

# Тихоходные двигатели

---

Микродвигатели с частотой вращения  
сотни, десятки и единицы об/мин



# Тихоходные электродвигатели

Традиционный двигатель + механический редуктор

- » снижение общего КПД
- » снижение общей надежности
- » увеличение габаритов и массы
- » повышенные шумы

Низкооборотная ЭМ

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

Уменьшение частоты (работа через преобразователь)

- » стоимость
- » габариты
- » надежность

Увеличение  $p$

- » увеличение диаметра
- » возможны специальные конструкции

- » Многополюсные ЭМ с когтеобразными полюсами
- » Двигатели с катящимся / волновым ротором
- » Двигатели с электромагнитной редукцией скорости

# ЭМ с когтеобразными полюсами

## Микродвигатели

# ЭМ с когтеобразными полюсами

На статоре – кольцевая обмотка возбуждения + когтеобразные полюсы  
На роторе – постоянные магниты

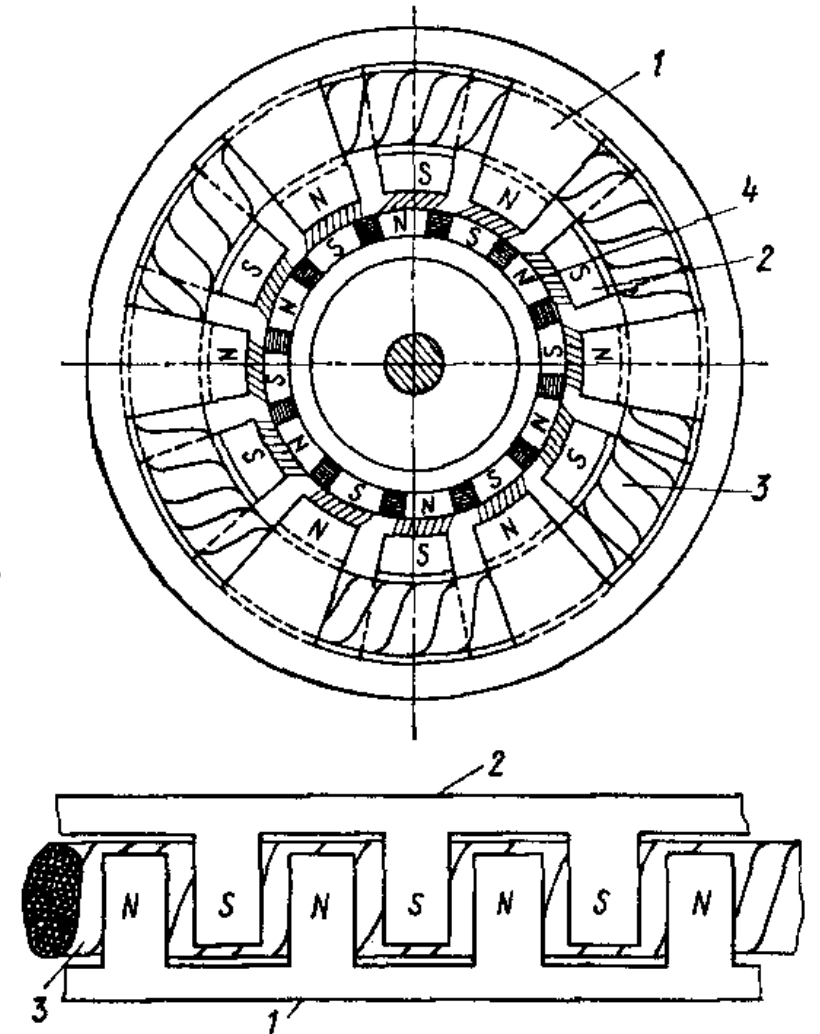
- 1 – передний торцевой щит с выступами, загнутыми назад
- 2 – задний торцевой щит с выступами, загнутыми вперед
- 3 – кольцевая ОВ
- 4 – ротор с радиальными ПМ

Ток ОВ → разная полярность торцевых щитов  
→ разная полярность когтеобразных выступов в зазоре

Переменный ток ОВ → пульсирующее поле → изменяющаяся полярность когтеобразных выступов → пульсирующий момент взаимодействия статора и ротора

Пуск двигателя – за полпериода изменения тока ОВ / момента (только малоинерционная нагрузка)

Для вращения в нужную сторону – пружины, храповики и т.д.



# ЭМ с когтеобразными полюсами

Основной недостаток – большие потоки рассеяния между когтеобразными выступами (терпимо при малых мощностях)

Достоинства

- » увеличение числа пар полюсов в малых габаритах
- » простота и технологичность

Известная конструкция – генератор с когтеобразными полюсами

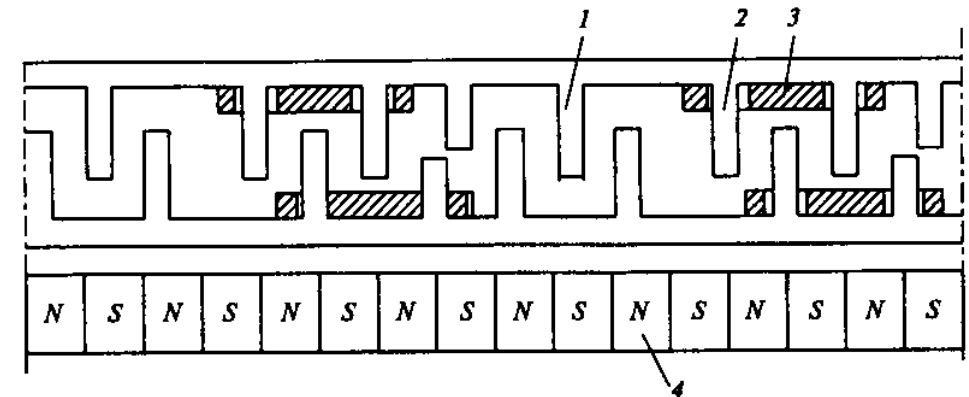
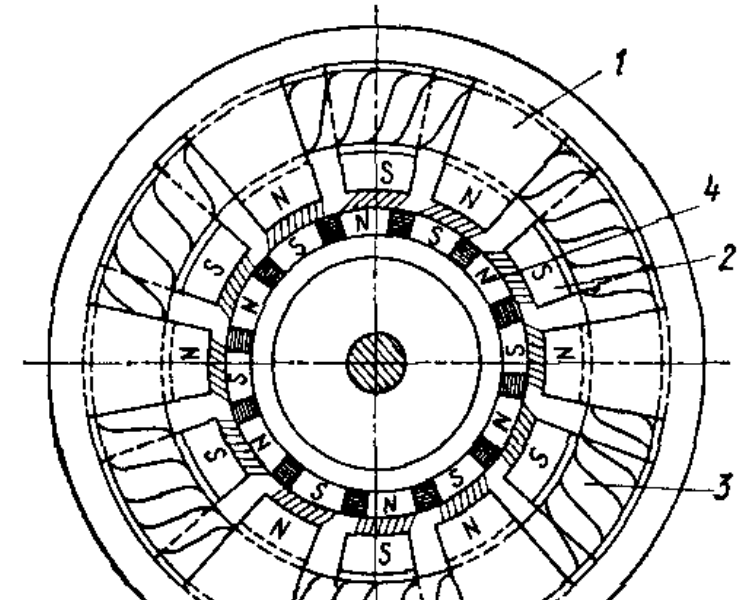


Для улучшения пусковых и рабочих свойств

- » экранирование части полюсов КЗ витками (3)
- » неравномерное распределение полюсов

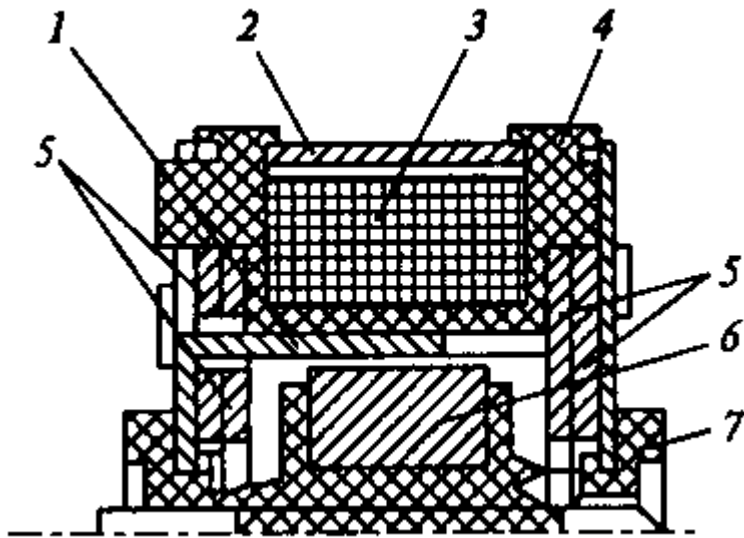
→ сдвиг потоков в пространстве и времени

→ эллиптическое вращающееся поле



# ЭМ с когтеобразными полюсами

Пример реализации – двигатель типа ДСО



1 – подшипниковый щит с когтеобразными полюсами

2 – внешнее ярмо

3 – кольцевая однофазная ОВ

4 – пластмассовый каркас

5 – медные пластины – экранируют часть полюсов (как КЗ витки)

6 – ротор с цилиндрическим ПМ с 16 радиальными полюсами

7 – подшипники скольжения

Направление вращения – в сторону экранированных полюсов  
(нераверсивный двигатель)

- » частота вращения 375 об/мин и меньше
- » малоинерционная нагрузка
- » мощности – до 1 Вт
- » КПД – 3...5%

# ЭМ с когтеобразными полюсами

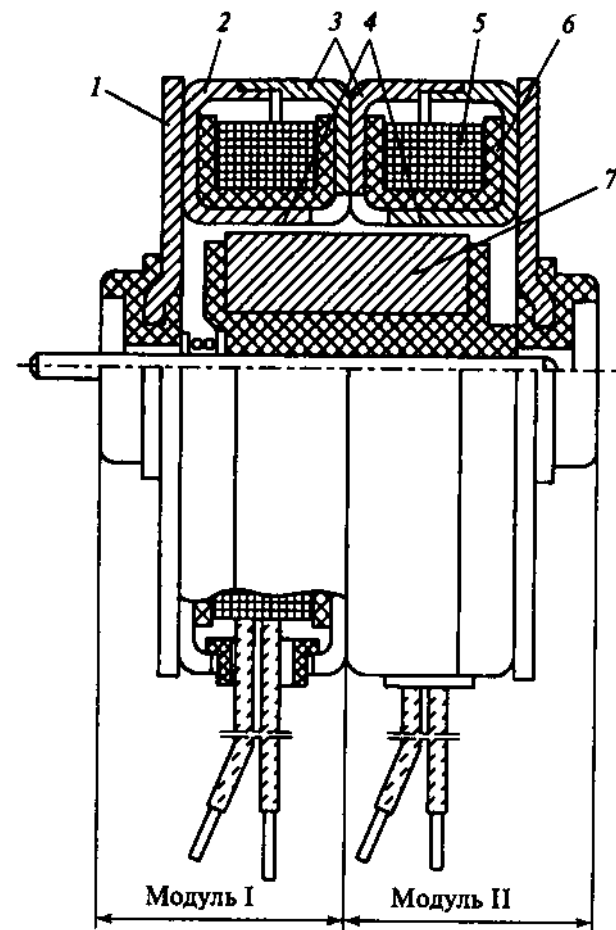
Наилучшая форма поля – в конденсаторных многополюсных СД типа ДСК

Два одинаковых симметричных модуля

- 1 – дисковый подшипниковый щит
- 2 – внешний магнитопровод
- 3 – внутренний магнитопровод
- 4 – когтеобразные полюсы (выштампованы в магнитопроводе 2 со стороны зазора)
- 5 – кольцевая ОВ
- 6 – пластмассовый каркас ОВ
- 7 – многополюсный радиальный ПМ

- » каждая ОВ при питании переменным током создает пульсирующее поле
- » модули сдвинуты тангенциально на 90 эл.град.
- » в цепь одного из модулей включен конденсатор
- » ротор (магнит) общий для двух модулей – воспринимает поля двух модулей как единое вращающееся поле (возможно, эллиптическое)

Для трехфазной сети – три модуля, сдвинутых на 120 эл.град.



# Двигатели с катыщимся ротором

Москвитин А.И., 1944 г.



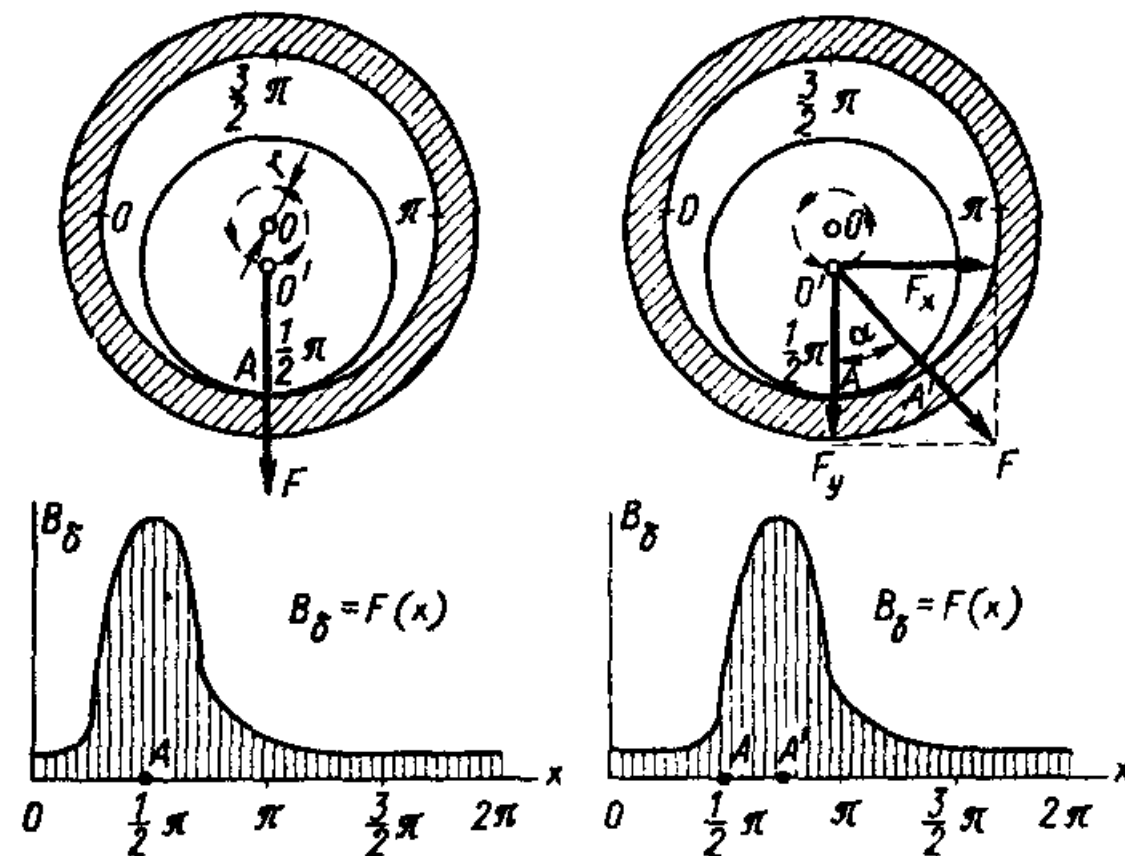
# Двигатели с катящимся ротором

Конструкция ДКР объединяет в себе электродвигатель и редуктор  
ДКР способны создавать большой момент при низкой частоте вращения  
(до 100 об/мин и меньше 1 об/мин)

- » Ротор – гладкий, шихтованный, без обмоток, расположен эксцентрично внутри статора
- » Статор – традиционный, создает вращающееся несимметричное магнитное поле

Рассмотрим работу ДКР

- » ротор притягивается к поверхности статора в точке  $A$  с наибольшим значением индукции магнитного поля
- » затем поле поворачивается на угол  $\alpha$
- » сила магнитного притяжения  $F$  также поворачивается (примерно на угол  $\alpha$ )
- » тангенциальная составляющая  $F_x$  стремится повернуть ротор
- » ротор начинает катиться вслед за полем
- » при наличии вращающегося поля ротор катится синхронно с максимумом поля



# Двигатели с катящимся ротором

При обкатывании ротором внутренней поверхности статора ось ротора  $O'$  также синхронно вращается вокруг оси статора  $O$

Сам ротор при качении поворачивается вокруг своей оси со скоростью  $n_2$ , которая много меньше скорости поля  $n_1$

При повороте поля статора на 1 оборот ротор повернется вокруг своей оси в обратную сторону на угол  $\Omega_2$

При этом ротор пройдет путь, равный разности длин окружностей статора и ротора

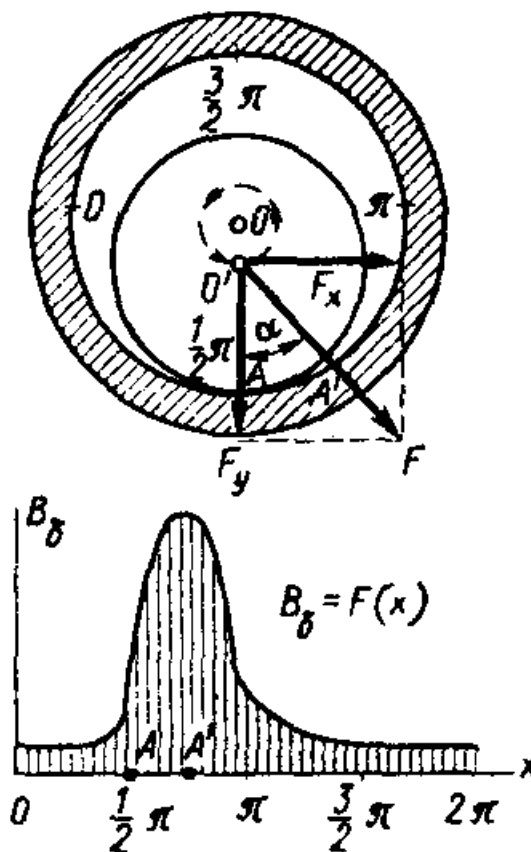
$$\Omega_2 R_R = 2\pi R_S - 2\pi R_R \quad \text{отсюда} \quad \Omega_2 = 2\pi \frac{R_S - R_R}{R_R}$$

Поскольку 1 оборот поля статора равен  $\Omega_1 = 2\pi$ ,

можно записать соотношение углов поворота ротора и поля статора  $\Omega_2 = \Omega_1 \frac{R_S - R_R}{R_R}$

Переходя от углов к частотам вращения  $n_2 = n_1 \frac{R_S - R_R}{R_R}$

Коэффициент редукции ДКР может быть очень большим  $k_p = \frac{n_1}{n_2} = \frac{R_R}{R_S - R_R}$



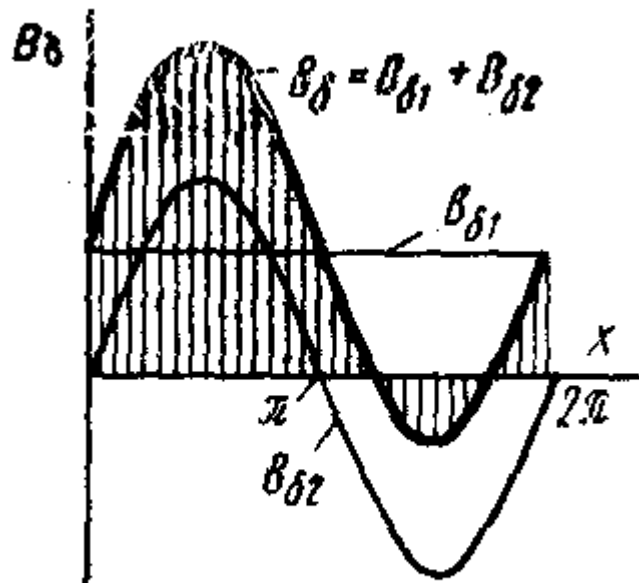
# Способы получения несимметричного вращающегося поля

Для работы ДКР требуется вращающееся несимметричное магнитное поле

Простой способ получить такое поле

– совместить униполярное магнитное поле  $B_{\delta 1}$

и круговое вращающееся поле  $B_{\delta 2}$



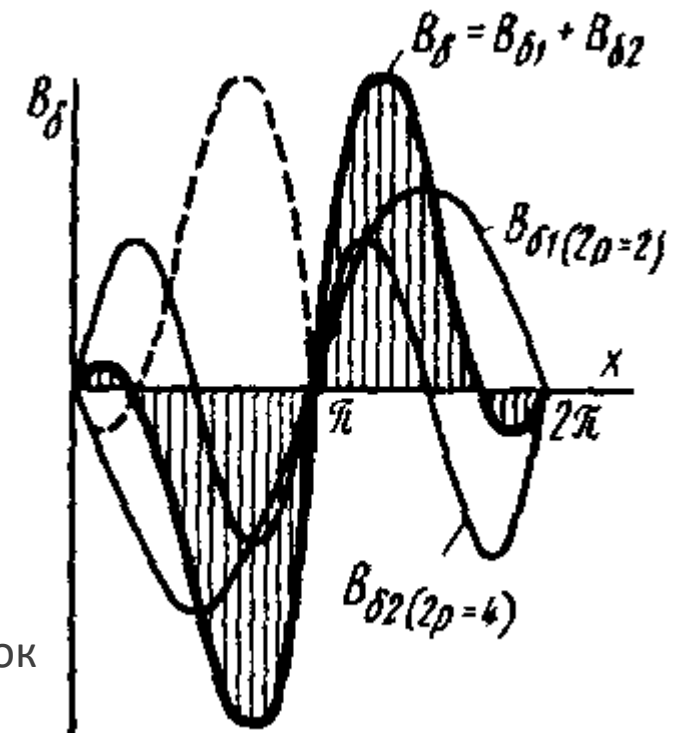
Другой способ

– совместить круговые вращающиеся поля с разной полюсностью

Например,  $B_{\delta 1}$  с  $2p = 2$  и  $B_{\delta 2}$  с  $2p = 4$

Сила магнитного притяжения определяется величиной индукции, но не направлением поля

→ для притяжения ротора важен модуль индукции (пунктирная кривая)

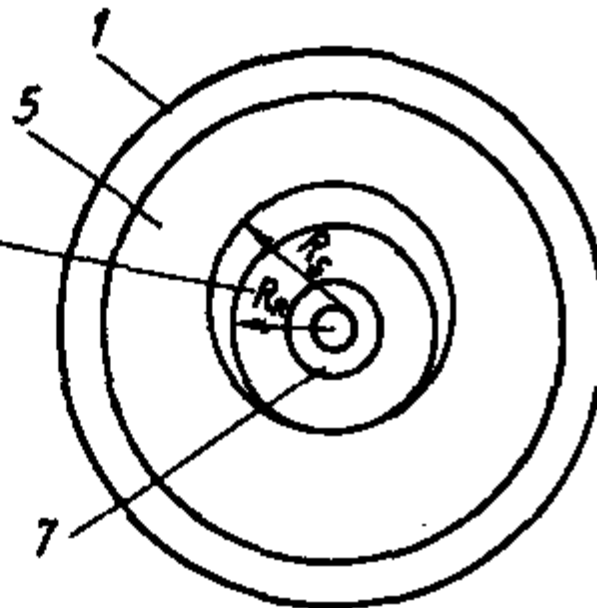
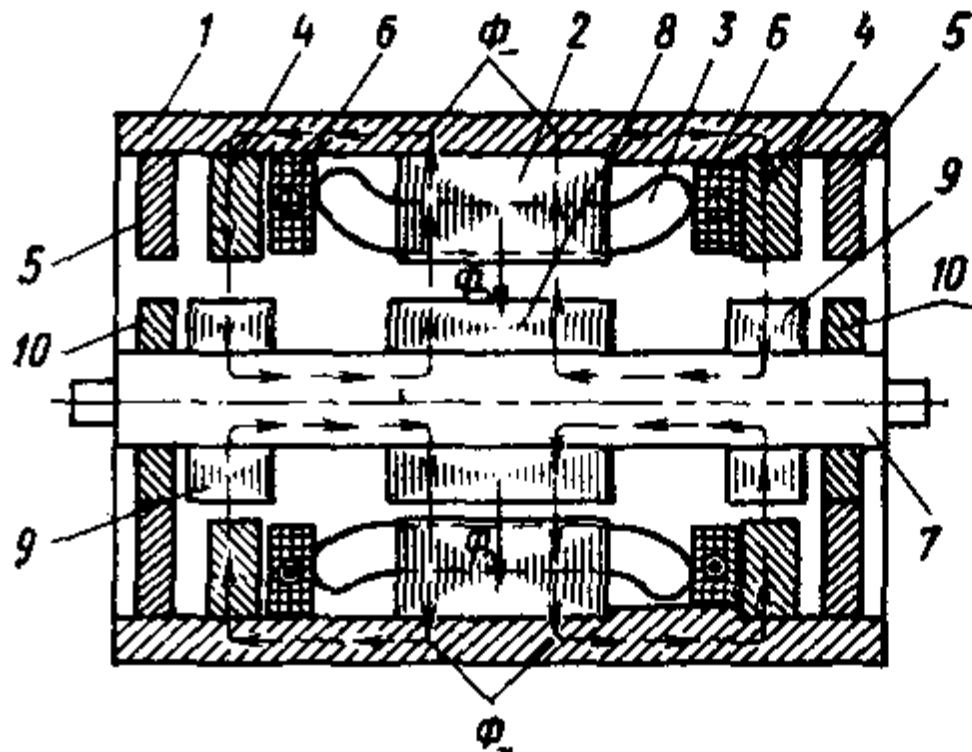


Возможно также применение зубцовых обмоток с последовательным возбуждением фаз

# Конструкция ДКР

В реальных двигателях не допускается механическое касание шихтованных сердечников статора и ротора  
Обкатывание осуществляется по специальным поверхностям за пределами активной зоны

Пример конструкции ДКР



- 1 – корпус (стальной)
- 2 – сердечник статора
- 3 – трехфазная обмотка статора
- 4 – ферромагнитные кольца
- 5 – катки статора
- 6 – обмотка постоянного тока
- 7 – вал (магнитопровод ротора)
- 8,9 – сердечники ротора
- 10 – катки ротора

$n_2$  определяется радиусами катков

Катки статора и ротора

- » зубчатые (без проскальзывания)
- » или гладкие (износоустойчивое покрытие)

Левые и правые катки должны иметь строго одинаковые диаметры  
(лучше небольшую конусность обкатываемых поверхностей)

**ЭМАУ**

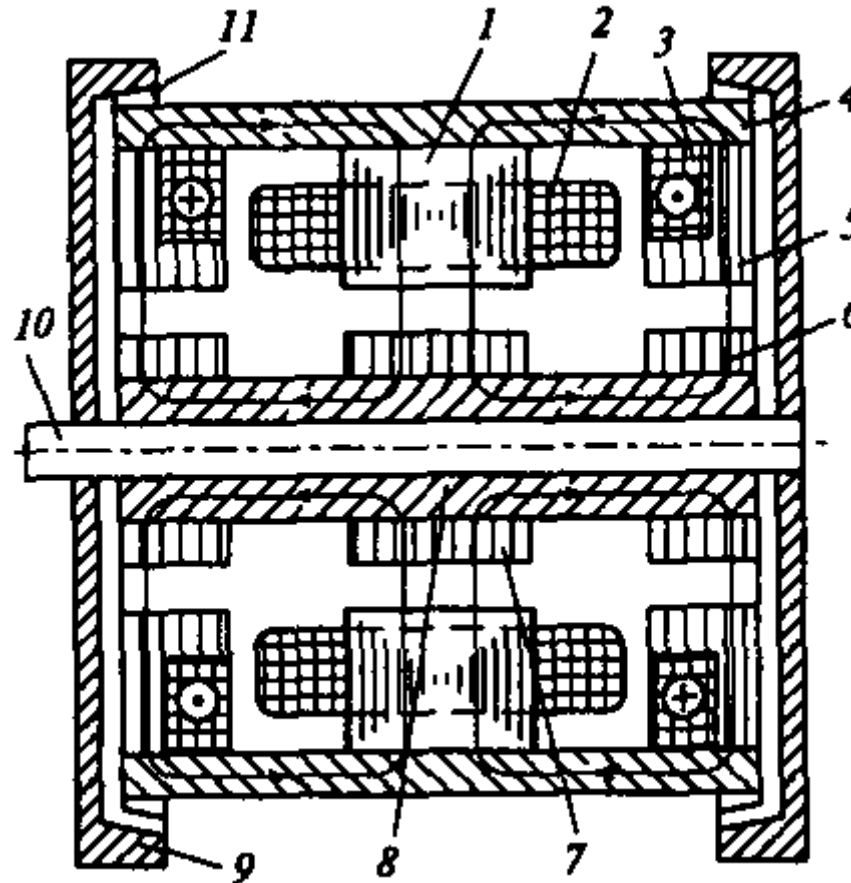
Ширинский С.В., каф.ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

# Конструкция ДКР

Возможно обеспечить обкатывание по наружной поверхности статора

Здесь происходит обкатывание катков ротора 9 по направляющим 11 на наружной поверхности статора

При этом ротор вращается в направлении вращения поля статора

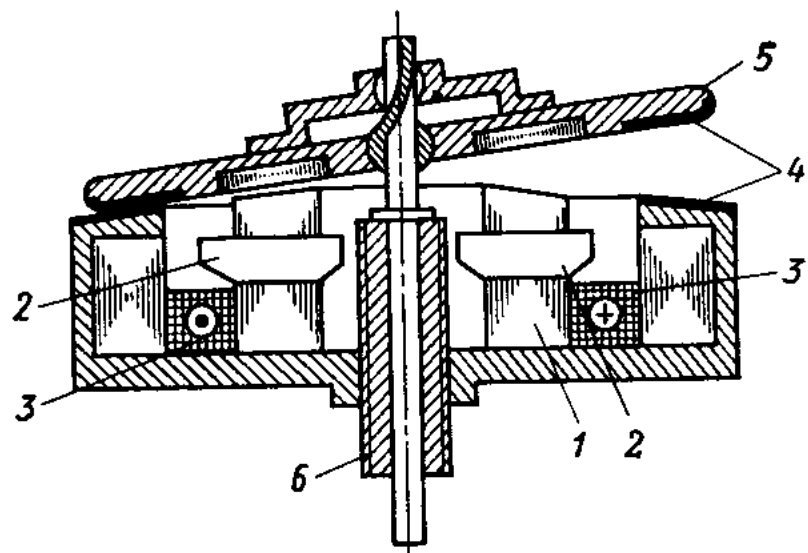


В ДКР ось ротора перемещается (по малой окружности) → для передачи момента требуются специальные эластичные муфты и гибкие передачи

- » усложнение конструкции
- » шумы и вибрации

# Конструкция ДКР

## Дисковый ДКР



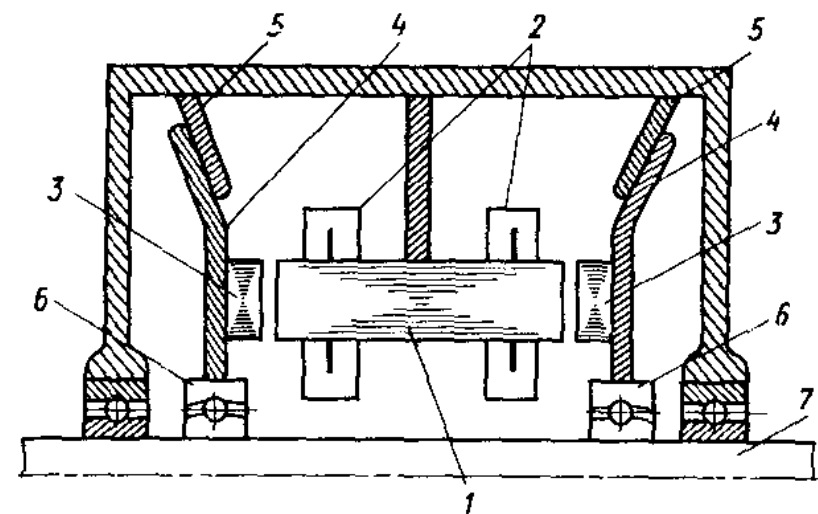
- 1 – статор
- 2 – обмотка переменного тока
- 3 – обмотка постоянного тока
- 4 – поверхности качения
- 5 – дисковый ротор
- 6 – винт регулировки частоты вращения

Специальный подшипник обеспечивает качение ротора, но исключает вращение относительно оси ротора  
→ не требуются гибкие передачи

Здесь отсутствуют радиальные вибрации, но есть аксиальные

Аксиальных вибраций нет в ДКР сдвоенной торцевой конструкции

Подшипники роторов допускают качания дисков, но не позволяют им прокручиваться относительно вала



# Уравнения ДКР

Вращающаяся МДС статора  $F_{\delta S}$  создает в зазоре несимметричную кривую индукции

$$B_{\delta S} = \mu_0 \frac{F_{\delta S}}{\delta_\alpha} = \mu_0 \frac{F_{1m}}{2\delta} \frac{2 \cos(\alpha - \theta) - \xi \cos \theta}{1 - \xi \cos \alpha}$$

где  $\delta_\alpha$  – величина неравномерного зазора в точке с координатой  $\alpha$

$\xi = e/\delta$  – относительный эксцентриситет

$\theta$  – угол между осью МДС статора  $F_{1m}$  и точкой касания

При  $\theta = 0$  МДС статора действует по продольной оси  $F_{1m} = F_{d1}$  и создает индукцию  $B_{\delta S} = B_d$

Ее первая гармоника  $B_{d1} = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi B_{\delta S} \cos \alpha d\alpha = \mu_0 \frac{F_{d1}}{\delta}$

При  $\theta = \pi/2$  МДС статора действует по поперечной оси  $F_{1m} = F_{q1}$  и создает индукцию  $B_{\delta S} = B_q$

Ее первая гармоника  $B_{q1} = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi B_{\delta S} \sin \alpha d\alpha = \mu_0 \frac{F_{q1}}{\delta}$

При неизменной МДС  $F_{d1} = F_{q1}$  индукции также равны  $B_{d1} = B_{q1}$

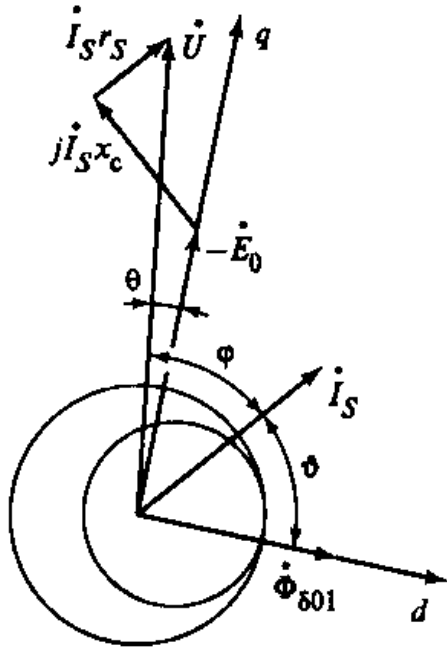
т.е. ДКР создает такие же основные гармоники, что и обычный СД с неявнополюсным ротором

Тогда можно использовать обычные уравнения СД при условии

$$x_{ad} = x_{aq} = 2m_1 f_1 (w_1 k_{o1})^2 \frac{\mu_0 D_s l}{\delta}$$

# Уравнения ДКР

Векторная диаграмма  
(для основной гармоники)



ЭДС  $E_0$  определяется индукцией от униполярной МДС

$$B_{\delta 0} = \mu_0 \frac{F_{\delta 0}}{\delta_{\alpha}} = \mu_0 \frac{F_{\delta 0}}{\delta(1 - \xi \cos \alpha)}$$

Первая гармоника индукции униполярного поля

$$B_{\delta 01} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_{\delta 0} \cos \alpha d\alpha = \mu_0 \frac{F_{\delta 0} \xi}{\delta}$$

Тогда ЭДС  $E_0 = 4,44 f_1 w_1 k_{o1} D_S l B_{\delta 01 m}$

Таким образом можно приближенно рассчитать рабочие характеристики ДКР

Энергетические показатели ДКР

- » КПД при малых  $n$  (2...10 об/мин) не превышает 5%
- » КПД при больших  $n$  (100...200 об/мин) достигает 40%
- »  $\cos \varphi$  зависит от степени подмагничивания униполярным потоком и может изменяться от 0,2 до 0,8



# Пуск двигателя с катящимся ротором

ДКР не имеет пусковых устройств

Пуск (синхронизация с вращающимся полем) происходит в течение полупериода изменения момента

Рассматривая ДКР как синхронный двигатель с  $x_d = x_q = x_c$

запишем вращающий момент как

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{см}} \sin(\theta + \alpha_c) - M_{\text{ст}}$$

Здесь амплитуда электромагнитного момента СД

Фазовый сдвиг определяется как  $\alpha_c = \arctg \frac{r_s}{x_c}$

Тормозной момент СД  $M_{\text{ст}} = \frac{m_1 E_0^2 r_s}{\Omega_c (r_s^2 + x_c^2)}$

$$M_{\text{см}} = \frac{m_1 U E_0}{\Omega_c \sqrt{r_s^2 + x_c^2}}$$

Внешний момент сопротивления нагрузки должен быть приведен к оси ротора  $M'_{\text{вн}} = \frac{M_{\text{вн}}}{k_{\text{ред}}}$

Также как и момент инерции  $J' = \frac{J}{k_{\text{ред}}^2}$  и угловая скорость  $\Omega'_R = \Omega_R k_{\text{ред}}$

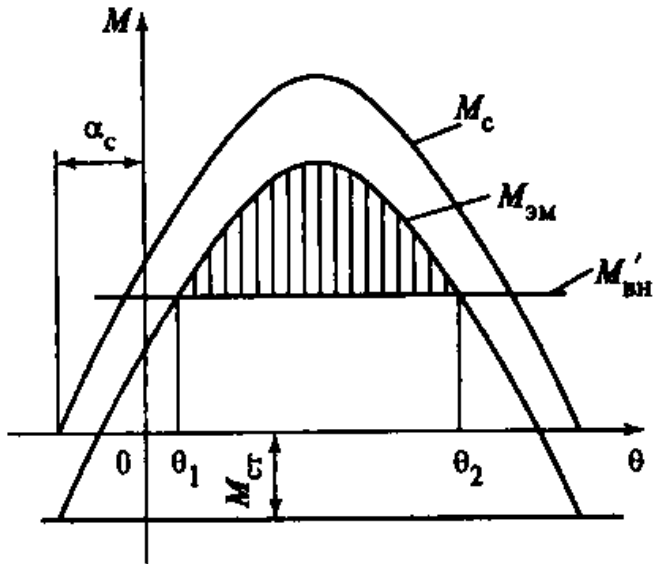
Тогда можно записать уравнение движения

(пренебрегая электромагнитными переходными процессами)

$$M_{\text{ЭМ}} - M'_{\text{вн}} = J' \frac{d\Omega'_R}{dt}$$

# Пуск двигателя с катящимся ротором

Рассмотрим процесс входа в синхронизм за полпериода изменения момента на базе угловой характеристики двигателя



С учетом внешнего момента сопротивления положительный вращающий момент действует в диапазоне углов от  $\theta_1$  до  $\theta_2$

ДКР войдет в синхронизм, если работа, совершаемая положительным вращающим моментом при разгоне, будет больше прироста кинетической энергии

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} (M_{\text{ЭМ}} - M'_{\text{ВН}}) d\theta \geq J' \frac{\Omega_c^2}{2}$$

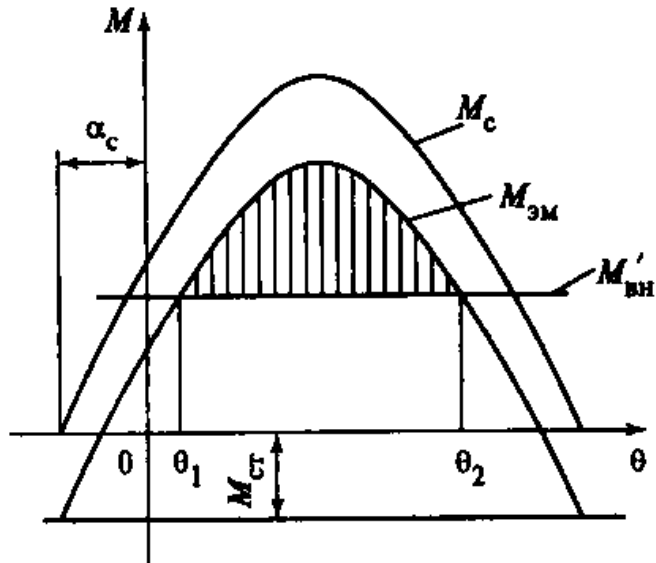
Проинтегрируем с учетом соотношения углов  $\theta_2 = \pi - \theta_1 - 2\alpha_c$

$$J' \frac{\Omega_c^2}{2} \leq 2M_{\text{см}} \cos(\theta_1 + \alpha_c) + (M_{\text{ст}} - M'_{\text{ВН}}) \cdot [\pi - 2(\theta_1 + \alpha_c)]$$



# Пуск двигателя с катящимся ротором

Рассмотрим процесс входа в синхронизм за полпериода изменения момента на базе угловой характеристики двигателя



$$k_J \leq 2 \cos(\theta_1 + \alpha_c) + (m_T - m_{BX}) \cdot [\pi - 2(\theta_1 + \alpha_c)]$$

Так как при  $\theta = \theta_1 + \alpha_c$   $M_{ЭМ} = M'_{вн}$ , то  $\theta_1 + \alpha_c = \arcsin \frac{M'_{вн} - M_{CT}}{M_{cm}} = \arcsin(m_{BX} - m_T)$

В большинстве случаев  $\theta_1 + \alpha_c < \pi/4$ ,  
поэтому можно принять  $\theta_1 + \alpha_c \approx m_{BX} - m_T$

$$\text{и } \cos(\theta_1 + \alpha_c) = \sqrt{1 - (m_{BX} - m_T)^2} \approx 1 - \frac{1}{2}(m_{BX} - m_T)^2$$

Полагая  $m_T^2 \ll 1$  из условия входа в синхронизм получим выражение для предельного момента сопротивления нагрузки, при котором ДКР еще входит в синхронизм

$$m_{BX} = \sqrt{2 + \pi m_T - k_J}$$

С увеличением момента инерции синхронизирующие свойства ДКР ухудшаются

# Достоинства и недостатки ДКР

## Достоинства

- » малые скорости при больших моментах без механических редукторов
- » хорошее быстродействие (время разгона  $< 0,01$  с)
- » малое время торможения, отсутствие самохода и выбега
- » небольшая кратность пускового тока ( $2...3 I_H$ )
- » отсутствие высокоскоростных подшипников → надежная работа практически без смазки (в вакууме)

## Недостатки

- » сложность конструкции (гибкие передачи)
- » вибрации и шумы
- » технологический разброс поверхностей качения и их износ → трудно гарантировать нужную скорость
- » нестабильная работа при ударных нагрузках и тряске
- » трудность пуска при больших частотах питания и инерционной нагрузке
- » небольшой срок службы из-за износа трущихся поверхностей

# Двигатель с гибким волновым ротором

Двигатель имеет гибкий ферромагнитный ротор, который деформируется, притягиваясь к статору в местах с максимальной индукцией (разновидность двигателя с катящимся ротором)

При вращении поля волны деформации перемещаются синхронно с полем

При этом ротор обкатывается по поверхности статора, поворачиваясь за один оборот поля статора на угол

$$\Omega_2 = \frac{2\pi R_S - 2\pi R_R}{R_R}$$

Двигатель может быть многополюсным

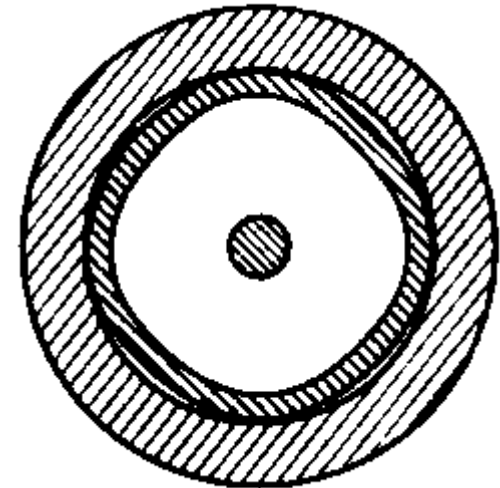
Преимущества

- » четное число точек соприкосновения → взаимно уравновешенные силы тяжения → нет вибраций и шумов
- » малый момент инерции ротора → легкий пуск и высокое быстродействие

Недостаток

- » тонкий ротор → большое магнитное сопротивление → большой намагничивающий ток

В реальных двигателях применяются катки (зубчатые или гладкие)

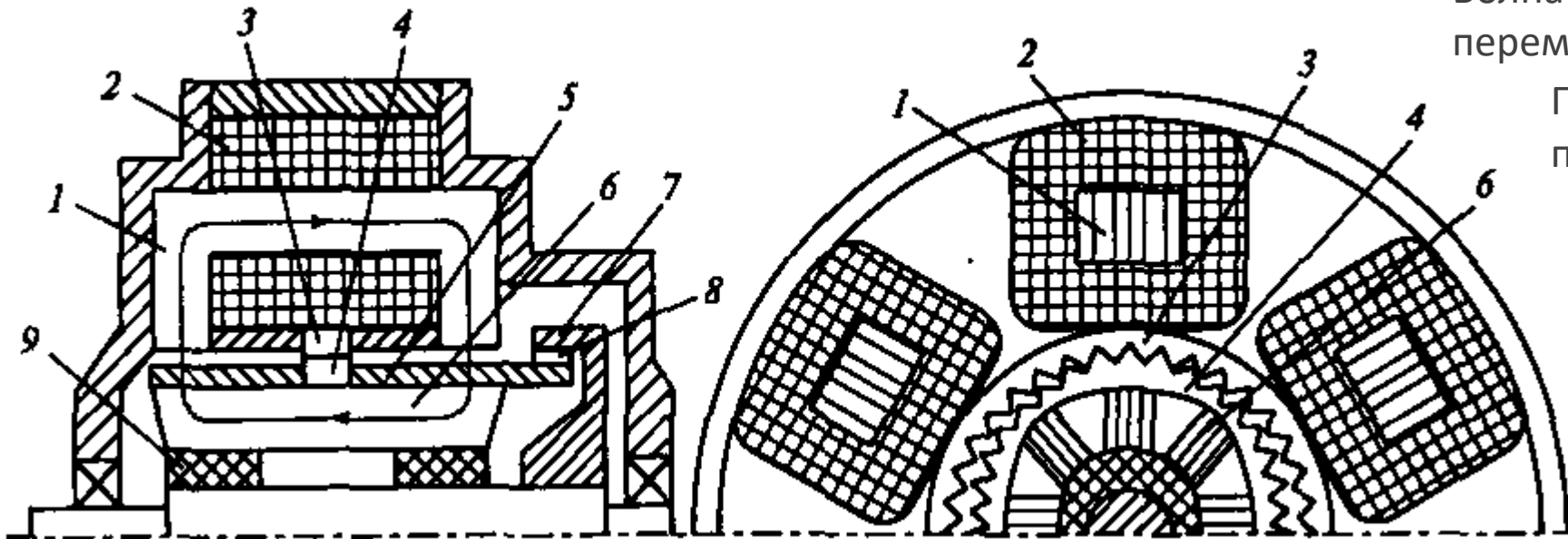


# Двигатель с гибким волновым ротором

Пример реализации

- 1 – П-образные сердечники магнитопровода статора
- 2 – катушки  $m$ -фазной обмотки, создающие 2-полюсное вращающееся поле
- 3 – жесткий зубчатый венец статора с  $Z_S$
- 4 – гибкий зубчатый венец с  $Z_R$

- 5 – тонкостенный стакан, соединенный с гибким венцом 4
- 6 – секторы магнитопровода ротора (внутри стакана 5)
- 7,8 – зубчатая передача для вращения вала
- 9 – эластичная втулка, допускающая перемещение секторов 6 при изгибе стенок стакана 5



Волна деформации перемещается синхронно с полем  
При этом ротор поворачивается со скоростью

$$\Omega_R = \Omega_c \frac{Z_R - Z_S}{Z_R}$$

- » при  $Z_R > Z_S$  вращение ротора по полю
- » при  $Z_R < Z_S$  вращение ротора против поля

# Гармоники индукции поля в зубчатом зазоре

Теория индукторных  
двигателей



# Магнитное поле в зазоре ЭМ

Другой способ получения тихоходного двигателя – использование электромагнитной редукции  
Такие двигатели называются индукторными

Индукторные двигатели используют в качестве рабочих высшие гармоники поля  
(открытые пазы статора и ротора способствуют их усилению)

Рассмотрим приближенный метод гармонического анализа магнитного поля в зазоре электрической машины с двусторонней зубчатостью

МДС обмотки статора, дискретно распределенной по пазам, имеет ступенчатую форму  
Кривую МДС можно представить спектром гармоник (обмоточные гармоники)

$$F_v(x) = F_{vm} \sin\left(\omega t - v \frac{\pi x}{\tau}\right)$$

Индукция магнитного поля в зазоре (пренебрегая падением  $U_\mu$  в магнитопроводе)

$$B_\delta = F \cdot \lambda_\delta \quad \text{где } \lambda_\delta \text{ – удельная проводимость зазора}$$

Кривая индукции может быть найдена как  $B_\delta(x) = F(x) \cdot \lambda_\delta(x)$

При гладком зазоре ( $\lambda_\delta(x) = \text{const}$ ) каждая гармоника МДС создает свою гармонику индукции

$$B_v(x) = B_{vm} \sin\left(\omega t - v \frac{\pi x}{\tau}\right) = \frac{\mu_0 F_{vm}}{\delta} \sin\left(\omega t - v \frac{\pi x}{\tau}\right)$$

В реальной машине зубчатость статора и ротора влияет на форму кривой  $\lambda_\delta(x)$

# Магнитное поле в зазоре ЭМ

Рассмотрим вначале проводимость зазора с зубчатым статором и гладким ротором

Удельная проводимость такого зазора  $\lambda_s$  содержит

- » постоянную составляющую  $\lambda_{s0}$  (обусловлена минимальным зазором  $\delta$ )
- » переменную составляющую  $\lambda_{zs}$  (обусловлена зубчатостью  $Z_s$ )

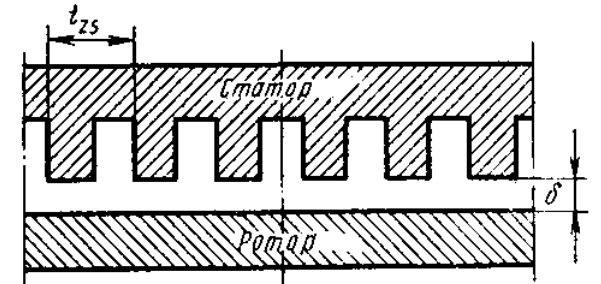
В кривой  $\lambda_s$  можно выделить множество гармоник

Будем учитывать только самую большую гармонику – первую зубцовую гармонику проводимости  $\lambda_{zs1}$

- » период первой зубцовой гармоники проводимости  $\lambda_{zs1}$  равен зубцовому делению  $t_{zs}$  (в  $Z_s/p$  раз меньше периода основной гармоники  $2\tau$ )
- » порядок первой зубцовой гармоники проводимости  $\lambda_{zs1}$  в  $Z_s/p$  раз больше порядка основной гармоники

Таким образом, удельная проводимость воздушного зазора

$$\lambda_s(x) = \lambda_{s0} - \lambda_{zs1} \cos\left(\frac{Z_s}{p} \cdot \frac{\pi x}{\tau}\right) \quad \text{где } \lambda_{zs1} \text{ – амплитуда первой зубцовой гармоники проводимости}$$



# Магнитное поле в зазоре ЭМ

Рассмотрим вначале проводимость зазора с зубчатым статором и гладким ротором

Найдем индукцию в зазоре машины от  $\nu$  гармоники МДС статора

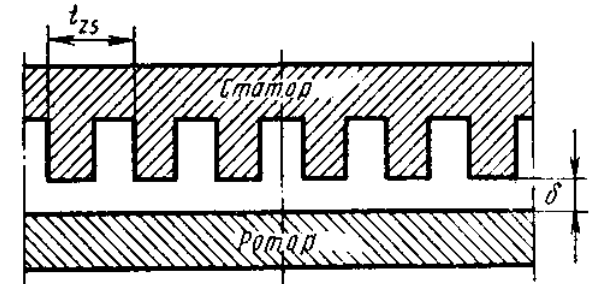
$$B_{S_{\nu\Sigma}}(x) = F_{\nu}(x) \cdot \lambda_S(x) = F_{\nu m} \sin\left(\omega t - \nu \frac{\pi x}{\tau}\right) \cdot \left[ \lambda_{S0} - \lambda_{ZS1} \cos\left(\frac{Z_S}{p} \cdot \frac{\pi x}{\tau}\right) \right]$$

После преобразования с учетом равенства  $2 \sin \alpha \cdot \cos \beta = \sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)$  получим

$$B_{S_{\nu\Sigma}}(x) = B_{S_{\nu m}} \sin\left(\omega t - \nu \frac{\pi x}{\tau}\right) - B_{ZS_{\nu m}} \sin\left(\omega t + \left(\frac{Z_S}{p} - \nu\right) \frac{\pi x}{\tau}\right) - B_{ZS_{\nu m}} \sin\left(\omega t - \left(\frac{Z_S}{p} + \nu\right) \frac{\pi x}{\tau}\right)$$

Здесь амплитуда гармоники индукции  $B_{S_{\nu m}} = F_{\nu m} \lambda_{S0}$

$$B_{ZS_{\nu m}} = \frac{1}{2} F_{\nu m} \lambda_{ZS1}$$



# Магнитное поле в зазоре ЭМ

Рассмотрим вначале проводимость зазора с зубчатым статором и гладким ротором

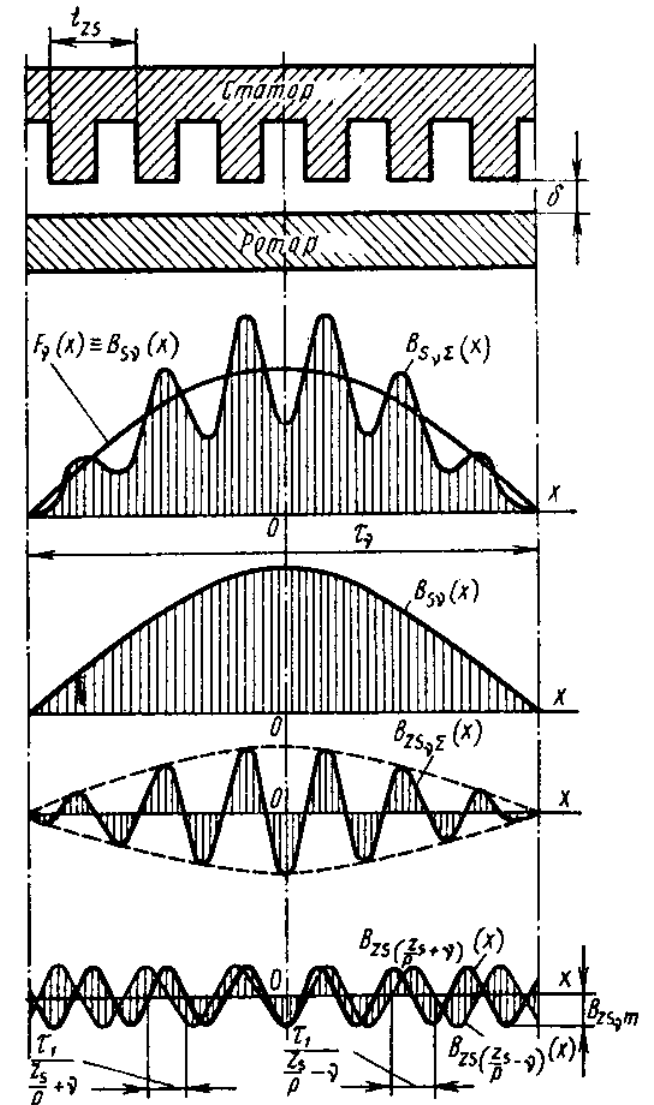
Таким образом, каждая  $\nu$  гармоника МДС зубчатого статора (при гладком роторе) создает в зазоре

- »  $\nu$  гармонику индукции магнитного поля и
- » две зубцовые гармоники индукции с амплитудой  $B_{ZS\nu}$  порядка

$$\nu_{ZS\nu} = \frac{Z_s}{p} \pm \nu = \frac{Z_s \pm p\nu}{p}$$

Представим их на рисунке

- »  $\nu$  гармоника МДС  $F_\nu$  создает индукцию в зазоре  $B_{S\nu\Sigma}$
- » кривая индукции  $B_{S\nu\Sigma}$  содержит  $\nu$  гармонику  $B_{S\nu}$  и сумму зубцовых  $B_{ZS\nu\Sigma}$
- »  $B_{ZS\nu\Sigma}$  представляет собой сумму двух зубцовых гармоник  $B_{ZS(Z/p+\nu)} + B_{ZS(Z/p-\nu)}$  одинаковой амплитуды, но разного порядка



# Магнитное поле в зазоре ЭМ

Рассмотрим вначале проводимость зазора с зубчатым статором и гладким ротором

Найдем угловые скорости гармоник индукции

Приравняем нулю производную аргумента функции с учетом

$$x = \alpha R \quad \tau = \frac{2\pi R}{2p} \quad \omega_v = \frac{d\alpha}{dt}$$

Для  $\nu$  гармоники,

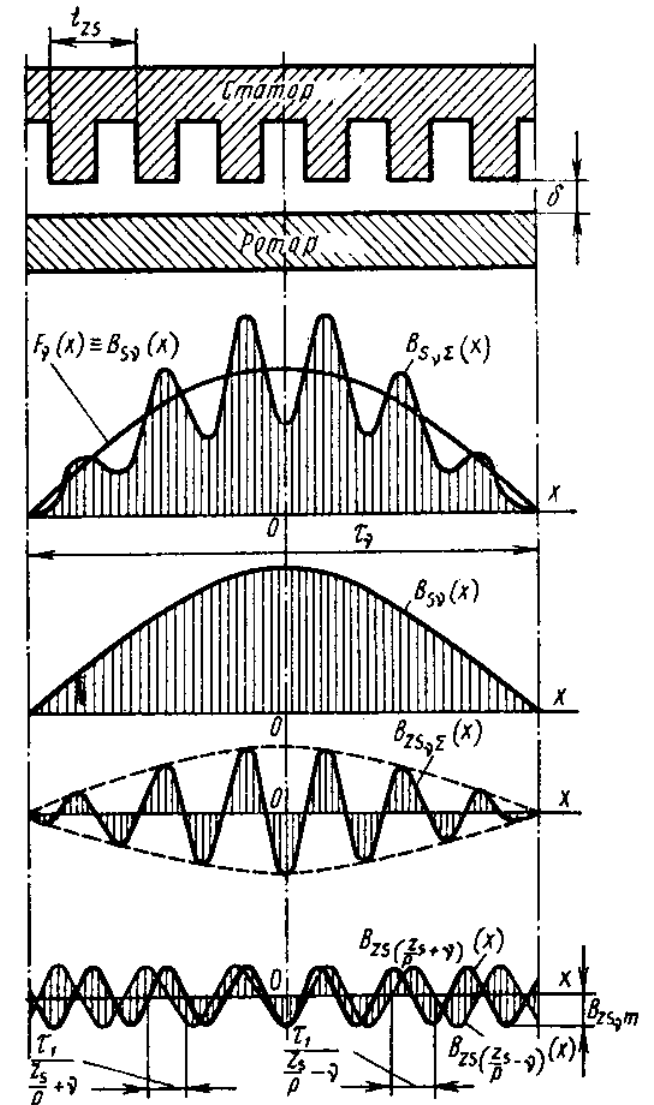
обусловленной постоянной составляющей  $\lambda_{S0}$ , угловая скорость  $\omega_v = \frac{\omega}{p\nu}$

Для зубцовых гармоник угловые скорости  $\omega_{ZS\nu} = \frac{\pm\omega}{p\nu_{ZS\nu}} = \frac{\pm\omega}{Z_S \pm p\nu}$

(знак перед  $p$  соответствует знаку перед  $\omega$ )

Скорость зубцовой гармоники зависит от  $Z_S$

Две зубцовые гармоники поля вращаются в пространстве в разные стороны с разными скоростями



# Магнитное поле в зазоре ЭМ

Теперь рассмотрим проводимость зазора с гладким статором и зубчатым ротором

При неподвижном роторе выражение  $B_{Rv\Sigma}(x)$  аналогично выражению при зубчатом статоре (заменив  $Z_S$  на  $Z_R$ )

Но при вращении ротора проводимость зазора постоянно меняется  
– зубцовая гармоника проводимости движется с ротором

$$\lambda_R(x) = \lambda_{R0} - \lambda_{ZR1} \cos\left(Z_R \left(\frac{\pi x}{\tau_1 p} - \omega_2 t\right)\right)$$

Тогда индукция магнитного поля в зазоре  $v$  гармоники МДС статора

$$B_{Rv\Sigma}(x) = B_{Rvm} \sin\left(\omega t - v \frac{\pi x}{\tau}\right) - B_{ZRvm} \sin\left((\omega - Z_R \omega_2)t + \left(\frac{Z_R}{p} - v\right) \frac{\pi x}{\tau}\right) - B_{ZRvm} \sin\left((\omega + Z_R \omega_2)t - \left(\frac{Z_R}{p} + v\right) \frac{\pi x}{\tau}\right)$$

Для  $v$  гармоники угловая скорость  $\omega_v = \frac{\omega}{pv}$

Зубцовые гармоники поля имеют порядок  $v_{ZRv} = \frac{Z_R}{p} \pm v = \frac{Z_R \pm pv}{p}$

Их угловые скорости  $\omega_{ZRv} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{pv_{ZRv}} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm pv}$  – зависят от  $Z_R$  и от скорости вращения ротора  $\omega_2$

(знак перед  $p$  соответствует знаку перед  $\omega$ )

# Магнитное поле в зазоре ЭМ

## Проводимость зазора при двусторонней зубчатости

Обычно и статор и ротор ЭМ зубчатые

Картина магнитного поля в зазоре усложняется

Для приближенного расчета удельной проводимости зазора при двусторонней зубчатости воспользуемся формулой, предложенной Вольдеком А.И.

$$\lambda_{\delta}(x) \approx \frac{\lambda_S(x) \cdot \lambda_R(x)}{\lambda_0}$$

Здесь  $\lambda_S$  – проводимость зазора при зубчатом статоре  
 $\lambda_R$  – проводимость зазора при зубчатом роторе  
 $\lambda_0$  – проводимость гладкого зазора

Тогда можно найти индукцию магнитного поля в зазоре  $B_{\delta}(x) = F(x) \cdot \lambda_{\delta}(x)$

$\nu$  гармоника МДС статора создает в зубчатом зазоре следующие гармоники индукции

- » гармонику порядка  $\nu$
- » гармоники, обусловленные зубчатостью статора и ротора по отдельности  $\nu_{ZS}$  и  $\nu_{ZR}$
- » гармоники, обусловленные взаимодействием зубцов статора и ротора  $\nu_{Zv}$

Таких гармоник 4  $\nu_{Zv} = \frac{Z_R \pm Z_S}{p} \pm \nu$  их угловые скорости  $\omega_{Zv} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{p \nu_{Zv}}$  (знак перед  $\nu$  соответствует знаку перед  $\omega$ )

# Магнитное поле в зазоре ЭМ

Итак, ток обмотки статора создает спектр обмоточных гармоник МДС

Каждая  $\nu$  гармоника МДС статора  $F_\nu$  создает спектр гармоник индукции поля в зазоре

- » от гладкого зазора – гармоника порядка  $\nu$
- » от зубчатости статора – две зубцовые гармоники  $\nu_{ZS}$
- » от зубчатости ротора – две зубцовые гармоники  $\nu_{ZR}$
- » от двусторонней зубчатости – четыре гармоники  $\nu_{ZV}$

Принято выделять две группы гармоник

- » гармоники статора –  $\nu$  и  $\nu_{ZS}$  (их  $\omega$  определяются  $f_1$ )
- » гармоники ротора –  $\nu_{ZR}$  и  $\nu_{ZV}$  (их  $\omega$  определяются  $Z_R$  и  $\omega_2$ )

Высшие обмоточные гармоники МДС успешно подавляются при правильном проектировании ЭМ

Поэтому на практике можно учитывать лишь такие гармоники индукции

- » Гармоники статора  $\nu_1 = 1$

$$\nu_{ZS} = \frac{Z_S}{p} \pm 1 = \frac{Z_S \pm p}{p}$$

$$\omega_1 = \omega / p$$

$$\omega_{ZS} = \frac{\pm \omega}{p \nu_{ZS}} = \frac{\pm \omega}{Z_S \pm p}$$

- » Гармоники ротора

$$\nu_{ZR} = \frac{Z_R}{p} \pm 1 = \frac{Z_R \pm p}{p}$$

$$\omega_{ZR} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{p \nu_{ZR}} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm p}$$

$$\nu_Z = \frac{Z_R \pm Z_S}{p} \pm 1 = \frac{Z_R \pm Z_S \pm p}{p}$$

$$\omega_Z = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{p \nu_Z} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm Z_S \pm p}$$



# Индукторные двигатели

Двигатели с  
электромагнитной  
редукцией

# Магнитное поле индукторного двигателя

Индукторный двигатель в общем случае содержит две обмотки на статоре

- » одна обмотка с числом пар полюсов  $p$ , питаемая токами с частотой  $f$
- » другая обмотка с другим числом пар полюсов  $p'$ , питаемая токами с другой частотой  $f'$

Основная гармоника МДС обмотки  $p$  имеет  $p$  периодов на окружности статора

Основная гармоника МДС обмотки  $p'$  имеет  $p'$  периодов на той же окружности

Очевидно порядки основных гармоник пропорциональны числам пар полюсов

$$\frac{v'_1}{v_1} = \frac{p'}{p}$$

Полагая  $v = 1$  получим порядок основной гармоники другой обмотки  $v'_1 = \frac{p'}{p}$

Гармоника МДС  $v'_1$  обмотки  $p'$  создает в зазоре тот же спектр гармоник поля, что и основная гармоника обмотки  $p$

При этом в формулы вместо  $v$  надо подставить  $p'/p$ , а вместо  $\omega$  – угловую частоту  $\omega' = 2\pi f'$

» Гармоники статора 
$$v'_1 = \frac{p'}{p} \quad \omega'_1 = \frac{\omega'}{pv'} = \frac{\omega'}{p'} \quad v'_{ZS} = \frac{Z_S \pm p'}{p} = \frac{Z_S \pm p'}{p} \quad \omega'_{ZS} = \frac{\pm\omega'}{pv'_{ZS}} = \frac{\pm\omega'}{Z_S \pm p'}$$

» Гармоники ротора 
$$v'_{ZR} = \frac{Z_R \pm p'}{p} = \frac{Z_R \pm p'}{p} \quad \omega'_{ZR} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega'}{pv'_{ZR}} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega'}{Z_R \pm p'}$$

$$v'_Z = \frac{Z_R \pm Z_S \pm p'}{p} = \frac{Z_R \pm Z_S \pm p'}{p} \quad \omega'_Z = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega'}{pv'_Z} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega'}{Z_R \pm Z_S \pm p'}$$

# Принцип действия индукторного двигателя

Индукторный двигатель с двумя обмотками  $p$  и  $p'$  на статоре, питаемыми токами с частотой  $f$  и  $f'$  соответственно, создает в зазоре спектр гармоник поля

- » гармоники статора  $v_1, v'_1, v_{ZS}, v'_{ZS}$  (их скорости вращения зависят от частоты  $f$  и  $f'$ )
- » гармоники ротора  $v_{ZR}, v'_{ZR}, v_Z, v'_Z$  (их скорости вращения зависят от скорости ротора  $\omega_2$ )

При определенных соотношениях  $Z_S$  и  $Z_R$ , а также  $p$  и  $p'$  среди всего спектра гармоник поля могут найтись гармоники одного порядка

Т.е. гармоника статора  $v_S$  от обмотки  $p$  совпадает с гармоникой ротора  $v_R$  от обмотки  $p'$   $v_S = v_R$

Соответственно, совпадают числа пар полюсов  $p_{vS} = p_{vR}$  и полюсные деления  $\tau_{vS} = \tau_{vR}$

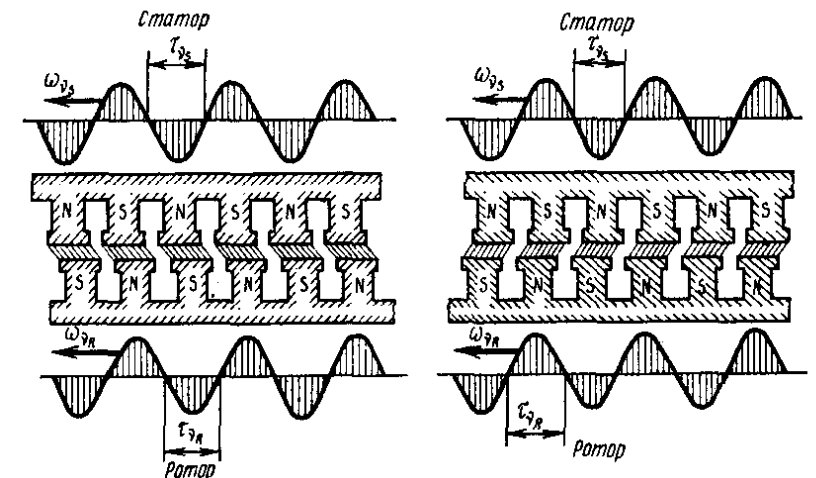
Между гармониками одного порядка возникают силы взаимодействия, создающие электромагнитный момент (у несовпадающих гармоник результат взаимодействия очень мал из-за несовпадения полюсных делений)

Поля гармоник  $v_S$  и  $v_R$  вращаются в пространстве

Момент от их взаимодействия будет постоянен, если их скорости равны

$$\omega_{vS} = \omega_{vR}$$

В противном случае момент будет знакопеременным



# Принцип действия индукторного двигателя

Итак, для создания постоянного момента в индукторном двигателе необходимо выполнение двух условий

- » должны существовать гармоники статора и ротора одного порядка  $v_S = v_R$
- » их скорости вращения должны совпадать  $\omega_{vS} = \omega_{vR}$

Как сделать такой двигатель?

Предположим, что

- » рабочей гармоникой статора  $v_S$  является гармоника  $v'_{ZS}$  от обмотки  $p'$
- » рабочей гармоникой ротора  $v_R$  является гармоника  $v_{ZR}$  от обмотки  $p$

$$v_S = v'_{ZS} = \frac{Z_S \pm p'}{p}$$

$$v_R = v_{ZR} = \frac{Z_R \pm p}{p}$$

Первое условие  $v_S = v_R$  означает, что  $v'_{ZS} = v_{ZR}$ , т.е.  $\frac{Z_S \pm p'}{p} = \frac{Z_R \pm p}{p}$  или  $Z_R = Z_S \pm (p' \pm p)$

Это основное соотношение между  $Z$  и  $p$  в индукторном двигателе с двусторонней зубчатостью

Для индукторного двигателя с односторонней зубчатостью ( $Z_S = 0$ )

$$Z_R = \pm (p' \pm p)$$

Условие равенства скоростей  $\omega_{vS} = \omega_{vR}$  преобразуется в равенство  $\omega'_{ZS} = \omega_{ZR}$ , т.е.  $\frac{\pm \omega'}{Z_S \pm p'} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm p}$

В силу равенства порядков  $v'_{ZS} = v_{ZR}$  знаменатели совпадают, значит должны совпадать числители  $\pm \omega' = Z_R \omega_2 \pm \omega$

Тогда  $\omega_2 = \frac{\mp \omega \pm \omega'}{Z_R}$  С учетом  $\omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}$   $\omega = 2\pi f$   $\omega' = 2\pi f'$  перепишем  $n_2 = \frac{60(\mp f \pm f')}{Z_R}$

Исключив одинаковые комбинации с разными знаками

запишем частоту вращения ИД

$$n_2 = 60 \frac{f \pm f'}{Z_R}$$

# Особенности индукторных двигателей

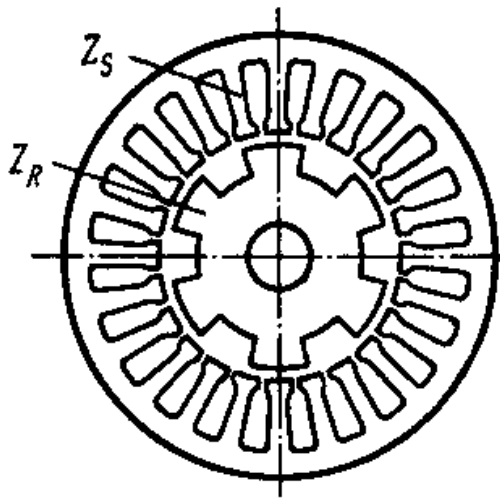
На роторе индукторного двигателя всегда открытые пазы

Число зубцов ротора  $Z_R = Z_S \pm (p' \pm p)$

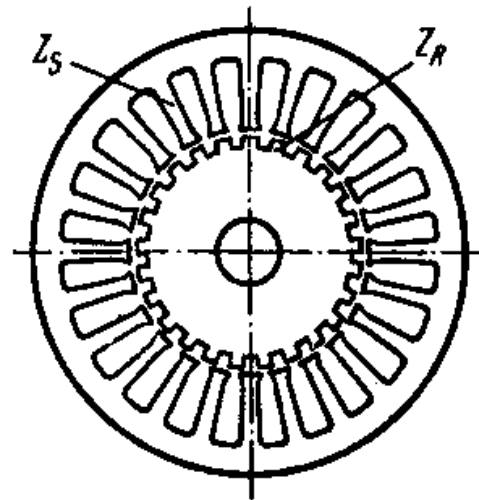
Число зубцов статора

- » должно обеспечивать размещение обмоток  $p$  и  $p'$
- » может быть изменено искусственно

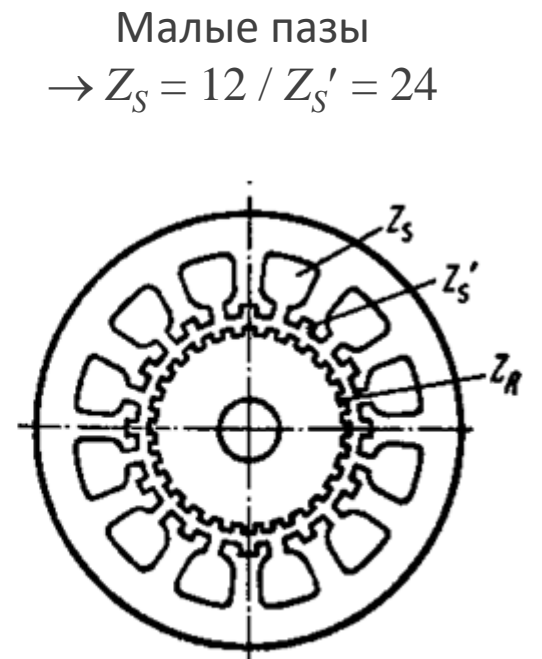
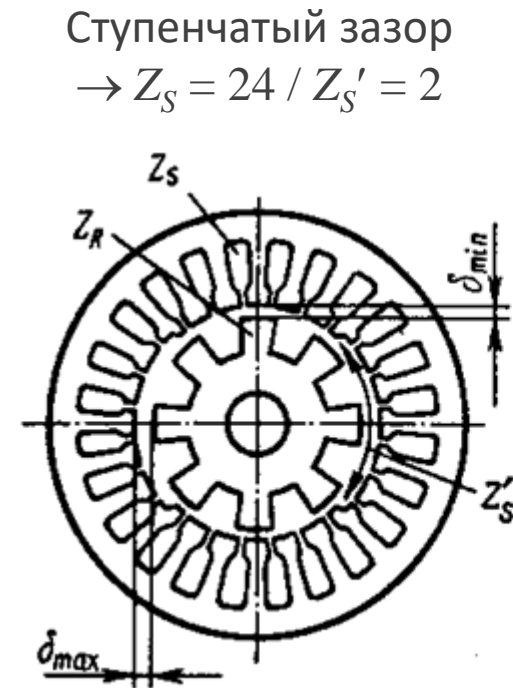
$Z_R$  влияет на частоту вращения  $n_2 = 60 \frac{f \pm f'}{Z_R}$



Полузакрываемые пазы  
→  $Z_S = 0$



Полуоткрытые пазы  
→  $Z_S = 24$



# Особенности индукторных двигателей

В индукторном двигателе возможно одновременное взаимодействие нескольких пар гармоник при одинаковой  $n_2$

Если взаимодействуют гармоники  $v'_{ZS}$  и  $v_{ZR}$  при скорости  $\omega_2 = \frac{\mp\omega \pm \omega'}{Z_R}$

Тогда найдется гармоника  $v_Z = \frac{Z_R \pm Z_S \pm p}{p}$

с учетом  $Z_R = Z_S \pm p' \mp p$   $v_Z = \frac{Z_S \pm p' \mp p \pm Z_S \pm p}{p}$  в том числе  $v_Z = \frac{p'}{p} = v'_1$

Ее скорость  $\omega_Z = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm Z_S \pm p}$  с учетом  $\omega_2 Z_R = \mp\omega \pm \omega'$   $\omega_Z = \frac{\mp\omega \pm \omega' \pm \omega}{Z_S \pm p' \mp p \pm Z_S \pm p}$  в том числе  $\omega_Z = \frac{\omega'}{p'} = \omega'_1$

Это увеличивает вращающий момент

# Варианты исполнения индукторных двигателей

## Синхронные индукторные двигатели

- » Двигатели с радиальным возбуждением
  - с обмоткой возбуждения
  - с самовозбуждением
  - с постоянными магнитами
- » Двигатели двойного питания
- » Двигатели с униполярным возбуждением
  - с обмоткой возбуждения
  - с постоянными магнитами
- » Реактивные двигатели

## Асинхронные индукторные двигатели

# Варианты исполнения индукторных двигателей

## *Синхронный индукторный двигатель с радиальным возбуждением постоянным током*

Основная обмотка –  $p$  пар полюсов, трехфазная / двухфазная, питается от сети с частотой  $f \rightarrow$  вращающееся поле

Обмотка возбуждения –  $p' > p$  пар полюсов, питается постоянным током ( $f' = 0$ )  $\rightarrow$  неподвижное поле

Статор – гладкий (закрытые пазы,  $Z_S = 0$ ) либо зубчатый (открытые пазы,  $Z_S$ )

Ротор – зубчатый  $Z_R = p' \mp p$                       либо  $Z_R = Z_S \pm (p' \pm p)$

При  $Z_S = 0$  вращающий момент – взаимодействие гармоники статора  $v_S = v'_1$  от обмотки  $p'$  и зубцовой гармоники ротора  $v_R = v_{ZR}$  от обмотки  $p$

При  $Z_S$  вращающий момент – взаимодействие гармоники статора  $v_S = v'_{ZS}$  и гармоники ротора  $v_R = v_{ZR}$  либо гармоники  $v'_1$  и гармоники  $v_Z$



# Варианты исполнения индукторных двигателей

## Синхронный индукторный двигатель с радиальным возбуждением постоянным током

Взаимодействующие гармоники неподвижны в пространстве, т.к.  $f' = 0$

Ротор вращается в сторону основного поля со скоростью  $\omega_2$

Частота вращения ротора (при  $f' = 0$ )  $n_2 = 60 \frac{f}{Z_R}$

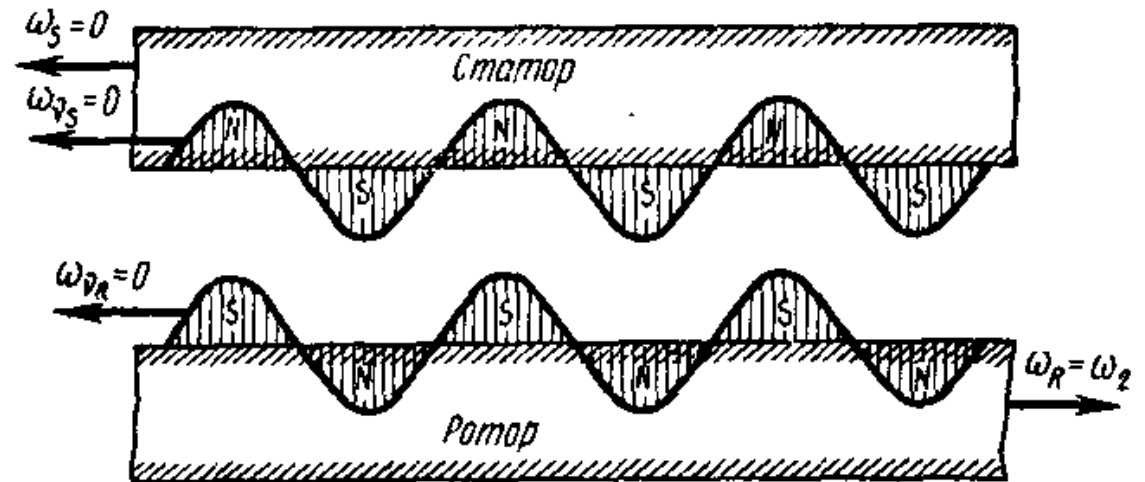
Синхронная скорость по основной гармонике  $n_1 = 60 \frac{f}{p}$

Коэффициент электромагнитной редукции  $k_p = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_R}{p}$

При двусторонней зубчатости  $k_p$  больше, т.к. больше  $Z_R$

Для исключения влияния обмоток  $p$  и  $p'$  друг на друга

(т.е. чтобы не было трансформаторной связи), необходимо выполнение условия  $p'/p =$  целое четное число



# Варианты исполнения индукторных двигателей

## Синхронный индукторный двигатель с самовозбуждением (радиальным)

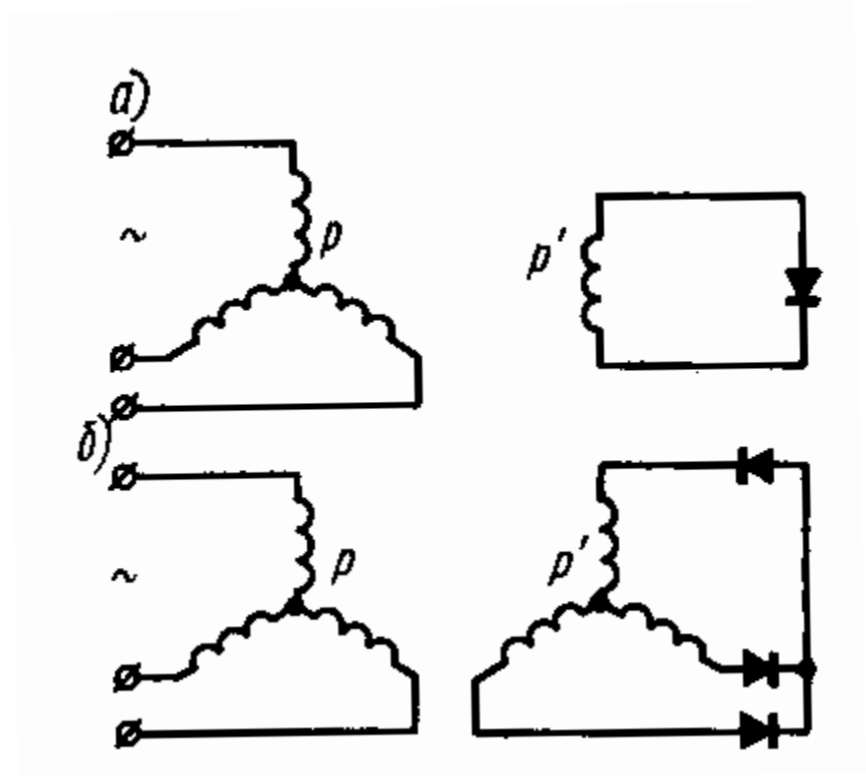
Здесь ОВ должна иметь трансформаторную связь с основной обмоткой, чтобы в ней наводилась ЭДС от основного поля

Для этого необходимо выполнение условия  $p'/p = \text{целое нечетное число}$

Сама ОВ замкнута через выпрямитель

→ протекает ток возбуждения одного направления (хотя и пульсирующий)

Работа ИД с самовозбуждением аналогична ИД с обмоткой возбуждения, но рабочие характеристики хуже из-за пульсации тока возбуждения (при выпрямлении)



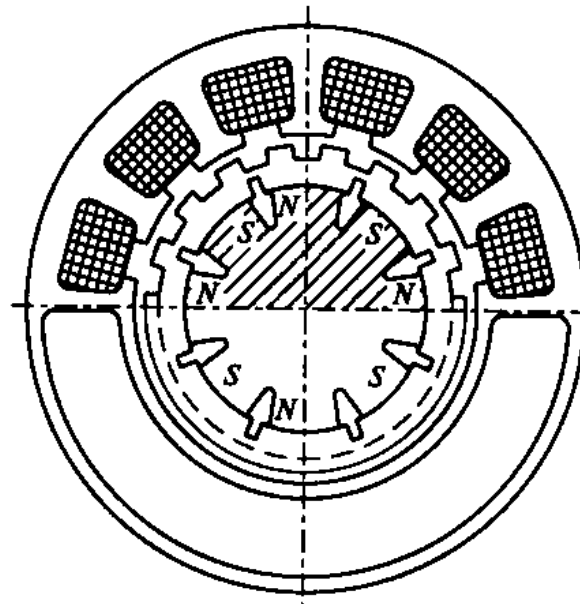
# Варианты исполнения индукторных двигателей

## *Синхронный индукторный двигатель с радиальным возбуждением постоянными магнитами*

Вместо обмотки возбуждения можно использовать постоянные магниты

Постоянные магниты  
проще разместить на роторе  
– получается обращенная конструкция

Магнит – «звездочка»  
Между полюсами магнитов  
– немагнитные промежутки



Принцип действия остается прежним  
– момент создается при взаимодействии  
зубцовых гармоник статора и ротора,  
имеющих одинаковые  $\nu$

# Варианты исполнения индукторных двигателей

## *Синхронный индукторный двигатель двойного питания*

Реализация самого общего случая индукторного двигателя

- » две обмотки на статоре с разной полюсностью  $p$  и  $p'$
- » подключенные к двум источникам питания с разной частотой  $f$  и  $f'$

Частота вращения ротора 
$$n_2 = 60 \frac{f \pm f'}{Z_R}$$

При питании двух обмоток от разных источников с близкими частотами  $f$  и  $f'$  частота вращения ротора может быть очень низкой (десятки об/мин, единицы об/мин, доли об/мин)

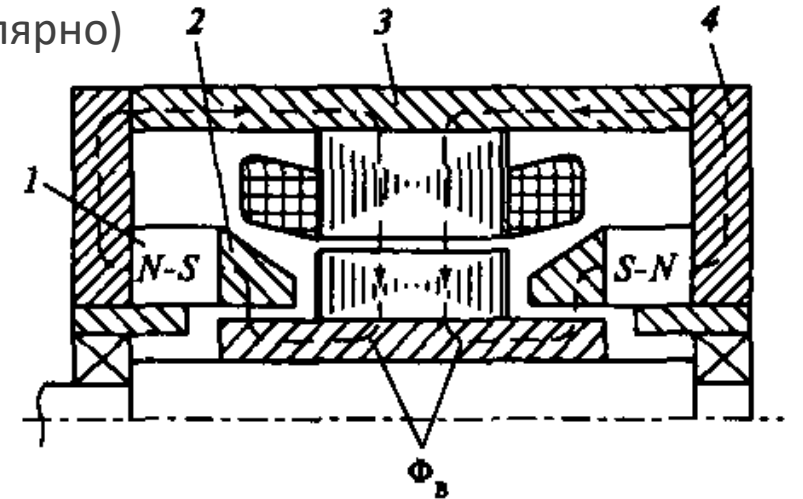
Для этого потребуется преобразователь частоты

# Варианты исполнения индукторных двигателей

## Синхронный индукторный двигатель с униполярным возбуждением

Обмотка возбуждения (или постоянные магниты) создает поток  $\Phi_B$  в основном аксиального направления, который пересекает рабочий зазор всегда в одном направлении (униполярно)

- 1 – постоянные магниты
- 2 – полюсные башмаки
- 3 – корпус
- 4 – подшипниковые щиты



МДС возбуждения  $F_0$  по всей окружности зазора постоянна по величине и направлению

Величина индукции униполярного поля в зазоре определяется только проводимостью зазора  $B_0(x) = F_0 \cdot \lambda(x)$

Создается – постоянная составляющая поля  $v = 0$

– зубцовые гармоники статора  $v_{ZS0} = \frac{Z_S}{p} \quad \omega_{ZS0} = 0$

– зубцовые гармоники ротора  $v_{ZR0} = \frac{Z_R}{p} \quad \omega_{ZR0} = \frac{Z_R \omega_2}{p v_{ZR0}} = \omega_2 \quad v_{Z0} = \frac{Z_R \pm Z_S}{p} \quad \omega_{Z0} = \frac{Z_R \omega_2}{p v_{Z0}} = \omega_2 \frac{Z_R}{Z_R \pm Z_S}$

# Варианты исполнения индукторных двигателей

## Синхронный индукторный двигатель с униполярным возбуждением

Рабочие гармоники

- » гармоника тока статора  $\nu_1 = 1$  и одна из зубцовых гармоник униполярного поля ротора  $\nu_{Z0}$
- » одна из зубцовых гармоник статора  $\nu_{ZS}$  и одна из зубцовых гармоник униполярного поля ротора  $\nu_{Z0}$

Число зубцов ротора (из условия равенства порядков гармоник  $\nu_{Z0} = \nu_1 = 1$ )

$$\frac{Z_R \pm Z_S}{p} = 1 \rightarrow Z_R = |p \mp Z_S|$$

Скорость вращения (из условия равенства скоростей гармоник  $\omega_{Z0} = \omega_1$ )

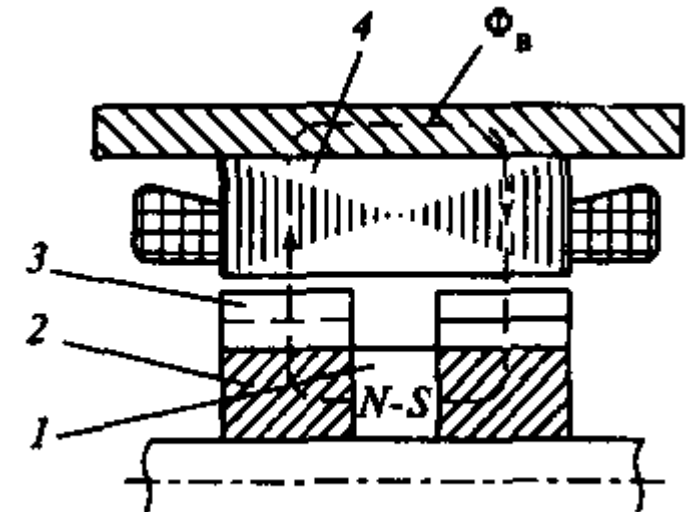
$$\omega_2 \frac{Z_R}{Z_R \pm Z_S} = \frac{\omega}{p} \rightarrow \omega_2 = \frac{\omega}{Z_R}$$

Тогда частота вращения ротора  $n_2 = 60 \frac{f}{Z_R}$

Другой вариант конструкции – аксиальный ПМ между пакетами ротора

- » нет нужды в ферромагнитных торцевых щитах, меньше зазоров на пути потока
- » поле в зазоре – униполярное, но разнонаправлено в двух пакетах ротора
- » для работы необходимо, чтобы пакеты ротора были сдвинуты на  $t_{Z2}$

- 1 – постоянный магнит
- 2 – магнитомягкие втулки
- 3 – зубчатые сердечники
- 4 – статор



# Варианты исполнения индукторных двигателей

## Синхронный реактивный индукторный двигатель

Обычный СРД работает без возбуждения, но имеет явно выраженные полюсы

Реактивный индукторный двигатель должен иметь открытые пазы на роторе и на статоре

Дополнительная обмотка статора  $p'$  имеет такое же число пар полюсов, что и основная ( $p = p'$ ) и совмещена с ней (т.е.  $f' = f$ )

Тогда необходимое число пазов ротора  $Z_R = Z_S \pm 2p$  С учетом  $f' = f$  частота вращения  $n_2 = 120 \frac{f}{Z_R}$

Рабочие гармоники

- » гармоника тока статора  $v_1 = 1$  и одна из зубцовых гармоник ротора  $v_Z$
- » одна из зубцовых гармоник статора  $v_{ZS}$  и одна из зубцовых гармоник ротора  $v_{ZR}$

из условия  $v_Z = v_1$  
$$\frac{Z_R - Z_S}{p} - 1 = 1 \rightarrow Z_R = Z_S + 2p$$

из условия  $v_{ZR} = v_{ZS}$  также 
$$\frac{Z_R - p}{p} = \frac{Z_S + p}{p} \rightarrow Z_R = Z_S + 2p$$

из условия равенства скоростей гармоник  $\omega_Z = \omega_1$ ,  $\omega_{ZR} = \omega_{ZS}$  
$$\omega_2 = \frac{2\omega}{Z_R} \quad \text{или} \quad n_2 = 120 \frac{f}{Z_R}$$

Коэффициент редукции 
$$k_p = \frac{Z_R}{2p}$$

# Варианты исполнения индукторных двигателей

## *Синхронный реактивный индукторный двигатель*

Обычный СРД работает без возбуждения, но имеет явно выраженные полюсы

Реактивный индукторный двигатель должен иметь открытые пазы на роторе и на статоре

Дополнительная обмотка статора  $p'$  имеет такое же число пар полюсов, что и основная ( $p = p'$ ) и совмещена с ней (т.е.  $f' = f$ )

Тогда необходимое число пазов ротора  $Z_R = Z_S \pm 2p$  С учетом  $f' = f$  частота вращения  $n_2 = 120 \frac{f}{Z_R}$

Частота вращения реактивного индукторного двигателя в 2 раза больше, чем у индукторного двигателя с радиальным возбуждением

Как любой реактивный двигатель синхронный реактивный индукторный двигатель имеет худшие энергетические показатели и меньшую мощность, чем индукторные двигатели с возбуждением (радиальным или униполярным)

Достоинство синхронного реактивного индукторного двигателя

» простота конструкции, надежность и дешевизна



# Варианты исполнения индукторных двигателей

## Асинхронные индукторные двигатели

Статор содержит две обмотки:

- » обмотка с числом пар полюсов  $p$  – подключена к сети  $f$
- » обмотка с числом пар полюсов  $p'$  – замкнута накоротко

Ротор – зубчатый с открытыми пазами

$$Z_R = Z_S \pm (p' \pm p) \quad \text{Если на статоре пазы закрытые – принимаем } Z_S = 0, \text{ тогда } Z_R = p' \pm p$$

Гармоника ротора  $v_{ZR}$  вращается со скоростью  $\omega_{ZR}$

→ наводит в обмотке  $p'$  ЭДС с частотой  $f'$

→ в замкнутой обмотке  $p'$  протекает ток с частотой  $f'$

→ обмотка  $p'$  создает магнитное поле с гармоникой  $v'_1$

→ взаимодействие гармоник  $v_{ZR}$  и  $v'_1$  создает вращающий момент

Частота токов  $f'$  в обмотке  $p'$  изменяется с изменением скорости вращения гармоники ротора  $v_{ZR}$

$$\omega_{ZR} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm p} = \frac{Z_R \omega_2 \pm \omega}{p'}$$

Синхронной скоростью вращения ротора считают такую скорость  $\omega_2$ ,

при которой частота ЭДС  $f'$  равна нулю,

т.е. гармоника  $v_{ZR}$  неподвижна в пространстве ( $\omega_{ZR} = 0$ )

$$\omega_{zc} = \mp \frac{\omega}{Z_R} = \mp \frac{p\omega_1}{Z_R} = \mp \frac{\omega_1}{k_p}$$

# Варианты исполнения индукторных двигателей

## Асинхронные индукторные двигатели

Для асинхронных ИД вводят понятие скольжения

Скольжение  $s_{vz}$  поля рабочей гармоники  $v_{ZR}$  относительно КЗ обмотки  $p'$

$$s_{vz} = \frac{(\omega_{zc} - \omega_2)}{\omega_{zc}}$$

- » при  $\omega_2 = \omega_{zS}$  скольжение  $s_{vz} = 0$  и частота тока обмотки  $p'$   $f' = 0$
- » при  $\omega_2 = 0$  скольжение  $s_{vz} = 1$  и частота тока обмотки  $p'$   $f' = f$
- » частота тока  $f'$  при любой скорости вращения ротора  $\omega_2$  равна  $f' = s_{vz} \cdot f$

Частота вращения ротора 
$$n_2 = 60 \frac{f \pm f'}{Z_R} = 60 \frac{f}{Z_R} (1 - s_{vz})$$

(в  $k_p$  раз меньше частоты вращения обычного АД с тем же  $p$ )

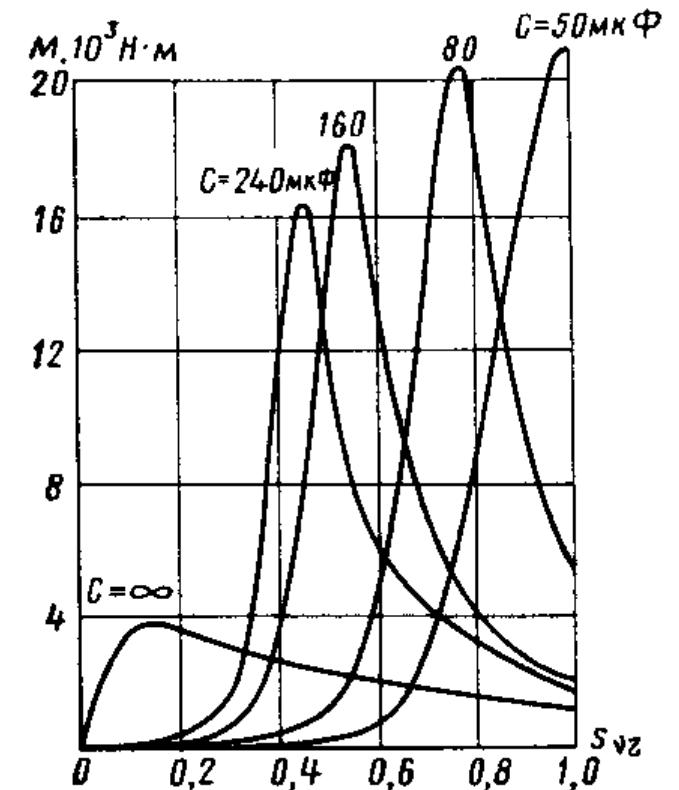
При открытых пазах на статоре  $Z_R$  увеличивается на величину  $Z_S$ , снижая  $n_2$

Вращающий момент АД зависит от тока обмотки  $p'$

→ от полного сопротивления обмотки  $p'$

- » для уменьшения  $x$  в цепь обмотки  $p'$  включают конденсатор

Механические характеристики асинхронного ИД при разных  $C$   
 $C$  влияет на  $M_{II}$  и  $M_{max}$ , но не влияет на жесткость характеристики



# Пуск в ход синхронных индукторных двигателей

Проблемы пуска синхронных ИД аналогичны всем синхронным двигателям

- » способы пуска – частотный, с разгонным двигателем, асинхронный
- » самый распространенный способ пуска – асинхронный (с помощью КЗ обмотки в пазах ротора)

Недостаток КЗ обмотки:

- » в синхронном режиме ротор вращается с  $n_{2c} = 60 \frac{f}{Z_R}$
- » а основная гармоника статора  $\nu_1$  вращается относительно ротора со скоростью, близкой к  $n_1 = 60 \frac{f}{p}$

Поле гармоники  $\nu_1$  (и поля других гармоник) в синхронном режиме работы вращается относительно ротора → наводит в КЗ обмотке ЭДС и токи → постоянные потери в роторе → снижение КПД двигателя

Для уменьшения потерь в роторе в двигателях с  $f = 50$  Гц делают КЗ обмотку с большим  $R$  (чтобы  $s_{кр} = 7 \dots 10$ )

- » уменьшение тока в обмотке ротора → уменьшение электрических потерь ( $I^2R$ )
- » мягкая характеристика упрощает синхронизацию с  $n_{2c}$

При питании от сети с большой частотой  $f$  на роторе укладывают многовитковую фазную обмотку с большим  $R$ , замкнутую через центробежные выключатели

- »  $R$  выбирают так, чтобы  $s_{кр} = 1$
- » центробежные выключатели настраивают на отключение при  $n_{2c}$

# Пуск в ход синхронных индукторных двигателей

В случае малого  $J$  ротора и нагрузки возможен пуск без КЗ обмотки

- » за счет вихревых токов ротора, асинхронных моментов от высших гармоник, быстрого втягивания в синхронизм

Процесс синхронизации более сложен – ротор может «проскочить»  $n_{2c}$  под действием асинхронного момента от  $v_1$

В этом случае надо предусмотреть соблюдение условия

$$J \leq \frac{pZ_R M_{cm} M_{ак}}{\omega(Z_S M_{ак} - Z_R M_{вн})}$$

где  $M_{cm}$  – максимальный синхронизирующий момент

$M_{ак}$  – асинхронный момент при  $n_2 = 0$

$M_{вн}$  – внешний момент нагрузки

# Рабочие свойства индукторных двигателей

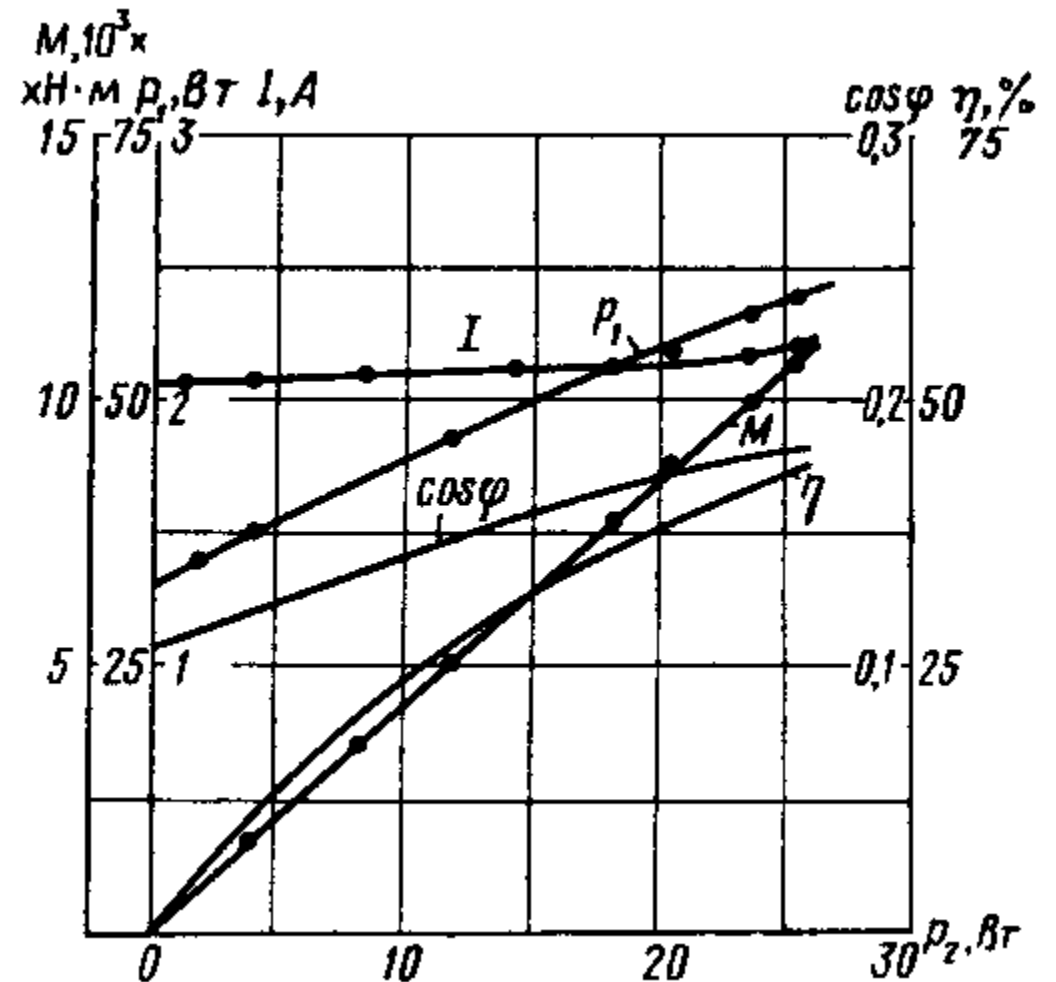
Рабочие характеристики индукторного двигателя

Недостатки ИД

- » плохие энергетические показатели ( $\eta$ ,  $\cos\varphi$ ) из-за
  - нерабочей гармоники  $\nu_1 = 1$
  - других высших гармонических
- » мгновенная скорость может «плавать»
  - из-за открытых пазов на статоре и роторе
- » плохая самовентиляция при больших потерях
  - приходится увеличивать габариты

Достоинства ИД

- » малая частота вращения (тихоходные)
- » надежность и долговечность
  - нет скользящих контактов
  - слабый износ подшипников



## Далее

---

### Часть 2. Исполнительные и информационные ЭМ

👤 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/))

