиса – т.1

B_S – индукция насыщения

B_r – остаточная индукция (после снятия намагничивания, в т.2 при $H = 0$)

H_c – коэрцитивная сила (по индукции) – напряженность внешнего размагничивающего поля, обеспечивающая $B = 0$ в ПМ

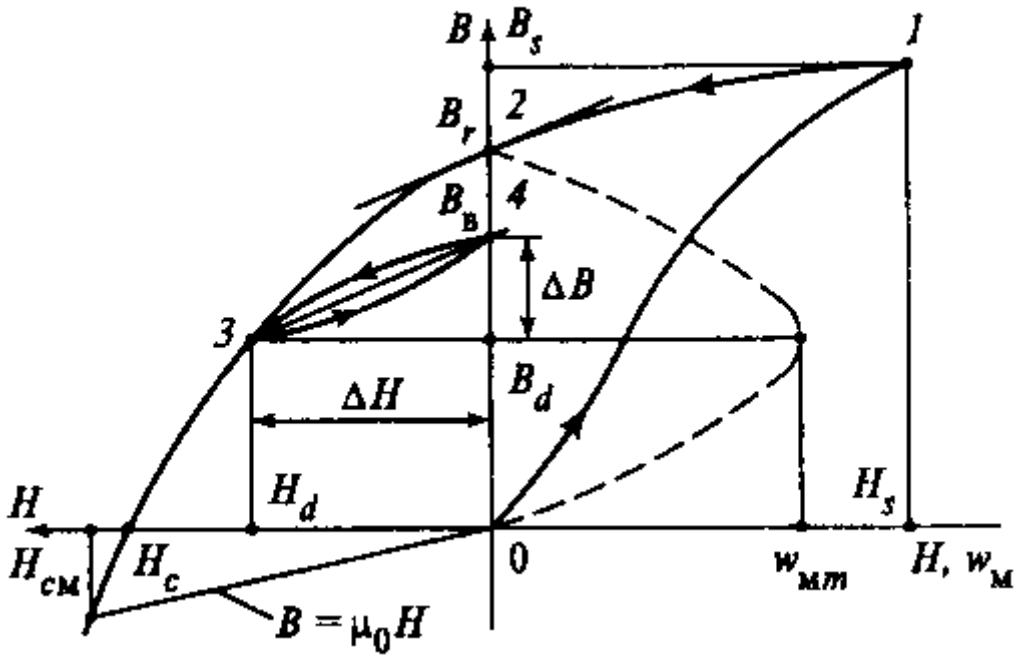
$H_{см}$ – коэрцитивная сила (по намагниченности) – напряженность внешнего размагничивающего поля, обеспечивающая полное размагничивание ПМ

Свойства постоянных магнитов

$\mu_{пм}$ – магнитная проницаемость ПМ (разная при разных H) $\mu_{пм} = \dfrac{dB}{dH}$

$w_{пм}$ – удельная магнитная энергия ПМ $w_{пм} = \dfrac{BH}{2}$

Максимальная удельная магнитная энергия в точке 3 $w_{пм\,max} = \dfrac{B_d H_d}{2} = \dfrac{(BH)_{max}}{2}$



После снятия намагничивания → ПМ находится в т.2

При приложении размагничивающей МДС
(внешняя F или U_μ в немагнитном зазоре)
→ ПМ переходит в т.3

После снятия внешней МДС
→ ПМ возвращается по частичной петле гистерезиса в т.4
(обычно упрощают до прямой 3-4): $B_4 < B_r$

Если в процессе работы внешнее поле не превышает H_3
→ ПМ перемагничивается по прямой 3-4 – «линия возврата»)

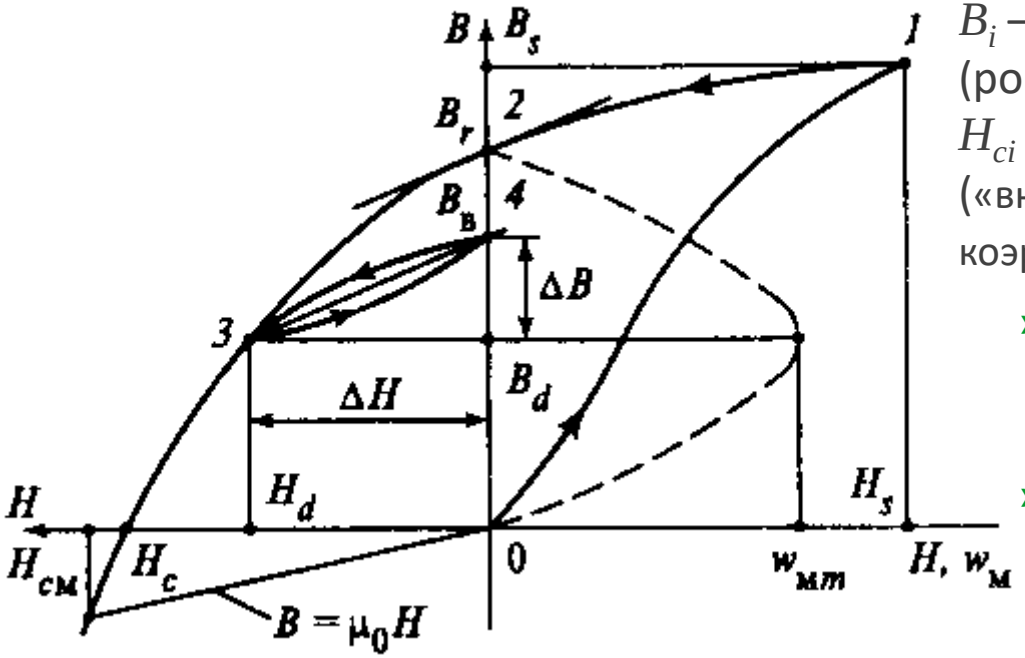
При более сильном размагничивании (реакция якоря при КЗ)
→ переход на другую линию возврата
вплоть до полного размагничивания при H_c

Свойства постоянных магнитов

После первоначального намагничивания – «стабилизация» ПМ
$\rightarrow$ размагничивание до H_d, которая гарантированно больше H при работе ЭМ
(желательно в т.3, где максимальная $w_{\text{пм}}$)

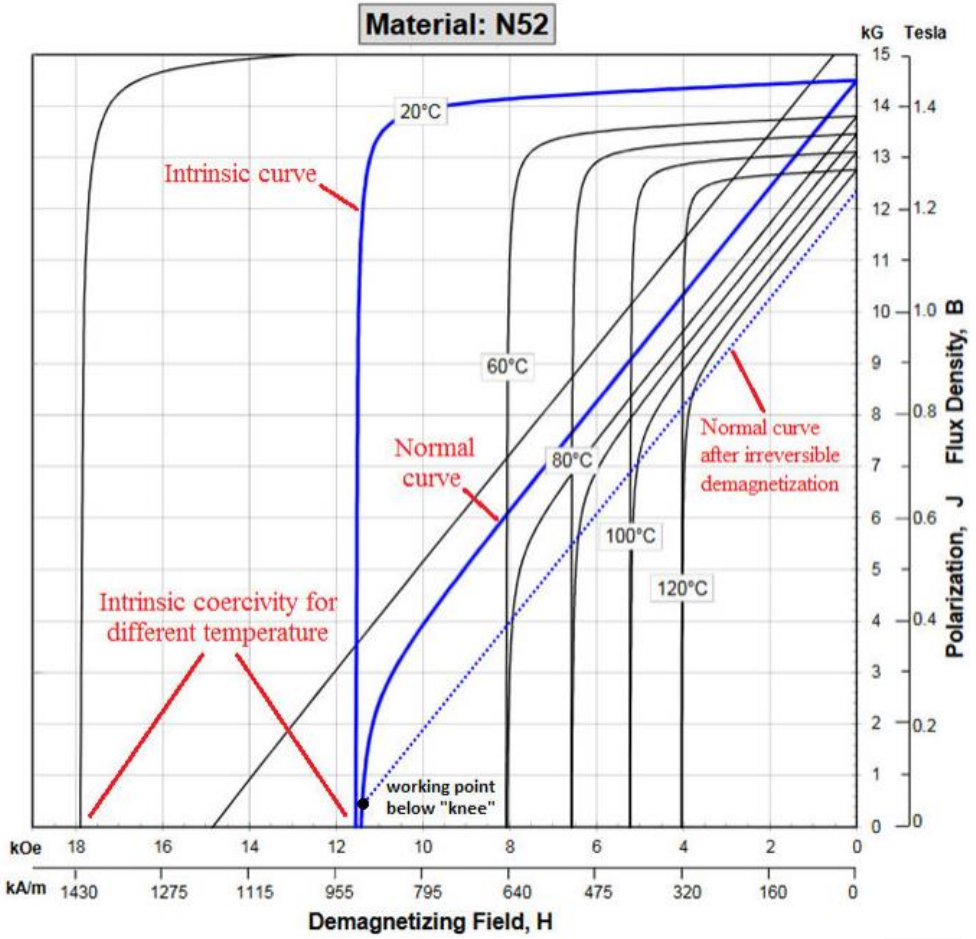
В англоязычной литературе используют другое представление

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad \rightarrow \quad B = \mu_0 H + B_i$$



B_i – intrinsic flux density (polarization J)
H_{ci} – intrinsic coercivity («внутренняя» индукция / коэрцитивность)

- видна область безвозвратного размагничивания
- Обычно показана температурная зависимость



Работа постоянных магнитов в электрической машине

Рассмотрим тороид из магнитотвердого материала, намагниченный до состояния насыщения

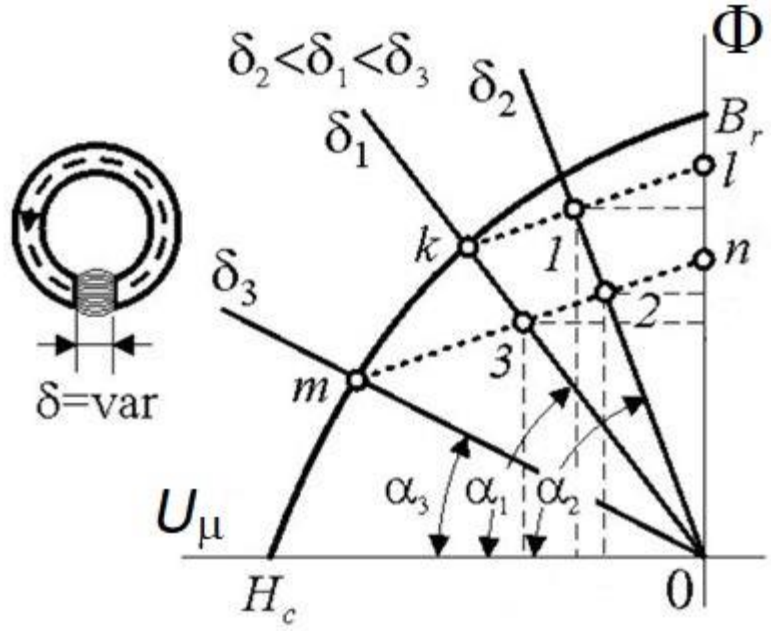
При снятии внешнего намагничивания индукция в материале равна B_r

По закону полного тока $\oint Hdl = H_м l = 0$ Т.е. U_μ и напряженность поля в магните $H_м = 0$ (а индукция $B = B_r$)

(при этом удельная энергия магнита $BH/2 = 0$, внешнее поле не создается)

Если создать зазор δ, в нем возникнет магнитное поле с напряженностью H_δ

По закону полного тока $\oint Hdl = H_\delta \delta + H_м l = 0$ или $U_{\mu\delta} + U_{\mu м} = 0$



Т.е. U_μ в магните $U_{\mu м} = -U_{\mu\delta} \neq 0$ и напряженность $H_м = -H_\delta \delta / l$

Что соответствует рабочей точке k на кривой размагничивания

При этом индукция $B_k < B_r$ (происходит размагничивание)

(если затем зазор δ уменьшить до нуля, напряженность станет $H_м = 0$, но рабочая точка переместится по прямой возврата в точку l)

Точка k – пересечение кривой размагничивания с характеристикой воздушного зазора – прямой линией под углом α

где $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{\Phi_\delta}{U_{\mu\delta}} = \dfrac{B_\delta S_\delta}{H_\delta \delta} = \mu_0 \dfrac{S_\delta}{\delta} = \Lambda_\delta$

Действительно, по закону Ома: $\Phi_\delta = \Lambda_\delta U_{\mu\delta}$

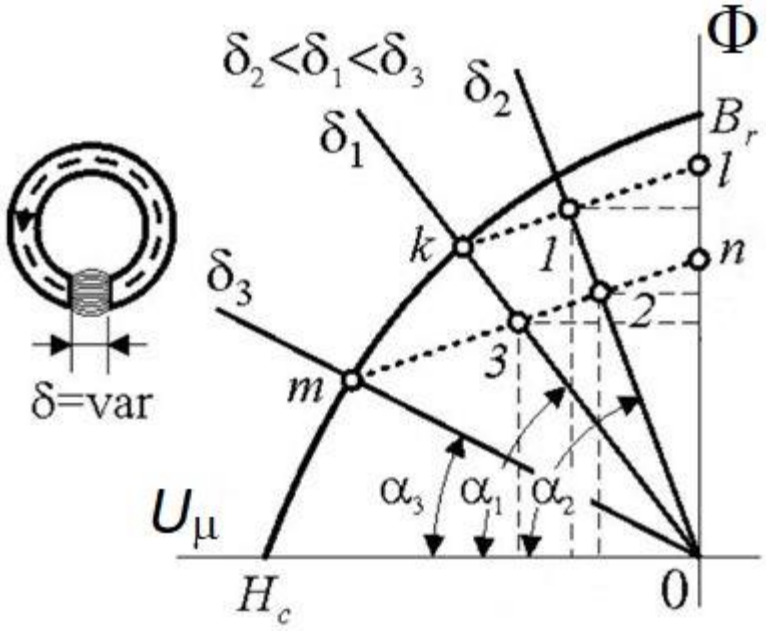
Чем больше δ, тем меньше проводимость зазора Λ_δ,

тем меньше угол наклона кривой α, тем сильнее размагничивание ПМ

Работа постоянных магнитов в электрической машине

При этом важна последовательность размагничивания магнита

- Если вначале создан зазор δ_1, то рабочая точка по кривой размагничивания – в т. k
- Если затем уменьшить зазор до δ_2, то рабочая точка по прямой возврата kl – в т. 1
- Если затем увеличить зазор до δ_3, то рабочая точка по кривой размагничивания – в т. m
- Если опять уменьшить зазор до δ_1, то рабочая точка по прямой возврата mn – в т. 3
- Если далее уменьшить зазор до δ_2, то рабочая точка по прямой возврата mn – в т. 2



Магнитная проводимость зазора в тороиде моделирует полную магнитную проводимость всей магнитной цепи ЭМ (в основном в зазоре)

Работа постоянных магнитов в электрической машине

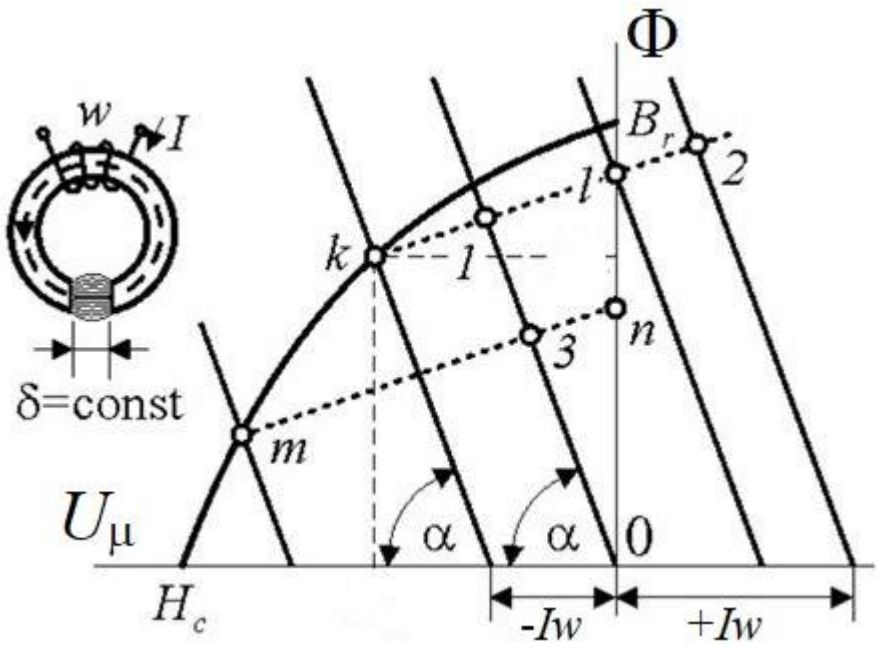
Теперь добавим обмотку с числом витков w и током I (модель МДС реакции якоря)

МДС обмотки Iw создает магнитное поле согласно или встречно с полем магнита

По закону полного тока теперь $H_\delta \delta + H_м l = Iw$

К U_μ поля в магните $U_{\mu м} = H_\delta \delta$ теперь добавляется МДС внешнего намагничивания $F_w = Iw$ (+ или -) смещая характеристику намагничивания воздушного зазора параллельно на величину F_w

- Если увеличивать ток, намагничивая тороид, индукция растет по прямой возврата kl
- При МДС $F_w = Iw = H_\delta \delta$ рабочая точка из т. 1 придет в т. l (можно дойти до B_r и B_S)
- Обычно в ЭМ МДС якоря размагничивающая и $-F_w$ смещает характеристику влево
- Размагничивание происходит по прямой возврата kl до т. k
- При дальнейшем размагничивании рабочая точка смещается по кривой размагничивания (например, до т. m)
- После такого размагничивания рабочей становится прямая возврата mn (по ней и надо в дальнейшем рассчитывать магнитную цепь ЭМ с ПМ)



Магнитные материалы

1940-е – 1960-е

Литые сплавы на основе *Fe-Ni-Al* (+Cu, Co, Ti, Nb) – ЮНДК / *AlNiCo*

Давно выпускаются, есть множество вариантов

- B_r – 0,5…1,4 Тл
- H_c – 40…150 кА/м
- $\mu_{пм}$ – 2…5 μ_0
- $w_{пм}$ – 4…40 кДж/м^3

- стабильность магнитных параметров (температурный коэф-т -0,02 %/°C)
- рабочая температура до 520°C (t° Кюри до 900°C)
- устойчивость против структурного старения
- нелинейная кривая намагничивания
- высокая твердость, хрупкость, склонность к трещинам и сколам (невозможна механическая обработка, только литье + шлифовка)
- могут быть изотропными или анизотропными

Магнитные материалы

1950-е

<u>Ферриты</u> на основе ферритов бария и стронция ($BaO+6Fe_2O_3$ / $SrO+6Fe_2O_3$)

Керамика по технологии порошковой металлургии

- B_r – 0,2…0,4 Тл
- H_c – 120…270 кА/м
- $\mu_{пм}$ – 1,3…2 μ_0
- $w_{пм}$ – 5…15 кДж/м^3

- низкая цена
- в среднем больше B_r, но меньше H_c (чем у ЮНДК)
- сильная зависимость B_r от температуры
- рабочая температура до 400°
- высокое $\rho_{пм}$ (нет потерь от вихревых токов)
- могут быть изотропными или анизотропными

Магнитные материалы

1970-е

Редкоземельные магниты самарий-кобальт (SmCo)

Большая плотность магнитной энергии

- B_r – 0,8…0,9 Тл
- H_c – 500…600 кА/м
- $\mu_{пм}$ – 1,1…1,3 μ_0
- $w_{пм}$ – 55…80 кДж/м^3

- сложная технология
- дорогие материалы
- самая высокая цена ПМ
- линейная кривая намагничивания
- рабочая температура до 350°
- стабильность магнитных параметров

Магнитные материалы

1980-е

Редкоземельные магниты неодим-железо-бор (NdFeB)

Еще больше плотность магнитной энергии

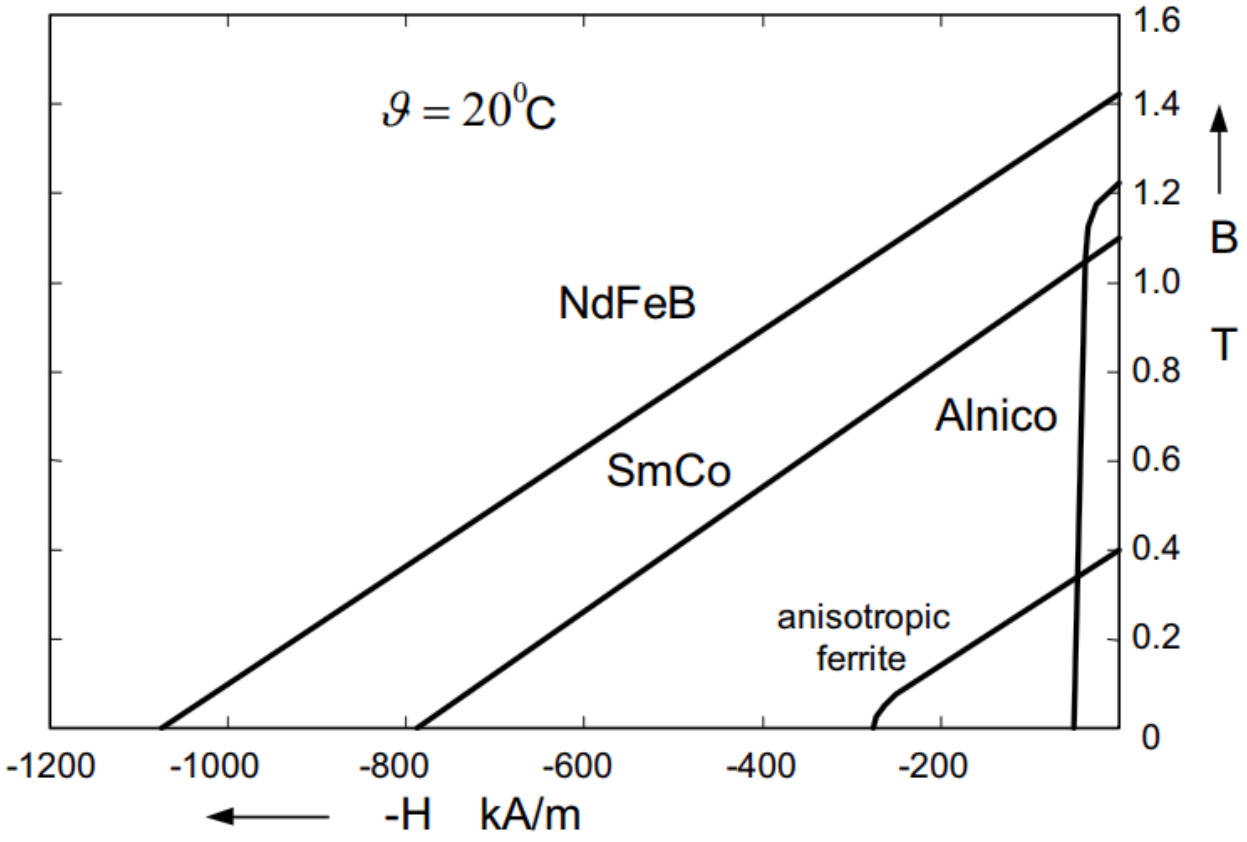
- B_r – 1,1…1,2 Тл
- H_c – 600…900 кА/м
- $\mu_{пм}$ – 1,05…1,1 μ_0
- $w_{пм}$ – 100…150 кДж/м^3

- производство дешевле SmCo
- прочность выше, чем у SmCo
- магнитные свойства лучше SmCo, но только при комнатной $t°$
- при повышении $t°$ быстро теряют намагниченность
- рабочая температура до 150°
- склонность к коррозии (кислота, щелочь, вода, водород, радиация)
  $\rightarrow$ требуется защитное покрытие и аккуратная установка

Магнитные материалы

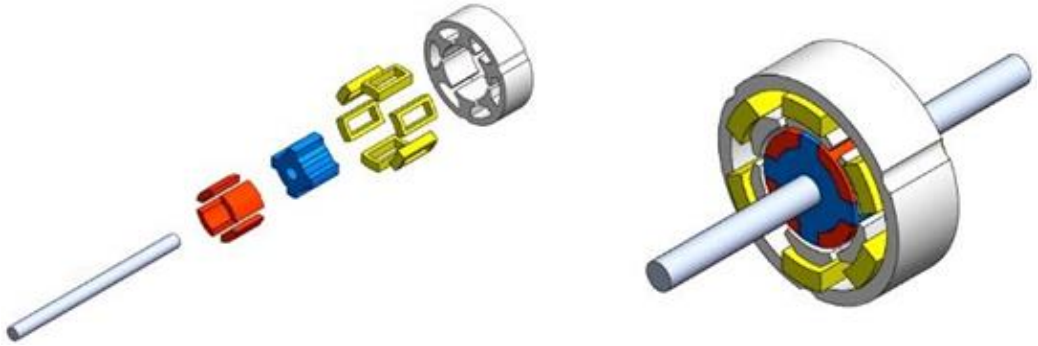
Сравнение магнитных материалов

- ЮНДК / Alnico
- Ферриты
- SmCo
- NdFeB



Далее

Синхронные микродвигатели



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