

# Часть 2. Исполнительные двигатели

---

Исполнительные двигатели постоянного  
тока



# Исполнительные (управляемые) двигатели

Исполнительные двигатели преобразуют электрический сигнал ( $U$ ) в механическое перемещение вала (частота вращения, момент, мощность)

ИД работают в системах автоматики, в условиях частых пусков, остановок и реверса

» энергетические показатели ( $\eta$ ,  $\cos\varphi$ ) неважны

Важно иметь

» малоинерционный ротор

Другие особенности

» разные, в том числе низкие, скорости

→ отсутствие вентилятора на валу

→ малые плотности токов в обмотках

» высокие требования к линейности характеристик

→ большое  $\mu$  в линейной зоне

→ большое сечение магнитопровода

» много меди, много стали

→ плохие массогабаритные показатели

Исполнительный двигатель имеет 2 обмотки

» Обмотка возбуждения (ОВ) –  $U_B = \text{const}$

» Обмотка управления (ОУ) –  $U_y = \text{var}$

$U_y$  – сигнал управления

» величина / фаза  $U_y$  определяют  $n$ ,  $M$

# Исполнительные (управляемые) двигатели

## Основные требования к исполнительным двигателям

- » линейность характеристик (механических и регулировочных)
- » устойчивая работа во всем диапазоне скоростей в двигательном режиме
- » отсутствие самохода (самоторможение при снятии  $U_y$ )
- » большой пусковой момент
- » высокое быстродействие
- » малая мощность управления
- » широкий диапазон регулирования  $n$
- » малое напряжение трогания
- » надежность в работе
- » малые габариты и масса

В качестве исполнительных двигателей применяются

- » двигатели постоянного тока
  - с независимым возбуждением
  - с постоянными магнитами
- » асинхронные двигатели
  - двухфазные
- » синхронные шаговые двигатели

# Исполнительные двигатели постоянного тока ИДПТ

# Исполнительные двигатели постоянного тока

## Достоинства ИДПТ

- » линейные характеристики
- » практически любые частоты вращения
- » плавное и экономичное регулирование скорости в широком диапазоне
- » устойчивость работы при любых скоростях
- » отсутствие самохода
- » большой пусковой момент
- » небольшая электромеханическая постоянная времени
- » малые габариты и масса

## Способы управления ИДПТ

- » Сигнал управления – напряжение на ОУ
- » Якорное управление –  $U_y$  на обмотке якоря
- » Полюсное управление –  $U_y$  на обмотке полюсов

## Недостатки ИДПТ

- » наличие щеточно-коллекторного узла
  - непостоянство переходного сопротивления скользящих контактов  
→ нестабильность характеристик
  - искрение под щетками  
→ подгорание контактов  
→ загрязнение двигателя  
→ необходимость регулярного ухода
- радиопомехи и гармоники тока  
→ необходимость применения фильтров

# Конструкции ИДПТ

Похожи на традиционные двигатели постоянного тока, за исключением

- » полностью шихтованные сердечники
  - снижение потерь в стали при переходных процессах
  - повышение быстродействия
- » увеличенная масса меди и стали
  - малая  $B_{ст}$  → линейность характеристик
  - малая  $j$  → малое тепловыделение
- » отсутствие добавочных полюсов (нет места)
- » повышенное число коллекторных пластин
  - улучшение коммутации

Иногда применяется гладкий беспазовый якорь

- » ОЯ уложена поверх ярма ротора и закреплена компаундом
  - малое рассеяние – малая индуктивность
  - улучшение коммутации
  - снижение электрохимической постоянной времени (повышение быстродействия)
- » увеличенный немагнитный зазор
  - повышенный ток ОВ

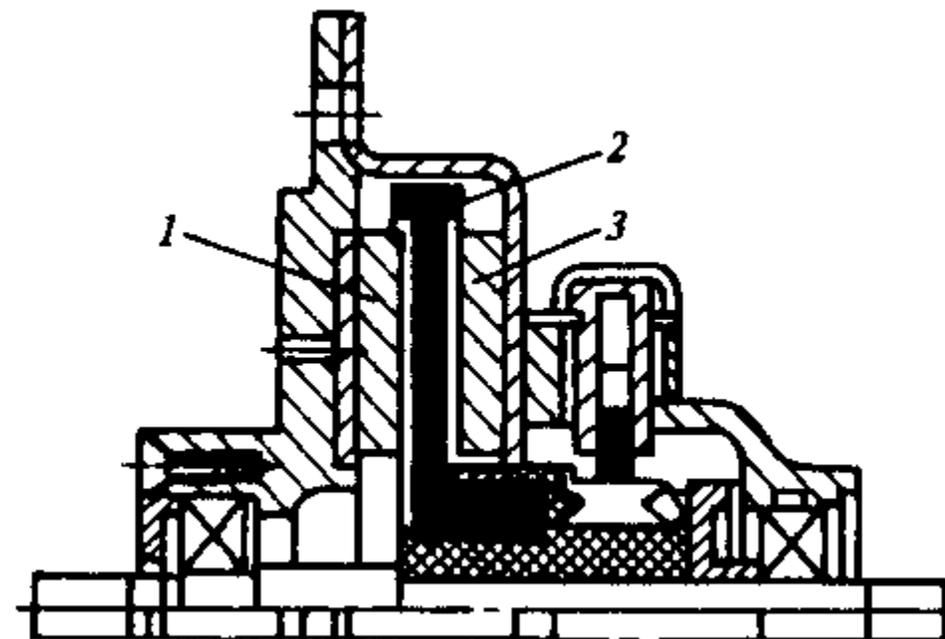
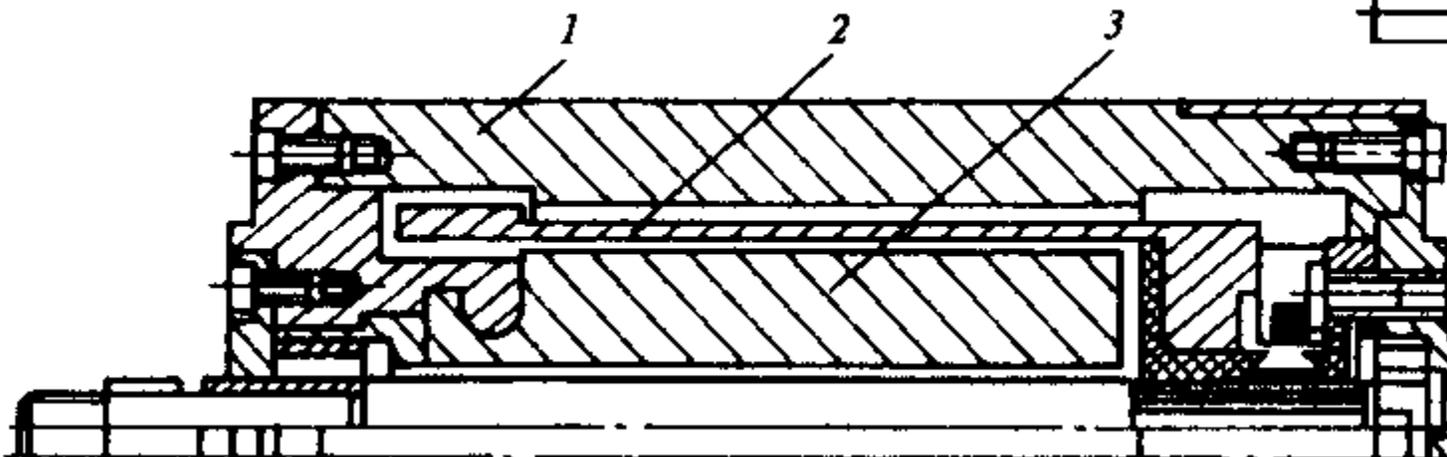
# Конструкции ИДПТ

## Малоинерционный ИДПТ

Обмотку якоря укладывают на оправке, закрепляют компаундом и убирают оправку

- » ОЯ вращается вместе с коллектором (без сердечника)
- » Внутренний неподвижный сердечник снижает магнитное сопротивление

с цилиндрическим якорем



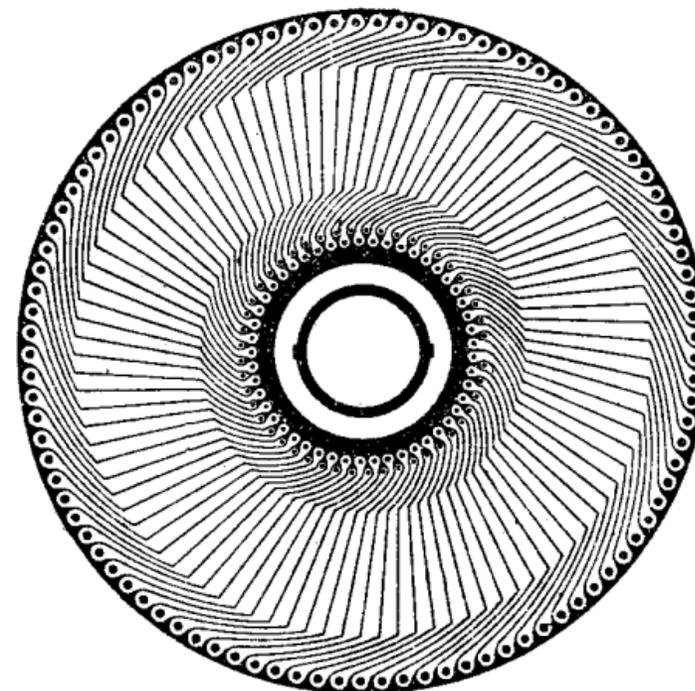
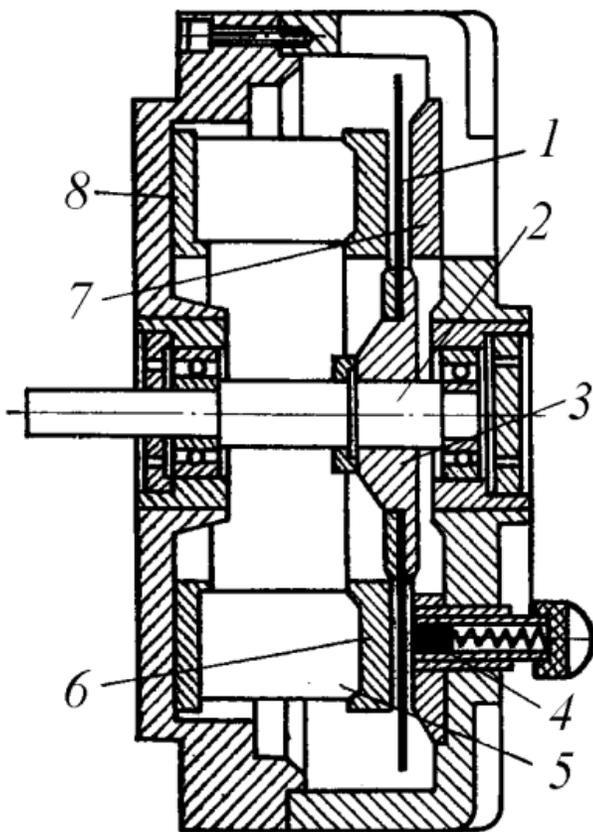
с дисковым якорем

# Конструкции ИДПТ

Малоинерционный ИДПТ с дисковым якорем с печатной обмоткой

Проводники обмотки якоря изготавливают по технологии печатных плат (с двух сторон диска)

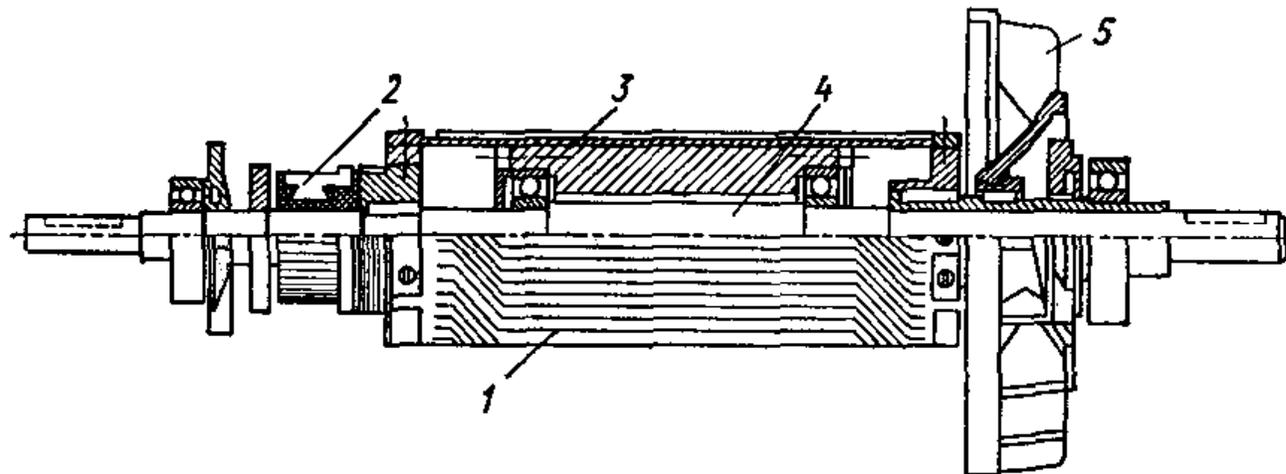
- » Ротор легкий с малым  $J$
- » Не требуется коллектор – щетки скользят по проводникам ОЯ
- » Возбуждение – от ПМ
- » С другой стороны диска – сердечник (ядро)



# Конструкции ИДПТ

Малоинерционный ИДПТ с цилиндрическим якорем с печатной обмоткой

В случае цилиндрического якоря момент инерции еще меньше  
Выше прочность ротора  
(допускается больше  $n$ )



Достоинства малоинерционных ИДПТ

- » малый момент инерции
- » высокое быстродействие
- » отсутствие магнитных потерь в якоре
- » безыскровая коммутация (малая индуктивность секций)
- » отсутствие сил магнитного тяжения (статор-ротор)

Недостатки

- » большой немагнитный промежуток
- » малая механическая прочность ротора
- » ограниченное число витков якоря (печатная обмотка - однослойная)
- » износ витков якоря из-за трения щеток

# Якорное управление ИДПТ

Уравнения,  
характеристики

# Якорное управление ИДПТ

Обмотка возбуждения (ОВ) – обмотка полюсов ИДПТ (или ПМ)

» независимое возбуждение

»  $U_B = \text{const}$

Обмотка управления (ОУ) – обмотка якоря ИДПТ

»  $U_y = \text{var} \rightarrow n, M$

Обмотка возбуждения (ОВ)

»  $U_B \rightarrow I_B \rightarrow \Phi_B$

»  $\Phi_B = c_\Phi U_B (= \text{const})$

Обмотка управления (ОУ)

»  $E_y = c_E n \Phi_B$

»  $U_y = E_y + I_y r_y$

( $r_y$  – сопротивление обмотки якоря)

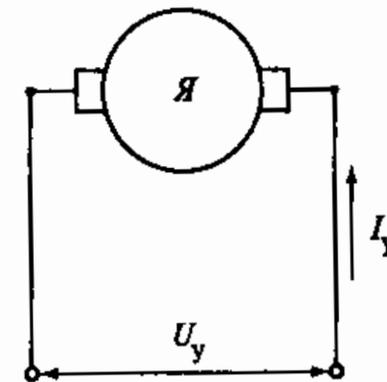
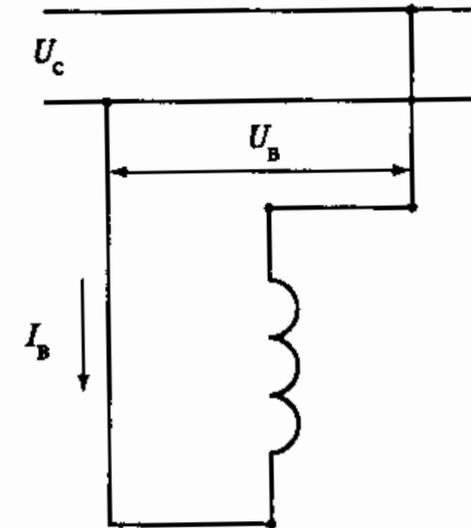
Ток обмотки управления

$$I_y = \frac{U_y - E_y}{r_y} = \frac{U_y - c_E c_\Phi U_B n}{r_y}$$

Вращающий момент ИДПТ

$$M = c_M \Phi_B I_y = c_M c_\Phi U_B I_y$$

$$M = \frac{c_M c_\Phi U_B U_y - c_E c_M c_\Phi^2 U_B^2 n}{r_y}$$



# Якорное управление ИДПТ

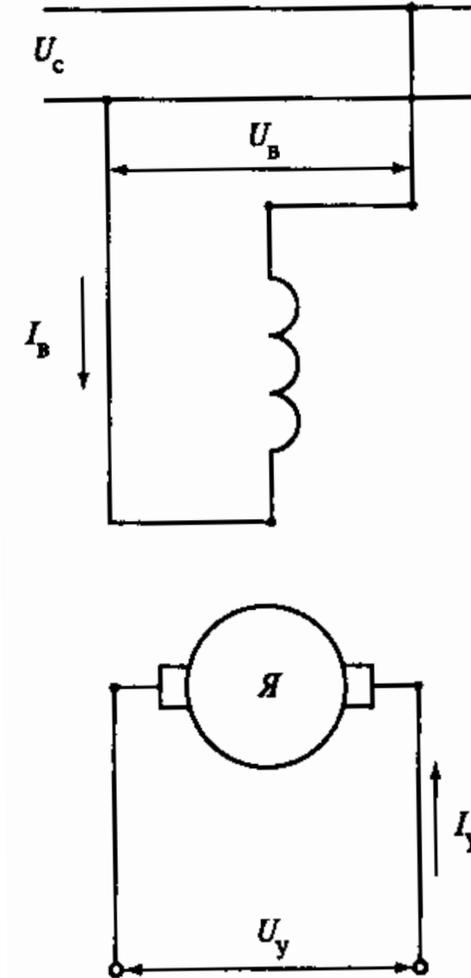
Исполнительные двигатели используются в системах автоматики  
Для них принято записывать уравнения в относительных единицах

Система относительных единиц

– относительно базовых величин

- » Базовое напряжение  $U_{\sigma} = U_B (=const)$ 
  - Напряжение управления  $\rightarrow \alpha = \frac{U_y}{U_B}$  (коэффициент сигнала)
- » Базовый момент
  - момент ИДПТ при пуске ( $n = 0$ ) при  $\alpha = 1$   $M_{\sigma} = M_{\text{пл}} = \frac{c_M c_{\Phi} U_B^2}{r_y}$
  - Относительный момент  $\rightarrow m = \frac{M}{M_{\sigma}}$
- » Базовая частота вращения
  - частота вращения ХХ ( $M = 0$ ) при  $\alpha = 1$   $n_{\sigma} = n_0 = \frac{1}{c_E c_{\Phi}}$
  - Относительная скорость  $\rightarrow v = \frac{n}{n_{\sigma}} = \frac{\Omega}{\Omega_{\sigma}}$

Тогда момент ИДПТ 
$$M = \frac{c_M c_{\Phi} U_B U_y - c_E c_M c_{\Phi}^2 U_B^2 n}{r_y} \rightarrow m = \alpha - v$$



# Якорное управление ИДПТ

## Механические характеристики

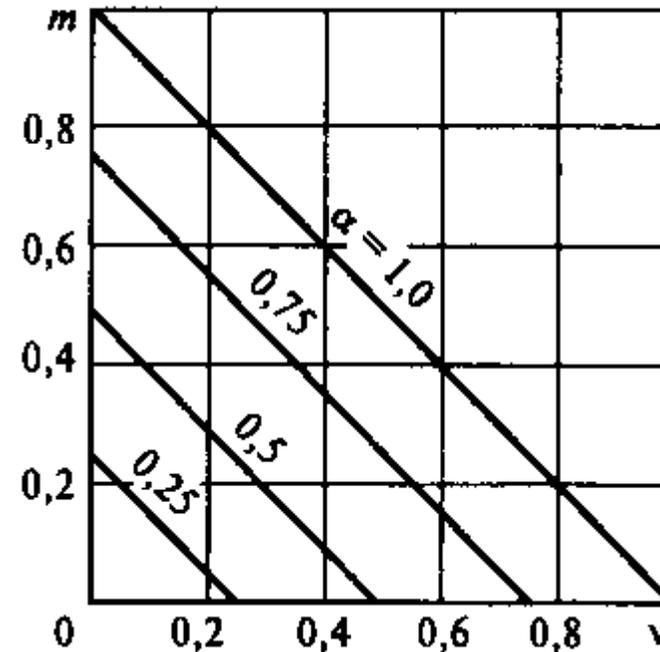
Механическая характеристика:  $m = f(v)$  при  $\alpha = \text{const}$

Семейство механических характеристик для разных  $\alpha$

- » Механические характеристики – линейны
- » При пуске ( $v = 0$ )  
( $M_{II}$  пропорционален  $U_y$ )  $m_{II} = \alpha$
- » При ХХ ( $m = 0$ )  
( $n_{XX}$  пропорциональна  $U_y$ )  $v_{XX} = \alpha$
- » Жесткость механических характеристик не изменяется для всех  $\alpha$

Идеальные механические характеристики для исполнительного двигателя

$$m = \alpha - v$$



# Якорное управление ИДПТ

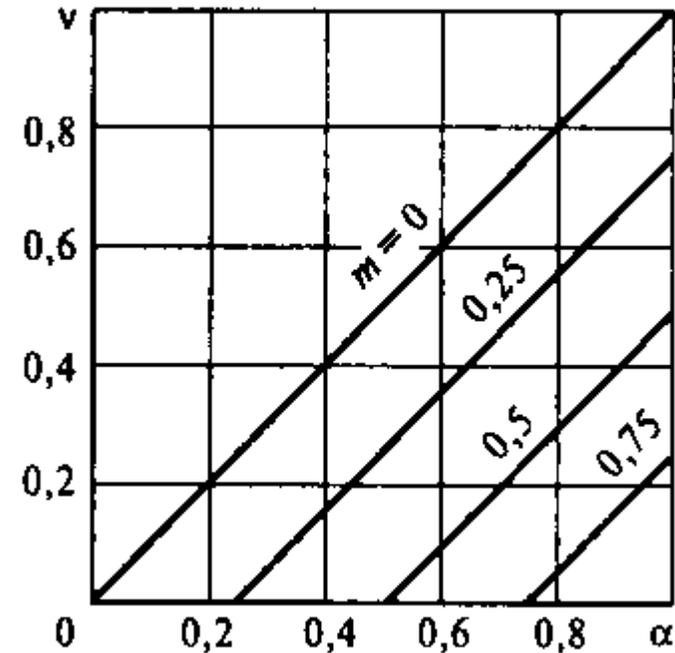
## Регулировочные характеристики

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

Семейство регулировочных характеристик для разных  $m_c$

- » Регулировочные характеристики – линейны
- » При любом моменте сопротивления скорость пропорциональная сигналу управления
- » При любом моменте сопротивления максимальная скорость – при  $\alpha = 1$
- » Напряжение управления, при котором начинается вращение ИД (при заданном моменте сопротивления) – **напряжение трогания**
- » Тогда **сигнал трогания** –  $\alpha_{\text{тр}} = m$   
(в реальных ИД есть собственный момент сопротивления, поэтому  $U_{\text{тр}}$  на 5% больше теоретического)

$$v = \alpha - m$$



При  $\alpha = 0$  всегда  $v = 0$  (даже при ХХ)  
→ ИДПТ с якорным управлением не имеет самохода

# Якорное управление ИДПТ

## Мощности

При анализе работы двигателя надо знать потребляемую и отдаваемую мощности

### Мощность возбуждения

потребляется обмоткой полюсов

$$P_B = I_B^2 r_B = \frac{U_B^2}{r_B}$$

- » неизменна при любом  $\alpha$
- » не зависит от нагрузки
- » выделяется в виде тепла (потери)

В ИДПТ мощностью  $>250$  Вт  $P_B$  составляет 5...10% от потребляемой мощности

В ИДПТ мощностью  $<10$  Вт  $P_B$  составляет 20...30% от потребляемой мощности

В машинах с ПМ  $P_B = 0$

# Якорное управление ИДПТ

## Мощности

При анализе работы двигателя надо знать потребляемую и отдаваемую мощности

### Мощность управления

потребляется обмоткой якоря

$$P_y = U_y I_y = U_y \frac{U_y - E_y}{r_y}$$

- » преобразуется в механическую мощность  
– заставляет вращаться двигатель и нагрузку
- » покрывает потери в якоре (электрические и магнитные)
- » составляет 70...95% всей потребляемой мощности  
(это недостаток, т.к. придется усиливать сигнал управления)

### Максимальная потребляемая мощность

– мощность  $P_y$  при пуске ( $v = 0$ ) и номинальном напряжении ( $U_y = U_{yH}, \alpha = 1$ )  $P_{1max} = U_{yH} I_{yH} = U_{yH} \frac{U_{yH} - 0}{r_y} = \frac{(U_B)^2}{r_y}$

Перепишем выражение  $P_y$  с учетом  $n_\sigma = \frac{1}{c_E c_\Phi}$  и  $E = c_E n \Phi_B = c_E n c_\Phi U_B = \frac{1}{n_\sigma} n U_B = v U_B$

$$P_y = U_y \frac{U_y - E_y}{r_y} = \alpha U_B \frac{\alpha U_B - v U_B}{r_y} = \alpha^2 \frac{U_B^2}{r_y} - \alpha v \frac{U_B^2}{r_y} = \alpha \left( \alpha \frac{U_B^2}{r_y} - v \frac{U_B^2}{r_y} \right)$$

Тогда относительно максимальной мощности  $p_y = \frac{P_y}{P_{1max}} = \alpha^2 - \alpha v = \alpha(\alpha - v)$

# Якорное управление ИДПТ

## Мощности

При анализе работы двигателя надо знать потребляемую и отдаваемую мощности

### Полная механическая мощность

$$P_{\text{мех}} = M\Omega \rightarrow p_R = mv = (\alpha - v)v = \alpha v - v^2$$

Нелинейная функция частоты вращения

» при пуске ( $v = 0$ )  $\rightarrow p_R = 0$

» при ХХ ( $m = 0$ )  $\rightarrow p_R = 0$

Найдем экстремум (максимальную мощность)

приравняем нулю производную  $dp_R/dv$ ,

получим скорость, при которой мощность максимальна

$$v_{p_{\text{max}}} = \frac{\alpha}{2} = \frac{v_{\text{ХХ}}}{2} \quad \text{Тогда максимальная мощность} \quad P_{R_{\text{max}}} = \frac{\alpha^2}{4}$$

### Номинальная мощность ИДПТ

– максимальная механическая мощность при  $\alpha = 1$

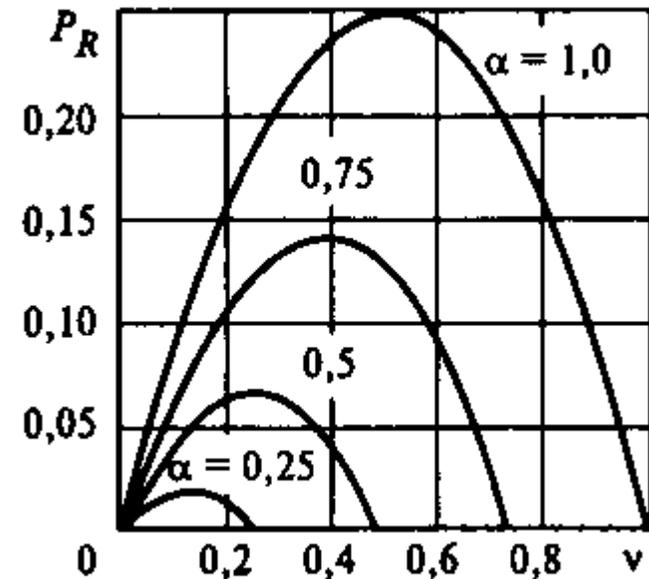
$$P_{R_{\text{H}}} = \frac{1}{4}$$

### Номинальная частота вращения ИДПТ

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

$$v_{\text{H}} = \frac{1}{2}$$

Зависимость  $p_R = f(v)$  при разных  $\alpha$



Базовая механическая мощность – произведение базового момента и базовой скорости

$$P_{\text{б}} = M_{\text{б}} \cdot \Omega_{\text{б}}$$

# Импульсное управление ИДПТ

Разновидность  
якорного управления

# Импульсное управление ИДПТ

В маломощных системах автоматики вместо регулирования напряжения  $U_y$  проще коммутировать его, меняя продолжительность включения ОУ

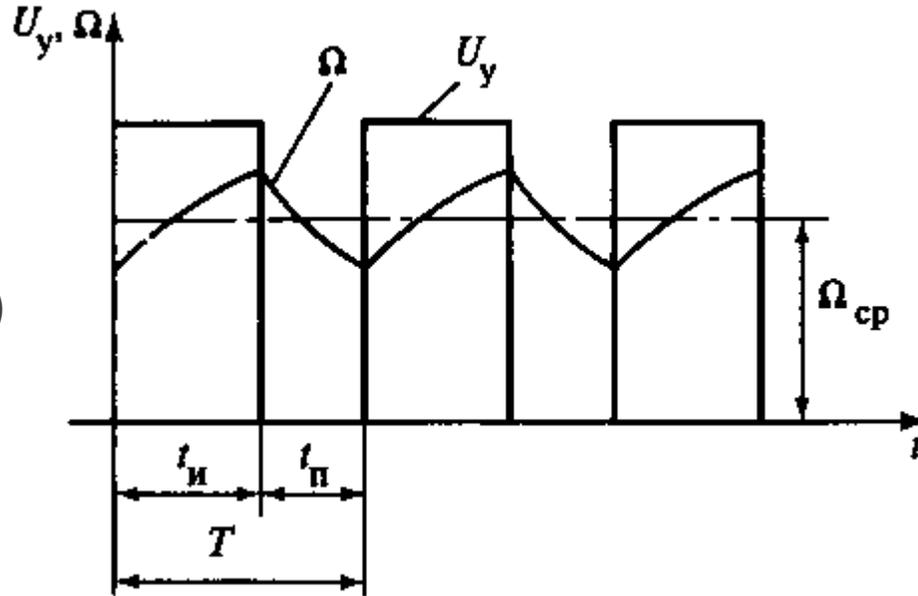
$T$  – период коммутации

$t_{и}$  – длительность импульса

$t_{п}$  – длительность паузы

Продолжительность включения  
(коэффициент заполнения / duty cycle)

$$\tau_{и} = \frac{t_{и}}{T} \quad \tau_{и} = 0 \dots 1$$



Скважность  $S = \frac{T}{t_{и}} = \frac{1}{\tau_{и}}$

За время импульса – разгон на  $\Delta\Omega_p$

$$J\Delta\Omega_p = (M_{ср} - M_{вн})t_{и}$$

За время паузы – торможение на  $\Delta\Omega_T$

$$J\Delta\Omega_T = -M_{вн}t_{п}$$

В установившемся режиме  $\rightarrow$  средняя скорость и  $\Delta\Omega_p = \Delta\Omega_T$

тогда  $(M_{ср} - M_{вн})t_{и} = M_{вн}(T - t_{и})$

Средний момент  $M_{ср} = M_{вн} \frac{T}{t_{и}} = \frac{M_{вн}}{\tau_{и}}$

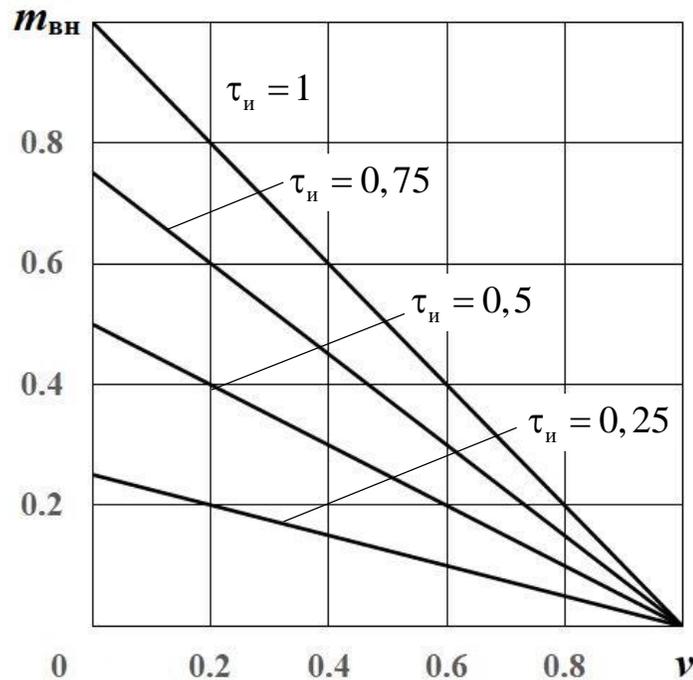
# Импульсное управление ИДПТ

При импульсном управлении всегда  $\alpha = 1$ , момент  $m = m_{\text{ср}}$ , скорость  $v = v_{\text{ср}}$   
Тогда выражение для момента  $m = \alpha - v$  запишется в виде  $m_{\text{ср}} = 1 - v_{\text{ср}}$   
Средний момент при этом в о.е.  $m_{\text{ср}} = m_{\text{вн}} / \tau_{\text{и}}$

Внешний момент, уравниваемый средним вращающим моментом

При  $\tau_{\text{и}} = \text{const}$  – выражение механической характеристики

$$m_{\text{вн}} = \tau_{\text{и}} (1 - v_{\text{ср}})$$

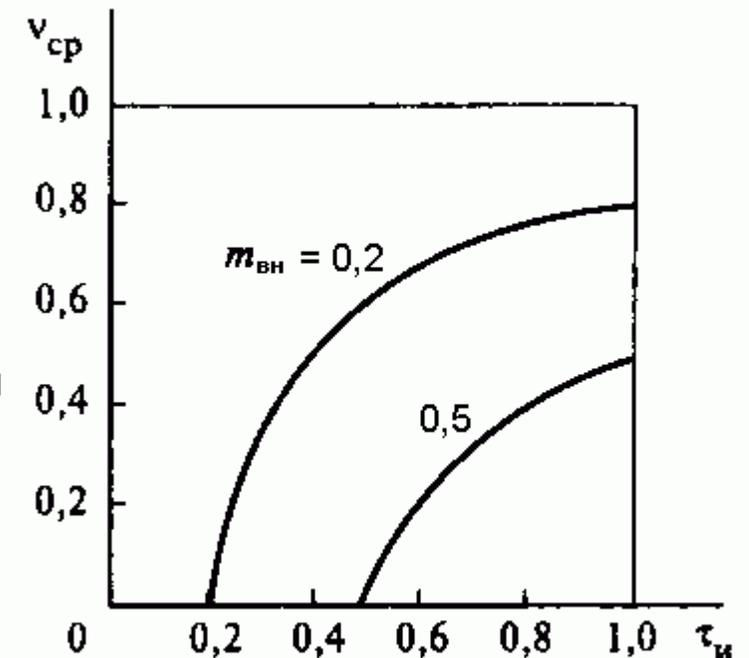


- » Механические характеристики линейны
- » Жесткость характеристик снижается с уменьшением  $\tau_{\text{и}}$

- » Регулировочные характеристики нелинейны
- » Регулирование возможно лишь при  $m_{\text{вн}} > 0$  (на XX  $v_{\text{ср}} = 1$  всегда)

Средняя скорость  $v_{\text{ср}} = 1 - \frac{m_{\text{вн}}}{\tau_{\text{и}}}$

При  $m_{\text{вн}} = \text{const}$  – выражение регулировочной характеристики



# Полюсное управление ИДПТ

Уравнения,  
характеристики

# Полюсное управление ИДПТ

Обмотка возбуждения (ОВ) – обмотка якоря ИДПТ

- » ток ОВ (ток якоря) течет всегда и максимален при  $E = 0$  ( $n = 0$ )
- » в ИДПТ мощностью  $>10$  Вт включают  $r_{доб}$  для ограничения тока

Обмотка управления (ОУ) – обмотка полюсов ИДПТ

- » ПМ использовать нельзя
- »  $U_y = var \rightarrow n, M$

Обмотка полюсов (ОУ)

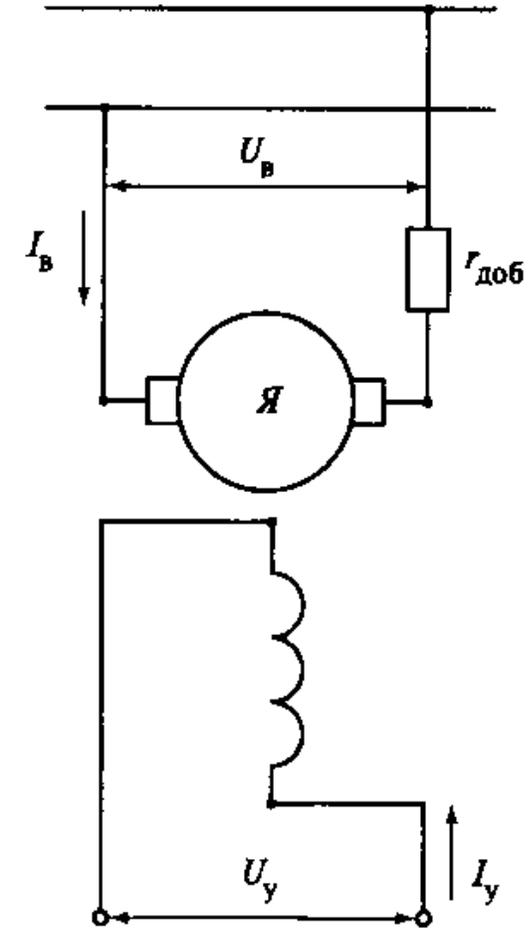
- »  $U_y \rightarrow I_y \rightarrow \Phi_y$
- »  $\Phi_y = c_\Phi U_y = c_\Phi \alpha U_B (= var)$

Обмотка якоря (ОВ)

- »  $E_B = c_E n \Phi_y = c_E c_\Phi \alpha U_B n$
- »  $U_B = E_B + I_B r_B$   
( $r_B$  – сопротивление обмотки якоря)

Ток обмотки возбуждения 
$$I_B = \frac{U_B - E_B}{r_B} = \frac{U_B - c_E c_\Phi \alpha U_B n}{r_B}$$

Вращающий момент ИДПТ 
$$M = c_M \Phi_y I_B = \frac{c_M c_\Phi \alpha U_B^2 - c_E c_M c_\Phi^2 \alpha^2 U_B^2 n}{r_B}$$



# Полюсное управление ИДПТ

Система относительных единиц полностью аналогична якорному управлению (базовые величины имеют те же значения)

» Базовый момент  
– момент ИДПТ при пуске ( $n = 0$ ) при  $\alpha = 1$

$$M_{\delta} = M_{\text{пл}} = \frac{c_M c_{\Phi} U_B^2}{r_B}$$

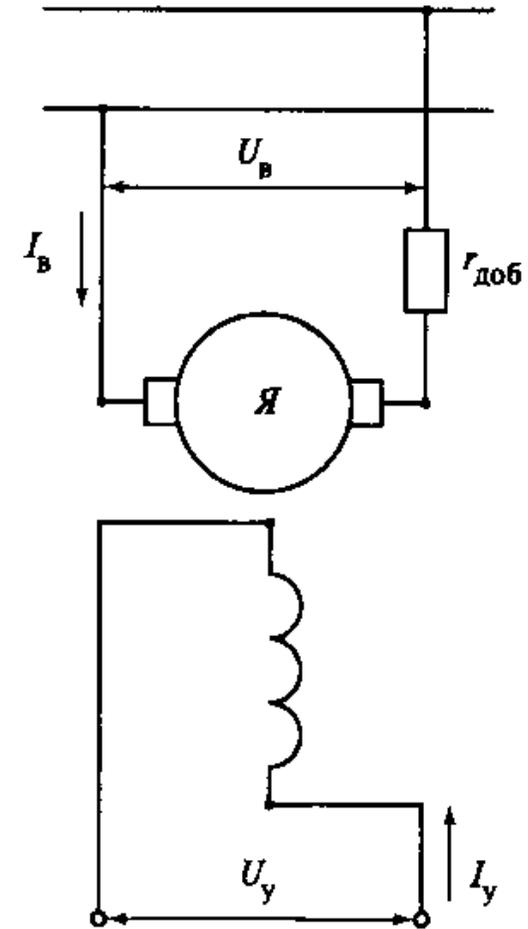
➤ Относительный момент  $\rightarrow m = \frac{M}{M_{\delta}}$

» Базовая частота вращения  
– частота вращения ХХ ( $M = 0$ ) при  $\alpha = 1$

$$n_{\delta} = n_0 = \frac{1}{c_E c_{\Phi}}$$

➤ Относительная скорость  $\rightarrow v = \frac{n}{n_{\delta}} = \frac{\Omega}{\Omega_{\delta}}$

Тогда момент  $M = \frac{c_M c_{\Phi} \alpha U_B^2 - c_E c_M c_{\Phi}^2 \alpha^2 U_B^2 n}{r_B} \rightarrow m = \alpha - \alpha^2 v$



# Полюсное управление ИДПТ

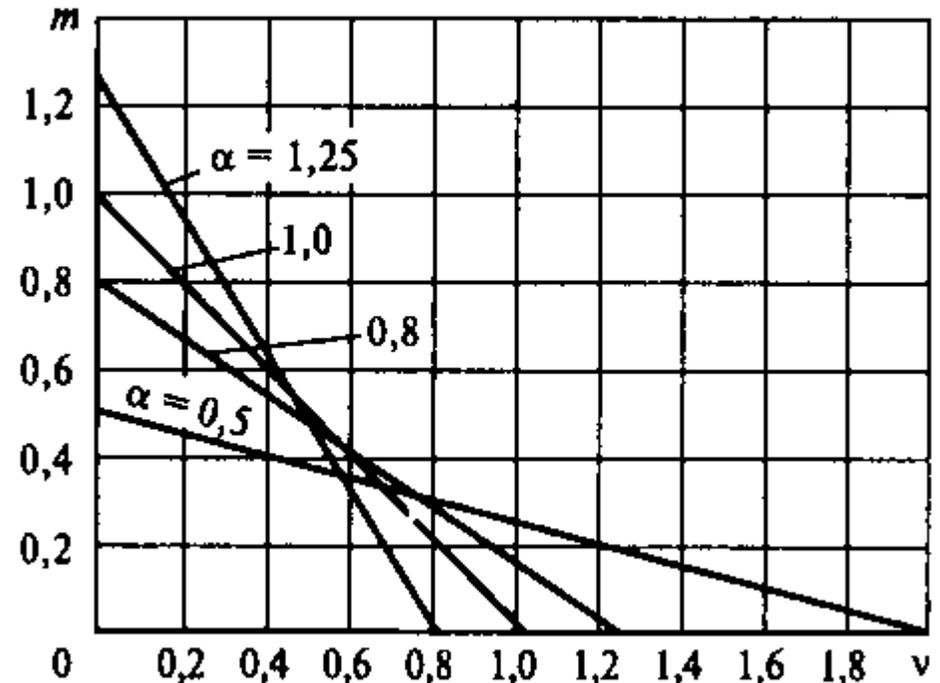
## Механические характеристики

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

Семейство механических характеристик для разных  $\alpha$

- » Механические характеристики – линейны
- » Жесткость характеристик снижается при уменьшении  $\alpha$
- » При пуске ( $v = 0$ )  
(как и при якорном управлении)  $m_{\text{п}} = \alpha$
- » При ХХ ( $m = 0$ )  
( $n_{\text{ХХ}}$  обратно пропорциональна  $\alpha$ )  $v_{\text{ХХ}} = \frac{1}{\alpha}$
- » При  $\alpha = 0$  скорость ХХ  $v_{\text{ХХ}} \rightarrow \infty$   
(в реальном ИДПТ  $M_c > 0$  и  $v_{\text{ХХ}}$  конечна, но она может превысить допустимую  $\rightarrow$  двигатель идет вразнос)
- » Нельзя использовать ИДПТ при малых  $\alpha$  в системах с малым моментом сопротивления

$$m = \alpha - \alpha^2 v$$



# Полюсное управление ИДПТ

## Регулировочные характеристики

$v = f(\alpha)$  при  $m_c = \text{const}$

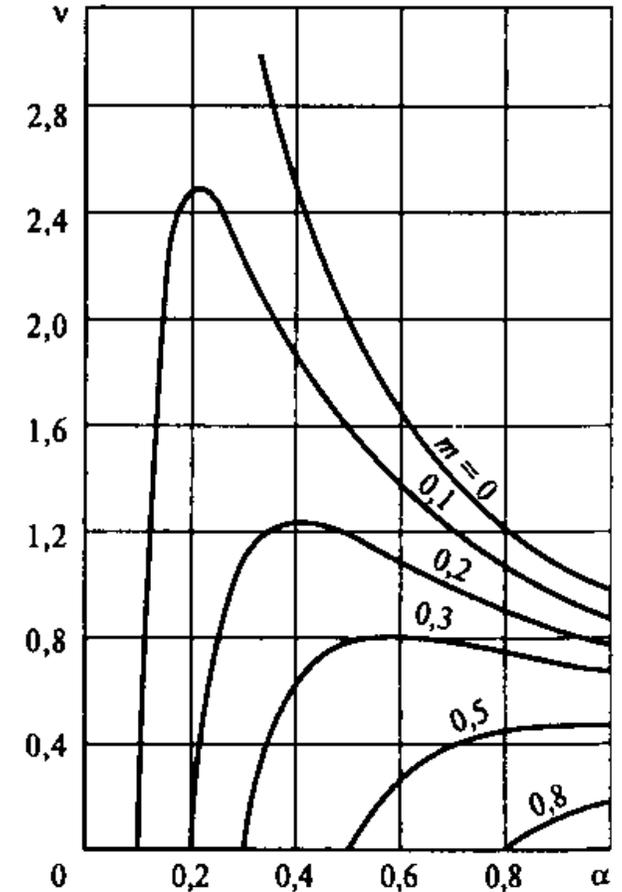
Семейство регулировочных характеристик для разных  $m_c$

- » Регулировочные характеристики нелинейны
- » При ХХ ( $m = 0$ ) получается гипербола ( $v_{\text{ХХ}} = 1/\alpha$ )
- » Максимум скорости при нагрузке ( $m > 0$ ) найдем, приравняв нулю производную  $dv/d\alpha$

$$\alpha_{v_{\text{max}}} = 2m \quad \text{тогда} \quad v_{\text{max}} = \frac{1}{4m}$$

- » При  $\alpha = 1$  скорость  $v = 1 - m$
- » Нелинейность регулировочных характеристик – недостаток  
Недопустимый недостаток – неоднозначность характеристик
- » Допускается применять полюсное управление только в схемах, где момент сопротивления не ниже  $\frac{1}{2}M_{\text{нп}}$  ( $m > 0,5$ )
- » Напряжение трогания (при  $v = 0$ ) пропорционально моменту сопротивления т.е. сигнал трогания –  $\alpha_{\text{тр}} = m$   
(как и при якорном управлении)

$$v = \frac{\alpha - m}{\alpha^2}$$



# Полюсное управление ИДПТ

## Мощность возбуждения

потребляется обмоткой якоря

$$P_B = U_B I_B = U_B \frac{U_B - E_B}{r_B}$$

- » это основная часть потребляемой мощности
- » преобразуется в механическую мощность и покрывает потери в якоре

В ИДПТ мощностью  $>250$  Вт  $P_B$  составляет до 95% от потребляемой мощности

В ИДПТ мощностью  $<10$  Вт  $P_B$  составляет до 70% от потребляемой мощности

## Мощность управления

потребляется обмоткой полюсов

$$P_y = I_y^2 r_y = \frac{U_y^2}{r_y} = \frac{\alpha^2 U_B^2}{r_y}$$

- » покрывает электрические потери в обмотке полюсов
- » составляет не более 5% потребляемой мощности в ИДПТ мощностью  $>250$  Вт
- » и не более 30% потребляемой мощности в ИДПТ мощностью  $<10$  Вт  
(это достоинство ИДПТ с полюсным управлением)

# Полюсное управление ИДПТ

## Полная механическая мощность

$$p_R = mv = (\alpha - \alpha^2 v)v = \alpha v - \alpha^2 v^2$$

Найдем скорость, при которой мощность максимальна

$$v_{p\max} = \frac{1}{2\alpha} = \frac{v_{xx}}{2}$$

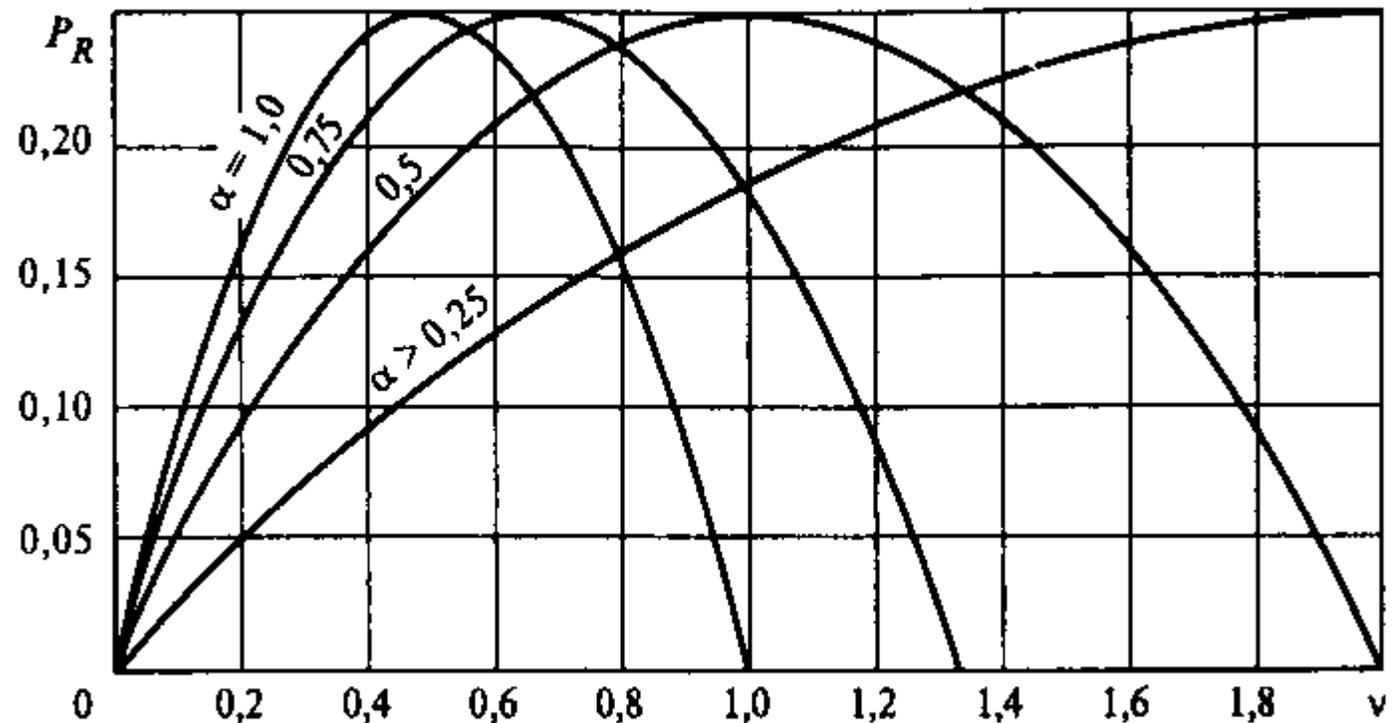
Тогда максимальная мощность

$$p_{R\max} = \alpha v_{p\max} - \alpha^2 v_{p\max}^2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{4} = \frac{1}{4}$$

Максимальная мощность не зависит от  $\alpha$ , но от  $\alpha$  зависит скорость, при которой мощность максимальна

Достоинство: при незначительных  $U_y$  можно получить значительную мощность на валу

Зависимость  $p_R = f(v)$  при разных  $\alpha$



# Динамические характеристики исполнительных двигателей

На примере ИДПТ

# Динамические характеристики исполнительных двигателей

Для оценки реакции двигателя на сигнал управления используются коэффициенты управления

Коэффициент внутреннего демпфирования (коэффициент вязкого трения)

- » характеризует величину и свойства собственного тормозного момента, развиваемого двигателем при изменении угловой скорости
- » численно равен тангенсу угла наклона касательной к механической характеристике в данной точке

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

Для линейных механических характеристик  $k_D$  не зависит от скорости

$$k_D = \frac{M_{\Pi}}{\Omega_{XX}}$$

- » при якорном управлении  $k_D = -1$
- » при полюсном управлении  $k_D = -\alpha^2$

Условие устойчивой работы электродвигателя –  $k_D < 0$

(демпфирующий момент стремится погасить изменение скорости)

В теории электропривода  $k_D$  – жесткость механической характеристики

# Динамические характеристики исполнительных двигателей

Для оценки реакции двигателя на сигнал управления используются коэффициенты управления

## Коэффициент управления по моменту

- » производная пускового момента по напряжению управления
- » и при якорном и при полюсном управлении  $k_M = 1$

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

## Коэффициент управления по мощности

- » отношение пускового момента к потребляемой мощности управления при  $\Omega = 0$

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

## Коэффициент управления по скорости

- » производная скорости ХХ к напряжению управления
- » определяет крутизну регулировочной характеристики при  $M = 0$
- » пропорционален тангенсу угла наклона характеристики

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

$$k_{\Omega} = \frac{\Omega_{XX}}{U_y} = \frac{k_M}{k_D}$$

## Коэффициент управления по ускорению

- » учитывает влияние момента инерции ротора при пуске

$$k_J = \frac{k_M}{J} = \frac{M_{\Pi}}{U_y J}$$

# Динамические характеристики исполнительных двигателей

Постоянная времени – характеризует быстродействие ИД в процессе разгона  
Поскольку скорость электромагнитных переходных процессов очень велика,  
в постоянной времени учитывают только электромеханическую составляющую

Электромеханические переходные процессы описываются уравнением движения

$$M - M_{\text{вн}} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{На ХХ } (M_{\text{вн}} = 0) \text{ переходные процессы определяются только свойствами двигателя}$$

Линейную механическую характеристику можно представить как  $M = M_{\text{п}} - k_D \Omega = M_{\text{п}} - \frac{M_{\text{п}} \Omega}{\Omega_{\text{ХХ}}}$   
(через пусковой момент  $M_{\text{п}}$  и скорость холостого хода  $\Omega_{\text{ХХ}}$ )

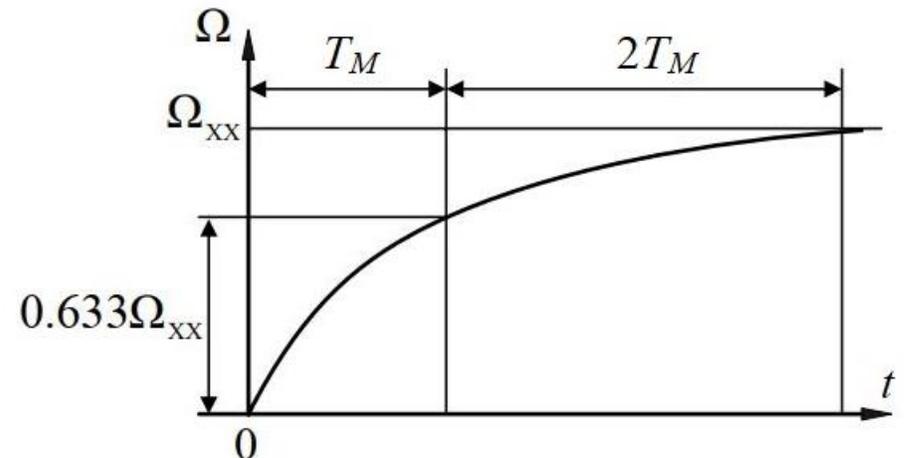
Тогда уравнение движения такого двигателя

$$M_{\text{п}} - \frac{M_{\text{п}} \Omega}{\Omega_{\text{ХХ}}} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{или} \quad \frac{d\Omega}{dt} + \frac{M_{\text{п}}}{J \Omega_{\text{ХХ}}} \Omega - \frac{M_{\text{п}}}{J} = 0$$

Решение однородного дифференциального уравнения

$$\Omega = \Omega_{\text{ХХ}} \left( 1 - e^{-\frac{M_{\text{п}}}{J \Omega_{\text{ХХ}}} t} \right) = \Omega_{\text{ХХ}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right)$$

где  $T_M = \frac{J \Omega_{\text{ХХ}}}{M_{\text{п}}}$  – электромеханическая постоянная времени



# Динамические характеристики исполнительных двигателей

Постоянная времени – характеризует быстродействие ИД в процессе разгона

$$T_M = \frac{J \Omega_{XX}}{M_{II}} \quad \text{Скорость XX и пусковой момент ИДПТ изменяются при изменении сигнала } \alpha$$

При якорном управлении

$$M_{II} = \alpha M_{II1} \quad \Omega_{XX} = \alpha \Omega_{XX1}$$

$$T_{Mя} = \frac{J \Omega_{XX}}{M_{II}} = \frac{J \alpha \Omega_{XX1}}{\alpha M_{II1}} = \frac{J \Omega_{XX1}}{M_{II1}}$$

При любом  $\alpha$  разгон происходит одинаково быстро (достоинство)

При полюсном управлении

$$M_{II} = \alpha M_{II1} \quad \Omega_{XX} = \Omega_{XX1} / \alpha$$

$$T_{Mя} = \frac{J \Omega_{XX}}{M_{II}} = \frac{J \Omega_{XX1} / \alpha}{\alpha M_{II1}} = \frac{J \Omega_{XX1}}{\alpha^2 M_{II1}}$$

При регулировании чем меньше  $\alpha$ , тем медленнее разгон ИД

Реальные постоянные времени ИДПТ несколько больше теоретических (влияние индуктивностей обмоток на электромагнитные процессы)

В ИДПТ традиционной конструкции  $T_M$  составляет 35...55 мс

В малоинерционных ИДПТ  $T_M$  в 2 раза меньше

# Динамические характеристики исполнительных двигателей

Передаточная функция представляет собой отношение изображения по Лапласу выходной величины к изображению входной величины

Входной величиной ИДПТ является  $U_y$ , выходной может быть угловое перемещение  $\gamma$  или скорость  $\Omega = \frac{d\gamma}{dt}$

Для выходной величины  $\gamma$  перепишем уравнение движения относительно углового перемещения

$$\frac{d\Omega}{dt} + \frac{M_{\Pi}}{J \Omega_{XX}} \Omega - \frac{M_{\Pi}}{J} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{d^2\gamma}{dt^2} + \frac{M_{\Pi}}{J \Omega_{XX}} \frac{d\gamma}{dt} - \frac{M_{\Pi}}{J} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{d^2\gamma}{dt^2} + \frac{1}{T_M} \frac{d\gamma}{dt} - \frac{k_M U_y}{J} = 0$$

Запишем последнее уравнение в операторной форме ( $d/dt \rightarrow p_t$ )

$$T_M p_t^2 \gamma + p_t \gamma = T_M \frac{k_M U_y}{J}$$

поскольку  $\frac{T_M k_M}{J} = \frac{\Omega_{XX}}{U_y} = k_{\Omega}$   
(коэф-т управления по скорости)

получим выражение передаточной функции в виде

$$\frac{\gamma}{U_y} = \frac{k_{\Omega}}{p_t(p_t T_M + 1)}$$

Если выходной величиной является скорость  $\Omega = \frac{d\gamma}{dt} = p_t \gamma$   
то передаточная функция записывается как

$$\frac{\Omega}{U_y} = \frac{k_{\Omega}}{p_t T_M + 1}$$

## Далее

---

### Асинхронные исполнительные 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/))

