Асинхронные исполнительные двигатели

Исполнительные двигатели переменного тока на базе двухфазных АД

Асинхронные исполнительные двигатели

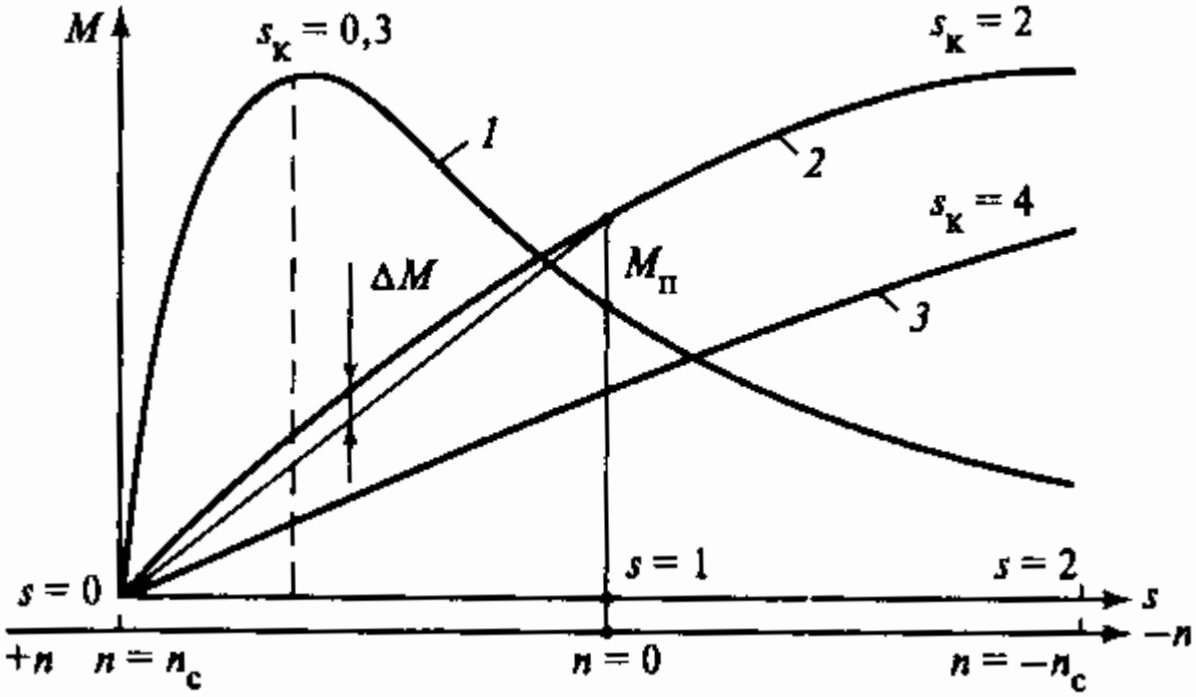
Как и обычные АД, асинхронные исполнительные двигатели – самые распространенные ИД (простота, дешевизна, надежность)

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 $M_п$ и мощность на валу
  - возрастают потери в роторе (большое r_2)

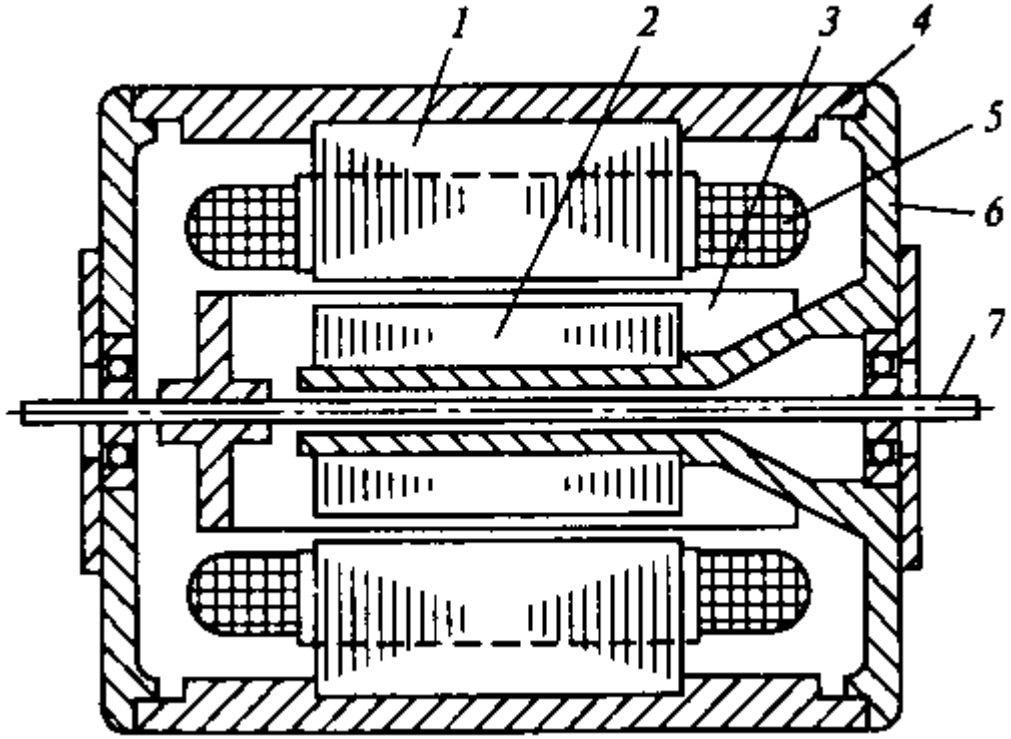
Мощность АИД в 2…3 раза меньше $P_н$ силового АД в тех же габаритах

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 пазами
- 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

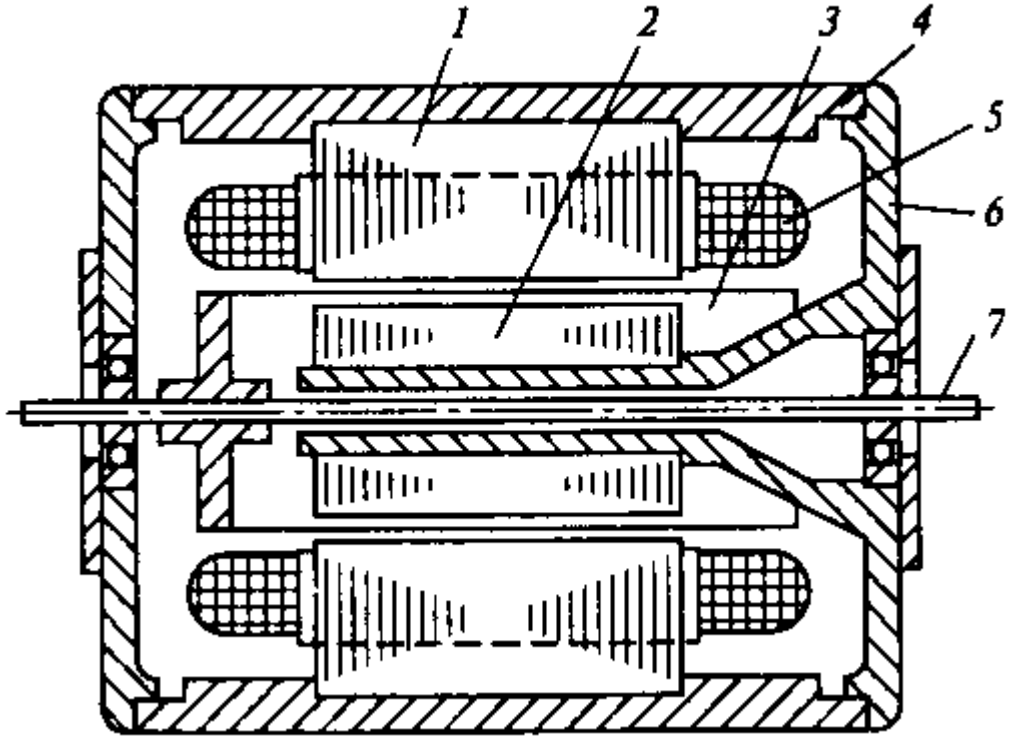
АИД с полым немагнитным ротором

В маломощных АИД ($P_н < 3$ 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

$\delta = \delta_1 + \Delta + \delta_2 \to 0{,}4\ldots1{,}5$ мм

→ большой намагничивающий ток (до $0{,}8\ldots0{,}9\ I_н$)

→ низкий коэффициент мощности

→ большой полный ток → электрические потери → низкий КПД

Другая особенность – малое индуктивное сопротивление рассеяния ротора $x_R = (0{,}05\ldots0{,}1)r_R$

→ уменьшается нелинейность механических и регулировочных характеристик

АИД с полым немагнитным ротором

Достоинства

» малый J ротора $\rightarrow$ хорошее быстродействие ($T_M < 60$ мс)

» относительно хорошая линейность характеристик ($\Delta M = (0{,}05\ldots0{,}15)M_п$)

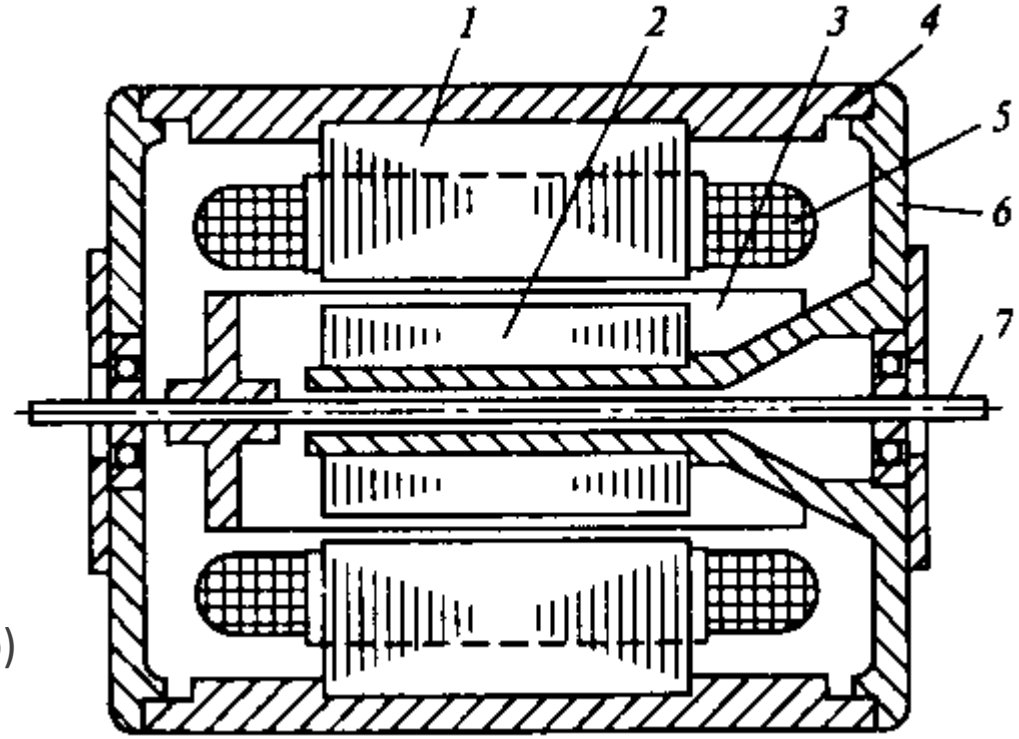
» устойчивая работа АИД во всем диапазоне скоростей

» большая кратность регулирования $n_{max}/n_{min} = 100\ldots200$

» 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 $M_п$ в любом положении (нет зубцов на роторе)



Недостатки

» низкий КПД (0,2…0,4), при регулировании n еще меньше

- намагничивающий ток $\rightarrow$ большой $I_1 \rightarrow$ большие $P_{э1}$
- большое $r_R \rightarrow$ большие $P_{э2}$

» низкий cosφ (0,2…0,4)

» большие габариты и масса

- из-за низких η и cosφ

Снижению габаритов способствует высокая частота сети

АИД с обычным КЗ ротором

Конструкция полностью аналогична силовому АД

» малый немагнитный зазор
  - малый намагничивающий ток → выше cosφ
  - меньше $P_{э1}$ → больше КПД

» тяжелый ротор → 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 $s_{кр}$

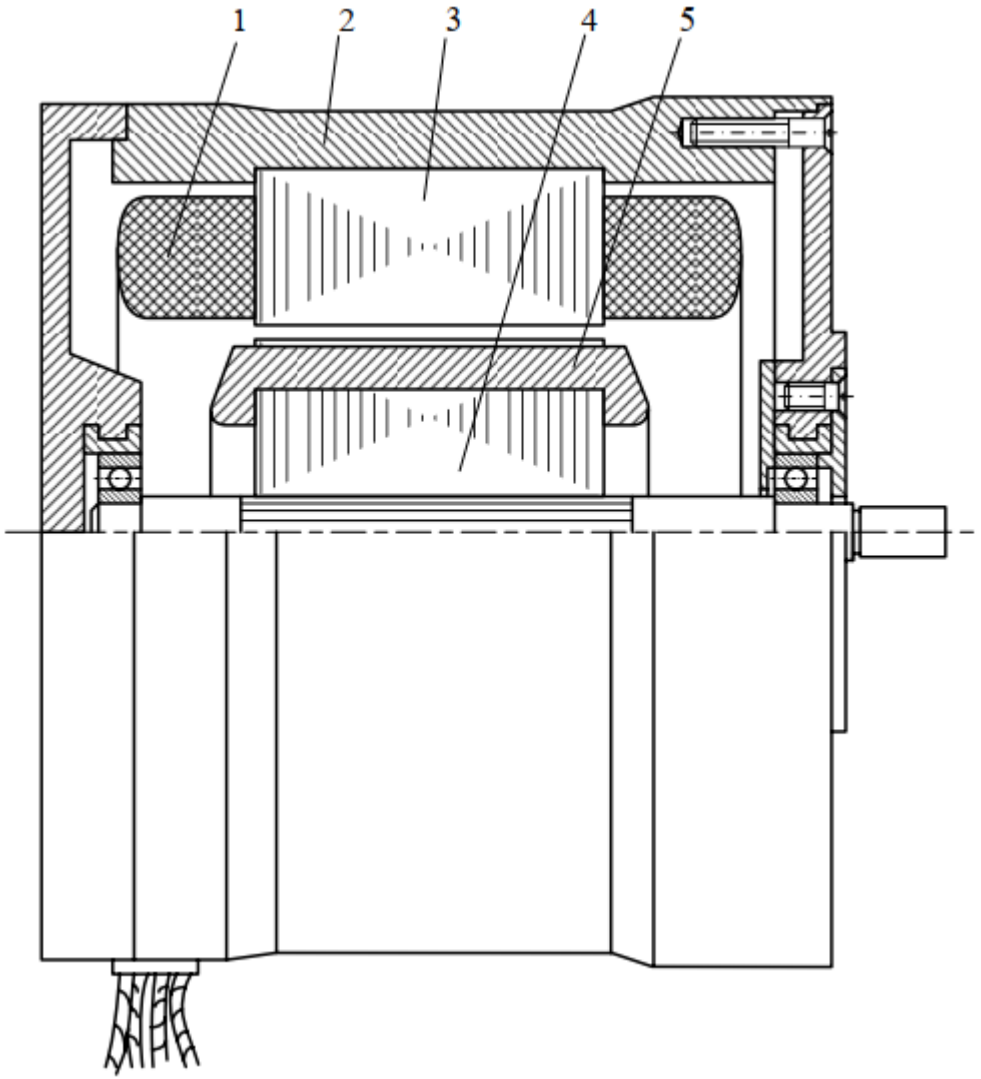
Критическое скольжение зависит от параметров АД

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

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

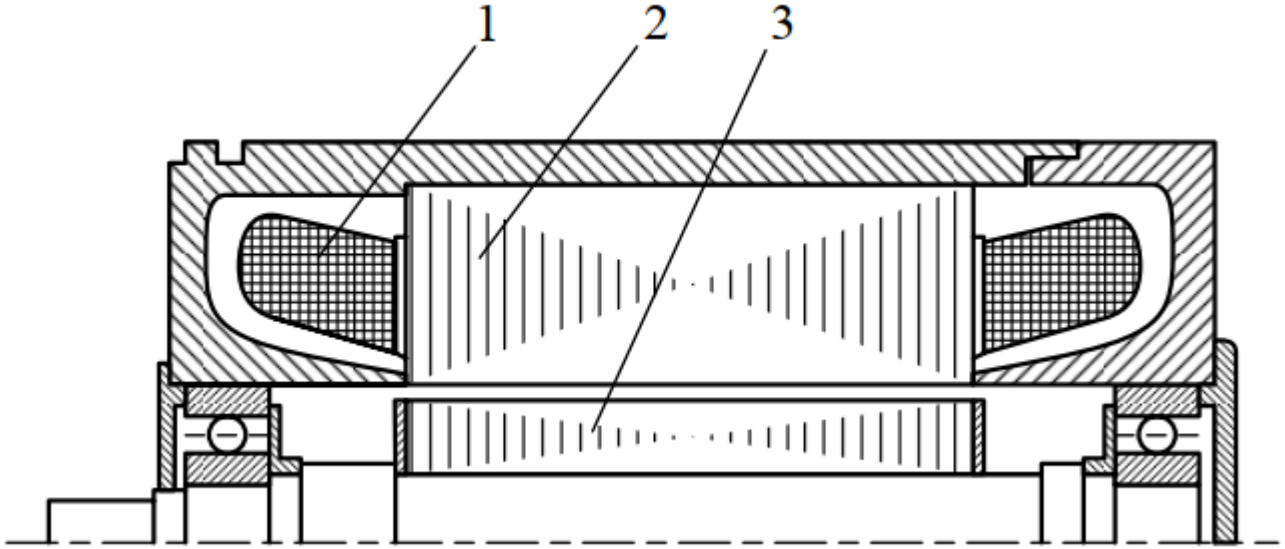
» в АИД с обычным ротором $x_R \approx x_S \rightarrow r_R = 2s_{кр}x_S$

Завышенное значение r_R → увеличенные потери $P_{э2}$ → 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)

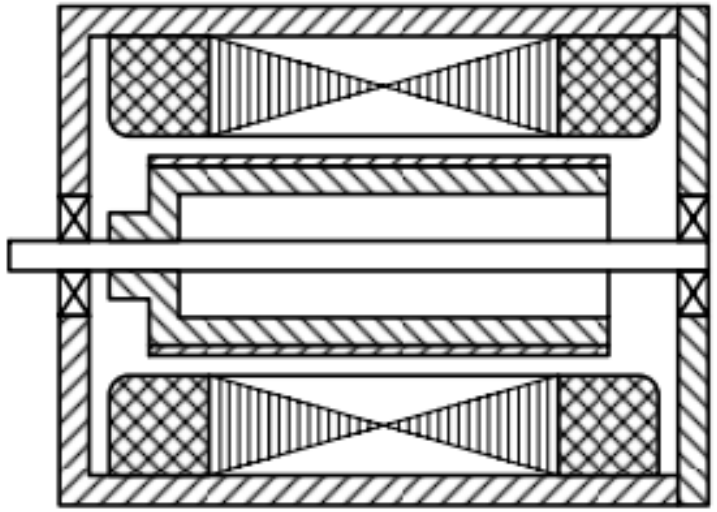
- » открытые прямоугольные пазы на роторе
  - уменьшение пазового рассеяния и снижение x_R
- » большая длина / малый диаметр ротора ($l/D = 2\ldots3$)
  - снижение момента инерции J

Недостатки

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

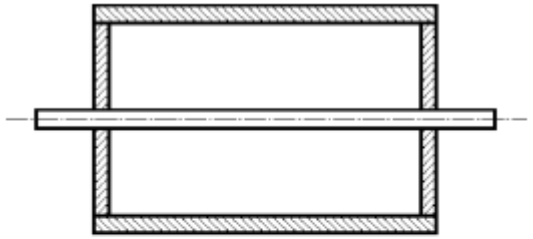
АИД с полым ферромагнитным ротором

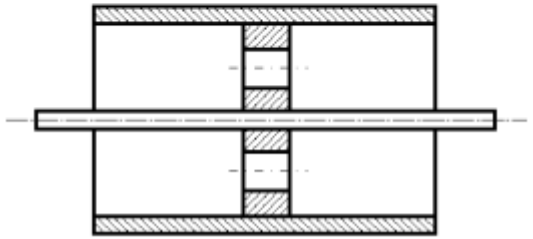
- Статор – обычный с 2-фазной обмоткой
- Ротор – полый ферромагнитный цилиндр толщиной 0,3…3 мм, иногда - омедненный



Ферромагнитный ротор
- внутренний статор не нужен
- немагнитный зазор $\delta = 0{,}2\ldots0{,}3$ мм
- но намагничивающий ток все равно большой, т.к. тонкостенный ротор сильно насыщен

Увеличение толщины ротора нецелесообразно
- увеличение момента инерции ротора
- при частотах $f = 400\ldots500$ 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 $U_в = \text{const}$
- напряжение на ОУ $U_у$ сдвинуто по фазе на $\pi/2$ относительно $U_в$
- напряжение $U_у$ изменяется по величине

$$\alpha_e = \frac{U_у}{U'_в} = \frac{U_у}{U_в/k}$$ – эффективный коэффициент сигнала

- круговое поле (и максимальный момент) только при $\alpha_e = 1$ ($U_{у0} = U'_в$)
- $U_{у0} \to$ номинальное напряжение
- при $\alpha_e < 1$ ($U_у \neq U'_в$) поле эллиптическое
- при $\alpha_e = 0$ ($U_у = 0$) 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 $U_у$ на противоположную (сдвинуть на π)

Способы управления АИД

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

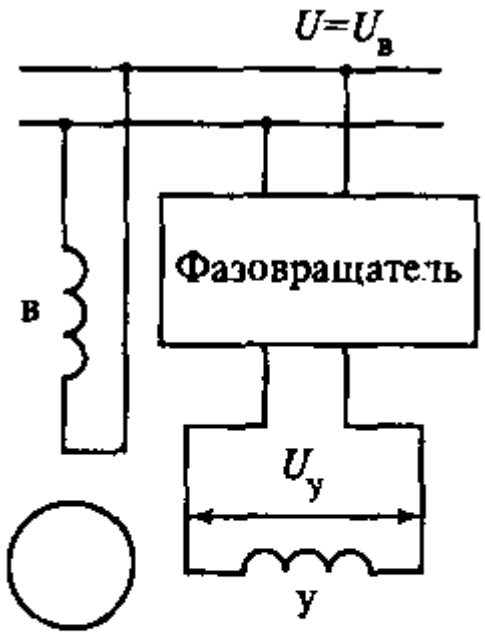
Фазовое управление

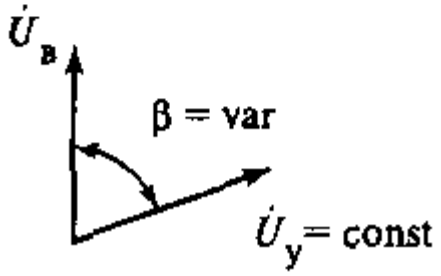
- ОВ подключена к сети с напряжением $U_в = \text{const}$
- напряжение на ОУ $U_у$ неизменно по амплитуде $U_у = U'_в = U_в/k$
- изменяется фазовый сдвиг между $U_у$ и $U_в$

$\sin\beta$ – коэффициент сигнала

- круговое поле – при сдвиге фаз между $U_у$ и $U_в$ 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
$\rightarrow$ сделать β отрицательным ($\sin\beta < 0$)





Способы управления АИД

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

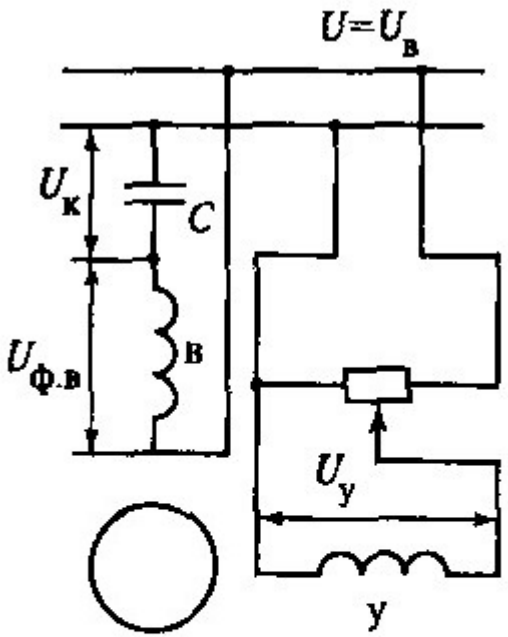
Амплитудно-фазовое управление

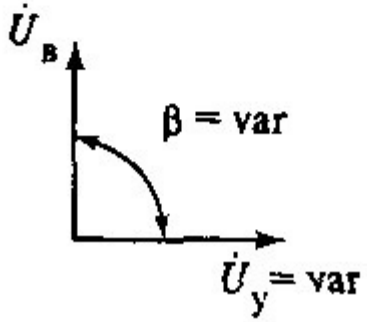
- ОВ подключена к сети через конденсатор C
- напряжение на ОУ $U_у$ изменяется только по амплитуде
- при этом изменяется напряжение на ОВ $U_{ф\,в}$ как по величине, так и по фазе (из-за изменения тока и $U_к = I_в Z_C$)
- параметры АИД выбирают так, чтобы получить круговое поле при пуске
- соответствующий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

Условия получения кругового поля в АКД
$$\begin{cases} \alpha_0 = \dfrac{\alpha_{e0}}{k} = \dfrac{U_{y0}}{U_в} = \dfrac{x_y}{k\,r_y} \\ x_C = \dfrac{k\,r_y}{\alpha_0} + k^2 x_y \end{cases}$$

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

Для реверса АИД надо переключить C в цепь другой фазы





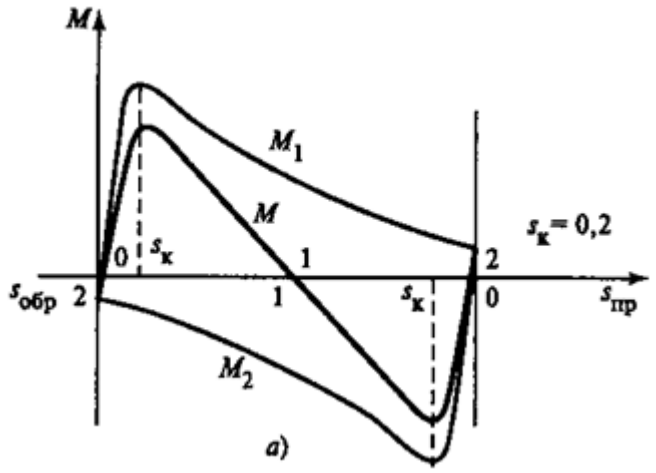
Самоход АИД

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

Параметрический самоход

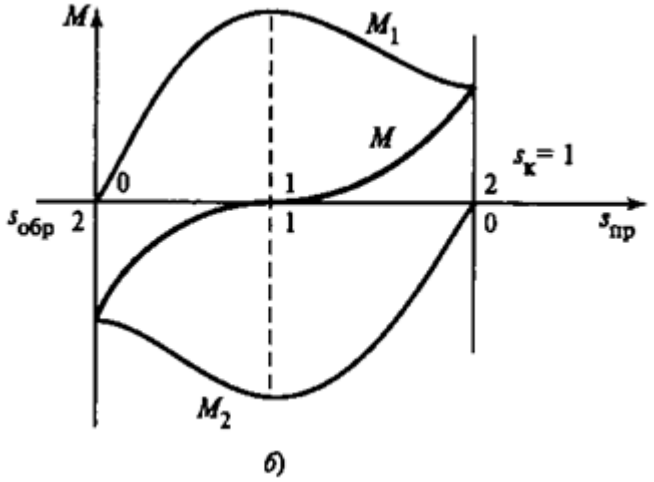
самоход по причине неправильного выбора параметров АИД
(ошибка при проектировании)

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 $\alpha_e = U_у/U'_в$

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

$$\dot{I}_{у1} = \frac{\dot{U}_у Z_{в2} - jk\dot{U}_в Z_{у2}}{Z_{у1}Z_{в2} + Z_{у2}Z_{в1}}$$

$$\dot{I}_{у2} = \frac{\dot{U}_у Z_{в1} + jk\dot{U}_в Z_{у1}}{Z_{у1}Z_{в2} + Z_{у2}Z_{в1}}$$

Симметричные составляющие тока другой обмотки $\dot{I}_{в1} = j\dfrac{\dot{I}_{у1}}{k}$ $\dot{I}_{в2} = -j\dfrac{\dot{I}_{у2}}{k}$

Здесь $Z_{у1}$, $Z_{у2}$ – сопротивления ОУ токам прямой и обратной последовательности

$Z_{в1}$, $Z_{в2}$ – сопротивления ОВ токам прямой и обратной последовательности

$k = w_в/w_у$ – эффективный коэффициент трансформации

Возможно приведение параметров ОВ к числу витков ОУ $Z_{в1} = k^2 Z_{у1}$ $Z_{в2} = k^2 Z_{у2}$

Амплитудное управление АИД

Сигнал управления $\alpha_e = U_у/U'_в$

Сопротивления $Z_{у1}$, $Z_{у2}$ – входные сопротивления схем замещения ОУ для токов прямой и обратной последовательности

Для удобства расчетов исполнительных двигателей используем вместо скольжения s величину относительной скорости v

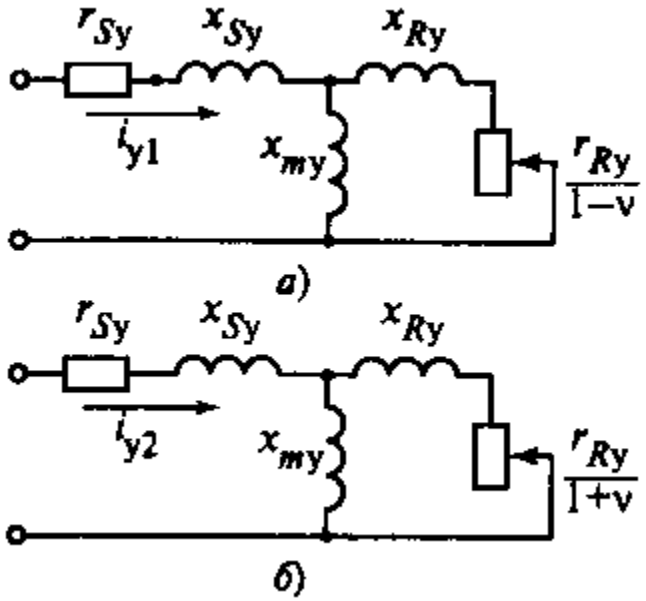
$$v = \frac{\Omega}{\Omega_с} = \frac{n}{n_с} = 1 - s$$

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 $\alpha_e = U_у/U'_в$

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

» Пусть действительная ось совпадает с вектором $U_в$

Тогда $$\dot{U}_у = -j\alpha_e \dot{U}'_в = -j\alpha_e \frac{\dot{U}_в}{k}$$

Симметричные составляющие тока ОУ (относительно $U_в$)

$$\dot{I}_{у1} = -j\frac{\dot{U}_в}{2kZ_{у1}}(1+\alpha_e) \qquad \dot{I}_{у2} = j\frac{\dot{U}_в}{2kZ_{у2}}(1-\alpha_e)$$

» Пусть действительная ось совпадает с вектором $U_у$

Тогда $$\dot{U}_в = j\frac{k\dot{U}_у}{\alpha_e}$$

Симметричные составляющие тока ОУ (относительно $U_в$)

$$\dot{I}_{у1} = \frac{\dot{U}_у}{2\alpha_e Z_{у1}}(1+\alpha_e) \qquad \dot{I}_{у2} = \frac{\dot{U}_у}{2\alpha_e Z_{у2}}(1-\alpha_e)$$

Амплитудное управление АИД

Вращающий момент АИД найдем как момент двухфазного несимметричного АД

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

Электромагнитные мощности прямой и обратной последовательности
– по схемам замещения

$$P_{\text{ЭМ1}} = 2I_{\text{у1}}^2 r_{R\text{у1}} \qquad P_{\text{ЭМ2}} = 2I_{\text{у2}}^2 r_{R\text{у2}}$$

где $r_{R\text{у1}}$, $r_{R\text{у2}}$ – активные сопротивления разветвлений схем замещения
(после преобразования схемы замещения в последовательную цепь сопротивлений)

Выразив модули токов через $U_{\text{в}}$
запишем выражение для момента

$$M = \frac{U_{\text{в}}^2}{2k^2\Omega_{\text{с}}}\left[\frac{(1+\alpha_e)^2}{Z_{\text{у1}}^2} r_{R\text{у1}} - \frac{(1-\alpha_e)^2}{Z_{\text{у2}}^2} r_{R\text{у2}}\right]$$

Это уравнение механической характеристики $M = f(\Omega)$,
но в неявном виде
(т.к. параметры $Z_{\text{у1}}$, $Z_{\text{у2}}$ и $r_{R\text{у1}}$, $r_{R\text{у2}}$ зависят от ν)

Для упрощения представим идеальный АИД,
в котором вся поступающая мощность
поступает в ротор (нет ΔU и потерь мощности)

Тогда входные сопротивления $Z_{\text{у1}} = r_{R\text{у1}} = \dfrac{r_{R\text{у}}}{1-\nu}$ $\quad Z_{\text{у2}} = r_{R\text{у2}} = \dfrac{r_{R\text{у}}}{1+\nu}$

Вращающий момент идеального АИД

$$M = \frac{U_{\text{в}}^2}{2k^2 r_{R\text{у}}\Omega_{\text{с}}}\left[2\alpha_e - (1+\alpha_e^2)\nu\right]$$

Амплитудное управление АИД

Для перехода к относительным единицам выберем систему базовых величин

» Базовое напряжение – приведенное значение напряжения ОВ

$$U_б = U'_в = \frac{U_в}{k}$$

» Базовая скорость – угловая скорость вращения поля статора

$$\Omega_б = \Omega_с = \frac{2\pi f_1}{p} \quad \text{или} \quad n_б = n_с = \frac{60 f_1}{p}$$

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

$$P_б = P_{ЭМ\,п1} = \frac{2U_в^2 r_{Rук}}{k^2 Z_{ук}^2}$$

здесь $Z_{ук}$, $r_{Rук}$ – параметры схемы замещения ОУ при коротком замыкании ($\nu = 0$)

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

$$M_б = M_{п1} = \frac{P_{ЭМ\,п1}}{\Omega_с}$$

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

Амплитудное управление АИД

Механические характеристики

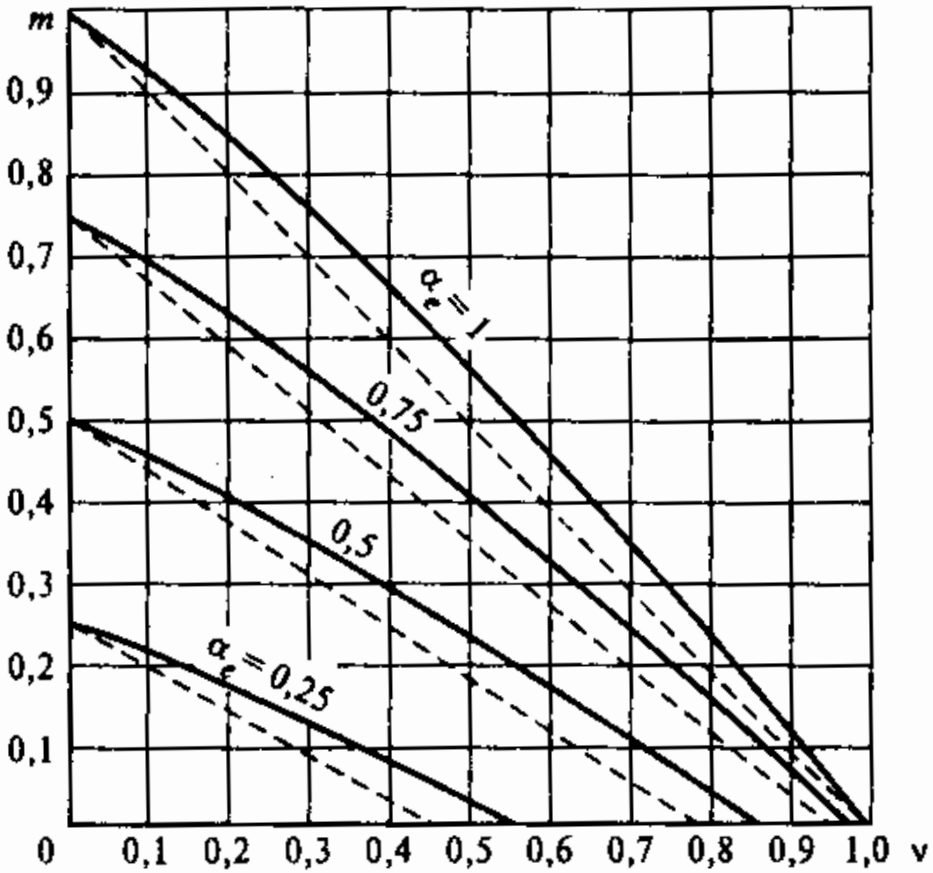
Механическая характеристика: $m = f(v)$ при $\alpha_e = \text{const}$

Семейство механических характеристик для разных α_e

- Механические характеристики идеального АИД – линейны (пунктирные линии)
- При пуске ($v = 0$) $m_п = \alpha_e$
- При ХХ ($m = 0$) $v_{XX} = \dfrac{2\alpha_e}{1+\alpha_e^2}$
- 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
- $\rightarrow v_{XX}$ реального АИД больше, чем v_{XX} идеального АИД (кроме случая $\alpha_e = 1$, когда поле круговое)

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

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



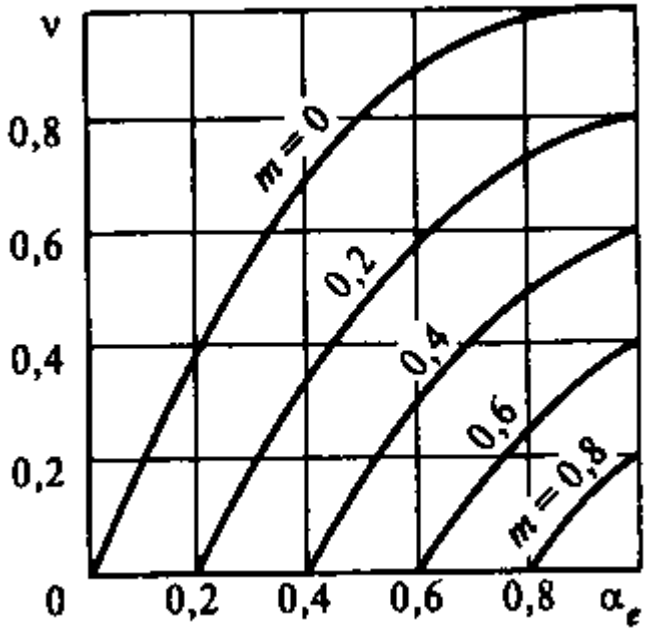
Амплитудное управление АИД

Регулировочные характеристики

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

Семейство регулировочных характеристик для разных m_c

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



- 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)

Амплитудное управление АИД

Полная механическая мощность идеального АИД

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

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

Найдем экстремум, приравняв нулю производную dp'_R/dv

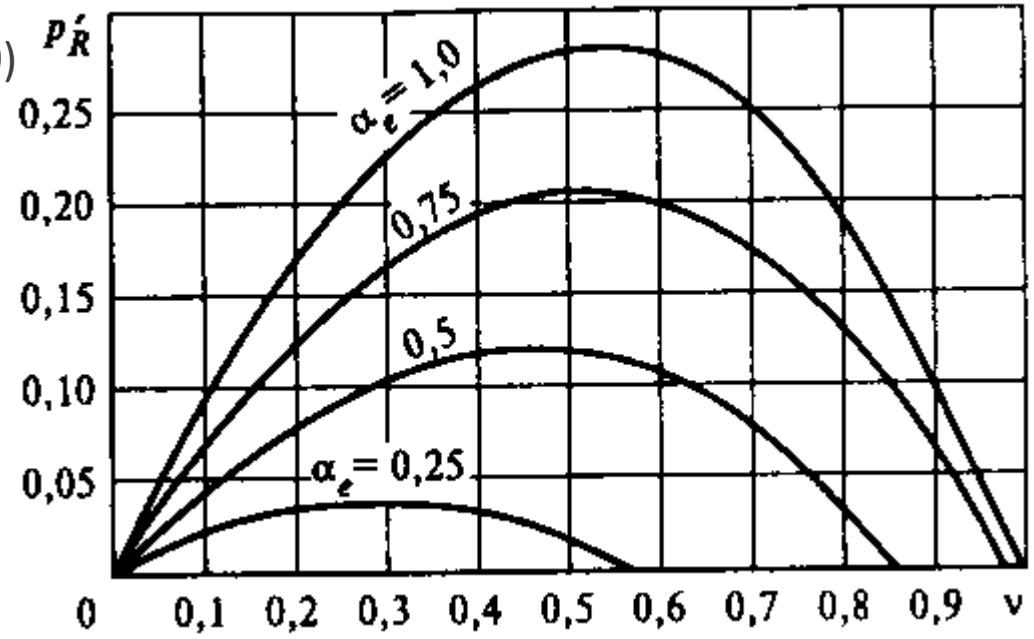
Скорость, при которой мощность максимальна

$$\nu_{p\max} = \frac{\alpha_e}{1+\alpha_e^2} = \frac{\nu_x}{2}$$

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 $v_{p\max} = (0{,}52\ldots0{,}57)v_{XX}$

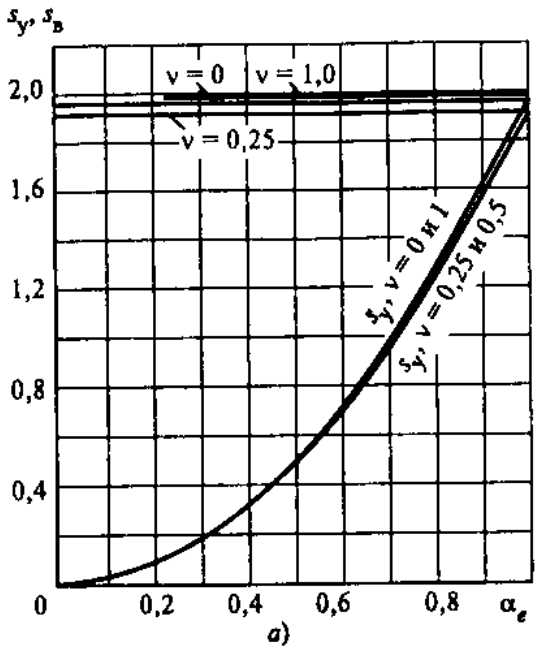


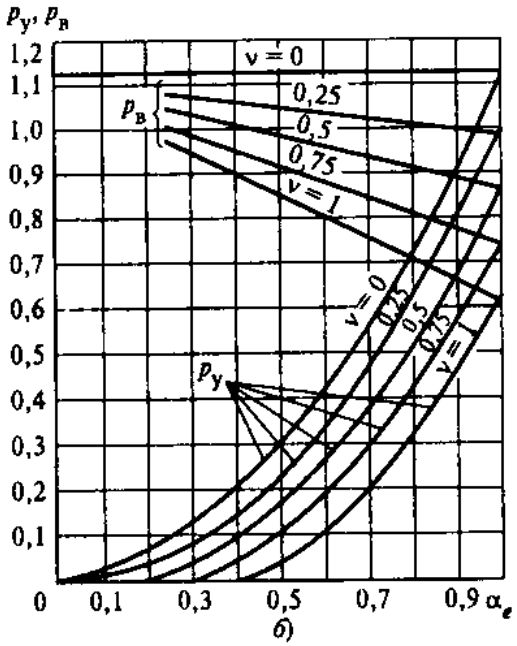
Номинальная мощность АИД
– максимальная механическая мощность при $\alpha_e = 1$
Номинальная частота вращения АИД
– та, при которой мощность максимальная при $\alpha_e = 1$

Амплитудное управление АИД

Потребляемые мощности

- Полные мощности, потребляемые обмотками $S_у = U_у I_у = \dfrac{\alpha_e U_в}{k} I_у$ $\quad S_в = U_в I_в$
- Полные токи, потребляемые обмотками $I_у = \left|\dot{I}_{у1} + \dot{I}_{у2}\right|$ $\quad I_в = \left|\dot{I}_{в1} + \dot{I}_{в2}\right|$
- Активные мощности обмоток $P_у = U_у I_{у.а}$ $\quad P_в = U_в I_{в.а}$
- Коэффициенты мощности обмоток $\cos\varphi_у = \dfrac{P_у}{S_у}$ $\quad \cos\varphi_в = \dfrac{P_в}{S_в}$





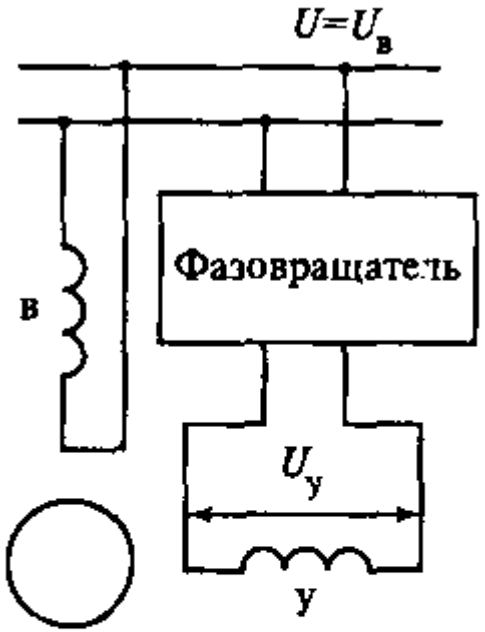
- Мощности ОВ слабо зависят от α_e
- Мощности ОУ зависят от α_e почти параболически

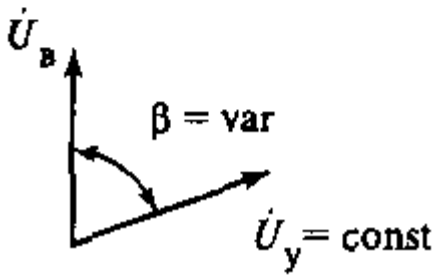
Фазовое управление АИД

Уравнения и характеристики

Фазовое управление АИД

Сигнал управления sinβ





Величина напряжения управления $U_{\text{у}} = U'_{\text{в}} = \dfrac{U_{\text{в}}}{k}$

» при $\beta = \pi/2$ – поле круговое

» при уменьшении β возрастает степень эллиптичности поля

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

Также учтем приведение параметров ОВ к числу витков ОУ $Z_{\text{в}1} = k^2 Z_{\text{у}1}$ $Z_{\text{в}2} = k^2 Z_{\text{у}2}$

» Если действительная ось совпадает с вектором $U_{\text{в}}$, тогда $\dot{U}_{\text{у}} = \dot{U}'_{\text{в}} \mathrm{e}^{-j\beta} = \dfrac{\dot{U}_{\text{в}}}{k} \mathrm{e}^{-j\beta}$

Симметричные составляющие тока ОУ (относительно $U_{\text{в}}$)

$$\dot{I}_{\text{у}1} = \frac{\dot{U}_{\text{в}}}{2kZ_{\text{у}1}}\left(\mathrm{e}^{-j\beta} - j\right) \qquad \dot{I}_{\text{у}2} = \frac{\dot{U}_{\text{в}}}{2kZ_{\text{у}2}}\left(\mathrm{e}^{-j\beta} + j\right)$$

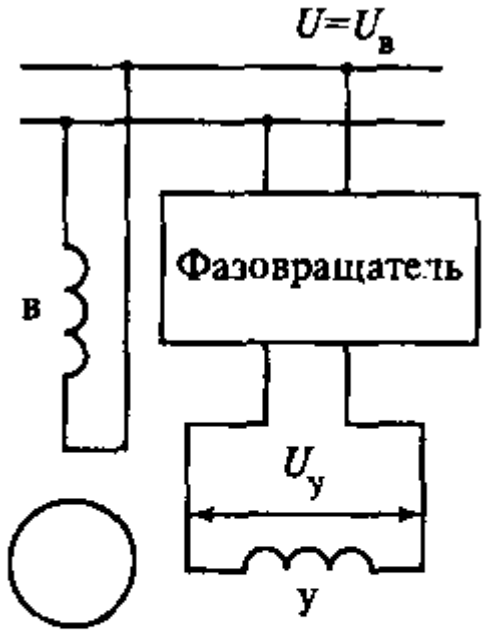
» Если действительная ось совпадает с вектором $U_{\text{у}}$, тогда $\dot{U}_{\text{в}} = k\dot{U}_{\text{у}} \mathrm{e}^{j\beta}$

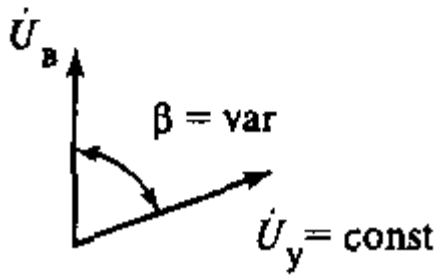
Симметричные составляющие тока ОУ (относительно $U_{\text{в}}$)

$$\dot{I}_{\text{у}1} = \frac{\dot{U}_{\text{у}}}{2Z_{\text{у}1}}\left(1 + \mathrm{e}^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)}\right) \qquad \dot{I}_{\text{у}2} = \frac{\dot{U}_{\text{у}}}{2Z_{\text{у}2}}\left(1 + \mathrm{e}^{j\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right)}\right)$$

Фазовое управление АИД

Сигнал управления sinβ





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

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

Симметричные составляющие тока другой обмотки $\dot{I}_{в1} = j\dfrac{\dot{I}_{y1}}{k}$ $\qquad \dot{I}_{в2} = -j\dfrac{\dot{I}_{y2}}{k}$

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

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

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

Фазовое управление АИД

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

Электромагнитная мощность несимметричного АД $P_{ЭМ} = 2I_{у1}^2 r_{Ry1} + 2I_{у2}^2 r_{Ry2}$

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 $I^2 = I_а^2 + I_р^2$

После преобразований получим $I_{у1}^2 = \dfrac{U_у^2}{2Z_{у1}^{\ 2}}(1+\sin\beta)$ $\quad I_{у2}^2 = \dfrac{U_у^2}{2Z_{у2}^{\ 2}}(1-\sin\beta)$

С учетом $U_у = U_в/k$ квадраты токов запишем как $I_{у1}^2 = \dfrac{U_в^2}{2k^2 Z_{у1}^{\ 2}}(1+\sin\beta)$ $\quad I_{у2}^2 = \dfrac{U_в^2}{2k^2 Z_{у2}^{\ 2}}(1-\sin\beta)$

Тогда вращающий момент АИД при фазовом управлении $M = \dfrac{U_в^2}{k^2\Omega_с}\left[\dfrac{1+\sin\beta}{Z_{у1}^2} r_{Ry1} - \dfrac{1-\sin\beta}{Z_{у2}^2} r_{Ry2}\right]$

Здесь вновь неявная зависимость от ν

Для идеального АИД, у которого входные сопротивления $Z_{у1} = r_{Ry1} = \dfrac{r_{Ry}}{1-\nu}$ $\quad Z_{у2} = r_{Ry2} = \dfrac{r_{Ry}}{1+\nu}$
выражение вращающего момента запишется как

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

Фазовое управление АИД

Система базовых единиц АИД остается неизменной

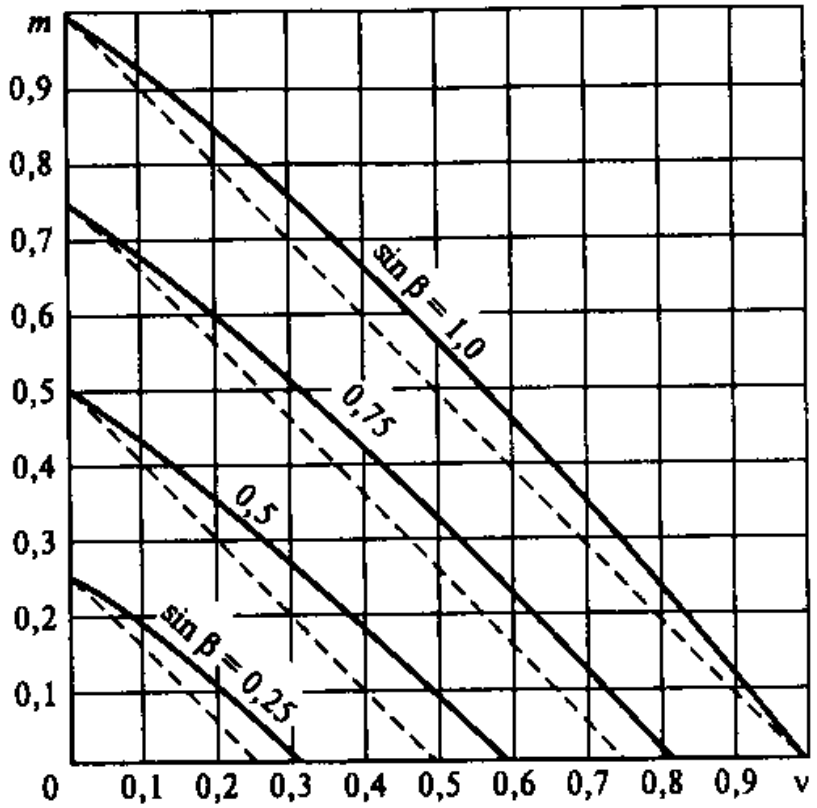
Тогда момент идеального АИД при фазовом управлении в о.е. запишется как $\boxed{m = \sin\beta - v}$

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 ($v = 0$) $m_п = \sin\beta$
- При ХХ ($m = 0$) $v_{XX} = \sin\beta$
- Жесткость характеристик идеального АИД – постоянна
- У реального АИД жесткость снижается с уменьшением $\sin\beta$ (из-за возрастания v_{XX})
- 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

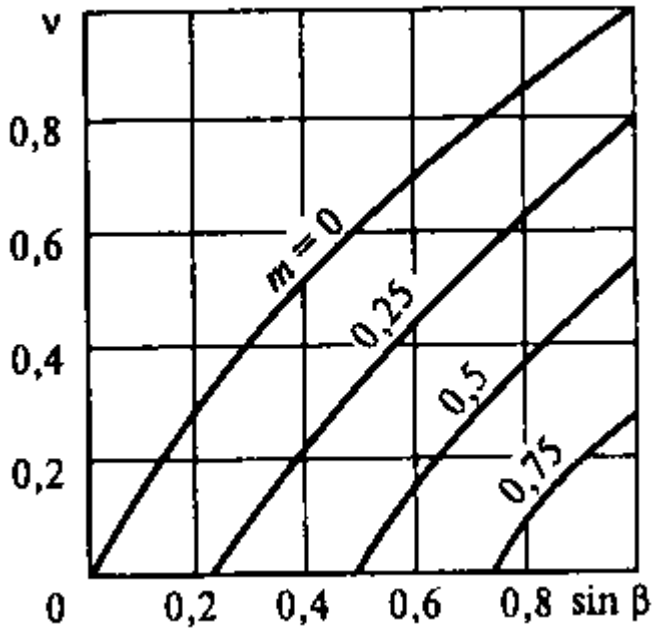
Регулировочная характеристика: $v = f(\sin\beta)$ при $m_c = \text{const}$

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

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.)

$$\sin\beta_{тр} = m$$



Фазовое управление АИД

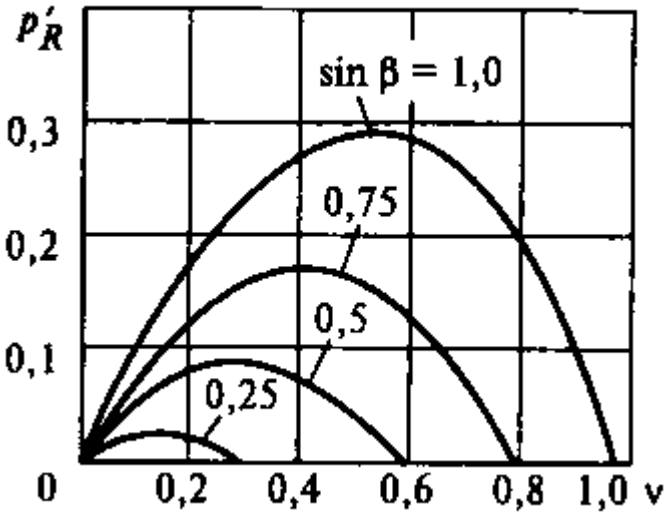
Полная механическая мощность идеального АИД

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

Максимум механической мощности достигается при скорости

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

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)

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 рассчитываются аналогично АИД с амплитудным управлением

Полные мощности $S_у = U_у I_у$ $S_в = U_в I_в$

Активные мощности $P_у = U_у I_{у.а}$ $P_в = U_в I_{в.а}$

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

Амплитудно-фазовое управление АИД

Уравнения и характеристики

Амплитудно-фазовое управление АИД

Наиболее простой способ управления для однофазных сетей переменного тока

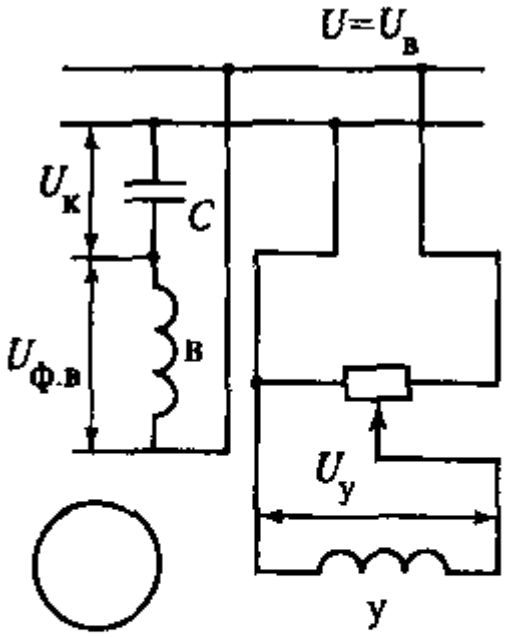


Схема включения аналогична асинхронному конденсаторному двигателю

» конденсатор включен в цепь ОВ

» регулирование осуществляется изменением напряжения ОУ

$$\dot{U}_{\text{у}} = \alpha \dot{U}_{\text{в}} = \alpha_e \frac{\dot{U}_{\text{в}}}{k}$$

Напряжение на самой ОВ $\dot{U}_{\text{ф.в}} = \dot{U}_{\text{в}} - \dot{U}_{\text{к}}$

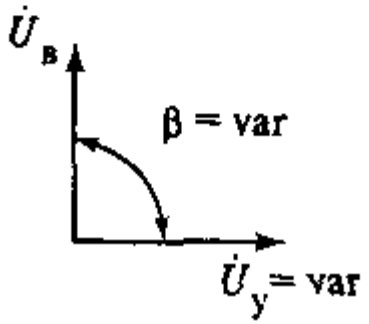
При изменении $U_{\text{у}}$ изменяется n

→ изменяется входное сопротивление схемы замещения $Z_{\text{в}}$

→ изменяется ток $I_{\text{в}}$ и падение напряжения на конденсаторе $U_{\text{к}} = I_{\text{в}} Z_C$

→ изменяется величина и фаза напряжения на обмотке ОВ $U_{\text{ф.в}}$

т.е. управление – амплитудно-фазовое



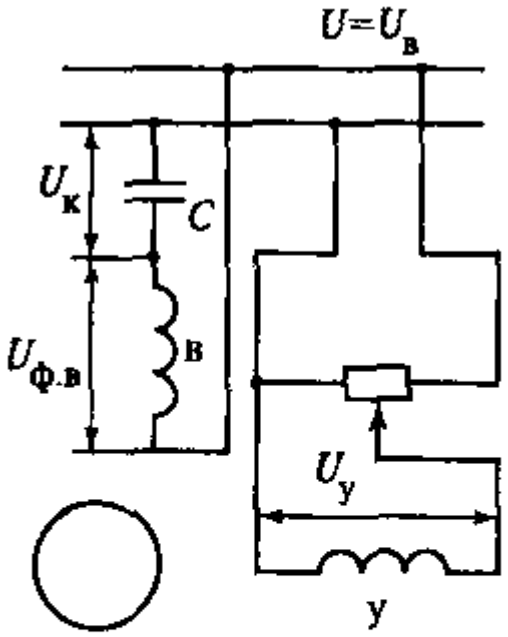
» параметры АИД выбирают так, чтобы получить круговое поле при пуске и номинальном напряжении $U_{\text{ун}}$

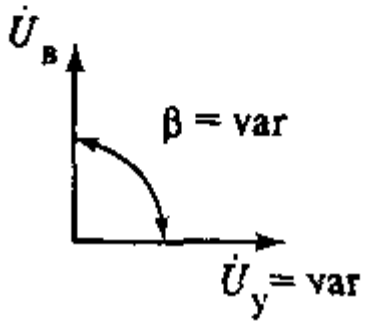
Для этого подбирают коэффициент сигнала и емкость так, чтобы

$$\begin{cases} \alpha_0 = \dfrac{U_{\text{у}}}{U_{\text{в}}} = \dfrac{x_{\text{ук}}}{k r_{\text{ук}}} = \dfrac{\operatorname{tg}\varphi_{\text{у}}}{k} \\ x_C = \dfrac{k r_{\text{ук}}}{\alpha_0} + k^2 x_{\text{ук}} = \dfrac{x_{\text{ук}}}{\alpha_0^2} + x_{\text{фв}} \end{cases}$$

Амплитудно-фазовое управление АИД

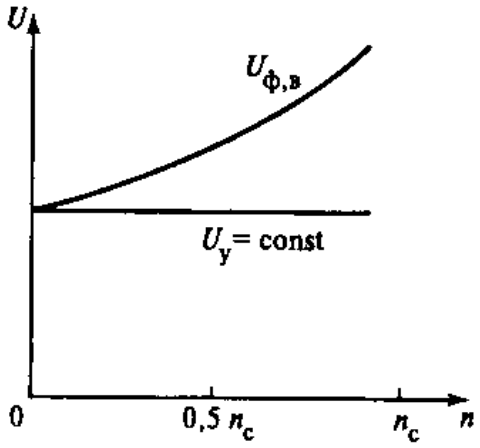
Особенность конденсаторного АИД, в котором $\dot{U}_{ф.в} = \dot{U}_{в} - \dot{U}_{к}$





» при постоянном $U_{у}$ и при увеличении n (с изменением нагрузки двигателя) напряжение на ОВ $U_{ф.в}$ возрастает

Это приводит к увеличению потока $\Phi_{в}$ и вращающего момента и искажению характеристик



Для расчета характеристик можно использовать выражения составляющих тока $I_{у}$ из теории асинхронных конденсаторных двигателей

$$\dot{I}_{у1} = \dot{U}_{в} \frac{\alpha\left(k^2 Z_{у2} - jx_C\right) - jkZ_{у2}}{Z_{у1}\left(k^2 Z_{у2} - jx_C\right) + Z_{у2}\left(k^2 Z_{у1} - jx_C\right)}$$

$$\dot{I}_{у2} = \dot{U}_{в} \frac{\alpha\left(k^2 Z_{у1} - jx_C\right) + jkZ_{у1}}{Z_{у1}\left(k^2 Z_{у2} - jx_C\right) + Z_{у2}\left(k^2 Z_{у1} - jx_C\right)}$$

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

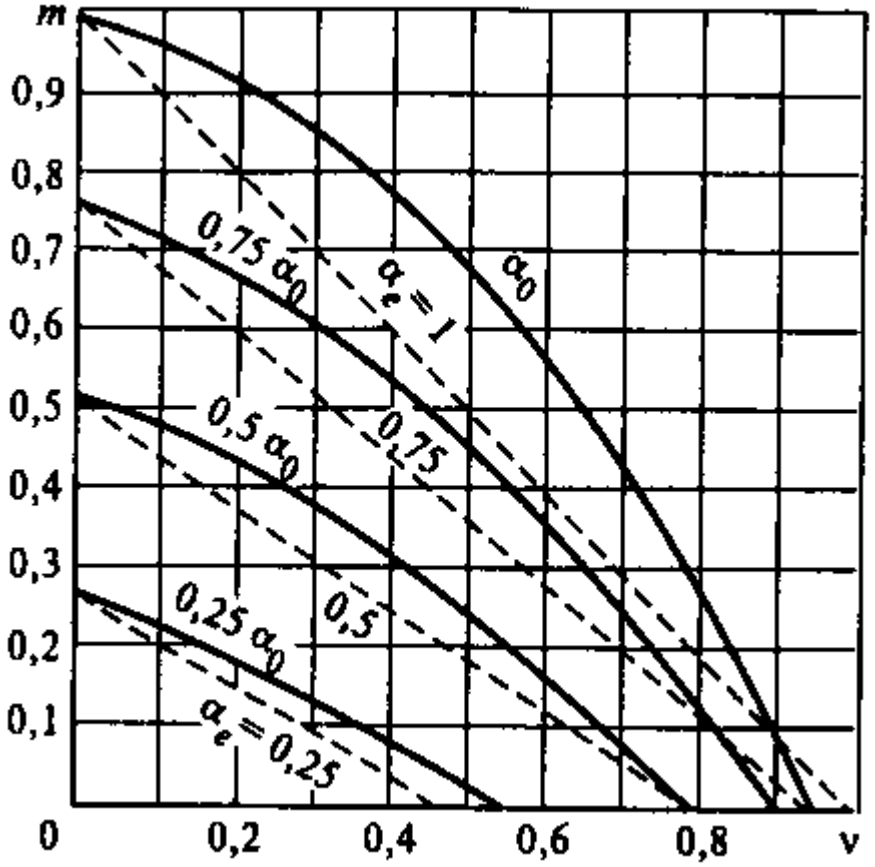
Механические характеристики

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)

$$M_б = M_{п1} = \frac{2U_в^2 r_{Rук}}{\Omega_с k^2 Z_{ук}^2}\left(\frac{x_{ук}}{r_{ук}}\right)^2$$



Амплитудно-фазовое управление АИД

Механические характеристики

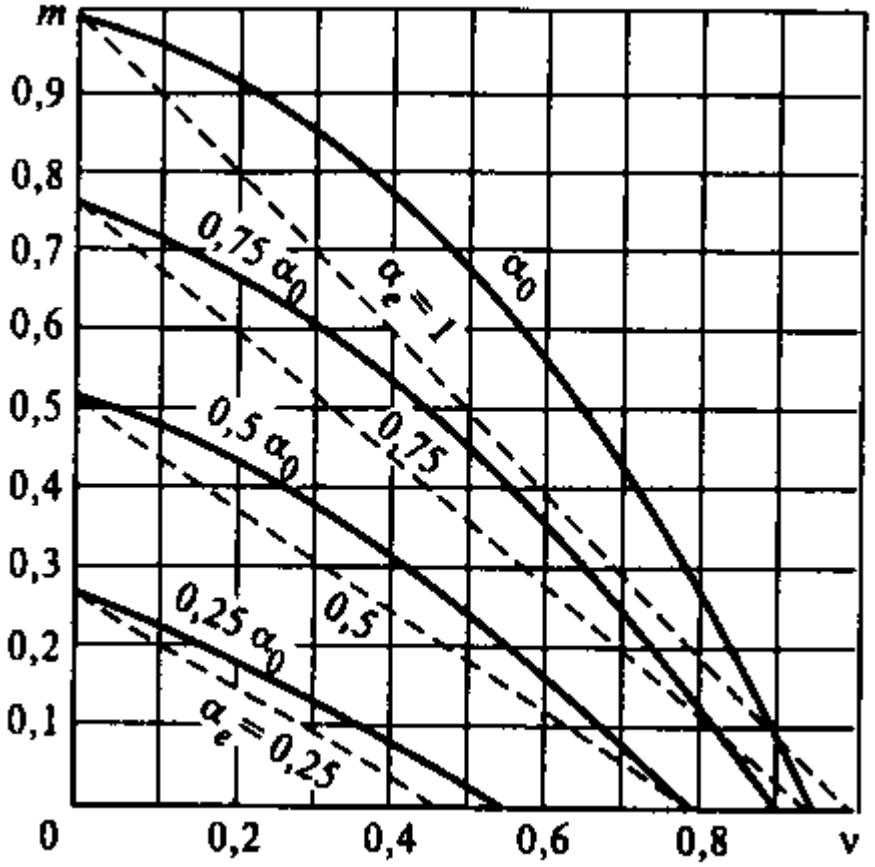
Механическая характеристика: $m = f(v)$ при $\alpha = \text{const}$

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 $U_{ф.в}$ 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 $\Delta M/M_п$

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



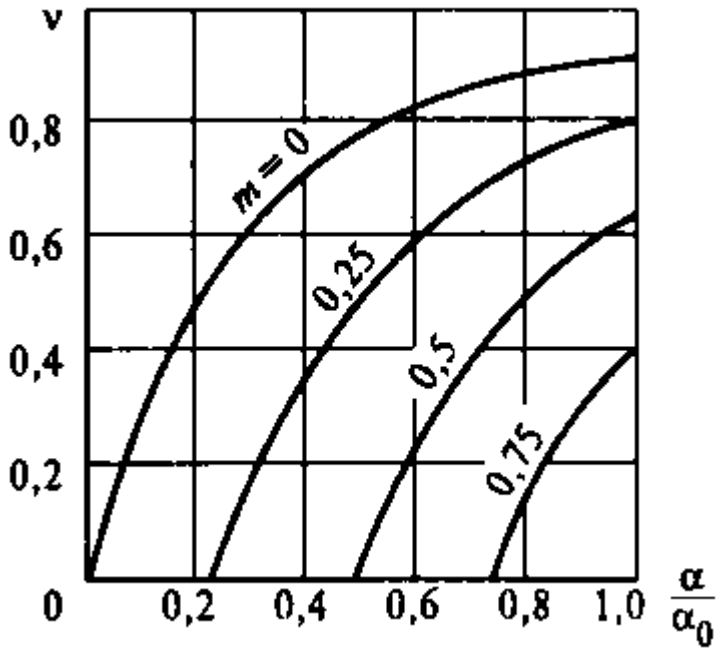
Амплитудно-фазовое управление АИД

Регулировочные характеристики

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

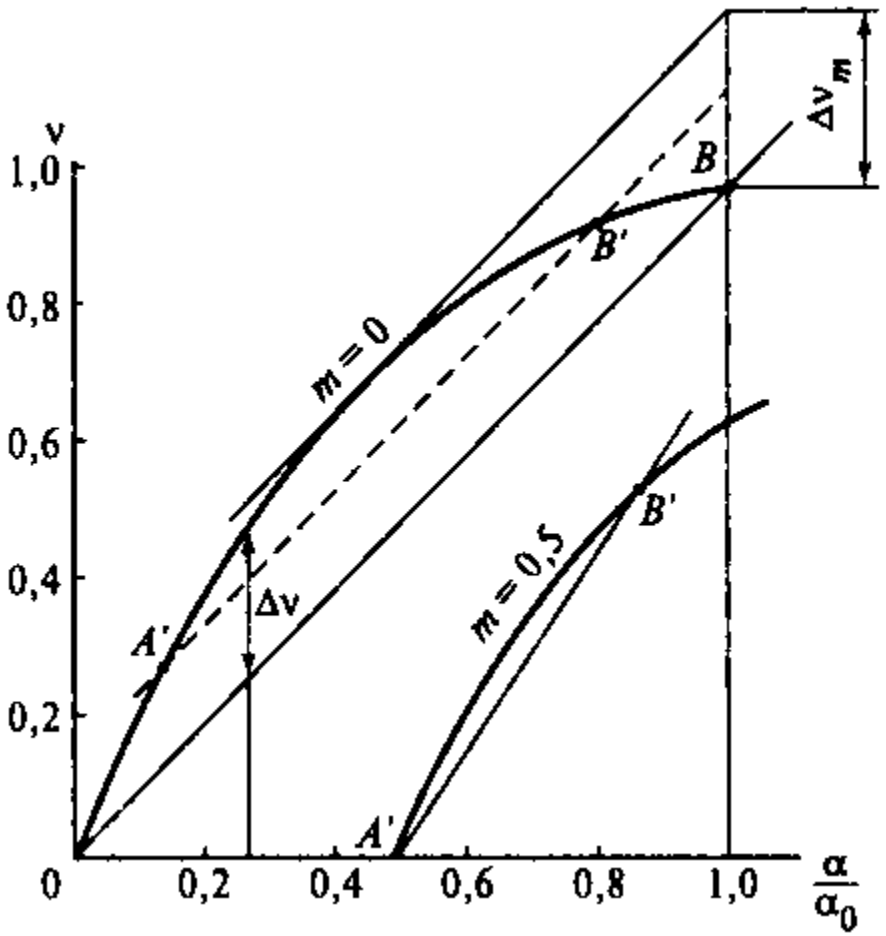
Семейство регулировочных характеристик для разных m_c

- 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 ХХ ($m = 0$)

Величина нелинейности $\Delta\nu$ – разница между реальной скоростью и скоростью по калибровочной прямой $0B$ для каждого α/α_0

Обычно регулирование требуется
в ограниченном диапазоне скоростей
$\rightarrow$ можно уменьшить зону изменения управляющего сигнала
$\rightarrow$ можно увеличить $n_б = n_с$, уменьшив рабочие значения ν

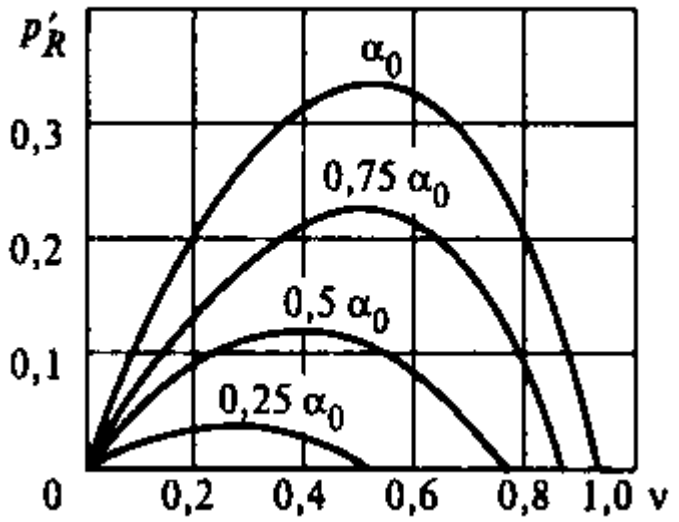
Если калибровочной прямой будет линия $A'B'$
(для заданного диапазона ν),
то нелинейность $\Delta\nu$ относительно нее будет меньше

Напряжение трогания,
определяющее чувствительность АИД

$$\frac{U_{тр}}{U_{ун}} = 0,01\ldots0,08$$

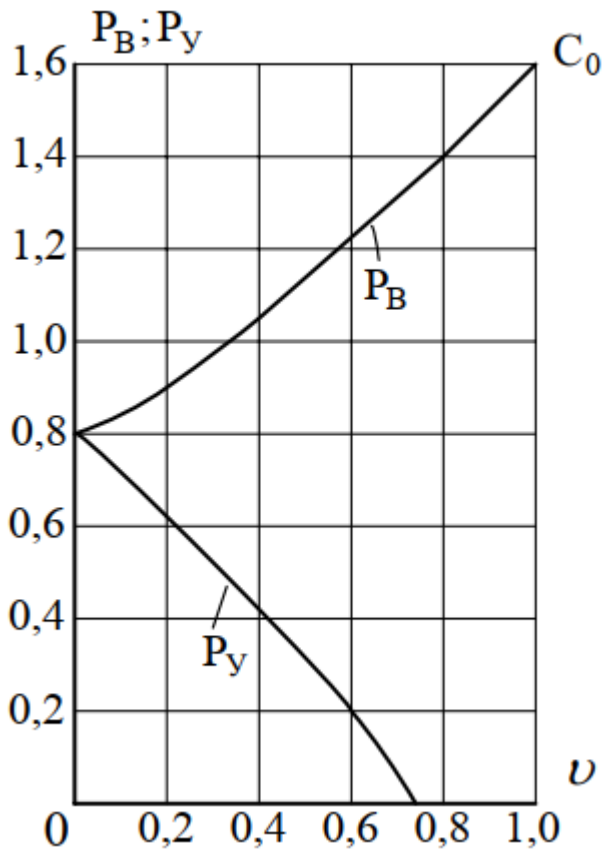
Амплитудно-фазовое управление АИД

Полная механическая мощность $p'_R = \nu m$
в конденсаторном АИД больше,
чем при амплитудном и фазовом управлении
Причина – повышение напряжения $U_{ф.в}$ при увеличении скорости → увеличение момента



Потребляемая активная мощность
В конденсаторном ИАД 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)

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

» для идеального АИД с линейной механической характеристикой

$$k_D = \frac{M_п}{\Omega_{XX}} = \operatorname{tg}\psi = \text{const}$$

Коэффициент управления по моменту

$$k_M = \frac{dM_п}{dU_у}$$

$$k_M = \frac{M_п}{U_{ун}} = \operatorname{tg}\beta = \text{const}$$

Коэффициент управления по скорости

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

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

Коэффициент управления по мощности

$$k_P = \frac{M_п}{P_{у\,п}}$$

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/)