

## СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОЙ САР НАТЯЖЕНИЯ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МОТАЛКИ НСХП В ПРОСТРАНСТВЕ ОСНОВНЫХ КООРДИНАТ И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ

Зеленов А.Б., Полилов Е.В., Щёлоков А.Г.

Донбасский горно-металлургический институт

aems@mail.ru, aems@yandex.ru

*In given article is shown possibility of using the relay-type systems of optimum control for stabilizations with pinpoint accuracy of tension band, rolled on the area between the last stand and reel of continuous cold-rolling mill. Syntheses of algorithms of control is realized by the method of analytical design regulators in the space of main coordinates and their derived.*

При рулонном способе обработки металла на всех технологических переделах холодной прокатки осуществляется развёртывание рулонов в полосу перед началом технологического процесса и свёртывание её в рулон после его завершения.

Холодная прокатка производится при обязательном наличии натяжения полосы между клетями и между клетью и моталкой. Лишь при этом условии возможно получение листа высокого качества. Натяжение является главной особенностью станов холодной прокатки, так как оно обеспечивает: одинаковую толщину и ровную поверхность полосы; качественное сматывание и наматывание полосы в рулоны; повышенную надёжность работы оборудования, так как предотвращается образование петель и связанных с этим повреждений. Потеря натяжения так же, как и его чрезмерная величина, приводит к аварийным режимам с возможными тяжёлыми последствиями. При низких натяжениях может произойти нарушение плоскостности, образование складок. Чрезмерно высокие уровни натяжения также опасны, так как появляющиеся внутренние напряжения накладываются на общее натяжение и суммарная величина может превысить предел прочности полосы, приводя к обрыву полосы.

На прокатных станах применяются как системы управления моталками с косвенным регулированием, так и системы управления по сигналу измеренного непосредственно натяжения. Характерной особенностью современных станов является значительный диапазон изменения натяжений полосы при смотке. Это значительно усложняет задачу косвенного регулирования натяжения, поскольку при работе с малым натяжением может возникать значительная погрешность, обусловленная неточной компенсацией механических потерь в системе привода. Решением проблемы является применение систем автоматического регулирования натяжения в функции сигнала измерителя этого натяжения. Системы с измерителем натяжения позволяют вести прокатку с поддержанием натяжения на очень низком уровне, поэтому при широком диапазоне натяжений наиболее перспективной среди существующих является система с регулированием непосредственно по натяжению.

Существующие на данный момент различные способы построения систем стабилизации натяжения полосы (применение принципов подчиненного регулирования и модального управления, использование адаптивной системы управления) не обеспечивают инвариантности системы к координатным и параметрическим возмущениям, которыми в данной системе являются изменение радиуса и момента инерции рулона, обратные составляющие приращения радиуса вследствие наложения очередного витка и эксцентриситета рулона, а также эксцентриситетные колебания скорости валковой системы. Поэтому решение комплексной проблемы одновременной стабилизации натяжения полосы с высокой точностью и придания системе управления электроприводом свойств квазиинвариантности к координатным и параметрическим возмущениям представляется весьма актуальной.

Данная статья посвящена синтезу релейной системы оптимального управления электроприводом моталки НСХП как объекта управления САР натяжения прямого действия (САРН-П) с использованием в обратной связи сигнала измерителя натяжения. Работа релейной САРН-П с организацией скользящих режимов в системе позволит значительно повысить точность регулирования натяжения и обеспечит квазиинвариантность к параметрическим и координатным возмущениям при стабилизации натяжения полосы. Для решения поставленной задачи использован метод аналитического конструирования регуляторов (АКР) [1, 2].

Математическое описание электропривода моталки НСХП, представленного двухмассовой электромеханической системой с питанием приводного электродвигателя постоянного тока от источника регулируемого напряжения (например, тиристорного преобразователя) приведено в статье [3]. Рассмотрено математическое описание электропривода моталки НСХП как объекта управления САРН-П с учётом упругости кинематических звеньев механизма моталки.

При структурно-алгоритмическом синтезе релейных систем управления полагаем, что математическая модель объекта управления представлена автономной системой линейных дифференциальных уравнений в форме Коши в матричном представлении:

$$p\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{b}u, \quad \mathbf{y}_i = \mathbf{e}_i^T \mathbf{y},$$

где  $p = d/dt$  - оператор дифференцирования;

(1)

$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T = [\Delta T_{i+1,i} \ \Delta T_{i+1,i} \ \Delta \omega_2 \ \Delta \dot{I}_{12} \ \Delta \omega_1 \ \Delta i_y \ \Delta e_{\delta i}]^T$  - вектор координат состояния системы;  $[\dots]^T$  - здесь и далее операция транспонирования;

$\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n,n}$  - матрица динамики системы, ненулевые элементы которой равны:

$$a_{11} = 1; a_{22} = -\frac{1}{T_i}; a_{23} = \frac{R_{p0} k_i}{T_i} \cdot \frac{\omega_{2i}}{\dot{O}_i}; a_{32} = -\frac{R_{p0}}{J_2} \cdot \frac{\dot{O}_i}{\omega_{2i}}; a_{33} = -\frac{k_{c12} + k_{f2}}{J_2}; a_{34} = \frac{1}{J_2} \cdot \frac{\dot{I}_{12i}}{\omega_{2i}};$$

$$a_{35} = \frac{k_{c12}}{J_2} \cdot \frac{\omega_{1i}}{\omega_{2i}}; a_{43} = -c_{12} \cdot \frac{\omega_{2i}}{\dot{I}_{12i}}; a_{45} = c_{12} \cdot \frac{\omega_{1i}}{\dot{I}_{12i}}; a_{53} = \frac{k_{c12}}{J_1} \cdot \frac{\omega_{2i}}{\omega_{1i}}; a_{54} = -\frac{1}{J_1} \cdot \frac{\dot{I}_{12i}}{\omega_{1i}}; a_{55} = -\frac{k_{c12} + k_{f1}}{J_1};$$

$$a_{56} = \frac{C_a \dot{O}_a}{J_1} \cdot \frac{I_i}{\omega_{1i}}; a_{65} = -\frac{C_a \dot{O}_a}{R_{y,\delta} T_{y,\delta}} \cdot \frac{\omega_{1i}}{I_i}; a_{66} = -\frac{1}{T_{y,\delta}}; a_{67} = \frac{1}{R_{y,\delta} T_{y,\delta}} \cdot \frac{A_{\delta i i}}{I_i}; a_{77} = -\frac{1}{T_\mu},$$

$$\mathbf{b} = \left[ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{k_{\delta i}}{T_\mu} \right]^T - \text{вектор-столбец коэффициентов управления};$$

$u$  - скалярная функция управления;  $y_i$  - регулируемая переменная в каждом  $i$ -том контуре регулирования;  $\mathbf{e}_i$  - вектор коэффициентов выхода,  $i$ -тый элемент которого равен единице при равенстве нулю остальных.

Заменой на координаты возмущённого движения  $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{y} - \mathbf{y}^*$  система (1) может быть приведена к виду:

$$p\boldsymbol{\eta} = \mathbf{A}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{b}u, \quad \eta_i = \mathbf{e}_i^T \boldsymbol{\eta}. \quad (2)$$

Здесь  $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1 \ \eta_2 \ \dots \ \eta_n]^T$  - вектор-столбец координат возмущённого состояния системы.

При синтезе регулятора натяжения в качестве выходной регулируемой переменной принята координата  $y_1$ . Математическую модель объекта управления в каноническом пространстве (т.е. в пространстве основных регулируемых координат и их производных) возмущённого движения представим в виде:

$$p\mathbf{x} = \mathbf{G}\mathbf{x} + \mathbf{e}_n u, \quad \eta_1 = \mathbf{f}^T \mathbf{x}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{x}$  - вектор координат возмущённого движения канонической системы;

$$\mathbf{G} = \dot{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -g_0 & -g_1 & -g_2 & \dots & -g_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_n = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T, \quad \mathbf{f}^T = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n] = \mathbf{e}_1^T \mathbf{M} -$$

соответственно матрица динамики и векторы коэффициентов входа и выхода этой системы;

$g_0, g_2, \dots, g_n$  - коэффициенты характеристического полинома системы:

$$\det[p\mathbf{E} - \mathbf{A}] = g_n p^n + \dots + g_1 p + g_0; \quad (4)$$

$\mathbf{E}$  - единичная диагональная матрица;  $\mathbf{M}$  - преобразующая матрица, которая может быть определена на основе матрицы управляемости  $\mathbf{R} = [\mathbf{b} \ | \ \mathbf{A}\mathbf{b} \ | \ \dots \ | \ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{b}]$  и коэффициентов характеристического полинома

$\det[p\mathbf{E} - \mathbf{A}]$  в виде:

$$\mathbf{M} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \dots & g_{n-1} & g_n \\ g_2 & g_3 & \dots & g_n & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n-1} & g_n & \dots & 0 & 0 \\ g_n & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для удобства в дальнейшем вместо стандартного вектора канонических координат  $\mathbf{x}$  будем использовать модифицированный вектор канонических координат

$$\hat{\mathbf{x}} = b_0 \mathbf{x}, \quad (6)$$

где  $b_0 = \mathbf{e}_1^T \mathbf{M} \mathbf{e}_1$ .

Используя метод АКР [1, 2] синтезируем релейную САРН-П электроприводом моталки НСХП. В результате структурно-алгоритмических преобразований применительно к релейной системе управления получим

алгоритм управления регулятора натяжения в фазовом пространстве основных регулируемых координат электропривода и их производных:

$$U = -\text{sign}\left(\mathbf{b} \frac{\partial V(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \hat{\mathbf{x}}}\right) = -\text{sign}(\boldsymbol{\lambda}^T \hat{\mathbf{x}}), \quad (7)$$

где  $\boldsymbol{\lambda}^T = \mathbf{b}^T \mathbf{V} = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_n]$  - вектор коэффициентов обратных связей;  $V(\mathbf{x})$  - функция Ляпунова, представляет собой положительно-определенную квадратичную форму:

$$V(\hat{\mathbf{x}}) = \hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{V} \hat{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{V} = \mathbf{V}^T. \quad (8)$$

Согласно А.А.Красовскому [4], коэффициенты матрицы  $\mathbf{V}$  могут быть определены в результате решения матричного алгебраического уравнения:

$$\mathbf{V}\mathbf{G} + \mathbf{G}^T \mathbf{V} + \mathbf{W} = 0, \quad (9)$$

определяющего стабилизирующие свойства управления, т.е. выполнение граничного условия  $\eta(\infty) = 0$ .

Здесь  $\mathbf{W} = \mathbf{W}^T$  - матрица весовых коэффициентов интегранта  $I_1 = \int_0^{\infty} (\boldsymbol{\eta}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\eta}) dt$ , накладывающих «штрафы»

на величину и длительность отклонений координат в переходном процессе.

При определении функции Ляпунова, удовлетворяющей уравнению (9), удобно пользоваться методом, предложенным Е.А.Барбашиным [5]. В соответствии с этим методом искомая функция Ляпунова имеет вид матричного уравнения:

$$\mathbf{V}\mathbf{x} = \frac{-1}{\Delta} \begin{pmatrix} 0 & x_1^2 & 2x_1x_2 & \dots & 2x_1x_n & x_2^2 & \dots & 2x_2x_n & \dots & x_n^2 \\ -0,5\omega_{11} & c_{11,11} & c_{12,11} & \dots & c_{1n,11} & c_{22,11} & \dots & c_{ik,11} & \dots & c_{nn,11} \\ -\omega_{12} & c_{11,12} & c_{12,12} & \dots & c_{1n,12} & c_{22,12} & \dots & c_{ik,12} & \dots & c_{nn,12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\omega_{1n} & c_{11,1n} & c_{12,1n} & \dots & c_{1n,1n} & c_{22,1n} & \dots & c_{ik,1n} & \dots & c_{nn,1n} \\ -0,5\omega_{22} & c_{11,22} & c_{12,22} & \dots & c_{1n,22} & c_{22,22} & \dots & c_{ik,22} & \dots & c_{nn,22} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\omega_{ik} & c_{11,ik} & c_{12,ik} & \dots & c_{1n,ik} & c_{22,ik} & \dots & c_{ik,ik} & \dots & c_{nn,ik} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -0,5\omega_{nn} & c_{11,nn} & c_{12,nn} & \dots & c_{1n,nn} & c_{22,nn} & \dots & c_{ik,nn} & \dots & c_{nn,nn} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где  $c_{ij,kl}$  — постоянные вещественные коэффициенты определяемые соотношениями:

$$c_{ij,kl} = c_{ji,kl} = c_{ji,lk}$$

$$c_{ij,kl} = \begin{cases} 0 & \text{ї ðè } i \neq j \neq k \neq l; \\ g_{jk} & \text{ї ðè } j = l, i \neq k; \\ g_{ii} + g_{kk} & \text{ї ðè } i = k, j = l, i \neq j; \\ g_{ii} & \text{ї ðè } i = j = k = l. \end{cases} \quad (11)$$

Из уравнения (10) коэффициенты функции Ляпунова определяются по формулам Крамера.

Синтез алгоритмов управления регуляторов скорости и тока электропривода моталки может быть осуществлён аналогично приведенному заменой регулируемой переменной в каждом контуре регулирования в исходной системе (1).

Структурная схема синтезированной релейной САРН-П между последней клетью и моталкой, представленной линейными дифференциальными уравнениями вида (1) с алгоритмом управления (7) приведена на рис. 1. В полученной структурной схеме вектор  $\hat{\mathbf{x}}$  представлен произведением векторного оператора дифференцирования  $\mathbf{p} = [1 \ p \ \dots \ p^{n-1}]$  на управляемую координату объекта.

Для анализа работоспособности синтезированной релейной САРН-П применительно к двухмассовому ЭП моталки было проведено компьютерное моделирование в среде MATLAB 6.5 / Simulink. Исследовались переходные процессы пуска, режима намотки полосы с постоянной линейной скоростью, торможения СХП и удержания натяжения полосы после останова приводов (создание натяжения покоя). На рис. 2 представлены результаты моделирования, в котором осуществлялась стабилизация натяжения полосы с помощью релейных систем. На графиках представлены переходные процессы скорости выхода металла из валков последней клетки  $V_3$ , линейной скорости намотки полосы в рулон  $V_1$  и натяжения полосы  $T$  соответственно. Также представ-

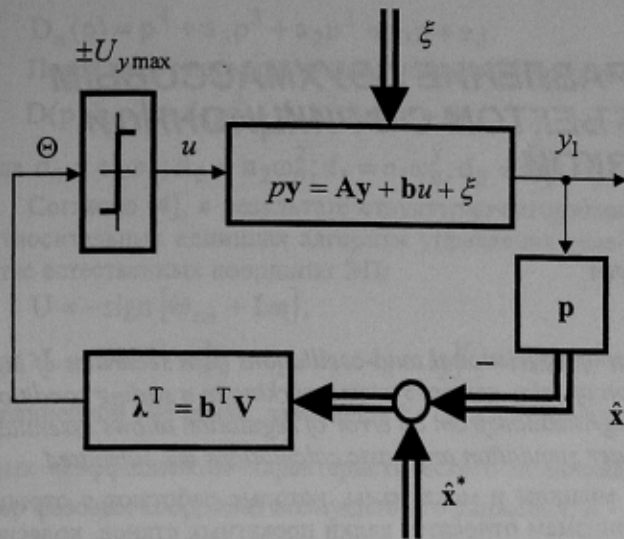


Рисунок 1 - Структурная схема релейной САРН-П электроприводом моталки НСХП

- пакет траекторий движения (вектор  $y_1^*$ ) представлен в виде реакции эталонной системы того же порядка, что и исходный объект на скачок задающего воздействия. Это позволило получить плавное нарастание выходной величины – натяжения полосы во время пуска и останова СХП без срыва скользящего режима в релейной системе при условии, что быстродействие синтезируемой релейной САРН-П будет больше быстродействия эталонной системы.

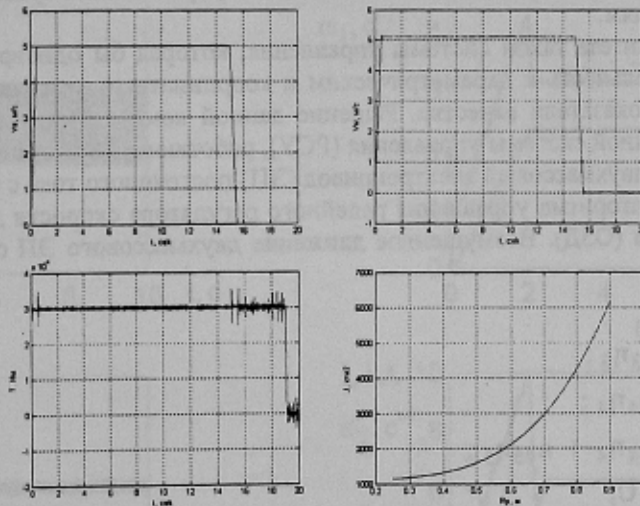


Рисунок 2 – Графики переходных процессов в синтезированной релейной САРН-П

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленов А.Б. Синтез и исследование релейных систем управления электроприводом постоянного тока // Изв. Вузов. Электромеханика, - 1979, №5. – с. 407-413.
2. Садовой А.В., Сухинин Б.В. Сохина Ю.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами.- К.: ИСИМО, 1996.- 298 с.
3. Зеленов А.Б., Полилов Е.В. Математическое описание электропривода моталки НСХП как объекта управления САР натяжения прямого действия // Труды ДонНТУ. Сер. Электротехника и энергетика.- Донецк: ДонНТУ.- 2002.- Вып. 41.
4. Красовский А.А. Интегральные оценки моментов и синтез нелинейных регуляторов. - Автоматика и телемеханика.- 1967.- №12,- с. 26-37.
5. Барбашин Е.А. Функции Ляпунова. – М.: Наука, 1970. – 240с.

Надано до редакції:

07.05.2003