

# 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

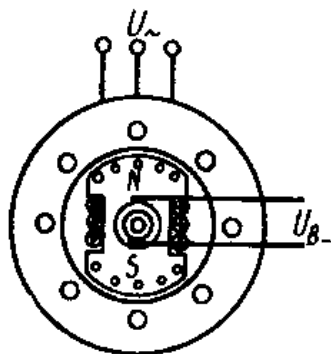
- » 3-фазное или 1-фазное
- » частота напряжения  $f = 50 / 400 / 1000$  Гц

Конструкция статора

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

# Синхронные микродвигатели

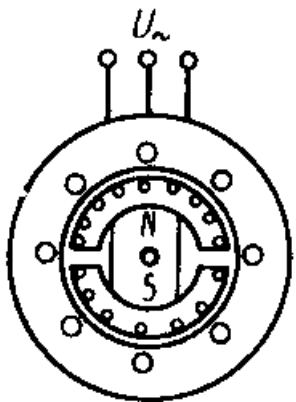
## Конструкция ротора



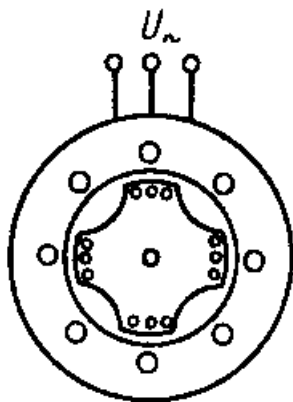
СД с электромагнитным возбуждением

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

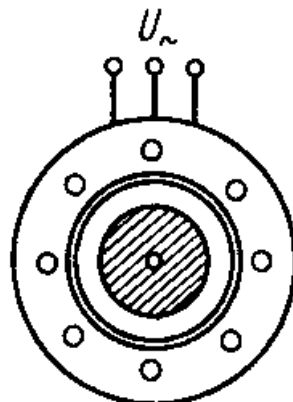
Применяются в микромашинах очень редко



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  $E_\delta$  – ЭДС, наведенная в обмотке статора результирующим потоком в зазоре  $\Phi$ ,

$E_\sigma$  – 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  $\Phi$ :

- » поток возбужденного ротора  $\Phi_B$
- » поток реакции статора  $\Phi_a$  (от намагничивающего тока статора)

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

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

# Уравнение напряжений синхронного микродвигателя

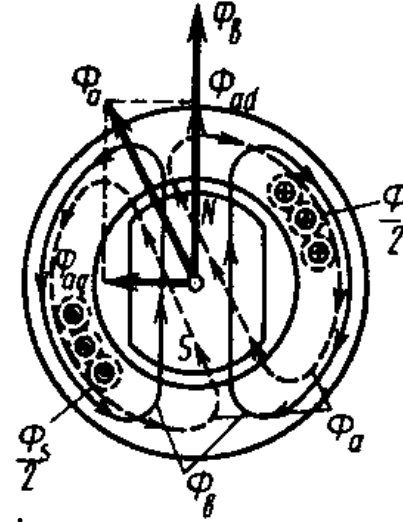
ЭДС от результирующего потока в зазоре  $\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_a$

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

$E_a$  – ЭДС, наводимая потоком реакции статора  $\Phi_a$

Т.к. потоки  $\Phi_B$  и  $\Phi_a$  смещены в пространстве,

ЭДС  $E_0$  и  $E_a$  сдвинуты по фазе во времени



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

В СД с явновыраженными полюсами проводимость зазора не постоянна,

поэтому для анализа магнитной цепи применяют метод двух реакций,

раскладывая  $\Phi_a$  на составляющие  $\Phi_{ad}$  и  $\Phi_{aq}$

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

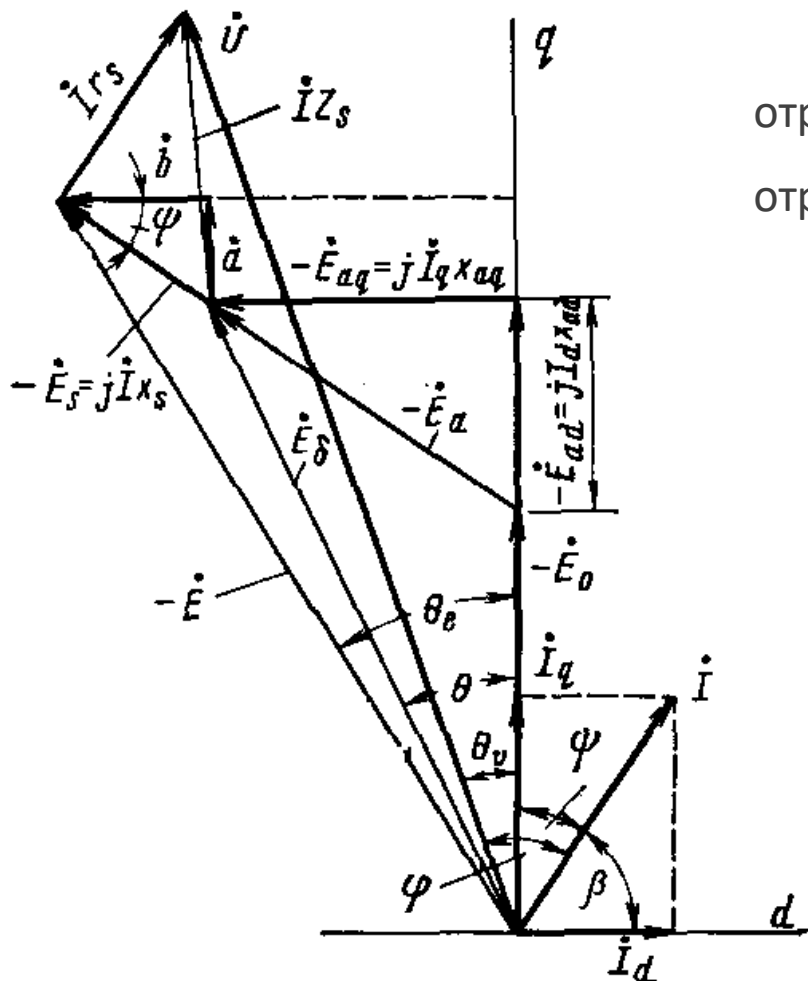
Уравнение баланса напряжений  $\dot{U} = -\dot{E}_0 - \dot{E}_{ad} - \dot{E}_{aq} - \dot{E}_\sigma + i r_s$



# 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

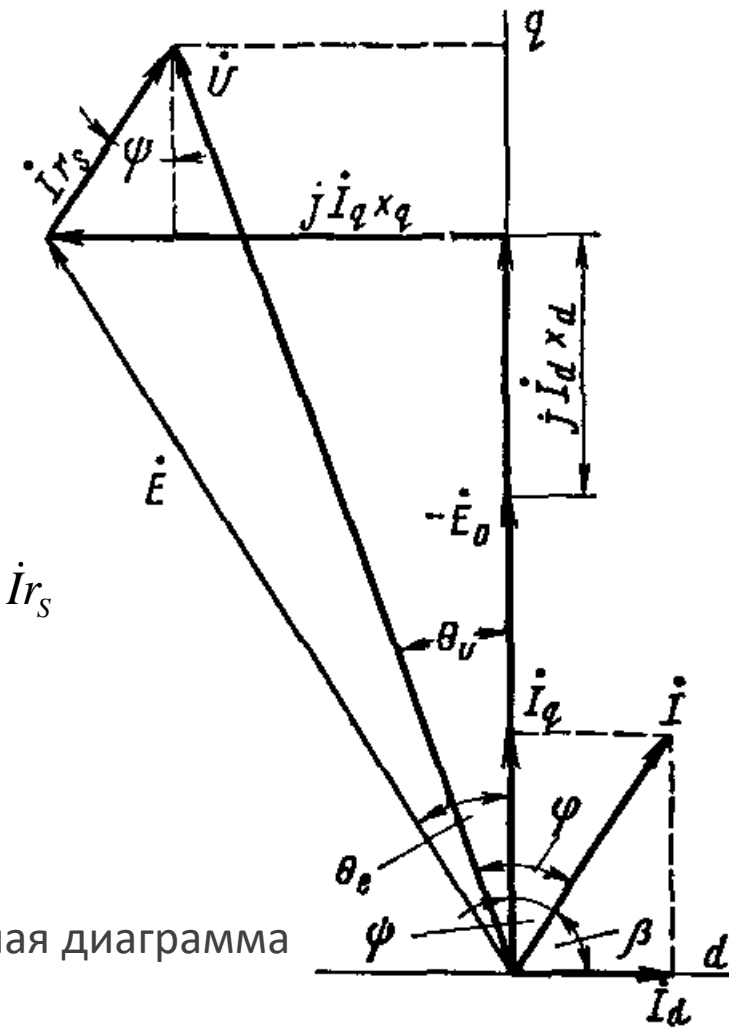
$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_{ad} + j\dot{I}_q x_{aq} + j\dot{I}_d x_S + j\dot{I}_q x_S + \dot{I} r_S$$

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  $\varepsilon = \frac{E_0}{U}$

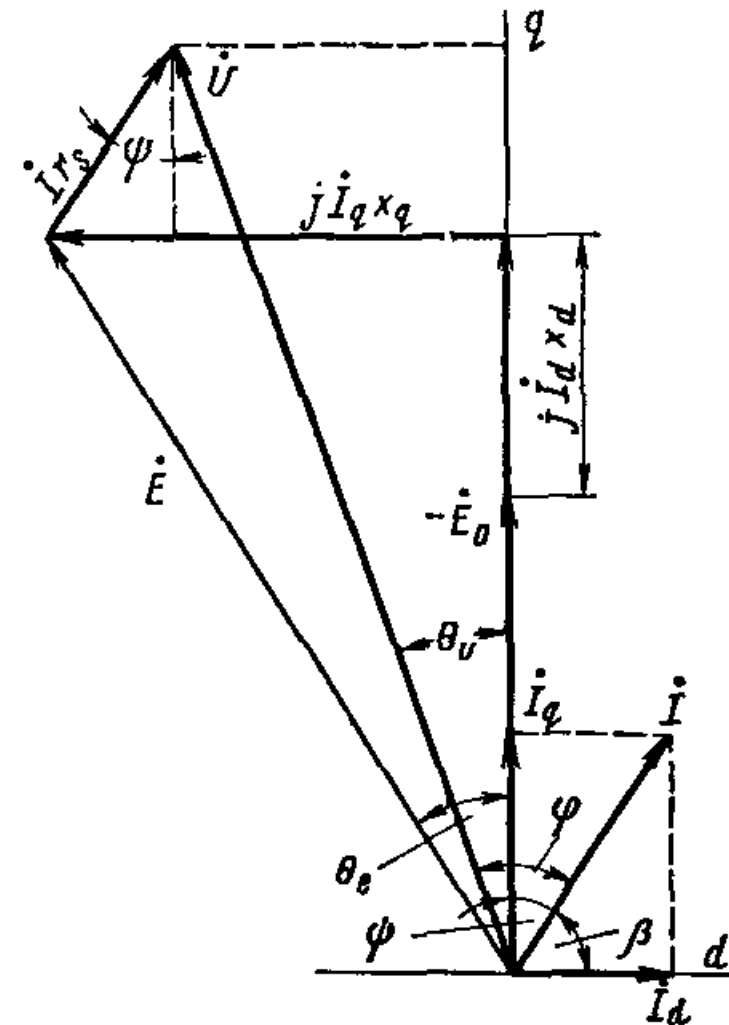
Тогда составляющие токов

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

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

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

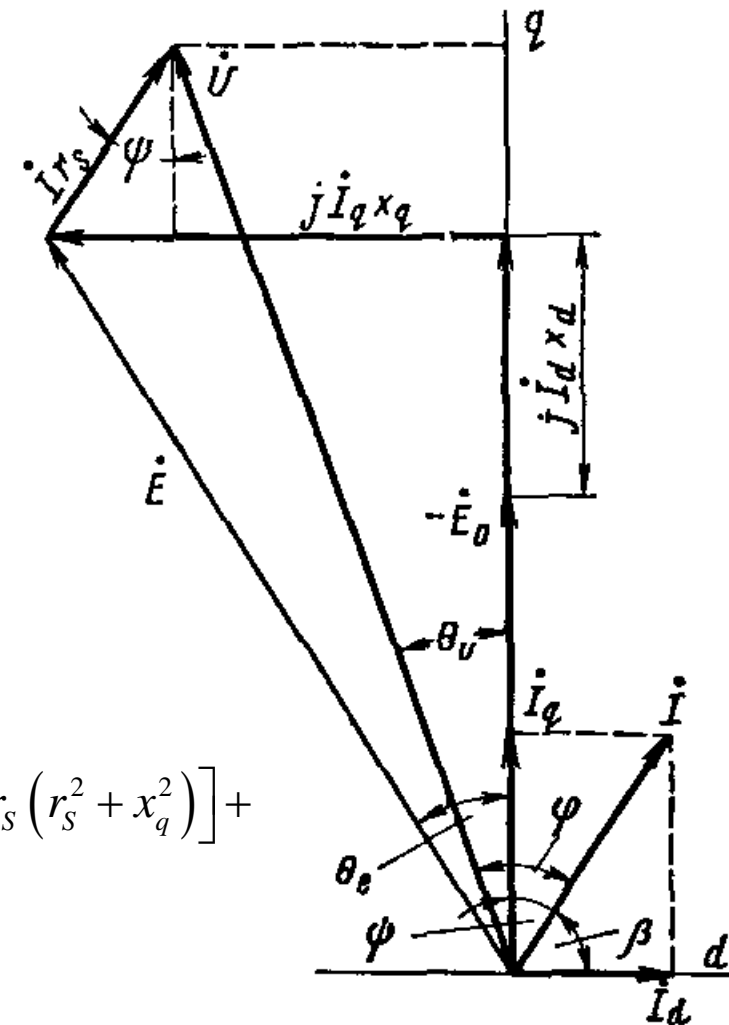
$$P_s = \frac{mU^2}{r_s^2 + x_d x_q} \left[ \varepsilon (x_q \sin \theta_U - r_s \cos \theta_U) + \frac{1}{2} (x_d - x_q) \sin 2\theta_U + r_s \right]$$

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:  $M = M_\varepsilon + M_{dq}$

- »  $M_\varepsilon$  – основной электромагнитный момент  
(зависит от степени возбужденности ротора  $\varepsilon$ )
- »  $M_{dq}$  – реактивный момент / момент явнополюсности  
(зависит от соотношения  $x_d$  и  $x_q$ )

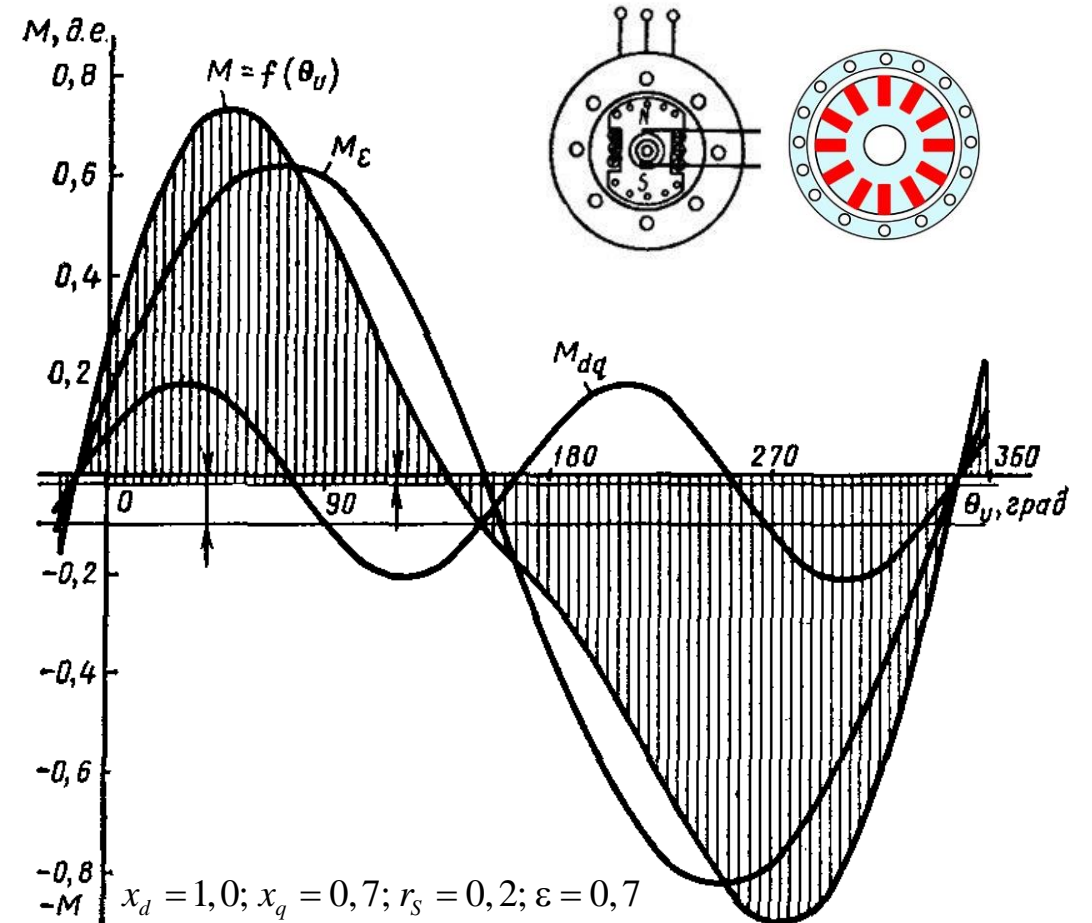
В СД с неявновыраженными полюсами  
(или с поверхностными ПМ)

$x_d = x_q$  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  $\theta_U$ ) положителен  $M_{dq} > 0$

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

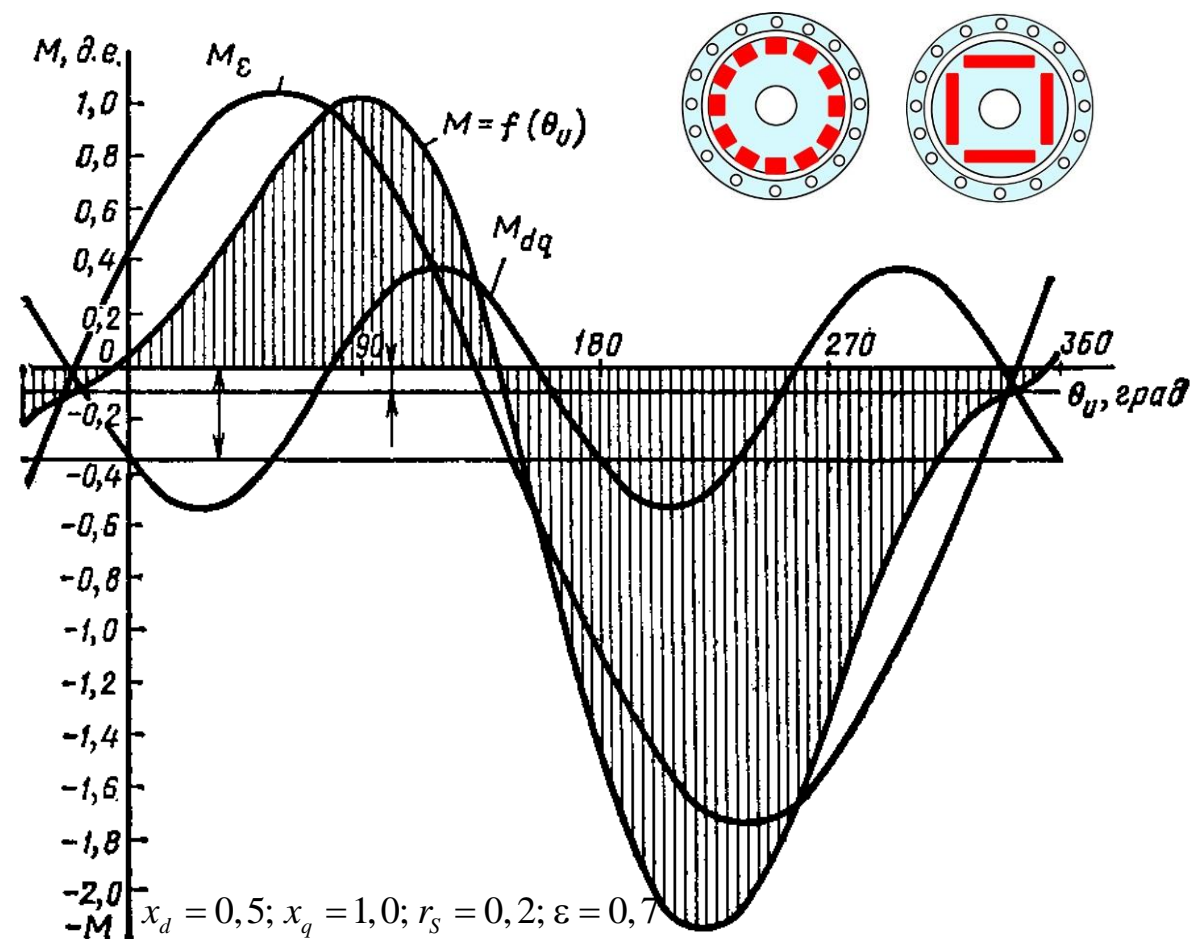


# Угловая характеристика синхронного микродвигателя

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

и реактивный момент при малых нагрузках (малых углах  $\theta_U$ ) 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  $M_{\varepsilon} = A \sin \theta_U + B \cos \theta_U + C = A_{\varepsilon} \sin(\theta_U + \alpha_{\varepsilon}) - M_{\varepsilon T}$

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

$\alpha_{\varepsilon}$  – 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  $U$

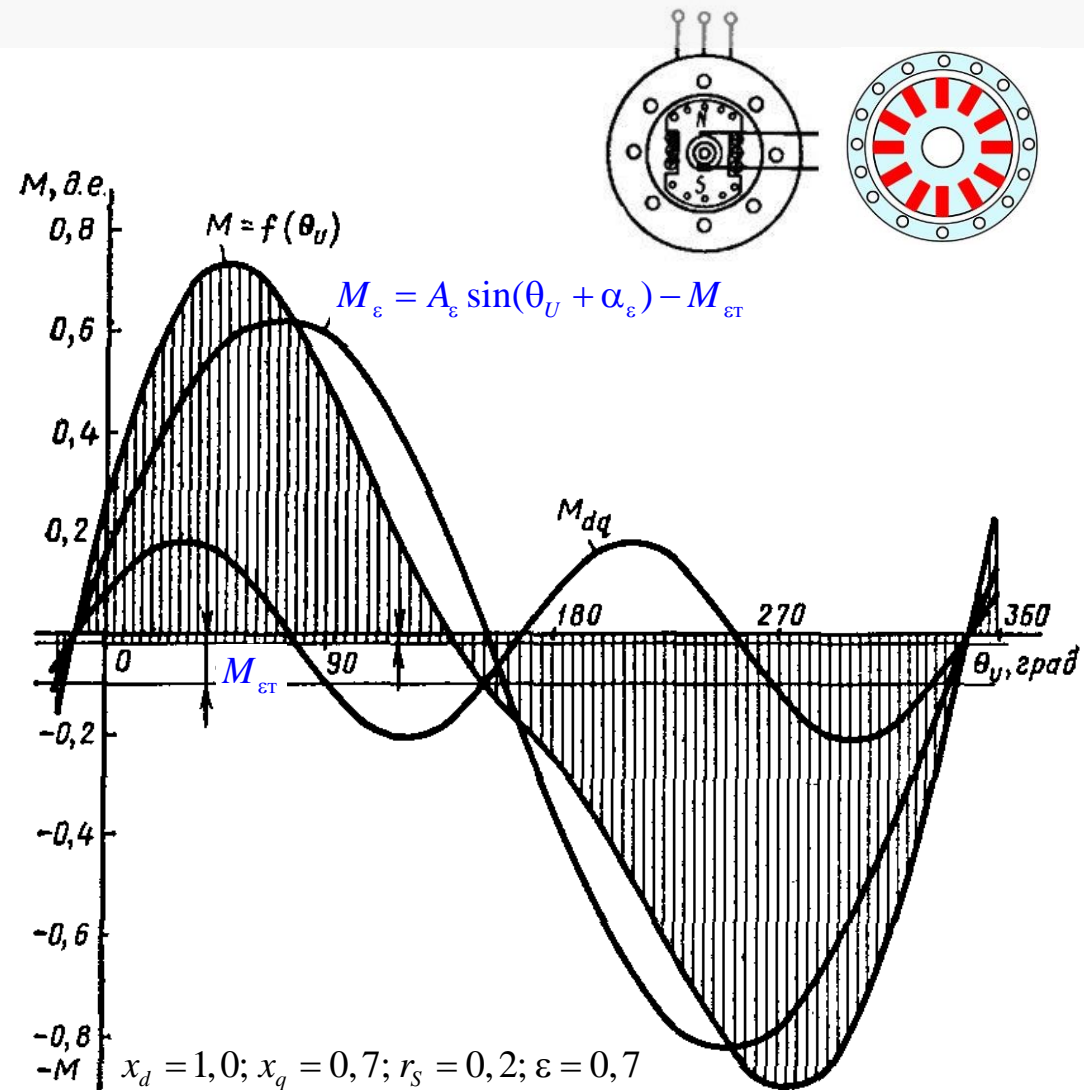
» причина возникновения  $M_{\varepsilon T}$  – потери в обмотке статора от токов, наводимых полем возбуждения (генераторный момент)

Электромагнитный момент изменяется по закону **sin** от угла  $\theta_U$

Но за счет  $r_s$  синусоида смещается влево на угол  $\alpha_{\varepsilon}$  и вниз на  $M_{\varepsilon T}$

# Составляющие момента

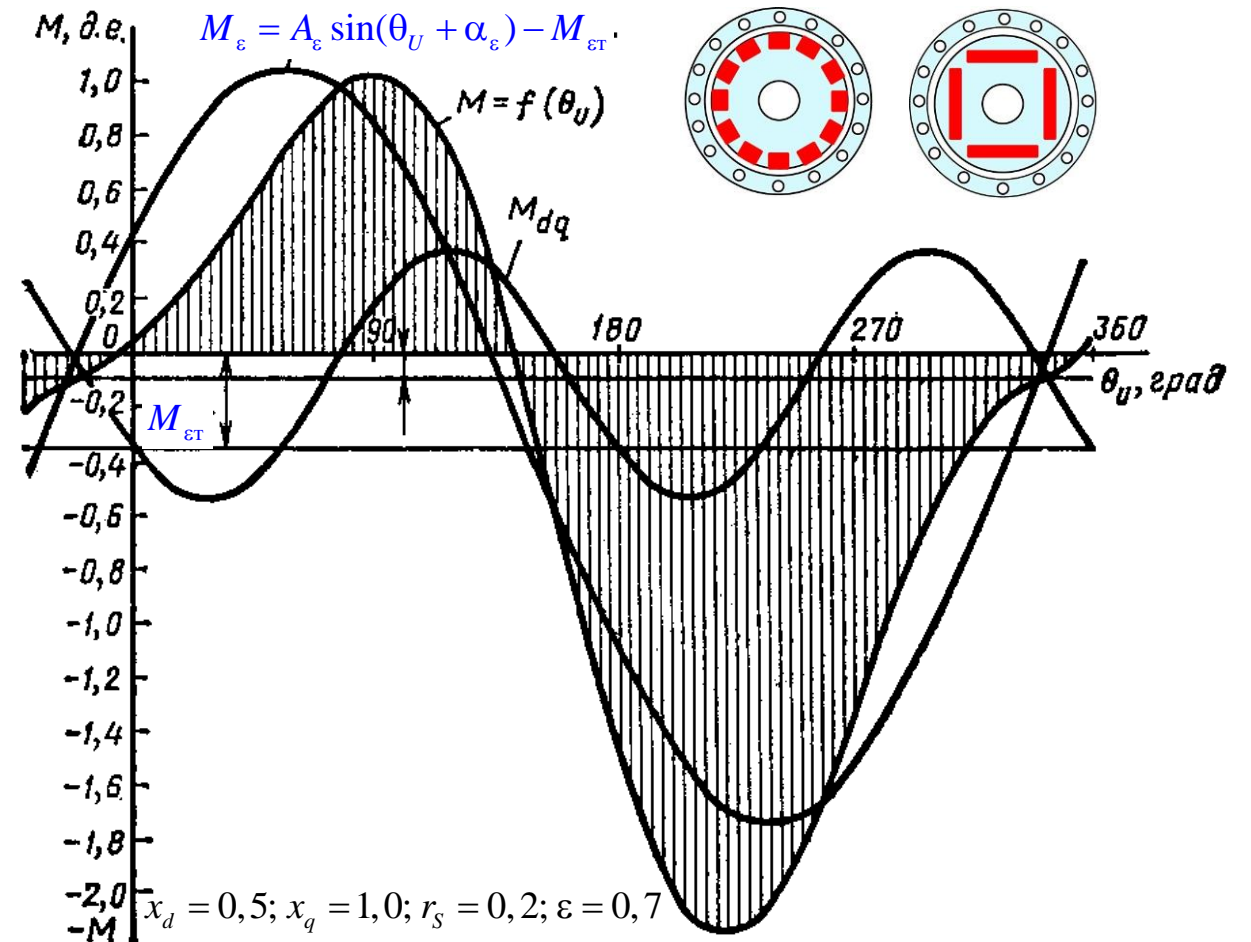
Вращающий момент при  $x_d > x_q$





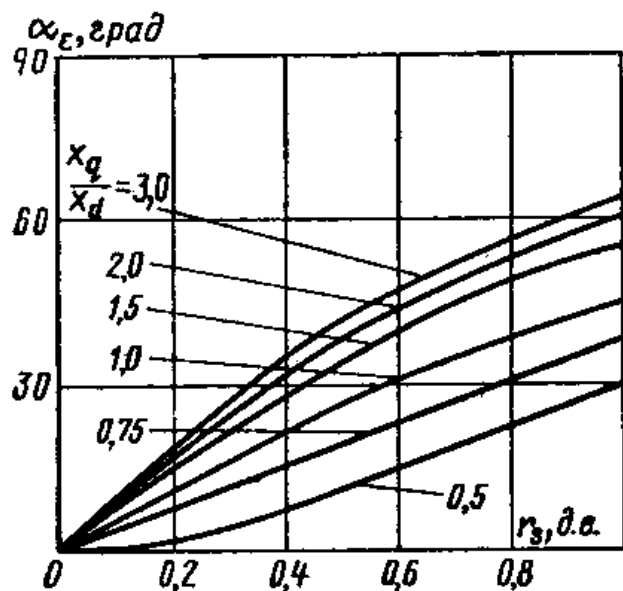
# Составляющие момента

Вращающий момент при  $x_d < x_q$

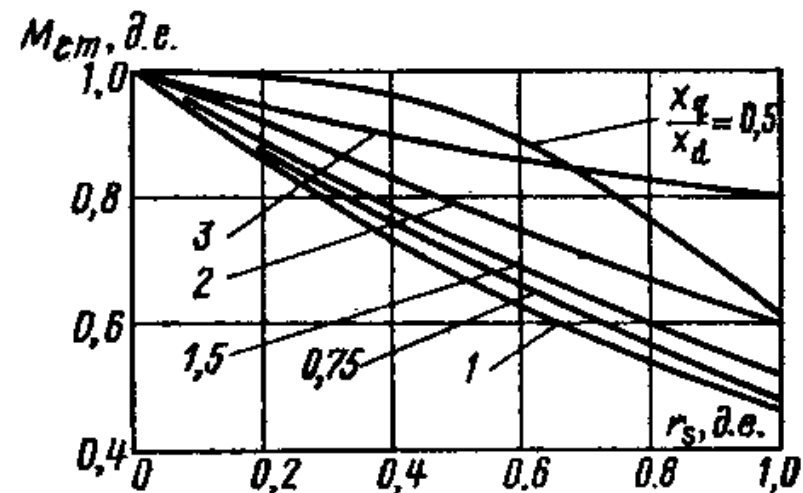


# Составляющие момента

Угол смещения синусоиды  $\alpha_\varepsilon$   
в зависимости от  $r_s$   
для разных СД



Величина максимального  
электромагнитного момента  $M_{эм}$   
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 
$$A_{dq} = \frac{mU^2 (x_d - x_q)}{2\Omega_c (r_s^2 + x_d x_q)^2} \sqrt{(x_d x_q - r_s^2)^2 + r_s^2 (x_d + x_q)^2}$$

$\alpha_{dq}$  – 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  $M_{dT}$

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

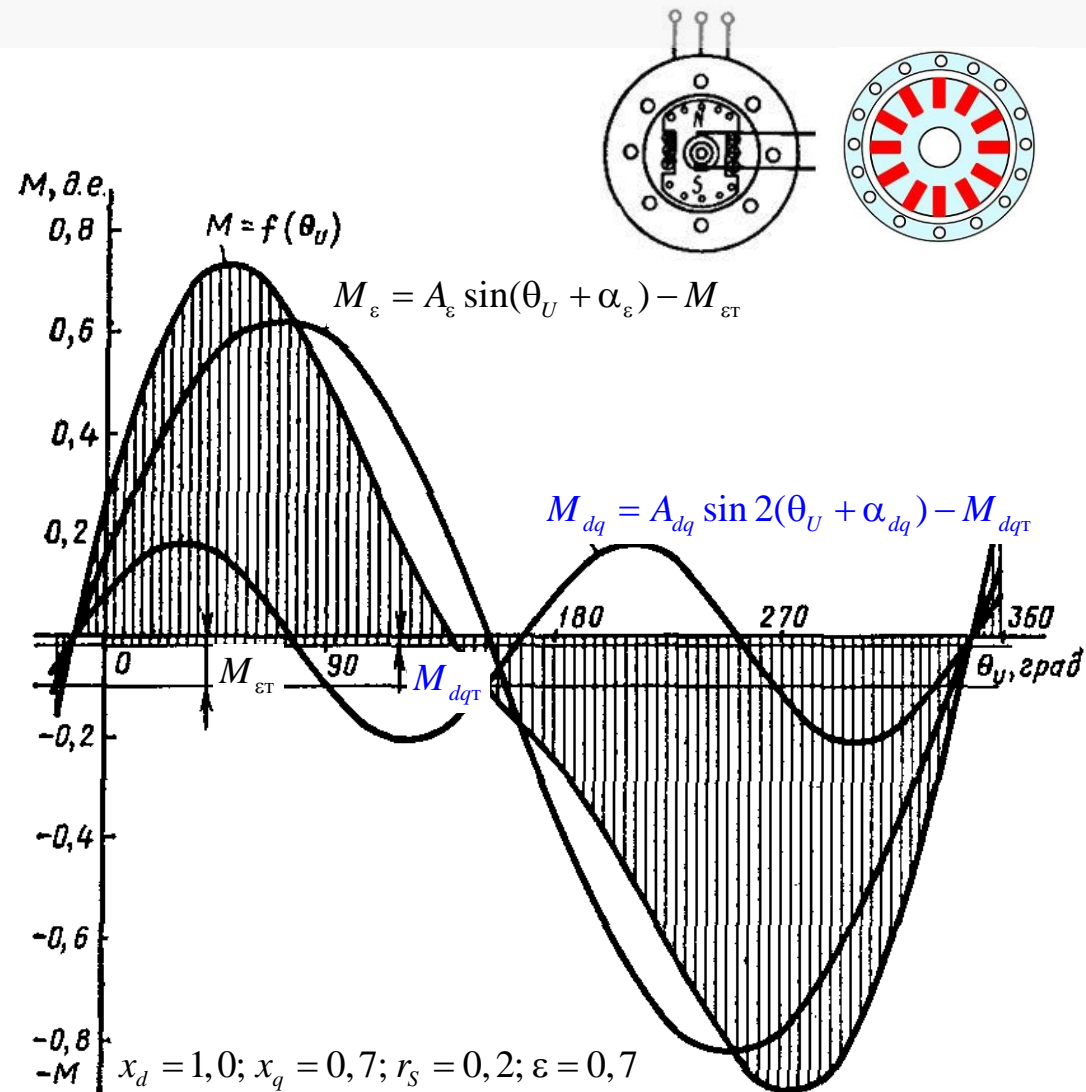
»  $M_{dqT}$  становится заметен лишь у СД с большим  $r_s$

Реактивный момент изменяется по закону **sin** от двойного угла  $\theta_U$

Но за счет  $r_s$  синусоида смещается влево на угол  $\alpha_{dq}$  и вниз на  $M_{dqT}$

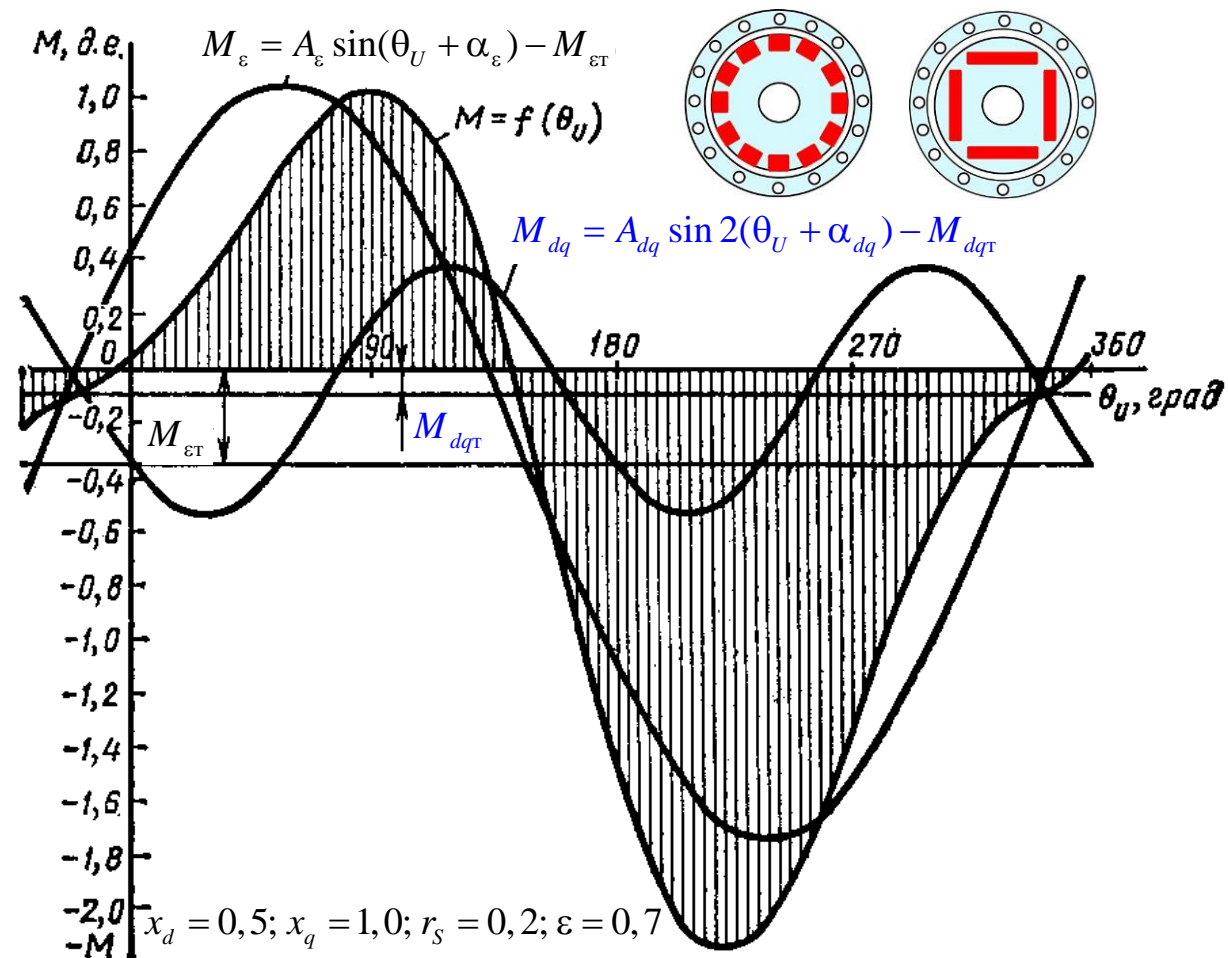
# Составляющие момента

Вращающий момент при  $x_d > x_q$



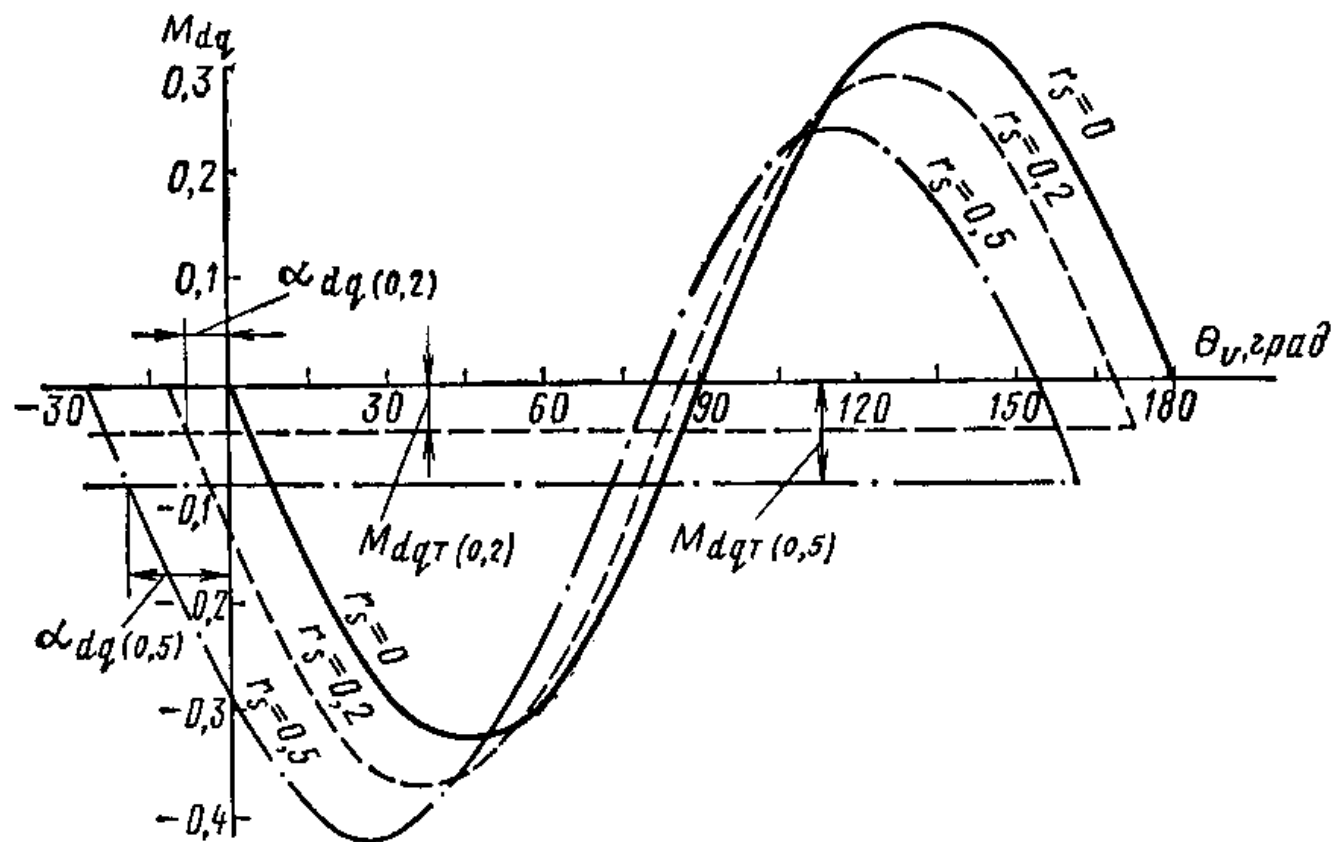
# Составляющие момента

Вращающий момент при  $x_d < x_q$



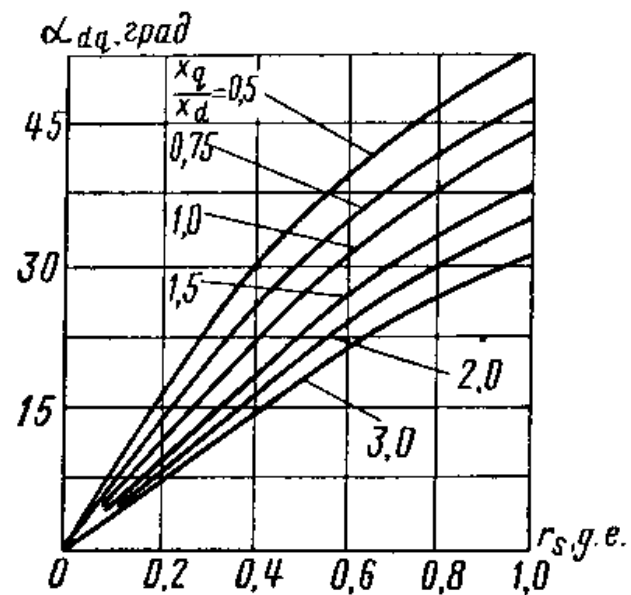
# Составляющие момента

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

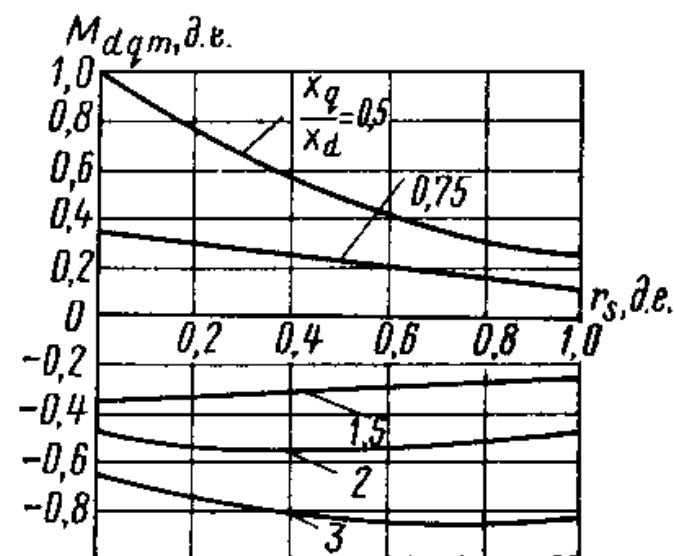


# Составляющие момента

Угол смещения синусоиды  $\alpha_{dq}$   
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

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

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

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

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

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

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

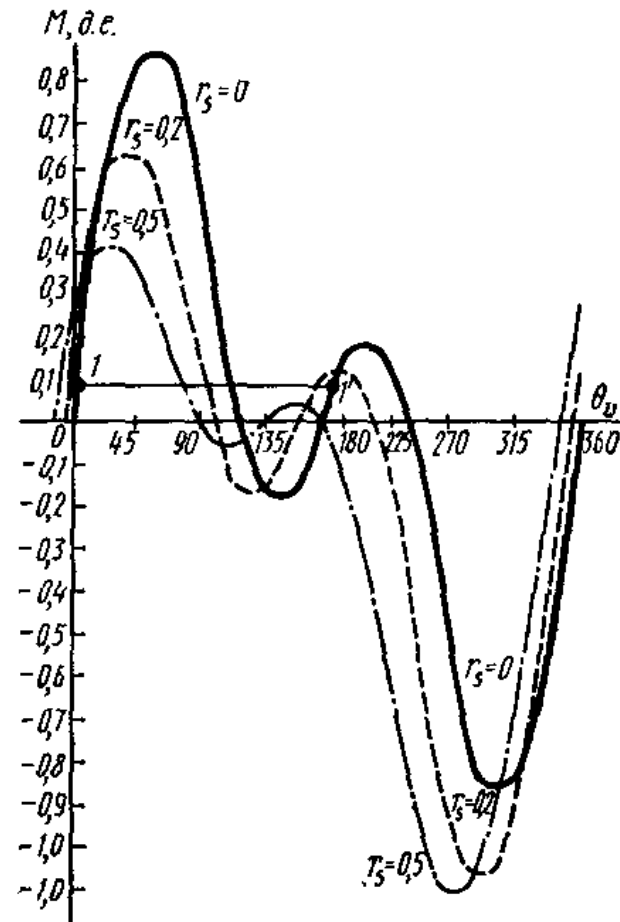
При увеличении  $r_s$  синусоиды смещаются влево (на  $\alpha_{\varepsilon}$  и  $\alpha_{dq}$ ) и вниз (на  $M_{\varepsilon}$  и  $M_{dq}$ )



# Результирующий момент

Если при слабой намагниченности амплитуда электромагнитного момента  $M_\varepsilon$  соизмерима с амплитудой реактивного момента  $M_{dq}$ , в результирующей кривой появляются две зоны устойчивой работы: рабочие точки 1 и 1' при разных углах нагрузки  $\theta_U$   
→ 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  $x_d = x_q = x_c$

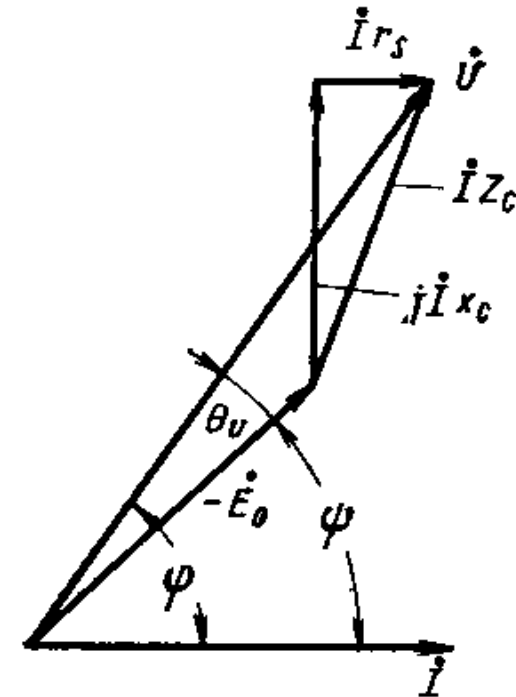
Полный ток статора  $I = \frac{U}{Z_c} \sqrt{1 - 2\varepsilon \cos \theta_U + \varepsilon^2}$

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  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\varepsilon$  приравняем нулю и найдем степень возбужденности ротора, обеспечивающую максимально возможный максимальный момент

$$\varepsilon_{M_{cm}} = \frac{Z_c}{2r_s} \quad M_{cmax} = \frac{mU^2}{4\Omega_c r_s}$$

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

На практике степень возбужденности  $\varepsilon$  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

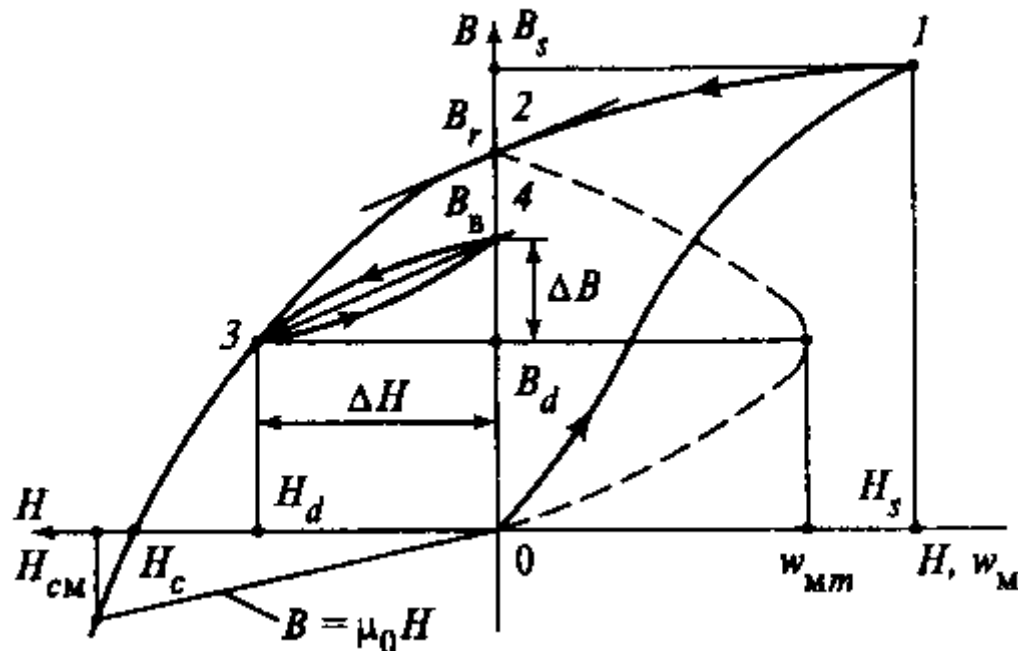


# Свойства постоянных магнитов

$\mu_{\text{ПМ}}$  – 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  $U_\mu$  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  $H_c$

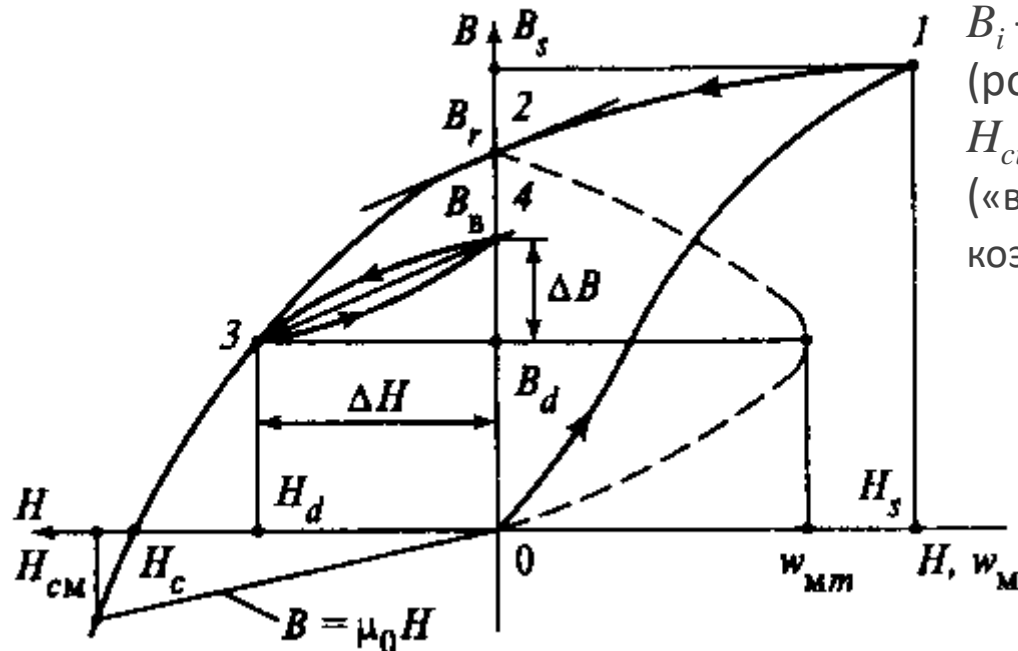
# Свойства постоянных магнитов

После первоначального намагничивания – «стабилизация» ПМ

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

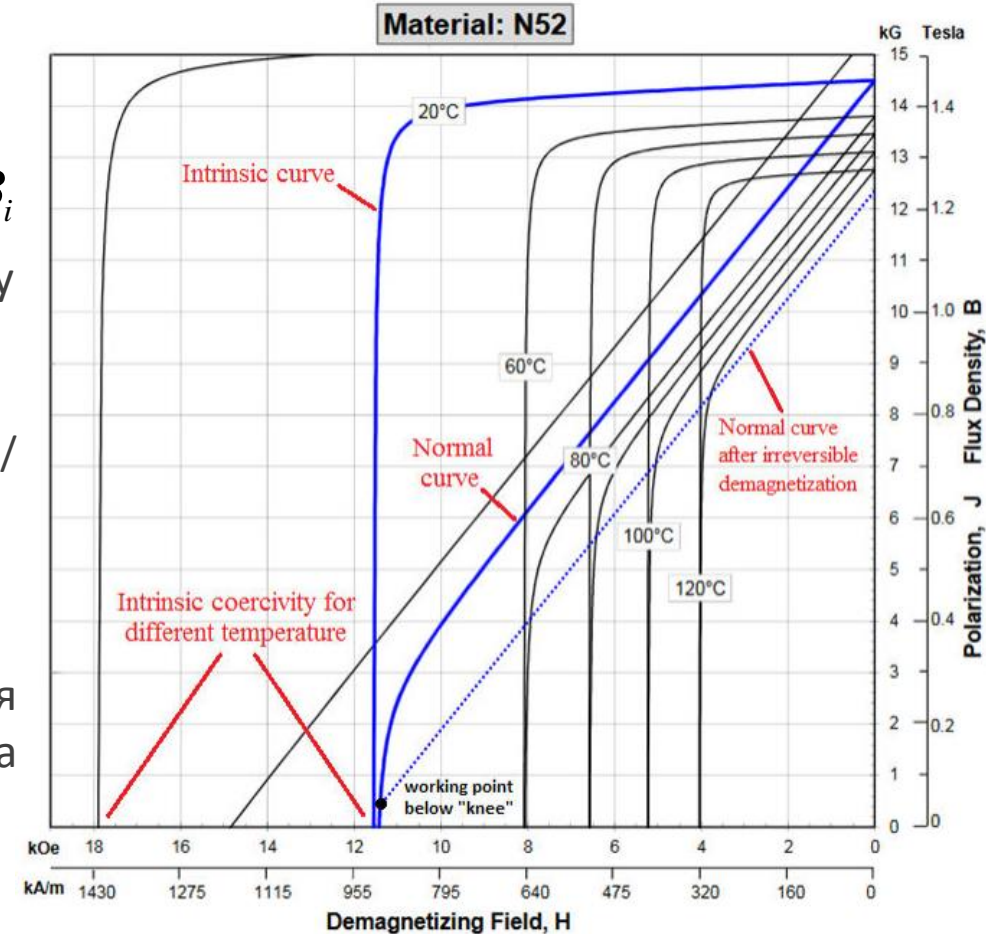
В англоязычной литературе используют другое представление

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



$B_i$  – 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.  $U_\mu$  и напряженность поля в магните  $H_M = 0$  (а индукция  $B = B_r$ )  
(при этом удельная энергия магнита  $BH/2 = 0$ , внешнее поле не создается)

Если создать зазор  $\delta$ , в нем возникнет магнитное поле с напряженностью  $H_\delta$

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

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

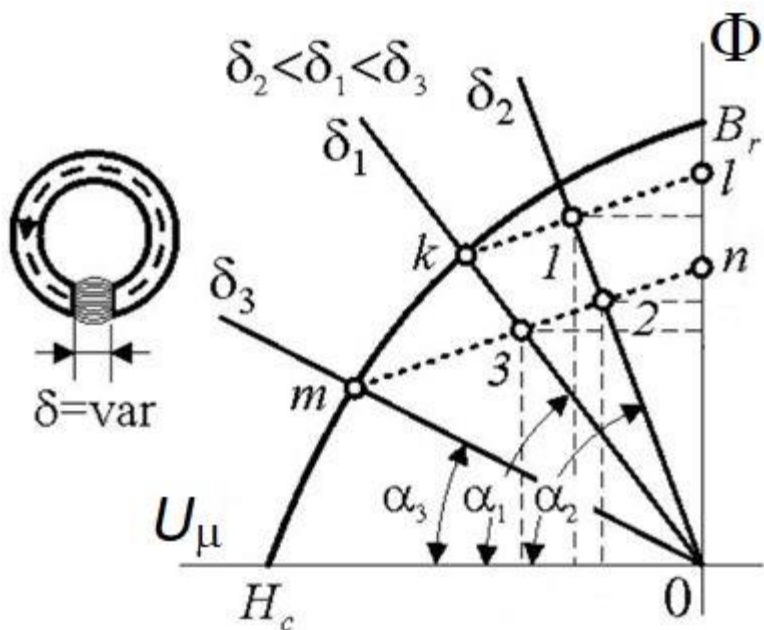
Что соответствует рабочей точке  $k$  на кривой размагничивания  
При этом индукция  $B_k < B_r$  (происходит размагничивание)

(если затем зазор  $\delta$  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  $\alpha$

где  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Phi_\delta}{U_{\mu\delta}} = \frac{B_\delta S_\delta}{H_\delta \delta} = \mu_0 \frac{S_\delta}{\delta} = \Lambda_\delta$  Действительно, по закону Ома:  $\Phi_\delta = \Lambda_\delta U_{\mu\delta}$

Чем больше  $\delta$ , тем меньше проводимость зазора  $\Lambda_\delta$ ,  
тем меньше угол наклона кривой  $\alpha$ , тем сильнее размагничивание ПМ

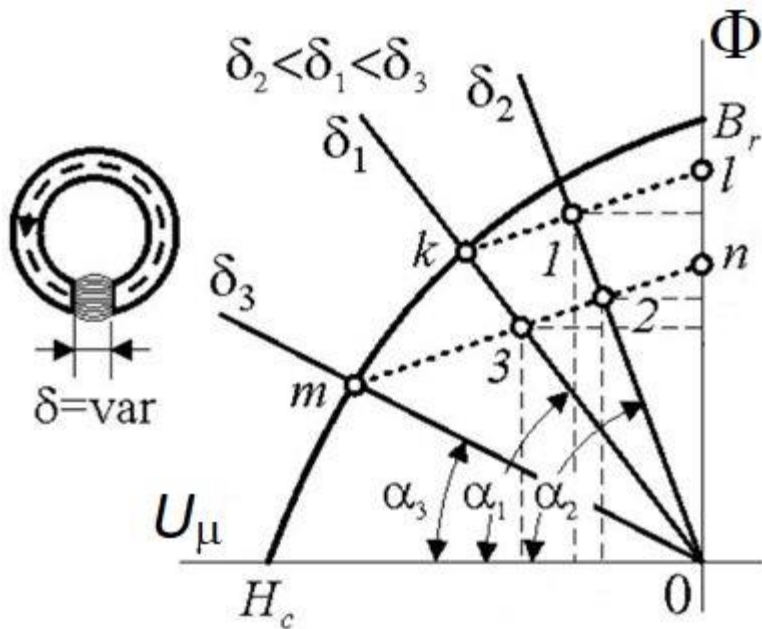




# Работа постоянных магнитов в электрической машине

При этом важна последовательность размагничивания магнита

- » Если вначале создан зазор  $\delta_1$ , то рабочая точка по кривой размагничивания – в т.  $k$
- » Если затем уменьшить зазор до  $\delta_2$ , то рабочая точка по прямой возврата  $kl$  – в т. 1
- » Если затем увеличить зазор до  $\delta_3$ , то рабочая точка по кривой размагничивания – в т.  $m$
- » Если опять уменьшить зазор до  $\delta_1$ , то рабочая точка по прямой возврата  $mn$  – в т. 3
- » Если далее уменьшить зазор до  $\delta_2$ , 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

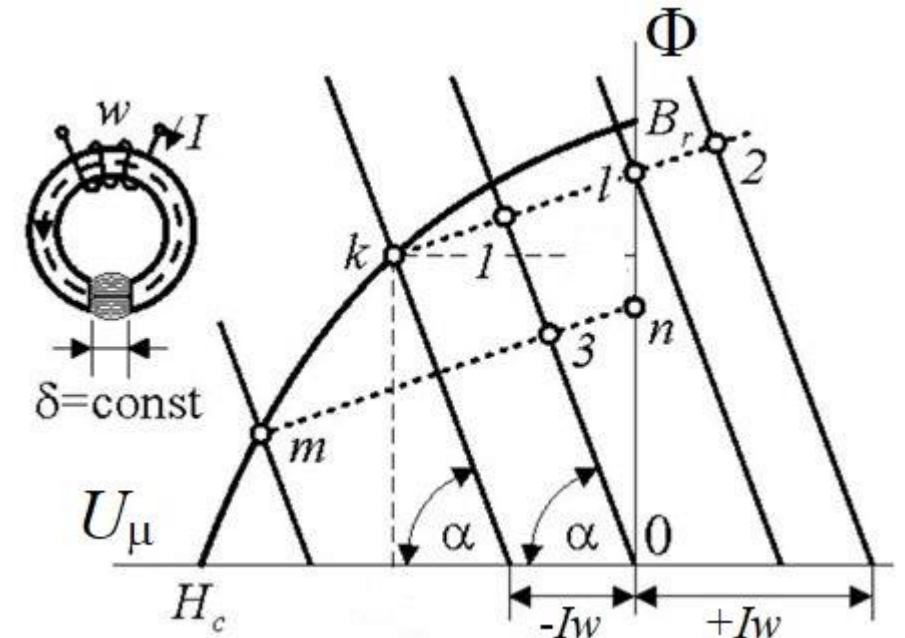
Теперь добавим обмотку с числом витков  $w$  и током  $I$  (модель МДС реакции якоря)

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

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

К  $U_\mu$  поля в магните  $U_{\mu M} = H_\delta \delta$  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. 1 (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
  - »  $\mu_{\text{ПМ}}$  – 2...5  $\mu_0$
  - »  $w_{\text{ПМ}}$  – 4...40 кДж/м<sup>3</sup>
- » стабильность магнитных параметров (температурный коэф-т -0,02 %/°C)
  - » рабочая температура до 520°C ( $t^\circ$  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  $\mu_0$
  - »  $w_{\text{пм}}$  – 5...15 кДж/м<sup>3</sup>
- » 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/м<sup>3</sup>
  - » 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)

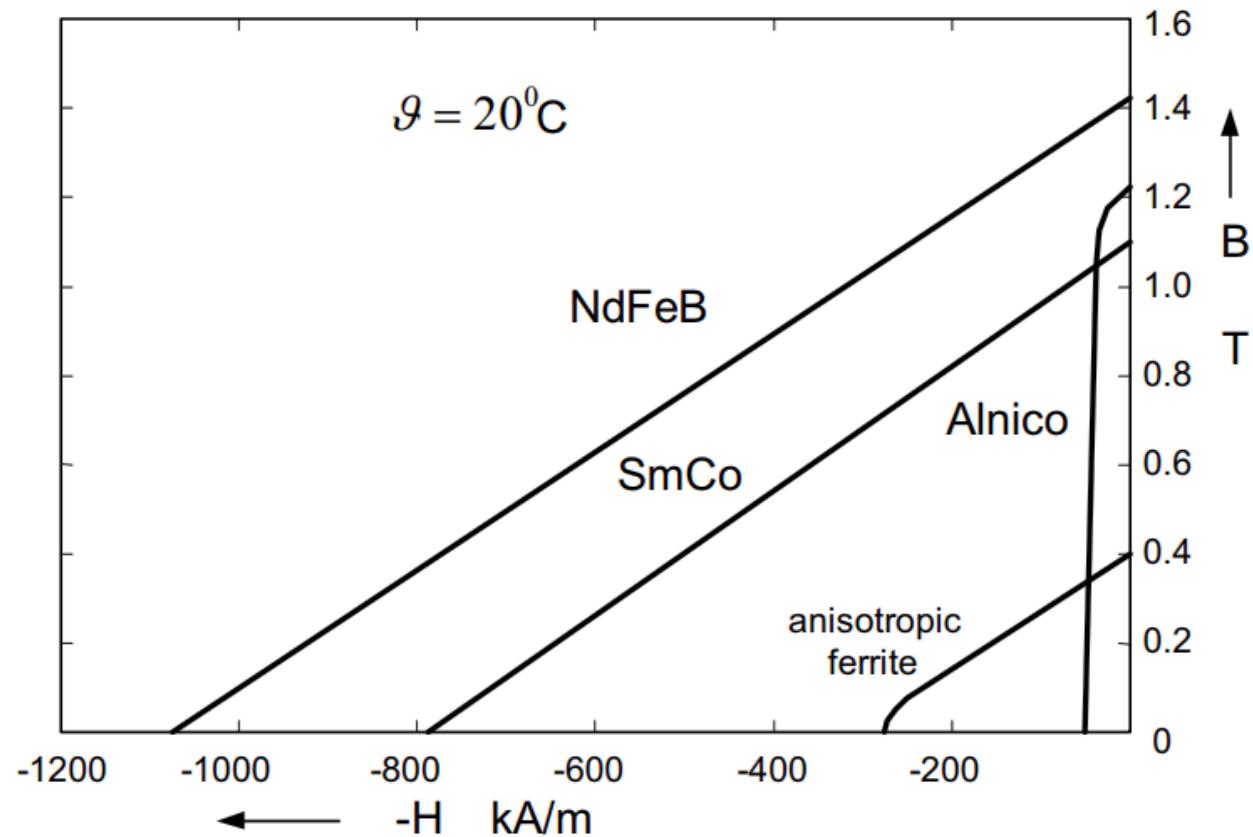
Еще больше плотность магнитной энергии

- »  $B_r$  – 1,1...1,2 Тл
  - »  $H_c$  – 600...900 кА/м
  - »  $\mu_{\text{ИМ}}$  – 1,05...1,1  $\mu_0$
  - »  $w_{\text{ИМ}}$  – 100...150 кДж/м<sup>3</sup>
- » производство дешевле SmCo
  - » прочность выше, чем у SmCo
  - » магнитные свойства лучше SmCo, но только при комнатной  $t^\circ$
  - » при повышении  $t^\circ$  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/](http://elmech.mpei.ac.ru/EMAU/)  
([srv0-5.mpei.ac.ru/EMAU/](http://srv0-5.mpei.ac.ru/EMAU/))

