

# Генераторы постоянного тока

В процессе работы генератора постоянного тока в обмотке якоря индуцируется ЭДС:

$$E_a = c_E \Phi n.$$

При подключении к генератору нагрузки, в цепи якоря возникает ток  $I_a$ , а на нагрузке устанавливается напряжение:

$$U = E_a - I_a \sum r_a. \quad \text{- уравнение напряжений генератора}$$

Ток в проводниках обмотки якоря  $I_a$ , взаимодействуя с магнитным полем, создает на якоре электромагнитный момент  $M$ , который в генераторе направлен встречно вращающему моменту приводного двигателя, т.е. является тормозящим.

При неизменной частоте вращения ( $n = \text{const}$ ) вращающий момент приводного двигателя  $M_1$  уравнивается суммой противодействующих моментов:

$$M_1 = M + M_0, \quad \text{- уравнение моментов генератора}$$

$M_0$  – момент х. х. , т.е. момент, создаваемый силами трения и действием вихревых токов в якоре.

# Генераторы постоянного тока

Умножив уравнение моментов на угловую скорость вращения  $\omega$  получим уравнение мощностей:

$$P_1 = P_{\text{эм}} + P_0,$$

где  $P_1 = M_1 \omega$  - механическая мощность подводимая к генератору,

$P_0 = M_0 \omega$  - мощность х. х. (подводимая к генератору в режиме х. х., т. е. при отключенной нагрузке);

$P_{\text{эм}} = M \omega$  - электромагнитная мощность генератора.

С другой стороны  $P_{\text{эм}} = E_a I_a$ ;

тогда 
$$P_{\text{эм}} = U_a I_a + I_a^2 \sum r_a = P_2 + P_{\text{э}_a},$$

где  $P_2$  - полезная мощность генератора, т.е. мощность отдаваемая генератором нагрузке;

$P_{\text{э}_a}$  - мощность потерь на нагрев обмоток и щеточного контакта в цепи якоря.

В результате, учитывая потери на возбуждение  $P_{\text{э}_B}$ , получаем уравнение мощностей генератора:

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{\text{э}_a} + P_{\text{э}_B},$$

Механическая мощность, развиваемая приводным двигателем  $P_1$ , преобразуется в генераторе в полезную мощность  $P_2$ , передаваемую нагрузке, и мощность, затрачиваемую на покрытие потерь ( $P_0 + P_{\text{э}_a} + P_{\text{э}_B}$ ).

# Основные характеристики генераторов постоянного тока

1. Характеристика холостого хода – зависимость  $U_0 = f(I_B)$ ,  
при  $I = 0$  и  $n = const$ .

2. Нагрузочная характеристика – зависимость  $U_a = f(I_B)$ ,  
при  $I = const$  и  $n = const$ .

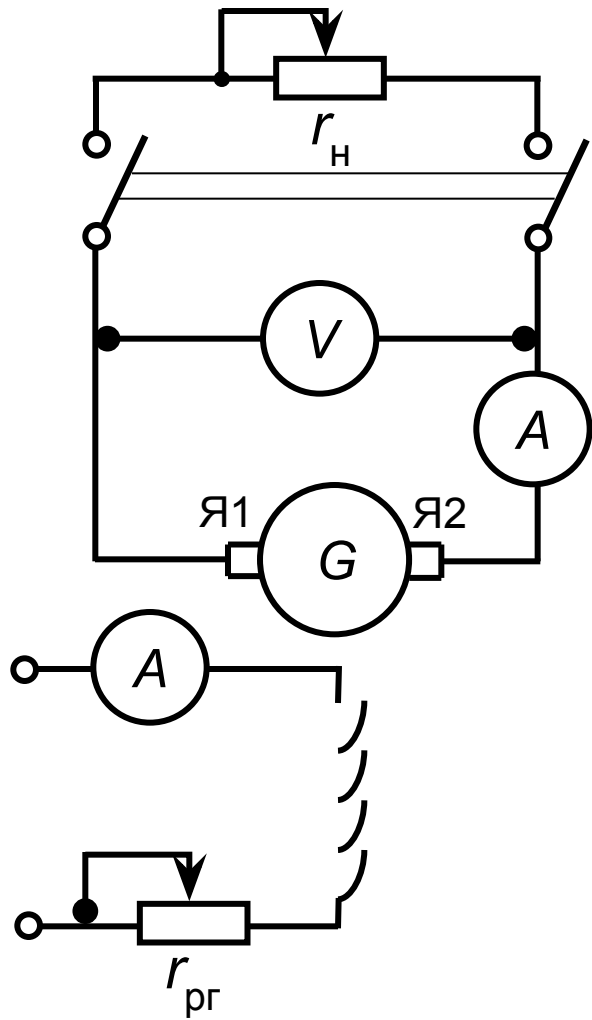
3. Внешняя характеристика – зависимость  $U_a = f(I_a)$ ,  
при  $r_{pg} = const$  и  $n = const$ .

$r_{pg}$  - регулировочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения.

4. Регулировочная характеристика – зависимость  $I_B = f(I_a)$ ,  
при  $U_a = const$  и  $n = const$ .

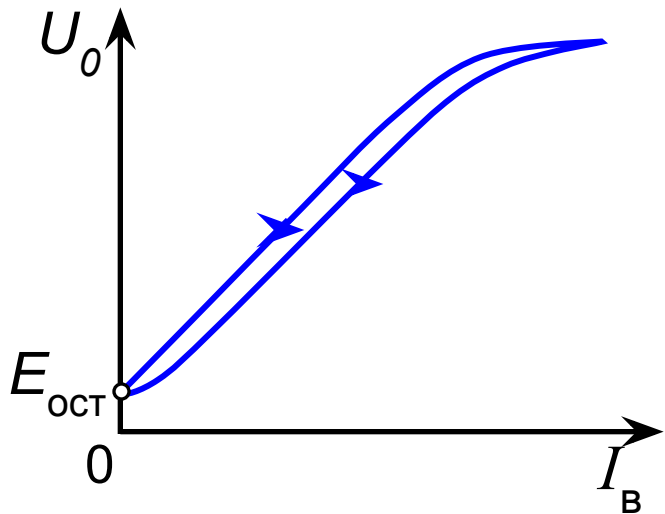
Вид перечисленных характеристик определяет рабочие свойства генераторов постоянного тока.

# Генератор постоянного тока независимого возбуждения



# Основные характеристики ГПТ параллельного возбуждения

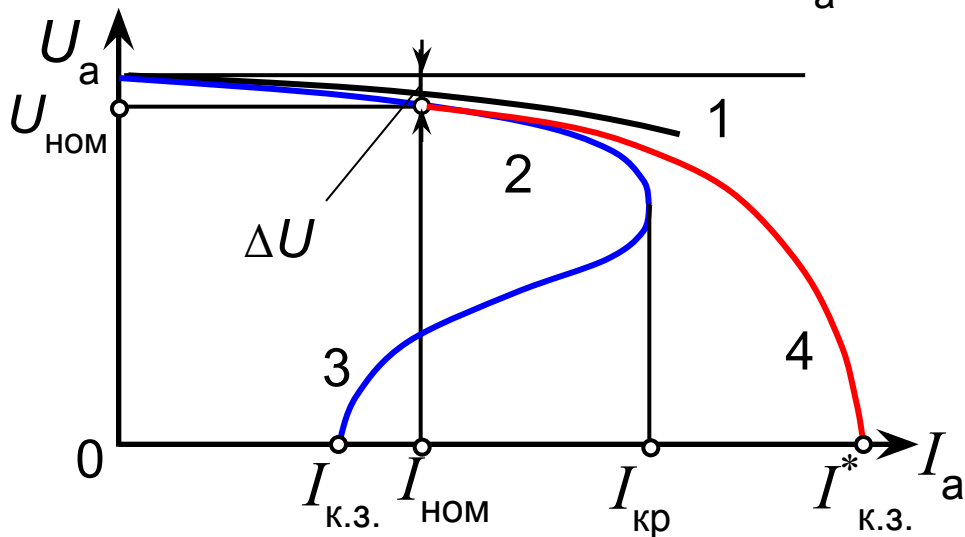
1. Характеристика холостого хода – зависимость  $U_0 = f(I_B)$ ,  
при  $I = 0$  и  $n = const$ .



Так как ГПТ параллельного возбуждения самовозбуждается лишь при одном направлении тока  $I_B$ , то характеристика х. х. может быть снята только для одного квадранта осей координат.

2. Нагрузочная характеристика  $U_a = f(I_B)$ , при  $I = const$  и  $n = const$ .  
практически не отличается от характеристики ГПТ независимого возбуждения.

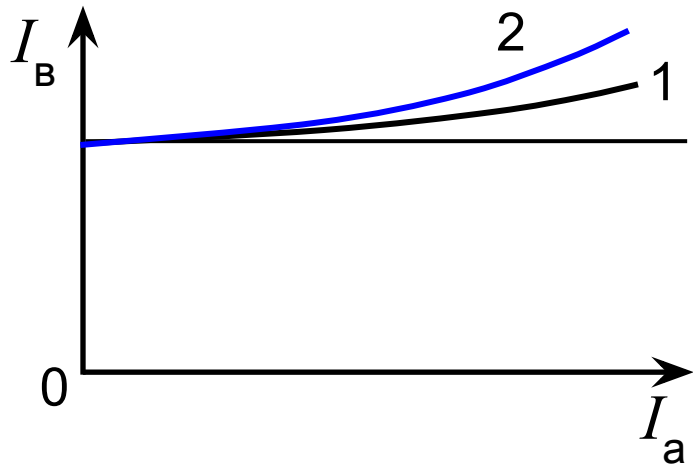
3. Внешняя характеристика  $U_a = f(I_a)$ , при  $r_{rg} = const$  и  $n = const$ .



- 1 – ГПТ независимого возбуждения
- 2 – ГПТ параллельного возбуждения
- 3 – «постепенное» короткое замыкание
- 4 – «внезапное» короткое замыкание

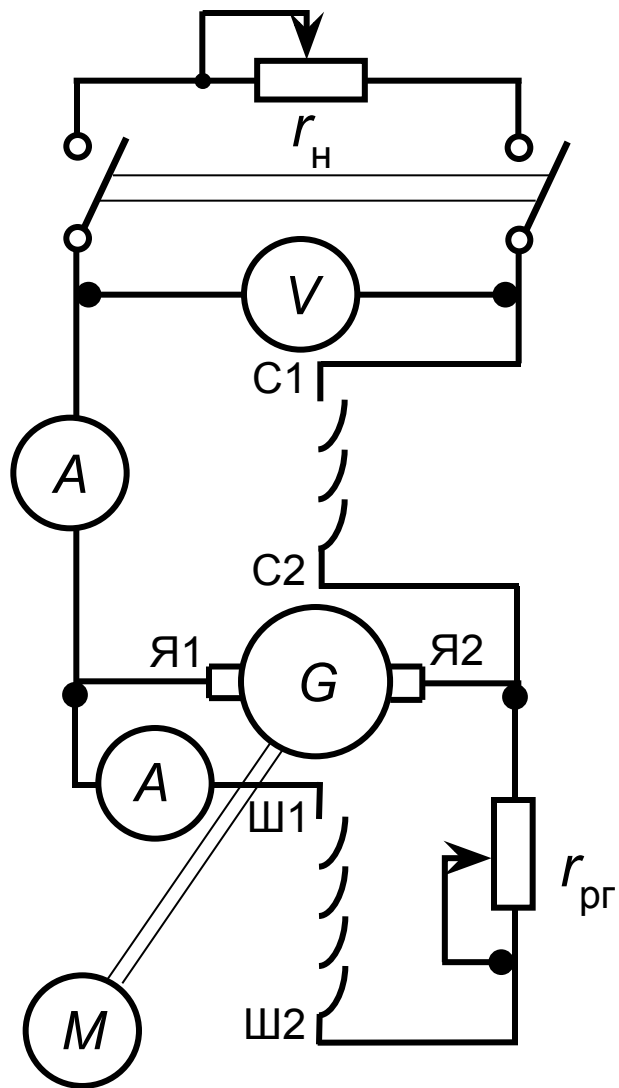
# Основные характеристики ГПТ параллельного возбуждения

4. Регулировочная характеристика  $I_B = f(I_a)$ , при  $U_a = const$  и  $n = const$ .



- 1 – ГПТ независимого возбуждения
- 2 – ГПТ параллельного возбуждения

# Генератор постоянного тока смешанного возбуждения



# Основы электропривода

К. Маркс: «Всякое развитое машинное устройство состоит из трех существенно различных частей: машины двигателя, передаточного механизма, наконец машины орудия или рабочей машины.»

Назначение первых двух элементов: двигателя с его системой управления и передаточного механизма – сообщать движение исполнительному механизму; т.е. они служат для приведения в движение рабочей машины.

Отсюда название – привод.

В настоящее время основным двигателем является электродвигатель и следовательно основным типом привода является электропривод.

## Классификация электроприводов

С учетом исторического развития и с точки зрения способов распределения механической энергии электроприводы можно разделить на три основных типа:

1) групповой (передача энергии от одного двигателя к нескольким рабочим машинам осуществляется с помощью нескольких трансмиссий);



# Классификация электроприводов

2) индивидуальный (на каждом рабочем механизме свой двигатель);

*Преимущества:*

- производственные помещения не загромождаются тяжелыми трансмиссиями;
- улучшаются условия труда;
- повышается производительность из-за облегчения управления отдельными механизмами;
- улучшаются энергетические показатели.

3) взаимосвязанный (содержит два или несколько электрически или механически связанных между собой электродвигателя, при работе которых поддерживается заданное соотношение или равенство скоростей, нагрузок или положение исполнительных органов рабочей машины).

*Пример:*

- привод цепного конвейера;
- привод прокатных станов в металлургическом производстве, в производстве синтетических пленок, бумаги и т. д.

**По виду движения:** электроприводы могут обеспечивать

- вращательное однонаправленное движение;
- вращательное реверсивное движение;
- поступательное реверсивное движение.

# Классификация электроприводов

**По степени управления:**

- 1) нерегулируемый электропривод;
- 2) регулируемый электропривод (параметры привода могут изменяться под воздействием управляющего воздействия);
- 3) программно-управляемый электропривод (управляемый в соответствии с заданной программой);
- 4) следящий электропривод (автоматически обрабатывающий перемещение исполнительного механизма с определенной точностью);
- 5) адаптивный электропривод (автоматически избирающий структуру или параметры системы управления при изменении условий работы).

**По роду передаточного устройства:**

- редукторный;
- безредукторный.

**По уровню автоматизации:**

- 1) неавтоматизированный (ручное управление);
- 2) автоматизированный (автоматическое регулирование параметров);
- 3) автоматический (управляющее воздействие вырабатывается автоматическим устройством без участия оператора).

**По роду тока:**

- электроприводы постоянного тока;
- электроприводы переменного тока.

# Механика электропривода

## Приведение моментов и сил сопротивления, моментов инерции

Механическая часть электропривода представляет собой сложную кинематическую цепь с большим числом движущихся элементов каждый из которых обладает упругостью, а в соединениях элементов имеются воздушные зазоры.

Расчет такой *многомассовой механической системы с упругими связями* и зазорами представляет собой значительные трудности.

В большинстве случаев в инженерных расчетах можно *пренебречь* зазорами и упругостью, приняв *механические связи абсолютно жесткими*.

Тогда расчетную схему механической части электропривода можно свести к одному обобщенному жесткому механическому звену, имеющему эквивалентную массу с моментом инерции  $J$ , на который воздействует электромагнитный момент двигателя  $M$  и суммарный, приведенный к валу двигателя момент сопротивления  $M_c$ , включающий все механические потери в системе.

# Приведение моментов и сил сопротивления, моментов инерции

Момент сопротивления производственного механизма  $M_{см}$ , возникающий на валу рабочей машины, состоит из двух слагаемых, соответствующих полезной работе и работе трения.

Полезная работа связана с выполнением соответствующих технологических операций. При этом происходит деформация материала или изменяется запас потенциальной энергии.

Работа трения, совершаемая в производственном механизме, учитывается коэффициентом полезного действия механических связей электропривода. Момент трения всегда направлен против движущего момента привода.

Моменты сопротивления можно разделить на две категории:

- 1) реактивные моменты;
- 2) активные или потенциальные моменты.

1) реактивные – моменты сопротивления от сжатия, резания, моменты трения и т. п., препятствующие движению привода и изменяющие свой знак при изменении направления вращения.

2) активные или потенциальные – моменты от сил тяжести, а также растяжения, сжатия и скручивания упругих тел; они связаны с изменением потенциальной энергии отдельных элементов привода и сохраняют свой знак при изменении направления вращения.

# Приведение моментов и сил сопротивления, моментов инерции

Приведение момента сопротивления от одной оси вращения к другой может быть осуществлено на основании энергетического баланса системы.

На основании равенства мощностей получим:

$$M_c \omega_d = M_{c_m} \omega_m \frac{1}{\eta_p}$$

где  $M_{c_m}$  - момент сопротивления производственного механизма;

$M_c$  - тот же момент, приведенный к частоте вращения вала двигателя;

$\omega_d$  и  $\omega_m$  - угловые скорости вала двигателя и вала производственного механизма;

$\eta_p$  - КПД передачи, учитывающий потери мощности в промежуточных передачах.

$$\text{Отсюда: } M_c = M_{c_m} \frac{\omega_m}{\omega_d} \frac{1}{\eta_p} = \frac{M_{c_m}}{i \eta_p},$$

где  $i = \omega_d / \omega_m$  - передаточное число.

При наличии нескольких передач между двигателем и производственным механизмом

$$M_c = M_{c_m} \frac{1}{i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n} \cdot \frac{1}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n}.$$

# Приведение моментов и сил сопротивления, моментов инерции

Приведение сил сопротивления производится аналогично приведению моментов:

$$M_c \omega_d = F_{c_m} v \frac{1}{\eta_p},$$

где  $v$  - скорость поступательного движения.

Тогда

$$M_c = \frac{F_{c_m} \cdot v}{\omega_d \cdot \eta_p}.$$

Приведение моментов инерции к одной оси вращения основано на том, что *суммарный запас кинетической энергии* движущихся частей электропривода отнесенный к другой оси вращения *остаётся неизменным*.

При наличии вращающихся частей с моментами инерции  $J_d, J_1 \dots J_n$  и угловыми скоростями  $\omega_d, \omega_1 \dots \omega_n$  получим

$$J \frac{\omega_d^2}{2} = J_d \frac{\omega_d^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2}.$$

где  $J_d$  - момент инерции ротора двигателя и других элементов, установленных на валу двигателя.

## Приведение моментов и сил сопротивления, моментов инерции

Момент инерции, приведенный к скорости вала двигателя:

$$J = J_{\text{д}} + J_1 \left( \frac{\omega_1}{\omega_{\text{д}}} \right)^2 + J_2 \left( \frac{\omega_2}{\omega_{\text{д}}} \right)^2 + \dots + J_n \left( \frac{\omega_n}{\omega_{\text{д}}} \right)^2 .$$

**Приведение масс**, движущихся поступательно со скоростью  $V$  осуществляется также на основе равенства *запаса кинетической энергии*:

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\omega_{\text{д}}^2}{2} .$$

Отсюда

$$J = m \left( \frac{v}{\omega_{\text{д}}} \right)^2 .$$

Если механизм имеет, как вращающиеся, так и поступательно движущиеся элементы, то *суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя*:

$$J = J_{\text{д}} + J_1 \left( \frac{\omega_1}{\omega_{\text{д}}} \right)^2 + \dots + J_n \left( \frac{\omega_n}{\omega_{\text{д}}} \right)^2 + m_1 \left( \frac{v_1}{\omega_{\text{д}}} \right)^2 + \dots + m_m \left( \frac{v_m}{\omega_{\text{д}}} \right)^2 .$$

# Механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей

Зависимость между приведенными к валу двигателя скоростью и моментом сопротивления  $\omega = f(M_c)$  называют механической характеристикой производственного механизма.

Для анализа и классификации различных механических характеристик воспользуемся следующей эмпирической формулой

$$M_c = M_0 + (M_{c_{\text{ном}}} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^x,$$

где  $M_c$  - момент сопротивления механизма при скорости  $\omega$  ;

$M_0$  - момент сопротивления трения в движущихся частях механизма;

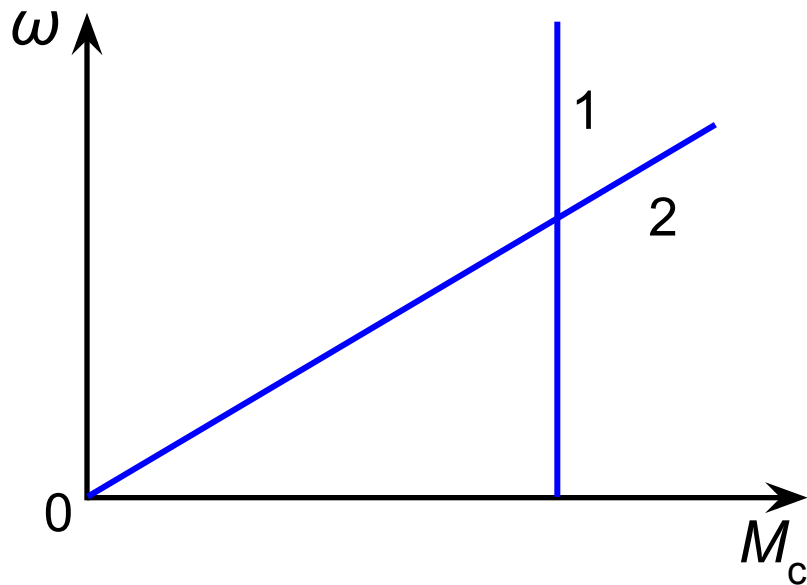
$M_{c_{\text{ном}}}$  - момент сопротивления механизма при скорости  $\omega_{\text{ном}}$ .

Приведенная формула позволяет классифицировать механические характеристики производственных механизмов на следующие основные категории:



# Механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей

## 1. Механическая характеристика, независящая от скорости ( $x = 0$ ).



При этом  $M_c = M_{c_{ном}}$

Такой характеристикой обладают:

- подъемные краны;
- лебедки;
- механизмы подачи металлорежущих станков;
- конвейеры и т. д.

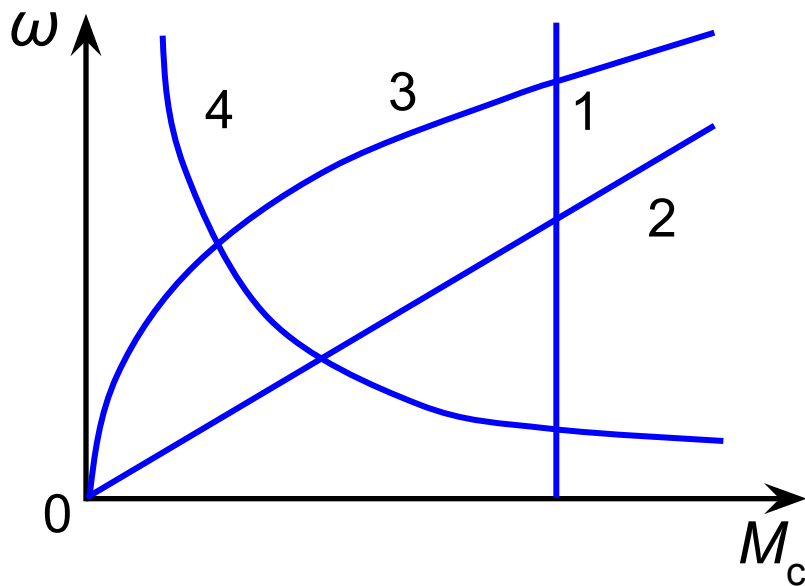
## 2. Линейно-возрастающая механическая характеристика ( $x = 1$ ).

В этом случае момент сопротивления линейно зависит от скорости (на рисунке  $M_0 = 0$ )

Такая характеристика получится в приводе ГПТ независимого возбуждения, при его работе на постоянный внешний резистор.

# Механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей

## 3. Нелинейно-возрастающая (параболическая) механическая характеристика ( $x = 2$ ).



В этом случае *момент сопротивления зависит от квадрата скорости.*

Такие механизмы называют иногда механизмами с вентиляторным моментом.

К ним относятся: - вентиляторы;  
- центробежные насосы;  
- гребные винты и т.д.

## 4. Нелинейно-спадающая механическая характеристика ( $x = -1$ ).

*Момент сопротивления* изменяется *обратно пропорционально скорости*, а *мощность*, потребляемая механизмом, *остаётся постоянной*.

Такой характеристикой обладают некоторые токарные, расточные, фрезерные и другие металлорежущие станки.

# Механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его угловой скорости от вращающего момента, т. е.  $\omega = f(M)$ .

Почти все электродвигатели обладают спадающей механической характеристикой.

Степень изменения угловой скорости с изменением момента характеризуется жесткостью механических характеристик:

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}.$$

Жесткость механических характеристик – это отношение разности электромагнитных моментов двигателя к соответствующей разности угловых скоростей.

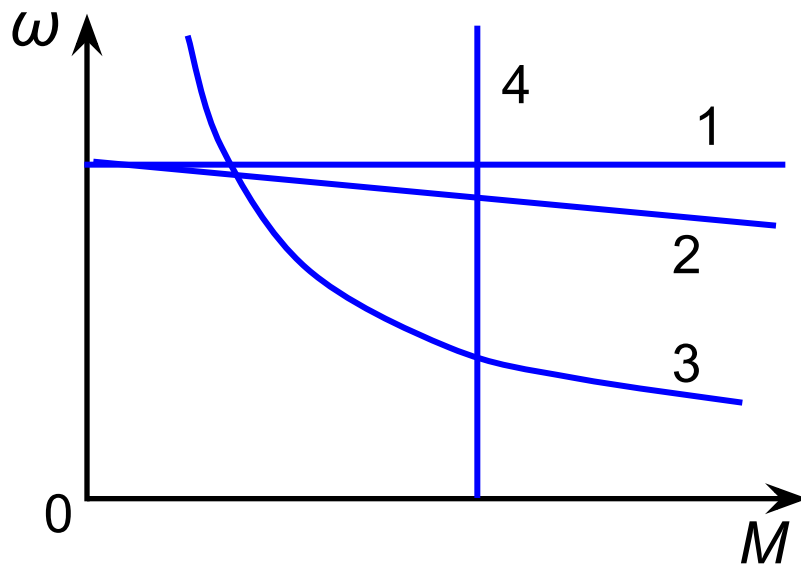
Обычно на рабочих участках механической характеристики электрические двигатели имеют отрицательную жесткость т. е.  $\beta < 0$ .

В случае нелинейных механических характеристик жесткость определяется в каждой точке, как производная момента по угловой скорости  $\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega}$ .

# Механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей

Существует четыре основных категории механических характеристик электрических двигателей:

1. Абсолютно жесткая характеристика ( $\beta = \infty$ , т.е.  $\omega = const$ )



Такой характеристикой обладают синхронные двигатели.

2. Жесткая механическая характеристика

(незначительные изменения  $\omega$  при изменении  $M$ )

Такой характеристикой обладают:

- ДПТ независимого и параллельного возбуждения;

- асинхронные двигатели в пределах рабочей части характеристики.

3. Мягкая механическая характеристика

(при изменении момента  $M$  скорость  $\omega$  значительно изменяется)

Такой характеристикой обладают ДПТ последовательного возбуждения.

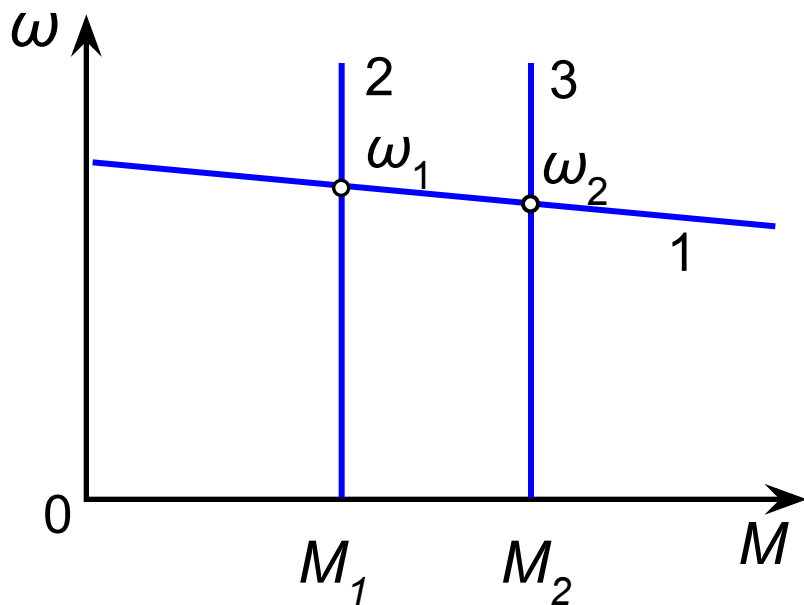
4. Абсолютно мягкая механическая характеристика ( $\beta = 0$ , т.е. при изменении скорости  $\omega$  момент двигателя остается неизменным:  $M = const$ )

Такой характеристикой обладают ДПТ независимого возбуждения при питании их от источника тока, т. е. при  $I_a = const$ .

# Работа электропривода в установившемся режиме.

## Статическая устойчивость

Работе электродвигателя и производственного механизма в установившемся режиме соответствует равновесие момента сопротивления механизма и вращающего момента двигателя, т. е.  $M_c = M$ .



Изменение момента сопротивления на валу ЭД приводит к тому, что скорость двигателя  $\omega_d$  и момент  $M$ , который он развивает, автоматически изменяются и привод будет продолжать работать при другой скорости  $\omega_2$  и с новым значением момента  $M_2$ .

В неэлектрических двигателях для восстановления равновесия используются специальные регуляторы, которые воздействуют на источник энергии: увеличивая подачу пара, топлива и т. д.

В электрическом двигателе роль автоматического регулятора выполняет ЭДС двигателя.

Рассмотренные условия работы электропривода в установившемся режиме характеризуют статическую устойчивость, когда изменения  $\omega$  и  $M$  происходят относительно медленно.

# Работа электропривода в установившемся режиме.

## Статическая устойчивость

Под статической устойчивостью понимают такое состояние установившегося режима, когда при случайно возникшем отклонении скорости привод возвращается в точку установившегося режима.

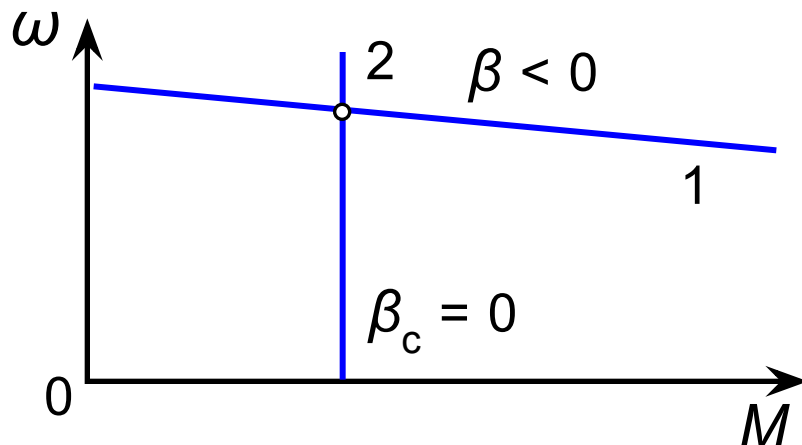
При неустойчивом движении любое, даже самое малое отклонение скорости от установившегося режима приводит к изменению состояния привода – он не возвращается в точку устойчивого режима.

Привод статически устойчив, если в точке установившегося режима

выполняется условие:

$$\frac{\partial M}{\partial \omega} - \frac{\partial M_c}{\partial \omega} < 0 \quad \text{или} \quad \beta - \beta_c < 0.$$

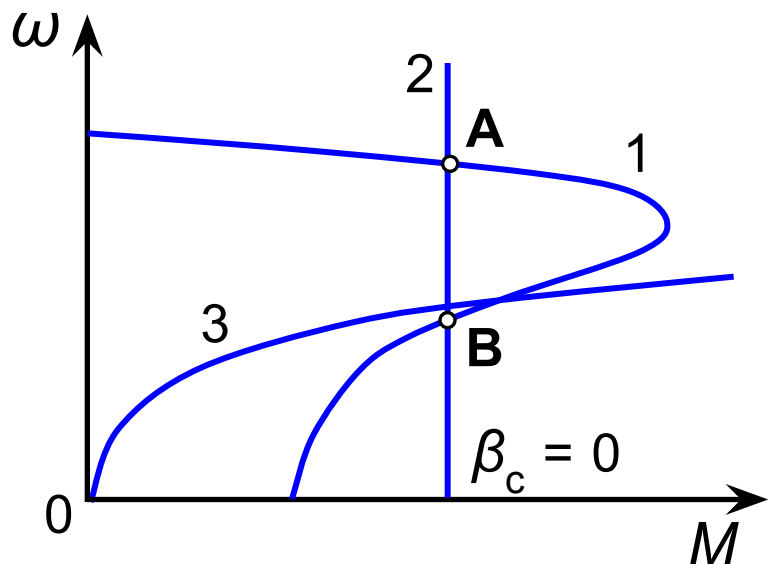
При постоянном моменте нагрузки ( $\beta_c = 0$ ) статическая устойчивость определяется только жесткостью механической характеристики двигателя



**Двигатель постоянного тока независимого возбуждения ( $\beta < 0$ ) обеспечивает устойчивую работу при постоянном моменте нагрузки.**

# Работа электропривода в установившемся режиме. Статическая устойчивость

## Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором



В точке **А** ( $\beta < 0$ ) двигатель будет работать устойчиво, а в точке **В** ( $\beta > 0$ ) – неустойчиво.

Однако, при работе асинхронного двигателя на нагрузку с вентиляторной характеристикой (кривая **3**) работа электропривода во всех точках механической характеристики двигателя будет устойчивой т. к. будет выполняться условие  $\beta - \beta_c < 0$ .

Обычно при проектировании электропривода механическая характеристика производственного механизма уже задана.

Поэтому для получения устойчивой работы электропривода в установившемся режиме при определенных значениях скорости  $\omega$  и момента нагрузки  $M_c$ , необходимо подбирать механическую характеристику электродвигателя соответствующей формы

# Уравнение движения электропривода

Кроме установившегося режима электропривод может ускоряться или замедляться. При этом возникают инерционные силы и моменты, которые электродвигатель должен преодолевать в переходном режиме.

Переходным режимом электропривода называют режим работы при переходе из одного установившегося состояния в другое, когда изменяются скорость  $\omega$ , момент  $M$  и ток  $I$ .

Причины возникновения переходных режимов:

- изменение нагрузки;
- воздействие на привод при управлении (пуск, торможение, изменение направления вращения и т. п.)
- аварийные режимы или нарушение нормальных условий электроснабжения (изменение  $U$ ,  $f$ , несимметрия и т. п.)

Уравнение равновесия сил при поступательном движении:

$$F - F_c = m \frac{dv}{dt},$$

где  $F$  - движущая сила;

$F_c$  - сила сопротивления;

$m \frac{dv}{dt}$  - инерционная сила.



# Уравнение движения электропривода

Уравнение равновесия моментов:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

Развиваемый двигателем вращающий момент  $M$  уравнивается моментом сопротивления  $M_c$  на его валу и инерционным или динамическим моментом  $J \frac{d\omega}{dt}$ .

- Следовательно: 1) при  $M > M_c$   $\frac{d\omega}{dt} > 0$  - электропривод ускоряется;  
2) при  $M < M_c$   $\frac{d\omega}{dt} < 0$  - электропривод замедляется;  
3) при  $M = M_c$   $\frac{d\omega}{dt} = 0$  - электропривод работает в установившемся режиме

Кроме того отметим, что:

1. Вращающий момент  $M$  принимается положительным, если он направлен в сторону вращения привода. Если момент  $M$  направлен в сторону обратную движению, то он считается отрицательным.

## Уравнение движения электропривода

2. Момент сопротивления  $M_c$  оказывает тормозящее воздействие ( $-M_c$ ) при резании, трении, подъеме груза сжатию пружины и т. п. при положительном знаке скорости.

При спуске груза, раскручивании или разжатию пружины момент  $M_c$  становится положительным ( $+M_c$ ), т. к. он помогает вращению привода.

3. Инерционный (динамический) момент  $J \frac{d\omega}{dt}$  проявляется только во время переходных режимов, когда изменяется скорость привода.

При ускорении привода он направлен против движения, при торможении – он поддерживает движение.