

## Многоконтурные системы АЭП

В процессе регулирования скорости или положения вала исполнительного двигателя требуется контролировать и ограничивать ряд координат электропривода на допустимом уровне

(ток, напряжение, ЭДС, поток, скорость и т.д.), поэтому современные системы АЭП - многоконтурные

# Принципы построения многоконтурных систем АЭП

1. Многоконтурные АЭП с параллельными контурами регулирования с одним или несколькими регуляторами.

А). Один регулятор

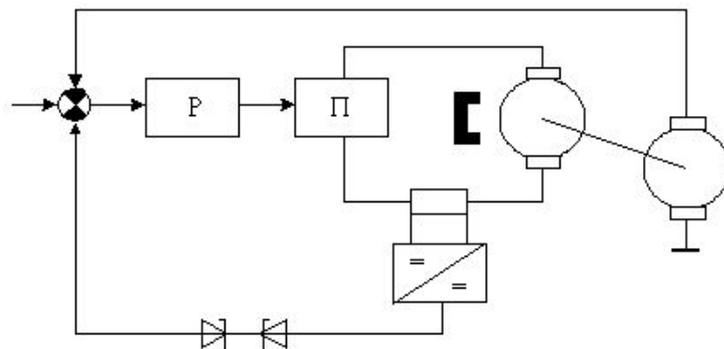
Пример: АЭП с ООС по скорости и отсечкой по току.

Недостаток – компромиссная настройка регулятора.

Б). Число регуляторов равно числу регулируемых координат.

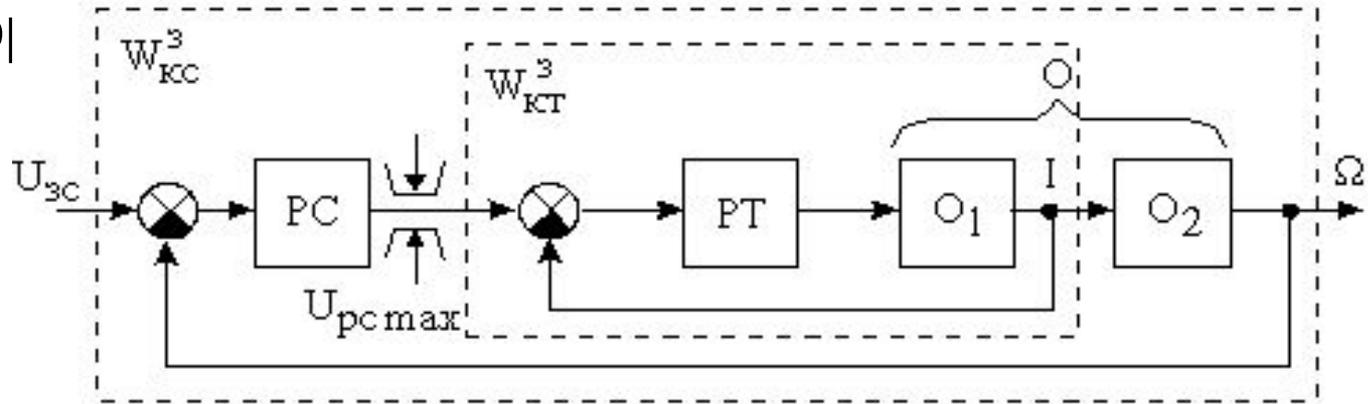
Недостаток- сложно организовать совместную работу параллельных контуров.

Достоинство – высокое быстродействие.



# Принципы построения многоконтурных систем АЭП

2. Многоконтурные системы с concentric контурами регулирования (последовательно включенными регуляторами)



У каждого параметра - свой регулятор, поэтому можно обеспечить оптимальность настройки каждого контура. Цель регулирования определяется внешним контуром (в данном случае контуром скорости). Выходной сигнал  $PC$  является задающим для внутреннего контура. Контур тока является подчиненным контуру скорости, следовательно, это система с подчиненным регулированием параметров (ПРП)

# Принципы построения многоконтурных систем АЭП

## **Достоинства:**

- - возможность реализации оптимальных законов управления каждым параметром (число контуров = числу параметров);
- - простота ограничения максимальных значений регулируемой величины - за счет ограничения сигнала на входе соответствующего контура. Ограничение тока осуществляется за счет ограничения выходного сигнала РС, который является задающим для контура тока. Максимальная скорость привода ограничивается за счет ограничения максимальных сигналов задания на входе системы;
- - упрощается расчет, наладка и реализация. Оптимизация системы начинается с внутреннего контура, который в дальнейшем будет представлен в виде звена с достаточно простой передаточной функцией, входящего в состав объекта внешнего контура.

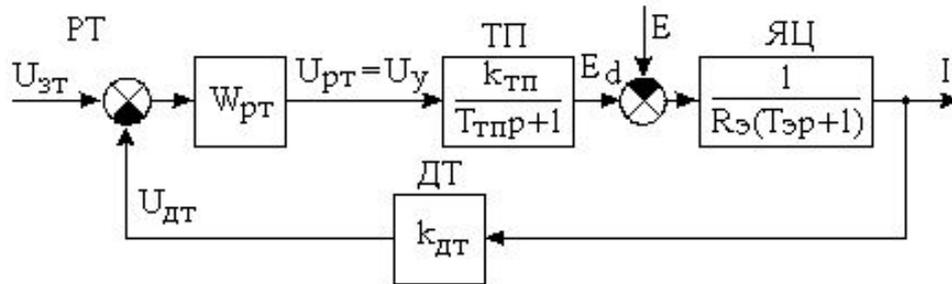
## **Недостатки:**

- - быстродействие системы снижается по мере увеличения числа контуров регулирования, т.к. малая постоянная времени в контуре увеличивается по мере возрастания номера контура.

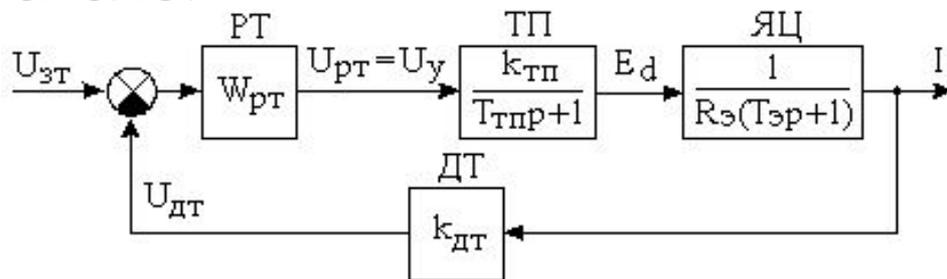


# Оптимизация контуров регулирования

Оптимизация контура тока. Структурная схема контура тока.



Структурная схема контура тока при заторможенном двигателе.



Контур тока содержит звенья с большой и малой инерционностью (малую инерционность компенсировать не следует, она будет определять помехоустойчивость контура).

# Оптимизация контура тока

Оптимизация контура тока на модульный оптимум (МО).

Запишем 
$$W_{\text{КТ}}^p(p) = W_{\text{РТ}}(p) \frac{k_{\text{ТП}}}{T_{\mu}p + 1} \frac{1}{R_{\text{Э}}(T_{\text{Э}}p + 1)} k_{\text{ДТ}} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}$$

Получим 
$$W_{\text{РТ}}(p) = \frac{R_{\text{Э}}(T_{\text{Э}}p + 1)}{2T_{\mu}p \cdot k_{\text{ТП}}k_{\text{ДТ}}} \frac{T_{\text{Э}}}{T_{\text{Э}}} = \frac{R_{\text{Э}}T_{\text{Э}}}{2T_{\mu}k_{\text{ТП}}k_{\text{ДТ}}} \frac{T_{\text{Э}}p + 1}{T_{\text{Э}}p} = k_{\text{РТ}} \frac{T_{\text{Э}}p + 1}{T_{\text{Э}}p}$$

РТ – ПИ типа, поэтому контур тока будет астатическим как по заданию, так и по возмущению (при заторможенном двигателе).

$$W_{\text{КТ}}^3(p) = \frac{1}{k_{\text{ДТ}}} \frac{W_{\text{КТ}}^p(p)}{1 + W_{\text{КТ}}^p(p)} = \frac{1}{k_{\text{ДТ}}} \frac{\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}}{1 + \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}} = \frac{1/k_{\text{ДТ}}}{1 + 2T_{\mu}p + 2T_{\mu}^2p^2}$$

$$W_{\text{КТ}}^3(p) \cong \frac{1/k_{\text{ДТ}}}{1 + 2T_{\mu}p} = \frac{1/k_{\text{ДТ}}}{1 + T_{\text{Т}}p}$$

$2T_{\mu} = T_{\text{Т}}$  - эквивалентная постоянная времени

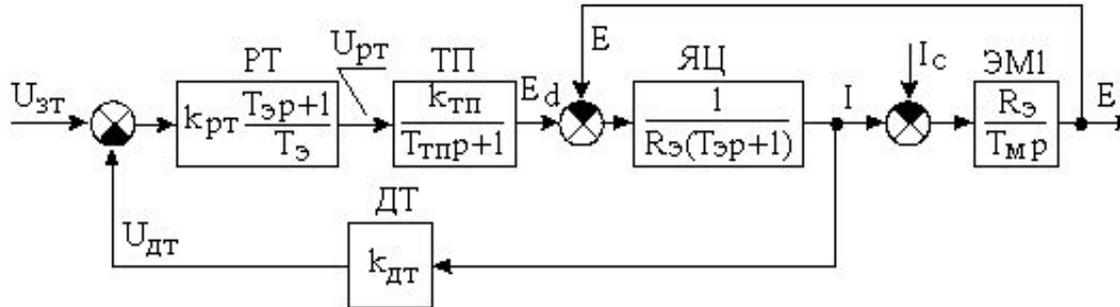
$$\lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ t \rightarrow \infty}} W_{\text{КТ}}^3(p) = 1/k_{\text{ДТ}}$$

оптимизированного на МО контура тока

# Оптимизация контура тока

Оценка влияния внутренней обратной связи по ЭДС на процессы в контуре тока.

Структурная схема контура тока с учетом влияния внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС.



Максимальное влияние ЭДС будет на ХХ, поэтому примем ( $I_c = 0$ ).

# Оптимизация контура тока

Передаточная функция звена якорной цепи с учетом влияния внутренней обратной связи по ЭДС примет вид:

$$W_{\text{яц(Е)}}(p) = \frac{1}{R_{\text{я}}(T_{\text{э}}p + 1)} = \frac{1}{R_{\text{э}}} \frac{T_{\text{м}}p}{1 + T_{\text{м}}p + T_{\text{м}}T_{\text{э}}p^2}$$

Передаточная функция звена якорной цепи обладает дифференцирующими свойствами, благодаря чему компенсируются интегральные свойства регулятора.

$$W_{\text{кт(Е)}}^p(p) = k_{\text{рм}} \frac{T_{\text{э}}p + 1}{T_{\text{э}}p} \frac{k_{\text{мн}}}{T_{\text{μ}}p + 1} \frac{T_{\text{м}}p}{R_{\text{э}}(1 + T_{\text{м}}p + T_{\text{м}}T_{\text{э}}p^2)} k_{\text{дм}} = \frac{1}{2T_{\text{μ}}} \frac{(T_{\text{э}}p + 1)T_{\text{м}}p}{(T_{\text{μ}}p + 1)(1 + T_{\text{м}}p + T_{\text{м}}T_{\text{э}}p^2)}$$

# Оптимизация контура тока

Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура тока

с учетом влияния внутренней обратной связи по ЭДС имеют

ВИД:

$$W_{km(E)}^p(p) = k_{pm} \frac{T_{\vartheta}p+1}{T_{\vartheta}p} \frac{k_{mn}}{T_{\mu}p+1} \frac{T_{\mu}p}{R_{\vartheta}(1+T_{\mu}p+T_{\mu}T_{\vartheta}p^2)} k_{\partial m} = \frac{1}{2T_{\mu}} \frac{(T_{\vartheta}p+1)T_{\mu}p}{(T_{\mu}p+1)(1+T_{\mu}p+T_{\mu}T_{\vartheta}p^2)}$$

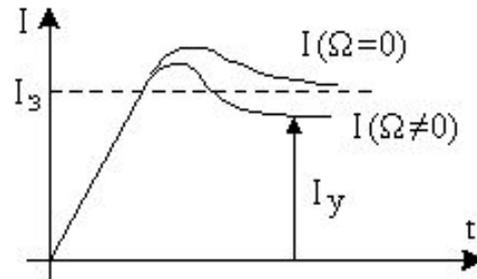
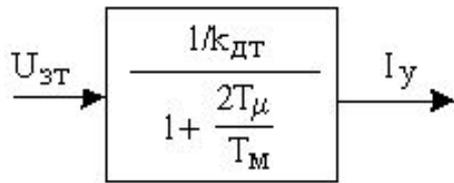
$$W_{km(E)}^z(p) = \frac{\frac{T_{\mu}}{2T_{\mu}k_{\partial m}} \frac{T_{\vartheta}p+1}{(T_{\mu}p+1)(1+T_{\mu}p+T_{\mu}T_{\vartheta}p^2)}}{1 + \frac{T_{\mu}}{2T_{\mu}} \frac{T_{\vartheta}p+1}{(T_{\mu}p+1)(1+T_{\mu}p+T_{\mu}T_{\vartheta}p^2)}} = \frac{\frac{T_{\mu}}{k_{\partial m}} (T_{\vartheta}p+1)}{2T_{\mu}(T_{\mu}p+1)(1+T_{\mu}p+T_{\mu}T_{\vartheta}p^2) + T_{\mu}(T_{\vartheta}p+1)}$$

# Оптимизация контура тока

В установившемся режиме разгона-торможения двигателя на ХХ:

$$\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{КТ}(E)}^3(p) = \frac{T_M/k_{\text{ДТ}}}{2T_\mu + T_M} = \frac{1/k_{\text{ДТ}}}{1 + \frac{2T_\mu}{T_M}}$$

$$U_{\text{ЗТ}} \cdot \frac{1/k_{\text{ДТ}}}{1 + \frac{2T_\mu}{T_M}} = I_y$$



$$I_y = \frac{I_3}{1 + \frac{2T_\mu}{T_M}}$$

где  $I_3$  – заданная величина тока в контуре тока в случае заторможенного ЭП.

Контур тока, который при заторможенном двигателе с ПИ-регулятором был астатическим, становится статическим в переходном режиме ( $\Delta E \neq 0$ ). Ошибка регулирования тем больше, чем меньше постоянная времени  $T_M$ .

# Оптимизация контура тока

Другое следствие влияния ОС по ЭДС - это увеличенное перерегулирование. По отношению к новому уровню установившегося тока перерегулирование увеличивается, но по абсолютной величине будет меньше.

Если ЭП имеет большую  $T_M$ , то за время выхода тока на заданный уровень ЭДС электродвигателя практически не меняется и ее влияние на ток минимально.

В АЭП с высокомоментными ЭД, где  $T_M$  мала, влияние внутренней ОС по ЭДС существенно, поэтому в таких АЭП следует применить другую передаточную функцию регулятора тока.

# Оптимизация контура тока

Осциллограммы тока при отработке скачка задающего сигнала при заторможенном двигателе и при учете влияния внутренней обратной связи по ЭДС (при пуске - торможении). Максимальное влияние внутренней ООС по ЭДС имеет место при пуске на ХХ и при торможении под нагрузкой.

# Оптимизация контура тока

Если передаточная функция якорной цепи может быть представлена в виде апериодического звена второго порядка с передаточной функцией:

$$W_{\text{яц}(E)}(p) = \frac{1}{R_{\text{э}}} \frac{T_M p}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)},$$

где  $T_1 + T_2 = T_M$ ;  $T_1 \cdot T_2 = T_M T_{\text{э}}$ .

Тогда, оптимизируя контур тока на МО, будем иметь более сложный регулятор тока с передаточной функцией:

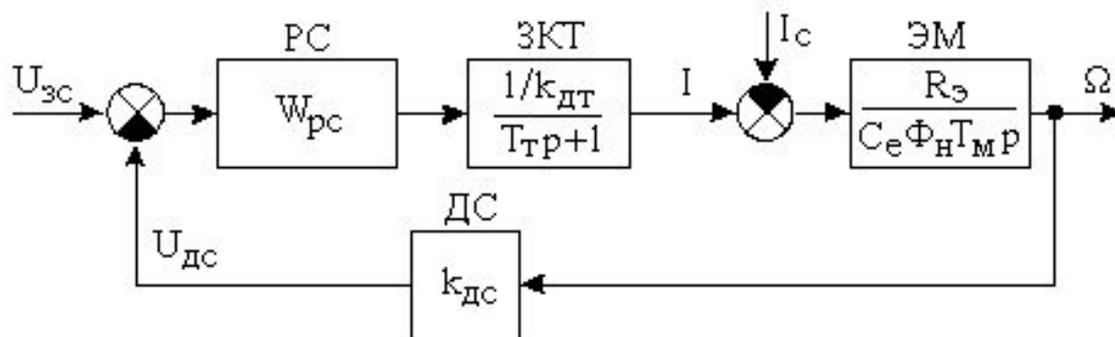
$$W_{\text{рт}(E)}(p) = k_{\text{рт}} \frac{(T_{\text{из}} p + 1)(T_y p + 1)}{T_{\text{из}} p^2},$$

где  $T_{\text{из}} = T_1$ ;  $T_y = T_2$ ;  $T_1 > T_2$ ;

Это регулятор типа  $(\text{ПИ})^2$ , реализация которого сложна и применяется крайне редко.

# Оптимизация контура скорости.

## Структурная схема контура регулирования скорости



Возможны два варианта оптимизации:

- на МО (контур скорости – однократно-интегрирующий);
- на СО (контур скорости – двукратно-интегрирующий).

Кратность интегрирования определяется количеством интегральных звеньев во внешнем

# Оптимизация контура скорости

Однократно-интегрирующая система АЭП.

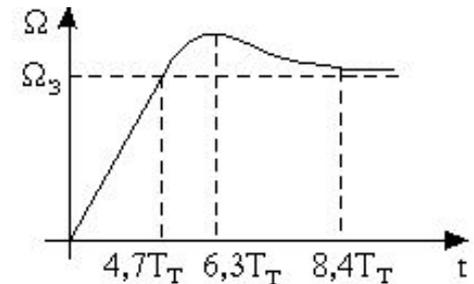
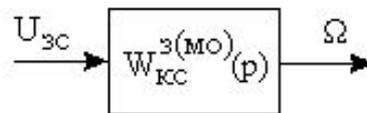
МО: 
$$W_{\text{КС}}^p(p) = W_{\text{РС}}(p) \frac{1/k_{\text{ДТ}}}{T_{\text{T}}p + 1} \frac{R_{\text{Э}}}{C_{\text{е}}\Phi_{\text{Н}}T_{\text{М}}p} k_{\text{Дс}} = \frac{1}{2T_{\text{T}}p(T_{\text{T}}p + 1)}$$

$$W_{\text{РС}}(p) = \frac{C_{\text{е}}\Phi_{\text{Н}}T_{\text{М}}k_{\text{ДТ}}}{2T_{\text{T}}R_{\text{Э}}k_{\text{Дс}}} = k_{\text{РС}}$$

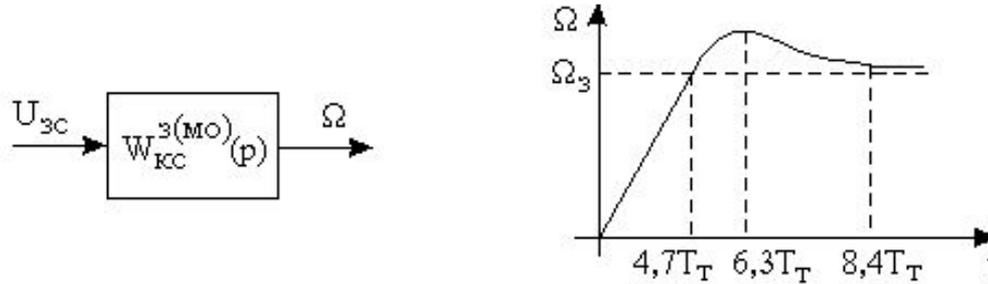
С пропорциональным РС система АЭП будет астатической по заданию и статической по возмущению.

$$W_{\text{КС}}^{z(\text{МО})}(p) = \frac{W_{\text{нк}}(p)}{1 + W_{\text{КС}}^p(p)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2T_{\text{T}}p(T_{\text{T}}p + 1)k_{\text{Дс}}}} = \frac{1/k_{\text{Дс}}}{1 + 2T_{\text{T}}p + 2T_{\text{T}}^2p^2} \approx \frac{1/k_{\text{Дс}}}{1 + 2T_{\text{T}}p} = \frac{1/k_{\text{Дс}}}{T_{\text{с}}p + 1}$$

где  $T_{\text{с}} = 2T_{\text{T}}$  – эквивалентная постоянная времени оптимизированного на МО контура скорости.



# Однократно-интегрирующая система АЭП.



Такой характер переходного процесса будет в том случае, если все звенья системы являются линейными (регулятор скорости не выходит на ограничение).

С П- регулятором контур скорости является астатическим по заданию первого порядка. При подаче линейно-изменяющегося сигнала задания появляется ошибка по скорости, т.е. система становится статической по заданию. Порядок астатизма равен номеру производной во входном сигнале, при котором контур становится статическим, т.е. появляется ошибка по скорости.

Установившийся режим:  $\lim_{p \rightarrow 0} W_{кс}^{з(мо)}(p) = 1/k_{дс} \quad \Omega_{oi} = \frac{U_{зci}}{K_{дс}}$

# Однократно-интегрирующая система АЭП.

Передаточная функция по возмущению:

$$W_{\text{КС(ВОЗМ)}}^{3(\text{МО})}(p) = \frac{\Delta\Omega(p)}{\Delta I_c} = - \frac{\frac{R_\varepsilon}{C_e \Phi_H T_M p}}{1 + \frac{1}{2T_T p(T_T p + 1)}} = - \frac{R_\varepsilon 2T_T (T_T p + 1)}{(C_e \Phi_H T_M)(1 + 2T_T p + 2T_T^2 p^2)}.$$

В установившемся режиме:  $\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{КС(ВОЗМ)}}^{3(\text{МО})}(p) = - \frac{R_\varepsilon 2T_T}{C_e \Phi_H T_M}$

По возмущению контур скорости является статическим. Величина ошибки в установившемся режиме пропорциональна  $I_c$ .

$$\Delta\Omega^{3(\text{МО})} = \frac{I_c R_\varepsilon}{C_e \Phi_H} \frac{2T_T}{T_M} = \Delta\Omega^{pc} \frac{2T_T}{T_M}$$

При  $2T_T > T_M$

$$\Delta\Omega^{3(\text{МО})} > \Delta\Omega^{pc}$$

# Двухкратно-интегрирующая система АЭП

Оптимизация контура скорости на симметричный оптимум.

$$\text{СО: } W_{\text{КС}}^{p(\text{CO})}(p) = W_{\text{РС}}(p) \frac{1/k_{\text{ДТ}}}{T_{\text{T}}p + 1} \frac{R_{\text{Э}}}{C_{\text{е}}\Phi_{\text{H}}T_{\text{M}}p} k_{\text{ДС}} = \frac{1}{2T_{\text{T}}p(T_{\text{T}}p + 1)} \frac{4T_{\text{T}}p + 1}{4T_{\text{T}}p}$$

$$\text{Тогда: } W_{\text{РС}}(p) = \frac{C_{\text{е}}\Phi_{\text{H}}T_{\text{M}}k_{\text{ДТ}}}{2T_{\text{T}}R_{\text{Э}}k_{\text{ДС}}} \cdot \frac{4T_{\text{T}}p + 1}{4T_{\text{T}}p} = k_{\text{РС}}^{(\text{CO})} \frac{T_{\text{ИЗ}}p + 1}{T_{\text{ИЗ}}p} = k_{\text{РС}}^{(\text{МО})} \frac{4T_{\text{T}}p + 1}{4T_{\text{T}}p}$$

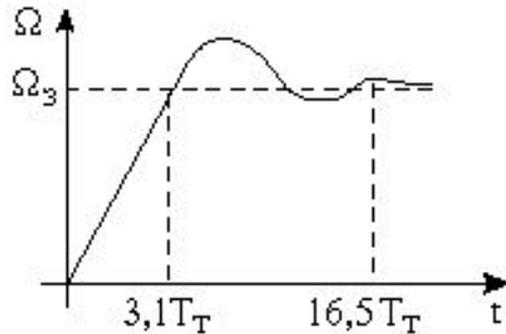
Получили РС ПИ-типа, у которого  $k_{\text{РС}}^{(\text{CO})} = k_{\text{РС}}^{(\text{МО})}$ ;  $T_{\text{ИЗ}} = 4T_{\text{T}}$ .

Передаточная функция замкнутого контура

$$\text{скорости: } W_{\text{КС}}^{p(\text{CO})}(p) = \frac{2T_{\text{T}}p(T_{\text{T}}p + 1) \cdot \frac{4T_{\text{T}}p}{4T_{\text{T}}p} \cdot \frac{k_{\text{ДС}}}{4T_{\text{T}}p}}{1 + \frac{1}{2T_{\text{T}}p(T_{\text{T}}p + 1)} \cdot \frac{4T_{\text{T}}p + 1}{4T_{\text{T}}p}} = \frac{1}{k_{\text{ДС}}} \cdot \frac{4T_{\text{T}}p + 1}{1 + 4T_{\text{T}}p + 8T_{\text{T}}^2p^2 + 8T_{\text{T}}^3p^3}$$

# Двухкратно-интегрирующая система АЭП.

Осциллограмма скорости при подаче скачка задающего сигнала



Такой переходный процесс будет только тогда, когда все звенья контура линейные (пока регулятор скорости не вышел на ограничение), а это возможно лишь при подаче малых сигналов задания.

Такое перерегулирование в системах АЭП нежелательно, поэтому для уменьшения перерегулирования на входе контура скорости включают фильтр с постоянной времени  $T_T$ .

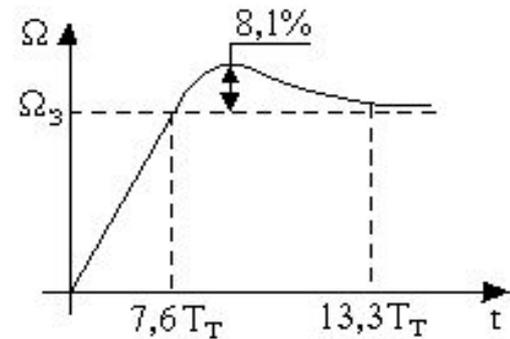
# Двухкратно-интегрирующая система АЭП.

Передаточная функция контура скорости с фильтром на входе и ее упрощенное выражение имеют вид:

$$W_{\text{КС}}^{3(\text{CO}+\phi)}(p) = \frac{1/k_{\text{ДС}}}{1 + 4T_{\text{T}}p + 8T_{\text{T}}^2p^2 + 8T_{\text{T}}^3p^3} \cong \frac{1/k_{\text{ДС}}}{1 + 4T_{\text{T}}p} = \frac{1/k_{\text{ДС}}}{T_{\text{C}}^{(\text{CO})}p + 1}$$

В установившемся режиме:

$$\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{КС}}^{3(\text{CO}+\phi)}(p) = 1/k_{\text{ДС}} \quad \Omega_{\text{oi}} = \frac{U_{\text{зсi}}}{K_{\text{ДС}}}$$



Следует заметить, что  $T_{\text{C}}^{(\text{MO})} = 2T_{\text{T}}$ , а  $T_{\text{C}}^{(\text{CO})} = 4T_{\text{T}}$ , т.е. контур скорости, оптимизированный на СО с фильтром на входе имеет быстродействие вдвое меньше, чем контур, оптимизированный на МО (заметно только в «малом»).

# Двухкратно-интегрирующая система АЭП.

Данный контур с ПИ регулятором скорости является по заданию астатическим второго порядка (ошибка появляется только при наличии 2-й производной во входном сигнале). Отметим, что астатизм контура скорости при настройке на СО достигнут ценой снижения быстродействия в малом.

Передаточная функция контура скорости по возмущению:

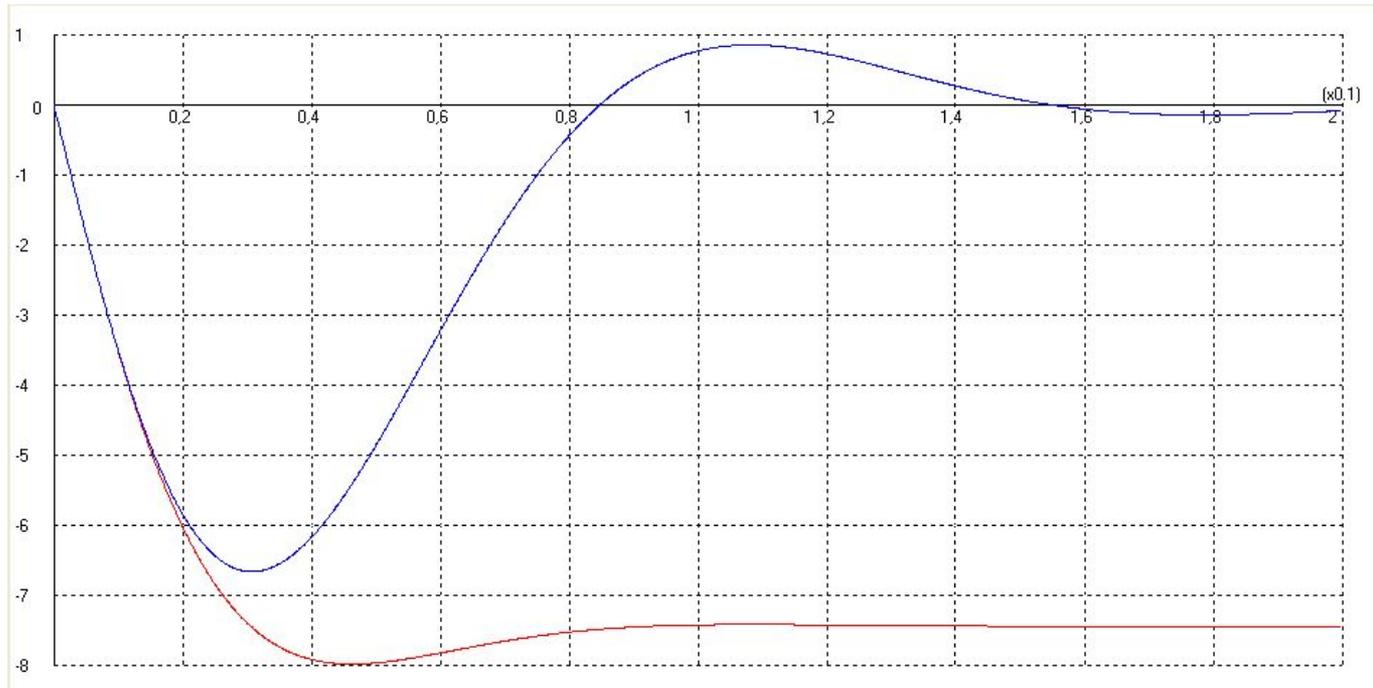
$$W_{\text{КС(ВОЗМ)}}^{3(\text{СО})}(p) = - \frac{\frac{R_{\text{э}}}{C_e \Phi_H T_M p}}{1 + \frac{1}{2T_T p (T_T p + 1)} \cdot \frac{4T_T p + 1}{4T_T p}} = - \frac{\frac{R_{\text{э}}}{C_e \Phi_H T_M p} \cdot 2T_T p (T_T p + 1) 4T_T p}{2T_T p (T_T p + 1) 4T_T p + 4T_T p + 1}.$$

Т.к.  $\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{КС(ВОЗМ)}}^{3(\text{СО})}(p) = 0$ , то  $\Delta \Omega_y^{3(\text{СО})} = 0$

Контур скорости с ПИ РС – астатический как по заданию (второго порядка) так и по возмущению!!!

# Оптимизация контура скорости

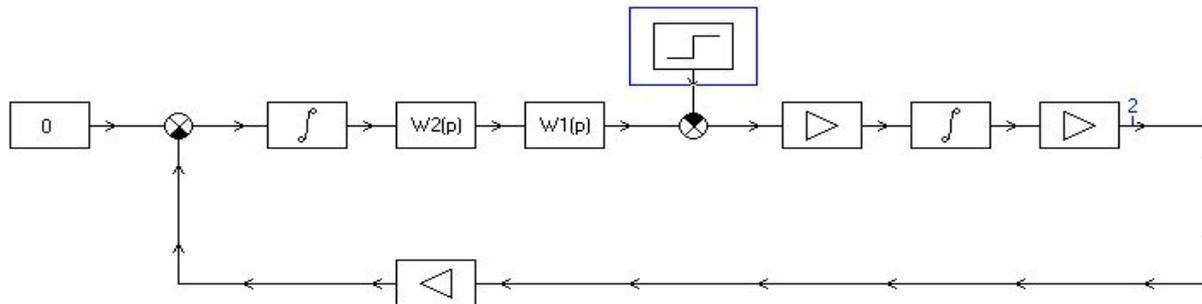
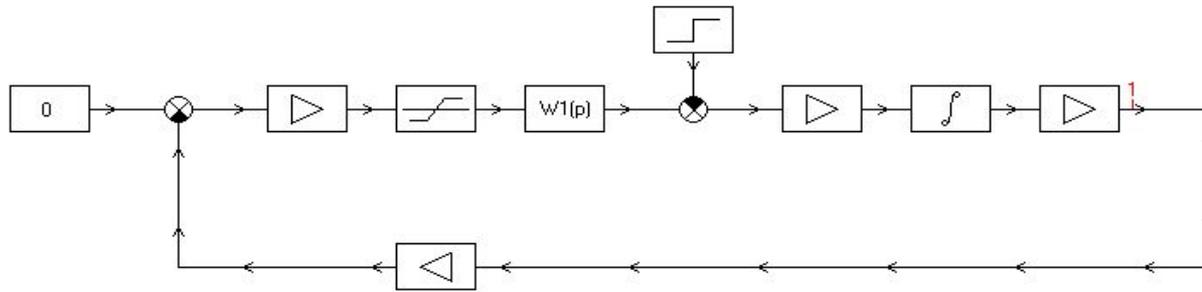
Осциллограммы скорости при приложении скачка возмущающего воздействия при настройках на МО и СО:



$$\Delta\Omega^{з(мо)} = \Delta\Omega^{pc} \frac{2T_T}{T_M}; \quad \Delta\Omega^{з(со)} = 0; \quad \Delta\Omega_{\max}^{з(со)} = 0,86 * \Delta\Omega^{з(мо)}$$

# Оптимизация контура скорости

## Модели контура скорости с П и ПИ регуляторами



# Оптимизация контура скорости

Модели контура скорости с П и ПИ регуляторами

