

*С.Н. БАЛЮТА*, канд. техн. наук, зав. каф., Национальный университет пищевых технологий, Киев

## **СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕТЛЕДЕРЖАТЕЛЕМ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ**

Розроблена методика синтезу оптимальної системи управління петлетримачем смуги ширококутового стану гарячої прокатки як двохмасової електромеханічної системи. Наведено динамічні характеристики синтезованої системи оптимального управління.

Разработана методика синтеза оптимальной системы управления петледержателя полосы широкополосного стана горячей прокатки как двухмассовой электромеханической системы. Приведены динамические характеристики синтезированной системы оптимального управления.

**Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами.** Непрерывный стан горячей прокатки представляет собой сложный многодвигательный агрегат, в котором отдельные клетки связаны между собой полосой металла [1-2]. На станах горячей прокатки между клетями устанавливаются петледержатели, которые часто называют также луперами. Окружные скорости валков клеток непрерывного стана должны быть строго согласованы и поддерживаться на заданном уровне совместно с управлением петледержателями [3].

**Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме.** Для управления моталками, главными приводами и петледержателями широкополосных станов горячей прокатки используют различные типы исполнительных электроприводов. Наиболее часто применяются электродвигатели постоянного тока, однако в настоящее время в основном используют синхронные и асинхронные двигатели переменного тока с частотным управлением от преобразователей частоты. При синтезе системы регулирования петледержателем обычно используют модель в виде одномассовой электромеханической системы в предположении жесткого соединения вала двигателя с рабочим механизмом. Однако, такая модель адекватна реальному процессу лишь в области частот регулирования, расположенных значительно ниже первой резонансной частоты механической системы двигатель-рабочий механизм. В системе с одномассовой моделью настройка системы управления с полосой пропускания контура скорости выше резонансной частоты механической системы часто приводит к появлению незатухающих колебаний.

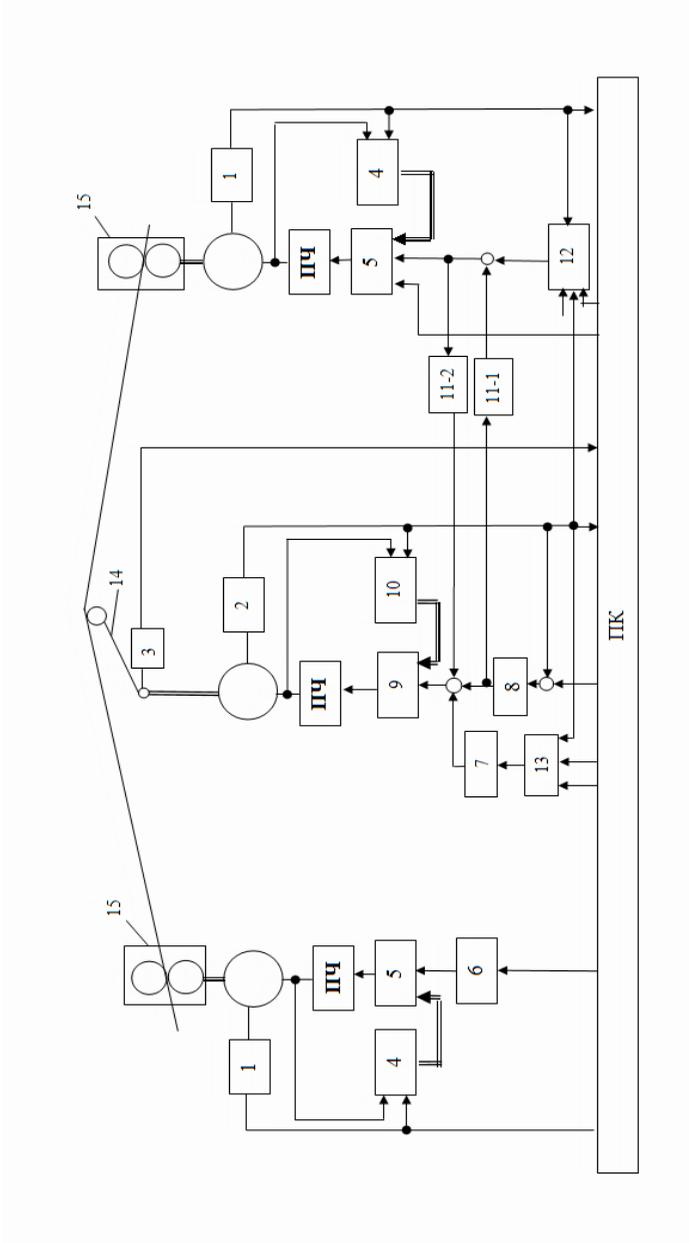


Рис. 1. Схема регулирования натяжения в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки

Устойчивую работу такой системы можно получить при использовании модели системы, которая учитывает наличие упругих элементов между валом двигателя и рабочим механизмом, например, в виде двухмассовой системы, состоящей из сосредоточенных масс вала двигателя и стола петледержателя, между которыми имеется упругий элемент [4-5].

**Цель работы.** Целью данной работы является синтез и исследование динамических характеристик системы оптимального управления петледержателем широкополосного стана горячей прокатки с математической моделью в виде двухмассовой электромеханической системы.

**Изложение материала исследования, полученных научных результатов.** Процесс горячей прокатки сопровождается колебаниями технологических параметров – толщины, давления прокатки, натяжения полосы и т.д. В качестве примера на рис. 1 показана схема системы автоматического регулирования межклетевого натяжения и петли полосы [1]. На этой схеме обозначено: 1 – датчик частоты двигателя прокатной клетки; 2 – датчик угла петледержателя; 3 – датчик натяжения полосы; 4 – наблюдатель состояния привода клетки; 5 – регулятор состояния скорости двигателя клетки; 6 – ПИ регулятор скорости; 7 – контроллер компенсации статического момента; 8 – регулятор положения петледержателя; 9 – регулятор состояния скорости петледержателя; 10 – наблюдатель состояния петледержателя; 11 – контроллер перекрестных связей; 12 – регулятор натяжения; 13 – блок расчета статического момента петледержателя; 14 – петледержатель; 15 – прокатная клеть; ПЧ – преобразователь частоты.

К системе управления петледержателем стола широкополосного стана горячей прокатки предъявляются различные требования в различных режимах работы. При заправке полосы стол петледержателя устанавливается в нулевое положение. После заправки полосы стол петледержателя устанавливается в некоторое номинальное угловое положение, относительно которого стол петледержателя может совершать повороты вверх и вниз. В ходе прокатки с помощью петледержателя поддерживается заданное натяжение полосы, измеряемое датчиками давления, встроенными в ролики петледержателя. Восстановление заданного углового положения стола петледержателя происходит за счет изменения скоростей вращения главного привода передней либо задней клетей по сигналу с датчика положения петледержателя. При этом фактически натяжение полосы регулируется по принципу грубого и точного управления: грубо – за счет изменения скоростей главных приводов прокатных клетей и точно – за счет изменения положения петледержателя. Причем, за счет работы грубого канала регулирования натяжения полосы при изменении скоростей главных приводов угол положения стола петледержателя поддерживается

вблизи номинального значения.

Примем компоненты вектора состояния петледержателя в следующем виде скорость вращения двигателя петледержателя  $\omega_M$ , угол поворота двигателя петледержателя  $\vartheta_L$  скорость вращения самого петледержателя  $\omega_L$ , угол поворота самого петледержателя  $\vartheta_L$  и момент двигателя петледержателя  $M_M$ . Тогда уравнение состояния петледержателя примет следующий вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_M \\ \vartheta_M \\ \omega_L \\ \vartheta_L \\ M_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{C}{J_1} & 0 & \frac{C}{J_1} & \frac{1}{J_1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C}{J_2} & 0 & -\frac{C}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_\Sigma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_M \\ \vartheta_M \\ \omega_L \\ \vartheta_L \\ M_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_\Sigma} \end{bmatrix} \cdot u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot M_c(t).$$

**Синтез оптимального регулятора.** При управлении петледержателем с помощью ЭВМ по исходной непрерывной модели обмоточной машины получим ее дискретный аналог.

$$\vec{X}(k+1) = A_d \vec{X}(k) + B_d \vec{u}(k);$$

$$A_d = e^{AT} = T + AT + \frac{A^2 T^2}{2!} + \dots + \frac{A^n T^n}{n!};$$

$$B_d = BT + B \frac{AT^2}{2!} + \dots + B \frac{A^{n-1} T^n}{n!},$$

где  $T$  – период дискретности работы ЭВМ.

Основное назначение системы управления петледержателем заключается в поддержании угла положения стола петледержателя  $\vartheta_L$  и натяжения полосы  $\sigma$  на заданных уровнях  $\vartheta_{L3}$  и  $\sigma_3$ .

Введем вектор выходных координат

$$\vec{y}(k) = C\vec{x}(k) + D\vec{u}(k),$$

компонентами которого являются

$$\vec{y}(k) = \{\vartheta_L(k), \sigma(k)\}^T$$

и вектор задающих воздействий

$$\vec{y}_3(k) = \{\vartheta_{L3}(k), \sigma_3(k)\}^T.$$

Рассмотрим построение оптимального астатического дискретного регулятора для двухмассовой системы. Введем вектор вспомогательных переменных цифрового астатического регулятора с уравнением

состояния

$$\bar{z}(k+1) = \bar{z}(k) + \bar{y}_3(k) - \bar{y}(k),$$

где  $\bar{y}_3(k)$  и  $\bar{y}(k)$  – векторы заданных и фактических значений регулируемых переменных.

Рассмотрим расширенную систему, включающую исходную систему и вектор вспомогательных переменных. В блочном виде уравнение примет следующий вид:

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{A}\tilde{x}(k) + \tilde{B}\bar{u}(k) + \tilde{B}_3\bar{y}_3(k),$$

компонентами вектора состояния  $\tilde{x}(k)$  расширенной системы являются вектор состояния исходной системы  $\bar{x}(k)$  и вспомогательный вектор  $\bar{z}(k)$  так, что  $\tilde{x}(k) = \begin{bmatrix} \bar{x}^T(k) \\ \bar{z}^T(k) \end{bmatrix}^T$ . Тогда матрица состояния  $\tilde{A}$ , управления  $\tilde{B}$  и управления  $\tilde{B}_3$  по вектору задания  $\bar{y}_3(k)$  расширенной системы примет следующий вид:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & \\ -C & I \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ -D \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_3 = \begin{bmatrix} \\ I \end{bmatrix}.$$

Синтезируем оптимальный регулятор для рассматриваемой расширенной системы. Рассмотрим дискретную линейную систему, описываемую разностным уравнением состояния

$$\bar{x}[k+1] = A(k)\bar{x}(k) + B(k)\bar{u}(k),$$

с управляемой переменной

$$\bar{z}(k) = C(k)\bar{x}(k),$$

и исследуем задачу перевода этой системы из произвольного начального состояния  $\bar{x}(k_0) = \bar{x}_0$  в нулевое конечное состояние  $x(k_1) = \bar{0}$  так, чтобы минимизировать квадратичный критерий качества

$$J = \sum_{k=k_0}^{k=k_1} [\bar{z}^T(k+1)R_3(k+1)\bar{z}(k+1) + \bar{u}^T(k)R_2(k)\bar{u}(k)] + \bar{x}^T(k_1)P_1\bar{x}(k_1).$$

Здесь  $R_3(k+1) > 0$ ,  $R_2(k) > 0$  и  $P_1 = 0$  – симметрические весовые матрицы. Оптимальное управление линейной дискретной системой по квадратичному критерию является линейным по полному вектору состояния

$$\bar{u}(k) = -F(k)\bar{x}(k) \quad (k = k_0, k_0 + 1, k_1 - 1),$$

где матрица коэффициентов усиления линейного оптимального регулятора  $F(k)$  определяется разностным уравнением

$$F(k) = \{R_2(k) + B^T(k)[R_1(k+1) + P(k+1) \cdot B(k)]^{-1} B^T(k)[R_1(k+1) + P(k+1)]A(k),$$

а последовательность матриц  $P(k)$  ( $k = k_0, k_0 + 1, \dots, k_1 - 1$ ) удовлетворяет матричному разностному уравнению

$P(k)=A^T(k)[R_1(k+1)=P(k+1)][A(k)-B(k)F(k)], (k=k_0, k_0+1, \dots, k_1-1),$   
с нулевым конечным условием.

Это уравнение эквивалентно уравнению Риккати для непрерывной системы, и его удобно решать в обратном дискретном времени: сначала из  $P(k+1)$  по уравнению определить  $F(k)$ , а затем из уравнения найти  $P(k)$ .

Схема системы регулирования положения стола петледержателя с регулятором состояния показана на рис. 2.

Фактическим заданием системы управления является натяжение полосы и высота петли. Для реализации различных режимов работы петледержателя сформируем эквивалентное управление в виде следующей суммы

$$u(t) = \lambda_1 \Delta \vartheta_L(t) + \lambda_2 \Delta \sigma(t).$$

При  $\lambda_2 = 0$  петледержатель работает в режиме поддержания заданного значения угла поворота стола, а при  $\lambda_1 = 0$  петледержатель работает в режиме поддержания заданного значения натяжения и при этом сигнал, пропорциональный отклонению угла поворота стола петледержателя от заданного значения  $\Delta \vartheta_L(t)$  является заданием для системы управления изменения скоростей вращения главных приводов.

**Синтез оптимального наблюдателя.** Оптимальное управление линейной дискретной системой реализуется в замкнутой форме в виде линейного регулятора по полному вектору состояния  $\bar{x}(k)$ . В рассматриваемой системе непосредственно измеряется угол поворота приводного двигателя  $\vartheta_M$  и скорость его вращения  $\omega_M$ , а также косвенно измеряется момент двигателя  $M_M$  при векторном управлении с алгоритмом прямого управления момента

$$\bar{y}(k) = c(k)\bar{x}(k),$$

так что размерность вектора  $\bar{y}(k)$  меньше размерности полного вектора состояния  $\bar{x}(k)$ . Для восстановления всего вектора состояния  $\bar{x}(k)$  по измеряемому вектору  $\bar{y}(k)$  используются наблюдатели.

$$\hat{\dot{x}}(k+1) = A(k)\bar{x}(k) + B(k)\bar{u}(k) + G(k)[\bar{y}(k) - c(k)\hat{x}(k)].$$

Корректное определение матрицы коэффициентов усиления наблюдателя  $G(k)$  можно выполнить для дискретной стохастической системы

$$\bar{x}(k+1) = A(k)\bar{x}(k) + B(k)\bar{u}(k) + \bar{W}_1(k),$$

у которой вектор наблюдений измеряется с ошибкой

$$\bar{y}(k) = c(k)\bar{x}(k) + \bar{W}_2(k).$$

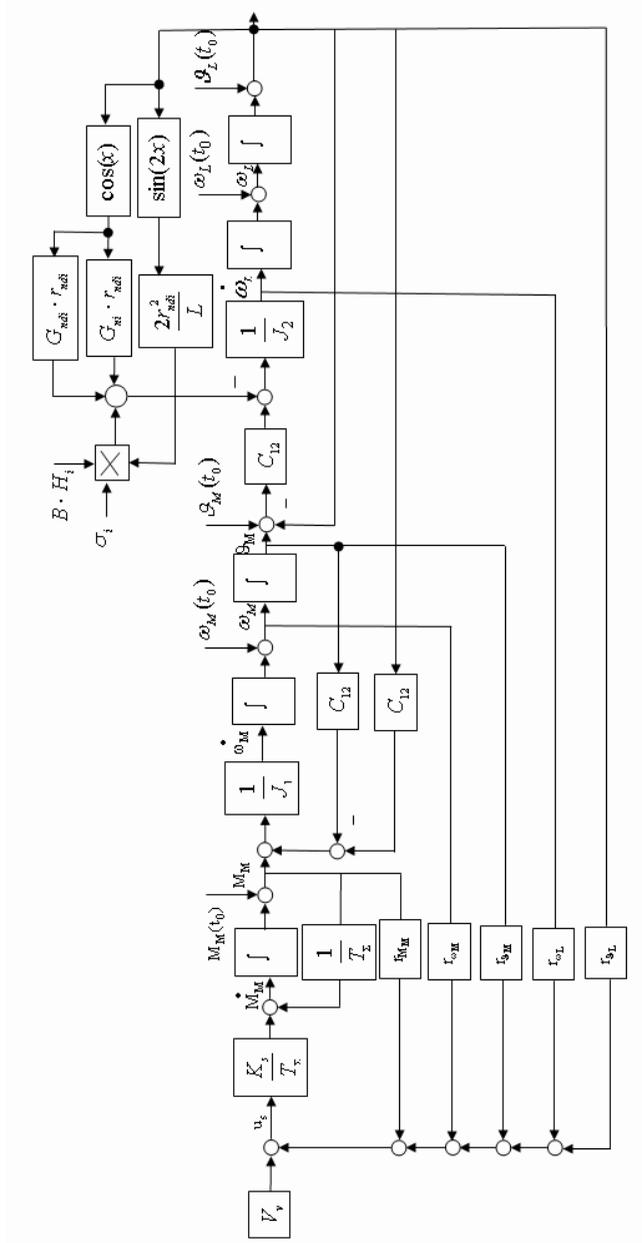


Рис.2. Схема системы регулирования положения стола пегледержателя

Здесь вектор  $\left\{ \overline{W}_1^T(k) \overline{W}_2^T(k) \right\}^T$  представляет собой последовательность некоррелированных векторных стохастических величин с нулевым средним и матрицами дисперсий

$$V(k) = \begin{bmatrix} V_1(k) & V_{12}(k) \\ V_{12}(k) & V_2(k) \end{bmatrix} (k \geq k_0).$$

Построим оптимальный наблюдатель для такой системы, минимизирующий критерий

$$M \left\{ \overline{e}^T(k) \gamma(k) \overline{e}(k) \right\},$$

где  $\gamma(k)$  – положительно определенная симметричная весовая матрица, а  $M$  – математическое ожидание.

Применяя метод динамического программирования для минимизации последовательности  $tr[Q(k)\gamma(k)]$  по матрицам коэффициентов усиления наблюдателя  $G(k)$ , получим рекуррентное уравнение для оптимальных матриц коэффициентов усиления наблюдателей

$$G(k) = [A(k)Q(k)c^T(k) + V_{12}(k)][V_2(k) + c(k)Q(k)c^T(k)]^{-1}.$$

Матрица  $Q(k)$  удовлетворяет разностное уравнение

$$Q(k+1) = [A(k) - G(k)c(k)Q(k)A^T(k) + V_1(k) - G(k)V_{12}^T(k)]$$

с начальным условием.

Матрица  $Q(k)$  является матрицей дисперсии ошибок восстановления

$$M \left\{ \overline{e}^T(k) \gamma(k) \overline{e}(k) \right\} = tr[Q(k)\gamma(k)].$$

Заметим что, как и при построении оптимальных наблюдателей системы, задача построения оптимального дискретного наблюдателя с матрицей коэффициентов усиления является дуальной к задаче построения оптимального линейного дискретного регулятора с матрицей коэффициентов усиления оптимальных регуляторов. Оптимальный линейный дискретный наблюдатель с матрицей коэффициентов усиления является оптимальным дискретным фильтром Калмана-Бьюси.

Полученный вектор состояния  $\hat{x}(k)$  наблюдателя используется для формирования управления

$$\overline{u}(k) = -F(k)\hat{x}(k).$$

Особенностью рассматриваемой задачи является использование цифрового интегратора для получения астатизма по управлению. При этом к исходному объекту управления

$$\overline{X}_0(k+1) = A_0\overline{X}_0(k) + B_0\overline{u}(k)$$

прибавляется цифровой интегратор

$$\bar{z}(k+1) = \bar{z}(k) + \bar{y}_3(k) - \bar{y}(k)$$

и для этой расширенной системы решается задача синтеза оптимального управления

$$\bar{u}(k) = -F_0 \bar{x}_0(k) - F_z \bar{z}(k),$$

где  $F_0$  – матрица коэффициентов усиления оптимального регулятора по вектору состояния  $\bar{x}_0(k)$  исходного объекта усиления, а  $F_z$  – коэффициент усиления оптимального регулятора по вектору переменных состояния  $\bar{z}(k)$  цифрового интегратора.

Оптимальный цифровой наблюдатель строится для исходного объекта управления как наблюдатель полного порядка

$$\hat{X}_0(k+1) = A_0 \hat{X}(k) + B_0 u_{\text{вх}}(k) + G [C_0 \bar{X}_0(k) - C_0 \hat{X}_0(k)]$$

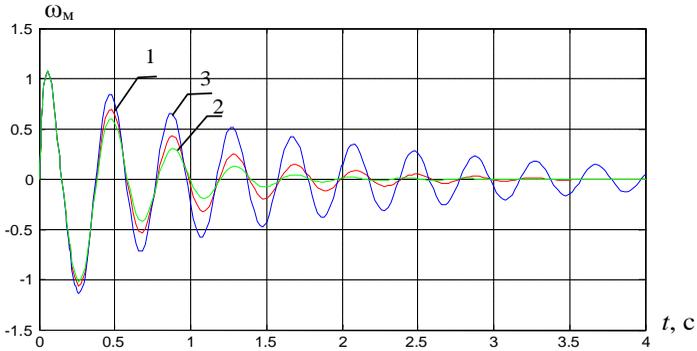
Введем вектор состояния расширенной системы  $\tilde{x}(k)$ , включающий вектор состояния исходного объекта управления  $\bar{x}_0(k)$ , вектор переменных цифрового интегратора  $\bar{z}(k)$  и вектор наблюдателя  $\hat{x}_0(k)$  в следующем виде:

$$\tilde{x}(k) = \left\{ \bar{x}_0^T(k), \bar{z}^T(k), \hat{x}_0^T(k) \right\}^T$$

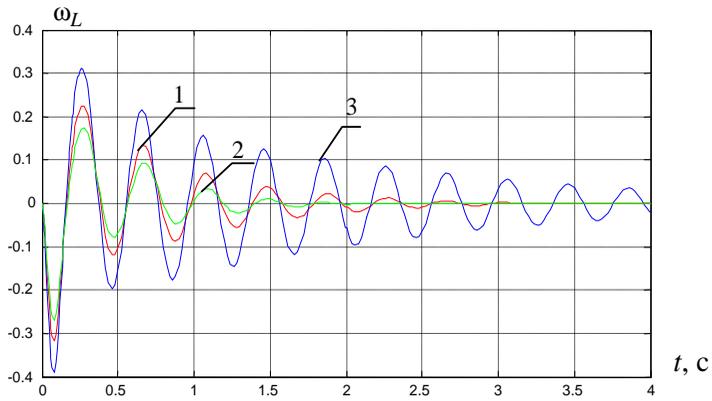
Тогда в блочном виде уравнение состояния оптимальной системы с регулятором и компенсатором примет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_0(k+1) \\ Z(k+1) \\ \hat{x}_0(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & -B_0 F_z & -B_0 F_0 \\ -C_0 & 1 & \\ G C_u & -B_0 F_z & A_0 - B_0 F_0 - G C_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_0(k) \\ Z(k) \\ \hat{x}_0(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} y_3(k)$$

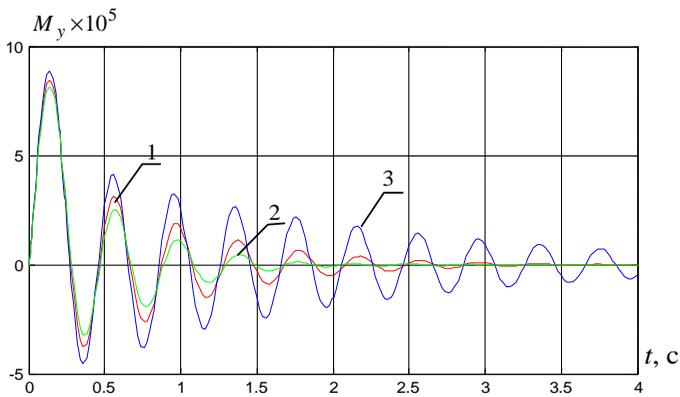
**Результаты моделирования.** Рассмотрим переходные процессы в оптимальной двухмассовой системе управления углом поворота стола петледержателя широкополосного стана горячей прокатки по моменту сопротивления. В качестве примера на рис. 3 показаны переходные процессы переменных состояния: а – скорости вращения двигателя  $\omega_M$ ; б – скорости вращения петледержателя  $\omega_L$ ; в, г – моменты упругости  $M_y$  и угла поворота петледержателя  $\vartheta_L$  в системе регулирования угла поворота петледержателя с учетом его взаимного влияния на натяжение полосы по моменту сопротивления для трех значений моментов инерции петледержателя: 1 – при номинальном моменте инерции; 2 – при увеличенном моменте инерции на 20 %; 3 – при уменьшенном моменте инерции на 20 %.



a



б



B

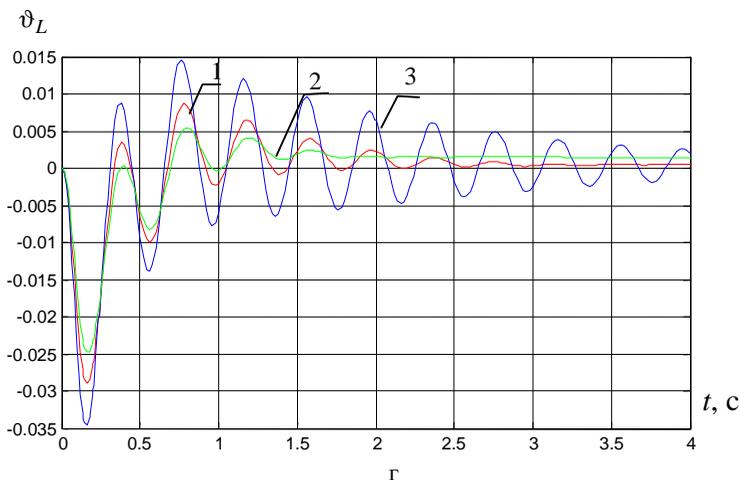


Рис. 3. Переходные процессы переменных состояния: а – скорости вращения двигателя  $\omega_M$ ; б – скорости вращения петледержателя  $\omega_L$ ; в, г – момента упругости  $M_y$  и угла поворота петледержателя  $\vartheta_L$  в системе регулирования угла поворота петледержателя с учетом его взаимного влияния на натяжение полосы по моменту сопротивления для трех значений моментов инерции петледержателя: 1 – при номинальном моменте инерции; 2 – при увеличенном на 20 %; 3 – при уменьшенном на 20 %

Как видно из этих графиков, с помощью оптимальных регуляторов удалось. Как видно из этих графиков, переходные процессы в синтезированной системе удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к системе [3].

**Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления.** Рассчитаны переходные процессы в двухмассовой системе с оптимальными регуляторами, замкнутыми через оптимальные наблюдатели применительно к управлению углом поворота стола петледержателя широкополосного стана горячей прокатки. Исследования переходных процессов этой двухмассовой системы показало их практическое совпадение с переходными процессами исходной оптимальной системы, замкнутой по полному вектору состояния. Переходные процессы наблюдателя достаточно близки к переходным процессам соответствующих переменных состояния систем. С помощью опти-

мальных регуляторов удалось получить динамические характеристики системы, удовлетворяющие техническим требованиям, предъявляемым к системе управления углом поворота стола петледержателя широкополосного стана горячей прокатки с учетом упругих элементов в виде двухмассовой электромеханической системы.

**Список литературы:** 1. *K. Hamada, S. Ueki, M. Shitomi.* Finishing mill tension control system in the Mizushima hot strip mill // Kawasaki steel technical report. – 1985. – № 11. – P.35-43. 2. *Tanimoto S., Hayashi Y., Saito M.* New tension measurement and control system in hot strip finishing mill // Meas. And Contr. Instrum. Iron and Steel Ind. Prod. 5<sup>th</sup> Process Technical Congress, Detroit / Werrendale, Pa. 1985. – P. 147-154. 3. Исследование взаимосвязанной работы САР скорости и натяжения полосы / Анализ систем управления станов горячей прокатки; *Ф.Ф. Олефир, И.А. Опрышко, В.И. Васичкин* и др. – К.: Наукова думка, 1970. – 175 с. 4. *Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В.* Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков, УИПА, 2005. – 512 с.

*Поступила в редколлегию 05.02.2009*