

Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах

2.2. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

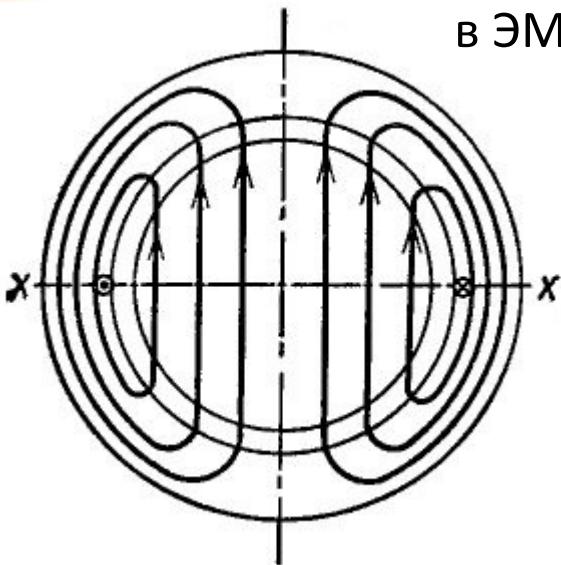
Вращающееся магнитное поле

Назначение обмотки

- создание вращающегося магнитного поля
- наведение 3-фазной системы ЭДС

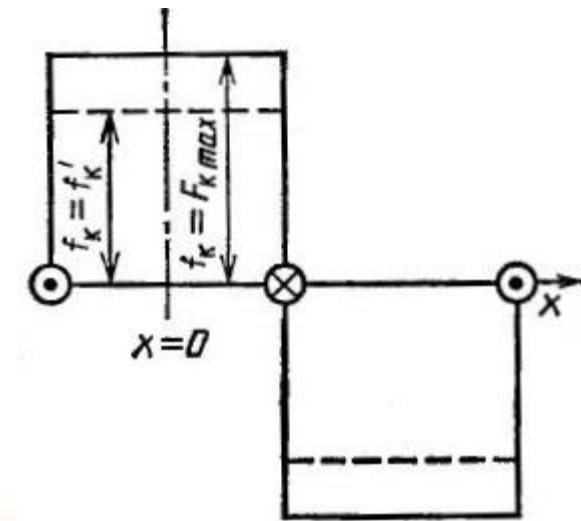
Закон полного тока: магнитодвижущая сила (iw) = падению магнитного напряжения в цепи U_μ

МДС катушки с w_k от тока $i_k = \sqrt{2}I_k \sin \omega t$



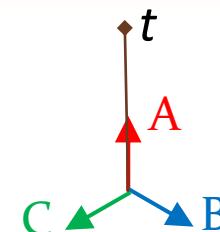
в ЭМ без насыщения с гладким равномерным зазором

- МДС для любой силовой линии = $i_k w_k$
- U_μ в зазоре = $i_k w_k / 2$
- везде в зазоре МДС $f_k = \text{const}$
- величина МДС $f_k = F_{km} \sin \omega t$
- МДС на периоде – прямоугольная пульсирующая симметричная волна с амплитудой $F_{km} = \frac{1}{2} \sqrt{2} I_k w_k$



Вращающееся магнитное поле

МДС обмотки = сумма МДС катушек

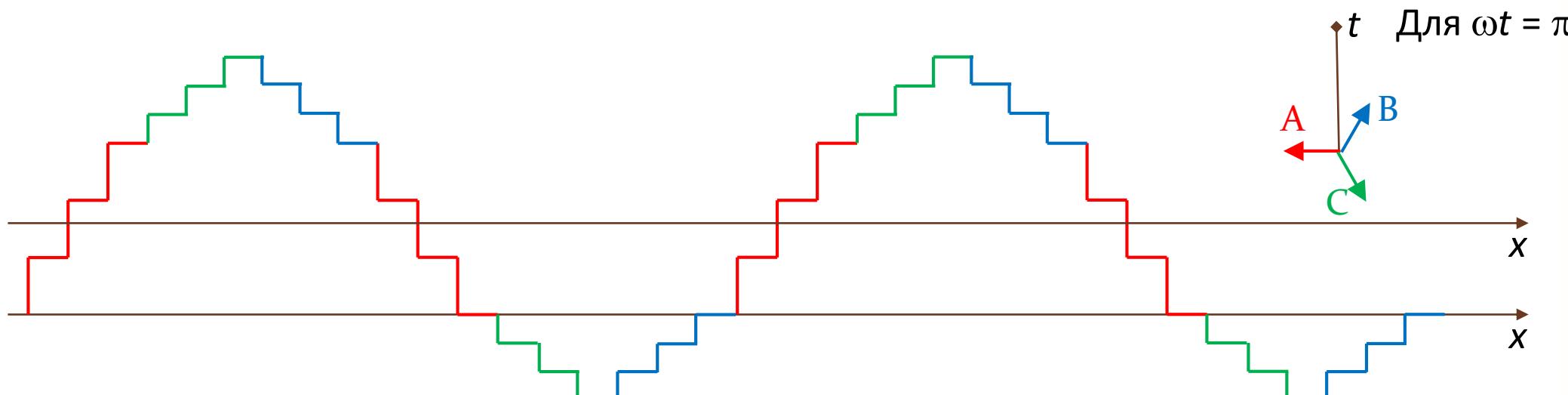


Для $\omega t = \pi/2$ и $I_m = 1 \text{ A}$

$$i_A = 1 \cdot \sin \omega t = 1 \text{ A}$$

$$i_B = 1 \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) = -0,5 \text{ A}$$

$$i_C = 1 \cdot \sin(\omega t + 4\pi/3) = -0,5 \text{ A}$$



A	A	A	Z	Z	Z	B	B	B	X	X	X	C	C	C	Y	Y	Y	A	A	A	Z	Z	Z	B	B	B	X	X	X	C	C	C	Y	Y	Y
A	Z	Z	Z	B	B	B	X	X	X	C	C	C	Y	Y	Y	A	A	A	Z	Z	Z	B	B	B	X	X	X	C	C	C	Y	Y	Y		

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

Двухслойная обмотка: скачок МДС – полный ток паза

Вращающееся магнитное поле

Гармонический анализ (разложение f_k в ряд Фурье)

- основная гармоника с $\tau_1 = \tau$ обмотки
- высшие гармоники (нечетные) с $\tau_v = \tau/v$

Основная гармоника МДС катушки

(для прямоугольной волны с началом координат на оси катушки)

$$f_k = F_{k1} \cos \frac{\pi x}{\tau} \sin \omega t$$

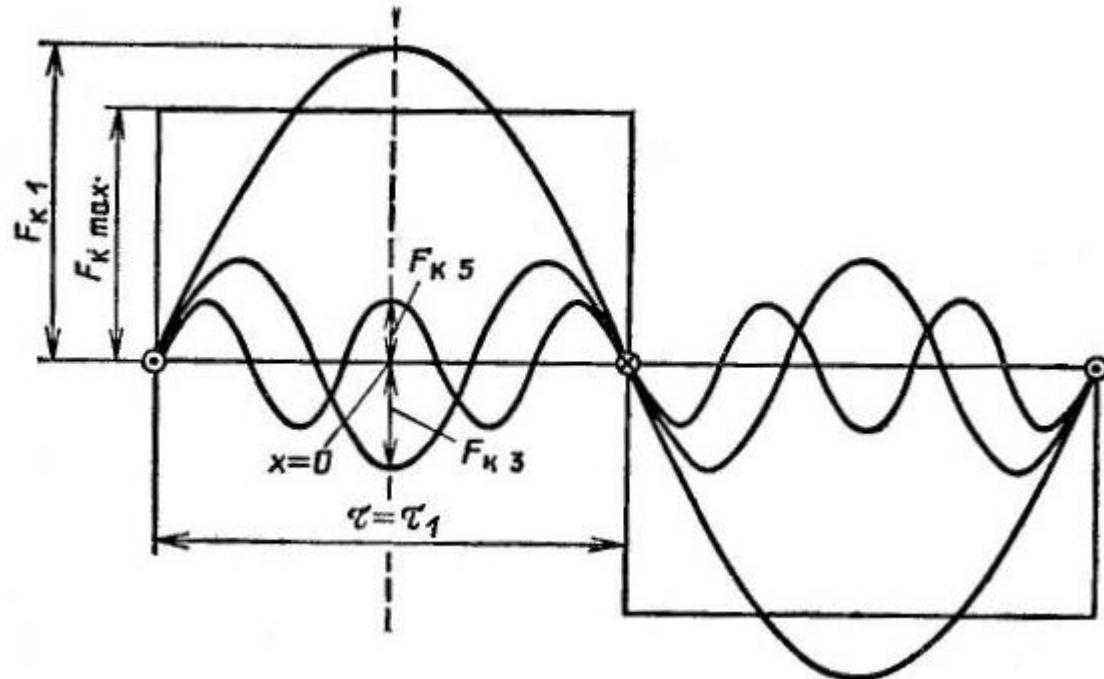
Амплитуда 1 гармоники МДС катушки

$$F_{k1} = \frac{4}{\pi} F_{km} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi \cdot 2} I_k w_k = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_k w_k$$

Высшие гармоники (для прямоугольной волны)

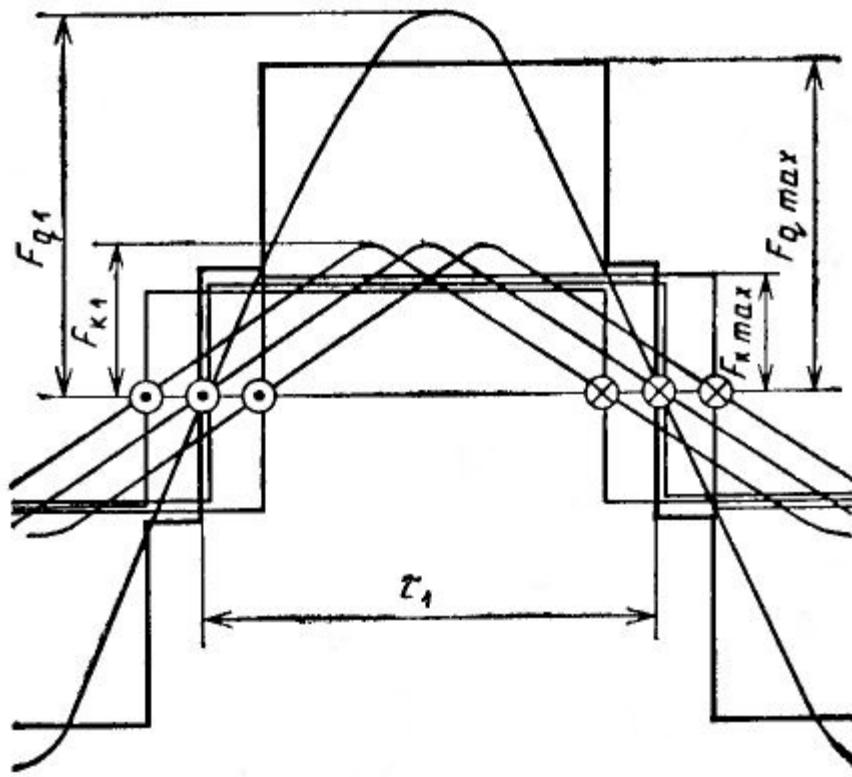
$$f_{kv} = F_{kv} \cos \frac{v\pi x}{\tau} \sin \omega t$$

$$F_{kv} = \frac{1}{v} F_{k1} = \frac{2\sqrt{2}}{v\pi} I_k w_k$$



Вращающееся магнитное поле

МДС катушечной группы из q катушек
= сумме МДС катушек, сдвинутых на t_z



Аналогично, 1 гармоника МДС катушечной группы

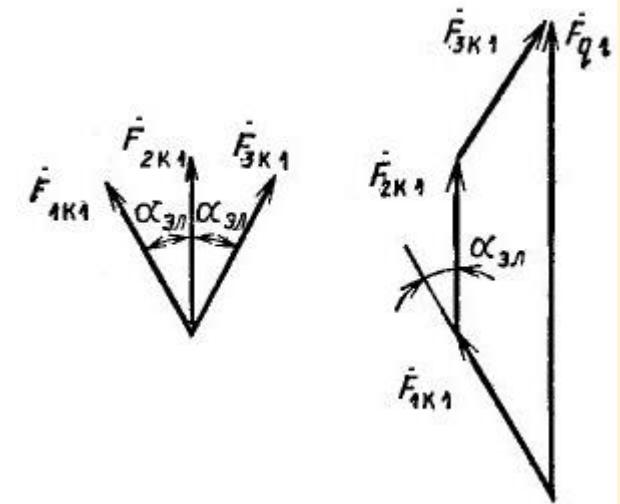
$$\dot{F}_{q1} = \sum_q \dot{F}_{k1}$$

Тогда амплитуда
МДС катушечной
группы

$$F_{q1} = qF_{k1}k_{p1}$$

где k_{p1} – коэффициент распределения

$$k_{p1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}}$$



$$k_{pv} = \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{q \sin \frac{v\pi}{2mq}}$$

Вращающееся магнитное поле

Для двухслойной обмотки:

каждый слой – элементарная обмотка с F'_q

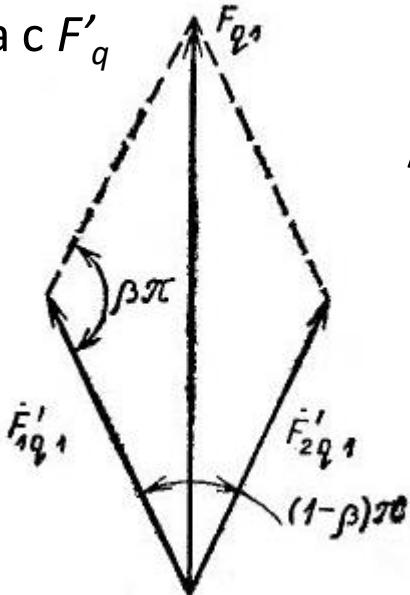
Оси элементарных катушечных групп сдвинуты на угол

$$(\tau - y) \frac{\pi}{\tau} = (1 - \beta)\pi$$

$\beta = \frac{y}{\tau}$ – относительное укорочение шага катушки

Фаза обмотки: $2p$ катушечных групп на окружности

МДС фазы: $2p$ МДС катушечных групп с одинаковыми F_{q1}



Тогда полная МДС катушечной группы

$$\dot{F}_{q1} = \dot{F}'_{1q1} + \dot{F}'_{2q1}$$

Амплитуда полной МДС катушечной группы

$$F_{q1} = 2F'_{q1} \sin \frac{\pi\beta}{2} = 2qF_{k1}k_{p1}k_{y1}$$

k_{y1} – коэффициент укорочения

$$k_{y1} = \sin \frac{\pi\beta}{2}$$

$$k_{yv} = \sin \frac{v\pi\beta}{2}$$

С учетом $F_{k1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_k w_k$ $w = 2pqw_k / a$ $I_k = I / a$

запишем амплитуду МДС фазы $F_{\phi1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi p} I_w k_{o1}$

$k_{o1} = k_{y1}k_{p1}$ – обмоточный коэффициент

$$F_{\phi v} = \frac{2\sqrt{2}}{v\pi p} I_w k_{ov}$$

Вращающееся магнитное поле

Волна МДС фазы

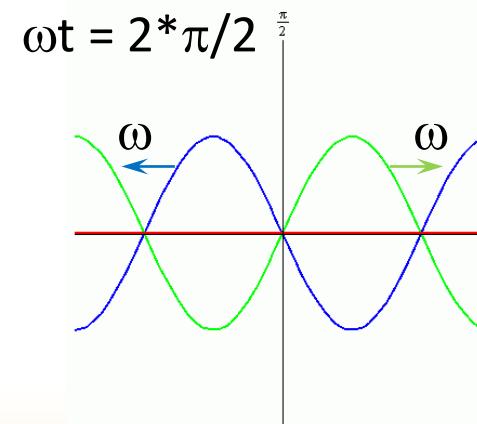
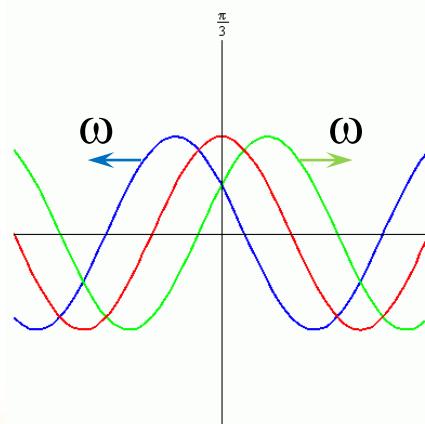
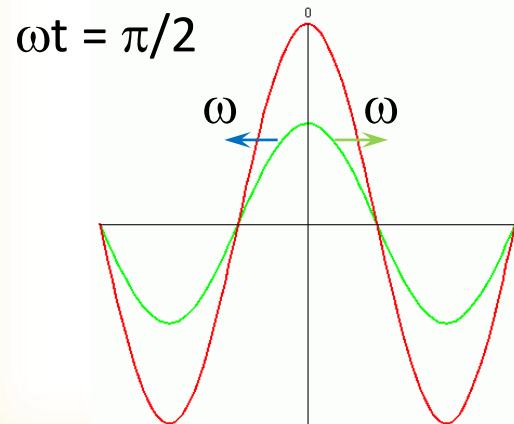
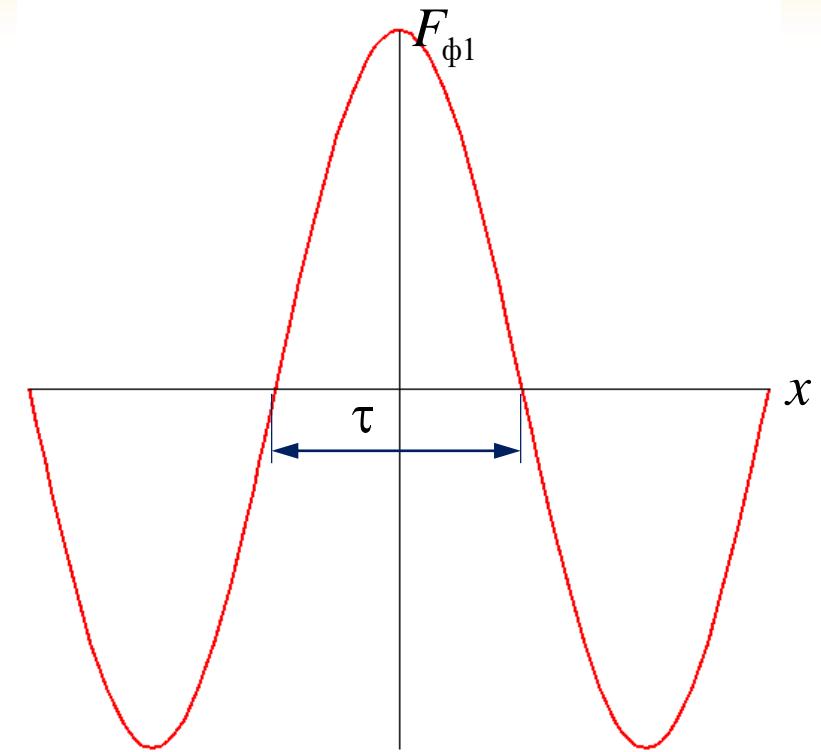
Значение МДС фазы в точке x в момент времени t

$$f_{\phi 1} = F_{\phi 1} \cos \frac{\pi x}{\tau} \sin \omega t \quad \text{где амплитуда } F_{\phi 1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi p} I_w k_{o1}$$

– уравнение **пульсирующей** [стоячей] волны

Можно разложить на 2 **вращающиеся** волны

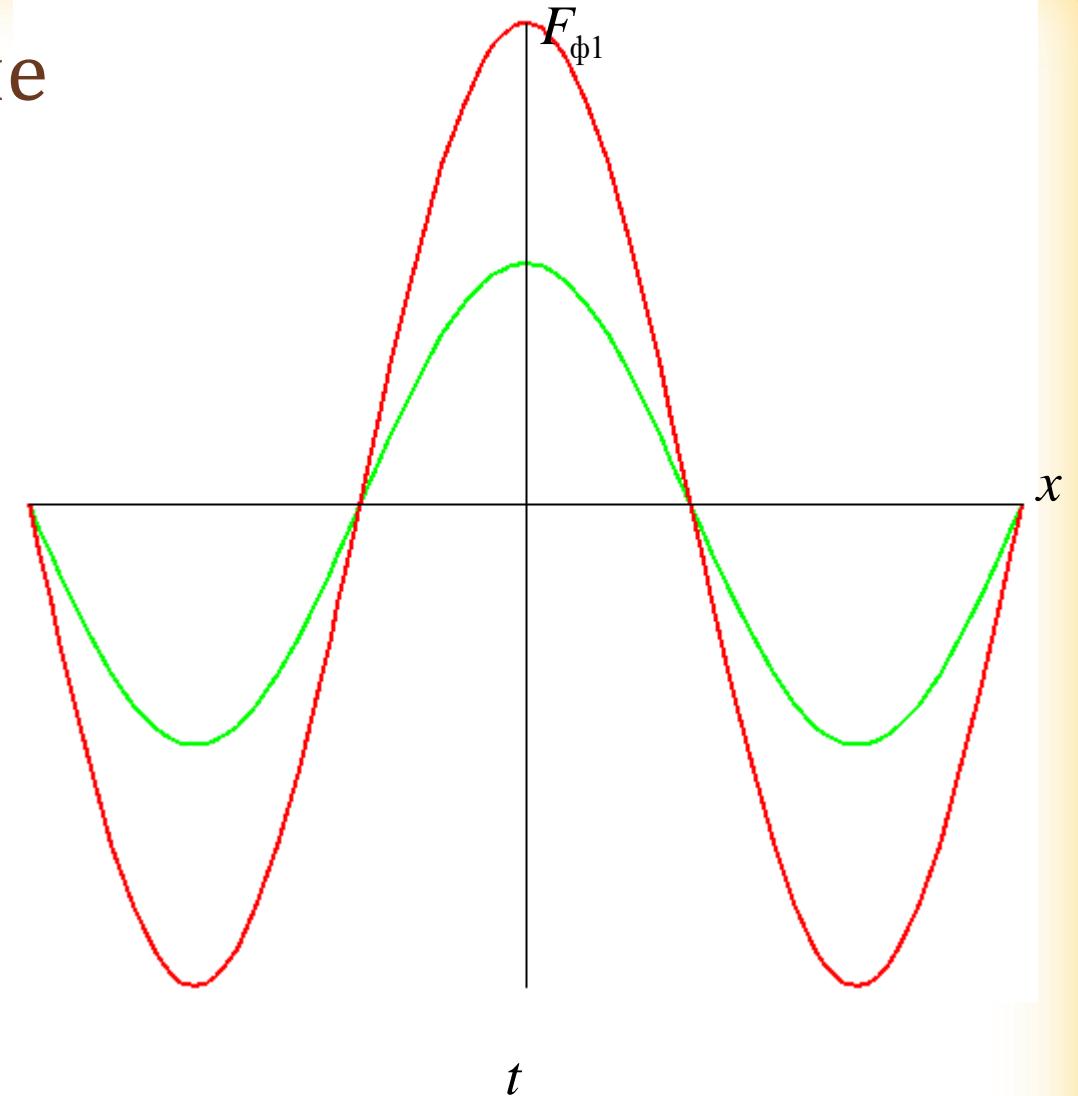
$$f_{\phi 1} = \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau} \right) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\pi x}{\tau} \right) = f_{\text{пр1}} + f_{\text{обр1}}$$



Вращающееся магнитное поле

Волна МДС фазы

Прямая и обратная волна МДС фазы



Вращающееся магнитное поле

Волна МДС фазы

Скорость перемещения волны $f_{\text{пр1}} = \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right)$ $f_{\text{прv}} = \frac{F_{\phi v}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{v\pi x}{\tau}\right)$

Выберем точку на волне: $\omega t - \frac{\pi x}{\tau} = \text{Const}$ Ее координата, м $x = \omega t \frac{\tau}{\pi} - \text{Const} \cdot \frac{\tau}{\pi}$

Скорость ее перемещения, м/с $\frac{dx}{dt} = \omega \frac{\tau}{\pi} = 2\pi f \frac{\tau}{\pi} = 2\tau f$

Угловая скорость, рад/с $\Omega = \frac{2\pi}{p} f = \frac{\omega}{p}$ $\Omega_v = \frac{\omega}{vp}$

Частота вращения, об/мин $n = \frac{60}{2\pi} \frac{2\pi}{p} f$ $n = \frac{60f}{p}$ «синхронная частота вращения»

Для частоты $f = 50$ Гц

Для обратной волны $\Omega_{\text{обр}} = -\frac{\omega}{p}$

p	1	2	3	4	5	6
n_1	3000	1500	1000	750	600	500

Вращающееся магнитное поле

МДС 3-фазной обмотки

Фазные обмотки смещены в пространстве на 120° (эл.)

Их токи (и МДС) смещены во времени на 120°

или для прямой и обратной волны

$$f_{A1} = \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi x}{\tau}\right)$$

$$f_{B1} = \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi x}{\tau} - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$f_{C1} = \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi x}{\tau} - \frac{8\pi}{3}\right)$$

$$f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \frac{\pi x}{\tau} \sin \omega t$$

$$f_{B1} = F_{\phi 1} \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$f_{C1} = F_{\phi 1} \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} - \frac{4\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Прямые волны фаз – совпадают

Обратные волны – взаимно уничтожаются
(синусоиды, сдвинутые на $1/3$ периода)

Тогда, МДС 3-фазной обмотки

$$f_1 = f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} = 3f_{\phi 1}$$

Вращающееся магнитное поле

МДС 3-фазной обмотки

$$f_1 = 3 \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi p} I_w k_{o1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right)$$

– синусоидальная волна, вращающаяся с $n = \frac{60f}{p}$

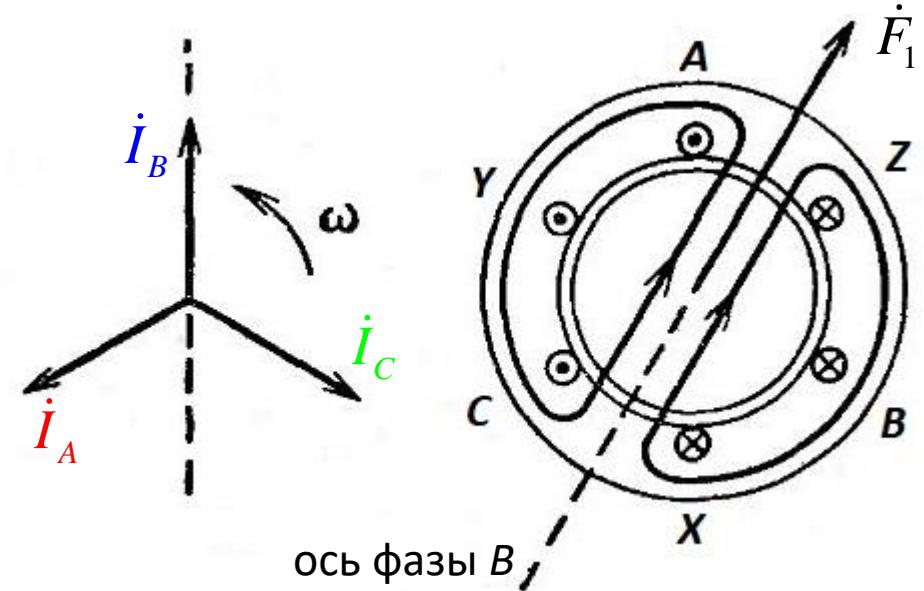
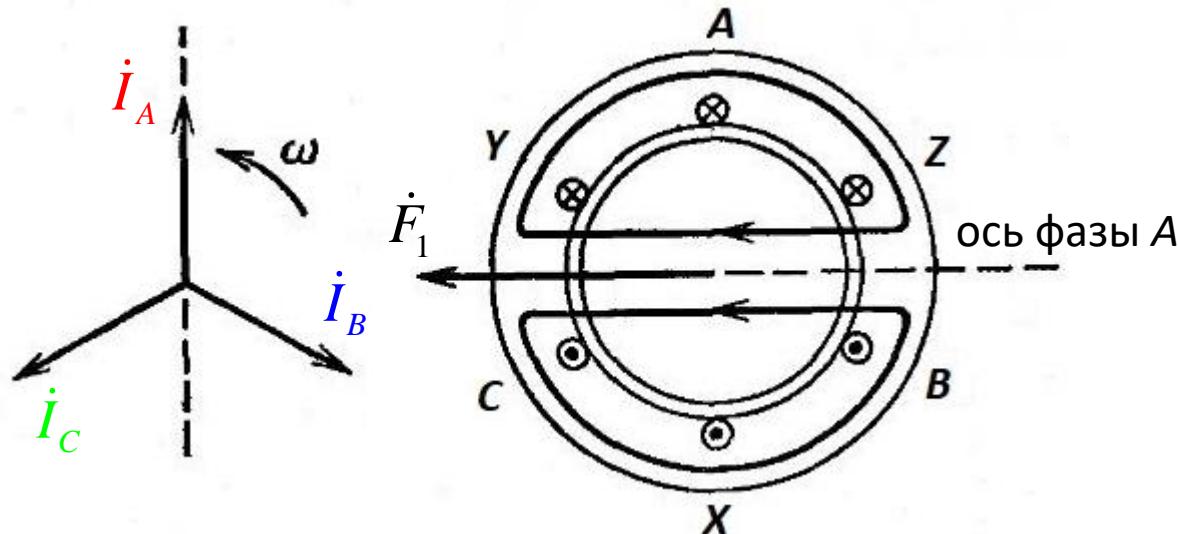
При равномерном зазоре

волна МДС \rightarrow волна м. поля (B)

$$B_1 = \frac{\mu_0 F_{1m}}{\delta} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) = B_{1m} \sin(\omega t - p\gamma)$$

«круговое магнитное поле»

Направление вращения поля в пространстве определяется чередованием фаз во времени



Вращающееся магнитное поле

МДС 3-фазной обмотки

$$f_1 = 3 \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi p} I_w k_{o1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right)$$

– синусоидальная волна, вращающаяся с $n = \frac{60f}{p}$

При равномерном зазоре
волна МДС \rightarrow волна м. поля (B)

$$B_1 = \frac{\mu_0 F_{1m}}{\delta} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) = B_{1m} \sin(\omega t - p\gamma)$$

«круговое магнитное поле»

Высшие гармонические МДС $f_v = \frac{3\sqrt{2}}{v\pi p} I_w k_{ov} \sin\left(\omega t - \frac{v\pi x}{\tau}\right)$

для разных v суммирование аргументов \sin проходит по-разному

- v кратные 3 – отсутствуют для $m=3$
- существуют только $v = 1+2m$ [ц.ч.]
(-5, +7, -11, +13, -17, +19 ... для $m=3$)
- знак показывает направление вращения
- подавляются подбором $\beta = y/\tau$ ($k_{yv} \rightarrow 0$)
- важны только «зубцовые» гармоники
 $v = 1+2mq$ [ц.ч.]