

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

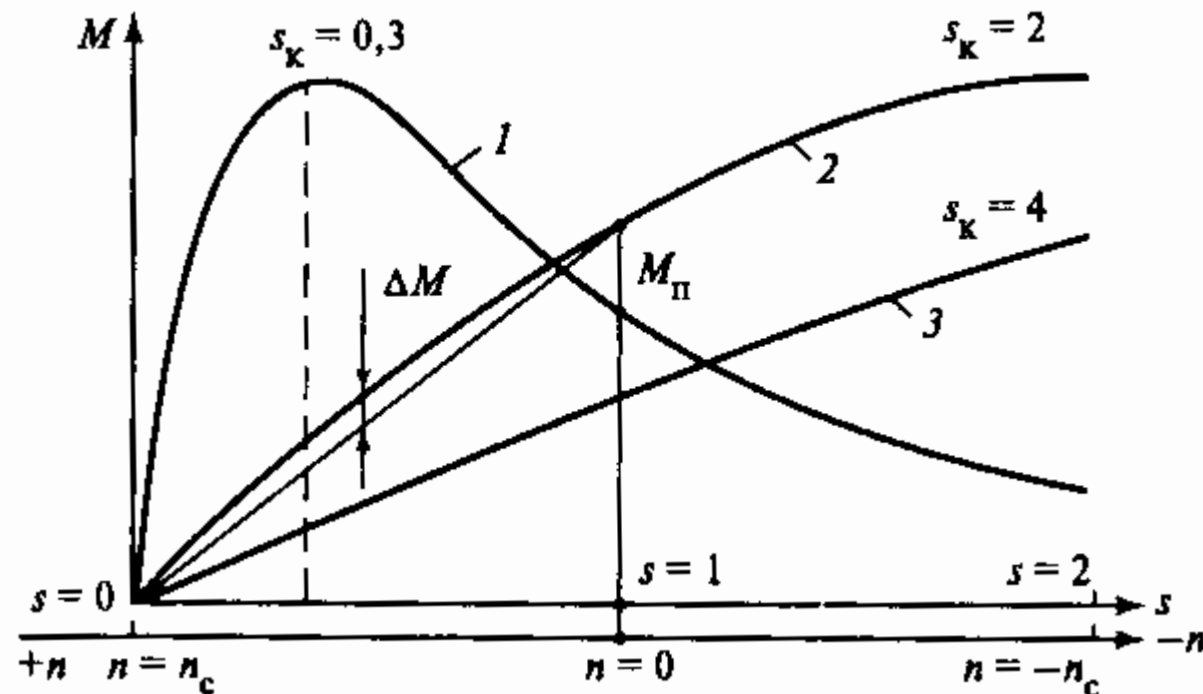
Для выполнения этих требований применяют АД с большим сопротивлением ротора r_2 (чтобы $s_{кр} > 1$)

Механические характеристики

1 – обычный АД

2,3 – исполнительный двигатель

- » При $s_{кр} = 2$ в рабочей зоне характеристика нелинейна (отклонение от прямой линии ΔM)
- » 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

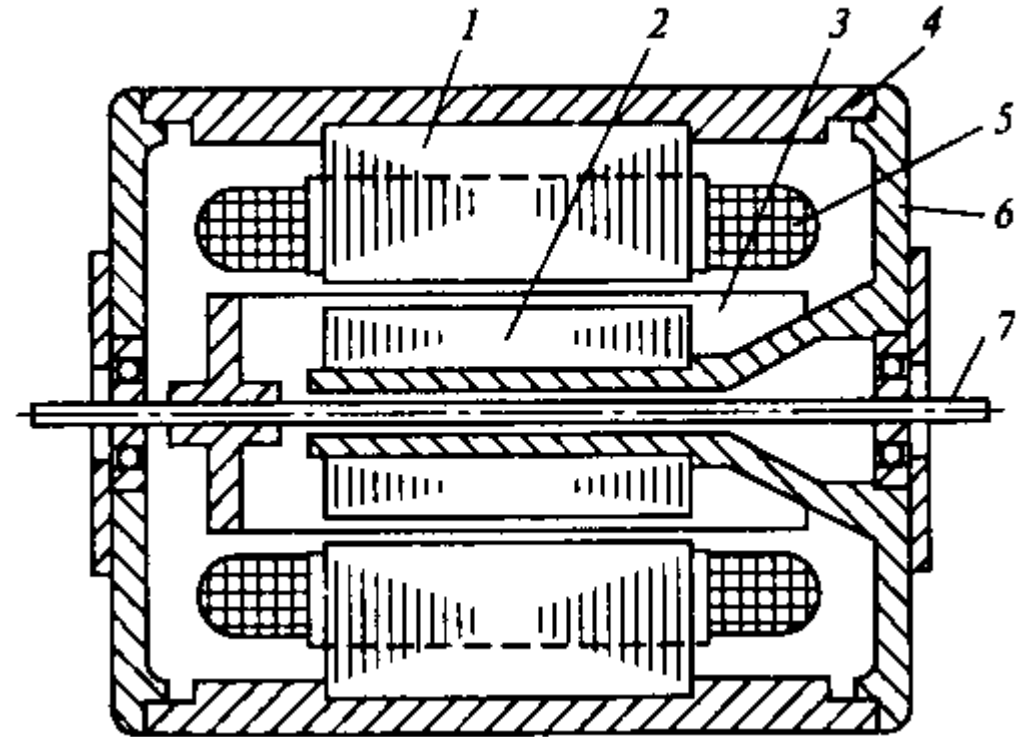
- 1 – внешний статор
- 2 – внутренний статор
- 3 – ротор (полый цилиндр)
- 4 – корпус
- 5 – обмотки
- 6 – подшипниковый щит
- 7 – вал

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

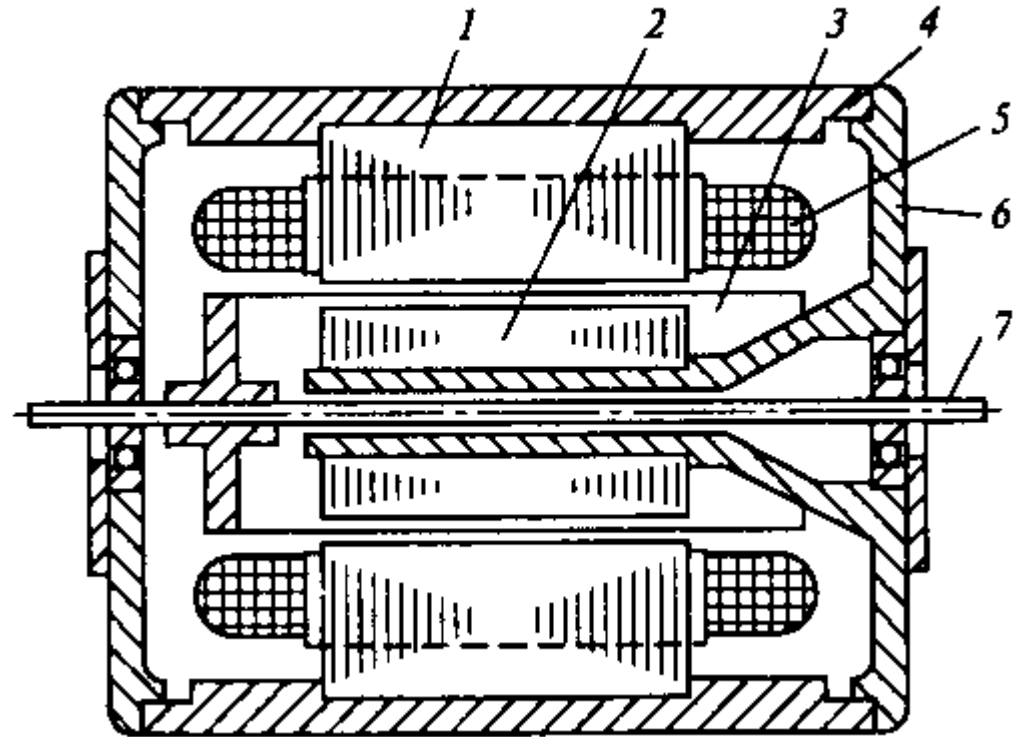
Отличительная особенность – большой немагнитный зазор

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

- 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 обычным КЗ ротором

Конструкция полностью аналогична силовому АД

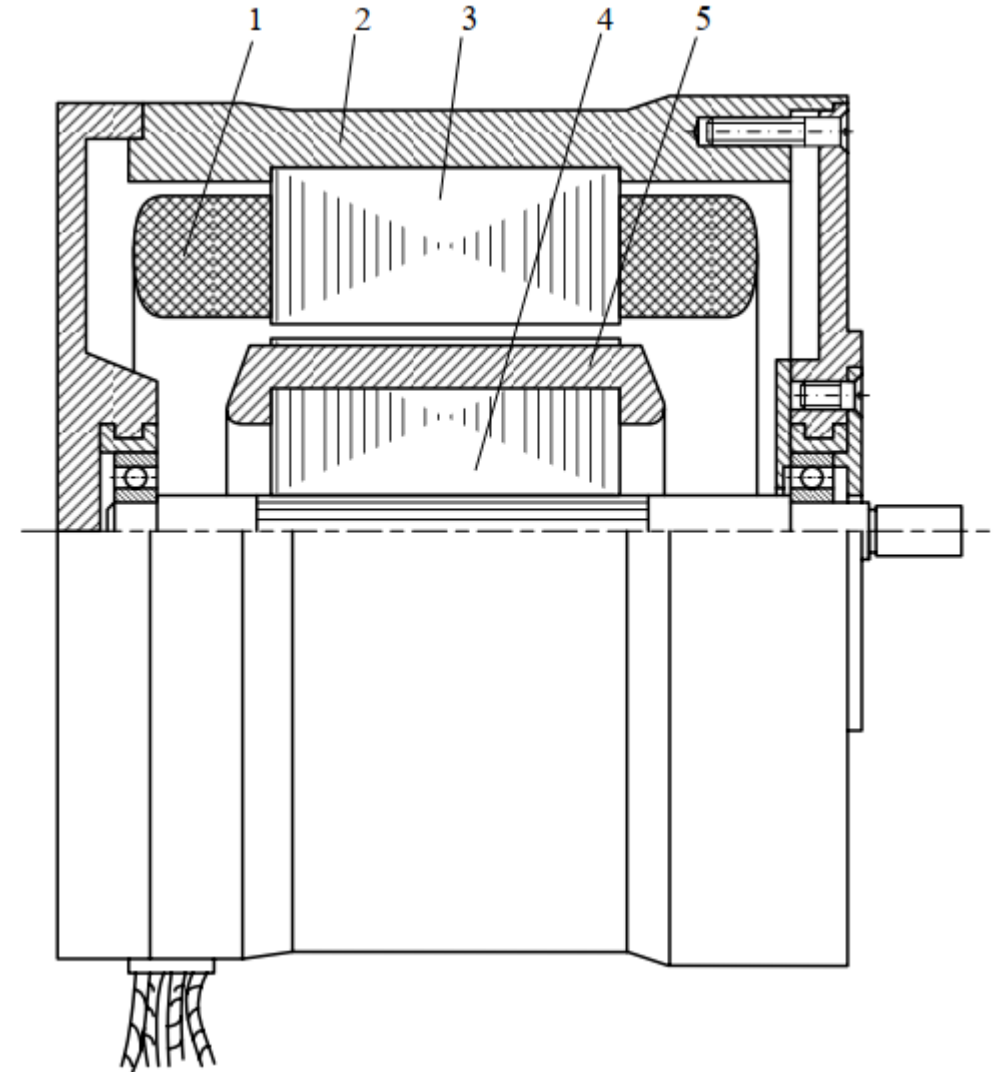
- » малый немагнитный зазор
 - малый намагничивающий ток \rightarrow выше $\cos\varphi$
 - меньше $P_{\text{э1}}$ \rightarrow больше КПД
- » тяжелый ротор \rightarrow большой J , низкое быстродействие
- » в роторе для увеличения r_R
 - материалы с большим ρ (латунь, бронза)
 - малое сечение стержней
- » 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

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

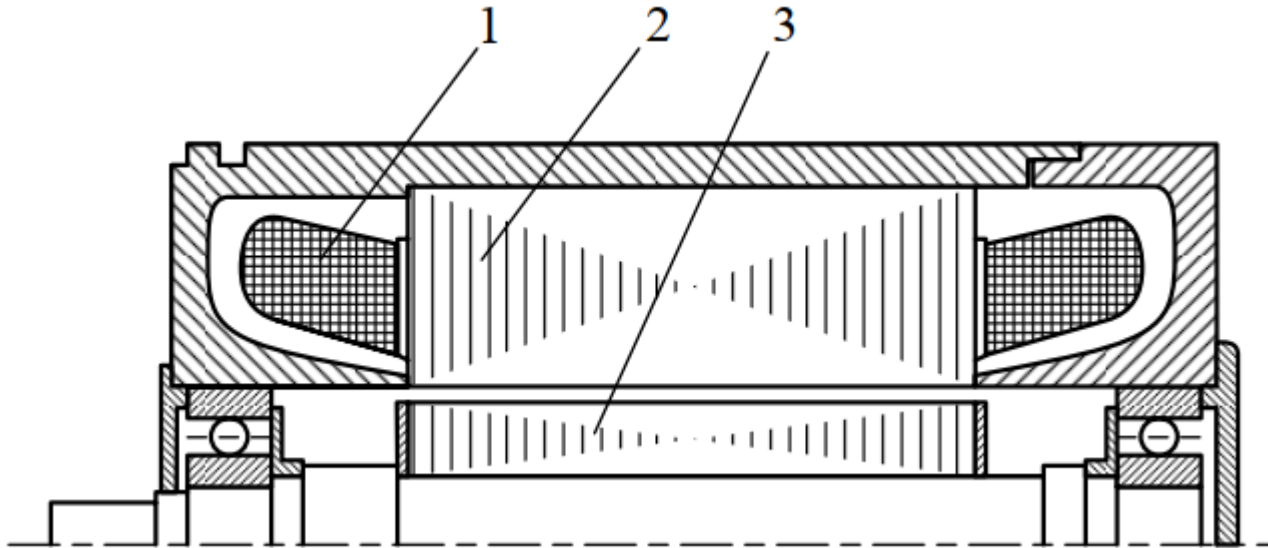
- » в АИД с полым немагнитным ротором $x_R \approx 0 \rightarrow r_R = s_{\text{кр}} x_S$
- » в АИД с обычным ротором $x_R \approx x_S \rightarrow r_R = 2s_{\text{кр}} x_S$

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



АИД с обычным КЗ ротором

АИД сквозной конструкции



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

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

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

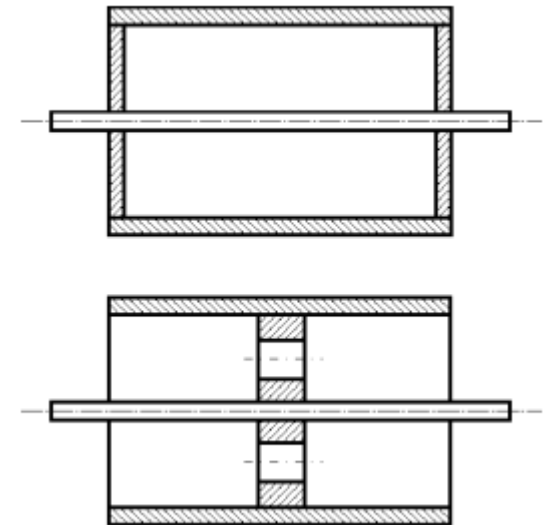
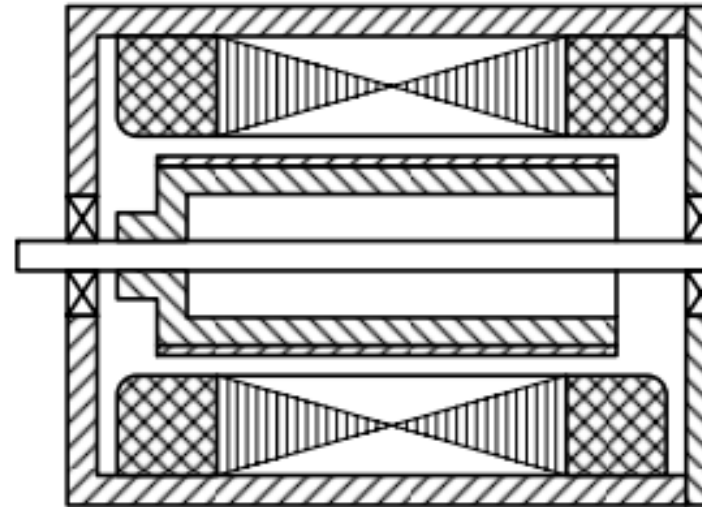
- » внутренний статор не нужен
- » немагнитный зазор $\delta = 0,2...0,3$ мм
- » но намагничивающий ток все равно большой, т.к. тонкостенный ротор сильно насыщен

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 (ρ 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

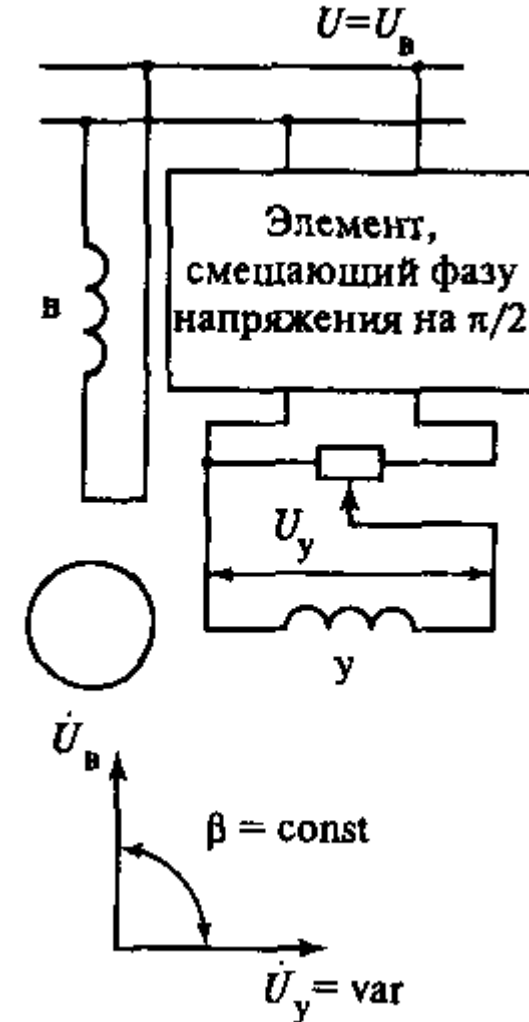
- » ОВ подключена к сети с напряжением $U_B = \text{const}$
- » напряжение на ОУ U_y сдвинуто по фазе на $\pi/2$ относительно U_B
- » напряжение U_y изменяется по величине

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

- » 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 π)



Способы управления АИД

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

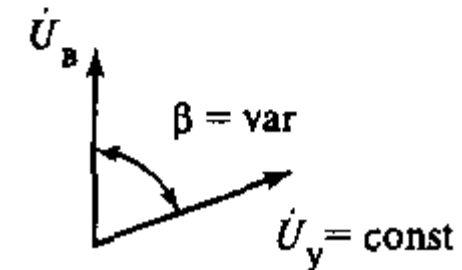
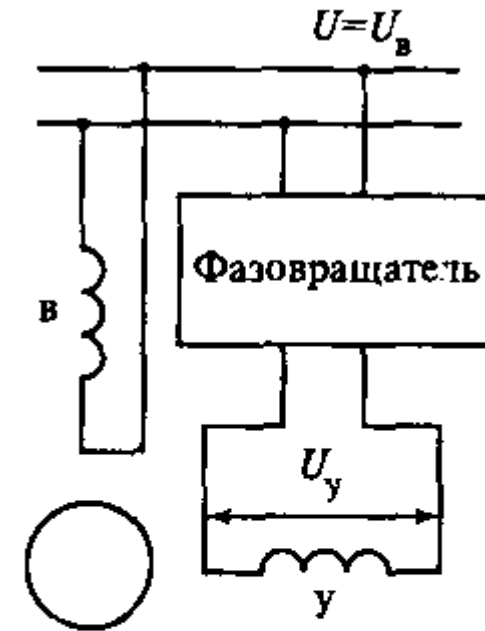
Фазовое управление

- » 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 β отрицательным ($\sin\beta < 0$)



Способы управления АИД

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

Амплитудно-фазовое управление

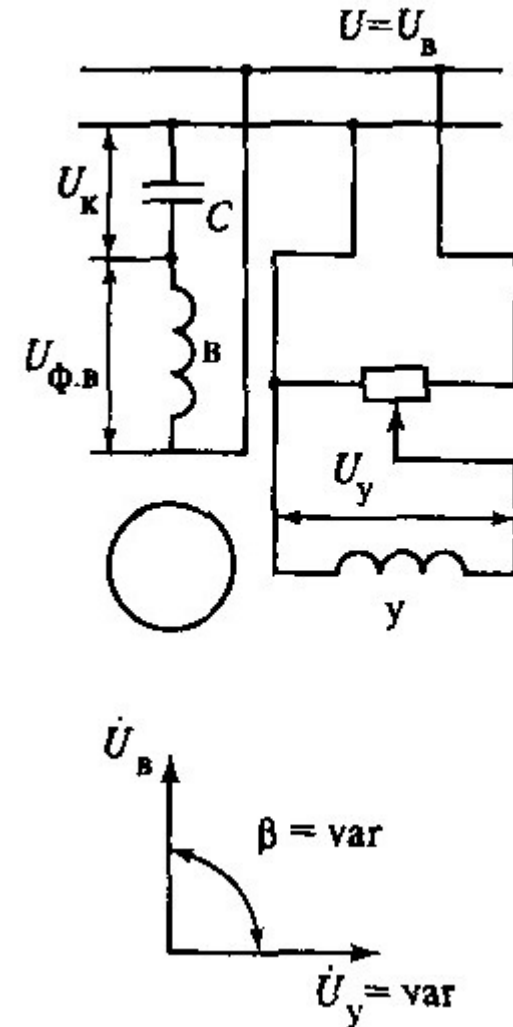
- » ОВ подключена к сети через конденсатор C
- » напряжение на ОУ U_y изменяется только по амплитуде
- » при этом изменяется напряжение на ОВ $U_{\phi.B}$ как по величине, так и по фазе (из-за изменения тока и $U_K = I_B Z_C$)
- » параметры АИД выбирают так, чтобы получить круговое поле при пуске
- »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

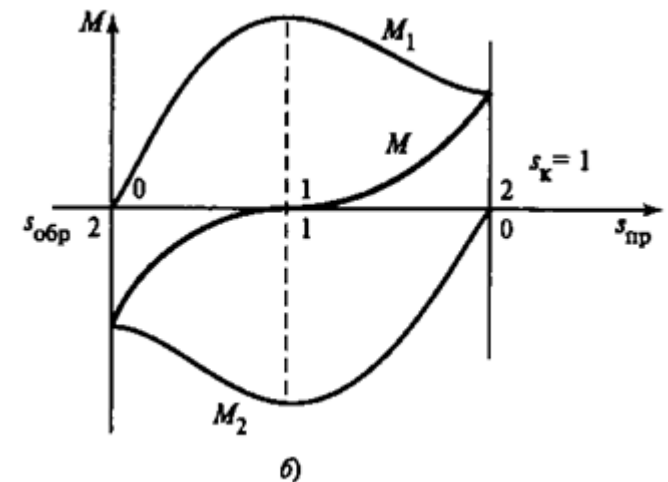
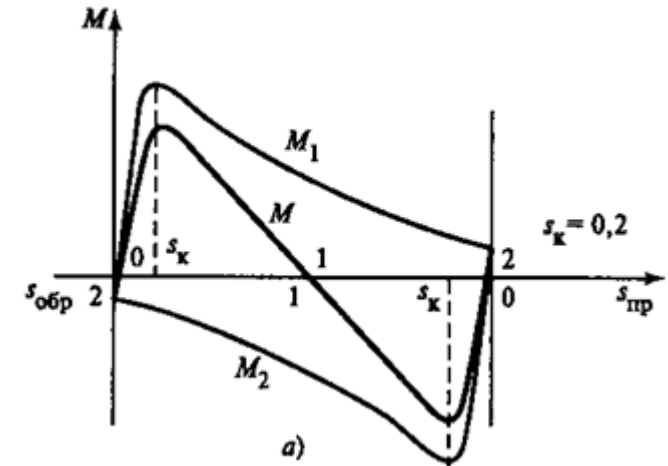
самоход по причине неправильного выбора параметров АИД (ошибка при проектировании)

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 μ по разным осям (анизотропия магнитных свойств)
- » неравномерность воздушного зазора
- » неравномерность толщины полого ротора

Требуется высококачественное изготовление АИД

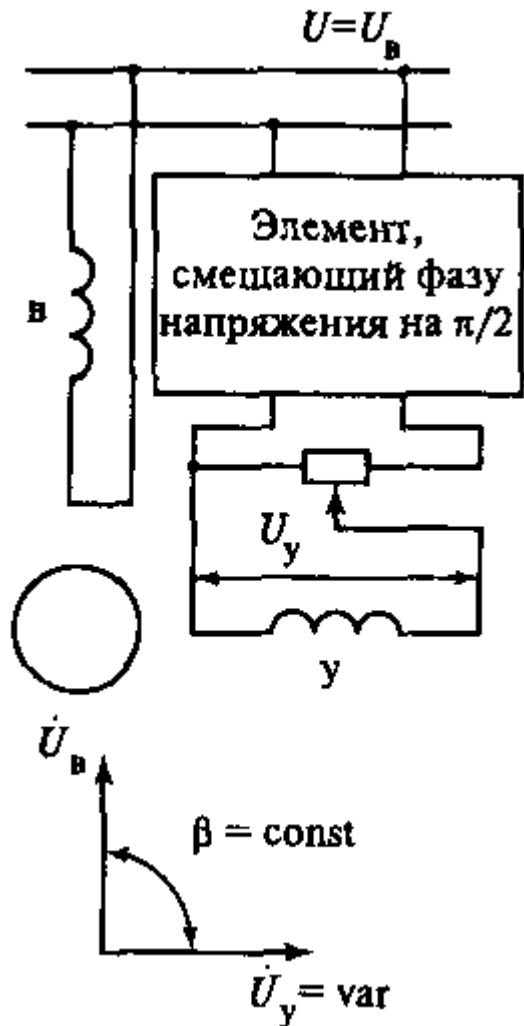
- » тщательная изоляция обмотки и листов сердечника
- » точная механическая обработка
- » «веерная» сборка пакета сердечника (поворот листов на t_z)

Амплитудное управление АИД

Уравнения и
характеристики

Амплитудное управление АИД

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



При произвольном α_e – поле эллиптическое

Воспользуемся методом симметричных составляющих

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

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

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

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

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

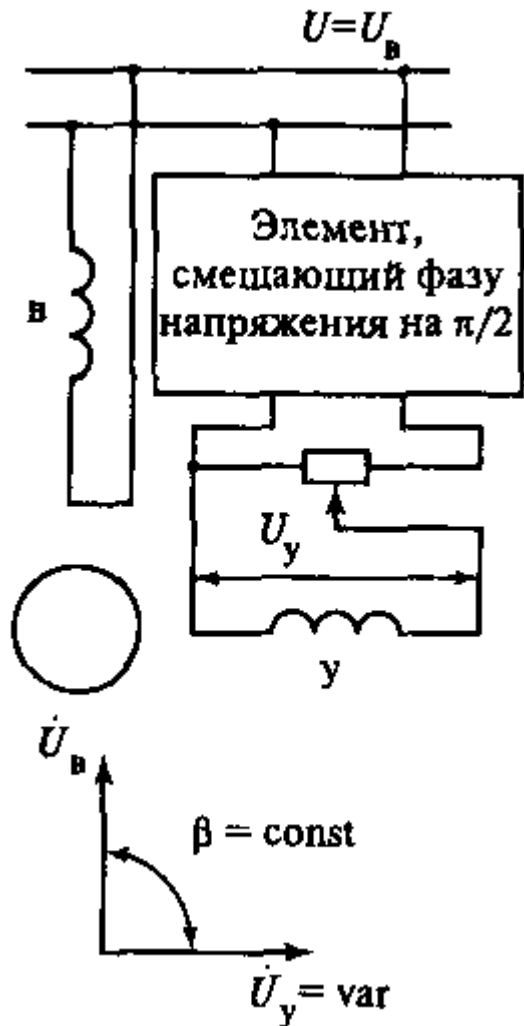
Возможно приведение параметров ОВ

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

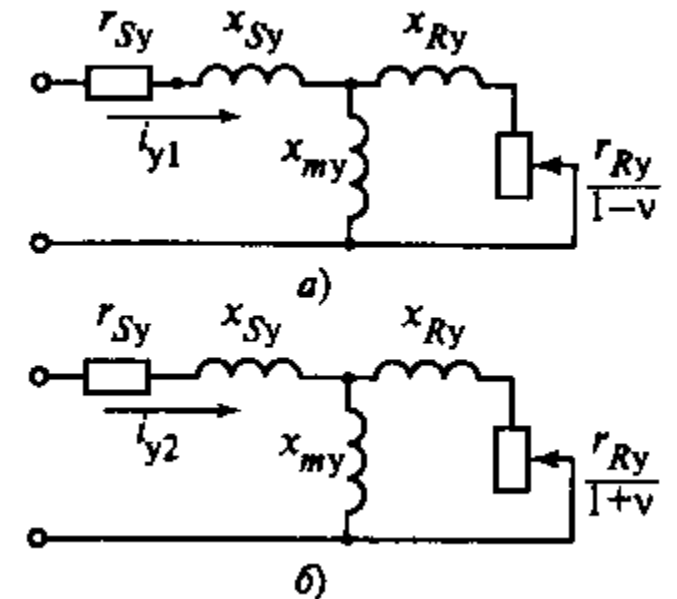
$$v = \frac{\Omega}{\Omega_c} = \frac{n}{n_c} = 1 - s$$

Тогда активное сопротивление ветви ротора токам прямой последовательности

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

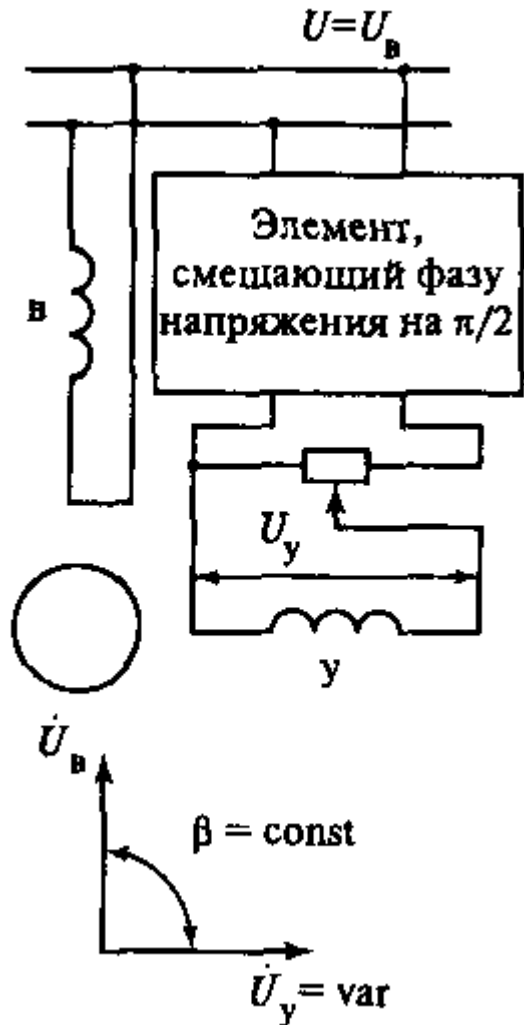
Активное сопротивление ветви ротора токам обратной последовательности

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



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 ΔU 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

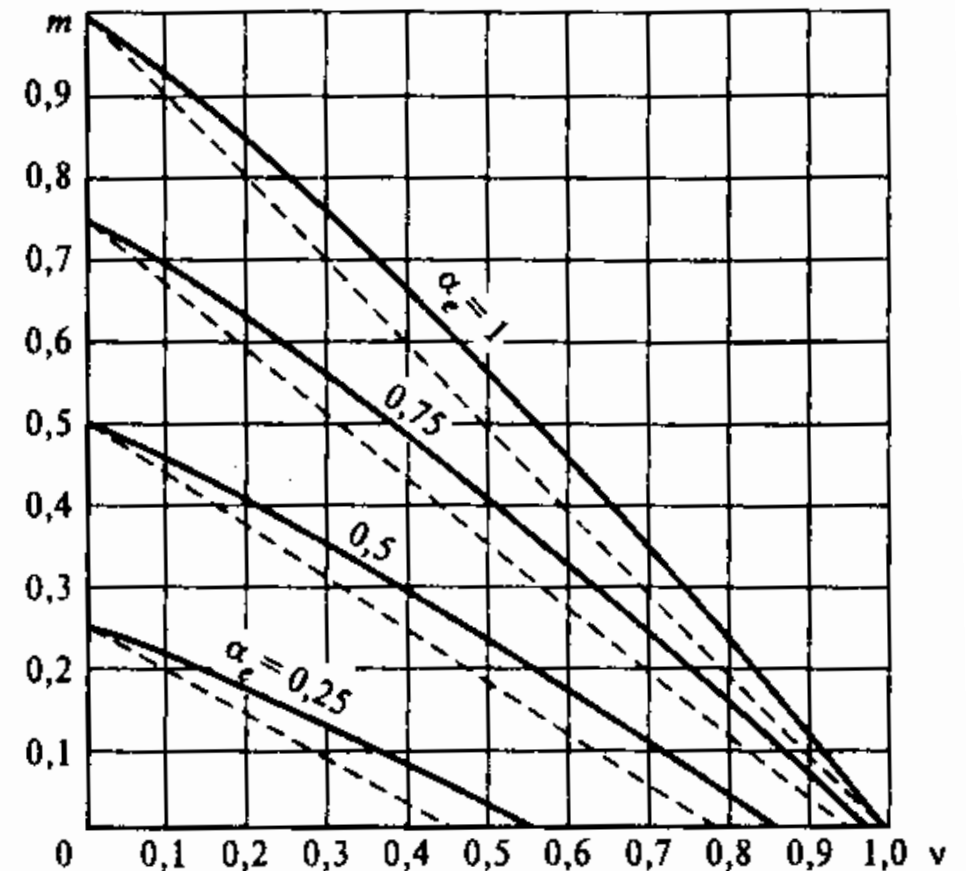
Механическая характеристика: $m = f(v)$ при $\alpha_e = \text{const}$

Семейство механических характеристик для разных α_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

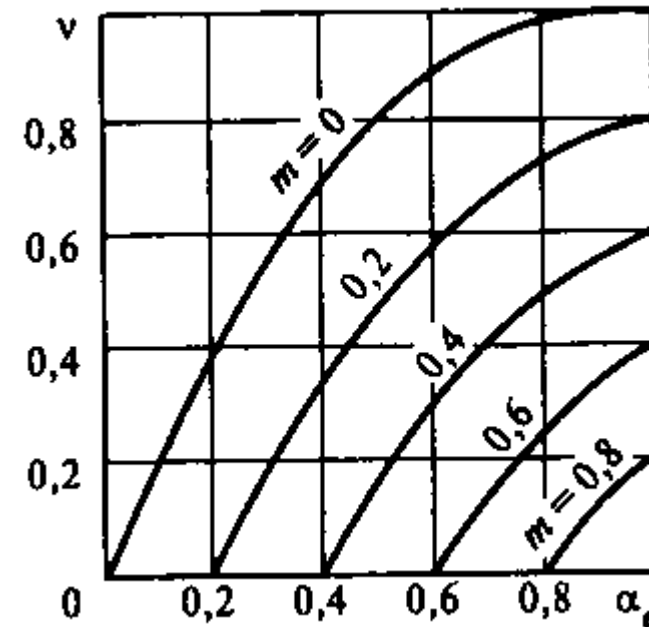
Регулировочные характеристики

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 α_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

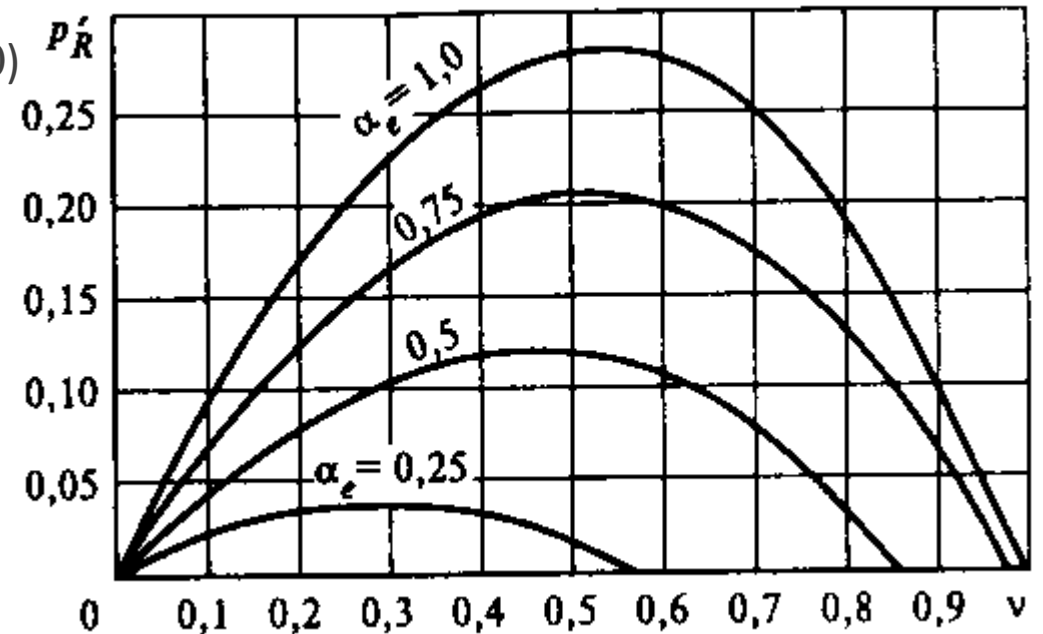
$$v_{p\max} = \frac{\alpha_e}{1 + \alpha_e^2} = \frac{v_x}{2}$$

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

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

$$S_B = U_B I_B$$

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

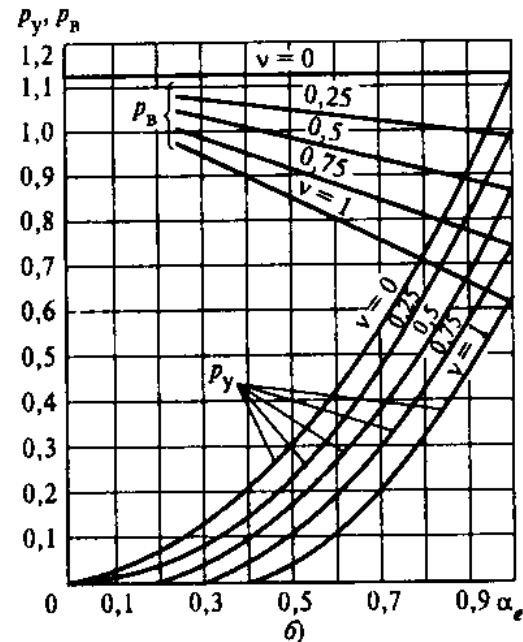
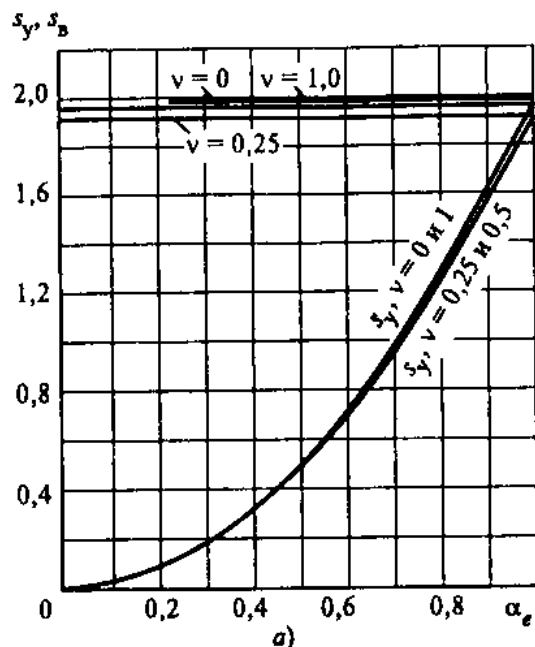
$$I_B = |\dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2}|$$

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

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

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

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



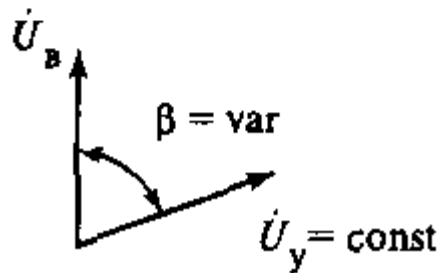
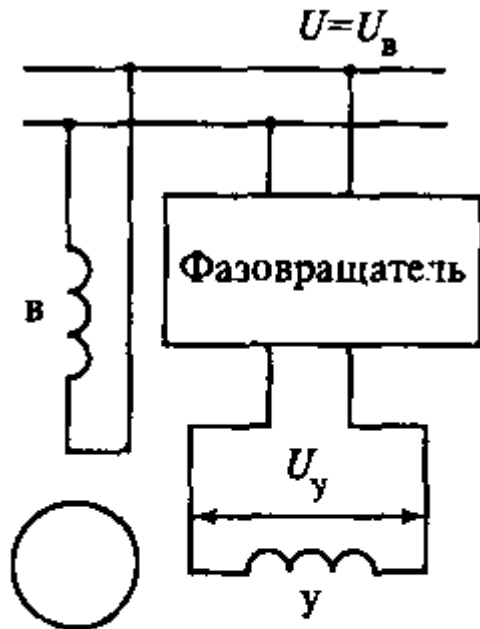
- » Мощности ОБ слабо зависят от α_e
- » Мощности ОУ зависят от α_e почти параболически

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 β 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)

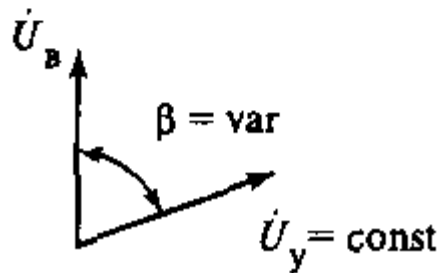
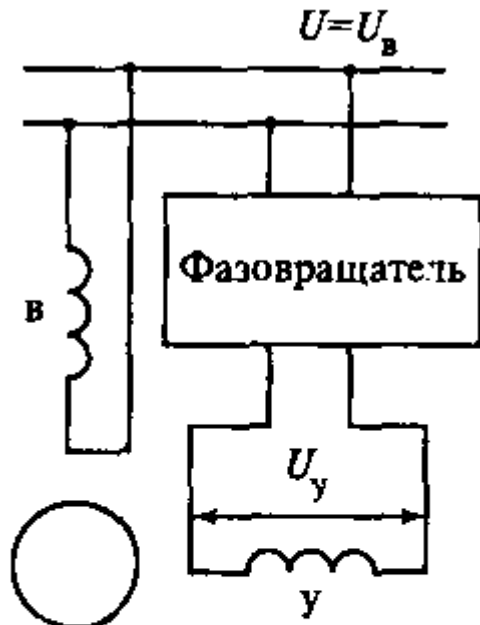
$$\dot{i}_{y1} = \frac{\dot{U}_B}{2kZ_{y1}} (e^{-j\beta} - j) \quad \dot{i}_{y2} = \frac{\dot{U}_B}{2kZ_{y2}} (e^{-j\beta} + j)$$

- » 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 $\dot{I}_{B1} = j \frac{\dot{I}_{y1}}{k} \quad \dot{I}_{B2} = -j \frac{\dot{I}_{y2}}{k}$

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 ν

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

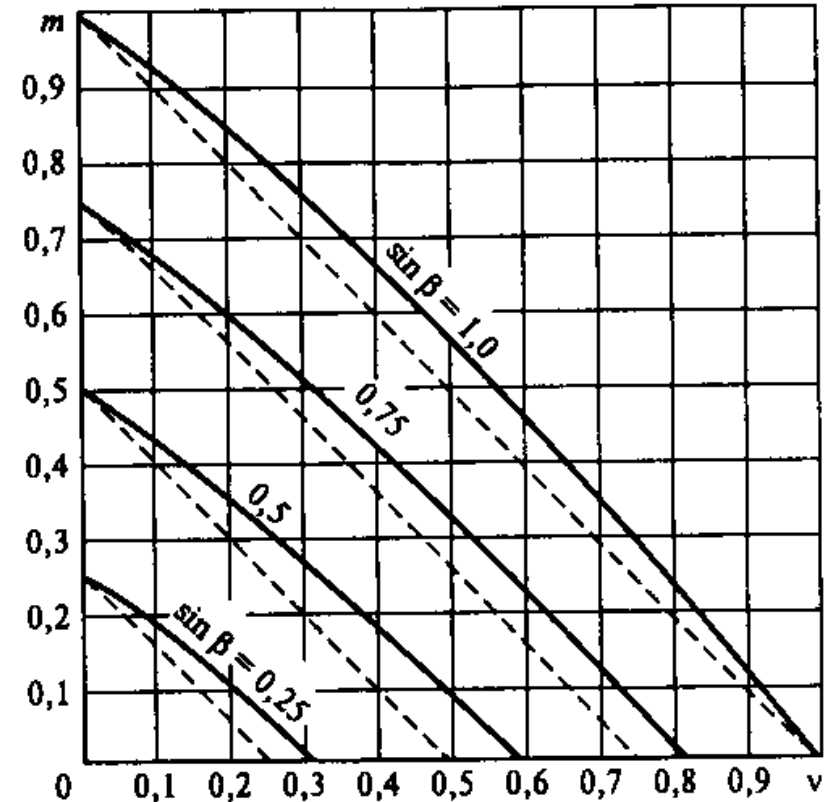
$$m = \sin \beta - v$$

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

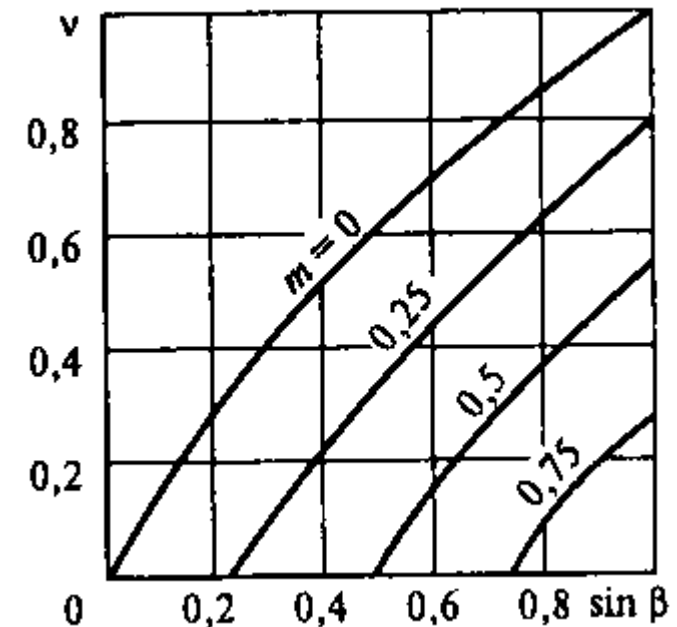
Регулировочная характеристика: $v = f(\sin\beta)$ при $m_c = \text{const}$

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 α_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

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

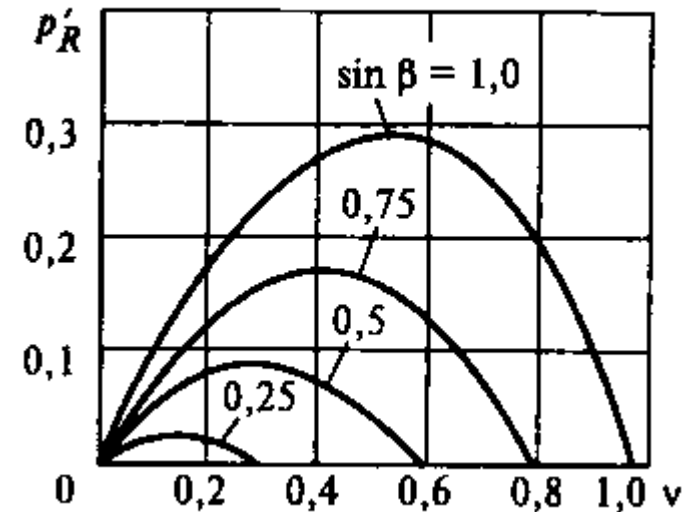
и равен $p'_{R \max} = 0,25 \sin^2 \beta$

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

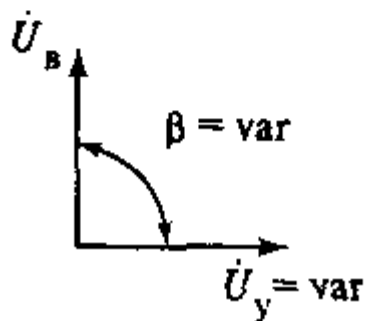
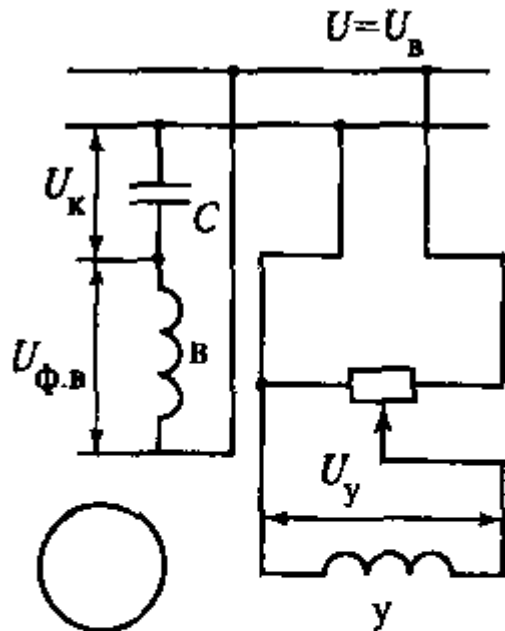


Схема включения аналогична асинхронному конденсаторному двигателю

- » 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

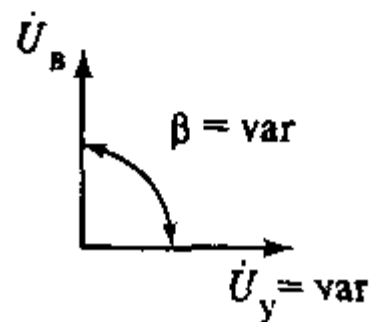
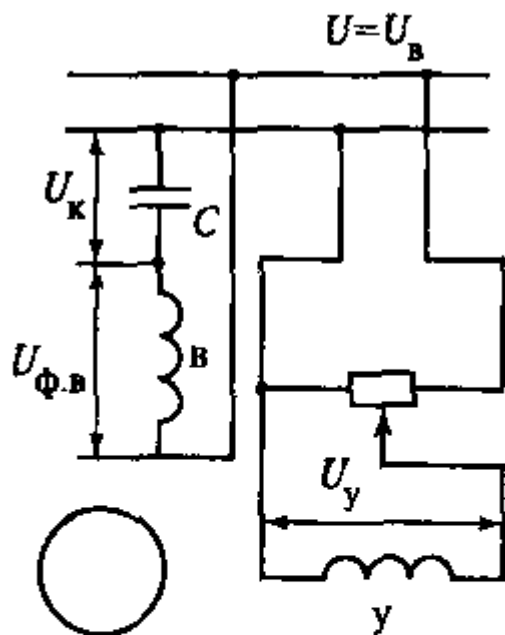
- » параметры АИД выбирают так, чтобы получить круговое поле при пуске и номинальном напряжении $U_{ун}$

Для этого подбирают коэффициент сигнала и емкость так, чтобы

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

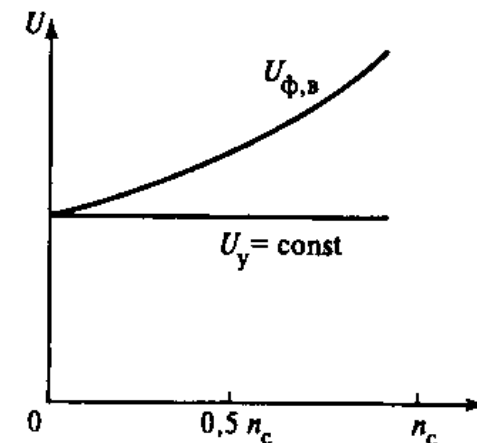
Амплитудно-фазовое управление АИД

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 Φ_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

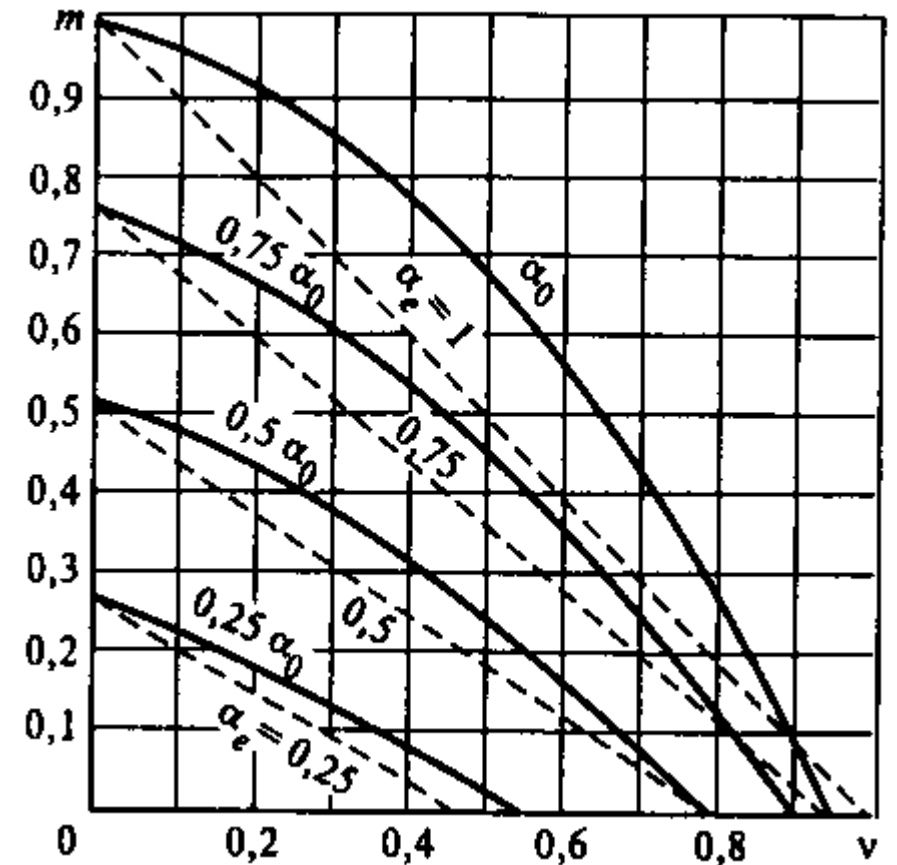
Механические характеристики

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

Семейство механических характеристик для разных α (в долях от α_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 α_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

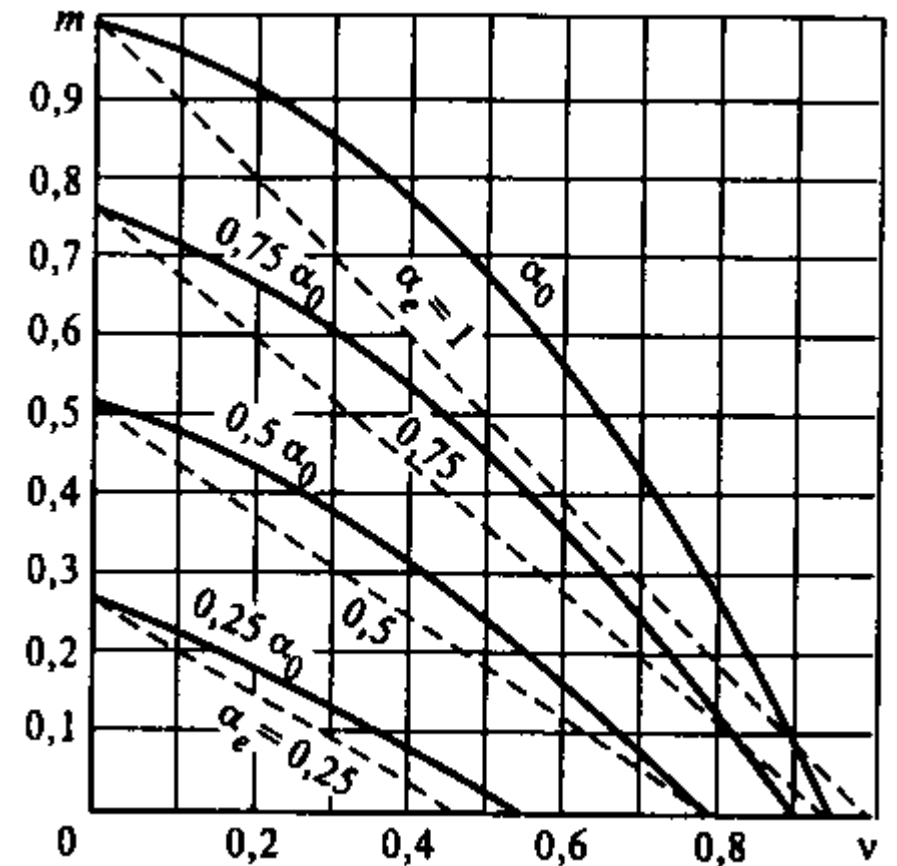
Механическая характеристика: $m = f(v)$ при $\alpha = \text{const}$

Семейство механических характеристик для разных α
(в долях от α_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 $\Delta M/M_{\text{П}}$

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



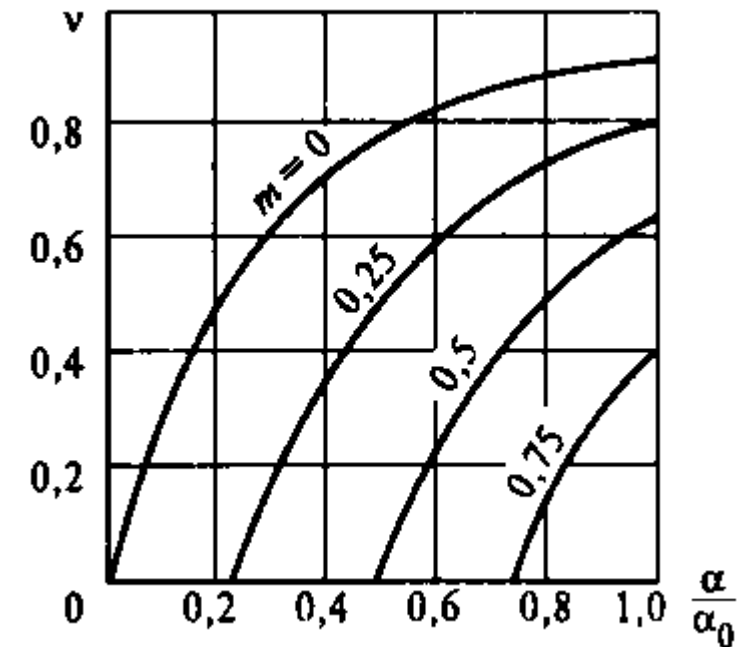
Амплитудно-фазовое управление АИД

Регулировочные характеристики

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

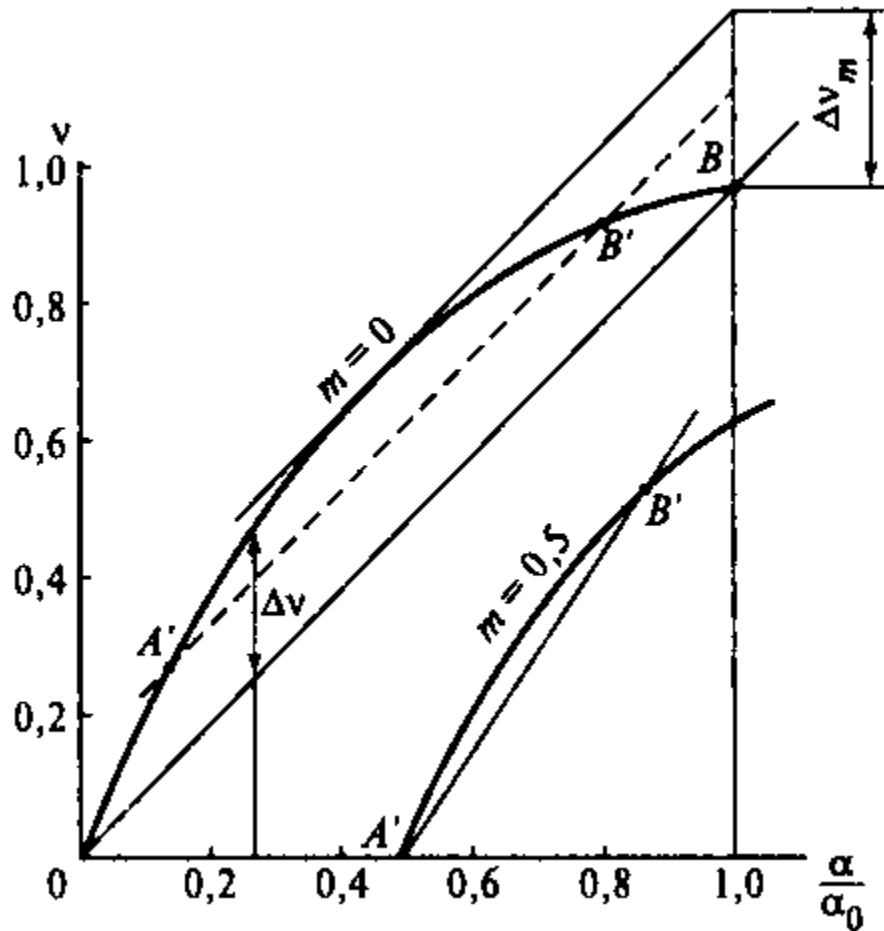
Семейство регулировочных характеристик для разных m_c

- » Координатой служит не сигнал управления α , а его доля от α_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 α/α_0

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

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

Напряжение трогания, определяющее чувствительность АИД

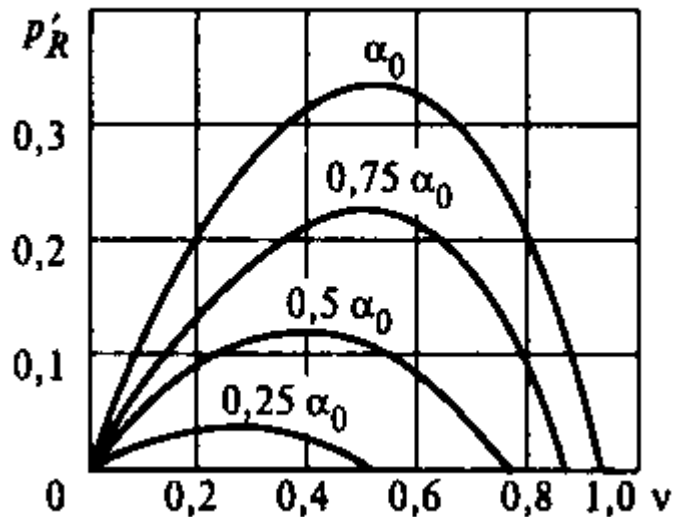
$$\frac{U_{\text{тр}}}{U_{\text{ун}}} = 0,01 \dots 0,08$$

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 → увеличение момента

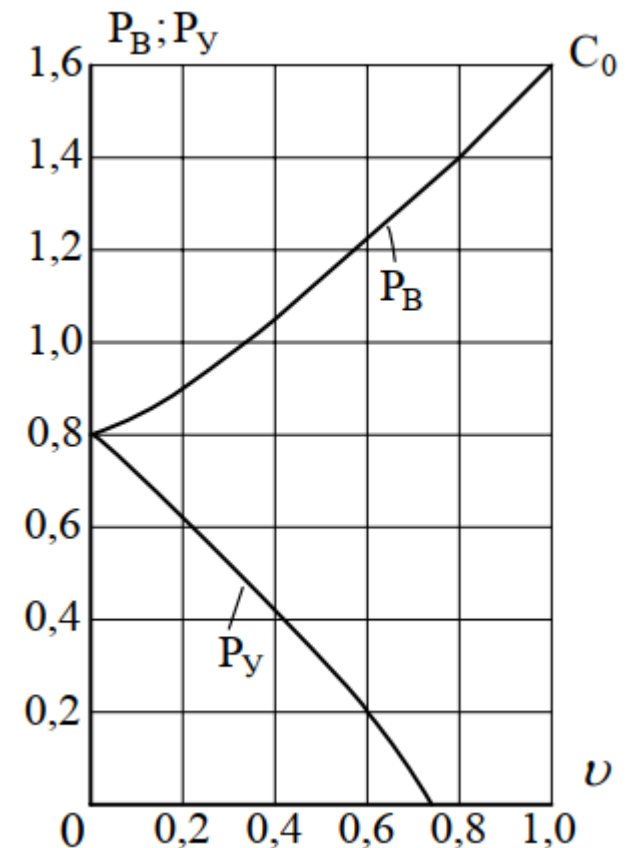


Потребляемая активная мощность

В конденсаторном АИД с ростом ν

- » мощность ОУ падает
- » мощность ОВ растет

Обычно суммарная потребляемая мощность с ростом ν 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/
(srv0-5.mpei.ac.ru/EMAU/)

