

**СИНТЕЗ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ
МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ САР ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО
ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ**

Ю.П. ДОБРОБАБА, А.Л. ХОРЦЕВ

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: tolyahortsev@gmail.ru*

В статье выполнен синтез методом последовательной коррекции модернизированной системы автоматического регулирования (САР) положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

Ключевые слова: система автоматического регулирования положения, САР, упругий валопровод, электропривод.

Известна трехкратно-интегрирующая система автоматического регулирования с типовыми регуляторами и упругим валопроводом [1], синтезированная методом последовательно-параллельной коррекции. Эта система имеет следующие недостатки:

низкое быстродействие контура скорости;

низкое быстродействие контура положения.

Низкое быстродействие контура положения обуславливает невысокую точность отработки системой заданной диаграммы перемещения исполнительного органа механизма. В статье выполнен синтез методом последовательной коррекции модернизированной САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

На рисунке 1 представлена структурная схема модернизированной системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

Передаточные функции блоков представленной на рисунке 1 структурной схемы имеют вид:

$$W_{\text{рт}}(p) = \beta_{\text{рт}} \cdot \frac{\tau_{\text{рт}} p + 1}{\tau_{\text{рт}} p};$$

$$W_{\text{ку}}(p) = \frac{C_e}{\beta_{\text{рт}}} \cdot \frac{\tau_{\text{рт}} p}{\tau_{\text{рт}} p + 1} \cdot \frac{1}{K_{\text{п}}};$$

$$W_{\text{рс}}(p) = \beta_{\text{рс}} \cdot \frac{\tau_{\text{рс}} p + 1}{\tau_{\text{рс}} p};$$

$$W_{\text{ф}}(p) = \frac{1}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1};$$

$$W_{\text{к}}(p) = \frac{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}{\tau_3^3 p^3 + \tau_2^2 p^2 + \tau_1 p + 1},$$

где $\beta_{\text{рт}}$ – динамический коэффициент регулятора тока;

$\tau_{\text{рт}}$ – постоянная времени регулятора тока, с;

$\beta_{\text{рс}}$ – динамический коэффициент регулятора скорости;

$\tau_{\text{рс}}$ – постоянная времени регулятора скорости, с;

T_1, T_2, T_3 – постоянные времени фильтра контура скорости, с;

τ_1, τ_2, τ_3 – постоянные времени корректора контура скорости, с.

На рисунке 1 приняты обозначения:

РП – регулятор положения;

Φ – фильтр контура скорости;

РС – регулятор скорости;

К – корректор контура скорости;

РТ – регулятор тока;

КУ – компенсирующее устройство;

ИП – импульсный преобразователь напряжения;

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

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

$U_{\text{зс}}$ – задающее напряжение контура скорости, В;

$U_{\text{зт}}$ – задающее напряжение контура тока, В;

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

ω_1 –угловая скорость электродвигателя, $\frac{рад}{с}$;

M_y –упругий момент, $H \cdot м$;

M_c –момент сопротивления электропривода $H \cdot м$;

ω_2 –угловая скорость механизма, $\frac{рад}{с}$;

φ_2 –угол поворота механизма, $рад$;

$K_{рп}$ –коэффициент усиления регулятора положения;

$K_{п}$ –коэффициент усиления преобразователя;

C_e –коэффициент пропорциональности, $\frac{В \cdot с}{рад}$;

C_m –коэффициент пропорциональности, $В \cdot с$;

R_y –сопротивление якорной цепи электродвигателя, $Ом$;

L_y –индуктивность якорной цепи электродвигателя, $Гн$;

J_1 –момент инерции исполнительного органа электродвигателя, $кг \cdot м^2$;

C_y –жёсткость валопровода, $\frac{Н \cdot м}{рад}$;

J_2 –момент инерции исполнительного органа механизма, $кг \cdot м^2$;

$K_{от}$ –коэффициент обратной связи по току, $Ом$;

$K_{ос}$ –коэффициент обратной связи по скорости, $\frac{В \cdot с}{рад}$;

$K_{оп}$ –коэффициент обратной связи по положению, $\frac{В}{рад}$.

Синтез контура тока

Для компенсации влияния отрицательной внутренней обратной связи по ЭДС двигателя используется компенсирующее устройство с передаточной функцией $W_{ку}(p)$.

Для контура тока справедлива система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} & [U_{зт}(p) - K_{от} \cdot I_{я}(p)] \cdot \beta_{пт} \cdot \frac{\tau_{пт} p + 1}{\tau_{пт} p} \cdot K_{п} = U(p); \\ & U(p) = R_{я} \cdot I_{я}(p) + L_{я} p \cdot I_{я}(p). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Если выбрать постоянную времени регулятора тока равную

$$\tau_{пт} = \frac{L_{я}}{R_{я}}, \quad (2)$$

то передаточная функция контура тока по каналу управления «задающее напряжение контура тока – ток якорной цепи электродвигателя» имеет вид

$$\frac{I_{я}(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{1}{K_{от}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\beta_{пт}} \cdot \frac{L_{я}}{K_{п} \cdot K_{от}} \cdot p + 1}. \quad (3)$$

При выборе динамического коэффициента регулятора тока равным

$$\beta_{пт} = \frac{L_{я}}{K_{п} \cdot K_{от} \cdot T_{\mu}} \quad (4)$$

передаточная функция контура тока по каналу управления «задающее напряжение контура тока – ток якорной цепи электродвигателя» имеет вид

$$\frac{I_{я}(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{1}{K_{от}} \cdot \frac{1}{T_{\mu} p + 1}. \quad (5)$$

Синтез контура скорости

Для контура скорости справедлива система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} & \left[\frac{1}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \cdot U_{зс}(p) - K_{ос} \cdot \omega_2(p) \right] \times \\ & \times \beta_{рс} \cdot \frac{\tau_{рс} p + 1}{\tau_{рс} p} \cdot \frac{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}{\tau_3^3 p^3 + \tau_2^2 p^2 + \tau_1 p + 1} = U_{зт}(p); \\ & U_{зт}(p) = K_{от} \cdot (T_{\mu} p + 1) \cdot I_{я}(p); \\ & C_m \cdot I_{я}(p) = \left[\frac{J_1 J_2}{C_y} + (J_1 + J_2) \cdot p \right] \cdot \omega_2(p) + \left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot M_c. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Если выбрать постоянную времени регулятора скорости, равную

$$\tau_{pc} = T_{\mu}, \quad (7)$$

то система уравнений (6) преобразуется в уравнение

$$\begin{aligned} \frac{U_{zc}(p)}{K_{oc}} - (T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) \cdot \omega_2(p) = \\ = \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{от}}{K_{oc}} \cdot (\tau_3^3 p^3 + \tau_2^2 p^2 + \tau_1 p + 1) \cdot T_{\mu} p \cdot \frac{1}{C_M} \cdot \left[\frac{J_1 J_2}{C_y} + (J_1 + J_2) \cdot p \right] \cdot \omega_2(p) + \\ + \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{от}}{K_{oc}} \cdot (\tau_3^3 p^3 + \tau_2^2 p^2 + \tau_1 p + 1) \cdot T_{\mu} p \cdot \frac{1}{C_M} \cdot \left(\frac{J_1}{C_y} p^2 + 1 \right) \cdot M_c. \end{aligned} \quad (8)$$

Передаточная функция контура скорости по каналу управления «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа механизма» имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\omega_2(p)}{U_{zc}(p)} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{от}}{K_{oc}} \cdot (\tau_3^3 p^3 + \tau_2^2 p^2 + \tau_1 p + 1) \cdot T_{\mu} p \cdot \frac{1}{C_M} \times} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{1}{\left[\frac{J_1 J_2}{C_y} + (J_1 + J_2) \cdot p \right] + (T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Параметры регулятора скорости, фильтра и корректора контура скорости следует выбрать равными:

$$\beta_{pc} = 64 \cdot \frac{K_{от} J_1 J_2}{K_{oc} C_M C_y T_{\mu}^3} \cdot \left[1 - 2^{-9} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right]^{-1}; \quad (10)$$

$$\tau_1 = 2^{-4} \cdot \left[1 - 2^{-11} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right] \cdot \left[1 - 2^{-9} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right]^{-1} \cdot T_{\mu}; \quad (11)$$

$$\tau_2^2 = 2^{-9} \cdot \left[1 - 2^{-9} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right]^{-1} \cdot T_{\mu}^2; \quad (12)$$

$$\tau_3^3 = 2^{-15} \cdot \left[1 - 2^{-9} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \right]^{-1} \cdot T_{\mu}^3; \quad (13)$$

$$T_1 = T_{\mu}; \quad (14)$$

$$T_2^2 = 2^{-1} \cdot \left[1 - 2^{-5} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} + 2^{-14} \cdot \frac{C_y^2 (J_1 + J_2)^2 T_\mu^4}{J_1^2 J_2^2} \right] \cdot T_\mu^2; \quad (15)$$

$$T_3^3 = 2^{-3} \cdot \left[1 - 2^{-7} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} + 2^{-18} \cdot \frac{C_y^2 (J_1 + J_2)^2 T_\mu^4}{J_1^2 J_2^2} \right] \cdot T_\mu^3. \quad (16)$$

Так как $\frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \ll 1$, то зависимости (10) – (13), (15) и (16)

целесообразно представить следующим образом:

$$\beta_{pc} = 64 \cdot \frac{K_{ор} J_1 J_2}{K_{oc} C_M C_y T_\mu^3}; \quad (17)$$

$$\tau_1 = \frac{1}{16} T_\mu; \quad (18)$$

$$\tau_2 = \frac{\sqrt{2}}{32} T_\mu; \quad (19)$$

$$\tau_3 = \frac{1}{32} T_\mu; \quad (20)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} T_\mu; \quad (21)$$

$$T_3 = \frac{1}{2} T_\mu. \quad (22)$$

Таким образом, для контура скорости справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & \left(2^{-21} \cdot T_\mu^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_\mu^6 p^6 + 2^{-10} \cdot T_\mu^5 p^5 + 2^{-6} \cdot T_\mu^4 p^4 + 2^{-3} \cdot T_\mu^3 p^3 + \right. \\ & \left. + 2^{-1} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1 \right) \cdot \omega_2(p) = \frac{U_{zc}(p)}{K_{oc}} - \frac{1}{64} \cdot \frac{C_y T_\mu^3}{J_1 J_2} \cdot \left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \\ & \times \left(2^{-15} \cdot T_\mu^3 p^3 + 2^{-9} \cdot T_\mu^2 p^2 + 2^{-4} \cdot T_\mu p + 1 \right) \cdot T_\mu p \cdot M_c(p). \end{aligned} \quad (23)$$

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

$$\frac{\omega_2(p)}{U_{zc}(p)} = \frac{1}{K_{oc}} \cdot \frac{1}{2^{-21} \cdot T_{\mu}^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_{\mu}^6 p^6 + 2^{-10} \cdot T_{\mu}^5 p^5 + 2^{-6} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + \dots} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{+2^{-3} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-1} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1}; \quad (24)$$

$$\frac{\omega_2(p)}{M_c(p)} = -\frac{1}{64} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^3}{J_1 J_2} \cdot \frac{\left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1\right) \times}{2^{-21} \cdot T_{\mu}^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_{\mu}^6 p^6 + 2^{-10} \cdot T_{\mu}^5 p^5 + 2^{-6} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + \dots} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\times (2^{-15} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + 2^{-9} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-4} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p)}{+2^{-3} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-1} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1}. \quad (25)$$

Синтез контура положения

Для контура положения справедлива система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} & [U_{зп}(p) - K_{оп} \cdot \varphi_2(p)] \cdot K_{рп} = U_{zc}(p); \\ & U_{zc}(p) = K_{oc} \cdot \left(2^{-21} \cdot T_{\mu}^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_{\mu}^6 p^6 + 2^{-10} \cdot T_{\mu}^5 p^5 + 2^{-6} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + \right. \\ & \quad \left. + 2^{-3} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-1} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1 \right) \cdot \omega_2(p) + K_{oc} \cdot \frac{1}{64} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^3}{J_1 J_2} \times \\ & \quad \times \left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot \left(2^{-15} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + 2^{-9} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-4} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p \right) \cdot M_c(p); \\ & \omega_2(p) = p \varphi_2(p). \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Система уравнений (26) преобразуется в уравнение

$$\frac{U_{зп}(p)}{K_{оп}} - \varphi_2(p) = \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{оп}} \cdot \left(2^{-21} \cdot T_{\mu}^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_{\mu}^6 p^6 + 2^{-10} \cdot T_{\mu}^5 p^5 + \right.$$

$$\left. + 2^{-6} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + 2^{-3} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-1} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1 \right) \cdot p \cdot \varphi_2(p)$$

$$+ \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{64} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^3}{J_1 J_2} \cdot \left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \times$$

$$\times \left(2^{-15} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + 2^{-9} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-4} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p \right) \cdot M_c(p). \quad (27)$$

Передаточная функция контура положения по каналу управления «задающее напряжение контура положения – угол поворота исполнительного органа механизма» имеет вид

$$\frac{\varphi_2(p)}{U_{зп}(p)} = \frac{1}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot (2^{-21} \cdot T_{\mu}^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_{\mu}^6 p^6 + 2^{-10} \cdot T_{\mu}^5 p^5 + 2^{-6} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + 2^{-3} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-1} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1)}{1} \rightarrow \rightarrow \frac{1}{+2^{-6} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + 2^{-3} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-1} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1)} \cdot p \cdot \varphi_2(p) + 1 \quad (28)$$

При выборе коэффициента усиления регулятора положения

$$K_{рп} = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп} T_{\mu}} \quad (29)$$

для контура положения справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & (2^{-20} \cdot T_{\mu}^8 p^8 + 2^{-14} \cdot T_{\mu}^7 p^7 + 2^{-9} \cdot T_{\mu}^6 p^6 + 2^{-5} \cdot T_{\mu}^5 p^5 + 2^{-2} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + T_{\mu}^3 p^3 + \\ & + 2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1) \cdot \varphi_2(p) = \frac{U_{зп}(p)}{K_{оп}} - \frac{1}{32} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^4}{J_1 J_2} \cdot \left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \times \\ & \times (2^{-15} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + 2^{-9} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-4} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p) \cdot M_c(p). \end{aligned} \quad (30)$$

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

$$\frac{\varphi_2(p)}{U_{зс}(p)} = \frac{1}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{2^{-20} \cdot T_{\mu}^8 p^8 + 2^{-14} \cdot T_{\mu}^7 p^7 + 2^{-9} \cdot T_{\mu}^6 p^6 + 2^{-5} \cdot T_{\mu}^5 p^5 + 2^{-2} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + T_{\mu}^3 p^3 + 2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} \rightarrow \rightarrow \frac{1}{+2^{-2} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + T_{\mu}^3 p^3 + 2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} \quad (31)$$

$$\frac{\varphi_2(p)}{M_c(p)} = -\frac{1}{64} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^4}{J_1 J_2} \cdot \frac{\left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \times}{2^{-20} \cdot T_{\mu}^8 p^8 + 2^{-14} \cdot T_{\mu}^7 p^7 + 2^{-9} \cdot T_{\mu}^6 p^6 + 2^{-5} \cdot T_{\mu}^5 p^5 + 2^{-2} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + T_{\mu}^3 p^3 + 2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\times(2^{-14} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + 2^{-8} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-3} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p)}{+2^{-2} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + T_{\mu}^3 p^3 + 2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1}. \quad (32)$$

Вывод

Предлагаемая САР положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом имеет, по сравнению с известной системой, представленной в статье [1], следующие преимущества:

в четыре раза увеличено быстродействие контура скорости;

в четыре раза увеличено быстродействие контура положения.

Увеличение быстродействия контура положения позволит повысить точность отработки системой заданной диаграммы перемещения исполнительного органа механизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добробаба Ю.П., Литаш Б.С., Олейников А.А. Трехкратно-интегрирующая система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода с типовыми регуляторами и упругим валопроводом. – Изв. вузов. Пищевая технология. – 2008. – №5-6. – с. 88-91.

REFERENCES

1 Dobrobaba Ju.P., Litash B.S., Olejnikov A.A. – Izv. vuzov. Pishhevaja tehnologija. – 2008. – №5-6. – s. 88-91.

CONSISTENT CORRECTION SYNTHESIS OF POSITION AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC DRIVE WITH ELASTIC SHAFTING

Y.P. DOBROBABA, A.L. KHORTSEV

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072;
e-mail: tolyahortsev@gmail.com, tre-86@mail.ru*

In this article was synthesized by consistent correction position automatic control system for electric drive with elastic shafting.

Keywords: automatic control system, elastic shafting, electric drive.

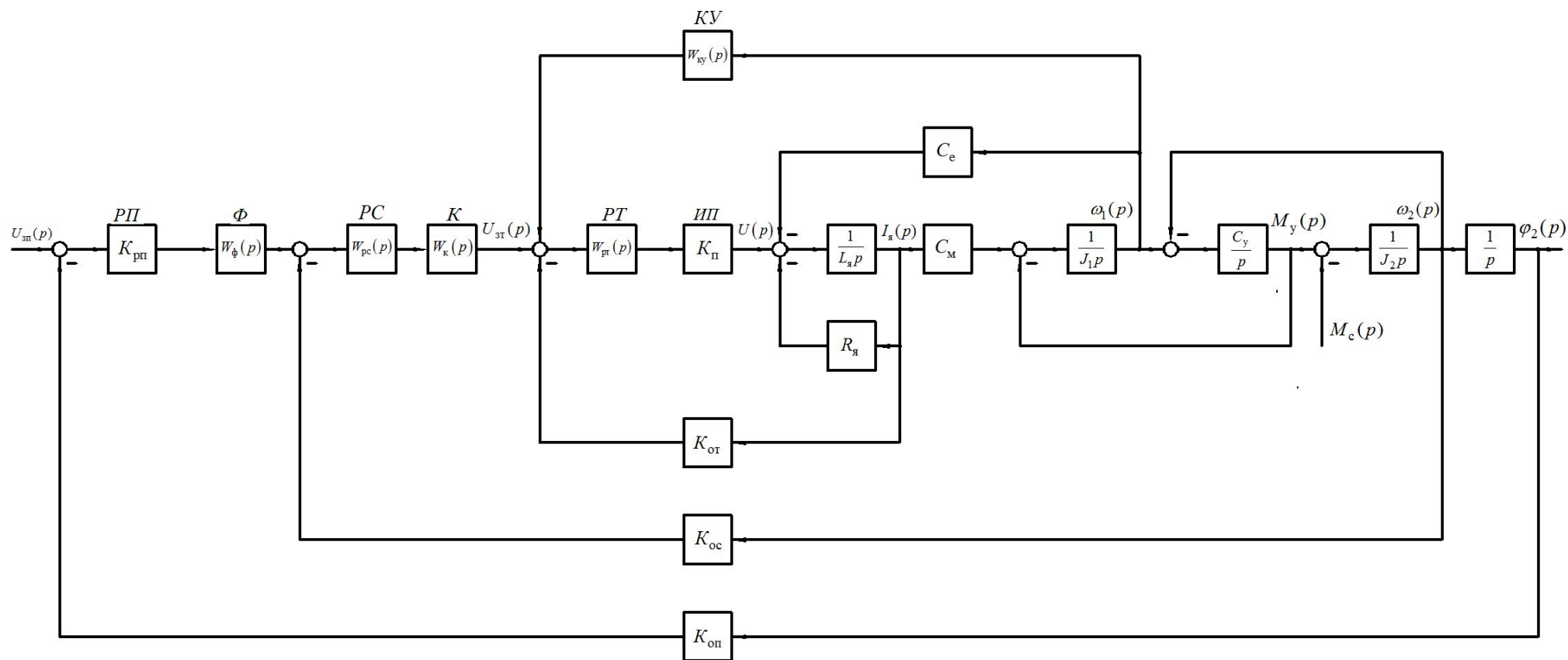


Рисунок 1 – Структурная схема модернизированной системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом