

Министерство образования и науки Украины  
Донбасская государственная машиностроительная академия

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению контрольной работы

по дисциплине

«Автоматизированный электропривод»

(для студентов специальности 151)

Краматорск 2016

УДК 62-83

Методические указания к выполнению контрольной работы по дисциплине «Автоматизированный электропривод» (для студентов специальности 151) / Сост. О.В. Субботин. - Краматорск: ДГМА, 2016. – 32 с.

Изложена методика выполнения контрольной работы, которая охватывает основные разделы курса основ автоматизированного электропривода – синтез систем автоматизированного управления электроприводом; структурное проектирование регулируемых и следящих электроприводов; построение переходных процессов на основе использования структурной схемы системы автоматизированного управления электроприводом; моделирование систем управления электроприводами. Приводятся примеры выполнения заданий.

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 Методика построения переходных процессов на основе использования структурной схемы САУ ЭП	11
3 Синтез САУ ЭП	15
4 Моделирование системы управления электроприводом	22
5 Задание к контрольной работе	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	30

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для обеспечения их 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 автоматического проектирования на ЭВМ.

Настоящая контрольная работа направлена на 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).

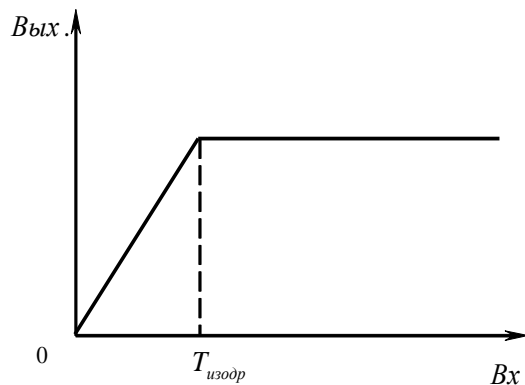


Рисунок 1 – Характеристика задатчика интенсивности

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

$$W \cdot p = \frac{1}{T_p} = \frac{K}{p}; \quad \frac{1}{T} = K.$$

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:

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

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 как:

##### а) усилительное звено

$$W_{\text{TP}} \overset{\sim}{=} k_{\text{TP}},$$

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

$$k_{\text{TP}} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y}.$$

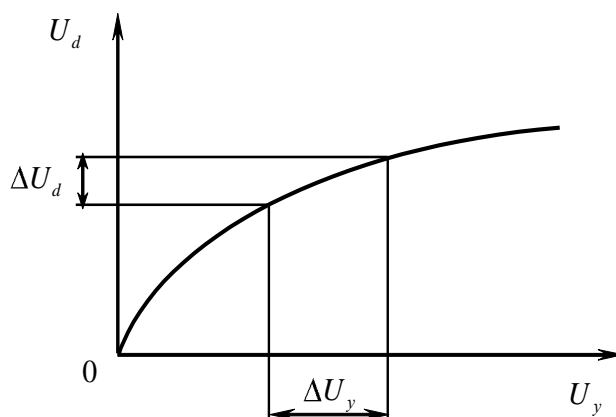


Рисунок 2 – Графическое определение коэффициента передачи преобразователя

##### б) апериодическое звено

$$W \overset{\sim}{=} \frac{k_{\text{TP}}}{T_{\text{TP}} p + 1},$$

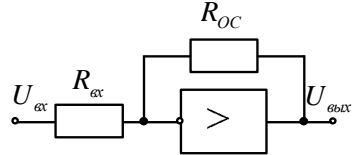
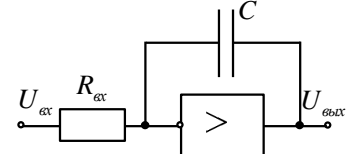
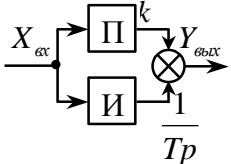
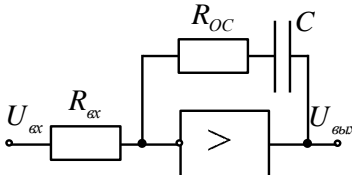
где  $k_{\text{TP}}$  аналогично предыдущему;  $T_{\text{TP}} = 0,005 \dots 0,01$  - постоянная времени на входе в фильтр и обозначается  $T_{\text{TP}} = T_{\mu}$  (малая некомпенсируемая постоянная).

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

$$W_{\text{TP}} \overset{\sim}{=} k e^{-p\tau}, \quad \tau = \frac{0,5}{mf},$$

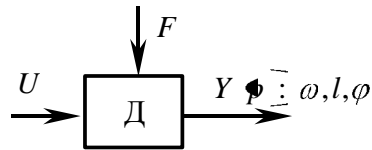
где  $m$  - число фаз;  $f$  - частота питающей сети.

Таблица 1 – Виды регуляторов

Закон регулирования	Вид регулятора	Дифференциальное уравнение	Передаточная функция $W(p)$	Электронная схема	Примечание
1. Пропорциональный закон	П	$\Delta y = k\Delta x$	$k$		$k = \frac{\Delta U_{obyx}}{\Delta U_{ox}} = \frac{R_{oc}}{R_{ox}}$
2. Интегральный закон	И	$\Delta y = \int_{t_1}^{t_2} \Delta x dt$	$\frac{k}{p}$	 <p>В цепи ОС стоит конденсатор</p>	$k_{инт} = \frac{1}{T}$ $T = R_{ox} C$
3. Пропорционально-интегральный закон	ПИ	$\Delta y = k_y \Delta x + k_u \int_{t_1}^{t_2} \Delta x dt$	 <p>Структурная схема ПИ-регулятора</p> $W_{ПИ}(p) = W_{П}(p) + W_{И}(p) = k + \frac{1}{Tp} = \frac{kTp + 1}{p}$		$T_1 = R_{oc} C \quad T_2 = R_{ox} C,$ <p>задаются <math>R_{ox} = 10 \text{ кОм}</math> и <math>C = 1 \text{ мкФ}</math></p>

## 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  $W_{\varphi} = \frac{\omega_{\varphi}}{U_{\varphi}}$ ;

б) по возмущающему воздействию  $W_{\varphi} = \frac{\omega_{\varphi}}{F_{\varphi}}$ .

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.

$$W_{\varphi} = \frac{k_D}{T_D p + 1}.$$

$$k_D, T_D = f(\omega_c, R, S_k).$$

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

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

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

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

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



Двигатели постоянного тока могут быть представлены как:

а) колебательное звено:

$$W \Phi \equiv \frac{k_D}{T_{\Omega} T_M p^2 + T_M p + 1},$$

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;  $T_M = I \frac{R_{яц}}{k\Phi}$  - механическая постоянная, учитывающая

инерционность механических частей;  $R_{яц}$  - сопротивление якорной цепи;  $J$  -

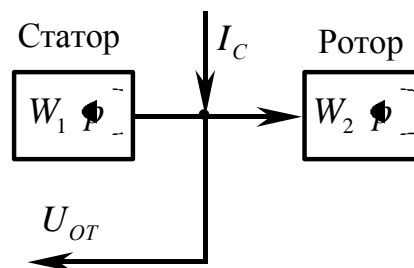
момент инерции электродвигателя;  $L_{яц}$  - индуктивность якорной цепи;

б) инерционное звено второго порядка:

$$W \Phi \equiv \frac{k_{\delta}}{\tau_1 p + 1 \tau_2 p + 1},$$

где  $\tau_1 p + 1 \equiv T_{\Omega}$ ;  $\tau_2 p + 1 \equiv T_M$ ;

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



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

где  $T_M = I \frac{R_{я}}{k\Phi}$ ;  $T_{III} = T_{\mu}$  - малая некомпенсируемая постоянная;

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

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

г) ДПТ с выходным параметром в виде угла поворота:

$$W_{\Phi} \equiv W_K \cdot W_{II} \equiv \frac{k_D}{p^2 T_M p^2 + T_M p + 1},$$

где  $W_K$  - передаточная функция колебательного звена;  $W_{II}$  - 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.

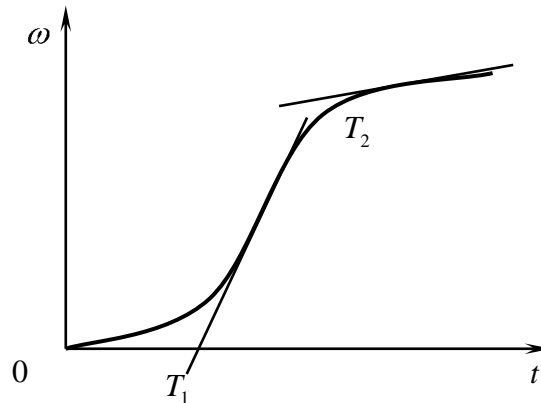


Рисунок 3 – Характеристика системы с двукратным интегрированием

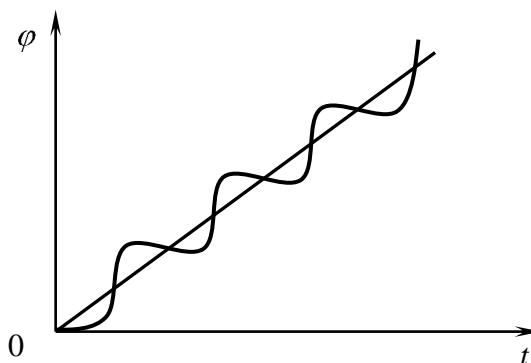


Рисунок 4 – Характеристика системы с трехкратным интегрированием

## 7 Редуктор Р.

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

$$W_{\Phi} \equiv k_P; k_P = \frac{1}{u},$$

где  $u$  — передаточное отношение.

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

$$W_{\Phi} \equiv \frac{k_P}{p} = \frac{1}{T_P}.$$

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

Этапы построения переходных процессов:

- 1 Составляется структурная схема САУ ЭП для подчиненного регулирования (на рис. 5 представлен пример двухконтурной системы АЭП).

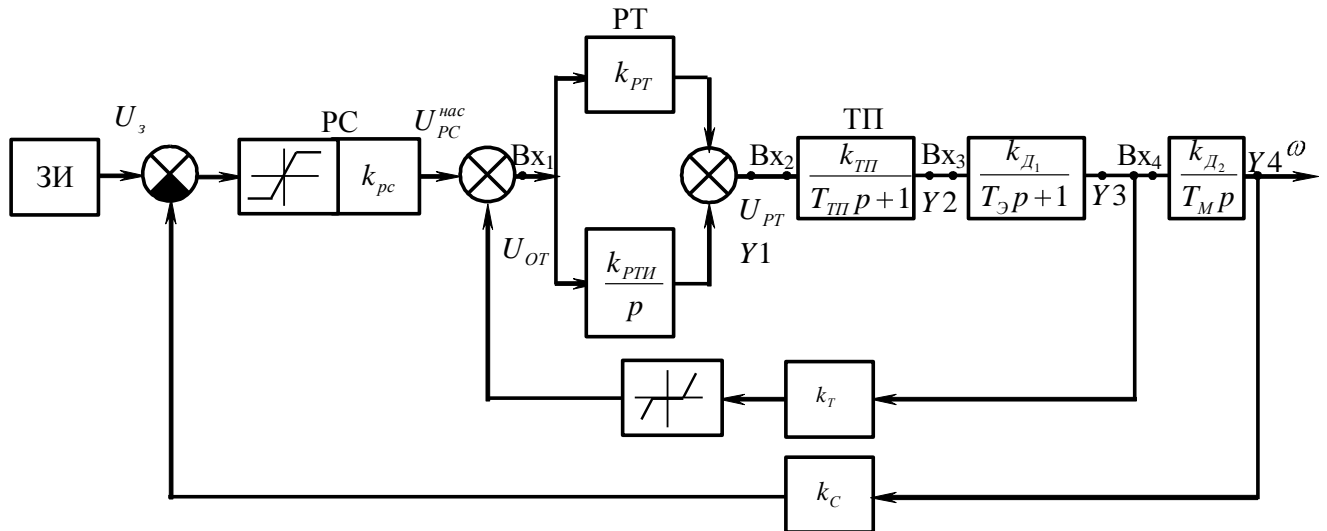


Рисунок 5 – Структурная схема двухконтурной САУ ЭП

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

$\Delta y = f \cdot T$  - обычное дифференциальное уравнение;

$\frac{dy}{dt} = f \cdot T$  - 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  $i$ ,  $\omega$ ).

Рассмотрим пример.

1, 2, 3 и 4-е пункты представлены на рис. 6.

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

$$W_{\text{PT}} \equiv \frac{\Delta Y_1}{Bx_1} = \frac{k_{\text{РТНТ}}}{p}.$$

Находим  $\Delta y_1$ :

$$\Delta Y_1 \equiv \frac{k_{\text{РТНТ}} Bx_1}{p},$$

$$\Delta Y_1 p = Y_1 p = k_{\text{РТНТ}} Bx_1,$$

$$Y_1 p = Y_1',$$

где  $p$  — оператор дифференцирования.

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

Дифференциальные уравнения Коши:

$$y_1 p = y_1' = k_{\text{РТНТ}} Bx_1,$$

Составляем уравнение Коши для тиристорного преобразователя, звено №2:

$$W_{\text{ТТ}} \equiv \frac{k_{\text{ТТ}}}{T_{\mu} p + 1} = \frac{Y_2}{Bx_2};$$

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

$$Y_2 (T_{\mu} p + 1) = k_{\text{ТТ}} Bx_2,$$

$$Y_2 T_{\mu} p + Y_2 = k_{\text{ТТ}} Bx_2,$$

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

Перейдем к третьему звену (Д1):

$$W_{Д1} \Phi \bar{\omega} = \frac{k_{Д1}}{T_3 p + 1} = \frac{Y_3}{Bx_3};$$

$$Y_3 = \frac{k_{Д1} Bx_3}{T_3 p + 1},$$

$$Y_3 p = \frac{k_{Д1} Bx_3 - Y_3}{T_3}.$$

Проанализируем звено № 4 (Д2):

$$W_{Д2} \Phi \bar{\omega} = \frac{k_{Д2}}{T_M p} = \frac{Y_4}{Bx_4},$$

$$\frac{Bx_4 k_{Д2}}{T_M p} = Y_4,$$

$$p Y_4 = \frac{Bx_4 \cdot k_{Д2}}{T_M}.$$

6 Определяем входы и составляем уравнения связей.

Составим уравнение связей для  $Bx_1$ :

$$U_3 - U_{OC} \bar{k}_{PC} - U_{OT} = Bx_1,$$

$$U_3 - U_{OC} \bar{k}_{PC} = U_{PC}.$$

$$U_{OT} = I_D k_T - U_{CP1}.$$

$$Bx_1 = U_3 - U_{OC} \bar{k}_{PC} - I_D k_T - U_{CP1},$$

$$Bx_1 = U_3 - U_{OC} \bar{k}_{PC} - I_D k_T - F_1.$$

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  $Bx_4$ :

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

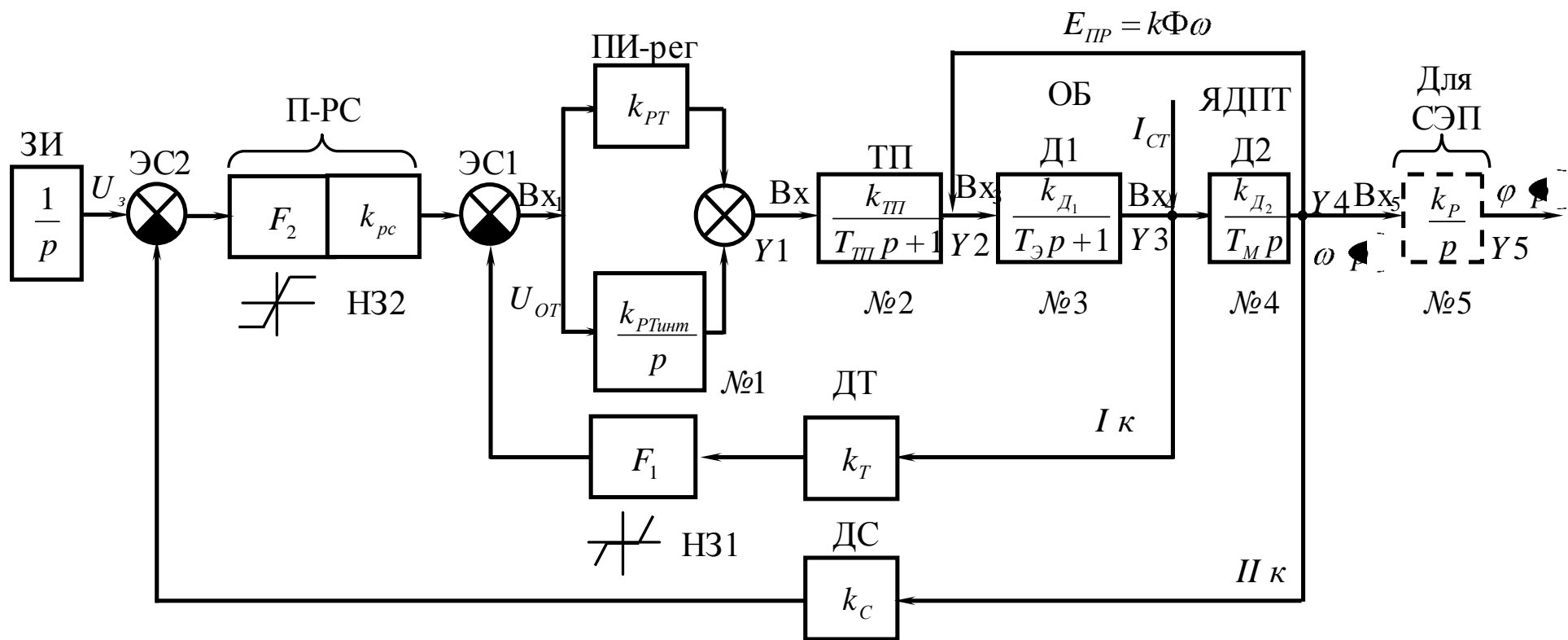


Рисунок 6 – Структурная схема САУ ЭП для подчиненного регулирования

### 3 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  $\sigma_{ст\ min} \leq 1...10\ %$  ;
- $t_{шт}$  должно стремиться к минимуму, быстродействие должно быть максимальным;  $t_{шт} \rightarrow \min$  ;
- абсолютную устойчивость.

#### Оптимизации САУ ЭП

Оптимизация основана на использовании желаемых передаточных функций, последовательной коррекции:

$$W_{ж}(\omega) \approx W_{изм}(\omega) \cdot W_{н}(\omega).$$

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:

$$W_{р}(\omega) \approx W_{ж}(\omega),$$

$$W_{изм}(\omega) \approx W_{р}(\omega) \approx \frac{W_{ж}(\omega)}{W_{н}(\omega)}.$$

Неизменяемая часть определяется передаточной функцией тиристорного преобразователя и двигателя.

Структурная схема двухконтурной САУ ЭП (для регулируемого привода) представлена на рис. 8.

В такой системе необходимо:

- определить ПФ изменяемой части в первом контуре  $W_{PT} \Phi$ :

$$W_{ИЗМ_I} \Phi \approx W_{PT} \Phi \text{ в I к.};$$

- найти ПФ изменяемой части во втором контуре  $W_{PC} \Phi$ :

$$W_{ИЗМ_{II}} \Phi \approx W_{PC} \Phi \text{ во II к.}$$

$$W_{PT.КЗ} \Phi \approx \frac{W_{Ж} \Phi}{W_{Неизм} \Phi} = W_{Изм} \Phi.$$

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

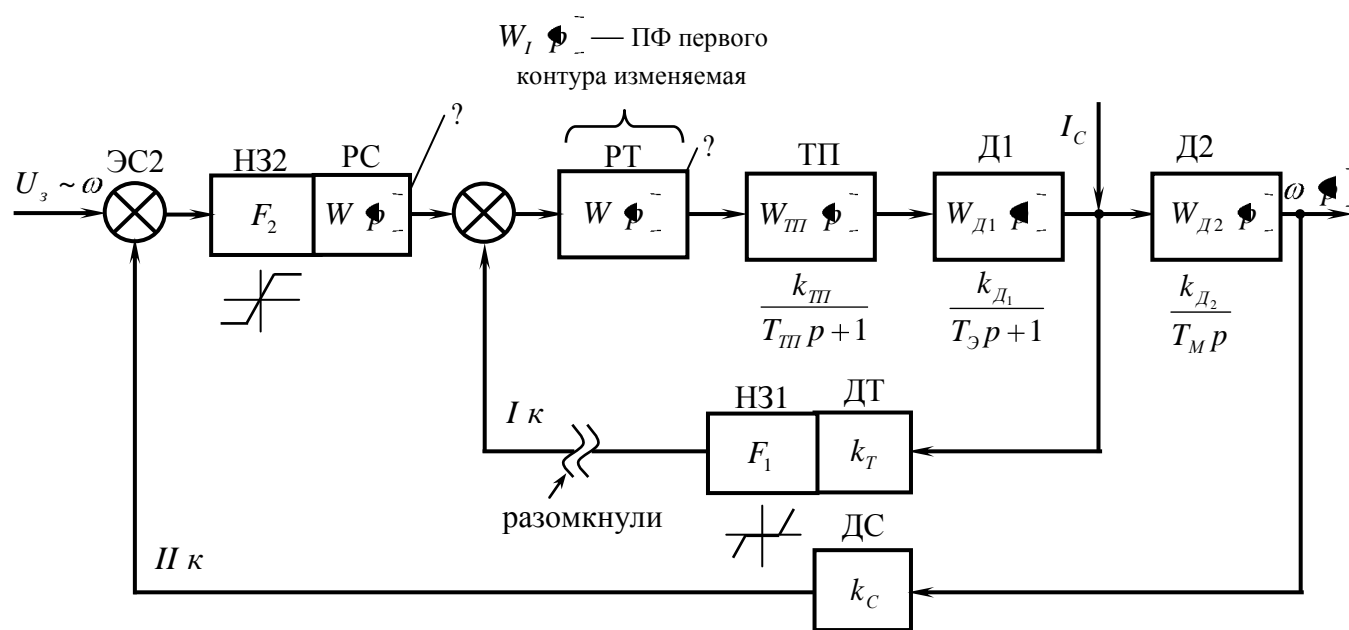


Рисунок 8 – Структурная схема регулируемого привода

Для этого используют следующие подходы:

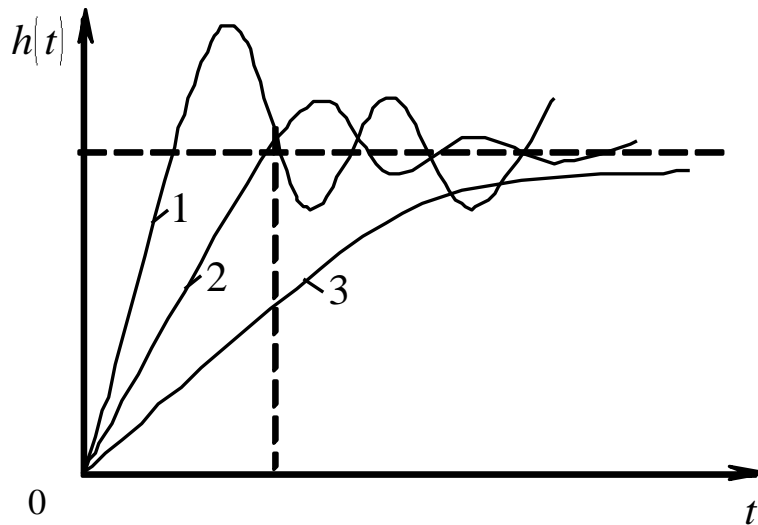
- технический оптимум (модульный принцип), который обеспечивает  $t_{III} \rightarrow \min$ , статическую погрешность  $\sigma = 1...10\%$  и абсолютную устойчивость;
- симметричный оптимум, который обеспечивает погрешность, стремящуюся к нулю ( $\sigma \rightarrow 0$ ). Эти установки называются прецизионными.



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

$$W_{ж} \Phi \equiv W_H \Phi \bar{W}_{An} \Phi \equiv \frac{k_H}{T_H p} \frac{k_\alpha}{T_\alpha p + 1}.$$

Отношение  $a = T_H / T_\alpha$  определяет вид переходного процесса, рис. 7. По выбранному желаемому переходному процессу оцениваются оптимальные параметры регулирования САУ ЭП.



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

Рисунок 7 – Виды переходного процесса в САУ ЭП

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

$$W_{ж \text{ Апер}} \Phi \equiv \frac{1}{2T_\alpha p} \frac{1}{T_\alpha p + 1}.$$

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.

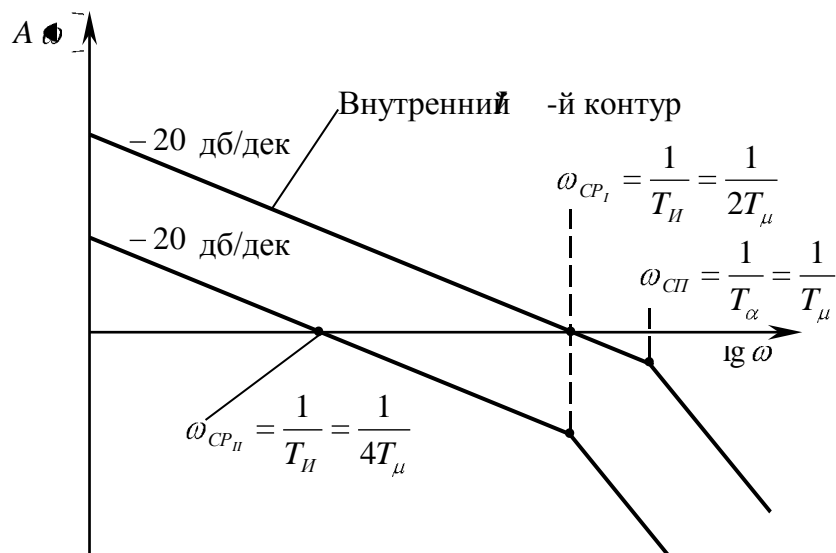
Таблица 2 - Разновидности желаемых передаточных функций для различного вида переходных процессов

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

*Примечание.* Во внешних контурах или при переходе ко внешним контурам постоянные времени интегрирующего и аperiodического звеньев увеличиваются в 2 раза с целью смещения ЛАЧХ внешних контуров в область низких частот (рис. 9).  $T_{\alpha} = T_{\mu} = T_{III}$  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 9 – 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):

$$W_{ЖИРАЗ} \bar{P} \bar{=} W_{РАЗПИ} \bar{P} \bar{=} W_{РТ} \bar{P} \bar{=} \cdot W_{ТП} \bar{P} \bar{=} \cdot W_{Д1} \bar{P} \bar{=} \cdot W_{ДТ} \bar{P} \bar{=},$$

где  $W_{РТ} \bar{P} \bar{=}$  - неизвестная передаточная функция регулятора тока;  $W_{ЖИРАЗ} \bar{P} \bar{=}$  - желаемая передаточная функция первого контура, разомкнутого;  $W_{РАЗПИ} \bar{P} \bar{=}$  - передаточная функция, состоящая из реальных звеньев в разомкнутой системе;  $W_{ДТ} \bar{P} \bar{=}$  - передаточная функция датчика тока.

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

$$W_{ИЗМ.Ч} \bar{P} \bar{=} W_{РТ} \bar{P} \bar{=} \bar{=} \frac{W_{Ж} \bar{P} \bar{=}}{W_{ТП} \bar{P} \bar{=} \cdot W_{Д1} \bar{P} \bar{=} \cdot W_{ДТ} \bar{P} \bar{=}}.$$

Надо найти передаточную функцию для аperiodического процесса (желаемую):

$$W_{ИЗМ.Ч} \bar{P} \bar{=} \bar{=} \frac{1}{\frac{2T_{\mu}p + 1}{k_{ТП} k_{Д1}} \cdot \frac{1}{T_{\mu}p + 1} \cdot \frac{1}{T_{\Delta}p + 1} k_{ДТ}},$$

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

Принимаем  $k_{ДТ} = 1$  или  $k_T = k_{ДТ}$  — одно и то же.

$$W_{ИЗМ.Ч} \bar{P} \bar{=} \bar{=} \frac{T_{\Delta}p + 1}{2T_{\mu}pk_{ТП}k_{Д1}} = \frac{T_1p + 1}{T_2p},$$

где  $\frac{T_1p + 1}{T_2p}$  - ПИ-регулятор.

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

тогда

$$W_{ИЗМ.Ч} \bar{P} \bar{=} \bar{=} k_T \Delta x + k_{ТП} \int_{T_1}^{T_2} \Delta x dt,$$

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  $W_{I\text{К}}$  (рис. 10) находим по известным правилам для нахождения передаточных функций замкнутых систем.

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

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

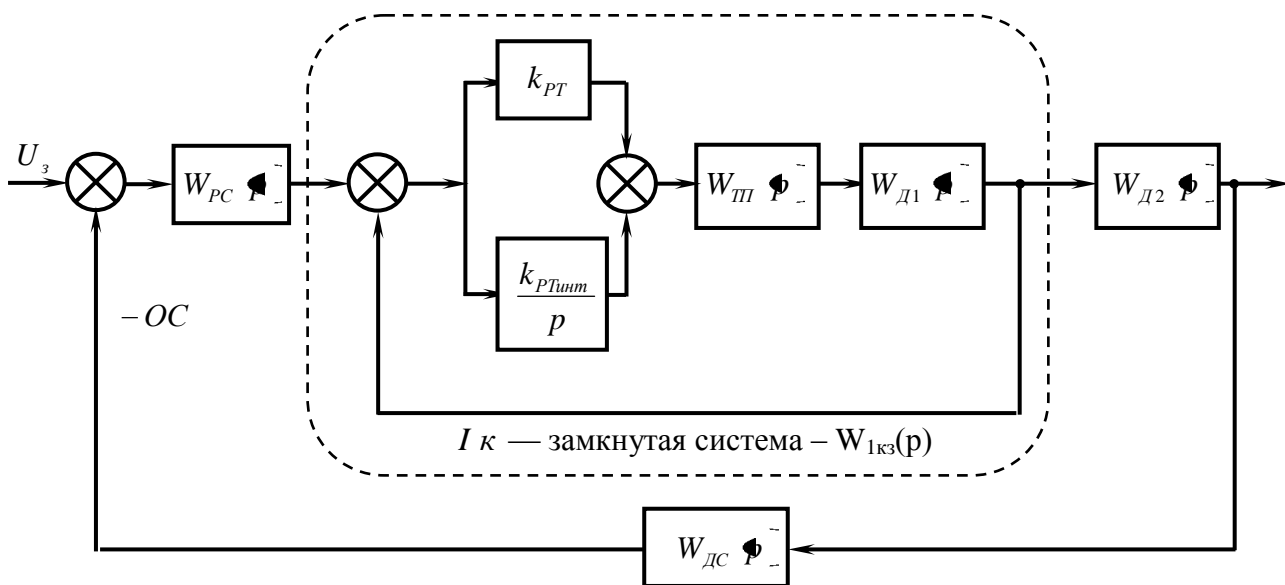


Рисунок 10 – Структурная схема контура скорости

Синтез неизвестной неизменяемой части (регулятора скорости) производим в соответствии с методикой для контура тока (рис. 11).

$$W_{ЖИ\text{ раз}}(p) = W_{Р\text{ II раз}}(p) = W_{PC}(p) \bar{W}_{I\text{К}}(p) \bar{W}_{Д2}(p) \bar{W}_{ДС}(p),$$

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{ЖИ\text{ аperiod. раз. сист.}}(p)}{W_{I\text{К}}(p) \bar{W}_{Д2}(p) \bar{W}_{ДС}(p)} = \frac{W_{ЖИ\text{ аperiod. раз. сист.}}(p)}{W_{I\text{К}}(p) \bar{W}_{Д2}(p) \underline{1}},$$

где принимается, что  $W_{ДС} \Phi \equiv 1$ .

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

где  $T_\mu = T_{\text{ш}}$ ;  $T_M = \frac{JR}{\Phi}$ ;  $T_1 = T_M$ ;  $T_2 = 4T_\mu k_{Д2}$ .

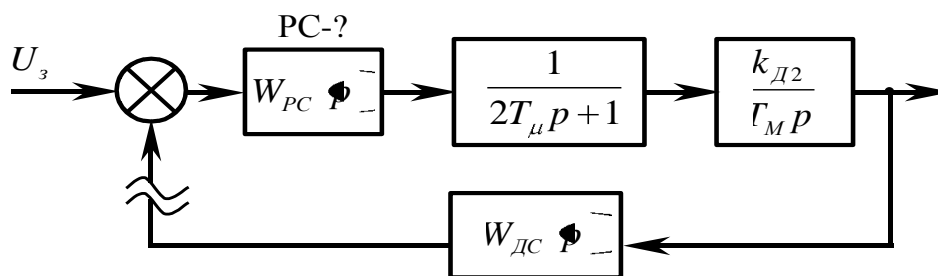


Рисунок 11 – Оптимизация контура скорости

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

#### 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.

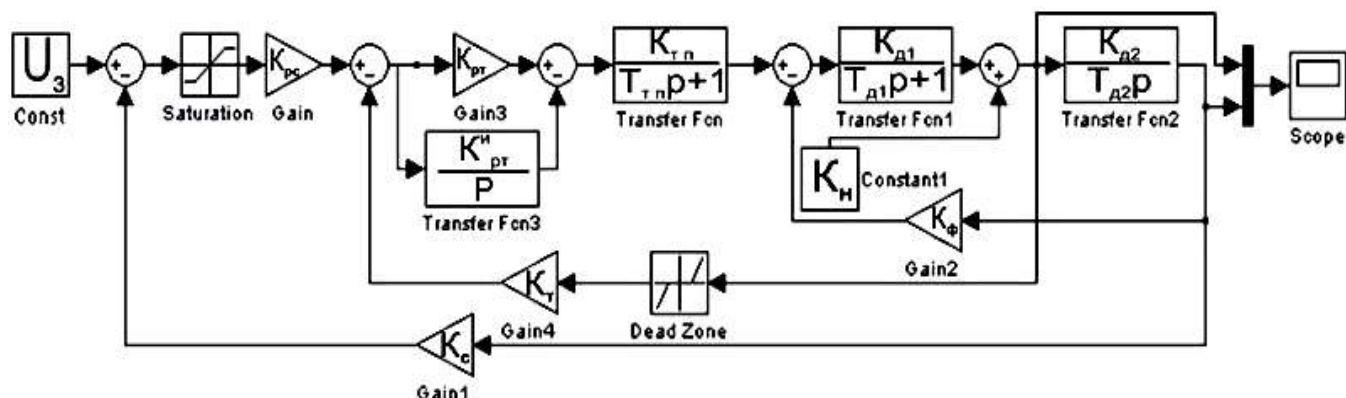


Рисунок 12 — Структурная схема РЭП в блоках MathLab

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:

$$\Delta\omega_C = \frac{4T_{II}}{T_M} \Delta\omega_{C\text{ PA3}} ,$$

где  $\Delta\omega_{C\text{ PA3}}$  — перепад скорости в разомкнутой системе;  $T_{II}$ ,  $T_M$  — постоянные времени соответственно преобразователя и электромеханическая.

Статический перепад скорости зависит от соотношения  $4T_{II}/T_M$ . 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.

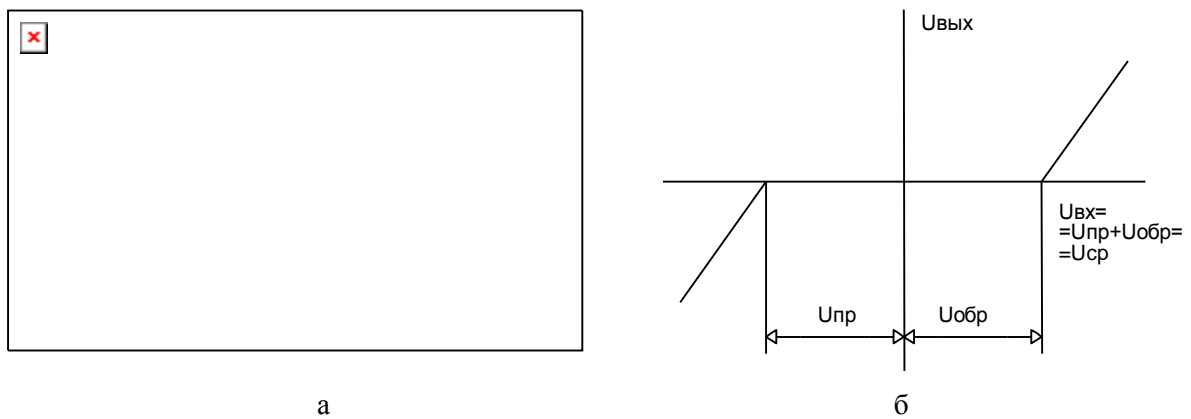


Рисунок 13 – Схемная реализация регулятора тока (а) и статическая характеристика НЭ1 – зоны нечувствительности (б)

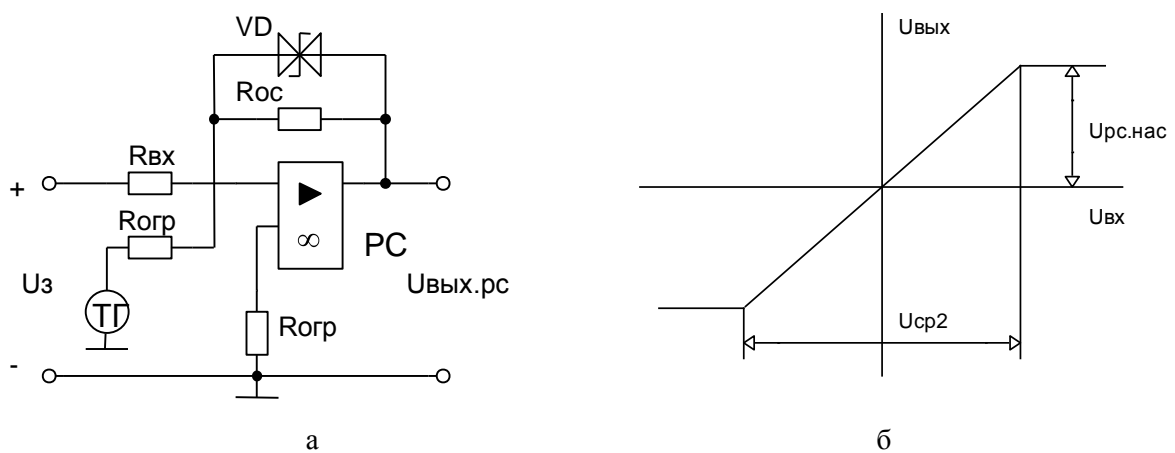


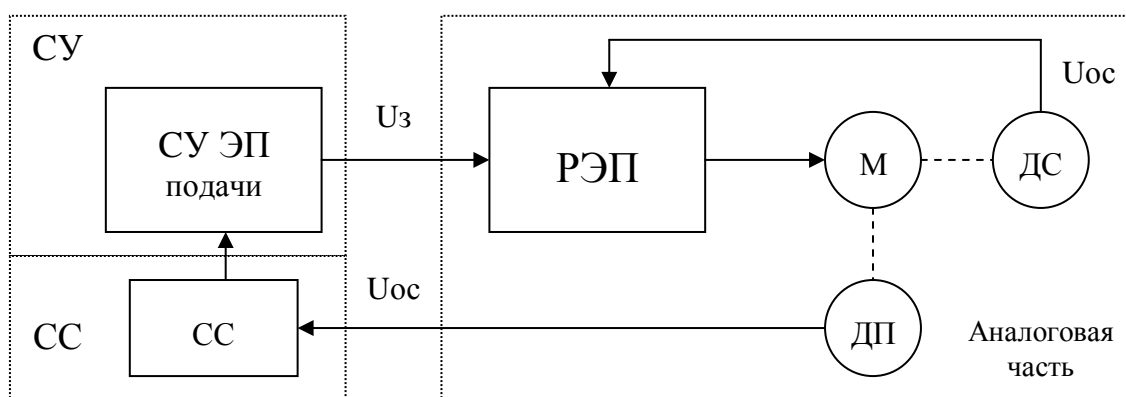
Рисунок 14 – Схемная реализация регулятора скорости (а) и статическая характеристика НЭ2 – зоны насыщения (б)



## 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.

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) -  $V$ .



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

Рисунок 15 – Реализация следящего привода

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

$$W_{ред}(p) = \frac{Q_{вых}(p)}{\omega_{дв}(p)} = \frac{k_p}{p} = \frac{i}{ip},$$

где  $i$  – передаточное отношение редуктора.

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

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

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 (см. рис. 16).

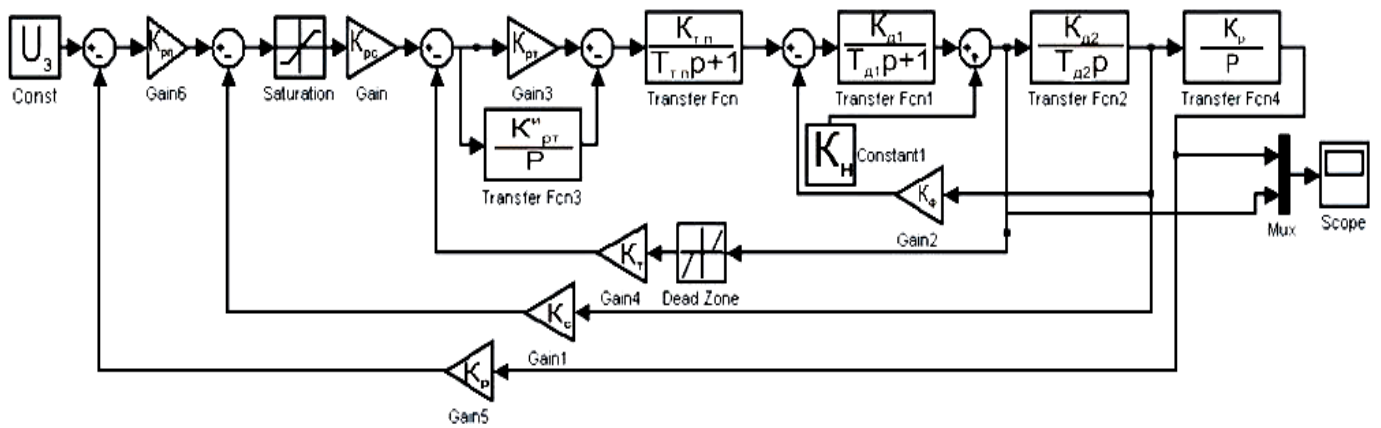


Рисунок 16 – Модель следящего электропривода

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

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

## 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 типовую структуру многоконтурной САУ ЭП с подчиненным регулированием в соответствии с заданными желаемыми переходными процессами в соответствующих контурах управления.

Варианты заданий представлены в табл. 3, 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 исследование полученной системы управления электроприводом (например, 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:  $U_3=10\text{В}$ ,  $U_{cp1}=8.8\text{ В}$ ,  $U_{cp2}=0.31\text{ В}$ ,  $K_\phi=2.01$ ,  $K_{тп}=37.5$ ,  $K_{д1}=0.545\text{ Р/В}$ ,  $K_{д2}=0.9\text{ Р/В}$ ,  $I_c=3.7\text{ А}$ ,  $T_m=0.4\text{ с}$ ,  $T_3=0.017\text{ с}$ ,  $T_{тп}=0.005\dots 0.01\text{ с}$ ,  $K_T=0.14$ ,  $K_c=0.09$ ,  $K_n \approx 1$ ,  $K_{ред} \approx 0.8$ .

Таблица 3 - 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 электроприводом, структурного проектирования регулируемых и следящих электроприводов, построения переходных процессов на основе использования структурной схемы системы управления электроприводом, а также моделирования систем управления электроприводами.

Приведенные примеры выполнения заданий позволят оценить качество усвоения 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.