

В.В.АЛЕКСЕЕВ, П.В.АЛЕКСЕЕВ, А.Е.КОЗЯРУК

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

*Учебное пособие*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2008

УДК 62-83(075.8)

В пособии в необходимом объеме представлен теоретический материал по основным разделам для расчетов электрического привода. Приведены наиболее характерные примеры и задачи, их развернутые решения или основные расчетные соотношения

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

Алексеев В.В.

А471. Электрический привод. Учебное пособие / В.В.Алексеев, П.В.Алексеев, А.Е.Козярук. СПб. 2008. 66 с.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие по дисциплине «Электрический привод» имеет главной целью ознакомление студентов с основными теоретическими положениями, необходимыми для расчета и элементов проектирования электропривода.

Первые три раздела включают материал по структуре, механике и выбору мощности электроприводов.

Четвертый и пятый разделы посвящены вопросам расчета механических и регулировочных характеристик приводов с двигателями постоянного и переменного тока, в том числе с релейным управлением посредством регулируемых сопротивлений в цепях электродвигателей (параметрическое регулирование), а также с помощью электромашинных систем «генератор - двигатель».

Шестой раздел охватывает существенные в современных условиях вопросы, связанные со статическими и динамическими характеристиками регулируемых электроприводов с силовыми полупроводниковыми преобразователями, в том числе с замкнутыми системами регулирования, включая векторные системы.

## 1. НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

*Электрический привод* (ЭП) – это электромеханическая система, служащая для преобразования электрической энергии в механическую и управления механической энергией с помощью электрических сигналов.

В соответствии со структурой электропривода с замкнутой системой управления рис.1.1 выходными координатами привода являются электромагнитный момент  $M$ , (или сила  $F$ ), обеспечивающие функционирование рабочей машины (РМ) и координаты движения – угловая  $\omega$  или линейная  $v$  скорости (или соответствующие отрезки пути  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta s$ ).

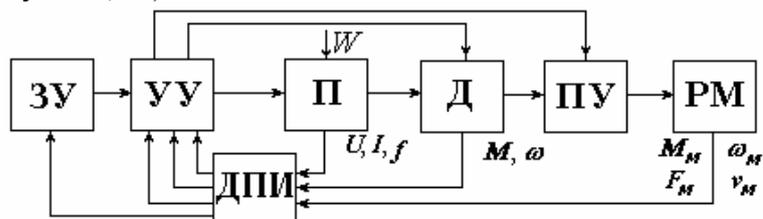


Рис.1. Функциональная схема электропривода

Назначение основных элементов ЭП

1. *Передающее устройство* (ПУ) служит для преобразования форм движения и передачи механической энергии от двигателя к рабочим органам рабочей машины (РМ).

2. *Двигательное устройство* (ДУ) преобразует электрическую энергию в механическую, а также формирует совместно с ПУ заданные формы движения рабочих органов и содержит один или несколько электродвигателей (Д).

3. *Преобразователь* (П) – это устройство, связанное с источником электроэнергии  $W$ , служащее для преобразования одного вида электроэнергии в другой, формирования и усиления по мощности сигналов управления.

4. *Управляющее устройство* (УУ) совместно с информационным каналом, содержащим датчики-преобразователи информации (ДПИ) формируют заданные законы управления (поток энергии  $W$  и движения РМ). ДПИ преобразует координаты ЭП в электрические сигналы.

5. *Задающее устройство* (ЗУ) формирует управляющие воздействия УУ, используя информацию ДПИ, на которые поступают сигналы обратных связей (ОС).

## 2. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

*Скоростной режим ЭП* определяется при совместном рассмотрении моментов механизма  $M_c$  и двигателя  $M$  и их механических характеристик путем применения основного уравнения движения.

Вид механической характеристики двигателя  $\omega=f(M)$  зависит от его типа. Виды механических характеристик рабочих механизмов  $\omega=f(M_c)$  также отличаются разнообразием и зависят, в том числе, от типа статического момента (момента сопротивления движению).

*Реактивный статический момент*  $M_c$  (сила  $F_c$ ) препятствует движению и меняет свой знак при изменении направления движения.

*Активный статический момент*  $M_c$  (сила  $F_c$ ) не изменяет свой знак при изменении направления движения.

*Основное уравнение движения электропривода* для механизма, у которого все элементы имеют одну и ту же угловую скорость ( $\omega$ ), что и ротор двигателя (насосы, вентиляторы) при суммарном моменте инерции механизма и двигателя  $J_m+J_{дв}=J_{\Sigma}=\text{const}$

$$M = M_c + M_{\text{дин}} = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} d\omega/dt$  – динамический момент.

Для машин, имеющих элементы, вращающиеся с другими угловыми скоростями, или элементы, движущиеся поступательно для применения (1) получают *приведенную механическую часть* ЭП из условия сохранения неизменной механической мощности системы [1, 2].

*Приведение моментов* (обычно к валу двигателя) осуществляется с учетом потери мощности в механической передаче, поскольку механическая часть ЭП содержит подвижную часть ЭД, рабочий орган РМ и механическое ПУ. Определение приведенных к валу двигателя моментов сопротивления  $M_c$  и моментов инерции  $J_{\text{пр}}$  для активной и реактивной нагрузки рассмотрено в примерах 1,2.

*Продолжительность переходного процесса* пуска, перехода с одной скорости на другую и торможения привода можно определить

на основе уравнение движения электропривода. Например, при разгоне со скорости  $\omega_{нач}$  до  $\omega_{уст}$  с постоянными моментами ( $J_{\Sigma}$ ,  $M$ ,  $M_c$ ) приближенно время переходного процесса  $t_{п}$

$$t_{п} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{уст} - \omega_{нач}}{M - M_c} . \quad (2)$$

При торможении со скорости  $\omega_{уст}$  до  $\omega_{нач}$  ( $M < M_c$ , но  $M \neq 0$ )  $t_{т}$

$$t_{т} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{уст} - \omega_{нач}}{M + M_c} . \quad (3)$$

Из уравнения движения относительно рабочего вала, по правилу определения максимума ускорения  $d\omega/dt = (i_p M - M_c) / (J_M + J_{дв} \delta i_p^2)$ , можно найти *оптимальное передаточное число*  $i_p$  редуктора, соответствующее минимальному времени переходного процесса

$$i_p = \frac{M_c}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_c}{M}\right)^2 + \frac{J_M}{J_{дв} \delta}} , \quad i_p = \sqrt{\frac{J_M}{J_{дв} \delta}} \quad (\text{при } M_c/M \ll 1), \quad (4)$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий момент инерции передачи,  $J_M$ ,  $J_{дв}$  – момент инерции механизма и двигателя.

**Пример 1.** Лебедка для подъема груза (рис.2) включает в себя барабан с канатом Б, крюк К, груз Г, редуктор Р и двигатель Д.

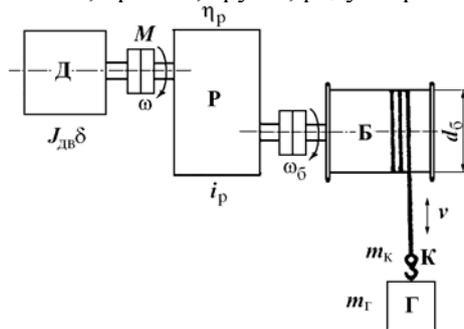


Рис.2. Грузоподъемная лебедка

Данные механизма: масса груза  $m_{Г} = 400$  кг; масса крюка  $m_{К} = 100$  кг; (вес  $G_{Г} = m_{Г} g = 4000$  Н;  $G_{К} = m_{К} g = 1000$  Н); скорость подъема или

опускания  $v = 1$  м/с; КПД редуктора  $\eta_p = 0,5$ . Установившаяся угловая скорость двигателя  $\omega = 100$  рад/с. Момент инерции с коэффициентом  $\delta$ , учитывающим момент инерции передачи  $J_{дв}\delta = 0,15$  кгм<sup>2</sup>.

1. Найти приведенный к валу двигателя статический момент нагрузки  $M_{c0\uparrow}$  при подъеме крюка без груза, приведенный момент инерции крюка  $J_{пр0}$ , суммарный момент инерции,  $J_{\Sigma 0} = J_{дв}\delta + J_{пр0}$  и динамический момент  $M_{дин0\uparrow}$  привода при равномерном нарастании скорости при пуске за  $t_{п} = 1$  с.

2. Определить  $M_{c\uparrow}$ ,  $J_{\Sigma}$  и  $M_{дин\uparrow}$  при подъеме груза ( $\uparrow$ ).

3. Определить  $M_{c\downarrow}$  и  $M_{дин\downarrow}$  при опускании груза ( $\downarrow$ ).

4. Определить передаточное число редуктора  $i_p$  при диаметре барабана  $d_6 = 0,5$  м.

**Решение.** Приведенный к валу двигателя привода лебедки (рис.2) момент инерции тела (крюка), движущегося поступательно (подъем)

$$J_{пр0} = \frac{m_k v^2}{\omega^2} = 0,01 \text{ кгм}^2. \quad (4)$$

Суммарный приведенный момент инерции механизма (лебедки) при подъеме крюка

$$J_{\Sigma 0} = J_{дв} \delta + J_{пр 0} = 0,16 \text{ кгм}^2 \quad (5)$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий момент инерции передачи.

Статический момент, приведенный к валу двигателя при подъеме крюка

$$M_{c0\uparrow} = \frac{G_k v}{\omega \eta_p} = 20 \text{ Нм}. \quad (6)$$

Динамический момент при пуске на подъем крюка без груза

$$M_{дин 0\uparrow} = J_{\Sigma 0} \frac{d\omega}{dt} = 16 \text{ Нм}. \quad (7)$$

с постоянным ускорением

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{t_{п}} = 100 \text{ рад/с}^2. \quad (8)$$

Статический момент, приведенный к валу двигателя, при подъеме крюка с грузом

$$M_{c\uparrow} = \frac{(G_k + G_r)v}{\omega \eta_p} = 100 \text{ Нм.} \quad (9)$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции крюка с грузом

$$J_{пр} = \frac{(m_k + m_r)v^2}{\omega^2} = 0,05 \text{ кгм}^2. \quad (10)$$

Динамический момент при равномерном нарастании скорости при пуске на подъем крюка с грузом за 1 с

$$M_{дин \uparrow} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 21 \text{ Нм,} \quad (11)$$

где  $J_{\Sigma} = J_{дв} \delta + J_{пр} = 0,21 \text{ кгм}^2$  – суммарный момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя.

Статический момент, приведенный к валу двигателя при спуске крюка с грузом, с учетом активного характера момента  $M_c$

$$M_{c\downarrow} = \frac{(G_k + G_r)v \eta_p}{\omega} = 25 \text{ Нм.} \quad (12)$$

Динамический момент при равномерном снижении скорости при торможении опускаемого крюка с грузом за 1 с.

$$M_{дин \downarrow} = -J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 21 \text{ Нм.} \quad (13)$$

Установившаяся скорость барабана  $\omega_6$

$$\omega_6 = \frac{2v}{d_6} = 4 \text{ рад/с,} \quad (14)$$

Передаточное число редуктора  $i_p$

$$i_p = \frac{\omega}{\omega_6} = 25. \quad (15)$$

**Пример 2.** Механизм вращательного действия (рис.3) включает в себя рабочий механизм РМ, редуктор Р и двигатель привода Д. Данные механизма:  $M_{M0} = 20$  Нм;  $M_M = 200$  Нм;  $J_M = 2$  кгм<sup>2</sup>;  $i_p = 2,0$ ;  $\eta_p = 0,5$ . Двигатель характеризуется установившейся скоростью  $\omega = 100$  рад/с и моментом инерции  $J_{дв}\delta = 0,5$  кгм<sup>2</sup>.

1. Найти приведенный к валу двигателя статический момент  $M_{c0}$  при холостом ходе, момент инерции  $J_{пр0}$ , суммарный момент инерции  $J_{\Sigma 0}$  и динамический момент привода  $M_{дин0}$  при пуске с постоянным ускорением  $\epsilon_{п} = d\omega / dt = 50$  рад/с<sup>2</sup> ( $J_{M0}=0$ ).

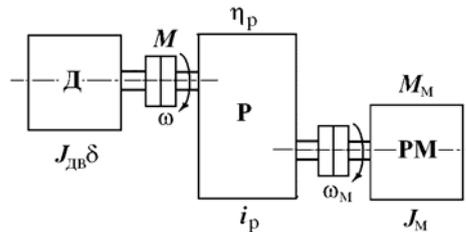


Рис.3. Механизм вращательного действия с редуктором

2. Определить приведенный момент  $M_c$  при работе с нагрузкой в двигательном режиме,  $J_{пр}$ ,  $J_{\Sigma}$  и  $M_{дин}$  при  $\epsilon_{п} = d\omega / dt = 50$  рад/с<sup>2</sup>.

3. Определить  $M_c$ ,  $J_{пр}$ ,  $J_{\Sigma}$  и  $M_{дин}$  при торможении привода с постоянным ускорением  $\epsilon_{т} = d\omega / dt = 50$  рад/с<sup>2</sup>.

**Расчет.** Статический момент  $M_{c0}$  механизма вращательного действия (рис.3), приведенный к валу двигателя при холостом ходе

$$M_{c0} = \frac{M_{M0}}{i_p \eta_p}. \quad (16)$$

Динамический момент привода  $M_{дин0}$  при холостом пуске ( $J_{M0} = 0$ ) с постоянным ускорением  $\epsilon_{п} = d\omega / dt$

$$M_{\text{дин}0} = J_{\Sigma 0} \frac{d\omega}{dt}, \quad (17)$$

где  $J_{\Sigma 0} = J_{\text{дв}} \delta + \frac{J_{\text{м}0}}{i_p^2}$  – суммарный приведенный момент инерции.

Приведенный статический момент  $M_c$  при работе с нагрузкой, имеющей реактивный характер

$$M_c = M'_c = \frac{M_{\text{м}}}{i_p \eta_p}, \quad (18)$$

Динамический момент привода  $M_{\text{дин}}$  при пуске под нагрузкой с постоянным ускорением  $\varepsilon_{\text{п}} = d\omega / dt$

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (19)$$

где  $J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} \delta + \frac{J_{\text{м}}}{i_p^2}$  – суммарный момент инерции;  $\frac{J_{\text{м}}}{i_p^2}$  – момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя.

Динамический момент привода  $M_{\text{дин}}$  при торможении с постоянным ускорением  $\varepsilon_{\text{т}} = d\omega / dt = 50 \text{ рад/с}^2$

$$M_{\text{дин}} = -J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (20)$$

**Пример 3.** Определить мощность двигателя привода лебедки (см. рис.2) в установившемся режиме работы. Данные привода:  $G_{\text{к}} = 5000 \text{ Н}$ ;  $G_{\text{т}} = 15000 \text{ Н}$ ;  $v_{\downarrow} = v_{\uparrow} = 0,5 \text{ м/с}$ ; КПД редуктора  $\eta_p = 0,8$ ; КПД редуктора при работе лебедки без груза  $\eta_0 = 0,5$ .

Найти мощность двигателя: 1) при подъеме груза; 2) при подъеме крюка без груза; 3) при опускании груза; 4) при опускании крюка без груза.

**Расчет.** Мощность двигателя привода лебедки (рис.2) при подъеме груза определяется моментом  $M$  и скоростью вала двигателя  $\omega$

$$P_{r\uparrow} = M \omega = \frac{(G_k + G_r)v}{\eta_p}. \quad (21)$$

Мощность двигателя при подъеме крюка

$$P_{k\uparrow} = \frac{G_k v}{\eta_0}. \quad (22)$$

Мощность двигателя привода при опускании груза, с учетом активного характера статического момента

$$P_{r\downarrow} = (G_k + G_r)v\eta_p. \quad (23)$$

Мощность двигателя привода при опускании крюка

$$P_{k\downarrow} = G_k v \eta_0. \quad (24)$$

**Задача 1.** Определить оптимальное передаточное число  $i_{\text{опт}}$  редуктора механизма вращательного действия (см. рис.3) при работе на холостом ходу ( $M_m = 0$ ).

Данные привода: Момент инерции механизма  $J_m = 4 \text{ кгм}^2$ ; момент инерции двигателя  $J_1 = J_{\text{дв}} + J_{\text{муфты}} = J_{\text{дв}} \delta$  с учетом коэффициента влияния инерции муфты  $\delta = 1,25$ .

Найти  $i_{\text{опт}}$ ,  $J_{\text{пр}}$ : 1) для привода с двигателем  $J_{\text{дв}} = 0,8 \text{ кгм}^2$ ; 2) для  $J_{\text{дв}} = 0,2 \text{ кгм}^2$ , 3) для  $J_{\text{дв}} = 0,05 \text{ кгм}^2$ .

**Задача 2.** Определить время пуска и торможения привода механизма вращательного движения при постоянных значениях статического момента  $M_c$  и момента двигателя  $M$  во время пуска или торможения. Данные привода:  $J_{\text{дв}} \delta = 1 \text{ кгм}^2$ ;  $J_m = 8 \text{ кгм}^2$ ,  $i_p = 2,0$ ;  $\omega_{\text{уст}} = 100 \text{ рад/с}$ ;  $M_c = 500 \text{ Нм}$ .

Найти время пуска и торможения привода для  $\omega_{\text{нач}} = 0$  и  $\omega_{\text{уст}} = 100 \text{ рад/с}$ : 1) при  $M = 750 \text{ Нм}$ ; 2)  $M = 1000 \text{ Нм}$ ; 3)  $M = 1500 \text{ Нм}$ .

**Задача 3.** Определить требуемый момент двигателя при пуске и торможении привода лебедки (см. рис.2) с постоянным ускорением  $\varepsilon = d\omega/dt = 100 \text{ рад/с}^2$ . Данные привода:  $M_{c,\text{гр}} = 500 \text{ Нм}$ ;  $M_{c0} = 50 \text{ Н.м}$ ;  $\omega_{\text{уст}} = 100 \text{ рад/с}$ ;  $t_n = t_r = 1 \text{ с}$ ,  $J_{\text{дв}} \delta = 2 \text{ кгм}^2$ ;  $J_{\text{пр}} = 3 \text{ кгм}^2$   $J_{\text{пр0}} = 0,6 \text{ кгм}^2$ .

Найти  $M_{\text{п(т)}} = M_c + M_{\text{дин}}$  при: 1) подъеме груза ( $M_{\text{п(т)\uparrow}}$ ); 2) подъеме крюка без груза ( $M_{\text{п0(т0)\uparrow}}$ ); 3) остановке привода при опускании

нии груза ( $M_{п(т)↓}$ ); 4) остановке привода при опускании крюка без груза ( $M_{п0(т0)↓}$ ).

### 3. НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ И ВЫБОР МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИВОДОВ

Для расчета мощности электропривода используются нагрузочные диаграммы и диаграмма скорости (тахограмма) (рис.4).

*Нагрузочной диаграммой рабочего механизма* называется зависимость приведенного к валу двигателя статического момента  $M_c$  от времени  $M=f(t)$  ( $I=f(t)$ ;  $P=f(t)$ ). Эта диаграмма рассчитывается на основе данных, характеризующих работу механизма.

*Нагрузочная диаграмма электропривода* – это зависимость момента, развиваемого двигателем от времени. ( $M_c + M_d = f(t)$ ).

*Тахограмма* - это зависимость скорости рабочего органа машины или вала двигателя от времени  $\omega=f(t)$ .

Расчет мощности зависит от режима работы двигателя. Различают продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный режимы работы.

*При продолжительном и повторно-кратковременном режиме* для расчета мощности двигателя используют метод эквивалентных величин (тока, момента, мощности).

*Эквивалентный ток (момент, мощность)* – это соответствующие параметры (неизменные), которые вызывают такой же нагрев двигателя, как и реальные параметры, изменяющиеся при работе.

*Повторно-кратковременный режим* характеризуется (относительной) продолжительностью включения (ПВ)

$$ПВ_x = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100. \quad (25)$$

где  $t_p, t_0$  – время работы и время паузы.

В *кратковременном режиме* двигатель продолжительного режима может быть перегружен и отношение допустимой мощности нагрузки двигателя в кратковременном режиме  $P_k$  к номинальной мощности  $P_n$  в продолжительном режиме характеризуется коэффициентом механической перегрузки

$$p_m = \frac{P_k}{P_H} = \sqrt{\frac{1 + \alpha_n}{1 - e^{-t_p/T_H}} - \alpha_n}, \quad (26)$$

где  $\alpha_n = p/p_{\sim}$  – отношение постоянных потерь  $p$  к переменным потерям в двигателе  $p_{\sim}$ ,  $T_H$  – постоянная времени нагрева.

*Постоянная времени нагрева двигателя* – это время, за которое двигатель нагрелся бы до установившегося значения при условии отсутствия отдачи тепла в окружающую среду.

Зависимость между коэффициентами механической  $p_m$  и термической перегрузки  $p_T$  при пренебрежении постоянными потерями

$$p_m = \sqrt{p_T} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-t_p/T_H}}}. \quad (27)$$

**Пример 4.** Определить по заданной тахограмме и нагрузочной диаграмме рабочей машины нагрузочную диаграмму привода с предварительно выбранным двигателем. Двигатель привода имеет номинальные данные: мощность  $P_H = 50$  кВт; скорость  $\omega_H = 100$  рад/с; момент инерции двигателя с передачей  $J_{дв} \delta = 5$  кгм<sup>2</sup>, момент  $M_H = P_H/\omega_H = 500$  Нм. Момент рабочей машины  $M_M = 1250$  Нм; установившаяся скорость  $\omega_M = 20$  рад/с;  $\eta = 0,5$ .

Тахограмма рабочей машины приведена на рис.4. Время пуска  $t_n = 2$  с, время торможения  $t_T = 2$  с, время работы  $t_p = 26$  с и время паузы  $t_0 = 20$  с. Коэффициент ухудшения теплоотдачи в периоды пуска и торможения  $\gamma_t = 0,75$ ; коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при остановке  $\beta_t = 0,5$ .

Рассчитать и построить нагрузочную диаграмму привода рабочей машины при  $J_M = 62,5$  кгм<sup>2</sup>;  $J_M = 125$  кгм<sup>2</sup>;  $J_M = 250$  кгм<sup>2</sup>.

**Решение.** Момент двигателя  $M_2$  при установившемся движении привода равен приведенному к валу двигателя моменту рабочей машины  $M_c$  (см. рис.4) с учетом формулы приведения моментов

$$M_2 = M_c = \frac{M_M}{i_p \cdot \eta} = 500 \text{ Нм}, \quad (28)$$

где  $i_p = \frac{\omega_H}{\omega_M} = 5$  – общее передаточное число редуктора.

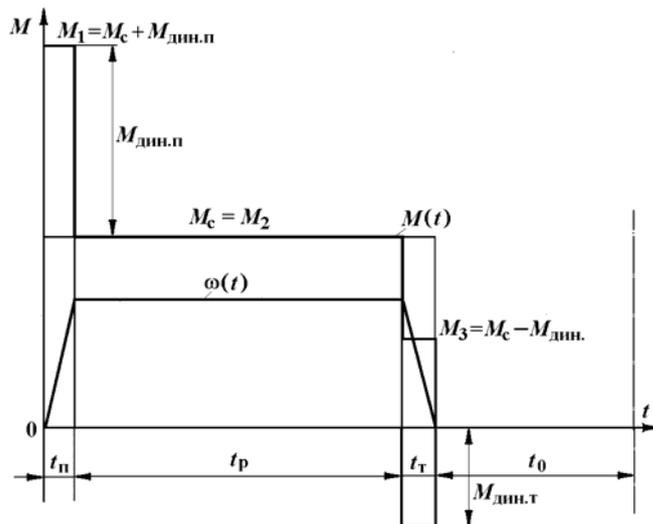


Рис.4. Тахограмма и нагрузочная диаграмма рабочей машины

2). Момент двигателя при пуске из основного уравнения движения электропривода

$$M_1 = M_c + M_{дин} = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 875 \text{ Нм.} \quad (29)$$

Ускорение согласно тахограмме

$$d\omega/dt = \omega / t_{п} = 50 \text{ рад/с}^2. \quad (30)$$

Суммарный момент инерции привода равен:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} \delta + \frac{J_{м}}{i_p^2} = 7,5 \text{ кгм}^2. \quad (31)$$

где  $J_{м}/i_p^2 = 2,5 \text{ кгм}^2$  – приведенный момент инерции механизма ( $J_{пр}$ ).

3). Момент двигателя при торможении равен

$$M_3 = M_c - J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 125 \text{ Нм.} \quad (32)$$

Замедление согласно тахограмме

$$d\omega/dt = \omega / t_{т} = 50 \text{ рад/с}^2. \quad (33)$$

4). Исходя из нагрузочной диаграммы, с учетом ухудшения теплообмена, эквивалентный момент двигателя, Нм

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_{\text{п}} + M_2^2 t_{\text{р}} + M_3^2 t_{\text{т}}}{(t_{\text{п}} + t_{\text{т}}) \gamma_t + t_{\text{р}} + \beta_t t_0}} = 45,4, \quad (34)$$

где  $\gamma_t = 0,75$  - коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при пуске и торможении;  $\beta_t = 0,5$  - коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при остановке.

5). Эквивалентная мощность

$$P_{\text{э}} = M_{\text{э}} \omega = 45,4 \text{ кВт}. \quad (35)$$

6). Сопоставляется величина эквивалентной мощности с паспортным значением мощности выбранного двигателя, кВт

$$P_{\text{э}} \leq P_{\text{н}} \quad (45,4 < 50). \quad (36)$$

7). Двигатель проверяется по допустимой перегрузке:

$$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = \frac{M_1}{M_{\text{э}}} \leq \lambda_M \quad (\lambda_M = 1,9), \quad (37)$$

где  $\lambda_M$  - коэффициент перегрузки по моменту выбранного двигателя.

**Пример 5.** Привод с двигателем мощностью  $P_{\text{н}} = 28$  кВт при  $\text{ПВ}_{\text{ст}} = 25\%$  предназначен для работы в повторно-кратковременном режиме. Цикл работы включает работу в течение  $t_{\text{р}} = 2,5$  мин с моментом на валу  $M = 300$  Нм и скоростью  $\omega = 73,3$  рад/с и паузы в течение  $t_0 = 5$  мин.

Проверить правильность выбора электродвигателя.

**Расчет.** Реальная относительная продолжительность включения двигателя при работе в повторно-кратковременном режиме

$$\text{ПВ}_x = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{р}} + t_0} \cdot 100. \quad (38)$$

Мощность на валу двигателя

$$P = M \omega. \quad (39)$$

В общем случае для определения мощности  $P_{ст}$  требуется привести реальное значение ПВ к стандартному значению  $PВ_{ст}$

$$P_{ст} = P \sqrt{\frac{ПВ_x}{ПВ_{ст}}} . \quad (40)$$

Выбранный двигатель должен иметь при  $PВ_{ст}$  мощность  $P_n$

$$P_n \geq P_{ст} . \quad (41)$$

**Пример 6.** Привод повторно-кратковременного режима работы выполнен с двигателем, имеющим следующие данные  $P_n = 100$  кВт,  $\omega_n = 100$  рад/с,  $M_n = 1000$  Нм при  $PВ_{ст} = 60$  %.

Найти мощность  $P_{н.х}$  и номинальное значение момента  $M_{н.х}$  при работе привода с  $PВ_{ст1} = 40$  %; с  $PВ_{ст2} = 25$  %; с  $PВ_{ст3} = 15$  %.

**Расчет.** Номинальное значение момента  $M_{н.х}$  для привода, работающего с продолжительностью включения  $PВ_{ст.х}$  при паспортном значении двигателя  $PВ_{ст}$  по формуле эквивалентного момента

$$M_{н.х} = M_n \sqrt{\frac{ПВ_{ст}}{ПВ_{ст.х}}} . \quad (42)$$

Мощность при новом значении продолжительности ПВ

$$P_{н.х} = M_{н.х} \omega_n . \quad (43)$$

**Пример 7.** Проверить по методу эквивалентного момента двигатель привода повторно-кратковременного режима работы по нагрузочной диаграмме, приведенной на рис.5. Данные привода:  $PВ_{ст} = 25$  %;  $P_n = 2$  кВт,  $\omega_n = 100$  рад/с,  $M_n = 20$  Нм;  $t_1 = 5$  с;  $M_1 = 25$  Нм;  $t_2 = 10$  с;  $M_2 = 17$  Нм;  $t_0 = 35$  с;  $t_{ц} = 50$  с.

Найти; 1) коэффициент продолжительности включения двигателя  $PВ_x$ , 2) эквивалентное значение момента двигателя при  $PВ_x$ , 3) эквивалентное значение момента двигателя при  $PВ_{ст} = 25$  %.

**Расчет.** Фактический коэффициент продолжительности включения двигателя при известной нагрузочной диаграмме (рис.5)

$$ПВ_x = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100 = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} 100. \quad (44)$$

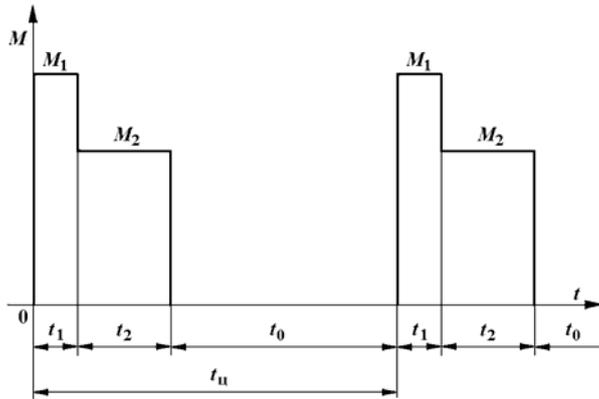


Рис.5. Диаграмма повторно-кратковременного режима

Эквивалентное значение момента при  $ПВ_x$

$$M_{ПВx} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2}{t_1 + t_2}}. \quad (45)$$

Если фактическая  $ПВ_x$  соответствует стандартной, то двигатель выбирают из условия  $M_n > M_{ПВx}$ .

Если фактическая  $ПВ_x$  не соответствует стандартной, эквивалентный момент приводят к стандартному (15, 25, 40, 60)%

$$M_{ст} = M_{ПВx} \sqrt{\frac{ПВ_x}{ПВ_{ст}}}. \quad (46)$$

**Задача 4.** Привод с двигателем ( $P_n = 15$  кВт,  $\omega_n = 100$  рад/с,  $M_n = 150$  Нм) работает по тахограмме, приведенной на рис.4. Коэффициент ухудшения теплоотдачи в периоды пуска и торможения  $\gamma_t = 0,75$ ; коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при остановке  $\beta_t = 0,5$ . Моменты  $M_1 = M_n = 200$  Нм;  $M_2 = M_p = M_c = 150$  Нм;  $M_3 = M_T = -141$  Нм.

Найти эквивалентный момент двигателя: 1) при  $t_n = 5$  с,  $t_p = 40$

$c, t_t = 5 \text{ с}, t_0 = 155 \text{ с}, 2)$  при  $\gamma_t = 1, \beta_t = 1, t_0 = 75 \text{ с}$ .

**Задача 5.** Определить коэффициент увеличения мощности двигателя продолжительного режима при работе в кратковременном режиме. Постоянная времени нагрева двигателя  $T_n = 60 \text{ мин}$ .

Найти коэффициент термической и механической перегрузки двигателя при кратковременном режиме при  $t_p = 30 \text{ мин}$  и  $t_p = 60 \text{ мин}$  (соотношение потерь  $a_n = 1$  и  $a_n = 0$ ).

#### 4. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электромеханические свойства электропривода без обратных связей в основном определяются характеристиками двигателя.

Наиболее широкое применение нашли двигатели с независимым (параллельным) возбуждением, которые и рассматриваются в пособии.

*Номинальный момент двигателя постоянного тока (ДПТ)  $M_n$ , возникающий в результате взаимодействия номинального магнитного потока  $\Phi_n$  с номинальным током якоря  $I_n$*

$$M_n = c\Phi_n I_n. \quad (47)$$

где  $c = p_0 N / 2\pi a$  – конструктивная постоянная двигателя при числе пар полюсов  $p_0$ , числе активных проводников якоря  $N$ , числе параллельных ветвей якоря  $a$ .

Для якорной цепи двигателя справедливо уравнение номинального напряжения  $U_n$ , записанное по второму закону Кирхгофа

$$U_n = E_0 + I_n R_{я}, \quad (48)$$

где  $R_{я}$  – сопротивление всей якорной цепи, состоящей из обмоток якоря ( $r_{я}$ ) и добавочного сопротивления  $R_n$ ,  $E_0$  – ЭДС обмотки якоря.

*Сопротивление обмотки якоря  $r_{я}$  для двигателей средней и большой мощности ( $P_n$ ) оценивается по формуле*

$$r_{я} = 0,5 \left(1 - \frac{P_n}{U_n I_n}\right) R_n, \quad (49)$$

где  $R_n = U_n / I_n$  – номинальное сопротивление двигателя.

Основные свойства двигателя постоянного тока оцениваются его скоростной (механической) характеристикой.

*Скоростная характеристика* – это зависимость скорости от тока якоря  $\omega = f(I)$  при  $U = \text{const}$  и потоке возбуждения  $\Phi = \text{const}$ .

$$\omega = \frac{U - r_{\text{я}}I}{c\Phi}. \quad (50)$$

*Естественной скоростной характеристикой* называют зависимость  $\omega = f(I)$  при номинальных значениях напряжения и потока и при отсутствии дополнительных сопротивлений цепи якоря

$$\omega = \frac{U_{\text{н}}}{c\Phi_{\text{н}}} - \frac{r_{\text{я}}I}{c\Phi_{\text{н}}} = \omega_0 - \frac{r_{\text{я}}I}{c\Phi_{\text{н}}} = \omega_0 - \Delta\omega \quad (51)$$

Из уравнения естественной характеристики (при  $I_{\text{н}}$ ) получают величину, которая носит название *машинная постоянная ДПТ*  $c\Phi_{\text{н}}$

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - r_{\text{я}}I_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н}}}{\omega_0}, \quad (52)$$

*номинальное значение скорости двигателя*

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 - \frac{r_{\text{я}}I_{\text{н}}}{c\Phi_{\text{н}}}, \quad (53)$$

*относительное номинальное падение скорости  $\Delta v_{\text{н}}$*

$$\Delta v_{\text{н}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{н}}}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega_{\text{н}}}{\omega_0}. \quad (54)$$

*Механическая характеристика* – это зависимость скорости от момента  $\omega = f(M)$  при  $U = \text{const}$  и потоке возбуждения  $\Phi = \text{const}$

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{M r_{\text{я}}}{c^2 \Phi^2}. \quad (55)$$

*Коэффициент крутизны  $\beta$*  является основным параметром, определяющим вид механической характеристики

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\Delta M} \frac{M_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{1}{\gamma}, \quad (56)$$

где  $\gamma$  – коэффициент жесткости механической характеристики. Механические характеристики при  $\beta=0$  абсолютно жесткие; при  $\beta \leq 0,1$  – жесткие; при  $\beta > 0,1$  – мягкие.

Жесткость механической характеристики ДПТ  $\gamma^*$ , Нс

$$\gamma^* = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{(c\Phi)^2}{R_{\text{я}}} \quad (57)$$

применяется при расчетах привода с ДПТ.

Из уравнения (50) следует, что регулировать скорость, можно, изменяя сопротивление якоря  $R_{\text{я}}$ , магнитный поток  $\Phi$ , напряжение  $U$ .

1. Искусственная реостатная характеристика 2 при введении сопротивления в цепь якоря показана на рис.6 (ниже естественной характеристики 1). *Реостатное регулирование* неэкономично и используется только при пуске.

2. Регулирование изменением магнитного потока возможно только *при ослаблении магнитного потока* из-за насыщения магнитной системы и ограничено механической прочностью ДПТ при высоких скоростях (характеристика 3 на рис.6).

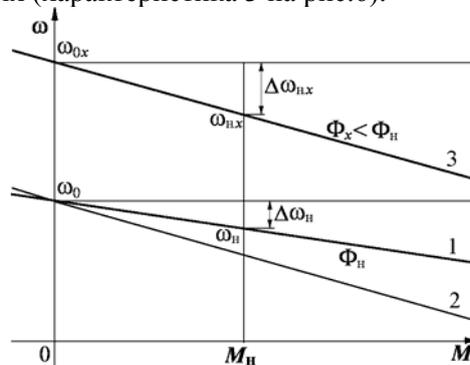


Рис.6. Естественная (1) и искусственные (2, 3) механические характеристики

Скорость идеального холостого хода обратно пропорциональна коэффициенту ослабления магнитного потока  $\alpha_{\Phi}$

$$\omega_{0x} = \frac{U_{\text{н}}}{\alpha_{\Phi} c\Phi_{\text{н}}} \quad (58)$$

Относительное номинальное падение скорости  $\Delta v_{н.х}$  при номинальной нагрузке  $M_n$  и ослабленном магнитном потоке  $\alpha_\phi \Phi_n$

$$\Delta v_{н.х} = \frac{\Delta \omega_{н.х}}{\omega_{0х}} = \frac{r_я M_n}{\omega_{0х} (\alpha_\phi c \Phi_n)^2}. \quad (59)$$

3. Для регулирования напряжения двигателя используется генератор (система Г-Д) или статический преобразователь (ТП-Д). Система ТП-Д обеспечивает широкий диапазон регулирования  $\omega$ .

*Переходный процесс* – это процесс перехода привода из одного установившегося режима работы в другое установившееся состояние. Это происходит при пуске, изменении нагрузки на валу двигателя, торможении, реверсе и т.п.

*Режим динамического торможения* (ДТ) осуществляется отключением двигателя от сети и включением в цепь якоря сопротивления (двигатель работает как автономный генератор).

*Режим торможения противовключением* (ПВ) реализуется путем изменения на ходу полярности напряжения якоря или обмотки возбуждения ДПТ (ПВ первого рода).

*Режим рекуперативного генераторного торможения* возможен, если скорость превысит скорость холостого хода ( $\omega > \omega_0$ ).

Переходные процессы зависят от характера объекта. Если система нелинейная, проводится компьютерное моделирование []. В случае линейной электромеханической системы, состоящей из ДПТ с линейной механической характеристикой и жесткого механического звена возможен анализ процессов аналитическими методами.

Совместное решение уравнений движения электропривода (29) и механической характеристики (55) дает уравнение переходных процессов системы «двигатель с линейной механической характеристикой – жесткое механическое звено», определяемых механической инерционностью электропривода

$$\frac{J_\Sigma r_я}{(c \Phi_n)^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст}, \quad (60)$$

где  $\omega_{уст} = \omega_0 - (M_c r_я / (c \Phi_n)^2)$  – установившееся значение скорости электропривода после окончания переходного процесса ( $M = M_c$ ).

Решением (60) является переходная характеристика

$$\omega = \omega_{уст} - (\omega_{уст} - \omega_{нач}) \exp(-t/T_M) . \quad (61)$$

где  $T_M = J_{\Sigma} r_{я} / (c\Phi_n)^2$  – электромеханическая постоянная времени,  $\omega_{нач}$  – начальная скорость.

При нулевых начальных условиях

$$\omega = \omega_{уст} (1 - \exp(-t/T_M)) . \quad (62)$$

**Пример 8.** Определить ЭДС генератора, питающего цепь якоря двигателя по схеме генератор – двигатель (Г-Д) рис.7, для получения требуемой скорости двигателя при заданной нагрузке.

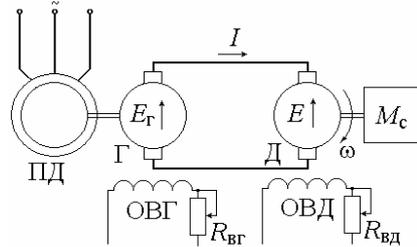


Рис.7. Электропривод по системе генератор-двигатель

Данные машин системы Г-Д: генератор:  $P_{нг} = 8,8$  кВт;  $U_{нг} = 220$  В;  $I_n = 40$  А;  $r_{яг} = 0,5$  Ом; двигатель:  $P_{нд} = 8,0$  кВт;  $\omega_n = 90$  рад/с;  $U_{нд} = U_{нг} = U_n = 220$  В;  $I_n = 40$  А;  $r_{яд} = 0,5$  Ом.

Схема и характеристики привода Г-Д приведены на рис.7, 8.

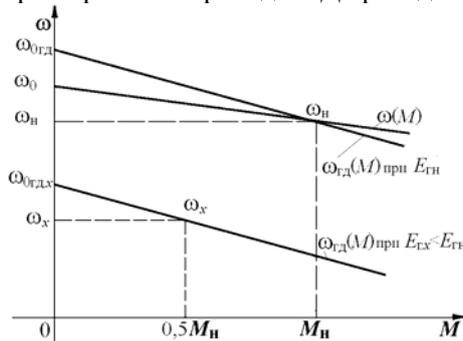


Рис.8. Механические характеристики электропривода Г-Д

1. Определить машинную постоянную двигателя  $c\Phi_n$  и скорость холостого хода двигателя  $\omega_{0гд}$  в системе Г-Д.

2. Найти номинальное значение ЭДС генератора  $E_{гн}$  для получения номинальной скорости двигателя  $\omega_{гд} = \omega_n = 90$  рад/с.

3. Найти ЭДС генератора  $E_{г.х}$  для получения скорости привода в системе Г-Д  $\omega_x = 0,5\omega_n$  при  $M_{с.х} = 0,5M_n$ .

**Решение.** Машинная постоянная двигателя  $c\Phi_n$  при  $r_я = r_{яд}$

$$c\Phi_n = (U_{нд} - r_{яд} I_n) / \omega_n = 2,22 \text{ Вб.} \quad (63)$$

Падение скорости в системе Г-Д при номинальной нагрузке

$$\Delta\omega_{гдн} = \frac{I_n (r_{яд} + r_{яг})}{c\Phi_n} = 18 \text{ рад/с,} \quad (64)$$

где  $r_{яд}$ ,  $r_{яг}$  – сопротивления цепи якоря двигателя и генератора (рис.7).

Скорость холостого хода системы Г-Д при  $E_{гн}$  (рис.8)

$$\omega_{0гд} = \Delta\omega_{гдн} + \omega_n = 108 \text{ рад/с.} \quad (65)$$

ЭДС генератора  $E_{гн}$  для получения в системе Г-Д номинальной скорости

$$E_{гн} = \omega_{0гд} c\Phi_n = 240 \text{ В.} \quad (66)$$

ЭДС генератора для получения скорости привода  $\omega_x = 0,5\omega_n$  при  $M_{с.х} = 0,5M_n$ .

$$E_{г.х} = \omega_{0гд.х} c\Phi_n = 0,5 c\Phi_n (\omega_n + \Delta\omega_{гдн}) = 120 \text{ В.} \quad (67)$$

**Пример 9.** Определить ослабление магнитного потока двигателя при регулировании скорости по системе Г-Д для получения повышенной скорости привода при уменьшении нагрузки.

Данные машин системы Г-Д: генератор:  $U_{нг} = 220$  В;  $I_n = 40$  А;  $r_{яг} = 0,05$  Ом; двигатель:  $\omega_n = 90$  рад/с;  $U_{нд} = 220$  В;  $I_n = 40$  А;  $r_{яд} = 0,05$  Ом, характеристики даны на рис.6.

1. Найти машинную постоянную, номинальное сопротивление двигателя и абсолютное и относительное сопротивление цепи якорей системы Г-Д  $c\Phi_n$ ;  $R_n$ ;  $\rho$ .

2. Найти уменьшение относительного магнитного потока двига-

теля  $\varphi_x$ . для относительной скорости привода  $v_x = 1,4$  при относительной нагрузке  $\mu_x = 0,5$ .

**Решение.** Для вычисления уменьшения относительного магнитного потока двигателя  $\varphi_x$ . для заданной скорости и нагрузки привода используется система относительных параметров

$$u = \frac{U}{U_H}, \quad v = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \mu = \frac{M}{M_H}, \quad \varphi = \frac{c\Phi}{c\Phi_H}, \quad \rho = \frac{r_{я}}{R_H} = 0,02, \quad (68)$$

где  $r_{я} = r_{яд} + r_{яг} = 0,1$  Ом;  $R_H = \frac{U_H}{I_H} = 5$  Ом;  $c\Phi_H = \frac{U_H}{\omega_0}$ .

Уравнение механической характеристики имеет вид (55).

В относительных единицах уравнение механической характеристики при  $U = U_H$

$$v_x = \frac{1}{\varphi_x} - \frac{\rho\mu_x}{\varphi_x^2}, \quad (69)$$

откуда уменьшение магнитного потока двигателя, учитывая решение, имеющее физический смысл ( $v_x = 1,4$ ;  $\mu_x = 0,5$ )

$$\varphi_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_H} = \frac{1 + \sqrt{1 - 4\rho v_x \mu_x}}{2v_x} = 0,71. \quad (70)$$

**Пример 10.** Для привода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПТНВ) с реостатно-релейным управлением (рис.9) рассчитать величины ступеней пусковых сопротивлений. Номинальные значения параметров двигателя:  $P_H = 8,5$  кВт;  $U_H = 220$  В;  $I_H = 44$  А;  $\omega_H = 94$  рад/с. Максимальный пиковый момент двигателя при пуске  $\mu_1 = 2$ . Относительные значения момента переключения ступеней пускового сопротивления  $\mu_2 = 1$ , статического момента нагрузки  $\mu_c = 0,8$ .

1. Определить скорость идеального холостого хода двигателя  $\omega_0$  и построить в долях величинах естественную механическую характеристику двигателя  $v = f(\mu)$ .

2. Найти число ступеней пуска  $m$  и построить характеристики реостатного пуска (рис.10).

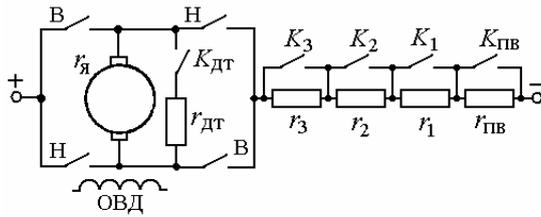


Рис.9. Схема электропривода с реостатно-релейным управлением

3. Определить номинальное сопротивление двигателя  $R_n = U_n / I_n$ , сопротивление якоря  $r_я$ , найти значения ступеней  $r_1, r_2, \dots, r_m$  и полное сопротивление пускового реостата  $r_{полн}$ .

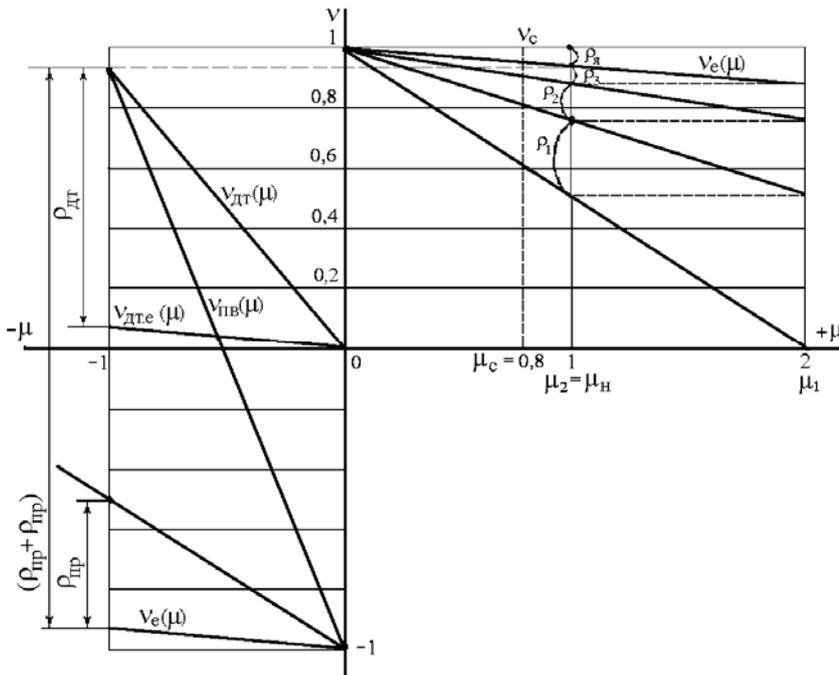


Рис.10. Механические пусковые и тормозные характеристики ДПТНВ

**Решение.** Для расчета величин ступеней пусковых сопротивлений (форсированный пуск) определяют следующие параметры (рис.9).

Номинальное сопротивление двигателя  $R_n$

$$R_n = U_n / I_n = 5 \text{ Ом.} \quad (71)$$

Сопротивление якоря двигателя  $r_y$

$$r_y = 0,5 \left(1 - \frac{P_n}{U_n I_n}\right) R_n = 0,3 \text{ Ом.} \quad (72)$$

Скорость холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_n}{U_n - I_n r_y} \omega_n = 100 \text{ рад/с.} \quad (73)$$

Машинная постоянная двигателя  $c\Phi_n$  определяется по (52).

$$c\Phi_n = (U_n - r_y I_n) / \omega_n = 2,2 \text{ Вб.}$$

Приближенно число ступеней реостата  $m$  при заданном значении  $\rho = \frac{r_y}{R_n} = 0,06$  находят, исходя из отношения пиковых моментов к моментам переключения

$$\lambda = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \sqrt[m]{\frac{1}{\mu_1 \rho}} = \sqrt[3]{\frac{1}{\mu_1 \rho}} = 2,02. \quad (74)$$

При числе ступеней  $m = 3$  отношение моментов  $\lambda \approx 2$ . Следовательно, корректировку  $\mu_1, \mu_2$ , (при соблюдении условий  $\mu_1 = 2 \dots 2,2$ ,  $\mu_2 = (1 \dots 1,2) \mu_c$ ) можно не проводить, приняв  $\lambda = 2, m = 3$ .

Сопротивления ступеней реостата по принятой величине  $\lambda$

$$r_m = r_y (\lambda - 1), \quad r_{m-1} = r_m \lambda, \quad r_{m-2} = r_{m-1} \lambda, \dots, \quad r_1 = r_2 \lambda. \quad (75)$$

Сопротивления ступеней реостата при  $m = 3$

$$r_3 = r_y (\lambda - 1) = 0,3; \quad r_2 = r_3 \lambda = 0,61; \quad r_1 = r_2 \lambda = 1,22 \text{ (Ом)}. \quad (76)$$

Относительные сопротивления ступеней  $\rho_i = \frac{r_i}{R_n}$  (см. рис.10).

Полное сопротивление реостата при  $m = 3$

$$r_{\text{полн}} = r_1 + r_2 + r_3 = 2,13 \text{ Ом.} \quad (77)$$

Сопротивление якорной цепи

$$r_{\text{общ}} = r_{\text{я}} + r_{\text{полн}} = 2,44 \text{ Ом.} \quad (78)$$

**Пример 11.** Для привода постоянного тока с реостатно-релейным управлением (см. рис.9) рассчитать степень сопротивления для торможения противовключением и для динамического торможения. Характеристики приведены на рис.10. Номинальные значения параметров двигателя:  $P_n = 8,5$  кВт;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 44$  А;  $r_{\text{я}} = 0,3$  Ом;  $\omega_0 = 100$  рад/с;  $\omega_n = 94$  рад/с. Двигатель переключается в тормозной режим противовключения или динамического торможения при  $\mu_c = 1$  и  $v = v_n$ . Максимальный тормозной момент при переключении  $\mu_t = 1$ . Пусковые характеристики рассчитаны для максимального значения момента при пуске с  $\mu_1 = 2$ .

1. Определить номинальное сопротивление двигателя  $R_n$ , рассчитать относительное сопротивление цепи якоря  $\rho = r_{\text{я}}$  и определить полное (без разбивки на ступени) сопротивление пуска  $\rho_{\text{полн}}$ .

2. Построить механические характеристики двигателя  $v=f(\mu)$  в долевых величинах при переключении в режим торможения противовключением или режим динамического торможения.

3. Определить величины добавочных сопротивлений ступени противовключения и динамического торможения  $\rho_{\text{пв}}$  и  $\rho_{\text{дт}}$ .

**Расчет.** Для привода постоянного тока с реостатно-релейным управлением при расчете величин ступеней сопротивлений торможения (см. рис.9) определяются следующие параметры.

Номинальное сопротивление двигателя  $R_n$  по формуле (71).

Относительное сопротивление цепи якоря

$$\rho = \frac{r_{\text{я}}}{R_n}. \quad (79)$$

Полное сопротивление  $\rho_{\text{полн}}$ .

$$\rho_{\text{полн}} = \frac{c\Phi_n \omega_0}{\mu_1 I_n R_n} = \frac{1}{\mu_1}. \quad (80)$$

Величина добавочного сопротивления (см. рис. 10) ступени динамического торможения  $r_{\text{дт}}$  и  $\rho_{\text{дт}} = r_{\text{дт}}/R_n$

$$r_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{нач}}}{I_{\text{доп}}} - r_{\text{я}}, \quad (81)$$

где  $U_{\text{нач}}$  – напряжение двигателя в начальный момент торможения ( $U_{\text{нач}} \approx U_n$ );  $I_{\text{доп}}$  – максимально допустимый ток ( $I_{\text{доп}} \approx I_n, \mu_{\text{max}} = -1$ ).

Величина добавочного сопротивления ступени торможения противовключением  $r_{\text{пв}}$  и  $\rho_{\text{пв}} = r_{\text{пв}}/R_n$

$$r_{\text{пв}} = \frac{U_n + U_{\text{нач}}}{I_{\text{доп}}} - r_{\text{я}}. \quad (82)$$

**Пример 12.** Определить, какой характер будут иметь переходные процессы при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения вхолостую с приложением через 2,66 с номинального момента нагрузки (рис.11). Пуск производится подачей номинального напряжения на якорь двигателя с включенной обмоткой возбуждения. Для ограничения пускового тока в цепь якоря двигателя на время пуска введено добавочное сопротивление, ограничивающее максимальное значение тока при пуска  $I_n = 2,5I_n$ . Данные двигателя: мощность  $P_n = 6,5$  кВт, номинальная скорость вращения  $\omega_n = 104,5$  рад/с, номинальное напряжение  $U_n = 220$  В; номинальный ток якоря  $I_n = 33,5$  А; сопротивление цепи якоря  $r_{\text{я}} = 0,77$  Ом; индуктивность якоря  $L_{\text{я}} = 0,01$  Гн; момент инерции привода  $J_{\Sigma} = 1,0$  кгм<sup>2</sup>.

Считать систему, состоящей из двигателя с линейной механической характеристикой и жесткого механического звена.

1. Найти электромеханические постоянные времени  $T_{\text{м.п.}}$ ,  $T_{\text{м}}$  в пусковом режиме и при приложении номинальной нагрузки.

2. Построить характеристики переходного процесса, считая, что процесс устанавливается за время  $t = 3,5T_{\text{м}}$ .

**Расчет.** Расчет переходных процессов пуска привода постоянного тока вхолостую и приложения номинального момента нагрузки

(см. рис.11) начинается с определения номинального момента двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} . \quad (83)$$

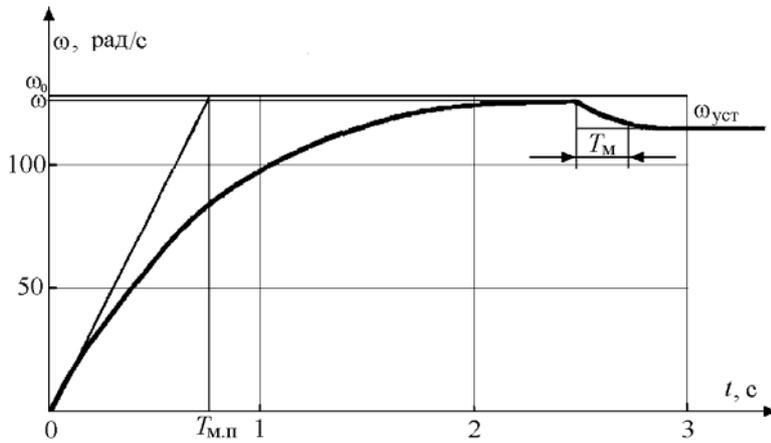


Рис.11. Характеристики при пуске и приложении нагрузки

Машинная постоянная двигателя из моментной характеристики

$$c\Phi_n = \frac{M_n}{I_n} . \quad (84)$$

Скорость холостого хода  $\omega_0$  определяется уравнением (52).

Добавочное сопротивление, вводимое в цепь якоря, равно

$$R_{доб} = \frac{U_n}{I_n} - r_{я} . \quad (85)$$

Максимальный момент при пуске с ограничением тока

$$M_k = 2,5M_n . \quad (86)$$

Жесткость естественной механической характеристики

$$\gamma_e^* = \frac{(c\Phi_n)^2}{r_{\text{я}}}. \quad (87)$$

Жесткость пусковой механической характеристики

$$\gamma_{\text{п}}^* = \frac{(c\Phi_n)^2}{r_{\text{я}} + R_{\text{п}}}. \quad (88)$$

Электромеханическая постоянная времени при работе на естественной характеристике

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\Sigma}}{\gamma_e^*}. \quad (89)$$

Электромеханическая постоянная времени при работе на пусковой характеристике

$$T_{\text{м.п}} = \frac{J_{\Sigma}}{\gamma_{\text{п}}^*}. \quad (90)$$

Электромагнитная постоянная времени при работе на естественной характеристике

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}. \quad (91)$$

При  $T_{\text{я}} \ll T_{\text{м}}$ , первой можно пренебречь.

С учетом уравнения (90) решением (60) при пуске вхолостую (нулевые начальные условия) является переходная характеристика

$$\omega = \omega_0 (1 - \exp(-t/T_{\text{м.п}})). \quad (92)$$

После разгона на холостом ходу при установлении  $R_{\text{п}}=0$ , к валу двигателя приложен момент нагрузки  $M_{\text{с}} = M_{\text{н}}$  (см. рис.10). Установившееся значение скорости после приложения нагрузки

$$\omega_{\text{уст}} = \omega_0 - \frac{M_{\text{с}}}{\gamma_e^*}. \quad (93)$$

Для построения переходного процесса изменения скорости, обусловленного приложением нагрузки, с учетом (89) используется уравнение (60) при начальных условиях  $\omega_{нач} = \omega_0$

$$\omega = \omega_{уст} - (\omega_{уст} - \omega_0) \exp(-t/T_M) . \quad (94)$$

**Задача 6.** Определить параметры двигателя постоянного тока по паспортным данным двигателя. Данные двигателя: мощность  $P_n = 40$  кВт, скорость  $\omega_n = 100$  рад/с, момент  $M_n = 400$  Нм; напряжение  $U_n = 220$  В; ток  $I_n = 200$  А. Возбуждение двигателя независимое или параллельное. (Естественная характеристика 1 и искусственная характеристика 3 при ослабленном потоке  $\Phi < \Phi_n$  двигателя показаны на рис.6).

1. Определить номинальное сопротивление двигателя  $R_n = U_n/I_n$ , относительное и омическое сопротивления цепи якоря двигателя  $\rho, r_a$ .

2. Найти машинную постоянную двигателя постоянного тока (ДПТ)  $c\Phi_n$  и скорость идеального холостого  $\omega_{0н}$ .

3. Определить относительное падение скорости двигателя при номинальной нагрузке  $\Delta v_n = \Delta\omega_n/\omega_n$  (см. рис.6).

4. Найти относительное номинальное падение скорости  $\Delta v_{н.х}$  при номинальной нагрузке  $M_n$  и магнитном потоке  $\alpha_\Phi\Phi_n = 0,5 \Phi_n$ .

**Задача 7.** Определить номинальные значения скорости и момента двигателя постоянного тока, если известны его напряжение, ток, скорость холостого хода и сопротивление цепи якоря. Данные двигателя:  $U_n = 220$  В;  $I_n = 200$  А;  $\omega_0 = 109$  рад/с;  $r_a = 0,05$  Ом.

Найти: 1) машинную постоянную двигателя  $c\Phi_n$ ; 2) номинальную скорость вращения двигателя  $\omega_n$ ; 3) номинальный электромагнитный момент двигателя  $M_n$ .

## 5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основным типом электродвигателя привода переменного тока является асинхронный трехфазный двигатель (АД) – с короткозамкнутым или фазным ротором. При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока в АД возникает вращающееся магнитное поле статора, угловая скорость которого определяется только числом пар полюсов  $p$  и частотой тока статора  $f_1$  и называется *синхронной скоростью*  $\omega_1 = \omega_0$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (95)$$

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. Если роторная обмотка замкнута, то возникающий в ней ток  $I_2$  во взаимодействии с магнитным полем статора  $\Phi$  создаст вращающий момент  $M$ .

Для возникновения вращающего момента необходимо, чтобы ротор вращался со скоростью  $\omega$ , отличной от скорости поля.

Скольжение  $s$  характеризует разницу скоростей  $\omega_0$  и  $\omega$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (96)$$

Связь между моментом и скольжением имеет вид

$$M = \frac{3pU_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[ (r_1 + r'_2/s)^2 + (x'_2 + x_1)^2 \right]}, \quad (97)$$

где  $r_1, r'_2$  – активные сопротивления фазы статорной и роторной, приведенной к напряжению статора, обмоток;  $x_1, x'_2$  – индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора;  $U_1$  – фазное напряжение. Зависимость  $M=f(s)$ , также как и зависимость  $\omega=f(M)$ , называется механической характеристикой АД.

Механическая характеристика АД общего применения нелинейная и имеет максимум, характеризующийся критическими значениями момента и скольжения  $M_{кр}, s_{кр}$ . Построение характеристики затруднено, к тому же в формулу для момента входят параметры схемы замещения АД, которые в каталоге отсутствуют.

Основные параметры двигателя могут быть вычислены.

Номинальное сопротивление АД с фазным ротором ( $R_{2н}$ )

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3}I_{2н}}. \quad (98)$$

Номинальный момент  $M_n$  АД вычисляется по формуле (83).

Критический момент находится через коэффициент  $k_{м.к}$  перегрузки

$$M_k = k_{м.к} M_n. \quad (99)$$

*Критическое скольжение  $s_k$*

$$s_k = s_H \left( k_{M.K} + \sqrt{k_{M.K}^2 - 1} \right). \quad (100)$$

*Пусковой момент АДФР без сопротивления в цепи ротора*

$$M_{II} = 2 \cdot M_K \left/ \left( s_k + \frac{1}{s_k} \right) \right. . \quad (101)$$

*Отношение пускового момента к номинальному  $\mu_{п.е} = M_{II}/M_H$ .*

*Коэффициент трансформации ЭДС от статора к ротору*

$$k_T = \frac{E_{1H}}{E_{2H}} = \frac{0,95U_{1H}}{E_{2H}}. \quad (102)$$

*Приведенное сопротивление фазного ротора*

$$r_2' = r_2 k_T^2 = R_{2H} s_H k_T^2. \quad (103)$$

При прямом пуске АД пусковой ток характеризуется кратностью  $k_i$

$$I_{II} = k_i I_H = (4 \dots 7) I_H. \quad (104)$$

*Регулирование скорости* возможно изменением числа пар полюсов, изменением скольжения за счет введения сопротивления (реактора) в цепь статора. Первый способ дает дискретное регулирование, а второй является неэкономичным и применяется при малых мощностях или при пуске АД. Наиболее перспективен частотный способ путем изменения частоты и напряжения АД.

Регулирование скорости АД с фазным ротором возможно путем введения сопротивления в цепь ротора и индуктивного сопротивления в цепь статора. Критический момент двигателя с добавочным индуктивным сопротивлением в цепи статора  $x_{1д}$

$$M_{K.x} = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot [(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{1д} + x_2')^2}]}. \quad (105)$$

Критическое скольжение с добавочными сопротивлениями в цепи статора и ротора  $r_{2д}, x_{1д}$

$$s_{к.х} = +(r'_{2} + r'_{2д}) / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{1д} + x'_{2})^2}. \quad (106)$$

Следовательно, скольжение  $s_{н.х}$  при номинальной нагрузке с дополнительными сопротивлениями (из формулы Клосса)

$$M_{н} = 2 \cdot M_{к} / \left( \frac{s_{к.х}}{s_{н.х}} + \frac{s_{н.х}}{s_{к.х}} \right), \quad (107)$$

где номинальный момент двигателя  $M_{н}$  находится по (83), откуда

$$s_{н.х}^2 - \frac{2M_{к.х} s_{к.х}}{M_{н}} s_{н.х} + s_{к.х}^2 = 0. \quad (108)$$

Таким образом, скорость при включенных сопротивлениях

$$\omega_{н.х} = \omega_0 (1 - s_{н.х}). \quad (109)$$

АД как и ДПТ может работать в трех тормозных режимах.

*Динамическое торможение* АД характеризуется тем, что статорные обмотки отключаются от сети переменного тока и подключаются к сети постоянного тока.

*Для торможения противовключением* надо поменять местами две любые фазы статора. В фазный ротор вводится сопротивление.

**Пример 13.** Для привода переменного тока центробежного насоса с трехфазным асинхронным двигателем (АД), пускаемым через реактор по схеме (рис.12), определить величину добавочного индуктивного сопротивления реактора  $x_p$ . Номинальные данные асинхронного двигателя:  $P_{н} = 26$  кВт;  $U_{н} = 380$  В;  $I_{н} = 44$  А;  $\cos\varphi_{н} = 0,9$ ;  $\omega_{н} = 100$  рад/с;  $k_i = I_{п}/I_{н} = 5$ ;  $k_{м.к} = M_{к}/M_{н} = 2$ . В режиме короткого замыкания  $\cos\varphi_{кз} = 0,6$ . Характеристики пуска показаны на рис.13.

1. Найти полное сопротивление короткозамкнутого асинхронного двигателя  $z_{кз}$  и его активную и реактивную составляющие  $z_{кз} = r_{кз} + jx_{кз}$ .

2. Для заданного снижения пускового момента при реакторном пуске  $\mu_{п.х} = 0,5\mu_{п.е}$  определить пусковой ток  $I_{п.х}$  и полное сопро-

тивление  $z_{к3,x}$  короткозамкнутого двигателя при реакторном пуске.

3. Определить сопротивление реактора  $x_p$  для заданных условий пуска привода с асинхронным короткозамкнутым двигателем.

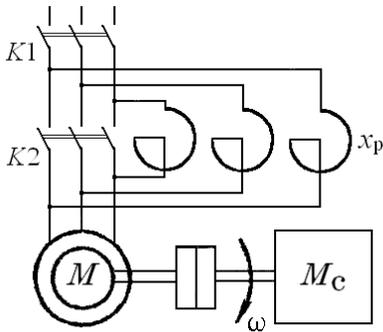


Рис. 12. Схема реакторного пуска АД

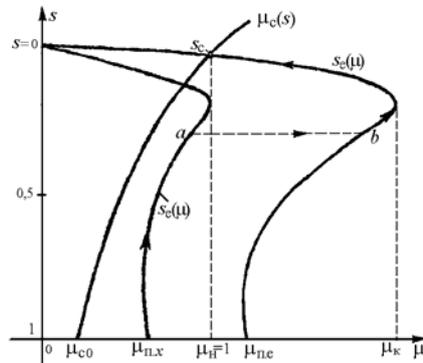


Рис. 13. Характеристики пуска

**Решение.** Определение сопротивления пускового реактора (см. рис. 12) начинается с расчета пускового тока асинхронного двигателя

$$I_{п} = k_t I_n = 220 \text{ А.} \quad (110)$$

Полное сопротивление  $z_{к3} = r_{к3} + jx_{к3}$  короткозамкнутого асинхронного двигателя и его активная и реактивная составляющие, Ом

$$z_{к3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{п}} = 1; \quad r_{к3} = z_{к3} \cos \varphi_{к3} = 0,6; \quad x_{к3} = \sqrt{z_{к3}^2 - r_{к3}^2} = 0,8. \quad (111)$$

Допустимый коэффициент снижения пускового тока  $a_T$  по заданному снижению пускового момента  $\mu_{п,x}$  ( $\mu_{п,x} = 0,5\mu_{п,e}$ )

$$a_T = \sqrt{\frac{\mu_{п,x}}{\mu_{п,e}}} = 0,71. \quad (112)$$

Ток при пуске с реактором в статорной цепи двигателя

$$I_{п,x} = a_T I_{п} = 155,6 \text{ А.} \quad (113)$$

Полное сопротивление статорной цепи асинхронного короткозамкнутого двигателя при реакторном пуске  $z_{к3,x}$

$$z_{кз.х} = \frac{U_{н}}{\sqrt{3}I_{п.х}} = 1,41 \text{ Ом.} \quad (114)$$

Сопротивление реактора  $x_p$  для заданных условий пуска привода с асинхронным короткозамкнутым двигателем при неизменном значении  $r_k$  (см.рис.13)

$$x_p = \sqrt{z_{кз.х}^2 - r_{кз}^2} - x_{кз} = 0,48 \text{ Ом.} \quad (115)$$

**Пример 14.** Для привода с асинхронным двигателем с фазным ротором и реостатно-релейным управлением рис.14 построить статические характеристики реостатного пуска и рассчитать ступени пускового реостата рис.15. Номинальные данные асинхронного двигателя привода:  $P_{н} = 22 \text{ кВт}$ ;  $U_{1н} = 380 \text{ В}$ ;  $I_{1н} = 50 \text{ А}$ ;  $\omega_0 = 104,7 \text{ рад/с}$ ;  $s_{н} = 0,0625$ <sup>1</sup>;  $k_{м.к} = M_{к}/M_{н} = 3$ ;  $\cos\varphi_{н} = 0,85$ ;  $E_{2н} = 173 \text{ В}$ ;  $I_{2н} = 100 \text{ А}$ .

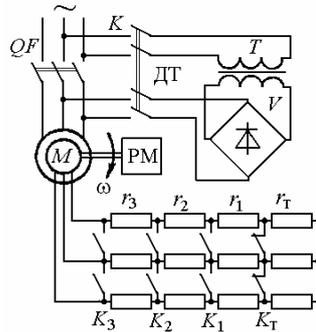


Рис.14. Схема реостатно-релейного пуска и торможения АДФР

Двигатель пускается в три ступени ( $m = 3$ ) при максимальном моменте при пуске  $\mu_1 = 2$  и минимальном  $\mu_2 = 1$ . Для динамического торможения (ДТ) двигателя обмотки статора подключаются к сети через трансформатор  $T$  и выпрямитель  $V$ .

1. Определить при  $r_{1с} \approx 0$ : сопротивление ротора  $r_{2п}$  при  $s=s_{н}$ , полное сопротивление пускового реостата  $r_{1+m}$  при  $s_{н} = 1$  и коэффициент отношения моментов двигателя при реостатном пуске  $\lambda =$

<sup>1</sup> Принято для упрощения построений. Типичное скольжение  $s_{н} = 0,02 \dots 0,05$ .

$\mu_1/\mu_2$ .

2. Рассчитать приближенным аналитическим методом ступени пускового реостата  $R_1, R_2, R_3$  при  $m=3, \lambda=2$ .

3. Построить график линейных пусковых характеристик асинхронного привода при найденных значениях моментов переключения  $\mu_1, \mu_2$  и относительных сопротивлений ступеней пускового реостата  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ .

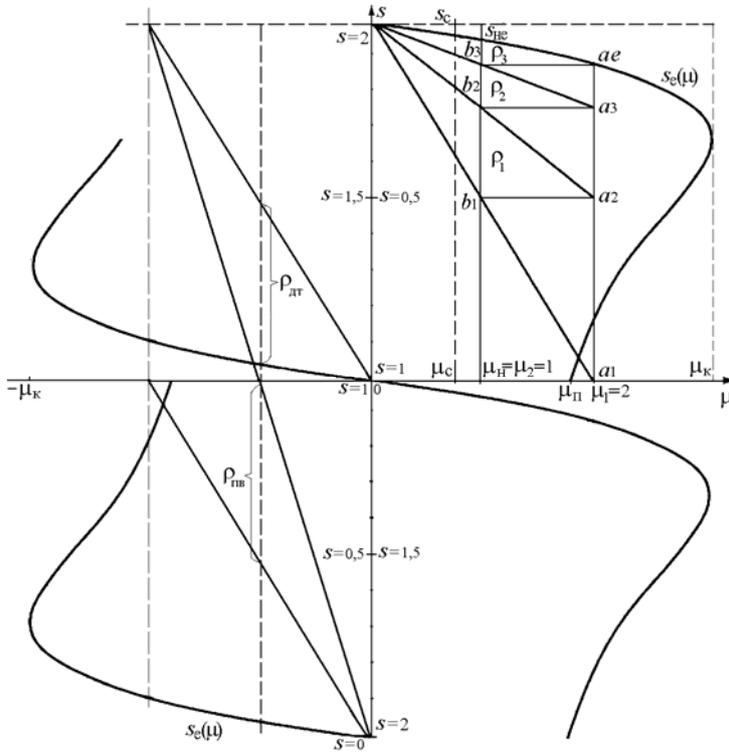


Рис.15. Механические пусковые и тормозные характеристики АДФР

**Расчет.** Вычисление пусковых сопротивлений (рис. 14) приближенным методом основано на прямолинейности рабочей части механических характеристик АД и аналогичен расчету для двигателя постоянного тока при  $\rho_i = s_i$  (см. рис. 15).

Номинальное сопротивление асинхронного двигателя с фазным ротором  $R_{2н}$  вычисляется по формуле (98).

Активное сопротивление ротора

$$r_{2p} = \frac{E_{2н} s_n}{\sqrt{3} I_{2н}}. \quad (116)$$

Относительное значение сопротивления фазы ротора

$$\rho = \frac{r_{2p}}{R_{2н}}. \quad (117)$$

При заданном числе ступеней  $m$  по формуле (74) проверяется отношение пиков моментов к моментам переключения  $\lambda = \mu_1/\mu_2$

Сопротивления ступеней реостата

$$r_m = r_{2p}(\lambda - 1), \quad r_{m-1} = r_m \lambda, \quad r_{m-2} = r_{m-1} \lambda, \dots, \quad r_1 = r_2 \lambda. \quad (118)$$

Сопротивления ступеней реостата при  $m = 3$

$$r_3 = r_{2p}(\lambda - 1); \quad r_2 = r_3 \lambda; \quad r_1 = r_2 \lambda. \quad (119)$$

Полное сопротивление пускового реостата

$$r_{п.р} = r_1 + r_2 + r_3 = \frac{E_{2н}(1 - 2s_n)}{\sqrt{3} I_{2н} \mu_1}. \quad (120)$$

Значения относительных сопротивлений ступеней пускового реостата  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$

$$\rho_i = \frac{r_i}{R_{2н}}. \quad (121)$$

Полное сопротивление роторной цепи

$$r_{2р.п} = r_{2p} + r_1 + r_2 + r_3. \quad (122)$$

Критическое скольжение  $s_k$  для естественной характеристики находится из уравнения (100).

**Пример 15.** Определить вид переходных процессов и по-

строить характеристики изменения момента и скорости двигателя при реостатно-релейном пуске привода с асинхронным двигателем при постоянном моменте нагрузки ( $\mu_1 = \text{const}$ ). Двигатель имеет данные:  $P_n = 22$  кВт;  $\omega_0 = 104,5$  рад/с;  $s_n = 0,0625$ ;  $J_d \delta = 0,5$  кгм<sup>2</sup>. Приведенные параметры механизма:  $M_c = 0,5M_n$ ,  $J_{пр} = 0,5$  кгм<sup>2</sup>. Привод пускается в три ступени при  $\mu_1 = 2$  и  $\mu_2 = 1$  (см. пример 14). Механические характеристики и характеристики пуска приведены на рис.15, 16.

1. Найти величину электромеханической постоянной времени привода на естественной характеристике  $T_{ме}$ , и на всех ступенях пуска  $T_{M1}$ ,  $T_{M2}$ ,  $T_{M3}$ .

2. Определить время пуска на каждой реостатной ступени и полное время пуска привода  $t_{п1}$ ,  $t_{п2}$ ,  $t_{п3}$ ,  $t_{п}$ .

3. Записать уравнения изменения скорости и момента двигателя на всех ступенях пуска и построить динамические характеристики изменения скорости и момента двигателя при пуске  $M=f(t)$  и  $\omega=f(t)$ .

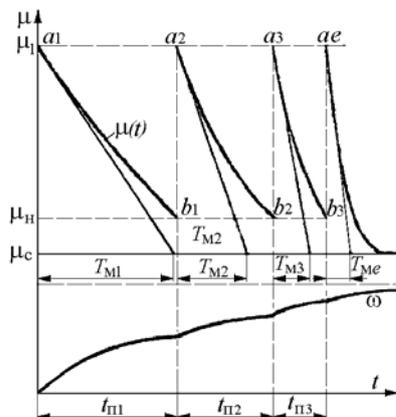


Рис.16. Диаграммы реостатного пуска привода с АД

**Расчет.** При расчете характеристик изменения момента и скорости двигателя при реостатно-релейном пуске привода с асинхронным двигателем (рис.14) значения номинальных скольжений для ступеней реостатного пуска находим, исходя из данных примера 14 и механических характеристик рис. 15

$$s_{H1} = \frac{r_{2p.п}}{R_{2H}}, s_{H2} = \frac{r_{2p.п} - r_1}{R_{2H}}, s_{H3} = \frac{r_{2p.п} - r_1 - r_2}{R_{2H}}, s_{H.e} = \frac{r_{2p}}{R_{2H}}. \quad (123)$$

Электромеханические постоянные при работе на ступенях

$$T_{M1} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 s_{H1}}{M_H}, \dots, T_{Mi} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 s_{Hi}}{M_H}, T_{M.e} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 s_{H.e}}{M_H}. \quad (124)$$

Время пуска при работе на реостатных ступенях (см. рис.15)

$$t_{п1} = T_{M1} \ln \left( \frac{\mu_1 - \mu_c}{\mu_2 - \mu_c} \right), \dots, t_{пi} = T_{Mi} \ln \left( \frac{\mu_1 - \mu_c}{\mu_2 - \mu_c} \right), t_e = 3T_{M.e}. \quad (125)$$

Время реостатного пуска

$$t_{п} = t_{п1} + \dots + t_{пi} + t_e. \quad (126)$$

Уравнения изменения момента и скорости двигателя на всех ступенях пуска при условии линейности рабочей части механической характеристики и постоянстве момента нагрузки  $\mu_c$

$$\mu = \mu_c + (\mu_1 - \mu_c) \exp(-t/T_{Mi}), \quad (127)$$

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_1 - \omega_{уст}) \exp(-t/T_{Mi}), \quad (128)$$

где  $\mu_1, \mu_c$  – относительные значения максимального переключающего момента и момента сопротивления;  $\omega_1, \omega_{уст}$  – начальная и установившаяся скорость на данной ступени.

**Пример 16.** Для схемы асинхронного привода с реостатным управлением по рис. 14 определить величину сопротивления ступени тормозного противовключения  $r_t = r_{пв}$  при максимальном значении тормозного момента  $\mu_{т1} = 2$  и  $s_{т1} \approx 2$ . Номинальные данные двигателя привода приведены в примере 14.

1. Построить график механических характеристик с пусковыми характеристиками для  $m = 3, \mu_1 = 2, \mu_2 = 1$  и характеристики противовключения с  $\mu_{т1} = 2$  и  $s_{т1} = 1,9375$ .

2. По графику пусковых характеристик  $m = 3, \mu_1 = 2, \mu_2 = 1$  и характеристике противовключения  $\mu_{т1} = 2$  и  $s_{т1} = 1,9375$  определить

сопротивление противовключения  $r_T = r_{пв}$  (см. рис.14).

3. Определить полное добавочное сопротивление в цепи ротора асинхронного двигателя при переключении в режим противовключения с  $\mu_{T1} = 2$  и  $s_T = 2$ ,  $r_{\Sigma пв} = r_{2р.л} + r_{пв}$ .

**Расчет.** По условиям примера 14 для определения сопротивления ступени противовключения приближенно принимают механические и пусковые характеристики АД прямолинейными. Через заданную точку  $\mu_{T1}$ ,  $s_{T1}$  ( $s_{T1} \approx 2 - s_n$ ) строят луч из точки  $s=0$ . На пересечении с вертикалью номинального момента определяется сопротивление противовключения  $\rho_{пв} = s_{пв}$  (см. рис.15,  $\rho_{пв} \approx 1 - \rho_{п.р}$ )

$$r_T = r_{пв} = R_{2н} \rho_{пв} . \quad (120)$$

Полное добавочное сопротивление в цепи ротора асинхронного двигателя при противовключении

$$r_{\Sigma пв} = r_{2р.л} + r_{пв} . \quad (121)$$

**Пример 17.** Для схемы асинхронного привода с реостатным управлением (см. рис.14) определить величину напряжения постоянного тока, подаваемого взамен переменного в статор двигателя, и величину сопротивления динамического торможения  $r_{дт1}$  для  $\mu_{дт1}=1$  при  $v_{дт1} = 0,9375$ . Соединение обмоток статора - звезда. Номинальные данные двигателя привода приведены в примере 14. Для расчета напряжения питания двигателя постоянным током принять омическое сопротивление фазы статора двигателя  $r_{1\phi} = 0,24$  Ом.

**Расчет.** Учитывая условия примера 14 (рис.14), принимаем, что для получения  $\Phi = \text{const}$  ток двигателя равняется  $I_{в\approx} = 0,5I_{1н}$ .

При соединении в звезду сопротивление цепи возбуждения

$$r_{рлТ} = 2r_{1\phi} . \quad (131)$$

Постоянный ток, обеспечивающий то же значение МДС, что и переменный

$$I_{вY} = 1,23 I_{в\approx} . \quad (132)$$

Величина напряжения постоянного тока, подаваемого взамен переменного в статор двигателя

$$U_{вУ} = 1,23 I_{в\approx} 2r_{1ф} \cdot \quad (133)$$

При использовании для динамического торможения пускового сопротивления  $r_T$  ( $\rho_T = \rho_{дт} = \rho_{пв}$ , см. рис.14, рис.15)

$$r_T = r_{дт1} = R_{2н} \rho_{дт} \cdot \quad (134)$$

**Задача 8.** Найти параметры и построить механическую характеристику привода с асинхронным двигателем с фазным ротором (АДФР). Привод имеет асинхронный двигатель со следующими данными:  $P_n = 28,5$  кВт;  $\omega_0 = 104,6$  рад/с;  $\omega_n = 99,4$  рад/с;  $s_n = 0,05$ ;  $U_{1н} = 380$  В;  $I_{1н} = 50$  А;  $k_{мк} = M_k/M_n = 2,2$ ;  $r_1 = 0$ ;  $E_{2н} = 173$  В;  $I_{2н} = 100$  А.

1. Определить номинальный момент двигателя  $M_n$ ; критическое скольжение  $s_k$  при  $M_k = 2,2M_n$  и пусковой момент  $M_n$ .

2. Построить естественную механическую характеристику для двигательного режима и оценить отношение пускового момента к номинальному моменту  $\mu_{п.е} = M_n/M_n$  двигателя.

3. Определить номинальное сопротивление асинхронного двигателя  $R_{2н}$ , коэффициент трансформации  $k_t$ , сопротивление ротора  $r_2$ , приведенное сопротивление ротора  $r'_2$ .

**Задача 9.** Какую скорость будет развивать асинхронный двигатель  $P_n = 22,5$  кВт;  $U_{1н} = 380$  В;  $\omega_1 = 157,1$  рад/с;  $\omega_n = 153,4$  рад/с;  $r_1 = 0,2$  Ом;  $r_2' = 0,24$  Ом;  $x_1 = 0,39$  Ом;  $x_2' = 0,46$  Ом при нагрузке номинальным моментом, если в цепь ротора включено сопротивление, приведенное значение которого равно  $r_{2д}' = 1,2$  Ом, а в цепь статора – индуктивное сопротивление  $x_{1д} = 0,75$  Ом.

1. Найти номинальный момент двигателя  $M_n$  и критический момент  $M_{к.х}$  с добавочными сопротивлениями в цепи ротора и статора.

2. Определить критическое скольжение  $s_{к.х}$  и скорость  $\omega_{н.х}$  при номинальной нагрузке с добавочными сопротивлениями.

## 6. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ

*Диапазон и точность регулирования скорости* являются одними из основных показателей электропривода. Повышение этих показателей связано с использованием регулируемого электрического привода.

*Автоматизированный регулируемый электропривод с замкнутой системой управления* – это привод, в котором плавное регулирование координат в заданных диапазонах осуществляется посредством регулирования величин тока, напряжения, частоты электроэнергии  $W$ , подводимой через преобразователь П к обмоткам двигателя (см. рис.1). Регулирование этих величин достигается применением силовых (тиристорных, транзисторных) преобразователей (ТП).

*Широтно-импульсные преобразователи (ШИП)* постоянного напряжения благодаря высокой частоте переключений JGB-транзисторов позволяют реализовать ТП с высоким быстродействием [1].

*Преобразователи частоты (ПЧ)* с неуправляемым выпрямителем и инвертором с широтно-импульсным регулированием (ШИМ), формирующие регулируемое напряжение близкое по форме к синусоиде, используются в системах с асинхронными двигателями (ПЧ-АД) [1].

*Замкнутая система регулируемого ЭП* – это система, в которой имеется сигнал обратной связи ( $U_{o.c}$ ) по выходной координате.

*Обратная связь* реализует канал передачи и преобразования информации с выхода узлов системы на вход с целью формирования сигнала управления ( $U_{вх}$ ) путем сравнения с сигналом задания ( $U_{з.с}$ )

$$U_{вх} = U_{з.с} \pm U_{o.c}.$$

В зависимости от знака и характера действия обратные связи могут быть положительными или отрицательными, жесткими и гибкими.

*Гибкие обратные связи*, в отличие от *жестких обратных связей*, действуют только во время переходного процесса.

*Отрицательная обратная связь (ООС) по скорости* используется в большинстве электроприводов. ООС по скорости применяется для уменьшения относительной ошибки путем повышения жесткости механических характеристик. Она позволяет повысить диапазон регулирования и быстродействие системы. Покажем это на примерах.

### **6.1. Влияние обратной связи на параметры электропривода**

**Пример 18.** Выполнить статический расчет электропривода постоянного тока по системе ТП-Д с жесткой отрицательной обратной связью по скорости  $\omega$  рис. 17.

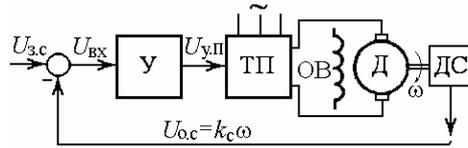


Рис.17. Схема электропривода ТП-Д

Данные специального двигателя ДЭВ-808 (Д) постоянного тока с независимым возбуждением: мощность 68 кВт, напряжение  $U_n = 440$  В; ток  $I_n = 170$  А; скорость  $\omega_n = 125$  рад/с; сопротивление якорной цепи  $R_{я} = 0,143$  Ом, машинная постоянная  $c\Phi_n = 3,3$  Вб.

Номинальные напряжения датчика скорости (ДС)  $U_{о.с}$ , задатчика скорости  $U_{з.с}$ , управления преобразователем  $U_{у.п}$  равны 10 В. ( $U_{у.п\max} = 12$  В). Тиристорный преобразователь (ТП) имеет номинальное напряжение  $U_{п.н} = 440$ В ( $U_{п.\max} = 460$  В).

1. Найти падение скорости  $\Delta\omega_p$  при увеличении тока до номинального в системе без обратной связи по скорости, передаточные коэффициенты преобразователя  $k_{п}$ , датчика скорости (ДС)  $k_{с}$ , двигателя  $k_{дв}$ .

2. Определить коэффициент усиления  $k_{у.з}$  усилителя (У) из условия заданной статической точности поддержания скорости замкнутой системы  $\delta\omega\% = 5\%$  в диапазоне регулирования  $D = \omega_{\max}/\omega_{\min} = 10$ .

**Решение.** Статическая ошибка системы ТП-Д без обратной связи по скорости при увеличении тока до номинального значения (170 А) определяется падением скорости из уравнения скоростной (электромеханической) характеристики  $\omega_0 = \omega_n + \Delta\omega_p$ :

$$\Delta\omega_p = \frac{I_n R_{я}}{c\Phi_n} = 7,31 \text{ рад/с.} \quad (135)$$

Относительная ошибка  $\delta\omega_p\% = 100 \Delta\omega_p/\omega_n = 5,8\%$ , но при минимальной скорости  $0,1\omega_n$  диапазона Д ошибка  $\delta\omega_p\% = 58\%$ .

Коэффициент передачи ТП при линейной регулировочной характеристике (при номинальном напряжении  $U_{у.п} = U_{у.п.н} = 10$  В):

$$k_n = \frac{\Delta U_{\Pi}}{\Delta U_{y.\Pi}} \approx \frac{U_{\Pi.n}}{U_{y.\Pi.n}} = 44. \quad (136)$$

Коэффициент передачи датчика скорости:

$$k_c = \frac{\Delta U_{o.c}}{\Delta \omega} \approx \frac{U_{o.c}}{\omega_n} = \frac{10}{\omega_n} = 0,08 \text{ Вс}. \quad (137)$$

Передаточный коэффициент двигателя:

$$k_{дв} = \frac{\Delta \omega}{\Delta U_{\Pi}} = \frac{\omega_n}{U_{\Pi.n}} \approx \frac{1}{c\Phi_n} = 0,29 \text{ 1/Вс}. \quad (138)$$

Требуемый коэффициент усиления разомкнутой системы

$$K = K_{тр} = \frac{\delta \omega_p \% \cdot D}{\delta \omega \%} - 1 = 10,7, \quad (139)$$

где  $\delta \omega_p \% = 100 \Delta \omega_p / \omega_n = 5,8\%$  – статическая ошибка разомкнутой системы в % к номинальной скорости при изменении тока нагрузки двигателя;  $\delta \omega \% = 100 \Delta \omega / \omega_{n.min} = 5\%$  – статическая относительная ошибка, выраженная в %, требуемая при регулировании скорости в диапазоне  $D = 10$ .

При данных значениях параметров коэффициент усилителя  $k_{y.3}$  в замкнутой САР из условия заданной статической точности равен [4]:

$$k_{y.3} = K / (k_c k_n k_{дв}) = 10,7. \quad (140)$$

Применение жесткой ООС (ЖООС) по скорости позволило снизить статическую относительную ошибку до 5% при  $D = 10$ .

**Пример 19.** Найти и сравнить параметры механических характеристик регулируемого привода по системе ТП-Д без обратных связей и с жесткой отрицательной обратной связью по скорости.

Данные привода указаны в примере 18, схема на рис.17. Изменение момента  $\Delta M = M_n = 544 \text{ Нм}$ . Коэффициент усиления разомкнутой системы регулирования напряжения  $K = 10,7$

1. Определить жесткость  $\gamma^*$  и коэффициент крутизны  $\beta$  механической характеристики привода без обратных связей, жесткость  $\gamma_3^*$  и коэффициент крутизны  $\beta_3$  привода с обратной связью по скоро-

сти.

2. Найти диапазон регулирования привода ТП-Д с ЖООС по скорости при заданной относительной статической ошибке замкнутой системы  $\delta\omega = 0,05$  и коэффициенте усиления разомкнутой системы  $K = 10,7$ .

**Решение.** Для системы ТП-Д без обратной связи по формулам (56), (57) находим (при  $\Delta M = M_n$ )

коэффициент крутизны механической характеристики  $\beta = \Delta\omega_p / \omega_n = 0,058$ , жесткость механической характеристики  $\gamma^* = (c\Phi_n)^2 / R_{\text{я}} = 77,3$ .

Жесткость  $\gamma_3^*$  и коэффициент крутизны  $\beta_3$  в системе с обратной связью по скорости [1]

$$\gamma_3^* = \gamma^*(K + 1) = 905 \text{ кгм}^2/\text{с}, \quad (141)$$

$$\beta_3 = \beta(K + 1)^{-1} = 0,005, \quad (142)$$

где  $K$  - коэффициент усиления разомкнутой системы регулирования.

Диапазон регулирования в системе без обратной связи по скорости определяется жесткостью механической характеристики  $\gamma^*$

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{\delta\omega(2\gamma^* \omega_n(1 + \beta) - \Delta M)}{\Delta M} = 1,83. \quad (143)$$

Диапазон регулирования в системе с обратной связью по скорости зависит от жесткости  $\gamma_3^*$  и определяется формулой

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{\delta\omega(2\gamma_3^* \omega_n(1 + \beta) - \Delta M)}{\Delta M} = 22. \quad (144)$$

Таким образом, применение ЖООС по скорости приводит к увеличению жесткости характеристики и диапазона регулирования.

**Пример 20.** Определить, какой характер будут иметь переходные процессы в электроприводе ТП-Д с разомкнутой и замкнутой по скорости системами регулирования.

Данные приводного двигателя постоянного тока 2ПО160: номинальное напряжение якоря  $U_n = 220$  В; сопротивление якорной цепи  $r_{\text{я}} = 0,6$  Ом; индуктивность обмотки якоря  $L_{\text{я}} = 0,02$  Гн, машинная постоянная  $c\Phi_n = 1,9$  Вб; номинальная скорость  $\omega_n = 104,5$  рад/с.

Момент инерции привода  $J_{\Sigma} = 1,0 \text{ кгм}^2$ .

Напряжение управления  $U_y = U_{3.c}$  изменяется от 0 до 10 В; напряжение тиристорного преобразователя  $U_{ТП}$  от 0 до 300 В пропорционально напряжению  $U_{y.П}$ , подаваемому на систему управления ТП и изменяющемуся от 0 до 30 В ( $U_{y.П*} = 22 \text{ В}$  при  $U_{П} = 220 \text{ В}$ ); коэффициент обратной связи по скорости  $k_c = 0,09 \text{ Вс}$ .

1. Найти электромагнитную постоянную времени якоря  $T_{я}$ , электромеханическую постоянную времени  $T_{м}$ , коэффициент усиления усилителя  $k_{y.p}$  в разомкнутой системе и коэффициент передачи ТП  $k_{п}$ .

2. Определить коэффициент усиления усилителя  $k_{y.з}$  в замкнутой системе, коэффициент усиления разомкнутой системы  $K$  и эквивалентную электромеханическую постоянную времени  $T_{м.эКВ}$  замкнутой по скорости системы.

**Расчет.** Характер переходных процессов в приводе зависит от электромагнитной постоянной времени якорной цепи

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}} \quad (145)$$

и от электромеханической постоянной времени [1]

$$T_{м} = \frac{J_{\Sigma} R_{я}}{(c\Phi)^2} = \frac{J_{\Sigma}}{\gamma^*}. \quad (146)$$

Коэффициент усиления усилителя  $k_{y.p}$  в разомкнутой системе

$$k_{y.p} = \frac{U_{н}}{U_{П}} \frac{U_{y.П}}{U_y}. \quad (147)$$

где  $U_y$ ,  $U_{y.П}$ ,  $U_{П}$  – максимальные напряжения (10 В, 30 В, 300 В).

Коэффициент усиления ТП при  $U_{y.П*}$ , соответствующем номинальному напряжению  $U_{П} = U_{н}$

$$k_{п} = \frac{U_{н}}{U_{y.П*}}. \quad (148)$$

Коэффициент усиления усилителя  $k_{y.з}$  в замкнутой системе регулирования определяется из соотношения (при  $U_y = U_{3.c}$ , см. рис.17)

$$U_{y.П*} = k_{y.з} (U_y - U_{o.c}),$$

где  $U_{o.c}$  – напряжение обратной связи по скорости при данном  $k_c$ , откуда

$$k_{y.з} = \frac{U_{y.П*}}{U_y - k_c \omega_H}. \quad (149)$$

Коэффициент усиления разомкнутой системы

$$K = \frac{k_{y.з} k_c k_{п}}{c \Phi_H}. \quad (150)$$

Эквивалентная электромеханическая постоянная времени  $T_{м.эКВ}$  в замкнутой по скорости системе

$$T_{м.эКВ} = \frac{T_M}{K + 1}. \quad (151)$$

В разомкнутой (замкнутой) системе регулирования при  $T_M > 4T_{я}$  ( $T_{м.эКВ} > 4T_{я}$ ) переходный процесс будет монотонным, носить апериодический характер, а при  $T_M < 4T_{я}$  ( $T_{м.эКВ} < 4T_{я}$ ) – процесс носит колебательный характер с затуханием.

Следовательно, при  $K > 1$  эквивалентная электромеханическая постоянная времени  $T_{м.эКВ}$  в замкнутой по скорости системе снижается.

## 6.2. Настройка регуляторов системы привода ТП-Д

Применение в электроприводе усилителя (см. рис.17) позволяет получить заданную статическую точность. Но динамические характеристики привода могут оказаться неудовлетворительными. Для получения требуемых переходных процессов на вход усилителя вводят сигналы соответствующих корректирующих обратных связей. Настройка полученной системы с суммирующим усилителем оказывается сложной.

*Системы подчиненного регулирования параметров электропривода (СПР)* применяются вместо систем с суммирующими усилителями. Принцип подчиненного регулирования состоит в том, что для каждой из регулируемых переменных: тока, скорости и, если нужно, положения, организуется свой контур регулирования, содержащий регулятор, объект регулирования и отрицательную обратную связь по регулируемой коор-

динате. Регуляторы контура соединяют последовательно, причем выходной сигнал регулятора внешнего контура является заданием для внутреннего контура. В промышленной унифицированной блочной системе регуляторов (УБСР-АИ) применяются в основном пропорциональные регуляторы (П-регуляторы), интегральные регуляторы (И-регуляторы) и пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ-регуляторы). Например, усилитель  $У$  в одноконтурной системе рис.17 выполняет роль П-регулятора, имеющего передаточную функцию  $W_c(p) = k_{y.з.}$

В системах электропривода внутренним подчиненным контуром является контур тока. В структурной схеме системы по рис.18 объект регулирования в контуре тока состоит из трех звеньев: тиристорного преобразователя ТП, цепи якоря двигателя постоянного тока, регулятора тока (РТ). Преобразователь обычно рассматривают как аperiodическое звено с «малой» постоянной времени  $T_\mu$ .

Задачей каждого из образованных контуров с регулятором является компенсация влияния «большой постоянной времени» контура, вызывающей запаздывание и формирование переходного процесса заданного типа (технический оптимум, симметричный оптимум).

Например, во внутреннем контуре тока привода ТП-Д рис.18 ( $W_{кт}(p)$ ), с которого начинают расчет, якорная цепь ДПТ описывается аperiodическим звеном с «большой» постоянной времени  $T_\alpha$

$$W_\alpha(p) = \frac{1/R_\alpha}{T_\alpha p + 1}$$

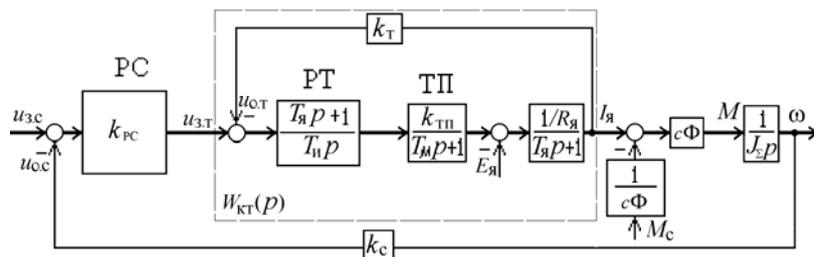


Рис.18. Структурная схема привода ТП-Д с подчиненным регулированием

Для компенсации влияния  $T_\alpha$  подбирается регулятор РТ, с пара-

метрами, обеспечивающими форсировочное напряжение в якоре, снижающее это запаздывание

*Регулятор должен* вырабатывать сигналы управления преобразователем с целью заданного изменения контролируемых параметров. С этой целью принимается следующая передаточная функция регулятора

$$W_{\text{РТ}}(p) = K_{\text{РТ}} + \frac{1}{T_{\text{и}}p} = \frac{T_{\text{с}}p + 1}{T_{\text{и}}p}, \quad (152)$$

где  $T_{\text{и}} = a_{\text{т.т}}k_{\text{пт}}k_{\text{т}}T_{\mu}/R_{\text{я}}$ , постоянная времени интегратора;  $T_{\text{с}} = T_{\text{я}}$  – постоянная времени настройки;  $K_{\text{РТ}} = T_{\text{я}}/T_{\text{и}}$  – коэффициент усиления регулятора,  $a_{\text{т.т}}$  – коэффициент настройки контура на технический оптимум;  $T_{\mu}$  – малая некомпенсируемая постоянная времени контура тока.

Передаточная функция контура тока, оптимизированного с помощью такого регулятора

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{1}{k_{\text{т}}} \frac{1}{a_{\text{т.т}} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + a_{\text{т.т}} T_{\mu} p + 1}. \quad (153)$$

Пренебрегая малой величиной  $T_{\mu}^2$  получим

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{1}{k_{\text{т}}} \frac{1}{a_{\text{т.т}} T_{\mu} p + 1}. \quad (154)$$

Регулятор вида (152) называется пропорционально-интегральным регулятором (ПИ-регулятором). Соответствующей настройкой параметров регулятора можно получить типовой вид изменения во времени выходного сигнала ( $U_{\text{вых}}$ ).

*Переходная характеристика регулятора* – это зависимость  $U_{\text{вых}} = f(t)$  при подаче на вход ступенчатого единичного сигнала.

*При настройке на технический оптимум* (ТО) в (154) обычно принимают  $a_{\text{т.т}} = 2$ . При этом переходная характеристика токового контура из-за пренебрежения влиянием противо-ЭДС  $E_{\text{я}}$ , из-за влияния неидеальности элементов контура при скачке тока может значительно отличаться от расчетной, но это допустимо. Ошибка контура выбирается внешним контуром регулирования скорости [5].

Показатели переходного процесса при настройке на ТО це-

лесообразно показать на примере внешнего скоростного контура.

**Пример 21.** Привод по системе ТП-Д с двухконтурной системой подчиненного регулирования СПР выполнен по функциональной схеме рис.19 (структурная схема рис.18). Контур скорости, содержащий регуляторы РС и РТ, настроены на технический оптимум ТО.

Рассчитать параметры регуляторов и величины настроечных резисторов  $R_{o.c}$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_{o.c.c}$ ,  $R_{вх.c}$  при заданном номинале емкости  $C_{o.c}$ .

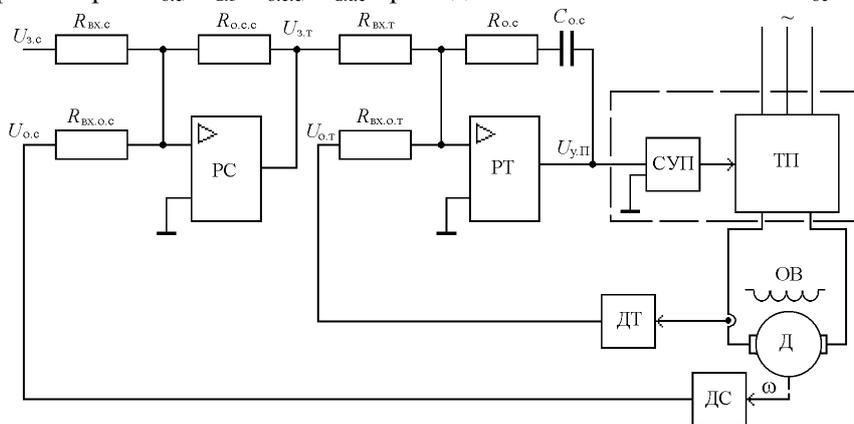


Рис.19. Схема привода ТП-Д с подчиненным регулированием

Номинальные данные двигателя (Д) постоянного тока с независимым возбуждением: мощность  $P_n = 68$  кВт,  $U_n = 440$  В,  $I_n = 170$  А,  $\omega_n = 125$  рад/с,  $c\Phi_n = 3,3$  Вб,  $R_y = 0,14$  Ом,  $L_y = 0,0034$  Гн, Сигналы задания скорости, системы управления преобразователем (СУП)  $U_{з.c} = U_y$ ,  $U_{y.п}$ , датчика тока (ДТ) и скорости (ДС)  $U_{o.т}$ ,  $U_{o.c}$  0...10 В (10 В при  $\omega_n$ ),  $C_{o.c} = 2$  мкФ. Постоянная времени ТП  $T_{п} = 0,0033$  с, суммарный приведенный момент инерции  $J_{\Sigma} = 3,5$  кгм<sup>2</sup>.

**Решение.** Электромагнитная постоянная времени якорной цепи  $T_y$  вычисляется по формуле (145).

$$T_y = \frac{L_y}{R_y} = 0,024 \text{ с.}$$

Электромеханическая постоянная времени ДПТ  $T_m$  при  $\Phi = \text{const}$  определяется выражением (146)

$$T_M = \frac{J_\Sigma R_\gamma}{(c\Phi)^2} = 0,045 \text{ с.}$$

Передаточный коэффициент тиристорного преобразователя  $k_{\Pi}$  находим по формуле (136)

$$k_{\Pi} = \frac{\Delta U_{\Pi}}{\Delta U_{y.\Pi}} \approx \frac{U_{\Pi.н}}{U_{y.\Pi.н}} = 44.$$

Коэффициент обратной связи по скорости  $k_c$  находим по формуле (137).

$$k_c = \frac{\Delta U_{o.c}}{\Delta \omega} \approx \frac{U_{o.c}}{\omega_n} = \frac{10}{\omega_n} = 0,08 \text{ Вс.}$$

Коэффициент обратной связи по току с учетом двукратной перегрузки

$$k_T = \frac{U_{o.T}}{2I_n} = \frac{10}{2I_n} = 0,029 \text{ В/А.} \quad (155)$$

Определим параметры регуляторов СПР (рис.18).

*Передаточная функция ПИИ-регулятора тока*

$$W_{PT}(p) = K_{PT} + \frac{1}{T_{\Pi}p} = \frac{T_c p + 1}{T_{\Pi}p} = \frac{0,024p + 1}{0,06p}, \quad (156)$$

где  $T_{\Pi} = a_{T.T} k_{\Pi} k_T T_{\mu} / R_{\gamma} = 0,06 \text{ с}$  – постоянная времени интегратора;  $T_c = T_{\Pi} K_{PT} = 0,024 \text{ с}$  – постоянная настройки;  $K_{PT} = T_{\mu} / T_{\Pi} = 0,4$  – коэффициент усиления регулятора;  $a_{T.T}$  – коэффициент настройки на технический оптимум ( $a_{T.T} = 2$ ).

Сопротивления резисторов в регуляторе тока из стандартного ряда E192 номинальных значений сопротивлений с допуском менее 5%

$$R_{o.c} = \frac{T_{\Pi}}{C_{o.c}} = 298 \text{ кОм}; \quad R_{вх} = \frac{R_{o.c}}{K_{PT}} = 75 \text{ кОм.} \quad (157)$$

*В контуре скорости* объект регулирования по рис. 18 содержит механическую часть ЭП в виде интегрирующего звена

$$W(p) = \frac{1}{\gamma^* T_M p} = \frac{1}{J_\Sigma p} = \frac{1}{3,5 p}$$

и оптимизированный контур тока с передаточной функцией (154)

$$W_{\text{кт}}(p) = \frac{1}{k_T a_{\text{т.т}} T_\mu p + 1} = \frac{1}{0,029(0,0066 p + 1)}.$$

При настройке на ТО П-регулятора скорости РС для компенсации «большой» постоянной времени контура скорости  $\gamma^* T_M = J_\Sigma = 3,5 \text{ кгм}^2$ , полагая некомпенсированной «малую» постоянную времени  $T_{\mu\text{с}} = a_{\text{т.т}} T_\mu = 0,0066 \text{ с}$  получим передаточную функцию регулятора скорости

$$W_{\text{pc}}(p) = K_{\text{PC}} = \frac{c\Phi_H k_T T_M}{a_{\text{т.с}} R_\text{я} k_c T_{\mu\text{с}}} = \frac{k_T J_\Sigma}{a_{\text{т.с}} T_{\mu\text{с}} k_c c\Phi_H} = 29,3, \quad (158)$$

где  $a_{\text{т.с}} = 2$  – коэффициент настройки контура скорости на ТО.

Передаточная функция контура скорости по задающему воздействию ( $u_{\text{з.с}} \rightarrow \infty$ ) при настройке на ТО

$$W_{\text{кc}}(p) = \frac{1}{k_c a_{\text{т.с}} \cdot T_{\mu\text{с}}^2 p^2 + a_{\text{т.с}} T_{\mu\text{с}} p + 1} = \frac{1}{0,08(8,7 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,013 p + 1)}$$

*Настройка на технический оптимум* определяет вид переходного процесса пуска до номинальной скорости  $\omega = f(t)$  на рис. 20. Показатели: время нарастания  $\omega$  до заданного значения  $t_H = 4,7 T_{\mu\text{т}}$ , время переходного процесса  $t_{\text{шт}} = 8,4 T_{\mu\text{т}}$ , перерегулирование  $\sigma = 4,3\%$ .

При номинале входного резистора  $R_{\text{вх}} = 10 \text{ кОм}$  (из стандартного ряда E24) сопротивление обратной связи  $R_{\text{о.с}} = K_{\text{PC}} R_{\text{вх}}$ .

При использовании ПИ-регулятора скорости РС и настройке на симметричный оптимум (СО) его передаточная функция

$$W_{\text{pc}}(p) = K_{\text{PC}} + \frac{1}{T_{\text{и.с}} p} = \frac{T_{\text{с.с}} p + 1}{T_{\text{и.с}} p}, \quad (159)$$

где  $T_{\text{и.с}} = a_{\text{с.с}} c\Phi_H k_c T_{\mu\text{с}} / k_T \gamma^* T_M = 2,06 \text{ с}$  – постоянная времени интегратора;  $a_{\text{с.с}} = 8$  (для СО),  $\gamma^* = (c\Phi_H)^2 / r_\text{я} = 77,3$  – жесткость;  $T_{\text{с.с}} = T_{\text{и.с}} K_{\text{PC}} = 0,1 \text{ с}$  – постоянная настройки;  $K_{\text{PC}} = 4 T_{\mu\text{с}} / T_{\text{и.с}} = 0,013 \text{ с}$ .

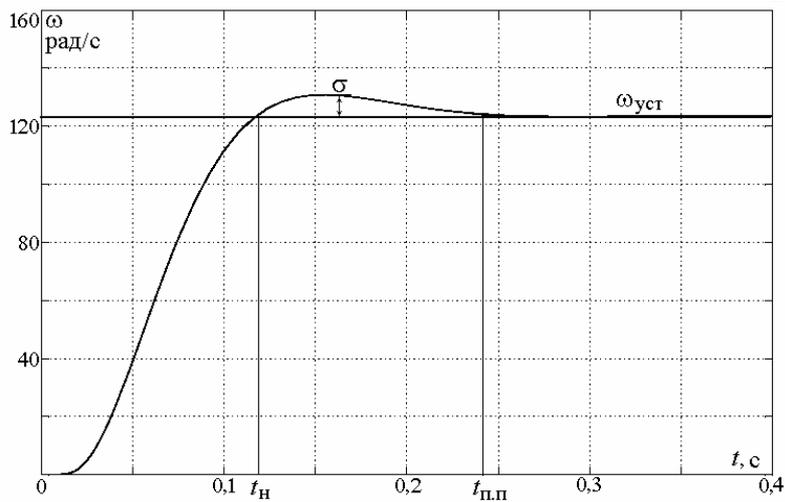


Рис.20. Переходный процесс пуска привода ТП-Д

Показатели качества переходного процесса при настройке на СО: время нарастания до заданного значения  $t_n = 3,1 T_{\text{ит}}$ , время переходного процесса  $t_{\text{пп}} = 16,5 T_{\text{ит}}$ , перерегулирование  $\sigma = 43\%$ .

Достоинством системы с ПИ-регулятором скорости, настроенным на СО является отсутствие статической ошибки скорости (астатизм). Для уменьшения колебательности переходного процесса на входе РС включают апериодический фильтр ( $T_{\text{ф}} = 4T_{\text{мс}}$ ) [5].

### 6.3. Настройка регуляторов системы управления привода ПЧ-АД

Техническая реализация частотного управления АД в переходных режимах, осложненная наличием в машинах переменного тока вращающегося магнитного поля, стала возможной с применением интегральных микросхем и микропроцессоров.

*Скалярные системы регулирования асинхронных двигателей (ССР)* при регулировании частоты и уровня напряжения статора АД позволяют получать системы с заданной статической точностью.

Ошибка системы ПЧ-АД без обратной связи по скорости при увеличении тока до номинального значения определяется абсолютным





$$W_{\text{инт}}(p) = \frac{(k_1/k_2)p+1}{(1/k_2)p} = \frac{T_c p+1}{T_{\text{н}} p}, \quad (160)$$

где  $T_{\text{и}} = 1/k_2$  и  $T_c = k_1/k_2$  – постоянные времени интегратора и настройки.

Передаточную функцию разомкнутого канала управления главным магнитным потокосцеплением получаем, выбирая  $k_1/k_2 = T_{\Psi}$

$$W'_{\Psi}(p) = \frac{k_2((k_1/k_2)p+1)k_{\Psi}k_{\text{тп}}k_{\text{дп}}}{p(T_{\mu}p+1)(T_{\Psi}p+1)}, \quad (161)$$

Настройка на технический оптимум определяет коэффициент  $k_2$

$$k_2 = \frac{1}{2T_{\mu}k_{\text{дп}}k_{\text{тп}}k_{\text{дп}}}. \quad (162)$$

В контуре составляющей тока  $i_2$  канала регулирования скорости ПИ-регулятор тока РТ  $W_{\text{инт}}(p) = \frac{(k_3/k_4)p+1}{(1/k_4)p} = \frac{T_c p+1}{T_{\text{н}} p}$  настраивается на технический оптимум с помощью следующих настроек

$$k_4 = 1/(2T_{\mu}k_i k_{\text{тп}}k_{\text{т}}); \quad k_3/k_4 = T_i, \quad (163)$$

при  $T_i > T_{\mu}$ , ( $T_{\mu} = T_a$ ,  $T_i = T_b$ );

$$k_4 = 1/(2T_i k_i k_{\text{тп}}k_{\text{т}}); \quad k_3/k_4 = T_{\mu}, \quad (164)$$

при  $T_i < T_{\mu}$ , ( $T_i = T_a$ ,  $T_{\mu} = T_b$ ),

Передаточная функция разомкнутого контура имеет вид:

$$W_i(p) = \frac{1}{2T_a p(T_a p+1)}. \quad (165)$$

Передаточная функция «объекта регулирования» скоростного контура

$$W_{01}(p) = \frac{C_m k_{\omega} |\Psi_0|}{k_{\text{т}} J_{\Sigma} (T_T p+1)p} = \frac{k_m}{J_{\Sigma} (T_T p+1)p}, \quad (166)$$

где  $k_m = C_m k_c |\Psi_0| / k_T$ ,  $T_T = 2T_a$ .

При использовании П-регулятора скорости РС, настроенного на ТО, его передаточная функция определяется выражением

$$k_{pc} = \frac{J_{\Sigma} k_T}{4T_a k_c C_m |\Psi_0|}. \quad (167)$$

Компенсирующие составляющие блока БК (см. рис.22) напряжения которых равны  $U_{1k} = -p_0 \omega L_s (1 - k_s) i_2$ ;  $U_{2k} = p_0 \omega |\Psi_0|$ , требуют коррекции при настройке [3].

**Задача 10.** Выполнить статический расчет системы скалярного регулирования (ССР) электропривода преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД) с жесткой отрицательной обратной связью по скорости  $\omega$  рис. 23.

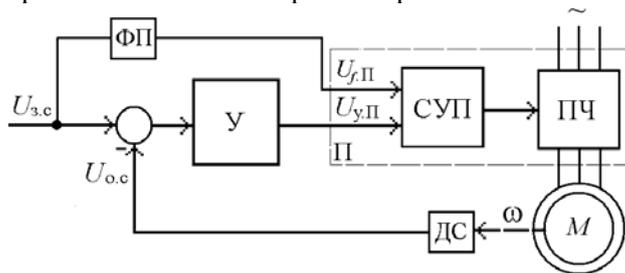


Рис.23. Схема асинхронного электропривода

Основные данные двигателя 4А71В4. Мощность  $P_n = 0,75$  кВт; фазное напряжение  $U_{1н} = 220$  В; частота  $f_n = 50$  Гц; синхронная скорость  $\omega_0 = 157$  рад/с; номинальная скорость  $\omega_n = 145,2$  рад/с; критическое скольжение  $s_k = 0,4$ ; номинальный ток двигателя  $I_n = 2,16$  А.

Номинальные напряжения датчика скорости (ДС)  $U_{о.с}$ ; задания скорости  $U_{з.с}$ ; управления частотой преобразователя  $U_{f.п}$ ; управления напряжением преобразователя  $U_{у.п}$  равны 10 В ( $U_{max} = 12$  В). Функциональный преобразователя (ФП) с коэффициентом передачи  $k_{фп} = 1$  обеспечивает закон частотного регулирования  $U/f = const$ . Сигнал управления с выхода усилителя У  $U_{у.п} = 10$  В с помощью системы управления (СУП) преобразователя (ПЧ) обеспечивает номинальное выходное напряжение  $U_{п.н} = 220$  В ( $U_{п.мак} = 242$  В),  $f_n = 50$  Гц (по сигналу ошибки скорости).

1. Найти падение скорости  $\Delta\omega_p = s_n \omega_0$  при увеличении тока до номинального в системе без обратной связи по скорости, передаточные коэффициенты преобразователя ПЧ  $k_p$ , датчика скорости ДС  $k_c$ , двигателя  $k_{дв}$ .

2. Определить коэффициент усиления  $k_{y.з}$  усилителя (У) из условия заданной статической точности поддержания скорости замкнутой системы  $\delta\omega\% = 2,5\%$  при увеличении тока до номинального значения в диапазоне регулирования скорости  $D = \omega_{max}/\omega_{min} = 10$ .

*Примеры расчета* параметров АД серии 4А, приближенного расчета параметров для АД других серий по данным каталога, расчета настроек регуляторов в Mathcad даны в приложениях 1-3 [3].

В приложении 4 приведены данные некоторых двигателей серии 4А. Параметры схемы замещения даны в относительных единицах. Методика пересчета в абсолютные параметры для уточненной схемы замещения представлена в приложении 1.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Онищенко Г.Б.* Электрический привод. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 288 с.
2. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1985. 576 с.
3. Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования. Учебное пособие/ *В.В. Алексеев, А.Е. Козярук, Э.А. Загивный.* СПбГИ. СПб, 2006. 58 с.
4. *Баширин А.В., Постников Ю.В.* Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. Л.: Энергоатомиздат. 1990. 440 с.
5. “Электроприводы с программным управлением и последовательной коррекцией. Учебное пособие. *В.В. Рудаков.* ЛГИ, Л. 1990. 103 с.

**Расчёт параметров асинхронного двигателя (4A250S4)**

**Исходные данные**

1. Частота, Гц (50):  $f_1 := 50$
2. Число фаз:  $m := 3$
3. Мощность, Вт:  $P_2 := 75000$
4. Фазное напряжение:  $U_{1H} := 220$
5. Синхронная скорость АД [Кравчик, табл.2.1], об/мин:  $n_1 := 1500$
6. КПД:  $\eta := 0.93$
7. Коэффициент мощности по [табл.2.1]:  $\cos\varphi := 0.9$
8. **Введите**  $X_m$  (о.е.) из справочника для двигателей серии 4А  $X_m := 4.4$
9. **Введите** активное сопротивление обмотки статора (о.е.)  $R'_1 := 0.025$
10. **Введите** индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $X'_1 := 0.089$
11. **Введите** приведенное активное сопротивление ротора (о.е.)  $R''_2 := 0.014$
12. **Введите** приведенное индуктивное сопротивление ротора (о.е.)  $X''_2 := 0.11$

$$\text{Фазный ток, А: } I_H := \frac{P_2}{m \cdot U_{1H} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad I_H = 135.7663 \text{ А}$$

Параметры уточненной Г-образной схемы замещения

$$X_1 := 2 \cdot X'_1 \cdot \frac{X_m}{X_m + \sqrt{X_m \cdot X_m + 4 \cdot X'_1 \cdot X_m}} \quad R_1 := R'_1 \cdot \frac{X_1}{X'_1} \quad X_1 = 0.0873 \quad R_1 = 0.0245$$

$$c = U_n / I_n: \text{ "Коэфф. перевода относит. ед. в физическ." Ом} \quad c := \frac{U_{1H}}{I_H} \quad c = 1.6204 \text{ Ом}$$

$$bk := \frac{X'_1}{X_1} \text{ Поправочный коэфф. для уточненной Г-обр.схемы} \quad bk = 1.0198$$

Основные параметры АД:  $L_m, L_s, L_r$  (Гн),  $R_s, R_r$  (Ом):  $w_0 := 314 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$

$$x_m := X_m \cdot c \quad L_m := \frac{x_m}{w_0} \quad x_m = 7.1299 \text{ Ом} \quad L_m = 0.0227 \text{ Гн}$$

$$x_1 := X_1 \cdot c \quad L_s := \frac{(x_m + x_1)}{w_0} \quad x_1 = 0.1414 \text{ Ом} \quad L_s = 0.0232 \text{ Гн}$$

$$x'_2 := X''_2 \cdot \frac{c}{bk \cdot bk} \quad X'_2 := \frac{X''_2}{bk \cdot bk} \quad X'_2 = 0.1058 \quad x'_2 = 0.1714 \text{ Ом}$$

$$L_r := \frac{(x_m + x'_2)}{w_0} \quad r_1 := R_1 \cdot c \quad r_1 = 0.0397 \text{ Ом} \quad L_r = 0.0233 \text{ Гн}$$

$$r'_2 := R''_2 \cdot \frac{c}{bk \cdot bk} \quad r'_2 = 0.0218 \text{ Ом}$$

$$k_s := \frac{L_m}{L_s} \quad k_r := \frac{L_m}{L_r} \quad k_s = 0.9806 \quad k_r = 0.9765$$

**Определение параметров схемы замещения по паспортным данным АД**

**Исходные данные**

1. Частота, Гц (50):  $f_1 := 50$
2. Число фаз:  $m := 3$
3. Мощность, Вт (75000):  $P_2 := 75000$
4. Фазное напряжение, В:  $U_{1H} := 220$
5. Линейное напряжение, В:  $U_s := 380$
6. Синхронная скорость АД, об/мин:  $n_1 := 1500$
7. Номинальная скорость, об/мин:  $n_2 := 1479$
8. Число пар полюсов:  $p_0 := 2$
9. КПД ( $\eta$ ) и коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ):  $\eta := 0.93$   $\cos\varphi := 0.9$
10. Кратность пускового тока  $i_k$  и момента  $m_k$   $i_k := 7$   $m_k := 2.1$

$$11. \text{ Фазный ток, А: } I_H := \frac{P_2}{m \cdot U_{1H} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad I_H = 135.77$$

$$s_n := \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad s_n = 0.01$$

$$s_k := \left[ m_k + \sqrt{m_k^2 + 2 \cdot s_n \cdot (m_k - 1)} - 1 \right] \cdot s_n \cdot \left[ 1 - 2 \cdot s_n \cdot (m_k - 1) \right]^{-1} \quad s_k = 0.06$$

Коэффициент  $b_k = (L_{\sigma s} / L_m) + 1 = 1.01 - 1.06$ . Примерно  $b_k := 1 + s_n$   $b_k = 1.01$   
 Механические потери, Вт

$$\Delta P_m := \left[ U_s \cdot (\sqrt{3} \cdot I_H) \cdot \cos\varphi - P_2 \right] \cdot \left( 1 + \frac{n_1^2}{1000^2} \right) \cdot 0.05 \quad \Delta P_m = 881.19 \text{ Вт}$$

$$r_s := 3 \cdot \left( \frac{U_s}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{(1 - s_n)}{2 \cdot b_k \cdot \left( 1 + \frac{b_k}{s_k} \right) \cdot m_k \cdot (P_2 + \Delta P_m)} \quad r_s = 0.02 \text{ Ом}$$

$$r_r := \frac{P_2 + \Delta P_m}{3 \cdot (1 - s_n) \cdot i_k^2 \cdot I_H^2}$$

$$L_s := \frac{U_s}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_H \cdot \left[ \sqrt{1 - (\cos\varphi)^2} - \cos\varphi \cdot \frac{s_n}{s_k} \right]} \quad r_r = 0.03 \text{ Ом}$$

$$L_s = 0.02 \text{ Гн}$$

$$L_{\sigma s} := \frac{\sqrt{\left( \frac{U_s}{i_k \cdot I_H \cdot \sqrt{3}} \right)^2 - (r_r + r_s)^2}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \quad L_r := L_s$$

$$L_m := L_s - L_{\sigma s}$$

$$L_m = 0.02 \text{ Гн}$$

**Расчёт параметров структурной схемы и регуляторов векторной САУ**

**1. Исходные данные**

$$f_1 := 50 \text{ Гц} \quad U_{1H} := 220 \text{ В} \quad I_H := 135 \text{ А} \quad U_Y := 380 \text{ В} \quad J_\Sigma := 2 \text{ кгм}^2$$

$$p_0 := 2 \quad \Omega := 314.16 \quad \omega_0 := 157.1 \text{ Номинальная скорость} \quad \omega_H := 155.2 \text{ рад/с}$$

$$r'_2 := 0.0218 \quad r_1 := 0.03972 \text{ Ом} \quad L_r := 0.0232 \quad L_s := 0.02315 \text{ Гн} \quad k_s := 0.98 \quad k_r := 0.976$$

Коэфф.передачи (В/В) и постоянная времени (с) ТПЧ:

$$K_{ТП} := \frac{1.414 \cdot U_{1H}}{10} \quad T_m := 0.001$$

$$K_{ТП} = 31.108$$

Главное потокосцепление, Вб

$$\Psi_0 := \frac{U_{1H}}{4.44 \cdot f_1} \quad \Psi_0 = 0.991$$

Датчики сигналов ОС

$$K_T := \frac{1}{I_H} \text{ В/А} \quad K_W := \frac{10}{\omega_H} \text{ В*с} \quad K_{ДП} := \frac{10}{\Psi_0} \text{ В/Вб}$$

$$K_T = 0.007 \quad K_W = 0.064 \quad K_{ДП} = 10.091$$

**2. Расчет параметров структурной схемы САУ**

$$T_\Psi := (1 - k_s \cdot k_r) \cdot \frac{L_r}{r'_2 \cdot (1 - k_s)} \quad k_\Psi := k_s \cdot \frac{L_r}{r'_2} \quad T_\Psi = 2.316 \quad k_\Psi = 1.043 \quad C_m := 1.5 \cdot p_0$$

$$T_i := \frac{L_s \cdot (1 - k_s \cdot k_r)}{r_1 + k_r \cdot r'_2} \quad k_i := \frac{1}{r_1 + k_r \cdot r'_2} \quad T_i = 0.017 \quad k_i = 16.394 \quad C_m = 3$$

**3. Регуляторы векторной САУ. Канал потока: ПИ-регулятор потока**

$$K_2 := \frac{1}{2 \cdot T_m \cdot k_\Psi \cdot K_{ТП} \cdot K_{ДП}} \quad K_1 := K_2 \cdot T_\Psi \quad \frac{1}{K_2} = 0.655 \quad \frac{K_1}{K_2} = 2.316$$

**Канал скорости: ПИ-регулятор тока i2**

$$T_i = 0.017 \quad T_m := 0.001 \quad \Delta T := T_i - T_m \quad \Delta T = 0.016$$

$$T_a := \text{if}(\Delta T > 0, T_m, T_i) \quad T_b := \text{if}(\Delta T > 0, T_i, T_m) \quad T_t := 2 \cdot T_a$$

$$K_4 := \frac{1}{2 \cdot T_a \cdot k_i \cdot K_{ТП} \cdot K_T} \quad K_3 := K_4 \cdot T_b \quad \frac{1}{K_4} = 0.008 \quad \frac{K_3}{K_4} = 0.017$$

**Расчет П-регулятора скорости по техническому оптимуму**

$$K_{PC} := J_\Sigma \cdot \frac{K_T}{4 C_m \cdot \Psi_0 \cdot K_W \cdot T_a} \quad K_{PC} = 19.335$$

Приложение 4. Таблица. Технические данные двигателей 4А  
(IP44)

Типоразмер двигателя	P кВт	m <sub>к</sub> %	s <sub>н</sub> %	i <sub>н</sub>	КПД %	cosφ	*Параметры схемы замещения				
							X <sub>m</sub>	R',	X',	R'',	X'',
<b>Синхронная частота вращения 3000 об/мин</b>											
4A71B2Y3	1,1	2,2	6,3	5,5	77,5	0,87	2,8	0,13	0,054	0,069	0,084
4A80A2Y3	1,5	2,6	4,2	6,5	81,0	0,83	2,5	0,084	0,051	0,049	0,081
4A80B2Y3	2,2	2,6	4,3	6,5	83,0	0,87	2,7	0,076	0,060	0,049	0,087
4A100L2Y3	5,5	2,5	3,4	7,5	87,5	0,91	3,8	0,050	0,054	0,036	0,11
4A132M2Y3	11,0	2,8	2,3	7,5	88,0	0,90	4,2	0,040	0,061	0,025	0,12
4A160S2Y3	15,0	2,2	2,1	7,0	88,0	0,91	4,0	0,052	0,092	0,022	0,12
4A160M2Y3	18,5	2,2	2,1	7,0	88,5	0,92	4,5	0,049	0,092	0,022	0,12
4A180S2Y3	22,0	2,5	1,9	7,5	88,5	0,91	3,6	0,035	0,091	0,020	0,11
4A180M2Y3	30,0	2,5	1,8	7,5	90,5	0,90	3,8	0,033	0,073	0,018	0,11
4A200M2Y3	37,0	2,5	1,9	7,5	90,0	0,89	4,1	0,029	0,094	0,021	0,12
4A200L2Y3	45,0	2,5	1,8	7,5	91,0	0,90	4,9	0,027	0,088	0,020	0,13
4A225M2Y3	55,0	2,5	1,8	7,5	91,0	0,92	5,6	0,026	0,092	0,019	0,12
4A250S2Y3	75,0	2,5	1,4	7,5	91,0	0,89	4,8	0,021	0,080	0,015	0,13
4A250M2Y3	90,0	2,5	1,4	7,5	92,0	0,90	5,2	0,023	0,078	0,016	0,13
4A280S2Y3	110	2,2	2,0	7,0	91,0	0,89	3,8	0,017	0,097	0,013	0,10
4A280M2Y3	132	2,2	2,0	7,0	91,5	0,89	4,2	0,017	0,095	0,013	0,10
<b>Синхронная частота вращения 1500 об/мин</b>											
4A80A4Y3	1,1	2,2	5,4	5,0	75,0	0,81	1,7	0,12	0,078	0,068	0,12
4A80B4Y3	1,5	2,2	5,8	5,0	77,0	0,83	1,9	0,12	0,078	0,068	0,12
4A90L4Y3	2,2	2,4	5,1	6,0	83,0	0,83	2,1	0,098	0,076	0,06	0,13
4A112M4Y3	5,5	2,2	3,6	7,0	85,5	0,85	2,8	0,034	0,078	0,041	0,13
4A132M4Y3	11,0	3,0	2,8	7,5	87,5	0,87	3,2	0,043	0,085	0,032	0,13
4A160S4Y3	15,0	2,3	2,3	7,0	88,5	0,88	4,0	0,047	0,086	0,025	0,13
4A160M4Y3	18,5	2,3	2,2	7,0	89,5	0,88	4,3	0,042	0,085	0,024	0,13
4A180S4Y3	22,0	2,3	2,0	6,5	90,0	0,90	4,0	0,041	0,080	0,021	0,12
4A180M4Y3	30,0	2,3	1,9	6,5	91,0	0,89	3,9	0,034	0,088	0,018	0,12
4A200M4Y3	37,0	2,5	1,7	7,0	91,0	0,90	4,4	0,039	0,086	0,018	0,14
4A200L4Y3	45,0	2,5	1,6	7,0	92,0	0,90	4,6	0,034	0,082	0,017	0,14
4A225M4Y3	55,0	2,5	1,4	7,0	92,5	0,90	4,2	0,027	0,086	0,015	0,14
4A250S4Y3	75,0	2,3	1,2	7,0	93,0	0,90	4,4	0,025	0,089	0,014	0,11
4A250M4Y3	90,0	2,3	1,3	7,0	93,0	0,91	5,0	0,024	0,093	0,014	0,12
4A280S4Y3	110	2,0	2,3	6,0	92,5	0,90	4,9	0,023	0,122	0,019	0,16
4A280M4Y3	132	2,0	2,3	6,0	93,0	0,93	4,5	0,021	0,115	0,018	0,15

Продолжение таблицы

Типоразмер двигателя	P кВт	m <sub>к</sub> %	s <sub>н</sub> %	i <sub>п</sub>	КПД %	cosφ	*Параметры схемы замещения				
							X <sub>м</sub>	R' <sub>1</sub>	X' <sub>1</sub>	R'' <sub>2</sub>	X'' <sub>2</sub>
<b>Синхронная частота вращения 1000 об/мин</b>											
4A80B6Y3	1,1	2,2	8,0	4,0	74,0	0,74	1,6	0,12	0,11	0,11	0,19
4A90L6Y3	1,5	2,2	6,4	4,5	75,0	0,74	1,8	0,11	0,11	0,088	0,21
4A100L6Y3	2,2	2,2	5,1	5,0	81,0	0,73	1,9	0,090	0,11	0,067	0,21
4A132S6Y3	5,5	2,5	3,3	6,0	85,0	0,80	1,9	0,037	0,072	0,041	0,11
4A160S6Y3	11,0	2,0	2,7	6,0	84,0	0,86	3,0	0,073	0,11	0,030	0,15
4A160M6Y3	15,0	2,0	2,6	6,0	87,5	0,87	3,0	0,062	0,10	0,028	0,16
4A180M6Y3	18,5	2,0	2,4	6,0	88,0	0,87	2,9	0,056	0,11	0,026	0,13
4A200M6Y3	22,0	2,4	2,3	6,5	90,0	0,90	4,1	0,050	0,11	0,024	0,14
4A200L6Y3	30,0	2,4	2,1	6,5	90,5	0,90	3,7	0,046	0,12	0,022	0,13
4A225M6Y3	37,0	2,3	1,8	6,5	91,0	0,89	3,7	0,042	0,10	0,019	0,13
4A250S6Y3	45,0	2,1	1,4	6,5	91,5	0,89	3,8	0,037	0,090	0,015	0,14
4A250M6Y3	55,0	2,1	1,3	6,5	91,5	0,89	3,4	0,034	0,083	0,014	0,13
4A280S6Y3	75,0	2,2	2,0	7,0	92,0	0,89	3,7	0,032	0,12	0,021	0,13
4A280M6Y3	90,0	2,2	1,8	7,0	92,5	0,89	3,5	0,03	0,11	0,019	0,12
4A315S6Y3	110	2,2	1,8	7,0	93,0	0,93	3,9	0,026	0,10	0,018	0,12
4A315M6Y3	132	2,2	1,7	7,0	93,5	0,90	3,5	0,023	0,099	0,018	0,12
<b>Синхронная частота вращения 750 об/мин</b>											
4A90LB8Y3	1,1	1,9	7,0	3,5	70,0	0,68	1,4	0,13	0,15	0,11	0,30
4A100L8Y3	1,5	1,9	7,0	4,0	74,0	0,65	1,5	0,11	0,16	0,093	0,32
4A112MA8Y3	2,2	2,2	6,0	5,0	76,5	0,71	1,5	0,093	0,11	0,083	0,17
4A132M8Y3	5,5	2,6	4,1	5,5	83,0	0,74	1,8	0,070	0,11	0,061	0,19
4A160M8Y3	11,0	2,2	2,5	6,0	87,0	0,75	2,0	0,066	0,13	0,031	0,18
4A180M8Y3	15,0	2,0	2,6	5,5	87,0	0,82	2,4	0,034	0,13	0,030	0,17
4A200M8Y3	18,5	2,2	2,3	5,5	88,5	0,84	2,6	0,057	0,13	0,028	0,16
4A200L8Y3	22,0	2,0	2,7	5,5	88,5	0,84	3,1	0,062	0,14	0,029	0,18
4A225M8Y3	30,0	2,1	1,8	6,0	90,5	0,81	2,3	0,045	0,12	0,022	0,17
4A250S8Y3	37,0	2,0	1,6	6,0	90,0	0,83	2,8	0,047	0,11	0,017	0,18
4A250M8Y3	45,0	2,0	1,4	6,0	91,0	0,84	2,6	0,037	0,099	0,016	0,17
4A280S8Y3	55,0	2,0	2,2	5,5	92,0	0,84	2,5	0,035	0,12	0,022	0,14
4A280M8Y3	75,0	2,0	2,2	5,5	92,5	0,85	2,6	0,028	0,12	0,021	0,13
4A315S8Y3	90,0	2,3	1,5	6,5	93,0	0,85	2,6	0,023	0,11	0,019	0,13
4A315M8Y3	110	2,3	1,5	6,5	93,0	0,85	2,4	0,023	0,10	0,019	0,12
4A355S8Y3	132	2,2	1,3	6,5	93,5	0,85	2,9	0,023	0,12	0,017	0,16

\* Значения параметров схемы замещения даны в относительных единицах

$$X = xI_{н.ф} / U_{н.ф}; R = rI_{н.ф} / U_{н.ф},$$

где X, R – сопротивления в отн. ед.; x, r – сопротивления, Ом;  $I_{н.ф} = P/3 U_{н.ф} \eta \cos\phi$  - номинальный ток статора

Величины, параметры и постоянные, используемые при расчетах

Величина	Обозначение	Единица измерения	Формула
Перемещение	$S$	м	
Время	$t$	с	
Скорость	$v$	м/с	
Ускорение	$a$	м/с <sup>2</sup>	
Угловое перемещение	$\varphi$	рад	
Угловая скорость	$\omega$	рад/с	
Частота вращения*	$n$	об/мин	$\omega = n/9,55$
Угловое ускорение	$\varepsilon$	рад/с <sup>2</sup>	
Масса	$m$	кг	
Сила	$F$	Н	
Вес*	$G$	Н	$G = m g$
Момент	$M$	Н м	
Момент инерции	$J$	кг м <sup>2</sup>	
Мощность	$P$	Вт	
Напряжение	$U$	В	
ЭДС	$E$	В	
Ток	$I$	А	
Активное сопротивление	$R, r$	Ом	
Индуктивность	$L$	Гн	
Емкость	$C$	Ф	
Реактивное сопротивление	$X, x$	Ом	
Магнитная индукция	$B$	Тл	
Магнитный поток	$\Phi$	Вб	
Ускорение свободного падения	$g$	м/с <sup>2</sup>	$g = 9,807 \approx 10 \text{ м/с}^2$
Коэффициент крутизны механической характеристики	$\beta$	-	$\beta = \Delta\omega M_H / \Delta M \omega_H$
Коэффициент жесткости механической характеристики	$\gamma$	-	$\gamma = \beta^{-1}$
Жесткость механической характеристики	$\gamma^*$	Н м с	$\gamma^* = \Delta M / \Delta \omega$

\*Внесистемные единицы и величины, применимые наряду с системными единицами по ГОСТ 8.417-2002

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	1
1. Назначение и состав электрического привода .....	4
2. Механика электроприводов .....	5
3. Нагрузочные диаграммы и выбор мощности двигателей приводов .....	12
4. Электромеханические свойства электроприводов постоянного тока .....	18
5. Электромеханические свойства электроприводов переменного тока .....	31
6. Статические и динамические характеристики регулируемых приводов .....	42
6.1. Влияние обратной связи на параметры электропривода .....	43
6.2. Настройка регуляторов системы привода ТП-Д .....	48
6.3. Настройка регуляторов системы управления привода ПЧ-АД .....	54
Библиографический список .....	59
Приложения .....	60