

Теория синхронных микромашин

Теория, конструкции, характеристики



Синхронные микродвигатели

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

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

Основные требования к СД

- » общие для силовых двигателей
 - высокие энергетические показатели
 - малые габариты и масса
- » специфические для СД
 - постоянство средней или мгновенной скорости

Питание

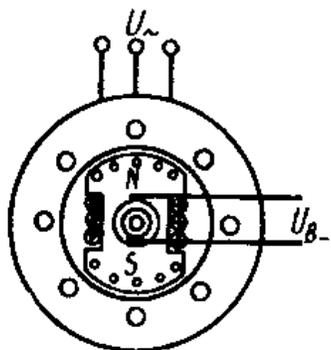
- » 3-фазное или 1-фазное
- » частота напряжения $f = 50 / 400 / 1000$ Гц

Конструкция статора

- » классическая: сердечник с обмотками
- » аналогична асинхронным микродвигателям

Синхронные микродвигатели

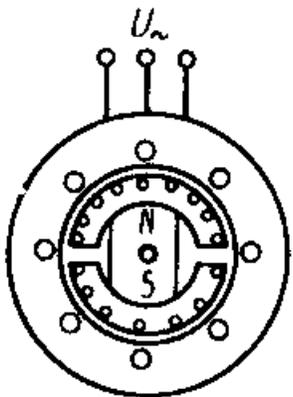
Конструкция ротора



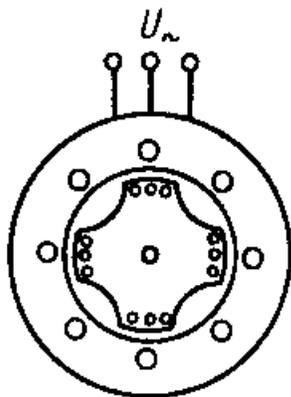
СД с электромагнитным возбуждением

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

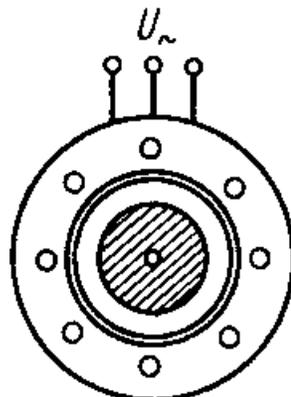
Применяются в микромашинах очень редко



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 уравнивается в основном ЭДС, а $E = 4,44 f_w \Phi$

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

Результирующий поток в зазоре Φ :

- » поток возбужденного ротора Φ_B
- » 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. Φ_B)

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

Уравнение напряжений синхронного микродвигателя

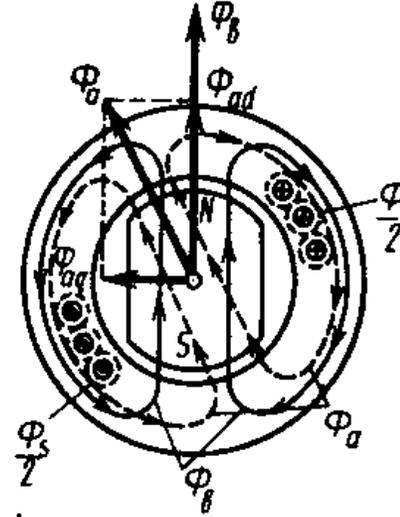
ЭДС от результирующего потока в зазоре $\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_a$

где E_0 – ЭДС, наводимая основным потоком ротора Φ_B

E_a – ЭДС, наводимая потоком реакции статора Φ_a

Т.к. потоки Φ_B и Φ_a смещены в пространстве,

ЭДС E_0 и E_a сдвинуты по фазе во времени



Уравнение баланса напряжений $\dot{U} = -\dot{E}_\delta + iZ_s = -\dot{E}_0 - \dot{E}_a - \dot{E}_\sigma + Ir_s$

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 $\dot{U} = -\dot{E}_0 - \dot{E}_{ad} - \dot{E}_{aq} - \dot{E}_\sigma + Ir_s$

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

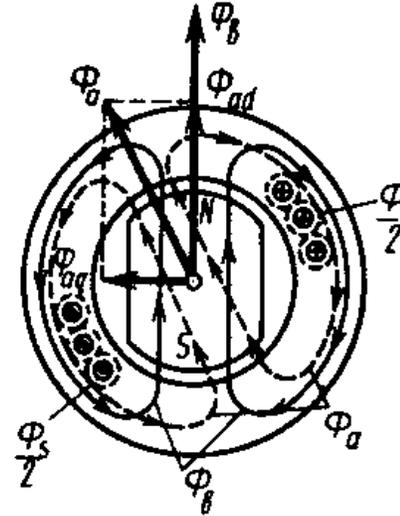
$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d x_{ad}$$

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

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})

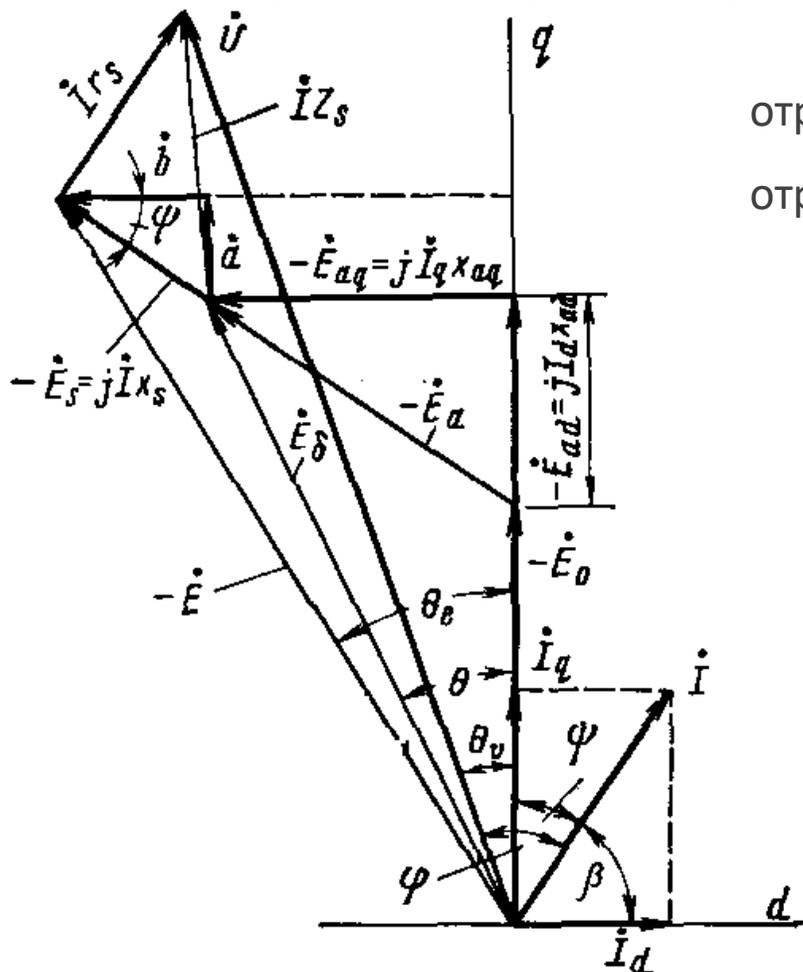
Уравнение баланса напряжений $\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_{ad} + j\dot{I}_q x_{aq} + j\dot{I}x_s + \dot{I}r_s$



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 $|\dot{a}| = I x_S \sin \psi = I_d x_S \quad \dot{a} = j\dot{I}_d x_S$

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

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

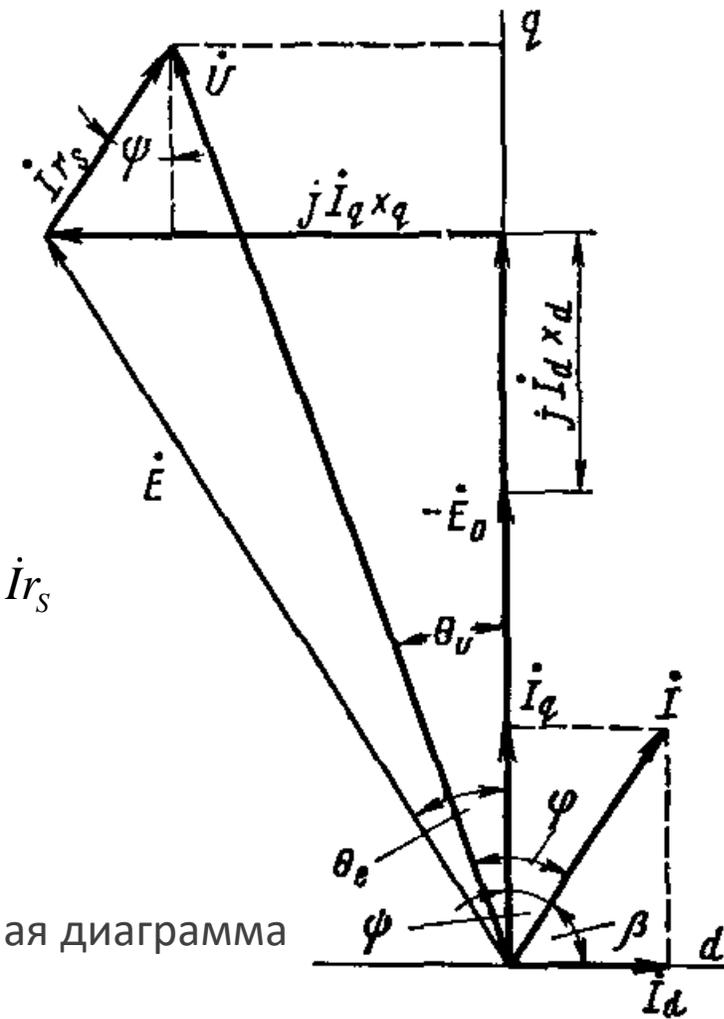
$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_{ad} + j\dot{I}_q x_{aq} + j\dot{I}_d x_S + j\dot{I}_q x_S + \dot{I} r_S$$

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 $I \cos \psi = I_q$ $I \sin \psi = I_d$

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

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

Выразим составляющие токов

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

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

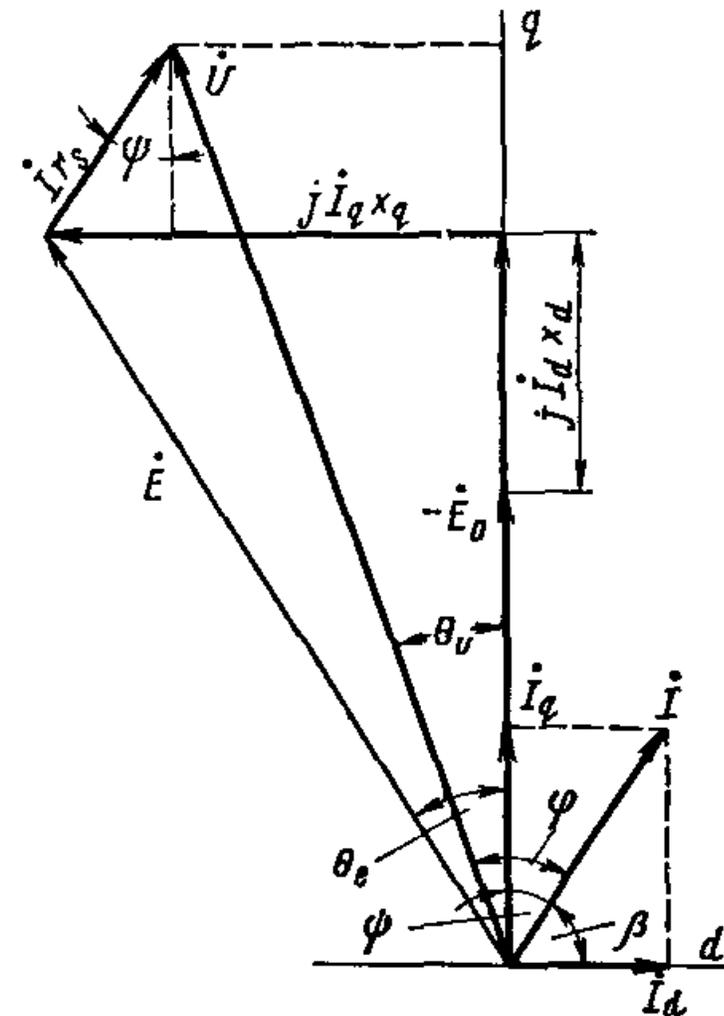
Тогда составляющие токов

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

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

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 $I \cos \psi = I_q$ $I \sin \psi = I_d$

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

Подставив выражения для I_d, I_q получим

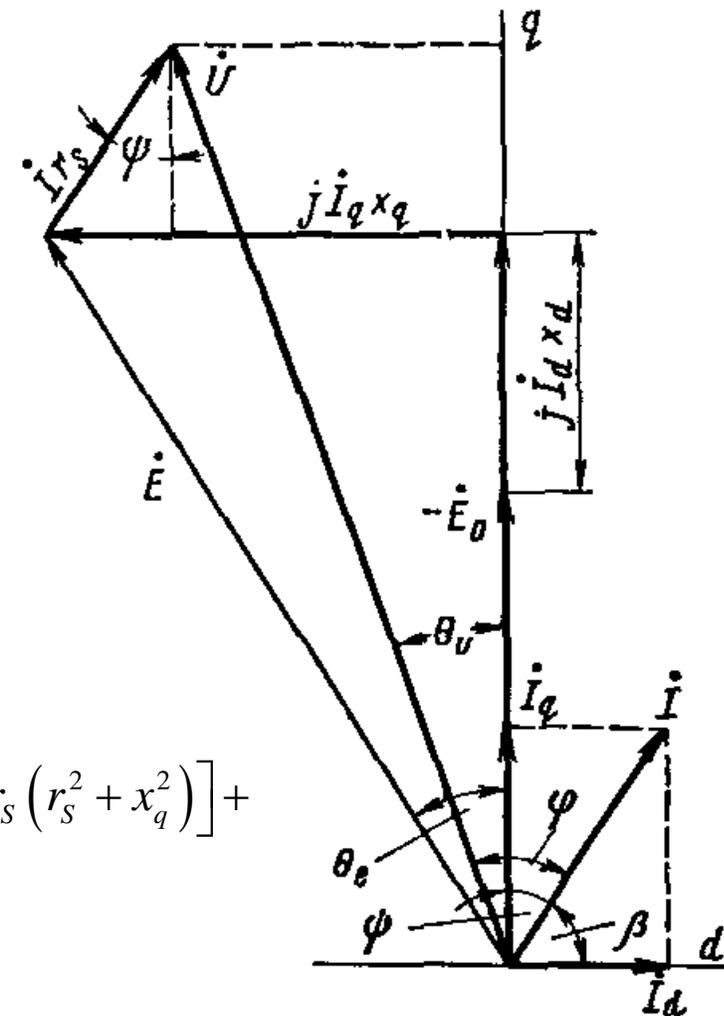
$$P_s = \frac{mU^2}{r_s^2 + x_d x_q} \left[\varepsilon (x_q \sin \theta_U - r_s \cos \theta_U) + \frac{1}{2} (x_d - x_q) \sin 2\theta_U + r_s \right]$$

Электромагнитная мощность $P_{ЭМ} = P_s - \Delta P_{\text{эс}} = P_s - mI^2 r_s$
(без учета потерь в стали)

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

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

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



Электромагнитный момент синхронного микродвигателя

Момент синхронного микродвигателя

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

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)

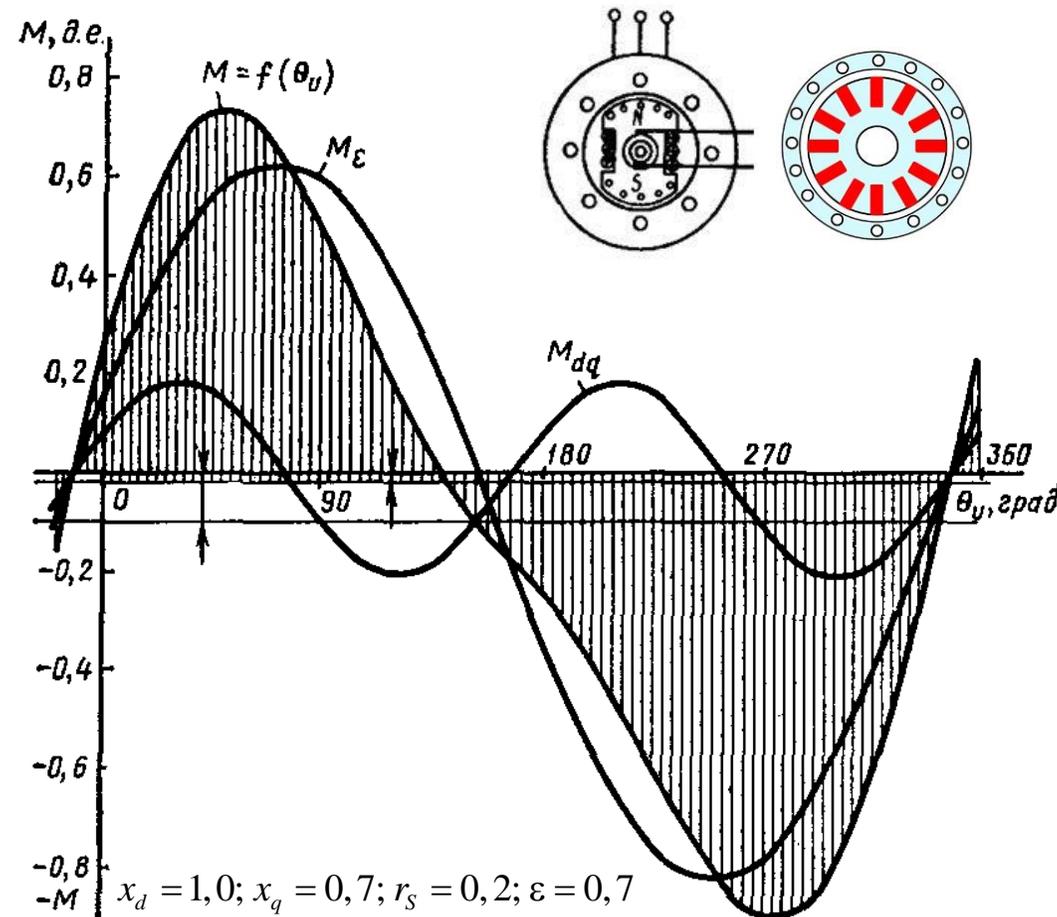
В СД с неявновыраженными полюсами
(или с поверхностными ПМ)

$x_d = x_q$ 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 $M_{dq} > 0$

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

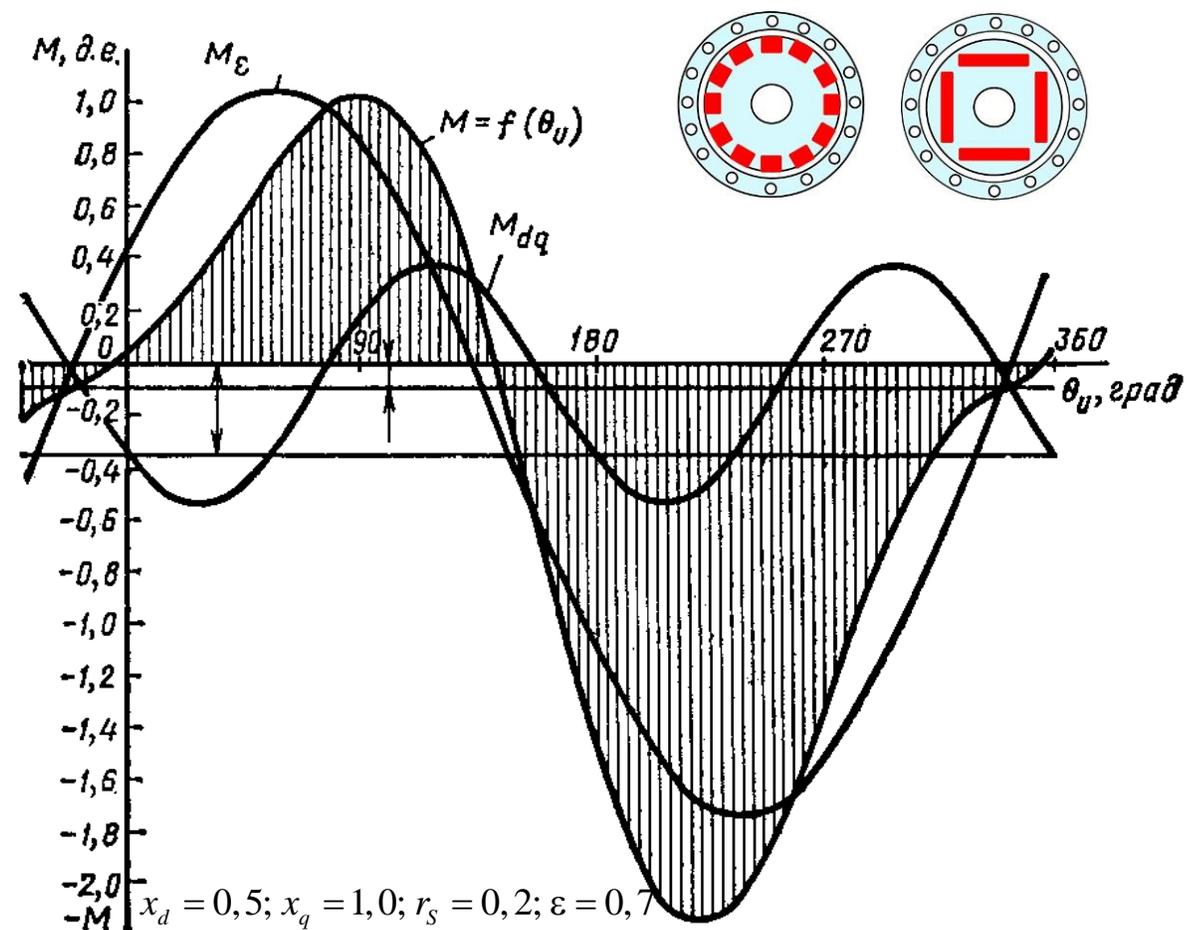


Угловая характеристика синхронного микродвигателя

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)

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

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

A_{ε} – амплитуда синусоиды $A_{\varepsilon} = \frac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c(r_s^2 + x_d x_q)^2} \sqrt{(x_d x_q^2 - r_s^2 x_q + 2r_s^2 x_d)^2 + r_s^2 (2x_q^2 + r_s^2 - x_d x_q)^2}$

α_{ε} – фазовый сдвиг, определяемый как $\operatorname{tg} \alpha_{\varepsilon} = \frac{r_s (2x_q^2 + r_s^2 - x_d x_q)}{x_d x_q^2 - r_s^2 x_q + 2r_s^2 x_d}$

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

$$M_{\varepsilon T} = -\frac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c(r_s^2 + x_d x_q)^2} \varepsilon r_s (r_s^2 + x_q^2) = \frac{mE_0^2 r_s}{\Omega_c} \frac{r_s^2 + x_q^2}{(r_s^2 + x_d x_q)^2}$$

» $M_{\varepsilon T}$ зависит от возбуждения полюсов (E_0) и r_s , но не зависит от U

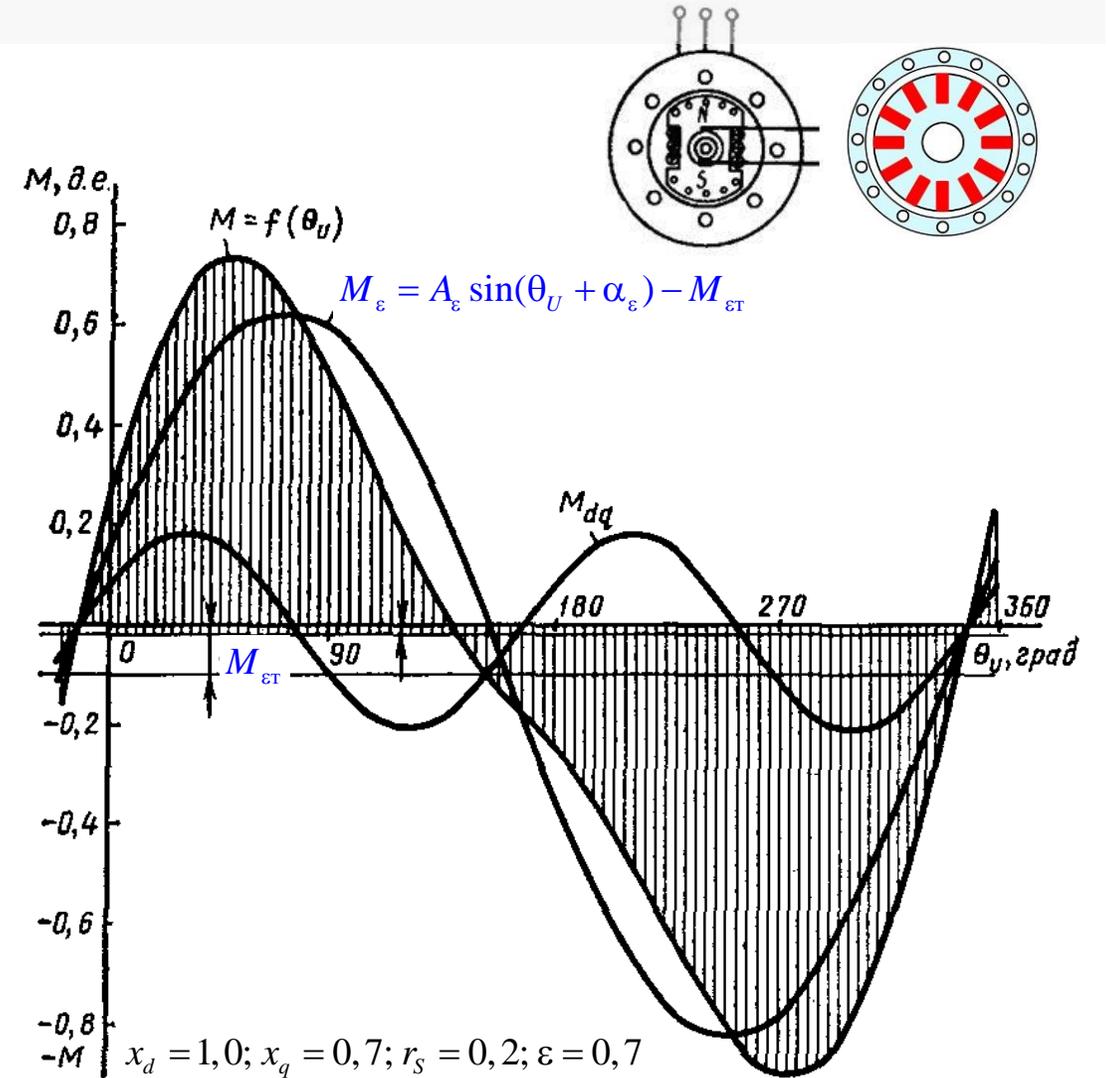
» причина возникновения $M_{\varepsilon T}$ – потери в обмотке статора от токов, наводимых полем возбуждения (генераторный момент)

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 $M_{\varepsilon T}$

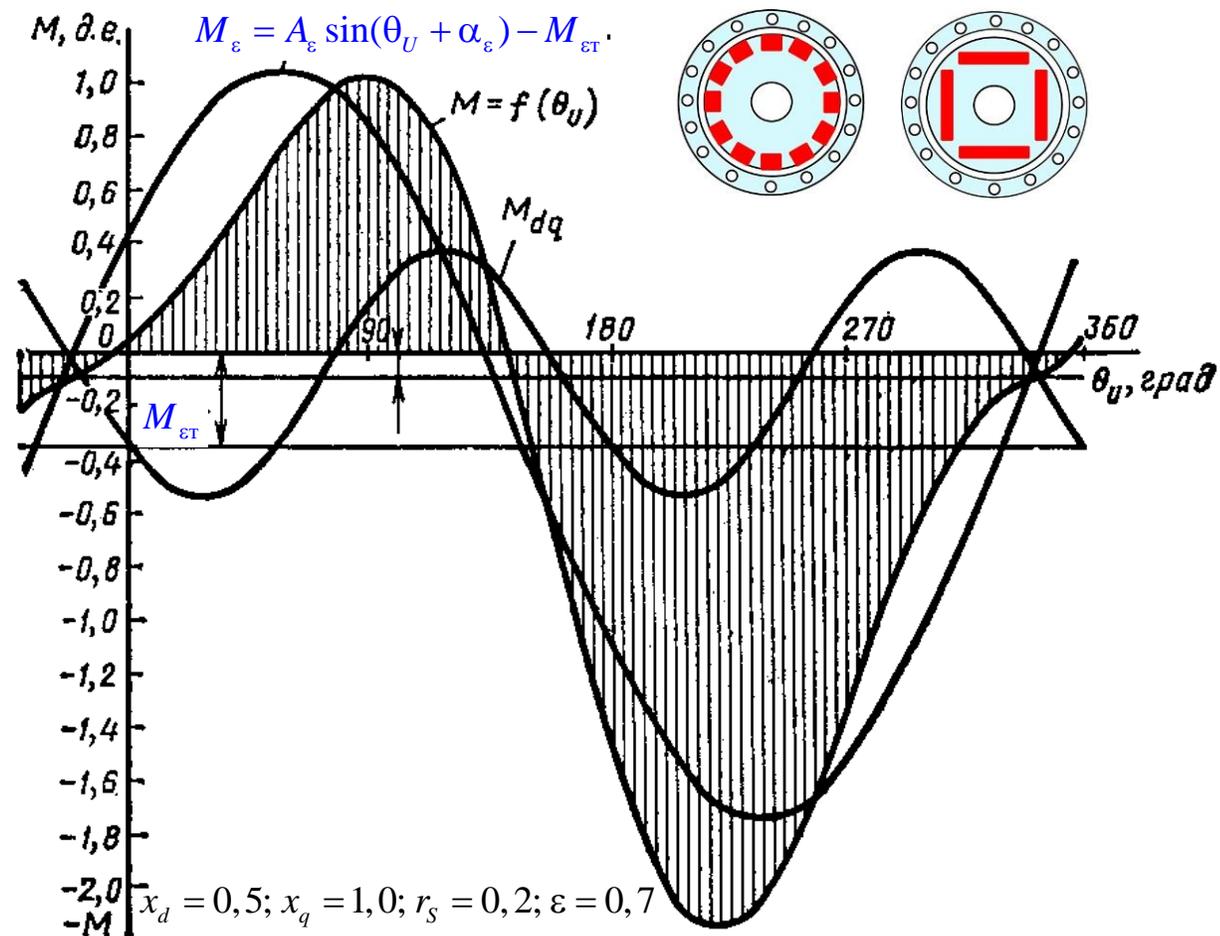
Составляющие момента

Вращающий момент при $x_d > x_q$



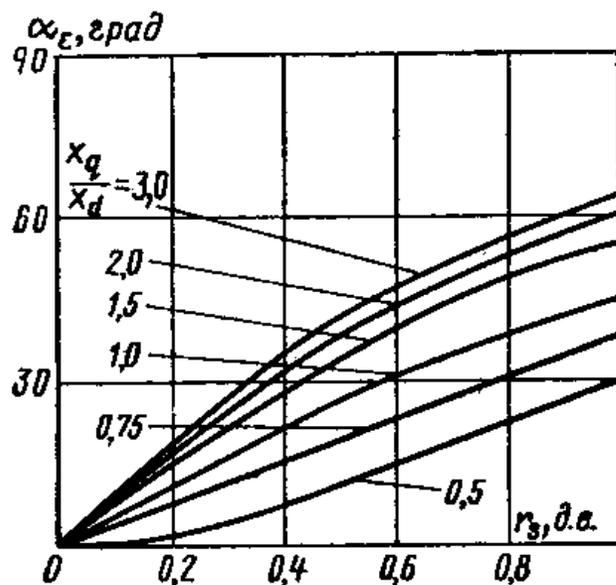
Составляющие момента

Вращающий момент при $x_d < x_q$

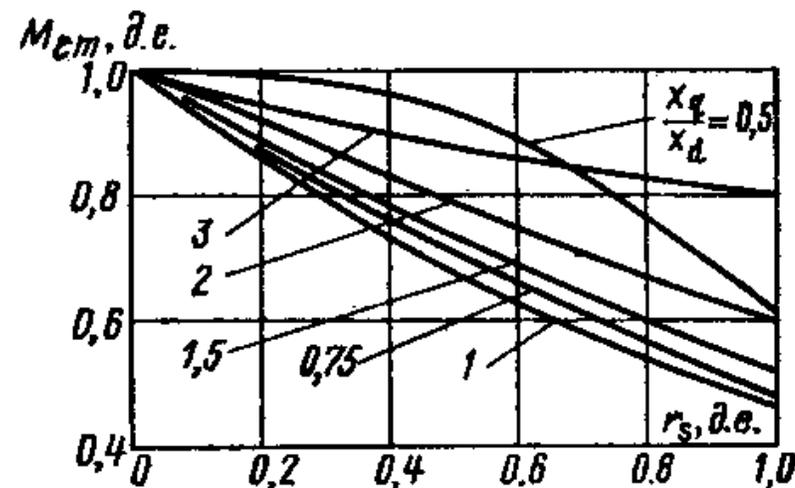


Составляющие момента

Угол смещения синусоиды α_ε
в зависимости от r_s
для разных СД



Величина максимального
электромагнитного момента M_{em}
в зависимости от r_s
для разных СД



Составляющие момента

Реактивный момент (момент явнополюсности)

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

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

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

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

Тормозной реактивный момент M_{dT}

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

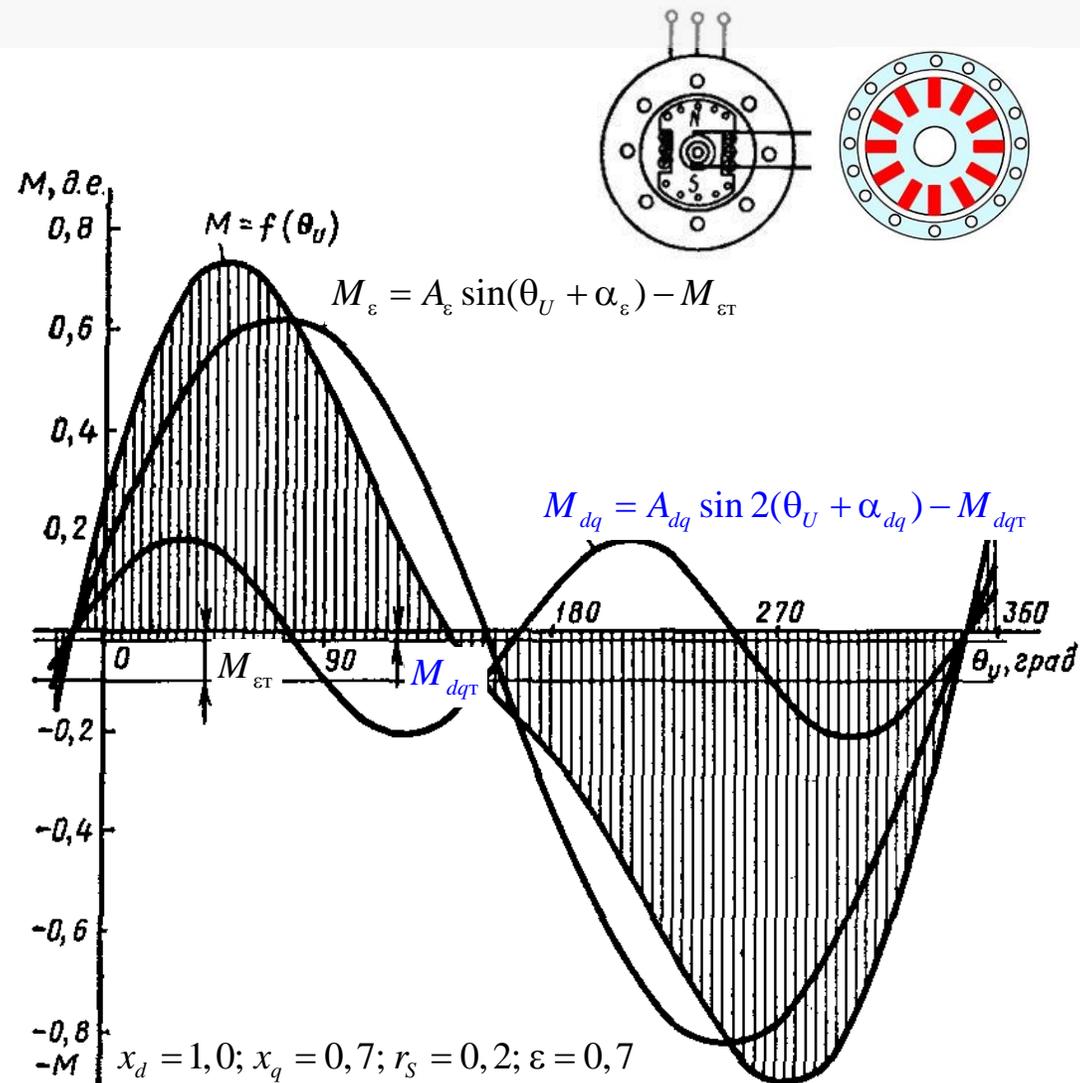
» M_{dqT} становится заметен лишь у СД с большим r_s

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_{dqT}

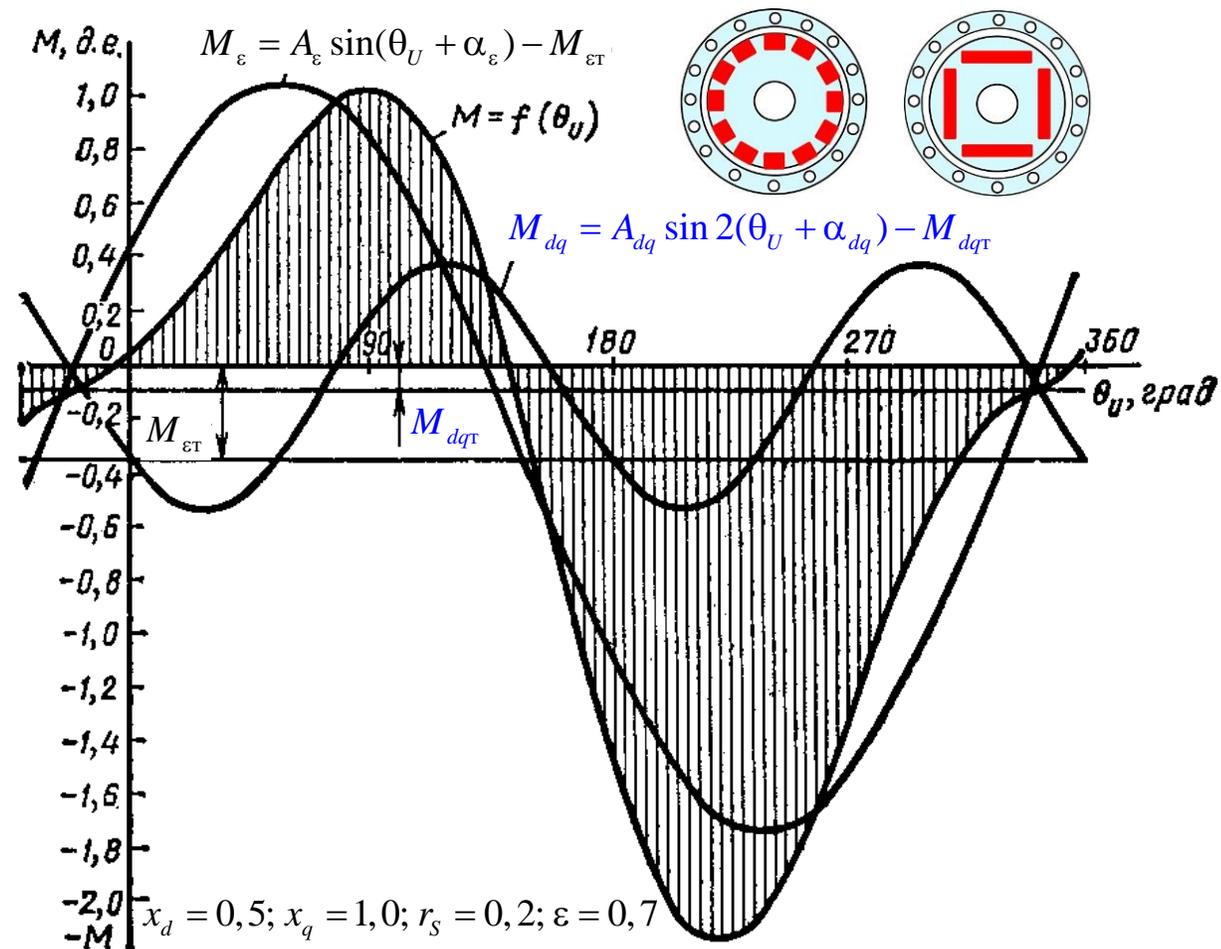
Составляющие момента

Вращающий момент при $x_d > x_q$



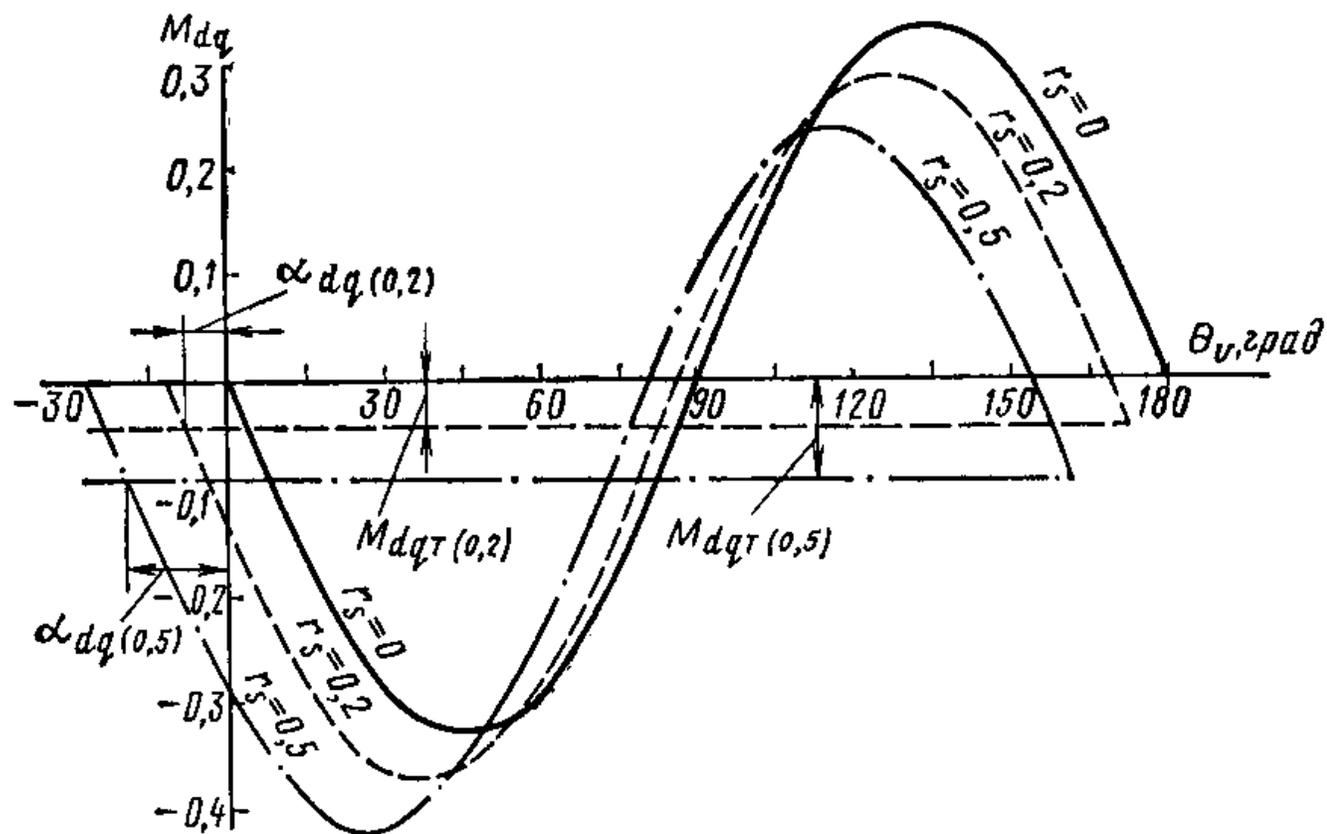
Составляющие момента

Вращающий момент при $x_d < x_q$



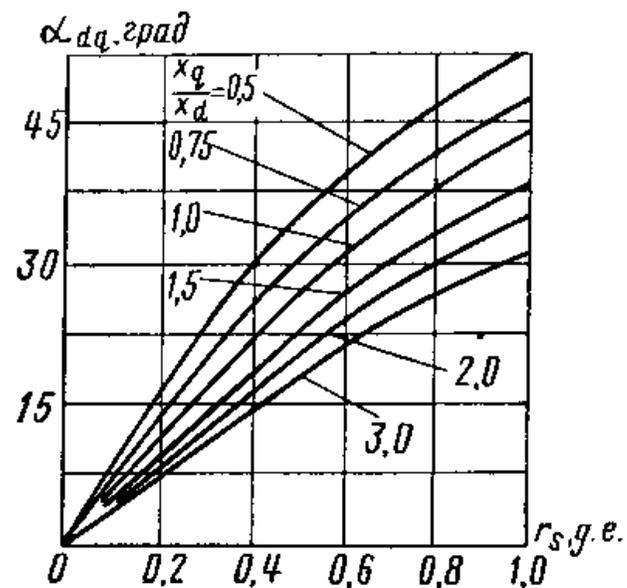
Составляющие момента

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

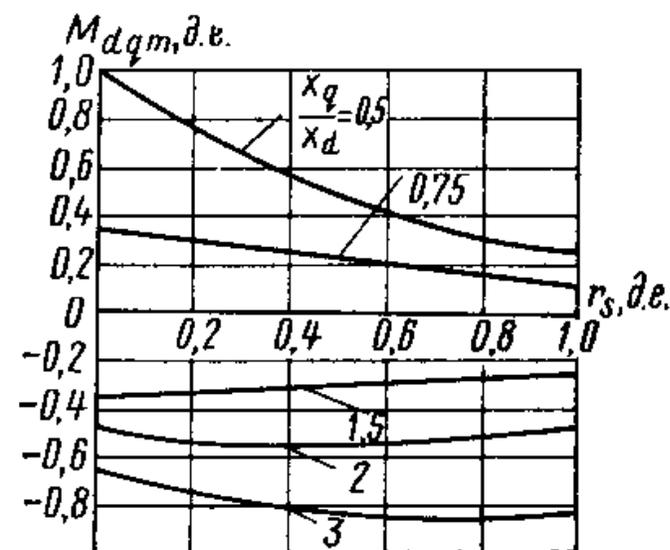


Составляющие момента

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



Величина максимального
реактивного момента M_{dqm} в
зависимости от r_s
для разных СД



Результирующий момент

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

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

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

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

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

$$\text{tg } \alpha_{\varepsilon} = \frac{r_s (2x_q^2 + r_s^2 - x_d x_q)}{x_d x_q^2 - r_s^2 x_q + 2r_s^2 x_d}$$

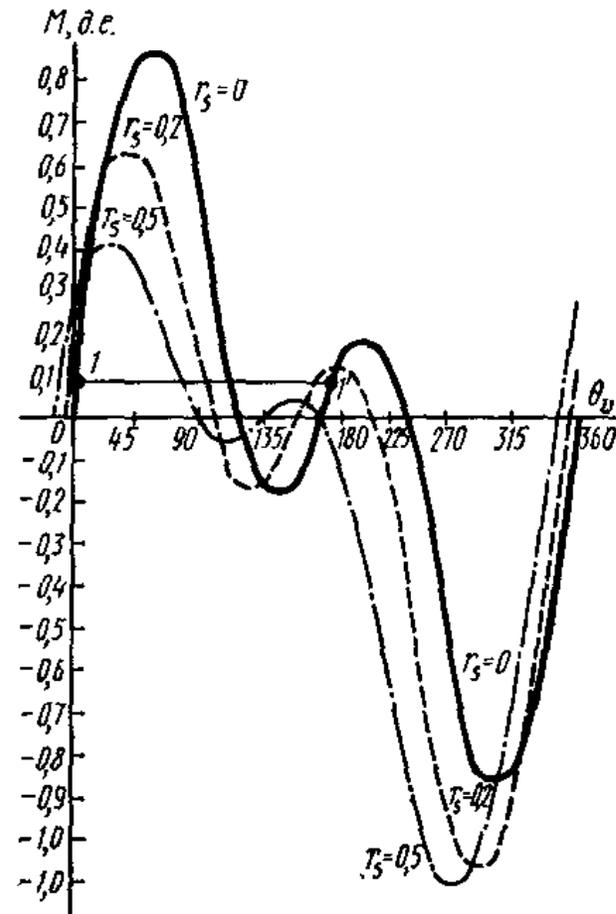
$$\text{tg } 2\alpha_{dq} = \frac{r_s (x_d + x_q)}{x_d x_q - r_s^2}$$

При увеличении r_s синусоиды смещаются влево (на α_{ε} и α_{dq}) и вниз (на M_{ε} и M_{dq})

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
→ проблемы с синфазным вращением нескольких СД

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



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 $x_d = x_q = x_c$

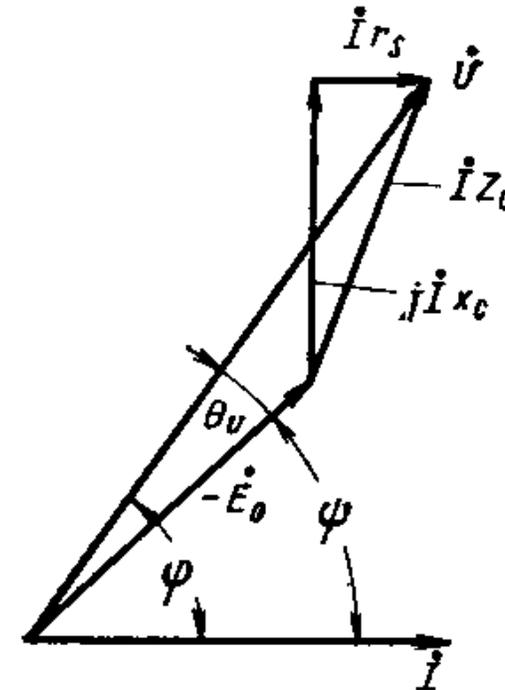
Полный ток статора $I = \frac{U}{Z_c} \sqrt{1 - 2\varepsilon \cos \theta_U + \varepsilon^2}$

Потребляемая мощность $P_s = \frac{mU^2}{r_s^2 + x_c^2} [r_s + \varepsilon(x_c \sin \theta_U - r_s \cos \theta_U)]$

Электромагнитная мощность $P_{ЭМ} = \frac{mU^2 \varepsilon}{r_s^2 + x_c^2} [(x_c \sin \theta_U + r_s \cos \theta_U) - \varepsilon r_s]$

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

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



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

СД с неявновыраженными полюсами

По формуле вращающего момента $M_c = \frac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c Z_c} \left[\sin(\theta_U + \alpha) - \frac{\varepsilon r_s}{Z_c} \right]$

найдем максимальный момент $M_{cm} = \frac{mU^2\varepsilon}{\Omega_c Z_c} \left[1 - \frac{\varepsilon r_s}{Z_c} \right]$ – при угле $\theta_U + \alpha = 90^\circ$ или $\text{tg } \theta_{Um} = \text{tg}(90^\circ - \alpha) = \text{ctg } \alpha = \frac{x_c}{r_s}$

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

$$\varepsilon_{M_{cm}} = \frac{Z_c}{2r_s}$$

$$M_{cmax} = \frac{mU^2}{4\Omega_c r_s}$$

Максимальный момент (и максимальная $P_{ЭМ}$) 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

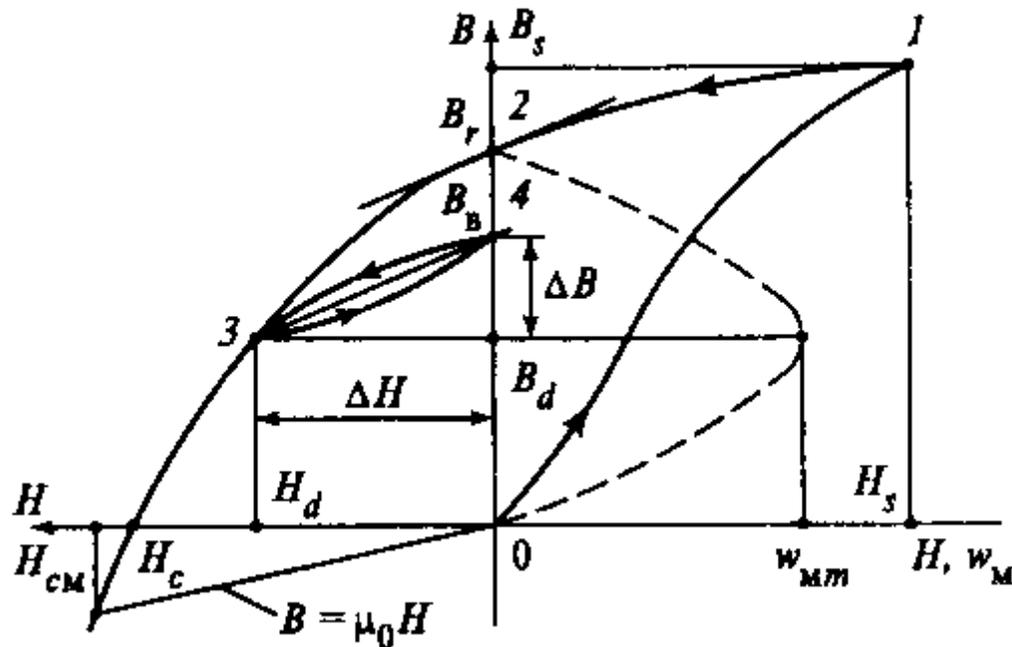
Для синхронных
микродвигателей

Свойства постоянных магнитов

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

$w_{\text{ПМ}}$ – удельная магнитная энергия ПМ $w_{\text{ПМ}} = \frac{BH}{2}$

Максимальная удельная магнитная энергия в точке 3 $w_{\text{ПМ max}} = \frac{B_d H_d}{2} = \frac{(BH)_{\text{max}}}{2}$



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

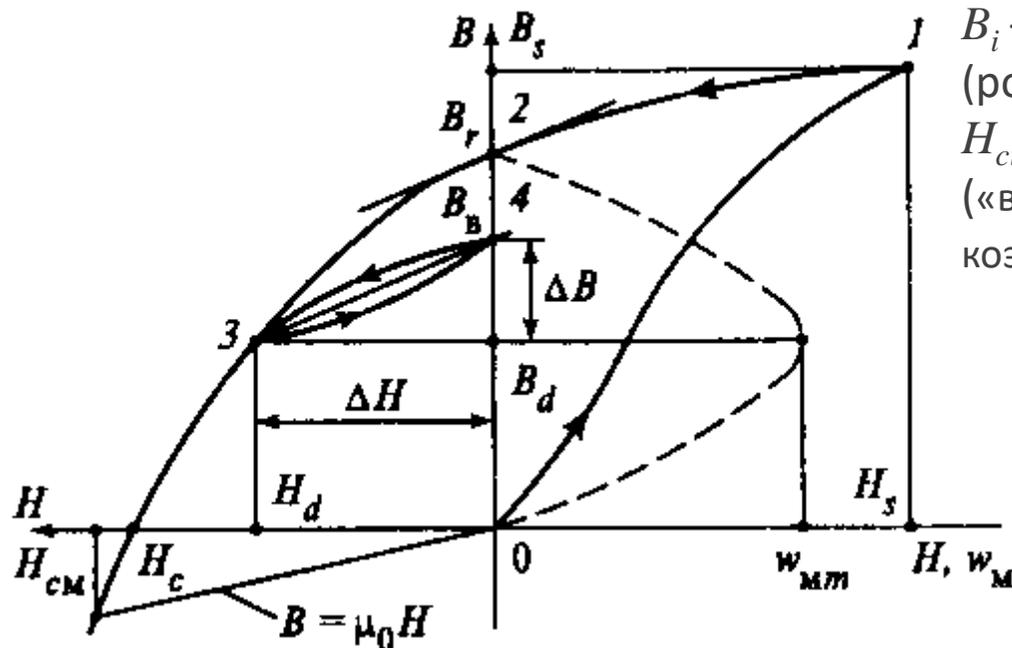
Свойства постоянных магнитов

После первоначального намагничивания – «стабилизация» ПМ

→ размагничивание до H_d , которая гарантированно меньше H при работе ЭМ (желательно в т.3, где максимальная $w_{ПМ}$)

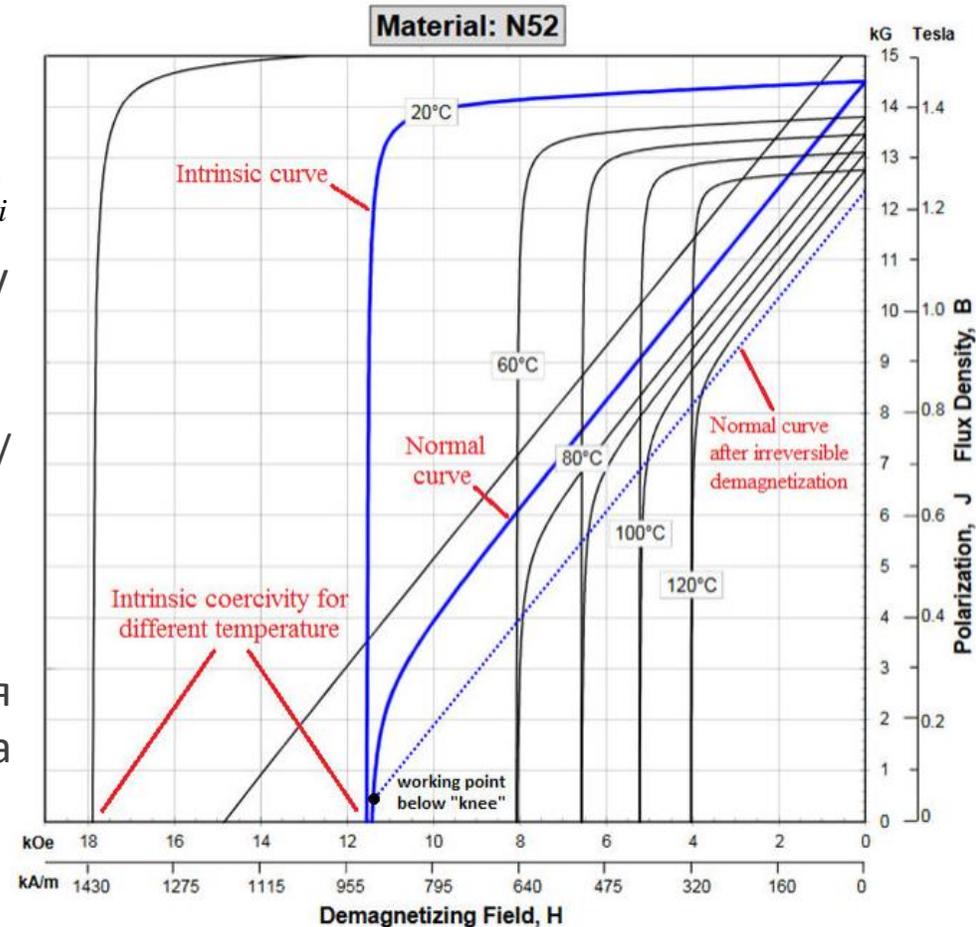
В англоязычной литературе используют другое представление

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



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 $\oint Hdl = H_M l = 0$ Т.е. напряженность поля в магните $H_M = 0$

(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 $\oint Hdl = H_\delta \delta + H_M l = 0$

Т.е. величина напряженности магнитного поля в магните $H_M = H_\delta \delta / l \neq 0$

Она соответствует рабочей точке k на кривой размагничивания

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

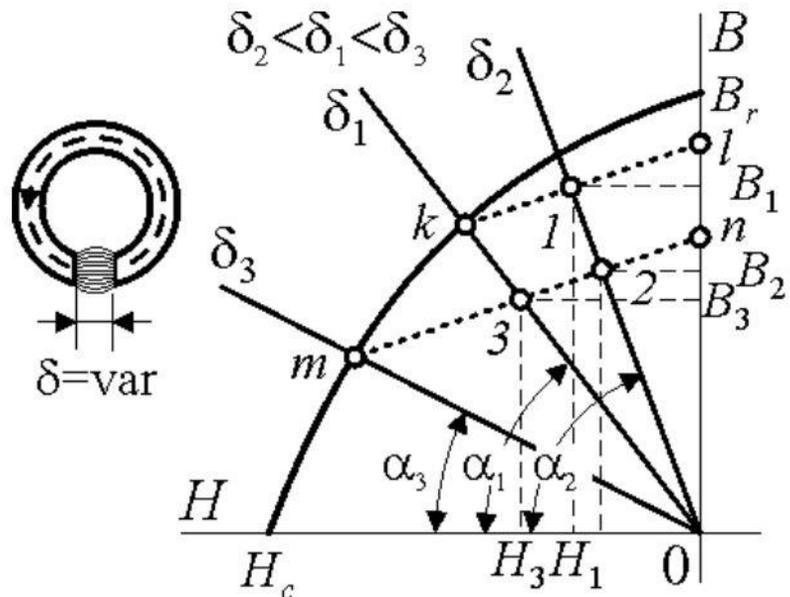
(если затем зазор δ уменьшить до нуля, напряженность станет $H_M = 0$, но рабочая точка переместится по прямой возврата в точку l)

Точка k – пересечение кривой размагничивания с характеристикой воздушного зазора – прямой линией под углом α , где $\text{tg} \alpha = \Lambda_\delta$

$$\Phi_\delta = \Lambda_\delta F_\delta \rightarrow B_\delta S_\delta = \Lambda_\delta H_\delta \delta \rightarrow \Lambda_\delta = \text{tg} \alpha = \frac{B_\delta S_\delta}{H_\delta \delta} = \mu_0 \frac{S_\delta}{\delta}$$

Чем больше δ , тем меньше проводимость зазора Λ_δ ,

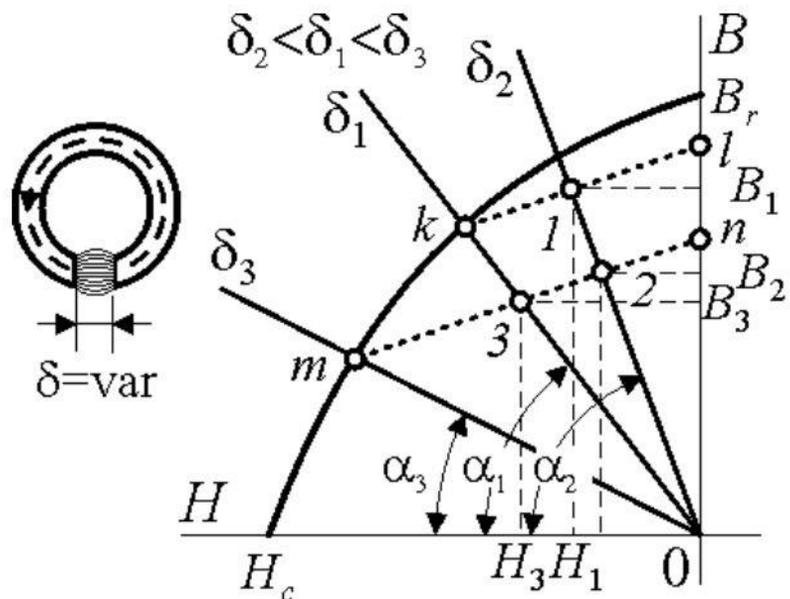
тем меньше угол наклона кривой α , тем сильнее размагничивание ПМ



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



Зазор в тороиде моделирует полную проводимость магнитной цепи ЭМ

Работа постоянных магнитов в электрической машине

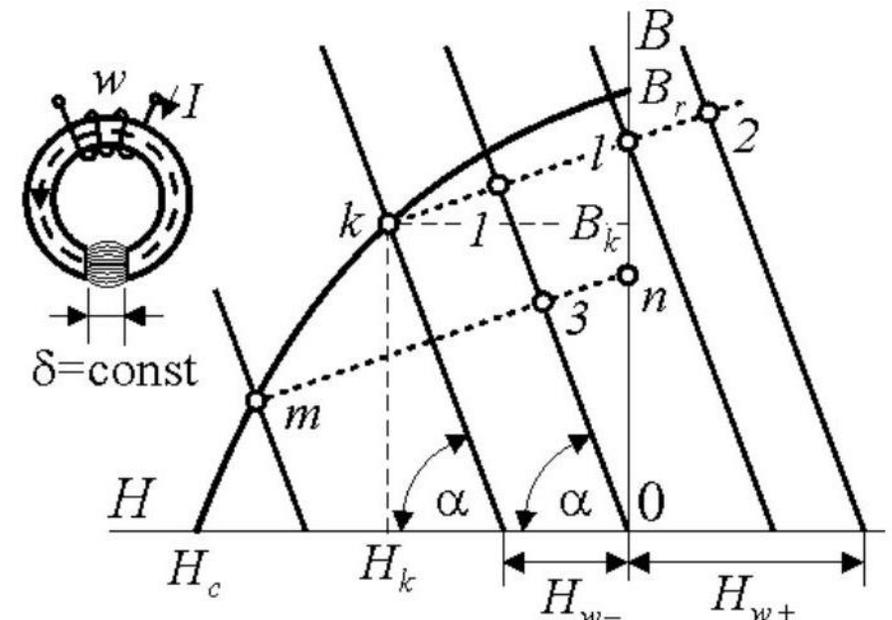
Теперь добавим обмотку с числом витков w и током I (модель МДС реакции якоря)

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

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

К напряженности поля в магните $H_M = H_\delta \delta / l$ теперь добавляется напряженность внешнего поля $H_w = Iw / l$ (+ или -) смещая характеристику воздушного зазора параллельно на величину H_w

- » Если увеличивать ток, намагничивая тороид, индукция растет по прямой возврата kl
- » При МДС $Iw = H_\delta \delta$ рабочая точка из т. 1 придет в т. l (можно дойти до B_r и B_S)
- » Обычно в ЭМ МДС якоря размагничивающая и H_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 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
 - » $\mu_{\text{ПМ}}$ – 2...5 μ_0
 - » $w_{\text{ПМ}}$ – 4...40 кДж/м³
- » 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

Ферриты на основе ферритов бария и стронция ($\text{BaO}+6\text{Fe}_2\text{O}_3$ / $\text{SrO}+6\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Керамика по технологии порошковой металлургии

- » B_r – 0,2...0,4 Тл
- » H_c – 120...270 кА/м
- » $\mu_{\text{ПМ}}$ – 1,3...2 μ_0
- » $w_{\text{ПМ}}$ – 5...15 кДж/м³
 - » 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 $\rho_{\text{ПМ}}$ (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
- » $\mu_{\text{ПМ}} - 1,1...1,3 \mu_0$
- » $w_{\text{ПМ}} - 55...80$ кДж/м³
 - » 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)

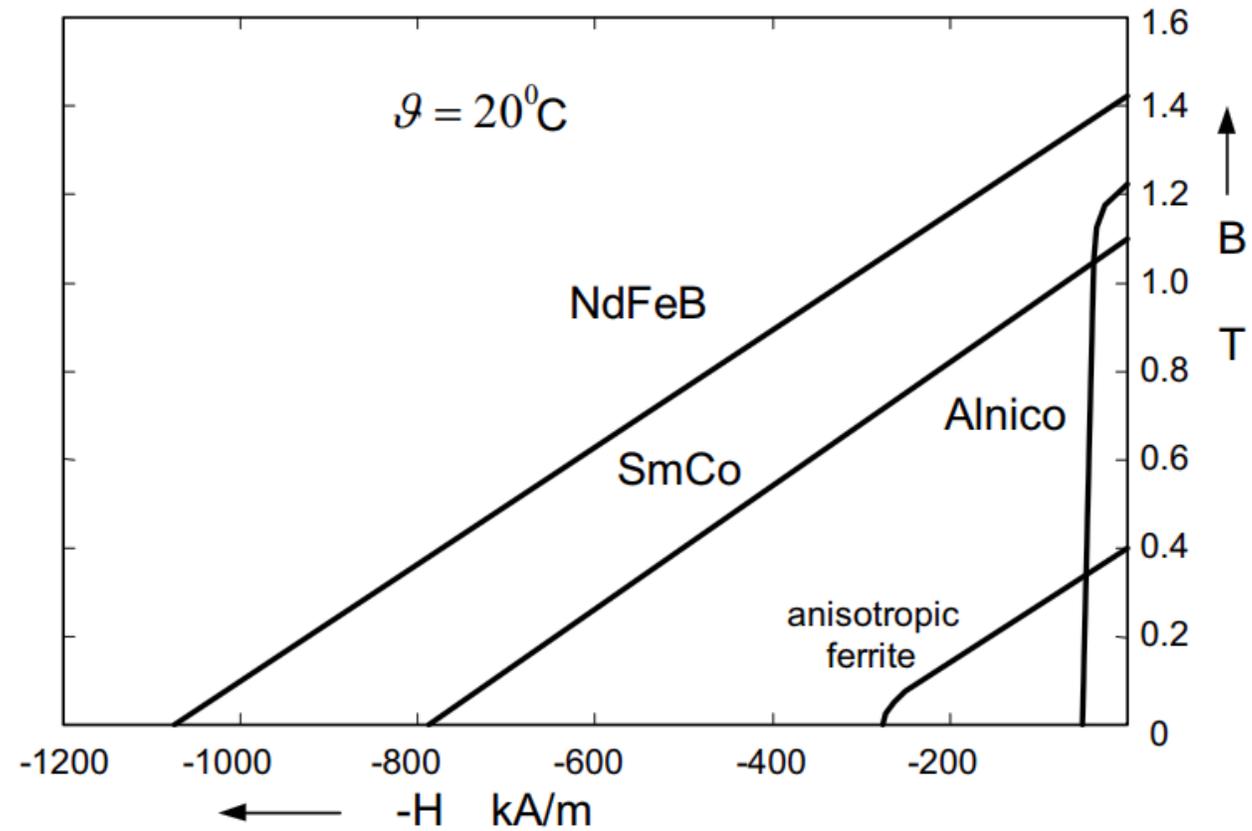
Еще больше плотность магнитной энергии

- » B_r – 1,1...1,2 Тл
- » H_c – 600...900 кА/м
- » $\mu_{\text{ИМ}}$ – 1,05...1,1 μ_0
- » $w_{\text{ИМ}}$ – 100...150 кДж/м³
 - » 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)
→ 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

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

