

Обмотка статора машины переменного тока

Требования к обмотке статора:

- наименьший расход меди;
- удобство и наименьшие затраты при изготовлении;
- форма кривой ЭДС, наводимой в обмотке статора, должна быть практически синусоидальна

Параметры обмотки статора:

m_1 - число фазных обмоток;

Z_1 - общее число пазов сердечника статора;

в трехфазной обмотке каждая фазная обмотка занимает $Z_1/3$ пазов

- Каждая фазная обмотка представляет собой разомкнутую систему проводников.

- Элементом обмотки является катушка, состоящая из одного или нескольких витков.

- Элементы катушки, расположенные в пазах, называются пазовыми сторонами.

- Элементы катушки, расположенные вне пазов и служащие для соединения пазовых сторон, называются лобовыми частями.

- Часть дуги внутренней расточки статора, приходящаяся на один полюс, называется полюсным делением

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p} \quad \text{или} \quad \tau = \frac{Z_1}{2p}.$$

Обмотка статора машины переменного тока

- Расстояние между пазовыми сторонами, измеренное по внутренней поверхности статора, называется шагом обмотки по пазам y_1 .

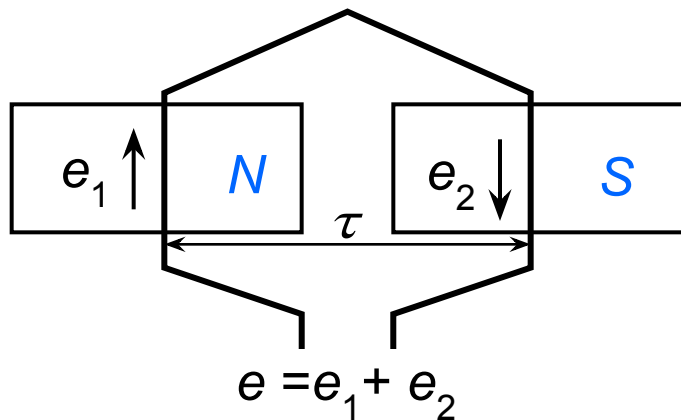
- Шаг обмотки называется полным или диаметральной, если он равен полюсному делению:

$$y_1 = Z_1 / 2p = \tau.$$

В этом случае ЭДС витка равна арифметической сумме ЭДС, наведенных в сторонах этого витка: $e = e_1 + e_2$

Если шаг обмотки $y_1 < \tau$, то он называется укороченным.

При этом ЭДС витка меньше арифметической суммы ЭДС, наведенных в сторонах этого витка: $e < e_1 + e_2$

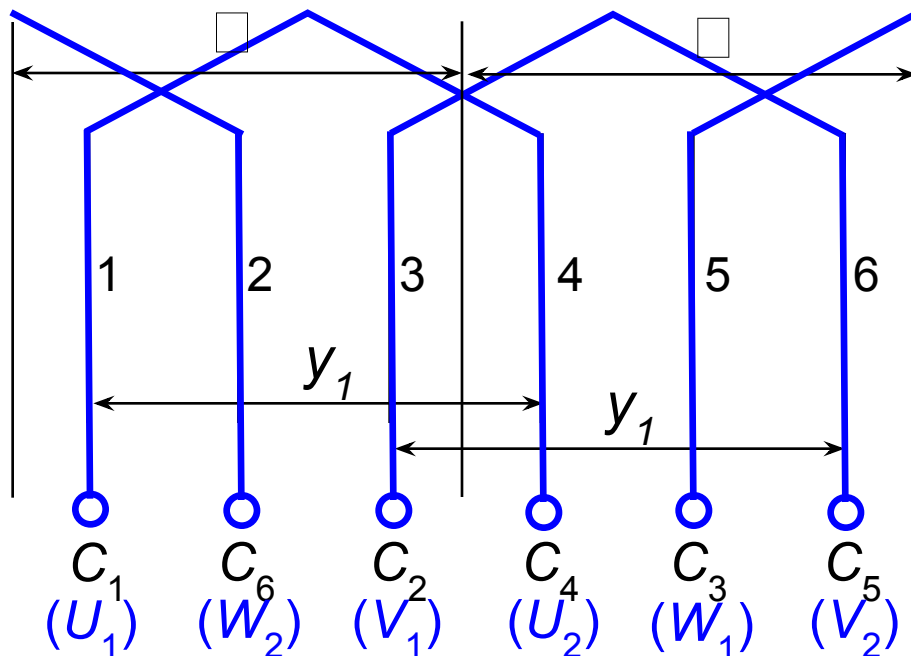
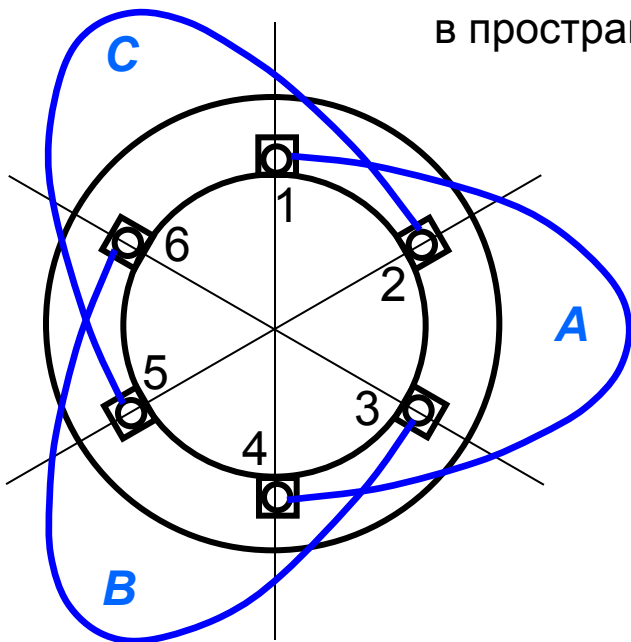


Для удобного и наглядного изображения катушек и их соединений используют развернутые схемы обмоток:

- на такой схеме цилиндрическую поверхность статора вместе с обмоткой условно разворачивают на плоскости, а все катушки изображают одновитковыми в виде прямых линий.

Обмотка статора машины переменного тока

Простейшая трехфазная обмотка статора двухполюсной машины состоит из трех катушек (А, В, С), оси которых смещены в пространстве на 120 эл. град. т.е. на 2/3 полюсного деления



Такая обмотка называется сосредоточенной однослойной.

Сосредоточенная обмотка – каждая катушка представляет собой фазную обмотку, сосредоточенную в двух пазах.

Однослойная обмотка – пазовая сторона одной катушки занимает весь паз.

Двухслойная обмотка – пазовая сторона одной катушки занимает половину паза по высоте, а другую половину этого паза занимает пазовая сторона другой катушки

Электродвижущая сила катушки

Вращающееся магнитное поле наводит в катушке с числом витков w_k ЭДС, мгновенное значение которой

$$e_k = B_\delta 2l v w_k.$$

Линейная скорость движения магнитного поля относительно неподвижной катушки

$$v = \pi D_1 n_1 / 60 = \tau 2p n_1 / 60 = 2\tau f_1,$$

где $\pi D_1 = \tau 2p$ - длина поверхности расточки статора

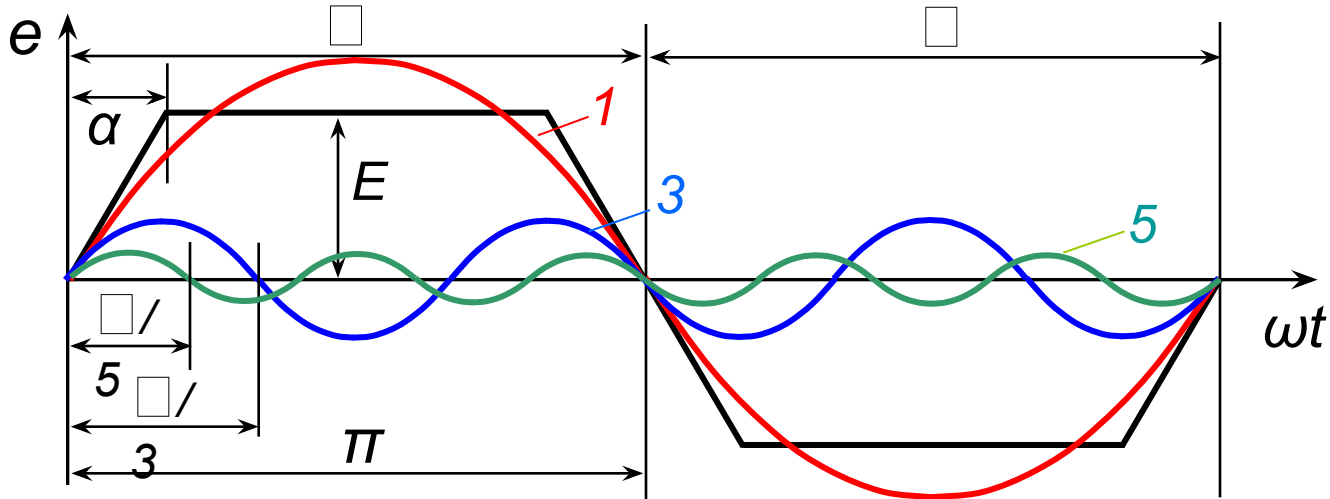
Тогда

$$e_k = B_\delta 4\tau l f_1 w_k.$$

Форма кривой ЭДС зависит от графика распределения B_δ и даже при неравномерном зазоре остается несинусоидальной и содержит ряд высших гармоник.

Так как кривая ЭДС симметрична относительно оси абсцисс, то она содержит лишь нечетные гармоники.

Электродвижущая сила катушки



При разложении в гармонический ряд периодической ЭДС трапецеидальной формы получаем

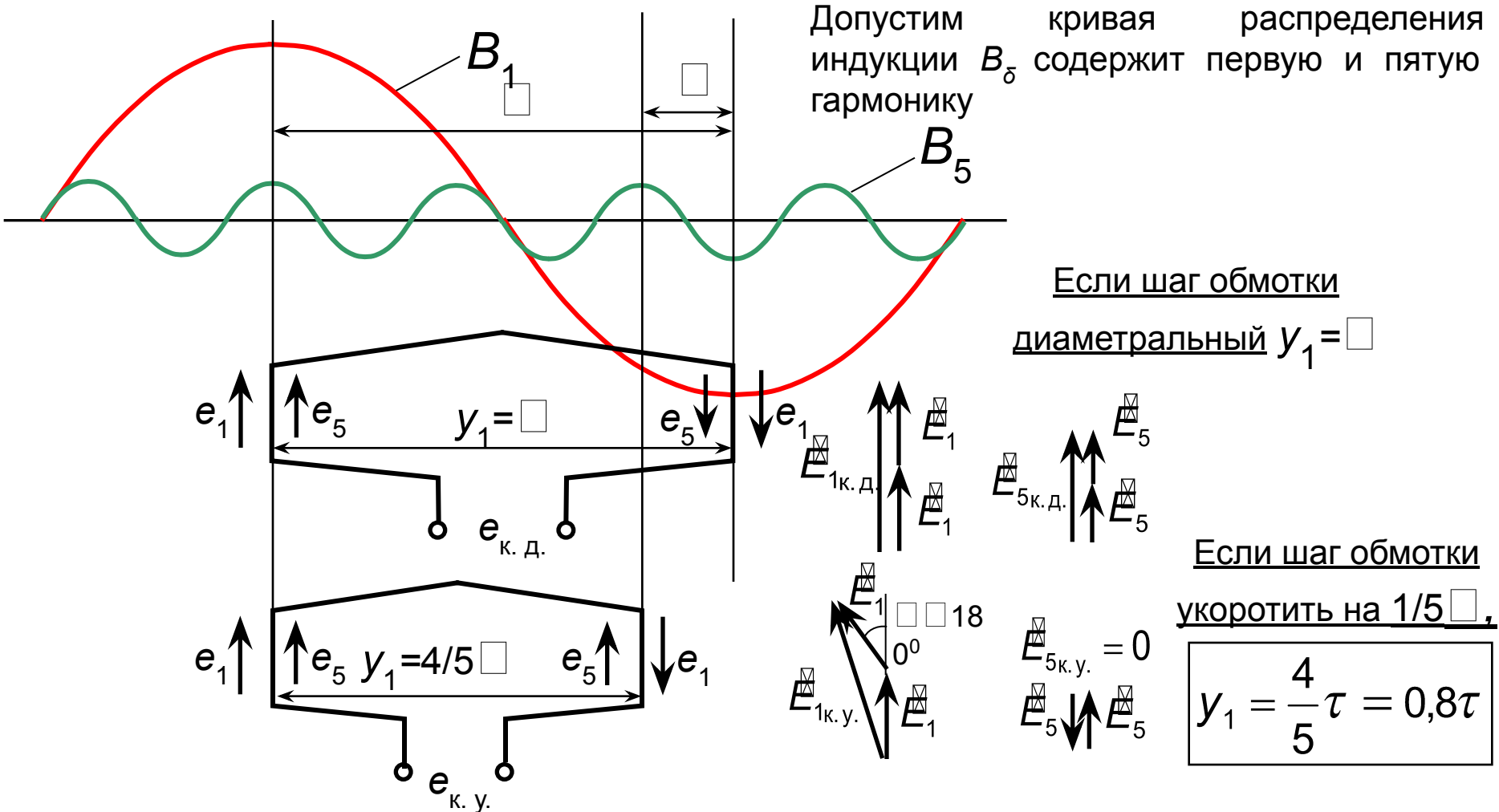
$$e = \frac{4E}{\pi\alpha} \left(\sin \alpha \sin \omega_1 t + \frac{1}{3^2} \sin 3\alpha \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5^2} \sin 5\alpha \sin 5\omega_1 t + \dots + \frac{1}{\nu^2} \sin \nu\alpha \sin \nu\omega_1 t \right).$$

С ростом номера гармоники ν ее амплитуда уменьшается пропорционально $\sin \nu\alpha / \nu^2$, поэтому практическое влияние на форму кривой оказывают гармоники не выше седьмой.

Электродвижущая сила катушки

Токи и ЭДС третьей гармоники во всех фазах трехфазной обмотки совпадают во времени (по фазе), поэтому в линейной ЭДС (напряжении) при схемах соединения Y или Δ третья гармоника отсутствует.

Рассмотрим вопрос ослабления пятой гармоники



Электродвижущая сила катушки

Для ослабления седьмой гармоники необходимо шаг обмотки

укоротить на $1/7$ □, т.е.

$$y_1 = \frac{6}{7} \tau = 0,857\tau$$

Отношение шага обмотки к полюсному делению называют относительным шагом обмотки:

$$\beta = \frac{y_1}{\tau}$$

Обычно принимают $\beta = 0,80 \div 0,89$, что обеспечивает ослабление как пятой так и седьмой гармоник.

Относительное укорочение шага обмотки $\varepsilon = 1 - \beta$ вызывает не только ослабление ЭДС высших гармоник, но и снижение ЭДС первой (основной) гармоники:

$$E_{1_{к.у.}} = E_1 + E_1 \cdot \cos(\varepsilon \cdot 180^0) < E_{1_{к.д.}}$$

Уменьшение ЭДС катушки в результате укорочения шага обмотки на величину ε учитывается коэффициентом укорочения шага

$$k_y = \frac{E_{1_{к.у.}}}{E_{1_{к.д.}}}$$

Электродвижущая сила катушечной группы

Обмотки статора: сосредоточенные и распределенные.

Сосредоточенная обмотка – все катушки одной фазы, приходящиеся на один полюс и образующие катушечную группу, укладываются в двух пазах и образуют *одну большую катушку*.

Недостатки сосредоточенных обмоток:

- необходимость вырубки в пластинах статора пазов большой площади, необходимой для размещения значительного числа пазовых сторон;
- необходимость увеличения наружного диаметра статора и размеров машины

В распределенной обмотке – все катушки равномерно расположены по периметру расточки статора. При этом катушки одной фазы, приходящиеся на один полюс, т. е. одной катушечной группы, занимают более двух пазов

Число пазов, приходящихся на полюс и фазу

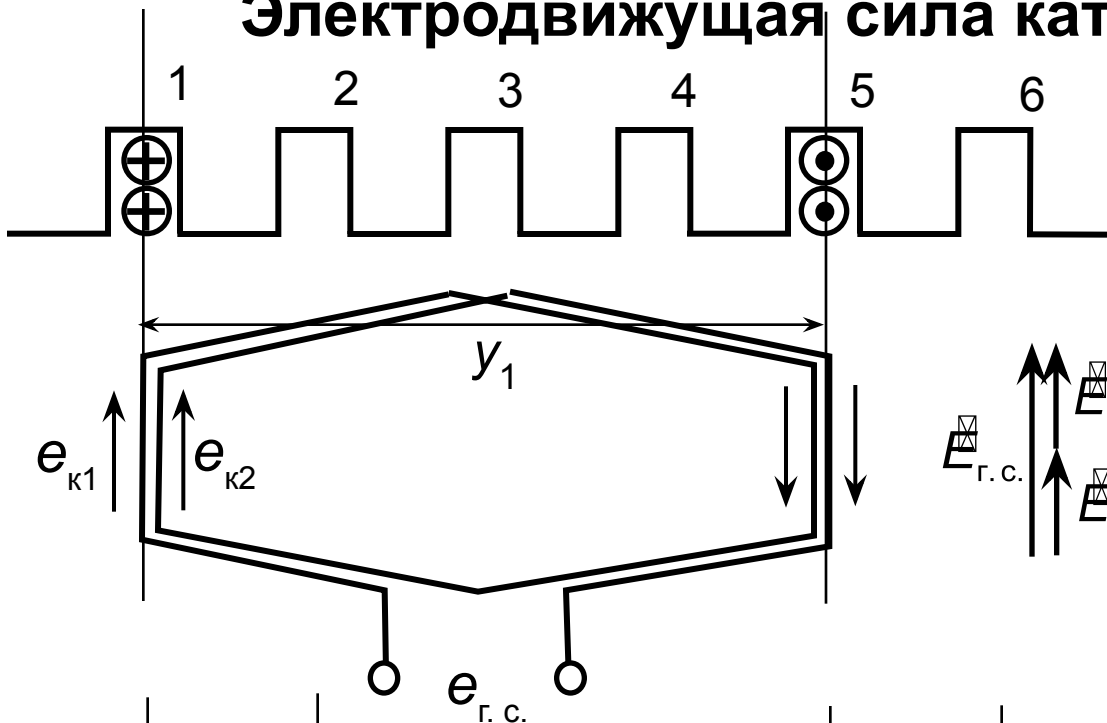
$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1},$$

В сосредоточенной обмотке $q_1 = 1$; в распределенной $q_1 > 1$.

В распределенной двухслойной обмотке:

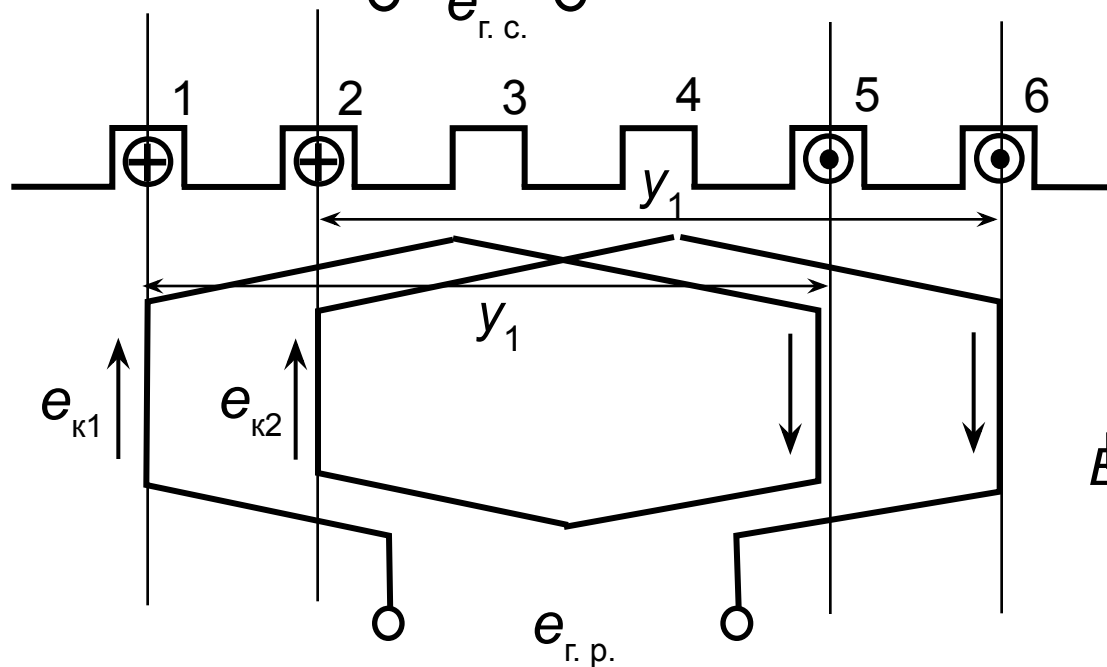
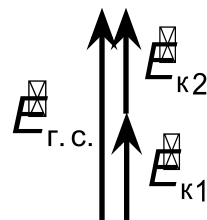
- число катушечных групп в каждой фазе равно числу полюсов $2p$;
- общее число катушечных групп $A = 2pm_1$;
- число катушек в катушечной группе q_1 .

Электродвижущая сила катушечной группы



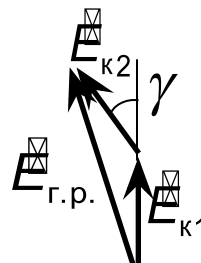
В сосредоточенной обмотке

$$E_{г.с.} = E_{k1} + E_{k2} = E_k \cdot q$$



В распределенной обмотке

$$E_{г.р.} = E_{k1} + E_{k2} = \sum_1^q E_k < E_{г.с.}$$



Электродвижущая сила катушечной группы

Уменьшение ЭДС катушечной группы в результате распределения обмотки по пазам учитывается коэффициентом распределения

$$k_p = \frac{E_{г.р.}}{E_{г.с.}} < 1$$

Для первой (основной) гармоники $k_p = \frac{\sin(0,5 \cdot q_1 \cdot \gamma)}{q_1 \cdot \sin(0,5 \cdot \gamma)}$,

где $\gamma = \frac{360 \cdot p}{Z_1}$, - угол сдвига между векторами пазовых ЭДС.

Для V -й гармоники $k_p = \frac{\sin(0,5 \cdot v \cdot q_1 \cdot \gamma)}{q_1 \cdot \sin(0,5 \cdot v \cdot \gamma)}$,

Увеличение q_1 вызывает сравнительно небольшое уменьшение коэффициента распределения для основной гармоники и значительное его уменьшение для высших гармоник

Электродвижущая сила обмотки статора

Мгновенное значение ЭДС катушки обмотки статора

$$e_k = B_\delta 4\tau l f_1 w_k.$$

При синусоидальном законе распределения $B_\delta = B_m \sin \omega_1 t$.

$$E_{k_{\max}} = B_{\max} 4\tau l f_1 w_k.$$

Среднее значение индукции $B_{\text{ср}}$ при синусоидальном законе распределения B_δ

$$B_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} B_{\max}.$$

Тогда $E_{k_{\max}} = 2\pi B_{\text{ср}} \tau l f_1 w_k.$

Действующее значение ЭДС катушки $E_k = \frac{E_{k_{\max}}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} B_{\text{ср}} \tau l f_1 w_k.$

Произведение τl - площадь полюсного деления,

Следовательно $B_{\text{ср}} \tau l = \Phi$ - основной магнитный поток статора

Действующее значение ЭДС катушки с диаметральной шагом

$$E_k = 4,44 \Phi f_1 w_k.$$

Электродвижущая сила обмотки статора

Учитывая, что число последовательно соединенных витков в фазной обмотке

$$w_1 = 2p \cdot q_1 \cdot w_k,$$

получим действующее значение ЭДС фазной обмотки статора

$$E_1 = 4,44 \Phi f_1 w_1 k_{об1},$$

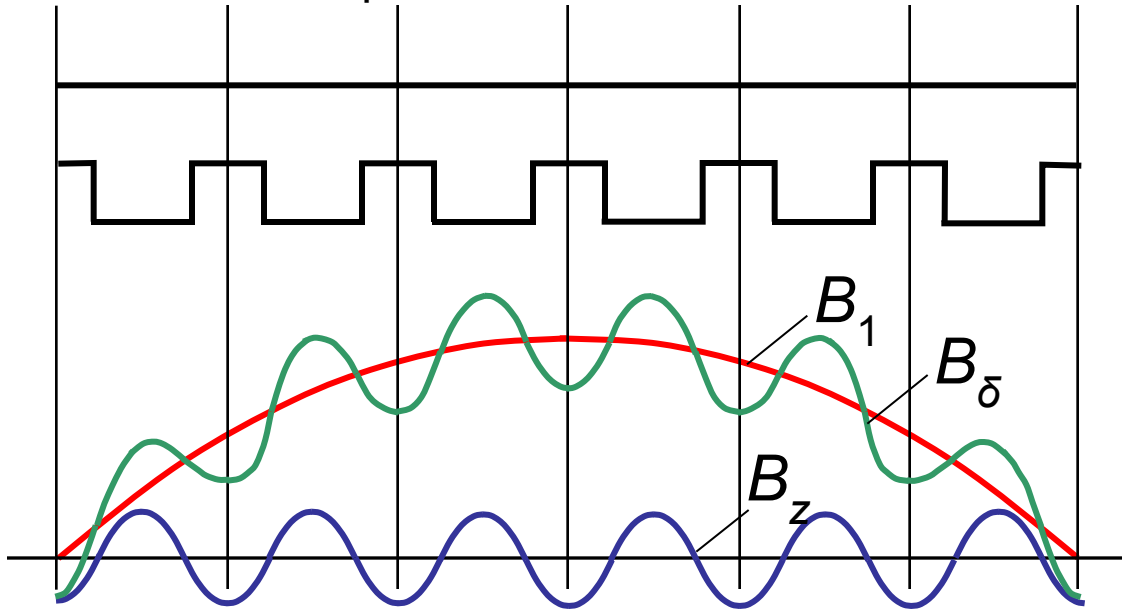
где $k_{об1} = k_{y1} \cdot k_{p1}$ - обмоточный коэффициент для основной гармоники, учитывающий уменьшение ее ЭДС, обусловленное укорочением шага обмотки и распределением ее по пазам.

Значение линейной ЭДС зависит от схемы соединения обмоток статора:

- при соединении «звездой» $E_{1л} = \sqrt{3} \cdot E_1;$
- при соединении «треугольником» $E_{1л} = E_1.$

Зубцовые гармоники ЭДС

Из-за наличия зубцов и пазов на поверхности статора все гармонические составляющие магнитного поля B_{δ} приобретают зубчатую форму, что приводит к появлению зубцовых гармоник в кривой ЭДС, наведенной в обмотке статора.



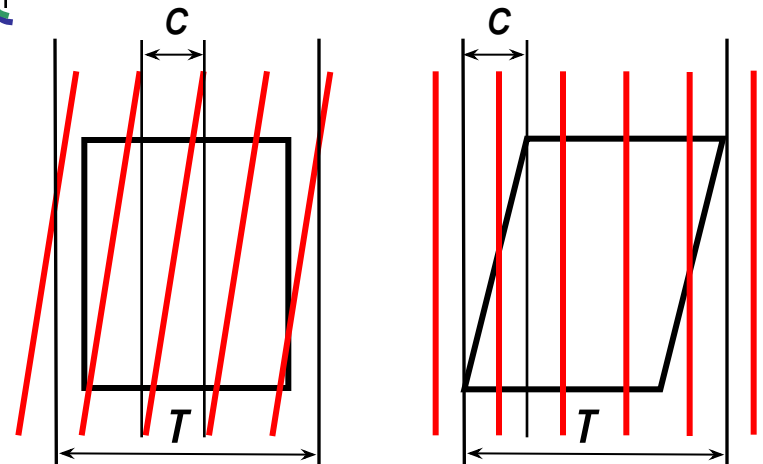
Вредное воздействие зубцовых гармоник ЭДС:

- вызывают дополнительные потери в машине;
- имея повышенную частоту, оказывают мешающее влияние на линии связи.

Эффективное средство ослабления зубцовых гармоник ЭДС –

скос пазов или скос полюсных наконечников
(в синхронных машинах)

Обычно скос составляет одно зубцовое деление



Магнитодвижущая сила обмотки статора

МДС сосредоточенной обмотки

При анализе МДС будем исходить из следующего:

1. Ток в обмотке статора синусоидален, и следовательно и МДС обмотки является синусоидальной функцией времени.
2. МДС обмоток переменного тока изменяется во времени и вместе с тем распределена по периметру статора (т.е. МДС является функцией не только времени, но и пространства).
3. Воздушный зазор по периметру статора постоянен, т.е. сердечник ротора цилиндрический.
4. Ток в обмотке ротора отсутствует, т.е. ротор не создает магнитного поля.

МДС сосредоточенной обмотки

Рассмотрим двухполюсную машину переменного тока с сосредоточенной однофазной катушкой с шагом $y_1 = T$

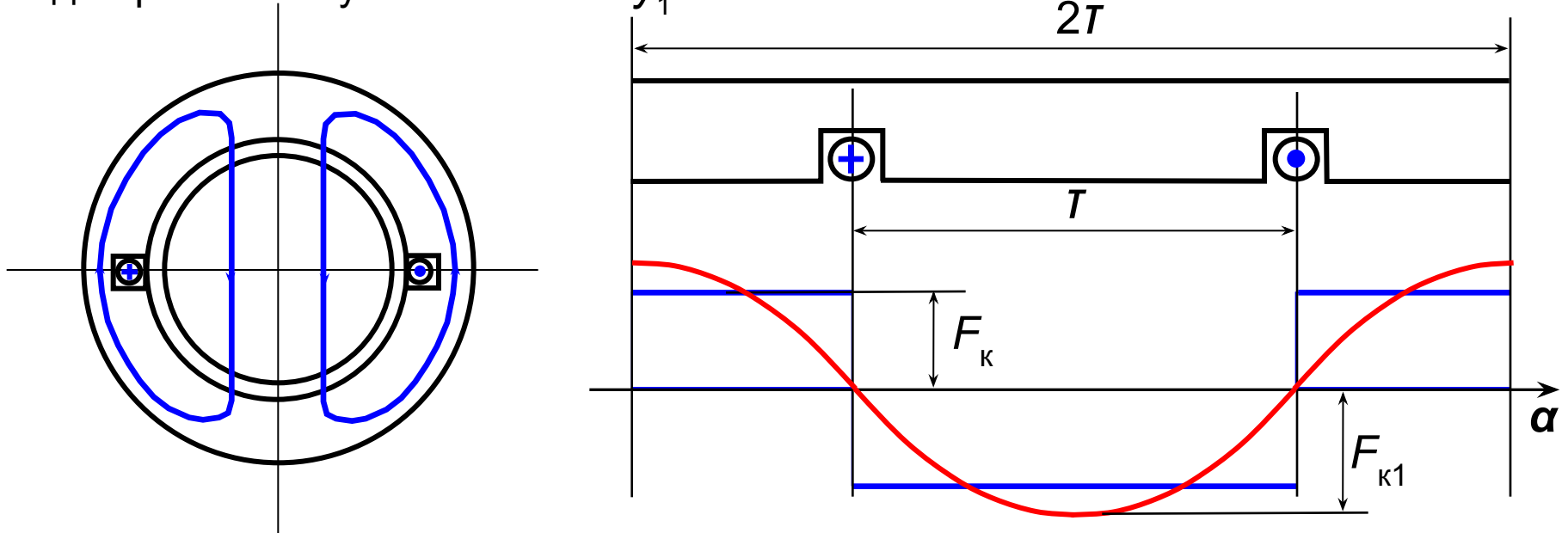


График МДС имеет прямоугольную форму с высотой

$$F_K = 0,5 I_{1_{max}} w_K = 0,5 \sqrt{2} I_1 w_K$$

Разложим эту МДС в гармонический ряд

$$f(\alpha) = \frac{4F_K}{\pi} \left(\cos \alpha - \frac{1}{3} \cos 3\alpha + \frac{1}{5} \cos 5\alpha - \dots \pm \frac{1}{v} \cos v\alpha \right).$$

Т.о. МДС сосредоточенной обмотки статора содержит *основную и высшие нечетные гармоники*

МДС сосредоточенной обмотки

Мгновенные значения любой гармоники МДС зависят от пространственного положения ее ординат относительно начала отсчета пространственного угла α . Поэтому гармоники МДС называют пространственными.

Амплитуда первой пространственной гармоники

$$F_{k1} = \frac{4}{\pi} F_k = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} I_1 w_k = 0,9 I_1 w_k$$

Гармоники МДС имеют и временную зависимость, т.к. по катушке протекает переменный ток. Но временная зависимость у всех гармоник одинакова и определяется частотой тока в катушке

Мгновенное значение первой гармоники $f_{k1} = F_{k1} \cdot \sin \omega t \cdot \cos \alpha$

Зависимость МДС любой гармоники от времени и пространственного угла α

$$f_{kv} = \pm F_{kv} \cdot \sin \omega t \cdot \cos v\alpha,$$

где $F_{kv} = F_{k1} / v = 0,9 I_1 w_k / v$

Полезный магнитный поток в машине переменного тока создает основная гармоника МДС, а высшие пространственные гармоники оказывают вредное воздействие.

МДС распределенной обмотки

Катушечная группа обмотки состоит из трех катушек:

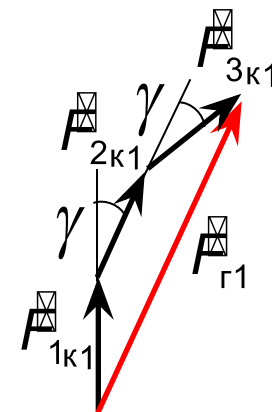
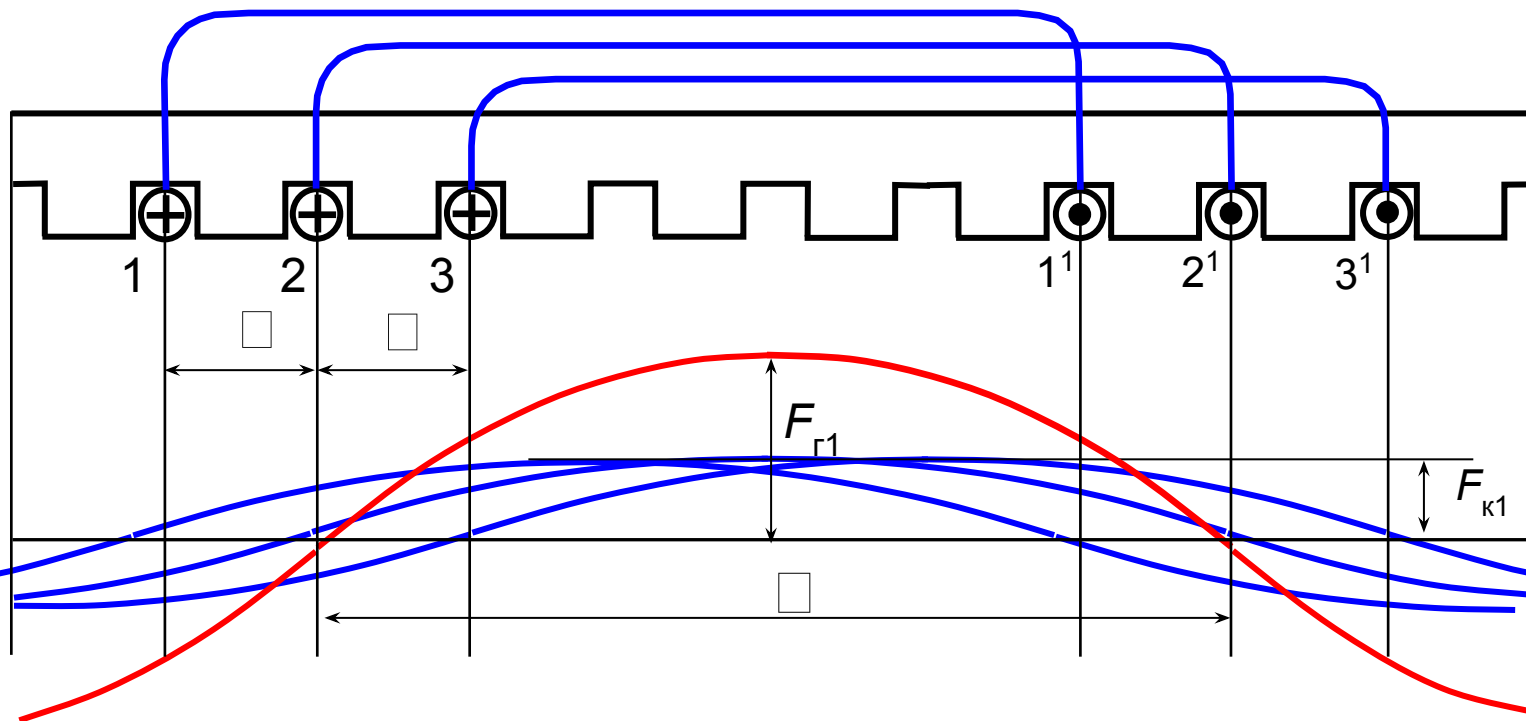


График МДС основной гармоники каждой из катушек – синусоида, максимальное значение которой совпадает с осью катушки.

Вектора МДС катушек F_{1k1} , F_{2k1} и F_{3k1} сдвинуты в пространстве на пазовый угол \square .

График МДС основной гармоники катушечной группы – также синусоида, а амплитуда вектора F_{r1} определяется как геометрическая сумма векторов F_{1k1} , F_{2k1} и F_{3k1}

МДС распределенной обмотки

Таким образом распределение катушек по пазам приводит к уменьшению МДС катушечной группы (по сравнению со сосредоточенной обмоткой), что учитывается коэффициентом распределения k_p .

МДС основной пространственной гармоники катушечной группы

$$F_{\Gamma 1} = F_{k1} q_1 k_{p1} = 0,9 I_1 w_k q_1 k_{p1}$$

Для фазной обмотки МДС основной пространственной гармоники

$$F_{\phi 1} = 0,9 I_1 w_1 k_{об1} / p,$$

где $W_1 = p \cdot q_1 \cdot W_k$ - общее число витков в фазной обмотке;

$k_{об1}$ - обмоточный коэффициент учитывающий уменьшение амплитуды основной гармоники МДС в результате укорочения шага обмотки и распределения по пазам.

Ток в обмотке статора переменный, и, следовательно МДС однофазной обмотки статора пульсирует с частотой тока f_1 , принимая различные значения (от $+F_{\phi 1}$ до $-F_{\phi 1}$) на каждом полюсном делении.

МДС трехфазной обмотки статора

При подключении трехфазной обмотки в трехфазную сеть, в обмотке появятся токи:

$$\begin{cases} i_A = I_{A\max} \sin \omega t \\ i_B = I_{B\max} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_C = I_{C\max} \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

Ток каждой обмотки создает пульсирующую МДС, а совокупность действия этих МДС создает результирующую МДС, вектор которой вращается относительно статора с синхронной частотой

$$n_1 = 60 f_1 / p,$$

Мгновенные значения основной гармоники МДС фазных обмоток, оси которых смещены в пространстве на 120 эл. град.:

$$\begin{cases} f_{A1} = F_{\phi_1} \cdot \sin \omega_1 t \cdot \cos \alpha = 0,5 F_{\phi_1} [\sin(\omega_1 t - \alpha) + \sin(\omega_1 t + \alpha)] \\ f_{B1} = F_{\phi_1} \cdot \sin(\omega_1 t - 120^\circ) \cdot \cos(\alpha - 120^\circ) = \\ \quad = 0,5 F_{\phi_1} [\sin(\omega_1 t - \alpha) + \sin(\omega_1 t + \alpha - 240^\circ)] \\ f_{C1} = F_{\phi_1} \cdot \sin(\omega_1 t - 240^\circ) \cdot \cos(\alpha - 240^\circ) = \\ \quad = 0,5 F_{\phi_1} [\sin(\omega_1 t - \alpha) + \sin(\omega_1 t + \alpha - 120^\circ)] \end{cases}$$

МДС трехфазной обмотки статора

Мгновенные значения основной гармоники трехфазной обмотки

$$f_1 = f_{A_1} + f_{B_1} + f_{C_1} = 1,5 \cdot F_{\phi_1} \sin(\omega_1 t - \alpha) = F_1 \sin(\omega_1 t - \alpha),$$

где $F_1 = 1,5 \cdot F_{\phi_1} = 1,35 I_1 w_1 k_{об1} / p$, - амплитуда основной гармоники МДС трехфазной обмотки

В общем случае амплитуда основной гармоники МДС m_1 -фазной обмотки на один полюс

$$F_1 = 0,5 m_1 F_{\phi_1} = 0,45 m_1 I_1 w_1 k_{об1} / p$$

Круговое, эллиптическое и пульсирующее магнитные поля

Круговое магнитное поле – пространственный вектор магнитной индукции B_{δ} этого поля вращается равномерно и своим острием описывает окружность.

Круговое магнитное поле создается многофазной обмоткой статора, если векторы магнитной индукции каждой фазы одинаковы и представляют собой симметричную систему.

Условие получения кругового магнитного поля:

для трехфазной обмотки – оси обмоток смещают в пространстве на 120 эл. градусов друг относительно друга и включают в сеть с симметричным трехфазным напряжением;

для двухфазной обмотки – оси обмоток смещают в пространстве на 90 эл. градусов друг относительно друга и питают их токами, сдвинутыми по фазе на 90 градусов.

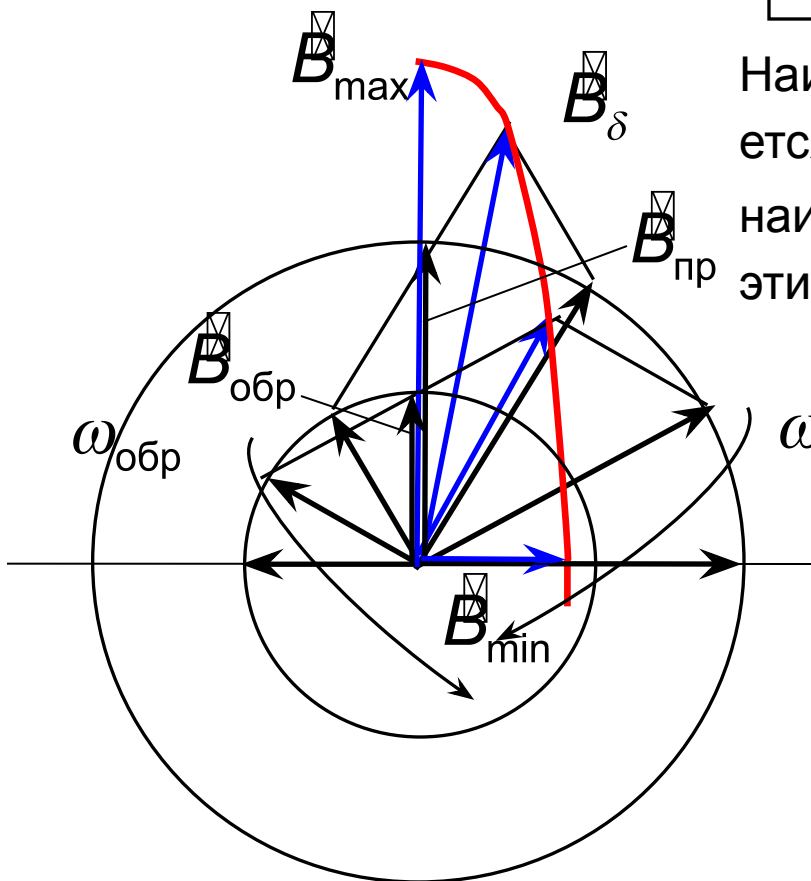
Если векторы магнитных индукций не образуют симметричную систему, то вращающееся поле становится эллиптическим, т. е. вектор B_{δ} не остается постоянным во времени и вращается не равномерно ($\omega \neq \text{const}$).

Круговое, эллиптическое и пульсирующее магнитные поля

Вектор магнитной индукции эллиптического поля B_{δ} можно представить в виде суммы векторов прямой $B_{пр}$ и обратной $B_{обр}$ составляющих, вращающихся в разные стороны:

$$B_{\delta} = B_{пр} + B_{обр}$$

при $B_{пр} > B_{обр}$



Наибольшее значение индукции B_{max} наблюдается при совпадении векторов $B_{пр}$ и $B_{обр}$, а наименьшее B_{min} - при встречном направлении этих векторов

Обратное магнитное поле неблагоприятно влияет на свойства машины переменного тока: в двигателях оно создает тормозной электромагнитный момент и ухудшает их эксплуатационные свойства

Круговое, эллиптическое и пульсирующее магнитные поля

Если прямая и обратная составляющие магнитного поля равны $\vec{B}_{\text{пр}} = \vec{B}_{\text{обр}}$, то результирующее поле становится пульсирующим.

Вектор магнитной индукции пульсирующего поля \vec{B}_{δ} неподвижен в пространстве и лишь изменяется во времени от $+B_{\text{max}}$ до $-B_{\text{max}}$ (когда векторы $\vec{B}_{\text{пр}}$ и $\vec{B}_{\text{обр}}$ совпадают по направлению), проходя через нулевое значение (когда векторы $\vec{B}_{\text{пр}}$ и $\vec{B}_{\text{обр}}$ направлены встречно)

Пульсирующее магнитное поле создает однофазная обмотка, включенная в сеть переменного тока.