

Сельсины

Информационные машины



Информационные машины

Информационные машины преобразуют входной сигнал (электрический или механический) в выходной сигнал (механический или электрический) в соответствии с определенной функциональной зависимостью

Основные требования

- » минимальная погрешность преобразования сигнала
- » минимальное влияние на преобразование внешних воздействий

Энергетические показатели имеют второстепенное значение

Обычно входной сигнал – механический

- » угловое положение
- » частота вращения
- » ускорение

Выходной сигнал

- » напряжение
- » угловое положение

Информационные машины

- » машины синхронной связи – сельсины
- » вращающиеся (поворотные) трансформаторы
- » тахогенераторы

Электрическая система синхронной связи

Синхронизация углового положения или вращения валов/осей механизмов

» Система электрического вала (синхронного вращения)

→ синхронное вращение механизмов, имеющих значительные моменты сопротивления

3-фазные асинхронные двигатели с фазным ротором

» обмотки статоров подключены к общей сети

» обмотки роторов соединены друг с другом

» Система передачи угла (синхронного поворота)

→ синхронный поворот осей: контроль положения, дистанционное управление, регулирование

Сельсины – «самосинхронизирующиеся» ЭМ:

электрический сигнал содержит информацию об угловом положении оси

и используется для синхронизации углового положения другой оси

3-фазные сельсины – обычные АД с фазным ротором

» обмотки статоров подключены к общей сети

» обмотки роторов соединены друг с другом

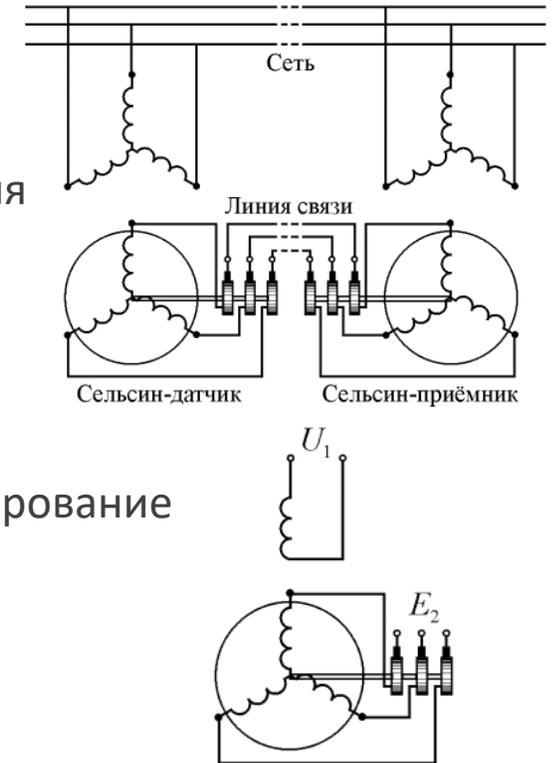
- неравенство синхронизирующих моментов при вращении ротора по полю или против
- малая динамическая устойчивость
- требуется 3-фазная сеть

1-фазные сельсины

» 1-фазные обмотки возбуждения включены в сеть

» 3-фазные обмотки синхронизации – соединены друг с другом

- самый распространенный вариант сельсина



Электрическая система синхронной связи

- » Индикаторная система синхронной связи применяется, когда момент сопротивления на валу приемника мал – стрелка / шкала (сельсин-приемник сам обрабатывает углы поворота)
- » Дифференциальный сельсин (3-фазные обмотки синхронизации и на статоре и на роторе)
 - второй датчик
 - приемник, работающий от двух датчиков
- » Трансформаторная система синхронной связи применяется при большом моменте сопротивления на валу приемника (вал сельсин-приемника поворачивается исполнительным двигателем по сигналу приемника)
- » Магнитоэлектрические машины синхронной связи
Магнесины – разновидность сельсинов с постоянными магнитами
- » Совмещенные сельсины-двигатели и вращающиеся трансформаторы

Конструкции сельсинов

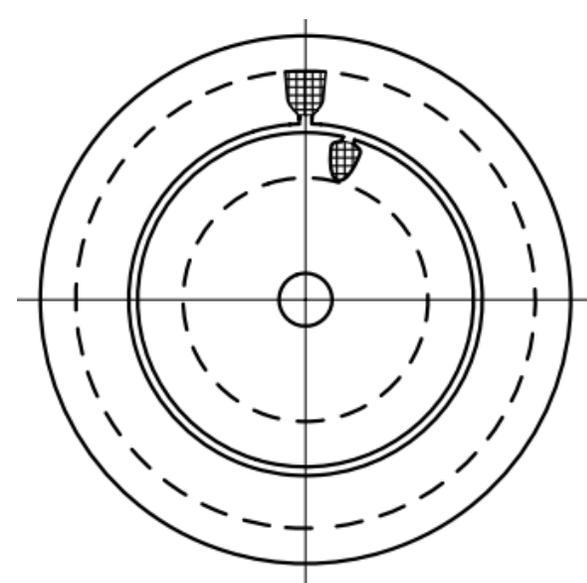
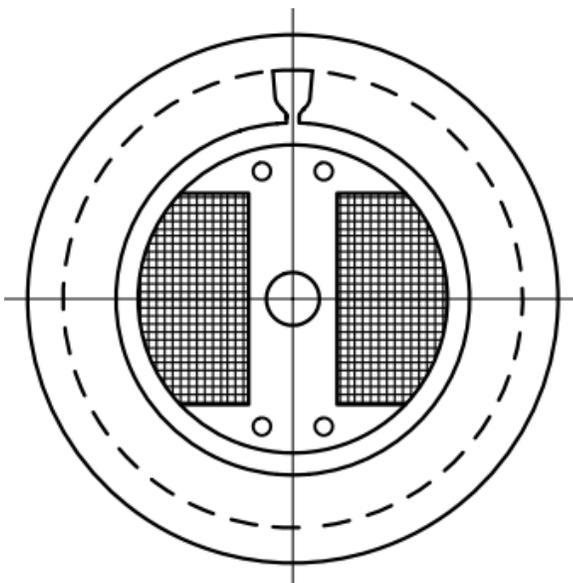
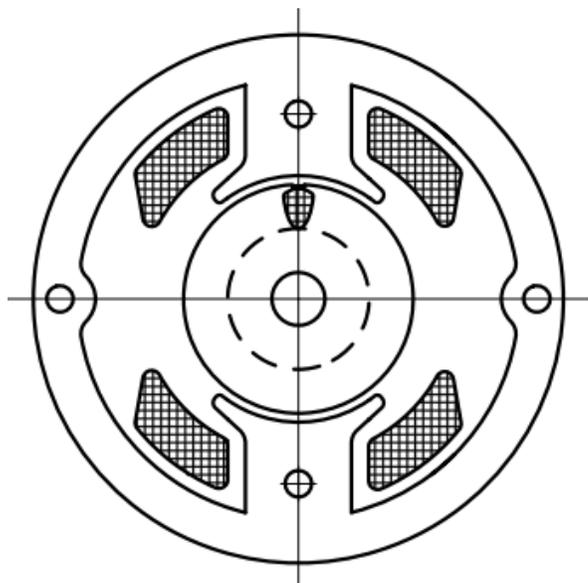
Конструкции сельсинов

Контактные сельсины

похожи на синхронные машины
или 1-фазные АД малой мощности

- » ОВ – сосредоточенная или распределенная; на статоре или на роторе
- » ОС – всегда распределенная, 3-фазная, соединена в звезду
- » на полюсах возможно размещение демпферной обмотки (ДО)

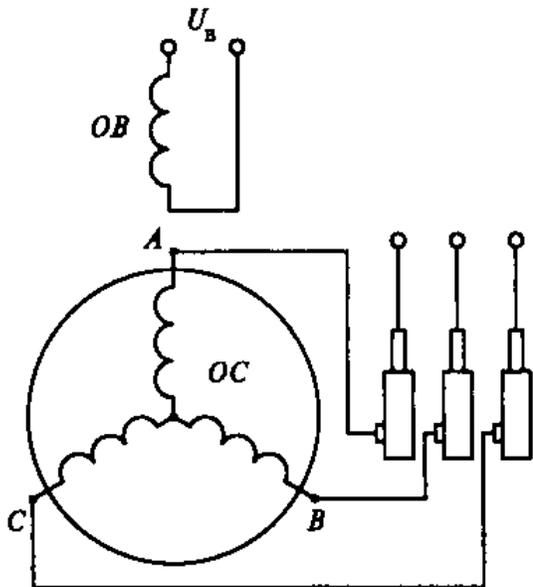
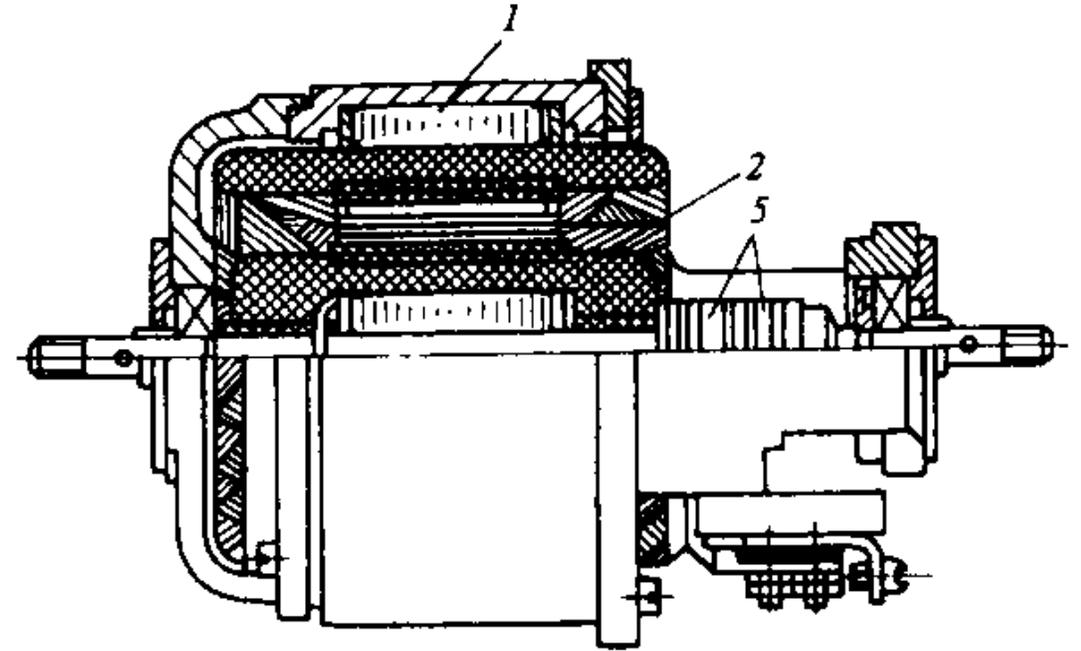
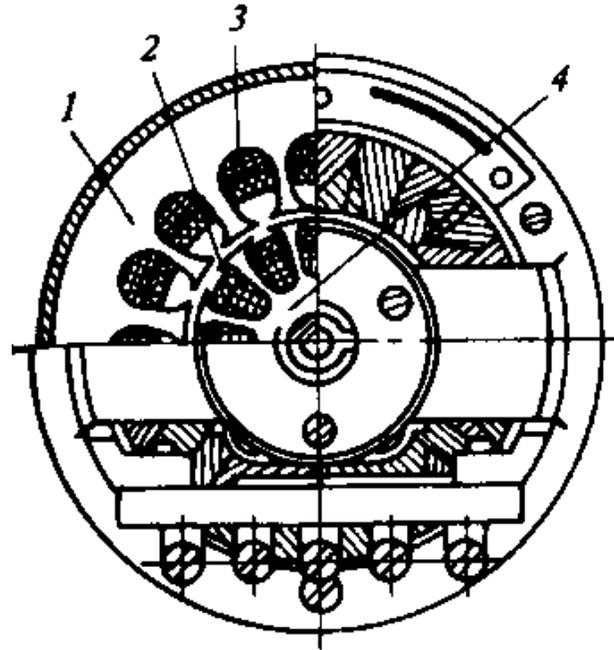
Все сельсины делают двухполюсными
для однозначной синхронизации



Конструкции сельсинов

Контактные сельсины

- 1 – сердечник статора
- 2 – обмотка возбуждения
- 3 – обмотка синхронизации
- 4 – сердечник ротора
- 5 – контактные кольца



Недостаток контактного сельсина – скользящий контакт

- » при слабом нажатии – большое $\Delta U_{\text{щ}}$
- » при сильном нажатии – большой момент трения (доп. погрешность) и износ щеток
- » ненадежный контакт при тряске и вибрациях

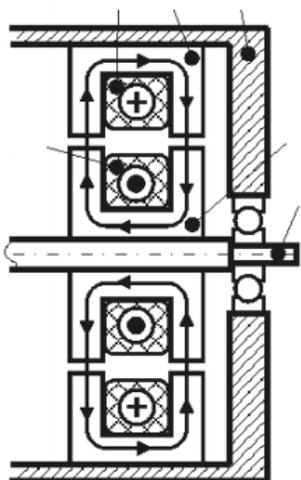
Для сглаживания недостатков – кольца и щетки из сплавов серебра

Конструкции сельсинов

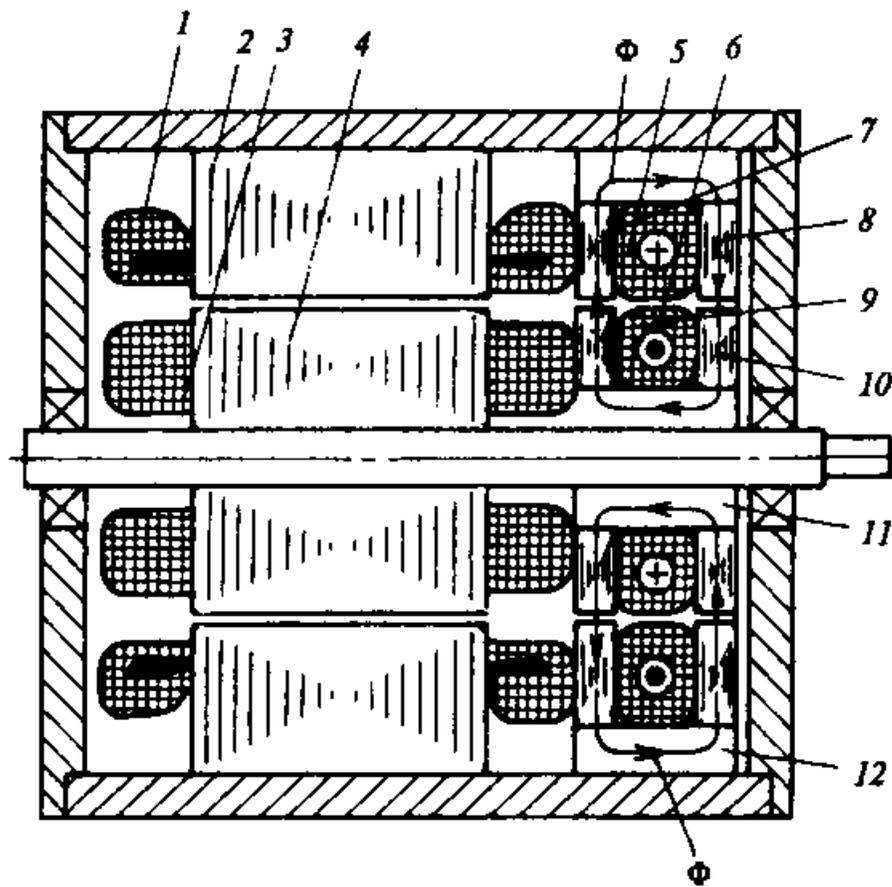
Бесконтактные сельсины

Неявнополюсный сельсин с кольцевым трансформатором

- » кольцевой трансформатор передает энергию на ротор для питания ОВ
- » обмотки трансформатора концентрические – при вращении ротора взаимоиндуктивность $L_{12} = \text{const}$ (в идеале – только трансформаторная ЭДС)
- » недостаток – доп.зазоры в магнитной цепи



- 1 – обмотка синхронизации (в пазах статора)
- 2 – сердечник статора
- 3 – обмотка возбуждения (в пазах ротора)
- 4 – сердечник ротора
- 5 – первичная обмотка кольцевого тр-ра – на статоре
- 6 – вторичная обмотка кольцевого тр-ра – на роторе
- 7,8 – кольцевые магнитопроводы статора
- 9,10 – кольцевые магнитопроводы ротора
- 11 – внутренний магнитопровод
- 12 – внешний магнитопровод



Конструкции сельсинов

Бесконтактные сельсины

Явнополюсный сельсин с униполярным возбуждением

1 – обмотка возбуждения:
две кольцевые катушки на
статоре (вкл. последовательно
и согласно)

2 – обмотка синхронизации:
распределенная 3-фазная
обмотка в пазах статора

3 – статор

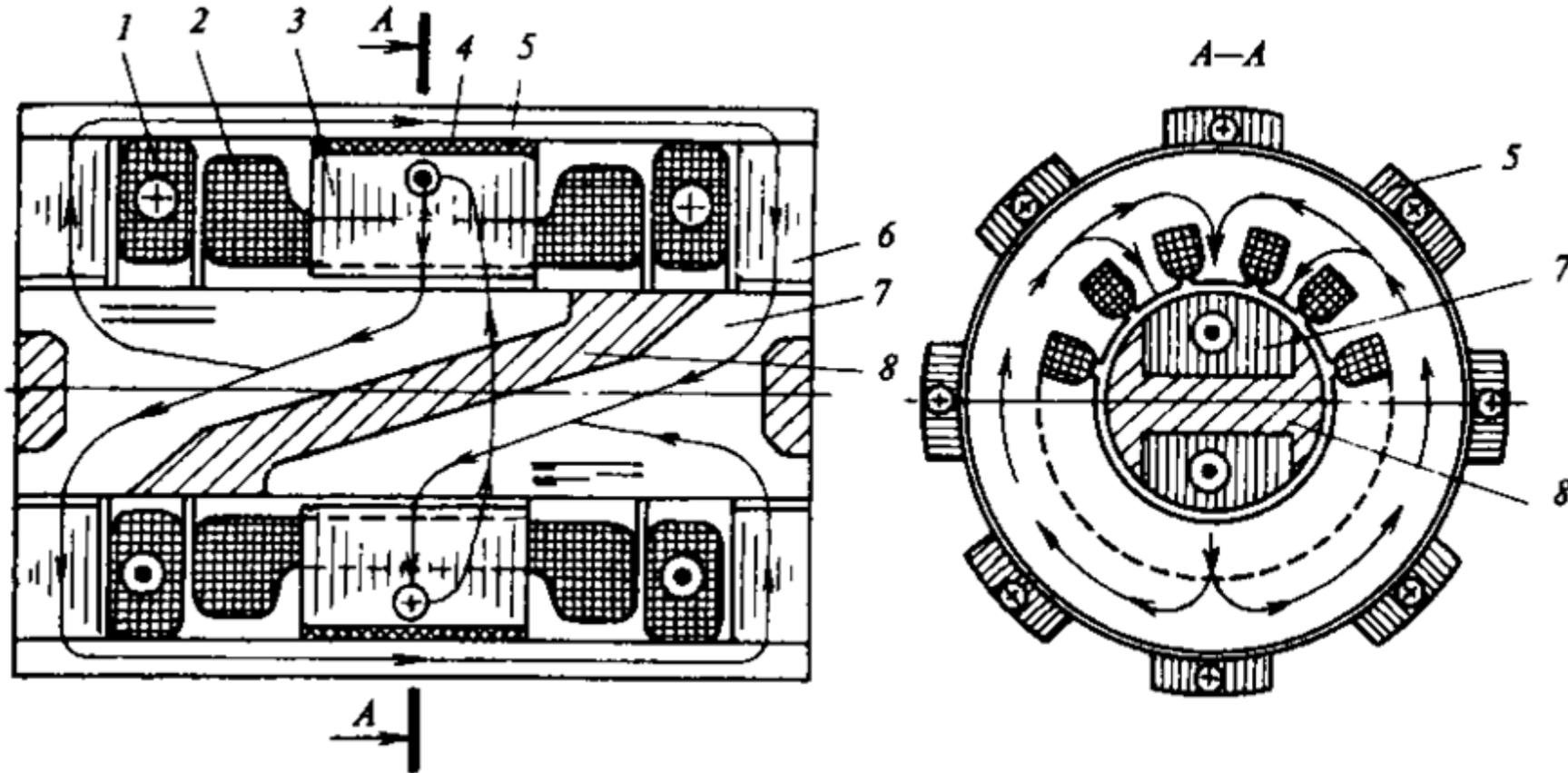
4 – немагнитный промежуток

5 – внешний магнитопровод
(продольная шихтовка)

6 – торцевые магнитопроводы
(поперечная шихтовка)

7 – двухполюсный ротор

8 – немагнитный промежуток
(пластмасса/алюминий)



Конструкции сельсинов

Бесконтактные сельсины

Явнополюсный сельсин с униполярным возбуждением

1 – обмотка возбуждения:
две кольцевые катушки на
статоре (вкл. последовательно
и согласно)

2 – обмотка синхронизации:
распределенная 3-фазная
обмотка в пазах статора

3 – статор

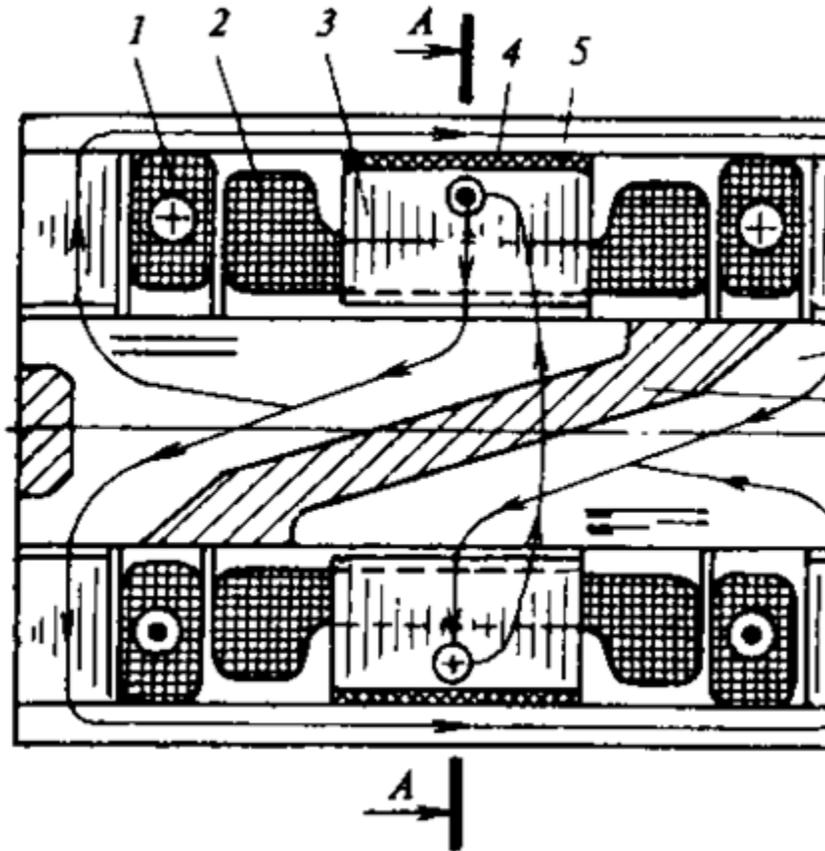
4 – немагнитный промежуток

5 – внешний магнитопровод
(продольная шихтовка)

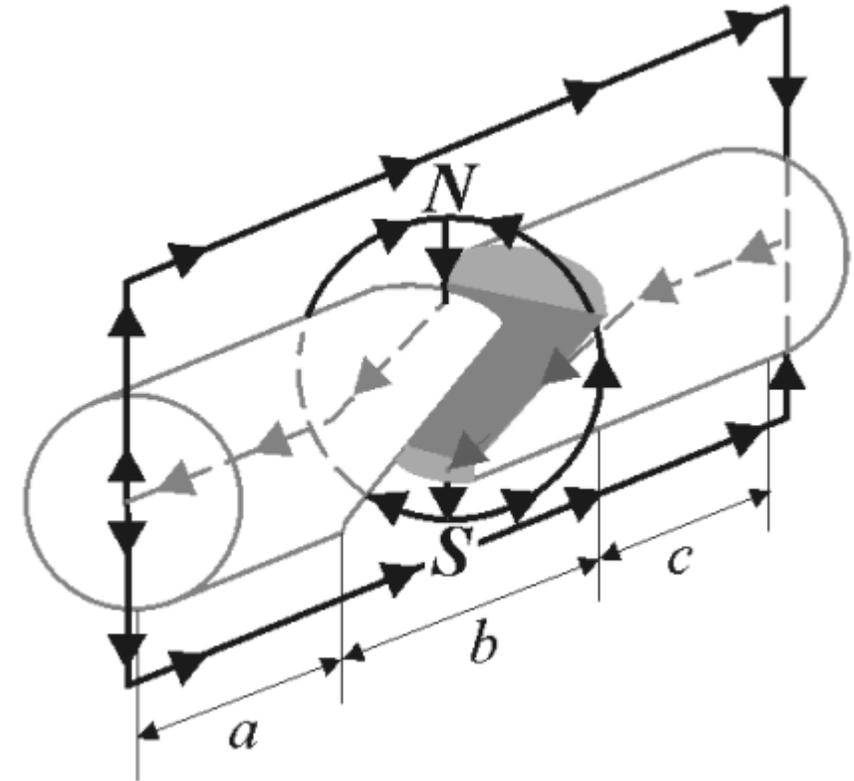
6 – торцевые магнитопроводы
(поперечная шихтовка)

7 – двухполюсный ротор

8 – немагнитный промежуток
(пластмасса/алюминий)



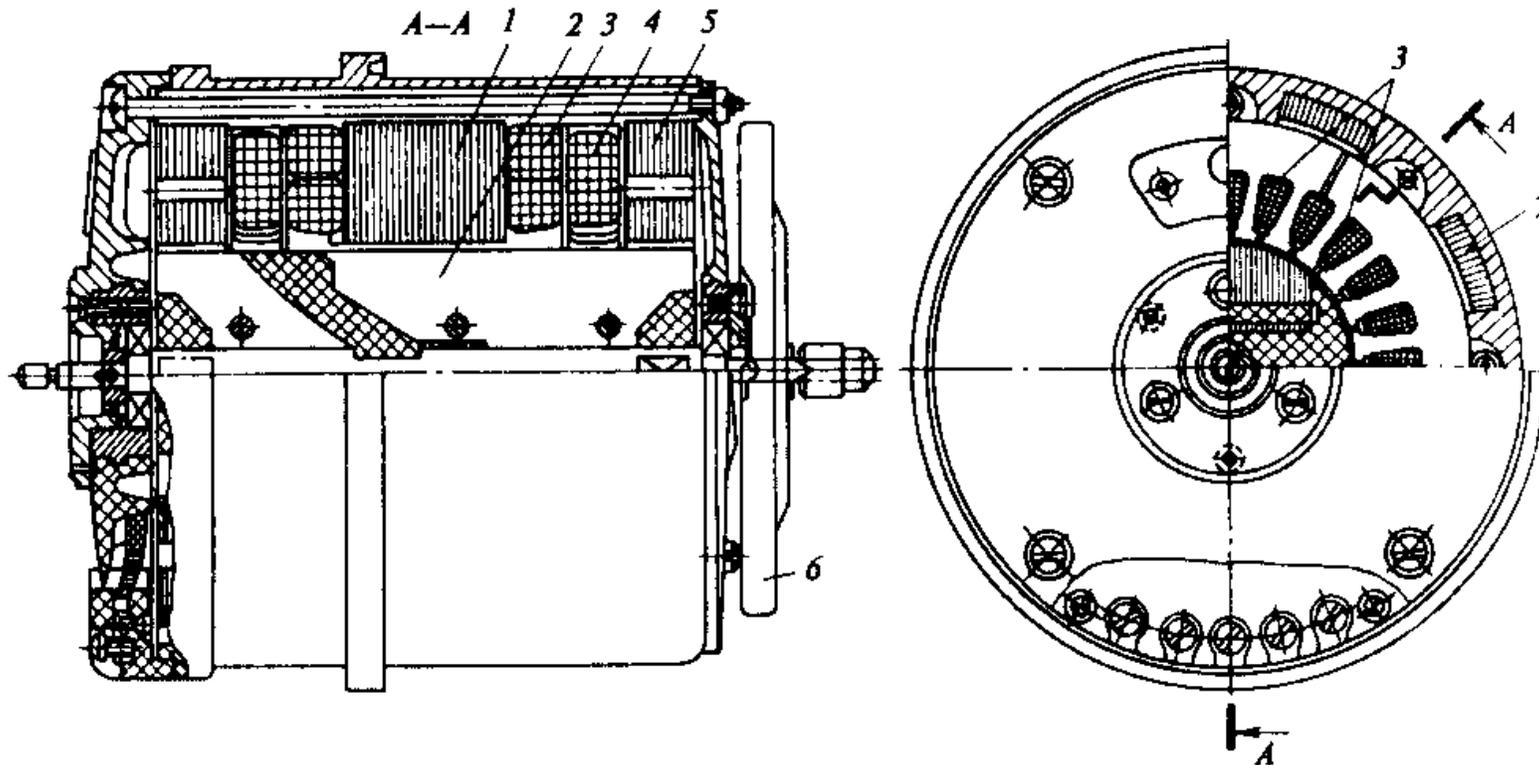
Замыкание магнитного потока



Конструкции сельсинов

Бесконтактные сельсины

Явнополюсный сельсин с униполярным возбуждением



1 – статор 3 – ОС 5 – торцевой магнитопровод
2 – ротор 4 – ОВ

- » Из-за аксиального потока нельзя допустить КЗ контуры поперек потока (вихревые токи по окружности) → разрезные листы сердечника статора и торцевых магнитопроводов
- » Для исключения магнитной несимметрии – веерная сборка листов магнитопроводов

Отсутствие скользящих контактов

→ надежность работы

→ стабильность характеристик

Недостатки:

» сложность конструкции

» низкий $\cos\varphi$ (много зазоров на пути Φ)

Индикаторный режим работы

Индикаторный режим работы

– обеспечивает передачу информации о положении вала

СД – сельсин-датчик

» вал соединен с контролируемым механизмом

СП – сельсин-приемник

» вал соединен с индикатором положения (стрелка, шкала)

ЛС – линии связи между одноименными фазами ОС

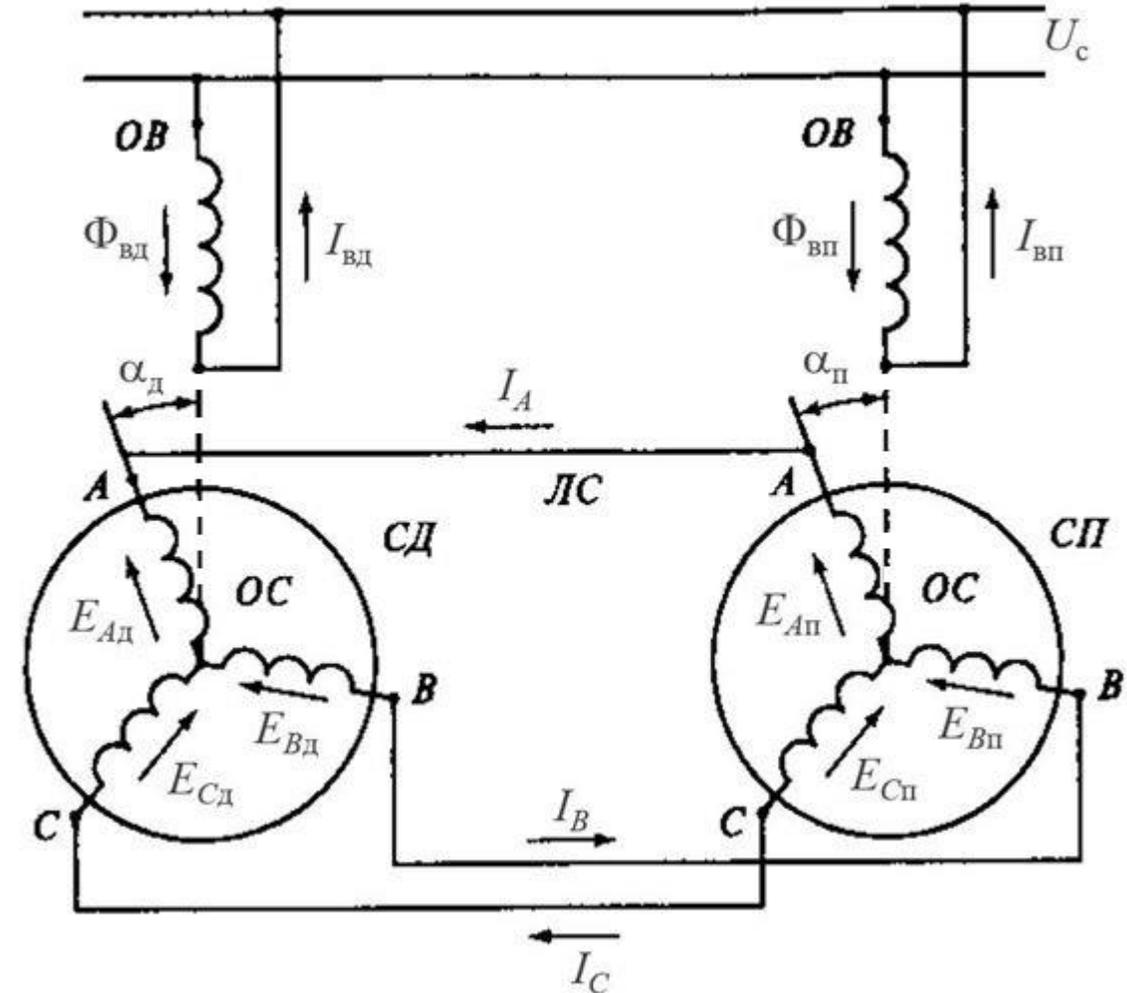
Фазы ОС имеют одинаковые эффективные числа витков

$$w_A = w_B = w_C = w_\phi$$

Положение вала характеризуется углом $\alpha_d, \alpha_{\text{п}}$

– угол между осью фазы А ОС и осью ОВ

(датчика, приемника)



Индикаторный режим работы

Обмотки возбуждения подключены к общей сети U_c и создают потоки возбуждения $\Phi_{ВД}$ и $\Phi_{ВП}$ одинаковой частоты $f = f_c$

Потоки $\Phi_{ВД}$ и $\Phi_{ВП}$ наводят в фазах ОС трансформаторные ЭДС
 Величина ЭДС зависит от положения ротора

Наибольшая ЭДС любой фазы E_ϕ получается при совпадении оси фазы с осью ОВ (с потоком)

$$E_\phi = 4,44 f_1 w_\phi \Phi_B$$

ЭДС фаз различаются по величине, но совпадают по фазе (трансформаторная ЭДС, созданная одним потоком Φ_B)

$$E_{Ад} = E_\phi \cos \alpha_d$$

$$E_{Ап} = E_\phi \cos \alpha_{п}$$

$$E_{Вд} = E_\phi \cos(\alpha_d - 120^\circ)$$

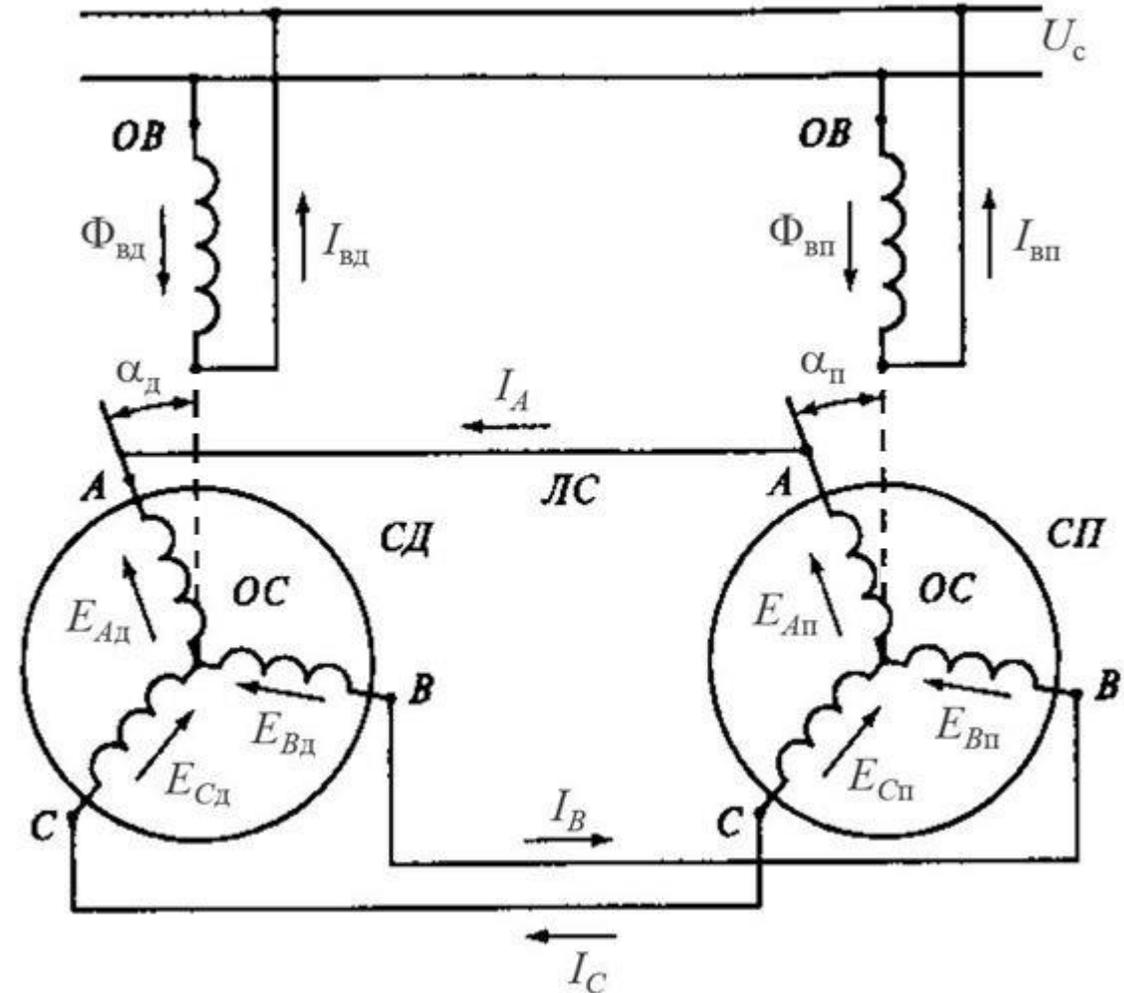
$$E_{Вп} = E_\phi \cos(\alpha_{п} - 120^\circ)$$

$$E_{Сд} = E_\phi \cos(\alpha_d - 240^\circ)$$

$$E_{Сп} = E_\phi \cos(\alpha_{п} - 240^\circ)$$

Если $\alpha_{п} = \alpha_d$, ЭДС одноименных фаз одинаковы и встречны
 → токов нет → момента нет → ротор приемника неподвижен

согласованное положение сельсинов



Индикаторный режим работы

Если углы датчика и приемника не совпадают ($\alpha_d \neq \alpha_{\text{п}}$),
появляется разность ЭДС

$$\Delta E_A = E_{A_d} - E_{A_{\text{п}}} = E_{\phi} (\cos \alpha_d - \cos \alpha_{\text{п}})$$

$$\Delta E_B = E_{B_d} - E_{B_{\text{п}}} = E_{\phi} (\cos(\alpha_d - 120^\circ) - \cos(\alpha_{\text{п}} - 120^\circ))$$

$$\Delta E_C = E_{C_d} - E_{C_{\text{п}}} = E_{\phi} (\cos(\alpha_d - 240^\circ) - \cos(\alpha_{\text{п}} - 240^\circ))$$

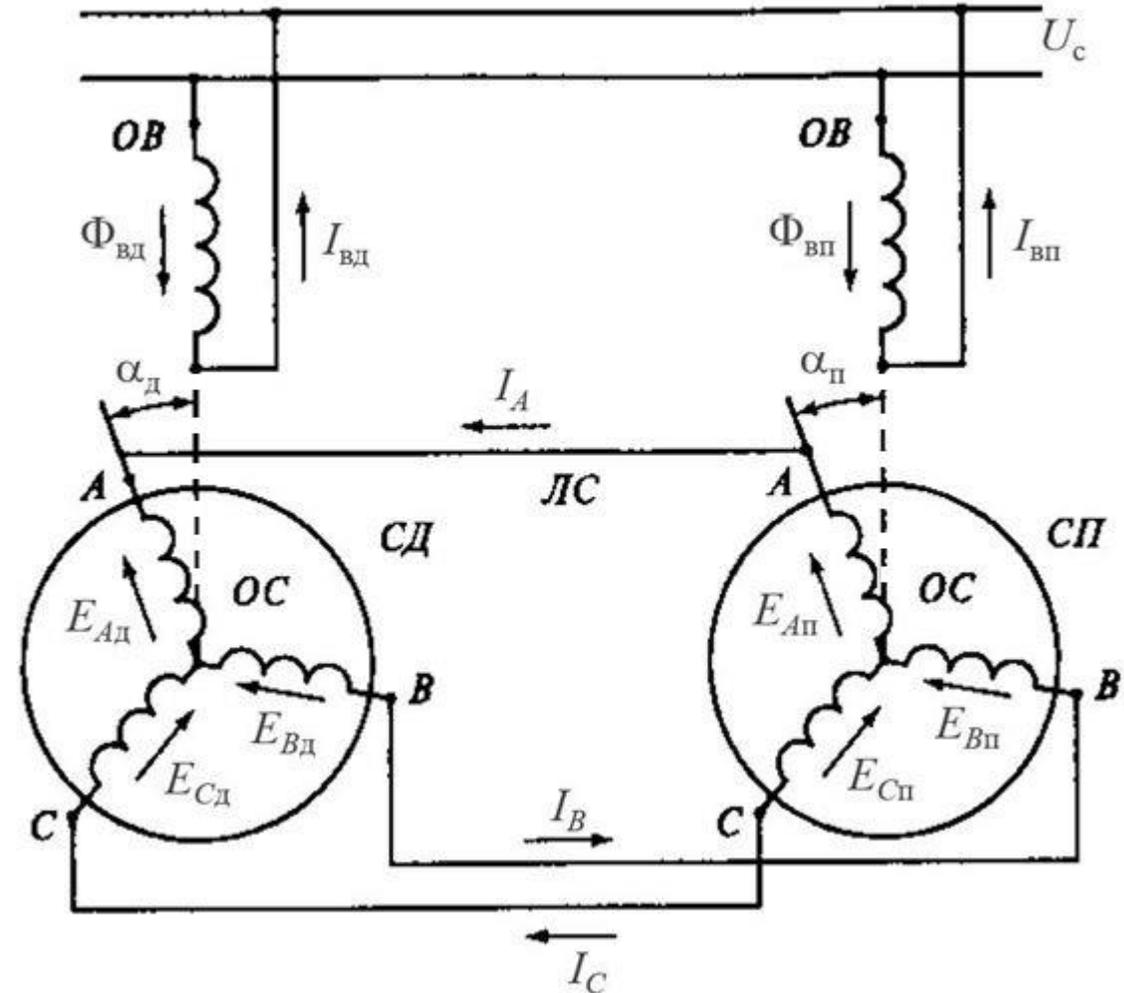
Введем понятие угла рассогласования $\theta = \alpha_d - \alpha_{\text{п}}$

Тогда разность ЭДС можно записать как

$$\Delta E_A = 2E_{\phi} \sin \left(\alpha_d - \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\Delta E_B = 2E_{\phi} \sin \left(\alpha_d - 120^\circ - \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\Delta E_C = 2E_{\phi} \sin \left(\alpha_d - 240^\circ - \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2}$$



Индикаторный режим работы

Под действием ΔE в каждой паре фаз возникает уравнительный ток

$$I_y = \frac{\Delta E}{Z_d + Z_{\Pi} + Z_{ЛС}}$$

Поскольку сопротивления фаз одинаковы, то считая $Z_d + \frac{1}{2}Z_{ЛС} = Z_{\Pi} + \frac{1}{2}Z_{ЛС} = Z_{\phi}$ запишем уравнительный ток

$$I_y = \frac{\Delta E}{2Z_{\phi}}$$

Токи фаз (уравнительные токи в ЛС)

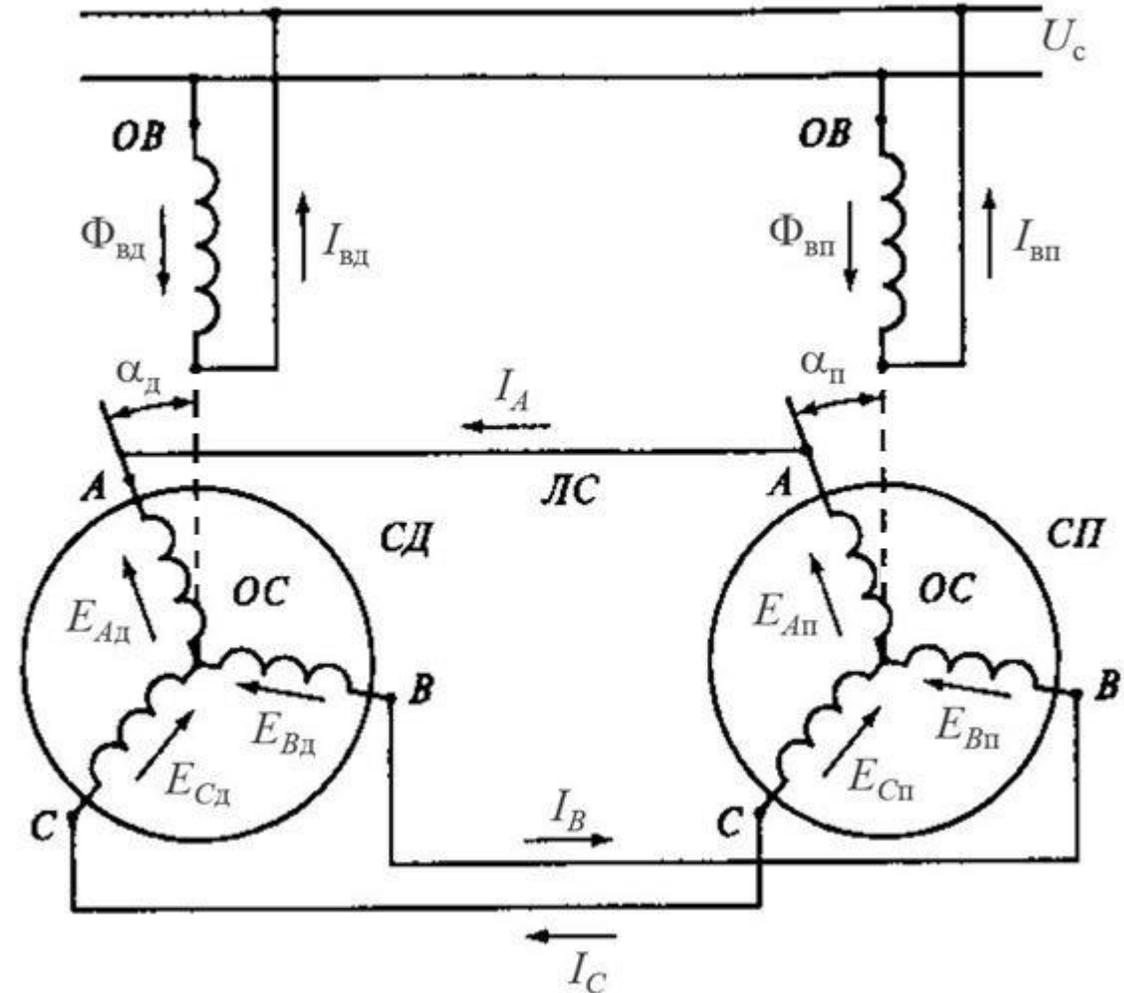
$$I_A = I_{\phi} \sin\left(\alpha_d - \frac{\theta}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2}$$

$$I_B = I_{\phi} \sin\left(\alpha_d - 120^\circ - \frac{\theta}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2}$$

$$I_C = I_{\phi} \sin\left(\alpha_d - 240^\circ - \frac{\theta}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2}$$

Здесь $I_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{Z_{\phi}}$ – наибольший возможный ток

При любом угле рассогласования $I_A + I_B + I_C = 0$



Индикаторный режим работы

Уравнительные токи создают МДС фаз датчика и приемника, направленные в противоположные стороны

$$F_{Ad} = -F_{An} = 1,8I_A w_\phi$$

В проекции на оси d и q (относительно оси OB)

» составляющие МДС датчика

$$F_{dд} = F_A \cos \alpha_д + F_B \cos(\alpha_д - 120^\circ) + F_C \cos(\alpha_д - 240^\circ)$$

$$F_{qд} = F_A \sin \alpha_д + F_B \sin(\alpha_д - 120^\circ) + F_C \sin(\alpha_д - 240^\circ)$$

» составляющие МДС приемника

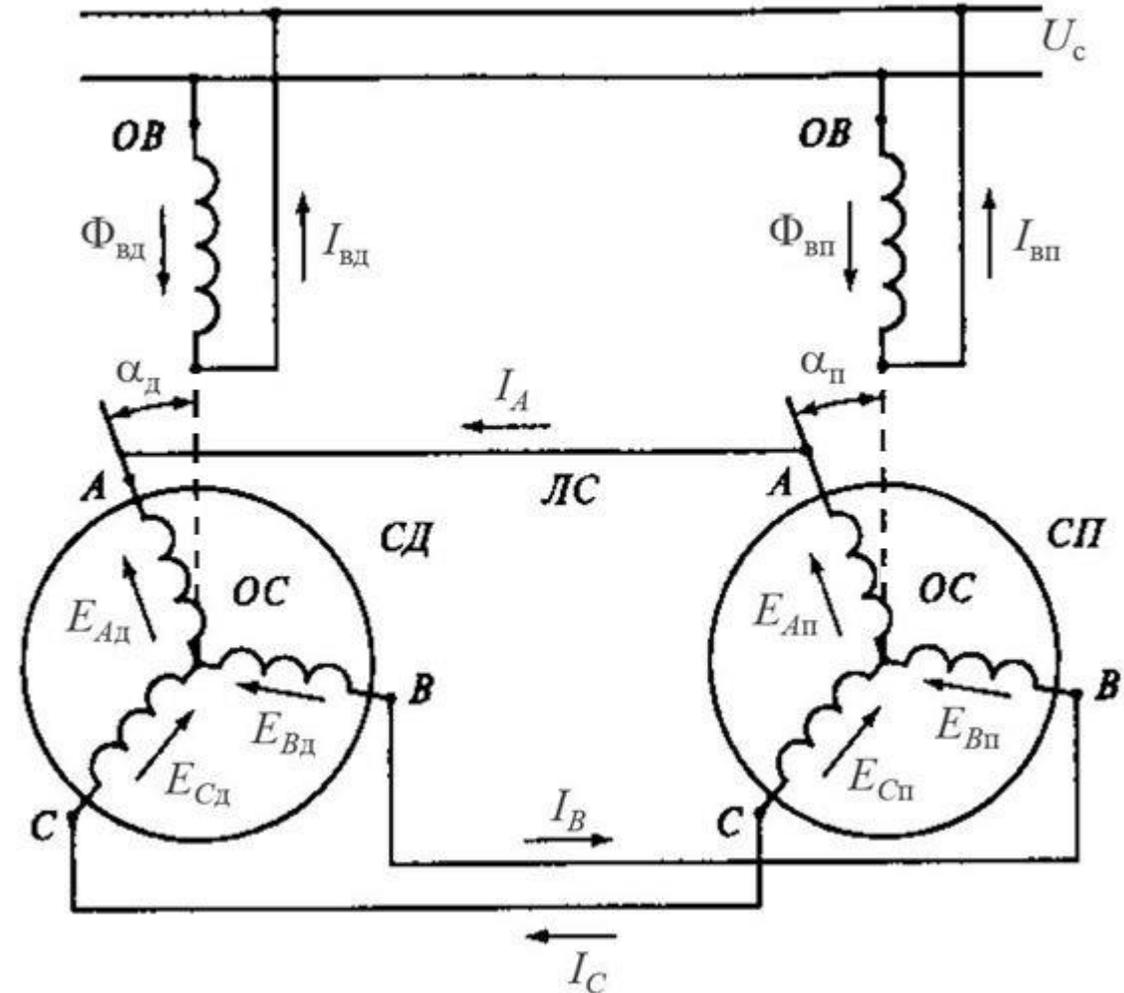
$$F_{dп} = F_A \cos \alpha_п + F_B \cos(\alpha_п - 120^\circ) + F_C \cos(\alpha_п - 240^\circ)$$

$$F_{qп} = F_A \sin \alpha_п + F_B \sin(\alpha_п - 120^\circ) + F_C \sin(\alpha_п - 240^\circ)$$

Результирующие МДС

$$F_{dд} = F_{dп} = -1,35I_\phi w_\phi (1 - \cos \theta)$$

$$F_{qд} = -F_{qп} = 1,35I_\phi w_\phi \sin \theta$$



Индикаторный режим работы

Составляющие МДС по продольной оси

$$F_{dд} = F_{dп} = -1,35I_{\phi}w_{\phi}(1 - \cos \theta)$$

- » одинаковы в датчике и приемнике
- » направлены против МДС ОВ (как в трансформаторах)
- » малы при малых углах рассогласования

Например, при $\theta = 5^{\circ}$ $\frac{F_d}{F_q} = \frac{1 - \cos 5^{\circ}}{\sin 5^{\circ}} = 0,026$

Обычно составляющей F_d пренебрегают

Взаимодействие поперечной составляющей F_q

$$F_{qд} = -F_{qп} = 1,35I_{\phi}w_{\phi} \sin \theta$$

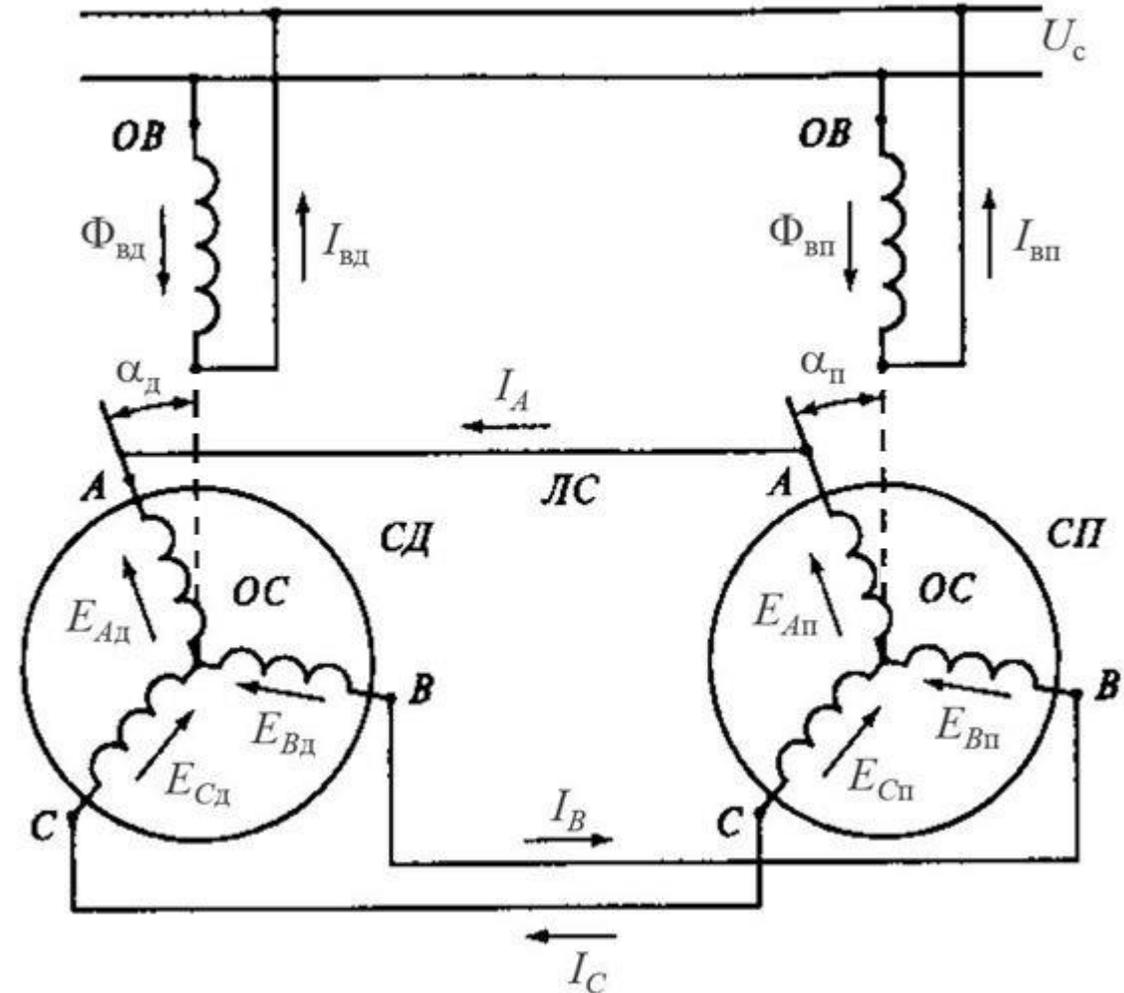
с потоком ОВ создает вращающий момент

$$M_{д} = -M_{п} = c'_M \Phi_{в} F_q \cos \psi_{\phi}$$

– **синхронизирующий момент** M_c

Здесь постоянная $c'_M = \frac{2\pi}{8}$

ψ_{ϕ} – временной угол между $\Phi_{в}$ и уравнительным током I_{ϕ}
(одинаковый для всех фаз ОС)



Индикаторный режим работы

Синхронизирующий момент $M_c = M_d = -M_n = c'_M \Phi_B F_q \cos \psi_\phi$

- » в датчике и приемнике направлен противоположно
- » ротор датчика фиксирован механизмом
- » ротор приемника поворачивается под действием M_c пока не придет в согласованное положение

Временной угол ψ_ϕ :
» ЭДС в фазе отстает от Φ_B на $\pi/2$
» ток в фазе отстает от ЭДС на φ_ϕ
(определяется соотношением r_ϕ и x_ϕ)

$$\text{Тогда } \psi_\phi = \frac{\pi}{2} + \varphi_\phi$$

С учетом $F_q = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_\phi w_\phi \sin \theta$, $I_\phi = \frac{E_\phi}{Z_\phi}$ и $E_\phi = \pi\sqrt{2} f_1 w_\phi \Phi_\phi$

запишем синхронизирующий момент как $M_c = \frac{c''_M}{f_1} \frac{E_\phi^2}{Z_\phi} \sin \varphi_\phi \sin \theta$ где $c''_M = \frac{3}{8\pi}$

Если пренебрегать F_d , то

$$Z_\phi = Z_q = \sqrt{r_q^2 + x_q^2} \quad \text{и} \quad \sin \varphi_\phi = \frac{x_\phi}{Z_\phi} = \frac{x_q}{Z_q}$$

При наличии демпферной обмотки надо использовать переходные сопротивления r'_q, x'_q

Тогда синхронизирующий момент $M_c = \frac{c''_M}{f_1} \frac{E_\phi^2 x_q}{r_q^2 + x_q^2} \sin \theta$

В идеальном сельсине синхронизирующий момент

- » пропорционален $E_\phi^2 (U^2)$
- » изменяется синусоидально от θ

Точность работы сельсинов в индикаторном режиме

Оценка точности работы *сельсин-приемников* в индикаторном режиме

– по отклонению от согласованного положения

Погрешность:
$$\Delta\theta = \frac{\theta_{m(+)} + \theta_{m(-)}}{2}$$

Здесь θ_m – максимальное положительное/отрицательное отклонение ротора приемника от согласованного положения

Классы точности индикаторных сельсин-приемников:

- » I класс точности – $\Delta\theta \leq \pm 30'$
- » ...
- » IV класс точности – $\Delta\theta \leq \pm 90'$

Оценка точности работы *сельсин-датчиков* в индикаторном режиме

– по асимметрии нулевых точек

Асимметрия нулевых точек – отклонение фактического положения ротора, при котором линейные ЭДС обмотки синхронизации равны 0, от теоретического

Классы точности индикаторных сельсин-датчиков:

- » I класс точности – $\Delta\theta \leq \pm 1'$
- » ...
- » ...
- » VII класс точности – $\Delta\theta \leq \pm 30'$

Точность работы сельсинов в индикаторном режиме

Факторы, влияющие на качество работы сельсин-приемников в индикаторном режиме

Удельный синхронизирующий момент

– синхронизирующий момент при угле рассогласования $\theta = 1^\circ$

» чем круче кривая $M_c = f(\theta)$, тем больше удельный M_c :

$$M_{уд1} > M_{уд2}$$

» чем больше удельный M_c , тем меньше погрешность:
момент трения создает погрешность $\theta_1 < \theta_2$

Величина удельного синхронизирующего момента

» $(0,1...5) \cdot 10^{-3}$ Н·м/град.

При работе n приемников от одного датчика

$M_{уд}$ уменьшается гиперболически
(требуется более мощный датчик)

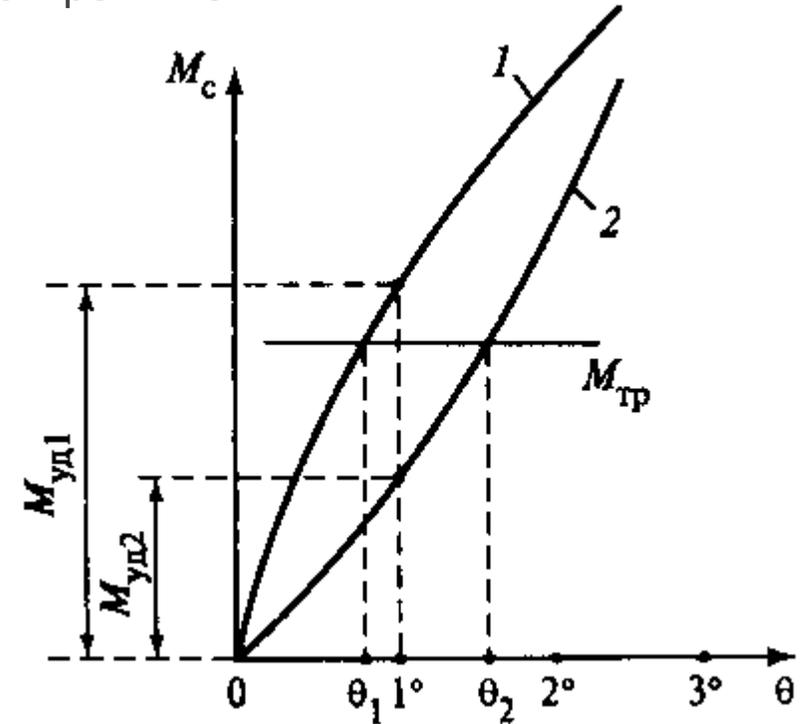
$$M_{удn} = \frac{2M_{уд1}}{1+n}$$

Момент сопротивления (на валу приемника)

– в основном это собственный момент трения
(трение в подшипниках и скользящих контактах)

Величина момента сопротивления

» $(0,3...10) \cdot 10^{-3}$ Н·м



Добротность сельсина

– отношение удельного момента к моменту трения

$$D = \frac{M_{уд}}{M_{тр}}$$

Чем больше добротность, тем выше
теоретическая точность сельсина

Точность работы сельсинов в индикаторном режиме

Факторы, влияющие на качество работы сельсин-приемников в индикаторном режиме

Время успокоения – время, за которое ротор приемника остановится после максимального рассогласования (на угол $\theta = \pm 179^\circ$)

На всех сельсин-приемниках ставят демпферы (электрические или механические)
– для предотвращения больших качаний ротора при больших θ
(снижает время успокоения)

Типичная величина времени успокоения

» < 3 с

Факторы, влияющие на *точность* работы сельсин-приемников в индикаторном режиме

Динамическая погрешность – погрешность приемника при вращении его ротора вслед за датчиком (динамический режим работы)

При вращении ротора в обмотке синхронизации кроме $E_{тр}$ наводится $E_{вр}$
 $E_{вр}$ отстает на $\pi/2$ в пространстве \rightarrow создает свои токи в ОС \rightarrow уменьшает M_c

Удельный синхронизирующий момент в динамическом режиме работы

$$M_{уд.д} = M_{уд} \cos\left(\frac{\pi n p}{120 f_1}\right) = M_{уд} \cos\left(v \frac{\pi}{2}\right)$$

$M_{уд}$ – удельный синхронизирующий момент в статическом режиме
 v – относительная скорость вращения

Точность работы сельсинов в индикаторном режиме

Факторы, влияющие на *точность* работы сельсин-приемников в индикаторном режиме

Магнитная несимметрия – неравенство магнитных проводимостей для Φ_B при разных положениях ротора

Технологические причины магнитной несимметрии

- » Анизотропия листовой стали → нужна веерная сборка пакетов сердечника
- » Неравномерность зазора (эллиптичность ротора/статора, эксцентриситет вала)
- » КЗ-контура в пакете стали / в обмотке

Параметрические причины магнитной несимметрии

- » Зубцовые гармоники в кривой проводимости зазора (реактивные моменты от этих гармоник)
→ оптимизация числа зубцов, размеров зубцовой зоны, полюсов, скос пазов

Электрическая несимметрия – неравенство сопротивлений фаз и соединительных проводов

Наиболее вероятная причина – неравенство переходных сопротивлений щеточного контакта разных фаз

→ рекомендуется выбирать сплавы с малым активным сопротивлением для контактных колец и щеток (сплавы серебра)

Дифференциальный сельсин

– позволяет поворачивать ось приемника на угол, равный сумме или разности углов двух датчиков

Конструкция:

- » отсутствует обмотка возбуждения
- » первичная обмотка – трехфазная

Рассмотрим ДС как второй датчик

Сельсин-датчик

Поток возбуждения $\Phi_{вд}$ наводит ЭДС в ОС $E_{Ад}$, $E_{Вд}$, $E_{Сд}$

ОС датчика соединена с первичной обмоткой ДС

→ токи в линиях связи и фазах I_A , I_B , I_C (всегда)

Дифференциальный сельсин

Токи в первичной обмотке → поток $\Phi_{ДС}$

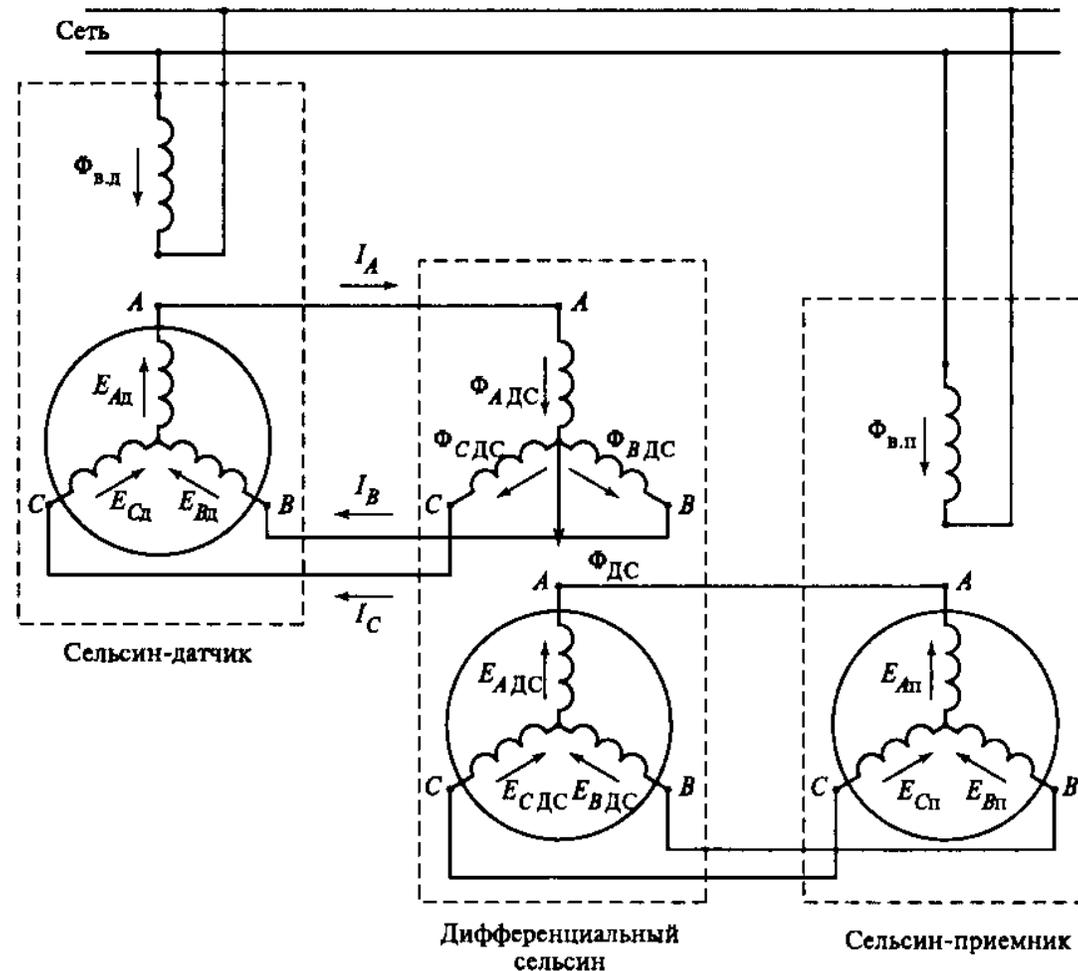
Направление $\Phi_{ДС}$ определяется положением ОС датчика

$\Phi_{ДС}$ наводит ЭДС в ОС $E_{АДС}$, $E_{ВДС}$, $E_{СДС}$

Сельсин-приемник

Поток возбуждения $\Phi_{вп}$ наводит ЭДС в ОС $E_{Ап}$, $E_{Вп}$, $E_{Сп}$

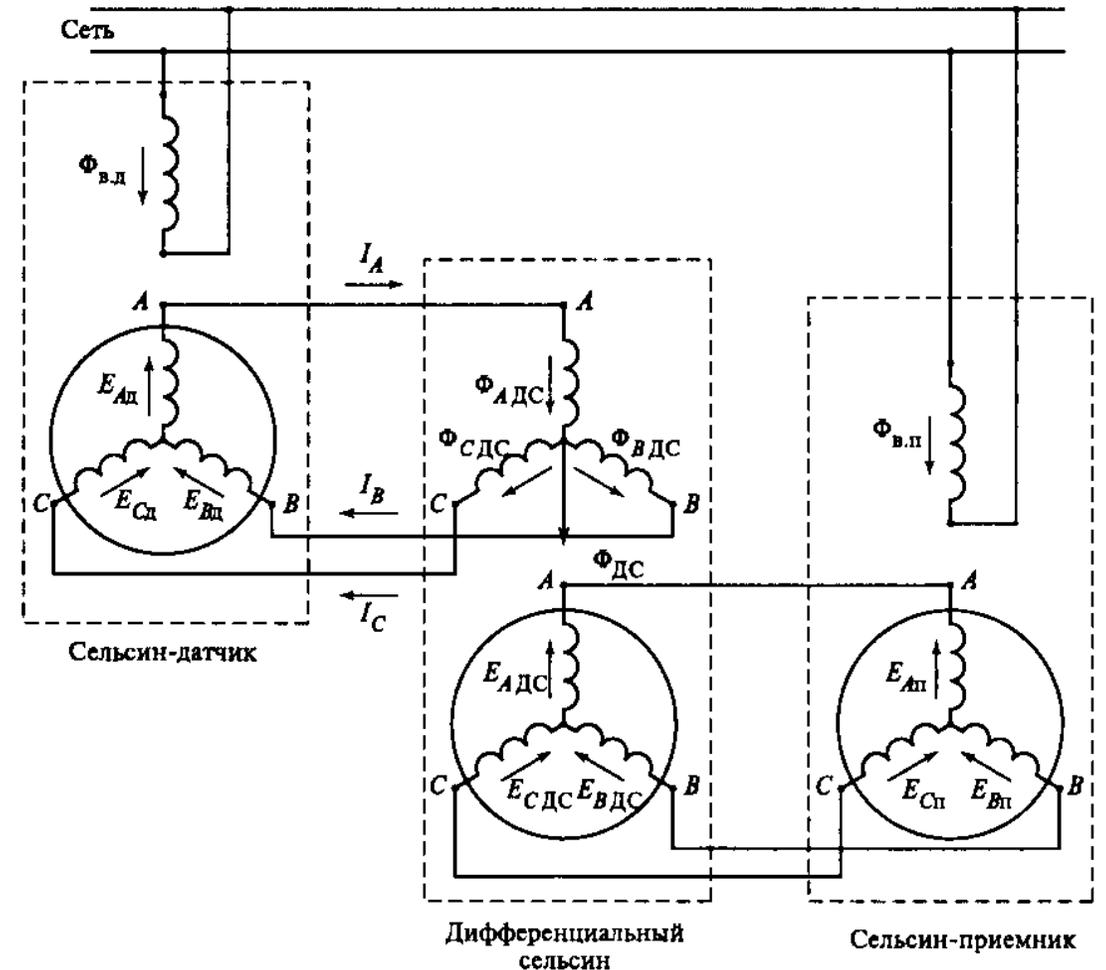
ОС приемника соединена с ОС дифференциального сельсина



Дифференциальный сельсин

- » Пусть фазы ОС ДС ориентированы относительно $\Phi_{ДС}$ так же, как фазы ОС приемника относительно $\Phi_{ВП}$, тогда фазные ЭДС ДС равны фазным ЭДС приемника и токи отсутствуют → *согласованное положение*
- » Если ротор ДС повернуть на угол $\alpha_{ДС}$, то разница ЭДС в ОС ДС и приемника создаст токи и ротор приемника повернется на тот же угол $\alpha_{ДС}$
- » Если ротор датчика повернуть на угол $\alpha_{д}$, то на тот же угол повернется поток $\Phi_{ДС}$, что аналогично повороту ротора ДС на угол $-\alpha_{д}$ (в противоположном направлении) → разница ЭДС ДС и приемника создаст токи и ротор приемника повернется на угол $-\alpha_{д}$
- » Таким образом, угол поворота ротора приемника

$$\alpha_{п} = \alpha_{ДС} - \alpha_{д}$$



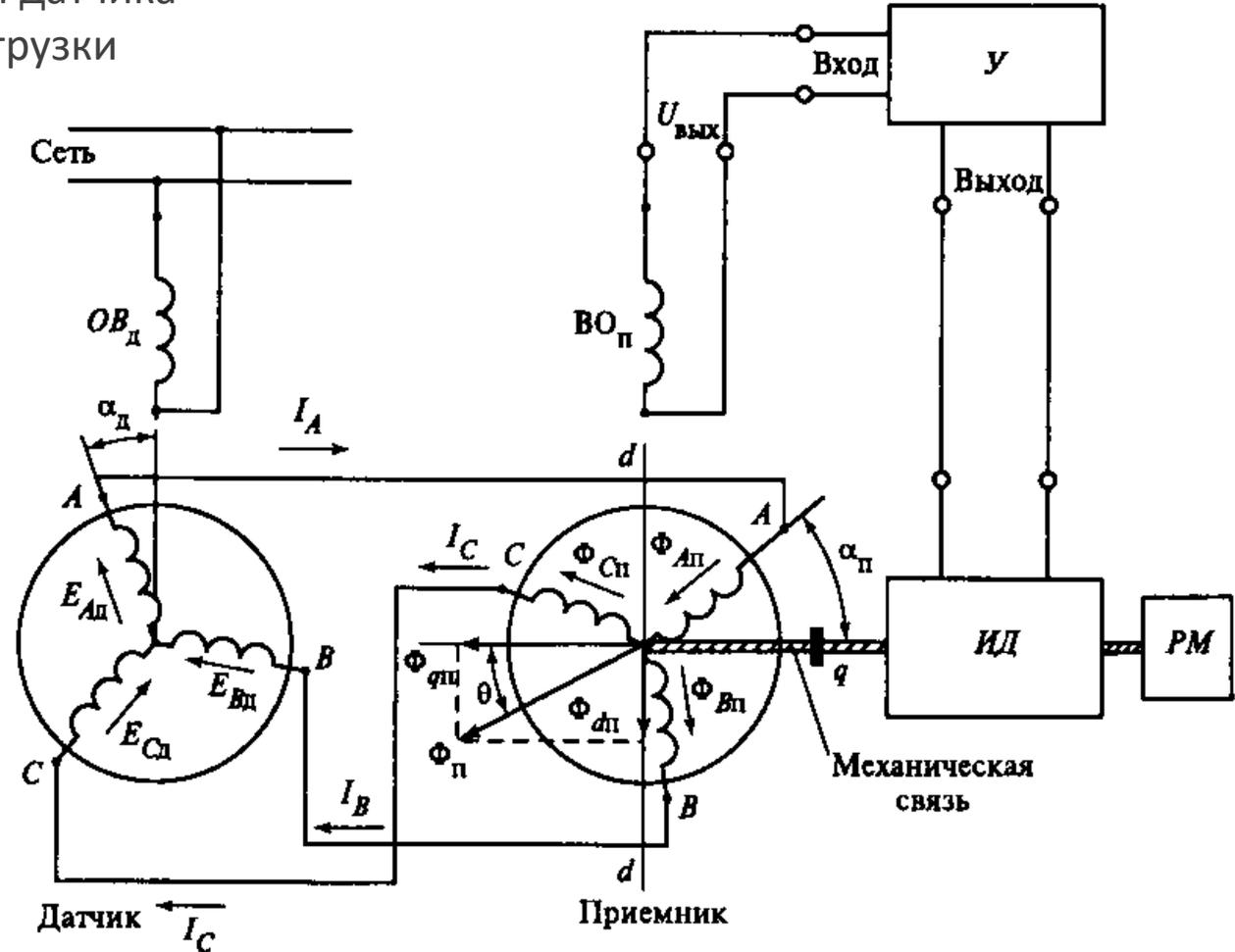
Трансформаторный режим работы

Трансформаторный режим работы

– применяется для передачи информации о положении датчика в случае, когда на валу приемника большой момент нагрузки

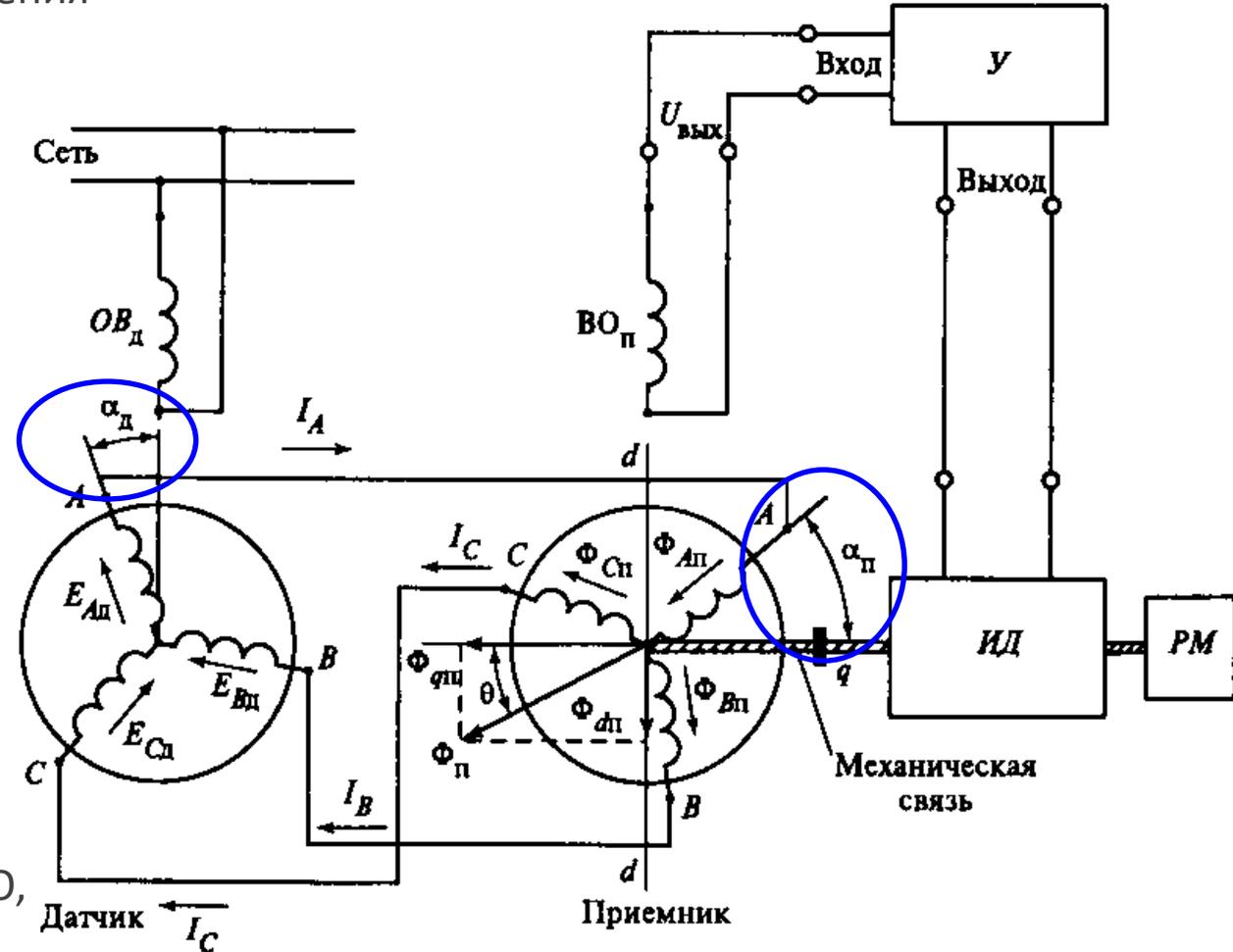
Сельсин-приемник конструктивно аналогичен датчику, но его обмотка возбуждения используется как выходная обмотка (ВО)

- » в ВО наводится ЭДС, зависящая от α
- » выходное напряжение через усилитель подается на управляющий вход исполнительного двигателя
- » ИД соединен с рабочим механизмом и валом приемника, поворачивая их одновременно
- » ИД по сигналу $U_{\text{ВЫХ}}$ поворачивает вал приемника до согласованного положения, когда $U_{\text{ВЫХ}} = 0$



Трансформаторный режим работы

- » ОВ датчика подключена к сети переменного напряжения и создает поток возбуждения Φ_d
- » Φ_d наводит ЭДС в фазах ОС E_{Ad}, E_{Bd}, E_{Cd} , зависящие от положения ротора датчика α_d
- » Так как в приемнике нет потока возбуждения, ЭДС E_{Ad}, E_{Bd}, E_{Cd} создают токи в линиях связи и фазах ОС приемника I_A, I_B, I_C
- » Токи I_A, I_B, I_C создают поток приемника Φ_{II} , направление которого определяется углом α_{II}
- » Φ_{II} пульсирует с частотой сети и наводит ЭДС в ВО
- » При одинаковых положениях датчика и приемника направление Φ_{II} совпадает с направлением Φ_d (и Φ_{II} по оси d наводит максимальную ЭДС в ВО)
- » *Согласованное положение* датчика и приемника соответствует $U_{\text{ВЫХ}} = 0$, когда Φ_{II} перпендикулярен ВО, т.е. когда ротор приемника повернут на 90° относительно ротора датчика



- » α_d – относительно оси d датчика
- » α_{II} – относительно оси q приемника

Трансформаторный режим работы

Токи в линиях связи и ОС датчика и приемника определяются величинами ЭДС фаз ОС датчика, которые зависят от положения ротора датчика α_d

Пусть сопротивления фаз ОС датчика и приемника одинаковы и содержат по половине Z линии связи

Тогда токи фаз $I_A = \frac{E_\phi}{2Z_\phi} \cos \alpha_d = I_\phi \cos \alpha_d$

$$I_B = \frac{E_\phi}{2Z_\phi} \cos(\alpha_d - 120^\circ) = I_\phi \cos(\alpha_d - 120^\circ)$$

$$I_C = \frac{E_\phi}{2Z_\phi} \cos(\alpha_d - 240^\circ) = I_\phi \cos(\alpha_d - 240^\circ)$$

МДС фаз приемника $F_{Aп} = F_\phi \cos \alpha_d$

$$F_{Bп} = F_\phi \cos(\alpha_d - 120^\circ)$$

$$F_{Cп} = F_\phi \cos(\alpha_d - 240^\circ)$$

$$Z_{\phi д} + \frac{Z_{л}}{2} = Z_{\phi п} + \frac{Z_{л}}{2} = Z_\phi$$

где $I_\phi = \frac{E_\phi}{2Z_\phi}$ – наибольшее значение тока в фазе

где $F_\phi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi r} I_\phi w$ – наибольшее значение МДС фазы

Трансформаторный режим работы

МДС фаз, где токи синфазны, складываются геометрически и образуют полную МДС приемника

Продольная составляющая МДС приемника зависит от положения приемника α_{Π}

$$F_{d\Pi} = F_{A\Pi} \sin \alpha_{\Pi} + F_{B\Pi} \sin(\alpha_{\Pi} - 120^\circ) + F_{C\Pi} \sin(\alpha_{\Pi} - 240^\circ)$$

– направлена по оси ВО (ось d), создает составляющую потока $\Phi_{d\Pi}$, наводящую ЭДС в ВО

После подстановки значений МДС фаз с учетом разницы углов $\alpha_d - \alpha_{\Pi} = \theta$ получим $F_{d\Pi} = \frac{3}{2} F_{\phi} \sin \theta$

МДС $F_{d\Pi}$ создает составляющую потока $\Phi_{d\Pi} = F_{d\Pi} \Lambda_d$,
где Λ_d – магнитная проводимость зазора по оси d

Поток $\Phi_{d\Pi}$ наводит ЭДС в выходной обмотке $E_{\text{ВЫХ}} = 4,44 f w_{\text{ВО}} \Phi_{d\Pi}$

При $\Lambda_d = \text{const}$ ЭДС $E_{\text{ВЫХ}}$ изменяется аналогично МДС $F_{d\Pi}$

$$E_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ВЫХ} \text{ м}} \sin \theta$$

» в согласованном положении ($\theta = 0$) $\rightarrow E_{\text{ВЫХ}} = 0$

» при $\theta = 90^\circ \rightarrow E_{\text{ВЫХ}}$ максимальна

В трансформаторном режиме работы важно использовать сельсин с постоянной магнитной проницаемостью зазора (неявнополюсный ротор)

Реактивный момент стремится повернуть ротор в положение, когда Φ_{Π} совпадает с осью полюсов

→ дополнительная погрешность

→ увеличение мощности ИД и усилителя

Трансформаторный режим работы

МДС фаз, где токи синфазны, складываются геометрически и образуют полную МДС приемника

Поперечная составляющая МДС приемника

$$F_{q\Pi} = F_{A\Pi} \cos \alpha_{\Pi} + F_{B\Pi} \cos(\alpha_{\Pi} - 120^\circ) + F_{C\Pi} \cos(\alpha_{\Pi} - 240^\circ)$$

После подстановки значений МДС фаз с учетом разницы углов $\alpha_{\text{д}} - \alpha_{\text{п}} = \theta$ получим $F_{q\Pi} = -\frac{3}{2} F_{\Phi} \cos \theta$

МДС $F_{q\Pi}$ создает составляющую потока $\Phi_{q\Pi} = F_{q\Pi} \Lambda_q$

Поток $\Phi_{q\Pi}$ не должен наводить ЭДС в выходной обмотке (он перпендикулярен ВО)

В реальности из-за магнитной несимметрии $\Phi_{q\Pi}$ наводит небольшую ЭДС $E_{\text{ВЫХ}}$ (погрешность)

Результирующая МДС приемника $F_{\Pi} = \sqrt{F_{d\Pi}^2 + F_{q\Pi}^2} = \frac{3}{2} F_{\Phi}$

- » Результирующая МДС F_{Π} (и полный поток Φ_{Π}) не зависит от угла рассогласования θ
- » От угла рассогласования θ зависит направление МДС F_{Π} (и потока Φ_{Π})
- » Вектор результирующей МДС (и потока) направлен под углом θ к поперечной оси q

Трансформаторный режим работы

Если ротор датчика поворачивается, а ротор приемника еще неподвижен (появляется θ)

→ полный поток приемника Φ_{Π} поворачивается на тот же угол θ , но в противоположном направлении

Если ротор датчика неподвижен, а ротор приемника поворачивается

→ полный поток приемника Φ_{Π} поворачивается вместе с ротором и ОС

В любом случае ЭДС выходной обмотки изменяется по закону $\sin\theta$

$$E_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ВЫХ } m} \sin \theta$$

- » В результате сигнал поступает на обмотку управления ИД, который поворачивает рабочий механизм и ротор приемника вплоть до согласованного положения, когда $\Phi_{d\Pi} = 0$ и $E_{\text{ВЫХ}} = 0$
- » При этом угловое положение приемника (α_{Π} относительно оси q приемника) соответствует угловому положению датчика ($\alpha_{\text{д}}$ относительно оси d датчика) $\theta = \alpha_{\text{д}} - \alpha_{\Pi} = 0$

Особенность трансформаторного режима работы

– питание приемника осуществляется по линиям связи от ОС датчика

- » по фазам и проводам всегда текут токи (потери мощности)
- » потребляемая приемником мощность проходит через датчик
- » ограниченное число приемников можно подключить к одному датчику

Точность работы сельсинов в трансформаторном режиме

Оценка точности работы сельсинов в трансформаторном режиме

– по асимметрии нулевых точек

(аналогично датчикам индикаторных систем)

Классы точности сельсинов в трансформаторных системах связи

» I класс точности – $\Delta\theta \leq \pm 0,1'$

» ...

» XI класс точности – $\Delta\theta \leq \pm 30'$

Факторы, влияющие на качество работы сельсинов в трансформаторном режиме

Удельное выходное напряжение – выходное напряжение при угле рассогласования $\theta = 1^\circ$

(характеризует чувствительность системы)

» Для повышения $U_{уд}$ можно увеличить число витков w_{BO} ,

» но при этом возрастет R_{BO} и падение напряжения на BO → снизится выходная мощность

Величина удельного напряжения (0,1...2) В/град.

Удельная выходная мощность – наибольшая мощность, которую может отдать BO при $\theta = 1^\circ$

(бóльшая выходная мощность позволит уменьшить мощность усилителя)

Точность работы сельсинов в трансформаторном режиме

Факторы, влияющие на *точность* работы сельсинов в трансформаторном режиме

Остаточная ЭДС – наводится в ВО поперечной составляющей потока $\Phi_{q\Pi}$ из-за магнитной несимметрии

- » $E_{\text{ост}}$ максимальна при максимальном $\Phi_{q\Pi}$, т.е. в согласованном положении
- » Большая величина $E_{\text{ост}}$ после усиления может превысить напряжение трогания исполнительного двигателя → начнется вращение (отработка ложного сигнала)
- » Для снижения $E_{\text{ост}}$ требуется повышение качества изготовления сельсинов

Величина остаточной ЭДС (0,1...0,3) В

Несинусоидальность магнитного поля сельсина

(определяет статическую погрешность)

- » Высшие пространственные гармоники МДС
- » Зубцовые гармоники проводимости зазора
- » Магнитная асимметрия сердечника из-за некачественного изготовления

Точность работы сельсинов в трансформаторном режиме

Факторы, влияющие на точность работы сельсинов в трансформаторном режиме

Скоростная погрешность – дополнительная ЭДС в ВО в динамическом режиме работы (при вращении ротора)

При вращении роторов

- » в ОС датчика наводится трансформаторная ЭДС $E_{\text{тр}}$, пропорциональная $d\Phi_{\text{вд}}/dt$,
- » а также ЭДС вращения $E_{\text{вр}}$, пропорциональная $\Phi_{\text{вд}} \cdot n$
- » $\Phi_{\text{вд}}$ пульсирует с частотой сети $f_1 \rightarrow$ так же изменяются все ЭДС, но фазовые углы $E_{\text{тр}}$ и $E_{\text{вр}}$ разные
- » $E_{\text{тр}}$ создает в обмотках токи \rightarrow поток $\Phi_{\text{п}} \rightarrow$ выходную ЭДС в ВО $E_{\text{вых.тр}}$
- » $E_{\text{вр}}$ создает в обмотках свои токи \rightarrow потоки \rightarrow дополнительную ЭДС в ВО $E_{\text{вых.вр}}$

Таким образом в выходной обмотке:

- » Трансформаторная ЭДС $E_{\text{вых.тр}} = f(\theta)$ (как при $n = 0$, так и при вращении)
- » ЭДС вращения $E_{\text{вых.вр}} = f(n)$ (при вращении)

Составляющая $E_{\text{вых.вр}}$, совпадающая по фазе с $E_{\text{вых.тр}}$, создает скоростную погрешность

- » даже при $\theta = 0$ есть $E_{\text{вых.вр}} \rightarrow$ сигнал управления на ИД \rightarrow отработка ложного угла рассогласования

Пути уменьшения скоростной погрешности

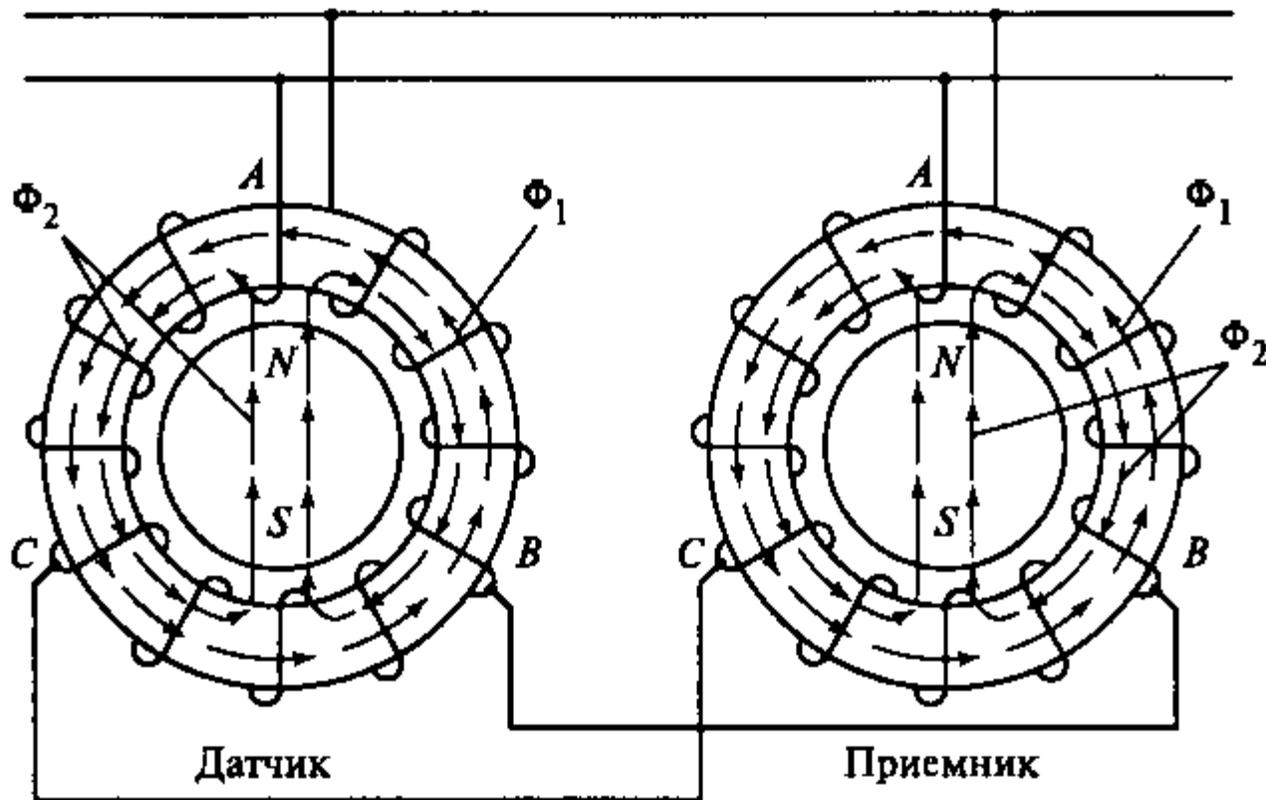
- » правильный выбор параметров обмоток
- » снижение частоты вращения роторов
- » повышение частоты сети (чтобы увеличить $E_{\text{тр}}$)

Магнесины

Магнесины

– бесконтактные магнитоэлектрические машины

Магнесины применяют в системах синхронной связи, когда расстояние между датчиком и приемником невелико (нет падения напряжения в линии) и отсутствует нагрузка на валу приемника



Конструкция статора

- » тороидальный сердечник (без пазов)
- » кольцевая однофазная обмотка, равномерно намотанная вокруг сердечника
- » обмотка подключена к сети переменного тока
- » обмотка имеет две равноудаленные отпайки (под углом 120° с равным числом витков между ними и началом и концом обмотки) → разбивают обмотку на 3 фазы, распределенные по окружности
- » сердечник сильно насыщается при потоке Φ_{1m}

Ротор

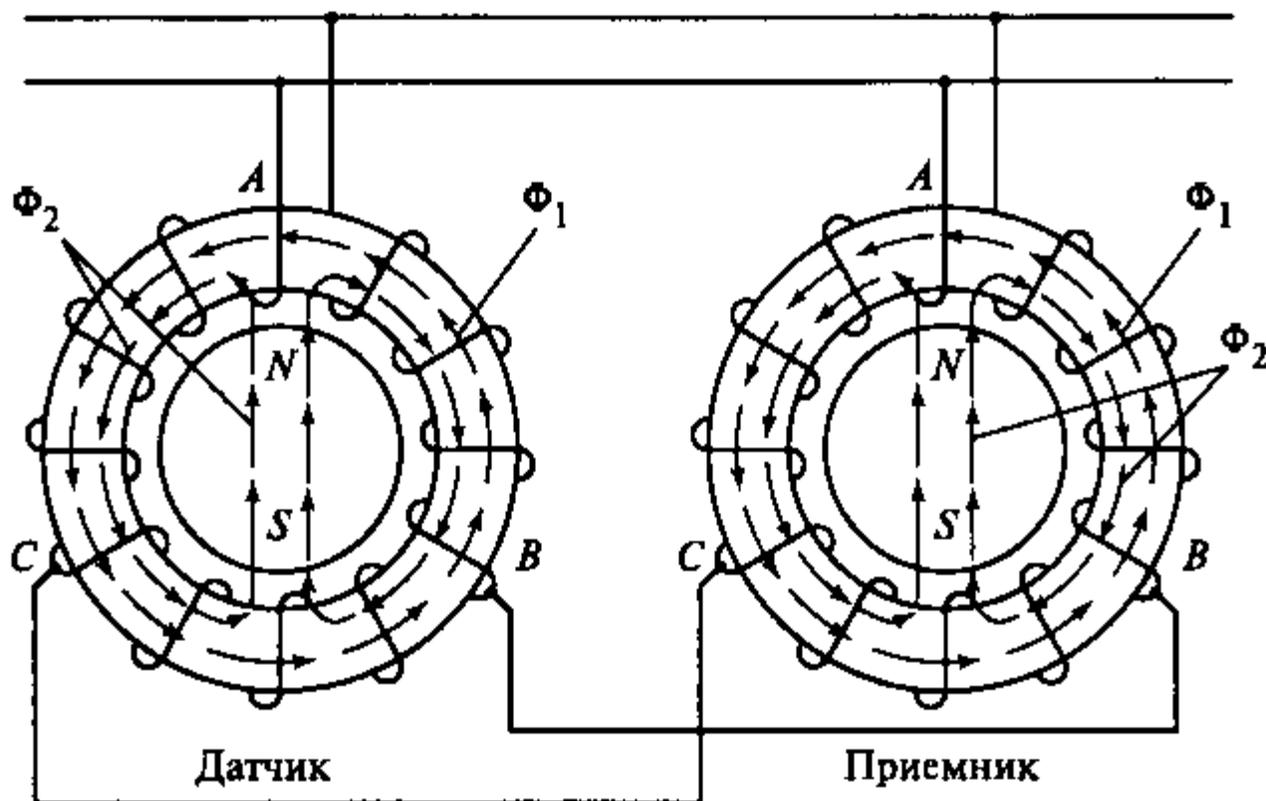
- » цилиндрический постоянный магнит (двухполюсный)

Магнесины

Переменный ток обмотки статора создает пульсирующий поток Φ_1 (с частотой f_1)

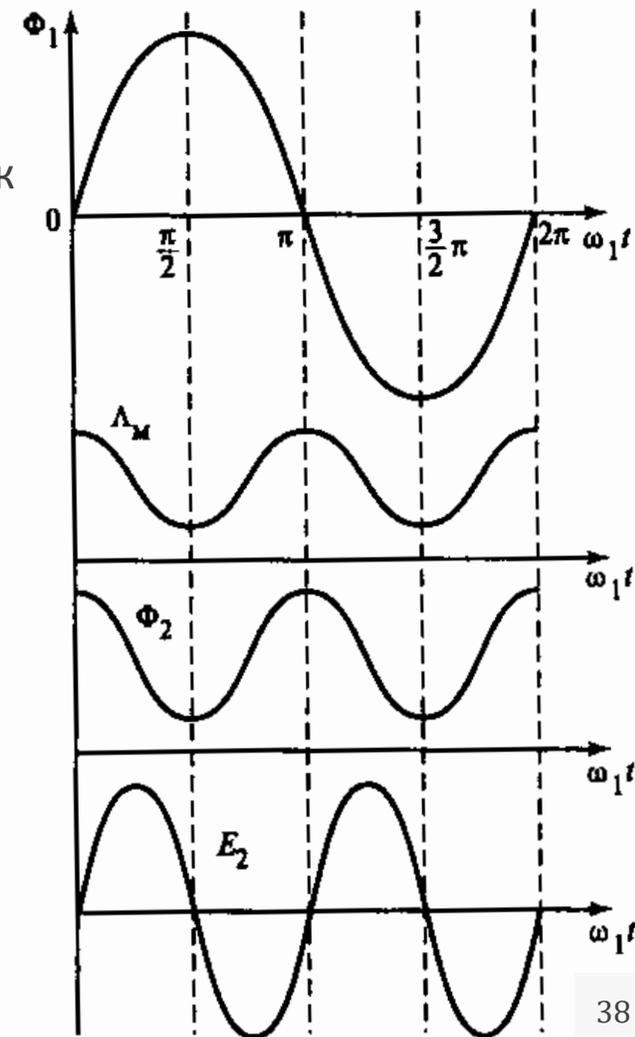
Постоянный магнит создает свой поток Φ_2

Пульсирующий поток Φ_1 насыщает сердечник дважды за период



» при $\Phi_1 = 0$ сердечник не насыщен (проводимость *max*)

» при $\Phi_1 = \Phi_{1m}$ сердечник сильно насыщен (проводимость *min*)



Магнесины

Из-за насыщения сердечника пульсирующим потоком Φ_1 (с частотой f_1) его магнитная проводимость Λ_M изменяется дважды за период (с частотой $f_2 = 2f_1$)

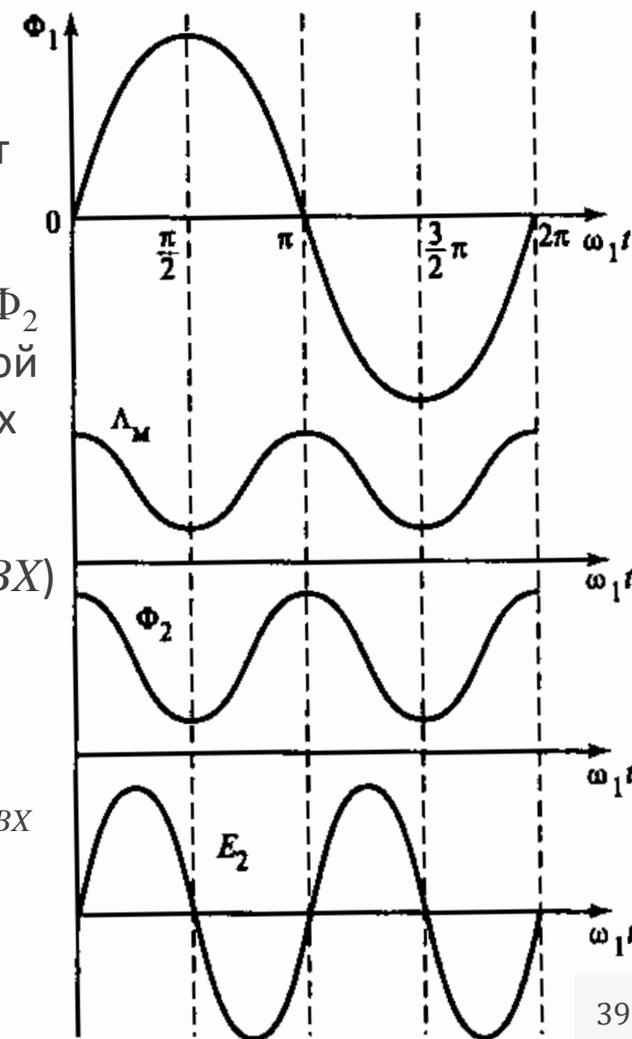
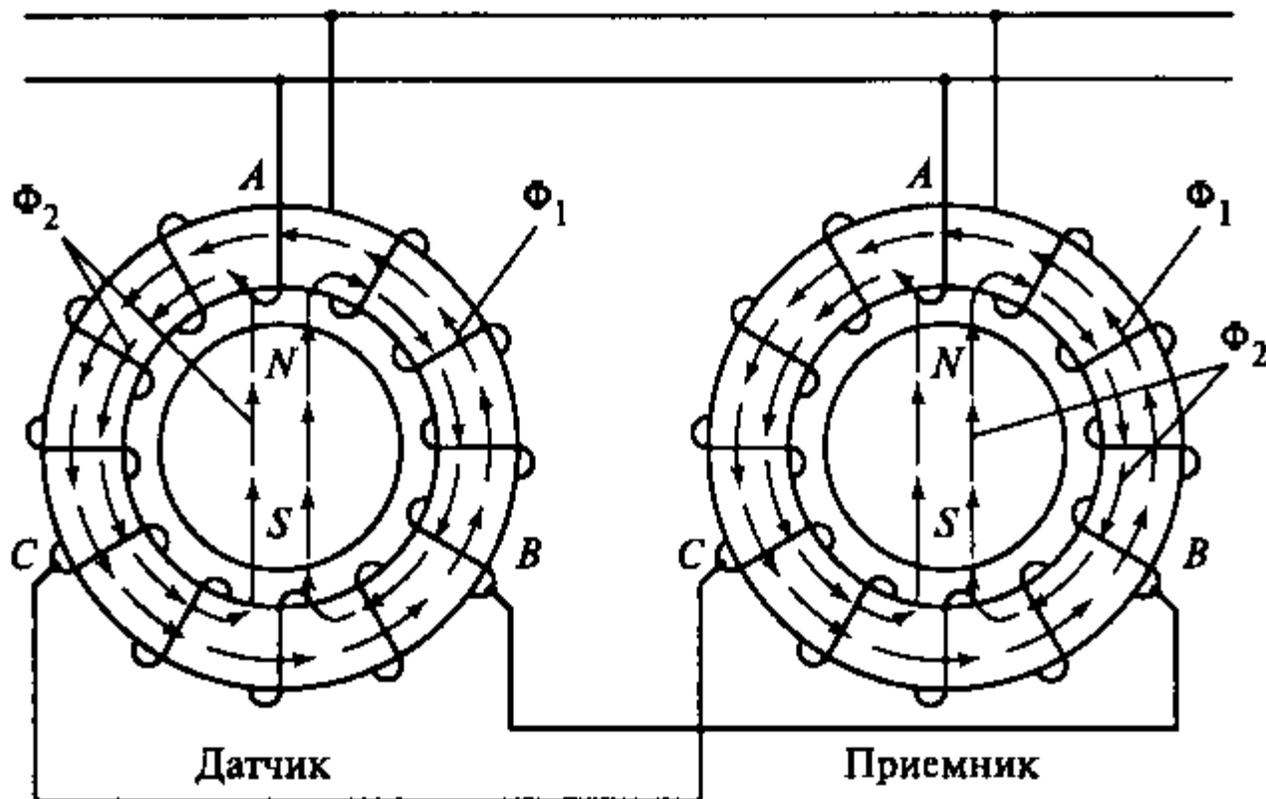
Величина потока постоянного магнита в сердечнике $\Phi_2 = F_{\text{ПМ}} \cdot \Lambda_M$

→ поток Φ_2 пульсирует с частотой $f_2 = 2f_1$

Пульсирующий поток Φ_2 наводит ЭДС E_2 двойной частоты $f_2 = 2f_1$ в витках обмотки

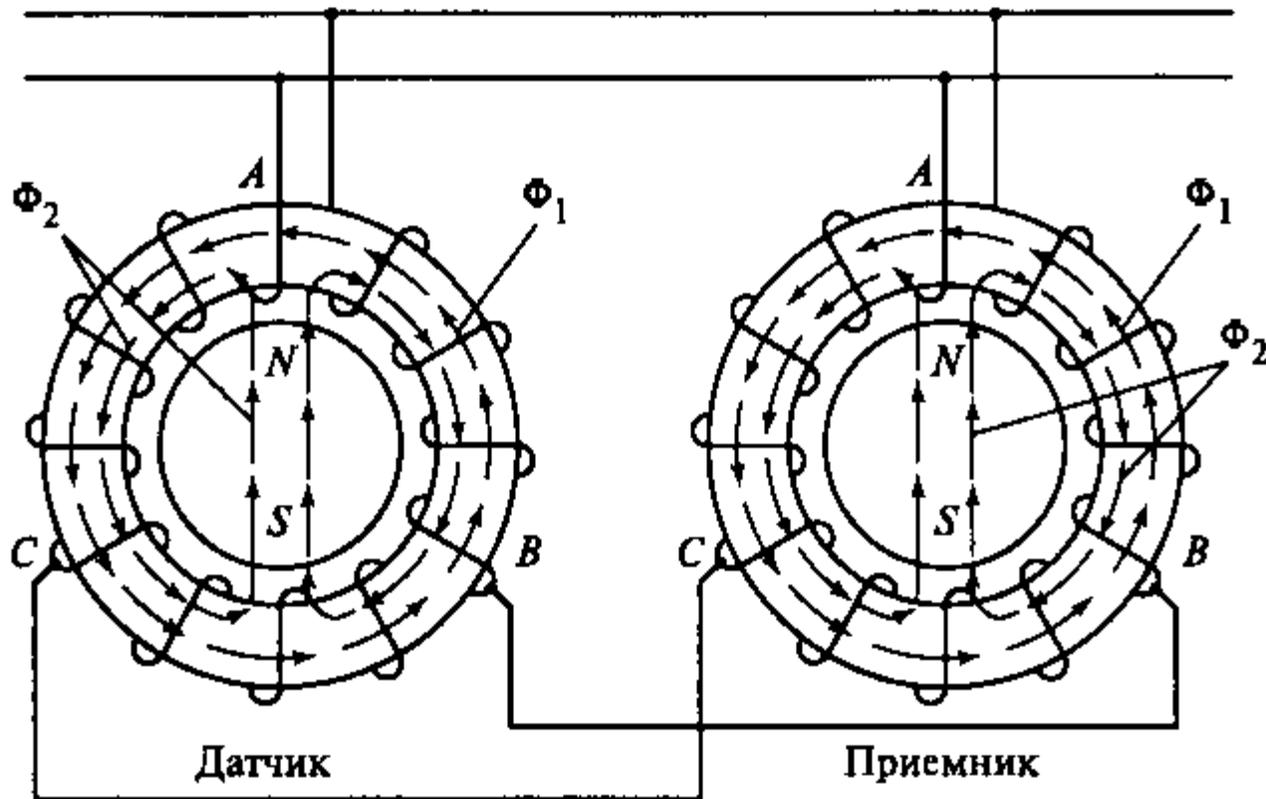
Разные фазы (AC, CB, BX) имеют разное потокоцепление с Φ_2 → в них наводятся разные ЭДС E_{AC}, E_{CB}, E_{BX}

Величина ЭДС зависит от положения ротора



Магнесины

При разных положениях ротора датчика и приемника (рассогласование) фазные ЭДС E_{AC} , E_{CB} , E_{BX} датчика и приемника различаются
→ в линиях связи возникают уравнительные токи частоты f_2



Взаимодействие токов фаз с потоком магнита Φ_2 создает синхронизирующий момент
→ ротор приемника поворачивается в согласованное положение, в котором ЭДС фаз уравновешены

Токи источника (с частотой f_1) в линиях связи отсутствуют, т.к. одноименные отпайки относительно U_c равнопотенциальны

Особенности магнесинов

- » Бесконтактная конструкция
- » Малые габариты и масса
- » Небольшой синхронизирующий момент
- » Погрешность на уровне (1...2,5) град.

Далее

Вращающиеся трансформаторы

👤 Ширинский С.В.

каф. ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

✉ ShirinskiiSV@mpei.ru

🔗 <https://e-200.ru/EMAU/>

