

Министерство образования и науки Украины  
Донбасская государственная машиностроительная академия

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к самостоятельной работе

по дисциплине

«Автоматизированный электропривод»

(для студентов специальности 7.092501)

Утверждено  
на заседании методического  
совета ДГМА  
Протокол №

Краматорск 2012

УДК 62-83

Методические указания к самостоятельной работе по дисциплине «Автоматизированный электропривод» (для студентов специальности 7.092501) / Сост. О.В. Субботин. - Краматорск: ДГМА, 2012. – 32 с.

Изложена методика выполнения контрольной работы, которая охватывает основные разделы курса основ автоматизированного электропривода: структурное проектирование и синтез систем автоматизированного управления электроприводами; построение переходных процессов с использованием структурной схемы системы автоматизированного управления электроприводом; моделирование систем управления электроприводами.

Методические указания предназначены для подготовки и выполнения контрольной работы студентами дневной и заочной форм обучения.

Составитель

О.В. Субботин, доцент

Отв. за выпуск

О.В. Субботин, доцент

## 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.

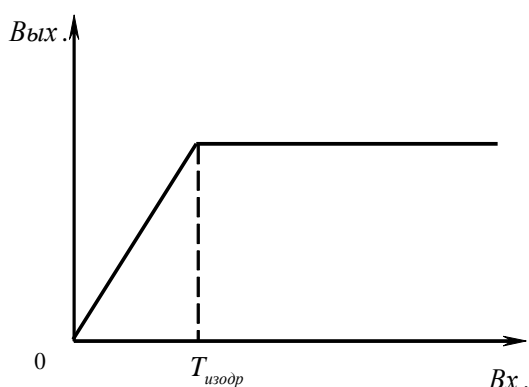
Методические указания предназначены для подготовки и выполнения контрольной работы, включающей решение обеих задач – аналитический расчет и моделирование системы управления электроприводом.

## 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).



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

Рисунок 1 – Характеристика задатчика интенсивности

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

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.

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

а) как усилительное звено -

$$W_{ТП}(p) = k_{ТП},$$

где  $k_{ТП}$  определяется по характеристике «вход-выход» (рис. 2) и будет равно:

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

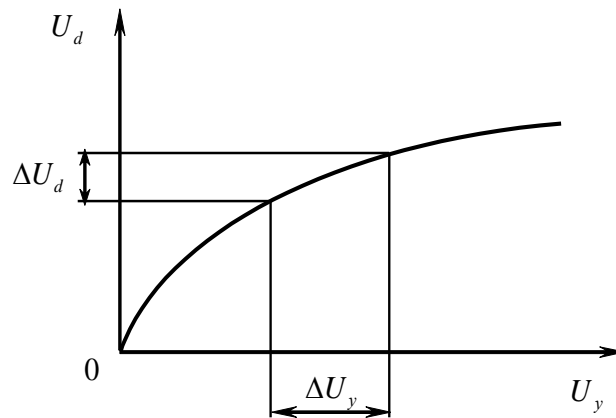


Рисунок 2 – Графическое определение коэффициента передачи преобразователя

б) как апериодическое звено -

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

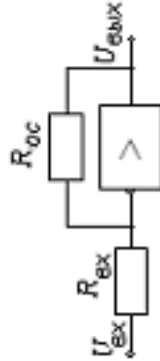
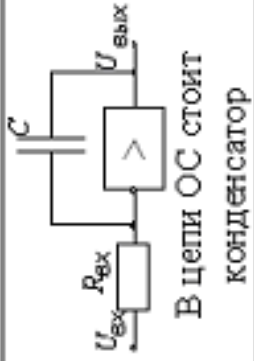
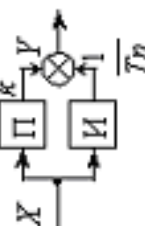
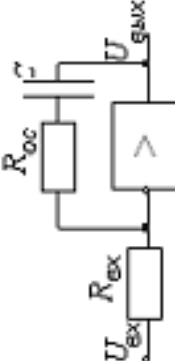
где  $k_{ТП}$  аналогично предыдущему;  $T_{ТП} = 0,005..0,01$  - постоянная времени на входе в фильтр и обозначается:  $T_{ТП} = T_{\mu}$  (малая некомпенсируемая постоянная);

в) как комбинация усилительного звена и звена запаздывания -

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

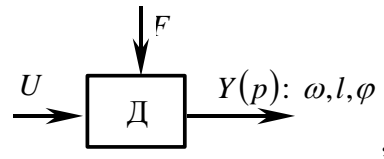
где  $m$  - число фаз;  $f$  - частота питающей сети.

Таблица 1 – Виды регуляторов

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

## 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:



а) как колебательное звено -

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

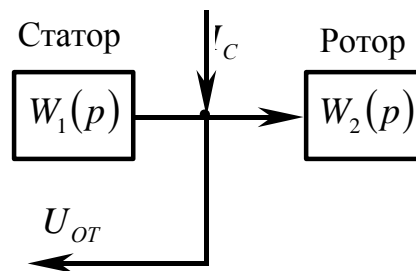
где  $k_D$  - это величина, обратная  $k\Phi$ ,  $k_D = \frac{1}{k\Phi}$ ;  $T_\Theta = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}$  - механическая постоянная, учитывает инерционность нарастания магнитных потоков в цепи возбуждения;  $T_M = I \frac{R_{яц}}{(k\Phi)^2}$  - механическая постоянная, учитывающая инерционность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

б) как инерционное звено второго порядка -

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

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

в) как ДПТ с обратной связью по току (выделен контур тока) -



$$W(p) = W_1(p) W_2(p) = \frac{k_{Д1}}{T_\Theta p + 1} \frac{k_{Д2}}{T_M p},$$

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

$$k_{Д1} k_{Д2} = k_D = \frac{1}{k\Phi};$$

$$k_{Д2} = \frac{1}{R_\text{я}}; k_{Д1} = k_D R_\text{я};$$

г) как ДПТ с выходным параметром в виде угла поворота -

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

где  $W_K(p)$  - передаточная функция колебательного звена;  $W_H(p)$  - передаточная функция интегрирующего звена.

Влияние порядка астатизма системы на вид переходного процесса в АЭП, включая двигатель, может быть охарактеризовано, как показано на рис. 3 и 4.

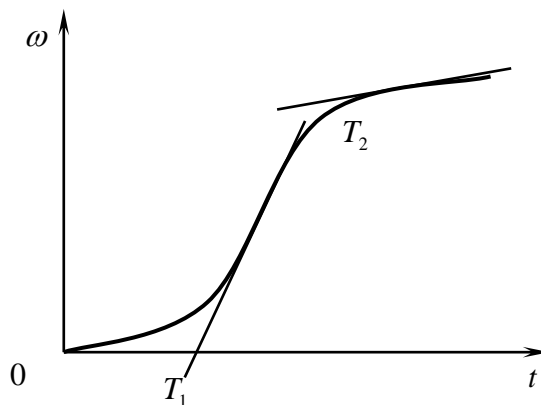


Рисунок 3 – Характеристика системы с двукратным интегрированием

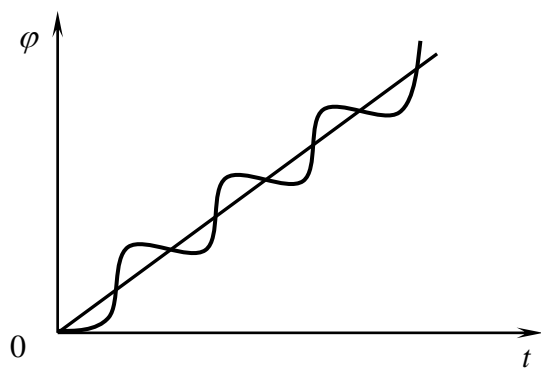


Рисунок 4 – Характеристика системы с трехкратным интегрированием

### 7 Редуктор Р.

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

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

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:

- минимальная статическая погрешность  $\sigma_{ст_{\min}} \leq (5...10)\%$  ;
- $t_{III}$  должно стремиться к минимуму, быстродействие должно быть максимальным;  $t_{III} \rightarrow \min$  ;
- абсолютная устойчивость.

### *Оптимизации САУ ЭП*

Оптимизация основана на использовании желаемых передаточных функций, последовательной коррекции:

$$W_{ж}(p) = W_{ИЗМ}(p) W_{H}(p).$$

В связи с этим реальная передаточная функция системы определяется умножением 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:

$$W_{P}(p) = W_{ж}(p),$$
$$W_{ИЗМ}(p) = W_{P}(p) = \frac{W_{ж}(p)}{W_{H}(p)}.$$

Неизменяемая часть определяется передаточной функцией тиристорного преобразователя и двигателя.

Структурная схема двухконтурной САУ ЭП (для регулируемого привода) представлена на рис. 5.

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.

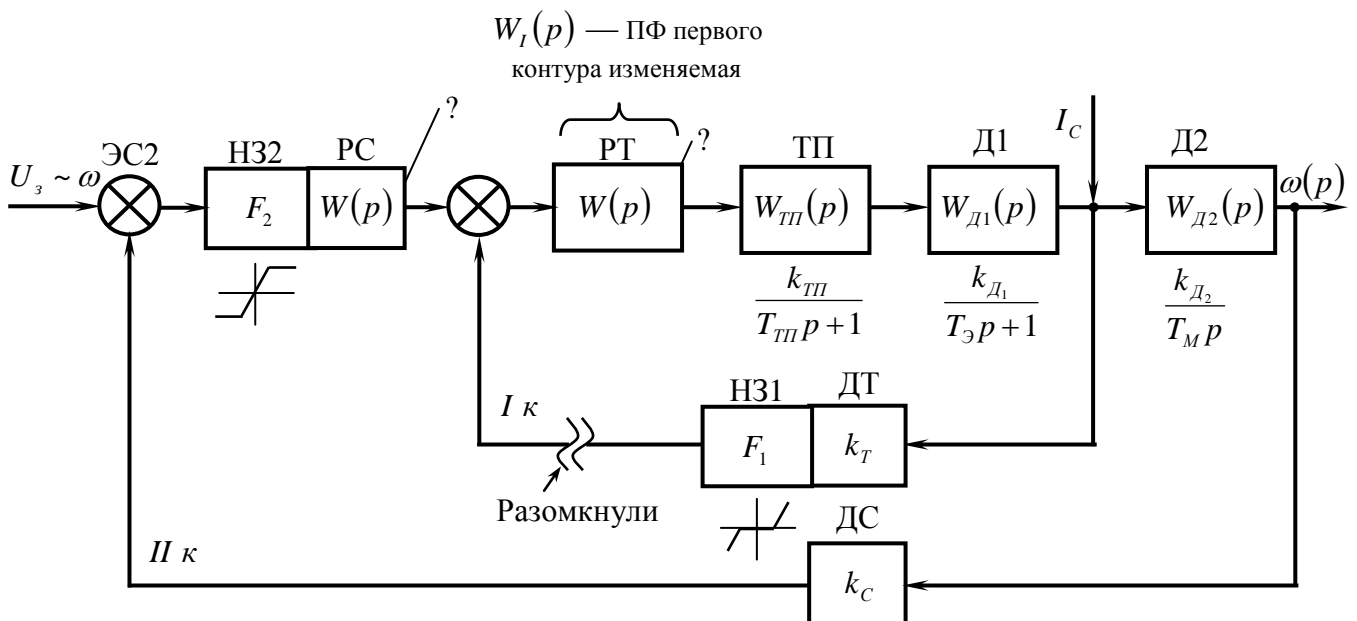


Рисунок 5 – Структурная схема регулируемого привода

Для этого используют следующие подходы:

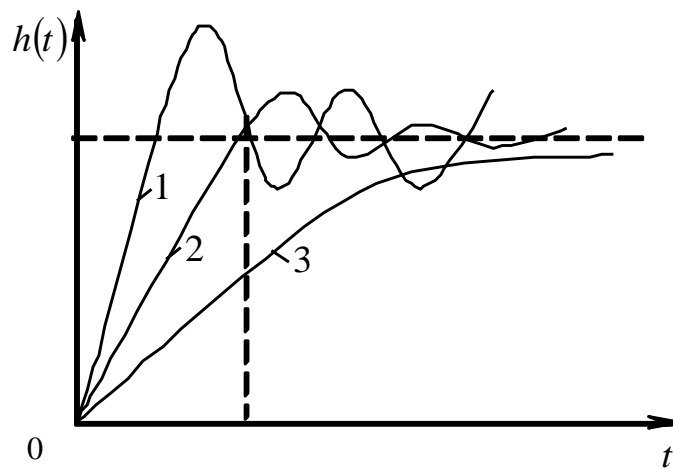
- технический оптимум (модульный принцип), который обеспечивает  $t_{ТП} \rightarrow \min$ , статическую погрешность  $\sigma = (5...10)\%$  и абсолютную устойчивость;

- 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. 6). По выбранному желаемому переходному процессу оцениваются оптимальные параметры регулирования САУ ЭП.



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

Рисунок 6 – Виды переходного процесса в САУ ЭП

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

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

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.

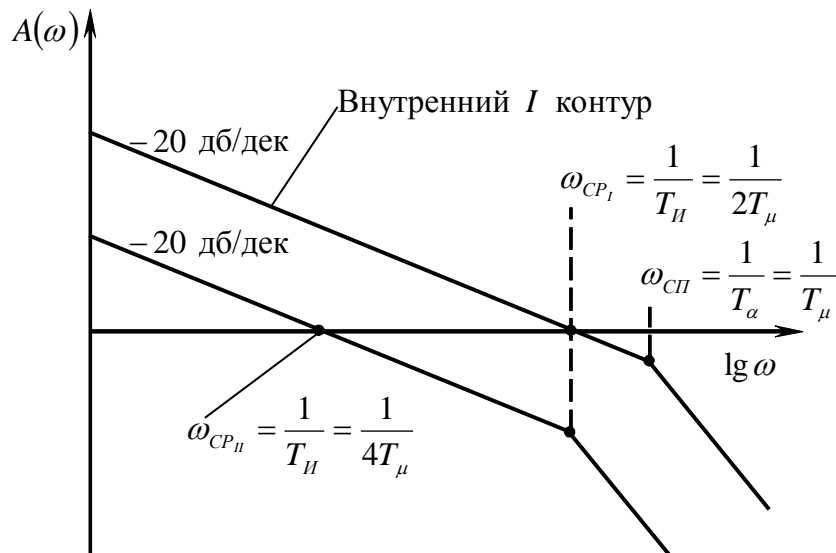
Таблица 2 - Желаемые передаточные функции разомкнутых контуров управления для различного вида переходных процессов

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 Апериодический	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 апериодического звеньев увеличиваются в 2 раза с целью смещения ЛАЧХ внешних контуров в область низких частот (рис. 7).  $T_{\alpha} = T_{\mu} = T_{III}$  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;  $\omega_{СП}$  — частота сопряжения

Рисунок 7 – 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 Выбирается вид желаемой передаточной функции по виду переходного процесса и по виду привода.
- 5 Оптимизация начинается с внутреннего контура в соответствии с принципом последовательной коррекции.
- 6 В результате преобразований получается передаточная функция изменяемой части, в качестве которой выступают регуляторы:
  - во внутреннем контуре – регулятор тока (как правило, ПИ-регулятор);
  - во внешнем контуре – регулятор скорости (как правило, П-регулятор).

Рассмотрим пример оптимизации двухконтурной системы АЭП.

Оптимизация внутреннего контура ( $I \kappa$ ) (*синтез регулятора тока*):

$$W_{Ж I PA3}(p) = W_{PA3 PI}(p) = W_{PT}(p)W_{ТП}(p)W_{Д1}(p)W_{ДГ}(p),$$

где  $W_{PT}(p)$  - неизвестная передаточная функция регулятора тока;  $W_{Ж I PA3}(p)$  - желаемая передаточная функция первого контура, разомкнутого;  $W_{PA3 PI}(p)$  - 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):

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

Находим желаемую передаточную функцию для апериодического процесса:

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

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

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

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

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

Пусть  $T_{\ominus} = T_1$ , 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 представляет собой астатическую систему первого порядка (с однократным интегрированием).

Оптимизация внешнего контура (*синтез регулятора скорости*)

Передаточную функцию замкнутого первого контура  $W_{I\text{КЗ}}$  (рис. 8) находим по известным правилам для нахождения передаточных функций замкнутых систем.

$$W_{I\text{КЗ}}(p) = \frac{W_{Ж\text{I}}(p)}{1 + W_{Ж\text{I}}(p)W_{ДГ}(p)},$$

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

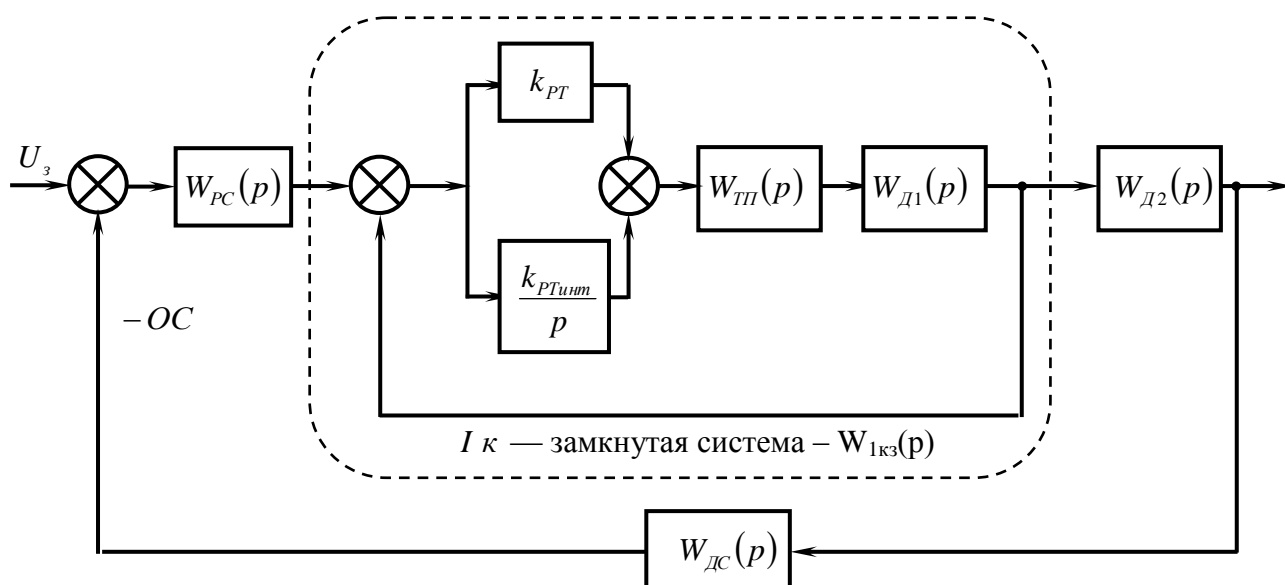


Рисунок 8 – Структурная схема контура скорости

Синтез неизвестной неизменяемой части (регулятора скорости) производим в соответствии с методикой для контура тока (рис. 9).

$$W_{Ж\text{II раз}}(p) = W_{P\text{II раз}}(p) = W_{PC}(p)W_{I\text{КЗ}}(p)W_{Д2}(p)W_{ДС}(p),$$

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{Ж\text{II аперюд. раз. сист}}(p)}{W_{I\text{КЗ}}(p)W_{Д2}(p)W_{ДС}(p)} = \frac{W_{Ж\text{II аперюд. раз. сист}}(p)}{W_{I\text{КЗ}}(p)W_{Д2}(p)I},$$

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

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

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

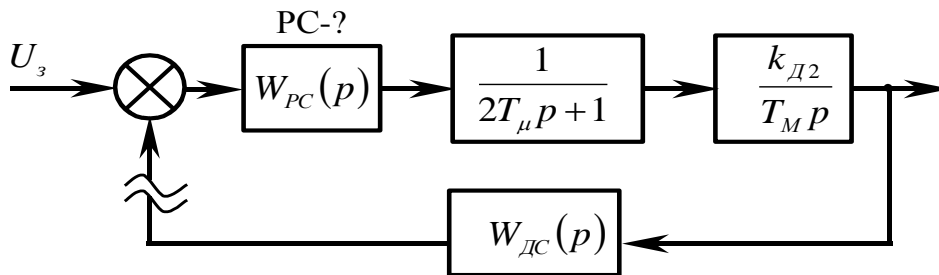


Рисунок 9 – Оптимизация контура скорости

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. 10 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.

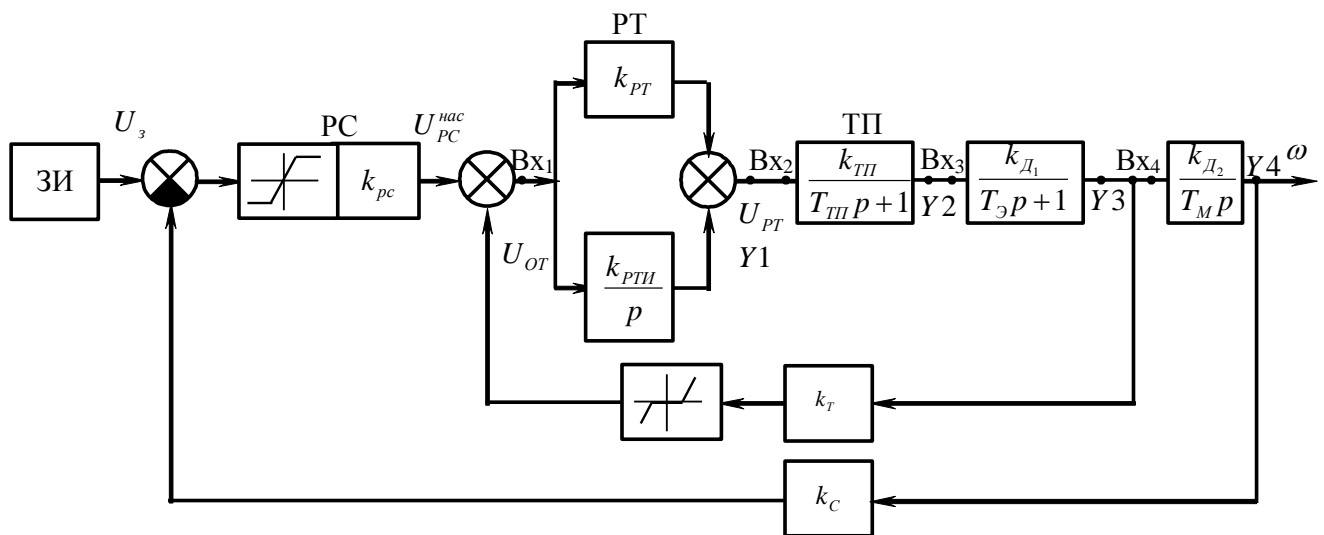


Рисунок 10 – Структурная схема двухконтурной САУ ЭП

- 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-й пункты представлены на рис. 11.

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

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

Находим  $\Delta y_1(p)$ :

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

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

$$Y_1 p = Y_1',$$

где  $p$  — оператор дифференцирования.

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

Дифференциальные уравнения Коши:

$$y_1 p = y_1' = k_{РТИ_{ум}} Bx_1.$$

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):

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

$$\frac{Bx_4 k_{Д2}}{T_M p} = Y_4,$$

$$pY_4 = \frac{Bx_4 k_{Д2}}{T_M}.$$

6 Определяем входы и составляем уравнения связей.

Составим уравнение связи для  $Bx_1$ :

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

где  $(U_3 - U_{OC})k_{PC} = U_{PC}$ ;  $U_{OT} = I_{Д}k_T - U_{СП1}$ .

$$Bx_1 = (U_3 - U_{OC})k_{PC} - (I_{Д}k_T - U_{СП1}),$$

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

Составим уравнение связи для  $Bx_2$ :

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

Составим уравнение связи для  $Bx_3$ :

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

Составим уравнение связи для  $Bx_4$ :

$$Bx_4 = Y_3 + I_{СТ}.$$

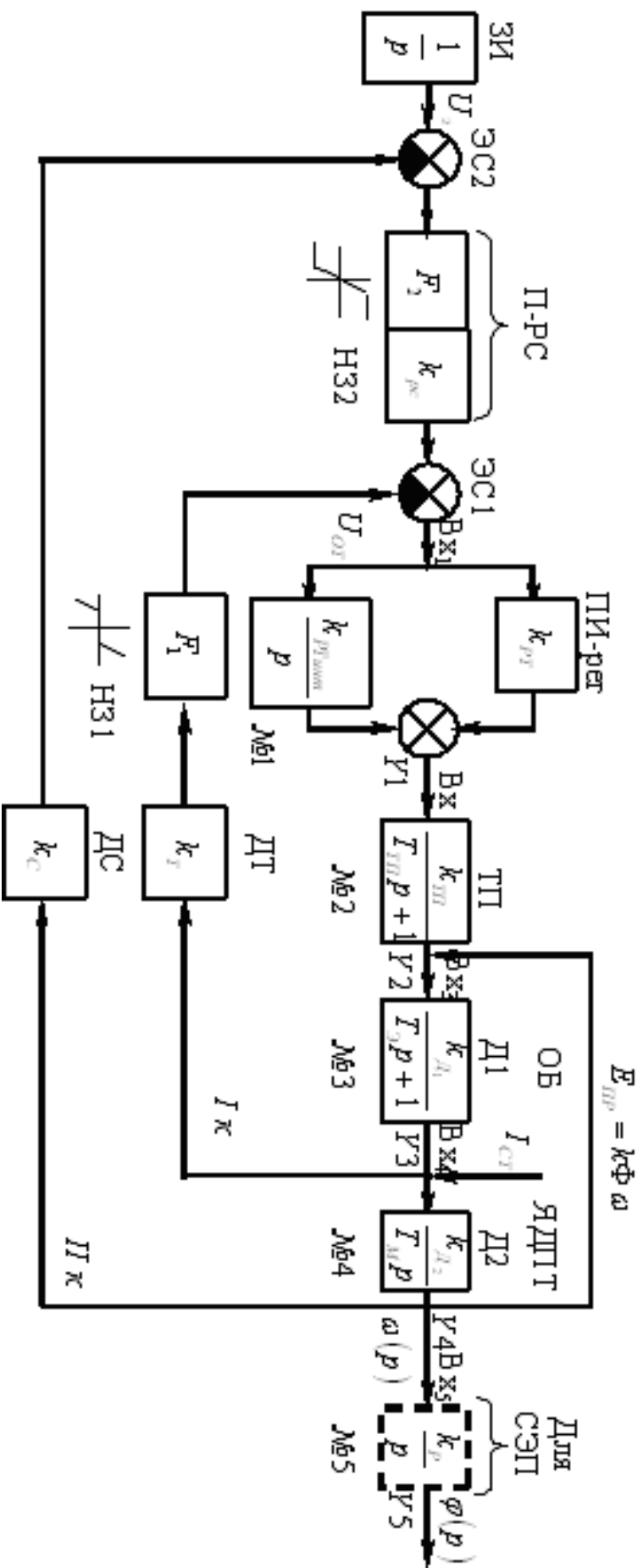


Рисунок 11 – Структурная схема САУ ЭП для подчиненного регулирования

## 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. 12. 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.

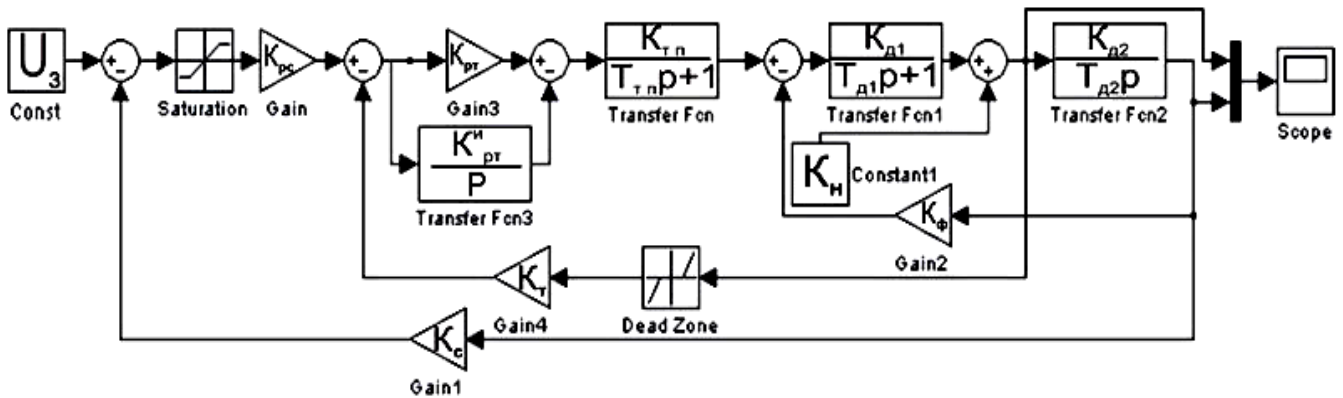


Рисунок 12 — Структурная схема РЭП в блоках MathLab

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. 13 и 14 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. 15.

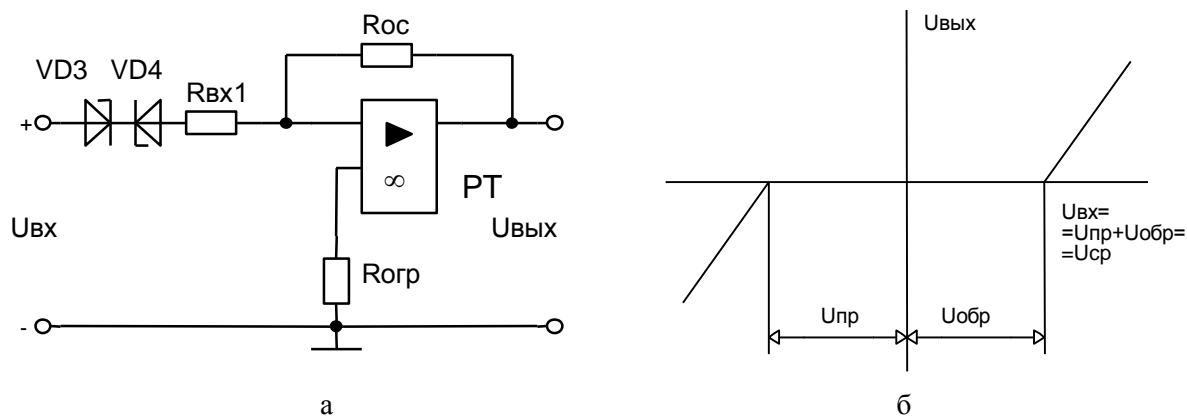


Рисунок 13 – Схемная реализация регулятора тока (а) и статическая характеристика НЭ1 – зоны нечувствительности (б)

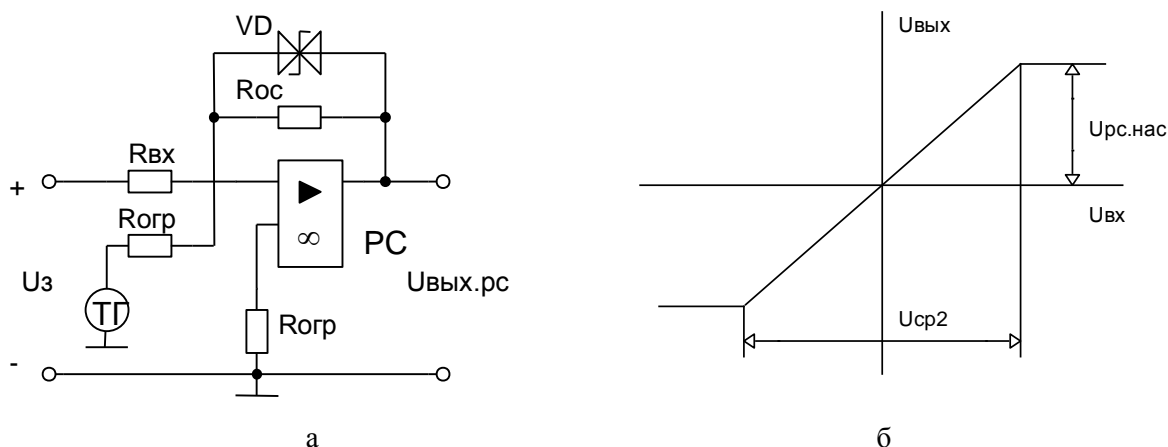


Рисунок 14 – Схемная реализация регулятора скорости (а) и статическая характеристика НЭ2 – зоны насыщения (б)

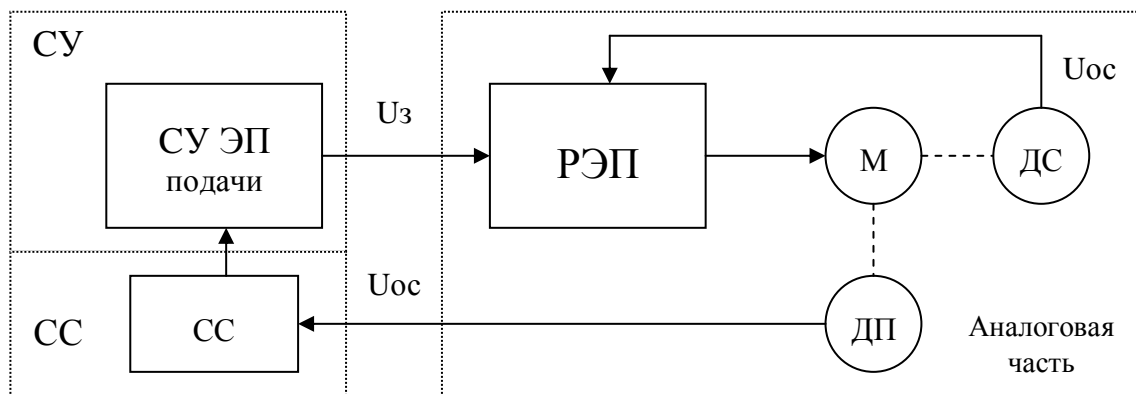
Следящая САУ рассматривается с позиции теории подчиненного регулирования с последовательной коррекцией (последовательным включением регуляторов). Как известно, величина ошибки САУ в установившемся режиме зависит от порядка астатизма (числа интегрирующих звеньев в системе)  $V$ .

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  $Q_{ввых}$ . Его передаточная функция при отсутствии зазоров в редукторе имеет вид

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

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 15 – Реализация следящего привода

Устройству для измерения угла рассогласования (СС) –  $\delta = Q_{вх} - Q_{ввых}$  и фазовому детектору, выполняющему функции регулятора положения, соответствует пропорциональное звено с коэффициентом усиления  $k_\delta$  ( $k_\delta = K_{рп}$ ), то есть

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

В соответствии со структурной схемой на рис. 15 и передаточными функциями ее звеньев на рис. 16 представлена схема модели следящего электропривода, реализованного на базе модели РЭП.

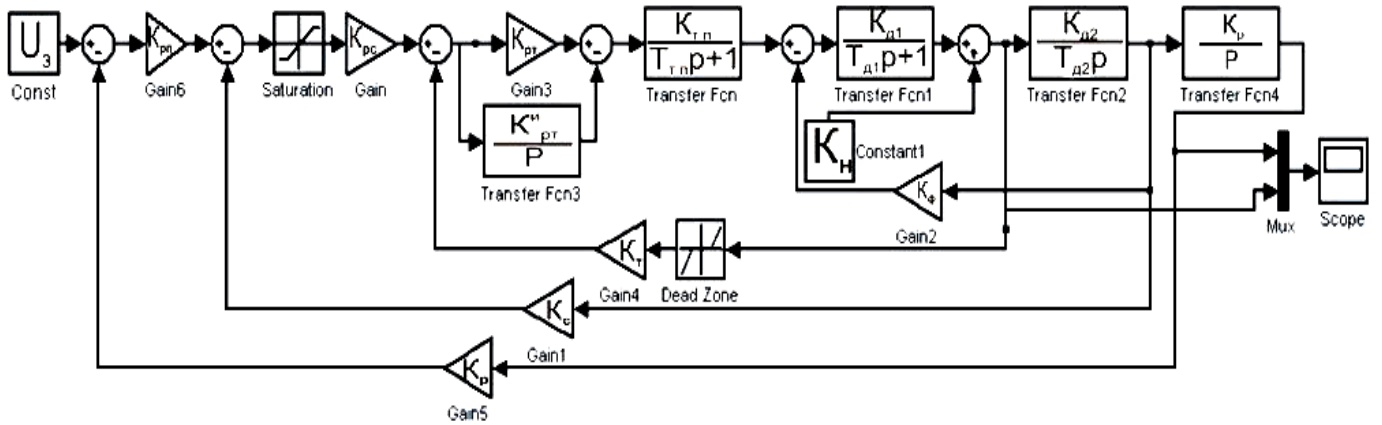


Рисунок 16 – Модель следящего электропривода

В следящем электроприводе, где не используются контуры регулирования тока и скорости, передаточная функция регулятора угла должна выбираться из условия обеспечения заданных значений добротности по скорости, ускорению и рывку. В этом случае необходимо использование ПИД - регулятора с передаточной функцией

$$W_{K1} = \frac{(T_{K1}p + 1)(T_{K2} + 1)}{T_{Ka}p} ,$$

где  $T_{K1}$  — низкочастотная постоянная времени дифференцирования, обеспечивающая устойчивость системы;  $T_{K2}$  — высокочастотная постоянная времени дифференцирования, повышающая динамические свойства системы;  $T_{K3}$  — постоянная времени интегрирования, обеспечивающая ограничение ускорения привода и компенсирующая скорость ошибку системы.

На практике для обеспечения заданных значений угла рассогласования в статических и динамических режимах достаточно использовать ПИ - регулятор с передаточной функцией

$$W_{Kr}(p) = \frac{T_{K1}p + 1}{T_{Ka}p} .$$

## 5 Задание к самостоятельной 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. 3, где обозначены: Э – экспоненциальный процесс; А – апериодический 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 переходный 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:

$$U_3=10\text{В}, U_{cp1}=8,8\text{ В}, U_{cp2}=0,31\text{ В}, K_{\phi}=2,01, K_{тп}=37,5, K_{д1}=0,545\text{ Р/В}, \\ K_{д2}=0,9\text{ Р/В}, I_c=3,7\text{ А}, T_m=0,4\text{ с}, T_3=0,017\text{ с}, T_{тп}=0,005\dots 0,01\text{ с}, \\ K_r=0,14, K_c=0,09, K_{п}\approx 1, K_{ред}\approx 0,8.$$

Таблица 3 - Желаемые переходные процессы в разомкнутых контурах управления САУ ЭП

Вариант	I контур	II контур	III контур	Вариант	I контур	II контур	III контур
1	Э	Э	Э	19	К	Э	Э
2	Э	Э	А	20	К	Э	А
3	Э	Э	К	21	К	Э	К
4	Э	А	Э	22	К	А	Э
5	Э	А	А	23	К	А	А
6	Э	А	К	24	К	А	К
7	Э	К	Э	25	К	К	Э
8	Э	К	А	26	К	К	А
9	Э	К	К	27	К	К	К
10	А	Э	Э	28	Э	Э	-
11	А	Э	А	29	Э	А	-
12	А	Э	К	30	Э	К	-
13	А	А	Э	31	А	Э	-
14	А	А	А	32	А	А	-
15	А	А	К	33	А	К	-
16	А	К	Э	34	К	Э	-
17	А	К	А	35	К	А	-
18	А	К	К	36	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 / А.В. Башарин, В.А.Новиков. — 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 / Н.И.Ильинский, В.Ф.Козаченко. - М.: Энергоатомиздат, 1992. – 398 с.

4 Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов / М.Г.Чиликин, А.С. Сандлер. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981.–576с.

5 Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.

Навчальне видання  
Методичні вказівки  
до самостійної роботи  
з дисципліни  
„Автоматизований електропривод”  
(для студентів спеціальності 7.092501)

Укладач Олег Володимирович Суботін  
Редактор Н.О. Хахіна

Підписано до друку Формат 60x84 1/16.

Папір газетний. Ризогр.друк. Зам.№

Тираж Ум.друк.арк. Обл.-вид.арк.

Видавець і виготовник „Донбаська державна машинобудівна академія”

84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи

серія ДК№1633 від 24.12.03



Министерство образования и науки Украины  
Донбасская государственная машиностроительная академия

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к самостоятельной работе

по дисциплине

«Автоматизированный электропривод»

(для студентов специальности 7.092501)

Краматорск 2010

