



## Лекция №9. Переходные процессы в электроприводах.

1. Расчет продолжительности переходных процессов электропривода.
2. Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.
3. Статическая устойчивость электропривода.
4. Динамическая устойчивость электропривода.

## Расчет продолжительности переходных процессов электропривода.

Исходя из основного уравнения движения электропривода с постоянным моментом инерции можно записать



$$M = J d\omega / \text{изб}$$

Для определения продолжительности механического переходного процесса достаточно проинтегрировать это выражение.

# Расчет продолжительности переходных процессов электропривода.

Из-за сложности представления аналитической зависимости избыточного момента от скорости вращения

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

и последующего его интегрирования прибегают к приближенному решению уравнению методом конечных приращений.

# Расчет продолжительности переходных процессов электропривода.

Суть метода конечных приращений сводится к замене дифференциалов переменных величин  $dt$  и  $d\omega$  их конечными малыми приращениями  $\Delta t$  и  $\Delta\omega$  на каждом  $i$ -м участке разгона или торможения электропривода.

$$\Delta M_{\text{изб}} = J \Delta\omega_i /$$

При определенном малом приращении  $\Delta\omega_i$  на  $i$ -м участке избыточный момент этого участка можно считать постоянным и равным среднему значению.

# Расчет продолжительности переходных процессов электропривода.

Таким образом, полная продолжительность переходного процесса электропривода будет равна

$$t_{nn} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i,$$

где  $n$  – число участков, на которые разбивают скоростной интервал.

С учетом предыдущего выражения это соотношение может быть представлено в виде

$$t_{nn} = J \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta \omega_i}{M_{узб.спi}}.$$

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

Общие потери мощности в электродвигателе  $\Delta P$  содержат постоянную  $K$  и переменную  $V$  составляющие.

Под *постоянными потерями* подразумеваются потери мощности, не зависящие от нагрузки электродвигателя. К ним относятся потери в стали магнитопровода, механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери. Постоянные потери мощности равны

$$K = \Delta P_n - V_n.$$

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

Под *переменными потерями* подразумеваются потери, выделяемые в обмотках электродвигателей при протекании по ним токов, определяемых механической нагрузкой электропривода.

Переменные потери мощности в электродвигателях постоянного тока:

$$V = I_2 \cdot R.$$

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

В трехфазных асинхронных электродвигателях

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2'.$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – соответственно потери мощности в цепях обмоток статора и ротора.

При использовании Г-образной схемы замещения электродвигателя

$$V_1 = 3I_2'^2 R_1 \Rightarrow$$
$$V = 3I_2'^2 (R_1 + R_2') = 3I_2'^2 R_2' \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = V_2 \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right).$$



## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

Переменные потери мощности, выделяющиеся в роторе асинхронного электродвигателя, могут быть определены через механические переменные и параметры

$$V_2 = M \cdot \omega_0 \cdot S.$$

Тогда полные переменные потери будут равны

$$V = M\omega_0 S \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right).$$

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

Большое значение определение потерь электроэнергии в переходных процессах имеет для электродвигателей, у которых динамический режим является основным.

К ним относятся электроприводы прокатных станов, подъемных кранов, строгальных станков, лифтов и т.д.

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

Потери энергии при пуске АД практически полностью определяются электрическими потерями энергии в обмотках, которые прямо пропорциональны квадрату силы тока

$$\Delta A_n = \Delta P_n \int_0^{t_n} i_n^2 \cdot dt,$$

где  $\Delta P_n$  - номинальные электрические потери мощности, электродвигателя, Вт;

$i$  – кратность тока электродвигателя по отношению к номинальному.

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

Для АД с короткозамкнутым ротором эквивалентное значение тока за период пуска составляет примерно 0,9 его пускового значения при  $\omega=0$

$$\int_0^{t_n} i_n dt = 0,9 I_n \cdot t_n.$$

С учетом этого

$$\Delta A_n = 0,81 \Delta P_n \cdot i_n^2 \cdot t_n.$$

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

Номинальные электрические потери мощности электродвигателя равны

$$\Delta P_n = P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n (1 + \alpha)},$$

где  $\alpha$  – коэффициент равный отношению постоянных потерь мощности к номинальным переменным,  
 $\alpha=0,5 \dots 0,7$  для АД общего назначения;  
 $\alpha=0,4 \dots 1$  для крановых АД.

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

С учетом предыдущего соотношения расчетная формула для определения потерь энергии при пуске имеет вид

$$\Delta A_n = 0,81 \cdot P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n (1 + \alpha)} \cdot i_n^2 \cdot t_n.$$

Через механические переменные и параметры потери мощности при пуске электродвигателя без нагрузки ( $M_c = 0$ ) определяют по формуле

$$\Delta A_{II} = \int_0^t M \omega_0 S dt = \int_0^t M (\omega_0 - \omega) dt.$$

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

$$dt = \frac{Jd\omega}{M}$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - S) \Rightarrow d\omega = -\omega_0 \cdot dS$$

$$dt = -\frac{J\omega_0 dS}{M}$$

$$\Delta A_{\Pi} = \int_{S_{нач}}^{S_{кон}} M\omega_0 S \left( -\frac{J\omega_0 dS}{M} \right) = -J\omega_0^2 \int_{S_{нач}}^{S_{кон}} S dS = -J\omega_0^2 \frac{S_{нач}^2 - S_{кон}^2}{2}$$

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

При пуске электродвигателя и динамическом торможении  $S_{нач} = 1$ ,  $S_{кон} = 0$ , тогда

$$\Delta A_{П} = \frac{J\omega_0^2}{2}.$$

При торможении противовключением  $S_{нач} = 2$ ,  $S_{кон} = 1$ , а потери энергии

$$\Delta A_{П} = 3 \frac{J\omega_0^2}{2}$$

При реверсе  $S_{нач} = 2$ ,  $S_{кон} = 0$  и потери энергии

$$\Delta A_{П} = 4 \frac{J\omega_0^2}{2}$$



## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

Потери энергии, а соответственно и нагрев электродвигателей в переходных режимах можно уменьшить следующими путями:


- сократив продолжительность переходного процесса;
- применив специальные электродвигатели с пониженной кратностью пускового тока и повышенными постоянными потерями мощности по отношению к переменным;

$$\Delta A_n = 0,81 \cdot P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n (1 + \alpha)} \cdot i_n^2 \cdot t_n$$

Электропривод.

## Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения.

- применив ступенчатое поочередное переключение ЭП с меньшей скорости на большую (большой избыточный момент электродвигателя при пуске);
- используя специальные АД с короткозамкнутым ротором крановых серий, с повышенным скольжением (большой избыточный момент за переходный период).

$$dt = \frac{Jd\omega}{M}$$


## Статическая устойчивость электропривода.

При рассмотрении динамики различных электроприводов возникает задача оценки их устойчивой работы при возникновении внешних механических воздействий, приводящих к возникновению в системе электропривода избыточного момента (это может произойти, например, при изменении нагрузки или условий питания).

## Статическая устойчивость электропривода.

*Статическую устойчивость* ЭП рассматривают в том случае, если длительность избыточного момента нагрузки превышает длительность возникшего переходного процесса.

*Динамическую устойчивость* рассматривают при кратковременном возникновении избыточного момента.

## Статическая устойчивость электропривода.

При возникновении в системе электропривода внешнего воздействия уравнение движения можно записать в виде

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

С учетом

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$$

Получим

$$\Delta \omega (\beta - \beta_c) = J \frac{d(\Delta \omega)}{dt},$$

где  $\beta$ ,  $\beta_c$  – жесткости механических характеристик электродвигателя и рабочей машины.

## Статическая устойчивость электропривода.

Разделяя переменные, запишем дифференциальное уравнение

$$\frac{\beta - \beta_c}{J} dt - \frac{d(\Delta\omega)}{\Delta\omega} = 0,$$

решая которое будем иметь

$$\frac{\beta - \beta_c}{J} t - \ln \Delta\omega + \ln c = 0,$$

где  $c$  – постоянная интегрирования.

## Статическая устойчивость электропривода.

Из начальных условий при  $t=0$   $\Delta\omega = \Delta\omega_{нач}$ . Тогда на основании последнего соотношения  $s = \Delta\omega_{нач}$ .

Следовательно

$$\frac{\beta - \beta_c}{J} t = \ln \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{нач}}.$$

Окончательно

$$\Delta\omega = \Delta\omega_{нач} e^{\frac{\beta - \beta_c}{J} t}.$$

## Статическая устойчивость электропривода.



Из предыдущего уравнения следует, что для обеспечения статической устойчивости необходимо, чтобы при  $t \rightarrow \infty$   $\Delta\omega \rightarrow 0$ , а это возможно при условии

$$\beta_c > \beta.$$

Это соотношение служит критерием устойчивости электропривода, согласно которому работа ЭП устойчива, если жесткость механической характеристики статической нагрузки больше жесткости механической характеристики электродвигателя в точке их пересечения.



## Динамическая устойчивость электропривода.

При работе ЭП момент статического сопротивления перегрузки  $M_{сп}$ , действующий со стороны нагрузки, может превышать максимально допустимый момент электродвигателя  $M_1$  в течение небольшого интервала времени, общая длительность которого меньше длительности возникшего электромеханического переходного процесса.

## Динамическая устойчивость электропривода.

При динамической устойчивости работоспособность ЭП сохраняется за счет дополнительного действия кинетической энергии движущихся масс электропривода при формально статической неустойчивости

$$M_{сн} \rangle M = \lambda \cdot M_n.$$

## Динамическая устойчивость электропривода.

Рабочий участок механической характеристики аппроксимируется прямой. В этом случае при ударной нагрузке увеличение момента электродвигателя происходит по экспоненциальному закону

$$M = M_0 + (M_{cn} - M_0) \cdot (1 - e^{-t/T_m}),$$

где  $M_0$  – момент электродвигателя при работе до перегрузки, Н·м;

$T_m$  – электромеханическая постоянная времени электропривода, с.

## Динамическая устойчивость электропривода.

Для электропривода с асинхронным электродвигателем

$$T_m = J \cdot \omega_0 \cdot S_{(н)} / M_n,$$

где  $S_n$  - скольжение АД при номинальном моменте нагрузки.

## Динамическая устойчивость электропривода.



Момент электродвигателя достигает максимального значения по истечении некоторого допустимого времени перегрузки.

$$M = M_0 + (M_{cn} - M_0) \cdot (1 - e^{-t/T_m}),$$

$$M = \lambda \cdot M_n.$$

$$t_{\partial n} = T_m \ln \frac{M_{cn} - M_0}{M_{cn} - \lambda \cdot M_n}.$$

## Динамическая устойчивость электропривода.

Если фактическая продолжительность приложения ударной нагрузки

$$t_{нз} \leq t_{дн},$$

то работа электропривода динамически устойчива.

Если же

$$t_{нз} \geq t_{дн},$$

то работоспособность ЭП нарушается.