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

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

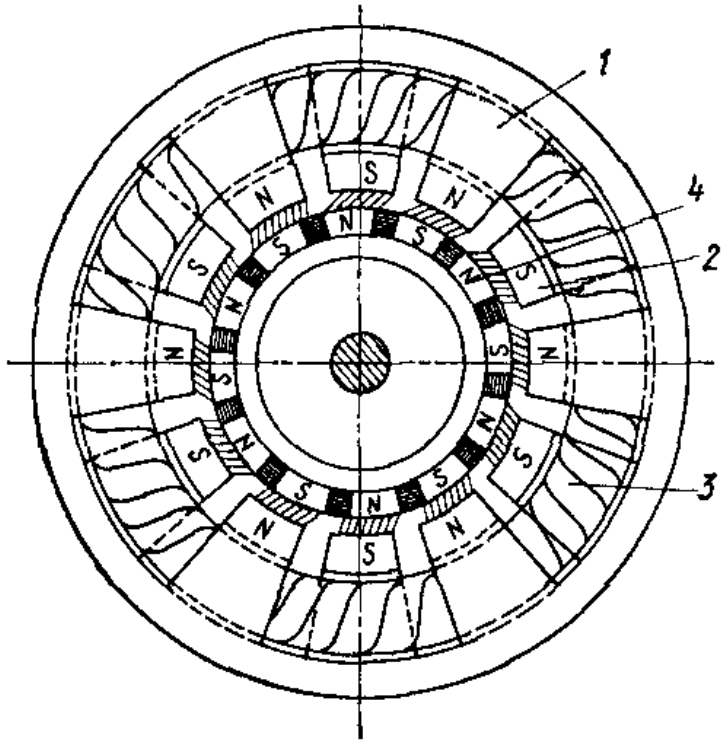
1 – передний торцевой щит с выступами, загнутыми назад
2 – задний торцевой щит с выступами, загнутыми вперед
3 – кольцевая ОВ
4 – ротор с радиальными ПМ

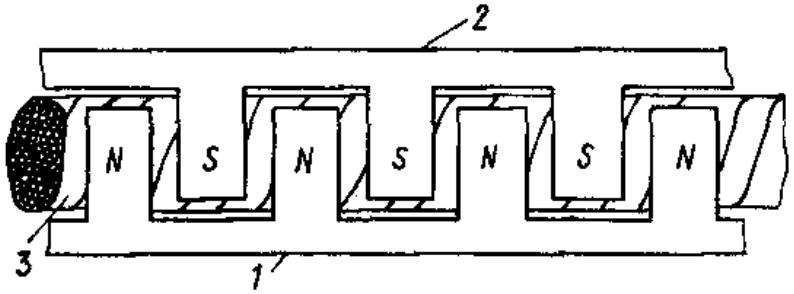
Ток ОВ → разная полярность торцевых щитов
→ разная полярность когтеобразных выступов в зазоре

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

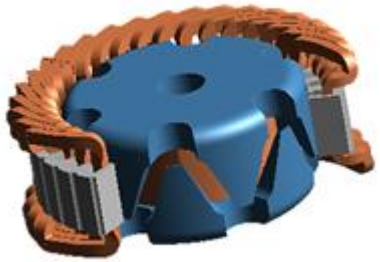
Основной недостаток – большие потоки рассеяния между когтеобразными выступами (терпимо при малых мощностях)

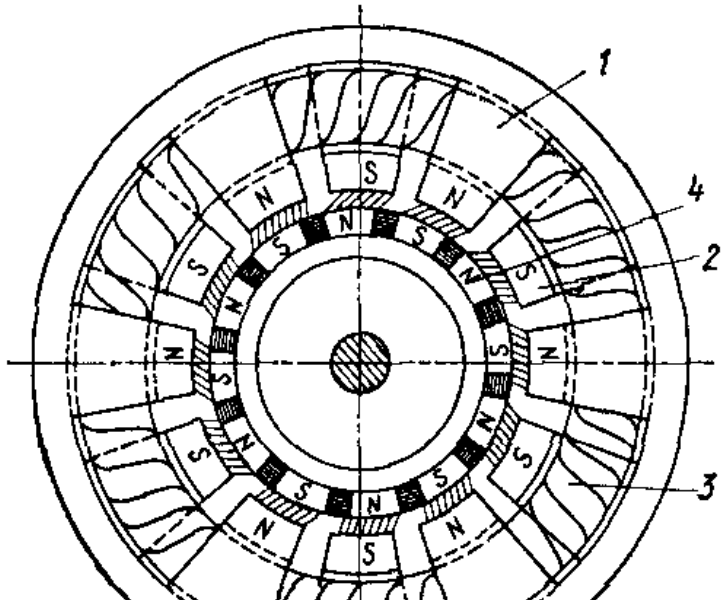
Достоинства

» увеличение числа пар полюсов в малых габаритах

» простота и технологичность

Известная конструкция – генератор с когтеобразными полюсами





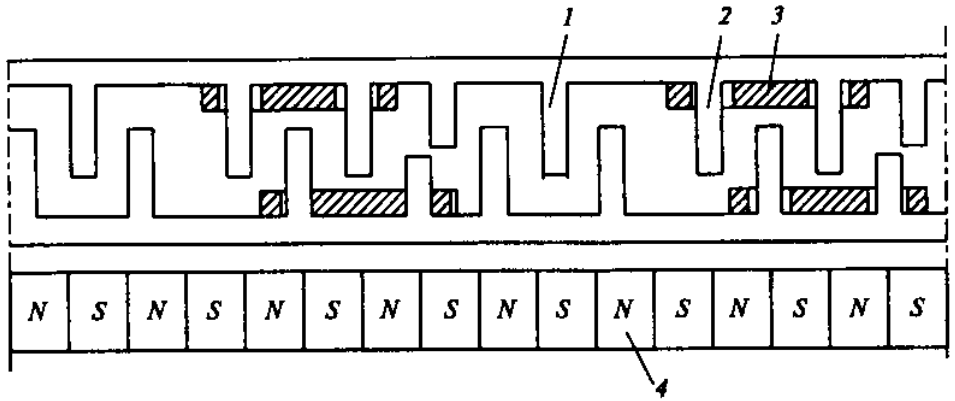

Для улучшения пусковых и рабочих свойств

» экранирование части полюсов КЗ витками (3)

» неравномерное распределение полюсов

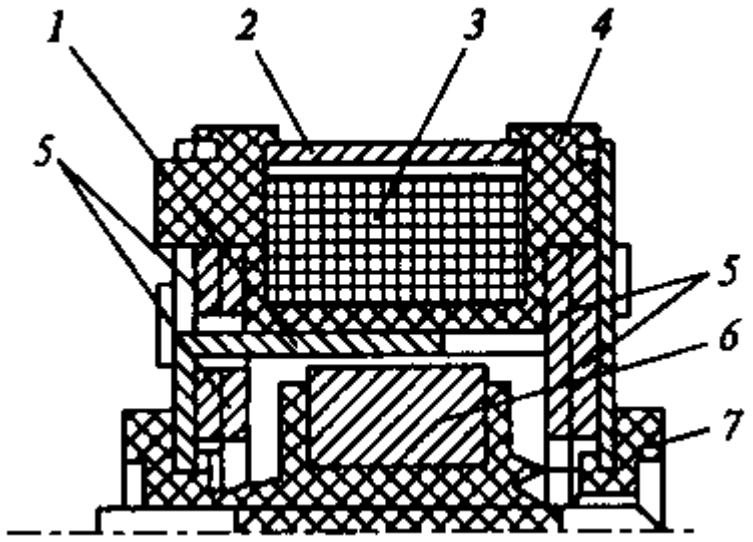
→ сдвиг потоков в пространстве и времени

→ 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 (нереверсивный двигатель)

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

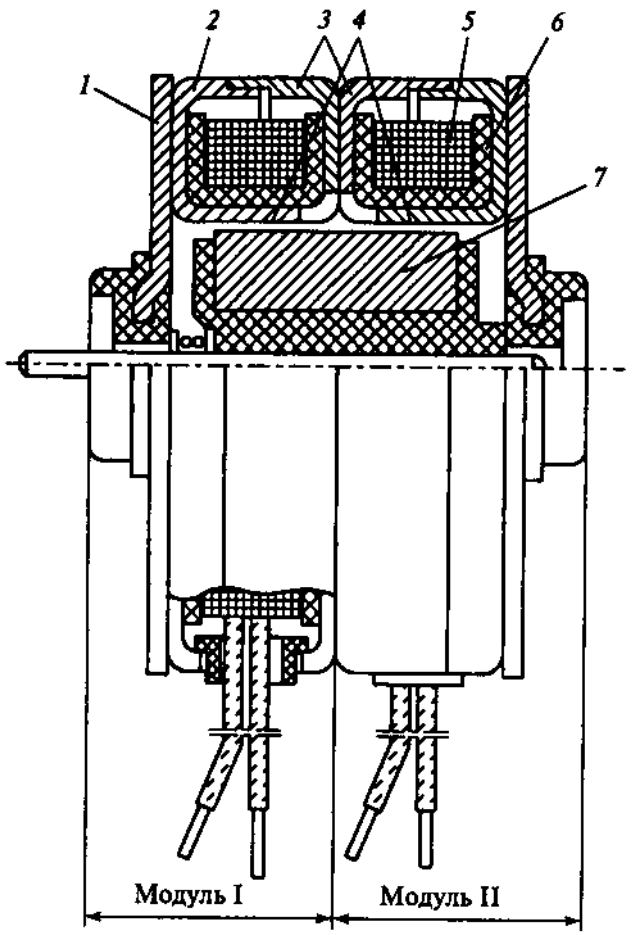
# ЭМ с когтеобразными полюсами

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 катящимся ротором

Москвитин А.И., 1944 г.

# Двигатели с катящимся ротором

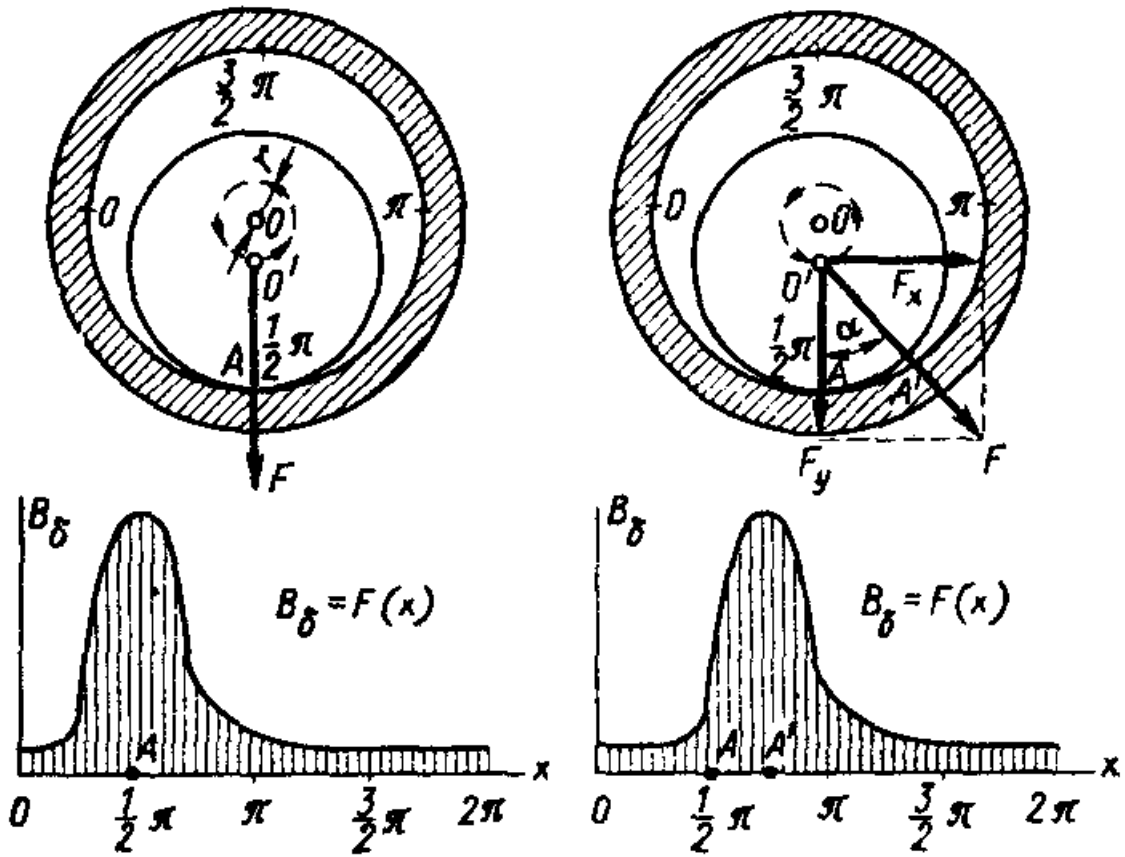
Конструкция ДКР объединяет в себе электродвигатель и редуктор

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 $0'$ также синхронно вращается вокруг оси статора $0$

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 $\Omega_2$

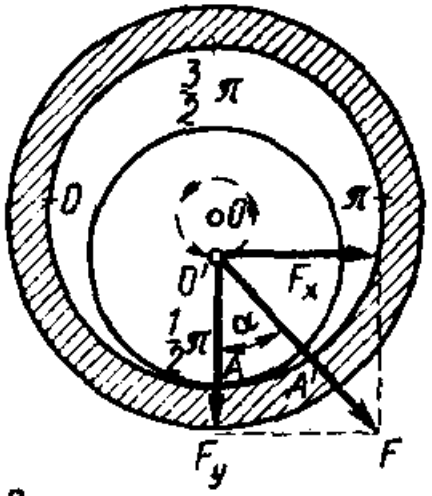
При этом ротор пройдет путь, равный разности длин окружностей статора и ротора

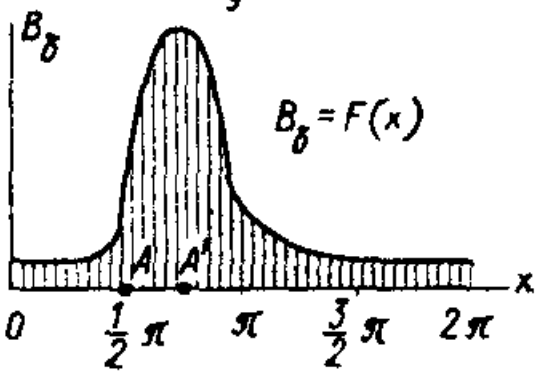
$$\Omega_2 R_R = 2\pi R_S - 2\pi R_R \qquad \text{отсюда} \qquad \Omega_2 = 2\pi \frac{R_S - R_R}{R_R}$$

Поскольку $1$ оборот поля статора равен $\Omega_1 = 2\pi$,
можно записать соотношение углов поворота ротора и поля статора $\Omega_2 = \Omega_1 \dfrac{R_S - R_R}{R_R}$

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

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

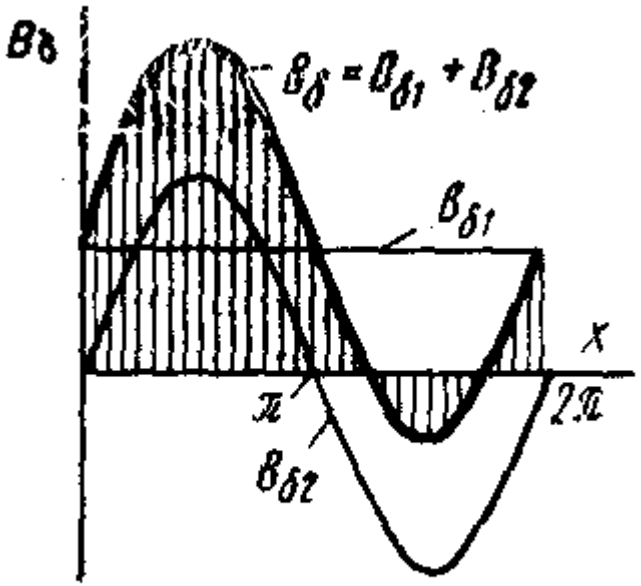


# Способы получения несимметричного вращающегося поля

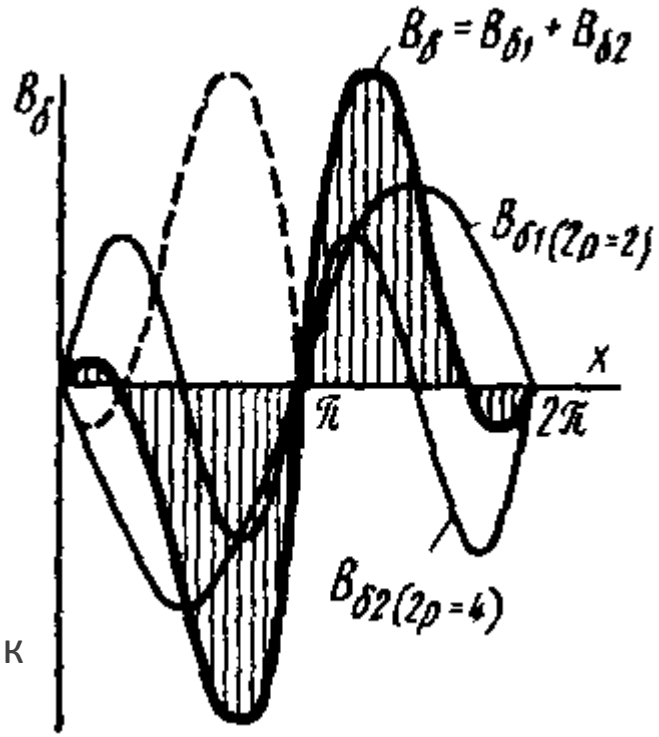
Для работы ДКР требуется вращающееся несимметричное магнитное поле

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
$\rightarrow$ для притяжения ротора важен модуль индукции (пунктирная кривая)

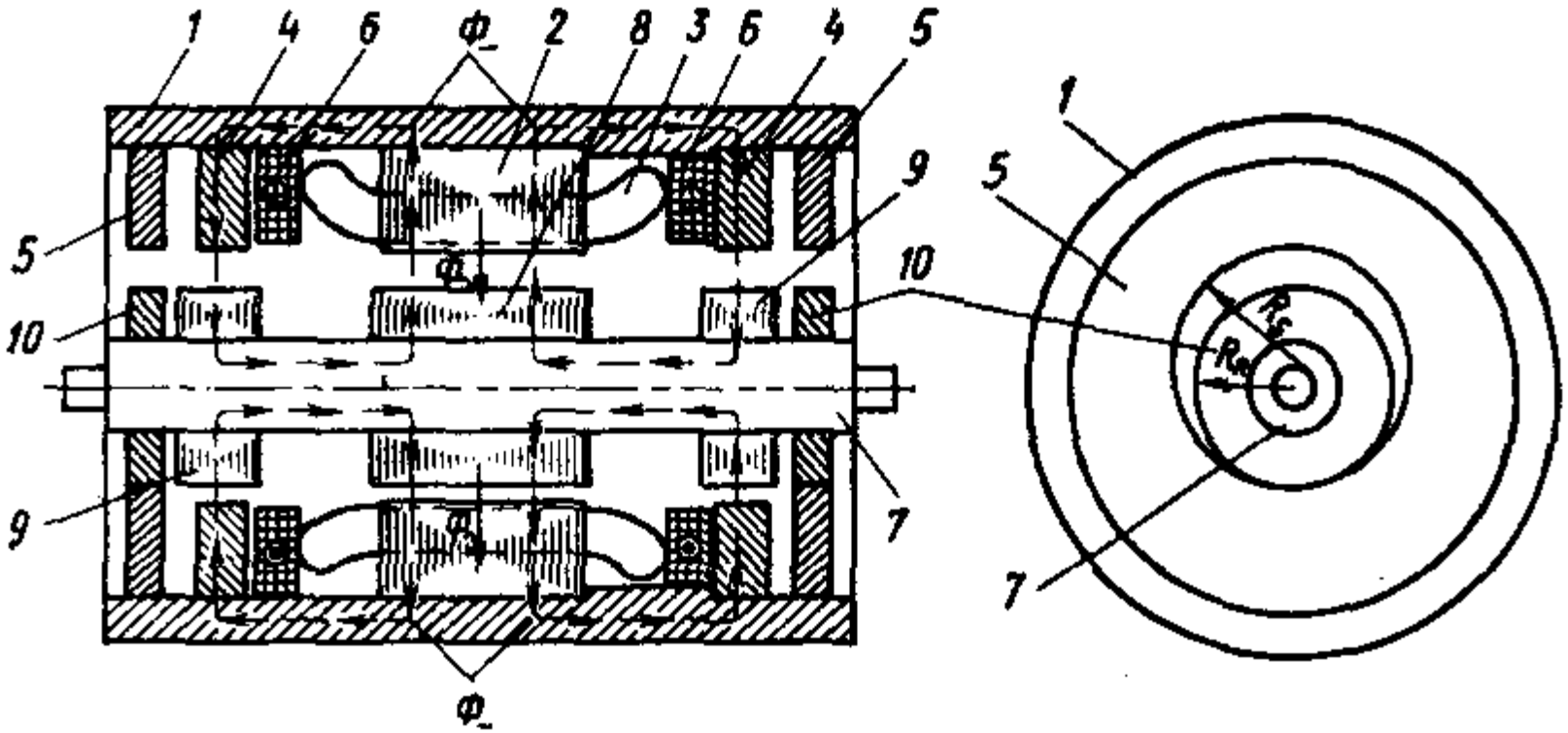



Возможно также применение зубцовых обмоток с последовательным возбуждением фаз

# 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)

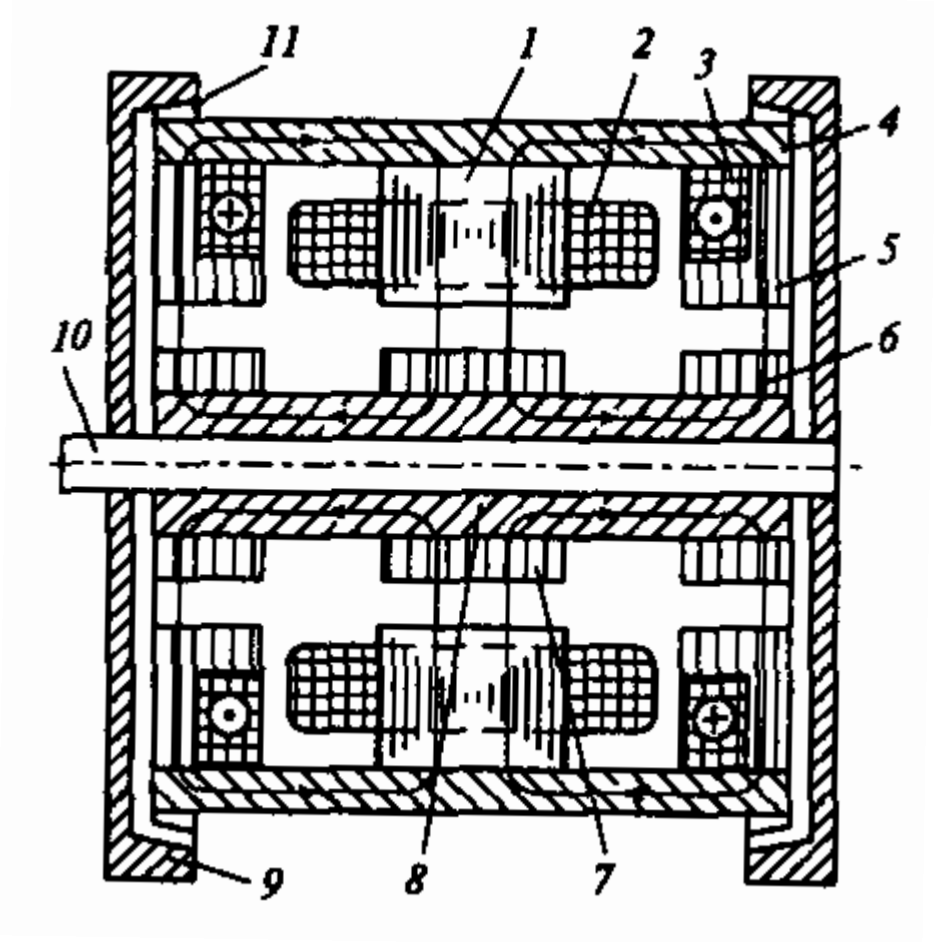
Левые и правые катки должны иметь строго одинаковые диаметры (лучше небольшую конусность обкатываемых поверхностей)

# 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

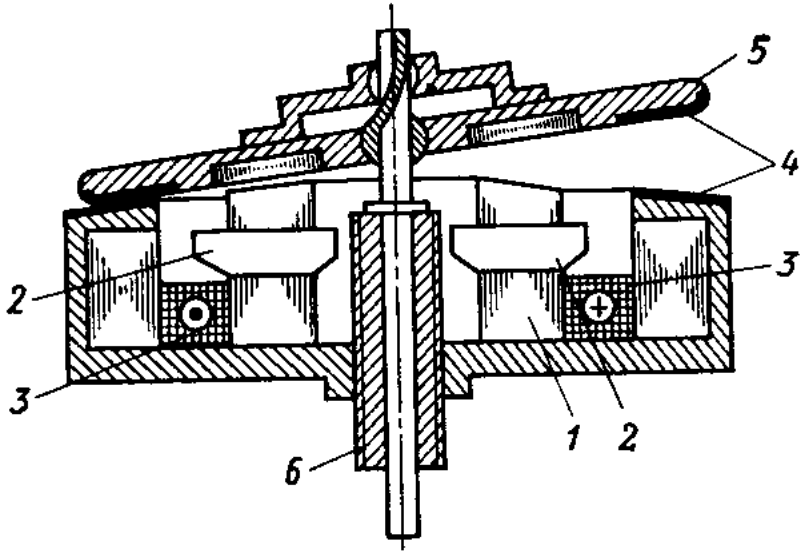



В ДКР ось ротора перемещается
(по малой окружности)
→ для передачи момента
требуются специальные
эластичные муфты
и гибкие передачи

- усложнение конструкции
- шумы и вибрации

# Конструкция ДКР

Дисковый ДКР



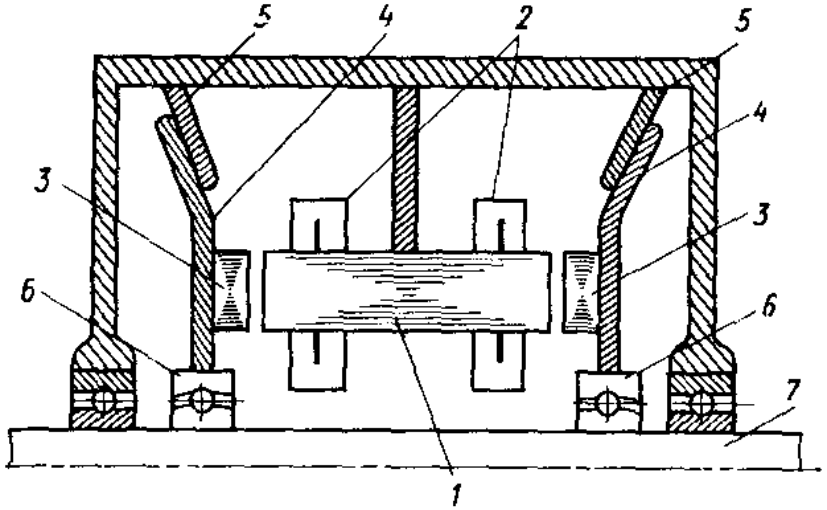

1 – статор
2 – обмотка переменного тока
3 – обмотка постоянного тока
4 – поверхности качения
5 – дисковый ротор
6 – винт регулировки частоты вращения

Специальный подшипник обеспечивает качание 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 α

$\xi = e/\delta$ – 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 $B_{d1} = B_{q1}$

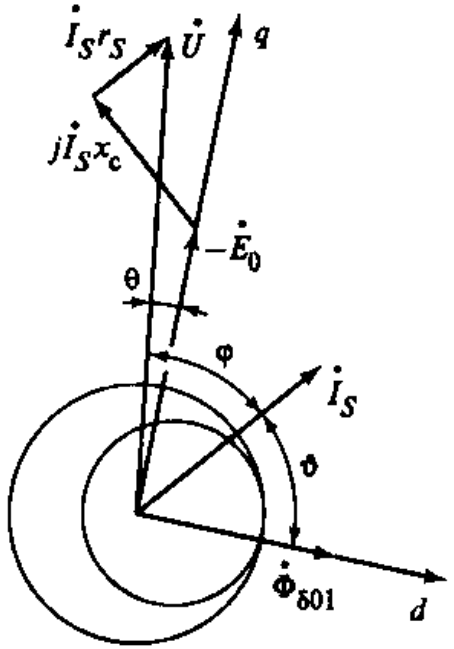
т.е. ДКР создает такие же основные гармоники, что и обычный СД с неявнополюсным ротором

Тогда можно использовать обычные уравнения СД при условии

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

# 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%
- cosφ 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 $x_d = x_q = x_\text{с}$
запишем вращающий момент как

$$M_\text{ЭМ} = M_{\text{с}m}\sin(\theta + \alpha_\text{с}) - M_\text{ст}$$

Здесь амплитуда электромагнитного момента СД $M_{\text{с}m} = \dfrac{m_1 U E_0}{\Omega_\text{с}\sqrt{r_S^2 + x_\text{с}^2}}$

Фазовый сдвиг определяется как $\alpha_\text{с} = \operatorname{arctg}\dfrac{r_S}{x_\text{с}}$

Тормозной момент СД $M_\text{ст} = \dfrac{m_1 E_0^2 r_S}{\Omega_\text{с}\left(r_S^2 + x_\text{с}^2\right)}$

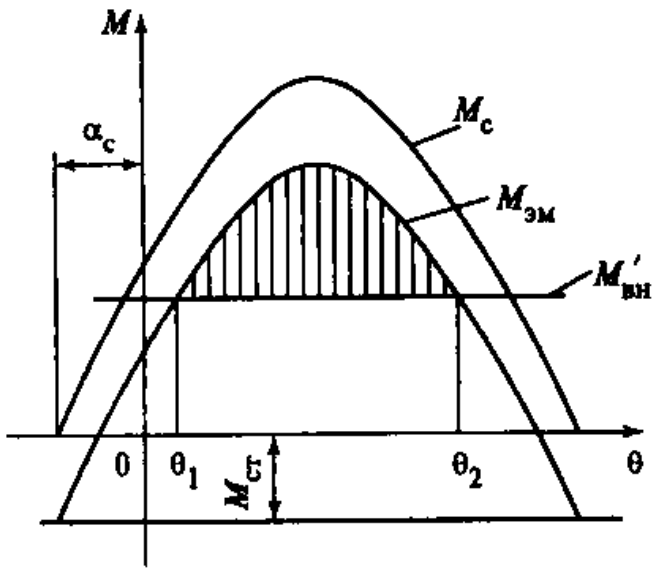
Внешний момент сопротивления нагрузки должен быть приведен к оси ротора $M'_\text{вн} = \dfrac{M_\text{вн}}{k_\text{ред}}$

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

Тогда можно записать уравнение движения
(пренебрегая электромагнитными переходными процессами) $M_\text{ЭМ} - M'_\text{вн} = J'\dfrac{d\Omega'_R}{dt}$

# 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

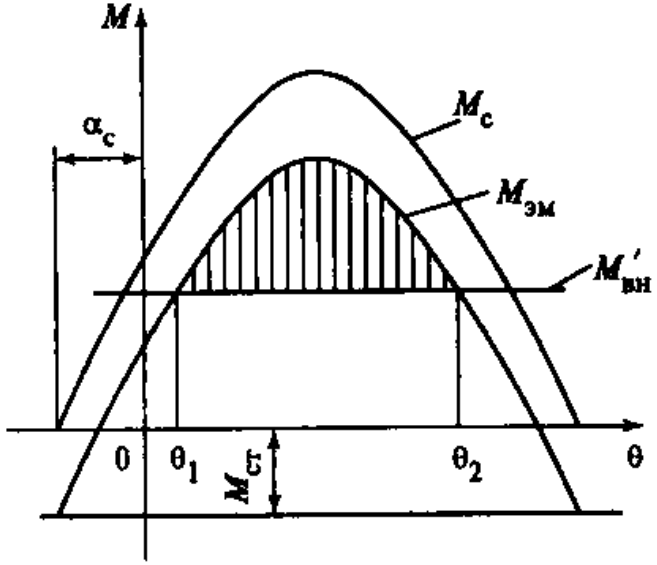
$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(M_{ЭМ} - M'_{вн}\right) d\theta \geq J' \frac{\Omega_c^2}{2}$$

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

$$J' \frac{\Omega_c^2}{2} \leq 2M_{cm} \cos(\theta_1 + \alpha_c) + \left(M_{ст} - M'_{вн}\right) \cdot \left[\pi - 2(\theta_1 + \alpha_c)\right]$$

# Пуск двигателя с катящимся ротором

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




$$J'\frac{\Omega_c^2}{2} \le 2M_{cm}\cos(\theta_1+\alpha_c)+\left(M_{ст}-M'_{вн}\right)\cdot\left[\pi-2(\theta_1+\alpha_c)\right]$$

Для большей наглядности используем относительные единицы, выразив все через амплитуду электромагнитного момента

$$m_{вх}=\frac{M'_{вн}}{M_{cm}}$$ – момент входа (предельный момент сопротивления нагрузки, при котором ДКР еще входит в синхронизм)

$$m_т=\frac{M_{ст}}{M_{cm}}$$ – тормозной момент СД

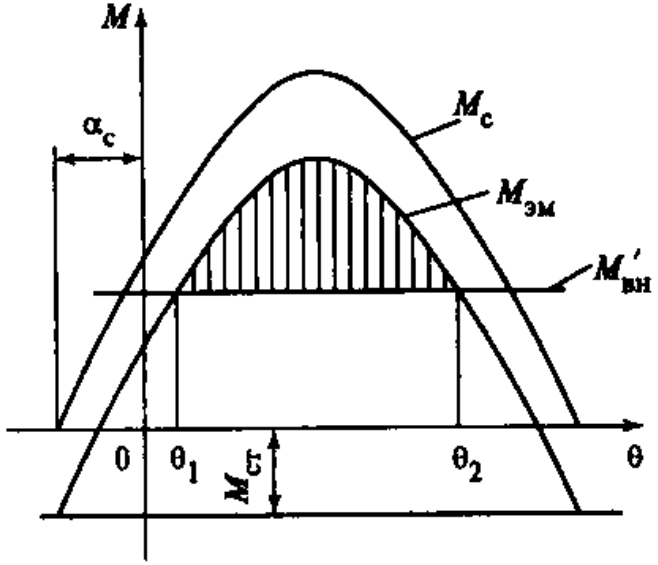
$$k_J=\frac{J'\Omega_c^2}{2M_{cm}}$$ – коэффициент момента инерции

Тогда условие входа в синхронизм запишется как

$$k_J \le 2\cos(\theta_1+\alpha_c)+\left(m_т-m_{вх}\right)\cdot\left[\pi-2(\theta_1+\alpha_c)\right]$$

# Пуск двигателя с катящимся ротором

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




$$k_J \le 2\cos(\theta_1+\alpha_c)+\left(m_т - m_{вх}\right)\cdot\left[\pi - 2(\theta_1+\alpha_c)\right]$$

Так как при $\theta = \theta_1 + \alpha_c$ $M_{ЭМ} = M'_{вн}$, то $\theta_1+\alpha_c = \arcsin\dfrac{M'_{вн}-M_{ст}}{M_{ст}} = \arcsin\left(m_{вх}-m_т\right)$

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

и $\cos\left(\theta_1+\alpha_c\right) = \sqrt{1-\left(m_{вх}-m_т\right)^2} \approx 1-\dfrac{1}{2}\left(m_{вх}-m_т\right)^2$

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

$$m_{вх} = \sqrt{2+\pi m_т - k_J}$$

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 ($2\ldots3\ I_{н}$)
- отсутствие высокоскоростных подшипников $\rightarrow$ надежная работа практически без смазки (в вакууме)

Недостатки

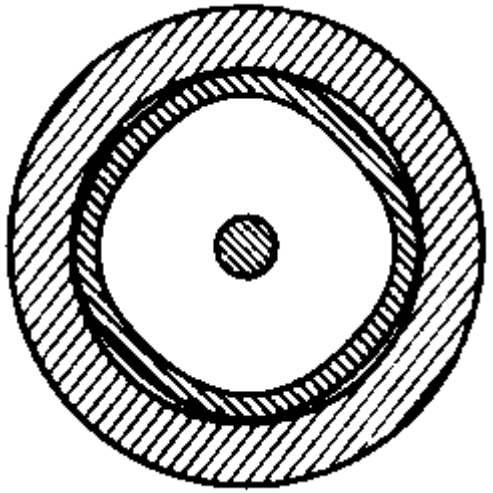
- сложность конструкции (гибкие передачи)
- вибрации и шумы
- технологический разброс поверхностей качения и их износ $\rightarrow$ трудно гарантировать нужную скорость
- нестабильная работа при ударных нагрузках и тряске
- трудность пуска при больших частотах питания и инерционной нагрузке
- небольшой 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 $\Omega_2 = \dfrac{2\pi R_S - 2\pi R_R}{R_R}$



Двигатель может быть многополюсным

Преимущества

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

Недостаток

- тонкий ротор $\rightarrow$ большое магнитное сопротивление $\rightarrow$ 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 $Z_S$

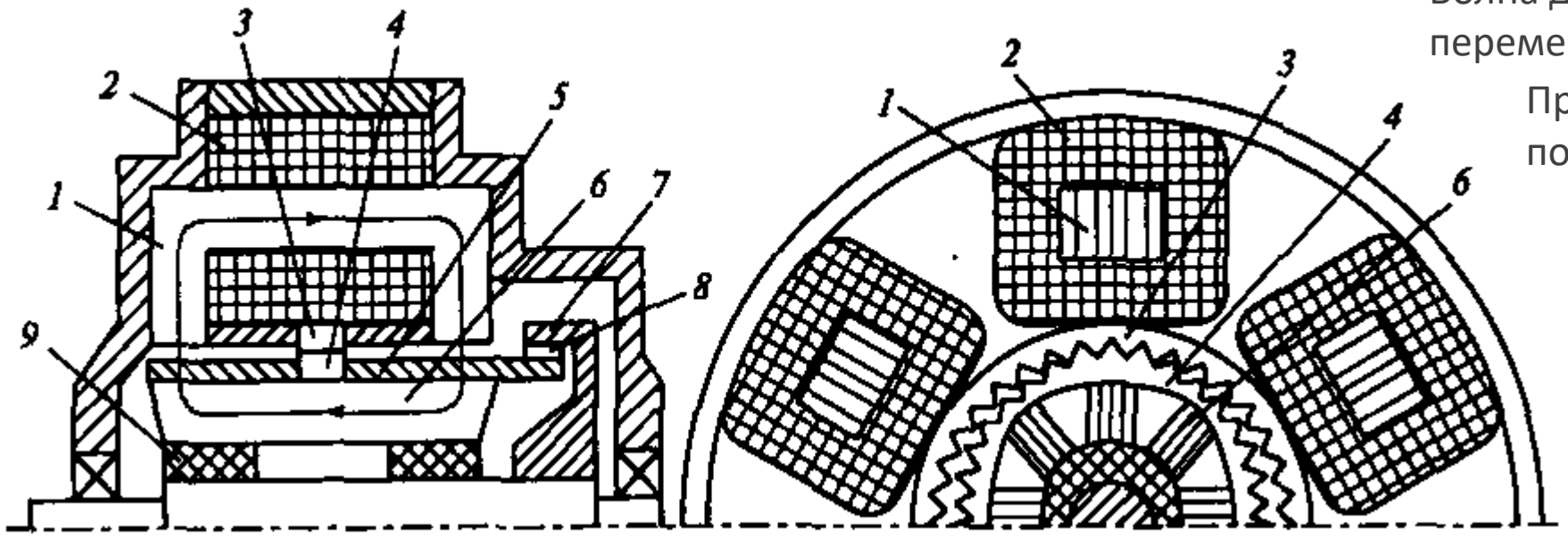
4 – гибкий зубчатый венец с $Z_R$

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) $\nu = 1+2m$(ц.ч.) или $\nu = 1+m'$(ц.ч.)

$$F_\nu(x) = F_{\nu m}\sin\left(\omega t - \nu\frac{\pi x}{\tau}\right)$$

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

$B_\delta = F\cdot\lambda_\delta$ где $\lambda_\delta$ – удельная проводимость зазора

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

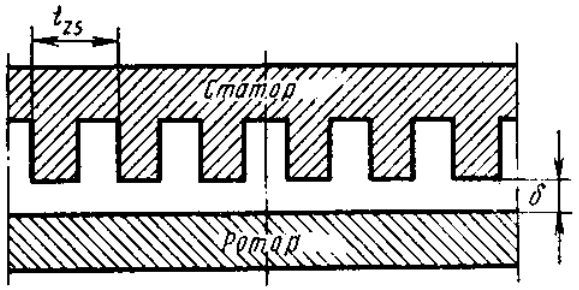
При гладком зазоре ($\lambda_\delta(x) = \mathrm{const}$) каждая гармоника МДС создает свою гармонику индукции

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

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 – зубцовые гармоники

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

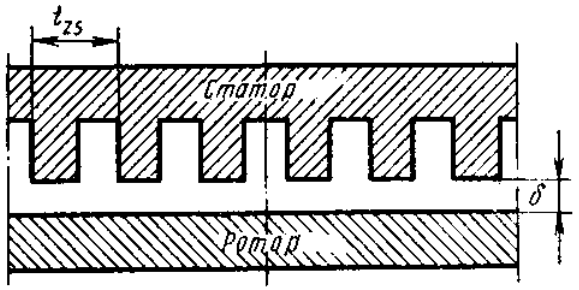
Таким образом, удельная проводимость воздушного зазора

$$\lambda_S(x) = \lambda_{S0} - \lambda_{ZS1}\cos\left(\frac{Z_S}{p}\cdot\frac{\pi x}{\tau}\right)$$

где $\lambda_{ZS1}$ – амплитуда первой зубцовой гармоники проводимости

# Магнитное поле в зазоре ЭМ

Рассмотрим вначале <u>проводимость зазора с зубчатым статором и гладким ротором</u>




Найдем индукцию в зазоре машины от ν 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 <u>проводимость зазора с зубчатым статором и гладким ротором</u>

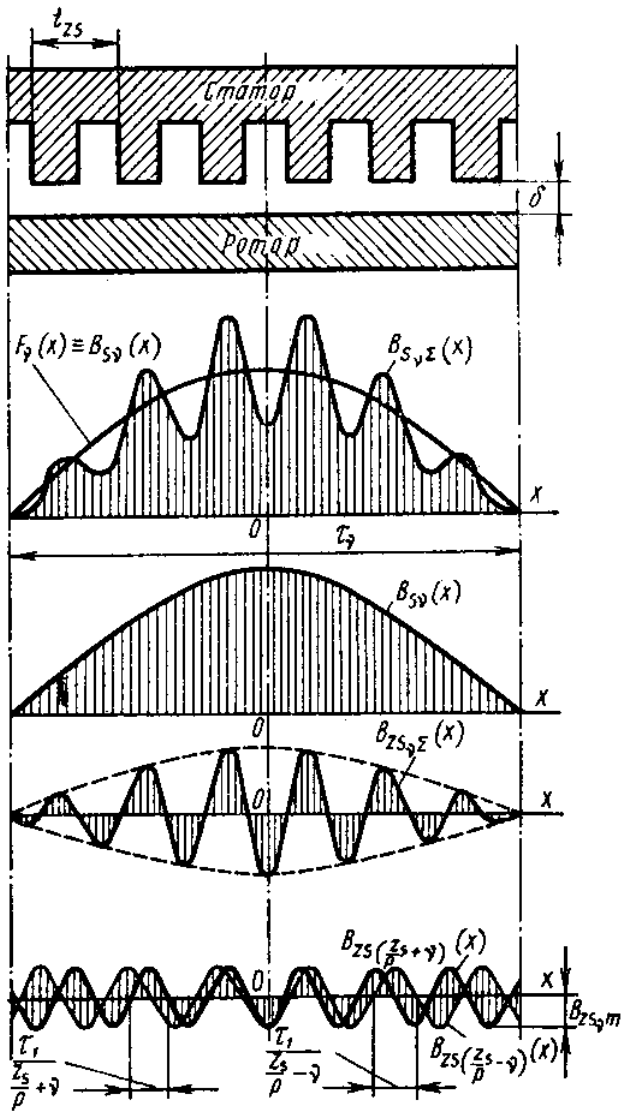
Таким образом, каждая ν гармоника МДС зубчатого статора (при гладком роторе) создает в зазоре

- ν 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

- ν гармоника МДС $F_\nu$ создает индукцию в зазоре $B_{S\nu\Sigma}$
- кривая индукции $B_{S\nu\Sigma}$ содержит ν 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 <u>проводимость зазора с зубчатым статором и гладким ротором</u>

Найдем угловые скорости гармоник индукции
Приравняем нулю производную аргумента функции с учетом

$$x = \alpha R \qquad \tau = \frac{2\pi R}{2p} \qquad \omega_\nu = \frac{d\alpha}{dt}$$

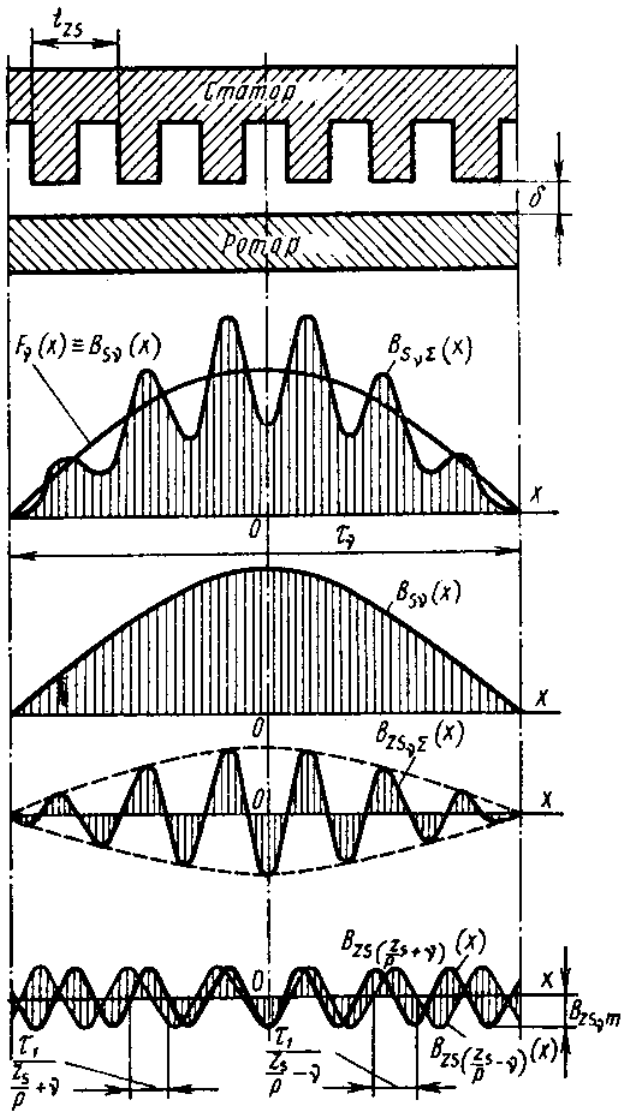
Для $\nu$ гармоники,
обусловленной постоянной составляющей $\lambda_{S0}$, угловая скорость $\omega_\nu = \dfrac{\omega}{p\nu}$

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

(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 <u>проводимость зазора с гладким статором и зубчатым ротором</u>

При неподвижном роторе выражение $B_{R\nu\Sigma}(x)$ 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

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

Тогда индукция магнитного поля в зазоре $\nu$ гармоники МДС статора

$$B_{R_\nu\Sigma}(x) = B_{R_\nu m}\sin\left(\omega t - \nu\frac{\pi x}{\tau}\right) - B_{ZR_\nu m}\sin\left(\left(\omega - Z_R\omega_2\right)t + \left(\frac{Z_R}{p} - \nu\right)\frac{\pi x}{\tau}\right) - B_{ZR_\nu m}\sin\left(\left(\omega + Z_R\omega_2\right)t - \left(\frac{Z_R}{p} + \nu\right)\frac{\pi x}{\tau}\right)$$

Для $\nu$ гармоники угловая скорость $\omega_\nu = \dfrac{\omega}{p\nu}$

Зубцовые гармоники поля имеют порядок $\nu_{ZR_\nu} = \dfrac{Z_R}{p} \pm \nu = \dfrac{Z_R \pm p\nu}{p}$

Их угловые скорости $\omega_{ZR_\nu} = \dfrac{Z_R\omega_2 \pm \omega}{p\nu_{ZR_\nu}} = \dfrac{Z_R\omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm p\nu}$ – 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 $\nu_{Z\nu}$

Таких гармоник 4 $\nu_{Z\nu} = \dfrac{Z_R \pm Z_S}{p} \pm \nu$ их угловые скорости $\omega_{Z_\nu} = \dfrac{Z_R\omega_2 \pm \omega}{p\nu_{Z\nu}}$ (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 $\nu_{Z\nu}$

Принято выделять две группы гармоник

- гармоники статора – $\nu$ и $\nu_{ZS}$ (их $\omega$ определяются $f_1$)
- гармоники ротора – $\nu_{ZR}$ и $\nu_{Z\nu}$ (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 $\nu_1 = 1$ $\qquad \omega_1 = \omega / p$

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

- Гармоники ротора

$$\nu_{ZR} = \frac{Z_R}{p} \pm 1 = \frac{Z_R \pm p}{p} \qquad \omega_{ZR} = \frac{Z_R\omega_2 \pm \omega}{p\nu_{ZR}} = \frac{Z_R\omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm p}$$

$$\nu_Z = \frac{Z_R \pm Z_S}{p} \pm 1 = \frac{Z_R \pm Z_S \pm p}{p} \qquad \omega_Z = \frac{Z_R\omega_2 \pm \omega}{p\nu_Z} = \frac{Z_R\omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm Z_S \pm p}$$

# Индукторные двигатели

## Двигатели с электромагнитной редукцией

# Магнитное поле индукторного двигателя

Индукторный двигатель в общем случае имеет зубчатые статор и ротор и 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

$$\frac{\nu_1'}{\nu_1} = \frac{p'}{p}$$

Полагая $\nu = 1$ получим порядок основной гармоники другой обмотки $\nu_1' = \dfrac{p'}{p}$

Гармоника МДС $\nu_1'$ обмотки $p'$ создает в зазоре тот же спектр гармоник поля, что и основная гармоника обмотки $p$

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

» Гармоники статора

$$\nu_1' = \frac{p'}{p} \qquad \omega_1' = \frac{\omega'}{p\nu'} = \frac{\omega'}{p'} \qquad \nu_{ZS}' = \frac{Z_S}{p} \pm \frac{p'}{p} = \frac{Z_S \pm p'}{p} \qquad \omega_{ZS}' = \frac{\pm\omega'}{p\nu_{ZS}'} = \frac{\pm\omega'}{Z_S \pm p'}$$

» Гармоники ротора

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

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

# 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 $\nu_1$, $\nu'_1$, $\nu_{ZS}$, $\nu'_{ZS}$ (их скорости вращения зависят от частоты $f$ и $f'$)

» гармоники ротора $\nu_{ZR}$, $\nu'_{ZR}$, $\nu_Z$, $\nu'_Z$ (их скорости вращения зависят от скорости ротора $\omega_2$)

В ЭМ взаимодействуют $B_S$ и $B_R$, имеющие одинаковый период ($\nu$) и скорость вращения ($\omega$)

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 $\nu_S$ от обмотки $p$ совпадает с гармоникой ротора $\nu_R$ от обмотки $p'$ $\quad \nu_S = \nu_R$

Соответственно, совпадают числа пар полюсов $p_{\nu S} = p_{\nu R}$ и полюсные деления $\tau_{\nu S} = \tau_{\nu R}$

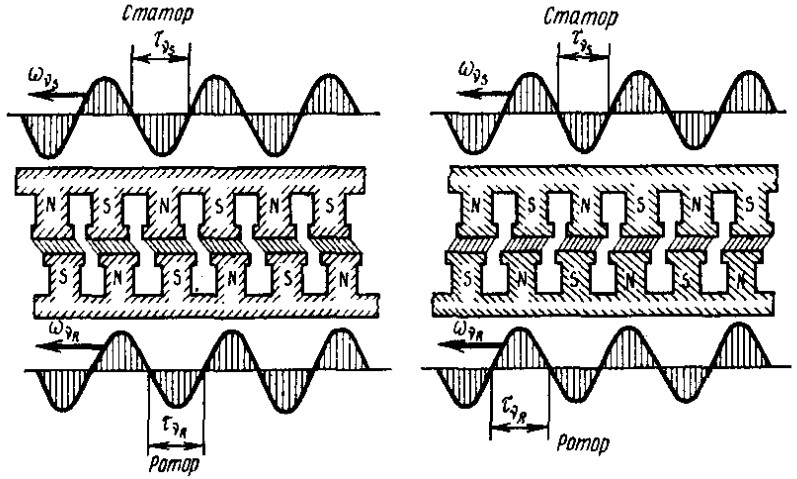
Между гармониками одного порядка возникают силы взаимодействия, создающие электромагнитный момент (у несовпадающих гармоник результат взаимодействия очень мал из-за несовпадения полюсных делений)

Поля гармоник $\nu_S$ и $\nu_R$ вращаются в пространстве

Момент от их взаимодействия будет постоянен, если их скорости равны

$$\omega_{\nu S} = \omega_{\nu R}$$

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 $\nu_S = \nu_R$

» их скорости вращения должны совпадать $\omega_{\nu S} = \omega_{\nu R}$

Как сделать такой двигатель?

Предположим, что

» рабочей гармоникой статора $\nu_S$ является гармоника $\nu'_{ZS}$ от обмотки $p'$ $\quad \nu_S = \nu'_{ZS} = \dfrac{Z_S \pm p'}{p}$

» рабочей гармоникой ротора $\nu_R$ является гармоника $\nu_{ZR}$ от обмотки $p$ $\quad \nu_R = \nu_{ZR} = \dfrac{Z_R \pm p}{p}$

Первое условие $\nu_S = \nu_R$ означает, что $\nu'_{ZS} = \nu_{ZR}$, т.е. $\dfrac{Z_S \pm p'}{p} = \dfrac{Z_R \pm p}{p}$ или $\boxed{Z_R = Z_S \pm (p' \pm p)}$

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

Для индукторного двигателя с односторонней зубчатостью ($Z_S = 0$) $\quad Z_R = \pm(p' \pm p)$

Условие равенства скоростей $\omega_{\nu S} = \omega_{\nu R}$ преобразуется в равенство $\omega'_{ZS} = \omega_{ZR}$, т.е. $\dfrac{\pm\omega'}{Z_S \pm p'} = \dfrac{Z_R\omega_2 \pm \omega}{Z_R \pm p}$

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

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

Исключив одинаковые комбинации с разными знаками запишем частоту вращения ИД $\boxed{n_2 = 60\dfrac{f \pm f'}{Z_R}}$

# Особенности индукторных двигателей

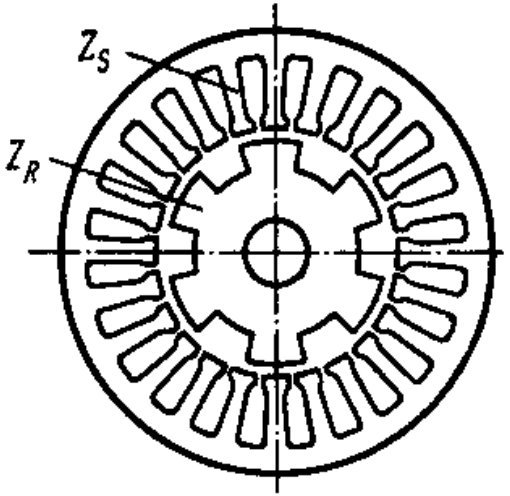
На роторе индукторного двигателя всегда открытые пазы

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

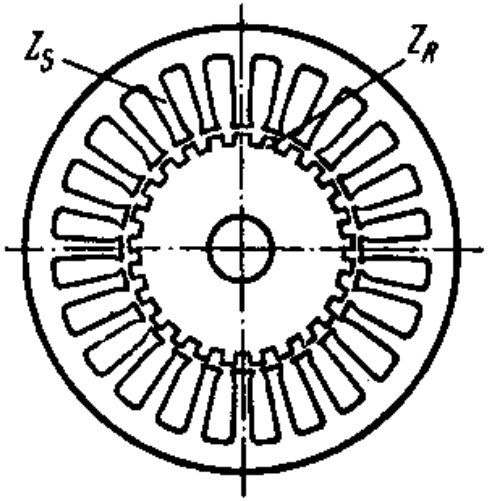
$Z_R$ влияет на частоту вращения $n_2 = 60\dfrac{f \pm f'}{Z_R}$

Число зубцов статора

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

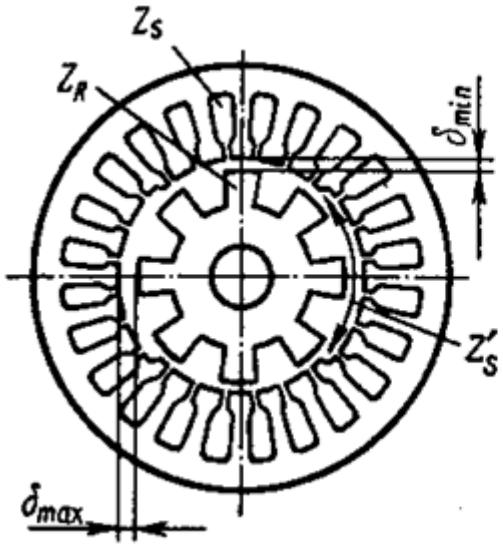



Полузакрытые пазы
$\rightarrow Z_S = 0$

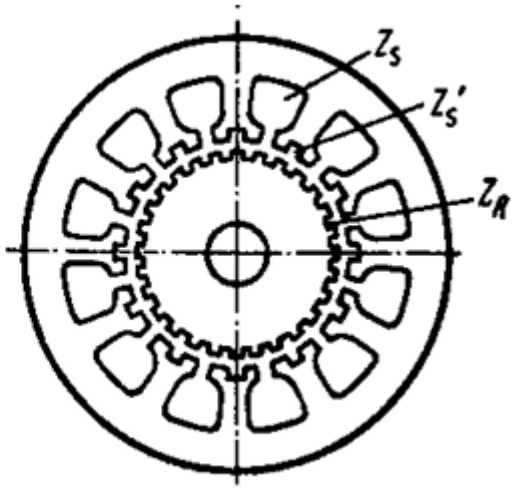



Полуоткрытые пазы
$\rightarrow Z_S = 24$

Ступенчатый зазор
$\rightarrow Z_S = 24 / Z_S' = 2$




Малые пазы
$\rightarrow Z_S = 12 / Z_S' = 24$



# Особенности индукторных двигателей

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

Если взаимодействуют гармоники $\nu'_{ZS}$ и $\nu_{ZR}$ при скорости $\omega_2 = \dfrac{\mp\omega \pm \omega'}{Z_R}$

Тогда найдется гармоника $\nu_Z = \dfrac{Z_R \pm Z_S \pm p}{p}$

с учетом $Z_R = Z_S \pm p' \mp p$ $\quad \nu_Z = \dfrac{Z_S \pm p' \mp p \pm Z_S \pm p}{p}$ в том числе $\nu_Z = \dfrac{p'}{p} = \nu'_1$

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

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 $Z_R = Z_S \pm \left( p' \pm p \right)$

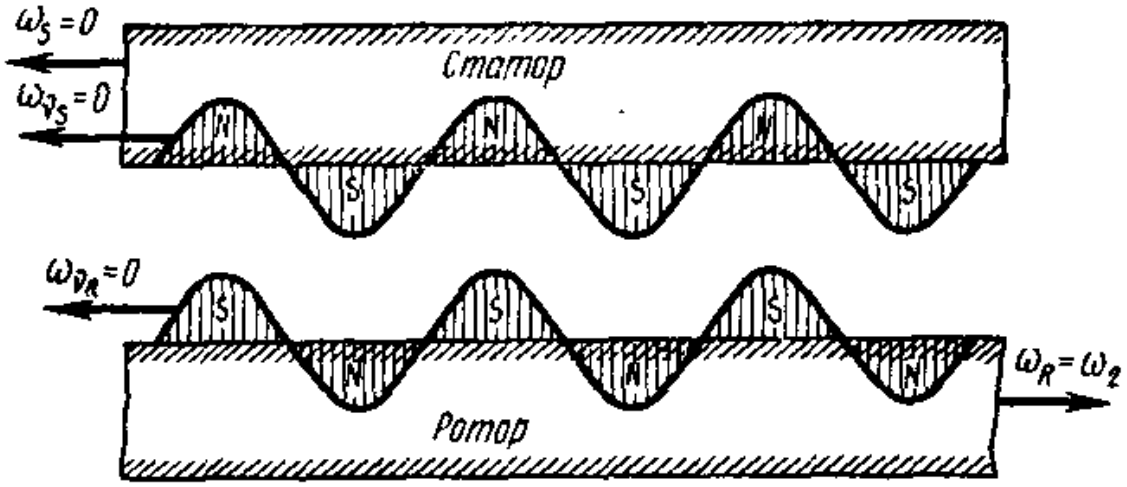
При $Z_S = 0$ вращающий момент – взаимодействие гармоники статора $\nu_S = \nu'_1$ от обмотки $p'$ и зубцовой гармоники ротора $\nu_R = \nu_{ZR}$ от обмотки $p$

При $Z_S$ вращающий момент – взаимодействие гармоники статора $\nu_S = \nu'_{ZS}$ и гармоники ротора $\nu_R = \nu_{ZR}$ либо гармоники $\nu'_1$ и гармоники $\nu_Z$

# 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 $f' = 0$) $\quad n_2 = 60\dfrac{f}{Z_R}$

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

Коэффициент электромагнитной редукции $\quad k_\text{р} = \dfrac{n_1}{n_2} = \dfrac{Z_R}{p}$

При двусторонней зубчатости $k_\text{р}$ 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

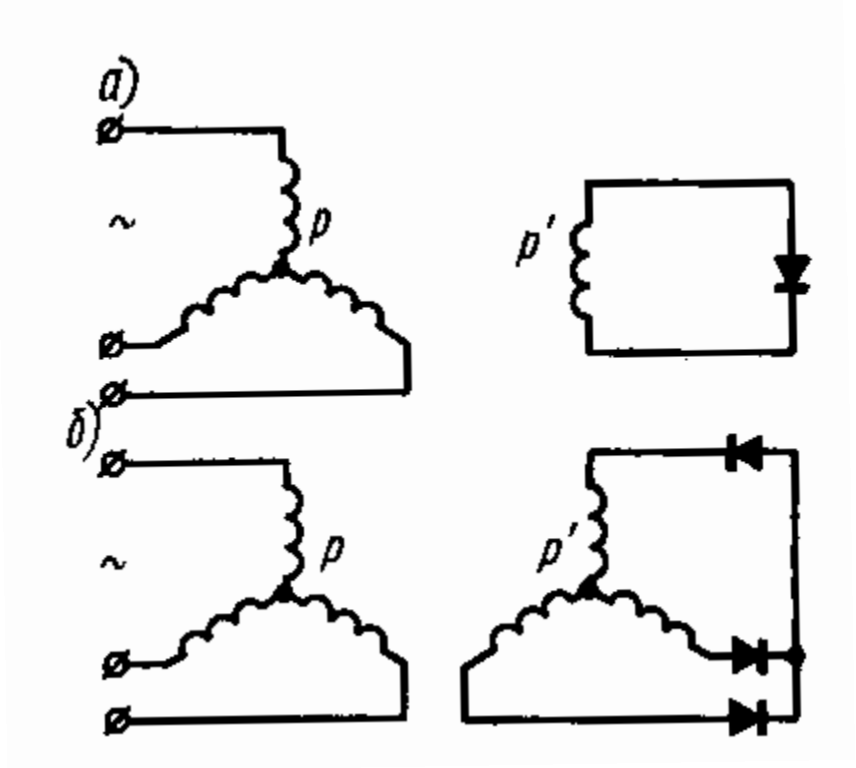
***Синхронный индукторный двигатель с самовозбуждением (радиальным)***

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

Для этого необходимо выполнение условия $p'/p$ = целое нечетное число

Сама ОВ закорочена через выпрямитель
$\rightarrow$ 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)



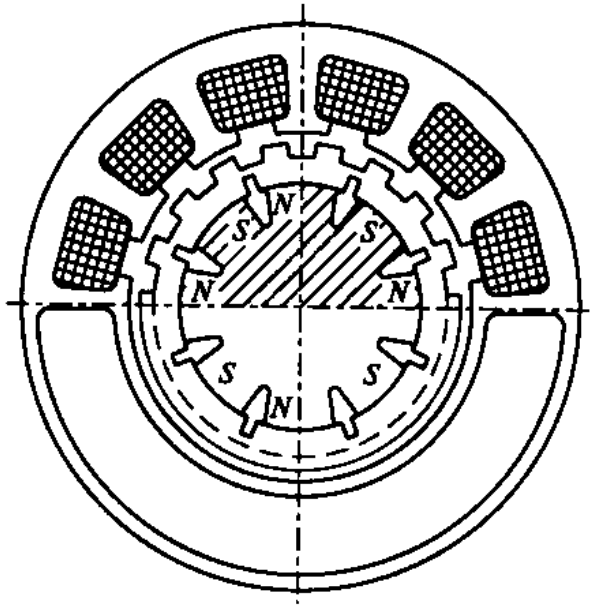
# Варианты исполнения индукторных двигателей

***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)

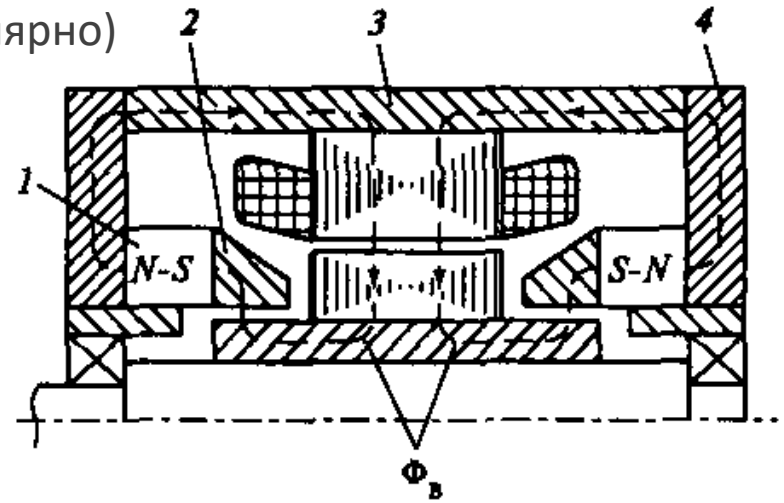
Для этого потребуется преобразователь частоты

# Варианты исполнения индукторных двигателей

***Синхронный индукторный двигатель с униполярным возбуждением***

Обмотка возбуждения (или постоянные магниты) создает поток $\Phi_в$
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 $\nu = 0$

– зубцовые гармоники статора $\nu_{ZS0} = \dfrac{Z_S}{p}$ $\omega_{ZS0} = 0$

– зубцовые гармоники ротора $\nu_{ZR0} = \dfrac{Z_R}{p}$ $\omega_{ZR0} = \dfrac{Z_R \omega_2}{p \nu_{ZR0}} = \omega_2$ $\nu_{Z0} = \dfrac{Z_R \pm Z_S}{p}$ $\omega_{Z0} = \dfrac{Z_R \omega_2}{p \nu_{Z0}} = \omega_2 \dfrac{Z_R}{Z_R \pm Z_S}$

# 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 $\nu_{Z0} = \nu_1 = 1$)

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

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

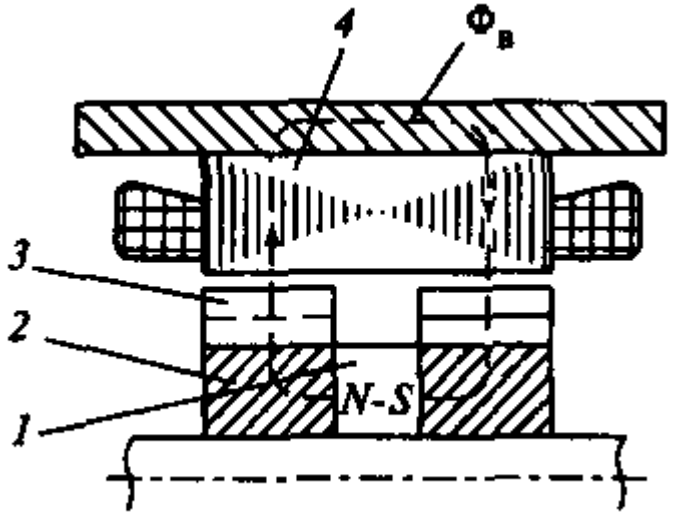
$$\omega_2 \frac{Z_R}{Z_R \pm Z_S} = \frac{\omega}{p} \quad \rightarrow \quad \omega_2 = \frac{\omega}{Z_R}$$

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

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 явновыраженные 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 $n_2 = 120\dfrac{f}{Z_R}$

Рабочие гармоники

» гармоника тока статора $\nu_1 = 1$ и одна из зубцовых гармоник ротора $\nu_Z$
» одна из зубцовых гармоник статора $\nu_{ZS}$ и одна из зубцовых гармоник ротора $\nu_{ZR}$

из условия $\nu_Z = \nu_1$ $\dfrac{Z_R - Z_S}{p} - 1 = 1 \quad \rightarrow \quad Z_R = Z_S + 2p$

из условия $\nu_{ZR} = \nu_{ZS}$ также $\dfrac{Z_R - p}{p} = \dfrac{Z_S + p}{p} \quad \rightarrow \quad Z_R = Z_S + 2p$

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

Коэффициент редукции $k_\text{р} = \dfrac{Z_R}{2p}$

# Варианты исполнения индукторных двигателей

***Синхронный реактивный индукторный двигатель***

Обычный СРД работает без возбуждения, но имеет явновыраженные 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 $n_2 = 120\dfrac{f}{Z_R}$

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 хýдшие энергетические показатели и мéньшую 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

$$Z_R = Z_S \pm \left( p' \pm p \right)$$

Если на статоре пазы закрытые – принимаем $Z_S = 0$, тогда $Z_R = p' \pm p$

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

$\rightarrow$ наводит в обмотке $p'$ ЭДС с частотой $f'$

$\rightarrow$ в замкнутой обмотке $p'$ протекает ток с частотой $f'$

$\rightarrow$ обмотка $p'$ создает магнитное поле с гармоникой $\nu'_1$

$\rightarrow$ взаимодействие гармоник $\nu_{ZR}$ и $\nu'_1$ создает вращающий момент

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

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

Синхронной скоростью вращения ротора считают такую скорость $\omega_2$, при которой частота ЭДС $f'$ равна нулю, т.е. гармоника $\nu_{ZR}$ 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 $s_{\nu z}$ поля рабочей гармоники $\nu_{ZR}$ относительно КЗ обмотки $p'$

$$s_{\nu z} = \frac{(\omega_{Zc} - \omega_2)}{\omega_{Zc}}$$

» при $\omega_2 = \omega_{ZS}$ скольжение $s_{\nu z} = 0$ и частота тока обмотки $p'$ $f' = 0$

» при $\omega_2 = 0$ скольжение $s_{\nu z} = 1$ и частота тока обмотки $p'$ $f' = f$

» частота тока $f'$ при любой скорости вращения ротора $\omega_2$ равна $f' = s_{\nu z} \cdot f$

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

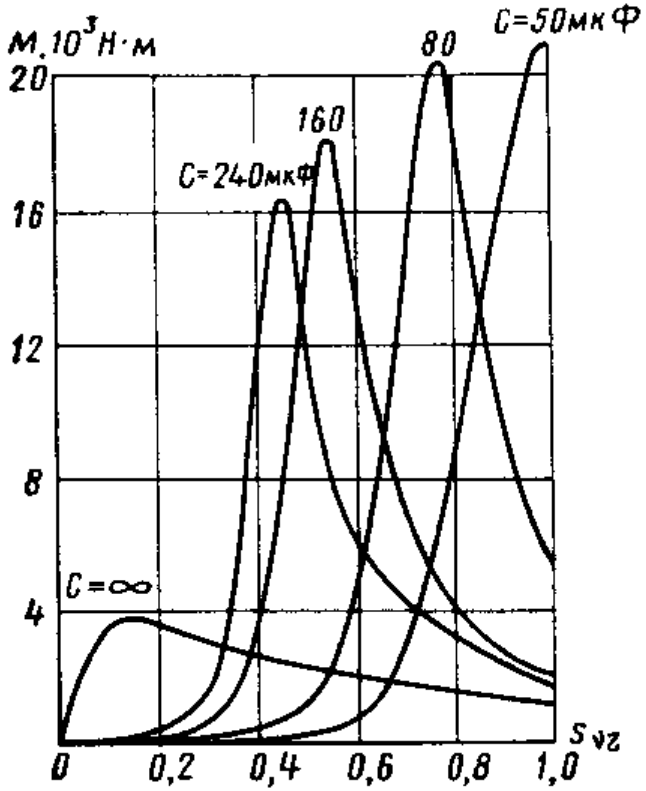
(в $k_p$ раз меньше частоты вращения обычного АД с тем же $p$)

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 $M_п$ 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 $n_{2c} = 60\dfrac{f}{Z_R}$

» а основная гармоника статора $\nu_1$ вращается относительно ротора со скоростью, близкой к $n_1 = 60\dfrac{f}{p}$

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

Для уменьшения потерь в роторе в двигателях с $f = 50$ Гц делают КЗ обмотку с большим $R$ (чтобы $s_{кр} = 7\ldots10$)

» уменьшение тока в обмотке ротора $\rightarrow$ 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 $\nu_1$

В этом случае надо предусмотреть соблюдение условия

$$J \le \frac{pZ_R M_{\text{с}\,m} M_{\text{а к}}}{\omega\left(Z_S M_{\text{а к}} - Z_R M_{\text{вн}}\right)}$$

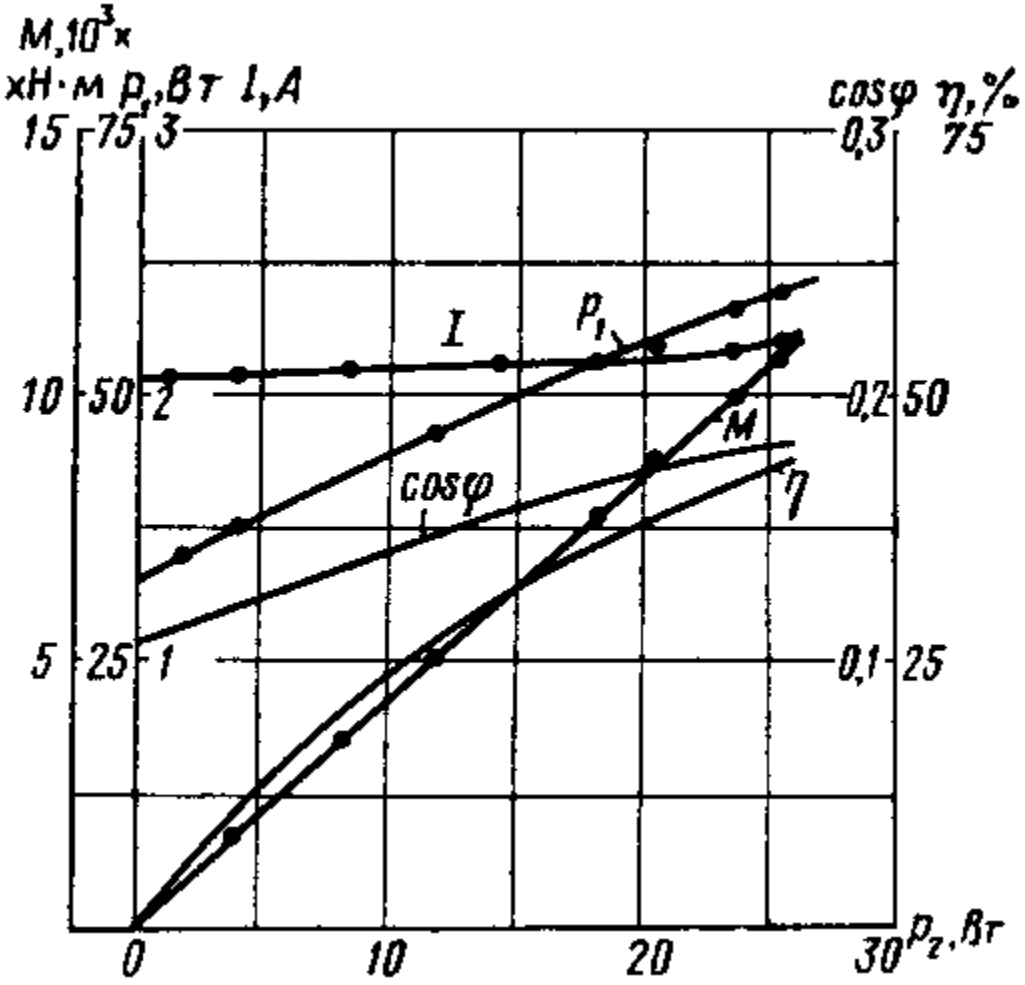
где $M_{c\,m}$ – максимальный синхронизирующий момент

$M_{\text{а к}}$ – асинхронный момент при $n_2 = 0$

$M_{\text{вн}}$ – 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

https://e-200.ru/EMAU/