
Электрические машины

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах



2.1. ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обмотки машин переменного тока

Электромеханический преобразователь энергии

- электрический генератор $P_{\text{мех}} \rightarrow P_{\text{эл}}$ (и ΣP)
- электрический двигатель $P_{\text{эл}} \rightarrow P_{\text{мех}}$ (и ΣP)
- электромашинный преобразователь $P_{\text{эл1}} \rightarrow P_{\text{эл2}}$ через $P_{\text{мех}}$ (и ΣP)
(род тока AC-DC-AC, частота U_{AC} , величина U_{DC})

Электрические машины переменного тока

- синхронные
- асинхронные

Конструкция ЭМ

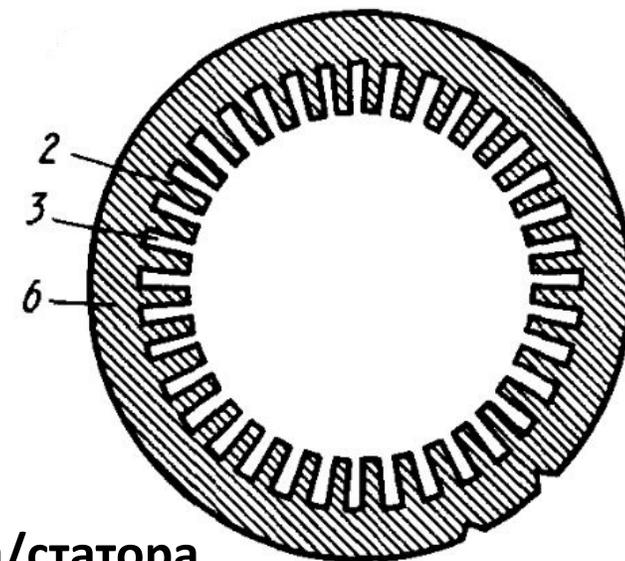
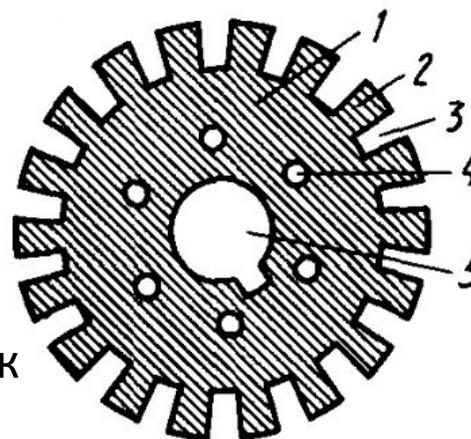
- статор
- ротор
- [подш.щит]

статор

- сердечник
- обмотка
- [корпус]

ротор

- сердечник
- обмотка
- [вал]



лист ротора/статора

- зубец
- паз
- ярмо

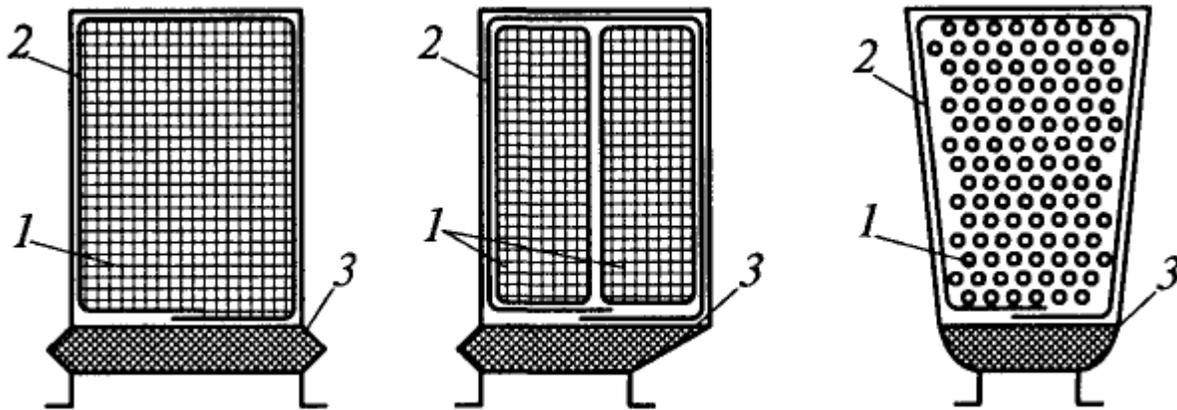
Обмотки машин переменного тока

Статор машины переменного тока

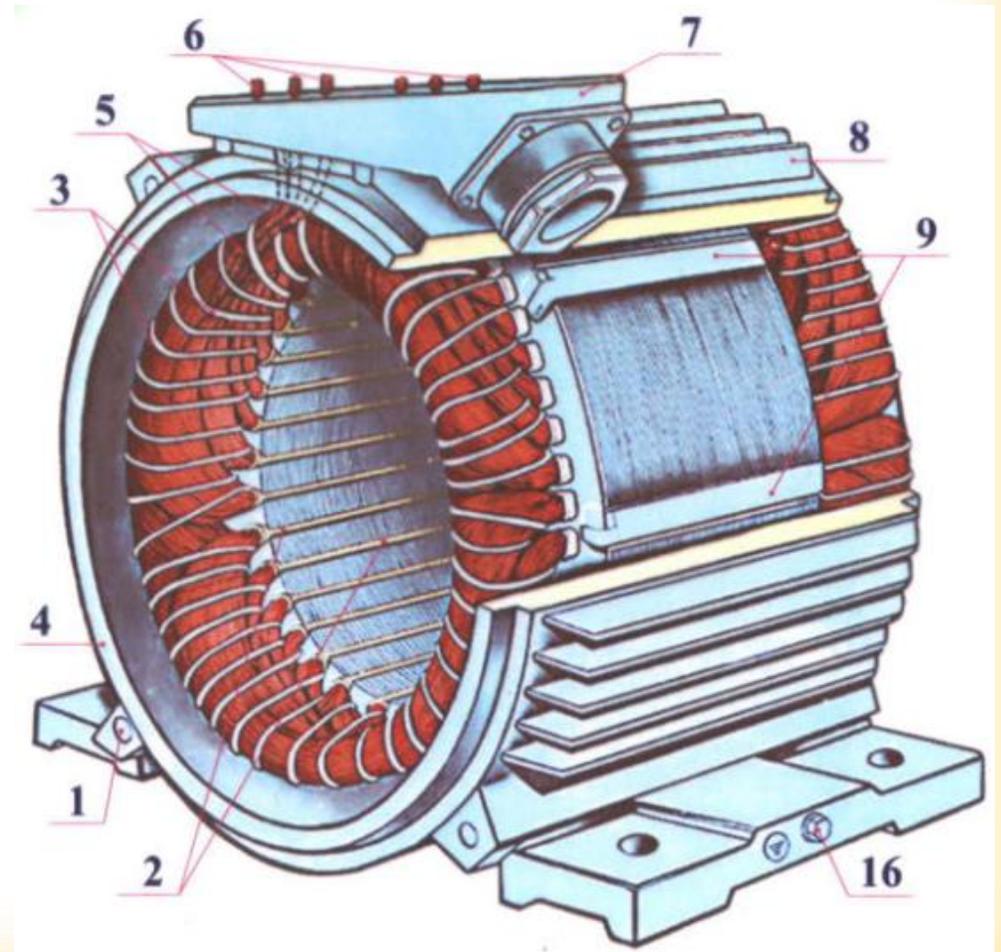
- сердечник (шихтованный) с пазами
- в пазах – распределенная многофазная обмотка

Виды пазов

- открытые (ЭМ более 400 кВт и 650 В)
- полуоткрытые (ЭМ 100...400 кВт)
- полужакрытые (ЭМ до 100 кВт)
- [закрытые (на роторе)]

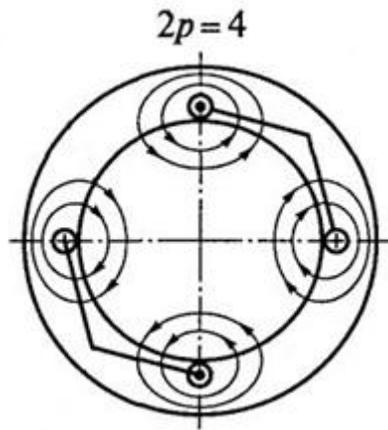
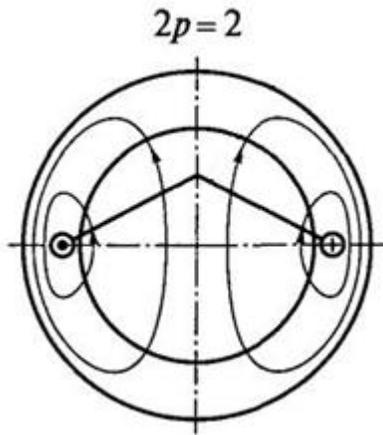


1 – проводники; 2 – изоляция; 3 – пазовый клин

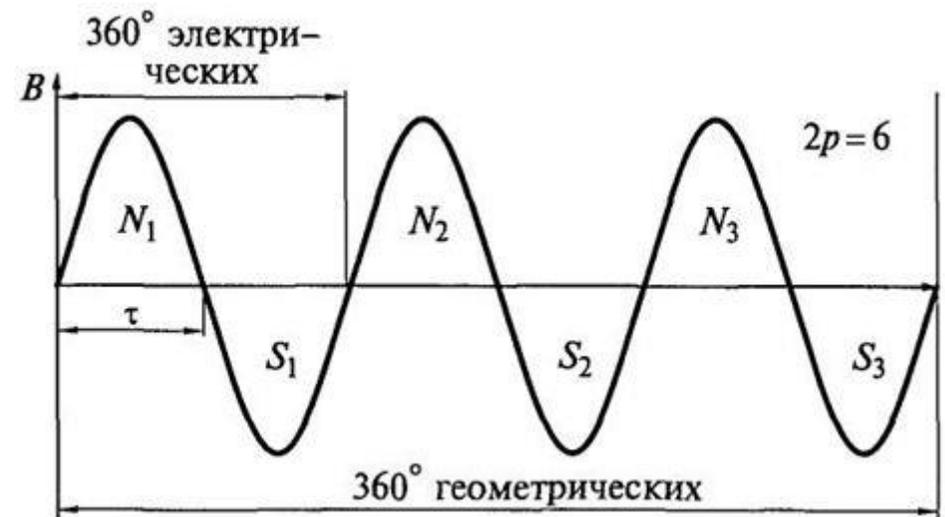
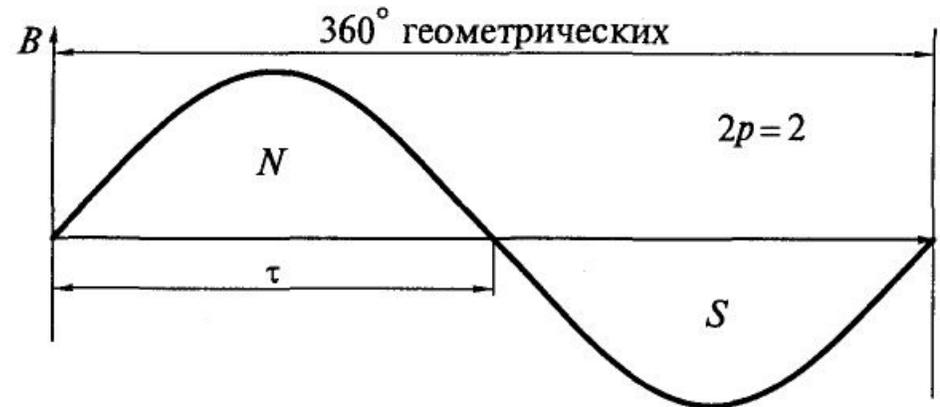


Обмотки машин переменного тока

Период и число пар полюсов p , электрические градусы



$$\alpha_1 \text{ (эл. град.)} = p \cdot \alpha \text{ (геом. град.)}$$



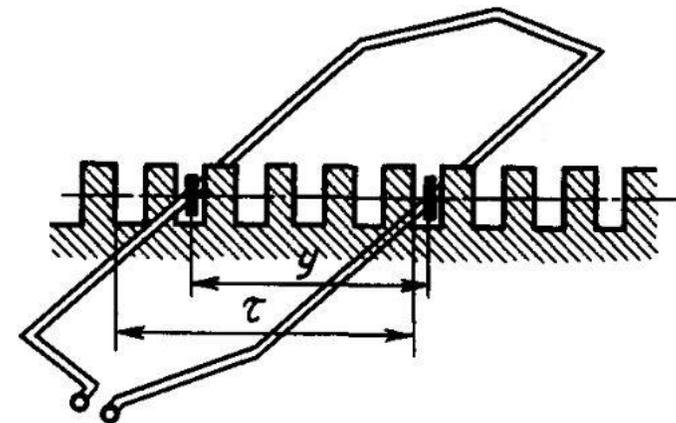
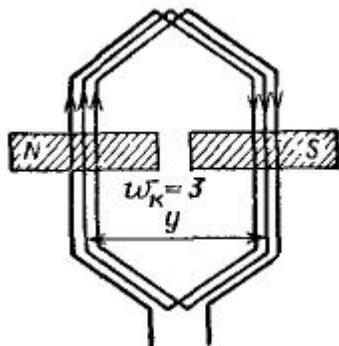
Обмотки машин переменного тока

Катушка (секция)

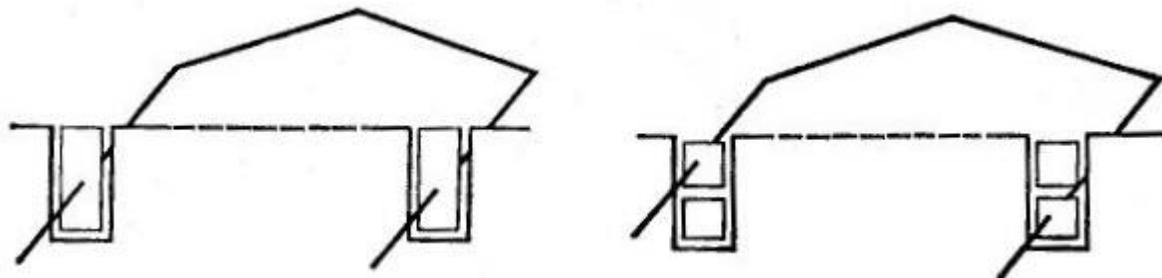
- одно/многовитковая (w_k)
- пазовая часть / лобовая часть
- шаг катушки y
- полюсное деление τ

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad t_z = \frac{\pi D}{Z} \quad \tau = \frac{Z}{2p}, \quad y \leq \tau$$

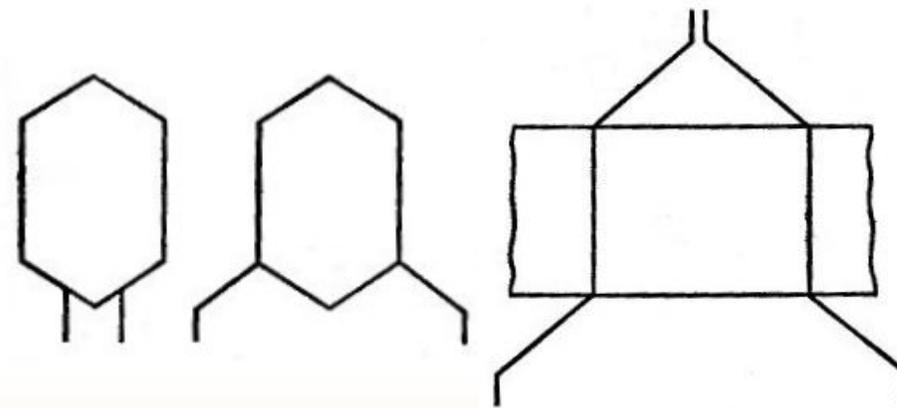
шаг диаметральный ($y = \tau$) / укороченный ($y < \tau$)



Однослойная / двухслойная обмотка



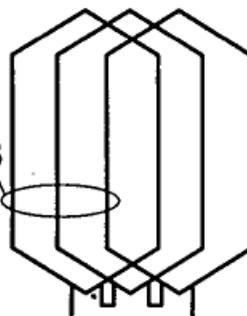
Петлевая / волновая обмотка



Обмотки машин переменного тока

Катушечная группа

- q – число пазов на полюс и фазу $q=3$



Период обмотки

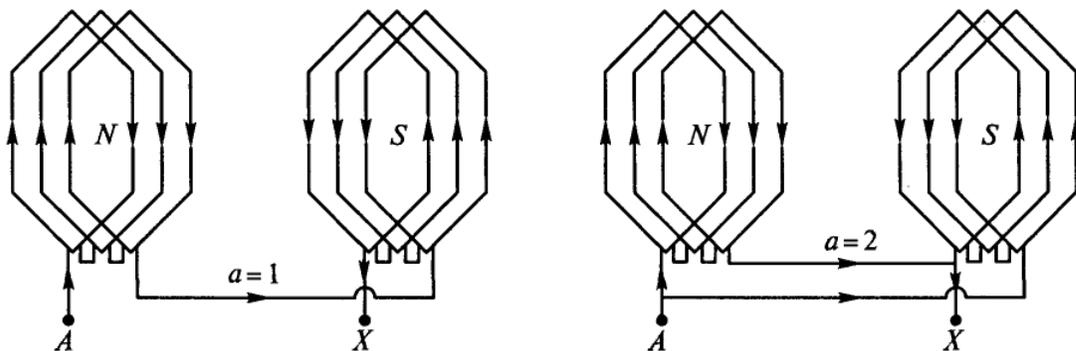
- [1 катушечная группа]
- 2 катушечные группы (вкл.встречно)

Фаза обмотки

- p периодов, $2p$ полюсов

Последовательное / параллельное соединение

- число параллельных ветвей $a_{min} = 1, a_{max} = 2p$



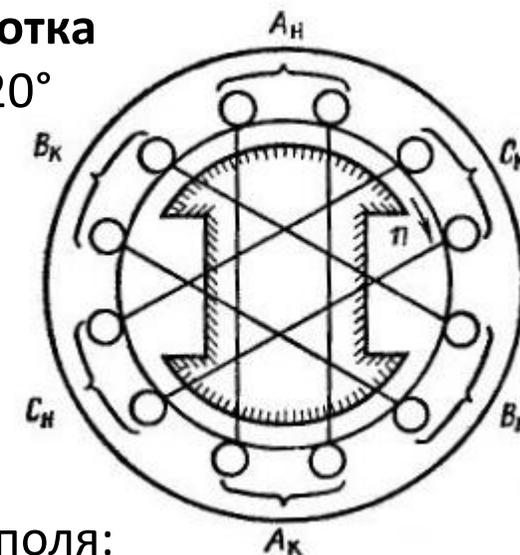
- число последовательных катуш.групп $2p/a$
- число последовательно соединенных витков $w = 2pqw_k/a$

Многофазная обмотка

- m одинаковых фаз
- со сдвигом на $360^\circ/m$

3-фазная обмотка

- сдвиг на 120°



При вращении поля:

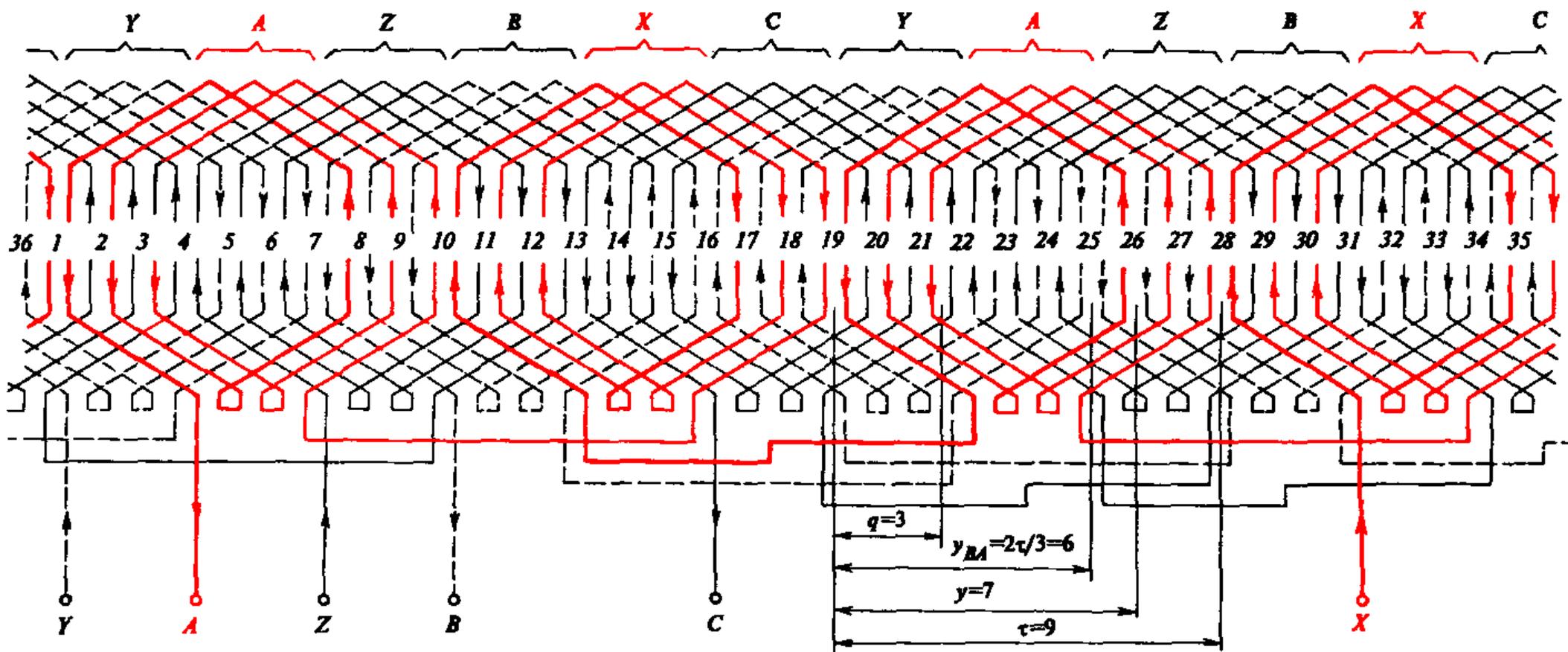
E_{Amax} потом E_{Bmax} потом E_{Cmax} = период
 → фазовый сдвиг $E_A - E_B - E_C = 120^\circ$
 → 3-фазная система ЭДС

Обмотки машин переменного тока

Пример: 3-фазная двухслойная обмотка

- $m = 3, p = 2, q = 3, y = 7, a = 1$

- $Z = 2ptq = 36, \tau = mq = 9, y_{BA} = 2\tau/m = 6$



Обмотки машин переменного тока

Пример: 3-фазная двухслойная обмотка

- $m = 3, p = 2, q = 3, y = 7$

$$Z = 2pmq = 36$$

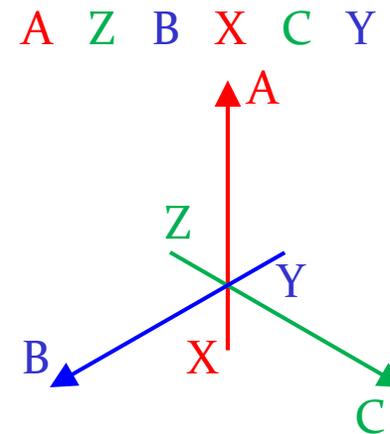
$$q = 3$$

$$p = 2$$

верхний слой

$$y = 7$$

нижний слой



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	A	A
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

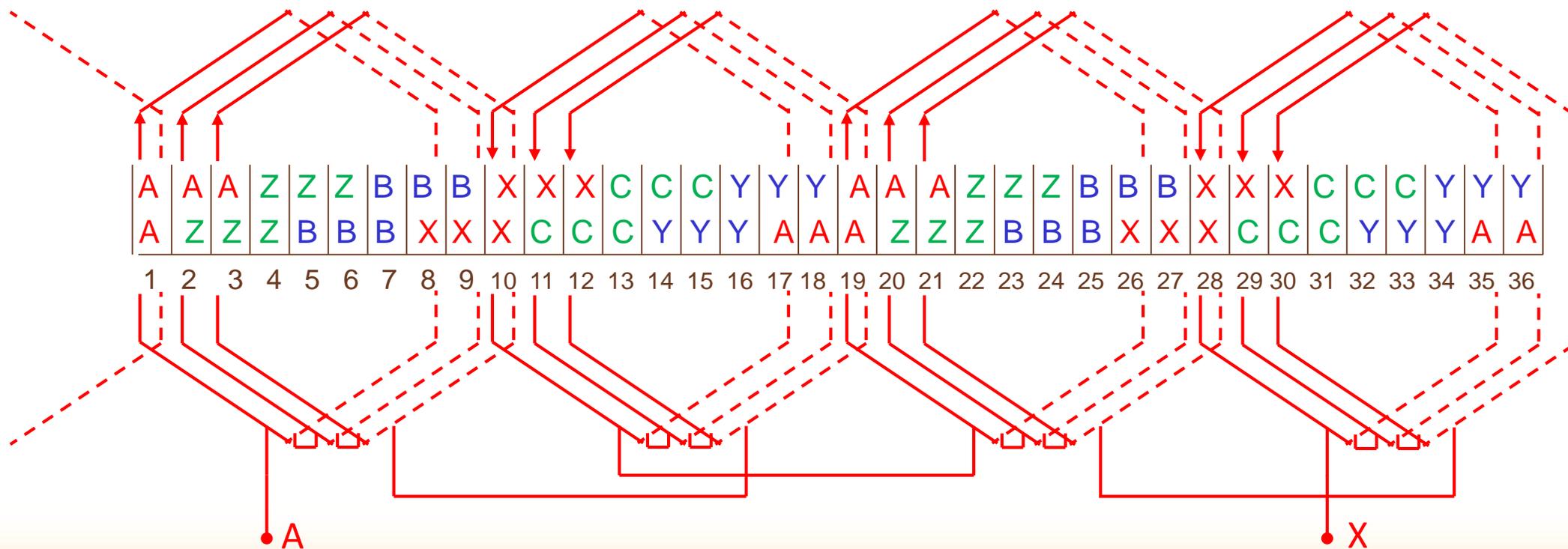
Обмотки машин переменного тока

Пример: 3-фазная двухслойная обмотка

- $m = 3, p = 2, q = 3, y = 7$
петлевая обмотка

полюсное деление $\tau = mq = 9$
шаг катушки $y = 7$

пусть $a = 1$



Обмотки машин переменного тока

Пример: 3-фазная двухслойная обмотка

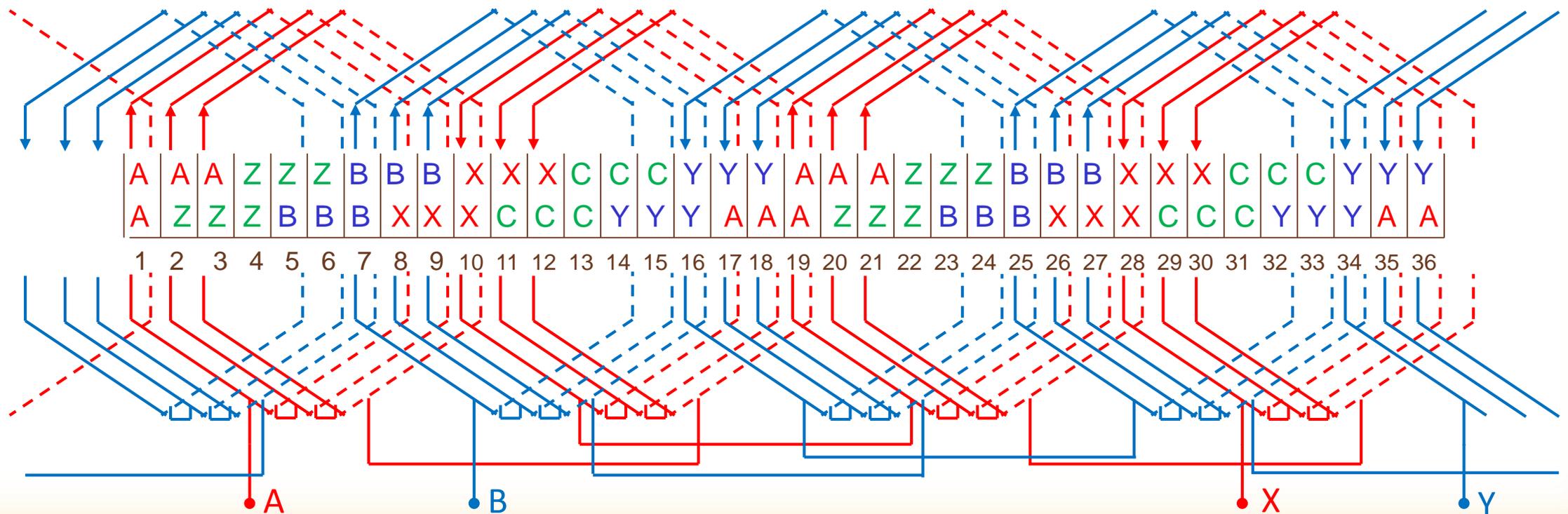
- $m = 3, p = 2, q = 3, y = 7$
петлевая обмотка

пусть $a = 1$

полюсное деление $\tau = mq = 9$

шаг катушки $y = 7$

сдвиг между фазами $y_{AB} = \frac{2}{3}\tau = 6$



Обмотки машин переменного тока

Пример: 3-фазная двухслойная обмотка

- $m = 3, p = 2, q = 3, y = 7$
петлевая обмотка

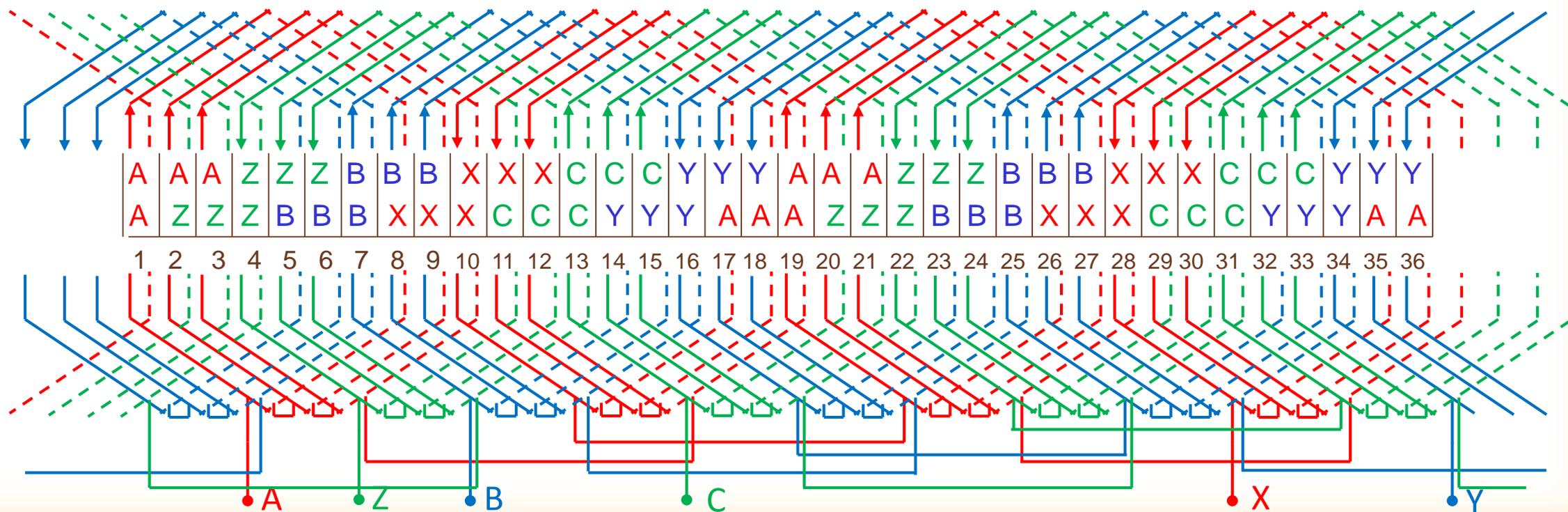
пусть $a = 1$

полюсное деление $\tau = mq = 9$

шаг катушки $y = 7$

сдвиг между фазами $y_{AB} = \frac{2}{3}\tau = 6$

$y_{BC} = y_{AB} = 6$



Общие вопросы теории электрохимического преобразования энергии в электрических машинах



2.2. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

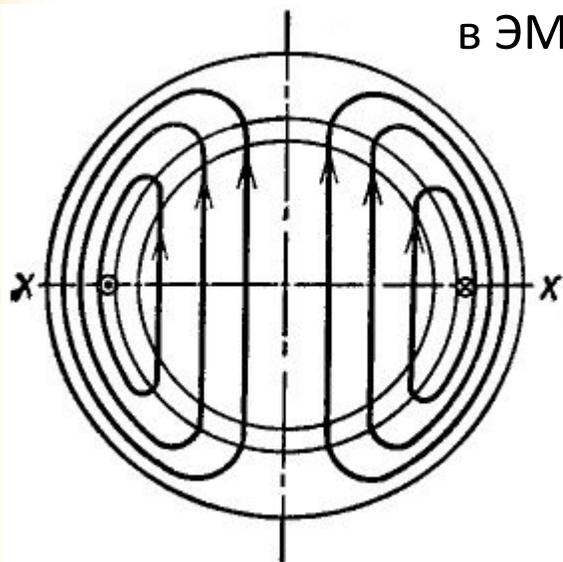
Вращающееся магнитное поле

Назначение обмотки

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

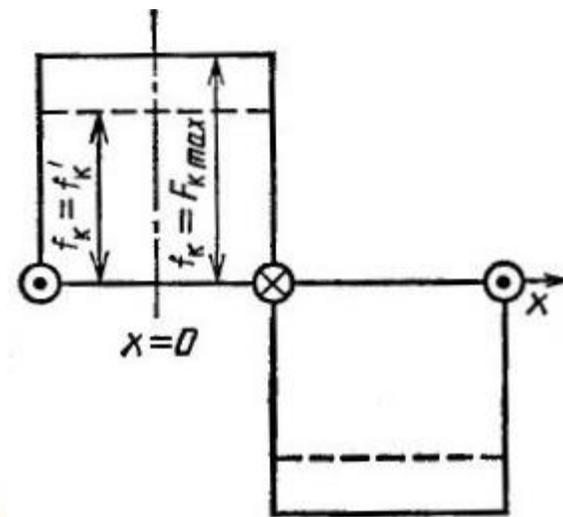
Закон полного тока: магнитодвижущая сила $i w =$ падению магнитного напряжения в цепи U_μ

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

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)

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

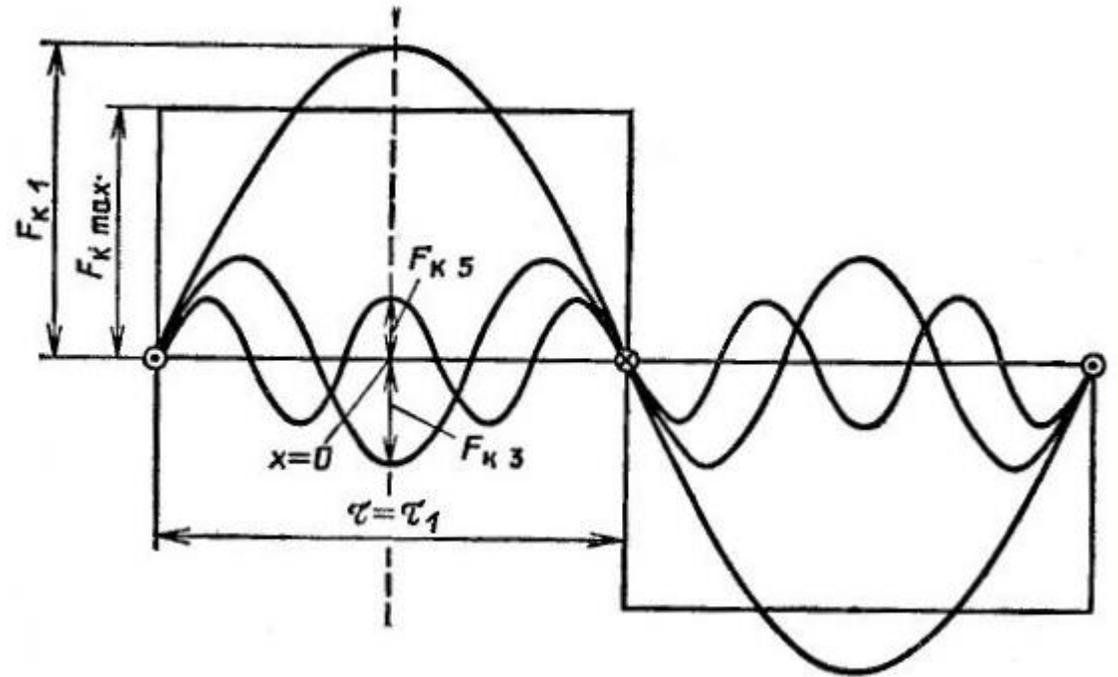
Амплитуда 1 гармоники МДС катушки

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

Высшие гармоники (для прямоугольной волны)

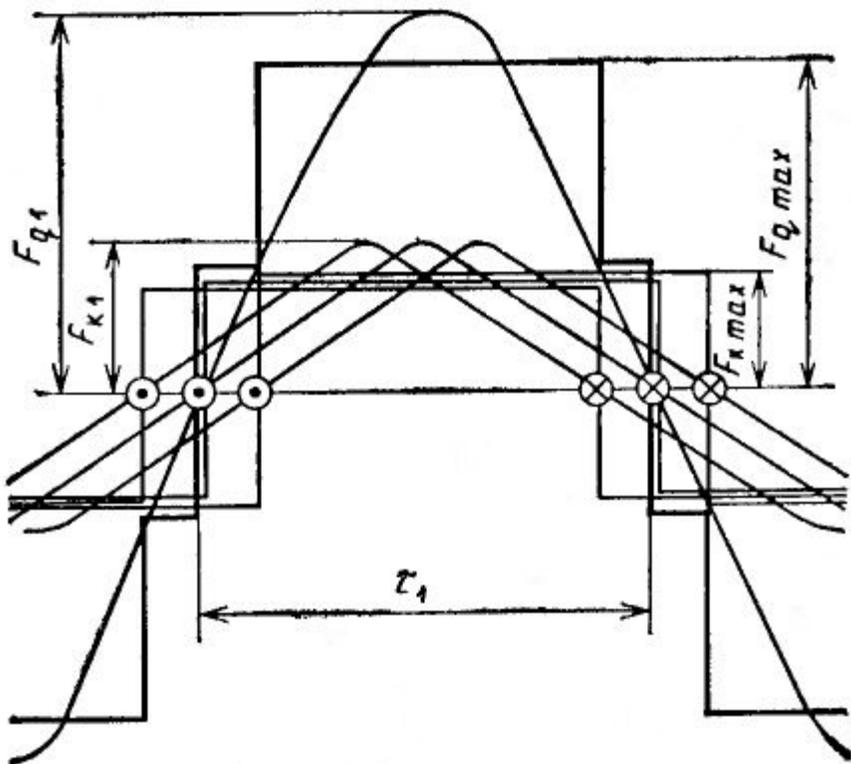
$$f_{kv} = F_{kv} \cos \frac{v\pi x}{\tau} \sin \omega t$$

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



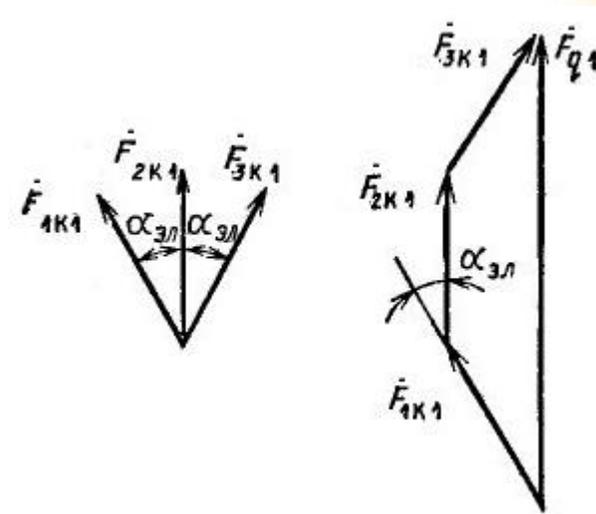
Вращающееся магнитное поле

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

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

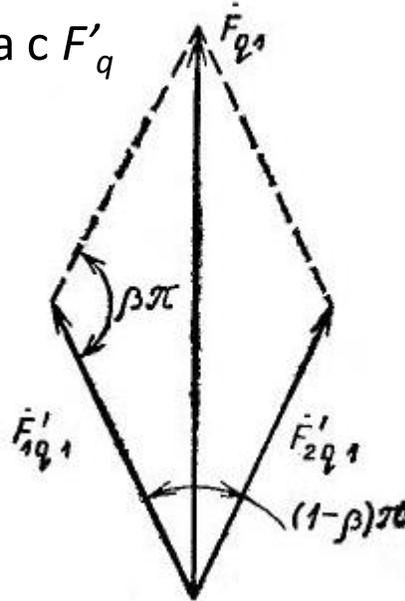
$$k_{pv} = \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{q \sin \frac{v\pi}{2mq}}$$

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



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

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

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

Фаза обмотки: $2p$ катушечных групп
на окружности

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

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 $F_{\phi 1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi p} I w k_{o1}$

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

$$F_{\phi v} = \frac{2\sqrt{2}}{\nu\pi p} I w k_{ov}$$

Вращающееся магнитное поле

Волна МДС фазы

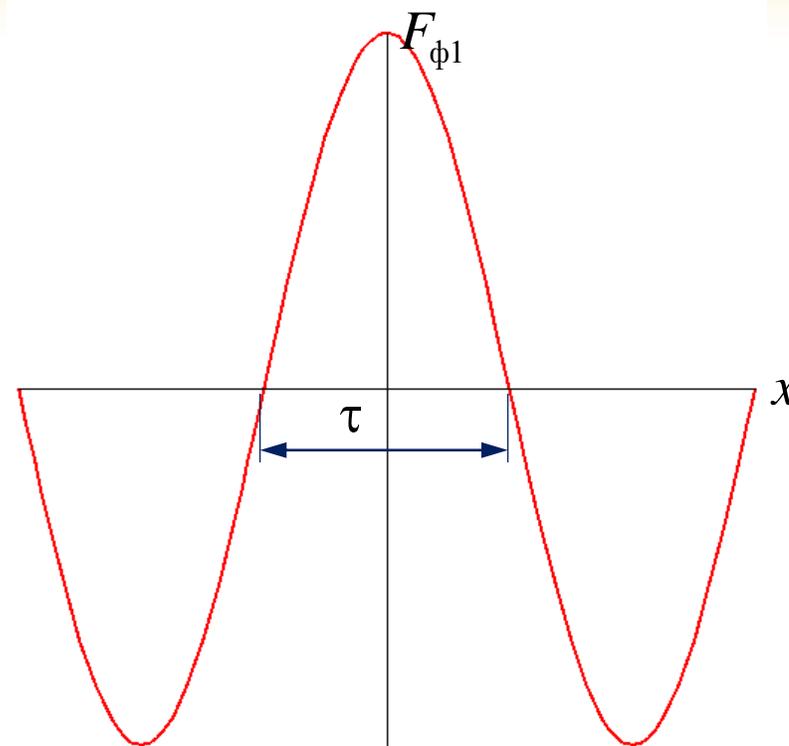
Значение МДС фазы в точке x в момент времени t

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

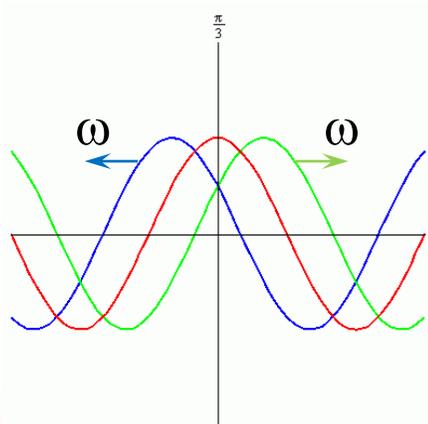
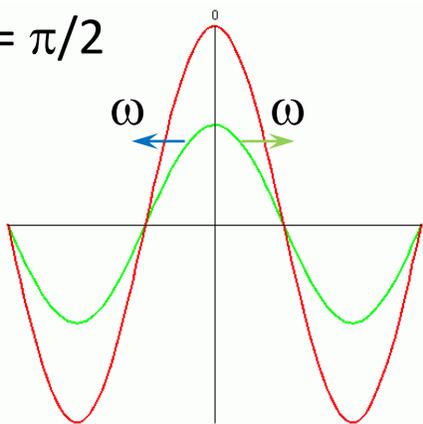
– уравнение **пульсирующей** [стоячей] волны

Можно разложить на 2 **вращающиеся** волны

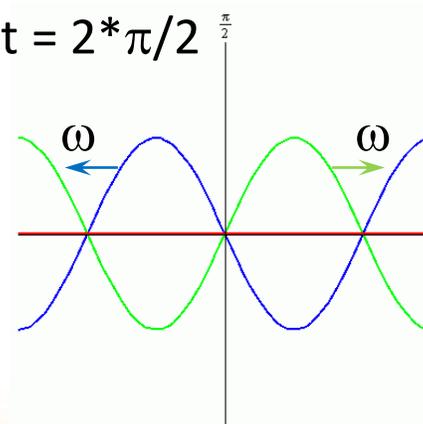
$$f_{\phi 1} = \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau} \right) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\pi x}{\tau} \right) = f_{\text{пр1}} + f_{\text{обр1}}$$



$\omega t = \pi/2$



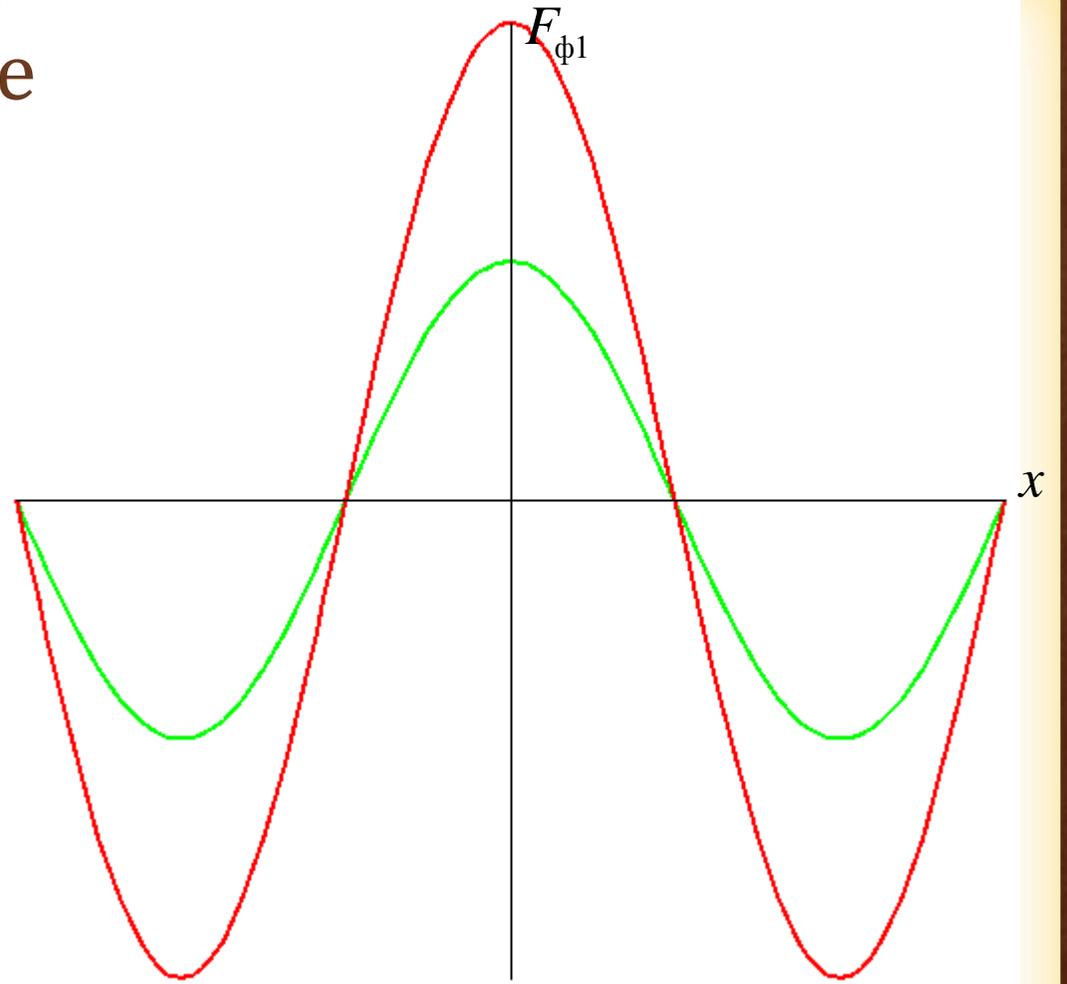
$\omega t = 2 * \pi/2$



Вращающееся магнитное поле

Волна МДС фазы

Прямая и обратная волна МДС фазы



Вращающееся магнитное поле

Волна МДС фазы

Скорость перемещения волны $f_{\text{пр1}} = \frac{F_{\phi1}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right)$ $f_{\text{прv}} = \frac{F_{\phi v}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{v\pi x}{\tau}\right)$

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

Для частоты $f = 50$ Гц

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°

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

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

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

или для прямой и обратной волны

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

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

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

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

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

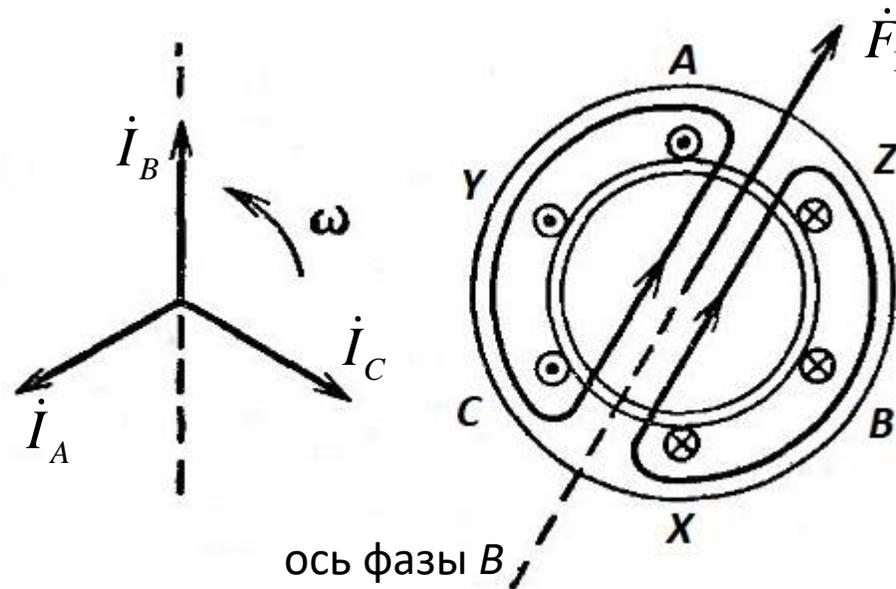
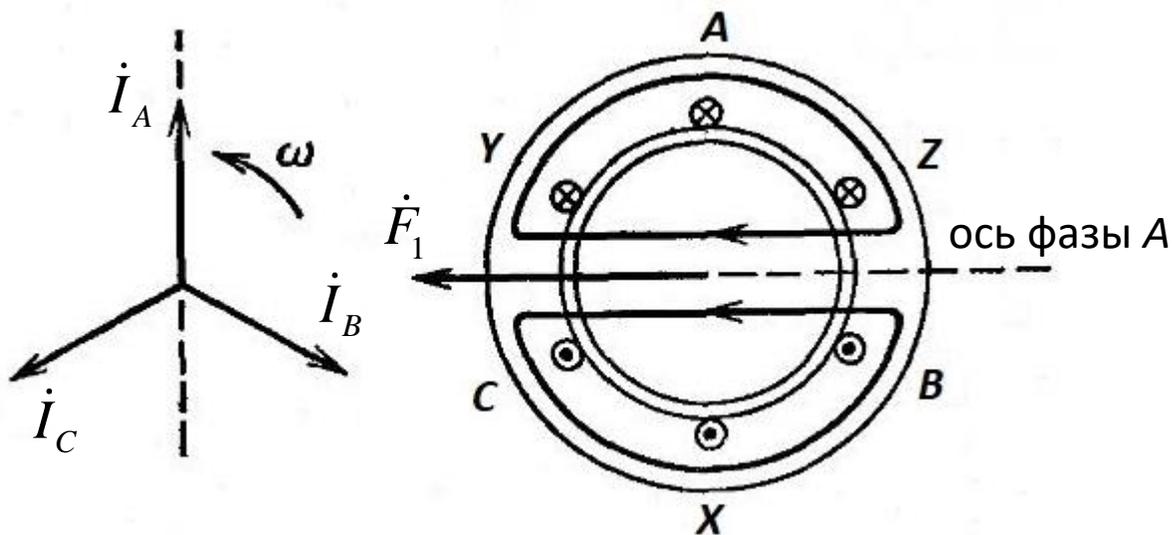
– синусоидальная волна, вращающаяся с $n = \frac{60f}{p}$

Направление вращения в пространстве определяется чередованием фаз во времени

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

$$B_1 = B_{1m} \sin(\omega t - \pi x / \tau) = B_{1m} \sin(\omega t - p\gamma)$$

«круговое магнитное поле»



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 → волна м. поля (B)

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

«круговое магнитное поле»

Высшие гармонические МДС

для разных ν суммирование аргументов \sin проходит по-разному

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

Общие вопросы теории электрохимического преобразования энергии в электрических машинах



2.3. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ОБМОТКИ

Электродвижущая сила обмотки

Назначение обмотки

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

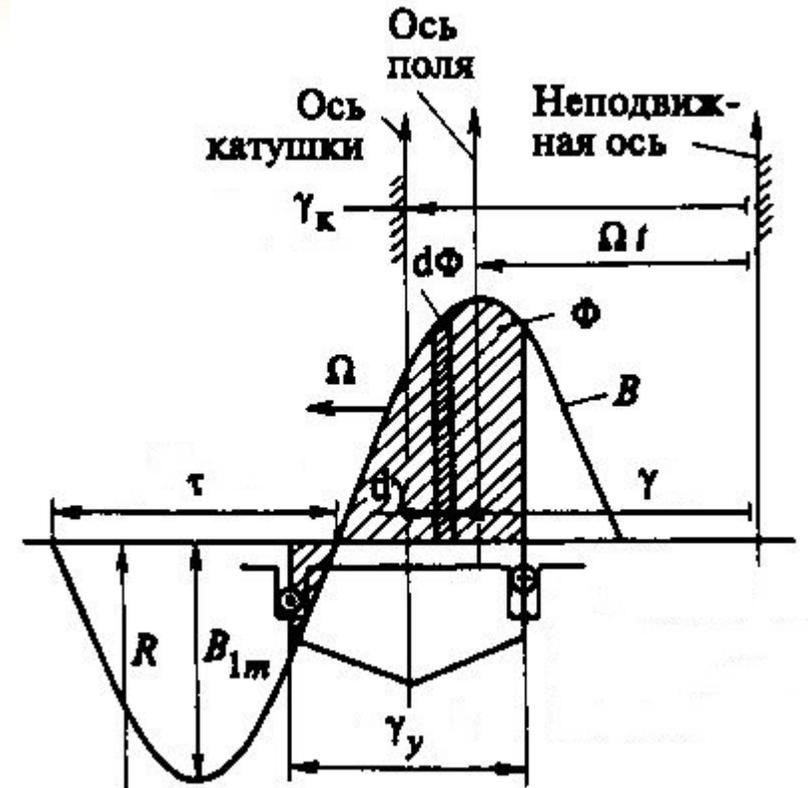
Вращающееся магнитное поле →
переменная ЭДС в проводниках обмотки

1 оборот поля → p периодов изменения ЭДС
 n оборотов за минуту → pn периодов ЭДС
число периодов ЭДС за секунду (частота)

$$f = \frac{pn}{60}$$

Рассмотрим наведение ЭДС:

катушка → катушечная группа → фаза



Основная гармоника поля

– вращающаяся волна $B = B_{1m} \cos(\omega t - p\gamma)$

Катушка шириной γ_y (рад.)

в положении γ_k ($\gamma_y = y/R$, где $\pi R = \tau p$)

ЭДС найдем как $e = -\frac{d\Psi}{dt}$

Электродвижущая сила обмотки

Поток, сцепленный с катушкой $\Phi = \int_{S_y} B dS$

Элемент поверхности катушки $dS = l_\delta dx = l_\delta R d\gamma$

Считая поле однородным по длине машины, перейдем к интегрированию по γ в пределах катушки от $\gamma_1 = \gamma_k - \gamma_y / 2$ до $\gamma_2 = \gamma_k + \gamma_y / 2$

$$\Phi = \int_{S_y} B dS = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} B_{1m} \cos(\omega t - p\gamma) l_\delta R d\gamma$$

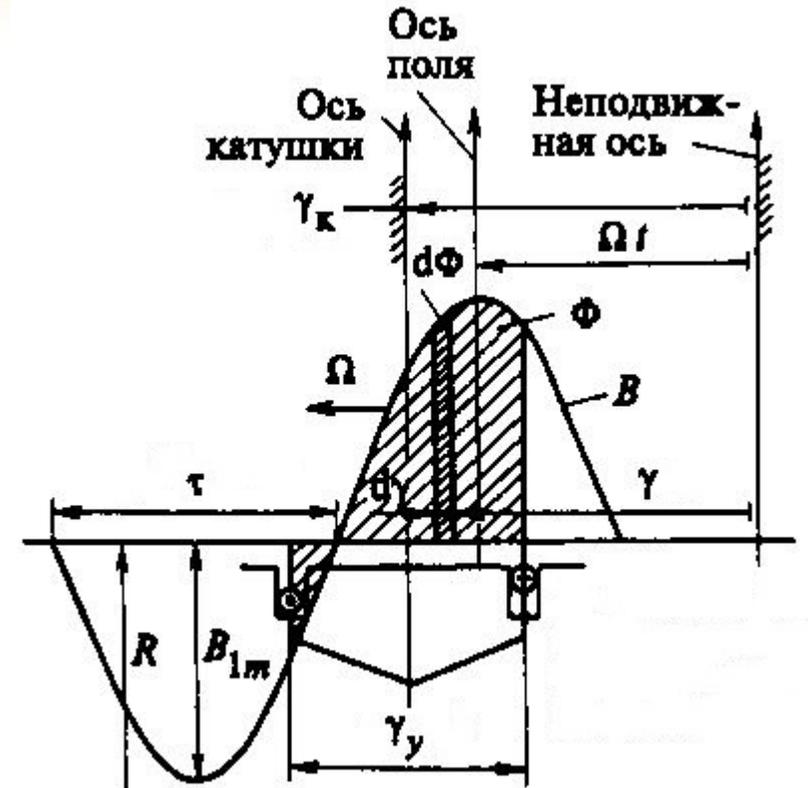
$$\Phi = B_{1m} l_\delta R \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \cos(\omega t - p\gamma) d\gamma = \frac{B_{1m} l_\delta R}{p} \sin(p\gamma - \omega t) \Big|_{\gamma_1}^{\gamma_2}$$

После преобразования разницы sin и с учетом $R = \tau p / \pi$

$$\Phi = \frac{B_{1m} l_\delta \tau}{\pi} 2 \sin\left(\frac{p\gamma_y}{2}\right) \cos(\omega t - p\gamma_k)$$

здесь $\sin\left(\frac{p\gamma_y}{2}\right) = \sin\left(\frac{y\pi}{2\tau}\right) = \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right) = k_y$

$$p\gamma_k \text{ (геом.)} = \alpha_k \text{ (электр.)}$$



Электродвижущая сила обмотки

Таким образом, поток, сцепленный с катушкой $\Phi = k_y \Phi_m \cos(\omega t - \alpha_k)$

где Φ_m – максимальный поток,
сцепленный с катушкой без укорочения $\Phi_m = \frac{2}{\pi} B_{1m} l_\delta \tau$

Φ изменяется во времени и
зависит от положения оси катушки

Потокосцепление с катушкой

$$\Psi = w_k \Phi = w_k k_y \Phi_m \cos(\omega t - \alpha_k)$$

ЭДС катушки

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = \omega w_k k_y \Phi_m \sin(\omega t - \alpha_k) = \sqrt{2} E_k \sin(\omega t - \alpha_k)$$

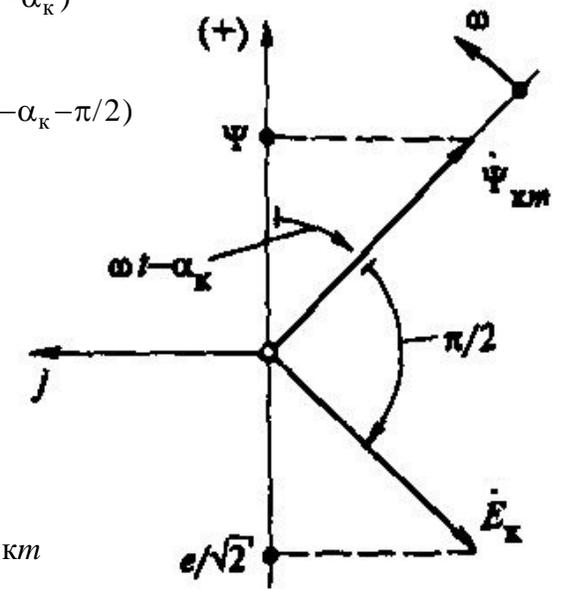
где действующее значение ЭДС катушки

$$E_k = \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_k k_y \Phi_m = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} w_k k_y \Phi_m = 4,44 f w_k k_y \Phi_m$$

представление гармонических величин
комплексными функциями

$$\dot{\Psi}_{km} = \Psi_{km} e^{j(\omega t - \alpha_k)}$$

$$\dot{E}_k = \sqrt{2} E_k e^{j(\omega t - \alpha_k - \pi/2)}$$



причем

$$\dot{E}_k = -j \frac{\omega}{\sqrt{2}} \dot{\Psi}_{km}$$

Электродвижущая сила обмотки

Потокосцепление и ЭДС катушечной группы

аналогично МДС

$$\Psi_{qm} = q\Psi_{km}k_p$$

где k_p – коэф-т распределения

$$E_q = qE_k k_p$$

$$\dot{E}_q = -j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\dot{\Psi}_{qm}$$

Потокосцепление и ЭДС фазы

на периоде – «+» и «-» полуволна B
и 2 кат. группы, включенные встречно

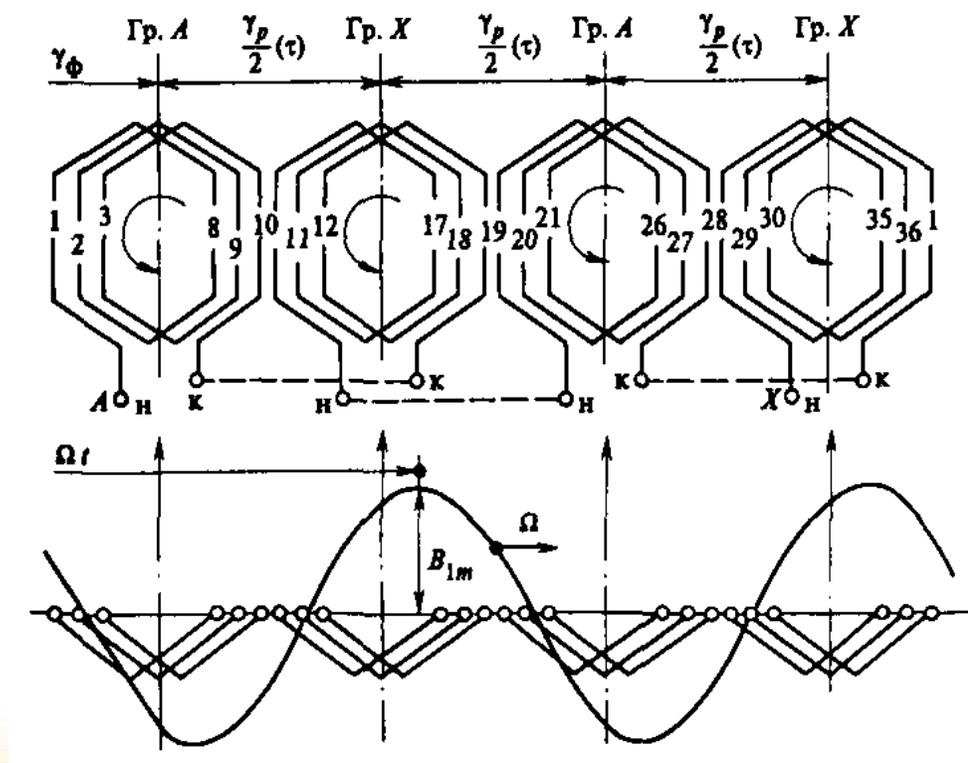
В параллельной ветви Ψ_q и E_q суммируются

$$\Psi_\phi = \frac{2p}{a}\Psi_{qm} = \frac{2p}{a}qw_k k_y k_p \Phi_m = wk_y k_p \Phi_m$$

$$E_\phi = \frac{2p}{a}E_q = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}fwk_y k_p \Phi_m = 4,44fwk_y k_p \Phi_m$$

ЭДС от высших гармонических поля

$$E_{\phi v} = 4,44vfwk_{yv} k_{pv} \Phi_{mv}$$



Электродвижущая сила обмотки

Представление потокосцепления и ЭДС трехфазной обмотки

Все фазы одинаковы и сдвинуты на угол $\gamma_{AB} = \frac{2\pi}{p\tau}$ или электрический угол $\alpha_{AB} = \frac{2\pi}{m} = \frac{2\pi}{3}$

На временной плоскости – звезда одинаковых фазных векторов вращается со скоростью ω

$$\Psi_{Am} = \Psi_{Bm} = \Psi_{Cm} = \Psi_{\phi m}$$

$$E_A = E_B = E_C = \sqrt{2}E_{\phi}$$

Мгновенные значения – проекции векторов на ось времени в положении ωt (выбирая фазу А за главную)

$$\Psi_A = \Psi_{\phi m} \cos(\omega t)$$

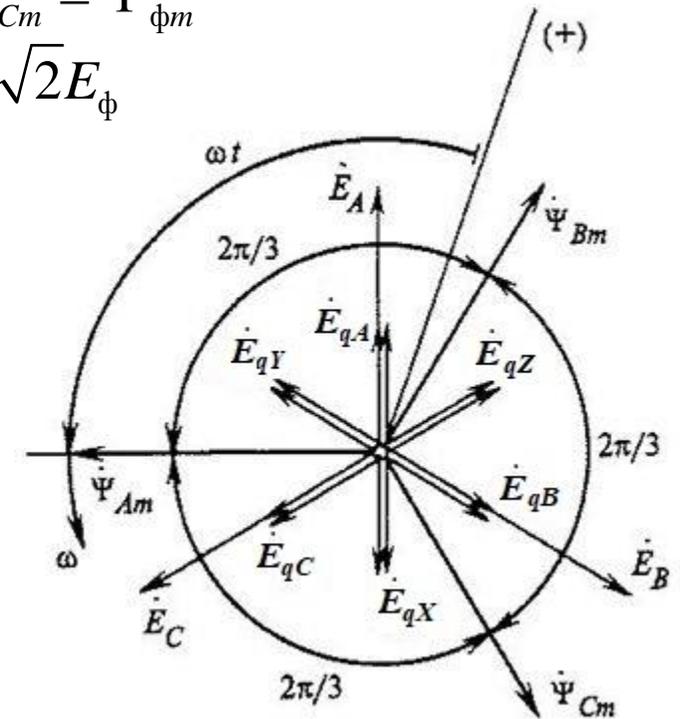
$$e_A = \sqrt{2}E_{\phi} \cos(\omega t - \pi/2)$$

$$\Psi_B = \Psi_{\phi m} \cos(\omega t - \alpha_{BA})$$

$$e_B = \sqrt{2}E_{\phi} \cos(\omega t - \pi/2 - \alpha_{BA})$$

$$\Psi_C = \Psi_{\phi m} \cos(\omega t - \alpha_{CA})$$

$$e_C = \sqrt{2}E_{\phi} \cos(\omega t - \pi/2 - \alpha_{CA})$$



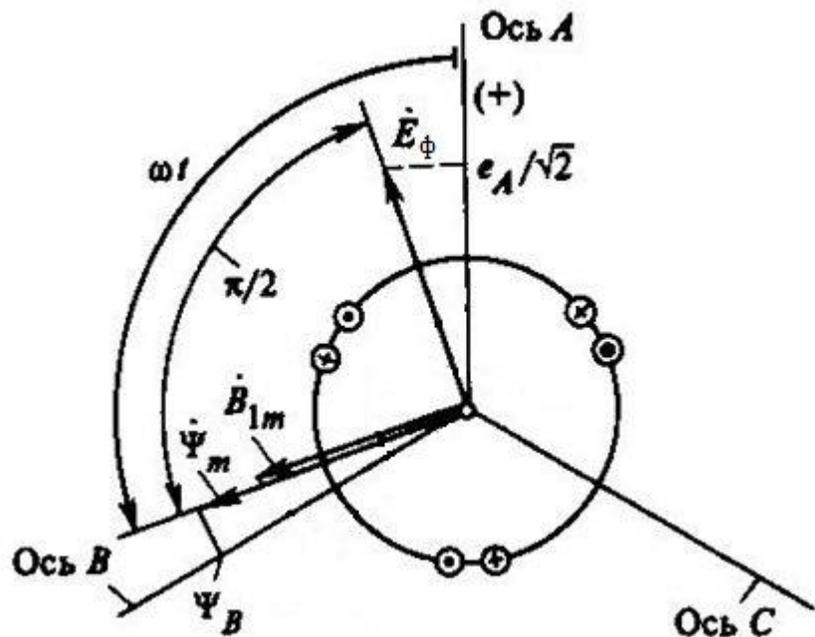
Электродвижущая сила обмотки

Представление потокосцепления и ЭДС трехфазной обмотки

На пространственной плоскости – результирующий вектор вращается со скоростью ω

$$\dot{\Psi} = \Psi_m e^{j\omega t} \quad \dot{E} = \sqrt{2}E_\phi e^{j(\omega t - \pi/2)}$$

Мгновенные значения – проекции результирующих векторов на оси фаз в положении ωt



$$\Psi_A = \Psi_m \cos(\omega t)$$

$$\Psi_B = \Psi_m \cos(\omega t - \alpha_{BA})$$

$$\Psi_C = \Psi_m \cos(\omega t - \alpha_{CA})$$

$$e_A = \sqrt{2}E_\phi \cos(\omega t - \pi/2)$$

$$e_B = \sqrt{2}E_\phi \cos(\omega t - \pi/2 - \alpha_{BA})$$

$$e_C = \sqrt{2}E_\phi \cos(\omega t - \pi/2 - \alpha_{CA})$$

Электродвижущая сила обмотки

Улучшение формы ЭДС

Укорочение шага обмотки

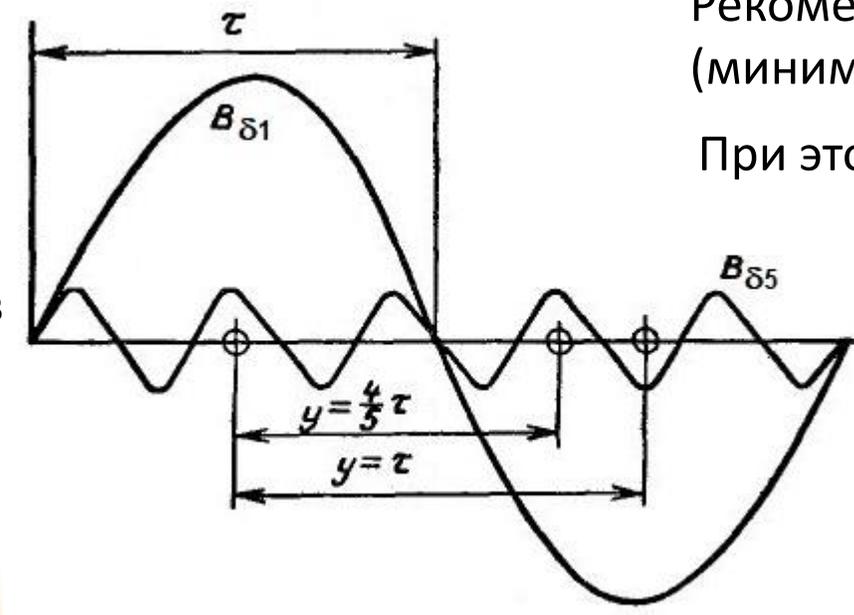
Для высших гармонических k_y быстро уменьшается

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

При укорочении шага на τ/v пропадает v гармоника

Например для $v = 5$

- при $y = \tau$ ЭДС проводников суммируются
- при $y = 4/5 \tau$ ЭДС проводников вз.компенсируются



При $y = 4/5 \tau$

- $k_{y1} = 0,951; k_{y5} = 0; k_{y7} = 0,573$

При $y = 6/7 \tau$

- $k_{y1} = 0,975; k_{y5} = 0,433; k_{y7} = 0$

Рекомендуется выбирать $y = 0,83 \tau$
(минимизация 5 и 7 гармоники)

При этом страдает и 1 гармоника!

Электродвижущая сила обмотки

Улучшение формы ЭДС

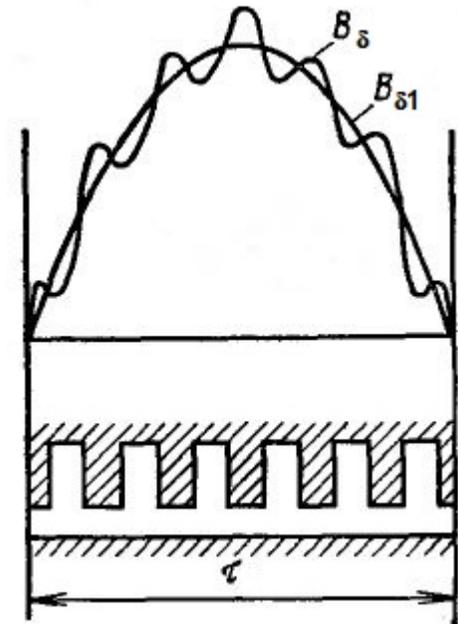
Распределение обмотки по пазам

при увеличении q быстро уменьшаются k_{pv}

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

k_{pv}	$q = 2$	$q = 3$	$q = 4$	$q = 5$	$q = 6$
$\nu = 1$	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957
$\nu = 5$	0,259	0,217	0,205	0,200	0,197
$\nu = 7$	0,259	0,177	0,158	0,149	0,145

Однако существуют гармоники $\nu = 1+2mq$ [ц.ч.], для которых $k_{pv} = k_{p1}$ и $k_{yv} = k_{y1}$ (большой k_o) «Зубцовые» гармоники (у них $p_\nu = p + Z$ [ц.ч.])



Электродвижущая сила обмотки

Улучшение формы ЭДС

Скос пазов

Сдвиг листов сердечника → скос пазов (проводников)

Единая волна поля → ЭДС участков по длине проводника

ΔE одинаковые, но смещены по фазе

→ ЭДС проводника меньше суммы ΔE

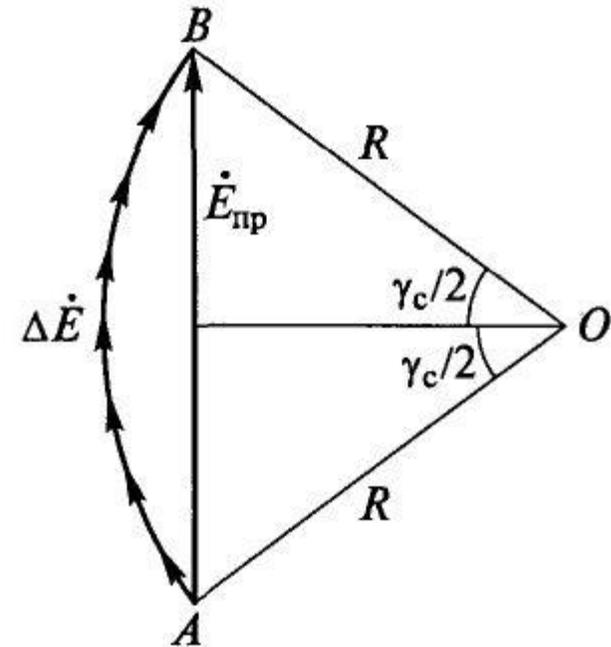
Коэффициент скоса $k_c = \frac{E_{\text{пр}}}{\sum \Delta E} = \frac{2R \sin \frac{\gamma_c}{2}}{R\gamma_c} = \frac{\sin \frac{\gamma_c}{2}}{\frac{\gamma_c}{2}}$

Обмоточный коэффициент

$$k_o = k_y k_p k_c$$

Эффективное число витков

$$w_{\text{эф}} = w \cdot k_o$$



Общие вопросы теории электрохимического преобразования энергии в электрических машинах



2.4. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ПАРАМЕТРЫ ОБМОТОК

Магнитные поля и параметры обмоток

Магнитное поле ЭМ

МДС токов обмотки статора F_1 и МДС токов обмотки ротора F_2

→ результирующее магнитное поле:

- главное поле (взаимоиндукции)
- поле рассеяния статора (от F_1)
- поле рассеяния ротора (от F_2)

Главное поле – основная гармоника поля в зазоре

В линейной среде $\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}$

Главная индуктивность фазы $L_{AA} = \frac{\Psi_{AAm}}{\sqrt{2}I_A}$ $\Psi_{AAm} = wk_{o1}\Phi_m = \frac{2}{\pi}\tau l_\delta wk_{o1}B_{1m}$

тогда $L_{AA} = \frac{4\mu_0}{p\pi^2}(wk_{o1})^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta}$ $B_{1m} = \frac{\mu_0 F_{\phi 1m}}{\delta k_\delta} = \frac{2\sqrt{2}I_A wk_{o1}\mu_0}{\pi r \delta k_\delta}$

Главная взаимная индуктивность между фазами $L_{BA} = \frac{\Psi_{BAm}}{\sqrt{2}I_A} = \frac{\Psi_{AAm} \cos \alpha_{BA}}{\sqrt{2}I_A} = L_{AA} \cos \alpha_{BA}$

Для 3-фазной обмотки $L_{BA} = L_{AA} \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2}L_{AA}$ $L_{CA} = L_{AA} \cos \frac{4\pi}{3} = -\frac{1}{2}L_{AA}$

Магнитные поля и параметры обмоток

Главное поле

Главная индуктивность 3-фазной обмотки

– индуктивность фазы с учетом влияния других фаз

$$L_{11} = \frac{\Psi_m}{I_{Am}} = \frac{L_{AA}I_{Am} + L_{AB}I_{Bm} + L_{AC}I_{Cm}}{I_{Am}}$$

- для токов прямой и обратной последовательности $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$

$$L_{11} = L_{AA}(1 - \cos \alpha_{AB}) = \frac{3}{2}L_{AA} = \frac{6\mu_0}{p\pi^2} (wk_{o1})^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta}$$

- для токов нулевой последовательности $\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C$

$$L_{11} = L_{AA} - \frac{1}{2}L_{AA} - \frac{1}{2}L_{AA} = 0$$

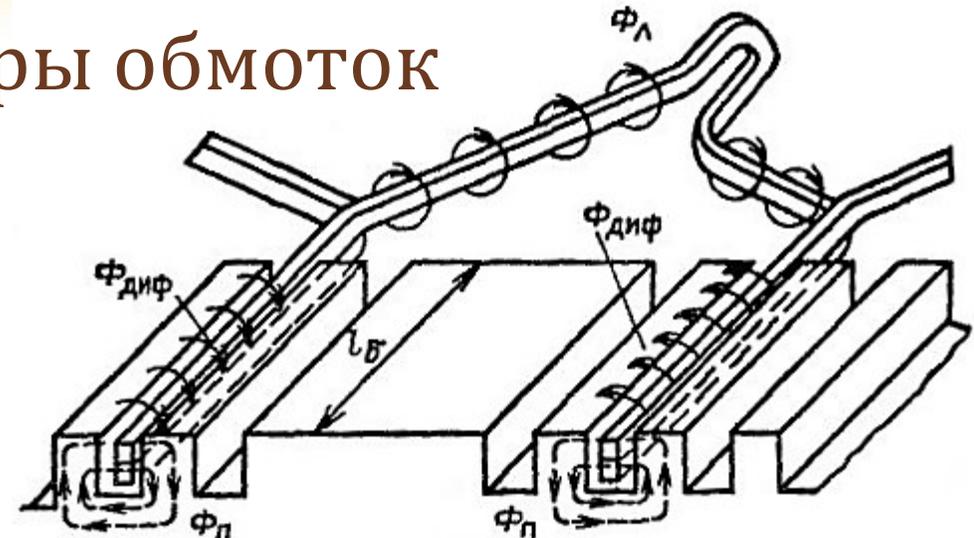
Магнитные поля и параметры обмоток

Поле рассеяния

- пазовое
- лобовое
- дифференциальное

Индуктивность рассеяния одной стороны катушки

$$L_{\sigma k} = \frac{\sum \Psi_{\sigma}}{I_{Am}} = \frac{\sum N_{\Pi} \Phi_{\sigma}}{I_{Am}} = N_{\Pi} \frac{\sum F_{Am} \Lambda_{\sigma}}{I_{Am}} = N_{\Pi} \frac{\sum N_{\Pi} I_{Am} \Lambda_{\sigma}}{I_{Am}} = N_{\Pi}^2 \sum \Lambda_{\sigma}$$



N_{Π} – число проводников в пазу
($N_{\Pi} = 2w_k$ или $N_{\Pi} = w_k$)

Фаза обмотки расположена в $2pq$ пазах, но разбита на a параллельных ветвей

Индуктивность одной параллельной ветви $L_{\sigma a} = N_{\Pi}^2 \Lambda_{\Sigma\sigma} \cdot 2 \frac{pq}{a}$

Индуктивность фазы из a параллельных ветвей

$$L_{\sigma} = \frac{1}{a} N_{\Pi}^2 \Lambda_{\Sigma\sigma} 2 \frac{pq}{a}$$

Число витков фазы $w = w_k \frac{2pq}{a} = \frac{N_{\Pi}}{2} \frac{2pq}{a} = N_{\Pi} \frac{pq}{a}$

В однослойной обмотке $w = w_k \frac{pq}{a} = N_{\Pi} \frac{pq}{a}$

Тогда индуктивность рассеяния фазы $L_{\sigma} = 2w^2 \frac{1}{pq} \Lambda_{\Sigma\sigma}$ или $L_{\sigma} = 2w^2 \frac{\mu_0 l_{\delta}}{pq} \lambda_{\sigma}$

где $\lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma\text{п}} + \lambda_{\sigma\text{л}} + \lambda_{\sigma\text{д}}$

Для двухслойной обмотки $\lambda_{\sigma\text{п}}$ должен учитывать укорочение шага катушки

– коэффициент проводимости

Расчет λ_{σ} – Проектирование ЭМ,
под. ред. И.П.Копылова

ДАЛЕЕ – синхронные машины