

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

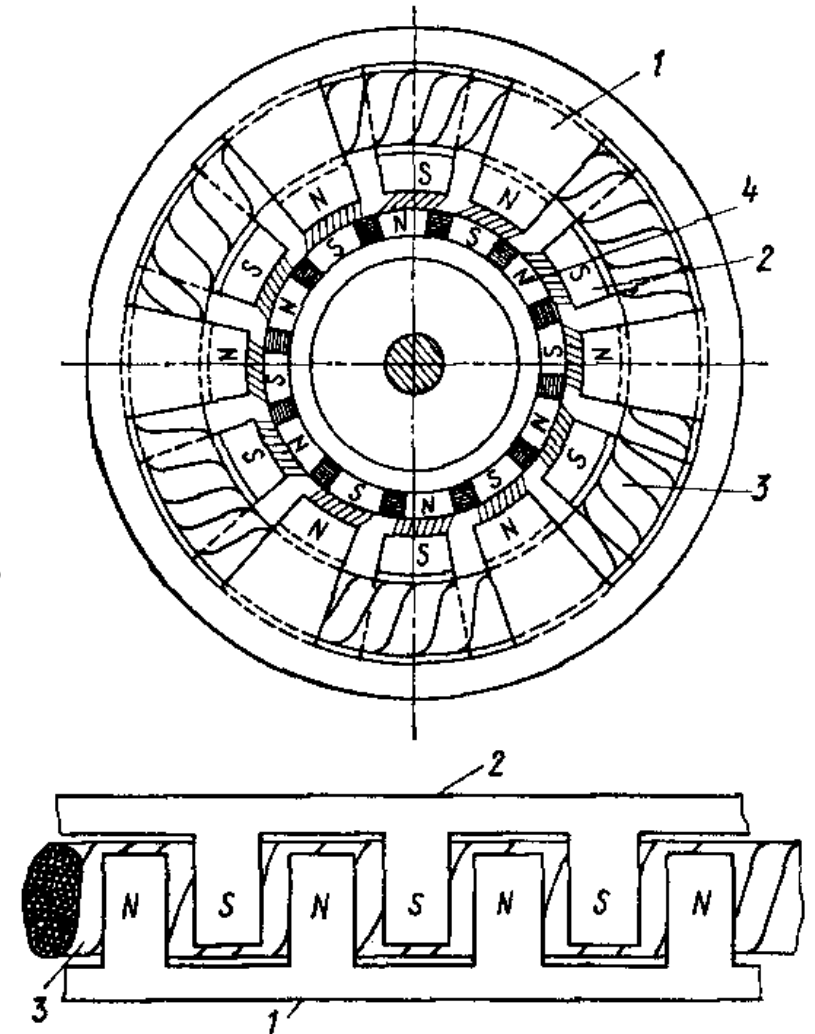
- 1 – передний торцевой щит с выступами, загнутыми назад
- 2 – задний торцевой щит с выступами, загнутыми вперед
- 3 – кольцевая ОВ
- 4 – ротор с радиальными ПМ

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

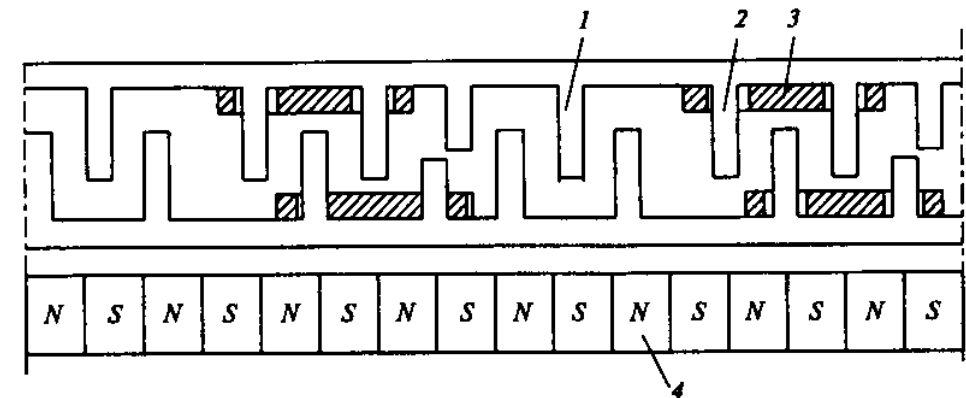
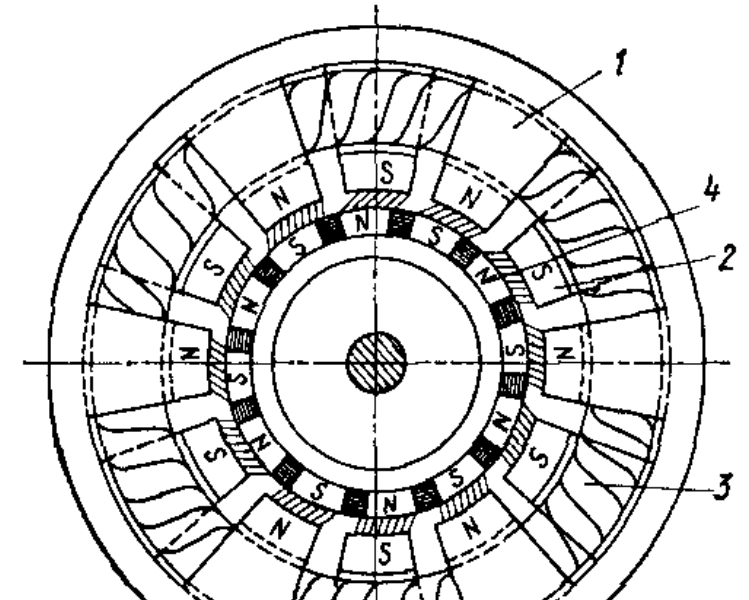


Для улучшения пусковых и рабочих свойств

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

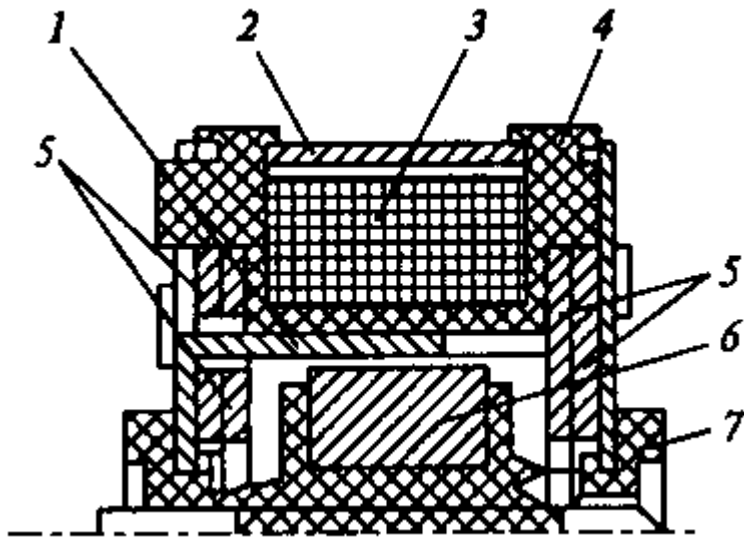
→ сдвиг потоков в пространстве и времени

→ 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
(неревर्सивный двигатель)

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

ЭМ с когтеобразными полюсами

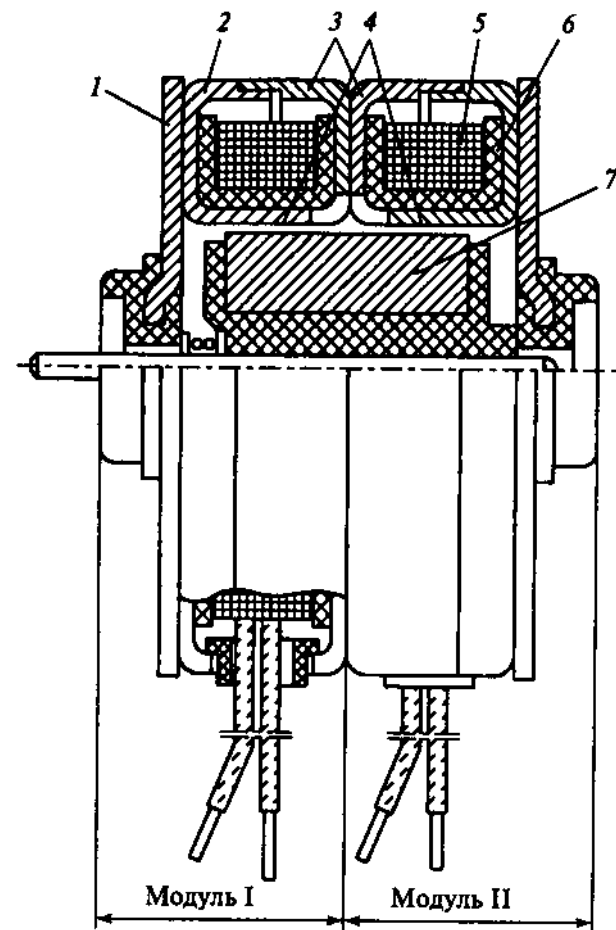
Наилучшая форма поля – в конденсаторных многополюсных СД типа ДСК

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.

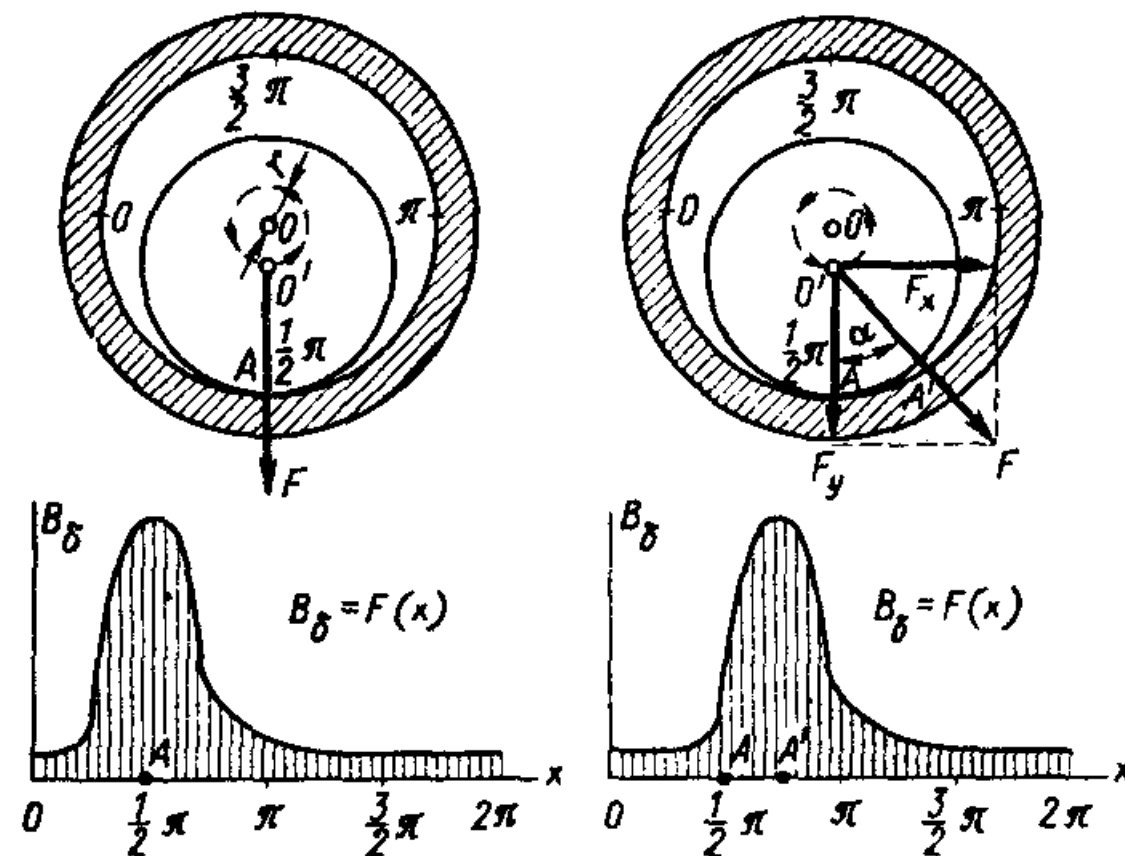
Двигатели с катящимся ротором

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 α
- » сила магнитного притяжения F также поворачивается (примерно на угол α)
- » 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 Ω_2

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

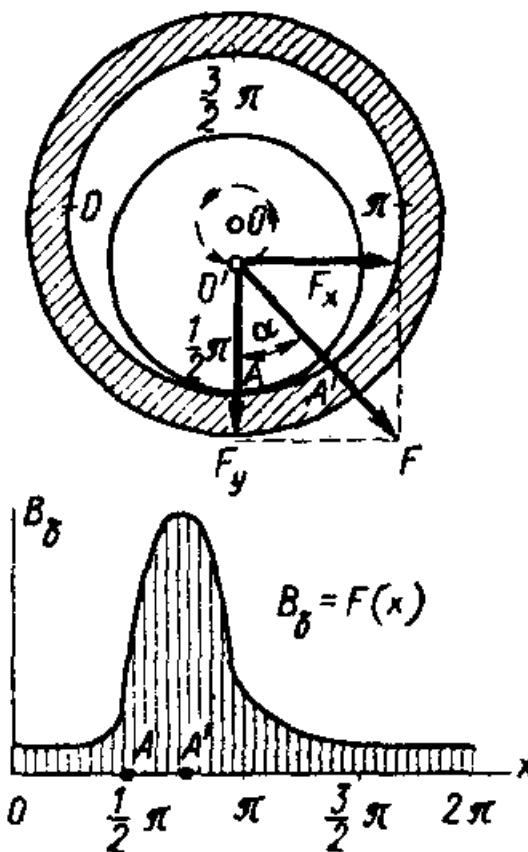
$$\Omega_2 R_R = 2\pi R_S - 2\pi R_R \quad \text{отсюда} \quad \Omega_2 = 2\pi \frac{R_S - R_R}{R_R}$$

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 $k_p = \frac{n_1}{n_2} = \frac{R_R}{R_S - R_R}$



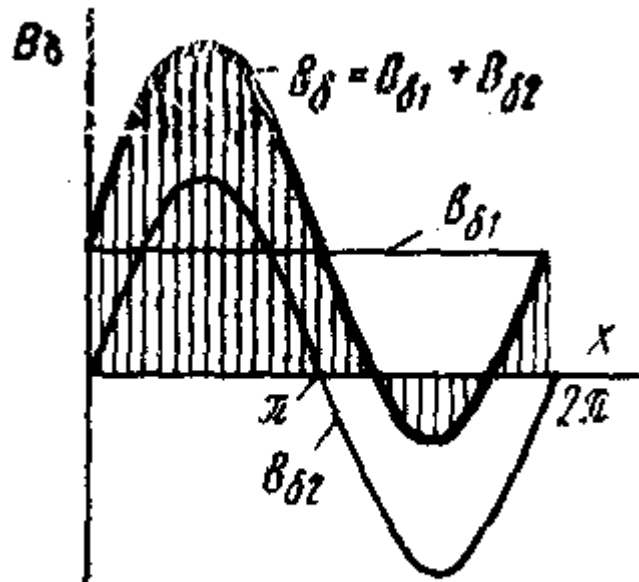
Способы получения несимметричного вращающегося поля

Для работы ДКР требуется вращающееся несимметричное магнитное поле

Простой способ получить такое поле

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

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



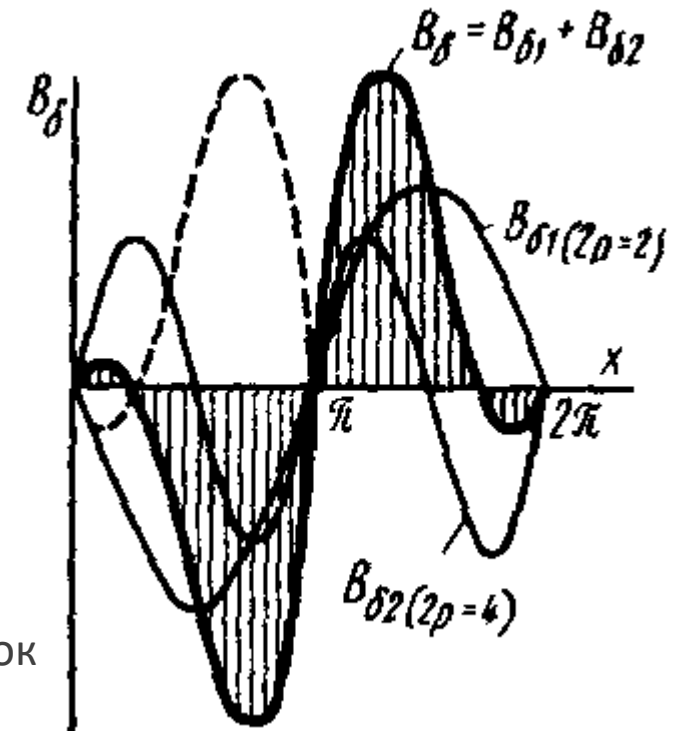
Другой способ

– 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)

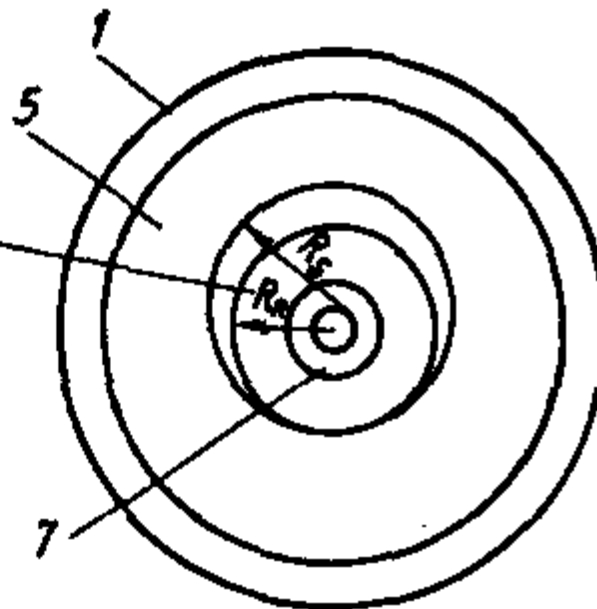
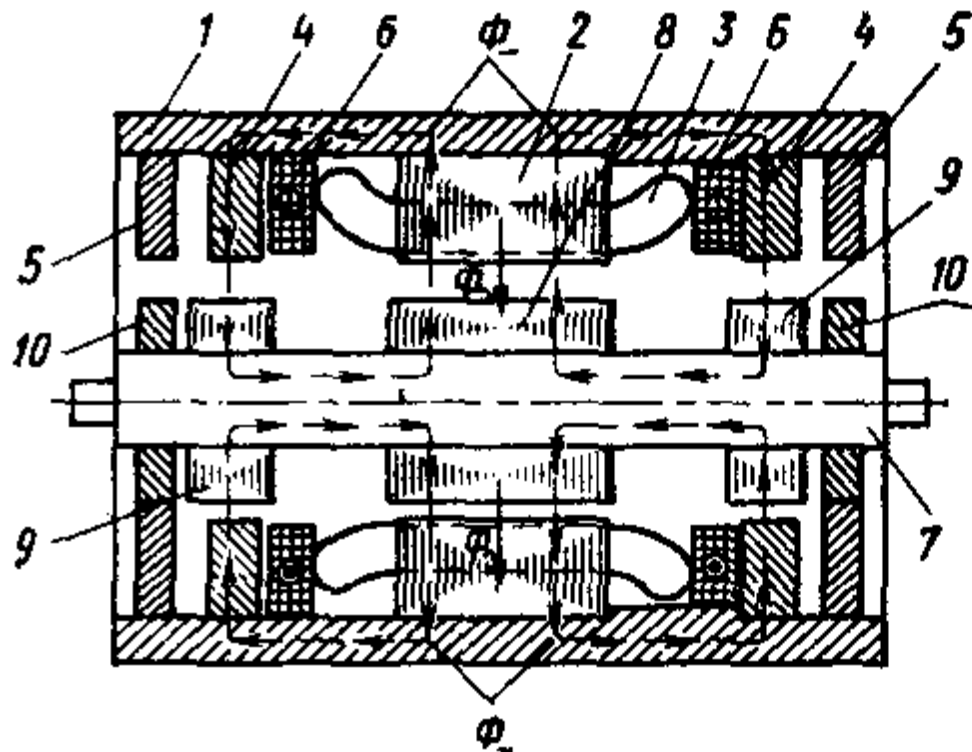


Возможно также применение зубцовых обмоток с последовательным возбуждением фаз

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

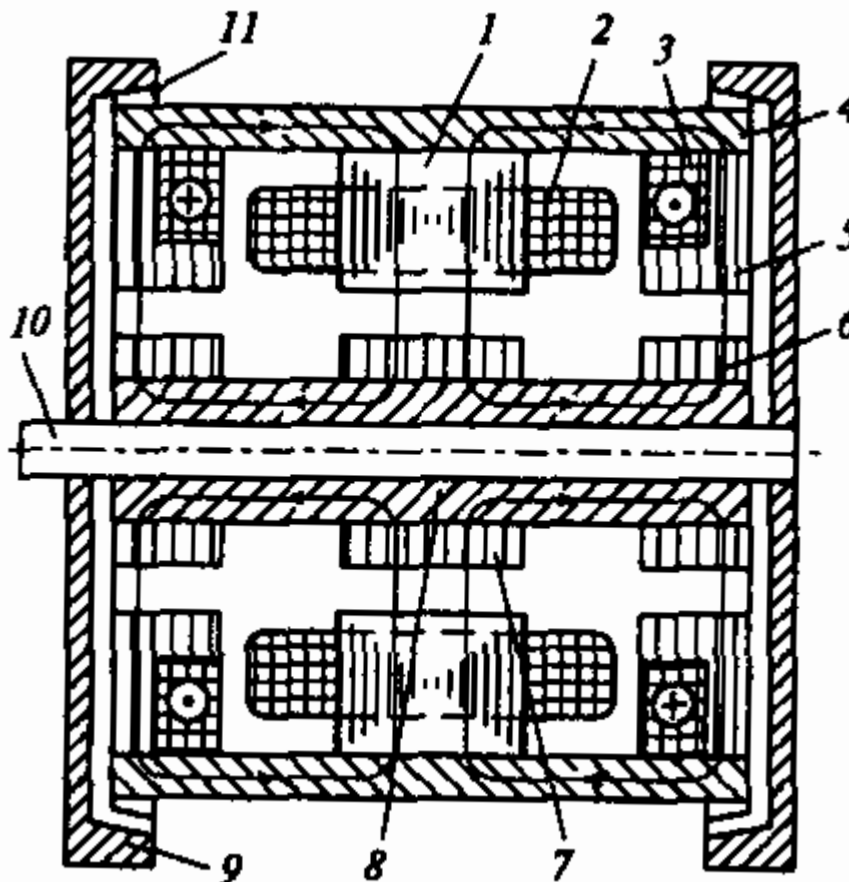
Ширинский С.В., каф.ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

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

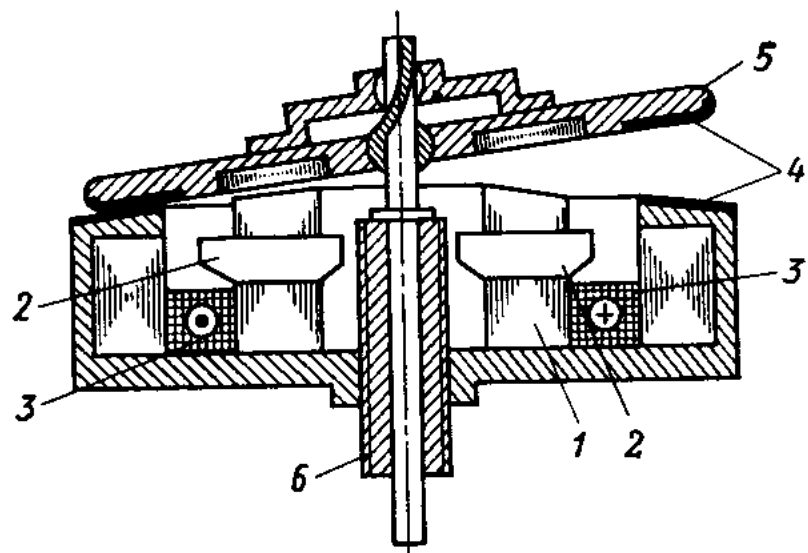


В ДКР ось ротора перемещается (по малой окружности) → для передачи момента требуются специальные эластичные муфты и гибкие передачи

- » усложнение конструкции
- » шумы и вибрации

Конструкция ДКР

Дисковый ДКР



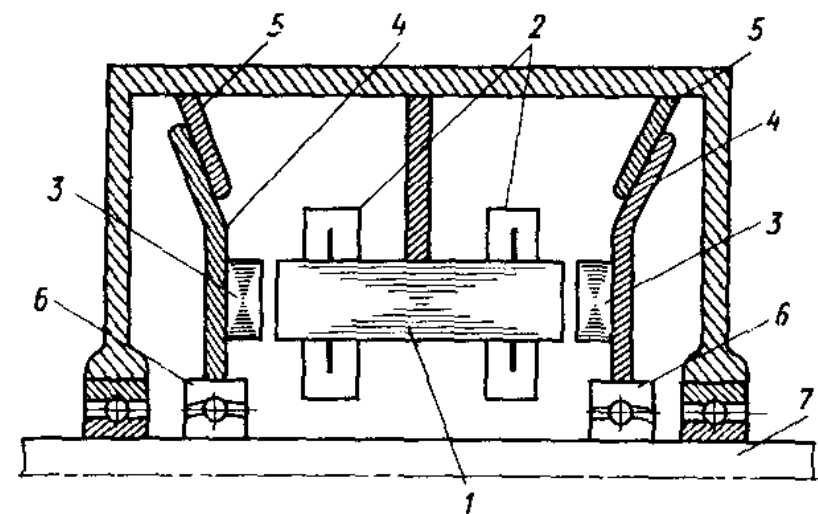
- 1 – статор
- 2 – обмотка переменного тока
- 3 – обмотка постоянного тока
- 4 – поверхности качения
- 5 – дисковый ротор
- 6 – винт регулировки частоты вращения

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 δ_α – величина неравномерного зазора в точке с координатой α

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

θ – 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 $B_{d1} = B_{q1}$

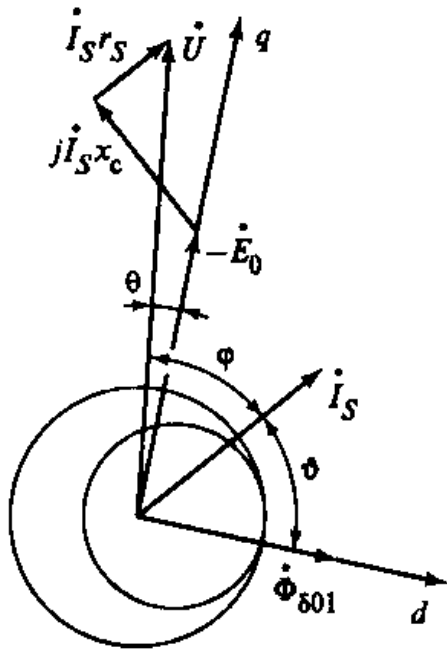
т.е. ДКР создает такие же основные гармоники, что и обычный СД с неявнополюсным ротором

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 $\Omega'_R = \Omega_R k_{\text{ред}}$

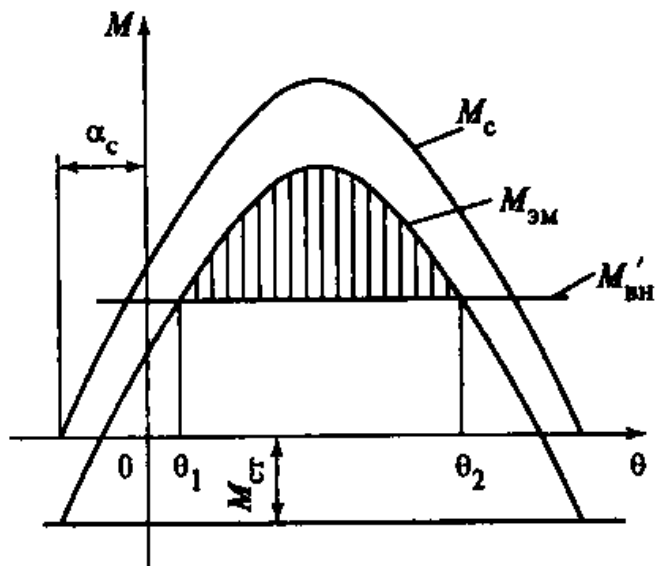
Тогда можно записать уравнение движения

(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 θ_1 до θ_2

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

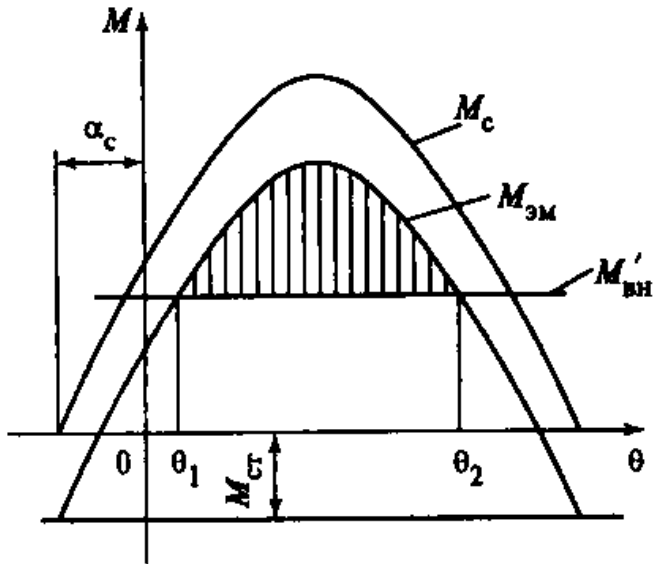
$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} (M_{\text{эм}} - M'_{\text{вн}}) d\theta \geq J' \frac{\Omega_c^2}{2}$$

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

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

Пуск двигателя с катящимся ротором

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



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

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

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

$$m_T = \frac{M_{ст}}{M_{cm}} \quad \text{– тормозной момент СД}$$

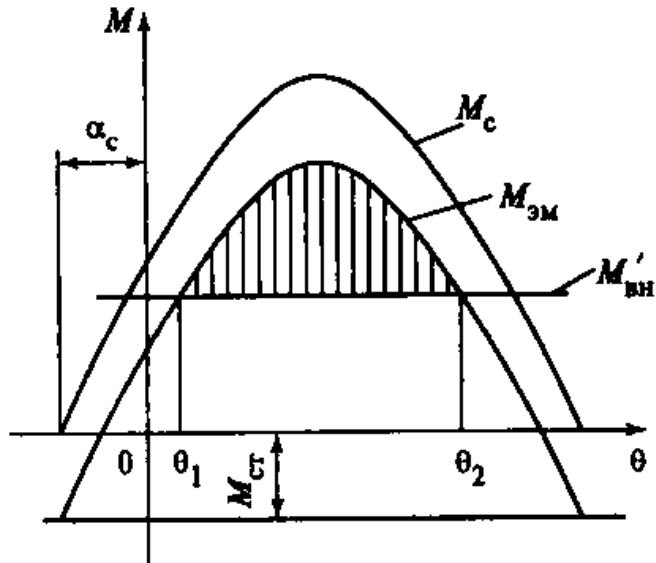
$$k_J = \frac{J' \Omega_c^2}{2M_{cm}} \quad \text{– коэффициент момента инерции}$$

Тогда условие входа в синхронизм запишется как

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

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

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

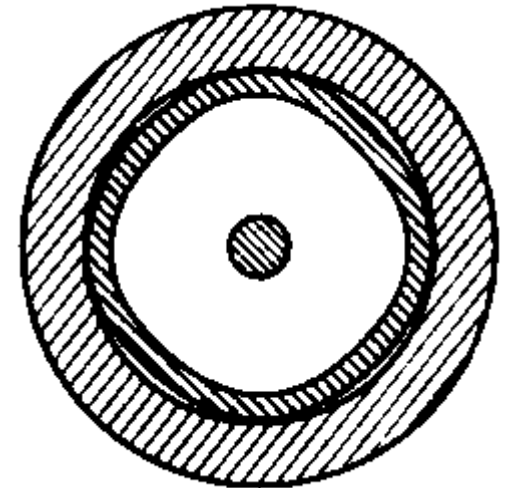
Преимущества

- » 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)

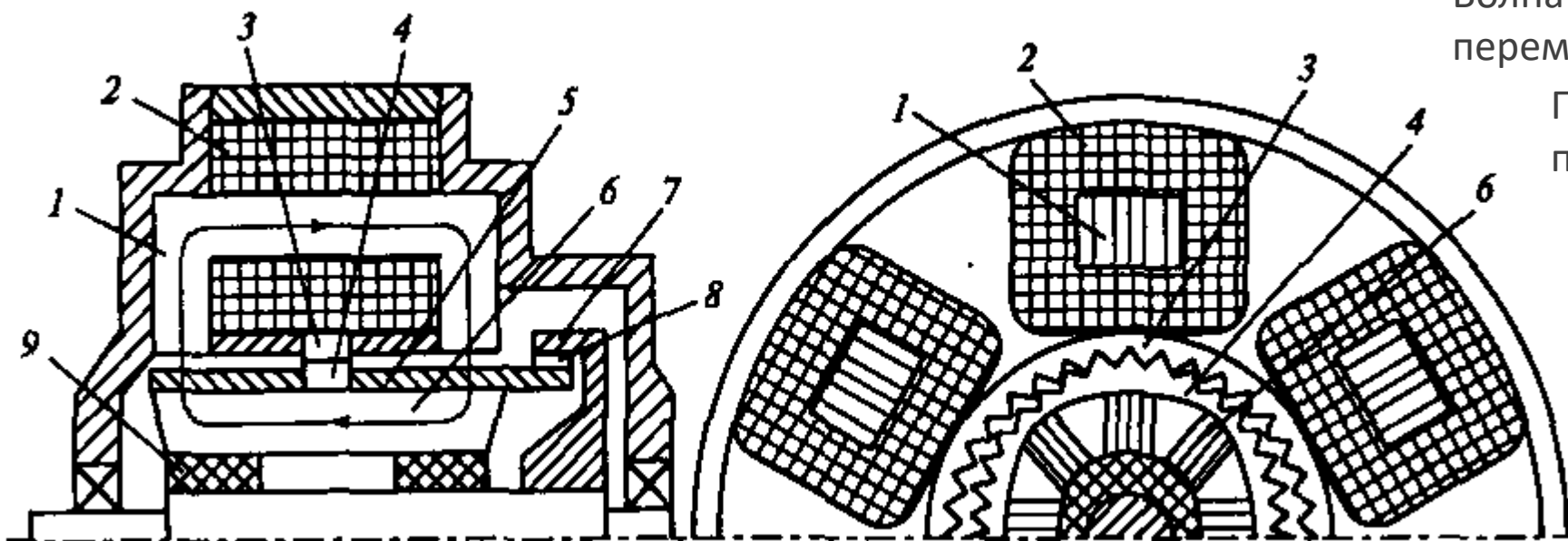


Двигатель с гибким волновым ротором

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_μ 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 λ_s содержит

- » постоянную составляющую λ_{s0} (обусловлена минимальным зазором δ)
- » переменную составляющую λ_{zs} (обусловлена зубчатостью Z_s)

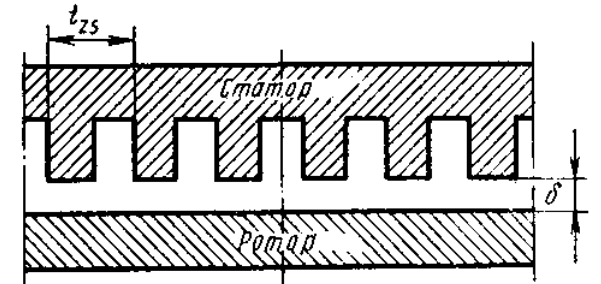
В кривой λ_s можно выделить множество гармоник

Будем учитывать только самую большую гармонику – первую зубцовую гармонику проводимости λ_{zs1}

- » период первой зубцовой гармоники проводимости λ_{zs1} равен зубцовому делению t_{zs} (в Z_s/p раз меньше периода основной гармоники 2τ)
- » порядок первой зубцовой гармоники проводимости λ_{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 ν гармоники МДС статора

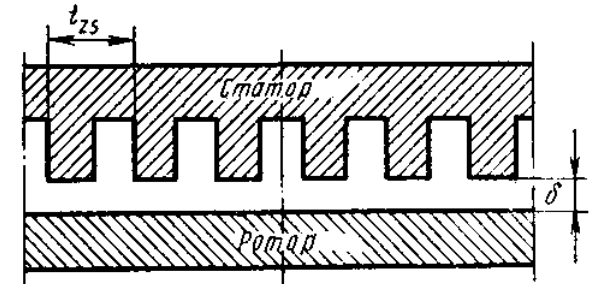
$$B_{S_{\nu\Sigma}}(x) = F_{\nu}(x) \cdot \lambda_S(x) = F_{\nu m} \sin\left(\omega t - \nu \frac{\pi x}{\tau}\right) \cdot \left[\lambda_{S0} - \lambda_{ZS1} \cos\left(\frac{Z_S}{p} \cdot \frac{\pi x}{\tau}\right) \right]$$

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 проводимость зазора с зубчатым статором и гладким ротором

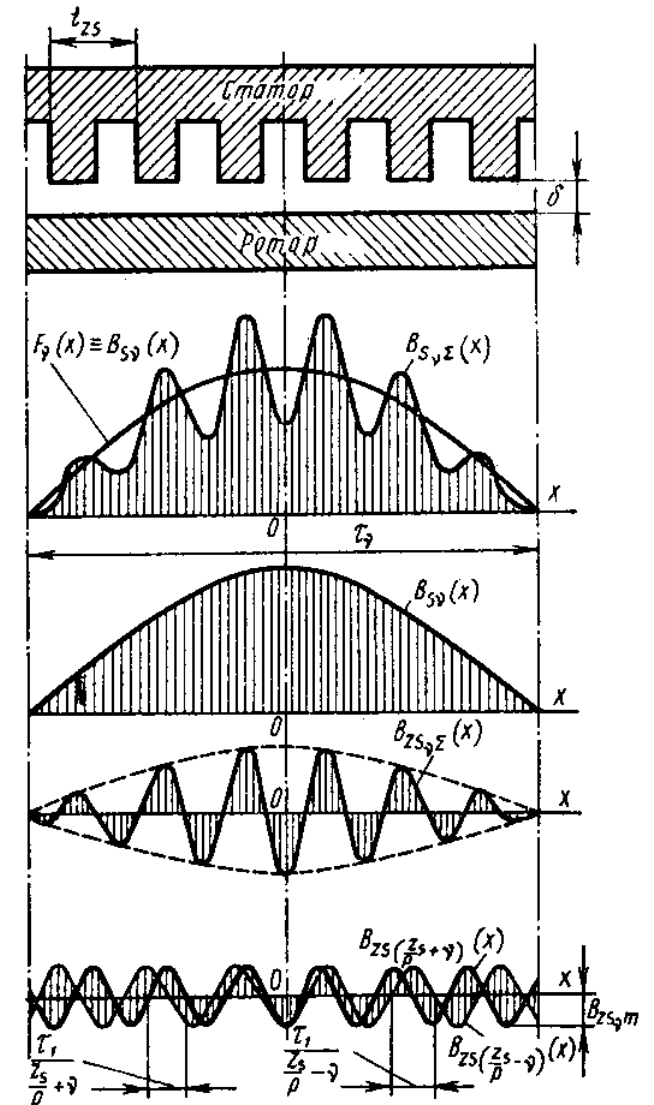
Таким образом, каждая ν гармоника МДС зубчатого статора (при гладком роторе) создает в зазоре

- » 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_ν 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 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 ν гармоники,

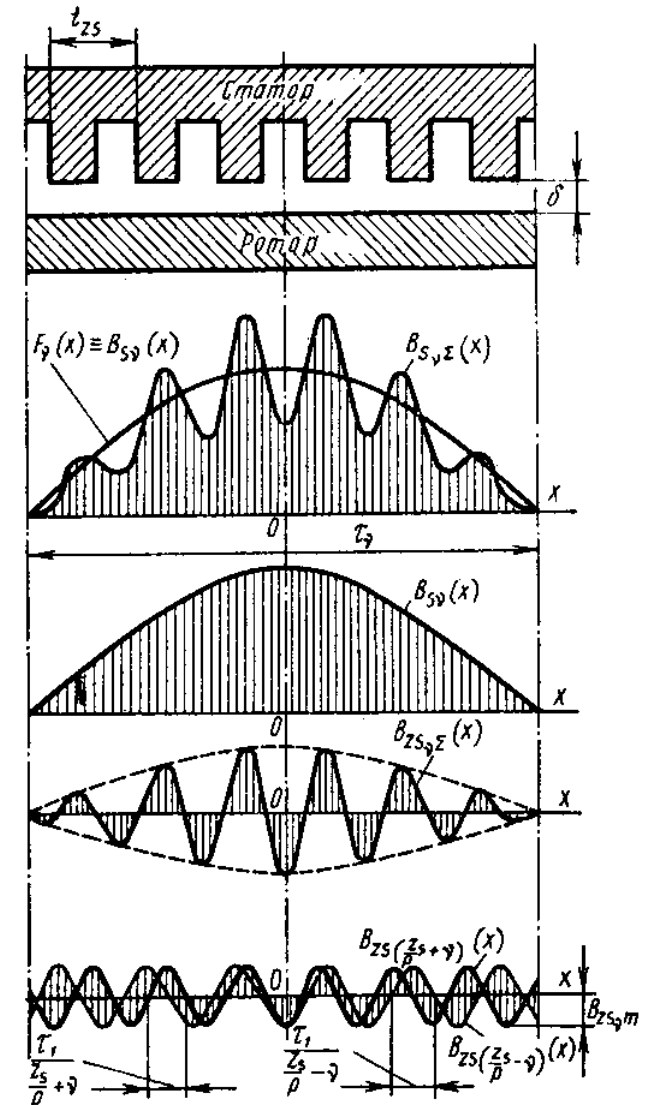
обусловленной постоянной составляющей λ_{S0} , угловая скорость $\omega_v = \frac{\omega}{p\nu}$

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 ω)

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 ω_2

(знак перед p соответствует знаку перед ω)

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 λ_S – проводимость зазора при зубчатом статоре
 λ_R – проводимость зазора при зубчатом роторе
 λ_0 – проводимость гладкого зазора

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

ν гармоника МДС статора создает в зубчатом зазоре следующие гармоники индукции

- » гармонику порядка ν
- » гармоники, обусловленные зубчатостью статора и ротора по отдельности ν_{ZS} и ν_{ZR}
- » гармоники, обусловленные взаимодействием зубцов статора и ротора ν_{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 ν соответствует знаку перед ω)

Магнитное поле в зазоре ЭМ

Итак, ток обмотки статора создает спектр обмоточных гармоник МДС

Каждая ν гармоника МДС статора F_ν создает спектр гармоник индукции поля в зазоре

- » от гладкого зазора – гармоника порядка ν
- » от зубчатости статора – две зубцовые гармоники ν_{ZS}
- » от зубчатости ротора – две зубцовые гармоники ν_{ZR}
- » от двусторонней зубчатости – четыре гармоники ν_{ZV}

Принято выделять две группы гармоник

- » гармоники статора – ν и ν_{ZS} (их ω определяются f_1)
- » гармоники ротора – ν_{ZR} и ν_{ZV} (их ω определяются Z_R и ω_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 ω – 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 ω_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 $\tau_{vS} = \tau_{vR}$

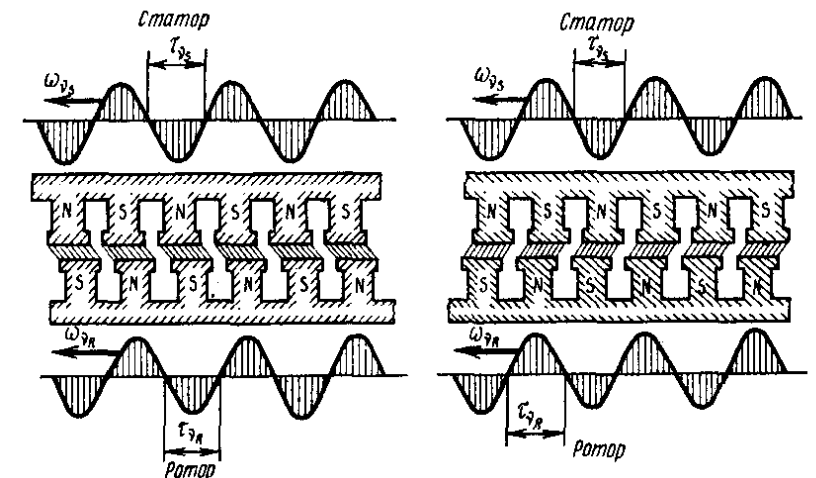
Между гармониками одного порядка возникают силы взаимодействия, создающие электромагнитный момент (у несовпадающих гармоник результат взаимодействия очень мал из-за несовпадения полюсных делений)

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

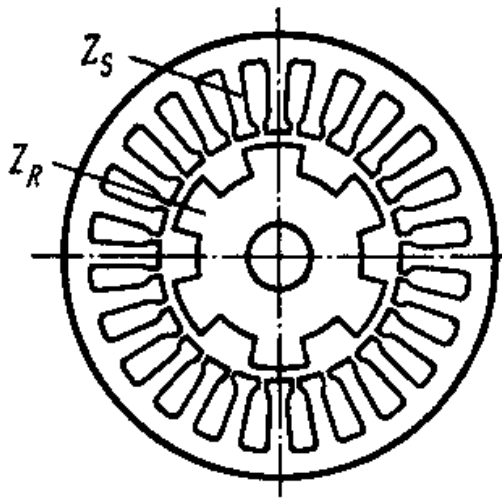
На роторе индукторного двигателя всегда открытые пазы

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

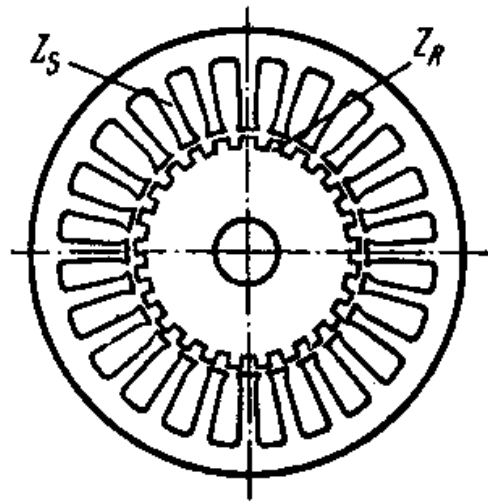
Число зубцов статора

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

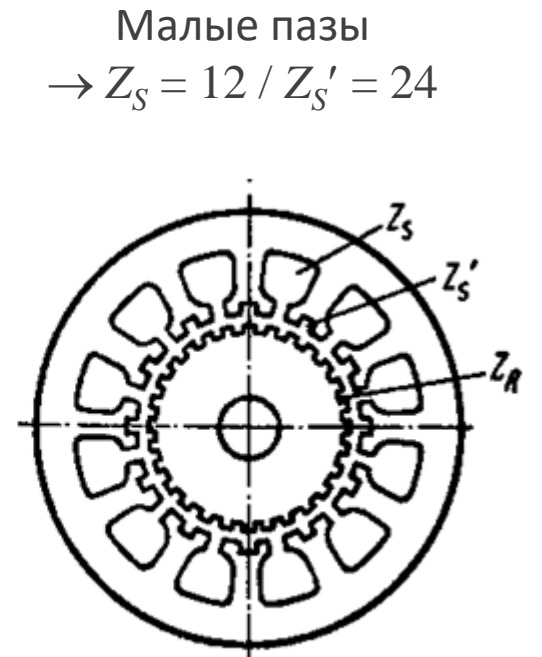
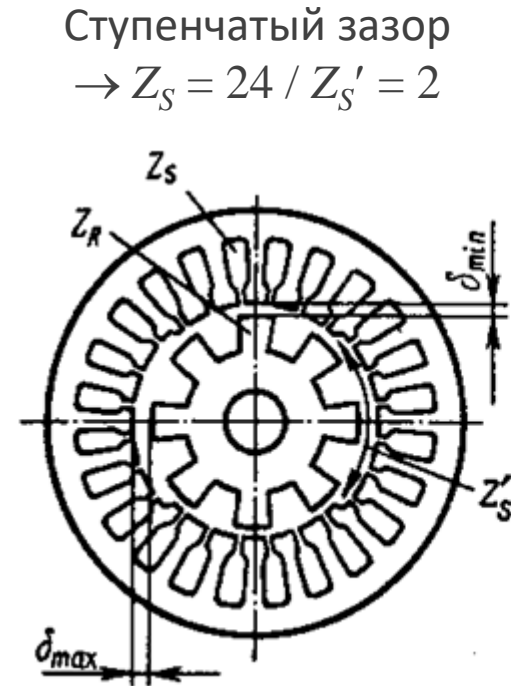
Z_R влияет на частоту вращения $n_2 = 60 \frac{f \pm f'}{Z_R}$



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 ω_2

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

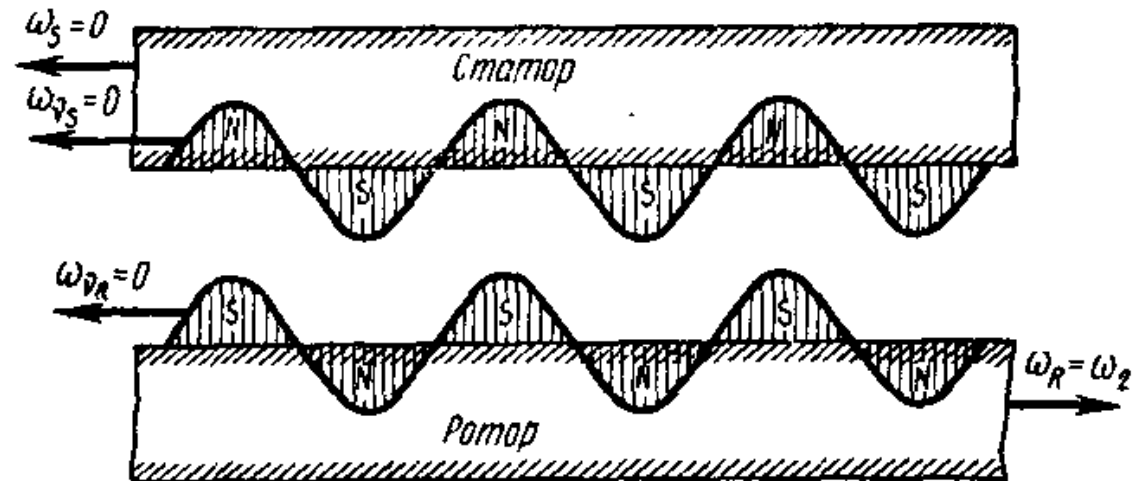
Синхронная скорость по основной гармонике $n_1 = 60 \frac{f}{p}$

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)

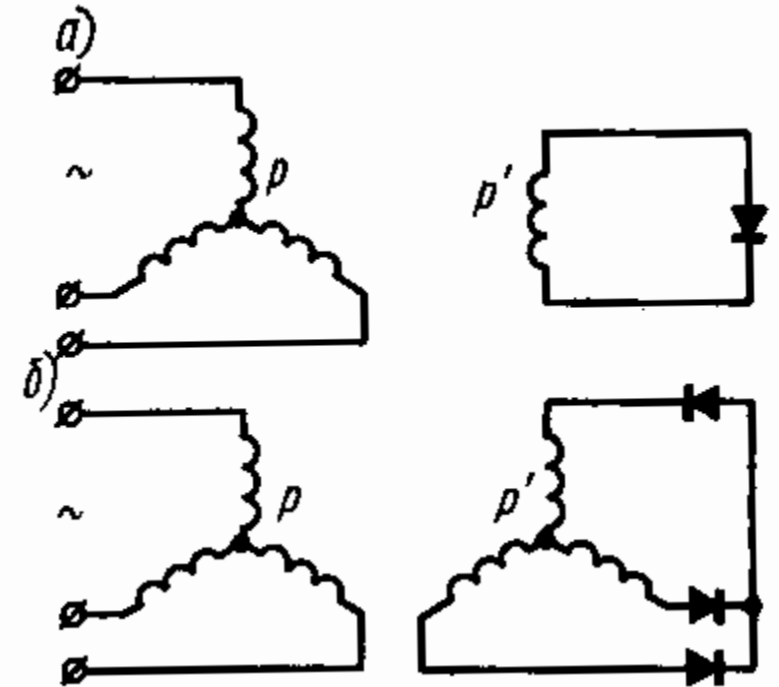
Здесь ОВ должна иметь трансформаторную связь с основной обмоткой, чтобы в ней наводилась ЭДС от основного поля

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)



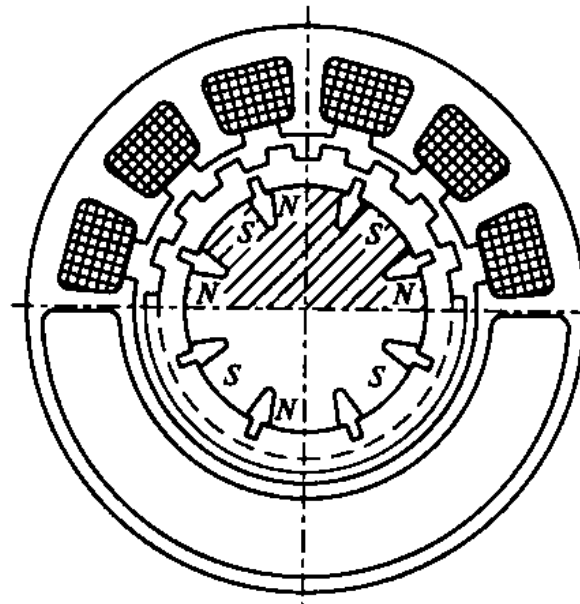
Варианты исполнения индукторных двигателей

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 ν

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)

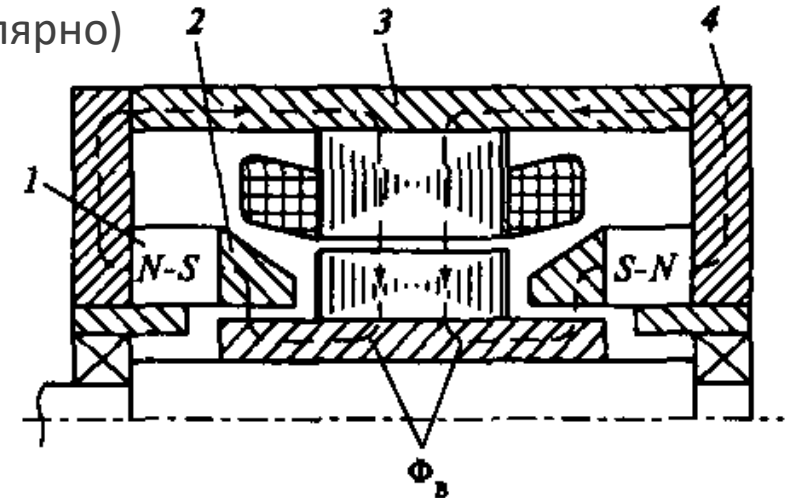
Для этого потребуется преобразователь частоты

Варианты исполнения индукторных двигателей

Синхронный индукторный двигатель с униполярным возбуждением

Обмотка возбуждения (или постоянные магниты) создает поток Φ_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 ν_{Z0}
- » одна из зубцовых гармоник статора ν_{ZS} и одна из зубцовых гармоник униполярного поля ротора ν_{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 $\omega_{Z0} = \omega_1$)

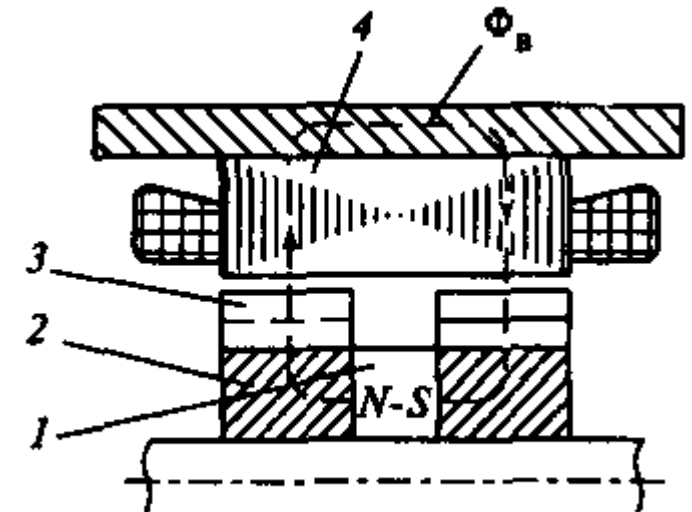
$$\omega_2 \frac{Z_R}{Z_R \pm Z_S} = \frac{\omega}{p} \rightarrow \omega_2 = \frac{\omega}{Z_R}$$

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 ω_{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 ω_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 $\omega_2 = \omega_{Zc}$ 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 ω_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)

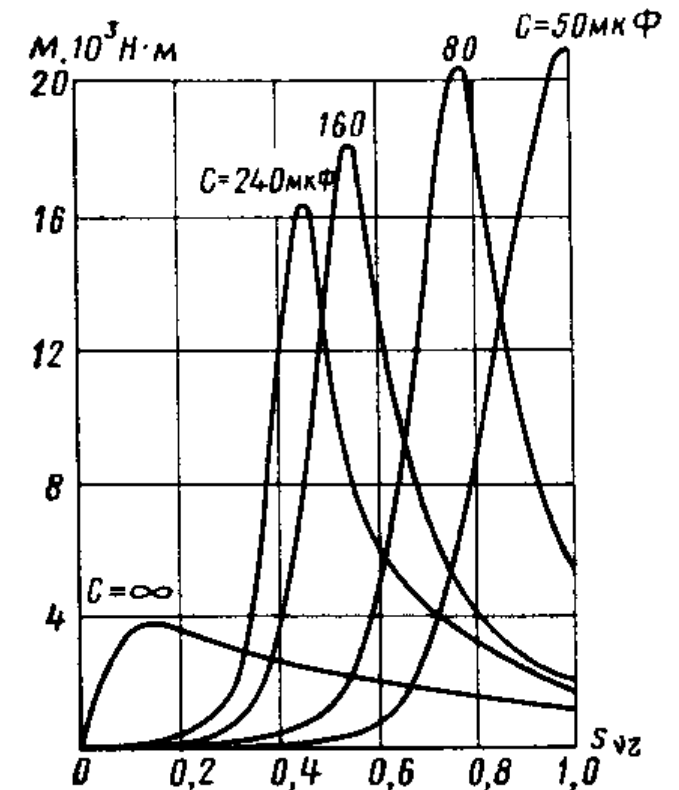
При открытых пазах на статоре Z_R увеличивается на величину Z_S , снижая n_2

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 ν_1 вращается относительно ротора со скоростью, близкой к $n_1 = 60 \frac{f}{p}$

Поле гармоник ν_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 ($I^2 R$)
- » 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

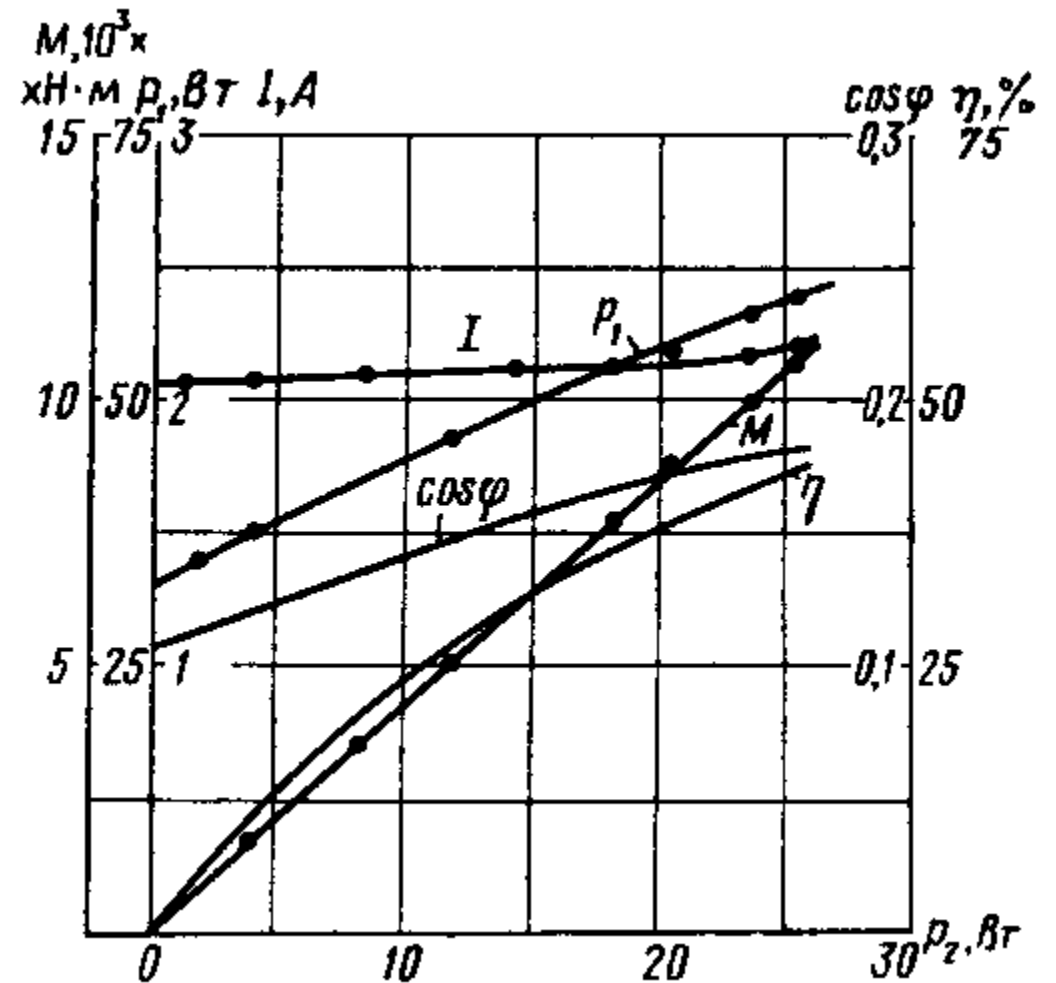
Рабочие характеристики индукторного двигателя

Недостатки ИД

- » плохие энергетические показатели (η , $\cos\varphi$) 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/
(srv0-5.mpei.ac.ru/EMAU/)

