

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЗАВИСЯЩИМ ОТ СКОРОСТИ МОМЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ

SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM POSITION OF THE EXECUTIVE BODY OF AN ELECTRIC DRIVE DEPENDING ON THE SPEED OF THE MOMENT OF RESISTANCE

Добробаба Юрий Петрович
к.т.н., профессор

Dobrobaba Yuriy Petrovitch
Cand.Tech.Sci., professor

Луценко Артём Юрьевич
аспирант
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Lutsenko Artyom Yurievich
postgraduate student
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Синтезирована система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода с зависящим от скорости моментом сопротивления

In the article we have shown how to synthesize an automatic position control of the executive body of an electric drive with speed-dependent moment of resistance

Ключевые слова: ПОЗИЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД; СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ; ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН; СИНТЕЗ; КОНТУР СКОРОСТИ; КОНТУР ТОКА; КОНТУР ПОЛОЖЕНИЯ

Keywords: POSITION ELECTRIC DRIVE; AUTOMATIC CONTROL SYSTEM; EXECUTIVE BODY; SYNTHESIS; SPEED LOOP; CURRENT LOOP; POSITION LOOP

В настоящее время позиционный программно-управляемый электропривод находит все более широкое применение в различных отраслях промышленности.

В работе [1] синтезирована система автоматического регулирования (САР) с постоянным по величине моментом сопротивления методом синтеза систем подчиненного регулирования по универсальным эталонным передаточным функциям, имеющим в числителе полином нулевой степени.

На рисунке 1 представлена САР положения исполнительного органа электропривода с зависящим от скорости моментом сопротивления.

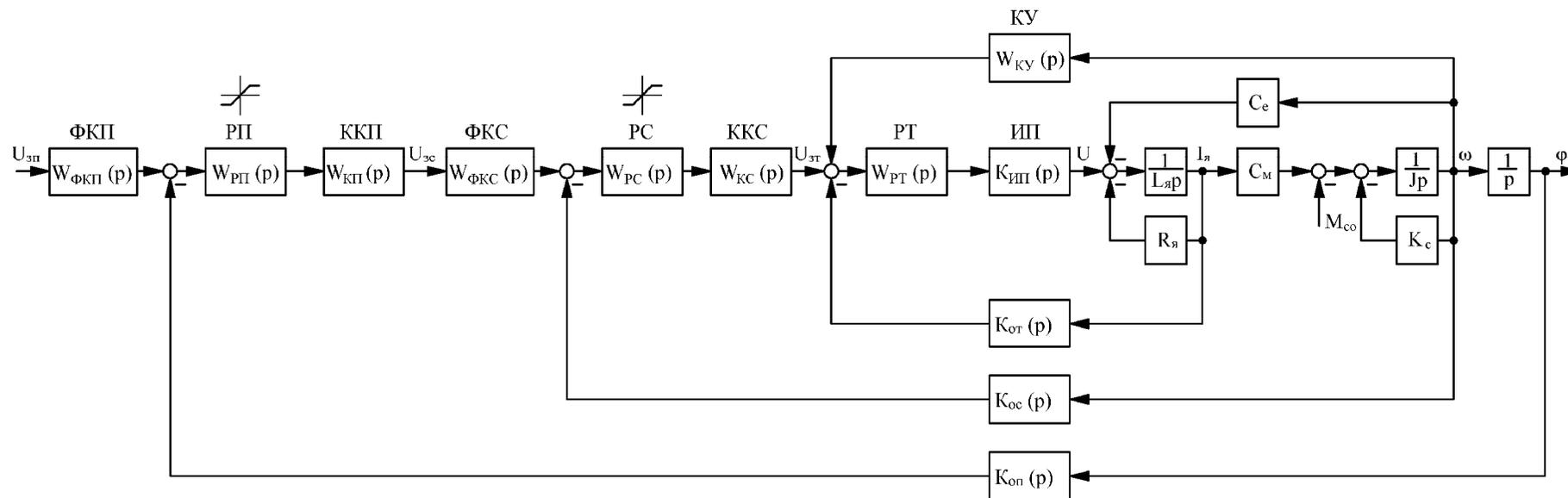


Рисунок 1. САР положения исполнительного органа электропривода с зависящим от скорости моментом сопротивления

На рисунке приняты обозначения:

- ФКП – фильтр контура положения;
- РП – регулятор положения;
- ККС – корректор контура скорости;
- ФКС – фильтр контура скорости;
- РС – регулятор скорости;
- РТ – регулятор тока;
- ИП – импульсный преобразователь;
- КУ – компенсирующее устройство;
- $U_{зп}$ – задающее напряжение контура положения, В;
- $U_{зс}$ – задающее напряжение контура скорости, В;
- $U_{зт}$ – задающее напряжение контура тока, В;
- U – напряжения, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;
- $I_{я}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А;
- $M_{со}$ – момент сопротивления электропривода, не зависящий от скорости, Н·м;
- ω – угловая скорость исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
- Φ – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $K_{ип}$ – коэффициент усиления ИП;
- C_e – коэффициент пропорциональности между скоростью и ЭДС электродвигателя, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$;
- 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 – момент инерции электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

K_c – коэффициент пропорциональности между скоростью исполнительного органа электропривода и моментом сопротивления, $\frac{Н \cdot м \cdot с}{рад}$;

$K_{от}$ – 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, $\frac{В}{рад}$;

$$W_{фкп}(p) = \frac{1}{T_{кп}p + 1};$$

$$W_{рп}(p) = K_{рп};$$

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

$$W_{фкс}(p) = \frac{T_c p + 1}{\tau_{рс} p + 1};$$

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

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

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

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

$K_{рп}$ – коэффициент усиления РП;

$T_{кп}; \tau_{кп}$ – постоянные времени ККП, с;

T_c – постоянная времени ФКС, с;

- β_{pc} – динамический коэффициент РС;
- τ_{pc} – постоянная времени РС, с;
- $T_{kc}; \tau_{kc}$ – постоянные времени ККС, с;
- β_{pt} – динамический коэффициент РТ;
- τ_{pt} – постоянная времени РТ, с;
- p – комплексный параметр преобразования Лапласа, $\frac{1}{c}$.

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 справедливо уравнение

$$(U_{зт} - K_{от} \cdot I_{я}) \cdot \beta_{pt} \cdot \frac{\tau_{pt} p + 1}{\tau_{pt} p} \cdot K_{ип} = R_{я} \cdot \left(\frac{L_{я}}{R_{я}} \cdot p + 1\right) \cdot I_{я}. \quad (1)$$

Если выбрать постоянную времени регулятора тока равную

$$\tau_{pt} = \frac{L_{я}}{R_{я}},$$

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

$$\frac{I_{я}(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{1}{K_{от}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\beta_{pt}} \cdot \frac{L_{я}}{K_{ип} K_{от}} \cdot p + 1}. \quad (2)$$

При выборе динамического коэффициента регулятора тока равным

$$\beta_{pt} = \frac{L_{я}}{K_{ип} K_{от} T_{\mu}} \quad (3)$$

передаточная функция контура тока по каналу «задающее напряжение контура тока – ток якорной цепи электродвигателя» имеет вид передаточной функции первого порядка с постоянной времени T_{μ}

$$\frac{I_{\text{я}}(p)}{U_{\text{зт}}(p)} = \frac{1}{K_{\text{от}}} \cdot \frac{1}{T_{\mu}p + 1}, \quad (4)$$

где T_{μ} – некомпенсированная постоянная времени, с.

Синтез контура скорости

Для контура скорости справедлива система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} & \left[\frac{T_{\text{с}}p + 1}{\tau_{\text{рс}}p + 1} \cdot U_{\text{зс}} - K_{\text{ос}} \cdot \omega \right] \cdot \beta_{\text{рс}} \cdot \frac{\tau_{\text{рс}}p + 1}{\tau_{\text{рс}}p} \cdot \frac{T_{\text{кс}}p + 1}{\tau_{\text{кс}}p + 1} = U_{\text{зт}}; \\ & U_{\text{зт}} = (T_{\mu}p + 1) \cdot K_{\text{от}} \cdot I_{\text{я}}; \\ & C_{\text{м}}I_{\text{я}} = M_{\text{со}} + K_{\text{с}} \cdot \omega + Jp \cdot \omega. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Если выбрать постоянную времени корректора контура скорости равную

$$T_{\text{кс}} = T_{\mu}$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\omega(p)}{U_{\text{зс}}(p)} &= \frac{1}{K_{\text{ос}}} \cdot \frac{T_{\text{с}}p + 1}{\frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}J}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \tau_{\text{кс}}\tau_{\text{рс}}p^3 + \frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}J}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \tau_{\text{рс}}p^2 +} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}K_{\text{с}}}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \tau_{\text{кс}}\tau_{\text{рс}}p^2 + \frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}K_{\text{с}}}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \tau_{\text{рс}}p + \tau_{\text{рс}}p + 1}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\omega(p)}{M_{\text{со}}(p)} &= -\frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \frac{\tau_{\text{рс}}p \cdot (\tau_{\text{кс}}p + 1)}{\frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}J}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \tau_{\text{кс}}\tau_{\text{рс}}p^3 + \frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}J}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \tau_{\text{рс}}p^2 +} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}K_{\text{с}}}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \tau_{\text{кс}}\tau_{\text{рс}}p^2 + \frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}K_{\text{с}}}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \tau_{\text{рс}}p + \tau_{\text{рс}}p + 1}. \end{aligned} \quad (7)$$

При выборе параметров регулятора скорости и фильтра контура скорости равными:

$$\beta_{pc} = 4 \cdot \left[1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{K_c T_\mu}{J} \cdot \left(1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{K_c T_\mu}{J} \right) \right] \cdot \left(1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{K_c T_\mu}{J} \right)^{-1} \cdot \frac{K_{от} J}{K_{oc} C_M T_\mu}; \quad (8)$$

$$\tau_{pc} = \left[1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{K_c T_\mu}{J} \cdot \left(1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{K_c T_\mu}{J} \right) \right] \cdot T_\mu; \quad (9)$$

$$T_c = \frac{\sqrt{2}}{2} T_\mu; \quad (10)$$

$$\tau_{kc} = \frac{1}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{K_c T_\mu}{J} \right)^{-1} \cdot T_\mu \quad (11)$$

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

$$\frac{\omega(p)}{U_{zc}(p)} = \frac{1}{K_{oc}} \cdot \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} T_\mu p + 1}{\frac{1}{32} T_\mu^3 p^3 + \frac{1}{4} T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1}; \quad (12)$$

$$\frac{\omega(p)}{M_{co}(p)} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{T_\mu}{J} \cdot \frac{\frac{1}{8} T_\mu^2 p^2 + \left(1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{K_c T_\mu}{J} \right) \cdot T_\mu p}{\frac{1}{32} T_\mu^3 p^3 + \frac{1}{4} T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1}. \quad (13)$$

Передаточная функция контура скорости по каналу управления «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа электропривода» соответствует универсальной эталонной передаточной функции третьего порядка, имеющей в числителе полином первой степени, с постоянной времени T_μ .

Синтез контура положения

Для контура положения справедлива система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} & \left[\frac{1}{T_{кп}p+1} \cdot U_{зп} - K_{оп} \cdot \varphi \right] \cdot K_{рп} \cdot \frac{T_{кп}p+1}{\tau_{кп}p+1} = U_{зс}; \\ & \left(\frac{\sqrt{2}}{2} T_{\mu}p+1 \right) \cdot U_{зс} = \left(\frac{1}{32} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{1}{4} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu}p+1 \right) \cdot K_{ос} \cdot \omega + \\ & \quad + K_{ос} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{T_{\mu}}{J} \cdot \left[\frac{1}{8} T_{\mu}^2 p^2 + \left(1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{K_c T_{\mu}}{J} \right) \cdot T_{\mu}p \right] \cdot M_{со}; \\ & \omega = p\varphi. \end{aligned} \right\} (14)$$

Если выбрать постоянную времени корректора контура положения равной

$$\tau_{кп} = \frac{\sqrt{2}}{2} T_{\mu},$$

то передаточные функции контура положения по каналам «задающее напряжение контура положения – угол поворота исполнительного органа электропривода» и «момент сопротивления электропривода - угол поворота исполнительного органа электропривода» принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{\varphi(p)}{U_{зп}(p)} &= \frac{1}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{32} T_{\mu}^3 p^4 + \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{4} T_{\mu}^2 p^3 +} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{1}{\frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot T_{\mu}p^2 + \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot p + T_{кп}p+1}; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\varphi(p)}{M_{со}(p)} &= - \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{T_{\mu}}{J} \cdot \frac{\frac{1}{8} T_{\mu}^2 p^2 + \left(1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{K_c T_{\mu}}{J} \right) \cdot T_{\mu}p}{\frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{32} T_{\mu}^3 p^4 + \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{4} T_{\mu}^2 p^3 +} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{1}{\frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot T_{\mu}p^2 + \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot p + T_{кп}p+1}. \end{aligned} \quad (16)$$

При выборе параметров регулятора положения, фильтра контура положения и корректора контура положения равными

$$K_{рп} = 2 \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп} T_{\mu}};$$

$$T_{кп} = \frac{1}{2} T_{\mu}$$

передаточные функции контура положения по каналу «задающее напряжение контура положения – угол поворота электропривода» и «момент сопротивления электропривода – угол поворота электропривода» принимают вид:

$$\frac{\varphi(p)}{U_{зп}(p)} = \frac{1}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{64} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{1}{8} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{1}{2} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1}; \quad (17)$$

$$\frac{\varphi(p)}{M_{со}(p)} = -\frac{1}{8} \cdot \frac{T_{\mu}^2}{J} \cdot \frac{\frac{1}{8} T_{\mu}^2 p^2 + \left(1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{K_c T_{\mu}}{J}\right) \cdot T_{\mu} p}{\frac{1}{64} T_{\mu}^4 p^4 + \frac{1}{8} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{1}{2} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1}. \quad (18)$$

Передаточная функция контура положения по каналу управления «задающее напряжение контура положения – угол поворота электропривода» соответствует эталонной передаточной функции четвертого порядка с постоянной времени T_{μ} .

Предлагаемая САР положения исполнительного органа электропривода с зависящим от скорости моментом сопротивления обеспечивает предельное быстродействие контуров тока, скорости и положения.

Список литературы

1 Добробаба Ю.П., Прохоренко Д.С. Позиционный программно-управляемый электропривод. Патент РФ на изобретение № 2401501. Оpubл. 10.10.2010 Бюл. № 28.

References

1 Dobrobaba Ju.P., Prohorenko D.S. Pozicionnyj programmno-upravljajemyj jelektroprivod. Patent RF na izobretenie № 2401501. Opubl. 10.10.2010 Bjul. № 28.