

УДК 62.83.52:62.503.56

**СИНТЕЗ ОДНОКОНТУРНОЙ САР УГЛОВОЙ СКОРОСТИ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

**SYNTHESIS OF SINGLE-CIRCUIT ACS OF THE ANGULAR VELOCITY OF  
THE EXECUTIVE BODY OF THE ELECTRIC DRIVE WITH ELASTIC SHAFTING  
WITH IMPROVED CHARACTERISTICS**

**Добробаба Юрий Петрович**

кандидат технических наук,  
доцент, профессор кафедры  
электропитания промышленных предприятий,  
Кубанский государственный  
технологический университет

**Кошкин Гордей Анатольевич**

кандидат технических наук,  
начальник цеха,  
НКУ ООО «Прогресс»

**Сахно Игорь Александрович**

студент,  
Кубанский государственный  
технологический университет

**Аннотация.** Выполнен синтез одноконтурной САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом с улучшенными характеристиками. Разработаны два алгоритма для определения параметров систем, при которых достигается максимально возможное быстродействие при различных требованиях по перерегулированию по каналу «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа механизма».

**Ключевые слова:** система автоматического регулирования (САР), электропривод, угловая скорость исполнительного органа, упругий валопровод.

**Dobrobaba Yury Petrovich**

Candidate of technical sciences,  
Associate professor,  
Professor of department  
of power supply industrial enterprises,  
Kuban state technological university

**Koshkin Gordey Anatolievich**

Candidate of technical sciences,  
Foreman,  
NKU LLS Progress

**Sakhno Igor Alexandrovich**

Student,  
Kuban state technological university

**Annotation.** Was performed the synthesis of single-circuit ACS of the angular velocity of the executive body of the electric drive with elastic shafting with improved characteristics.

Two algorithms have been developed to determine the parameters of the systems at which the maximum possible speed is achieved with different requirements for overshoot through the channel «the setting voltage of the speed circuit – the angular velocity of the executive body of the mechanism».

**Keywords:** automatic control system (ACS), electric drive, angular velocity of the executive body, elastic shafting.

В настоящее время разработаны одноконтурные САР положения исполнительного органа электропривода [1, 2]. В данной статье представлена одноконтурная САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

На рисунке 1 приведена структурная схема одноконтурной САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом с улучшенными характеристиками. На рисунке приняты обозначения:

$\Phi$  – фильтр;

$P$  – регулятор;

$K$  – корректор;

ИП – импульсный преобразователь;

КУ – компенсирующее устройство;

$U_{3C}$  – задающее напряжение контура скорости, В;

$U$  – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;

$I_{я}$  – ток якорной цепи электродвигателя, А;

$\omega_1$  – угловая скорость исполнительного органа электродвигателя,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$M_y$  – момент в валопроводе (упругий момент), Н·м;

$M_{C0}$  – момент сопротивления электропривода, Н·м;

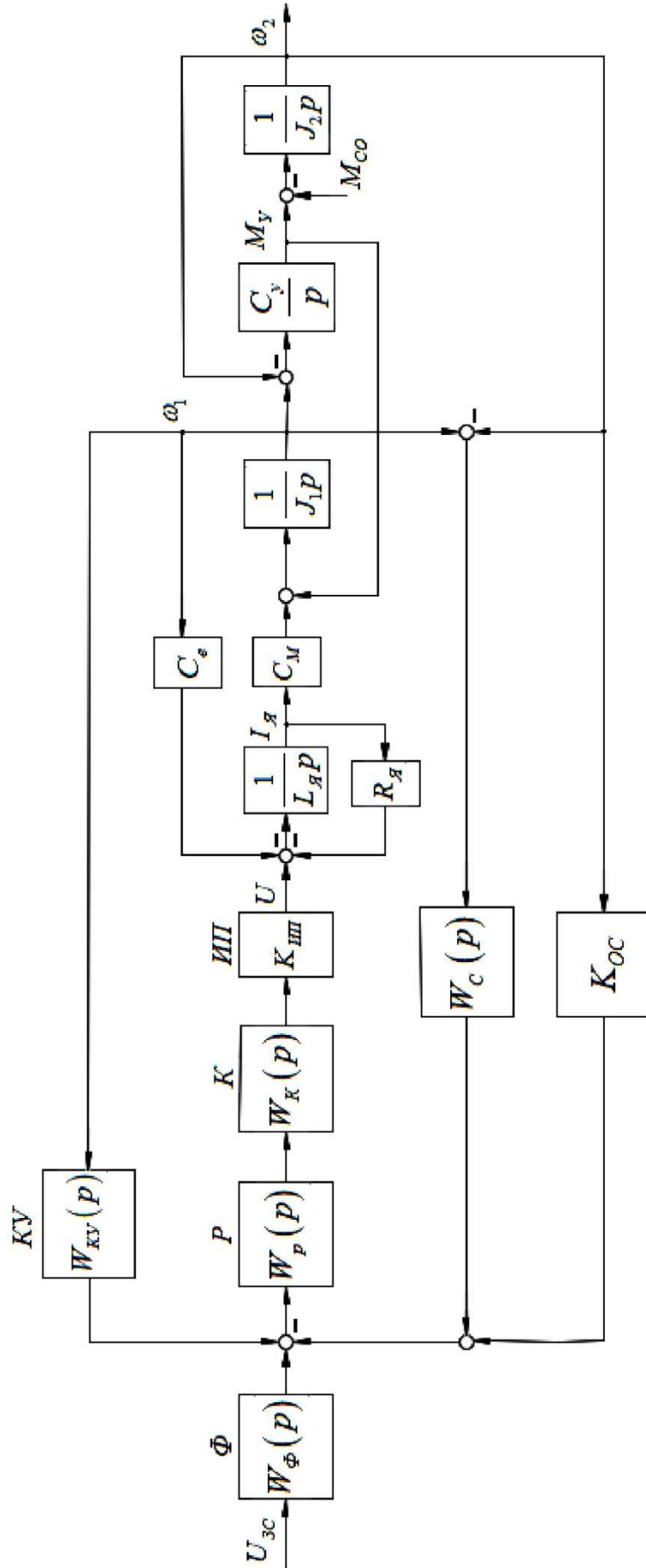


Рисунок 1 – Структурная схема одноконтурной САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с улучшенными характеристиками

$\omega_2$  – угловая скорость исполнительного органа механизма,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  
 $K_{\text{ИП}}$  – коэффициент усиления ИП;  
 $C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС электродвигателя,  $\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}$ ;  
 $C_M$  – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с;  
 $R_{\text{Я}}$  – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;  
 $L_{\text{Я}}$  – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн;  
 $J_1$  – момент инерции исполнительного органа электродвигателя,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  
 $C_y$  – жесткость валопровода,  $\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{рад}}$ ;  
 $J_2$  – момент инерции исполнительного органа механизма,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  
 $K_{\text{ОС}}$  – коэффициент обратной связи по скорости,  $\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}$ ;

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{\tau_p p + 1};$$

$$W_p(p) = \beta_p \cdot \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p p};$$

$$W_K(p) = \frac{T_K p + 1}{\tau_K p + 1};$$

$$W_{\text{КУ}}(p) = \frac{C_e}{\beta_p} \cdot \frac{\tau_p p}{\tau_p p + 1} \cdot \frac{\tau_K p + 1}{T_K p + 1} \cdot \frac{1}{K_{\text{ИП}}};$$

$$W_C(p) = K_{\text{ОС}} \cdot \frac{\tau_C p + K_C}{\tau_p p + 1};$$

$\beta_p$  – динамический коэффициент регулятора;

$\tau_p$  – постоянная времени регулятора, с;

$T_K, \tau_K$  – постоянные времени корректора, с;

$\tau_C$  – постоянная времени дополнительной обратной связи по скорости, с;

$K_C$  – коэффициент дополнительной обратной связи по скорости;

$p$  – преобразователь Лапласа,  $\frac{1}{\text{с}}$ .

В схеме предусмотрено устройство с передаточной функцией  $W_{\text{КУ}}(p)$ , обеспечивающее компенсации влияния внутренней обратной связи по ЭДС двигателя.

Для системы справедливы уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{1}{\tau_p p + 1} \cdot U_{\text{ЗС}} - K_{\text{ОС}} \cdot \omega_2 - K_{\text{ОС}} \cdot \frac{\tau_C p + K_C}{\tau_p p + 1} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \right] \times \\ \quad \times \beta_p \cdot \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p p} \cdot \frac{\tau_K p + 1}{\tau_K p + 1} \cdot K_{\text{ИП}} = R_{\text{Я}} \cdot \left( \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}} \cdot p + 1 \right) \cdot I_{\text{Я}}; \\ (\omega_1 - \omega_2) = \frac{J_2}{C_y} \cdot p^2 \omega_2 + \frac{1}{C_y} \cdot p M_{\text{СО}}; \\ I_{\text{Я}} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[ \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot p^3 + (J_1 + J_2) \cdot p \right] \cdot \omega_2 + \frac{1}{C_M} \cdot \left[ \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right] \cdot M_{\text{СО}}. \end{array} \right.$$

Если выбрать постоянную времени корректора равную  $T_K = \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}}$ , то после преобразований получаем:

$$\left[ \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{\text{Я}} J_1 J_2}{K_{\text{ИП}} K_{\text{ОС}} C_M C_y} \cdot \tau_K \tau_p p^5 + \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{\text{Я}} J_1 J_2}{K_{\text{ИП}} K_{\text{ОС}} C_M C_y} \cdot \tau_p p^4 + \right. \\ \left. + \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{\text{Я}} (J_1 + J_2)}{K_{\text{ИП}} K_{\text{ОС}} C_M} \cdot \tau_K \tau_p p^3 + \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{\text{Я}} (J_1 + J_2)}{K_{\text{ИП}} K_{\text{ОС}} C_M} \cdot \tau_p p^2 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \tau_C p^3 + \frac{J_2}{C_y} \cdot K_C p^2 + \tau_p p + 1 \right] \cdot \omega_2 = \\ = \frac{U_{\text{ЗС}}}{K_{\text{ОС}}} - \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{\text{Я}} (J_1 + J_2)}{K_{\text{ИП}} K_{\text{ОС}} C_M} \cdot \tau_p p \cdot (\tau_K p + 1) \cdot \left[ \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right] \cdot M_{\text{СО}} - (\tau_C p + K_C) \cdot \frac{1}{C_y} \cdot p M_{\text{СО}}.$$

Предлагаются два варианта синтеза одноконтурной САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом с улучшенными характеристиками.

### Вариант 1

При выборе параметров системы:

$$\beta_p = 64 \cdot \frac{R_{\text{Я}} J_1 J_2}{K_{\text{ИП}} K_{\text{ОС}} C_M C_{\text{У}} T_{\mu}^3};$$

$$\tau_p = T_{\mu};$$

$$\tau_K = \frac{1}{16} \cdot T_{\mu};$$

$$\tau_C = \frac{1}{8} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{128} \cdot \frac{C_{\text{У}} \cdot (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot \frac{C_{\text{У}} \cdot T_{\mu}^2}{J_2} \cdot T_{\mu};$$

$$K_C = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{32} \cdot \frac{C_{\text{У}} (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot \frac{C_{\text{У}} T_{\mu}^2}{J_2},$$

её передаточные функции по каналам «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа механизма» и «момент сопротивления электропривода – угловая скорость исполнительного органа механизма» принимают вид:

$$\frac{\omega_2(p)}{U_{3C}(p)} = \frac{1}{K_{\text{ОС}}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{1024} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{1}{64} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{1}{8} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{1}{2} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1};$$

$$\frac{\omega_2(p)}{M_{\text{СО}}(p)} = -\frac{1}{64} \cdot \frac{T_{\mu}}{J_2} \cdot \frac{C_{\text{У}} T_{\mu}^2}{J_1} \times$$

$$\times \frac{T_{\mu} p \cdot \left( \frac{1}{16} T_{\mu} p + 1 \right) \cdot \left( \frac{J_1}{C_{\text{У}}} \cdot p^2 + 1 \right)}{\frac{1}{1024} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{1}{64} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{1}{8} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{1}{2} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{\mu}}{J_2} \times$$

$$\times \frac{T_{\mu} p \cdot \left\{ \frac{1}{4} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{128} \cdot \frac{C_{\text{У}} (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot T_{\mu} p + \left[ 1 - \frac{1}{32} \cdot \frac{C_{\text{У}} (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \right\}}{\frac{1}{1024} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{1}{64} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{1}{8} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{1}{2} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1}.$$

При этом система обеспечивает по каналу «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа механизма» максимально возможное быстродействие с перерегулированием около 5%.

### Вариант 2

При выборе параметров системы:

$$\beta_p = 125 \cdot \frac{R_{\text{Я}} J_1 J_2}{K_{\text{ИП}} K_{\text{ОС}} C_M C_{\text{У}} T_{\mu}^3};$$

$$\tau_p = T_{\mu};$$

$$\tau_K = \frac{1}{25} \cdot T_{\mu};$$

$$\tau_C = \frac{2}{25} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{250} \cdot \frac{C_{\text{У}} (J_1 + J_2) T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot \frac{C_{\text{У}} T_{\mu}^2}{J_2} \cdot T_{\mu};$$

$$K_C = \frac{2}{5} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{50} \cdot \frac{C_{\text{У}} (J_1 + J_2) T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot \frac{C_{\text{У}} T_{\mu}^2}{J_2},$$

её передаточные функции по каналам «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа механизма» и «момент сопротивления электропривода – угловая скорость исполнительного органа механизма» принимают вид:

$$\frac{\omega_2(p)}{U_{3c}(p)} = \frac{1}{K_{0c}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{3125} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{1}{125} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{2}{25} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{2}{5} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1};$$

$$\frac{\omega_2(p)}{M_{co}(p)} = -\frac{1}{125} \cdot \frac{T_{\mu}}{J_2} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^2}{J_1} \times$$

$$\times \frac{T_{\mu} p \cdot \left( \frac{1}{25} T_{\mu} p + 1 \right) \cdot \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right)}{\frac{1}{3125} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{1}{125} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{2}{25} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{2}{5} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1} - \frac{2}{5} \cdot \frac{T_{\mu}}{J_2} \times$$

$$\times \frac{T_{\mu} p \cdot \left\{ \frac{1}{5} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{250} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot T_{\mu} p + \left[ 1 - \frac{1}{50} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \right\}}{\frac{1}{3125} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{1}{125} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{2}{25} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{2}{5} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1}.$$

При этом система обеспечивает по каналу «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа механизма» хорошее быстродействие при отсутствии перерегулирования.

#### Выводы

Синтезирована одноконтурная САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом с улучшенными характеристиками.

Определены параметры САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом с улучшенными характеристиками, при которых достигается максимально возможное быстродействие с перерегулированием около 5%.

Определены параметры САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом с улучшенными характеристиками, при которых достигается хорошее быстродействие при отсутствии перерегулирования.

#### Литература:

1. Добробаба Ю.П., Махова В.А., Виноградова И.Н. Одноконтурная система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода постоянного тока / Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 5. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/419>
2. Добробаба Ю.П., Махова В.А. Одноконтурная система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления / Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 11. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/627>

#### References:

1. Dobrobaba Yu.P., Makhova V.A., Vinogradova I.N. Single-circuit system of automatic control of the position of the executive body of the DC drive / Scientific works of KubGTU. – 2015. – № 5. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/419>
2. Dobrobaba YU.P., Makhova V.A. Single-circuit automatic control system the position of the executive body of the DC electric drive with speed-dependent torque / Scientific works of KubGTU. – 2015. – № 11. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/627>