



## Лекция №8. Переходные процессы в электроприводах.

1. Общие положения.
2. Дифференциальное уравнение движения электропривода.
3. Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя.

## Общие положения.

Переходные процессы имеют место при пуске, торможении, реверсировании электропривода (ЭП), при изменении нагрузки и условий питания двигателя.

Переходный процесс сопровождается изменением скорости ЭП, момента и тока электродвигателя и температуры его нагрева.

## Общие положения.

Режим перехода ЭП из одного установившегося состояния в другое, в процессе которого происходит изменение соответствующих видов энергии, называют *переходным процессом* или *динамическим режимом* электропривода.

При переходном процессе одновременно и взаимосвязано изменяются механическая (кинетическая), электромагнитная и тепловая энергия системы ЭП.

## Общие положения.

Состояние электропривода в любой момент времени определяется текущими значениями переменных и внешними воздействиями.

Переменные величины системы ЭП, как и переходные процессы. Подразделяют на:

- механические (моменты, силы, скорости, ускорения);
- электромагнитные (токи обмоток, МДС и т.д.);
- тепловые (потери мощности и энергии, температуры частей электродвигателя).

## Общие положения.

Из-за инерционности системы ЭП любой переходный процесс происходит в течение определенного интервала времени.

Поэтому рассмотрение переходных процессов ЭП сводится к определению и анализу зависимостей изменения различных переменных системы ЭП во времени, например  $\omega=f(t)$ ,  $M=f(t)$ ,  $I=f(t)$  и т.д.

## Общие положения.

В установившемся режиме момент двигателя развиваемый на валу, уравновешен статическим моментом, действующим на валу со стороны нагрузки  $M = M_c$ ,  $M_{изб} = 0$ .

Если  $M_{изб} \neq 0$ , то установившийся режим нарушается и движение электропривода будет происходить с ускорением, то есть дополнительно возникает динамическая нагрузка ( $M_{изб} = M_{дин}$ ).

## Общие положения.

Таким образом, момент электродвигателя  $M$  всегда уравновешен суммой статического  $M_c$ , и динамического  $M_{дин}$

$$M = M_c + M_{дин}.$$

Статический момент действует постоянно, а динамический – только в переходных режимах.

## Дифференциальное уравнение движения электропривода.

Кинетическую энергию  $A_K$ , Дж, движущихся в системе электропривода масс можно записать в виде

$$A_K = \frac{J\omega^2}{2}$$

где  $J$  – момент инерции всех движущихся масс относительно угловой скорости вала электродвигателя,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;

$\omega$  – угловая скорость вала электродвигателя,  $\text{с}^{-1}$ .



## Дифференциальное уравнение движения электропривода.

С изменением скорости изменяется во времени и кинетическая энергия системы электропривода, при этом на валу электродвигателя возникает динамическая нагрузка мощностью

$$P_{\text{дин}} = \frac{dA_K}{dt} = \frac{d\left(J \frac{\omega^2}{2}\right)}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}.$$

## Дифференциальное уравнение движения электропривода.

Учитывая, что мощность и момент связаны через угловую скорость, получаем

$$M_{дин} = \frac{P_{дин}}{\omega} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}.$$

Изменение момента целесообразно связать не со временем, а с углом поворота вала электродвигателя

$$\omega = d\alpha / dt \Rightarrow dt = d\alpha / \omega \Rightarrow$$

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}.$$

## Дифференциальное уравнение движения электропривода.

Так как  $M_{\text{изб}} = M_{\text{дин}}$ , а  $M_{\text{изб}} = M - M_c$ , то получим

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}.$$

Дифференциальное уравнение движения электропривода

В большинстве случаев  $J = \text{const}$ , то есть  $dJ/d\alpha = 0$ , поэтому

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

Второй закон Ньютона для вращательного движения

## Дифференциальное уравнение движения электропривода.

$M_{изб} = 0$  – система электропривода находится в состоянии покоя или установившегося движения,  $\left(\frac{d\omega}{dt} = 0\right)$ .

$M_{изб} > 0$  – происходит ускорение,  $\left(\frac{d\omega}{dt} > 0\right)$ .

$M_{изб} < 0$  – замедление системы электропривода,  $\left(\frac{d\omega}{dt} < 0\right)$ .

## Дифференциальное уравнение движения электропривода.

Изложенное справедливо и для ЭП поступательного движения, с той лишь разницей, что вместо момента инерции необходимо использовать массу инерции  $m$ , вместо моментов  $M$  – силу  $F$ , а вместо угловой скорости  $\omega$  – линейную скорость  $v$ .

Применительно к поступательному движению

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

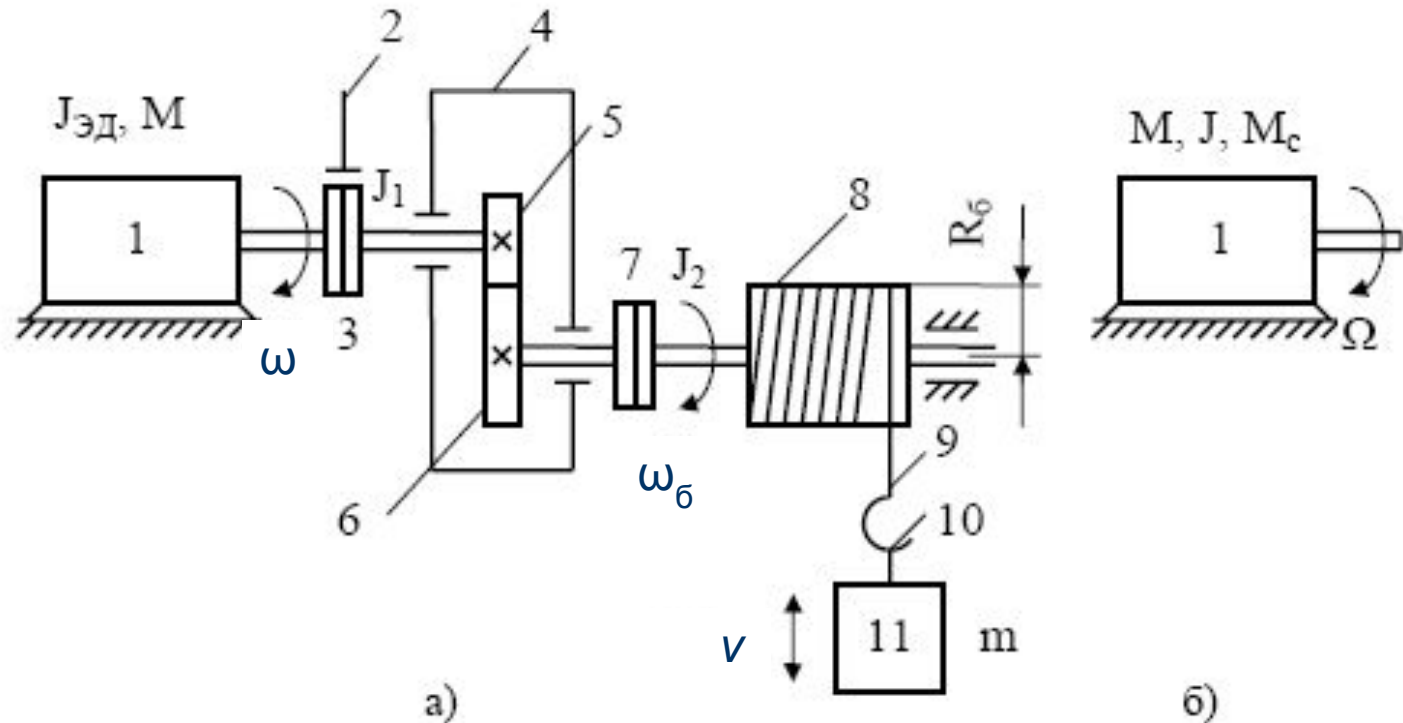
## Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя.

Для того, чтобы анализировать поведение ЭП как механической системы с использованием дифференциального уравнения движения ЭП, необходимо все статические моменты и массы инерции, действующие в реальной системе ЭП, приводить к валу электродвигателя.

## Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя.

При этом производится пересчет сил, моментов, масс и моментов инерции относительно двигателя электропривода. Этот расчёт называется *операцией приведения*, а сами пересчитанные переменные и параметры – *приведёнными*. В этом случае реальная механическая часть электропривода заменяется расчётной моделью.

# Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя.





## Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя.

Для определения приведённого момента инерции  $J$  необходимо приравнять выражения кинетической энергии в реальной и расчётной схемах

$$\frac{J\omega^2}{2} = \frac{J_0\omega^2}{2} + \frac{J_1\omega^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_6^2}{2} + \frac{mv^2}{2},$$

где  $J_1$  – суммарный момент инерции элементов, вращающихся со скоростью  $\omega$  (кроме двигателя),  
 $J_2$  – момент инерции элементов, вращающихся со скоростью барабана  $\omega_6$ .

Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя.

Умножая обе части этого выражения на  $2 / \omega^2$ , получим

$$J = J_{\partial} + J_1 + J_2 \cdot \frac{\omega_{\partial}^2}{\omega^2} + m \cdot \frac{v^2}{\omega^2},$$

Введем коэффициент, учитывающий момент инерции механической передачи, а также учтем, что отношение угловых скоростей двигателя и рабочей машины есть передаточное отношение

$$k = 1,05 \dots 1,2; \quad i = \frac{\omega}{\omega_{\partial}} \Rightarrow J = k \cdot J_{\partial} + \frac{J_M}{i^2} + m \cdot \frac{v^2}{\omega^2},$$

## Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя.

Момент инерции простых тел можно рассчитать.

Например, момент инерции цилиндра,  $m_{ц}$  с внешним  $R_{ц}$  и внутренним  $r_{ц}$  радиусами относительно продольной оси

$$J_{ц} = m_{ц} \cdot (R_{ц}^2 - r_{ц}^2) / 2.$$

Для тел сложной конфигурации и совершающих сложные движения используют методы экспериментального определения момента инерции.

Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя.

Приведение моментов и сил статического сопротивления может быть выполнено на основании энергетического баланса для механической части ЭП. В общем случае энергетический баланс сводится к равенству мощности, которую развивает электродвигатель в установившемся режиме работы, когда  $M = M_c$ , мощностям нагрузок вращательного ( $M_m, \omega_m$ ) и поступательного ( $F_m, v_m$ ) движений.

Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя.

С учетом КПД передачи получим

$$M_C \omega = \frac{M_{MC} \omega_M}{\eta_{n\omega}} + \frac{F_M v_M}{\eta_{nv}}$$

Разделим обе части уравнения на  $\omega$  и с учетом того, что передаточное отношение механической передачи  $i = \omega / \omega_M$ , получим

$$M_C = \frac{M_{MC}}{i \eta_{n\omega}} + \frac{F_M v_M}{\omega \eta_{nv}}$$