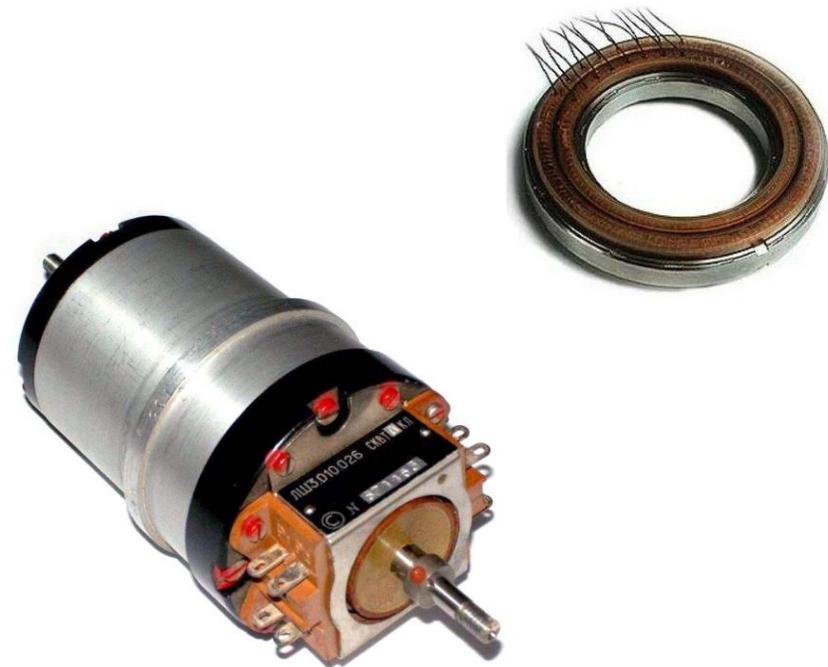


Вращающиеся трансформаторы

Информационные машины



Вращающиеся трансформаторы

Как и все *информационные машины* ВТ осуществляют преобразование сигнала механического (угол поворота) в электрический (выходное напряжение) при обеспечении требуемой функциональной зависимости

Основные требования к вращающимся трансформаторам

- » ВТ для счетно-решающих устройств
 - точность воспроизведения функциональной зависимости
- » ВТ для систем дистанционных передач
 - точность обработки приемником сигнала датчика
- » Классификация ВТ по функциональной зависимости
 - синусно-косинусные (СКВТ): $U_A = U_m \sin \alpha$, $U_B = U_m \cos \alpha$
 - линейные (ЛВТ): $U_{\text{ВЫХ}} = c \cdot \alpha$ ($c = \text{const}$)
- » Режимы работы ВТ
 - преобразование координат
 - масштабирование
 - фазовращатель
 - трансформаторная синхронная передача

Режим работы и характеристики ВТ зависят от схемы соединения

ВТ – высокоточные информационные ЭМ
→ повышенные требования к конструктивному исполнению и технологии изготовления

Конструкции вращающихся трансформаторов

Конструкции вращающихся трансформаторов

Двухполюсные ВТ

- » всегда с распределенными обмотками

Многополюсные ВТ

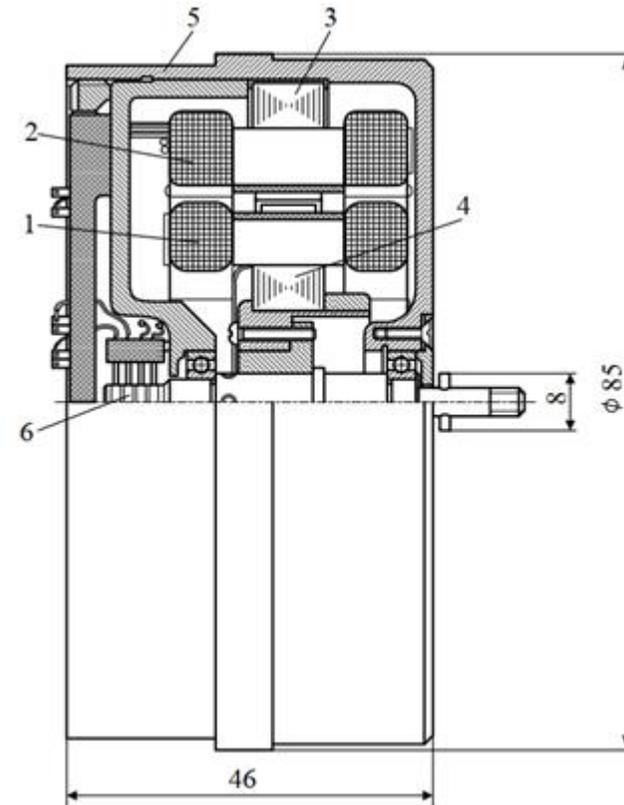
- » до $p = 4$ – распределенные обмотки
- » для больших p (до 60...180) – сосредоточенные обмотки
- » многополюсные с электромагнитной редукцией – индукционный редуктосин, индуктосин

Двухполюсные ВТ

– конструкция аналогична АД с фазным ротором

Особенности конструкции ВТ

- » 2-фазная ЭМ: в пазах статора и ротора по две взаимно-перпендикулярные обмотки
- » Синусные концентрические обмотки – обеспечивают синусоидальную форму МДС
- » Шихтованные сердечники с веерной сборкой листов (min анизотропия)
- » Ненасыщенный магнитопровод (min нелинейность)
- » Скос пазов на t_z



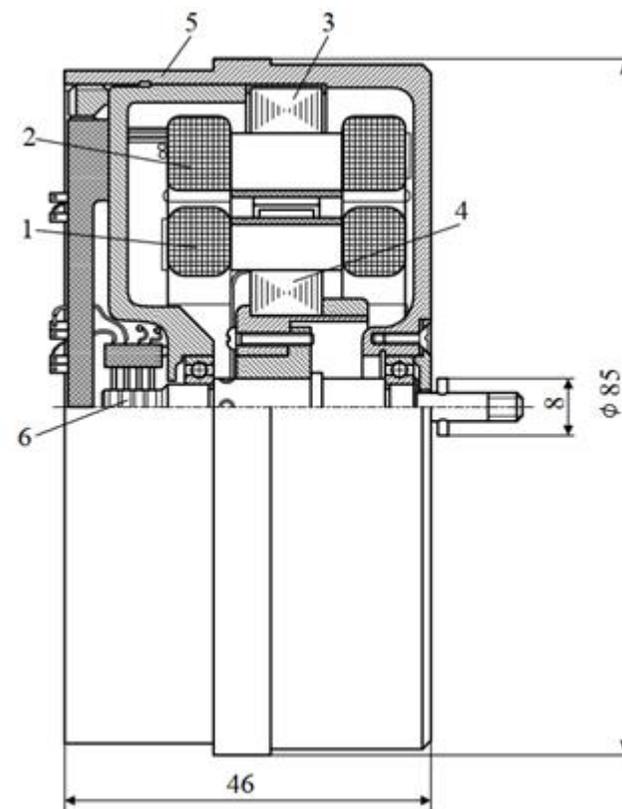
- 1 – обмотка ротора
- 2 – обмотка статора
- 3 – сердечник статора
- 4 – сердечник ротора
- 5 – корпус
- 6 – контактные кольца

Конструкции вращающихся трансформаторов

Двухполюсные ВТ

Особенности токосъема

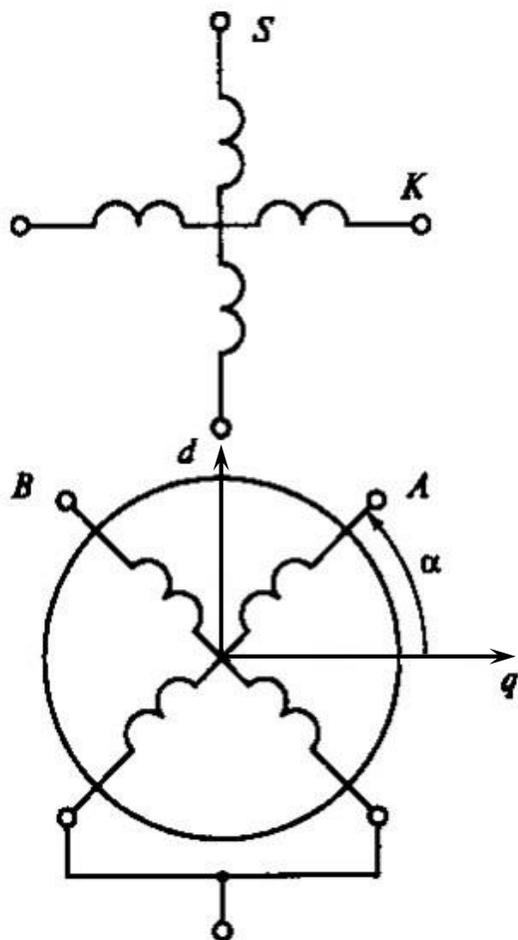
- » при неограниченном угле поворота ротора
 - щетки и контактные кольца
 - металлические щетки
 - материалы – сплавы серебра, покрытия – платина (малое переходное сопротивление контакта, стабильность свойств скользящего контакта)
 - только 3 контактных кольца, если 2 обмотки ротора имеют общее соединение
 - низкая частота вращения (до 100 об/мин)
- » при ограниченном угле поворота ротора
 - гибкие спиральные пружинящие проводники вместо скользящего контакта



- 1 – обмотка ротора
- 2 – обмотка статора
- 3 – сердечник статора
- 4 – сердечник ротора
- 5 – корпус
- 6 – контактные кольца

Конструкции вращающихся трансформаторов

Двухполюсные ВТ



Электрическая схема
4-обмоточного ВТ

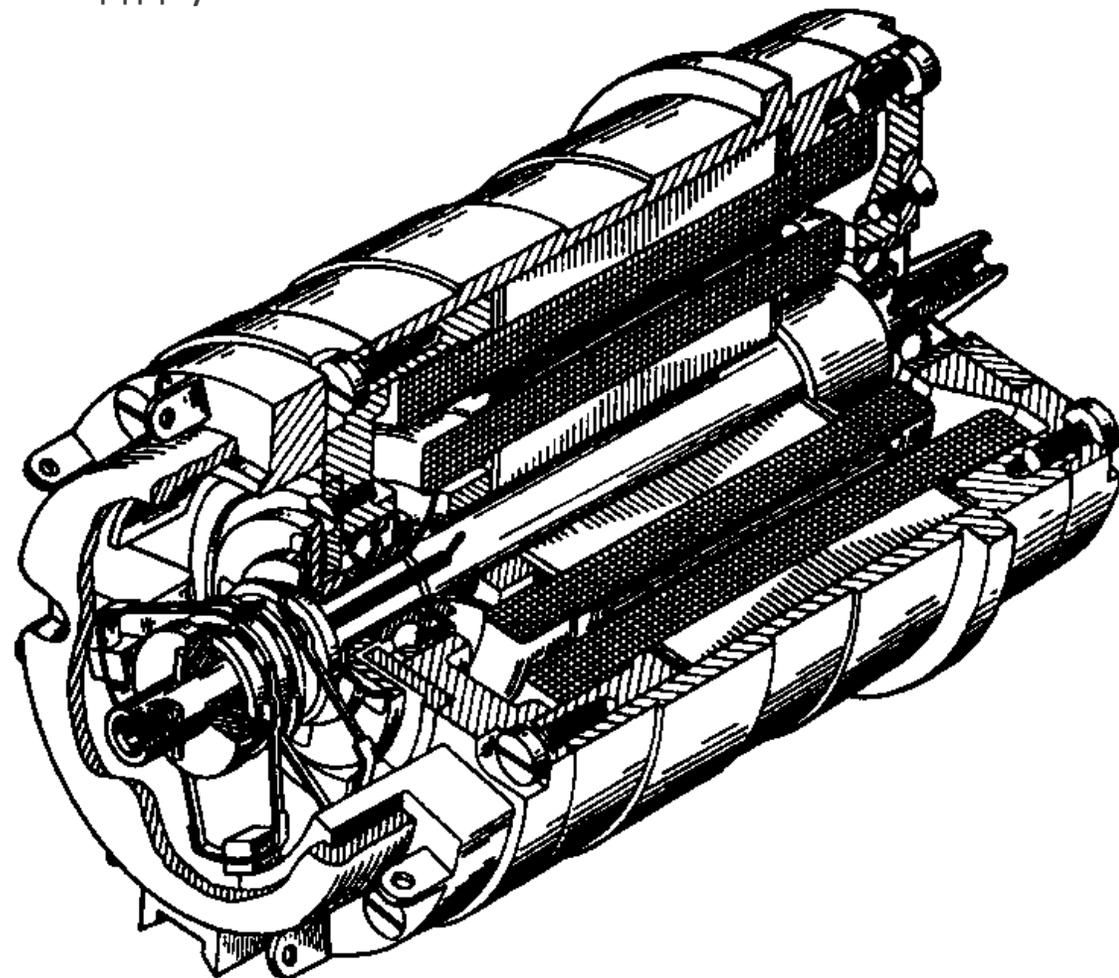
- » S – обмотка возбуждения
- » K – квадратурная (компенсационная) обмотка
- » A – синусная обмотка
- » B – косинусная обмотка

Обмотки попарно одинаковые

- » одинаковое число одинаковых пазов
- » число эффективных витков
 - $w_S = w_K$
 - $w_A = w_B$

Частота питающего напряжения
400 / 2000 Гц

Общий вид двухполюсного ВТ типа ВТ-5



Конструкции вращающихся трансформаторов

Многополюсные ВТ

Увеличение числа пар полюсов позволяет повысить точность преобразования

Принцип электромагнитной редукции:

- » период изменения $U_{\text{ВЫХ}}$ соответствует повороту ротора на угол $\alpha = 2\pi/p$
- » один оборот ротора обеспечивает p периодов $U_{\text{ВЫХ}}$

Тогда p – коэффициент электромагнитной редукции

Погрешность многополюсного ВТ (в угловых единицах)

– в p раз меньше, чем у двухполюсного

Конструкция многополюсного ВТ аналогична двухполюсному
но есть особенности:

- » малое отношение l/D (обычно 0,1...0,3)
- » бескорпусное исполнение (встраиваемые ЭМ)
- » ограниченное число пар полюсов $p \leq 4$



Конструкции вращающихся трансформаторов

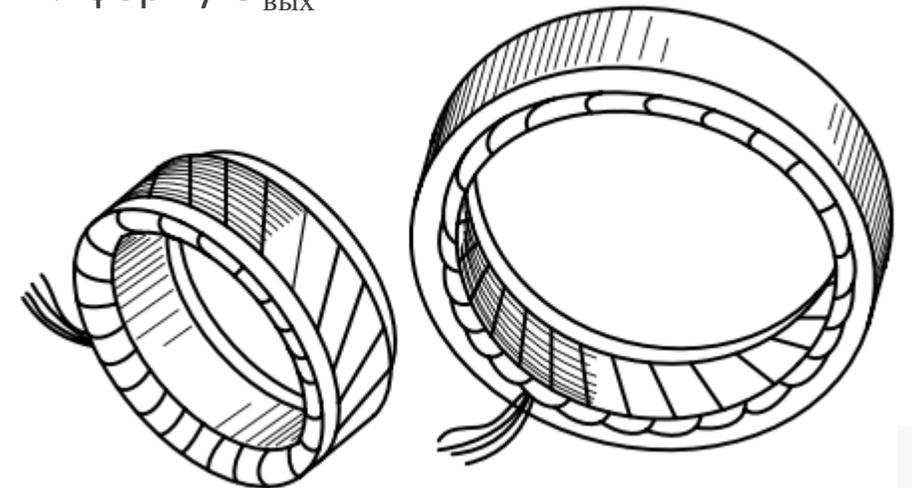
Многополюсные ВТ

ВТ с сосредоточенными обмотками

- » однофазная обмотка возбуждения – на роторе
- » (питание через кольцевой трансформатор)
- » двухфазная обмотка синхронизации – на статоре



Правильный выбор зубцовой зоны и скоса пазов обеспечивает синусоидальное изменение взаимной индуктивности → форму $U_{\text{ВЫХ}}$



Конструкции вращающихся трансформаторов

Многополюсные ВТ

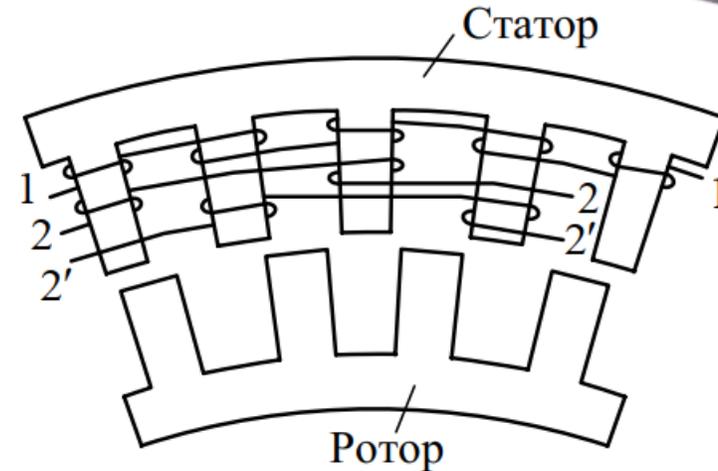
Еще большей электромагнитной редукции можно достичь при использовании зубцовых гармоник (аналогично индукторным ЭМ)

Статор:

- » открытые пазы
- » 3 однофазные обмотки
 - 1 – ОВ на каждом зубце (с чередующейся полярностью)
 - 2 – вторичная обмотка на нечетных зубцах
 - 2' – вторичная обмотка на четных зубцах
- » ЭДС вторичных обмоток сдвинуты по фазе на $\pi/2$

Ротор:

- » явновыраженные полюсы (зубцы)
- » число зубцов $Z_R/Z_S = 3/4$
 - при гладком роторе нет электромагнитной связи между ОВ и вторичными обмотками
 - при зубчатом роторе взаимная индуктивность изменяется с периодом $2\pi/Z_R$



Индукционный редуктосин

Правильный выбор зубцовых зон и скоса пазов обеспечивает синусоидальное изменение взаимной индуктивности

Конструкции вращающихся трансформаторов

Многополюсные ВТ

Индуктосин – торцевая конструкция

- » статор и ротор – изоляционные диски с печатными обмотками
- » на роторе – однофазная ОВ
- » на статоре – двухфазная вторичная обмотка (секции, сдвинутые на $\frac{1}{2}$ полюсного деления)
- » частота питающей сети 10...100 кГц

Правильный выбор ширины проводников, полюсного деления, скоса проводников, укорочения шага обмотки обеспечивает синусоидальное изменение взаимной индуктивности

Высокая точность в следящих системах

- » погрешность – несколько угл.секунд

Недостатки:

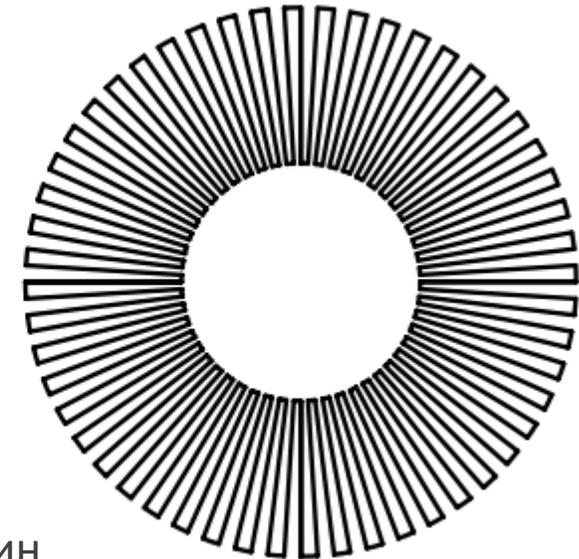
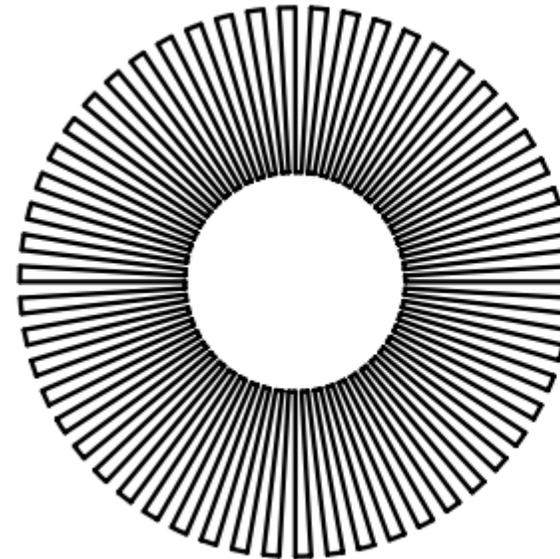
- » малая ЭДС вторичной обмотки
- » технологическая сложность



Статор



Ротор



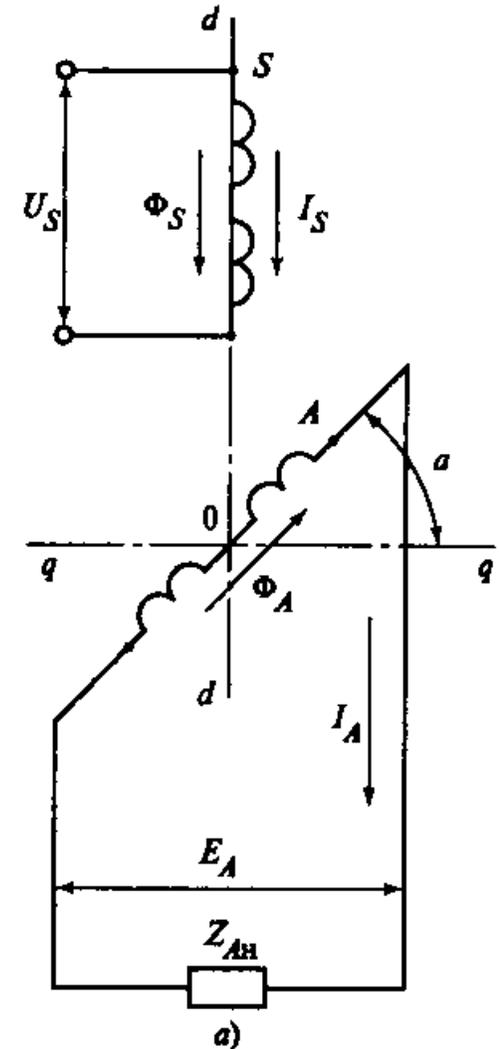
Индуктосин

Синусный вращающийся трансформатор (СВТ)

Синусный вращающийся трансформатор

Простейший двухполюсный синусный ВТ

- » магнитная цепь не насыщена
- » потери в стали пренебрежимо малы
- » на статоре – обмотка возбуждения S
 - ось обмотки $S \rightarrow$ продольная ось d
 - напряжение возбуждения $U_S \rightarrow$ ток $I_S \rightarrow$ поток Φ_S по оси d
- » на роторе – выходная обмотка A
 - положение оси обмотки – угол α относительно q
- » выходное напряжение обмотки A – в измерительную цепь, ее входное сопротивление $Z_{АН}$ – нагрузка для обмотки A



Синусный вращающийся трансформатор

Режим холостого хода ($Z_{Ah} = \infty, I_A = 0$)

- » Пульсирующий поток $\Phi_S \rightarrow$ ЭДС в выходной обмотке A
- » Взаимная индуктивность между S и A изменяется синусоидально при повороте ротора (изменении α)

$$E_{A0} = E_{Am} \sin \alpha$$

где E_{Am} – максимальная ЭДС (при совпадении осей обмоток)

- » При $\alpha = \pi/2$ обмотки A и S сцеплены с одним потоком Φ_S

тогда $\frac{E_{Am}}{E_S} = \frac{w_A}{w_S}$ или $E_{Am} = E_S \frac{w_A}{w_S} = E_S k_m$ где k_m – максимальный эффективный коэффициент трансформации

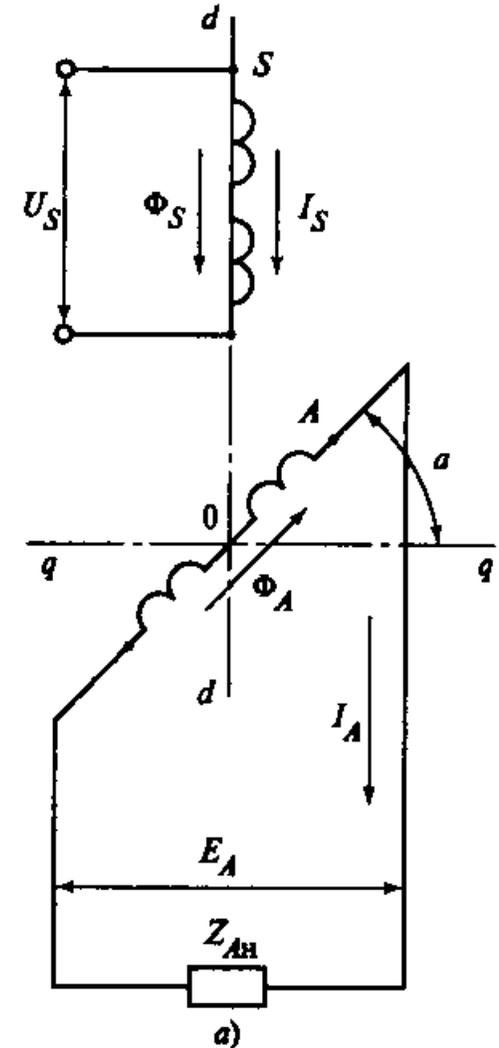
- » При произвольном α ЭДС выходной обмотки на ХХ

$$E_{A0} = E_S k_m \sin \alpha = E_S k(\alpha)$$

- » Пренебрегая падением напряжения $I_S r_S$

$$E_{A0} \approx U_S k_m \sin \alpha = U_S k(\alpha)$$

здесь $k(\alpha) = k_m \sin \alpha = \frac{w_A}{w_S} \sin \alpha$ – коэффициент трансформации СВТ



Синусный вращающийся трансформатор

Режим нагрузки ($Z_{AH} = \text{const}$)

- » Под действием ЭДС E_A протекает ток
$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z_A + Z_{AH}}$$
- » Ток I_A создает поток Φ_A по направлению оси обмотки A (под углом α к оси q)
- » Рассмотрим составляющие потока Φ_A по осям d и q

$$\Phi_{Ad} = \Phi_A \sin \alpha$$

$$\Phi_{Aq} = \Phi_A \cos \alpha$$

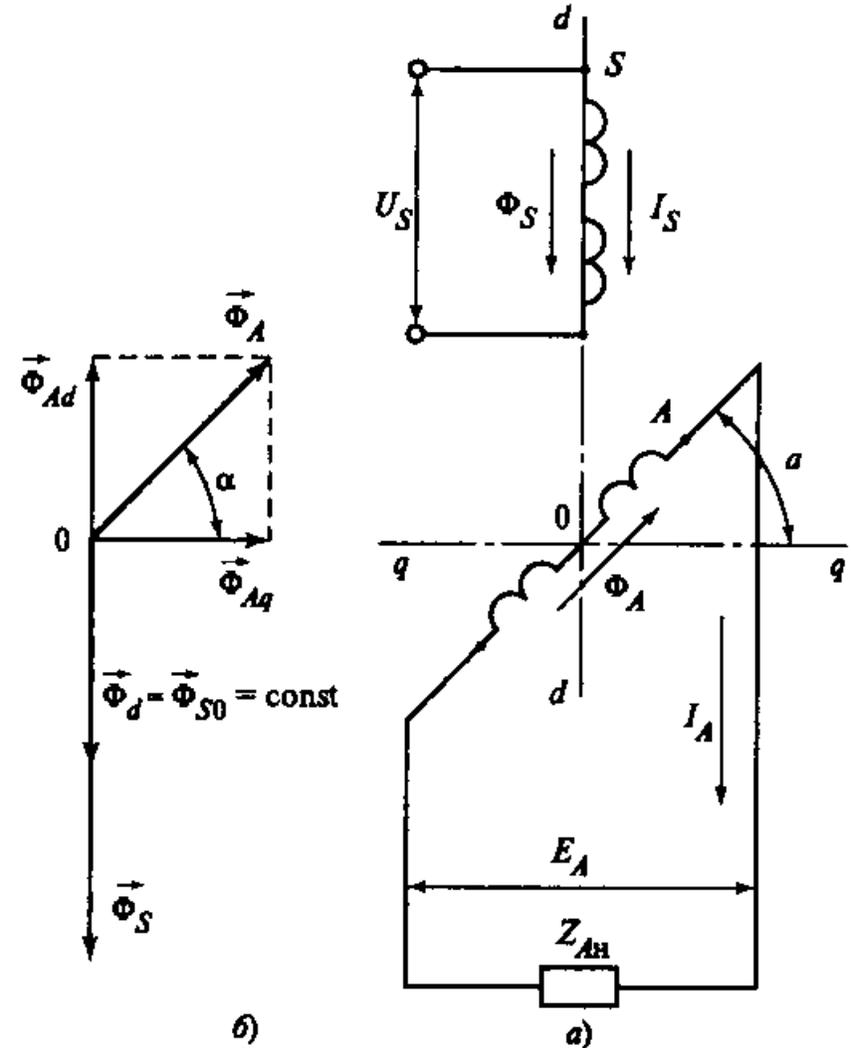
Продольная составляющая Φ_{Ad}

- » размагничивающее действие Φ_{Ad} компенсируется возрастанием тока I_S (как в трансформаторе)
- » полный поток по оси d не меняется для любой нагрузки

$$\Phi_d \approx \Phi_{S0} = \text{const}$$

- » поток Φ_d наводит ЭДС взаимоиндукции E_{AM} аналогично ХХ

$$E_{AM} = E_{A0} = E_S k_m \sin \alpha = E_S k(\alpha)$$



Синусный вращающийся трансформатор

Режим нагрузки ($Z_{AH} = \text{const}$)

Поперечная составляющая Φ_{Aq} – ничем не компенсируется

» поток Φ_{Aq} наводит ЭДС самоиндукции E_{AL}

$$\dot{E}_{AL} = -j\dot{I}_A x_{Aq} = -j\dot{I}_A \omega L_{Aq}$$

Индуктивность обмотки A по оси q $L_{Aq} = \frac{\Psi_{Aq}}{I_{Aq}} = \frac{w_{Aq} \Phi_{Aq}}{F_{Aq} / w_{Aq}} = w_{Aq}^2 \Lambda_{\delta q}$

Здесь $\Lambda_{\delta q}$ – магнитная проводимость зазора
(при равномерном зазоре не зависит от положения α)

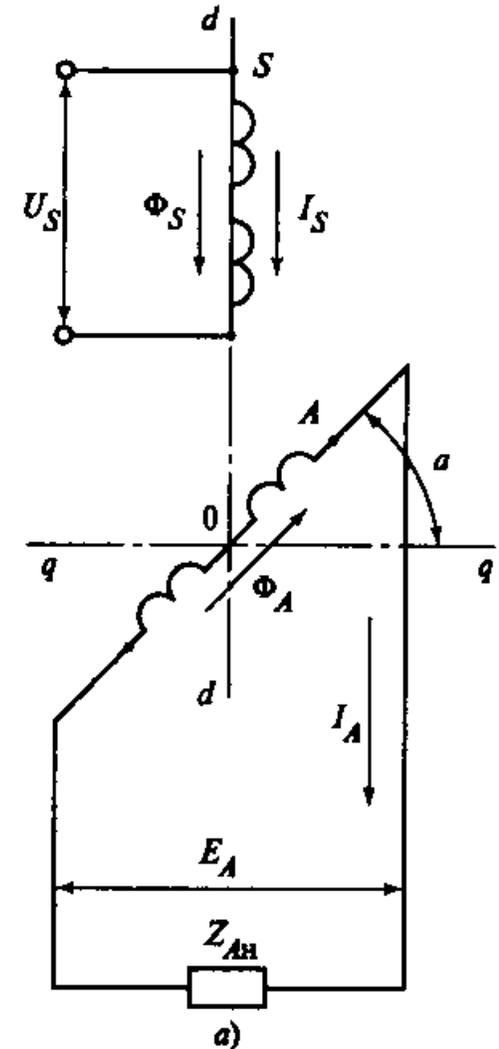
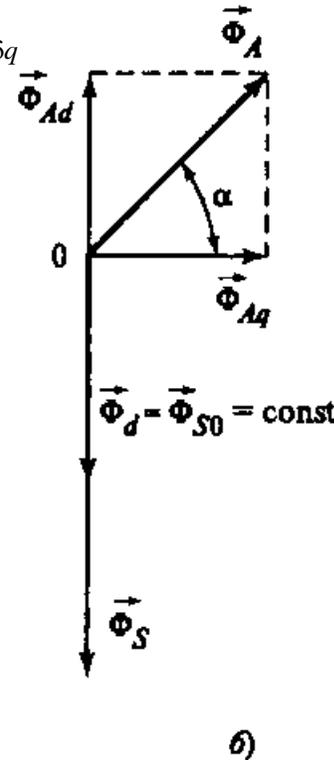
$w_{Aq} = w_A \cos \alpha$ – доля числа витков w_A ,
образующая потокосцепление Ψ_{Aq}

Тогда ЭДС самоиндукции E_{AL}

$$\dot{E}_{AL} = -j\dot{I}_A \omega (w_A \cos \alpha)^2 \Lambda_{\delta q} = -j \frac{\dot{E}_A}{Z_A + Z_{AH}} \omega w_A^2 \Lambda_{\delta q} \cos^2 \alpha$$

или $\dot{E}_{AL} = -a \dot{E}_A \cos^2 \alpha$

где $a = j \frac{\omega w_A^2 \Lambda_{\delta q}}{Z_A + Z_{AH}}$ – комплексный коэффициент, определяется параметрами ВТ и нагрузки и частотой сети



Синусный вращающийся трансформатор

Режим нагрузки ($Z_{AH} = \text{const}$)

Полная ЭДС обмотки A при нагрузке

$$\dot{E}_A = \dot{E}_{AM} + \dot{E}_{AL} = \dot{E}_S k_m \sin \alpha - a \dot{E}_A \cos^2 \alpha$$

т.е.
$$\dot{E}_A = \frac{k_m \dot{E}_S \sin \alpha}{1 + a \cos^2 \alpha}$$
 – не является чисто синусоидальной функцией угла α

Например, при $a = 1$

E_{A0} – ЭДС выходной обмотки на ХХ (синусоида)

E_A – ЭДС выходной обмотки при нагрузке

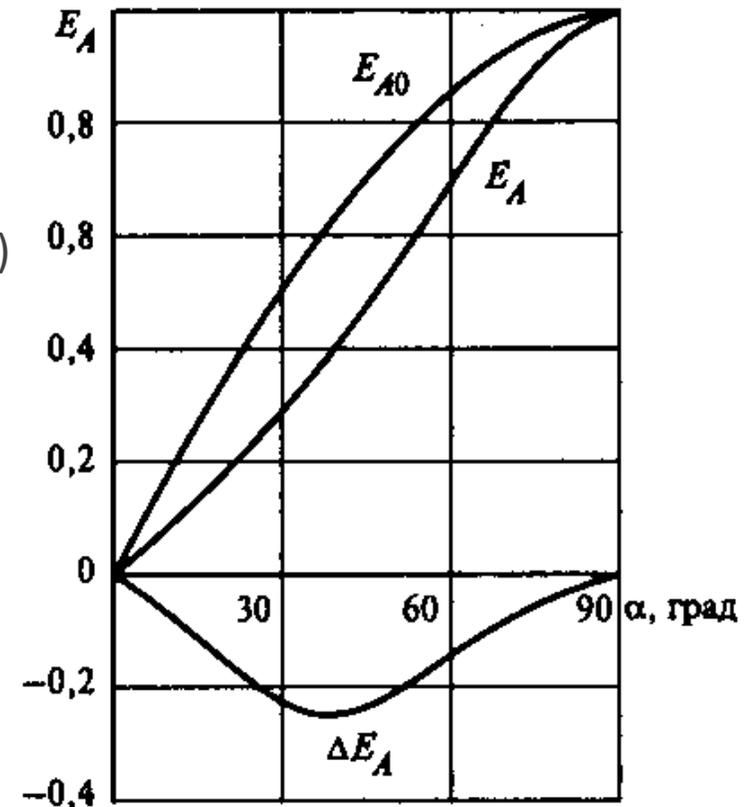
ΔE_A – погрешность, вносимая потоком Φ_{Aq}

В реальных ВТ величина a много меньше 1

→ погрешность ΔE_A значительно меньше представленной

Из-за наличия погрешности синусные ВТ применяются редко (только если Z_{AH} велико, например, это АЦП цифровой цепи)

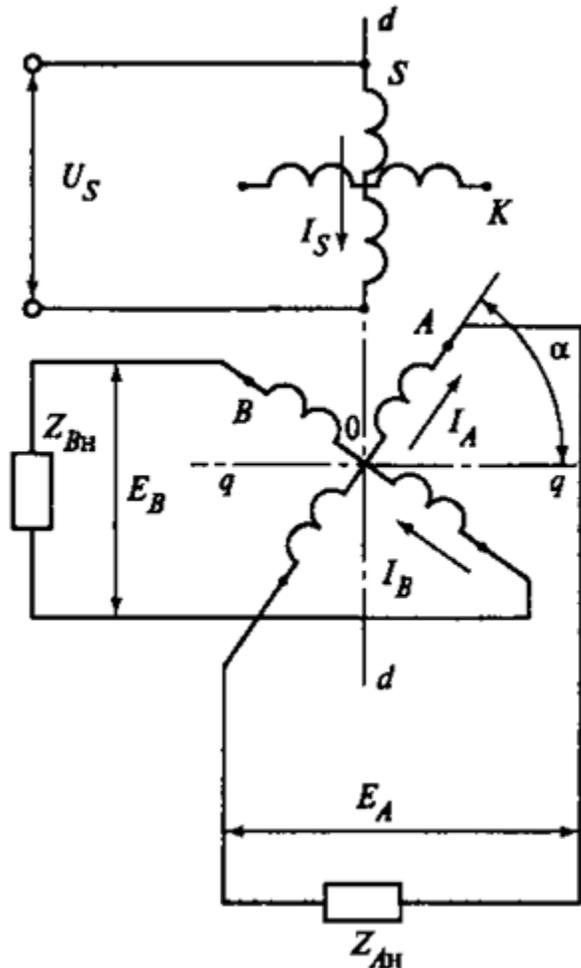
Чаще применяют синусно-косинусные ВТ



Синусно- косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ)

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

Обмотки СКВТ



На статоре

- » обмотка возбуждения S
- » квадратурная обмотка K
 - обмотки взаимно перпендикулярны
 - имеют одинаковое число витков $w_S = w_K$
 - одинаковые сопротивления $Z_S = Z_K$
 - ось обмотки $S \rightarrow$ продольная ось d

На роторе

- » выходная обмотка A
- » выходная обмотка B
 - обмотки взаимно перпендикулярны
 - имеют одинаковое число витков $w_A = w_B$
 - одинаковые сопротивления $Z_A = Z_B$
 - положение ротора – угол α между осью A и осью q

Каждая выходная обмотка подключается к своей нагрузке $Z_{Aн}$ и $Z_{Bн}$

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

При подаче возбуждения U_S на обмотку S

- » ток I_S создает поток возбуждения Φ_S
- » поток Φ_S наводит ЭДС в обмотках ротора E_A и E_B

Если ЭДС E_A изменяется по закону $\sin\alpha$,
то ЭДС перпендикулярной обмотки E_B изменяется по закону $\cos\alpha$

На холостом ходу ($Z_{AH} = \infty, I_A = 0$)

$$E_{A0} = E_S \frac{w_A}{w_S} \sin \alpha = E_S k_m \sin \alpha$$

аналогично

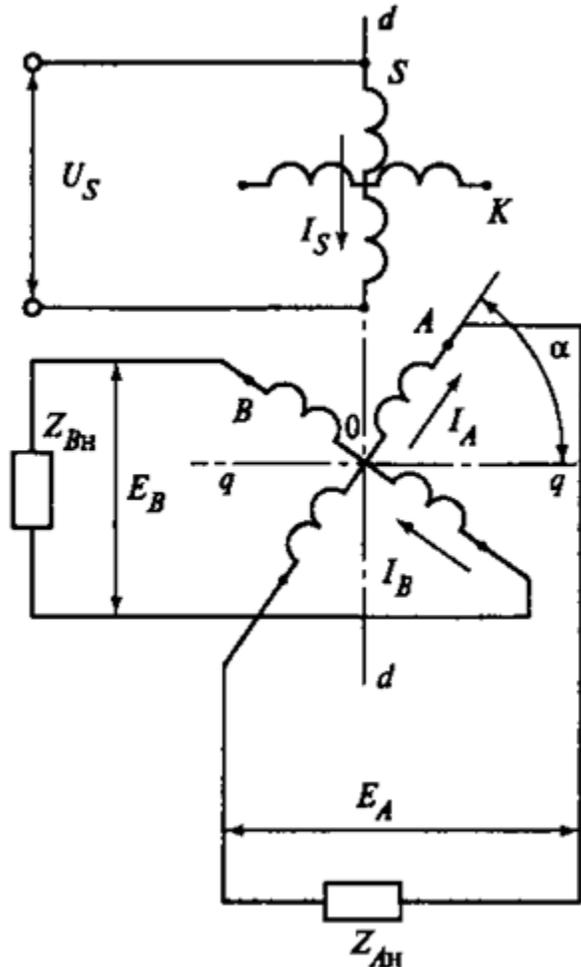
$$E_{B0} = E_S \frac{w_B}{w_S} \cos \alpha = E_S k_m \cos \alpha$$

При подключении нагрузки (Z_{AH}, Z_{BH})
протекают токи

$$\dot{i}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z_A + Z_{AH}}$$

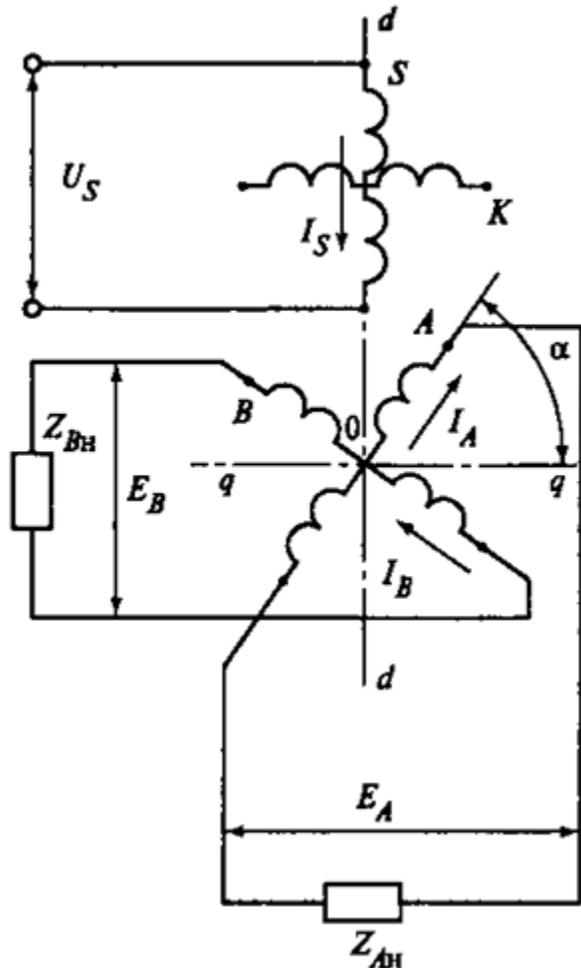
$$\dot{i}_B = \frac{\dot{E}_B}{Z_B + Z_{BH}}$$

Токи I_A и I_B создают потоки Φ_A и Φ_B вдоль осей обмоток A и B



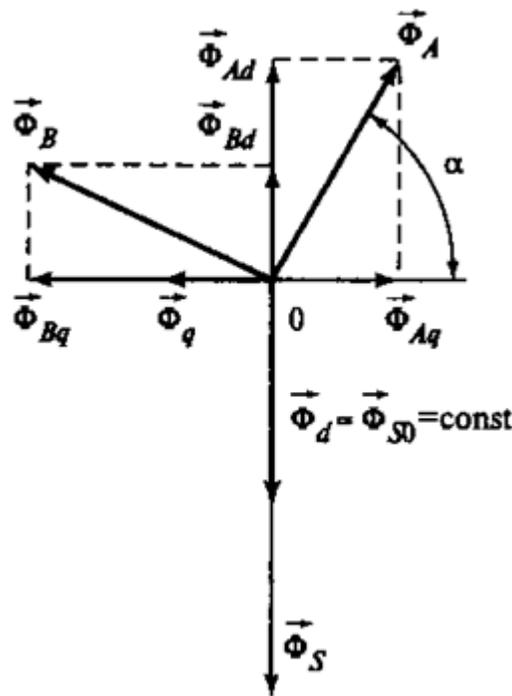
Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

Рассмотрим составляющие Φ_B по осям d и q



$$\Phi_{Bd} = \Phi_B \cos \alpha$$

$$\Phi_{Bq} = \Phi_B \sin \alpha$$



Продольная составляющая потока Φ_{Bd} компенсируется возросшим током I_S

Поток по оси d не изменяется при любой нагрузке

$$\Phi_d \approx \Phi_{S0} = \text{const}$$

Поток Φ_d наводит в обмотке B

ЭДС взаимоиндукции E_{BM} аналогично ХХ

$$E_{BM} = E_{B0} = E_S k_m \cos \alpha = E_S k(\alpha)$$

Поперечная составляющая потока Φ_{Bq}

наводит в обмотке B ЭДС самоиндукции E_{BL}

(аналогично синусному ВТ)

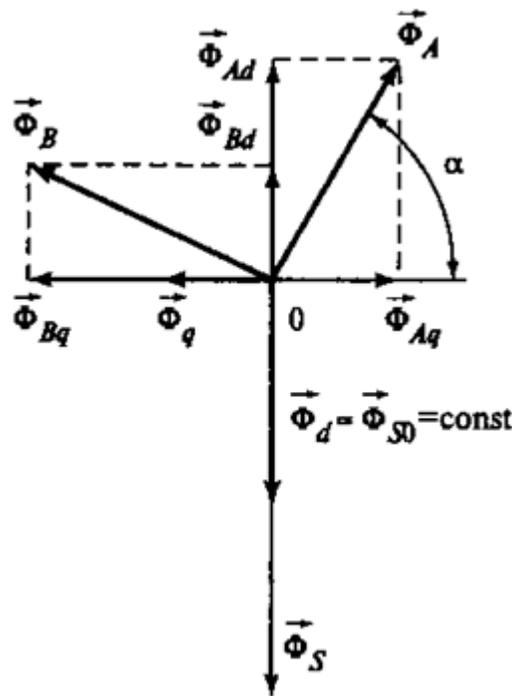
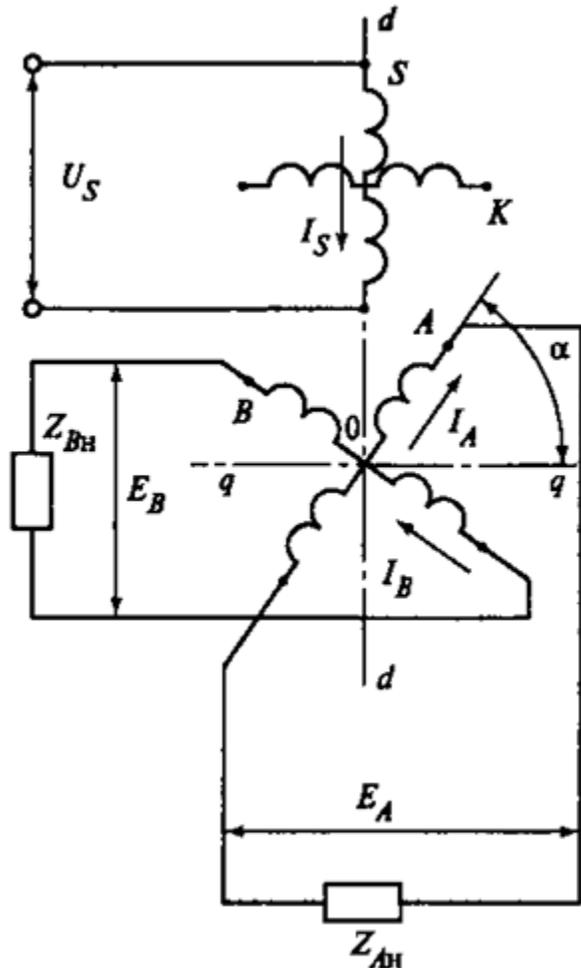
$$\dot{E}_{BL} = -b \dot{E}_B \sin^2 \alpha$$

где $b = j \frac{\omega w_B^2 \Lambda_{\delta q}}{Z_B + Z_{BH}}$ – комплексный коэффициент

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

Суммарная ЭДС обмотки B при нагрузке $\dot{E}_B = \dot{E}_{BM} + \dot{E}_{BL}$

или
$$\dot{E}_B = \frac{k_m \dot{E}_S \cos \alpha}{1 + b \sin^2 \alpha}$$



ЭДС E_B (как и ЭДС E_A) при нагрузке не является чисто косинусной функцией угла α

Здесь составляющая $b \sin^2 \alpha$, обусловленная потоком Φ_{Bq} , создает отклонение функции от \cos

Однако, потоки Φ_{Aq} и Φ_{Bq} направлены встречно

Полный поперечный поток при нагрузке

$$\dot{\Phi}_q = \dot{\Phi}_{Aq} + \dot{\Phi}_{Bq}$$

всегда меньше, чем при наличии одной обмотки

Меньше поток $\Phi_q \rightarrow$ меньше погрешность (в идеале можно сделать $\Phi_q = 0$)

Синусно-косинусные ВТ изначально имеют меньшую погрешность

Симметрирование СКВТ

Симметрирование СКВТ

Симметрирование – подбор сопротивлений цепей обмоток статора и ротора, при котором ЭДС выходных обмоток изменяются строго по законам \sin и \cos

Цель симметрирования – уничтожить поперечный поток Φ_q (источник погрешностей)

Вторичное симметрирование – подбор сопротивлений цепей вторичных обмоток так, чтобы $\Phi_q = 0$

Φ_{Aq} и Φ_{Bq} направлены встречно \rightarrow надо сделать $F_{Aq} = F_{Bq}$

Выразим МДС через токи и эффективные числа витков обмоток по оси q $F_{Aq} = F_{Bq} \rightarrow I_A w_A \cos \alpha = I_B w_B \sin \alpha$

Выразим токи через ЭДС и сопротивления обмоток $\frac{\dot{E}_A}{Z_A + Z_{Aн}} w_A \cos \alpha = \frac{\dot{E}_B}{Z_B + Z_{Bн}} w_B \sin \alpha$

Учитывая, что $E_A = k_m E_S \sin \alpha$ и $E_B = k_m E_S \cos \alpha$, запишем $\frac{k_m \dot{E}_S \sin \alpha \cos \alpha}{Z_A + Z_{Aн}} w_A = \frac{k_m \dot{E}_S \cos \alpha \sin \alpha}{Z_B + Z_{Bн}} w_B$

С учетом $w_A = w_B$ равенство выполняется при условии $Z_A + Z_{Aн} = Z_B + Z_{Bн}$

А с учетом $Z_A = Z_B$ условие вторичного симметрирования запишется как

$$Z_{Aн} = Z_{Bн}$$

Симметрирование СКВТ

Вторичное симметрирование – особенность

Рассмотрим баланс МДС по продольной оси (пренебрегая намагничивающей МДС)

$$\dot{F}_S = -(\dot{F}_{Ad} + \dot{F}_{Bd})$$

или
$$\dot{I}_S w_S = -(\dot{I}_A w_A \sin \alpha + \dot{I}_B w_B \cos \alpha)$$

Выразим ток обмотки S , учитывая, что $w_A/w_S = w_B/w_S = k_m$

$$-\dot{I}_S = k_m \dot{I}_A \sin \alpha + k_m \dot{I}_B \cos \alpha$$

Выразим токи I_A и I_B через ЭДС и сопротивления цепей

$$-\dot{I}_S = \frac{\dot{E}_A}{Z_A + Z_{Ah}} k_m \sin \alpha + \frac{\dot{E}_B}{Z_B + Z_{Bh}} k_m \cos \alpha$$

Выразим ЭДС вторичных обмоток через ЭДС первичной обмотки

$$-\dot{I}_S = \frac{\dot{E}_S k_m \sin \alpha}{Z_A + Z_{Ah}} k_m \sin \alpha + \frac{\dot{E}_S k_m \cos \alpha}{Z_B + Z_{Bh}} k_m \cos \alpha = \dot{E}_S k_m^2 \left(\frac{\sin^2 \alpha}{Z_A + Z_{Ah}} + \frac{\cos^2 \alpha}{Z_B + Z_{Bh}} \right)$$

При вторичном симметрировании $Z_A + Z_{Ah} = Z_B + Z_{Bh}$ (запишем как $Z_R + Z_{Rh}$)

$$-\dot{I}_S = \frac{\dot{E}_S k_m^2}{Z_R + Z_{Rh}} (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)$$

Симметрирование СКВТ

Вторичное симметрирование – особенность

Итак, ток обмотки S , потребляемый ВТ из сети

$$-i_S = \frac{\dot{E}_S k_m^2}{Z_R + Z_{RH}}$$

Пренебрегая падением напряжения на r_S (полагая $U_S = -E_S$)

$$i_S \approx \frac{\dot{U}_S k_m^2}{Z_R + Z_{RH}} = \frac{\dot{U}_S}{Z_{BX}}$$

Здесь входное сопротивление $Z_{BX} = \frac{Z_R + Z_{RH}}{k_m^2} = \text{const}$ Значит, и ток $I_S = \text{const}$

Особенность вторичного симметрирования:

- » входное сопротивление и потребляемый из сети ток при $U_S = \text{const}$ не зависят от положения ротора (от угла α)
- » Однако, выходное сопротивление зависит от α
Это нежелательно для ряда схем управления
→ ограничивает применение ВТ со вторичным симметрированием

Симметрирование СКВТ

Вторичное симметрирование – проверка правильности

Метод амперметра

- » амперметр включен в цепь первичной обмотки
- » т.к. Z_{BX} не зависит от α , то при $U_S = \text{const}$ потребляемый из сети ток не изменяется при повороте ротора ($I_S = \text{const}$)

Метод вольтметра

- » вольтметр подключен к обмотке K
- » т.к. $\Phi_q = 0$ при правильном симметрировании, то ЭДС в обмотке K не наводится и $U_K = 0$

Симметрирование СКВТ

Первичное симметрирование – подбор сопротивления квадратурной обмотки так, чтобы $\Phi_q = 0$

Условие первичного симметрирования

$$Z_{\text{ист}} + Z_{\text{л}} + Z_S = Z_K + Z_{\text{КН}}$$

Здесь $Z_{\text{ист}}$ – сопротивление источника питания

$Z_{\text{л}}$ – сопротивление линии (между источником и ВТ)

Обычно сопротивлению линии очень мало ($Z_{\text{л}} = 0$),
а сопротивления обмоток одинаковы ($Z_S = Z_K$)

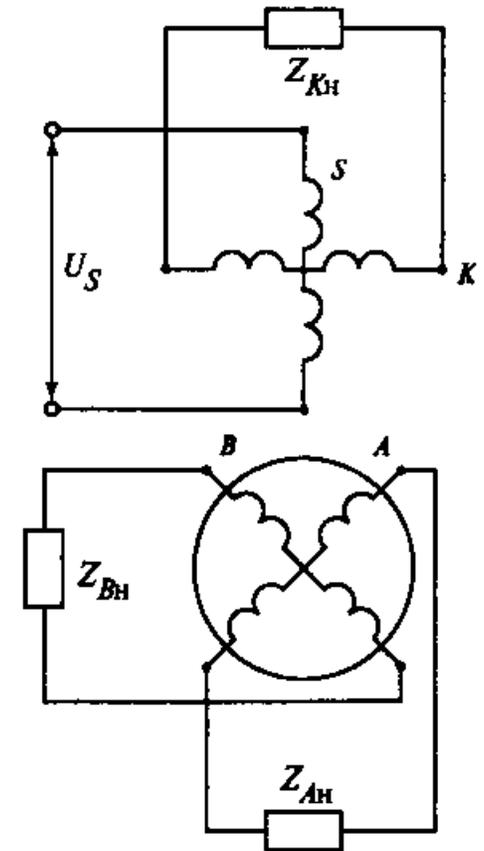
Поэтому условие первичного симметрирования записывают как

$$Z_{\text{КН}} = Z_{\text{ист}}$$

Если ВТ питается от источника большой мощности (можно считать $Z_{\text{ист}} = 0$),
то квадратурную обмотку просто закорачивают ($Z_{\text{КН}} = 0$)

Физический смысл первичного симметрирования:

- » поперечный поток ротора Φ_q (он вносит погрешность)
демпфируется током квадратурной обмотки

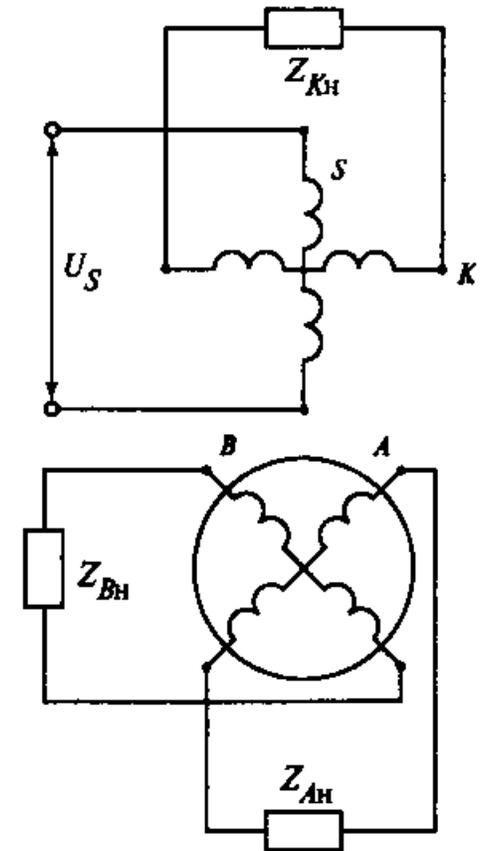


Симметрирование СКВТ

Первичное симметрирование – особенность

- » выходное сопротивление не зависит от положения ротора (от угла α)
→ это хорошо для измерительной цепи
- » при этом изменяется входное сопротивление с изменением α
→ это недостаток, но не существенный при большой мощности источника

На практике применяют и первичное и вторичное симметрирование одновременно – получаются наилучшие характеристики



Режимы работы вращающихся трансформаторов

Линейный вращающийся трансформатор

Режимы работы и выполняемые функции ВТ определяются схемой соединения обмоток и схемой включения в систему управления

Линейный вращающийся трансформатор обеспечивает линейную зависимость выходного напряжения от угла поворота α

Простейший способ реализации – использовать синусную обмотку СКВТ в зоне углов с линейной частью синусоиды

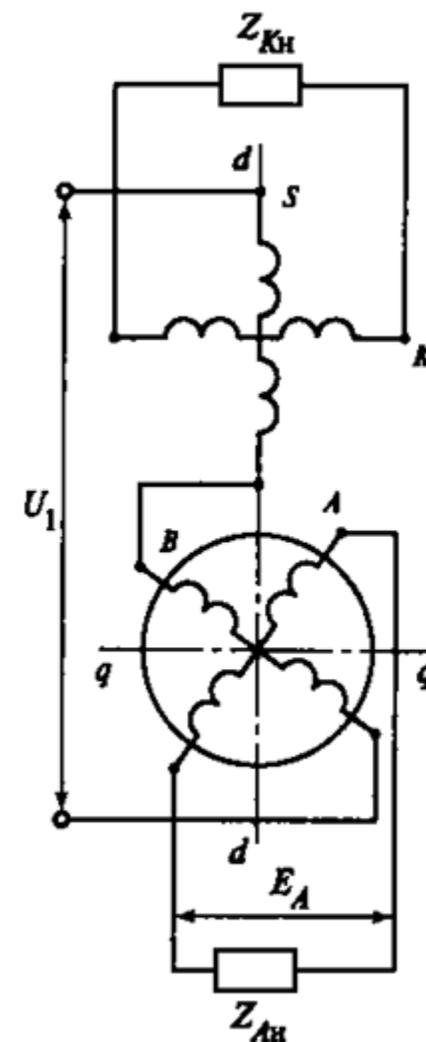
- » в диапазоне углов от -30° до $+30^\circ$ отклонение $\sin\alpha$ от прямой минимально
- » для расширения диапазона углов используется специальная схема соединения

ЛВТ с первичным симметрированием

- » обмотка возбуждения статора S и косинусная обмотка B соединены последовательно и подключены к сети U_1
- » квадратурная обмотка K замкнута (или замкнута на Z_{KH})
- » синусная обмотка A – выходная (включена на Z_{AH})

При этом

- » поперечный поток Φ_q обмоток A и B демпфируется током квадратурной обмотки K (первичное симметрирование)
→ результирующий поток Φ_q можно считать отсутствующим



Линейный вращающийся трансформатор

Линейный вращающийся трансформатор с первичным симметрированием

Учитывая только потоки по оси d и пренебрегая падением напряжения в обмотках S и B запишем уравнение баланса напряжений

$$-U_1 = E_S + E_B = E_S + E_S k_m \cos \alpha = E_S (1 + k_m \cos \alpha)$$

Выходная ЭДС синусной обмотки $E_A = E_S k_m \sin \alpha$

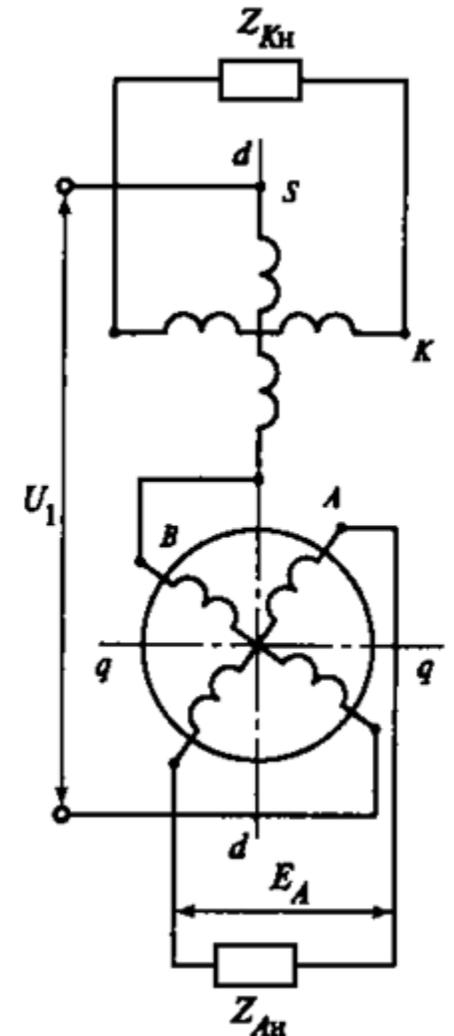
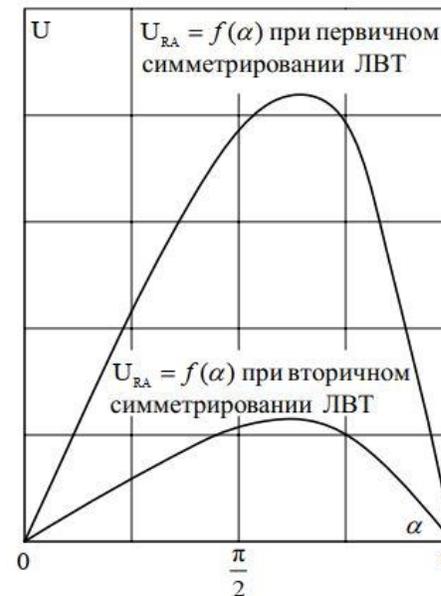
Выразив из нее ЭДС E_S , запишем баланс напряжений как

$$-U_1 = E_A \frac{1 + k_m \cos \alpha}{k_m \sin \alpha} \quad \text{откуда} \quad E_A = \frac{-U_1 k_m \sin \alpha}{1 + k_m \cos \alpha}$$

- » При $k_m = 0,5 \dots 0,6$ отклонение функции $E_A = f(\alpha)$ от прямой линии в диапазоне углов от -60° до $+60^\circ$ не превышает 0,1%
- » Для реальных ЛВТ (с учетом сопротивлений обмоток $-r$ и x_σ) оптимальное значение $k_m = 0,56 \dots 0,58$

Особенность ЛВТ с первичным симметрированием:

- » выходное сопротивление не зависит от α (это достоинство)

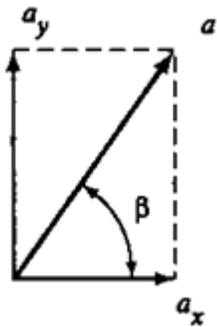


СКВТ в режиме построителя

ВТ-построитель осуществляет преобразование координат

- » из декартовой системы в полярную
- » из одной декартовой системы в другую, повернутую на угол α

Рассмотрим преобразование координат из декартовой СК в полярную СК

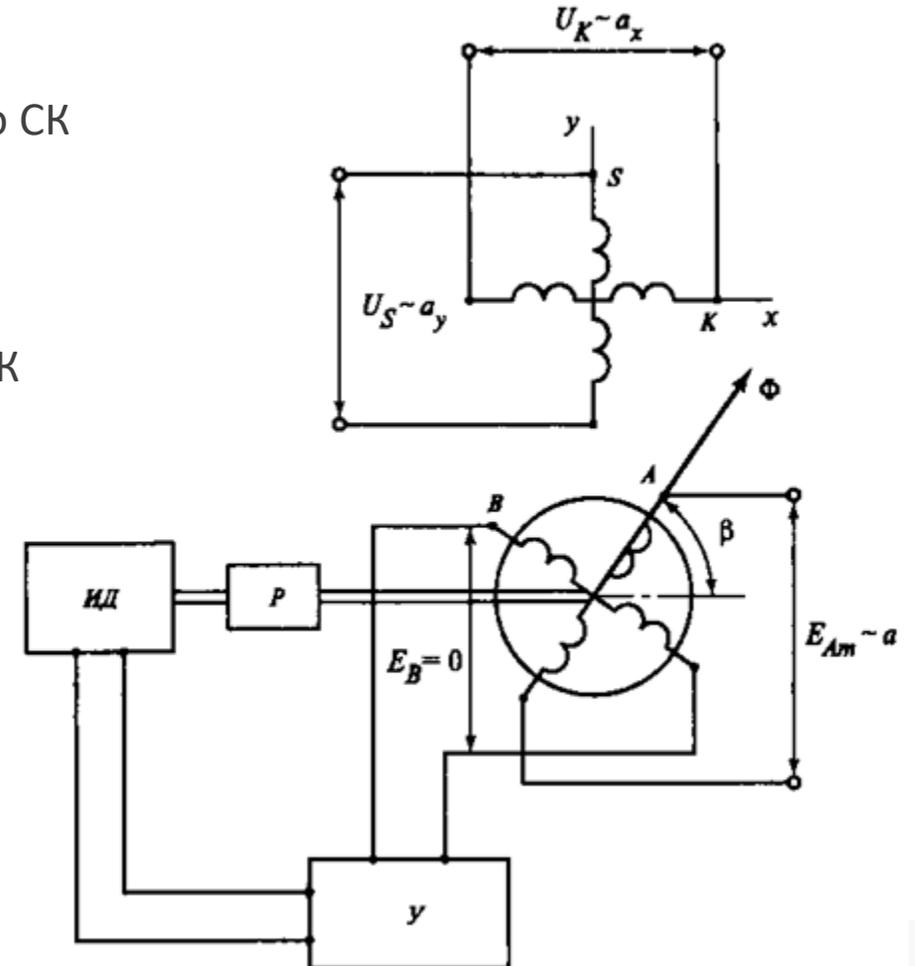


- » заданы координаты точки a в декартовой СК
– составляющие a_x и a_y
- » требуется найти координаты точки a в полярной СК
– модуль $|a|$ и аргумент вектора (угол β)

Схема ВТ-построителя

- » Пусть ось обмотки K совпадает с осью x декартовой СК, а ось обмотки S совпадает с осью y
- » Подадим на обмотки K и S переменные напряжения, величина которых пропорциональна координатам (напряжения одинаковые по фазе)

$$U_K \sim a_x$$
$$U_S \sim a_y$$



СКВТ в режиме построителя

ВТ-построитель: преобразование координат из декартовой СК в полярную СК

- » Токи обмоток K и S создадут пульсирующие потоки $\Phi_K \sim a_x, \Phi_S \sim a_y$
- » Суммарный поток Φ равен геометрической сумме потоков
 - величина потока Φ пропорциональна модулю вектора $|a|$
 - направление потока Φ составит угол β с осью обмотки K

Для получения выходной информации ($|a|$ и угол β) надо расположить ось обмотки A по направлению потока Φ , тогда

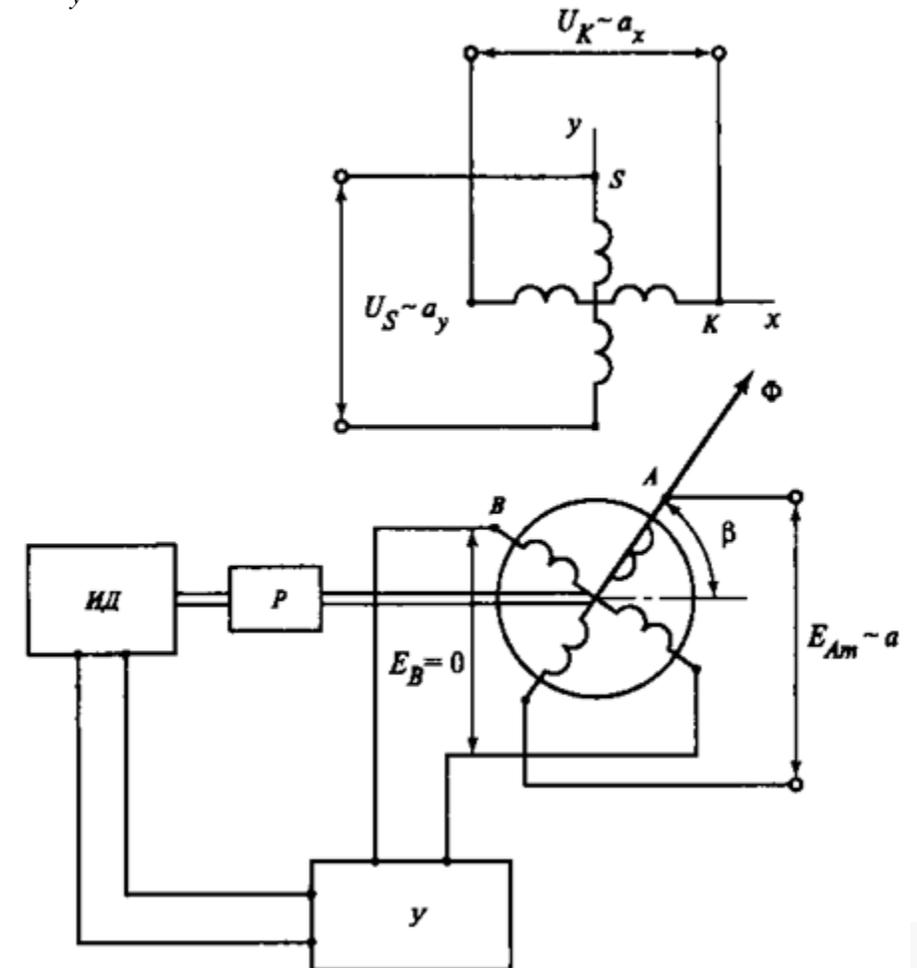
- » величина ЭДС E_A пропорциональна величине потока, т.е. $|a|$
- » направление обмотки A (положение ротора) определяет β

При этом

- » ЭДС обмотки A максимальна $E_A = E_{Amax}$
- » ЭДС перпендикулярной обмотки B $E_B = 0$ (сигнальная обмотка)

Автоматическая настройка построителя:

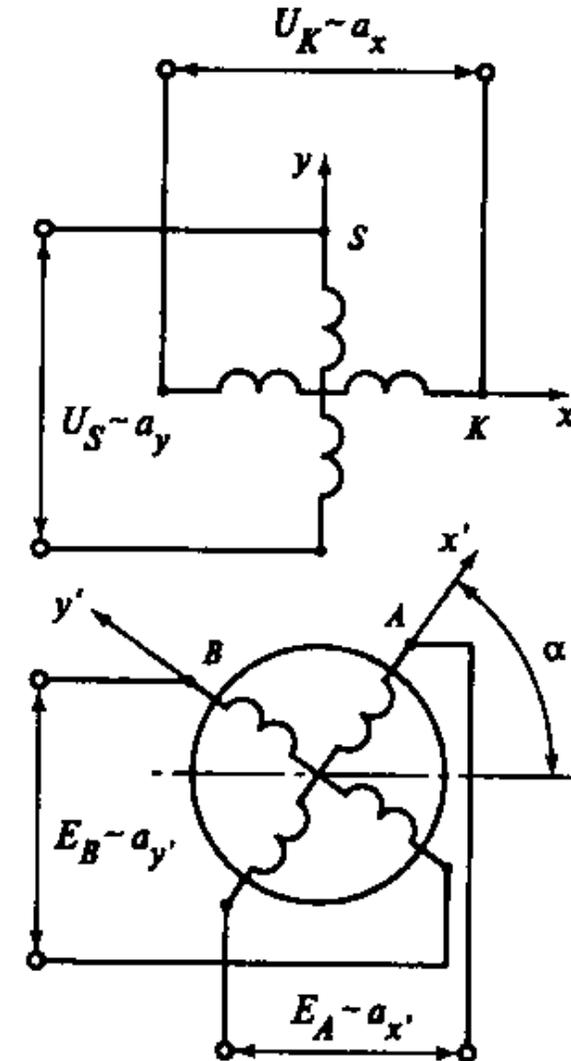
- » напряжение сигнальной обмотки B – через усилитель $У$ – на исполнительный двигатель ИД
- » ИД через редуктор P поворачивает ротор, пока E_B не станет равным 0



СКВТ в режиме построителя

Рассмотрим преобразование координат из одной декартовой СК в другую декартовую СК, повернутую на угол α относительно первой

- » Совместим оси обмоток K и S с осями x и y первой СК
- » Совместим оси обмоток A и B с осями x' и y' второй СК
- » На обмотки статора подаем напряжения U_K и U_S , пропорциональные координатам a_x и a_y
- » Токи обмоток K и S совместно создают результирующий поток Φ , соответствующий вектору a
- » В обмотках ротора поток Φ наводит ЭДС E_A и E_B , пропорциональные проекциям потока на оси обмоток, т.е. пропорциональные координатам $a_{x'}$ и $a_{y'}$
- » При этом можно задать любой требуемый угол α между двумя системами координат (и даже менять его динамически)



СКВТ в режиме масштабирования

Масштабные ВТ – настраиваемые трансформаторы для согласования напряжений разных каскадов (приводят в соответствие $U_{\text{вых}}$ первого каскада с $U_{\text{вх}}$ следующего каскада, сохраняя закон изменения напряжения)

Т.е. масштабный ВТ – регулятор напряжения (трансформатор)

- » Статор подключают к выходу первого каскада
- » Ротор поворачивают (с помощью редуктора – обеспечивает точность), пока не получается требуемая величина выходного напряжения
- » Фиксируют ротор стопорным устройством в нужном положении

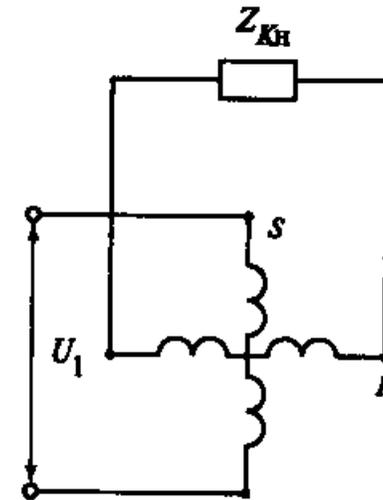
Дорогое решение, но точное (и настраиваемое)

Применяют для маломощных каскадов ответственных систем автоматики

СКВТ в режиме фазовращателя

Двухфазный фазовращатель

- » На обмотки статора S и K подают напряжения U_S и U_K , сдвинутые по фазе на $\pi/2$ (от двухфазной сети или однофазной с использованием C)
- » Обмотки статора создают круговое вращающееся поле
- » В обмотках ротора наводятся ЭДС E_A и E_B , фаза которых зависит от положения ротора – от угла α (как АД с заторможенным ротором)



Однофазный фазовращатель

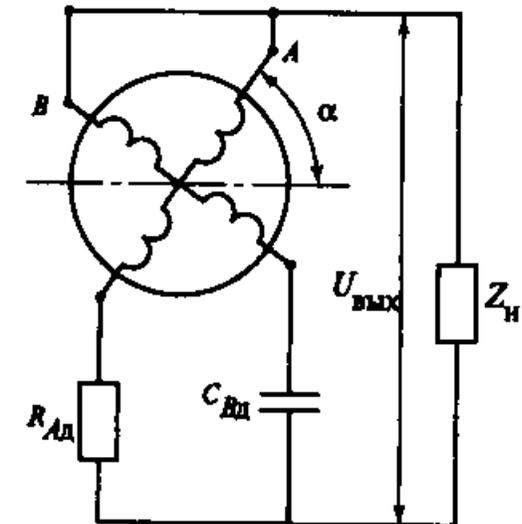
- » Обмотку возбуждения S подключают к сети
- » Квадратурную обмотку замыкают на Z_{KH}
- » Последовательно с обмоткой A включают добавочный резистор $R_{Ад}$
- » Последовательно с обмоткой B включают добавочный конденсатор $C_{Вд}$
- » Цепи обмоток A и B соединяют параллельно и подключают к нагрузке Z_H

Если параметры цепей удовлетворяют условиям

$$R_{Ад} + r_\phi = \frac{1}{\omega C_{Вд}} - x_\phi \quad \text{и} \quad r_\phi = x_\phi$$

где r_ϕ и x_ϕ – сопротивления обмоток A и B

то $U_{ВЫХ}$ постоянно по значению и изменяется по фазе пропорционально углу α в диапазоне углов от 0 до 360°



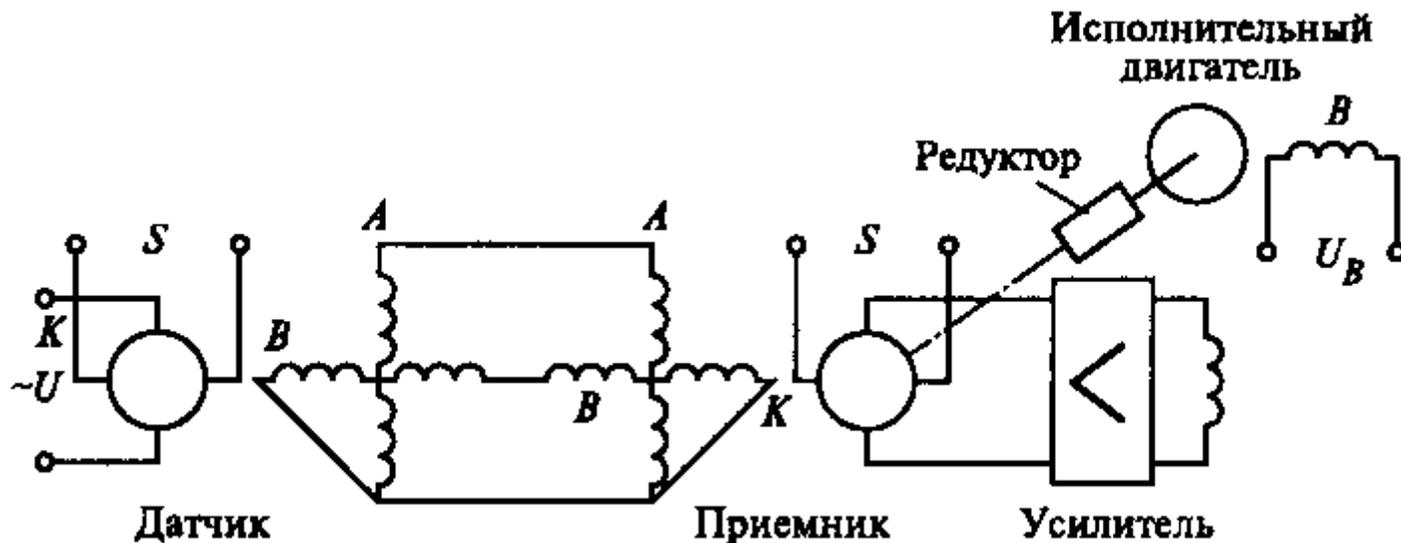
СКВТ в системе дистанционной передачи

СКВТ используют вместо сельсинов в трансформаторном режиме

Одинаковые ВТ – датчик и приемник

- » Обмотка возбуждения S датчика подключена к сети
- » Две обмотки ротора соединяют вместе (для экономии проводов)
- » Обмотки ротора датчика и приемника соединяют линиями связи
- » Поток обмотки S датчика наводит ЭДС в обмотках A и B (зависят от положения датчика)
- » Под действием E_A и E_B протекают токи в обмотках роторов датчика и приемника

(ВТ имеют бóльшую точность, чем сельсины, но менее использованы (AB_δ меньше) → требуются усилители мощности)



- » Токи обмоток A и B приемника создают основной поток приемника Φ_{Π}
- » Поток Φ_{Π} наводит ЭДС $E_{СП}$ в выходной обмотке S приемника
- » Величина ЭДС $E_{СП}$ зависит от угла рассогласования $\theta = \alpha_{\text{Д}} - \alpha_{\text{П}}$
- » Выходное напряжение U_S управляет ИД, поворачивающим ротор приемника в согласованное положение

Погрешности вращающихся трансформаторов

Погрешности вращающихся трансформаторов

Классификация погрешностей в зависимости от причин возникновения

- » по принципу действия (есть даже у идеальных ВТ):
 - погрешности от нелинейности выходной характеристики
 - погрешности из-за неточности симметрирования
 - фазовые и амплитудные погрешности ВТ в режиме фазовращателя
- » по конструктивным ограничениям:
 - от зубчатого строения статора и ротора
 - от несинусоидальности поля по окружности зазора
 - от нелинейности магнитной характеристики
 - от остаточной намагниченности (гистерезиса)
- » по технологическим причинам:
 - эксцентриситет окружности статора и ротора
 - асимметрия магнитной системы
 - неточность скоса пазов
 - КЗ контура в стали и обмотках
- » по условиям эксплуатации:
 - изменение температуры
 - колебания напряжения питания
 - изменение частоты

Разные виды погрешностей связаны друг с другом (влияют друг на друга)

Погрешности вращающихся трансформаторов

Показатели точности ВТ

» Погрешность отображения синусной зависимости

– отклонение формы выходного напряжения от идеальной синусоиды в зависимости от углового положения α

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta E_m^{(+)} + \Delta E_m^{(-)}}{2 \cdot E_m} \cdot 100\%$$

где E_m – максимальная выходная ЭДС

$\Delta E_m^{(+)}$, $\Delta E_m^{(-)}$ – максимальное отклонение в положительную и отрицательную сторону

» Погрешность отображения линейной зависимости

– отклонение формы выходного напряжения от идеальной прямой в зависимости от углового положения α (в диапазоне углов от -60° до $+60^\circ$)

$$\varepsilon_{\text{л}} = \frac{\Delta E_m^{(+)} + \Delta E_m^{(-)}}{2 \cdot E_m} \cdot 100\%$$

Классы точности СКВТ

- » I класс точности – $\varepsilon_c \leq \pm 0,01\%$
- » ...
- » VI класс точности – $\varepsilon_c \leq \pm 0,3\%$

Классы точности ЛВТ

- » I класс точности – $\varepsilon_{\text{л}} \leq \pm 0,02\%$
- » ...
- » V класс точности – $\varepsilon_{\text{л}} \leq \pm 0,3\%$

Погрешности вращающихся трансформаторов

Показатели точности ВТ

» Асимметрия нулевых точек

– характеризует неперпендикулярность обмоток статора / ротора

- СКВТ поочередно возбуждают со стороны обмоток S и K
- Измеряют положения α_A и α_B , при которых $E_A = 0$ и $E_B = 0$ или минимальны (положения α_A и α_B должны отличаться на $\pi/2$)

Величина асимметрии $\Delta\alpha_{AB}$ – максимальное отклонение от $\pi/2$

В современных ВТ $\Delta\alpha_{AB}$ от $\pm 20''$ до $\pm 10'$

» Остаточная ЭДС в нулевых точках

– остаточная ЭДС вследствие электрической или магнитной несимметрии

Величина остаточной ЭДС E_0 в о.е. $\varepsilon_0 = \frac{E_0}{E_m} \cdot 100\%$

В современных ВТ $\varepsilon_0 \leq (0,005 \dots 0,15)\%$

Погрешности вращающихся трансформаторов

Показатели точности ВТ

- » ЭДС квадратурной обмотки E_K
при подаче питания на обмотку возбуждения U_S
 - Обмотки статора взаимно перпендикулярны
 - Но на практике взаимная индуктивность не равна 0

Величина ЭДС E_K в о.е. $\varepsilon_K = \frac{E_K}{U_S} \cdot 100\%$ В современных ВТ $\varepsilon_K \leq (0,05 \dots 0,18)\%$

- » Неравенство коэффициентов трансформации
(для синусной обмотки $k_A = w_A/w_S$ и для косинусной обмотки $k_B = w_B/w_S$)

Измеряется коэффициент трансформации на ХХ

$$k_A = \frac{E_{Am}}{E_S} \approx \frac{U_{A(XX)}}{U_S} \quad \text{и} \quad k_B = \frac{E_{Bm}}{E_S} \approx \frac{U_{B(XX)}}{U_S}$$

Величина погрешности в о.е. $\Delta k = \frac{k_A - k_B}{k_A} \cdot 100\%$ В современных ВТ $\Delta k \leq 0,3\%$

Погрешности вращающихся трансформаторов

Показатели точности ВТ

- » Для ВТ в системах дистанционных передач – в качестве погрешности используется погрешность следования (определяется аналогично сельсинам в трансформаторном режиме)

Классы точности

- » I класс точности – $\varepsilon_{\text{III}} \leq \pm 0,05'$
 - » ...
 - » XII класс точности – $\varepsilon_{\text{III}} \leq \pm 30'$
-
- » Существуют и дополнительные виды погрешностей:
 - изменение выходной ЭДС при колебаниях U, f, t°

Далее

Тахогенераторы

👤 Ширинский С.В.
каф. ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

✉ ShirinskiiSV@mpei.ru

🔗 <https://e-200.ru/EMAU/>

