

62.83.52:62.503.56

*ТРЕХКОНТУРНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА*

**Ю.П. ДОБРОБАБА, В.А. МАХОВА, С.Г. МИРОНЮК**

*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
электронная почта: S.mir2393@gmail.com*

В статье выполнен синтез трехконтурной системы автоматического регулирования (САР) положения исполнительного органа электропривода постоянного тока. Синтезированная САР позволяет избавиться от систематической ошибки по перемещению исполнительного органа электропривода при отработке типовых оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения.

**Ключевые слова:** система автоматического регулирования положения, САР, угловое ускорение, электропривод, постоянный ток.

В монографии [1] синтезирована система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода постоянного тока с улучшенными характеристиками, которая описывается системой дифференциальных уравнений четвертого порядка.

В настоящее время для управления электроприводом постоянного тока используются типовые диаграммы, которые применяются для систем автоматического регулирования, описываемых системой дифференциальных уравнений третьего порядка: для малых (состоит из трех этапов); для средних (состоит из пяти этапов); для больших (состоит из семи этапов) перемещений исполнительного органа электропривода.

При отработке типовых оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода системой автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода постоянного тока с улучшенными характеристиками появляется систематическая ошибка по перемещению.

Для устранения систематической ошибки при отработке заданных диаграмм перемещения необходимо разработать: либо новые оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения (для системы описываемой дифференциальными уравнениями четвертого порядка); либо синтезировать систему автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода постоянного тока, описываемую системой дифференциальных уравнений третьего порядка.

Авторы монографии [1] пошли по первому пути и разработали оптимальные по быстродействию диаграммы для малых, средних и больших перемещений для системы, описываемой дифференциальными уравнениями четвертого порядка.

В данной работе разработана трехконтурная система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода постоянного тока, структурная схема которой представлена на рисунке. На рисунке приняты обозначения:

РП – регулятор положения;

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, приложенные к якорной цепи электродвигателя, В;

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

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

$\varepsilon$  – угловое ускорение исполнительного органа электропривода,

$$\frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$$

- $\omega$  – угловая скорость исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;
- $\varphi$  – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $K_{\text{ип}}$  – 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;
- $R_{\text{я}}$  – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;
- $L_{\text{я}}$  – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн;
- $J$  – момент инерции электропривода, кг·м<sup>2</sup>;
- $K_{\text{рп}}$  – коэффициент усиления РП;
- $\beta_{\text{рс}}$  – динамический коэффициент РС;
- $\tau_{\text{рс}}$  – постоянная времени РС, с;
- $\beta_{\text{рт}}$  – динамический коэффициент РТ;
- $\tau_{\text{рт}}$  – постоянная времени РТ, с;
- $K_{\text{от}}$  – коэффициент обратной связи по току, Ом;
- $K_{\text{ос}}$  – коэффициент обратной связи по скорости,  $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;
- $K_{\text{оп}}$  – коэффициент обратной связи по положения,  $\frac{\text{В}}{\text{рад}}$ ;
- $\tau_{\text{у}}$  – постоянная времени обратной связи по угловому ускорению на вход РС, с;
- $T_{\text{у}}$  – постоянная времени обратной связи по угловому ускорению на

- вход РП, с;
- $T_c$  – постоянная времени обратной связи по угловой скорости на вход РП, 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  $W_{кy}(p)$ .

Для контура тока уравнение баланса имеет вид

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

Если выбрать постоянную времени регулятора тока равную

$$\tau_{рт} = \frac{L_{я}}{R_{я}},$$

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

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

При выборе динамического коэффициента регулятора тока равным

$$\beta_{рт} = \frac{L_{я}}{K_{ип} K_{от} T_{\mu}}$$

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

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

где  $T_{\mu}$  – некомпенсированная постоянная времени, с.

### Синтез контура скорости

Для контура скорости уравнения баланса имеют вид

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

Если выбрать постоянную времени регулятора скорости равную

$$\tau_{\text{рс}} = T_{\mu},$$

то 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:

$$\frac{\omega(p)}{U_{\text{зс}}(p)} = \frac{1}{K_{\text{ос}}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}J}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot T_{\mu}p^2 + \tau_y p + 1};$$

$$\frac{\omega(p)}{M_{\text{с}}(p)} = -\frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot \frac{T_{\mu}p}{\frac{1}{\beta_{\text{рс}}} \cdot \frac{K_{\text{от}}J}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}} \cdot T_{\mu}p^2 + \tau_y p + 1}.$$

При выборе параметров регулятора скорости и постоянной времени обратной связи по угловому ускорению равными:

$$\beta_{\text{рс}} = 2 \cdot \frac{K_{\text{от}}J}{K_{\text{ос}}C_{\text{м}}T_{\mu}};$$

$$\tau_y = T_\mu$$

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:

$$\frac{\omega(p)}{U_{зс}(p)} = \frac{1}{K_{ос}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2}T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1};$$

$$\frac{\omega(p)}{M_{со}(p)} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{T_\mu}{J} \cdot \frac{T_\mu p}{\frac{1}{2}T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1}.$$

Передаточная функция контура скорости по каналу управления «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа электропривода» соответствует эталонной передаточной функции второго порядка с постоянной времени  $T_\mu$ .

### Синтез контура положения

Для контура положения уравнения баланса имеют вид

$$\left. \begin{aligned} & \left[ U_{зп}(p) - K_{оп} T_y^2 \cdot \varepsilon(p) - K_{оп} T_c \cdot \omega(p) - K_{оп} \cdot \varphi(p) \right] \cdot K_{рп} = U_{зс}(p); \\ & U_{зс}(p) = \left( \frac{1}{2} T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1 \right) \cdot K_{ос} \cdot \omega(p) + K_{ос} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T_\mu}{J} \cdot T_\mu p \cdot M_{со}(p); \\ & \varepsilon(p) = p \cdot \omega(p); \\ & \omega(p) = p \cdot \varphi(p) \end{aligned} \right\}$$

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

$$\frac{\varphi(p)}{U_{зп}(p)} = \frac{1}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{2} T_{\mu}^2 p^3 + \left( \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot T_{\mu} + \right.}$$

$$\left. + T_y^2 \right) \cdot p^2 + \left( \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} + T_c \right) \cdot p + 1};$$

$$\frac{\varphi(p)}{M_{со}(p)} = -\frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{\mu}}{J} \cdot \frac{T_{\mu} p}{\frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{4} T_{\mu}^2 p^3 +}$$

$$\left. + \left( \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} \cdot T_{\mu} + T_y^2 \right) \cdot p^2 + \left( \frac{1}{K_{рп}} \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп}} + T_c \right) \cdot p + 1}.$$

При выборе параметров регулятора положения, постоянных времени обратных связей по угловому ускорению и угловой скорости равными:

$$K_{рп} = 4 \cdot \frac{K_{ос}}{K_{оп} T_{\mu}};$$

$$T_y^2 = \frac{1}{4} T_{\mu}^2;$$

$$T_c = \frac{3}{4} T_{\mu}$$

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:

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

$$\frac{\varphi(p)}{M_{со}(p)} = -\frac{1}{8} \cdot \frac{T_{\mu}^2}{J} \cdot \frac{T_{\mu} p}{\frac{1}{8} T_{\mu}^3 p^3 + \frac{1}{2} T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1}.$$

Передаточная функция контура положения по каналу управления «задающее напряжение контура положения – угол поворота исполнительного органа электропривода» соответствует эталонной передаточной функции третьего порядка с постоянной времени  $T_{\mu}$ .

Предлагаемая трехконтурная САР положения исполнительного органа электропривода постоянного тока отработывает типовые оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода без систематической ошибки по перемещению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Добробаба Ю.П., Хорцев А.Л. Особо точный позиционный электропривод постоянного тока. – Монография. Краснодар, изд-во КубГТУ – 2014. 104с.

#### REFERENCES

1 Dobrobaba Ju.P.,Khortsev A.L. – Monography. Krasnodar, KubSTU – 2014. – 104p.

#### *THREE-CIRCUIT SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF THE POSITION OF THE EXECUTIVE BODY OF THE DC DRIVE*

**Yu.P. DOBROBABA, V.A. MAKHOVA, S.G. MIRONYuK**

*Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072;  
e-mail: S.mir2393@gmail.com*

In this paper the synthesis of a three-loop automatic control systems (ATS) position of the Executive body of the DC drive. Synthesized ATS allows you to get rid of systematic errors on the displacement of the Executive body of the actuator when developing a model of optimal performance diagrams of displacement.

Keywords: system of automatic regulation of the provision of ATS, angular acceleration, electric, DC.



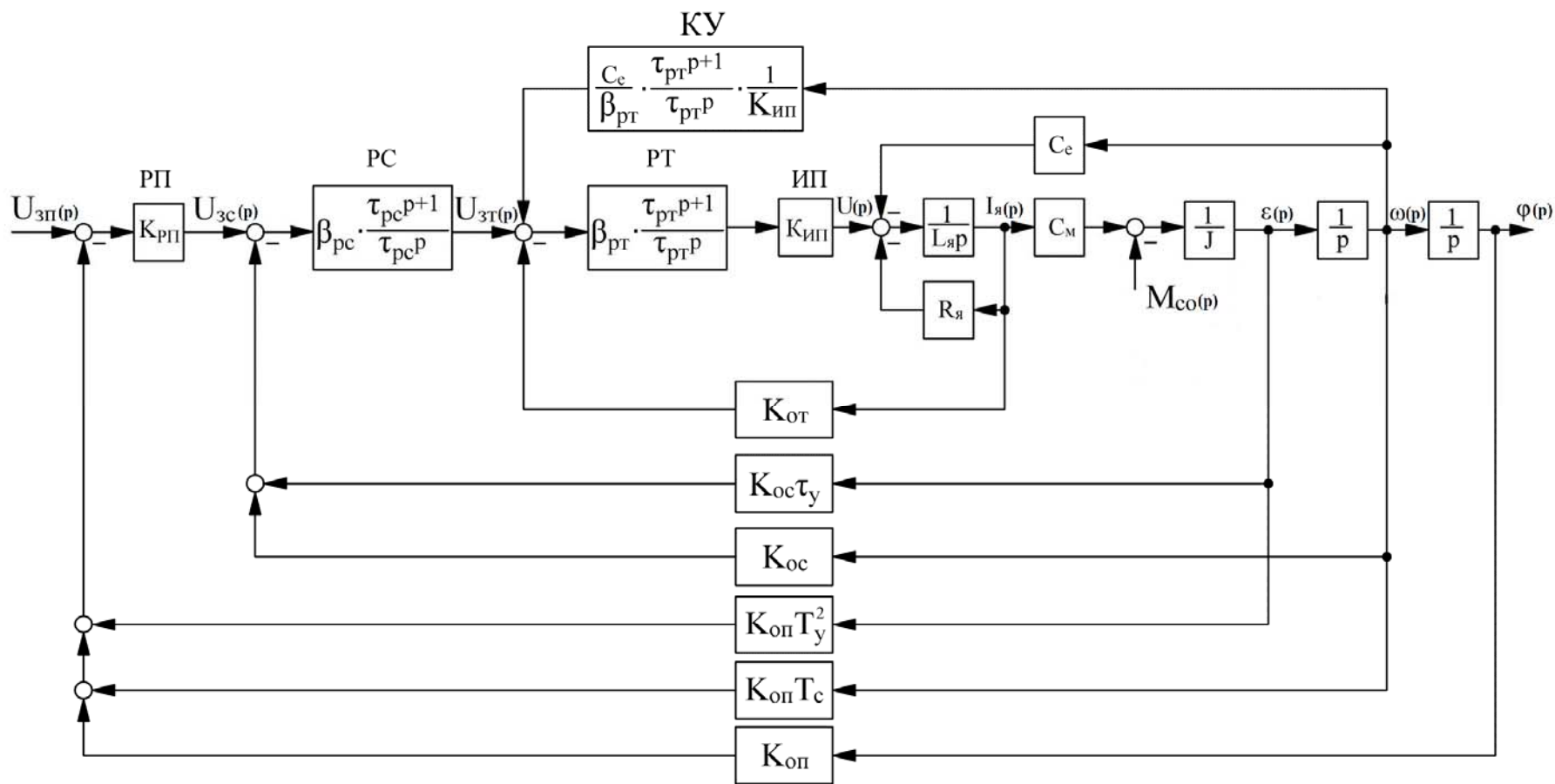


Рисунок – Структурная схема трехконтурной системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода постоянного тока