

Министерство образования и науки Украины  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
“ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД “, ДЛЯ СТУДЕНТОВ  
СПЕЦИАЛЬНОСТИ  
7092501 ДНЕВНОЙ И ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета  
протокол № 3 от 22.06.06. г.

Харьков НТУ «ХПИ» 2006

Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни “Автоматизований електропривод “, для студентів спец. 7092501 денної та заочної форм навчання /Уклад. Л.О. Шищенко – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – 31 с. – Рос. мовою.

Укладач

Л.О. Шищенко

Рецензент: О.П. Рудько

Кафедра “Технологія машинобудування та  
металорізальні верстати“

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Передаточные функции звеньев, входящих в систему АЭП	5
2 Синтез САУ ЭП	11
3 Методика построения переходных процессов на основе использования структурной схемы САУ ЭП	19
4 Моделирование системы управления электроприводом	23
5 Задание к самостоятельной работе	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	30
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	31

## ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения надежной и качественной работы тиристорных электроприводов требуется углубленное изучение переходных процессов в сложных системах, состоящих из преобразователей энергии сети, электродвигателей, производственных механизмов и систем управления.

Аналитический расчет переходных процессов в таких системах, даже при значительных упрощениях и допущениях, представляет определенные трудности. Наиболее быстрое и достаточно точное исследование переходных процессов в различных режимах работы проектируемой системы можно выполнить на соответствующей модели с использованием специальных систем и программных пакетов моделирования на ЭВМ.

Методические указания предназначены для подготовки и выполнения контрольной работы, включающей решение обеих задач – аналитический расчет и моделирование системы управления электроприводом.

## 1. Передаточные функции звеньев, входящих в систему АЭП

Необходимо различать элемент и звено системы. Звено системы представляется в виде передаточной функции (ПФ), а элемент системы определяется по функциональному назначению и не имеет ПФ.

Рассмотрим составляющие звенья системы управления автоматизированным электроприводом (АЭП):

### 1 Задатчик интенсивности ЗИ (рис.1.1).

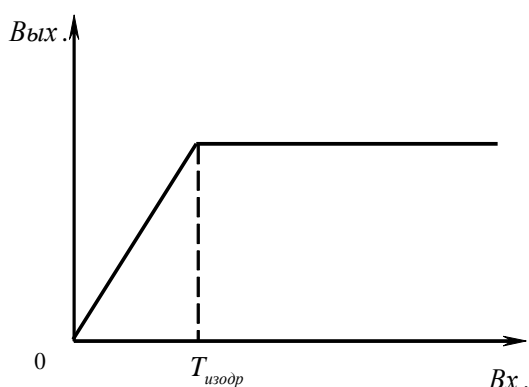


Рисунок 1.1 – Характеристика задатчика интенсивности

$T_{изодр}$  - время изодрамы, по истечении которого заканчивается возмущающее воздействие.

$$W(p) = \frac{1}{Tp} = \frac{K}{p}; \quad \frac{1}{T} = K.$$

Таким образом, задатчик интенсивности – интегрирующее звено.

### 2 Элемент сравнения ЭС.

ПФ отсутствует, это только элемент системы.

### 3 Обратные связи ОС по положению, скорости, напряжению к току.

ПФ датчиков обратных связей будет:

$$W(p) = K_i = \frac{\Delta y}{\Delta x},$$

где  $\Delta y, \Delta x$  - приращение соответственно выходной и входной величин,  $K_i$  - может быть:  $k_{II}$  - ОС по положению;  $k_H$  - ОС по напряжению;  $k_C$  - ОС по скорости;  $k_T$  - ОС по току.

Перечисленные выше звенья могут быть усилительными, пропорциональными, масштабирующими.

#### 4 Регуляторы Р.

Регулятор - устройство для регулирования управляющего воздействия в системе. Виды регуляторов представлены в табл.1.1.

#### 5 Тиристорный преобразователь ТП может быть представлен как:

##### а) усилительное звено

$$W_{ТП}(p) = k_{ТП},$$

где  $k_{ТП}$  определяется по характеристике «вход-выход» (рис.1.2) и будет равно

$$k_{ТП} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y}.$$

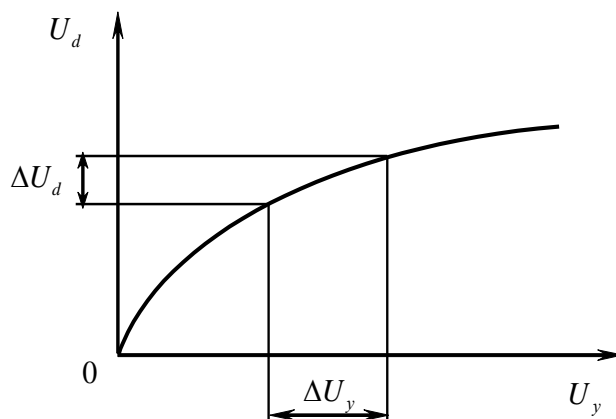


Рисунок 1.2 – Графическое определение коэффициента передачи преобразователя

##### б) апериодическое звено

$$W(p) = \frac{k_{ТП}}{T_{ТП}p + 1},$$

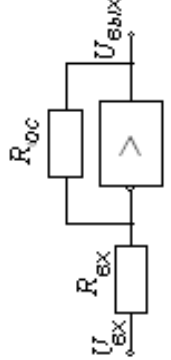
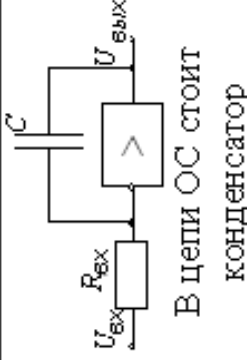
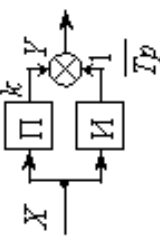
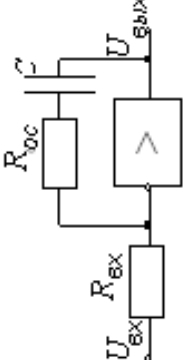
где  $k_{ТП}$  аналогично предыдущему;  $T_{ТП} = 0,005...0,01$  - постоянная времени на входе в фильтр и обозначается  $T_{ТП} = T_{\mu}$  (малая некомпенсируемая постоянная).

##### в) комбинация усилительного звена и звена запаздывания

$$W_{ТП}(p) = ke^{-p\tau}, \quad \tau = \frac{0,5}{mf},$$

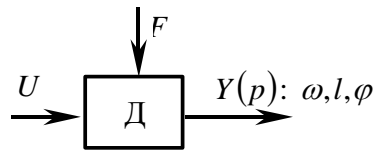
где  $m$  - число фаз;  $f$  - частота питающей сети.

Таблица 1.1 – Виды регуляторов

Закон регулирования	Вид регулятора	Дифференциальное уравнение	Передаточная функция $W(p)$	Электронная схема	Примечание
1. Пропорциональный закон	$P$	$\Delta y = k \Delta x$	$k$		$k = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{R_{\text{ос}}}{R_{\text{вых}}}$
2. Интегральный закон	$I$	$\Delta y = \int \Delta x dt$	$\frac{k}{p}$		$k_{\text{инт}} = \frac{1}{T}$ $T = R_{\text{вых}} C$
3. Пропорционально-интегральный закон	$ПИ$	$\Delta y = k_y \Delta x + k_y \int \Delta x dt$	 Структурная схема ПИ-регулятора $W_{\text{пид}}(p) = W_p(p) + \frac{1}{Tp}$ $+ W_u(p) = k + \frac{1}{Tp}$ $= \frac{kTp + 1}{Tp}$		$T_1 = R_{\text{ос}} C$ $T_2 = R_{\text{вых}} C,$ задаются $R_{\text{вых}} = 10 \text{ КОМИ}$ $C = 1 \text{ МКФ}$

## 6 Передаточные функции двигателей в САУ ЭП.

Двигатель можно представить:



где  $\omega$  - угловая скорость вращения;

$l$  - линейное перемещение;

$\varphi$  - угловое перемещение.

Рассматриваются два вида передаточных функций:

а) по управляющему воздействию  $W(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)}$ ;

б) по возмущающему воздействию  $W(p) = \frac{\omega(p)}{F(p)}$ .

Двигатели делятся на следующие виды:

- Двигатели постоянного тока ДПТ (момент создается постоянным током). Вход —  $U_c$ ; выход —  $\omega$ .
- Асинхронные двигатели АД (ротор не синхронно вращается с магнитным потоком). Выходной параметр —  $\omega$  или  $S$ ; вход —  $U_c$ .

ПФ и основные соотношения в АД представлены ниже.

$$W(p) = \frac{k_D}{T_D p + 1}.$$

$$k_D, T_D = f(U_\phi, R, S).$$

$$T_D = \frac{S_K \omega_c J}{2k_M U_\phi^2},$$

$$S_K = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_L^2}},$$

$$k_D = f(U_\phi) = \frac{\omega_c}{U_\phi} - \frac{S_K \omega_c U_c}{2k_M U_\phi^2},$$

$$k_M = \frac{1,5}{\omega_c \left( r_1 \pm \sqrt{r_2^2 + x_1^2} \right)}.$$

где  $S_k$  - критическое скольжение;  $\omega_c$  - синхронная скорость.



Двигатели постоянного тока могут быть представлены как:

а) колебательное звено:

$$W(p) = \frac{k_D}{T_\Omega T_M p^2 + T_M p + 1},$$

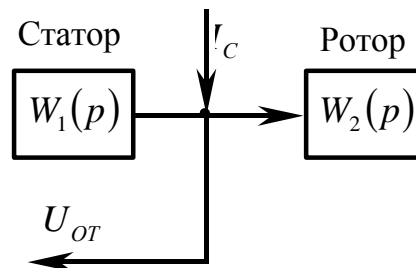
где  $k_D$  - это величина, обратная  $k\Phi$ ;  $k_D = \frac{1}{k\Phi}$ ;  $T_\Omega = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}$  - механическая постоянная, учитывает инерционность нарастания магнитных потоков в цепи возбуждения;  $T_M = I \frac{R_{яц}}{(k\Phi)^2}$  - механическая постоянная, учитывающая инерционность механических частей;  $R_{яц}$  - сопротивление якорной цепи;  $J$  - момент инерции электродвигателя;  $L_{яц}$  - индуктивность якорной цепи;

б) инерционное звено второго порядка:

$$W(p) = \frac{k_\delta}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где  $(T_1 p + 1) = T_\Omega$ ;  $(T_2 p + 1) = T_M$ ;

в) ДПТ с обратной связью по току (с выделенным контуром тока):



$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) = \frac{k_{D1}}{T_\Omega p + 1} \cdot \frac{k_{D2}}{T_M p},$$

где  $T_M = I \frac{R_\alpha}{(k\Phi)^2}$ ;  $T_{\mu\mu} = T_\mu$  - малая некомпенсируемая постоянная;

$$k_{D1} k_{D2} = k_D = \frac{1}{k\Phi};$$

$$k_{D2} = \frac{1}{R_\alpha}; \quad k_{D1} = k_D R_\alpha.$$

г) ДПТ с выходным параметром в виде угла поворота:

$$W(p) = W_K(p) \cdot W_{II}(p) = \frac{k_D}{p(T_{\Theta}T_M p^2 + T_M p + 1)},$$

где  $W_K(p)$  - передаточная функция колебательного звена;  $W_{II}(p)$  - передаточная функция интегрирующего звена.

Влияние порядка астатизма системы на вид переходного процесса в АЭП, включая двигатель, может быть охарактеризовано, как показано, рис.1.3 и 1.4.

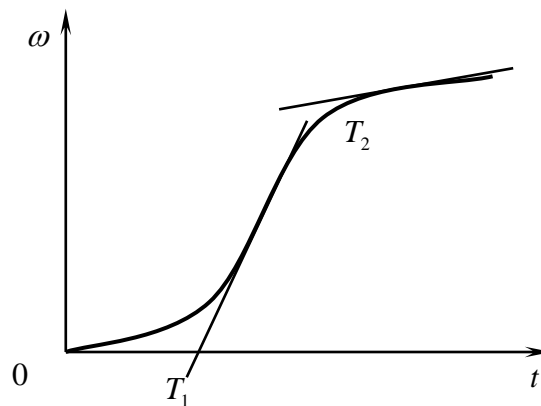


Рисунок 1.3 – Характеристика системы с двукратным интегрированием

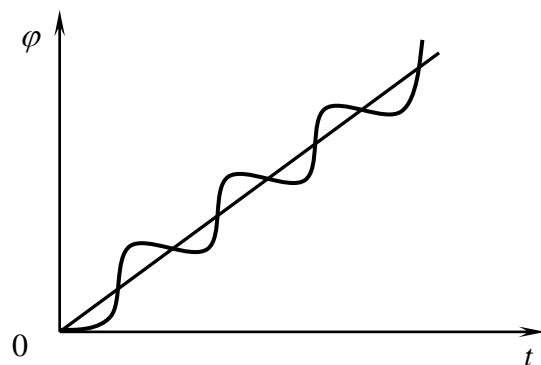


Рисунок 1.4 – Характеристика системы с трехкратным интегрированием

## 7 Редуктор Р.

Если выходной параметр – угловая скорость  $\omega$ , тогда ПФ редуктора:

$$W(p) = k_P; k_P = \frac{1}{u},$$

где  $u$  — передаточное отношение.

Если выходной параметр — угол поворота  $\varphi$ , тогда ПФ редуктора:

$$W(p) = \frac{k_P}{p} = \frac{1}{Tp}.$$

## 2. Синтез САУ ЭП

Под *синтезом* понимают целенаправленный расчет системы управления приводом или ее элементов с целью получения оптимальных значений регулируемых параметров (оптимальный — наилучший для данных параметров).

В качестве оптимальных параметров для САУ ЭП принимают, как правило, следующие условия:

минимальную статическую погрешность  $\sigma_{ст.мин} \leq (5...10)\%$ ;

$t_{III}$  должно стремиться к минимуму, быстродействие должно быть максимальным;  $t_{III} \rightarrow \min$ ;

абсолютную устойчивость.

### *Оптимизации САУ ЭП*

Оптимизация основана на использовании желаемых передаточных функций, последовательной коррекции:

$$W_{Ж}(p) = W_{ИЗМ}(p) \cdot W_{Н}(p).$$

В связи с этим реальная передаточная функция системы определяется произведением величины неизменяемой части на передаточную функцию изменяемой части системы. Для того чтобы передаточная функция реальной системы равнялась желаемой, необходимо оперировать изменяемой частью, в качестве которой выступает регулятор с изменяемыми параметрами и структурой.

Тогда для определения структуры и параметров регулятора, в соответствии с теорией последовательной коррекции, необходимо желаемую ПФ разделить на ПФ неизменяемой части:

$$W_{Р}(p) = W_{Ж}(p),$$
$$W_{ИЗМ}(p) = W_{Р}(p) = \frac{W_{Ж}(p)}{W_{Н}(p)}.$$

Неизменяемая часть определяется передаточной функцией тиристорного преобразователя и двигателя.

Структурная схема двухконтурной САУ ЭП (для регулируемого привода) представлена на рис.2.1.

В такой системе необходимо:

определить ПФ изменяемой части в первом контуре  $W_{PT}(p)$ :

$$W_{ИЗМ_I}(p) = W_{PT}(p) - в I к ;$$

найти ПФ изменяемой части во втором контуре  $W_{PC}(p)$ :

$$W_{ИЗМ_{II}}(p) = W_{PC}(p) - во II к .$$

$$W_{PT.КЗ}(p) = \frac{W_{Ж}(p)}{W_{Неизм}(p)} = W_{ИЗМ}(p).$$

Для решения задачи синтеза определяют выражения желаемых передаточных функций для первого и второго контура.

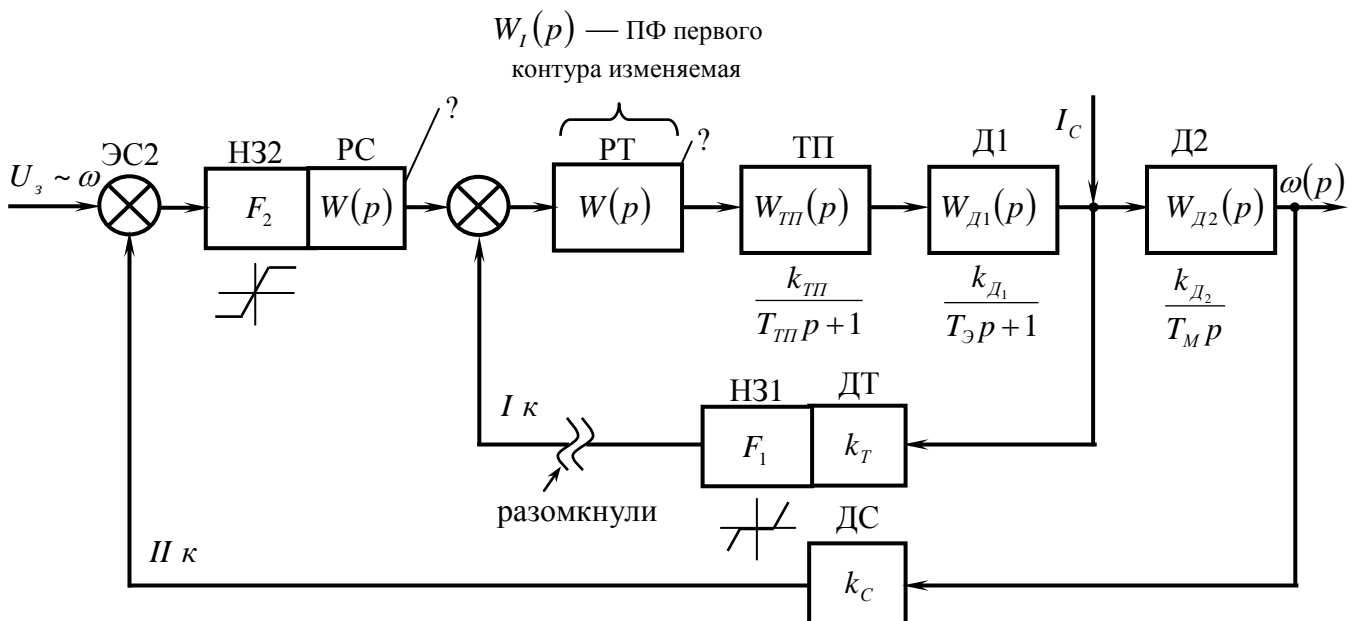


Рисунок 2.1 – Структурная схема регулируемого привода

Для этого используют следующие подходы:

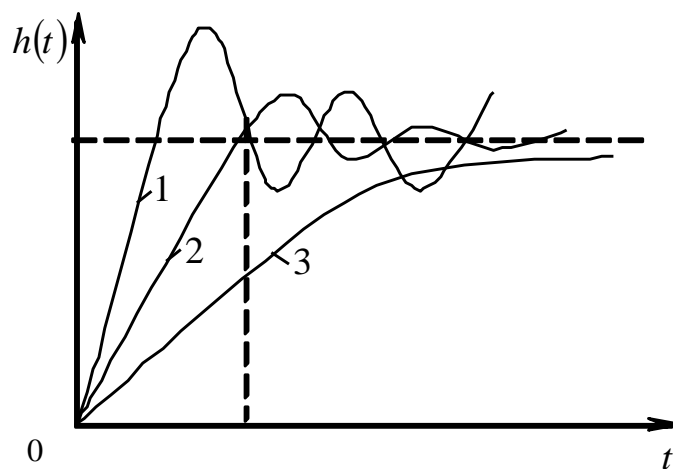
- технический оптимум (модульный принцип), который обеспечивает  $t_{ТП} \rightarrow \min$ , статическую погрешность  $\sigma = (5...10)\%$  и абсолютную устойчивость;

- симметричный оптимум, который обеспечивает погрешность, стремящуюся к нулю ( $\sigma \rightarrow 0$ ).

Принято, что желаемая передаточная функция  $W_{ж}(p)$  состоит из двух идеальных звеньев: интегрирующего и аperiodического:

$$W_{ж}(p) = W_H(p)W_{An}(p) = \frac{k_H}{T_H p} \frac{k_\alpha}{T_\alpha p + 1}.$$

Отношение  $a = T_H/T_\alpha$  определяет вид переходного процесса, рис.2.2. По выбранному желаемому переходному процессу оцениваются оптимальные параметры регулирования САУ ЭП.



- 1 — колебательный переходной процесс ( $\alpha = 1$ ;  $\xi = 0,5$ ;  $\sigma \gg 5\%$ )
- 2 — апериодический переходной процесс ( $\alpha = 2$ ;  $\xi = 0,707$ ;  $\sigma = 5\%$ )
- 3 — экспоненциальный переходной процесс ( $\alpha = 4$ ;  $\xi = 1$ ;  $\sigma \rightarrow 0$ )

Рисунок 2.2 – Виды переходного процесса в САУ ЭП

Для апериодического звена при допущении, что  $k_H = k_\alpha = 1$ , тогда

$$W_{ж\text{ Апер}}(p) = \frac{1}{2T_\alpha p} \frac{1}{T_\alpha p + 1}.$$

Разновидности желаемых передаточных функций для различного вида переходных процессов представлены в табл.2. В таблице указаны оптимальные ПФ разомкнутых контуров регулирования в соответствии с желаемым переходным процессом в контуре.

Таблица 2.1 - Желаемые передаточные функции разомкнутых контуров управления для различного вида переходных процессов

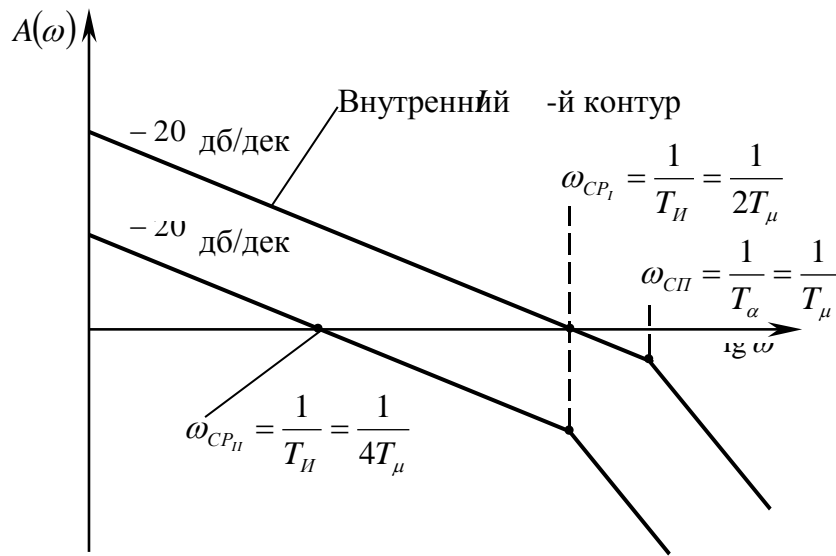
Вид переходного процесса	$\alpha$	I к	II к	III к
1 Экспоненциальный	4	$\frac{1}{4T_{\alpha}p(T_{\alpha}p+1)}$	$\frac{1}{8T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)}$	$\frac{1}{16T_{\mu}p(4T_{\mu}p+1)}$
2 Аперидический	2	$\frac{1}{2T_{\alpha}p(T_{\alpha}p+1)}$	$\frac{1}{4T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)}$	$\frac{1}{8T_{\mu}p(4T_{\mu}p+1)}$
3 Колебательный	1	$\frac{1}{T_{\alpha}p(T_{\alpha}p+1)}$	$\frac{1}{2T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)}$	$\frac{1}{4T_{\mu}p(4T_{\mu}p+1)}$

*Примечание.* Во внешних контурах или при переходе ко внешним контурам постоянные времени интегрирующего и аперидического звеньев увеличиваются в 2 раза с целью смещения ЛАЧХ внешних контуров в область низких частот (рис.2.3).  $T_{\alpha} = T_{\mu} = T_{\text{пл}}$  находятся в пределах от одной сотой до пяти тысячных - малая некомпенсируемая постоянная. Частота сопряжения  $f_c = 1/T$ .

Если система оптимизируется по техническому оптимуму, то в системе до точки приложения нагрузки появляется одно интегрирующее звено, то есть искомый регулятор тока является ПИ-регулятором. Такие системы называются астатическими или системами с однократным интегрированием. Если необходимо увеличить точность регулирования, то применяют системы астатические второго порядка или с двукратным интегрированием. Тогда и в первом и во втором контурах образуются регуляторы типа ПИ. Таким образом, в системе начинают действовать два интегрирующих звена, выходной сигнал будет в противофазе со входным при сдвиге фаз  $180^{\circ}$ , и система абсолютно неустойчива.

Для обеспечения устойчивости необходимо деформировать исходную ЛАЧХ путем ввода в систему форсирующего или дифференцирующего звена (создают сдвиг фаз — опережение). При этом ЛАЧХ желаемой передаточной

функции этой системы примет симметричный вид по отношению к оси частот. Этот метод получил название симметричный оптимум.



$\omega_{CP}$  — частота среза;  $\omega_{CP}$  — частота сопряжения

Рисунок 2.3 – ЛАЧХ для двухконтурной системы

Таким образом, методика оптимизации будет следующей.

- 1 Составляется структурная схема двухконтурной САУ ЭП.
- 2 На схеме выделяются изменяемые и неизменяемые части. Изменяемая часть представлена регуляторами, структура которых может меняться. Неизменяемые части представлены реальными звеньями системы.
- 3 Выбирается вид желаемого оптимального переходного процесса:  
для регулируемого привода — апериодический переходный процесс;  
для следящего электропривода — монотонный (экспоненциальный переходный процесс).
- 4 Выбирают вид желаемой передаточной функции по виду переходного процесса и по виду привода.
- 5 Оптимизацию начинают с внутреннего контура в соответствии с принципом последовательной коррекции.
- 6 В результате преобразований получают передаточную функцию изменяемой части, в качестве которой выступают регуляторы:  
во внутреннем контуре – регулятор тока (как правило ПИ регулятор);

во внешнем контуре – регулятор скорости (как правило, типа П – регулятора).

Рассмотрим пример оптимизации двухконтурной системы АЭП.

Оптимизация внутреннего контура ( $I_K$ ) (*синтез регулятора тока*):

$$W_{ЖИРАЗ}(p) = W_{РАЗПИ}(p) = W_{РТ}(p) \cdot W_{ТП}(p) \cdot W_{Д1}(p) \cdot W_{ДГ}(p),$$

где  $W_{РТ}(p)$  - неизвестная передаточная функция регулятора тока;  $W_{ЖИРАЗ}(p)$  - желаемая передаточная функция первого контура, разомкнутого;  $W_{РАЗПИ}(p)$  - передаточная функция, состоящая из реальных звеньев в разомкнутой системе;  $W_{ДГ}(p)$  - передаточная функция датчика тока.

Исходя из принципа последовательной коррекции, находим передаточную функцию регулятора тока (изменяемая часть):

$$W_{ИЗМ.Ч}(p) = W_{РТ}(p) = \frac{W_{Ж}(p)}{W_{ТП}(p)W_{Д1}(p)W_{ДГ}(p)}.$$

Находим желаемую передаточную функцию для аperiodического процесса:

$$W_{ИЗМ.Ч}(p) = \frac{1}{\frac{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}{k_{ТП}k_{Д1}k_{ДГ}}},$$

где  $k_{ДГ} = 1$ ,  $T_{\alpha} = T_{\mu} = T_{ТП} = 0,01 \dots 0,005$ ;  $T_{Я} = T_{\mathcal{O}} = \frac{L_{Я}}{R_{Я}}$ .

Принимаем  $k_{ДГ} = 1$  или  $k_T = k_{ДГ}$ , что одно и то же.

$$W_{ИЗМ.Ч}(p) = \frac{T_{\mathcal{O}}p+1}{2T_{\mu}pk_{ТП}k_{Д1}} = \frac{T_1p+1}{T_2p},$$

где  $\frac{T_1p+1}{T_2p}$  - пропорционально-интегрирующий (ПИ) регулятор.

Пусть  $T_{\mathcal{O}} = T_1$ , а  $2T_{\mu}pk_{ТП}k_{Д1} = T_2$ , тогда

$$W_{ИЗМ.Ч}(p) = k_T \Delta x + k_{ТИ} \int_{T_1}^{T_2} \Delta x dt,$$



где  $k_T \Delta x$  - пропорциональная часть (П),  $k_{ТИ} \int_{T_1}^{T_2} \Delta x dt$  - интегрирующая часть (И).

Таким образом, регулятор тока – это ПИ-регулятор, который расположен до точки приложения нагрузки. Первый контур реализован на астатической системе первого порядка (с однократным интегрированием).

Оптимизация внешнего контура (*синтез регулятора скорости*).

Передаточную функцию замкнутого первого контура  $W_{I\text{кз}}$  (рис.2.4) находим по известным правилам для нахождения передаточных функций замкнутых систем.

$$W_{I\text{кз}}(p) = \frac{W_{ЖИ}(p)}{1 + W_{ЖИ}(p)W_{ДТ}(p)},$$

$$W_{I\text{кз}}(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)}} = \frac{1}{2T_\mu p(T_\mu p + 1) + 1} = \frac{1}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} \approx \frac{1}{2T_\mu p + 1}.$$

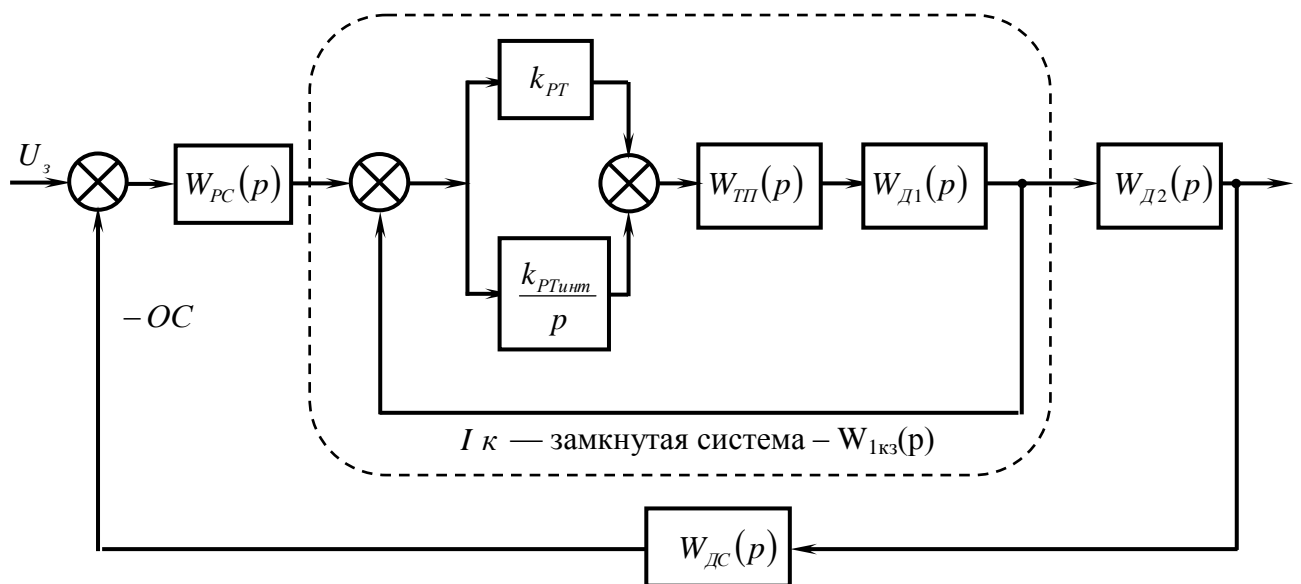


Рисунок 2.4 – Структурная схема контура скорости

Синтез неизвестной неизменяемой части (регулятора скорости) производим в соответствии с методикой для контура тока (рис.2.5).

$$W_{ЖИ\text{раз}}(p) = W_{ПИ\text{раз}}(p) = W_{PC}(p)W_{I\text{кз}}(p)W_{Д2}(p)W_{ДС}(p),$$

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{ЖП \text{ апериодраз. сист. }}(p)}{W_{IK3}(p)W_{Д2}(p)W_{ДС}(p)} = \frac{W_{ЖП \text{ апериодраз. сист. }}(p)}{W_{IK3}(p)W_{Д2}(p)1},$$

где принимается, что  $W_{ДС}(p) = 1$ .

$$W_{PC}(p) = \frac{1}{\frac{4T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)}{1} \frac{k_{Д2}}{2T_{\mu}p+1} \frac{1}{T_M p}} = \frac{T_M p}{4T_{\mu}p k_{Д2}} = \frac{T_1}{T_2} = k',$$

где  $T_{\mu} = T_{ПП}$ ;  $T_M = \frac{JR}{(k\Phi)^2}$ ;  $T_1 = T_M$ ;  $T_2 = 4T_{\mu}k_{Д2}$ .

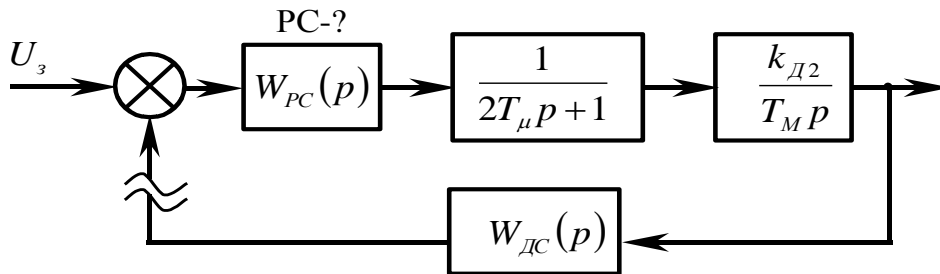


Рисунок 2.5 – Оптимизация контура скорости

Таким образом, в процессе синтеза контура скорости мы получили структуру П-регулятора.

### 3. Методика построения переходных процессов на основе использования структурной схемы САУ ЭП

Этапы построения переходных процессов следующие.

- 1 Составляется структурная схема САУ ЭП для подчиненного регулирования (на рис.3.1 представлен пример двухконтурной системы).
- 2 Выделяются и нумеруются динамические звенья системы, в передаточных функциях которых содержатся операторы дифференцирования  $p$  (или комплексные числа).
- 3 Нумеруются входные и выходные сигналы каждого звена.
- 4 Нумеруются коэффициенты и постоянные времени, в соответствии с номером звена.

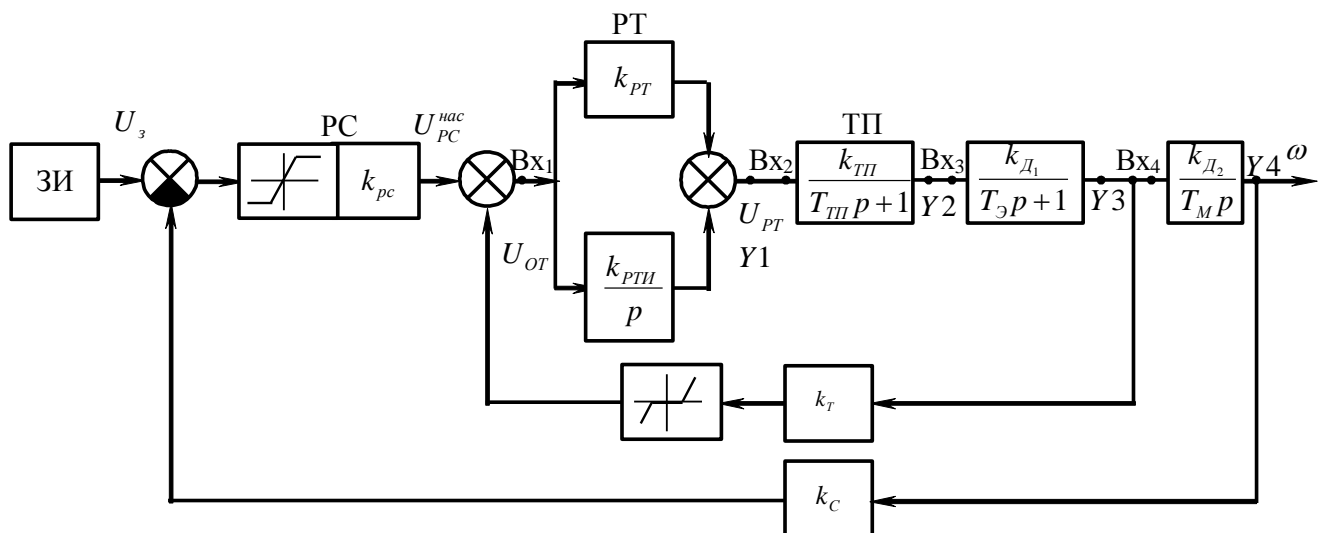


Рисунок 3.1 – Структурная схема двухконтурной САУ ЭП

- 5 Используются передаточные функции звеньев для составления дифференциальных уравнений в форме уравнений Коши:

$\Delta y = f(k, T)$  - обычное дифференциальное уравнение;

$\frac{dy}{dt} = f(k, T)$  - дифференциальное уравнение в форме уравнений Коши.

Дифференциальное уравнение в форме уравнений Коши предполагает нахождение производной регулируемого параметра.

- 6 Составляются алгебраические уравнения связи для каждого из входных сигналов.
- 7 Составляется таблица исходных данных для машинной обработки дифференциальных уравнений в форме уравнений Коши и уравнений связи с целью графического представления этих решений (кривые переходных процессов для силы тока и для скорости  $i(t)$ ,  $\omega(t)$ ).

Рассмотрим пример.

1, 2, 3 и 4-е пункты представлены на рис.3.2.

5 Составляем уравнение Коши для регулятора тока, звено № 1 (РТ):

$$W(p) = \frac{\Delta Y_1(p)}{Bx_1(p)} = \frac{k_{РТИм}}{p}.$$

Находим  $\Delta y_1(p)$ :

$$\Delta Y_1(p) = \frac{k_{РТИнт} Bx_1(p)}{p},$$

$$\Delta Y_1(p)p = Y_1(p)p = k_{РТИм} Bx_1(p),$$

$$Y_1 p = Y_1',$$

где  $p$  — оператор дифференцирования.

$$p = \frac{d}{dt}; \quad y_1 p = y_1' = k_{РТИнт} Bx_1.$$

Дифференциальные уравнения Коши:

$$y_1 p = y_1' = k_{РТИм} Bx_1,$$

Составляем уравнение Коши для тиристорного преобразователя, звено №2:

$$W_{ТП}(p) = \frac{k_{ТП}}{T_\mu p + 1} = \frac{Y_2}{Bx_2};$$

$$T_{ТП} = T_\mu; \quad Y_2 = \frac{k_{ТП} Bx_2}{T_\mu p + 1},$$

$$Y_2(T_\mu p + 1) = k_{ТП} Bx_2,$$

$$Y_2 T_\mu p + Y_2 = k_{ТП} Bx_2,$$

$$Y_2 p = \frac{k_{ТП} Bx_2 - Y_2}{T_\mu};$$

Перейдем к третьему звену (Д1):

$$W_{Д1}(p) = \frac{k_{Д1}}{T_{Э}p + 1} = \frac{Y_3}{Bx_3};$$

$$Y_3 = \frac{k_{Д1}Bx_3}{T_{Э}p + 1},$$

$$Y_3p = \frac{k_{Д1}Bx_3 - Y_3}{T_{Э}}.$$

Проанализируем звено № 4 (Д2):

$$W_{Д2}(p) = \frac{k_{Д2}}{T_M p} = \frac{Y_4}{Bx_4},$$

$$\frac{Bx_4 k_{Д2}}{T_M p} = Y_4,$$

$$pY_4 = \frac{Bx_4 \cdot k_{Д2}}{T_M}.$$

6 Определяем входы и составляем уравнения связей.

Составим уравнение связей для  $Bx_1$ :

$$(U_3 - U_{OC})k_{PC} - U_{OT} = Bx_1,$$

$$(U_3 - U_{OC})k_{PC} = U_{PC}.$$

$$U_{OT} = I_D k_T - U_{CPI}.$$

$$Bx_1 = (U_3 - U_{OC})k_{PC} - (I_D k_T - U_{CPI}),$$

$$Bx_1 = (U_3 - U_{OC})k_{PC} - (I_D k_T - F_1).$$

Составим уравнение связей для  $Bx_2$ :

$$Bx_2 = Y_1 + Bx_1 \cdot k_{PT}.$$

Составим уравнение связей для  $Bx_3$ :

$$Bx_3 = Y_2 - k\Phi\omega.$$

Составим уравнение связи для  $Bx_4$ :

$$Bx_4 = Y_3 + I_{CT}.$$



#### 4. Моделирование системы управления электроприводом

##### *Моделирование регулируемого электропривода.*

Структурные схемы систем подчиненного регулирования содержат типовые звенья САУ, в связи с чем их моделирование целесообразно осуществлять структурным методом. Суть структурного моделирования заключается в том, что типовые звенья соединяются в модели привода в той же последовательности, что и в структурной схеме системы.

Структурная схема такой системы регулируемого электропривода в блоках MathLab показана на рис.4.1. Она включает в себя два контура регулирования: контур регулирования тока, состоящий из регулятора тока, тиристорного преобразователя (ТП) и цепи якоря двигателя; контур регулирования скорости, включающий в себя регулятор скорости, контур тока и интегрирующее звено, отображающее в структурной схеме механическую часть электропривода.

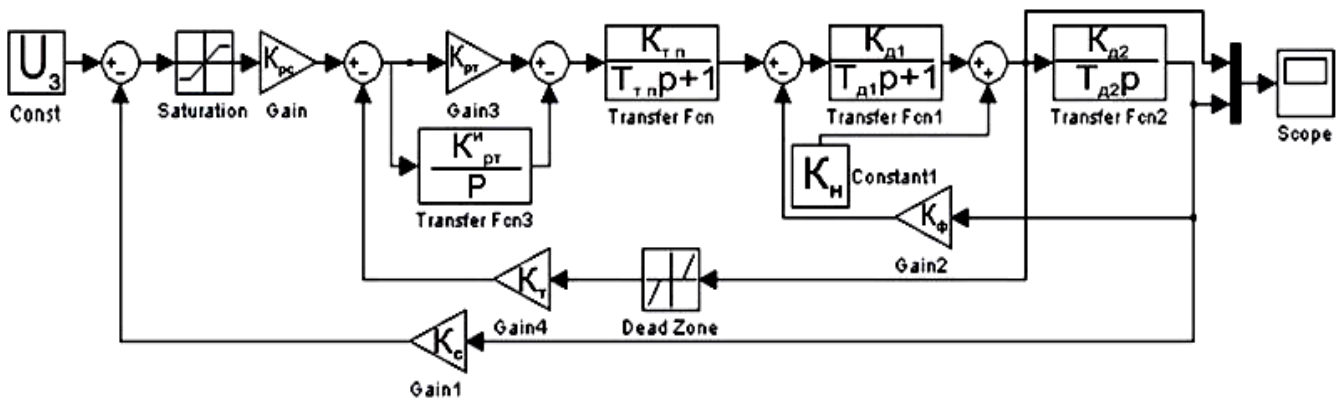


Рисунок 4.1 — Структурная схема РЭП в блоках MathLab

Рассматриваемая схема обеспечивает возможность настройки системы управления с минимальной величиной перерегулирования в кривых тока и скорости (около 5%), при статическом перепаде угловой скорости, определяемом параметрами системы по следующей формуле:

$$\Delta\omega_c = \frac{4T_{II}}{T_M} \Delta\omega_{c\text{ ПАЗ}} ,$$

где  $\Delta\omega_{\text{С РАЗ}}$  — перепад скорости в разомкнутой системе;  $T_{\text{П}}$ ,  $T_{\text{М}}$  — постоянные времени соответственно преобразователя и электромеханическая.

Статический перепад скорости зависит от соотношения  $4T_{\text{П}}/T_{\text{М}}$ . Для уменьшения статизма в ряде случаев используют системы с двукратным интегрированием, когда регулятор скорости выполняется также пропорционально-интегральным. В этом случае имеет место астатическая система, но характер переходного процесса ухудшается. Перерегулирование тока достигает 30—40%.

Для ограничения величины тока цепи якоря двигателя регулятор скорости шунтируют стабилитронами или специальными блоками ограничения. Настройка параметров электропривода в системах подчиненного регулирования отличается тем преимуществом, что можно проводить настройку отдельных контуров последовательно, одного за другим. В двухконтурных системах сначала настраивают контур тока при отключенном возбуждении двигателя. В этом случае двигатель рассматривается как инерционное звено. При подаче скачкообразного сигнала на вход РТ настраивается желаемый характер переходного процесса тока  $i(t)$ . Затем включается возбуждение двигателя и настраивается контур скорости.

Такой же порядок рекомендуется для настройки системы на модели.

В САУ ЭП применяются задержанные обратные связи (с отсечками), вступающие в действие при определенных значениях контролируемых параметров. Отключение или включение обратных связей осуществляется с помощью специальных ключей в виде нелинейных элементов (НЭ).

Реализация нелинейных элементов НЭ1 (в регуляторе тока) и НЭ2 (в регуляторе скорости) показана на рис.4.2 и рис.4.3 соответственно.

#### *Моделирование следящего электропривода.*

Задачей следящих систем автоматического управления электроприводом (САУ ЭП) рабочих органов механизмов является обеспечение перемещения исполнительного органа (ИО) в соответствии с изменяющимся по



произвольному закону управляющим (входным) сигналом. Функциональная схема, реализующая задачи следящих САУ, приведена на рис.4.1.

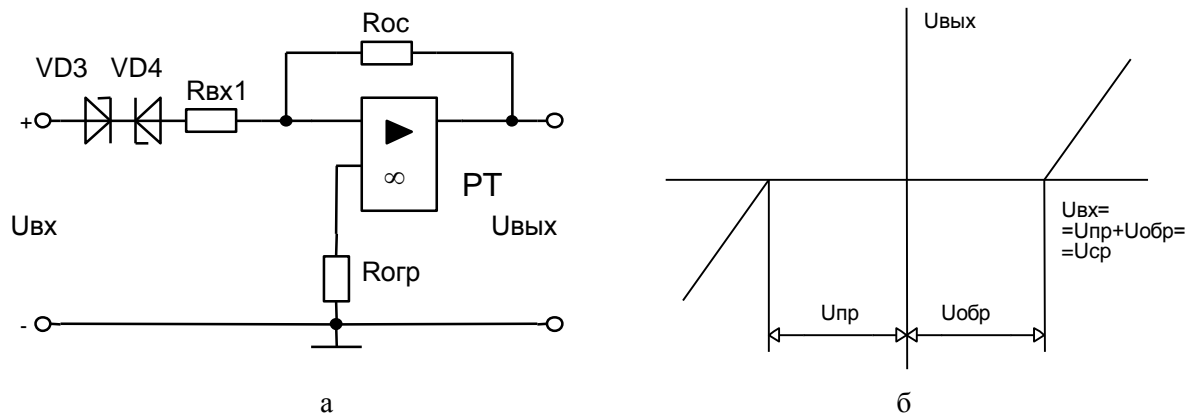


Рисунок 4.2 – Схемная реализация регулятора тока (а) и статическая характеристика НЭ1 – зоны нечувствительности (б)

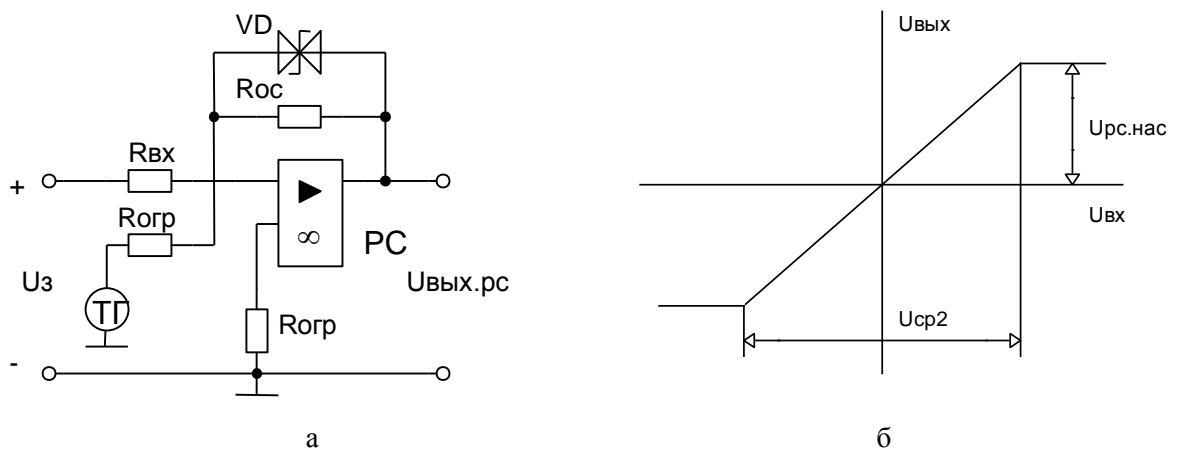


Рисунок 4.3 – Схемная реализация регулятора скорости (а) и статическая характеристика НЭ2 – зоны насыщения (б)

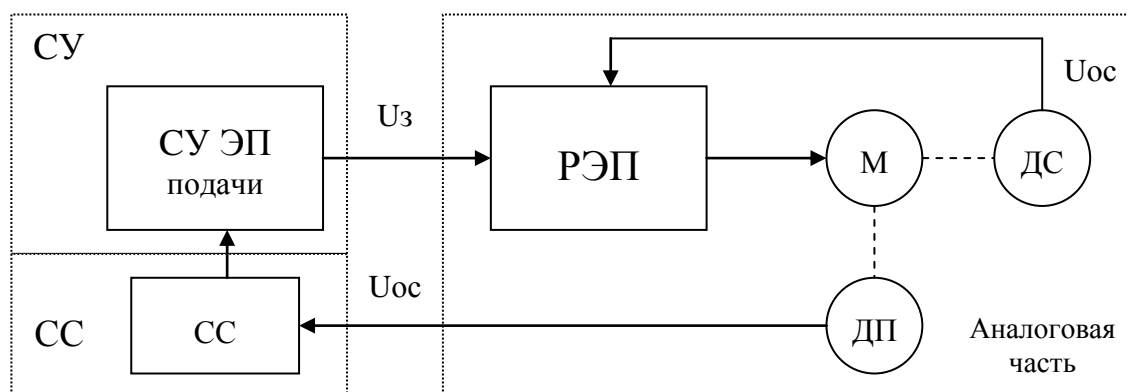
Следящая САУ рассматривается с позиции теории подчиненного регулирования с последовательной коррекцией (последовательным включением регуляторов). Как известно, величина ошибки САУ в установившемся режиме зависит от порядка астатизма (числа интегрирующих звеньев в системе) -  $V$ .

Аппаратное решение следящих САУ обычно осуществляется на базе ТП-Д с активными корректирующими звеньями последовательного действия – регуляторами на операционных усилителях. В отличие от схемы РЭП в

следящей системе имеется еще одно интегрирующее звено, соответствующее преобразованию угловой скорости двигателя  $\omega_{дв}$  в угол поворота объекта регулирования  $Q_{вЫХ}$ . Его передаточная функция при отсутствии зазоров в редукторе имеет вид

$$W_{РЕД}(p) = \frac{Q_{ВЫХ}(p)}{\omega_{ВЫХ}(p)} = \frac{k_P}{p} = \frac{i}{ip},$$

где  $i$  — передаточное отношение редуктора.



СУ ЭП – система управления электроприводом; СС – схема сопряжения датчика положения с СУ; ДП – датчик положения; ДС – датчик скорости; М – двигатель

Рисунок 4.4 – Реализация следящего привода

Устройству для измерения угла рассогласования (СС) –  $\delta = Q_{ВХ} - Q_{ВЫХ}$  и фазовому детектору, выполняющему функции регулятора положения, соответствует пропорциональное звено с коэффициентом усиления  $k_\delta$  ( $k_\delta = K_{рп}$ ), т.е.

$$W_{ИЗМ}(p) = \frac{u\delta(p)}{\delta(p)} = k_\delta.$$

В соответствии со структурной схемой на рис.4.4 и передаточными функциями ее звеньев на рис.4.5 представлена схема модели следящего электропривода, реализованного на базе модели РЭП (см. рис.4.5).



## 5. Задание к контрольной работе

В соответствии с индивидуальным заданием выполнить синтез и последующий анализ многоконтурной системы автоматического управления электроприводом (САУ ЭП) в указанной ниже последовательности.

1. Оптимизировать (в общем виде) типовую структуру многоконтурной САУ ЭП с подчиненным регулированием в соответствии с заданными желаемыми переходными процессами в соответствующих разомкнутых контурах управления.

Варианты заданий представлены в табл.5.1, где обозначены: Э – экспоненциальный процесс, А – аperiodический процесс, К – колебательный процесс.

2. По полученной оптимальной структуре регуляторов в каждом из контуров управления составить полную структурную схему САУ ЭП с указанием передаточных функций звеньев, входящих в систему.

3. Для синтезированной системы составить дифференциальные уравнения в форме Коши и уравнения связей.

4. Провести моделирование полученной системы управления электроприводом с помощью программы MathLab. Определить параметры регуляторов, при которых переходной процесс регулируемого параметра оптимален.

Параметры неизменяемой части системы управления электроприводом (параметры нелинейных элементов, коэффициенты и постоянные времени звеньев, параметры датчиков обратных связей и возмущающие воздействия) заданы:

$$U_3=10\text{В}, U_{cp1}=8.8\text{ В}, U_{cp2}=0.31\text{ В}, K_{\phi}=2.01, K_{\text{тп}}=37.5, K_{д1}=0.545\text{ P/В}, \\ K_{д2}=0.9\text{ P/В}, I_c=3.7\text{ А}, T_M=0.4\text{ с}, T_3=0.017\text{ с}, T_{\text{тп}}=0.005\dots 0.01\text{ с}, \\ K_T=0.14, K_c=0.09, K_{\text{п}}\approx 1, K_{\text{ред}}\approx 0.8.$$

Таблица 5.1 - Желаемые переходные процессы в разомкнутых контурах управления САУ ЭП

Вариант	1 контур	2 контур	3 контур	Вариант	1 контур	2 контур	3 контур
1	Э	Э	Э	28	-	Э	Э
2	Э	Э	А	29	-	Э	А
3	Э	Э	К	30	-	Э	К
4	Э	А	Э	31	-	А	Э
5	Э	А	А	32	-	А	А
6	Э	А	К	33	-	А	К
7	Э	К	Э	34	-	К	Э
8	Э	К	А	35	-	К	А
9	Э	К	К	36	-	К	К
10	А	Э	Э	37	Э	Э	-
11	А	Э	А	38	Э	А	-
12	А	Э	К	39	Э	К	-
13	А	А	Э	40	А	Э	-
14	А	А	А	41	А	А	-
15	А	А	К	42	А	К	-
16	А	К	Э	43	К	Э	-
17	А	К	А	44	К	А	-
18	А	К	К	45	К	К	-
19	К	Э	Э	46	Э	-	Э
20	К	Э	А	47	Э	-	А
21	К	Э	К	48	Э	-	К
22	К	А	Э	49	А	-	Э
23	К	А	А	50	А	-	А
24	К	А	К	51	А	-	К
25	К	К	Э	52	К	-	Э
26	К	К	А	53	К	-	А
27	К	К	К	54	К	-	К

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контрольная работа охватывает основные разделы дисциплины «Автоматизированный электропривод» и направлена на усвоение основ синтеза систем автоматизированного управления электроприводами, структурного проектирования регулируемых и следящих электроприводов, построения переходных процессов на основе использования структурной схемы системы управления электроприводом, а также моделирования систем управления электроприводами.

Качество выполнения индивидуальных заданий позволяет оценить качество усвоения учебного материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Башарин А. В. Управление электроприводами / Башарин А. В., Новиков В.А. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 392 с.
- 2 Комплектные системы управления электроприводами тяжелых металлорежущих станков / Под ред. д. т. н. А. Д. Поздеева. - М.: Энергия, 1985. – 288 с.
- 3 Ильинский Н. И. Общий курс электропривода / Ильинский Н. И., Козаченко В. Ф. - М.: Энергоатомиздат, 1992. – 398 с.
- 4 Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов / Чиликин М.Г., Сандлер А.С. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981.– 576с.
- 5 Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.

Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни “ Автоматизований електропривод “, для студентів спец. 7092501 денної та заочної форм навчання

Укладач

ШИШЕНКО Леонід Опанасович

Відповідальний за випуск

Ю.В. Тимофієв

Роботу рекомендував до видання

О.М. Шелковий

У авторській редакції

План 2006 р., п.137 /

Підписано до друку 01.02.06.

Формат 60 x 84<sup>1/16</sup>

Папір друк № 2. Гарнітура Таймс.

Друк – ризографія.

Ум. друк. арк. 2,1.

Обл. - вид. арк. 2,3.

Наклад 100 прим. Зам.

Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ “ХПІ”, 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000.

---