62.83.52:62.503.56

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА МЕХАНИЗМА

♦♦♦♦♦

OPTIMUM OPTIMAL TRANSITION CHARACTERISTICS OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC REGULATION OF ANGULAR SPEED OF THE EXECUTIVE AUTHORITY OF THE MECHANISM

Добробаба Юрий Петрович
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный
технологический университет

Овсиенко Виктория Александровна
студентка,
Кубанский государственный
технологический университет
alexandrovnav32@mail.ru

Dobrobaba Yuri Petrovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor
of the Department of Power Supplyof
Industrial Enterprises,
Kuban state technological university

Ovsienko Victoria Alexandrovna
Student,
Kuban State technological university
alexandrovnav32@mail.ru

Аннотация. В статье разработана система автоматического регулирования угловой скорости исполнительного органа механизма, получено математическое обеспечение, позволяющее определить параметры оптимальной по быстродействию диаграммы изменения угловой скорости исполнительного органа механизма.

Ключевые слова: оптимальные по быстродействию переходные характеристики, система автоматического регулирования, угловая скорость, исполнительный орган механизма.

Annotation. In article the system of automatic regulation of angular speed of executive body of the mechanism is developed, the mathematical maintenance allowing to define parameters of the diagram of change of angular speed of executive body of the mechanism optimum on speed is received.

Keywords: transient performance optimal in speed, automatic control system, angular velocity, mechanism executive body.

В предыдущих статьях разработаны оптимальные по быстродействию диаграммы для малых и больших изменений угловой скорости исполнительного электропривода, а также близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода постоянного тока.

В данной работе планируется разработать оптимальные по быстродействию переходные характеристики системы автоматического регулирования угловой скорости исполнительного органа механизма.

На рисунке 1 представлена структурная схема автоматического регулирования угловой скорости исполнительного органа механизма, где приняты следующие обозначения:

ФКС – фильтр контура скорости;
РС – регулятор скорости;
РТ – регулятор тока;
ИП – импульсный преобразователь;
КУ – компенсирующее устройство;
$U_{ЗС}$ – задающее напряжение контура скорости, В;
$U_{ЗТ}$ – задающее напряжение контура тока, В;
U – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;
$I_{Я}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А;
$М_{С}$ – момент сопротивления электропривода, $Н \cdot м$;

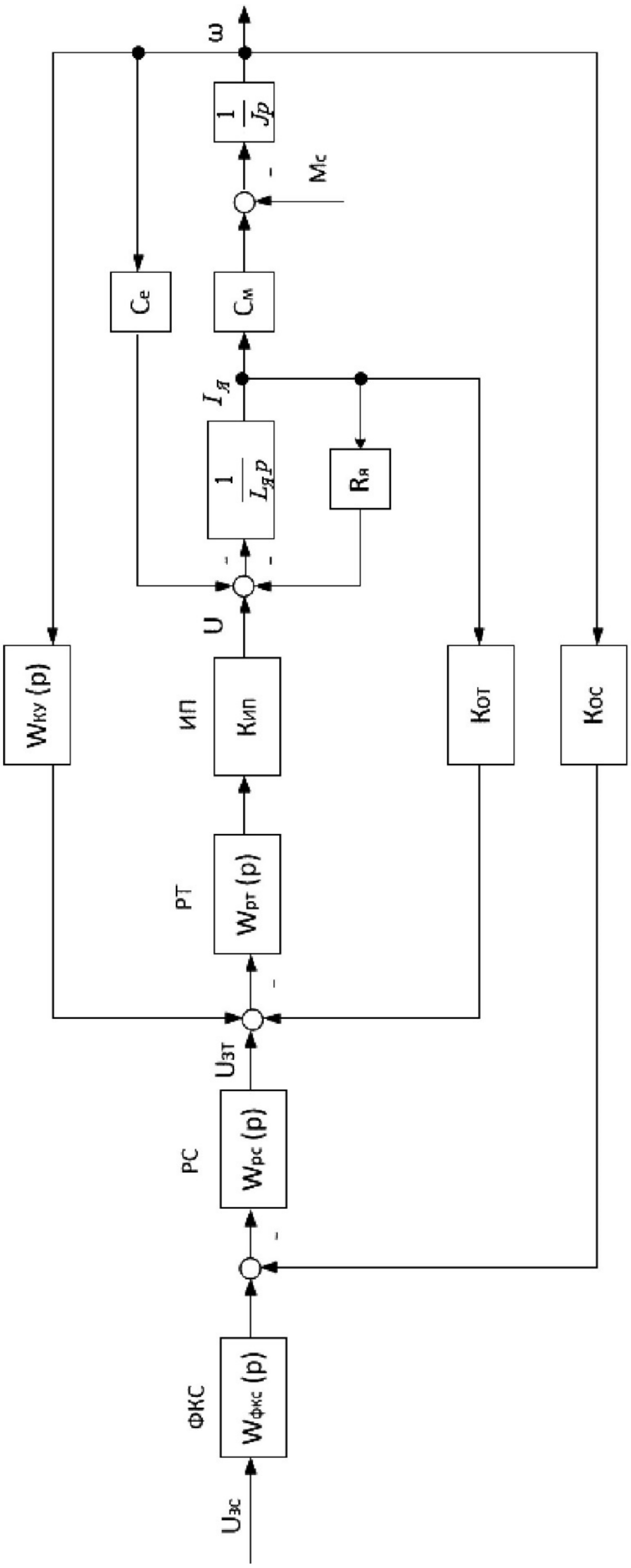

Рисунок 1 –Структурная схема системы автоматического регулирования угловой скорости исполнительного органа механизма

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

$\text{К}_{\text{ИП}}$ – коэффициент усиления ИП;

C_{e} – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС электродвигателя, $\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}$;

$\text{C}_{\text{М}}$ – 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·м².

$\text{К}_{\text{ОТ}}$ – коэффициент обратной связи по току, Ом;

$\text{К}_{\text{ОС}}$ – коэффициент обратной связи по скорости, $\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}$;

$W_{\text{фкс}}(p) = \frac{\tau_c p+1}{\tau_{pc} p+1}$;

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

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

$W_{\text{ку}}(p) = \frac{\text{C}_{\text{e}}}{\beta_{\text{рт}}} \cdot \frac{\tau_{pт} p}{\tau_{pт} p+1} \cdot \frac{1}{\text{К}_{\text{ИП}}}$;

τ_{c} – постоянная времени ФКС, с;

$\beta_{\text{рс}}$ – динамический коэффициент РС;

$\tau_{\text{рс}}$; $\text{T}_{\text{рс}}$; T_{c} – постоянные времени РС, с;

$\beta_{\text{рт}}$ – динамический коэффициент РТ;

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

p – комплексный параметр преобразования Лапласа, $\frac{1}{\text{с}}$.

Синтез контура тока

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

При выборе динамического коэффициента и постоянной времени регулятора тока, равными:

$$\beta_{\text{рт}} = \frac{L_{\text{Я}}}{\text{К}_{\text{ИП}}\text{К}_{\text{ОТ}}T_\mu};$$

$$\tau_{\text{рт}} = \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}},$$

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, где T_μ – некомпенсируемая постоянная времени, с.

$$\frac{I_{\text{Я}}(\text{p})}{U_{\text{ЗТ}}(\text{p})} = \frac{1}{\text{К}_{\text{от}}} \cdot \frac{1}{T_\mu p + 1}.$$

Синтез контура скорости

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

$$\beta_{\text{рс}} = 3 \cdot \frac{\text{К}_{\text{ОТ}}J}{\text{К}_{\text{ОС}}\text{C}_{\text{М}}T_\mu};$$

$$T_{\text{рс}} = T_\mu;$$

$$T_{\text{c}} = \frac{1}{9}T_\mu;$$

$$\tau_{\text{рс}} = T_\mu.$$

Передаточная функция контура скорости по каналу управления «задающее напряжение контура скорости – угловая скорость исполнительного органа электропривода» принимает вид:

$$\frac{\omega(p)}{U_{\text{ЗС}}(p)}=\frac{1}{\text{К}_{\text{ОС}}}\cdot\frac{1}{\frac{1}{27}T_\mu^3p^3+\frac{1}{3}T_\mu^2p^2+T_\mu p+1}.$$

Так как характеристическое уравнение контура скорости имеет три равных корня, то переходная характеристика по каналу управления имеет монотонный вид (отсутствует перерегулирование).

Этап 1. В интервале времени: $0\le t\le t_1$.

$$U_{ЗС}(t)=U_{ЗС\max};$$

$$\omega(t)=\left[1-(1+3\cdot\frac{t}{T_\mu}+\frac{9}{2}\cdot\frac{t^2}{T_\mu^2})\cdot e^{-3\frac{t}{T_\mu}}\right]\cdot\frac{U_{ЗС\max}}{K_{oc}};$$

$$I_Я(t)=\frac{27}{2}\cdot\frac{t^2}{T_\mu^2}\cdot e^{-3\cdot\frac{t}{T_\mu}}\cdot\frac{J}{C_MT_\mu}\cdot\frac{U_{ЗС\max}}{K_{oc}};$$

$$U(t)=C_e\cdot\left[1-\left(1+3\cdot\frac{t}{T_\mu}+\frac{9}{2}\cdot\frac{t^2}{T_\mu^2}\right)\cdot e^{-3\cdot\frac{t}{T_\mu}}\right]\cdot\frac{U_{ЗС\max}}{K_{oc}}+\frac{27}{2}\cdot\frac{t^2}{T_\mu^2}\cdot e^{-3\cdot\frac{t}{T_\mu}}\cdot\frac{R_ЯJ}{C_MT_\mu}\cdot\frac{U_{ЗС\max}}{K_{oc}}+$$

$$+\left(27\cdot\frac{t}{T_\mu}-\frac{81}{2}\cdot\frac{t^2}{T_\mu^2}\right)\cdot e^{-3\cdot\frac{t}{T_\mu}}\cdot\frac{L_ЯJ}{C_MT_\mu^2}\cdot\frac{U_{ЗС\max}}{K_{oc}}.$$

Так как напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, в конце первого этапа равно допустимому значению напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя, то:

$$U_{доп}=C_e\cdot\left[1-\left(1+3\cdot\frac{t_1}{T_\mu}+\frac{9}{2}\cdot\frac{t_1^2}{T_\mu^2}\right)\cdot e^{-3\cdot\frac{t_1}{T_\mu}}\right]\cdot\frac{U_{ЗС\max}}{K_{oc}}+\frac{27}{2}\cdot\frac{t_1^2}{T_\mu^2}\cdot e^{-3\cdot\frac{t_1}{T_\mu}}\cdot\frac{R_ЯJ}{C_MT_\mu}\cdot\frac{U_{ЗС\max}}{K_{oc}}+$$

$$+\left(27\cdot\frac{t_1}{T_\mu}-\frac{81}{2}\cdot\frac{t_1^2}{T_\mu^2}\right)\cdot e^{-3\cdot\frac{t_1}{T_\mu}}\cdot\frac{L_ЯJ}{C_MT_\mu^2}\cdot\frac{U_{ЗС\max}}{K_{oc}}.$$

Из данного уравнения определяем длительность первого этапа.

Этап 2. В интервале времени $t_1\le t\le(t_1+t_2)$:

$$U(t)=U_{доп};$$

$$\omega(t)=A_2\cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}}+B_2\cdot e^{-\frac{t-t_1}{T2}}+C_2;$$

$$I_Я(t)=\frac{J}{C_M}\cdot\left[-\frac{A_2}{T_1}\cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}}-\frac{B_2}{T_2}\cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}}\right];$$

$$U_{ЗС}(t)=K_{oc}\cdot\left\{\frac{1}{27}T_\mu^3\cdot\left[-\frac{A_2}{T_1^3}\cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}}-\frac{B_2}{T_2^3}\cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}}\right]+\frac{1}{3}T_\mu\cdot\left[\frac{A_2}{T_1^2}\cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}}+\frac{B_2}{T_2^2}\cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}}\right]+\right.$$

$$+T_\mu \cdot \left[-\frac{A_2}{T_1} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}} - \frac{B_2}{T_2} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}} \right] + \left[A_2 \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}} + B_2 \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}} + C_2 \right] \Bigg\},$$

где

$$A_2 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \omega_1 + \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \cdot \omega_1^{(1)} - \frac{T_1}{T_1 - T} \frac{U_{доп}}{C_e};$$

$$B_2 = -\frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \omega_1 - \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \cdot \omega_1^{(1)} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{доп}}{C_e};$$

$$C_2 = \frac{U_{доп}}{C_e}.$$

При этом:

$$\omega_1 = \left[1 - (1 + 3 \cdot \frac{t_1}{T_\mu} + \frac{9}{2} \cdot \frac{t_1^2}{T_\mu^2}) \cdot e^{-3\frac{t_1}{T_\mu}} \right] \cdot \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ос}};$$

$$\omega_1^{(1)} = \frac{27}{2T_\mu} \cdot \frac{t_1^2}{T_\mu^2} \cdot e^{-3 \cdot \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ос}}.$$

Этап 3. В интервале времени $(t_1 + t_2) \le t \le (t_1 + t_2 + t_3)$:

$$U_{ЗС}(t) = -U_{ЗС\max};$$

$$\omega(t) = A_3 \cdot e^{-3 \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu}} + B_3 \cdot (t - t_1 - t_2) \cdot e^{-3 \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu}} + C_3 \cdot (t - t_1 - t_2)^2 \cdot e^{-3 \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu}} + D_3;$$

$$I_Я(t) = \frac{J}{C_М} \cdot \left[\left(-3 \cdot \frac{A_3}{T_\mu} + B_3 \right) + \left(-3 \cdot \frac{B_3}{T_\mu} + 2C_3 \right) \cdot \left(t - t_1 - t_2 \right) - 3 \cdot \frac{C_3}{T_\mu} \cdot \left(t - t_1 - t_2 \right)^2 \right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu}};$$

$$U(t) = C_e \cdot \left\{ \left[A_3 + B_3 \cdot \left(t - t_1 - t_2 \right) + C_3 \cdot \left(t - t_1 - t_2 \right)^2 \right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu}} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}} \right\} + \frac{R_Я J}{C_М} \cdot \left[\left(-3 \cdot \frac{A_3}{T_\mu} + B_3 \right) + \right.$$

$$\left. + \left(-3 \cdot \frac{B_3}{T_\mu} + 2C_3 \right) \cdot \left(t - t_1 - t_2 \right) - 3 \cdot \frac{C_e}{T_\mu} \cdot \left(t - t_1 - t_2 \right)^2 \right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu}} + \frac{L_Я J}{C_М} \times$$

$$\times \left[\left(9 \cdot \frac{A_3}{T_\mu^2} - 6 \cdot \frac{B_3}{T_\mu} + 2C_3 \right) + \left(9 \cdot \frac{B_3}{T_\mu^2} - 12 \cdot \frac{C_3}{T_\mu} \right) \cdot \left(t - t_1 - t_2 \right) + 9 \cdot \frac{C_3}{T_\mu^2} \cdot \left(t - t_1 - t_2 \right)^2 \right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu}},$$

где

$$A_3 = \omega_2 + \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}};$$

$$B_3 = \frac{3}{T_\mu} \cdot \omega_2 + \omega_2^{(1)} + \frac{3}{T_\mu} \cdot \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}};$$

$$C_3 = \frac{9}{2T_\mu^2} \cdot \omega_2 + \frac{3}{T_\mu} \omega_2^{(1)} + \frac{1}{2} \omega_2^{(2)} + \frac{9}{2T_\mu^2} \cdot \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}},$$

$$D_3 = -\frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}.$$

При этом:

$$\omega_2 = A_2 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} + B_2 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} + C_2;$$

$$\omega_2^{(1)} = -\frac{A_2}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} - \frac{B_2}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}};$$

$$\omega_2^{(2)} = \frac{A_2}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} + \frac{B_2}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}}.$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \left\{ \omega_2^{(1)} + \left[\frac{3}{T_\mu} \cdot \omega_2^{(1)} + \omega_2^{(2)} \right] \cdot t_3 - \left[\frac{27}{2T_\mu^3} \cdot \omega_2 + \frac{9}{T_\mu^2} \cdot \omega_2^{(1)} + \frac{3}{2T_\mu} \cdot \omega_2^{(2)} + \frac{27}{2T_\mu^3} \cdot \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right] \cdot t_3^2 \right\} \cdot e^{-3 \cdot \frac{t_3}{T_\mu}}.$$

$$\omega_2^{(2)} - \left[\frac{27}{T_\mu^3} \cdot \omega_2 + \frac{27}{T_\mu^2} \cdot \omega_2^{(1)} + \frac{6}{T_\mu} \cdot \omega_2^{(2)} + \frac{27}{T_\mu^3} \cdot \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right] \cdot t_3 + \left[\frac{81}{2T_\mu^4} \cdot \omega_2 + \frac{27}{T_\mu^3} \cdot \omega_2^{(1)} + \frac{9}{2T_\mu^2} \cdot \omega_2^{(2)} + \right.$$

$$\left. + \frac{81}{2T_\mu^4} \cdot \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right] \cdot t_3^2 = 0.$$

Из вышеуказанных уравнений определяем длительности второго и третьего этапов соответственно.

Этап 4. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3) \le t \le (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)$:

$$I_Я(t) = I_{доп};$$

$$\omega(t) = \omega_3 + \frac{C_M I_{доп}}{J} \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 \right);$$

$$U(t) = C_e \cdot \left[\omega_3 + \frac{C_M I_{доп}}{J} \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 \right) \right] + R_Я I_{доп};$$

$$U_{3C}(t) = K_{OC} \cdot \left[T_\mu \cdot \frac{C_M I_{доп}}{J} + \omega_3 + \frac{C_M I_{доп}}{J} \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 \right) \right].$$

При этом:

$$\omega_3 = \left(A_3 + B_3 \cdot t_3 + C_3 \cdot t_3^2 \right) \cdot e^{-3 \cdot \frac{t_3}{T_\mu}} - \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}}.$$

Этап 5. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \le t \le (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5)$:

$$U_{3C}(t) = -U_{3C\max};$$

$$\omega(t) = A_5 \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4}{T_\mu}} + B_5 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4}{T_\mu}} + C_5 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^2 \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4}{T_\mu}} + D_5;$$

$$I_Я(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \left[\left(-3 \cdot \frac{A_5}{T_\mu} + B_5 \right) + \left(-3 \cdot \frac{B_5}{T_\mu} + 2C_5 \right) \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 \right) - 3 \cdot \frac{C_5}{T_\mu} \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 \right)^2 \right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4}{T_\mu}};$$

$$U(t) = C_e \cdot \left\{ \left[A_5 + B_5 \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 \right) + C_5 \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 \right)^2 \right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4}{T_\mu}} - \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right\} +$$

$$+\frac{R_Я J}{C_M}\cdot\left[\left(-3\cdot\frac{A_5}{T_\mu}+B_5\right)+\left(-3\cdot\frac{B_5}{T_\mu}+2C_5\right)\cdot(t-t_1-t_2-t_3-t_4)-3\cdot\frac{C_5}{T_\mu}\cdot(t-t_1-t_2-t_3-t_4)^2\right]\times$$

$$\times e^{-3\cdot\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4}{T_\mu}}+\frac{L_Я J}{C_M}\cdot\left[\left(9\cdot\frac{A_5}{T_\mu^2}-6\cdot\frac{B_5}{T_\mu}+2C_5\right)+\left(9\cdot\frac{B_5}{T_\mu^2}-12\cdot\frac{C_5}{T_\mu}\right)\cdot(t-t_1-t_2-t_3-t_4)+\right.$$

$$\left.+9\cdot\frac{C_5}{T_\mu^2}\cdot(t-t_1-t_2-t_3-t_4)^2\right]\cdot e^{-3\cdot\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4}{T_\mu}},$$

где

$$A_5=\omega_4+\frac{U_{ЗC\max}}{K_{OC}};$$

$$B_5=\frac{3}{T_\mu}\cdot\omega_4+\frac{C_M I_{доп}}{J}+\frac{3}{T_\mu}\cdot\frac{U_{ЗC\max}}{K_{OC}};$$

$$C_5=\frac{9}{2T_\mu^2}\cdot\omega_4+\frac{3}{T_\mu}\cdot\frac{C_M I_{доп}}{J}+\frac{9}{2T_\mu^2}\cdot\frac{U_{ЗC\max}}{K_{OC}};$$

$$D_5=-\frac{U_{ЗC\max}}{K_{OC}}.$$

При этом:

$$\omega_4=\omega_3+\frac{C_M I_{доп}}{J}\cdot t_4.$$

Этап 6. В интервале времени $(t_1+t_2+t_3+t_4+t_5)\le t\le(t_1+t_2+t_3+t_4+t_5+t_6)$:

$$U(t)=-U_{доп};$$

$$\omega(t)=A_6\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_1}}+B_6\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_2}}+C_6;$$

$$I_Я(t)=\frac{J}{C_M}\cdot\left[-\frac{A_6}{T_1}\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_1}}-\frac{B_6}{T_2}\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_2}}\right];$$

$$U(t)=K_{OC}\cdot\left\{\frac{1}{27}T_\mu^3\cdot\left[-\frac{A_6}{T_1^3}\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_1}}-\frac{B_6}{T_2^3}\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_2}}\right]+\frac{1}{3}T_\mu^2\times\right.$$

$$\times\left[\frac{A_6}{T_1^2}\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_1}}+\frac{B_6}{T_2^2}\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_2}}\right]+T_\mu\cdot\left[-\frac{A_6}{T_1}\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_1}}-\frac{B_6}{T_2}\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_2}}\right]+$$

$$\left.+\left[A_6\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_1}}+B_6\cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2-t_3-t_4-t_5}{T_2}}+C_6\right]\right\},$$

где

$$A_6=\frac{T_1}{T_1-T_2}\cdot\omega_5+\frac{T_1T_2}{T_1-T_2}\cdot\omega_5^{(1)}+\frac{T_1}{T_1-T_2}\cdot\frac{U_{доп}}{C_e};$$

$$B_6 = -\frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \omega_5 - \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \cdot \omega_5^{(1)} - \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{доп}}{C_e};$$

$$C_6 = -\frac{U_{доп}}{C_e}.$$

При этом:

$$\omega_5 = \left(A_5 + B_5 \cdot t_5 + C_5 \cdot t_5^2\right) \cdot e^{-3 \cdot \frac{t_5}{T_\mu}} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}};$$

$$\omega_5^{(1)} = \left[\left(-3 \cdot \frac{A_5}{T_\mu} + B_5\right) + \left(-3 \cdot \frac{B_5}{T_\mu} + 2C_5\right) \cdot t_5 - 3 \cdot \frac{C_5}{T_\mu} \cdot t_5^2\right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t_5}{T_\mu}};$$

Этап 7. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6) \le t \le (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7)$:

$$U_{ЗС}(t) = U_{ЗС\max};$$

$$\omega(t) = A_7 \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6}{T_\mu}} + B_7 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6) \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6}{T_\mu}} +$$
$$+ C_7 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6)^2 \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6}{T_\mu}} + D_7;$$

$$I_Я(t) = \frac{J}{C_М} \cdot \left[\left(-3 \cdot \frac{A_7}{T_\mu} + B_7\right) + \left(-3 \cdot \frac{B_7}{T_\mu} + 2C_7\right) \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6\right) - 3 \cdot \frac{C_7}{T_\mu} \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6\right)^2\right] \times$$
$$\times e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6}{T_\mu}};$$

$$U(t) = C_e \cdot \left\{\left[A_7 + B_7 \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6\right) + C_7 \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6\right)^2\right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6}{T_\mu}} +\right.$$
$$\left. + \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right\} + \frac{R_Я J}{C_М} \cdot \left[\left(-3 \cdot \frac{A_7}{T_\mu} + B_7\right) + \left(-3 \cdot \frac{B_7}{T_\mu} + 2C_7\right) \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6\right) -\right.$$
$$\left. - 3 \cdot \frac{C_7}{T_\mu} \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6\right)^2\right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6}{T_\mu}} + \frac{L_Я J}{C_М} \cdot \left[\left(9 \cdot \frac{A_7}{T_\mu^2} - 6 \cdot \frac{B_7}{T_\mu} + 2C_7\right) +\right.$$
$$\left. + \left(9 \cdot \frac{B_7}{T_\mu^2} - 12 \frac{C_7}{T_\mu}\right) \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6\right) + 9 \cdot \frac{C_7}{T_\mu^2} \cdot \left(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6\right)^2 \cdot e^{-3 \cdot \frac{t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6}{T_\mu}}\right.,$$

где

$$A_7 = \omega_6 - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}};$$

$$B_7 = \frac{3}{T_\mu} \omega_6 + \omega_6^{(1)} - \frac{3}{T_\mu} \cdot \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}};$$

$$C_7 = \frac{9}{2T_\mu^2} \cdot \omega_6 + \frac{3}{T_\mu} \cdot \omega_6^{(1)} + \frac{1}{2} \cdot \omega_6^{(2)} - \frac{9}{2T_\mu^2} \cdot \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}.$$

$$D_7 = \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}}.$$

При этом:

$$\omega_6 = A_6 \cdot e^{-\frac{t_6}{T_1}} + B_6 \cdot e^{-\frac{t_6}{T_2}} + C_6;$$

$$\omega_6^{(1)} = -\frac{A_6}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_6}{T_1}} - \frac{B_6}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_6}{T_2}};$$

$$\omega_6^{(2)} = \frac{A_6}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t_6}{T_1}} + \frac{B_6}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t_6}{T_2}}.$$

Так как угловая скорость исполнительного органа механизма в конце седьмого этапа равна конечному значению угловой скорости исполнительного органа механизма, то:

$$\omega_{кон} = \left(A_7 + B_7 \cdot t_7 + C_7 \cdot t_7^2\right) e^{-3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}} + \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}}.$$

Так как первая производная угловой скорости исполнительного органа механизма в конце седьмого этапа равна нулю, то:

$$\left(-3 \cdot \frac{A_7}{T_\mu} + B_7\right) + \left(-3 \cdot \frac{B_7}{T_\mu} + 2C_7\right) \cdot t_7 - 3 \cdot \frac{C_7}{T_\mu} \cdot t_7^2 = 0.$$

Так как вторая производная угловой скорости исполнительного органа механизма в конце седьмого этапа равна нулю, то:

$$\left(9 \cdot \frac{A_7}{T_\mu^2} - 6 \cdot \frac{B_7}{T_\mu^2} + 2C_7\right) + \left(9 \cdot \frac{B_7}{T_\mu^2} - 12 \cdot \frac{C_7}{T_\mu}\right) \cdot t_7 + 9 \cdot \frac{C_7}{T_\mu^2} \cdot t_7^2 = 0.$$

Из системы уравнений получаем коэффициенты:

$$\begin{cases} C_7 = \dfrac{9}{2T_\mu^2} \cdot \left(\omega_{кон} - \dfrac{U_{3C\max}}{K_{OC}}\right) \cdot e^{3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}}; \\ B_7 = \dfrac{3}{T_\mu} \cdot \left(\omega_{кон} - \dfrac{U_{3C\max}}{K_{OC}}\right) \cdot e^{3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}} - \dfrac{9}{2T_\mu^2} \cdot \left(\omega_{кон} - \dfrac{U_{3C\max}}{K_{OC}}\right) \cdot t_7 \cdot e^{3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}}; \\ A_7 = \left(\omega_{кон} - \dfrac{U_{3C\max}}{K_{OC}}\right) \cdot e^{3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}} - \dfrac{3}{T_\mu} \cdot \left(\omega_{кон} - \dfrac{U_{3C\max}}{K_{OC}}\right) \cdot t_7 \cdot e^{3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}} + \dfrac{9}{2T_\mu^2} \cdot \left(\omega_{кон} - \dfrac{U_{3C\max}}{K_{OC}}\right) \cdot t_7^2 \cdot e^{3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}}. \end{cases}$$

При этом:

$$I_{Я7} = 0;$$

$$I_{Я7}^{(1)} = 0;$$

$$U_7 = C_e \omega_{кон}.$$

Из полученных коэффициентов следует:

$$\omega_6 = \left(\omega_{кон} - \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}}\right) \cdot e^{3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}} - \frac{3}{T_\mu} \cdot \left(\omega_{кон} - \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}}\right) \cdot t_7 \cdot e^{3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}} + \frac{9}{2T_\mu^2} \cdot \left(\omega_{кон} - \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}}\right) \cdot t_7^2 \cdot e^{3 \cdot \frac{t_7}{T_\mu}} + \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}}.$$

$$\omega_6^{(1)} = -\frac{27}{2T_\mu^3}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right)\cdot t_7^2\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}.$$

$$\omega_6^{(2)} = \frac{27}{2T_\mu^3}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right)\cdot t_7\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}} + \frac{81}{2T_\mu^4}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right)\cdot t_7^2\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}.$$

При этом:

$$I_{Я6} = -\frac{27}{2}\cdot\frac{t_7^2}{T_\mu^2}\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}\cdot\frac{J}{C_M T_\mu}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right);$$

$$I_{Я6}^{(1)} = \left(27\cdot\frac{t_7}{T_\mu} + \frac{81}{2}\cdot\frac{t_7^2}{T_\mu^2}\right)\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}\cdot\frac{J}{C_M T_\mu}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right);$$

$$U_6 = C_e\cdot\left[\frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}} + \left(1 - 3\cdot\frac{t_7}{T_\mu} + \frac{9}{2}\cdot\frac{t_7^2}{T_\mu^2}\right)\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right)\right] - \frac{27}{2}\cdot\frac{t_7^2}{T_\mu^2}\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}\cdot\frac{R_Я J}{C_M T_\mu}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right) +$$

$$+\left(27\cdot\frac{t_7}{T_\mu} + \frac{81}{2}\cdot\frac{t_7^2}{T_\mu^2}\right)\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}\cdot\frac{L_Я J}{C_M T_\mu^2}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right).$$

Так как напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, в конце шестого этапа равно допустимому значению напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя, со знаком «минус», то:

$$-U_{доп} = C_e\cdot\left[\frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}} + \left(1 - 3\cdot\frac{t_7}{T_\mu} + \frac{9}{2}\cdot\frac{t_7^2}{T_\mu^2}\right)\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right)\right] - \frac{27}{2}\cdot\frac{t_7^2}{T_\mu^2}\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}\cdot\frac{R_Я J}{C_M T_\mu}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right) +$$

$$+\left(27\cdot\frac{t_7}{T_\mu} + \frac{81}{2}\cdot\frac{t_7^2}{T_\mu^2}\right)\cdot e^{3\cdot\frac{t_7}{T_\mu}}\cdot\frac{L_Я J}{C_M T_\mu^2}\cdot\left(\omega_{кон} - \frac{U_{ЗС\max}}{K_{ОС}}\right).$$

Из данного уравнения определяется длительность седьмого этапа.

Из зависимостей для конечных значений скорости и ее первой и второй производных в конце шестого этапа следует, что:

$$A_6 = \left[\frac{T_1 - T_2}{T_1}\cdot\omega_6 + \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6^{(1)} + \frac{T_1}{T_1 - T_2}\cdot\frac{U_{доп}}{C_e}\right]\cdot e^{-\frac{t_6}{T_1}}.$$

$$B_6 = -\left[\frac{T_2}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6 + \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6^{(1)} + \frac{T_2}{T_1 - T_2}\cdot\frac{U_{доп}}{C_e}\right]\cdot e^{-\frac{t_6}{T_2}}.$$

$$\omega_6^{(2)} = -\frac{1}{T_1 T_2}\cdot\omega_6 - \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2}\cdot\omega_6^{(1)} - \frac{1}{T_1 T_2}\cdot\frac{U_{доп}}{C_e}.$$

Аналогично из зависимостей для конечных значений скорости исполнительного органа механизма и ее первой и второй производных в конце пятого этапа следует, что:

$$\omega_5 = \left[\frac{T_1}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6 + \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6^{(1)} + \frac{T_1}{T_1 - T_2}\cdot\frac{U_{доп}}{C_e}\right]\cdot e^{-\frac{t_6}{T_1}} - \left[\frac{T_2}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6 + \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6^{(1)} + \frac{T_2}{T_1 - T_2}\cdot\frac{U_{доп}}{C_e}\right]\cdot e^{-\frac{t_6}{T_2}} -$$

$$-\frac{U_{доп}}{C_e};$$

$$\omega_5^{(1)} = -\left[\frac{1}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6 + \frac{T_2}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6^{(1)} + \frac{1}{T_1 - T_2}\cdot\frac{U_{доп}}{C_e}\right]\cdot e^{-\frac{t_6}{T_1}} + \left[\frac{1}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6 + \frac{T_1}{T_1 - T_2}\cdot\omega_6^{(1)} + \frac{1}{T_1 - T_2}\cdot\frac{U_{доп}}{C_e}\right]\cdot e^{-\frac{t_6}{T_2}};$$

$$\omega_5^{(2)} = \left[\frac{1}{T_1 \cdot (T_1 - T_2)} \cdot \omega_6 + \frac{T_2}{T_1 \cdot (T_1 - T_2)} \cdot \omega_6^{(1)} + \frac{1}{T_1 \cdot (T_1 - T_2)} \cdot \frac{U_{доп}}{C_e} \right] \cdot e^{-\frac{t_6}{T_1}} -$$

$$- \left[\frac{1}{T_2 \cdot (T_1 - T_2)} \cdot \omega_6 + \frac{T_1}{T_2 \cdot (T_1 - T_2)} \cdot \omega_6^{(1)} + \frac{1}{T_2 \cdot (T_1 - T_2)} \cdot \frac{U_{доп}}{C_e} \right] \cdot e^{-\frac{t_6}{T_2}}.$$

С другой стороны в конце пятого этапа угловая скорость исполнительного органа механизма и ее первая и вторая производная равны:

$$\omega_5 = \left[\left(\omega_4 + \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right) + \left(\frac{3}{T_\mu} \cdot \omega_4 + \frac{C_M I_{доп}}{J} + \frac{3}{T_\mu} \cdot \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right) \cdot t_5 + \left(\frac{9}{2T_\mu^2} \cdot \omega_4 + \frac{3}{T_\mu} \cdot \frac{C_M I_{доп}}{J} + \frac{9}{2T_\mu^2} \cdot \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right) \cdot t_5^2 \right] \times$$

$$\times e^{-3 \cdot \frac{t_5}{T_\mu}} - \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}};$$

$$\omega_5^{(1)} = \left[\frac{C_M I_{доп}}{J} + \frac{3}{T_\mu} \cdot \frac{C_M I_{доп}}{J} \cdot t_5 - \left(\frac{27}{2T_\mu^3} \cdot \omega_4 + \frac{9}{T_\mu^2} \cdot \frac{C_M I_{доп}}{J} + \frac{27}{2T_\mu^3} \cdot \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right) \cdot t_5^2 \right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t_5}{T_\mu}};$$

$$\omega_5^{(2)} = \left[-\left(\frac{27}{T_\mu^3} \cdot \omega_4 + \frac{27}{T_\mu^2} \cdot \frac{C_M I_{доп}}{J} + \frac{27}{T_\mu^3} \cdot \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right) \cdot t_5 + \left(\frac{81}{2T_\mu^4} \cdot \omega_4 + \frac{27}{T_\mu^3} \cdot \frac{C_M I_{доп}}{J} + \frac{81}{2T_\mu^4} \cdot \frac{U_{3C\max}}{K_{OC}} \right) \cdot t_5^2 \right] \cdot e^{-3 \cdot \frac{t_5}{T_\mu}}.$$

Из вышеуказанной системы, состоящей из шести уравнений, определяем: значение угловой скорости исполнительного органа механизма в конце четвертого этапа, значение угловой скорости исполнительного органа механизма в конце пятого этапа, значение первой производной угловой скорости исполнительного органа механизма в конце пятого этапа, значение второй производной угловой скорости исполнительного органа механизма в конце пятого этапа, значения длительности пятого и шестого этапов.

Длительность четвертого этапа определяется уравнением:

$$t_4 = \frac{(\omega_4 - \omega_3) \cdot J}{C_M I_{доп}}.$$

Вывод

Таким образом, разработан алгоритм для определения параметров оптимальных по быстродействию переходных характеристик для системы автоматического регулирования угловой скорости исполнительного органа механизма.