

# Асинхронные исполнительные двигатели

---

Исполнительные двигатели переменного  
тока на базе двухфазных АД



# Асинхронные исполнительные двигатели

Как и обычные АД, асинхронные исполнительные двигатели – самые распространенные ИД (простота, дешевизна, надежность)

В качестве исполнительных используют двухфазные асинхронные микродвигатели с КЗ ротором 2 перпендикулярные обмотки на статоре – ОВ и ОУ

Среди требований к исполнительным двигателям

- » устойчивая работа при скоростях от 0 до синхронной
- » широкая зона регулирования
- » отсутствие самохода

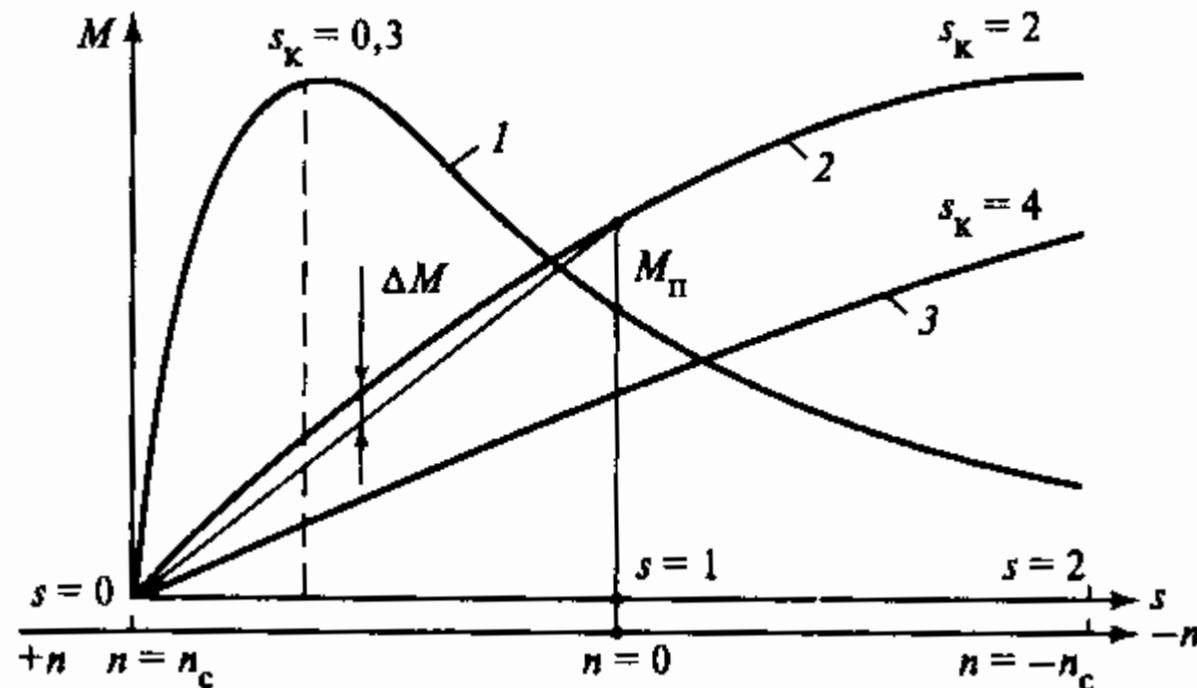
Для выполнения этих требований применяют АД с большим сопротивлением ротора  $r_2$  (чтобы  $s_{кр} > 1$ )

Механические характеристики

1 – обычный АД

2,3 – исполнительный двигатель

- » При  $s_{кр} = 2$  в рабочей зоне характеристика нелинейна (отклонение от прямой линии  $\Delta M$ )
- » При бóльших  $s_{кр}$  линейность повышается, но
  - снижается  $M_{II}$  и мощность на валу
  - возрастают потери в роторе (большое  $r_2$ )



Мощность АИД в 2...3 раза меньше  $P_H$  силового АД в тех же габаритах

# Конструкции АИД

# АИД с полым немагнитным ротором

- » мощности от 0,1 до 900 Вт
- » частота питающей сети 50, 200, 400, 500 Гц
- » синхронная частота вращения от 150 до 30,000 об/мин

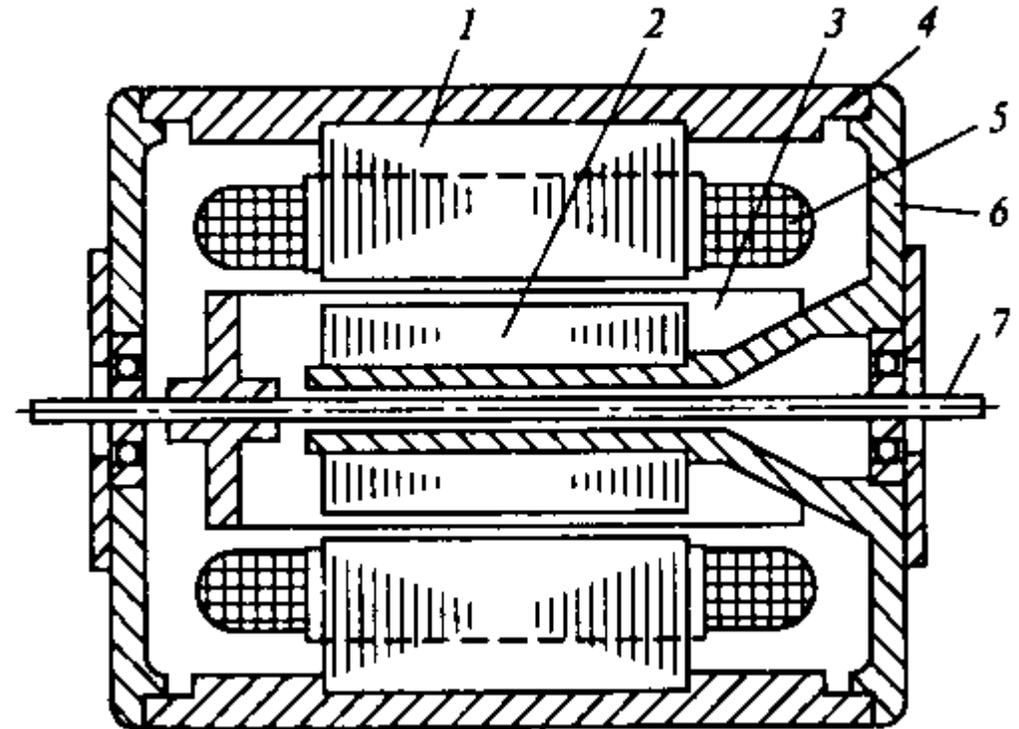
- 1 – внешний статор
- 2 – внутренний статор
- 3 – ротор (полый цилиндр)
- 4 – корпус
- 5 – обмотки
- 6 – подшипниковый щит
- 7 – вал

Внешний статор – обычный статор АД

- » шихтованный сердечник с пазми
- » двухфазная распределенная обмотка

Внутренний статор – магнитопровод для замыкания потока

- » шихтованный цилиндрический сердечник



Полый ротор – тонкостенный стакан из немагнитного материала (сплавы Al)

- » толщина стенок 0,1...1,0 мм
- » воздушные зазоры по 0,15...0,25 мм
- » малоинерционный ротор

# АИД с полым немагнитным ротором

В маломощных АИД ( $P_H < 3$  Вт) обмотки располагают на внутреннем статоре

- » проще укладывать на внешнюю поверхность
- » но возрастает диаметр статора → диаметр ротора → возрастает момент инерции

Иногда одна фазная обмотка располагается на внешнем статоре, другая – на внутреннем

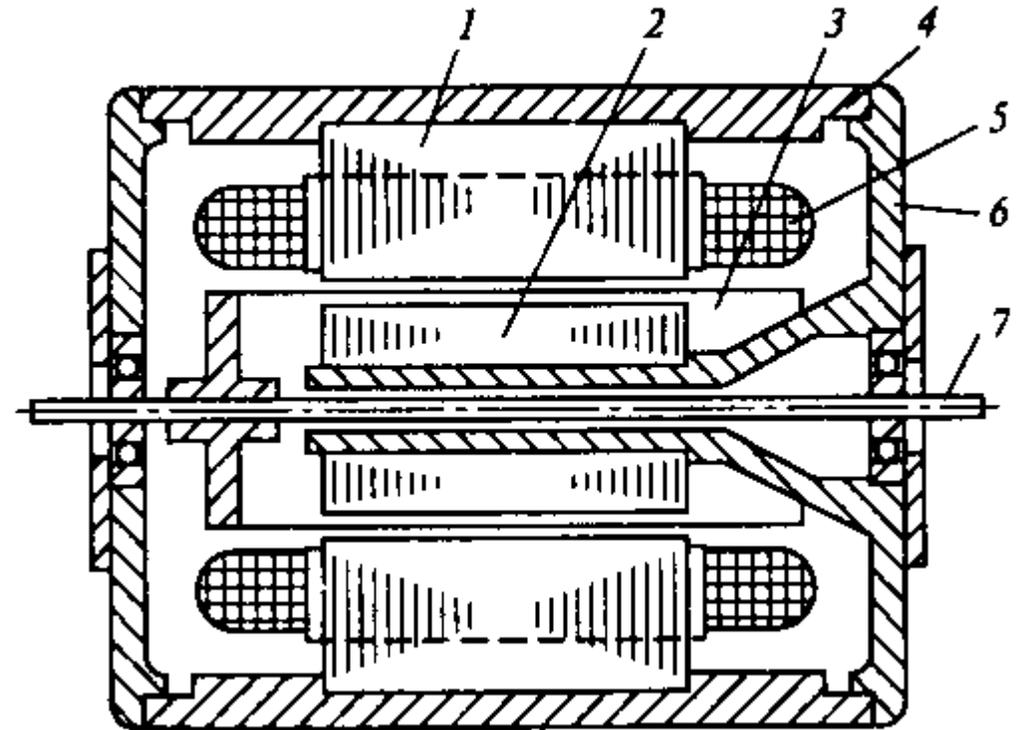
Отличительная особенность – большой немагнитный зазор

$$\delta = \delta_1 + \Delta + \delta_2 \rightarrow 0,4 \dots 1,5 \text{ мм}$$

- большой намагничивающий ток (до  $0,8 \dots 0,9 I_H$ )
- низкий коэффициент мощности
- большой полный ток → электрические потери → низкий КПД

Другая особенность – малое индуктивное сопротивление рассеяния ротора  $x_R = (0,05 \dots 0,1)r_R$

- уменьшается нелинейность механических и регулировочных характеристик



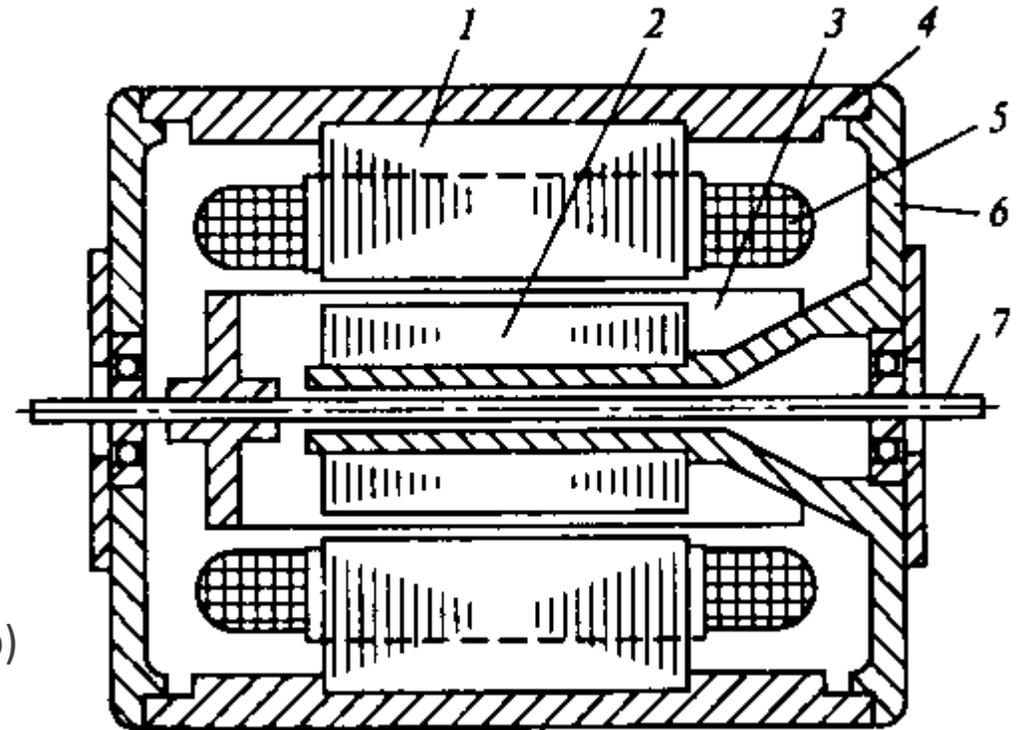
# АИД с полым немагнитным ротором

## Достоинства

- » малый  $J$  ротора → хорошее быстродействие ( $T_M < 60$  мс)
- » относительно хорошая линейность характеристик ( $\Delta M = (0,05 \dots 0,15) M_{\Pi}$ )
- » устойчивая работа АИД во всем диапазоне скоростей
- » большая кратность регулирования  $n_{\max}/n_{\min} = 100 \dots 200$
- » высокая чувствительность – малый сигнал трогания
  - малый момент инерции
  - малая масса ротора
  - большой пусковой момент
  - отсутствие радиальных сил тяжения (немагнитный ротор)
- » плавность и бесшумность хода, постоянство  $M_{\Pi}$  в любом положении (нет зубцов на роторе)

## Недостатки

- » низкий КПД (0,2...0,4), при регулировании  $n$  еще меньше
  - намагничивающий ток → большой  $I_1$  → большие  $P_{\Sigma 1}$
  - большое  $r_R$  → большие  $P_{\Sigma 2}$
- » низкий  $\cos \varphi$  (0,2...0,4)



- » большие габариты и масса
  - из-за низких  $\eta$  и  $\cos \varphi$

Снижению габаритов способствует высокая частота сети

# АИД с обычным КЗ ротором

Конструкция полностью аналогична силовому АД

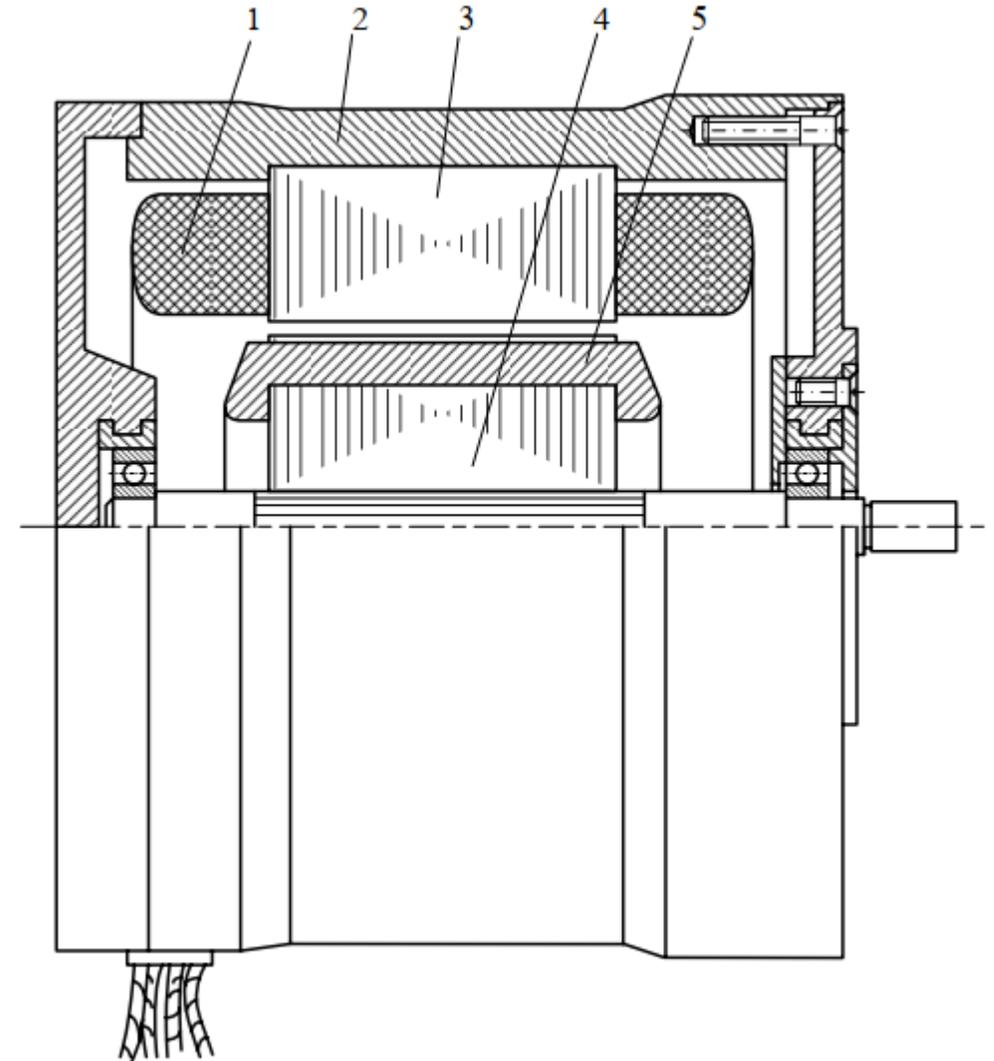
- » малый немагнитный зазор
  - малый намагничивающий ток → выше  $\cos\varphi$
  - меньше  $P_{\text{э1}}$  → больше КПД
- » тяжелый ротор → большой  $J$ , низкое быстродействие
- » в роторе для увеличения  $r_R$ 
  - материалы с большим  $\rho$  (латунь, бронза)
  - малое сечение стержней
- » обмотка ротора – в пазах стального сердечника
  - большое  $x_R$
  - завышенное  $r_R$

Например, подберем  $r_R$  так, чтобы получить нужное  $s_{\text{кр}}$   
Критическое скольжение зависит от параметров АД

$$s_{\text{кр}} \sim \frac{r_R}{x_S + x_R} \quad \text{тогда} \quad r_R = s_{\text{кр}} (x_S + x_R)$$

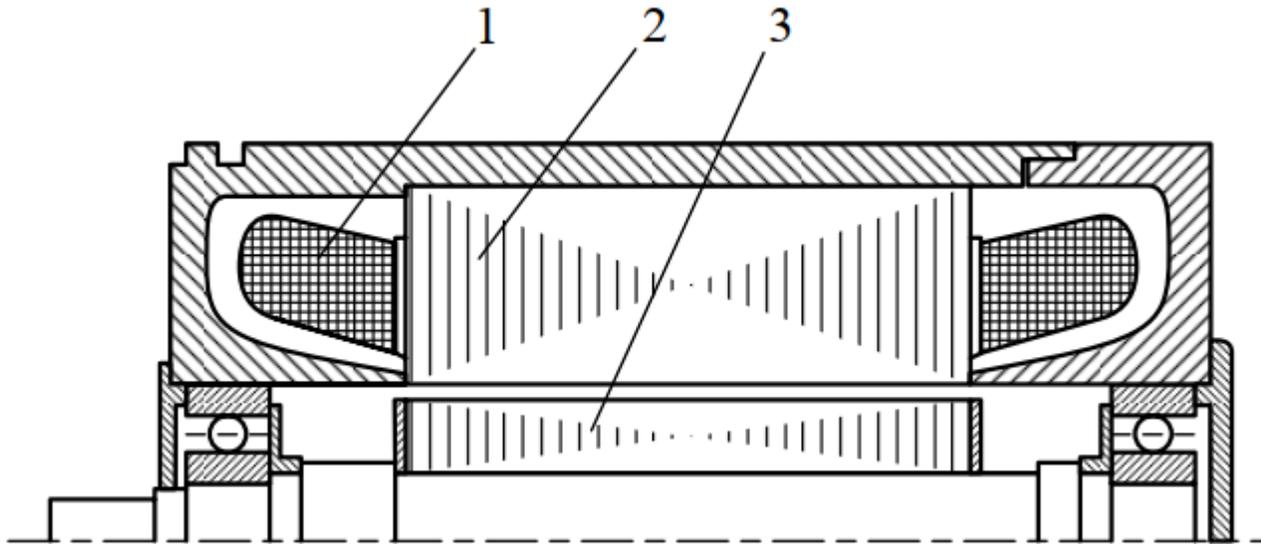
- » в АИД с полым немагнитным ротором  $x_R \approx 0 \rightarrow r_R = s_{\text{кр}} x_S$
- » в АИД с обычным ротором  $x_R \approx x_S \rightarrow r_R = 2s_{\text{кр}} x_S$

Завышенное значение  $r_R \rightarrow$  увеличенные потери  $P_{\text{э2}}$   
→ не такой уж большой КПД



# АИД с обычным КЗ ротором

АИД сквозной конструкции



Внутренний диаметр статора равен диаметру посадочного места подшипника

- » общая проточка внутреннего диаметра
- » точность позиционирования ротора
- » сверхмалый зазор (до 0,05 мм)
- » высокий  $\cos\varphi$  и КПД

Для повышения быстродействия (снижения  $T_M$ )

- » открытые прямоугольные пазы на роторе
  - уменьшение пазового рассеяния и снижение  $x_R$
- » большая длина / малый диаметр ротора ( $l/D = 2...3$ )
  - снижение момента инерции  $J$

Недостатки

- » относительно большой момент инерции
- » большой сигнал трогания
- » радиальные силы магнитного тяжения
- » значительные зубцовые гармоники поля (зубчатый ротор, открытые пазы)

# АИД с полым ферромагнитным ротором

- » Статор – обычный с 2-фазной обмоткой
- » Ротор – полый ферромагнитный цилиндр толщиной 0,3...3 мм, иногда - омедненный

## Ферромагнитный ротор

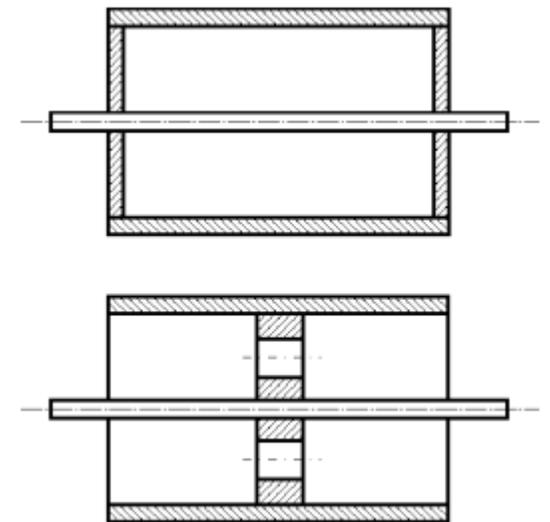
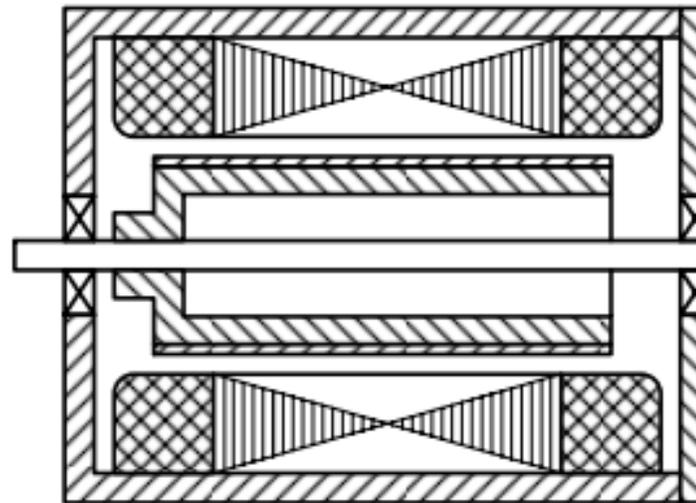
- » внутренний статор не нужен
- » немагнитный зазор  $\delta = 0,2...0,3$  мм
- » но намагничивающий ток все равно большой, т.к. тонкостенный ротор сильно насыщен

## Увеличение толщины ротора нецелесообразно

- » увеличение момента инерции ротора
- » при частотах  $f = 400...500$  Гц глубина проникновения поля все равно менее 2 мм

## Большое сопротивление ротора $r_R$ ( $\rho$ материала + вытеснение тока)

- большое  $s_{кр}$
- отсутствие самохода
- устойчивая работа от 0 до  $n_c$
- линейность характеристик



## Недостатки

- » большое  $r_R$ 
  - потери в роторе  $P_{э2}$
  - снижение КПД
- » радиальные силы магнитного тяжения

# Способы управления АИД и предотвращение самохода

# Способы управления АИД

Для управления работой асинхронного исполнительного двигателя можно использовать амплитуду и фазу напряжения управления

## Амплитудное управление

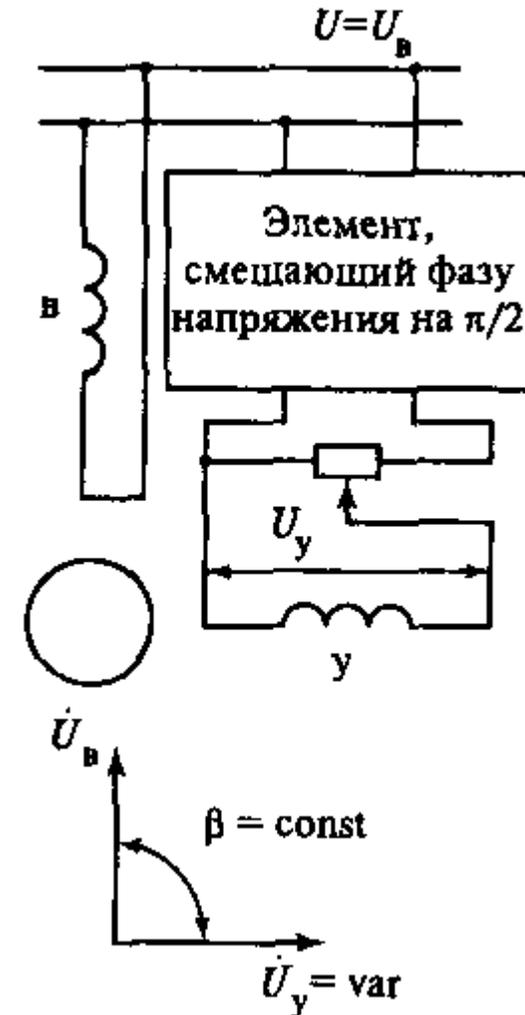
- » ОВ подключена к сети с напряжением  $U_B = \text{const}$
- » напряжение на ОУ  $U_y$  сдвинуто по фазе на  $\pi/2$  относительно  $U_B$
- » напряжение  $U_y$  изменяется по величине

$$\alpha_e = \frac{U_y}{U'_B} = \frac{U_y}{U_B/k} \quad \text{– эффективный коэффициент сигнала}$$

- » круговое поле (и максимальный момент) только при  $\alpha_e = 1$  ( $U_{y0} = U'_B$ )
- »  $U_{y0} \rightarrow$  номинальное напряжение
- » при  $\alpha_e < 1$  ( $U_y \neq U'_B$ ) поле эллиптическое
- » при  $\alpha_e = 0$  ( $U_y = 0$ ) поле пульсирующее (однофазное питание)

Регулирование  $M$  (и  $n$ ) происходит из-за изменения степени эллиптичности поля (момент несимметричного АД  $M = M_1 + M_2$ )

Для реверса АИД надо изменить фазу  $U_y$  на противоположную (сдвинуть на  $\pi$ )



# Способы управления АИД

Для управления работой асинхронного исполнительного двигателя можно использовать амплитуду и фазу напряжения управления

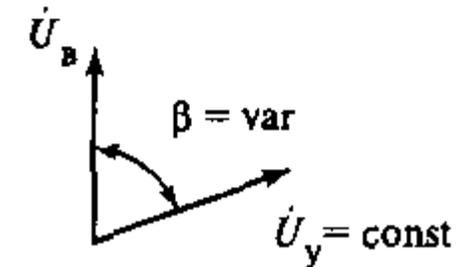
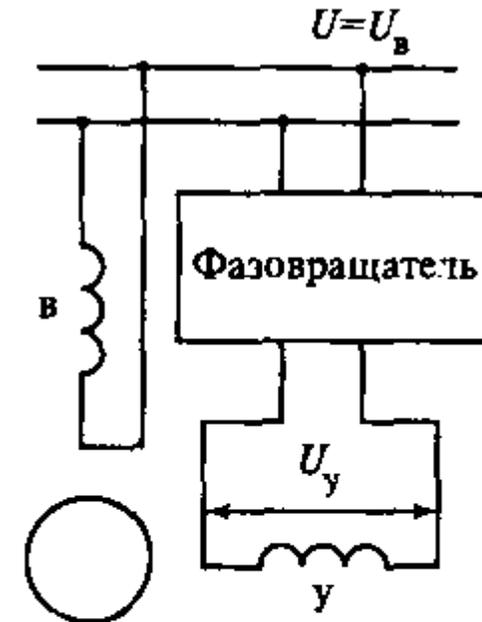
## Фазовое управление

- » ОВ подключена к сети с напряжением  $U_B = \text{const}$
- » напряжение на ОУ  $U_y$  неизменно по амплитуде  $U_y = U'_B = U_B/k$
- » изменяется фазовый сдвиг между  $U_y$  и  $U_B$

$\sin\beta$  – коэффициент сигнала

- » круговое поле – при сдвиге фаз между  $U_y$  и  $U_B$  на  $\pi/2$  ( $\sin\beta = 1$ )
- » при  $\sin\beta < 1$  ( $\beta \neq \pi/2$ ) поле эллиптическое
- » при  $\sin\beta = 0$  ( $\beta = 0$ ) поле пульсирующее

Для реверса АИД надо изменить чередование фаз  
→ сделать  $\beta$  отрицательным ( $\sin\beta < 0$ )



# Способы управления АИД

Для управления работой асинхронного исполнительного двигателя можно использовать амплитуду и фазу напряжения управления

## Амплитудно-фазовое управление

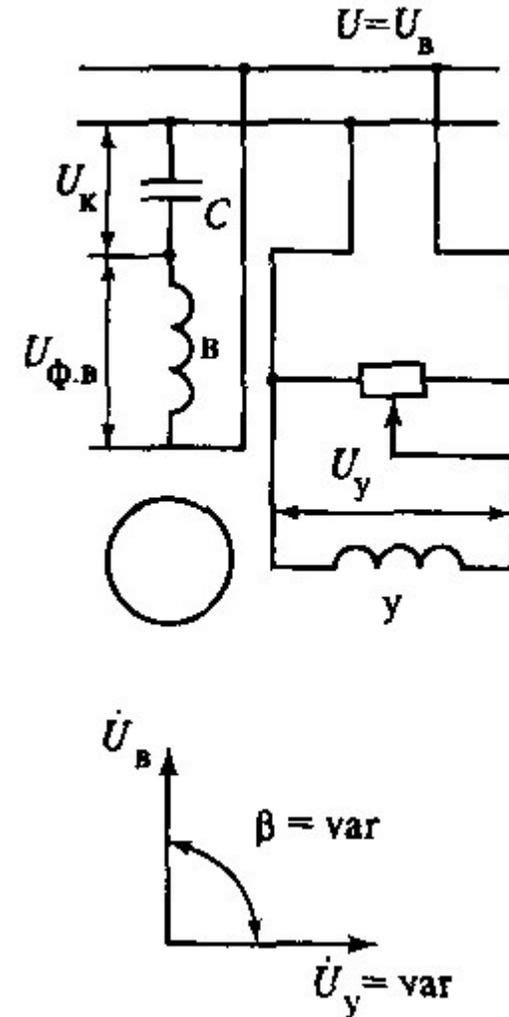
- » ОВ подключена к сети через конденсатор  $C$
- » напряжение на ОУ  $U_y$  изменяется только по амплитуде
- » при этом изменяется напряжение на ОВ  $U_{\phi.B}$  как по величине, так и по фазе (из-за изменения тока и  $U_K = I_B Z_C$ )
- » параметры АИД выбирают так, чтобы получить круговое поле при пуске
- » соответствующий коэффициент сигнала  $\rightarrow \alpha_0$

Условия получения кругового поля в АКД

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_0 = \frac{\alpha_{e0}}{k} = \frac{U_{y0}}{U_B} = \frac{x_y}{k r_y} \\ x_C = \frac{k r_y}{\alpha_0} + k^2 x_y \end{array} \right.$$

- » при других  $\alpha \neq \alpha_0$  поле эллиптическое
- » при  $\alpha = 0$  поле пульсирующее

Для реверса АИД надо переключить  $C$  в цепь другой фазы



# Самоход АИД

Самоход исполнительного двигателя – вращение ротора при отсутствии сигнала управления ( $\alpha_e = 0, \sin\beta = 0, \alpha = 0$ )

## Параметрический самоход

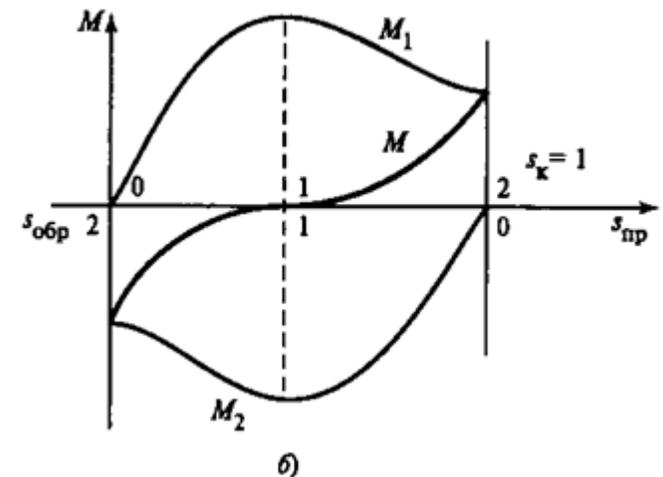
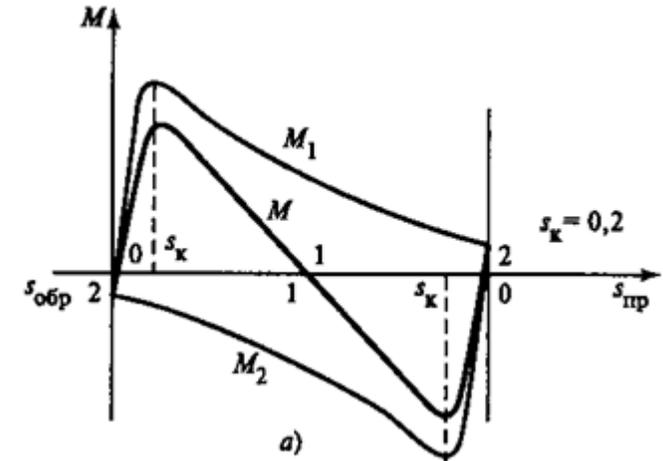
самоход по причине неправильного выбора параметров АИД (ошибка при проектировании)

при работе с малой нагрузкой при снятии сигнала управления ротор продолжает вращение

При отсутствии сигнала управления – поле пульсирующее (АИД аналогичен однофазному АД)

- » Если у АИД  $s_{кр} < 1$  (рис. а), в зоне двигательного режима  $M > 0$  (однофазный АД не имеет  $M_{п}$ , но может устойчиво вращаться)
- » Если  $s_{кр} = 1$  (рис. б) или больше, момент всегда  $M < 0$  (тормозной момент останавливает вращение)

Надо проектировать АИД так, чтобы  $s_{кр}$  гарантированно было  $> 1$   
При любом способе снятия сигнала управления однофазный АД должен останавливаться сам



# Самоход АИД

Самоход исполнительного двигателя – вращение ротора при отсутствии сигнала управления  
( $\alpha_e = 0, \sin\beta = 0, \alpha = 0$ )

## **Технологический самоход**

самоход по причине технологических допусков и ошибок изготовления АИД

ротор начинает вращение  
при включении питания  
одной только ОВ

Причина начала вращения – возникновение слабого эллиптического поля из-за

- » КЗ витков в обмотке статора
- » КЗ в стали статора
- » неравенство  $\mu$  по разным осям (анизотропия магнитных свойств)
- » неравномерность воздушного зазора
- » неравномерность толщины полого ротора

Требуется высококачественное изготовление АИД

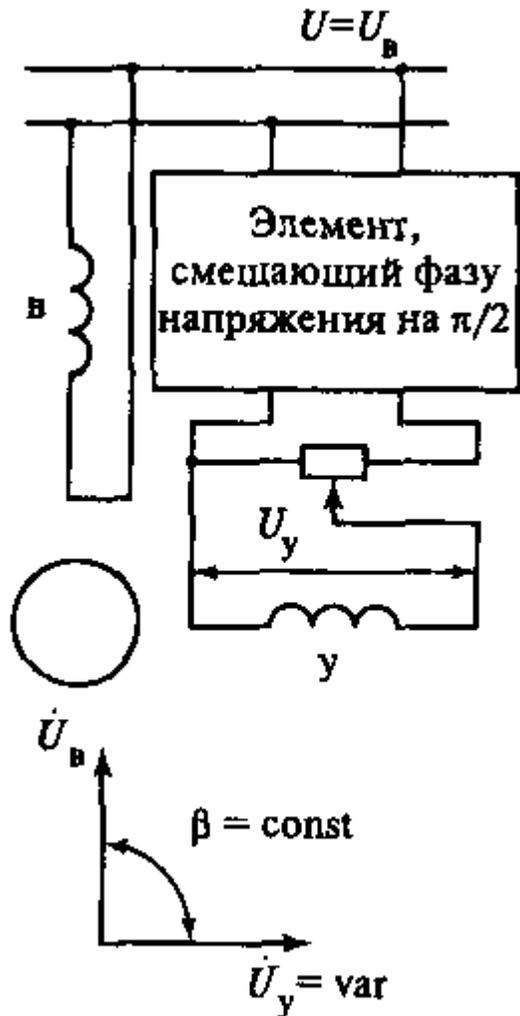
- » тщательная изоляция обмотки и листов сердечника
- » точная механическая обработка
- » «веерная» сборка пакета сердечника (поворот листов на  $t_z$ )

# Амплитудное управление АИД

Уравнения и  
характеристики

# Амплитудное управление АИД

Сигнал управления  $\alpha_e = U_v / U'_B$



При произвольном  $\alpha_e$  – поле эллиптическое

Воспользуемся методом симметричных составляющих

Для 2-фазного несимметричного АД с учетом наименований обмоток (ОВ и ОУ) токи прямой и обратной последовательности

$$\dot{I}_{y1} = \frac{\dot{U}_y Z_{B2} - jk \dot{U}_B Z_{y2}}{Z_{y1} Z_{B2} + Z_{y2} Z_{B1}}$$

$$\dot{I}_{y2} = \frac{\dot{U}_y Z_{B1} + jk \dot{U}_B Z_{y1}}{Z_{y1} Z_{B2} + Z_{y2} Z_{B1}}$$

Симметричные составляющие тока другой обмотки  $\dot{I}_{B1} = j \frac{\dot{I}_{y1}}{k}$        $\dot{I}_{B2} = -j \frac{\dot{I}_{y2}}{k}$

Здесь  $Z_{y1}, Z_{y2}$  – сопротивления ОУ токам прямой и обратной последовательности

$Z_{B1}, Z_{B2}$  – сопротивления ОВ токам прямой и обратной последовательности

$k = w_B / w_y$  – эффективный коэффициент трансформации

Возможно приведение параметров ОВ

к числу витков ОУ

$$Z_{B1} = k^2 Z_{y1} \quad Z_{B2} = k^2 Z_{y2}$$

# Амплитудное управление АИД

Сигнал управления  $\alpha_e = U_v / U'_B$



Сопротивления  $Z_{y1}, Z_{y2}$  – входные сопротивления схем замещения ОУ для токов прямой и обратной последовательности

Для удобства расчетов исполнительных двигателей

используем вместо скольжения  $s$  величину относительной скорости  $v$

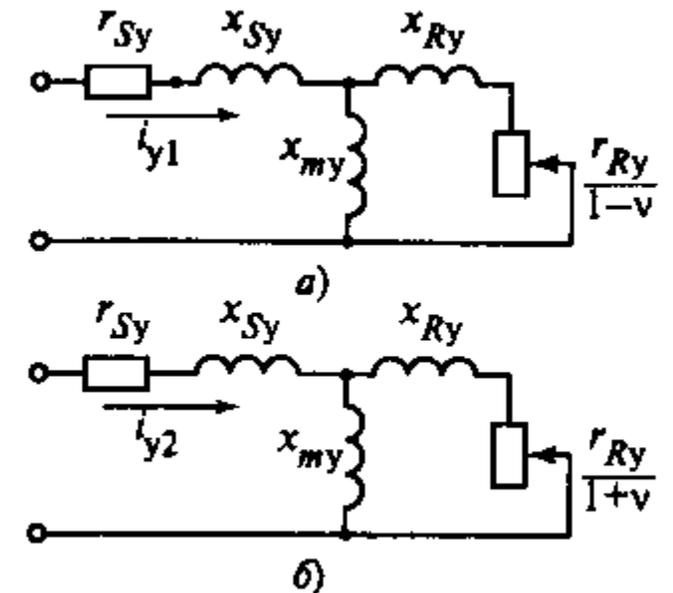
$$v = \frac{\Omega}{\Omega_c} = \frac{n}{n_c} = 1 - s$$

Тогда активное сопротивление ветви ротора токам прямой последовательности

$$\frac{r_R}{s} = \frac{r_R}{1 - v}$$

Активное сопротивление ветви ротора токам обратной последовательности

$$\frac{r_R}{2 - s} = \frac{r_R}{1 + v}$$



# Амплитудное управление АИД

Сигнал управления  $\alpha_e = U_y / U'_B$



Напряжения  $U_y$  и  $U_B$  взаимно перпендикулярны  
Любое может быть выбрано в качестве направления действительной оси временной плоскости

» Пусть действительная ось совпадает с вектором  $U_B$

Тогда 
$$\dot{U}_y = -j\alpha_e \dot{U}'_B = -j\alpha_e \frac{\dot{U}_B}{k}$$

Симметричные составляющие тока ОУ (относительно  $U_B$ )

$$\dot{I}_{y1} = -j \frac{\dot{U}_B}{2kZ_{y1}} (1 + \alpha_e) \quad \dot{I}_{y2} = j \frac{\dot{U}_B}{2kZ_{y2}} (1 - \alpha_e)$$

» Пусть действительная ось совпадает с вектором  $U_y$

Тогда 
$$\dot{U}_B = j \frac{k\dot{U}_y}{\alpha_e}$$

Симметричные составляющие тока ОУ (относительно  $U_B$ )

$$\dot{I}_{y1} = \frac{\dot{U}_y}{2\alpha_e Z_{y1}} (1 + \alpha_e) \quad \dot{I}_{y2} = \frac{\dot{U}_y}{2\alpha_e Z_{y2}} (1 - \alpha_e)$$

# Амплитудное управление АИД

Вращающий момент АИД найдем как момент двухфазного несимметричного АД

$$M = M_1 + M_2 = \frac{P_{\text{ЭМ1}}}{\Omega_c} + \frac{P_{\text{ЭМ2}}}{-\Omega_c}$$

Электромагнитные мощности прямой и обратной последовательности – по схемам замещения

$$P_{\text{ЭМ1}} = 2I_{y1}^2 r_{Ry1} \quad P_{\text{ЭМ2}} = 2I_{y2}^2 r_{Ry2}$$

где  $r_{Ry1}$ ,  $r_{Ry2}$  – активные сопротивления разветвлений схем замещения (после преобразования схемы замещения в последовательную цепь сопротивлений)

Выразив модули токов через  $U_B$  запишем выражение для момента

$$M = \frac{U_B^2}{2k^2 \Omega_c} \left[ \frac{(1 + \alpha_e)^2}{Z_{y1}^2} r_{Ry1} - \frac{(1 - \alpha_e)^2}{Z_{y2}^2} r_{Ry2} \right]$$

Это уравнение механической характеристики  $M = f(\Omega)$ , но в неявном виде (т.к. параметры  $Z_{y1}$ ,  $Z_{y2}$  и  $r_{Ry1}$ ,  $r_{Ry2}$  зависят от  $v$ )

Для упрощения представим идеальный АИД, в котором вся поступающая мощность поступает в ротор (нет  $\Delta U$  и потерь мощности)

Тогда входные сопротивления  $Z_{y1} = r_{Ry1} = \frac{r_{Ry}}{1 - v}$   $Z_{y2} = r_{Ry2} = \frac{r_{Ry}}{1 + v}$

Вращающий момент идеального АИД

$$M = \frac{U_B^2}{2k^2 r_{Ry} \Omega_c} \left[ 2\alpha_e - (1 + \alpha_e^2)v \right]$$

# Амплитудное управление АИД

Для перехода к относительным единицам выберем систему базовых величин

- » Базовое напряжение – приведенное значение напряжения ОВ

$$U_{\text{б}} = U'_{\text{в}} = \frac{U_{\text{в}}}{k}$$

- » Базовая скорость – угловая скорость вращения поля статора

$$\Omega_{\text{б}} = \Omega_{\text{с}} = \frac{2\pi f_1}{p} \quad \text{или} \quad n_{\text{б}} = n_{\text{с}} = \frac{60 f_1}{p}$$

- » Базовая мощность – электромагнитная мощность при пуске ( $\nu = 0$ ) и круговом поле ( $\alpha_e = 1$ )

$$P_{\text{б}} = P_{\text{ЭМпл}} = \frac{2U_{\text{в}}^2 r_{\text{Рук}}}{k^2 Z_{\text{ук}}^2} \quad \text{здесь } Z_{\text{ук}}, r_{\text{Рук}} \text{ – параметры схемы замещения ОУ при коротком замыкании } (\nu = 0)$$

- » Базовый момент – пусковой вращающий момент при круговом поле ( $\alpha_e = 1$ )

$$M_{\text{б}} = M_{\text{пл}} = \frac{P_{\text{ЭМпл}}}{\Omega_{\text{с}}}$$

Тогда вращающий момент идеального АИД в о.е.  $m = \alpha_e - (1 + \alpha_e^2) \frac{\nu}{2}$

# Амплитудное управление АИД

## Механические характеристики

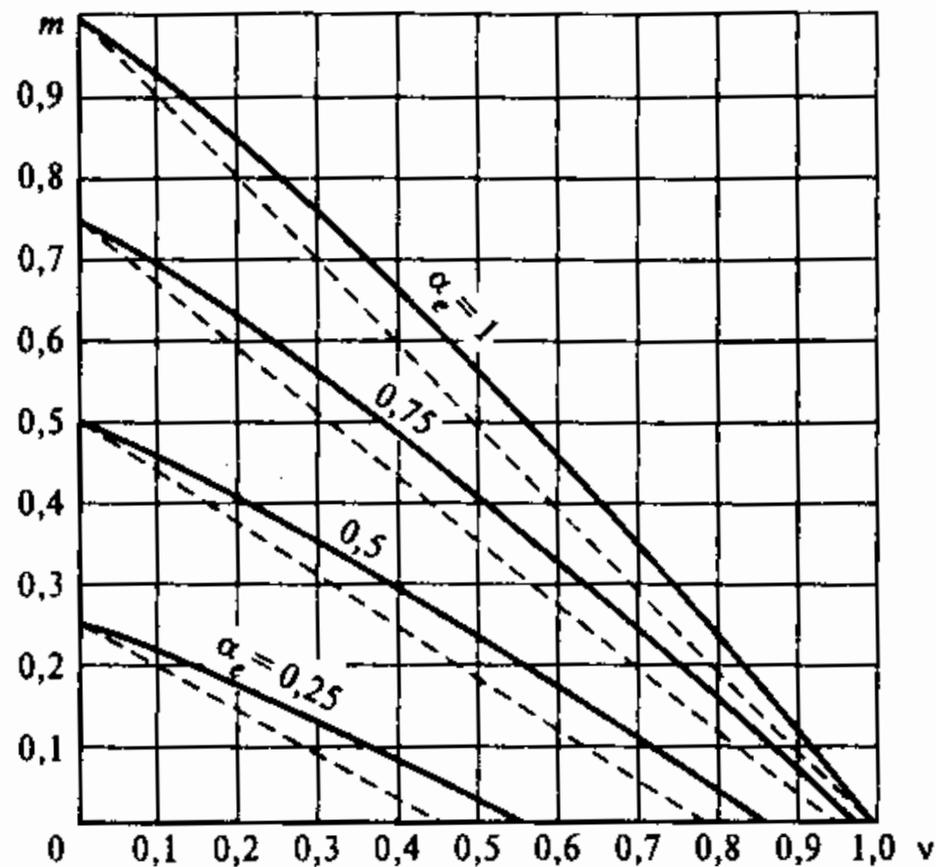
Механическая характеристика:  $m = f(v)$  при  $\alpha_e = \text{const}$

Семейство механических характеристик для разных  $\alpha_e$

- » Механические характеристики идеального АИД – линейны (пунктирные линии)
- » При пуске ( $v = 0$ )  $m_{\text{п}} = \alpha_e$
- » При ХХ ( $m = 0$ )  $v_{\text{ХХ}} = \frac{2\alpha_e}{1 + \alpha_e^2}$
- » Механические характеристики реального АИД нелинейны (сплошные линии – расчет по схеме замещения)
- » При малых нагрузках ( $m$ ) за счет  $Z_S$  ток и момент от токов обратной последовательности  $M_2$  уменьшаются сильнее, чем от токов прямой последовательности  $M_1$
- »  $\rightarrow v_{\text{ХХ}}$  реального АИД больше, чем  $v_{\text{ХХ}}$  идеального АИД (кроме случая  $\alpha_e = 1$ , когда поле круговое)

Характеристики в о.е. для идеального и реального АИД построены при разных  $M_6 \rightarrow$  в разных масштабах

$$m = \alpha_e - (1 + \alpha_e^2) \frac{v}{2}$$



# Амплитудное управление АИД

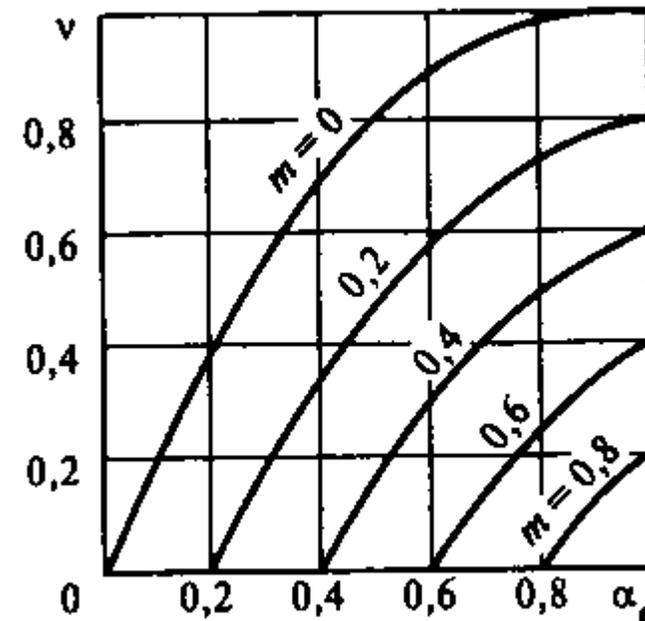
## Регулировочные характеристики

Регулировочная характеристика:  $v = f(\alpha_e)$  при  $m_c = \text{const}$

Семейство регулировочных характеристик для разных  $m_c$

- » Регулировочные характеристики – нелинейны даже для идеального АИД
- » По мере увеличения  $m_c$  характеристики становятся более линейными
- » Регулировочные характеристики реального АИД аналогичны характеристикам идеального,
- » но при том же  $\alpha_e$  в реальном АИД будет больше  $v$
- » Сигнал трогания –  $\alpha_{e \text{ тр}} = m$   
(минимальное  $U_y$  для трогания АИД при нагрузке на валу)

$$v = \frac{2(\alpha_e - m)}{1 + \alpha_e^2}$$



# Амплитудное управление АИД

Полная механическая мощность идеального АИД

$$p'_R = mv = \alpha_e v - (1 + \alpha_e^2) \frac{v^2}{2}$$

Нелинейная зависимость от скорости (при ХХ и пуске  $p'_R = 0$ )

Найдем экстремум, приравняв нулю производную  $dp'_R/dv$

Скорость, при которой мощность максимальна

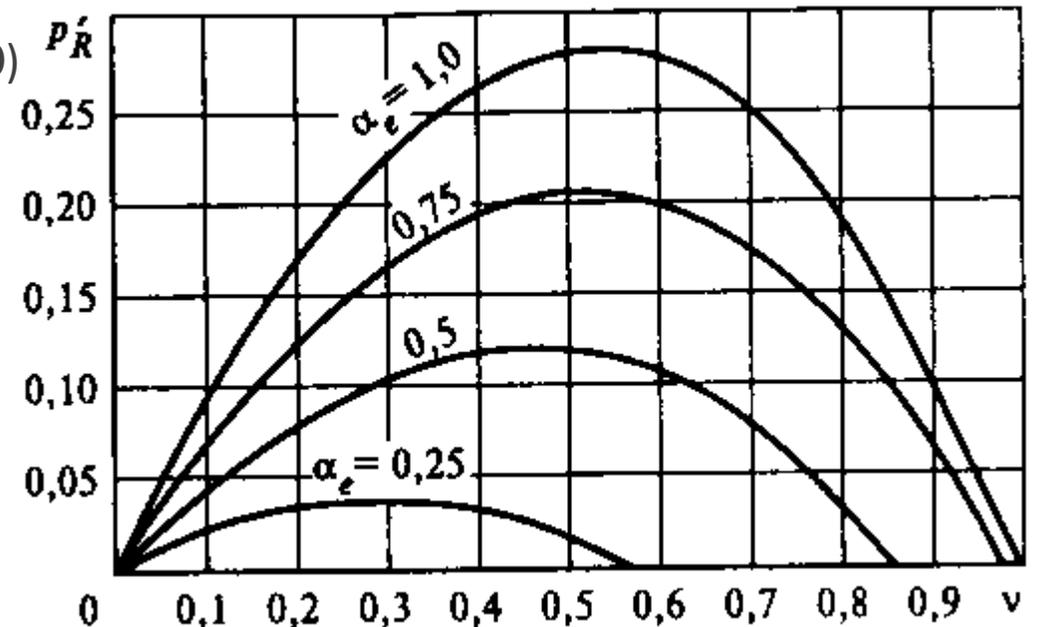
$$v_{p\max} = \frac{\alpha_e}{1 + \alpha_e^2} = \frac{v_x}{2}$$

Максимальная мощность

$$p'_{R\max} = \frac{0,5\alpha_e^2}{1 + \alpha_e^2}$$

В реальных АИД из-за нелинейности характеристик максимум мощности достигается при бóльших скоростях

$$v_{p\max} = (0,52 \dots 0,57)v_{\text{ХХ}}$$



Номинальная мощность АИД

– максимальная механическая мощность при  $\alpha_e = 1$

Номинальная частота вращения АИД

– та, при которой мощность максимальна при  $\alpha_e = 1$

# Амплитудное управление АИД

## Потребляемые мощности

- » Полные мощности, потребляемые обмотками
- » Полные токи, потребляемые обмотками
- » Активные мощности обмоток
- » Коэффициенты мощности обмоток

$$S_y = U_y I_y = \frac{\alpha_e U_B}{k} I_y$$

$$S_B = U_B I_B$$

$$I_y = |\dot{I}_{y1} + \dot{I}_{y2}|$$

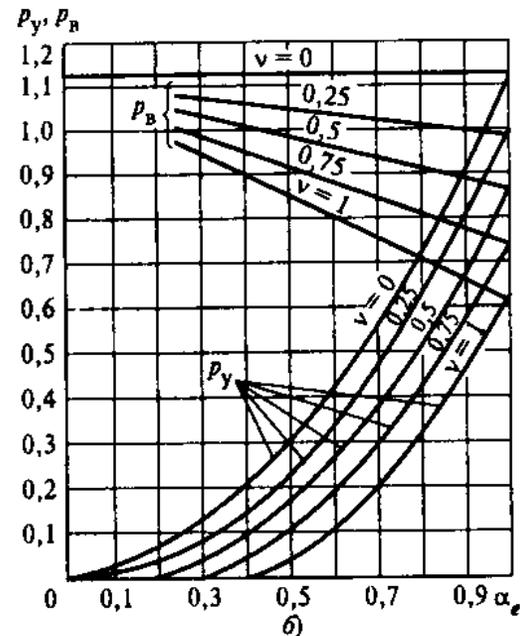
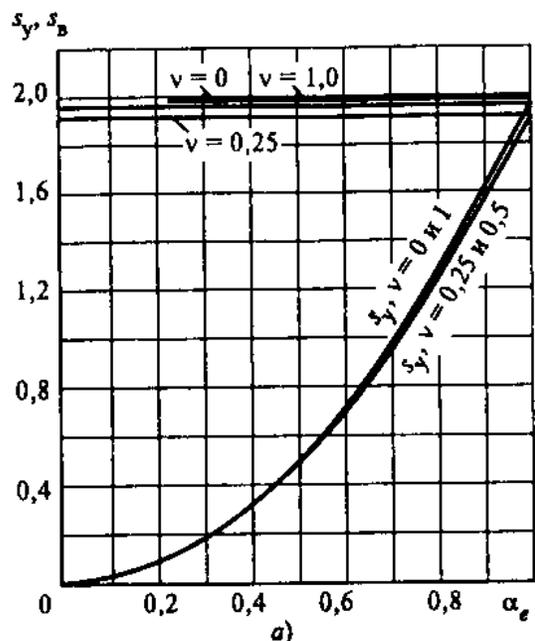
$$I_B = |\dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2}|$$

$$P_y = U_y I_{y.a}$$

$$P_B = U_B I_{B.a}$$

$$\cos \varphi_y = \frac{P_y}{S_y}$$

$$\cos \varphi_B = \frac{P_B}{S_B}$$



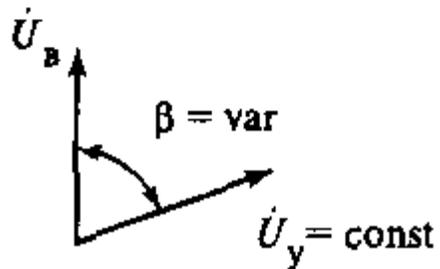
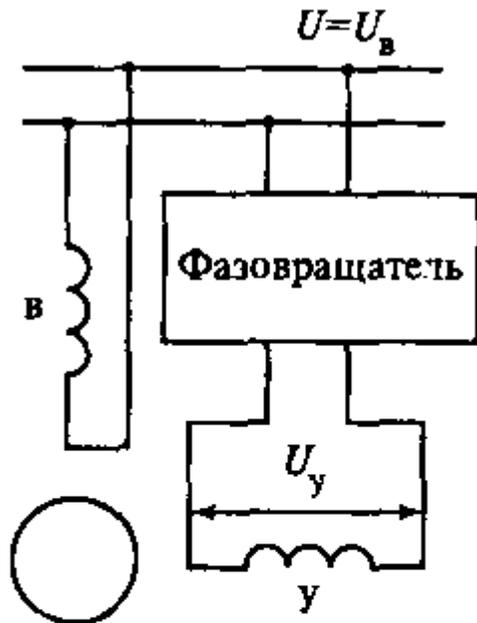
- » Мощности ОБ слабо зависят от  $\alpha_e$
- » Мощности ОУ зависят от  $\alpha_e$  почти параболически

# Фазовое управление АИД

Уравнения и  
характеристики

# Фазовое управление АИД

Сигнал управления  $\sin\beta$



Величина напряжения управления  $U_y = U'_B = \frac{U_B}{k}$

- » при  $\beta = \pi/2$  – поле круговое
- » при уменьшении  $\beta$  возрастает степень эллиптичности поля

При записи уравнений здесь удобно воспользоваться показательной и тригонометрической формой комплексных величин

Также учтем приведение параметров ОВ к числу витков ОУ  $Z_{B1} = k^2 Z_{y1}$   $Z_{B2} = k^2 Z_{y2}$

- » Пусть действительная ось совпадает с вектором  $U_B$ , тогда  $\dot{U}_y = \dot{U}'_B e^{-j\beta} = \frac{\dot{U}_B}{k} e^{-j\beta}$
- Симметричные составляющие тока ОУ (относительно  $U_B$ )

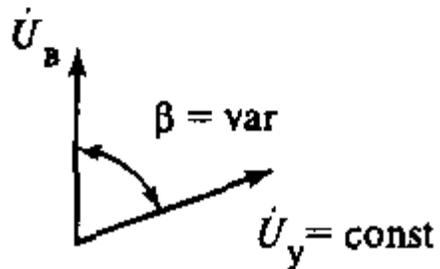
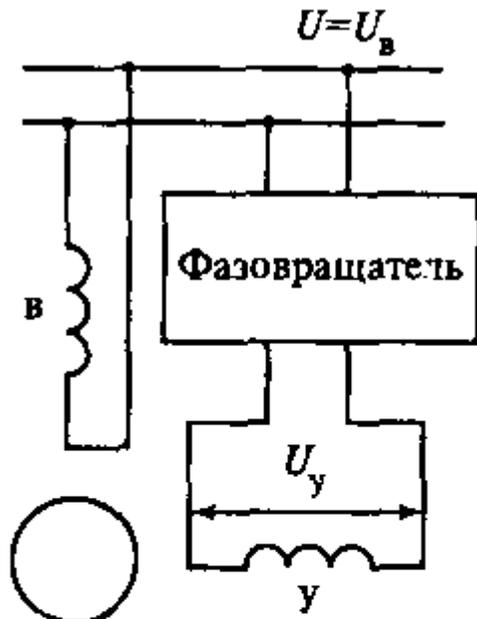
$$\dot{i}_{y1} = \frac{\dot{U}_B}{2kZ_{y1}} (e^{-j\beta} - j) \quad \dot{i}_{y2} = \frac{\dot{U}_B}{2kZ_{y2}} (e^{-j\beta} + j)$$

- » Пусть действительная ось совпадает с вектором  $U_y$ , тогда  $\dot{U}_B = k\dot{U}_y e^{j\beta}$
- Симметричные составляющие тока ОУ (относительно  $U_B$ )

$$\dot{i}_{y1} = \frac{\dot{U}_y}{2Z_{y1}} \left( 1 + e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)} \right) \quad \dot{i}_{y2} = \frac{\dot{U}_y}{2Z_{y2}} \left( 1 + e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right)} \right)$$

# Фазовое управление АИД

Сигнал управления  $\sin\beta$



Воспользуемся выражением токов через  $U_y$   
Перепишем их в тригонометрической форме

$$\dot{I}_{y1} = \frac{\dot{U}_y}{2Z_{y1}}(1 + \sin\beta - j \cos\beta) \quad \dot{I}_{y2} = \frac{\dot{U}_y}{2Z_{y2}}(1 - \sin\beta + j \cos\beta)$$

Симметричные составляющие тока другой обмотки  $\dot{I}_{B1} = j \frac{\dot{I}_{y1}}{k}$   $\dot{I}_{B2} = -j \frac{\dot{I}_{y2}}{k}$

Для удобства дальнейших расчетов выразим токи  
через активные и реактивные составляющие  $I = I_a + jI_p$   
с учетом того, что  $Z = r + jx$

$$\dot{I}_{y1} = \frac{\dot{U}_y}{2Z_{y1}^2} \left[ (r_{y1}(1 + \sin\beta) - x_{y1} \cos\beta) - j(x_{y1}(1 + \sin\beta) + r_{y1} \cos\beta) \right]$$

$$\dot{I}_{y2} = \frac{\dot{U}_y}{2Z_{y2}^2} \left[ (r_{y2}(1 - \sin\beta) + x_{y2} \cos\beta) - j(x_{y2}(1 - \sin\beta) - r_{y2} \cos\beta) \right]$$

# Фазовое управление АИД

Вращающий момент АД  $M = P_{\text{ЭМ}}/\Omega_c$

Электромагнитная мощность несимметричного АД  $P_{\text{ЭМ}} = 2I_{y1}^2 r_{Ry1} + 2I_{y2}^2 r_{Ry2}$

где  $r_{Ry1}, r_{Ry2}$  – активные сопротивления разветвлений схем замещения  
(после преобразования схемы замещения в последовательную цепь сопротивлений)

Квадраты токов найдем через активные и реактивные составляющие  $I^2 = I_a^2 + I_p^2$

После преобразований получим  $I_{y1}^2 = \frac{U_y^2}{2Z_{y1}^2} (1 + \sin \beta)$   $I_{y2}^2 = \frac{U_y^2}{2Z_{y2}^2} (1 - \sin \beta)$

С учетом  $U_y = U_B/k$  квадраты токов запишем как  $I_{y1}^2 = \frac{U_B^2}{2k^2 Z_{y1}^2} (1 + \sin \beta)$   $I_{y2}^2 = \frac{U_B^2}{2k^2 Z_{y2}^2} (1 - \sin \beta)$

Тогда вращающий момент АИД при фазовом управлении  $M = \frac{U_B^2}{k^2 \Omega_c} \left[ \frac{1 + \sin \beta}{Z_{y1}^2} r_{Ry1} - \frac{1 - \sin \beta}{Z_{y2}^2} r_{Ry2} \right]$  Здесь вновь неявная зависимость от  $\nu$

Для идеального АИД, у которого входные сопротивления  $Z_{y1} = r_{Ry1} = \frac{r_{Ry}}{1 - \nu}$   $Z_{y2} = r_{Ry2} = \frac{r_{Ry}}{1 + \nu}$   
выражение вращающего момента запишется как

$$M = \frac{U_B^2}{k^2 \Omega_c r_{Ry}} \left[ (1 + \sin \beta)(1 - \nu) - (1 - \sin \beta)(1 + \nu) \right] \quad \text{или} \quad M = \frac{U_B^2}{k^2 \Omega_c r_{Ry}} 2(\sin \beta - \nu)$$

# Фазовое управление АИД

Система базовых единиц АИД остается неизменной

Тогда момент идеального АИД при фазовом управлении в о.е. запишется как

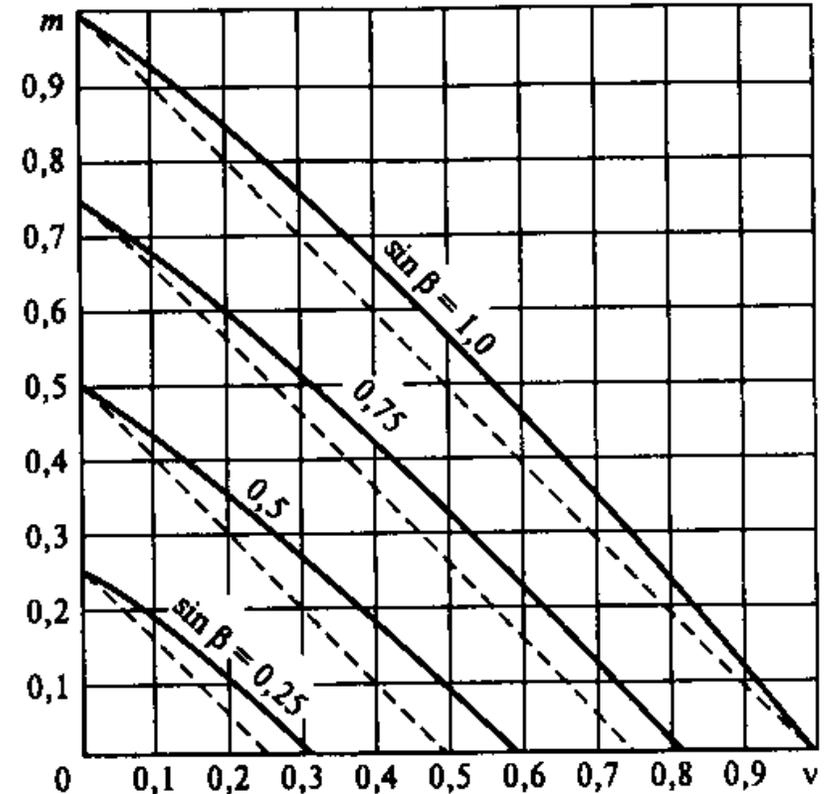
$$m = \sin \beta - v$$

## Механические характеристики

Механическая характеристика:  $m = f(v)$  при  $\sin \beta = \text{const}$

Семейство механических характеристик для разных  $\sin \beta$

- » Механические характеристики идеального АИД – линейны (пунктирные линии)
- » При пуске ( $v = 0$ )  $m_{\text{н}} = \sin \beta$
- » При ХХ ( $m = 0$ )  $v_{\text{ХХ}} = \sin \beta$
- » Жесткость характеристик идеального АИД – постоянна
- » У реального АИД жесткость снижается с уменьшением  $\sin \beta$  (из-за возрастания  $v_{\text{ХХ}}$ )
- » При фазовом управлении характеристики более линейны, чем при амплитудном
- » Но для одинаковой скорости момент АИД с фазовым управлением меньше момента АИД с амплитудным управлением



# Фазовое управление АИД

## Регулировочные характеристики

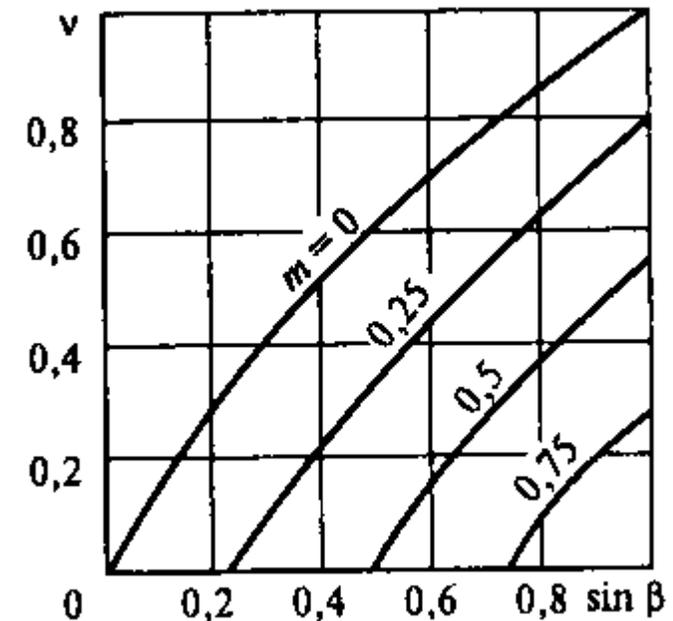
Регулировочная характеристика:  $v = f(\sin\beta)$  при  $m_c = \text{const}$

Семейство регулировочных характеристик для разных  $m_c$

- » Регулировочные характеристики реального АИД при фазовом управлении нелинейны
- » Но в меньшей степени, чем при амплитудном управлении (поскольку одинаковые изменения коэффициентов сигнала  $\sin\beta$  и  $\alpha_e$  приводят к неодинаковому изменению характера поля – степени эллиптичности)
- » При нагрузке коэффициент сигнала трогания равен моменту сопротивления (в о.е.)

$$\sin \beta_{\text{тр}} = m$$

$$v = \sin \beta - m$$



# Фазовое управление АИД

Полная механическая мощность идеального АИД

$$p'_R = v m = v \sin \beta - v^2$$

Максимум механической мощности достигается при скорости

$$v_{p \max} = 0,5 \sin \beta = \frac{v_{XX}}{2}$$

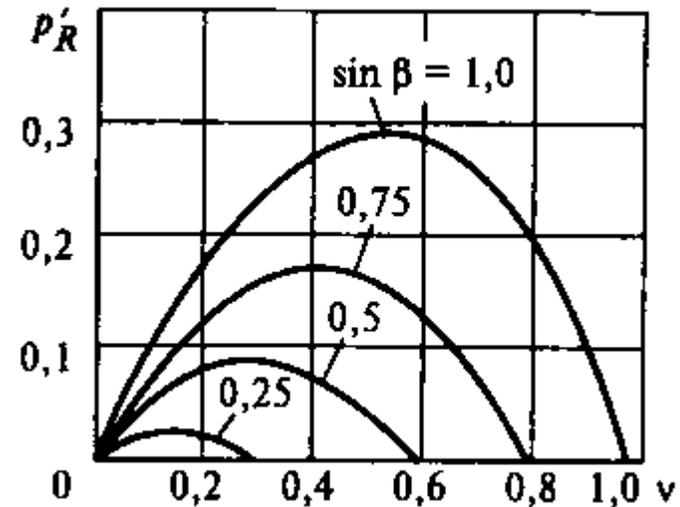
и равен  $p'_{R \max} = 0,25 \sin^2 \beta$

Зависимость полной механической мощности от скорости реального АИД близка к зависимости идеального АИД (из-за бóльшей линейности механических характеристик)

**Потребляемые мощности** рассчитываются аналогично АИД с амплитудным управлением

Полные мощности  $S_y = U_y I_y$   $S_B = U_B I_B$

Активные мощности  $P_y = U_y I_{y.a}$   $P_B = U_B I_{B.a}$



Номинальная мощность АИД

– максимальная механическая мощность при  $\sin \beta = 1$

Номинальная частота вращения АИД

– та, при которой мощность максимальная при  $\sin \beta = 1$

Потребляемые мощности при фазовом управлении слабо зависят от  $\sin \beta$  и от скорости  $v$

# Амплитудно- фазовое управление АИД

Уравнения и  
характеристики

# Амплитудно-фазовое управление АИД

Наиболее простой способ управления для однофазных сетей переменного тока

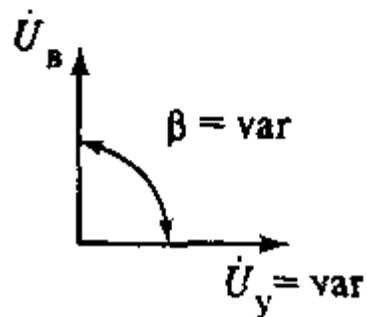
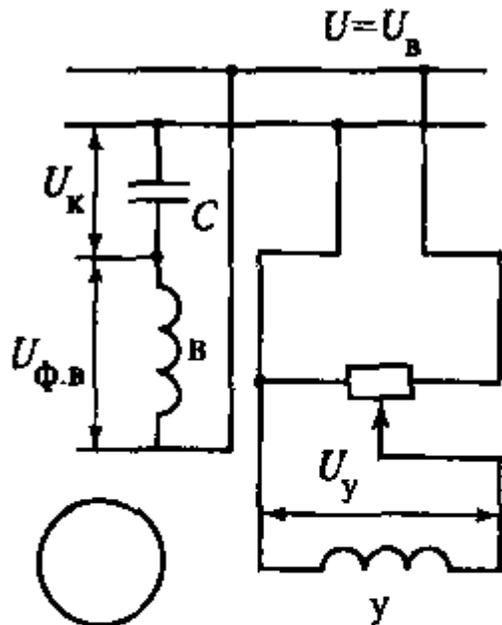


Схема включения аналогична асинхронному конденсаторному двигателю

- » конденсатор включен в цепь ОВ
- » регулирование осуществляется изменением напряжения ОУ

$$\dot{U}_y = \alpha \dot{U}_B = \alpha_e \frac{\dot{U}_B}{k}$$

Напряжение на самой ОВ  $\dot{U}_{\phi.В} = \dot{U}_B - \dot{U}_K$

При изменении  $U_y$  изменяется  $n$

- изменяется входное сопротивление схемы замещения  $Z_B$
- изменяется ток  $I_B$  и падение напряжения на конденсаторе  $U_K = I_B Z_C$
- изменяется величина и фаза напряжения на обмотке ОВ  $U_{\phi.В}$

т.е. управление – амплитудно-фазовое

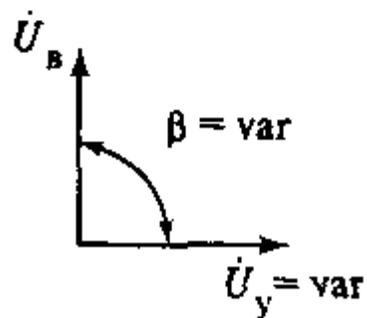
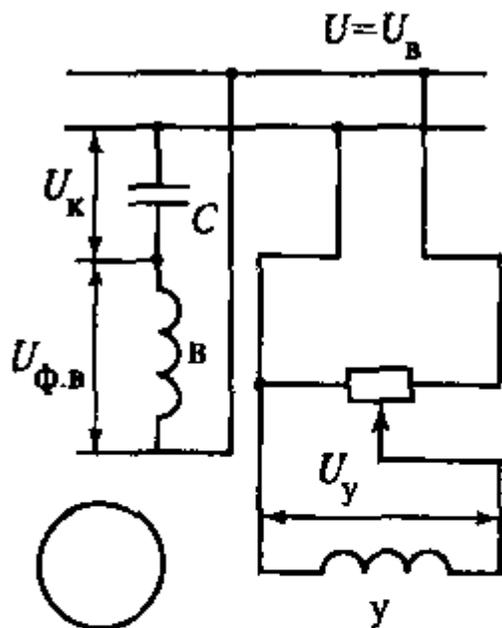
- » параметры АИД выбирают так, чтобы получить круговое поле при пуске и номинальном напряжении  $U_{ун}$

Для этого подбирают коэффициент сигнала и емкость так, чтобы

$$\begin{cases} \alpha_0 = \frac{U_y}{U_B} = \frac{x_{ук}}{kr_{ук}} = \frac{\text{tg } \varphi_y}{k} \\ x_C = \frac{kr_{ук}}{\alpha_0} + k^2 x_{ук} = \frac{x_{ук}}{\alpha_0^2} + x_{\phi.В} \end{cases}$$

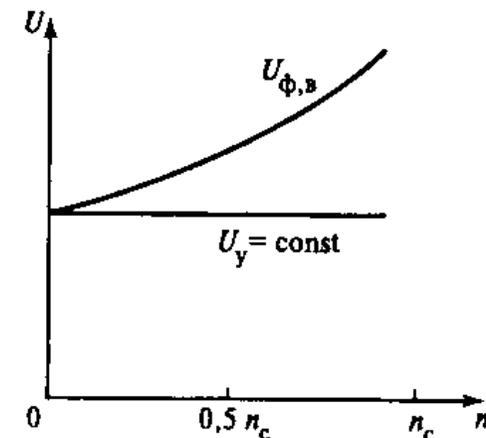
# Амплитудно-фазовое управление АИД

Особенность конденсаторного АИД, в котором  $\dot{U}_{\phi.B} = \dot{U}_B - \dot{U}_K$



» при постоянном  $U_y$  и при увеличении  $n$  (с изменением нагрузки двигателя) напряжение на ОБ  $U_{\phi.B}$  возрастает

Это приводит к увеличению потока  $\Phi_B$  и вращающего момента и искажению характеристик



Для расчета характеристик можно использовать выражения составляющих тока  $I_y$  из теории асинхронных конденсаторных двигателей

$$\dot{i}_{y1} = \dot{U}_B \frac{\alpha(k^2 Z_{y2} - jx_C) - jkZ_{y2}}{Z_{y1}(k^2 Z_{y2} - jx_C) + Z_{y2}(k^2 Z_{y1} - jx_C)}$$

$$\dot{i}_{y2} = \dot{U}_B \frac{\alpha(k^2 Z_{y1} - jx_C) + jkZ_{y1}}{Z_{y1}(k^2 Z_{y2} - jx_C) + Z_{y2}(k^2 Z_{y1} - jx_C)}$$

Выражение для момента аналитически не получить (даже для идеального АИД) Но можно численно рассчитать значения токов и момента для любой скорости и построить графики

# Амплитудно-фазовое управление АИД

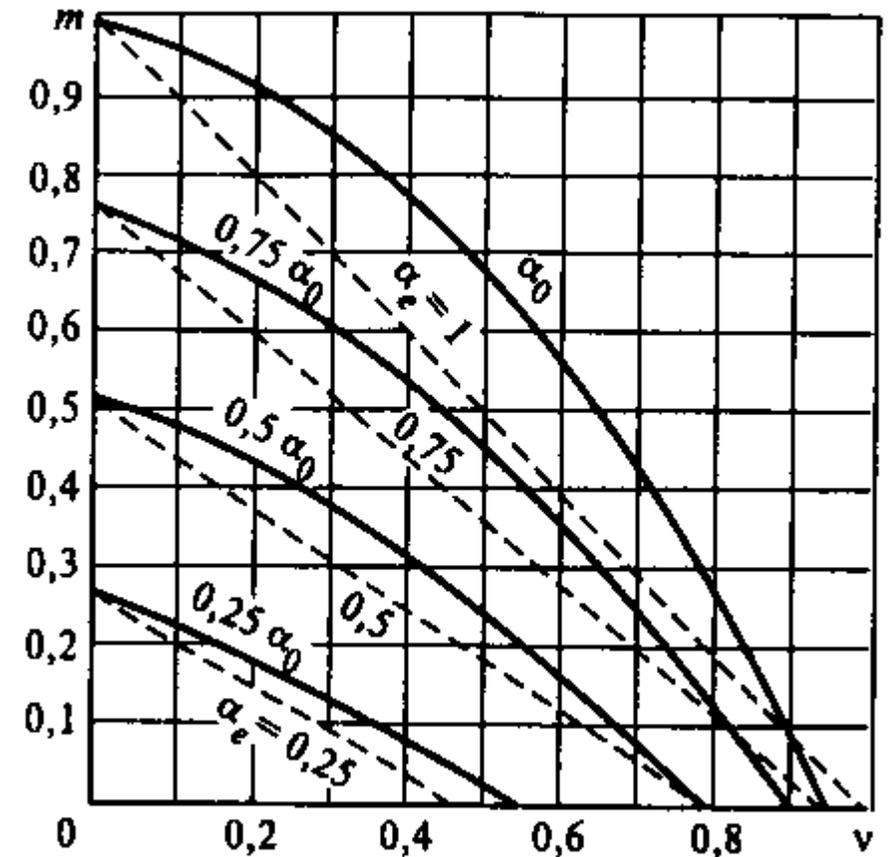
## Механические характеристики

Механическая характеристика:  $m = f(v)$  при  $\alpha = \text{const}$

Семейство механических характеристик для разных  $\alpha$  (в долях от  $\alpha_0$ )

- » Характеристики (сплошная линия) построены по точкам, рассчитанным по схемам замещения
- » Для сравнения (пунктиром) – характеристики идеального АИД с амплитудным управлением
- » Для характеристик в о.е. использован базовый момент – пусковой момент при круговом поле (при  $\alpha_0$ )

$$M_{\text{б}} = M_{\text{пл}} = \frac{2U_{\text{в}}^2 r_{\text{Рук}}}{\Omega_{\text{с}} k^2 Z_{\text{ук}}^2} \left( \frac{x_{\text{ук}}}{r_{\text{ук}}} \right)^2$$



# Амплитудно-фазовое управление АИД

## Механические характеристики

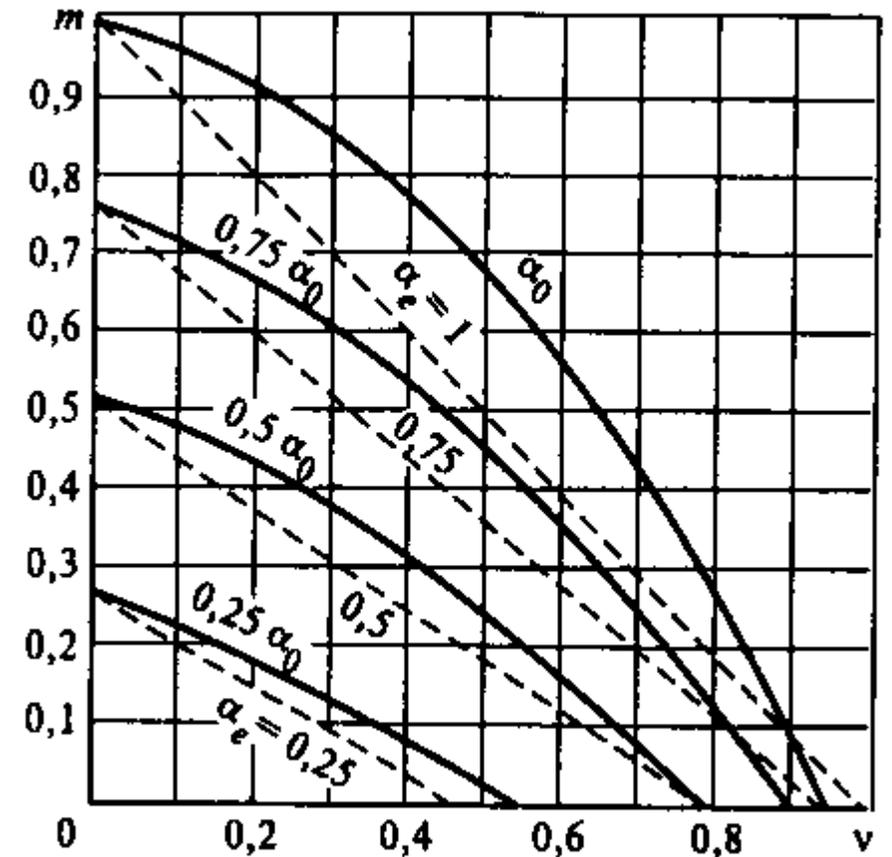
Механическая характеристика:  $m = f(v)$  при  $\alpha = \text{const}$

Семейство механических характеристик для разных  $\alpha$   
(в долях от  $\alpha_0$ )

- » Характеристики существенно нелинейны
- » Почти во всем диапазоне скоростей момент конденсаторного АИД больше момента АИД с амплитудным управлением  
Причина – увеличение  $U_{\text{ф.в}}$  при возрастании  $v$
- » Скорость ХХ меньше, чем в АИД с амплитудным управлением  
Причина – большой момент от обратного поля на ХХ  
даже при  $\alpha = \alpha_0$

Величина нелинейности характеристик АИД  $\Delta M/M_{\text{II}}$

- » от 0,04 у прецизионных АИД с фазовым управлением
- » до 0,2 у АИД с амплитудно-фазовым управлением



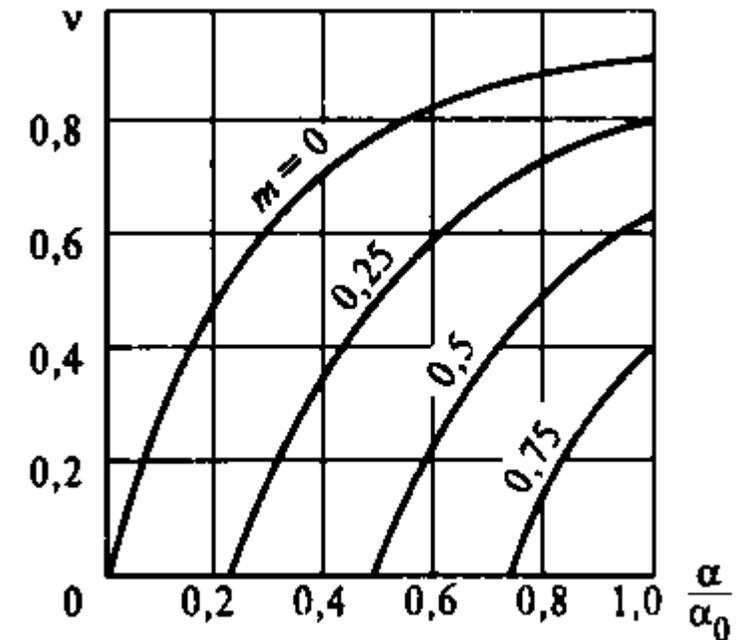
# Амплитудно-фазовое управление АИД

## Регулировочные характеристики

Регулировочная характеристика:  $v = f(\alpha/\alpha_0)$  при  $m_c = \text{const}$

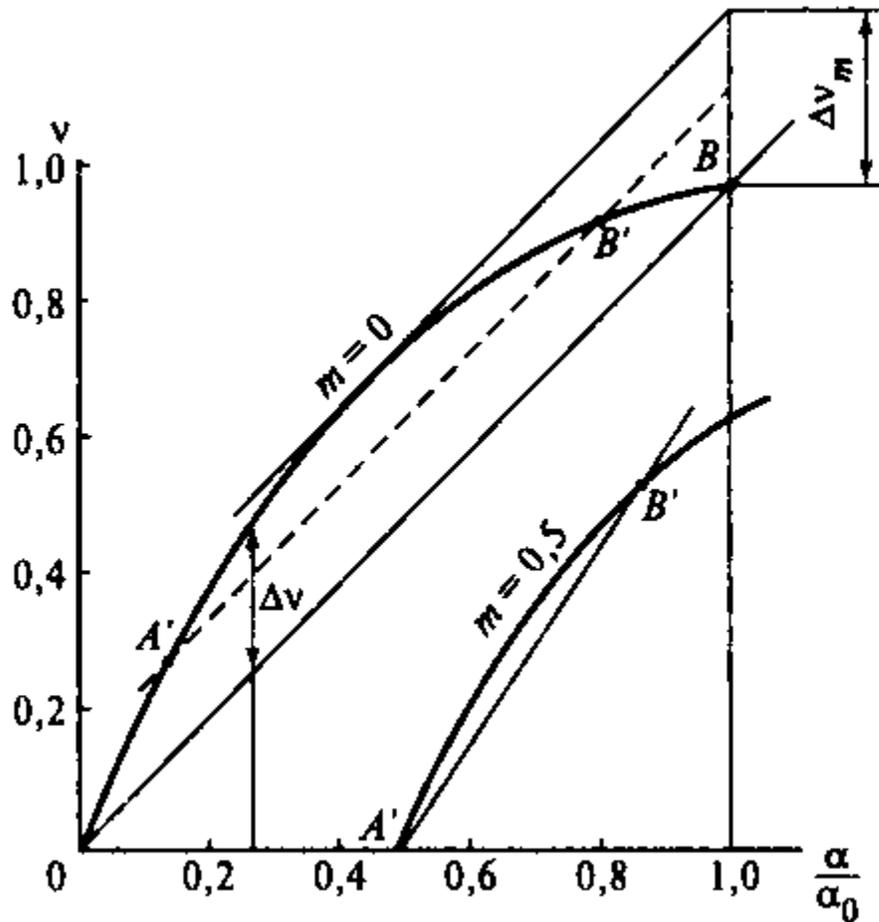
Семейство регулировочных характеристик для разных  $m_c$

- » Координатой служит не сигнал управления  $\alpha$ , а его доля от  $\alpha_0$ , обеспечивающего круговое поле при пуске
- » Регулировочные характеристики существенно более нелинейны, чем характеристики АИД с амплитудным и фазовым управлением (особенно на ХХ, когда  $m = 0$ )
- » Нелинейность регулировочной характеристики может быть снижена искусственно при калибровке АИД



# Амплитудно-фазовое управление АИД

## Регулировочные характеристики



Наибольшая нелинейность у характеристики при  $XH$  ( $m = 0$ )  
Величина нелинейности  $\Delta\nu$  – разница между реальной скоростью и скоростью по калибровочной прямой  $OB$  для каждого  $\alpha/\alpha_0$

Обычно регулирование требуется в ограниченном диапазоне скоростей  
→ можно уменьшить зону изменения управляющего сигнала  
→ можно увеличить  $n_{\sigma} = n_c$ , уменьшив рабочие значения  $\nu$

Если калибровочной прямой будет линия  $A'B'$  (для заданного диапазона  $\nu$ ), то нелинейность  $\Delta\nu$  относительно нее будет меньше

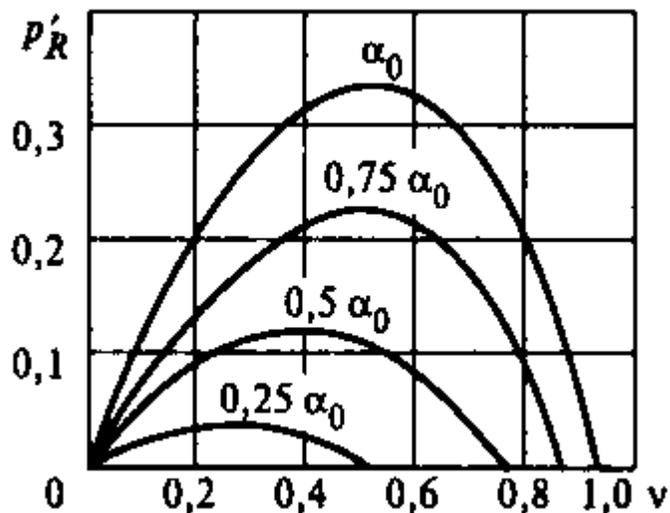
Напряжение трогания, определяющее чувствительность АИД

$$\frac{U_{\text{тр}}}{U_{\text{ун}}} = 0,01 \dots 0,08$$

# Амплитудно-фазовое управление АИД

Полная механическая мощность  $p'_R = \nu m$

в конденсаторном АИД больше,  
чем при амплитудном и фазовом управлении  
Причина – повышение напряжения  $U_{\phi.B}$  при увеличении  
скорости  $\rightarrow$  увеличение момента

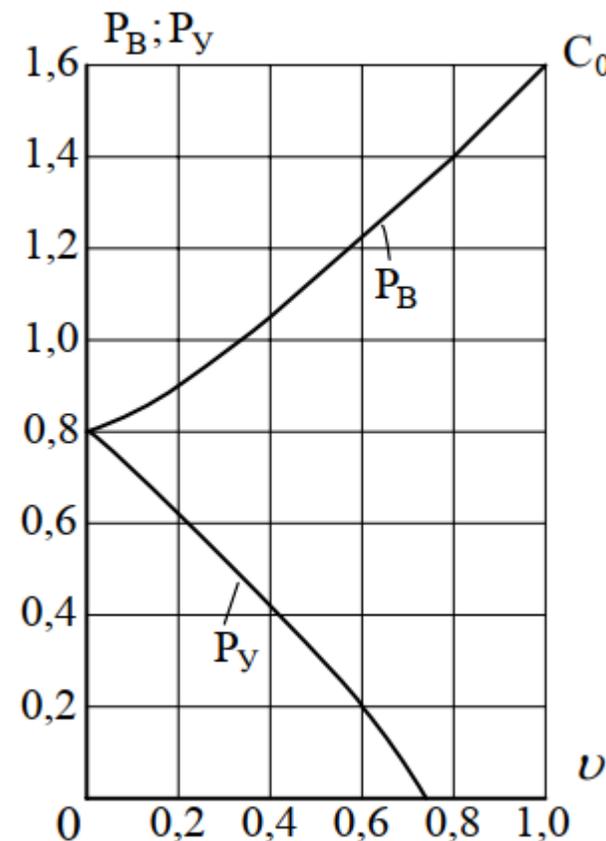


**Потребляемая активная мощность**

В конденсаторном АИД с ростом  $\nu$

- » мощность ОУ падает
- » мощность ОВ растет

Обычно суммарная потребляемая  
мощность с ростом  $\nu$  уменьшается  
(достоинство)



# Динамические свойства АИД

Динамические свойства характеризуются теми же показателями, что и в ИДПТ

Коэффициент внутреннего демпфирования (коэффициент вязкого трения)

$$k_D = \left. \frac{dM}{d\Omega} \right|_{U_y = \text{const}}$$

» для идеального АИД с линейной механической характеристикой

$$k_D = \frac{M_{\Pi}}{\Omega_{XX}} = \text{tg } \psi = \text{const}$$

Коэффициент управления по моменту

$$k_M = \frac{dM_{\Pi}}{dU_y}$$

$$k_M = \frac{M_{\Pi}}{U_{yH}} = \text{tg } \beta = \text{const}$$

Коэффициент управления по скорости

$$k_{\Omega} = \frac{d\Omega_{XX}}{dU_y}$$

$$k_{\Omega} = \frac{\Omega_{XX1}}{U_{yH}} = \text{tg } \gamma = \text{const}$$

Коэффициент управления по мощности

$$k_P = \frac{M_{\Pi}}{P_{y\Pi}}$$

Электромеханическая постоянная времени

» в современных АИД составляет от 5 до 200 мс (меньшее значение – для тихоходных АИД)

# Далее

---

## Шаговые двигатели

👤 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/))

