

# 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

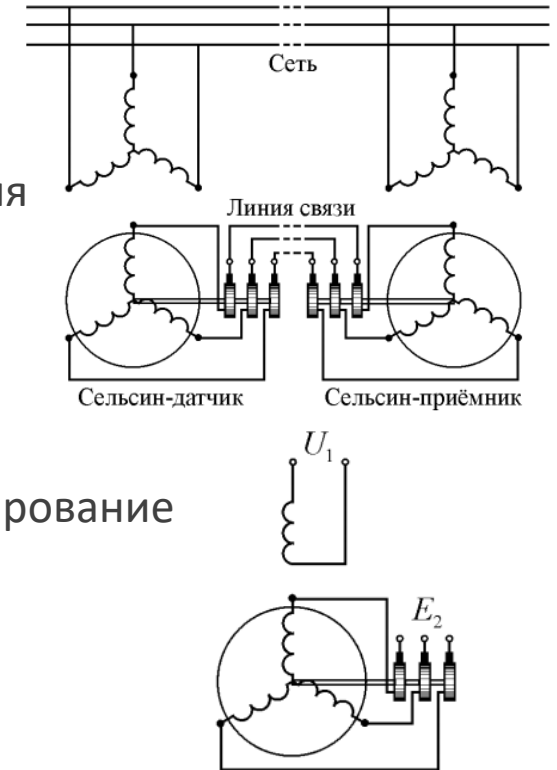
- неравенство синхронизирующих моментов при вращении ротора по полю или против
- малая динамическая устойчивость
- требуется 3-фазная сеть

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

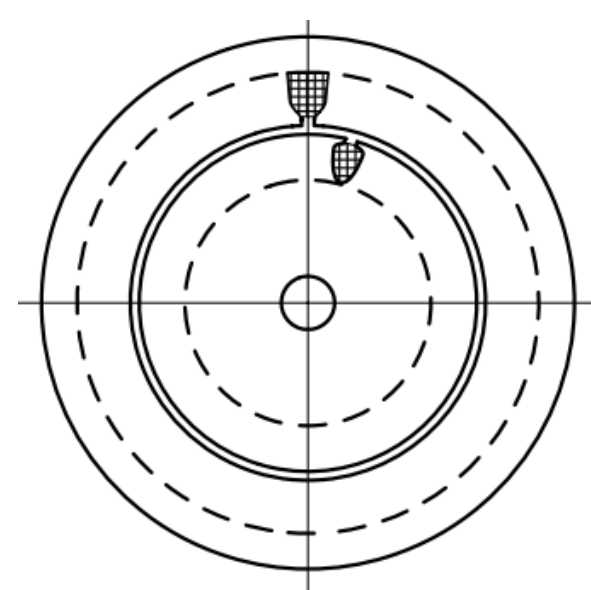
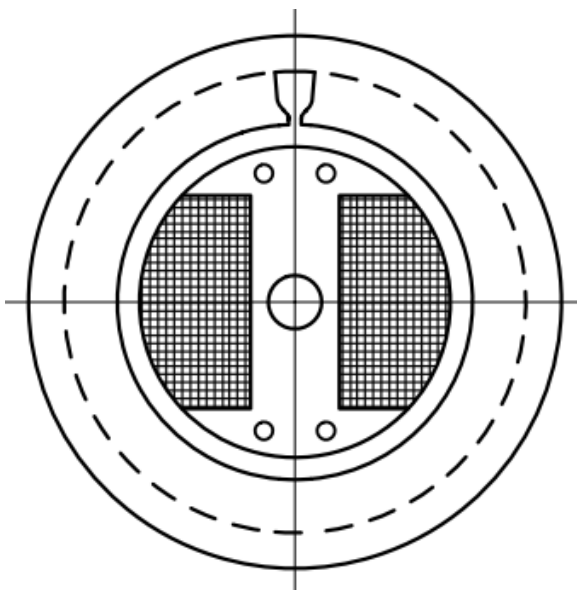
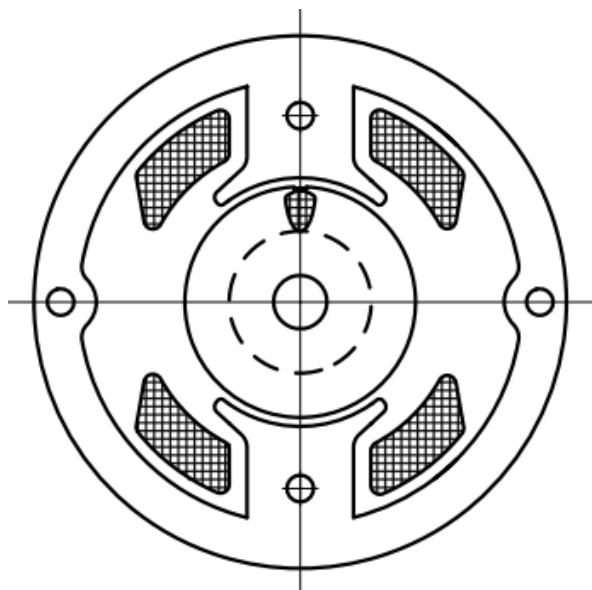
# Конструкции сельсинов

## 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)

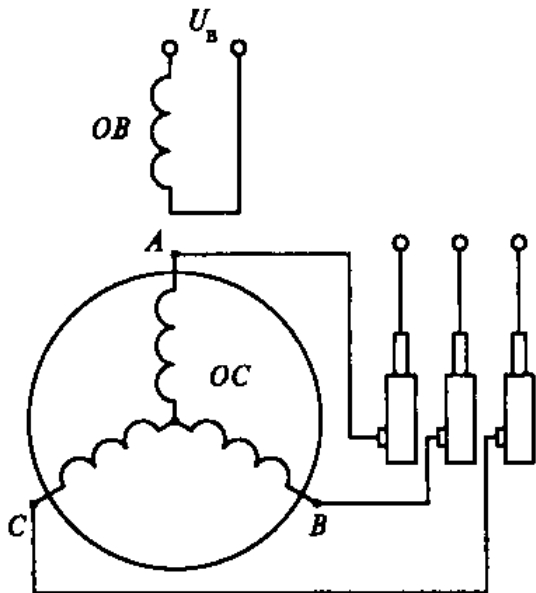
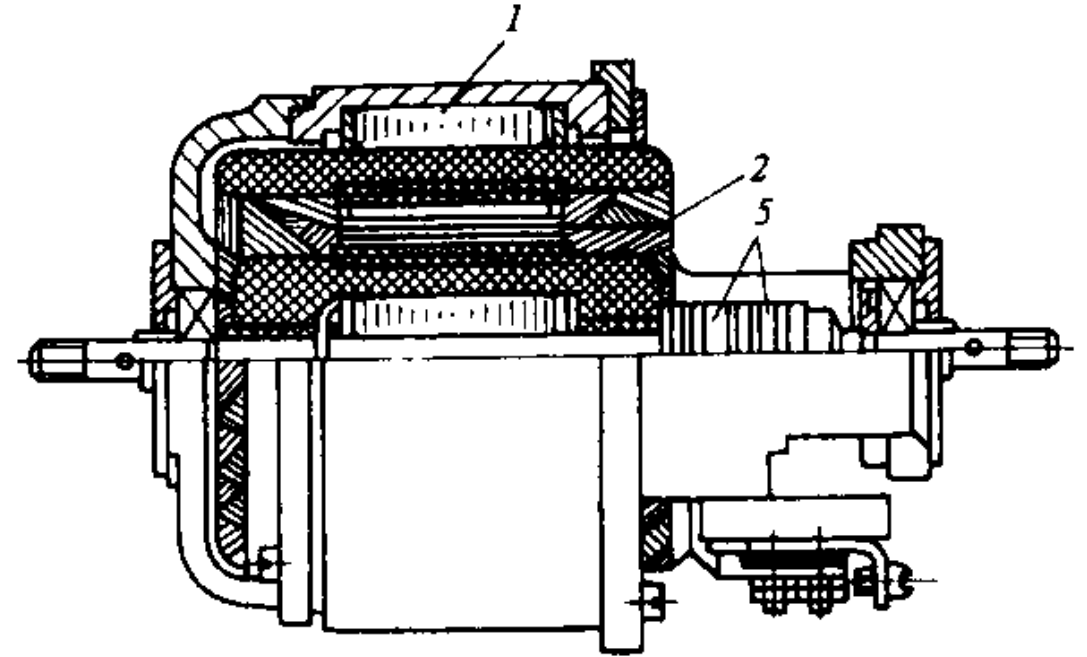
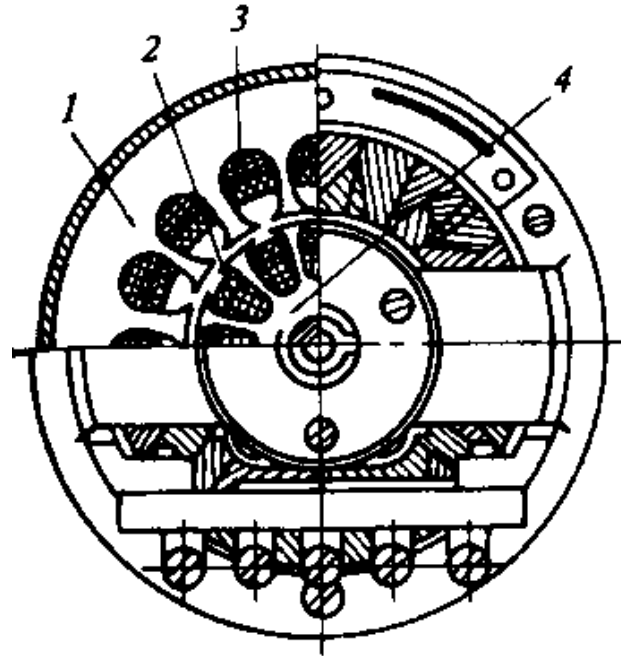
Все сельсины делают двухполюсными  
для однозначной синхронизации



# 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

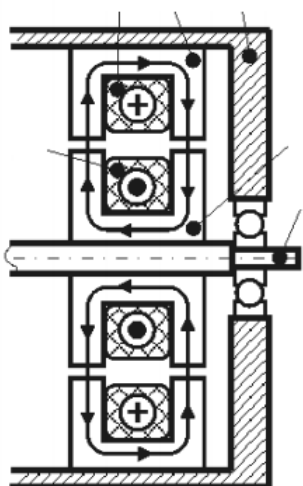
Для сглаживания недостатков – кольца и щетки из сплавов серебра

# Конструкции сельсинов

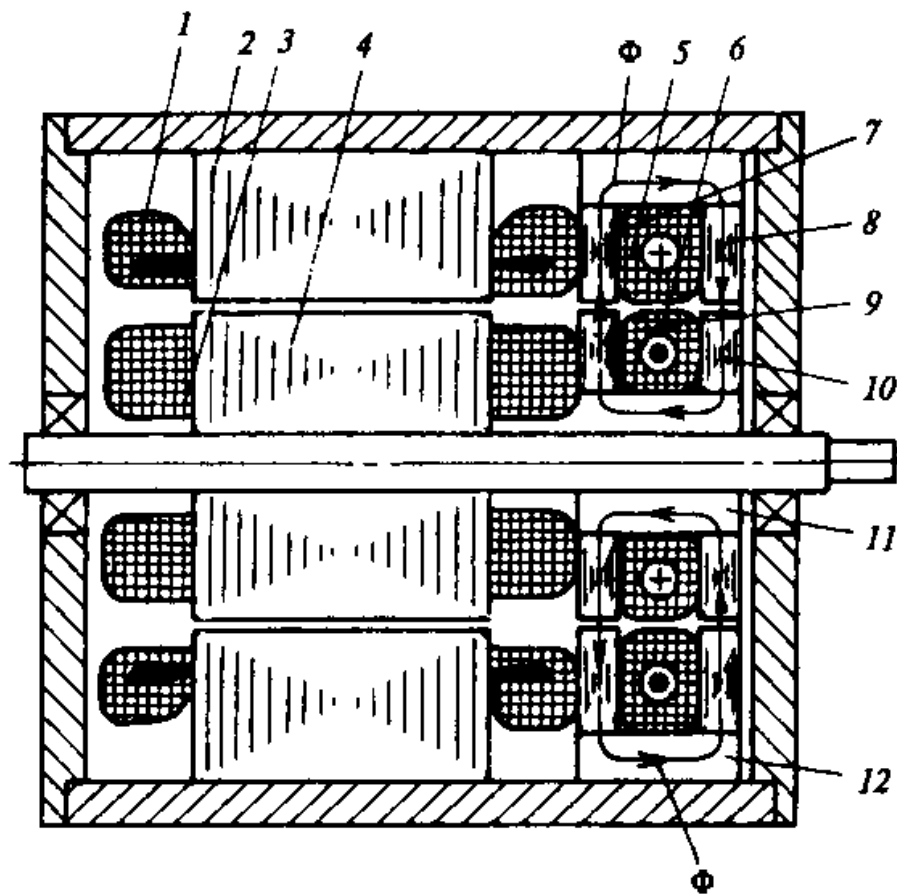
## Бесконтактные сельсины

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

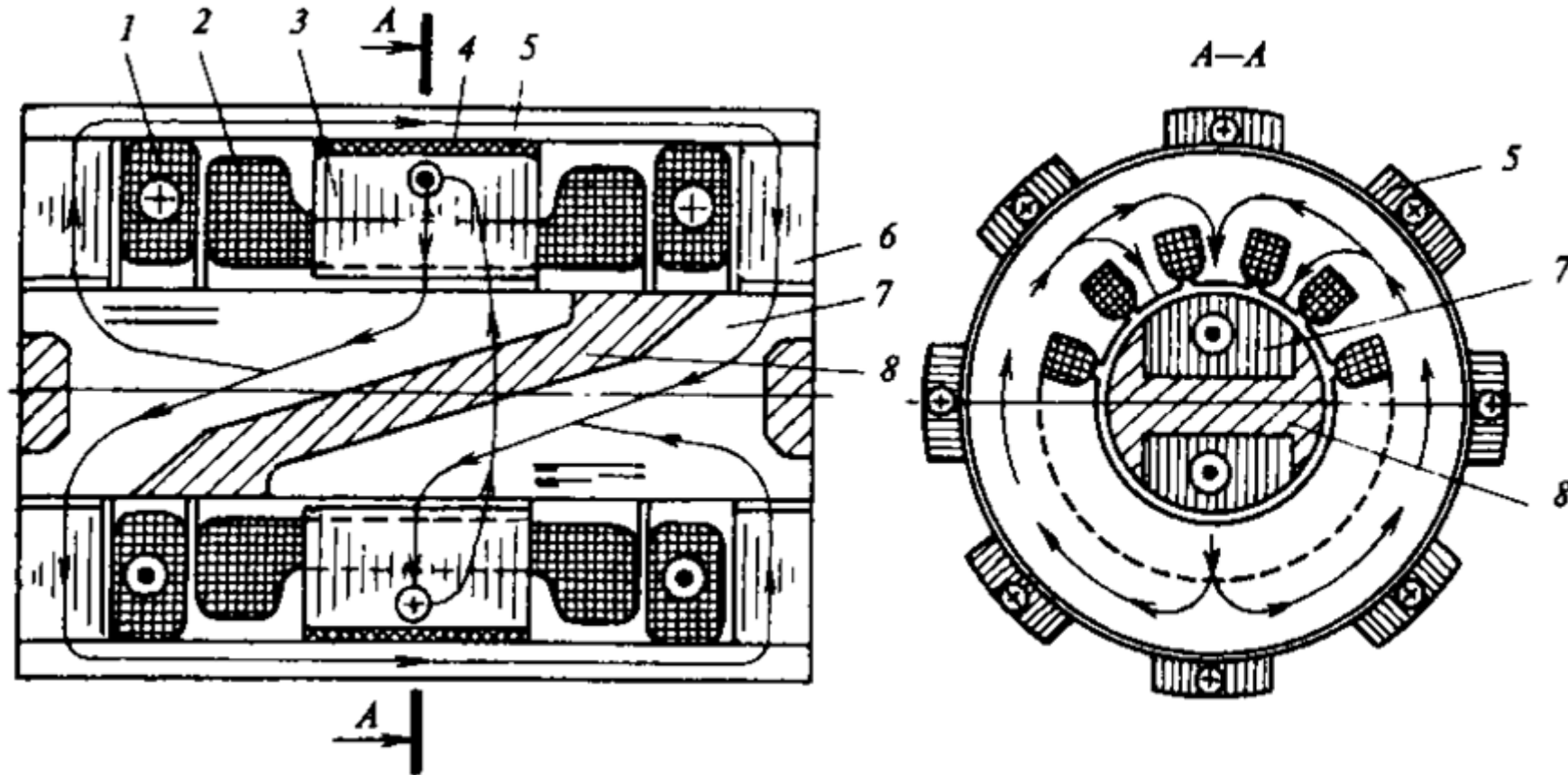
4 – немагнитный промежуток

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

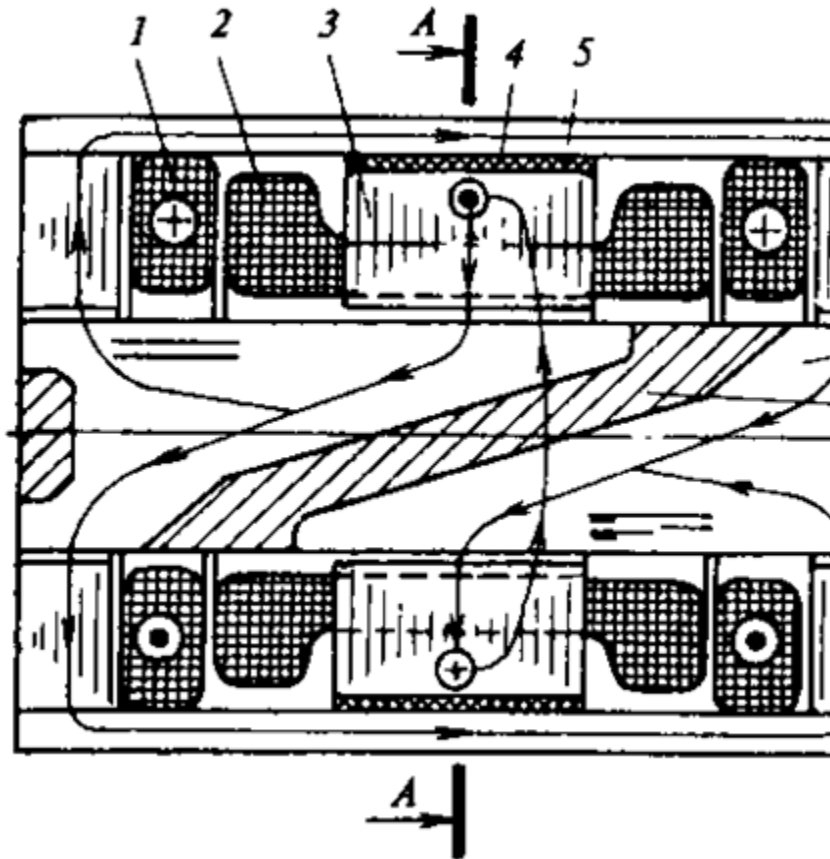
4 – немагнитный промежуток

5 – внешний магнитопровод  
(продольная шихтовка)

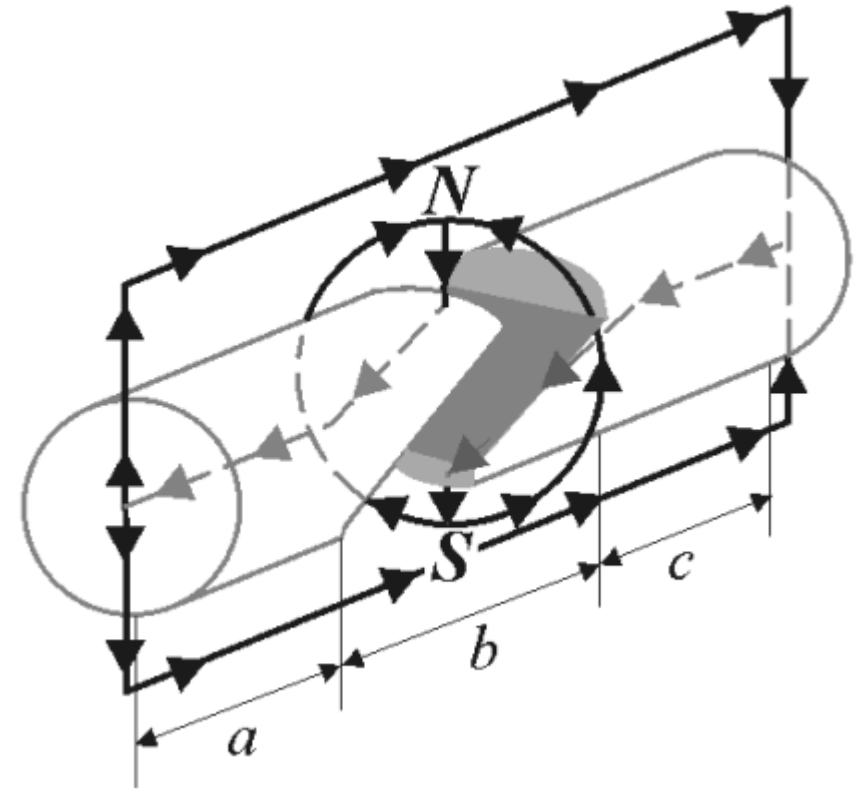
6 – торцевые магнитопроводы  
(поперечная шихтовка)

7 – двухполюсный ротор

8 – немагнитный промежуток  
(пластмасса/алюминий)



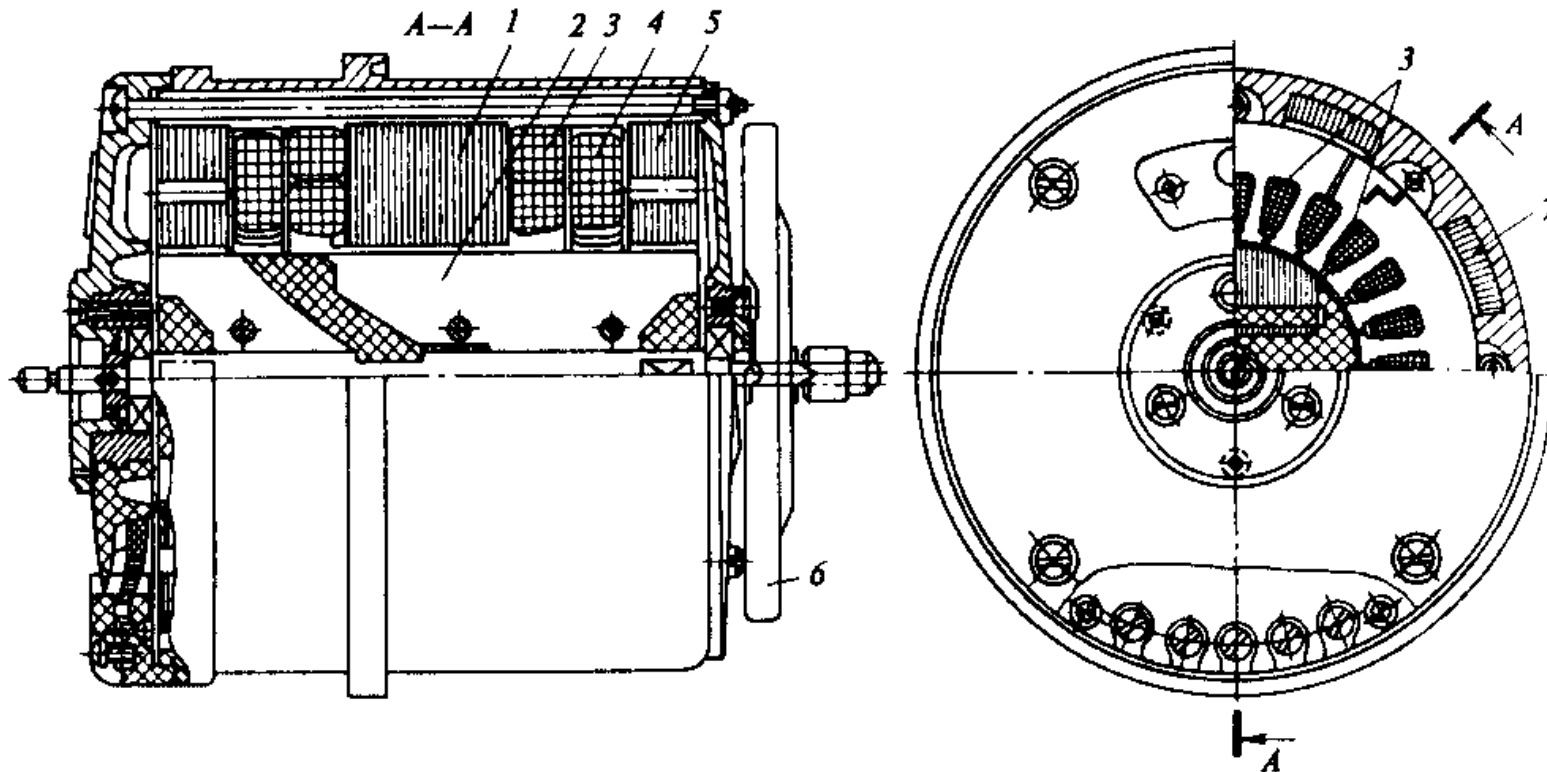
Замыкание магнитного потока



# 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  $\Phi$ )

# 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

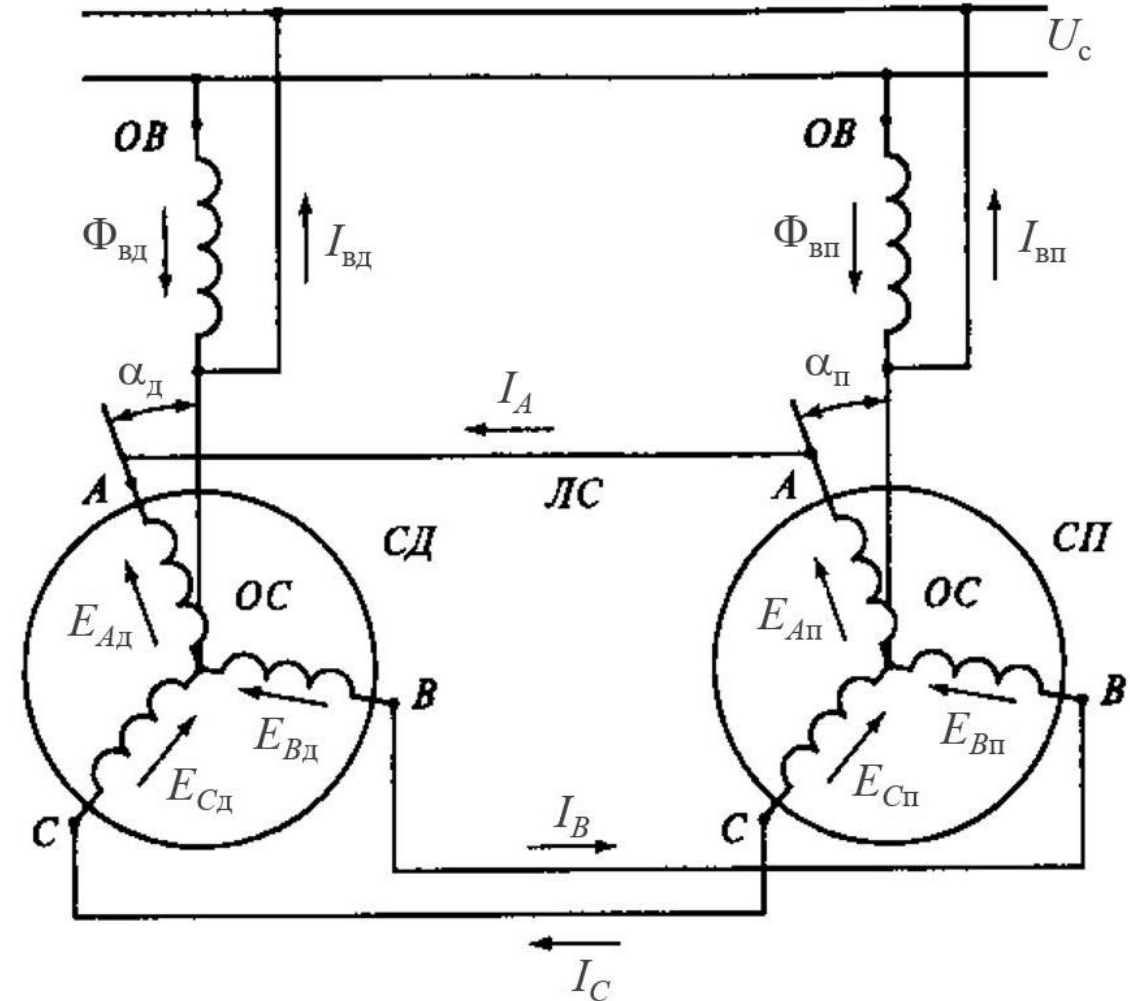
Фазы ОС имеют одинаковые эффективные числа витков

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

Положение вала характеризуется углом  $\alpha_D, \alpha_{II}$

– 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

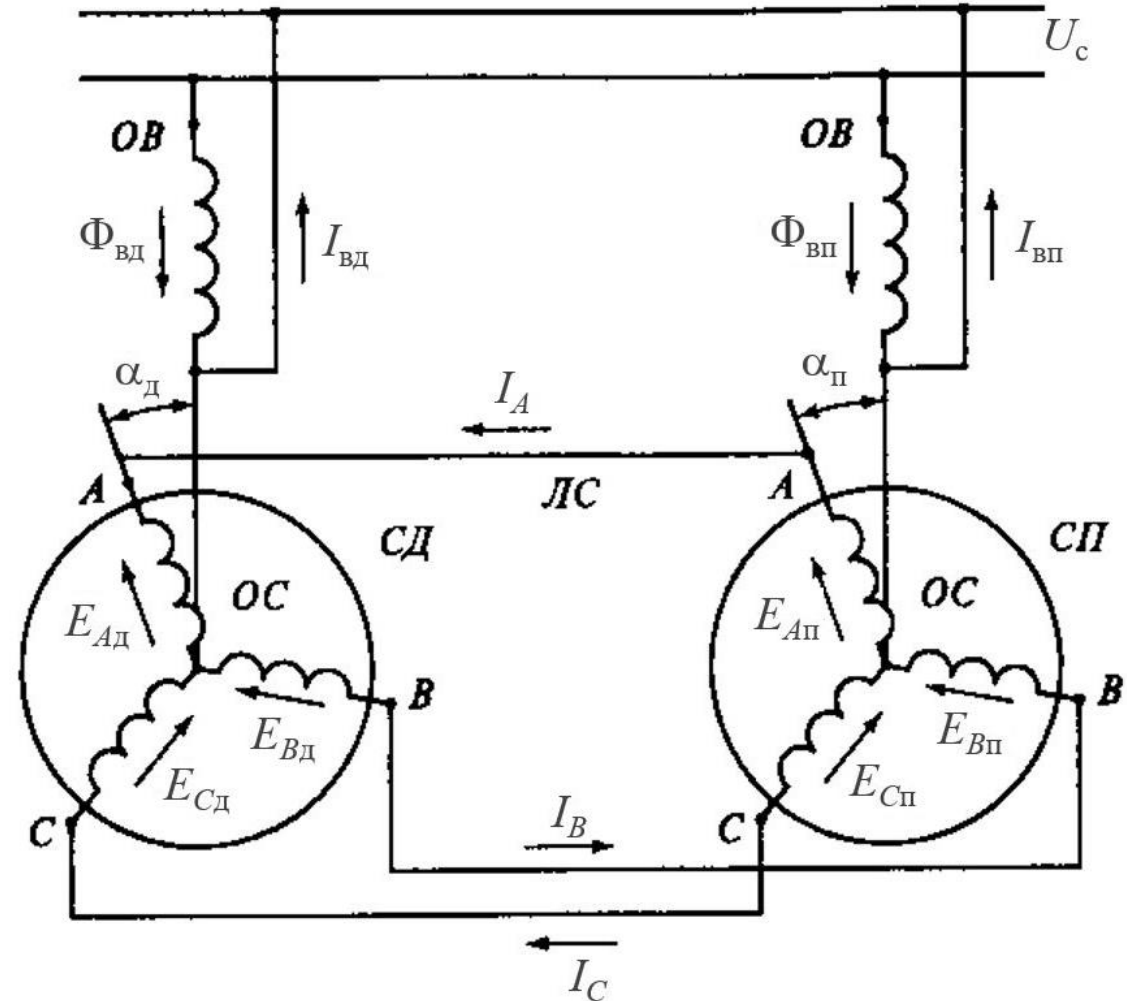
Наибольшая ЭДС любой фазы  $E_\phi$  получается при совпадении оси фазы с осью ОВ (с потоком)

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

ЭДС фаз различаются по величине, но совпадают по фазе (трансформаторная ЭДС, созданная одним потоком  $\Phi_B$ )

$$\begin{aligned} E_{Ад} &= E_\phi \cos \alpha_d & E_{Ап} &= E_\phi \cos \alpha_{п} \\ E_{Вд} &= E_\phi \cos(\alpha_d - 120^\circ) & E_{Вп} &= E_\phi \cos(\alpha_{п} - 120^\circ) \\ E_{Сд} &= E_\phi \cos(\alpha_d - 240^\circ) & E_{Сп} &= E_\phi \cos(\alpha_{п} - 240^\circ) \end{aligned}$$

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 ( $\alpha_{\text{д}} \neq \alpha_{\text{п}}$ ), появляется разность ЭДС

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

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

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

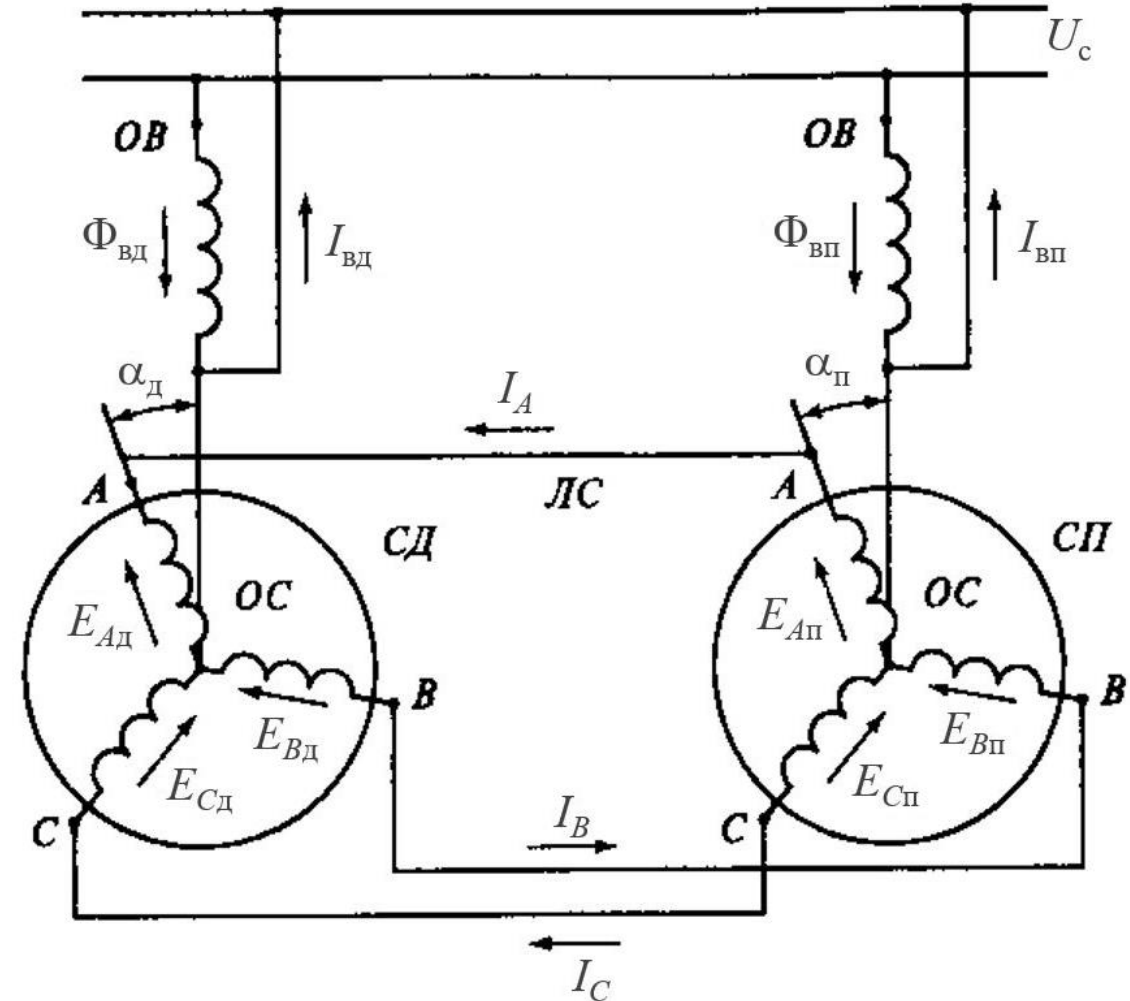
Введем понятие угла рассогласования  $\theta = \alpha_{\text{д}} - \alpha_{\text{п}}$

Тогда разность ЭДС можно записать как

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

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

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



# Индикаторный режим работы

Под действием  $\Delta E$  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)

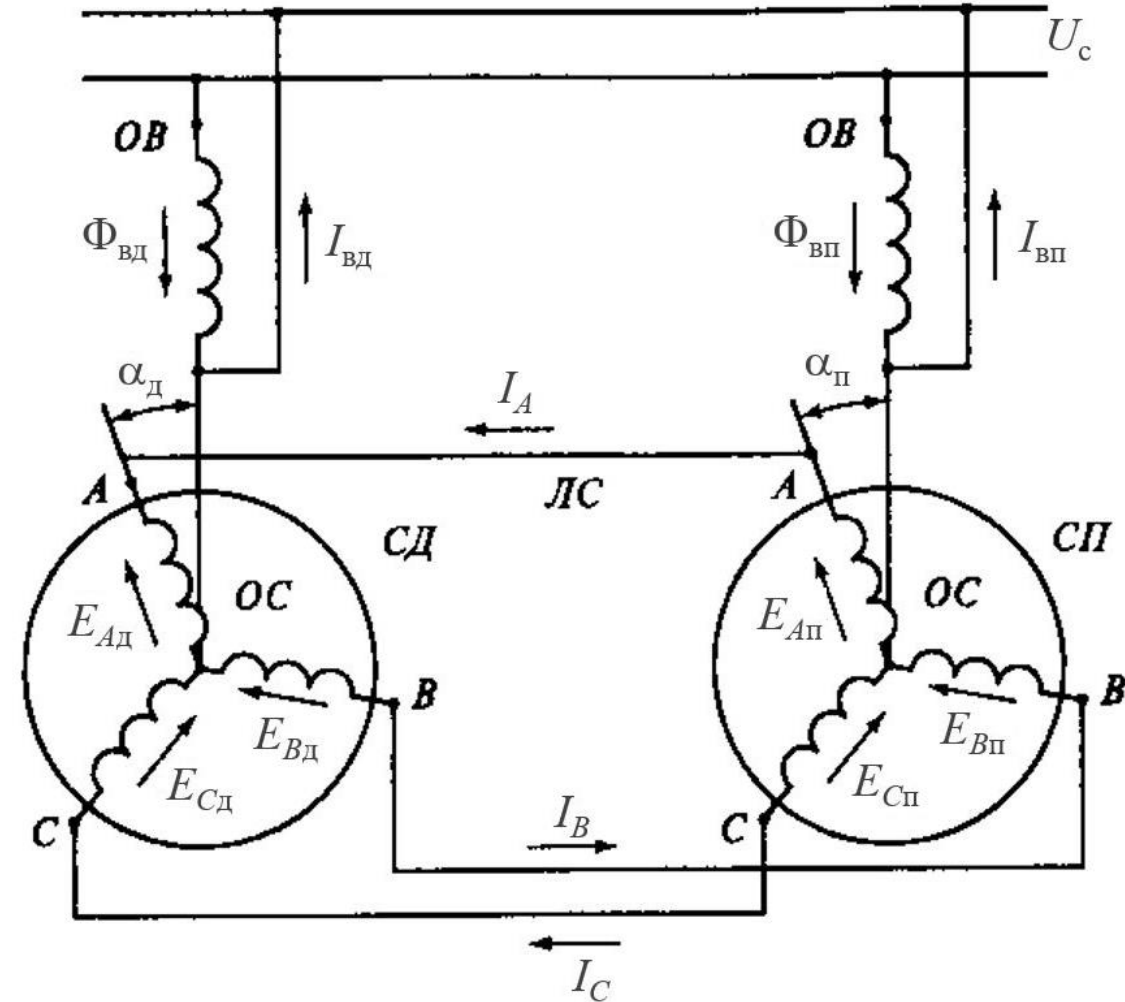
$$I_A = I_{\phi} \sin\left(\alpha_d - \frac{\theta}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2}$$

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

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

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

$$F_{Ad} = -F_{Aп} = 1,8I_A w_\phi$$

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

» составляющие МДС датчика

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

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

» составляющие МДС приемника

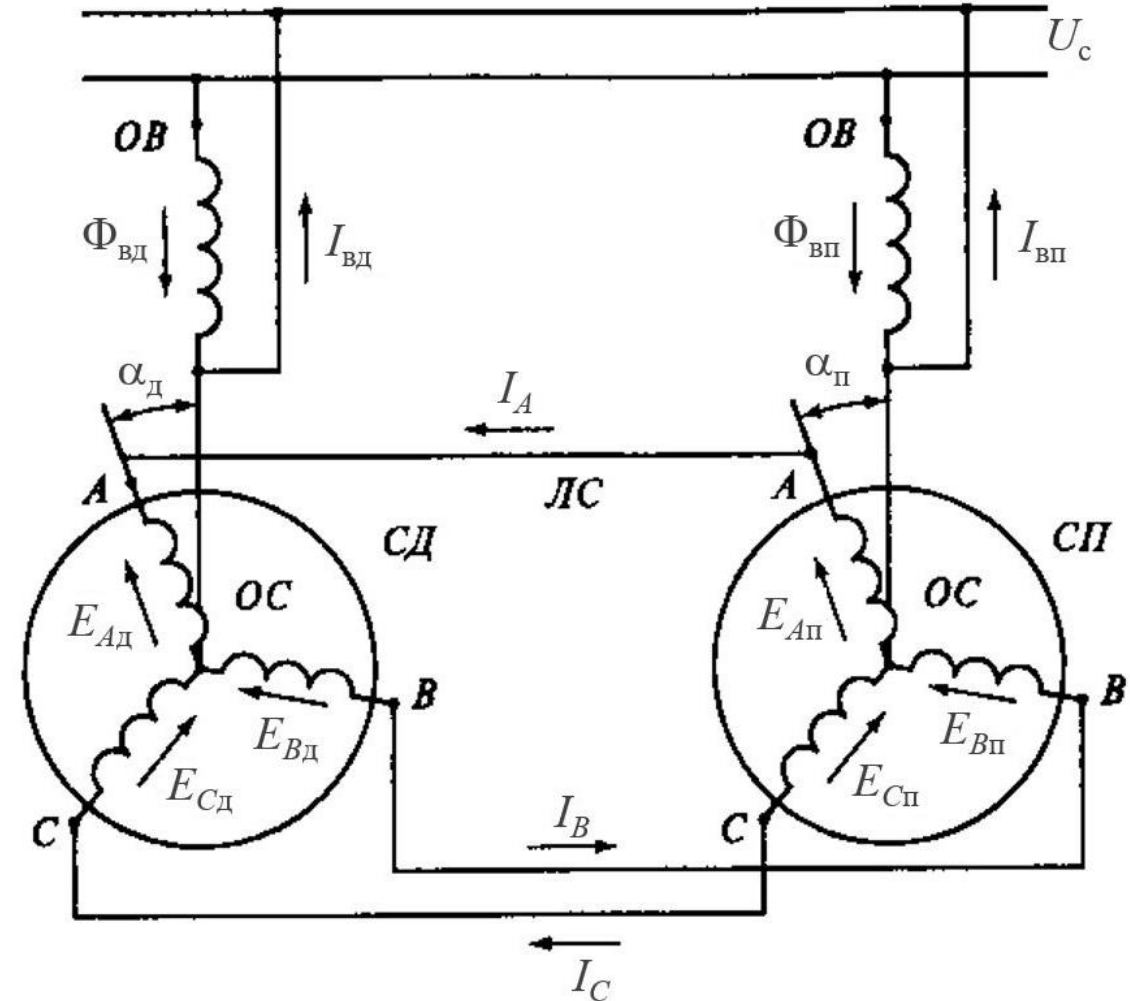
$$F_{dп} = F_A \cos \alpha_п + F_B \cos(\alpha_п - 120^\circ) + F_C \cos(\alpha_п - 240^\circ)$$

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

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  $F_q$

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

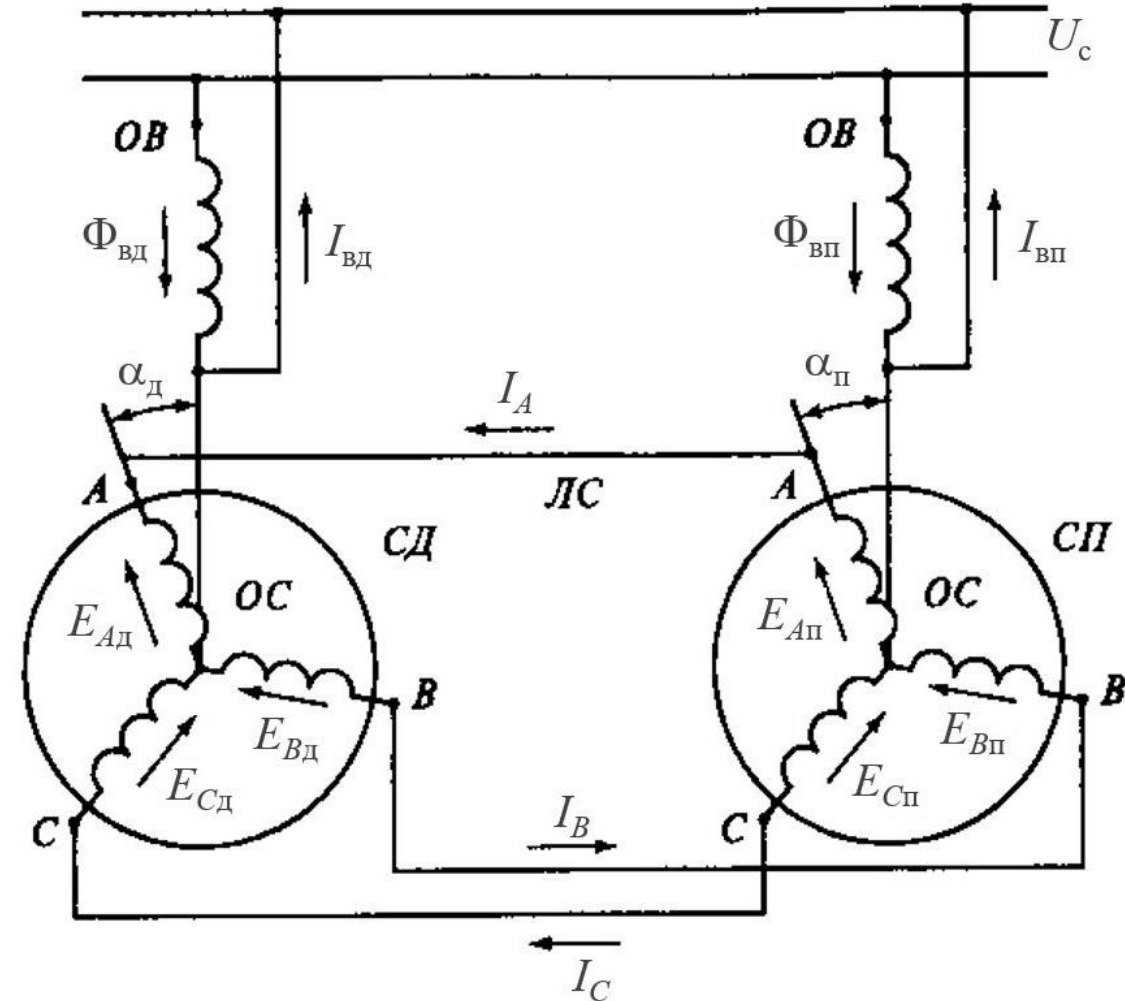
с потоком ОВ создает вращающий момент

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

– **синхронизирующий момент**  $M_c$

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

$\psi_{\phi}$  – временной угол между  $\Phi_{в}$  и уравнительным током  $I_{\phi}$   
(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  $\psi_\phi$ :  
» ЭДС в фазе отстает от  $\Phi_B$  на  $\pi/2$   
» ток в фазе отстает от ЭДС на  $\varphi_\phi$   
(определяется соотношением  $r_\phi$  и  $x_\phi$ )

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

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  $\theta$

# 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  $\theta_m$  – 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)

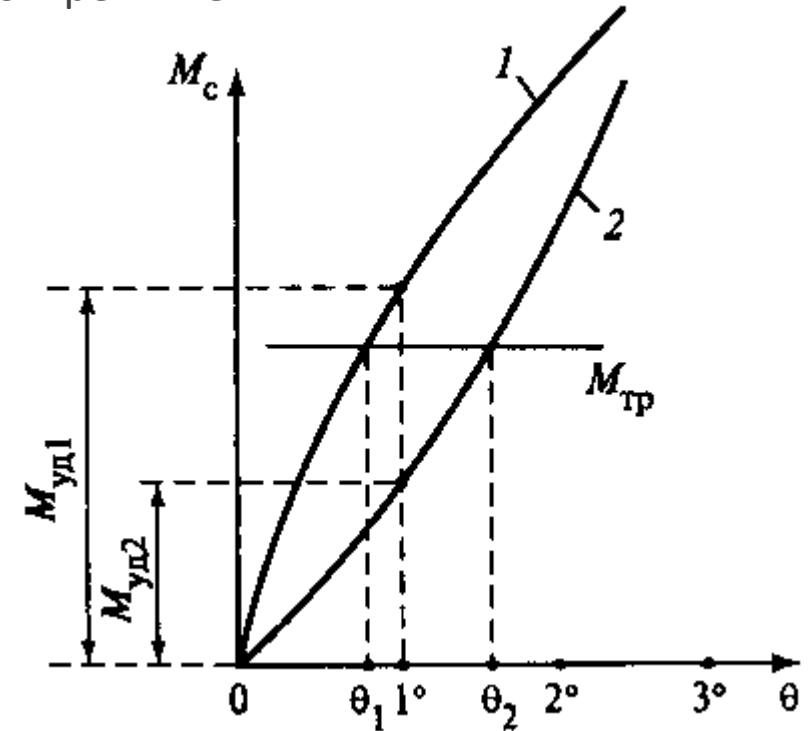
$$M_{удn} = \frac{2M_{уд1}}{1+n}$$

## 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  $\theta$  (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  $\Phi_B$  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  $\Phi_{ДС}$

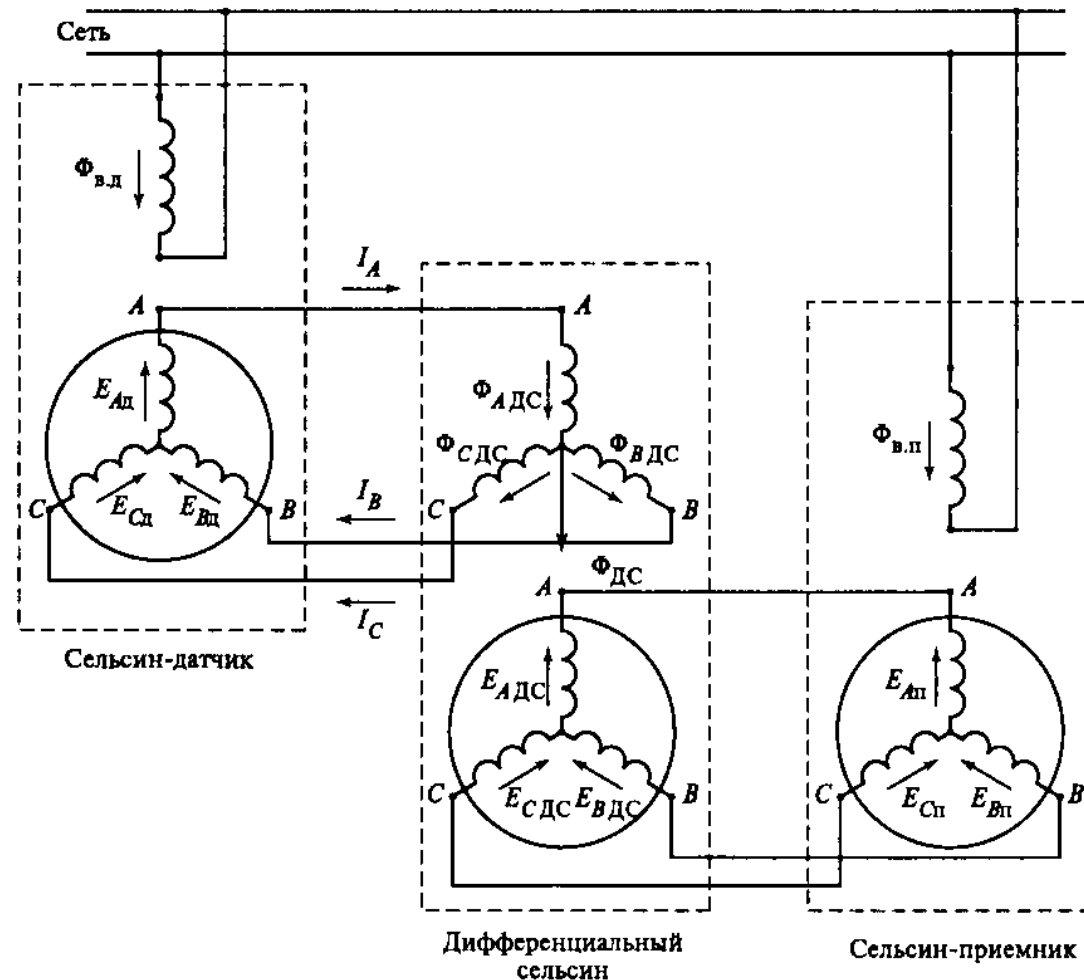
Направление  $\Phi_{ДС}$  определяется положением ОС датчика

$\Phi_{ДС}$  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

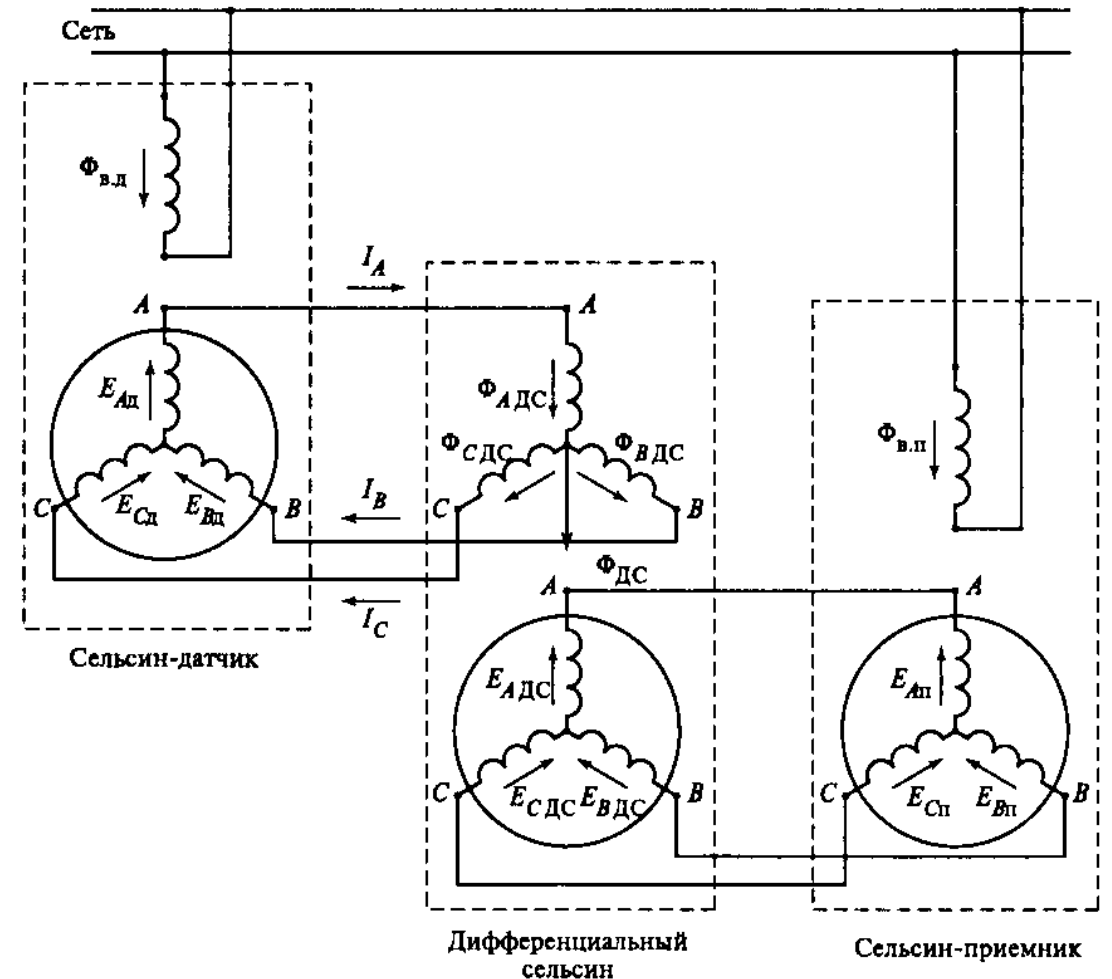




# Дифференциальный сельсин

- » 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

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



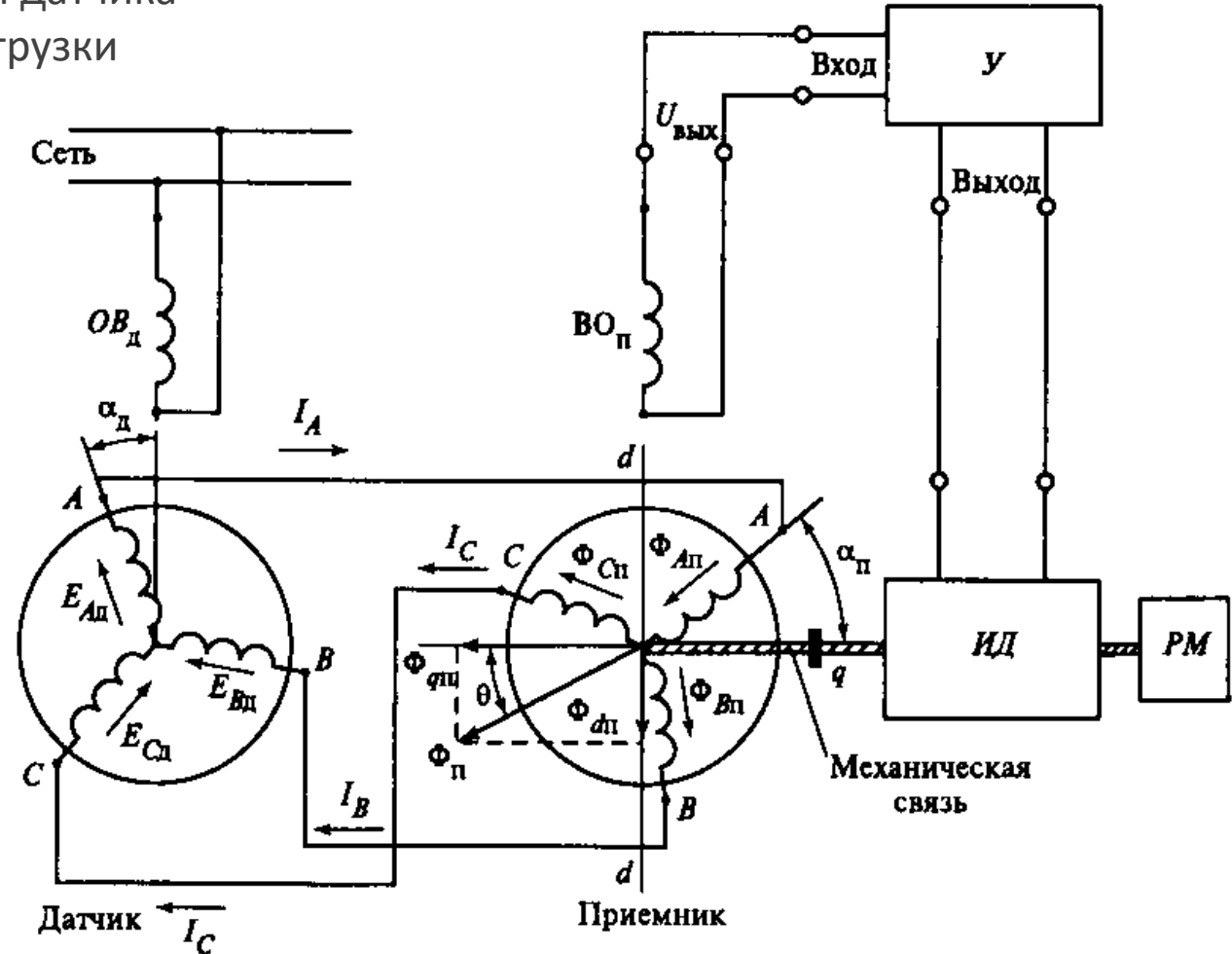
# Трансформаторный режим работы

# Трансформаторный режим работы

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

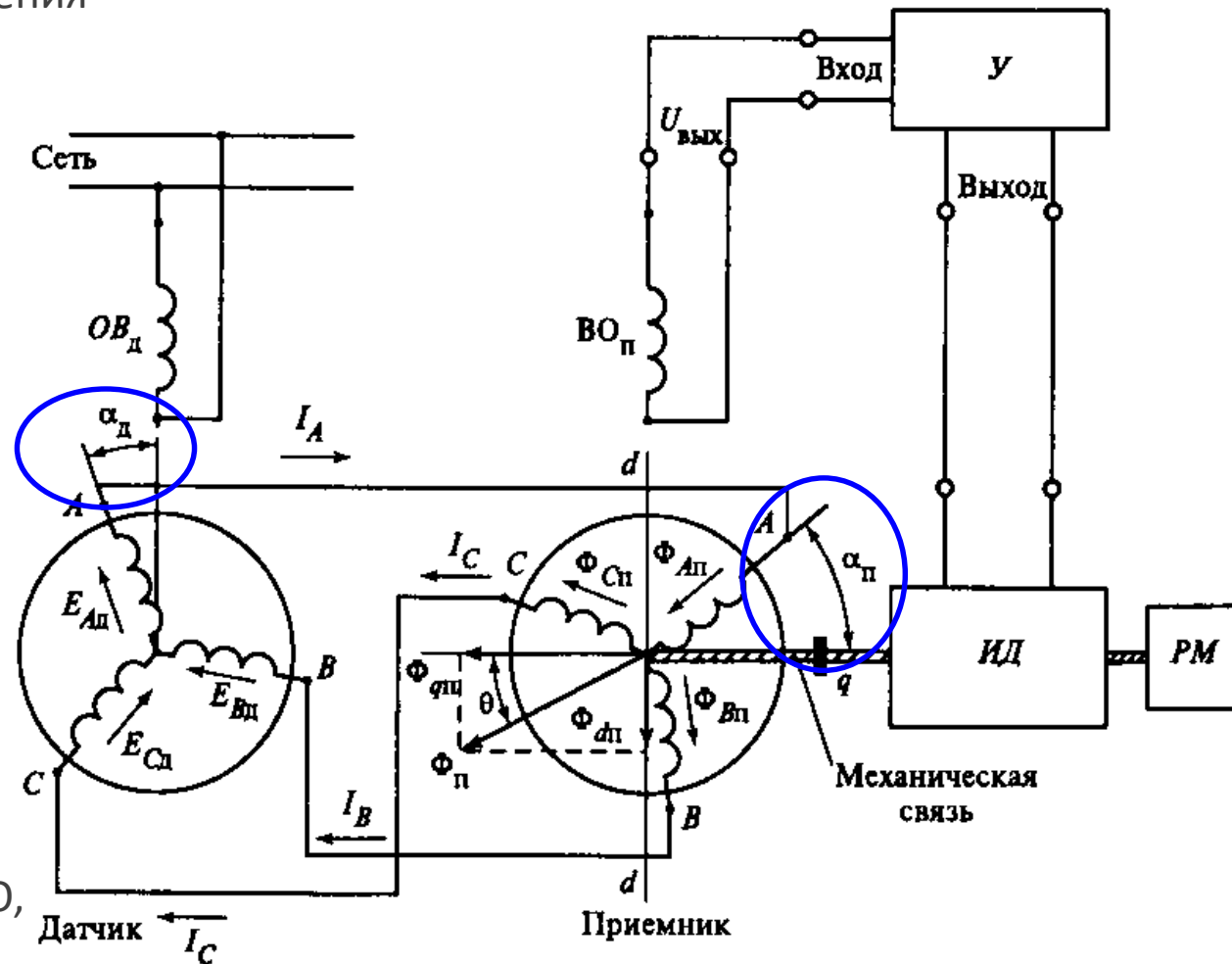
Сельсин-приемник конструктивно аналогичен датчику, но его обмотка возбуждения используется как выходная обмотка (ВО)

- » в ВО наводится ЭДС, зависящая от  $\alpha$
- » 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  $\Phi_d$
- »  $\Phi_d$  наводит ЭДС в фазах ОС  $E_{Ad}, E_{Bd}, E_{Cd}$ , зависящие от положения ротора датчика  $\alpha_d$
- » 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  $\Phi_{II}$ , направление которого определяется углом  $\alpha_{II}$
- »  $\Phi_{II}$  пульсирует с частотой сети и наводит ЭДС в ВО
- » При одинаковых положениях датчика и приемника направление  $\Phi_{II}$  совпадает с направлением  $\Phi_d$  (и  $\Phi_{II}$  по оси  $d$  наводит максимальную ЭДС в ВО)
- » *Согласованное положение* датчика и приемника соответствует  $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ , когда  $\Phi_{II}$  перпендикулярен ВО, т.е. когда ротор приемника повернут на  $90^\circ$  относительно ротора датчика



- »  $\alpha_d$  – относительно оси  $d$  датчика
- »  $\alpha_{II}$  – 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  $\alpha_d$

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  $F_{A\Pi} = F_\phi \cos \alpha_d$

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

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

$$Z_{\phi d} + \frac{Z_\pi}{2} = Z_{\phi \Pi} + \frac{Z_\pi}{2} = Z_\phi$$

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  $\alpha_{\Pi}$

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

– 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  $\Lambda_d$  – 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  $\Phi_{\Pi}$  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  $F_{\Pi}$  (и полный поток  $\Phi_{\Pi}$ ) не зависит от угла рассогласования  $\theta$
- » От угла рассогласования  $\theta$  зависит направление МДС  $F_{\Pi}$  (и потока  $\Phi_{\Pi}$ )
- » Вектор результирующей МДС (и потока) направлен под углом  $\theta$  к поперечной оси  $q$

# Трансформаторный режим работы

Если ротор датчика поворачивается, а ротор приемника еще неподвижен (появляется  $\theta$ )

→ полный поток приемника  $\Phi_{\Pi}$  поворачивается на тот же угол  $\theta$ , но в противоположном направлении

Если ротор датчика неподвижен, а ротор приемника поворачивается

→ полный поток приемника  $\Phi_{\Pi}$  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 ( $\alpha_{\Pi}$  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  $w_{ВО}$ ,

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

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

Удельная выходная мощность – наибольшая мощность, которую может отдать ВО 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

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

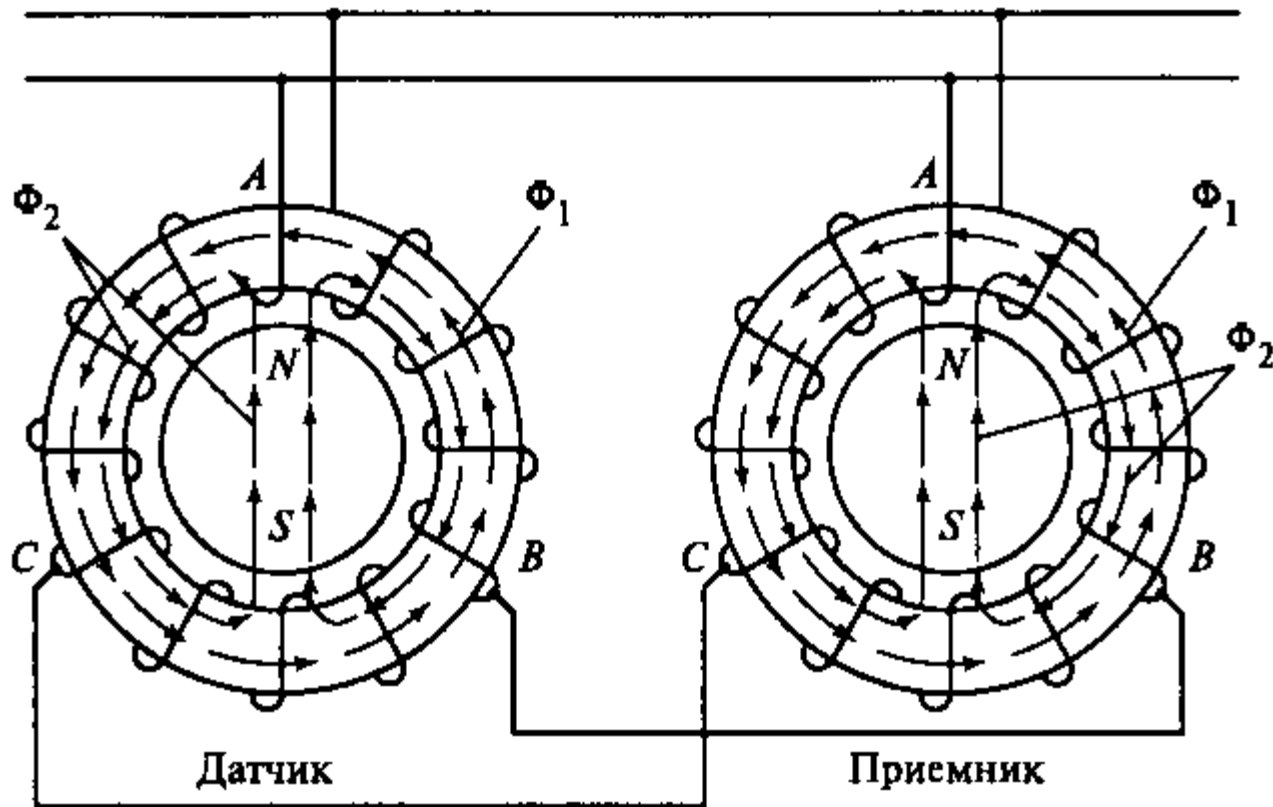
- » правильный выбор параметров обмоток
- » снижение частоты вращения роторов
- » повышение частоты сети (чтобы увеличить  $E_{\text{тр}}$ )

# 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  $120^\circ$  с равным числом витков между ними и началом и концом обмотки) → разбивают обмотку на 3 фазы, распределенные по окружности
- » сердечник сильно насыщается при потоке  $\Phi_{1m}$

Ротор

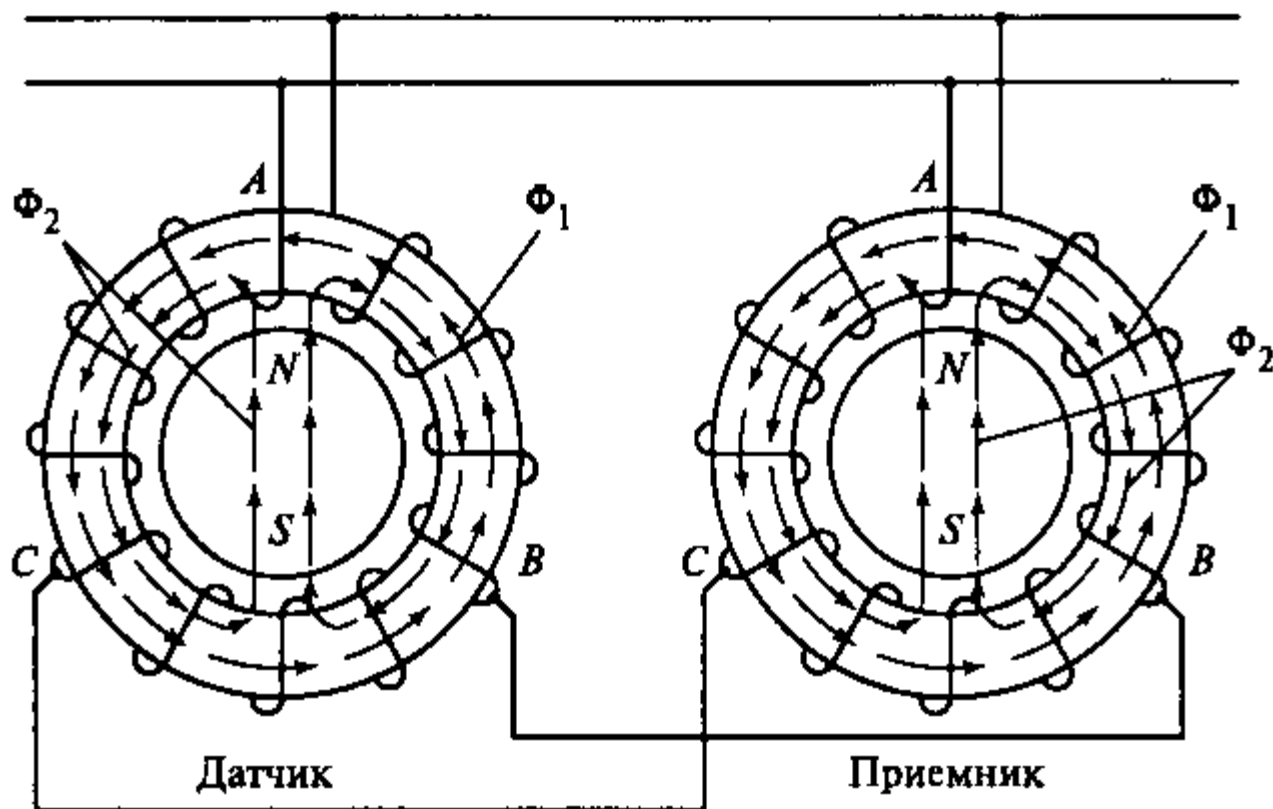
- » цилиндрический постоянный магнит (двухполюсный)

# Магнесины

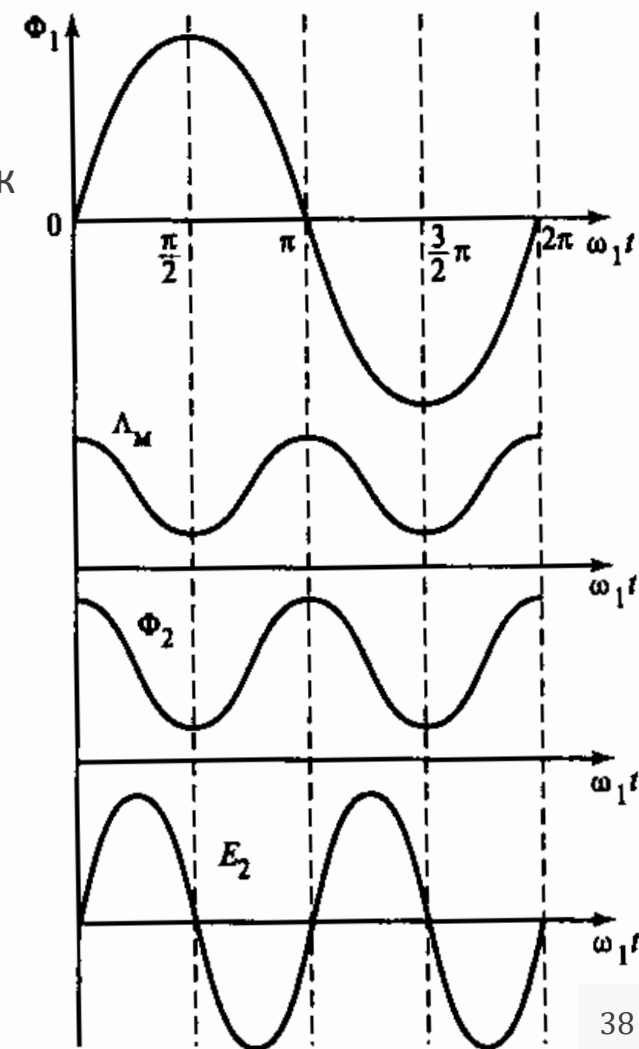
Переменный ток обмотки статора создает пульсирующий поток  $\Phi_1$  (с частотой  $f_1$ )

Постоянный магнит создает свой поток  $\Phi_2$

Пульсирующий поток  $\Phi_1$  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  $\Phi_1$  (с частотой  $f_1$ ) его магнитная проводимость  $\Lambda_M$  изменяется дважды за период (с частотой  $f_2 = 2f_1$ )

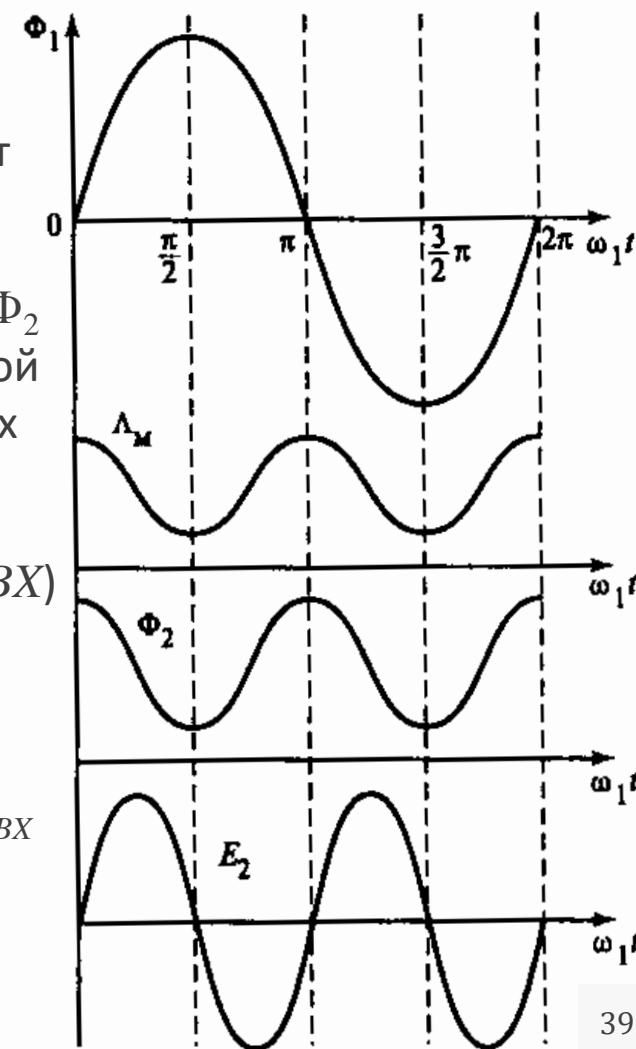
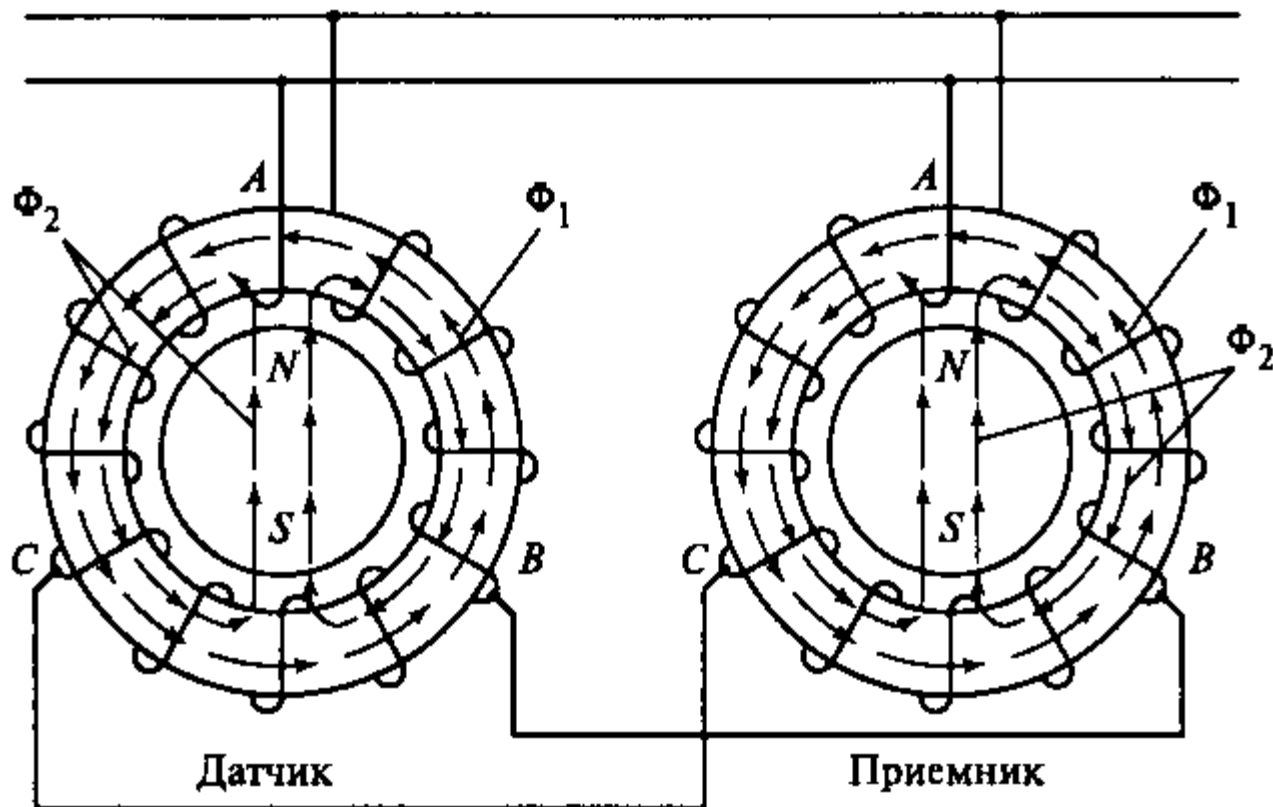
Величина потока постоянного магнита в сердечнике  $\Phi_2 = F_{\text{ПМ}} \cdot \Lambda_M$

→ поток  $\Phi_2$  пульсирует с частотой  $f_2 = 2f_1$

Пульсирующий поток  $\Phi_2$  наводит ЭДС  $E_2$  двойной частоты  $f_2 = 2f_1$  в витках обмотки

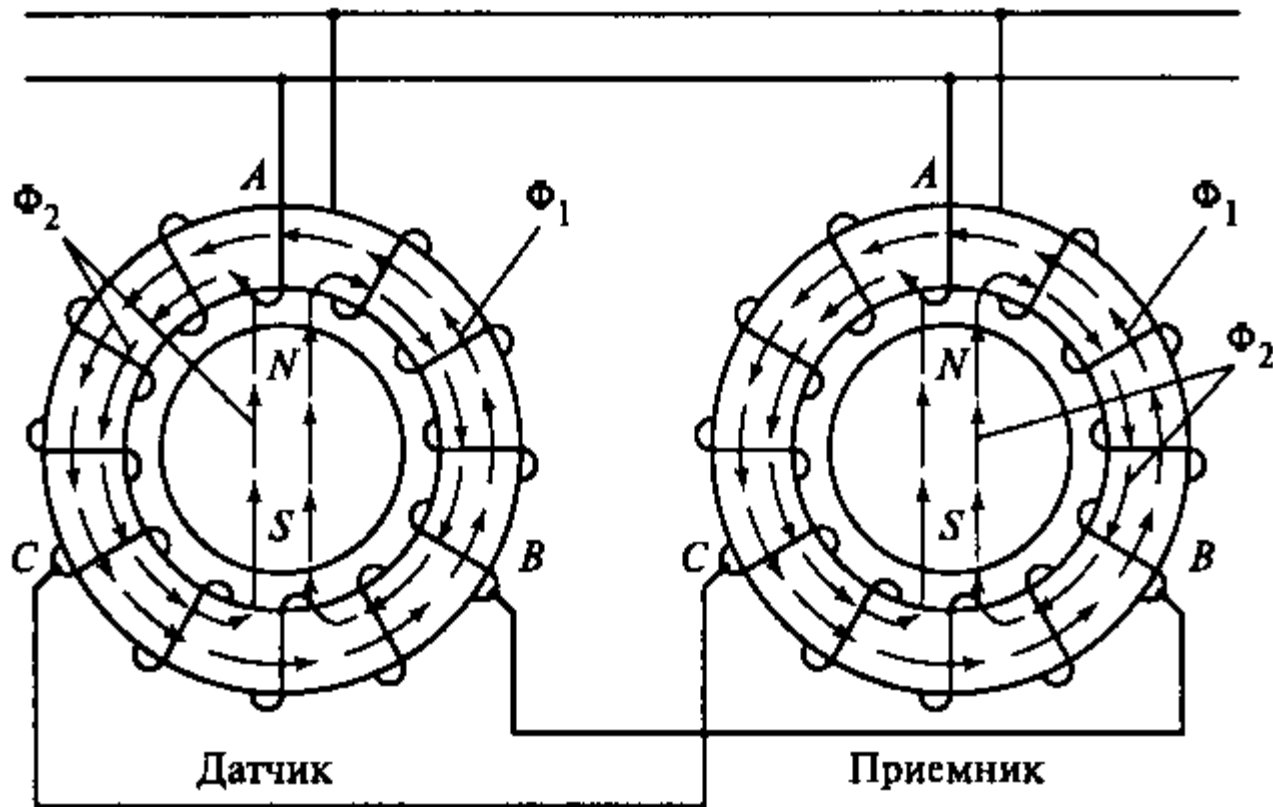
Разные фазы (AC, CB, BX) имеют разное потокоцепление с  $\Phi_2$  → в них наводятся разные ЭДС  $E_{AC}, E_{CB}, E_{BX}$

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 уравнивающие токи частоты  $f_2$



Взаимодействие токов фаз с потоком магнита  $\Phi_2$  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

🔗 [elmech.mpei.ac.ru/EMAU/](http://elmech.mpei.ac.ru/EMAU/)  
([srv0-5.mpei.ac.ru/EMAU/](http://srv0-5.mpei.ac.ru/EMAU/))

