

## Механика электроприводов

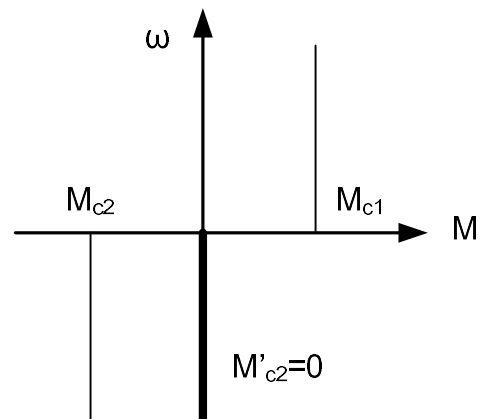
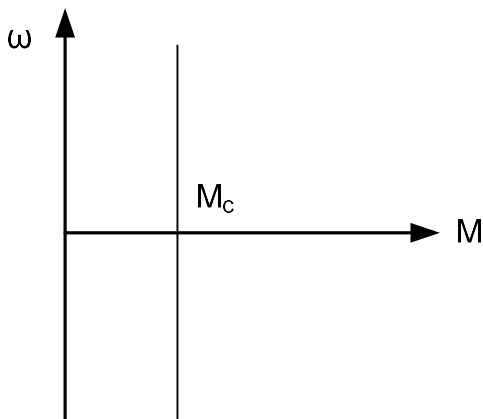
### Статические моменты

Зависимость скорости от момента статического называется механической характеристикой машины:  $\omega = f(M_c)$ .

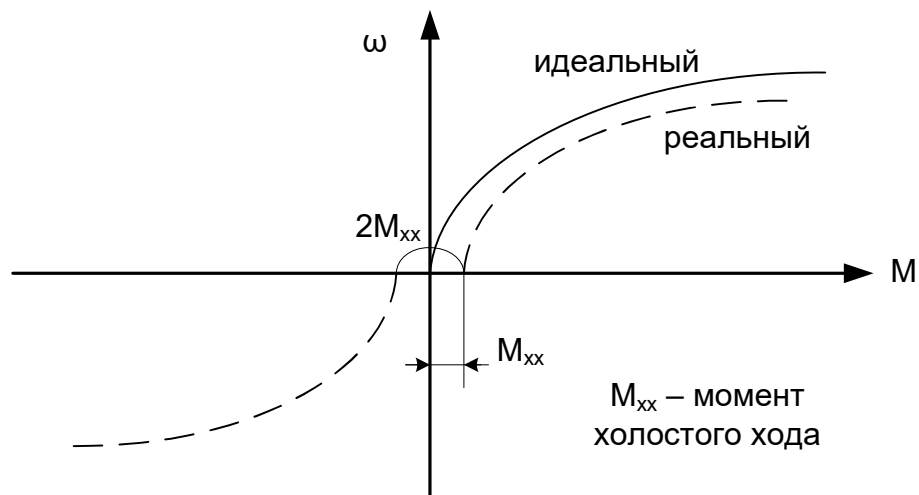
Статические моменты бывают двух видов: активные и реактивные.

Активный  $M_c$  – такой момент на валу механизма, который не изменяет знака при изменении направления вращения. В большинстве случаев, это момент груза.

Реактивный – такой момент, который изменяет свой знак при изменении направлении вращения. Это моменты, которые образуются от сил трения, резания и т.д..

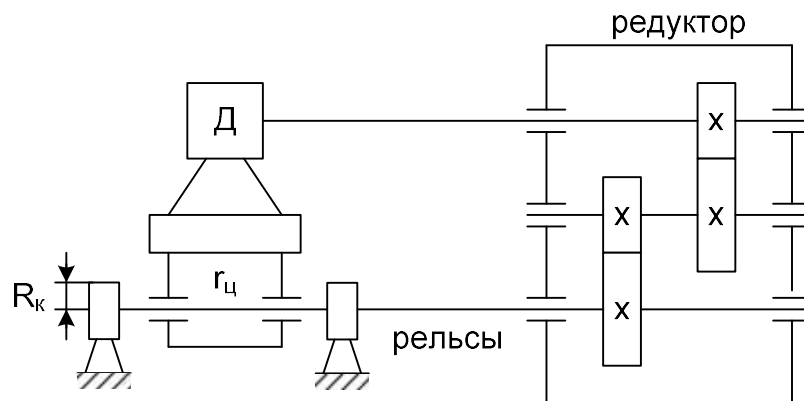


Ещё есть вентиляторный момент:



## Примеры моментов статических

### 1. Тележка



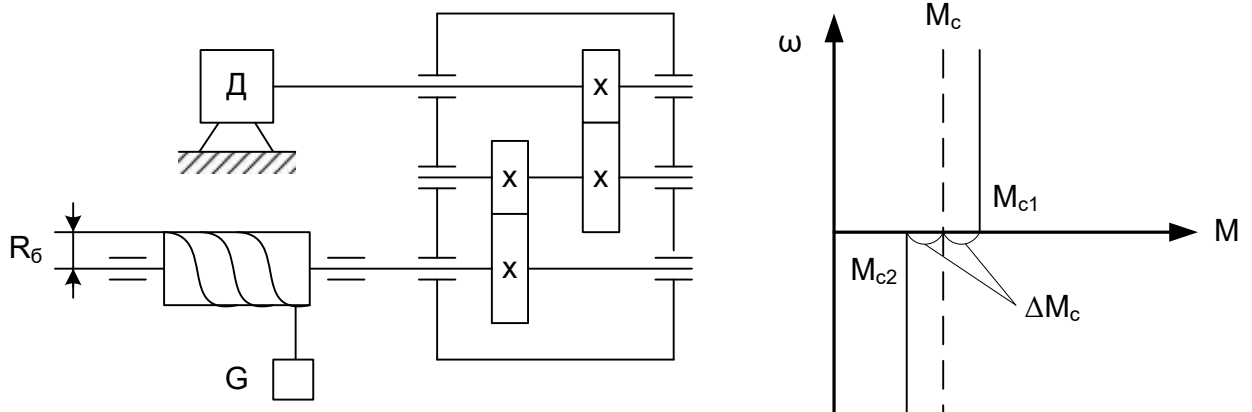
$$M_c = \frac{(\mu + fr_y) \cdot G}{R_k},$$

где  $\mu$  - коэффициент трения скольжения,

$f$  - коэффициент трения качения,

$r_y$  - радиус цапфы.

### 2. Однокольцевая лебёдка

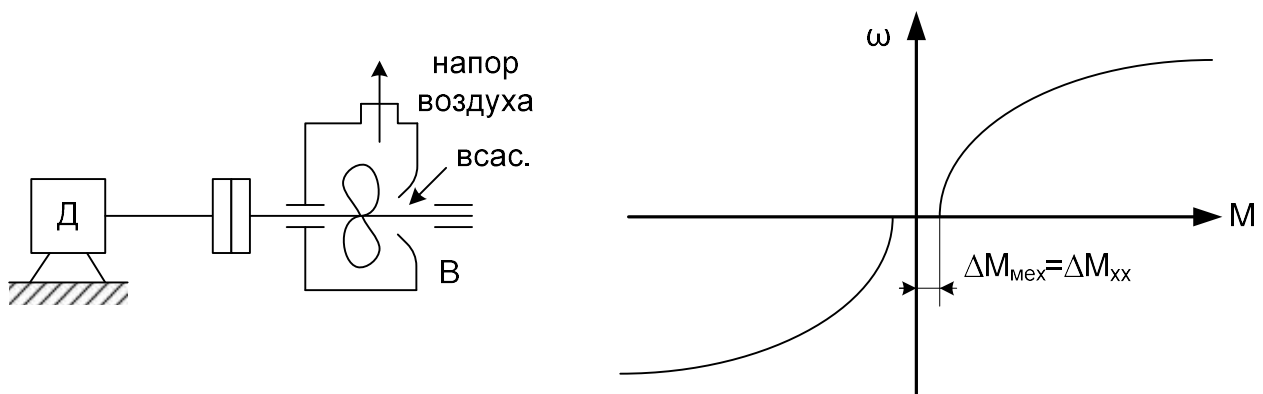


$$M_{c1} = \frac{GR_b}{i\eta} \quad (1) \quad M_{c2} = \frac{GR_0\eta}{i} \quad (2)$$

где  $i$  - передаточное отношение,  $\eta$  - КПД.

Когда на активный момент накладывается реактивная составляющая, то такой момент называют активный момент с реактивной составляющей. Он образуется за счёт того, что при подъёме груза двигатель покрывает потери (трение в редукторе, трение о барабан и т.д.), а при опускании механическая энергия груза за счёт электродвигателя преобразуется в электрическую и возвращается в сеть. При этом эта потенциальная энергия груза покрывает все потери, о которых говорилось ранее. Поэтому момент статический в обратном направлении.

### 3. Вентилятор

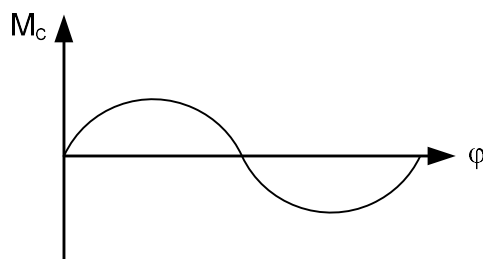


$$M_c = \Delta M_{\text{мех}} + K_B \omega^n,$$

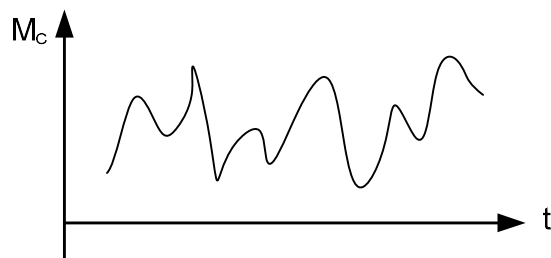
где  $K_B$  - коэффициент вентилятора,  $n$  - число лопастей.

Разновидности статических моментов бывают следующими:

– Когда момент статический меняется в зависимости от угла поворота;



– Механизмы со случайным статическими моментами.



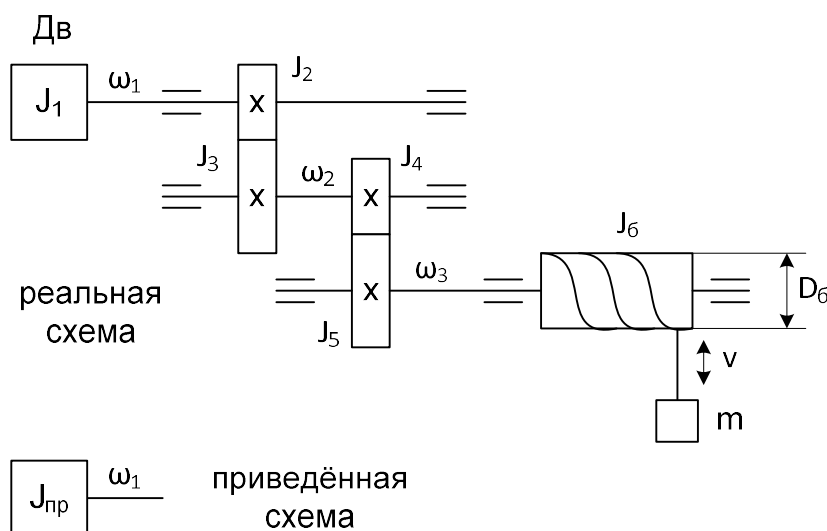
### Приведение инерционных масс

Для простоты расчётов зачастую сложные схемы механической части заменяются простыми упрощениями, которые проще анализировать, но при этом должна сохраняться инженерная точность анализа, т.е. погрешность не должна превышать 3-5%.

Основа приведения сложных цепей к простейшим заключается в том, что запасаемая кинетическая энергия в простейшей схеме должна быть равна запасённой кинетической энергии реальной схемы. Чаще всего приведение осуществляется к валу двигателя.

$$\frac{J_{\text{пр}}\omega_1^2}{2} = \frac{(J_1 + J_2)\omega_1^2}{2} + \frac{(J_3 + J_4)\omega_2^2}{2} + \frac{(J_5 + J_6)\omega_3^2}{2} + \frac{mv^2}{2};$$

$$J_{\text{пр}} = (J_1 + J_2) + (J_3 + J_4) \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + (J_5 + J_6) \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2 + \frac{mv^2}{\omega_1^2}.$$



### Основное уравнение движения привода

$$M - M_c = 0 \Rightarrow Mj = 0$$

$$M > M_c \Rightarrow Mj > 0$$

$$M - M_c = M \quad (1)$$

Если в (1) момент движущий равен моменту статическому, то момент динамический  $Mj$  отсутствует, т.е. наступает установившийся режим работы.

Если  $M > M_c$ , то появится избыточный  $Mj$ , который вызовет положительное ускорение.

Если  $M_c > M$ , то будет отрицательным  $Mj$ , т.е. отрицательное ускорение, а следовательно торможение привода.

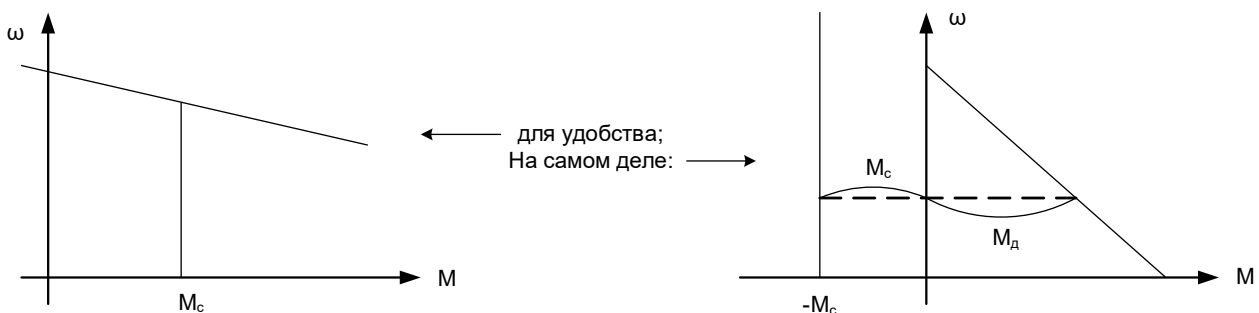
Известно, что работа равна запасаемой кинетической энергии  $A = \frac{J\omega^2}{2}$ , а  $\frac{dA}{dt}$  – динамическая мощность.

$$P_{\text{дин}} = \frac{dA}{dt} = \frac{J\omega^2}{2} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{P_{\text{дин}}}{\omega} = Mj \quad (5)$$

$$Mj = \frac{J\omega}{\omega} \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

$$\pm M \pm M_c = \pm J \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

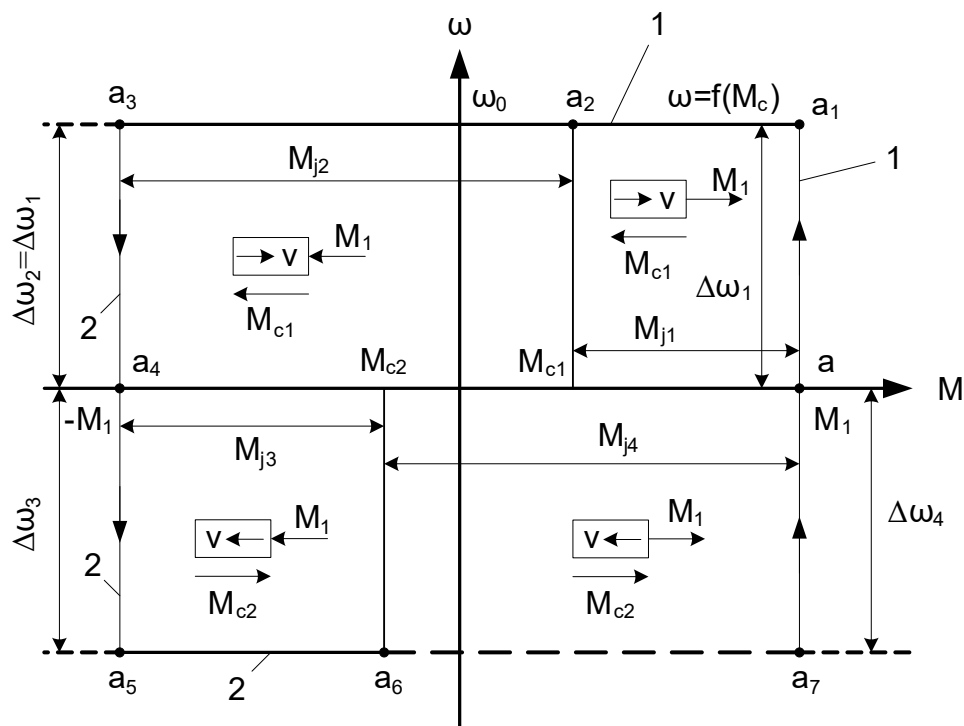


Систем с упругими механическими связями примерно (1,5...2)% от всех ЭП, т.е. в них упругая механическая связь существенно влияет на нагрузки в механической части и на вид расчётной схемы. Такие системы, как правило, сводятся к двухмассовым и, крайне редко, трёхмассовым. Остальные ЭП рассматриваются с абсолютно жёсткой механической частью.

В уравнении движения знак «+» перед моментом инерции в правой части ставится, если момент и скорость совпадают по направлению (двигательный режим), а «-» - если не совпадают (тормозной режим двигателя).

Механические переходные процессы

а) Момент статический реактивный



$$(1) M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon = M ,$$

где  $\varepsilon$  - ускорение.

$$(2) M - M_c = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

$$(3) \Delta t_1 = \frac{J\Delta\omega_1}{M_1 - M_c}$$

$M_1 - M_{c1} = Mj_1$ , если левая часть равна константе, то  $\varepsilon = \text{const}$ , т.е.  $\omega = f(t)$  изменяется по линейному закону.

По формуле (3) рассчитываем  $\Delta t$ . При достижении точки  $a$  привод мгновенно достигает точки  $a_2$  за счёт уменьшения момента. В точке  $a_2$  момент статический и момент движущий равны, и в этой точке будет установившийся режим работы. С точки  $a_2$  привод мгновенно перейдёт в  $a_3$  при неизменных оборотах.

$$\overline{a_3 a_4}: -M_1 - M_{c1} = -J \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \quad (4);$$

$$-M_1 - M_{c1} = -Mj_2 \quad (5)$$

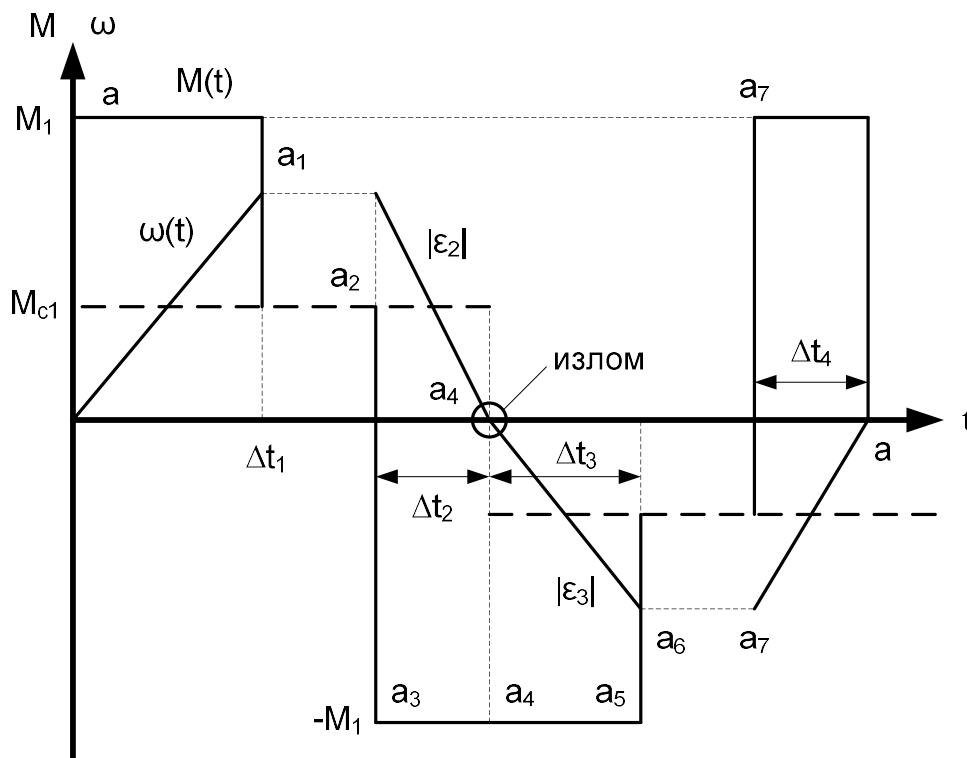
Знак перед моментом динамическим определяет знак левой части.

$$\text{Из (4): } \Delta t_2 = \frac{J \Delta \omega_2}{M_1 + M_{c1}} \quad (6)$$

$$\overline{a_4 a_5}: M_1 - M_{c2} = J \frac{\Delta \omega_3}{\Delta t_3} = J \varepsilon_3 \quad (7);$$

$$\text{Из (7): } \Delta t_3 = \frac{J \Delta \omega_3}{M_1 - M_{c2}} \quad (8), \quad \Delta t_1 > \Delta t_3$$

$$\overline{a_7 a}: -M_1 - M_{c2} = -J \frac{\Delta \omega_4}{\Delta t_4} = -J \varepsilon_4; \quad Mj_4 > Mj_2; \quad \Delta t_4 = \frac{J \Delta \omega_4}{M_1 + M_{c2}}.$$

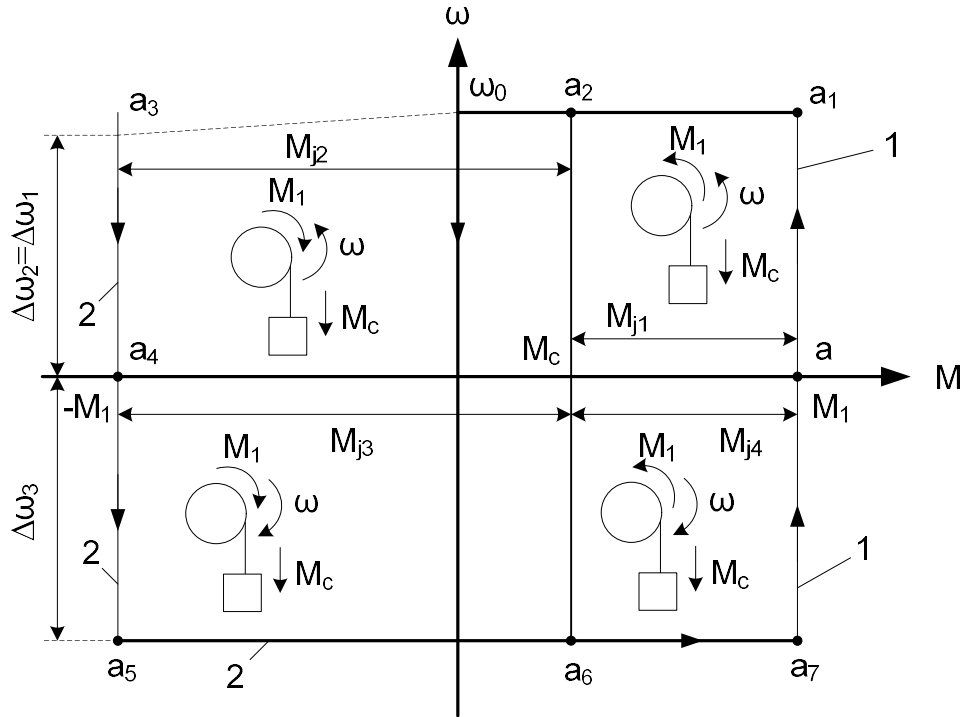


$\omega(t)$  - тахограмма механизма;

$M_c = f(t)$  - нагрузочная диаграмма механизма;

$M = f(t)$  - нагрузочная диаграмма двигателя, которая позволяет выполнить заданную тахограмму.

б) Момент статический активный



$$1) \overline{aa_1}: M_1 - M_{c1} = J \frac{\Delta\omega_1}{\Delta t_1} \quad (1)$$

$$2) \overline{a_3a_4}: -M_1 - M_c = J \frac{\Delta\omega_2}{\Delta t_2}$$

$$\Delta t_1 = \frac{J\Delta\omega_1}{M_1 - M_c} \quad (2)$$

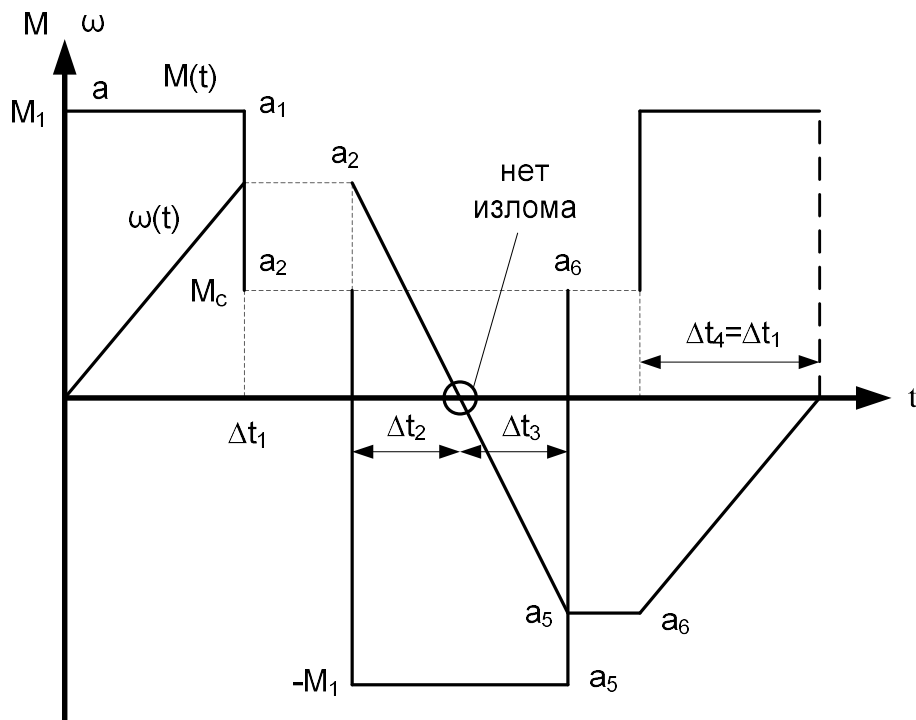
$$\Delta t_2 = \frac{J\Delta\omega_2}{M_1 + M_c}$$

$$3) \overline{a_4a_5}: M_1 + M_c = J \frac{\Delta\omega_3}{\Delta t_3}$$

$$4) \overline{a_7a}: -M_1 + M_c = -J \frac{\Delta\omega_4}{\Delta t_4}$$

$$\Delta t_3 = \frac{J\Delta\omega_3}{M_1 + M_c} = \Delta t_2$$

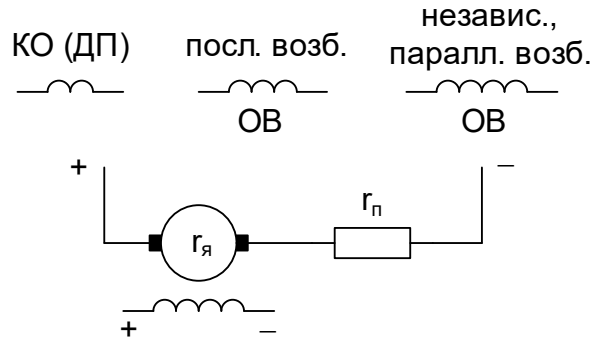
$$\Delta t_4 = \frac{J\Delta\omega_4}{M_1 - M_c} = \Delta t_1$$





Электромеханические свойства ЭП. Электромеханические и механические характеристики

1. Двигатель независимого возбуждения



По закону Кирхгофа:  $U_H = k\Phi_H \omega + I(r_я + r_п)$  (1)

$$k = \frac{pN}{2\pi a}; \quad k\Phi_H = C$$

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{I(r_я + r_п)}{k\Phi_H} \quad (2)$$

При  $I_0$ :  $\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H}$  (3)

$$\Delta\omega = \frac{I(r_я + r_п)}{k\Phi_H} \quad (4)$$

$$M = k\Phi_H I; \quad I = \frac{M}{k\Phi_H} \quad (5)$$

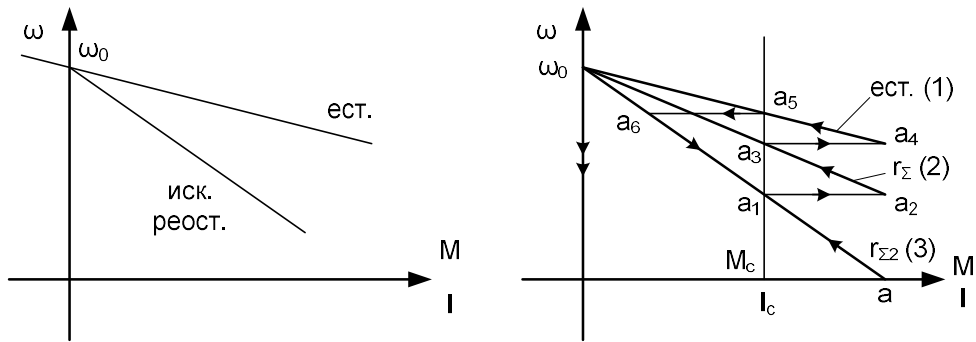
$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{M(r_я + r_п)}{(k\Phi_H)^2} \quad (6)$$

Если характеристика рассчитана при номинальном напряжении, номинальном потоке и отсутствии  $r_{доб}$  в цепи якоря, то такая характеристика называется естественной. Если одно из условий не выполняется, то – искусственной. Если регулирование реостатное (есть  $r_{доб}$ ), то такая характеристика называется реостатной.

При фиксированных параметрах  $\omega = f(I)$  и  $\omega = f(M)$  есть прямая линия.

$\omega = f(I)$  - электромеханическая характеристика;

$\omega = f(M)$  - механическая характеристика.

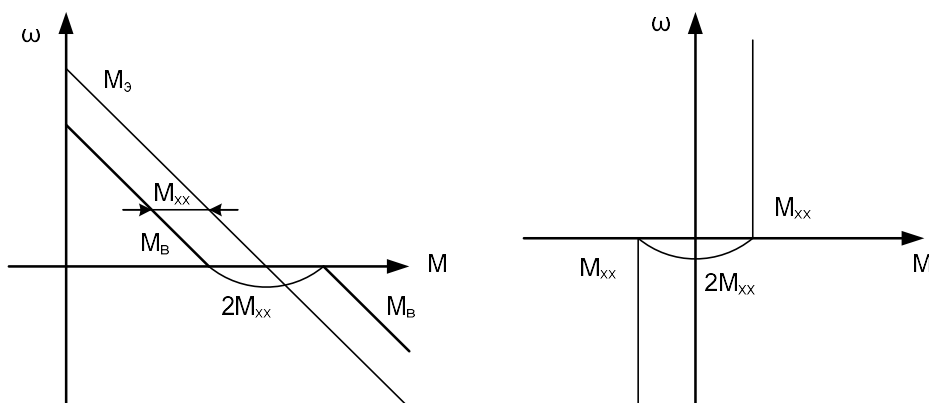


Принцип регулирования скорости:  $I_c = \frac{M_c}{k\Phi_H}$ ,  $I = \frac{U_H - E_1}{r_{\Sigma 2}}$ ,  $I_{a2} = \frac{U_H - E_1}{r_{\Sigma 1}}$ ;

заключается в рассмотрении формулы для тока и основного уравнения движения. Если включить двигатель по характеристике (3), то при неподвижном двигателе момент в точке а будет больше момента статического, динамический момент будет больше нуля до установившегося значения. Если вновь вывести часть сопротивления, то будет образована вторая характеристика. Ток мгновенно возрастёт, т.к. кинетическая энергия во вращающихся частях ротора велика, и двигатель, не изменив обороты за время замыкания контакта К, перейдёт в точку  $a_2$  на соответствующую характеристику. В ней  $I_{a2}$  мгновенно возрастёт, потому что числитель не изменился, а сопротивление стало  $r_{\Sigma 1}$ , дискретно уменьшившись. Вновь в точке  $a_2$  момент больше  $M_c$ , привод будет разгоняться до  $a_3$  и т.д.

Если при работе на естественной характеристике мы вновь включим  $r_{\Sigma 2}$ , то двигатель при неизменной скорости перейдёт в точку  $a_6$ . В ней момент двигателя будет меньше  $M_c$ , следовательно, согласно уравнению движения  $M_{a6} - M_c = Mj < 0$ . Это означает, что будет иметь место торможение до равенства моментов.

В лабораторных условиях:



## Построение естественной характеристики по паспортным данным

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{I r_{\text{я}}}{k\Phi_H} - \text{естественная электромеханическая}$$

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{M r_{\text{я}}}{(k\Phi_H)^2} - \text{естественная механическая}$$

$$a \begin{cases} I = I_H \\ \omega = \omega_H \end{cases}, \quad \omega_H = \frac{\pi n_H}{30};$$

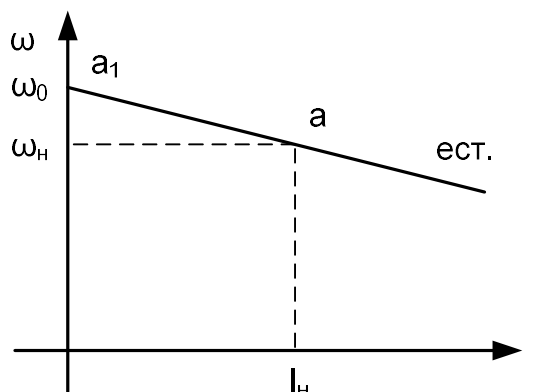
$$a_0 \begin{cases} I = 0 \\ \omega = \omega_0 \end{cases}, \quad \omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H};$$

$$k\Phi_H = \frac{E_H}{\omega_H} = \frac{U_H - I_H r_{\text{я}}}{\omega_H};$$

$$r_{\text{я}} = 0,5 R_H (1 - \eta_H);$$

$$R_H = \frac{U_H}{I_H}; \quad \eta_H = \frac{P_H}{U_H \cdot I_H};$$

$$M_H = k\Phi_H I_H.$$



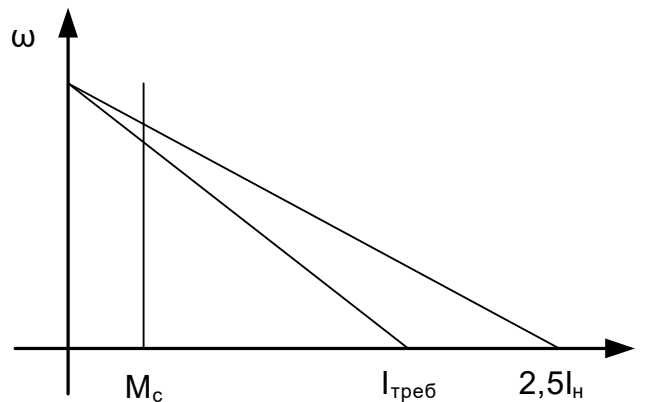
## Ограничение токов и моментов при реостатном пуске

1. Токи при пусках и торможениях должны быть ограничены и не превышать допустимых по коммутационной способности машины (исключение - искрение на щётках).

2. Зачастую ток уменьшается даже меньше, чем номинальный, для уменьшения пускового тормозного момента с целью обеспечения комфортного ускорения.

$$M - M_c = J\varepsilon_{\text{доп}}; \quad M_{\text{доп}} = J\varepsilon_{\text{доп}} + M_c; \quad \frac{M_{\text{доп}}}{k\Phi_{\text{н}}} = I_{\text{треб.}}$$

$$M_{\text{треб}} - M_c = J\varepsilon_{\text{доп}}$$



3. Момент пуска зачастую ограничивается с целью ограничения динамических нагрузок (для наличия зазоров кинематической цепи или стравленного троса).

Для закрытия зазора вначале включают привод на характеристике 2 при большом  $r_{\text{доб}}$ . По ней выбирают слабину каната или закрывают зазор, а дальше выводят сопротивление так, чтобы ток был равен предельно допускаемому значению.

