

62.83.52:62.503.56

**СИНТЕЗ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ОДНОКОНТУРНОЙ САР  
ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ**

**SYNTHESIS OF ADVANCED SINGLE-CIRCUIT ACS  
OF THE POSITION OF THE EXECUTIVE BODY OF THE ELECTRIC DRIVE  
WITH ELASTIC SHAFTING**

**Добробаба Юрий Петрович**

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

**Кошкин Гордей Анатольевич**

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

**Штокалов Кирилл Геннадьевич**

Кубанский государственный  
технологический университет

**Аннотация.** Разработана структурная схема усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом. Представлены два варианта параметрического синтеза усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

**Ключевые слова:** система автоматического регулирования (САР), электропривод, положение 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

**Shtokalov Kirill Gennadievich**

Kuban state technological university

**Annotation.** Developed a block diagram of the improved single-circuit ACS of the position of the executive body of the electric drive with elastic shafting. Presented two variants for the parametric synthesis of an improved single-circuit ACS of the position of the executive body of the electric drive with elastic shafting.

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

В статье [1] синтезирована одноконтурная САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом с улучшенными характеристиками.

В данной работе выполнен синтез усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

На рисунке 1 представлена структурная схема усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом, где приняты следующие обозначения:

$\Phi$  – фильтр;

$P$  – регулятор;

$K$  – корректор;

$ИП$  – импульсный преобразователь;

$КУ$  – компенсирующее устройство;

$U_{зп}$  – задающее напряжение контура положения, 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;

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

$\omega_2$  – угловая скорость исполнительного органа механизма,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

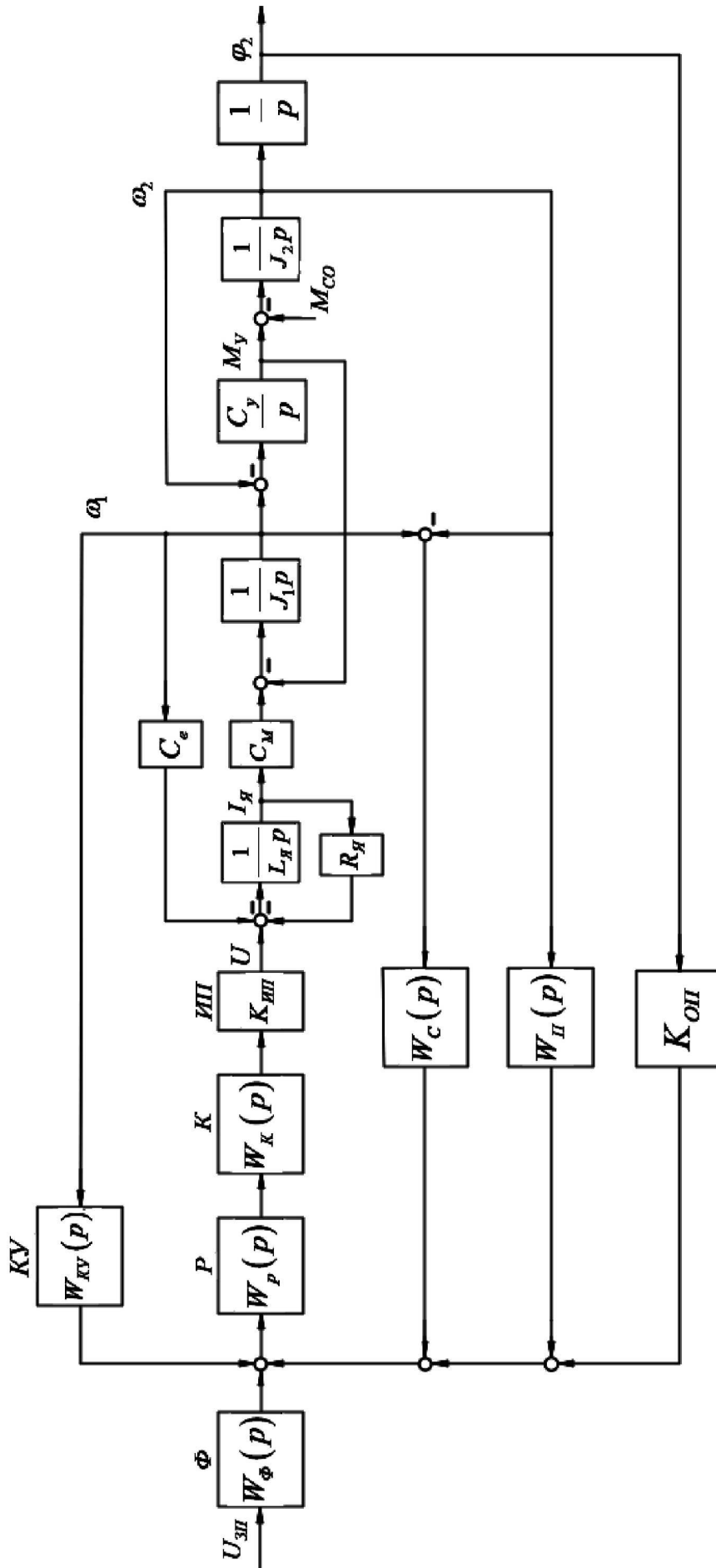


Рисунок 1 – Структурная схема усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

$\varphi_2$  – угол поворота исполнительного органа механизма, рад;  
 $K_{ИП}$  – коэффициент усиления ИП;  
 $C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС электродвигателя,  $\frac{В \cdot с}{рад}$ ;

$C_M$  – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с;

$R_{Я}$  – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;

$L_{Я}$  – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн;

$J_1$  – момент инерции исполнительного органа электродвигателя, м<sup>2</sup>;

$C_{У}$  – жесткость валопровода,  $\frac{Н \cdot м}{рад}$ ;

$J_2$  – момент инерции исполнительного органа механизма, м<sup>2</sup>;

$K_{ОП}$  – коэффициент обратной связи по положению,  $\frac{В}{рад}$ ;

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

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

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

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

$$W_C(p) = K_{ОП} \cdot \frac{T_C^2 p + \tau_C}{\tau_p p + 1};$$

$$W_{П}(p) = K_{ОП} \cdot \frac{T_{П}^2 p}{\tau_p p + 1};$$

$\beta_p$  – динамический коэффициент регулятора;

$\tau_p$  – постоянная времени регулятора, с;

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

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

$T_{П}$  – постоянная времени дополнительной обратной связи по положению, с;

$K_{П}$  – коэффициент дополнительной обратной связи по положению;

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

Для компенсации влияния внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя предусмотрено устройство с передаточной функцией

Для усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа с упругим валопроводом справедливы уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{1}{\tau_p p + 1} \cdot U_{3П} - K_{ОП} \cdot \varphi_2 - K_{ОП} \cdot \frac{T_C^2 p + \tau_C}{\tau_p p + 1} \cdot (\omega_1 - \omega_2) - K_{ОП} \cdot \frac{T_{П}^2 p}{\tau_p p + 1} \cdot \omega_2 \right] \times \\ \quad \times \beta_p \cdot \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p p} \cdot \frac{\tau_K p + 1}{\tau_K p + 1} \cdot K_{ИП} = R_{Я} \cdot \left( \frac{L_{Я}}{R_{Я}} \cdot p + 1 \right) \cdot I_{Я}; \\ (\omega_1 - \omega_2) = \frac{J_2}{C_{У}} \cdot p^2 \omega_2 + \frac{1}{C_{У}} \cdot p M_{CO}; \\ I_{Я} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[ \frac{J_1 J_2}{C_{У}} \cdot p^3 + (J_1 + J_2) \cdot p \right] \cdot \omega_2 + \frac{1}{C_M} \cdot \left[ \frac{J_1}{C_{У}} \cdot p^2 + 1 \right] \cdot M_{CO}; \\ \omega_2 = p \varphi_2. \end{array} \right.$$

При выборе постоянной времени корректора равной:  $T_K = \frac{L_{Я}}{R_{Я}}$  система уравнений после преобразований примет вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{U_{3п}}{K_{оп}} - (\tau_p p + 1) \cdot \varphi_2 - (T_c^2 p + \tau_c) \cdot \left[ \frac{J_2}{C_y} \cdot p^3 \varphi_2 + \frac{1}{C_y} \cdot p M_{со} \right] - T_{п}^2 p^2 \varphi_2 = \\
 & = \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{1}{K_{ип} K_{оп}} \cdot \tau_p p \cdot (\tau_K p + 1) \cdot R_{я} \cdot \left\{ \frac{1}{C_M} \cdot \left[ \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot p^4 + (J_1 + J_2) \cdot p^2 \right] \cdot \varphi_2 + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{C_M} \cdot \left[ \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right] \cdot M_{со} \right\}; \\
 & \left| \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} J_1 J_2}{K_{ип} K_{оп} C_M C_y} \cdot \tau_K \tau_p p^6 + \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} J_1 J_2}{K_{ип} K_{оп} C_M C_y} \cdot \tau_p p^5 + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} (J_1 + J_2)}{K_{ип} K_{оп} C_M} \cdot \tau_K \tau_p p^4 + \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} (J_1 + J_2)}{K_{ип} K_{оп} C_M} \cdot \tau_p p^3 + \frac{J_2}{C_y} \cdot T_c^2 p^4 + \right. \\
 & \left. + \frac{J_2}{C_y} \cdot \tau_c p^3 + T_{п}^2 p^2 + \tau_p p + 1 \right| \cdot \varphi_2 = \\
 & = \frac{U_{3п}}{K_{оп}} - \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я}}{K_{ип} K_{оп} C_M} \cdot \tau_p p \cdot (\tau_K p + 1) \cdot \left[ \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right] \cdot M_{со} - \\
 & - (T_c^2 p^2 + \tau_c p) \cdot \frac{1}{C_y} \cdot M_{со}.
 \end{aligned}$$

В работе синтезируются два варианта усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

### Вариант первый

Из сопоставления передаточной функции первого варианта усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом с первой эталонной передаточной функцией шестого порядка получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} J_1 J_2}{K_{ип} K_{оп} C_M C_y} \cdot \tau_K \tau_p = \frac{1}{32768} T_{\mu}^6; \\
 & \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} J_1 J_2}{K_{ип} K_{оп} C_M C_y} \cdot \tau_p = \frac{1}{1024} T_{\mu}^5; \\
 & \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} (J_1 + J_2)}{K_{ип} K_{оп} C_M} \cdot \tau_K \tau_p + \frac{J_2}{C_y} \cdot T_c^2 = \frac{1}{64} T_{\mu}^4; \\
 & \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} (J_1 + J_2)}{K_{ип} K_{оп} C_M} \cdot \tau_p + \frac{J_2}{C_y} \cdot \tau_c = \frac{1}{8} T_{\mu}^3; \\
 & T_{п}^2 = \frac{1}{2} T_{\mu}^2; \\
 & \tau_p = T_{\mu}.
 \end{aligned}$$

При выборе параметров системы:

$$\begin{aligned}
 & \beta_p = 1024 \cdot \frac{R_{я} J_1 J_2}{K_{ип} K_{оп} C_M C_y T_{\mu}^4}; \\
 & T_{п}^2 = \frac{1}{2} T_{\mu}^2; \\
 & \tau_p = T_{\mu}; \\
 & \tau_K = \frac{1}{32} \cdot T_{\mu}.
 \end{aligned}$$

$$T_C^2 = \frac{1}{64} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{512} \cdot \frac{C_y \cdot (J_1 + J_2) \cdot T_\mu^2}{J_1 J_2} \right] \cdot \frac{C_y T_\mu^2}{J_2} \cdot T_\mu^2;$$

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

ее уравнение принимает вид:

$$\left( \frac{1}{32768} T_\mu^6 p^6 + \frac{1}{1024} T_\mu^5 p^5 + \frac{1}{64} T_\mu^4 p^4 + \frac{1}{8} T_\mu^3 p^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1 \right) \cdot \varphi_2 =$$

$$= \frac{U_{3п}}{K_{оп}} - \frac{1}{1024} \cdot \frac{T_\mu^2}{J_2} \cdot \frac{C_y T_\mu^2}{J_1} \cdot T_\mu p \cdot \left( \frac{1}{32} T_\mu p + 1 \right) \cdot \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot M_{со} -$$

$$- \frac{1}{8} \cdot \frac{T_\mu^2}{J_2} \cdot T_\mu p \cdot \left\{ \frac{1}{8} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{512} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_\mu^2}{J_1 J_2} \right] \cdot T_\mu p + \right.$$

$$\left. + \left[ 1 - \frac{1}{128} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_\mu^2}{J_1 J_2} \right] \right\} \cdot M_{со}.$$

Передаточные функции по каналам «задающее напряжение контура положения – уголповорота исполнительного органа механизма» и «момент сопротивления электропривода – угол поворота исполнительного органа механизма» имеют вид:

$$\frac{\varphi_2(p)}{U_{3п}(p)} = \frac{1}{K_{оп}} \times$$

$$\times \frac{1}{\frac{1}{32768} T_\mu^6 p^6 + \frac{1}{1024} T_\mu^5 p^5 + \frac{1}{64} T_\mu^4 p^4 + \frac{1}{8} T_\mu^3 p^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1};$$

$$\frac{\varphi_2(p)}{M_{со}(p)} = - \frac{1}{1024} \cdot \frac{T_\mu^2}{J_2} \cdot \frac{C_y T_\mu^2}{J_1} \times$$

$$\times \frac{T_\mu p \cdot \left( \frac{1}{32} T_\mu p + 1 \right) \cdot \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right)}{\frac{1}{32768} T_\mu^6 p^6 + \frac{1}{1024} T_\mu^5 p^5 + \frac{1}{64} T_\mu^4 p^4 + \frac{1}{8} T_\mu^3 p^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1} - \frac{1}{8} \cdot \frac{T_\mu^2}{J_2} \times$$

$$\times \frac{T_\mu p \cdot \left\{ \frac{1}{8} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{512} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_\mu^2}{J_1 J_2} \right] \cdot T_\mu p + \left[ 1 - \frac{1}{128} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_\mu^2}{J_1 J_2} \right] \right\}}{\frac{1}{32768} T_\mu^6 p^6 + \frac{1}{1024} T_\mu^5 p^5 + \frac{1}{64} T_\mu^4 p^4 + \frac{1}{8} T_\mu^3 p^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1}.$$

Усовершенствованная одноконтурная САР положения исполнительного органа электроприводас упругим валопроводом обрабатывает ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях по каналу «задающее напряжение контура положения – угол поворота исполнительного органа механизма» с 5% перерегулированием за минимально возможное время.

### Вариант второй

Из сопоставления передаточной функции второго варианта усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом со второй эталонной передаточной функцией шестого порядка получаем систему уравнений:

$$\frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} J_1 J_2}{K_{ин} K_{оп} C_M C_y} \cdot \tau_K \tau_p = \frac{1}{46656} T_\mu^6;$$

$$\frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{я} J_1 J_2}{K_{ин} K_{оп} C_M C_y} \cdot \tau_p = \frac{1}{1296} T_\mu^5;$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{Я}(J_1 + J_2)}{K_{ин}K_{оп}C_M} \cdot \tau_K \tau_p + \frac{J_2}{C_y} \cdot T_C^2 &= \frac{5}{432} T_{\mu}^4; \\ \frac{1}{\beta_p} \cdot \frac{R_{Я}(J_1 + J_2)}{K_{ин}K_{оп}C_M} \cdot \tau_p + \frac{J_2}{C_y} \cdot \tau_C &= \frac{5}{54} T_{\mu}^3; \\ T_{II}^2 &= \frac{5}{12} T_{\mu}^2; \\ \tau_p &= T_{\mu}. \end{aligned}$$

При выборе параметров системы:

$$\begin{aligned} \beta_p &= 1296 \cdot \frac{R_{Я}J_1J_2}{K_{ин}K_{оп}C_M C_y T_{\mu}^4}; \\ \tau_p &= T_{\mu}; \\ T_{II}^2 &= \frac{5}{12} T_{\mu}^2; \\ \tau_K &= \frac{1}{36} \cdot T_{\mu}; \\ T_C^2 &= \frac{5}{432} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{540} \cdot \frac{C_y \cdot (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot \frac{C_y T_{\mu}^2}{J_2} \cdot T_{\mu}^2; \\ \tau_C &= \frac{5}{54} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{120} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot \frac{C_y T_{\mu}^2}{J_2} \cdot T_{\mu} \end{aligned}$$

ее уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned} &\left( \frac{1}{46656} T_{\mu}^6 p^6 + \frac{1}{1296} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{5}{432} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{5}{54} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{5}{12} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1 \right) \cdot \varphi_2 = \\ &= \frac{U_{зп}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{1296} \cdot \frac{T_{\mu}^2}{J_2} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^2}{J_1} \cdot T_{\mu} p \cdot \left( \frac{1}{36} T_{\mu} p + 1 \right) \cdot \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot M_{со} - \\ &- \frac{5}{54} \cdot \frac{T_{\mu}^2}{J_2} \cdot T_{\mu} p \cdot \left\{ \frac{1}{8} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{540} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot T_{\mu} p + \right. \\ &\left. + \left[ 1 - \frac{1}{120} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \right\} \cdot M_{со}. \end{aligned}$$

Передаточные функции по каналам «задающее напряжение контура положения – угол поворота исполнительного органа механизма» и «момент сопротивления электропривода – угол поворота исполнительного органа механизма» имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_2(p)}{U_{зп}(p)} &= \frac{1}{K_{оп}} \times \\ &\times \frac{1}{\frac{1}{46656} T_{\mu}^6 p^6 + \frac{1}{1296} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{5}{432} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{5}{54} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{5}{12} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1}; \\ \frac{\varphi_2(p)}{M_{со}(p)} &= - \frac{1}{1296} \cdot \frac{T_{\mu}^2}{J_2} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^2}{J_1} \times \\ &\times \frac{T_{\mu} p \cdot \left( \frac{1}{36} T_{\mu} p + 1 \right) \cdot \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right)}{\frac{1}{46656} T_{\mu}^6 p^6 + \frac{1}{1296} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{5}{432} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{5}{54} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{5}{12} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1} - \frac{5}{54} \cdot \frac{T_{\mu}^2}{J_2} \times \\ &\times \frac{T_{\mu} p \cdot \left\{ \frac{1}{8} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{540} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot T_{\mu} p + \left[ 1 - \frac{1}{120} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) \cdot T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \right\}}{\frac{1}{46656} T_{\mu}^6 p^6 + \frac{1}{1296} T_{\mu}^5 p^5 + \frac{5}{432} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{5}{54} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{5}{12} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1}. \end{aligned}$$

Усовершенствованная одноконтурная САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом обрабатывает ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях по каналу «задающее напряжение контура положения – угол поворота исполнительного органа механизма» без перерегулирования за минимально возможное время.

### **Выводы**

Выполнен синтез двух вариантов усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

Предложены алгоритмы для определения параметров усовершенствованной одноконтурной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом, при которых достигается максимально возможное быстродействие при ступенчатом воздействии по каналу «задающее напряжение контура положения – угол поворота исполнительного органа механизма» и нулевых начальных условиях с перерегулированием 5% и без перерегулирования.

### **Литература:**

1. Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Сахно И.А. Синтез одноконтурной САР угловой скорости исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом с улучшенными характеристиками // Научный журнал Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2018. – № 3. – С. 316–320.

### **References:**

1. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Sakhno I.A. Synthesis of single-circuit acs of the angular velocity of the executive body of the electric drive with elastic shafting with improved characteristics // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – Krasnodar : Publishing house – South, 2018. – № 3. – P. 316–320.