

## СИНТЕЗ САР ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШТАНГОВЫХ СКВАЖИННЫХ НАСОСОВ

**Ю.П. ДОБРОБАБА, Т.С. ЖИВОДРОВ, Ф.В. КОНОВАЛОВ**

*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
электронная почта: tre-86@mail.ru*

В электроприводе штанговых скважинных насосов невозможно непосредственно измерить скорость и положение исполнительного органа механизма. Поэтому в данной статье синтезирована САР положения исполнительного органа электропривода штанговых скважинных насосов с датчиками косвенного измерения скорости и положения исполнительного органа механизма.

**Ключевые слова:** система автоматического регулирования положения, датчик косвенного измерения, штанговый скважинный насос.

Особенностью синтеза САР положения исполнительного органа электропривода штанговых скважинных насосов является невозможность измерения скорости и положения исполнительного органа механизма. Поэтому предлагается разработать датчики косвенного измерения скорости и положения исполнительного органа механизма.

На рисунке 1 представлена структурная схема силовой части электропривода штанговых скважинных насосов.

На рисунке 2 приведены структурные схемы датчиков косвенного измерения скорости, разности скоростей и положения электропривода штанговых скважинных насосов.

На рисунке 3 представлена структурная схема системы управления электропривода штанговых скважинных насосов.

Передаточные функции блоков представленных на рисунке 3 структурной схемы системы управления электропривода штанговых скважинных насосов имеют вид:

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

$$W_{ку}(p) = \frac{C_e}{\beta_{pm}} \cdot \frac{\tau_{pm} p}{\tau_{pm} p + 1} \cdot \frac{1}{K_n};$$

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

$$W_{ккс}(p) = \frac{T_{\kappa} p + 1}{\tau_{\kappa} p + 1};$$

$$W_c(p) = \frac{\tau_c p + K_c}{T_{\kappa} p + 1};$$

$$W_{фкс}(p) = \frac{1}{(T_{\kappa} p + 1) \cdot (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)};$$

$$W_{pn}(p) = K_{pn};$$

$$W_{фкп}(p) = \frac{1}{T_{\phi} p + 1}.$$

На рисунках 1 – 3 приняты обозначения:

*ФКП* – фильтр контура положения;

*РП* – регулятор положения;

*ФКС* – фильтр контура скорости;

*РС* – регулятор скорости;

*ККС* – корректор контура скорости;

*РТ* – регулятор тока;

*КУ* – компенсирующее устройство;

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

*U<sub>зн</sub>* – задающее напряжение контура положения, В;

*U<sub>зс</sub>* – задающее напряжение контура скорости, В;

*U<sub>зт</sub>* – задающее напряжение контура тока, В;

*U<sub>упр</sub>* – напряжение управления, В;

- $I_{я}$  – ток якорной цепи электродвигателя,  $A$ ;
- $\omega_1$  – угловая скорость двигателя,  $\frac{рад}{с}$ ;
- $\varphi_1$  – угол поворота двигателя,  $рад$ ;
- $M_y$  – упругий момент,  $H \cdot м$ ;
- $M_c$  – момент сопротивления электропривода  $H \cdot м$ ;
- $\omega_2$  – угловая скорость механизма,  $\frac{рад}{с}$ ;
- $\varphi_2$  – угол поворота механизма,  $рад$ ;
- $K_n$  – коэффициент усиления преобразователя;
- $C_e$  – коэффициент пропорциональности,  $\frac{В \cdot с}{рад}$ ;
- $C_m$  – коэффициент пропорциональности,  $В \cdot с$ ;
- $R_{я}$  – сопротивление якорной цепи электродвигателя,  $Ом$ ;
- $L_{я}$  – 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,  $кг \cdot м^2$ ;
- $K_{ом}$  – коэффициент обратной связи по току,  $Ом$ ;
- $K_{ос}$  – коэффициент обратной связи по скорости,  $\frac{В \cdot с}{рад}$ ;
- $K_{он}$  – коэффициент обратной связи по положению,  $\frac{В}{рад}$ ;
- $\beta_{рм}$  – динамический коэффициент регулятора тока;
- $\tau_{рм}$  – постоянная времени регулятора тока,  $с$ ;
- $\beta_{рс}$  – динамический коэффициент регулятора скорости;
- $\tau_{рс}$  – постоянная времени регулятора скорости,  $с$ ;

$T_k$  – постоянная времени ККС, с;

$\tau_k$  – постоянная времени ККС, с;

$\tau_c$  – постоянная времени блока параллельной коррекции контура скорости, с;

$K_c$  – коэффициент пропорциональности блока параллельной коррекции контура скорости;

$T_1$  – постоянная времени фильтра датчика косвенного измерения скорости механизма, с;

$T_2$  – постоянная времени фильтра датчика косвенного измерения скорости механизма, с;

$T_\phi$  – постоянная времени фильтра датчика косвенного измерения угла поворота механизма, с.

### 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:

$$\left. \begin{aligned} [U_{zm}(p) - K_{om} \cdot I_{я}(p)] \cdot \beta_{pm} \cdot \frac{\tau_{pm} p + 1}{\tau_{pm} p} \cdot K_n = U(p); \\ U(p) = R_{я} \cdot I_{я}(p) + L_{я} p \cdot I_{я}(p). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Если выбрать постоянную времени регулятора тока, равную

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

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

$$\frac{I_{я}(p)}{U_{zm}(p)} = \frac{1}{K_{om}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\beta_{pm}} \cdot \frac{L_{я}}{K_n \cdot K_{om}} \cdot p + 1}. \quad (3)$$

При выборе динамического коэффициента регулятора тока равным

$$\beta_{pm} = \frac{L_{\text{я}}}{K_n \cdot K_{om} \cdot T_{\mu}} \quad (4)$$

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

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

### Синтез контура скорости

Предлагается при синтезе контура скорости использовать датчики косвенного измерения скорости исполнительного органа механизма

$$\frac{\omega_2(p)}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \cdot \omega_1(p) - \frac{\frac{C_m}{C_y} \cdot p}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \cdot I_{\text{я}}(p) \quad (6)$$

и разности скоростей

$$\frac{\omega_1(p) - \omega_2(p)}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{\frac{C_m}{C_y} \cdot p}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \cdot I_{\text{я}}(p) - \frac{\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \cdot \omega_1(p). \quad (7)$$

Для контура скорости справедлива система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} & \left[ \frac{1}{(T_{\kappa}p + 1) \cdot (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} \cdot U_{\text{зс}}(p) - K_{oc} \cdot \frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \cdot \omega_2(p) - \right. \\ & \left. - K_{oc} \cdot \frac{\tau_c p + K_c}{T_{\kappa}p + 1} \cdot \frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \cdot [\omega_1(p) - \omega_2(p)] \right] \times \\ & \times \beta_{pc} \cdot \frac{\tau_{pc} p + 1}{\tau_{pc} p} \cdot \frac{T_{\kappa} p + 1}{\tau_{\kappa} p + 1} \cdot \frac{1}{K_{om}} \cdot \frac{1}{T_{\mu} p + 1} = I_{\text{я}}(p); \\ & I_{\text{я}}(p) = \frac{1}{C_m} \cdot \left[ \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot p^3 + (J_1 + J_2) \cdot p \right] \cdot \omega_2(p) + \frac{1}{C_m} \cdot \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot M_c(p); \\ & [\omega_1(p) - \omega_2(p)] = \frac{J_2}{C_y} \cdot p^2 \cdot \omega_2(p) + \frac{1}{C_y} \cdot p \cdot M_c(p). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Предлагается ввести следующие обозначения:

$$(\tau_k p + 1) \cdot (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) = \tau_3^3 p^3 + \tau_2^2 p^2 + \tau_1 p + 1, \quad (9)$$

где  $\tau_1 = T_1 + \tau_k;$

$$\tau_2^2 = T_2^2 + T_1 \tau_k;$$

$$\tau_3^3 = T_2^2 \tau_k.$$

Если выбрать постоянную времени регулятора скорости, равную

$$\tau_{pc} = T_\mu, \quad (10)$$

то система уравнений (8) с учётом принятых обозначений (9) преобразуется в уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{U_{zc}(p)}{K_{oc}} - (T_k p + 1) \cdot \omega_2(p) - (\tau_c p + K_c) \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot p^2 \cdot \omega_2(p) - \\ & - (\tau_c p + K_c) \cdot \frac{1}{C_y} \cdot p \cdot M_c(p) = \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{om}}{K_{oc}} \cdot (\tau_3^3 p^3 + \tau_2^2 p^2 + \tau_1 p + 1) \times \\ & \times T_\mu p \cdot \frac{1}{C_m} \cdot \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot M_c(p). \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$\frac{\omega_2(p)}{U_{zc}(p)} = \frac{1}{K_{oc}} \cdot \frac{1}{B_7 p^7 + B_6 p^6 + B_5 p^5 + B_4 p^4 + B_3 p^3 + B_2 p^2 + B_1 p + 1}, \quad (12)$$

где  $B_1 = T_k;$

$$B_2 = \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{om}(J_1 + J_2)}{K_{oc} C_m} \cdot T_\mu + \frac{J_2}{C_y} \cdot K_c;$$

$$B_3 = \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{om}(J_1 + J_2)}{K_{oc} C_m} \cdot T_\mu \tau_1 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \tau_c;$$

$$B_4 = \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{om} J_1 J_2}{K_{oc} C_M C_y} + \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{om} (J_1 + J_2)}{K_{oc} C_M} \cdot \tau_2^2;$$

$$B_5 = \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{om} J_1 J_2}{K_{oc} C_M C_y} \cdot \tau_1 + \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{om} (J_1 + J_2)}{K_{oc} C_M} \cdot \tau_3^3;$$

$$B_6 = \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{om} J_1 J_2}{K_{oc} C_M C_y} \cdot \tau_2^2;$$

$$B_7 = \frac{1}{\beta_{pc}} \cdot \frac{K_{om} J_1 J_2}{K_{oc} C_M C_y} \cdot \tau_3^3.$$

При выборе параметров регулятора скорости, фильтра контура скорости и блока компенсации контура скорости равными:

$$T_\kappa = T_\mu; \tag{13}$$

$$\beta_{pc} = 64 \cdot \frac{K_{om} J_1 J_2}{K_{oc} C_M C_y T_\mu^3} \cdot \left[ 1 - 2^{-9} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \right]^{-1}; \tag{14}$$

$$\tau_1 = 2^{-4} \cdot \left[ 1 - 2^{-11} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \right] \cdot \left[ 1 - 2^{-9} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \right]^{-1} \cdot T_\mu; \tag{15}$$

$$\tau_2^2 = 2^{-9} \cdot \left[ 1 - 2^{-9} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \right]^{-1} \cdot T_\mu^2; \tag{16}$$

$$\tau_3^3 = 2^{-15} \cdot \left[ 1 - 2^{-9} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \right]^{-1} \cdot T_\mu^3; \tag{17}$$

$$\tau_c = 2^{-3} \cdot \frac{C_y T_\mu^2}{J_2} \cdot \left\{ 1 - 2^{-7} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \cdot \left[ 1 - 2^{-11} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \right] \right\} \cdot T_\mu; \tag{18}$$

$$K_c = 2^{-1} \cdot \frac{C_y T_\mu^2}{J_2} \cdot \left\{ 1 - 2^{-5} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \cdot \left[ 1 - 2^{-9} \cdot \frac{C_y (J_1 + J_2) T_\mu^2}{J_1 J_2} \right] \right\} \tag{19}$$

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

$$\frac{\omega_2(p)}{U_{zc}(p)} = \frac{1}{K_{oc}} \cdot \frac{1}{2^{-21} \cdot T_{\mu}^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_{\mu}^6 p^6 + 2^{-10} \cdot T_{\mu}^5 p^5 + 2^{-6} \cdot T_{\mu}^4 p^4 + 2^{-3} \cdot T_{\mu}^3 p^3 + 2^{-1} \cdot T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1} \rightarrow \quad (20)$$

При этом передаточная функция контура скорости по каналу управления «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа механизма» имеет вид эталонной передаточной функции седьмого порядка с постоянной времени равной  $T_{\mu}$ .

Так как  $\frac{C_y (J_1 + J_2) T_{\mu}^2}{J_1 J_2} \ll 1$ , то зависимости (14) – (19) целесообразно

представить следующим образом:

$$\beta_{pc} \approx 64 \cdot \frac{K_{om} J_1 J_2}{K_{oc} C_m C_y T_{\mu}^3}; \quad (21)$$

$$\tau_1 \approx \frac{1}{16} T_{\mu}; \quad (22)$$

$$\tau_2 \approx \frac{\sqrt{2}}{32} T_{\mu}; \quad (23)$$

$$\tau_3 \approx \frac{1}{32} T_{\mu}; \quad (24)$$

$$\tau_c \approx \frac{1}{8} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^2}{J_2} \cdot T_{\mu}; \quad (25)$$

$$K_c \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{C_y T_{\mu}^2}{J_2}. \quad (26)$$

При этом справедливы зависимости:



$$\tau_k = \frac{1}{32} T_\mu; \quad (27)$$

$$T_1 = \frac{1}{32} T_\mu; \quad (28)$$

$$T_2 = \frac{1}{32} T_\mu. \quad (29)$$

Таким образом, для контура скорости справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & (2^{-21} \cdot T_\mu^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_\mu^6 p^6 + 2^{-10} \cdot T_\mu^5 p^5 + 2^{-6} \cdot T_\mu^4 p^4 + 2^{-3} \cdot T_\mu^3 p^3 + \\ & + 2^{-1} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1) \cdot \omega_2(p) = \frac{1}{K_{oc}} \cdot U_{3c}(p) - \frac{1}{64} \cdot \frac{C_y T_\mu^3}{J_1 J_2} \times \\ & \times \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot (2^{-15} \cdot T_\mu^4 p^4 + 2^{-9} \cdot T_\mu^3 p^3 + 2^{-4} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p) \cdot M_c(p) - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{T_\mu}{J_2} \cdot (2^{-2} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p) \cdot M_c(p). \end{aligned} \quad (30)$$

### Синтез контура положения

Предлагается при синтезе контура положения использовать датчик косвенного измерения положения (угла поворота) исполнительного органа механизма

$$\frac{\varphi_2(p)}{T_\phi p + 1} = \frac{1}{T_\phi p + 1} \cdot \varphi_1(p) - \frac{\frac{J_1}{C_y} \cdot p}{T_\phi p + 1} \cdot \omega_1(p) - \frac{\frac{C_m}{C_y}}{T_\phi p + 1} \cdot I_\alpha(p). \quad (31)$$

Для контура положения справедлива система уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 & \left[ \frac{1}{T_\phi p + 1} \cdot U_{zn}(p) - K_{on} \cdot \frac{1}{T_\phi p + 1} \cdot \varphi_2(p) \right] \cdot K_{pn} = U_{zc}(p); \\
 & U_{zc}(p) = K_{oc} \cdot \left( 2^{-21} \cdot T_\mu^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_\mu^6 p^6 + 2^{-10} \cdot T_\mu^5 p^5 + 2^{-6} \cdot T_\mu^4 p^4 + \right. \\
 & \left. + 2^{-3} \cdot T_\mu^3 p^3 + 2^{-1} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1 \right) \cdot \omega_2(p) + K_{oc} \cdot \frac{1}{64} \cdot \frac{C_y T_\mu^3}{J_1 J_2} \times \\
 & \times \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot \left( 2^{-15} \cdot T_\mu^4 p^4 + 2^{-9} \cdot T_\mu^3 p^3 + 2^{-4} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p \right) \times \\
 & \times M_c(p) + K_{oc} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T_\mu}{J_2} \cdot \left( 2^{-2} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p \right) \cdot M_c(p); \\
 & \omega_2(p) = p \varphi_2(p).
 \end{aligned} \right\} (32)$$

Система уравнений (32) преобразуется в уравнение

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{K_{on}} \cdot U_{zn}(p) - \varphi_2(p) = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot (T_\phi p + 1) \cdot \left( 2^{-21} \cdot T_\mu^7 p^7 + 2^{-15} \cdot T_\mu^6 p^6 + \right. \\
 & \left. + 2^{-10} \cdot T_\mu^5 p^5 + 2^{-6} \cdot T_\mu^4 p^4 + 2^{-3} \cdot T_\mu^3 p^3 + 2^{-1} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1 \right) \cdot p \cdot \varphi_2(p) + \\
 & + \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot (T_\phi p + 1) \cdot \frac{1}{64} \cdot \frac{C_y T_\mu^3}{J_1 J_2} \cdot \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \times \\
 & \times \left( 2^{-15} \cdot T_\mu^4 p^4 + 2^{-9} \cdot T_\mu^3 p^3 + 2^{-4} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p \right) \cdot M_c(p) + \\
 & + \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot (T_\phi p + 1) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T_\mu}{J_2} \cdot \left( 2^{-2} \cdot T_\mu^2 p^2 + T_\mu p \right) \cdot M_c(p).
 \end{aligned} \quad (33)$$

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

$$\begin{aligned}
 & \frac{\varphi_2(p)}{U_{zn}(p)} = \frac{1}{K_{on}} \cdot \frac{1}{D_9 p^9 + D_8 p^8 + D_7 p^7 + D_6 p^6 + D_5 p^5 + D_4 p^4 + D_3 p^3 +} \rightarrow \\
 & \rightarrow \frac{1}{+D_2 p^2 + D_1 p + 1},
 \end{aligned} \quad (34)$$

где  $D_1 = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}};$

$$D_2 = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot T_\phi + \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot T_\mu;$$

$$D_3 = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot T_\mu T_\phi + \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-1} \cdot T_\mu^2;$$

$$D_4 = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-1} \cdot T_\mu^2 T_\phi + \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-3} \cdot T_\mu^3;$$

$$D_5 = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-3} \cdot T_\mu^3 T_\phi + \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-6} \cdot T_\mu^4;$$

$$D_6 = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-6} \cdot T_\mu^4 T_\phi + \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-10} \cdot T_\mu^5;$$

$$D_7 = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-10} \cdot T_\mu^5 T_\phi + \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-15} \cdot T_\mu^6;$$

$$D_8 = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-15} \cdot T_\mu^6 T_\phi + \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-21} \cdot T_\mu^7;$$

$$D_9 = \frac{1}{K_{pn}} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on}} \cdot 2^{-21} \cdot T_\mu^7 T_\phi.$$

При выборе параметров регулятора положения и фильтра контура положения

$$K_{pn} = \frac{1}{4} \cdot \frac{K_{oc}}{K_{on} T_\mu} \tag{35}$$

$$T_\phi = 2T_\mu \tag{36}$$

коэффициенты передаточной функции контура положения по каналу управления «задающее напряжение контура положения – угол поворота исполнительного органа механизма» имеют значения:

$$D_1 = 4T_\mu; \tag{37}$$

$$D_2 = \frac{3}{2} \cdot 8T_\mu^2; \quad (38)$$

$$D_3 = \frac{5}{4} \cdot 8T_\mu^3; \quad (39)$$

$$D_4 = \frac{9}{8} \cdot 4T_\mu^4; \quad (40)$$

$$D_5 = \frac{17}{16} \cdot T_\mu^5; \quad (41)$$

$$D_6 = \frac{33}{32} \cdot 2^{-3} \cdot T_\mu^6; \quad (42)$$

$$D_7 = \frac{65}{64} \cdot 2^{-7} \cdot T_\mu^7; \quad (43)$$

$$D_8 = \frac{129}{128} \cdot 2^{-12} \cdot T_\mu^8; \quad (44)$$

$$D_9 = 2^{-18} \cdot T_\mu^9. \quad (45)$$

При этом передаточная функция контура положения по каналу управления «задающее напряжение контура положения – угол поворота исполнительного органа механизма» имеет вид близкой к эталонной передаточной функции девятого порядка с постоянной времени  $4T_\mu$ .

Таким образом, для контура положения справедливо уравнение  $(D_9p^9 + D_8p^8 + D_7p^7 + D_6p^6 + D_5p^5 + D_4p^4 + D_3p^3 + D_2p^2 + D_1p + 1) \times$

$$\begin{aligned} \times \varphi_2(p) = & \frac{1}{K_{on}} \cdot U_{zn}(p) - \frac{1}{64} \cdot \frac{C_y T_\mu^4}{J_1 J_2} \cdot \left( \frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot (2T_\mu p + 1) \times \\ & \times \left( 2^{-13} \cdot T_\mu^4 p^4 + 2^{-7} \cdot T_\mu^3 p^3 + 2^{-2} \cdot T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p \right) \cdot M_c(p) - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{T_\mu^2}{J_2} \cdot (T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p) \cdot M_c(p). \end{aligned} \quad (46)$$

## Вывод

Предлагаемая САР положения способна обрабатывать заданные диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода с высокой точностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Добробаба Ю.П., Акулов О.В. Разработка электроприводов крановых механизмов с учётом влияния упругостей троса. - Материалы второй межвузовской научной конференции «Электромеханические преобразователи энергии», 2003, с. 171-174.

2. Патент на изобретение № 2239277. Электропривод механизма подъема крана. / Добробаба Ю.П., Акулов О.В., Добробаба С.В.: Оpubл. 27.10.2004, Бюл № 30.

## REFERENCES

1 Dobrobaba Yu.P., Akulov O.V. Development of electric crane mechanisms, taking into account the effect of elastic rope. - Proceedings of the Second Inter-University Conference "Electromechanical energy converters", 2003, p. 171-174.

2 Patent for the invention № 2239277. Electric hoist crane. / Dobrobaba Yu.P., Akoulov O.V., Dobrobaba S.V.: Publ. 27.10.2004, Bulletin number 30.

## *SYNTHESIS OF THE EXECUTIVE BODY SAR ELECTRIC POWER DEEP BOREHOLE PUMPS*

**Y.P. DOBROBABA, T.S. ZHIVODROV, F.V. KONOVALOV**

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

The drive rod well pumps is not possible to directly measure the speed and position of the executive body of the mechanism. Therefore, this article is synthesized SAR executive position actuator rod well pumps with sensors indirectly measure the speed and position of the executive body of the mechanism.

**Keywords:** system of automatic control of the situation, indirect measurement transducer, Deep borehole Pump.

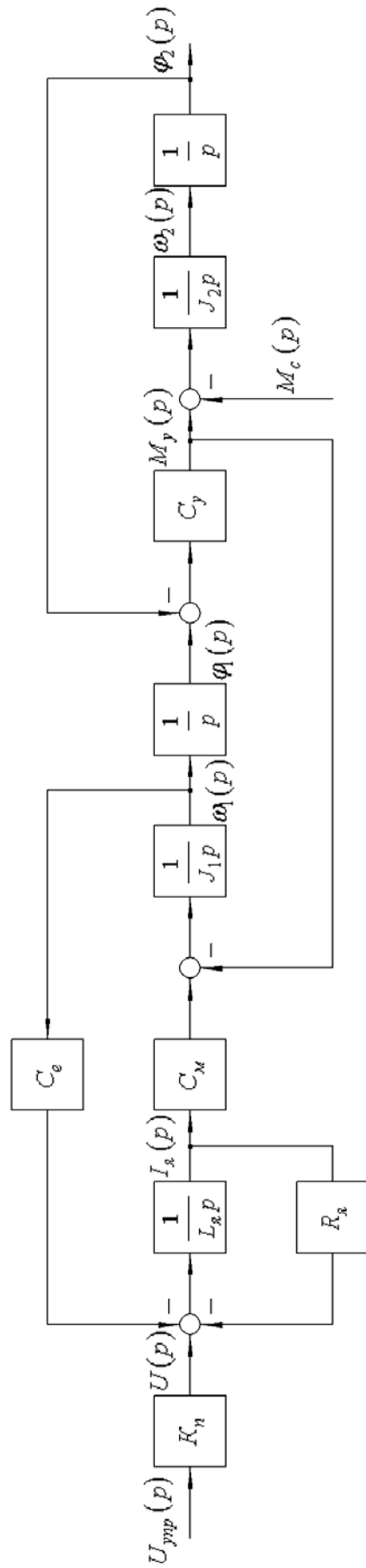


Рисунок 1 – Структурная схема силовой части электропривода штанговых скважинных насосов

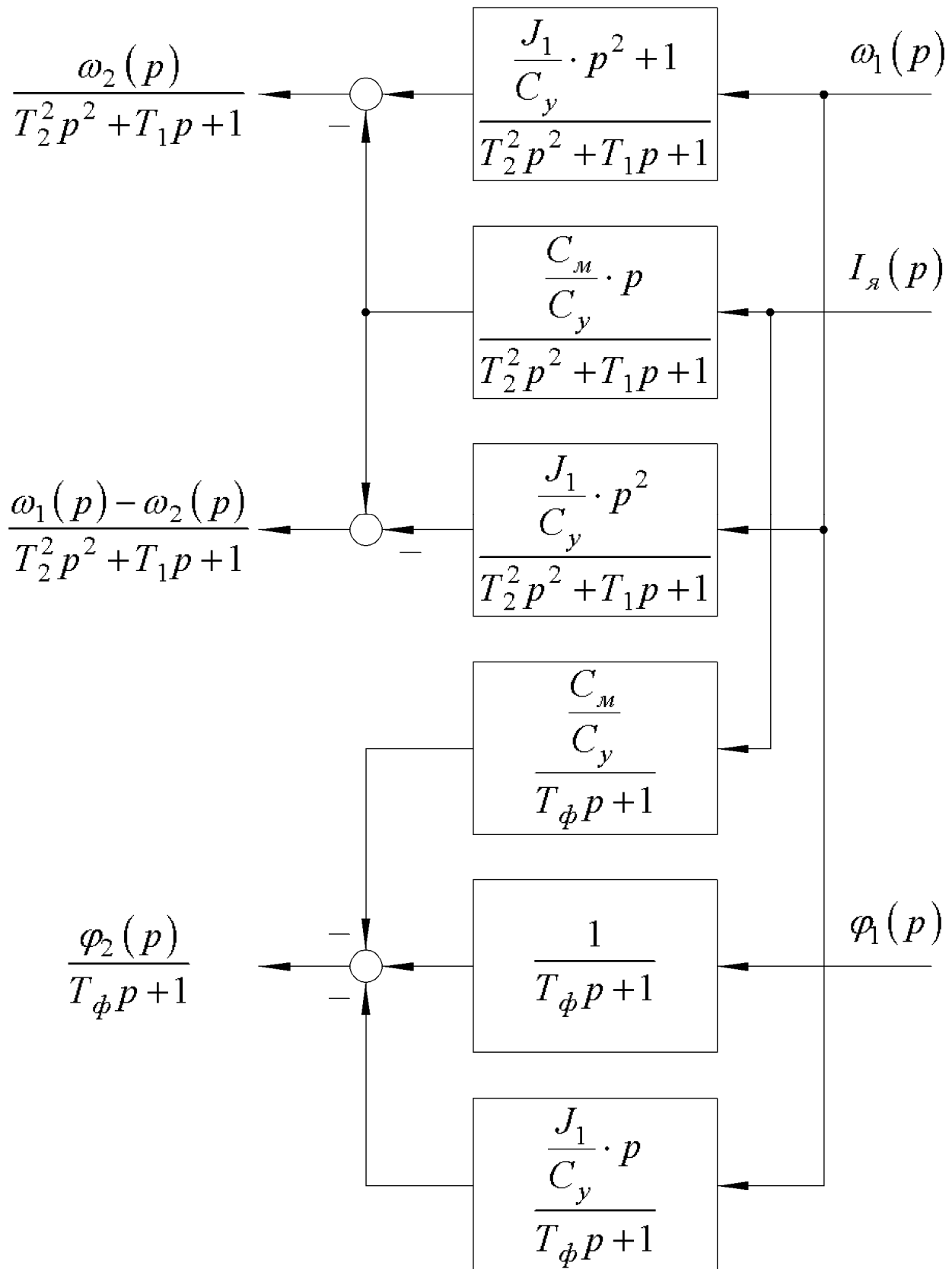


Рисунок 2 – Структурная схема датчиков косвенного измерения скорости, разности скоростей и положения электропривода штанговых скважинных насосов

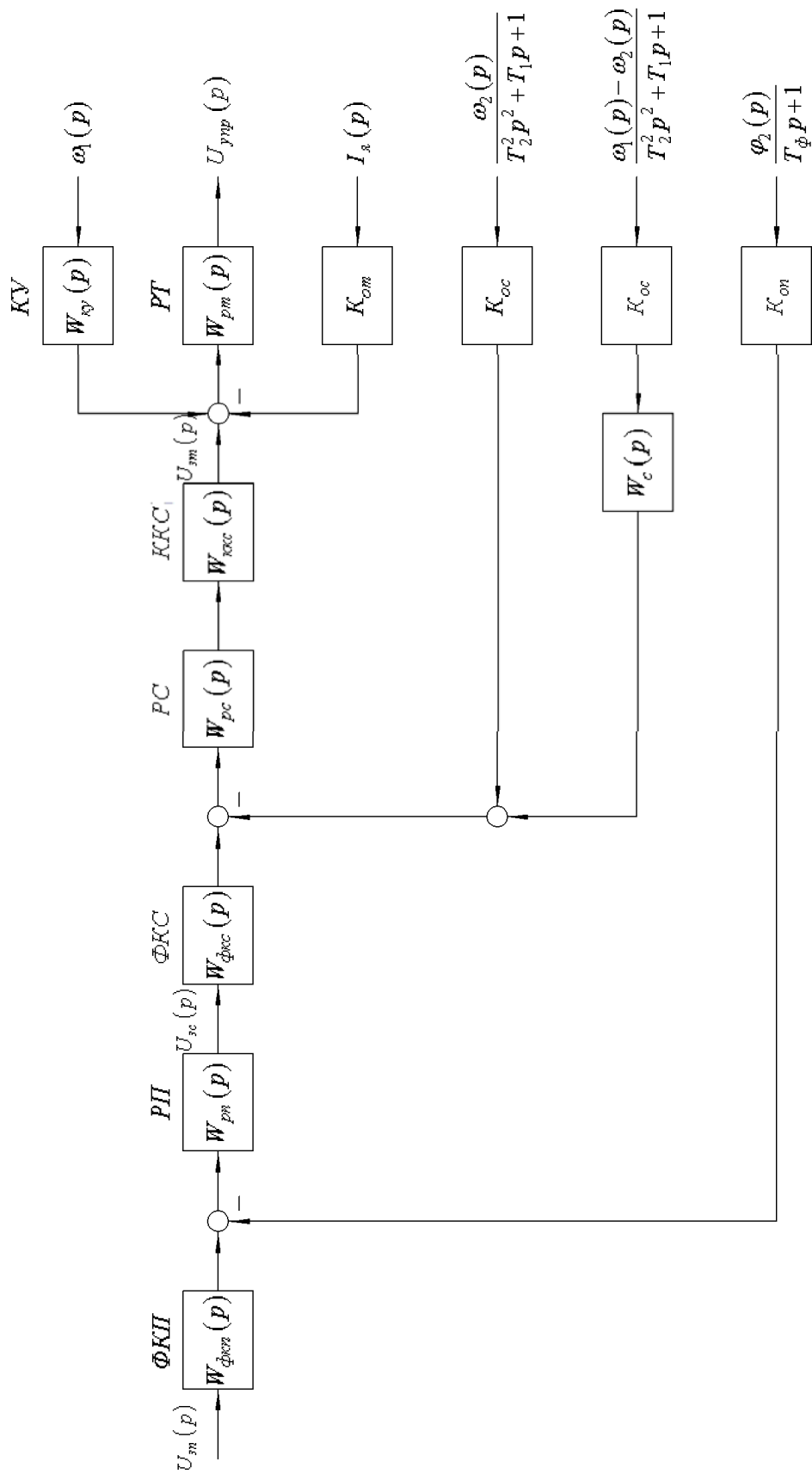


Рисунок 3 – Структурная схема системы управления электропривода штанговых скважинных насосов