

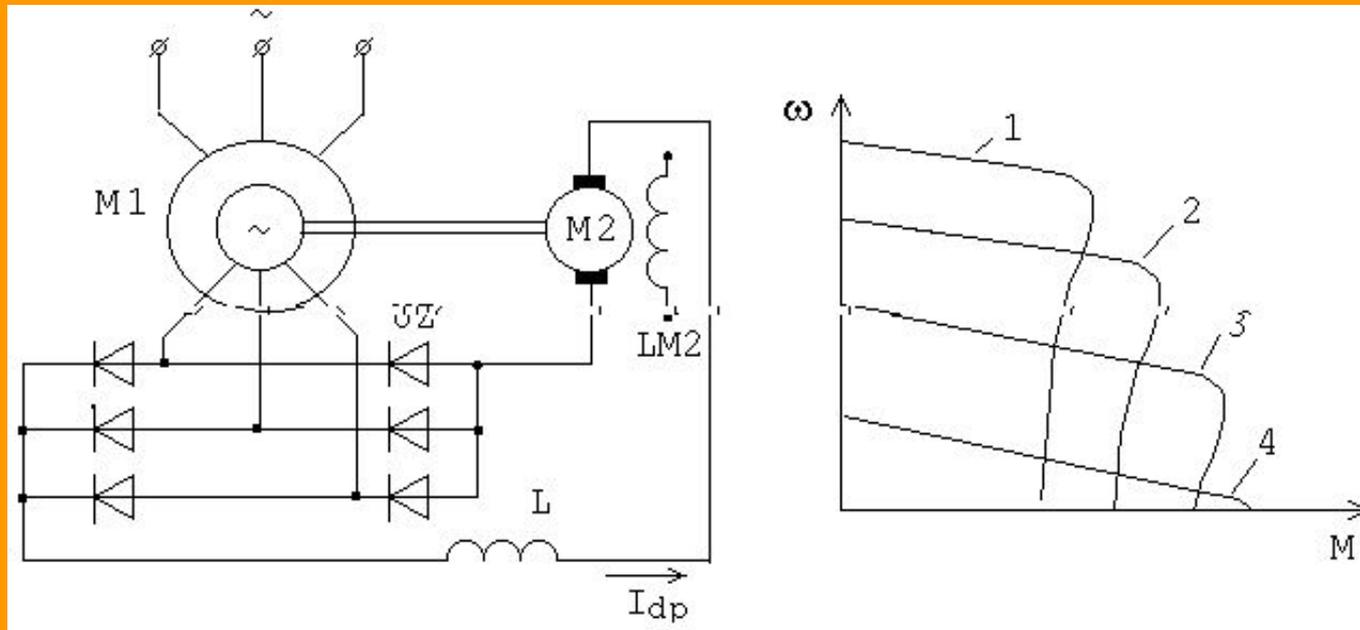
# РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ В КАСКАДНЫХ СХЕМАХ

Принцип работы асинхронных  
вентильных каскадов

Принцип регулирования скорости асинхронного двигателя в каскадных схемах заключается во введении в роторную цепь добавочной ЭДС  $E_{доб}$

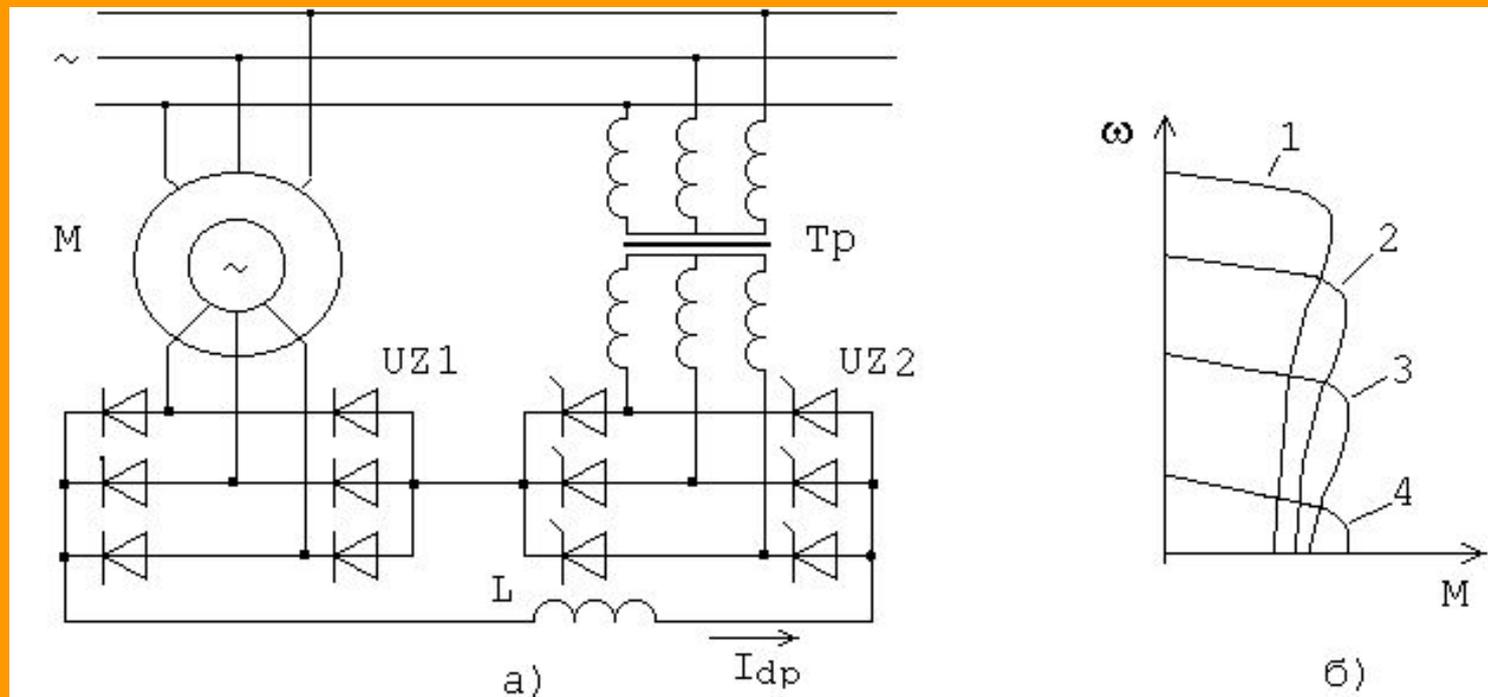
$$I_2 = \frac{E_2 - E_{доб}}{Z}$$

Источником добавочной ЭДС тогда может служить либо машина постоянного тока (вентильно-машинный каскад), либо статический преобразователь, подключённый к питающей сети (вентильный каскад)



Недостатки: низкая жёсткость характеристик;  
завышенная мощность машины постоянного тока М2

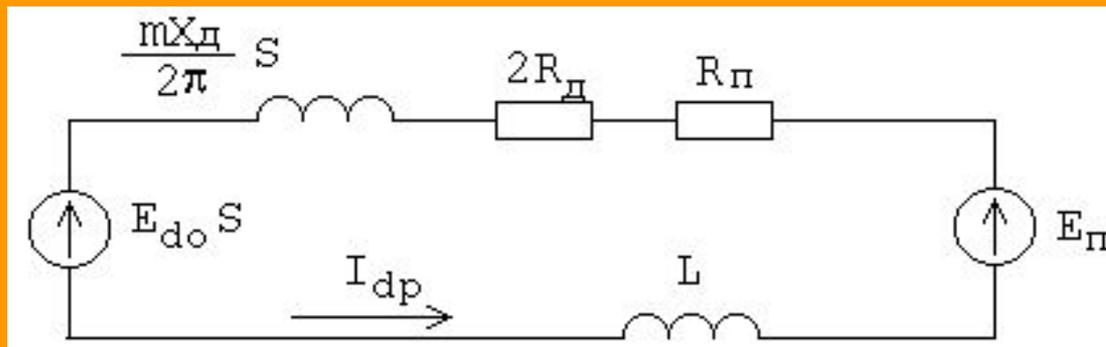
каскад электрический



Энергия скольжения в данном каскаде через статический преобразователь возвращается в сеть

В АВК энергия скольжения вначале преобразуется в энергию постоянного тока, а затем инвертором UZ2 в энергию переменного тока фиксированной частоты

Для анализа характеристик каскадов рассмотрим схему замещения роторной цепи двигателя



$$E_{dpo} S = E_n + I_{dp} \cdot R_{\sigma}; \quad \text{где } R_{\sigma} = 2R_{\delta} + (m_{\sigma}/2\pi)X_{\delta} \cdot S + R_n$$

Для вентильно-машинного каскада  $R_n = R_{я}$

$$\text{в АВК} \quad R_n = 2R_m + (m_u/2\pi) \cdot X_m$$

Соотношение между выпрямленным током  $I_{др}$  и моментом двигателя может быть найдено из уравнения потерь в роторной цепи двигателя

$$\Delta P_2 = M \cdot \omega_o \cdot S = U_{dp} \cdot I_{dp}$$

$$\text{где } U_{dp} = E_{dpo} \cdot S - (m_{\sigma}/2\pi) X_{\delta} \cdot I_{dp} \cdot S$$

При условии что  $(m_{\sigma}/2\pi)X_{\delta} \cdot S \gg 2R_{\delta}$

Отсюда

$$M = (1/\omega_o) \cdot [E_{dpo} - (m_b/2\pi)X_d \cdot I_{dp}] \cdot I_{dp}$$

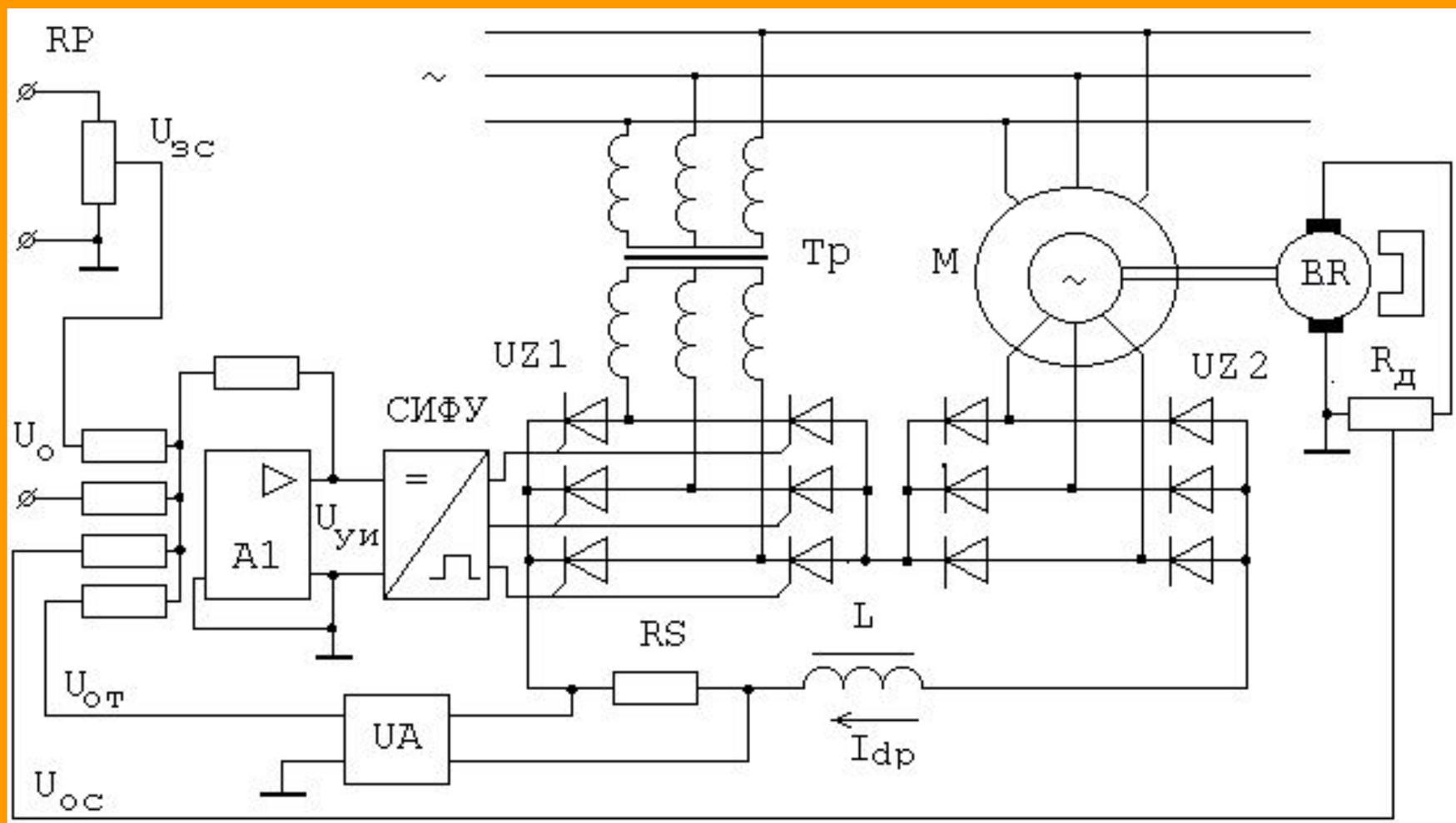
Выражая значение скольжения в режиме холостого хода (при  $I_{dp} = 0$ ), получим

$$S_o = E_n / E_{dpo}$$

Тогда уравнение механической характеристики асинхронного двигателя в каскадной схеме включения может быть получено из уравнения при подстановке в него  $I_{dp}$  и  $S_o$

$$M = \frac{E_{dpo}^2}{\omega_o} \cdot \frac{S - S_o}{R_{\Delta}^2} \cdot \left[ R_{\Delta} - \frac{m_b \cdot X_d}{2 \cdot \pi} \cdot (S - S_o) \right]$$

# Система управления асинхронно-вентильным каскадом с суммирующим усилителем



Для получения выражения статических характеристик замкнутой системы АВК и их анализа запишем уравнения электрического равновесия для каждого функционального узла системы

$$U_y = U_o - [U_{zc} - K_c \cdot \omega + K_m \cdot I_{dp}]$$

Напряжение управления инвертора

$$U_{yu} = K_{AI} \cdot U_y$$

ЭДС инвертора

$$E_u = K_u \cdot U_{yu}$$

где  $K_u = \Delta E_u / \Delta U_{yu}$

Напряжение в цепи выпрямленного тока ротора

$$E_{dpo} \cdot S - E_u = I_{dp} \cdot R_{\vartheta}$$

где  $R_{\vartheta} = 2R'_1 \cdot S + 2R_2 + (m_{\vartheta} / 2\pi) \cdot X_{\vartheta} \cdot S + R_p + 2R_m + (m_u / 2\pi) \cdot X_m$

в расчётах можно принять  $R_p \sim (0,002 \dots 0,005) U_{dн} / I_{dпн}$

Электромагнитный момент двигателя определится

$$M = (1/\omega_{\vartheta}) \cdot [E_{dpo} - (m_{\vartheta} / 2\pi) X_{\vartheta} \cdot I_{dp}] \cdot I_{dp}$$

Выражая текущее значение скорости  $\omega$  через синхронную и величину скольжения  $\omega = \omega_o(1-S)$  и решая совместно уравнения

$$\frac{E_{dpo}}{R_{\vartheta}} \cdot S - K_{A1} \cdot K_{II} \cdot \{U_0 - [U_{3c} - K_C \cdot \omega_0 (1-S) + K_m \cdot I_{dp}]\} = I_{dp}$$

Отсюда находим величину скольжения холостого хода  $S_0$  для заданного  $U_{3c}$  при  $I_{dp} = 0$

$$S_0 = \frac{K_{A1} \cdot K_{II} \cdot (U_0 - U_{3c} + K_C \cdot \omega_0)}{E_{dpo} + K_C \cdot K_{A1} \cdot K_{II} \cdot \omega_0}$$

Тогда, разрешив уравнение относительно  $S$  и учитывая  $S_0$ , получим уравнение электрохимической характеристики системы

$$S = S_0 + I_{dp} \cdot \frac{R_{\vartheta} - K_T \cdot K_{A1} \cdot K_{II}}{E_{dpo} + K_C \cdot K_{A1} \cdot K_{II} \cdot \omega_0}$$

Для нахождения уравнения механической характеристики из полученного выражаем  $I_{dp}$  и подставляем его в уравнение электромагнитного момента

$$M = \frac{\left\{ E_{dpo}^2 \cdot \left( 1 + \frac{K_C \cdot K_{A1} \cdot K_{II} \cdot \omega_0}{E_{dpo}} \right)^2 \cdot \left[ \frac{R_{\vartheta} - K_T \cdot K_{A1} \cdot K_{II}}{(1 + K_C \cdot K_{II} \cdot K_{A1} \cdot \omega_0) / E_{dpo}} - \frac{m_B \cdot X_D}{2} \cdot (S - S_0) \right] \right\} \cdot (S - S_0)}{\omega_0 \cdot (R_{\vartheta} - K_T \cdot K_{A1} \cdot K_{II})^2}$$

# Анализ динамических характеристик системы АВК

## с суммирующим усилителем

Запишем дифференциальное уравнение для каждого функционального узла системы

$$U_y = U_o - [U_{zc} - K_c \cdot \omega_o \cdot (1-S) + K_m \cdot i_{dp}];$$

$$U_{yu} = K_u \cdot U_y;$$

$$e_{II} + T_{II} \cdot \frac{de_{II}}{dt} = K_{II} \cdot U_{yII}$$

$$e_{dpo} \cdot S - e_{II} = i_{dp} \cdot R_{\mathcal{E}} + L_{\mathcal{E}} \cdot \frac{di_{dp}}{dt}$$

$$M = \frac{1}{\omega_0} \cdot \left[ E_{dpo} - \frac{m_B \cdot X_D}{2 \cdot \pi} \cdot i_{dp} \right] \cdot i_{dp}$$

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

Для упрощения анализа можно составить структурную схему системы

Однако этому препятствуют две нелинейности:

Для большинства практических расчётов с достаточной степенью точности зависимостью  $R_{\vartheta}$  от  $S$  можно пренебречь, а  $R_{\vartheta}$  можно принять постоянным при среднем значении скольжения  $S_{cp}$  в заданном диапазоне регулирования скорости

Нелинейную зависимость момента  $M$  двигателя от тока  $i_{dp}$  можно линеаризировать, если коэффициент между  $M$  и  $i_{dp}$  определить по средней для данного привода нагрузке  $I_{dpcp}$ , то есть

$$M = (1/\omega_{\vartheta}) \cdot [E_{dpo} - (m_{\vartheta}/2\pi) \cdot X_{\vartheta} \cdot I_{dpcp}] \cdot i_{dp} = C_M \cdot i_{dp}$$

Тогда с учётом принятых допущений система дифференциальных уравнений записывается в конечных приращениях относительно выбираемой рабочей точки, для которой принимается:  $\omega = \omega_l$ ;  $i_{dp} = i_{dp1}$ ;  $L_{\vartheta} = L_{\vartheta1}$ ;  $T_{\vartheta} = T_{\vartheta1} = L_{\vartheta1} / R_{\vartheta1}$ ;  $C_M = C_{M1}$ ;  $U_{3c} = U_{3c1}$ . В операторной форме записи она будет иметь вид:

$$\Delta U_{y1} = -(\Delta U_{3c1} - K_C \cdot \Delta \omega_1 + K_T \Delta i_{dp1})$$

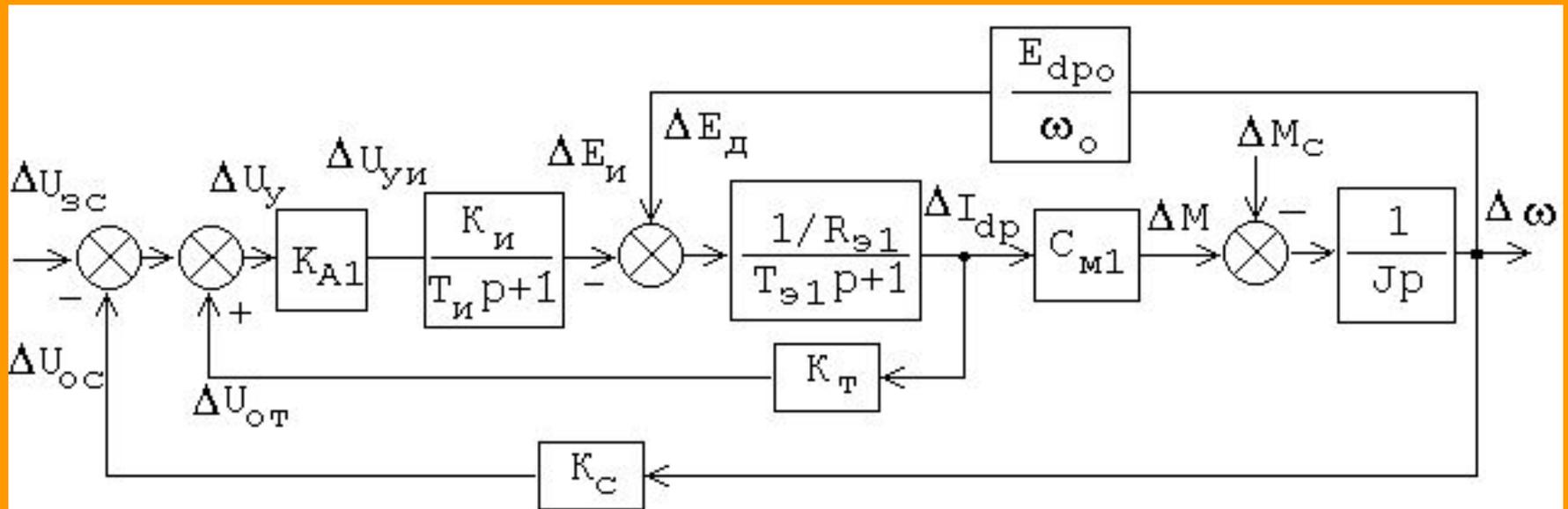
$$\Delta U_{yu1} = K_{A1} \cdot \Delta U_{y1}$$

$$\Delta E_{и1} \cdot (T_{и} \cdot p + 1) = K_{и} \cdot \Delta U_{yu1}$$

$$\frac{E_{dpo}}{\omega_0} \cdot \Delta \omega_1 - \Delta E_{и1} = \Delta I_{dp1} \cdot R_{э1} \cdot (T_{э1} \cdot p + 1)$$

$$\Delta M = C_{M1} \cdot \Delta I_{dp1}$$

$$\Delta M - \Delta M_c = J \cdot p \cdot \Delta \omega_1$$



$$W_{33}(p) = \frac{\Delta\omega_1(p)}{\Delta U_{3C1}(p)} = \frac{K_3}{(T_H \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{Э1}} \cdot T_2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p) + K_C \cdot K_3 - (K_T \cdot K_{A1} \cdot K_H / R_{\text{Э1}}) \cdot T_2 \cdot p} =$$

$$= \frac{K_3}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}$$

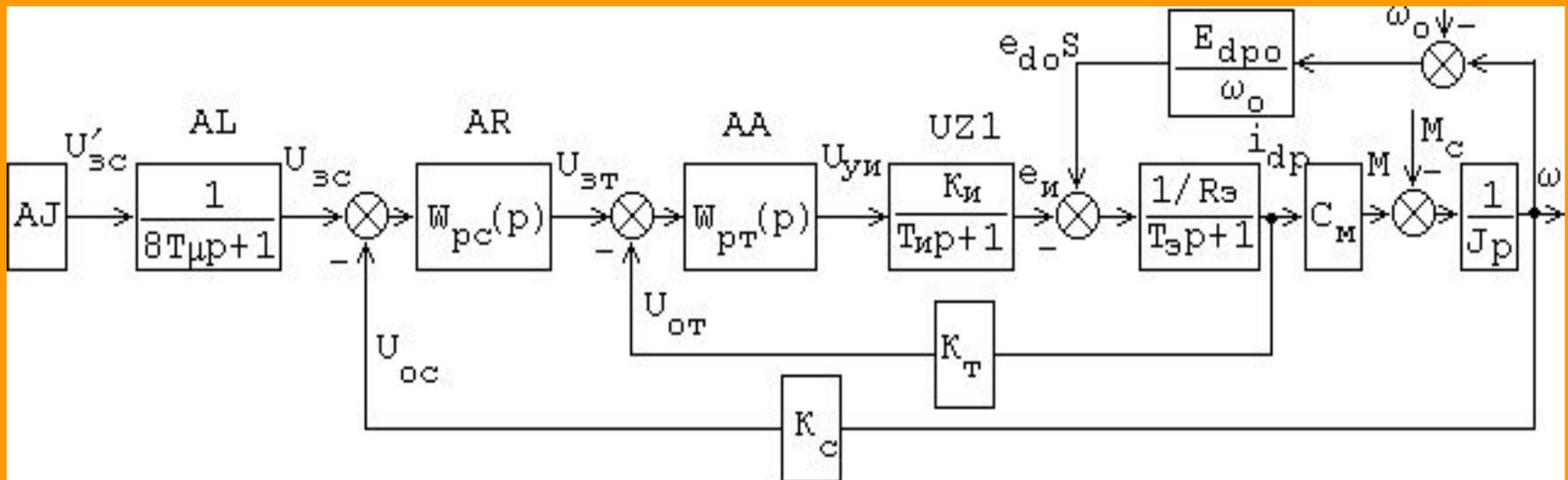
где  $K_3 = K_{A1} \cdot K_u \cdot \omega_o / E_{dpo}$ ;  $T_2 = J \cdot R_{\text{Э1}} \cdot \omega_o / (C_{M1} \cdot E_{dpo})$ ;  $a_3 = T_u \cdot T_{\text{Э1}} \cdot T_2$ ;  $a_2 = (T_u + T_{\text{Э1}}) \cdot T_2$ ;  $a_1 = T_u + T_2 \cdot (1 - K_m \cdot K_{A1} \cdot K_u / R_{\text{Э1}})$ ;  $a_0 = 1 + K_c \cdot K_3$

$$W_{3B}(p) = \frac{\Delta\omega_1(p)}{\Delta M_c(p)} = \frac{K_{3B} \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot (T_H \cdot p + 1)}{(T_H \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{Э1}} \cdot T_2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p) + K_C \cdot K_3 - (K_T \cdot K_{A1} \cdot K_H / R_{\text{Э1}}) \cdot T_2 \cdot p} =$$

$$= \frac{K_{3B} \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot (T_H \cdot p + 1)}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}$$

где  $K_{3B} = R_{\text{Э1}} \cdot \omega_o / (C_{M1} \cdot E_{dpo})$ .

# Подчинённое регулирование координат в системе АВК



За малую некомпенсируемую постоянную времени  $T_{\mu}$  принимается сумма малых постоянных времени: инвертора с системой импульсно-фазового управления и фильтра датчика тока

Пренебрегая внутренней обратной связью по ЭДС ротора, оптимизацию контура тока можно осуществить по техническому оптимуму.

Используя методику синтеза регуляторов, принятую для приводов постоянного тока, найдём передаточную функцию регулятора тока:

$$W_{PT} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p} \cdot \frac{R_{\vartheta} \cdot (T_{\vartheta} \cdot p + 1)}{K_{И} \cdot K_T} = \frac{R_{\vartheta} \cdot T_{\vartheta}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot K_{И} \cdot K_T} + \frac{R_{\vartheta}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot K_{И} \cdot K_{TP}}$$

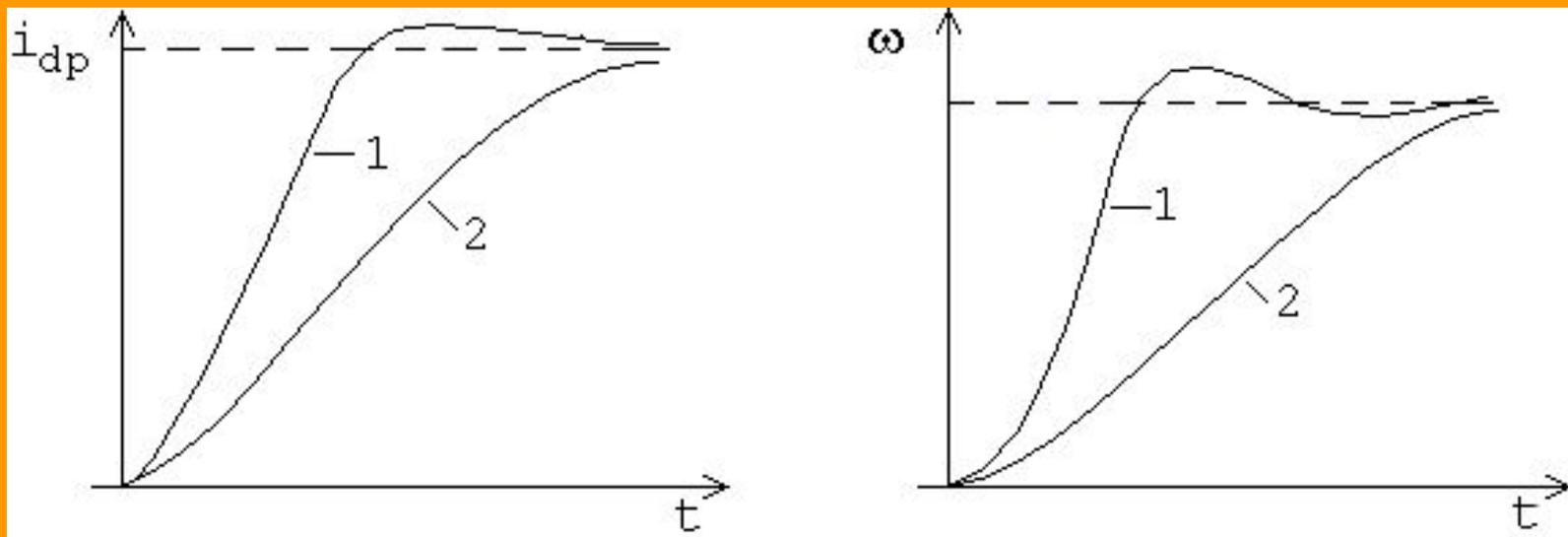
Передаточная функция оптимизированного контура будет иметь вид:

$$W_{OKT}(p) = \frac{I_{dp}(p)}{U_{3T}(p)} = \frac{1}{K_T \cdot [2 \cdot T_{\mu} \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1) + 1]}$$

Примерный вид переходных процессов при разных значениях  $S$  показан на рис.

Передаточная функция оптимизированного регулятора скорости будет иметь вид:

$$W_{PC}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot p} \cdot \frac{J \cdot p \cdot K_T}{C_M \cdot K_C} = \frac{J \cdot K_T}{4 \cdot T_{\mu} \cdot C_M \cdot K_C}$$



Передаточная функция оптимизированного контура скорости опишется выражением

$$W_{\text{окс}}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\text{зс}}(z)} = \frac{1}{K_c \cdot \{4 \cdot T_\mu \cdot p \cdot [2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1) + 1] + 1\}}$$

электромеханическая характеристика будет иметь подобный вид, как и для систем электропривода постоянного тока:

$$\omega = \frac{U_{\text{зс}}}{K_c} - \frac{4 \cdot T_\mu \cdot E_{\text{дро}}}{J} \cdot M_c$$

Если такой перепад скорости не удовлетворяет требованиям производственного механизма, то оптимизацию контура скорости как и в приводах постоянного тока проводят по симметричному оптимуму, в результате чего регулятор скорости получается пропорционально-интегральным с передаточной функцией:

$$W'_{PC}(p) = \frac{(8 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1) \cdot J \cdot K_T}{32 \cdot T_{\mu}^2 \cdot C_M \cdot K_C \cdot p}$$

Для уменьшения величины перерегулирования действие форсирующего звена в регуляторе скорости можно компенсировать включением на вход системы апериодического звена с передаточной функцией

$W_{\phi}(p) = 1/(8T_{\mu} \cdot p + 1)$ . В тех случаях, когда необходимо сформировать требуемый переходный процесс в системе, на вход включают задатчик интенсивности АІ

При синтезе систем подчинённого регулирования АВК следует учитывать две особенности каскадов, заключающиеся в отсутствии тормозных режимов и выбеге двигателя при  $E_u > E_{dpoS}$  при изменении скольжения от нуля до единицы и меньшей возможности форсирования процессов, так как форсирующее действие системы связано с уменьшением выходного сигнала ЭДС инвертора, предел регулирования которого равен нулю