

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЛЕЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МОТАЛОК СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Зеленов А.Б., Полилов Е.В.

Донбасский горно-металлургический институт

Info@dgmi.al.lg.ua

Are given the mathematical discription of object and results structural – algorithmic synthesis optimum relay control of the Electric Drive for reel cold rolling mill. Offer the structure diagram of this sistem control.

При холодной прокатке рулонной стали регулирование (точная стабилизация на заданном уровне) натяжения полосы при намотке ее на барабанных моталках существенно влияет на качество листа.

Существующие системы управления электроприводом моталок предусматривают регулирование натяжения с помощью регуляторов мощности, регуляторов тока или непосредственных регуляторов натяжения, в которых используются различного рода датчики натяжения полосы.

Требования технологии по диапазону и плавности регулирования скорости, а также по точности поддержания натяжения обуславливают для электроприводов моталок применение двигателей постоянного тока с независимым возбуждением и питанием якорной цепи от тиристорного преобразователя.

Далее рассмотрен структурно-алгоритмический синтез системы оптимального релейного управления электроприводом постоянного тока для моталки стана холодной прокатки. Синтезируется оптимальное (по минимуму интегральной квадратичной ошибки) релейное управление регулятора натяжения прямого действия.

Формирование оптимальных управлений производится методом аналитического конструирования регуляторов (АКР) с использованием динамического программирования Беллмана [1].

Структурная схема рассматриваемого объекта управления с общепринятыми в теории электропривода и в технологии прокатки допущениями [2, 3] показана на рис.1.

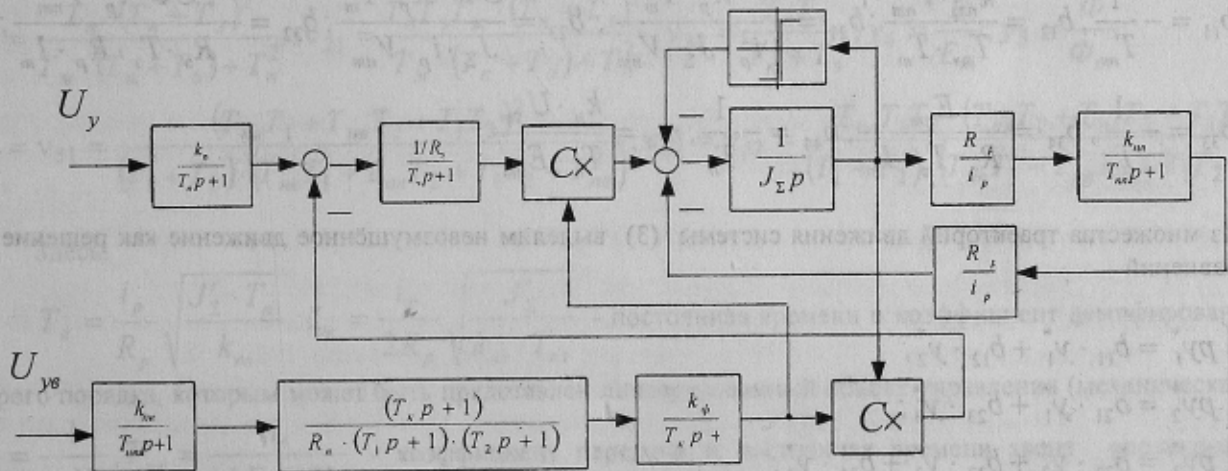


Рисунок 1 – Линеаризованная структурная схема объекта управления

Для этой структурной схемы можно записать следующую систему дифференциальных уравнений в форме Коши необходимую для выполнения процедуры АКР.

$$\begin{cases} pT = -\frac{1}{T_{nn}} \cdot T + \frac{k_{nn}}{T_{nn}} \cdot V_n; \\ pV_n = \frac{C\Phi \cdot R_p}{J_z \cdot i_p} \cdot I - \frac{R_p^2}{i_p^2 \cdot J_z} \cdot T; \\ pI = -\frac{C\Phi \cdot i_p}{R_s \cdot T_s \cdot R_p} \cdot V_n - \frac{1}{T_s} \cdot I + \frac{1}{R_s \cdot T_s} \cdot E_n; \\ pE_n = -\frac{1}{T_n} \cdot E_n + \frac{k_n}{T_n} \cdot U_y, \end{cases} \quad (1)$$

где T - натяжение наматываемой полосы; k_{nl}, T_{nl} - коэффициент передачи и постоянная времени звена «полоса-моталка»; V_n - поступательная скорость движения полосы; C - конструктивная постоянная двигателя; Φ - магнитный поток двигателя; R_p - радиус рулона; J_Σ - суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя; i_p - передаточное число редуктора; I - ток якоря электродвигателя; E_n, k_n, T_n - ЭДС, коэффициент усиления и постоянная времени управляемого преобразователя; T_3 - электромагнитная постоянная времени якорной цепи; R_3 - сопротивление якорной цепи; $p = \frac{d}{dt}$ - оператор дифференцирования.

Введём относительные значения фазовых координат объекта (отношение текущих значений к максимальным):

$$y_1 = \frac{T}{T_m}; y_2 = \frac{V_n}{V_{nm}}; y_3 = \frac{I}{I_m}; y_4 = \frac{E_n}{E_{nm}}; u = \frac{U_y}{U_{ym}} \quad (2)$$

С учётом отношений (2) система уравнений (1) примет вид

$$\begin{cases} py_1 = b_{11} \cdot y_1 + b_{12} \cdot y_2; \\ py_2 = b_{21} \cdot y_1 + b_{23} \cdot y_3; \\ py_3 = b_{32} \cdot y_2 + b_{33} \cdot y_3 + b_{34} \cdot y_4; \\ py_4 = b_{44} \cdot y_4 + m_4 \cdot u, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$b_{11} = -\frac{1}{T_{nl}}; b_{12} = \frac{k_{nl} \cdot V_{nm}}{T_{nl} \cdot T_m}; b_{21} = -\frac{R_p^2 \cdot T_m}{i_p^2 \cdot J_\Sigma \cdot V_{nm}}; b_{23} = \frac{C\Phi \cdot R_p \cdot I_m}{J_\Sigma \cdot i_p \cdot V_{nm}}; b_{32} = -\frac{C\Phi \cdot i_p \cdot V_{nm}}{R_3 \cdot T_3 \cdot R_p \cdot I_m};$$

$$b_{33} = -\frac{1}{T_3}; b_{34} = \frac{E_{nm}}{R_3 \cdot T_3 \cdot I_m}; b_{44} = -\frac{1}{T_n}; m_4 = \frac{k_n \cdot U_{ym}}{T_n \cdot E_{nm}}.$$

Из множества траекторий движения системы (3) выделим невозмущённое движение как решение системы уравнений

$$\begin{cases} py_1^* = b_{11} \cdot y_1^* + b_{12} \cdot y_2^*; \\ py_2^* = b_{21} \cdot y_1^* + b_{23} \cdot y_3^*; \\ py_3^* = b_{32} \cdot y_2^* + b_{33} \cdot y_3^* + b_{34} \cdot y_4^*; \\ py_4^* = b_{44} \cdot y_4^* + m_4 \cdot u^*, \end{cases} \quad (4)$$

где $y_k^*, (k = 1, \dots, 4)$ - заданное значение фазовых координат.

Произведём замену переменных $\eta_k = y_k - y_k^*, (k = 1, \dots, 4)$ и преобразуем уравнения (3) в систему дифференциальных уравнений возмущённого движения

$$\begin{cases} p\eta_1 = b_{11} \cdot \eta_1 + b_{12} \cdot \eta_2; \\ p\eta_2 = b_{21} \cdot \eta_1 + b_{23} \cdot \eta_3; \\ p\eta_3 = b_{32} \cdot \eta_2 + b_{33} \cdot \eta_3 + b_{34} \cdot \eta_4; \\ p\eta_4 = b_{44} \cdot \eta_4 + m_4 \cdot U. \end{cases} \quad (5)$$

Аналогично могут быть получены дифференциальные уравнения, описывающие возмущённое движение контура потока возбуждения и ЭДС двигателя.

В системе уравнений (5) $U = u - u^*$ представляет собой дополнительное, сверх u^* управление, обеспечивающее движение $y = y^*$. Следовательно, действительное движение объекта управления описывается

векторами $y = y^* + \eta$ и $u = u^* + U$. Очевидно, если на объект управления не подаётся программное управление u^* , то действительное управление $u = U$.

С помощью уравнений (5) выполнен структурно-алгоритмический синтез оптимального релейного управления методом АКР. Не останавливаясь на деталях метода АКР, который достаточно подробно изложен в [4, 5], приведём лишь конечные выражения алгоритмов управлений, полученных в фазовом пространстве отклонений основных регулируемых координат и их производных.

Алгоритмы оптимального релейного управления синтезированы для наиболее важных фазовых координат электропривода, а именно: тока якоря, скорости полюсы, натяжения полюсы, магнитного потока и ЭДС двигателя.

Оптимальные управления, синтезированные по указанной методике, после необходимых преобразований могут быть представлены:

$$\begin{aligned} U_{\text{пнн}}(T, pT, p^2T, p^3T) &= U_{\text{ym}} \cdot \text{sign}[(1 + v_{11}p + v_{12}p^2 + v_{13}p^3) \cdot (y_1^* - y_1)]; \\ U_{\text{рцн}}(V_n, pV_n, p^2V_n) &= U_{\text{ym}} \cdot \text{sign}[(1 + v_{21}p + v_{22}p^2) \cdot (y_2^* - y_2)]; \\ U_{\text{рм}}(I, pI, p^2I, p^3I) &= U_{\text{ym}} \cdot \text{sign}[(1 + v_{31}p) \cdot (y_3^* - y_3)]; \\ U_{\text{рз}}(E, pE, p^2E) &= U_{\text{ym}} \cdot \text{sign}[(1 + v_{41}p + v_{42}p^2) \cdot (y_4^* - y_4)]; \\ U_{\text{рлн}}(\Phi, p\Phi, p^2\Phi) &= U_{\text{ym}} \cdot \text{sign}[(1 + v_{51}p + v_{52}p^2) \cdot (y_5^* - y_5)]; \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} v_{11} &= \frac{T_\theta \cdot [T_\theta + 2\zeta_\theta \cdot (T_n + T_\theta)]}{2\zeta_\theta \cdot [T_\theta^2 + (T_n + T_\theta)^2 + 2\zeta_\theta T_\theta \cdot (T_n + T_\theta)]}; v_{12} = \frac{T_\theta^2 \cdot (T_n + T_\theta) [T_\theta + 2\zeta_\theta \cdot (T_n + T_\theta)]^2}{2\zeta_\theta \cdot [T_\theta^2 + (T_n + T_\theta)^2 + 2\zeta_\theta T_\theta \cdot (T_n + T_\theta)]}; v_{13} = 0; \\ v_{21} &= \frac{T_n \cdot (T_n + T_\theta)^2}{T_n \cdot (T_n + T_\theta) + T_n^2}; v_{22} = \frac{T_n T_\theta T_m \cdot (T_n + T_\theta)^2}{T_m \cdot (T_n + T_\theta) + T_n^2}; v_{31} = \frac{T_n T_\theta}{T_n + T_\theta}; y_4 = \frac{E}{E_m}; y_5 = \frac{\Phi}{\Phi_m}; \\ v_{41} = v_{51} &= \frac{(T_{n\theta} T_1 + T_{n\theta} T_2 + T_1 T_2)^2}{(T_1 + T_2) \cdot (T_{n\theta} T_1 + T_{n\theta} T_2 + T_1 T_2 + T_{n\theta}^2)}; v_{42} = v_{52} = \frac{T_{n\theta} T_1 T_2 \cdot (T_{n\theta} T_1 + T_{n\theta} T_2 + T_1 T_2)^2}{(T_1 + T_2) \cdot (T_{n\theta} T_1 + T_{n\theta} T_2 + T_1 T_2 + T_{n\theta}^2)}. \end{aligned}$$

Здесь:

$$T_\theta = \frac{i_p}{R_p} \sqrt{\frac{J'_\Sigma \cdot T_{n\theta}}{k_{n\theta}}}; \zeta_\theta = \frac{i_p}{2R_p} \sqrt{\frac{J'_\Sigma}{k_{n\theta} \cdot T_{n\theta}}} - \text{постоянная времени и коэффициент демпфирования звена}$$

второго порядка, которым может быть представлен линеаризованный объект управления (механическая часть);

$$k_{n\theta} = \frac{1}{\gamma_n V_n}, T_{n\theta} = \frac{L}{bhE_y \gamma_n V_n} - \text{коэффициент передачи и постоянная времени звена «полюса-моталка»;$$

$$\gamma_n = \partial S_\theta / \partial T + \frac{1}{bhE_y}; b, h - \text{ширина и толщина прокатываемой полюсы}; E_y - \text{модуль упругости материала}$$

полюсы; S_θ - опережение, характеризующее степень увеличения скорости полюсы на выходе из прокатной клети по сравнению с окружной скоростью прокатных валков; значение $\partial S_\theta / \partial T$ находят по экспериментальным

данным или по аналитическим выражениям [6]. Если перед моталкой установлены натяжные ролики, создающие натяжение полюсы, то $\partial S_\theta / \partial T = 0$; L - расстояние от оси валков последней клети до оси барабана моталки; $T_{n\theta}$ - постоянная времени тиристорного возбудителя;

$$T_{1,2} = \frac{T_k + T_s + T_{\text{соз}}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{T_k + T_s + T_{\text{соз}}}{2}\right)^2 - T_k T_s}, \text{ причём знак «+» - для } T_1, \text{ знак «-» - для } T_2;$$

T_k - постоянная времени контура вихревых токов; T_s - постоянная времени потока рассеяния; $T_{\text{соз}}$ - постоянная времени основного потокосцепления.

Ввиду сложности получения на практике производных выше второго порядка, при синтезе прямого регулятора натяжения полюсы было принято $(T_n p + 1) \cdot (T_\theta p + 1) \approx (T_n + T_\theta) p + 1$.

В соответствии с алгоритмом (6) оптимального управления U_{pnn} регулятора натяжения полосы (РНП) на рис.2 показана структурная схема, реализующая данный алгоритм. Аналогично могут быть составлены структурные схемы, реализующие и другие алгоритмы оптимальных управлений (6) – для регулятора скорости полосы (U_{pcn}), регулятора тока (U_{pm}), регулятора ЭДС (U_{ps}) и регулятора магнитного потока (U_{pnn}).

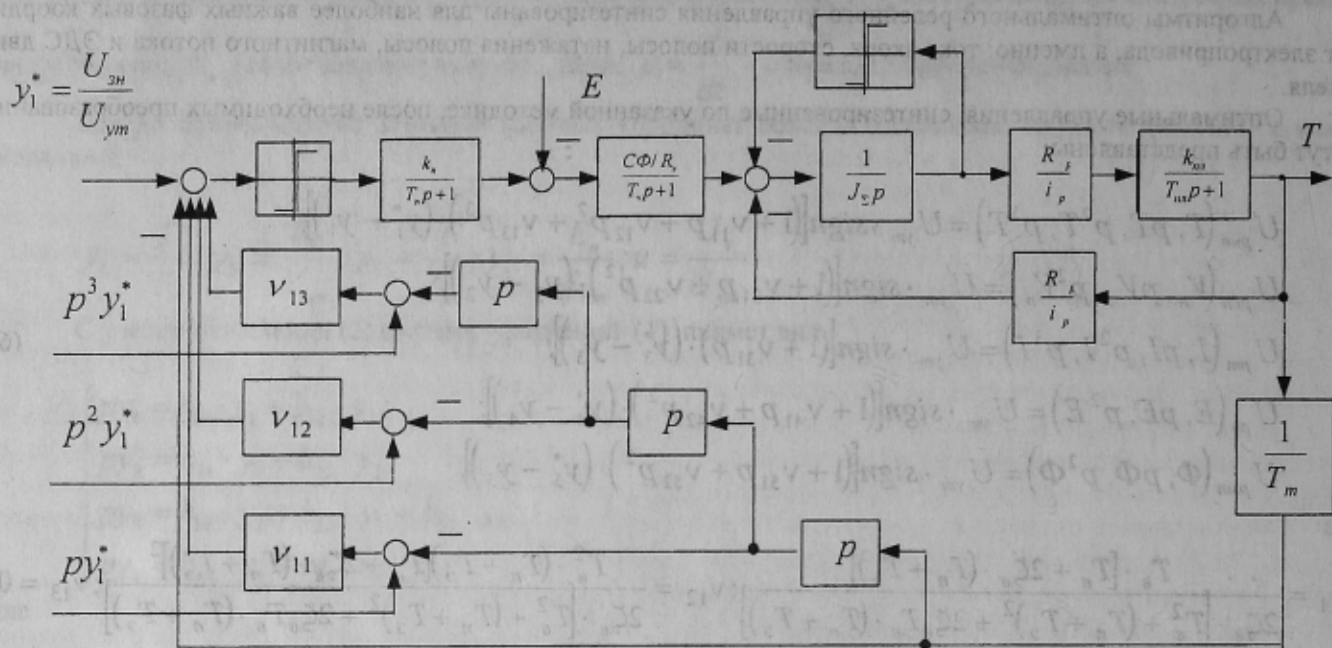


Рисунок 2 – Структурная схема реализации алгоритма U_{pnn}

На основе этих структурных схем может быть разработана цифровая математическая модель электропривода, с помощью которой исследуется влияние отдельных параметров объекта и системы управления на характер динамических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 232 с.
2. Альшиц В.М., Зеленцов В.И., Тикоцкий А.Е. Электроприводы моталок и разматывателей станов холодной прокатки. Обзорная информация. ТС-08. Электропривод. - М.: Информэлектро. 1980. - 56 с.
3. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий / Под ред. М.Г. Розенберга, Е.М. Феськова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 480 с. - (Электроустановки промышленных предприятий).
4. Зеленцов А.Б. Синтез и исследование релейных систем управления электроприводом постоянного тока // Изв. вузов. Электромеханика, - 1979, №5. - с. 407-413.
5. Зеленцов А.Б., Жилияков В.И., Садовой А.В. Некоторые особенности технической реализации алгоритмов оптимальных управлений // Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. научно-техн. сб., - К: Техника, 1977, вып 25, с. 8-14.
6. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М., Металлургия, 1975.