

УДК 62-83-52

**СИНТЕЗ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОСЫ**

**А. В. Пирожок**

Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: PirozhokAV@gmail.com

Исследование посвящено применению метода полиномиальных уравнений при синтезе статической системы подчиненного регулирования с регулятором пониженного порядка натяжения прокатываемой полосы металла при двухмассовой кинематике с учетом упругих связей I и II рода. Данный метод может быть использован на производстве при наладке и модернизации электроприводов прокатного производства, что заметно уменьшит временные затраты, снизит потери производства, а также позволит более глубоко исследовать процессы, возникающие при прокатке металла.

**Ключевые слова:** полиномиальный метод, упругие связи, система подчиненного регулирования, статический регулятор скорости, среднегеометрический корень, натяжение полосы, стан холодной прокатки.

**СИНТЕЗ ПОЛІНОМІАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НАТЯГУ СМУГИ**

**А. В. Пирожок**

Запорізький національний технічний університет  
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: PirozhokAV@gmail.com

Дослідження присвячено застосуванню методу поліноміальних рівнянь при синтезі статичної системи підлеглого регулювання з регулятором зниженого порядку натягу смуги металу, що прокатується, при двомасовій кінематиці з урахуванням пружних зв'язків I та II роду. Цей метод може бути використаний на виробництві при налагодженні та модернізації електроприводів прокатного виробництва, що значно зменшить витрати часу, знизить втрати виробництва, а також дозволить більш глибоко дослідити процеси, які виникають при прокатці металу.

**Ключові слова:** поліноміальний метод, пружні зв'язки, система підпорядкованого регулювання, натяг смуги, стан холодної прокатки.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Специфической особенностью широкого класса машин и агрегатов, в том числе станов холодной прокатки, является наличие упругих механических передач в кинематических линиях. Отрицательное влияние упругих звеньев проявляется в существенном росте динамических нагрузок колебательного характера на электромеханическое оборудование с отклонением переходных процессов от предписанных технологией и резким сокращением срока службы деталей механических передач по износу и выносливости. Поэтому представляет интерес, не выходя за рамки принципа последовательной коррекции, как это сделано для двухмассового объекта при нелинейном характере нагрузки [1], поиск структуры и параметров регулятора натяжения (РН), обеспечивающего традиционный для системы подчиненного регулирования (СПР) характер переходных процессов [2] методом полиномиальных уравнений [3].

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Обобщенная структурная схема двухмассового электромеханического объекта (ДЭМО), с учетом упругих связей I и II рода [4, 5] применительно к ведомому электроприводу (ЭП) наматывающего устройства с двигателем постоянного тока, приведена на рис. 1.

Управление по натяжению организовано при

помощи трехконтурной СПР. ЗКТ – замкнутый контур регулирования по току, настроенный на модульный оптимум; RS – регулятор скорости; RN – регулятор натяжения;  $J_1, J_2$  – моменты инерции первой (двигатель) и второй массы (например, механизм наматывающего устройства) соответственно;  $C_1, C_2$  – жесткость упругого соединения «длинный вал» и прокатываемого металла;  $k_{f1}, k_{f2}$  – коэффициенты внешнего трения. После преобразования и при условии, что  $T_M/T_E > 4$ , запишем передаточную функцию (ПФ) объекта регулирования контура скорости [6]:

$$W_{obs}(p) = \frac{CFK_{DS}}{K_{DT}} (J_2 p^2 + k_{f2} p + C_1) \times \\ \times ((2T_M p + 1)(J_1 J_2 p^3 + (J_1 k_{f2} + J_2 k_{f1}) p^2 + \\ + (J_1 C_1 + k_{f1} k_{f2} + J_1 C_1) p + (k_{f1} + k_{f2}) C_1)^{-1} \quad (1)$$

При этом, с использованием полиномиального метода, синтезирован статический регулятор скорости RS пониженного порядка [2, 3]:

$$W_{RS}(p) = \frac{K_{RS}(2T_M p + 1)(T_1 p + 1)}{(T_2^2 p^2 + T_3 p + 1)} \quad (2)$$

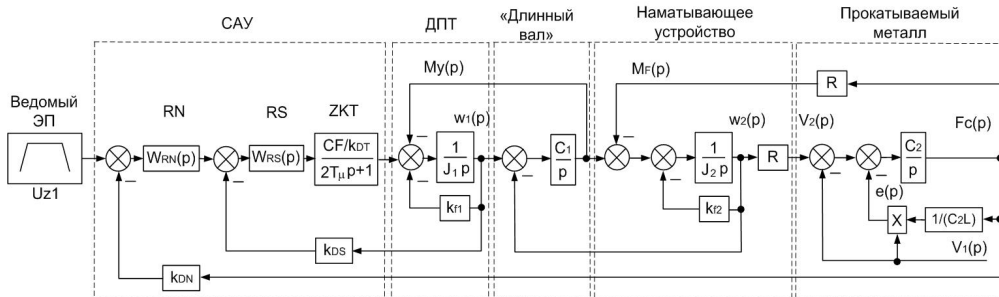


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема ДЭМО

Найдем ПФ замкнутого контура скорости с учетом (1) и (2), а также фильтра Фс на его входе [1]:

$$W_{ZS}(p) = \frac{m_0}{K_{DS}} \cdot (J_2 p^2 + k_{f2} p + C_1) \times \\ \times \left( (n_2 p^2 + n_1 p + 1) (Ap^3 + Bp^2 + Cp + D) + \right. \\ \left. + (m_1 p + m_0) (J_2 p^2 + k_{f2} p + C_1) \right)^{-1} \quad (3)$$

При настройке контура скорости его характеристический полином  $G(p)$  был принят соответствующим одному из известных распределений корней с коэффициентами  $\alpha_i \forall i \in [1, 5]$ . С учетом этого найдем передаточную функцию объекта регулирования в контуре натяжения:

$$W_{obN}(p) = \frac{Uosn(p)}{Urn(p)} = \frac{m_0}{K_{DS}} \frac{(J_2 p^2 + k_{f2} p + C_1)}{\alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0} \times \\ \times \frac{RJ_2 C_2 L p + RC_2 L k_{f2}}{J_2 L p^2 + (J_2 V_1 + k_{f2} L) p + (R^2 C_2 L + k_{f2} V_1)} \quad (4)$$

Согласно полиномиальному методу [3], полиномиальное уравнение синтеза записывается в виде:

$$\tilde{M}(p)P_-(p)P_{n+}(p) + \\ + \tilde{N}(p)Q_-(p)Q_{n+}(p)P^v = G(p); \\ m_0 (J_2 p^2 + k_{f2} p + C_1) + \\ + (n_1 p + n_0) (\alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0) = \\ = \alpha_3^* T_0^* p^3 + \alpha_2^* T_0^* p^2 + \alpha_1^* T_0^* p + \alpha_0^* \quad (5)$$

Сравнив выражения при степенях  $p^3, p^2, p^1, p^0$ , получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{n_1 \alpha_2}{\omega_0^2} = \frac{\alpha_3^*}{\omega_0^{*3}}; \\ m_0 J_2 + \frac{n_1 \alpha_1}{\omega_0} + \frac{n_0 \alpha_2}{\omega_0^2} = \frac{\alpha_2^*}{\omega_0^{*2}}; \\ n_1 \alpha_0 + \frac{n_0 \alpha_1}{\omega_0} + m_0 k_{f2} = \frac{\alpha_1^*}{\omega_0^*}; \\ m_0 C_1 + n_0 \alpha_0 = \alpha_0^* \end{array} \right. \quad (6)$$

Поиск значений среднегеометрического корня  $\omega_0$  может быть осуществлен двумя предлагаемыми методами. Первый метод основан на построении зависимостей  $m_i$  и  $n_j$  в функции  $\omega_{01}$  при выбранном распределении, следовательно, известных коэффициентах  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  и  $\alpha_4$ . Подобные зависимости дают не только конечное значение  $\omega_{01}$ , но и возможный диапазон его изменения  $\omega_{01 \min} \leq \omega_{01} \leq \omega_{01 \max}$  при некотором изменении значений  $\alpha$ . По данному методу найдены такие пределы изменения среднегеометрического корня системы  $3,455 \leq \omega_{01} \leq 3,553 \text{ с}^{-1}$ . Второй метод заключается в решении системы (6) из четырех уравнений с четырьмя неизвестными.

Допустим, что система уравнений (6) при выбранном распределении имеет хотя бы одно вещественное положительное решение  $\omega_{01}$ , при котором все коэффициенты полиномов  $\tilde{M}(p)$  и  $\tilde{N}(p)$  прини-

мают положительные вещественные значения. Это определяет физическую реализуемость синтезируемого регулятора. Тогда передаточная функция RN представляется в виде:

$$W_{RN}(p) = \frac{m_0^* K_{DS}}{m_0 K_{DN} R} \times \\ \times \left( \frac{J_2 L p^2 + (J_2 V_1 + k_{f2} L) p + (R^2 C_2 L + k_{f2} V_1)}{n_1^* J_2 C_2 L p^2 + (n_0^* J_2 + n_1^* k_{f2}) C_2 L p + n_0^* C_2 L k_{f2}} \right) \quad (7)$$

Для подтверждения правильности полученных результатов осуществлен расчет параметров RN и проведено математическое моделирование системы (рис. 2) на примере ведомого ЭП с учетом упругих связей I и II рода. При расчете параметров RN в качестве исходных данных взято  $CF = 13,63 \text{ В} \cdot \text{с}$ ;  $J_1 = 205 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_2 = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $C_1 = 5000 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$ ;  $C_2 = 100000 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$ ;  $T_\mu = 0,005 \text{ с}$ ;  $R = 0,38 \text{ м}$ ;  $L = 1 \text{ м}$ ;  $k_{f1} = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ ;  $k_{f2} = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ ;  $k_{DN} = 10 / 50000 \text{ В} / \text{Н}$ ;  $k_{DS} = 10 / 44 \text{ В} \cdot \text{с}$ .

Согласно методике поиска значения среднегеометрического корня и коэффициентов полинома, на основании построения зависимостей определен диапазон  $[2,545 - 6,405] \text{ с}^{-1}$ , т.к. только на нем все значения коэффициентов полинома положительные. При синтезе регулятора скорости было использовано распределение Баттерворта пятого порядка. Выбраны такие значения:  $\omega_0^* = 5 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_1^* = 3,456 \cdot 10^{-7}$ ;  $n_0^* = 9,708 \cdot 10^{-8}$ ;  $m_0^* = 2 \cdot 10^{-4}$ , при которых СПР с регулятором скорости пониженного порядка имеет оптимальные по быстродействию и перерегулированию переходные процессы.

Регулятор скорости RS пониженного порядка согласно (3) имеет вид:

$$W_{RS}(p) = 3,023 \frac{(2T_\mu p + 1)(0,063 + 1)}{(0,16 + 1)(0,101 + 1)} \quad (8)$$

После определения значения среднегеометрического корня и коэффициентов полинома получим:  $\omega_0^* = 3,525 \text{ с}^{-1}$ ;  $m_0^* = 0,000198$ ;  $n_1^* = 0,109$ ;  $n_0^* = 0,401$ . Это привело, согласно (7), к следующим численным значениям регулятора натяжения RN:

$$W_{RN}(p) = 1,78 \cdot 10^3 \frac{p^2 + 16,01 p + 14,44}{10900 p^2 + 40100 p + 0,401} \quad (9)$$

На рис. 2 показаны переходные процессы в рассматриваемой системе с переведенными выше параметрами при стандартных настройках (рис. 2,а) и в созданной системе натяжения (рис. 2,б), в обеих системах приложена ударная нагрузка на тянущей клетки в момент времени  $t=40-50 \text{ с}$ .

Таким образом, синтезирован новый статический РН пониженного порядка для ЭП постоянного тока при двухмассовой кинематике с учетом упругих связей I и II рода. Данная система предотвращает автоколебательные режимы, вызываемые нелинейной нагрузкой и наличием упругих связей I и II рода, что подтверждено качеством переходных процессов. В дальнейшем планируется внедрение данной методики на станах холодной прокатки ПАО Запорожсталь.

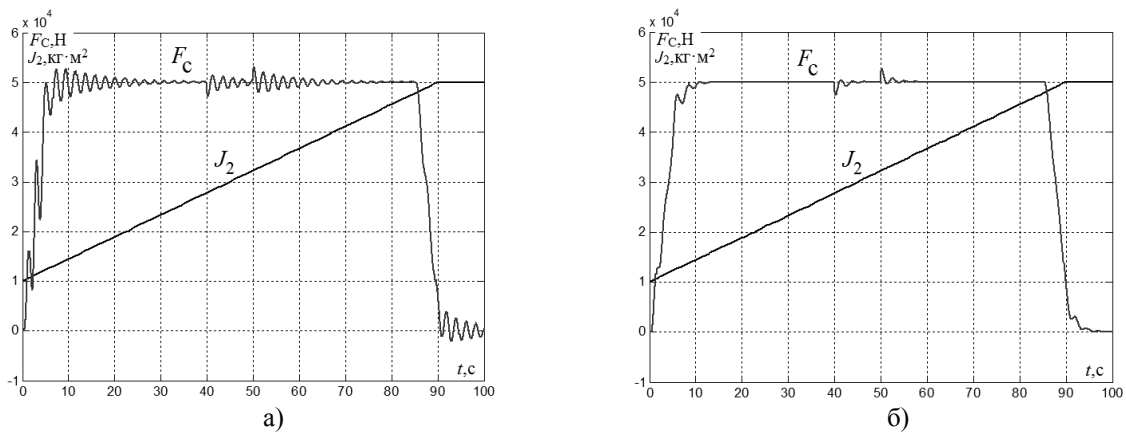


Рисунок 2 – Переходний процес контура натяження з урахуванням приложення ударної навантаження в момент времени  $t=40-50$  с при  $J_2 = \text{const}$  (а) и  $1000 < J_2 < 5000$   $J_2, \text{кг}\cdot\text{м}^2$  (б)  $F_c, \text{Н}$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Клепиков В.Б., Пирожок А.В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой. – Харьков: НТУ «ХПИ»; Запорожье: ЗНТУ, 2002. – 160 с.
2. Толочко О.И. Применение метода стандартных полиномов при синтезе систем подчиненного регулирования // Вестник Восточноукраинского национального университета им. В. Даля. – Луганск, 2003. – № 4. – С. 114–120.
3. Залялеев С.Р. О применении метода полиномиальных уравнений для синтеза непрерывных

- систем электропривода // Электротехника. – 1998. – № 2. – С. 48–53.
4. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
5. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
6. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния. – Х.: ХГПУ, 2000. – 93 с.

#### SYNTHESIS OF POLYNOMIAL REGULATOR TENSION STRIP

##### A. Pirozhok

Zaporizhzhya National Technical University

ul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063, Ukraine. E-mail: PirozhokAV@gmail.com

The article is devoted to the application of the method of polynomial equations in the synthesis of a static regulator of reduced order with subordinate control tensioning rolled strip of metal for two-mass kinematics, taking into account the elastic connections I and II kind. This method can be used in the production of when setting up and modernization electric drives rolling production, which significantly reduces the time required, reduce the loss of production, but also allow more deeply investigate the processes occurring during the rolling of the metal.

**Key words:** polynomial method, elastic connection, system of subordinate control, static speed controller, geometric average the root, strip tension, cold rolling.

#### REFERENCES

1. Akimov L.V., Dolbnya V.T., Klepikov V.B., Pirozhok A.V. *Synthesis of simplified structures of two-mass electric drives with nonlinear load*. – Kharkov: NTU «KhPI»; Zaporozhye: ZNTU, 2002. – 160 p. [in Russian]
2. Tolochko O.I. Application of the standard polynomials in the synthesis of the subordinate systems of regulation // *Bulletin Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. – 2003. – Lugansk. – № 4. – PP. 114–120. [in Russian]
3. Zalyaleev S.R. Application of polynomial equations for the synthesis of continuous systems of electric drive // *Electrotechnics*. – 1998. – № 2. – PP. 48–53. [in Russian]
4. Bortsov U.A., Sokolovsky G.G. *Automated electric drive with elastic connections*. – SPb.: Energoatomizdat, 1992. – 288 p. [in Russian]
5. Klyuchev V.I. *The theory of electric drive*. – M.: Energoatomizdat, 2001. – 704 p. [in Russian]
6. Akimov L.V., Kolotilo V.I., Markov V.S. *Dynamics of two-mass systems with non-traditional speed controls and observers the state*. – Kharkov: KhSPU, 2000. – 93 p. [in Russian]

Стаття надійшла 13.07.2012.

Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Бештою О.С.