

Б.И. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

А.В. ВОЛОШКО, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

И.В. БОВДУЙ, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

Е.В. ВИНИЧЕНКО, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМИ ПРИВОДАМИ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ ЧЕРЕЗ ПРОКАТЫВАЕМЫЙ МЕТАЛЛ

Розроблено метод робастного управління синхронними головними приводами прокатних станів з урахуванням нелінійних моментів тертя між валками та взаємним впливом прокатних валків один на одного у ході прокатки через метал, що прокатується. Наведено приклад динамічних характеристик синтезованої системи.

Разработан метод робастного управления синхронными главными приводами прокатных станов с учетом нелинейных моментов трения между валками взаимным влиянием прокатных валков друг на друга в ходе прокатки через прокатываемый металл. Приведен пример динамических характеристик синтезированной системы.

Введение. Подавляющее большинство главных приводов вновь строящихся и реконструируемых прокатных станов комплектуются синхронными двигателями с частотными преобразователями [1-7]. В частности, на главных приводах Алчевского металлургического комбината установлены синхронные приводы переменного тока. Многие зарубежные фирмы при модернизации прокатных станов также выполняют замену двигателей постоянного тока на двигатели переменного тока.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Динамические нагрузки в главных линиях прокатных станов опасны не только величиной амплитуд, а в основном тем, что моменты могут проходить через нулевые значения с раскрытием зазоров приводной линии и большими ударами и нагрузками [8-9]. На прокатных станах с индивидуальными приводами коэффициенты динамичности верхней и нижней приводных линий различны: в менее жесткой верхней линии коэффициент динамичности больше, чем в

нижней. Крутящие моменты в шпинделях, как правило, распределяются неравномерно вследствие разности скоростей вращения валков, различных условий трения на контактных поверхностях между подкатом и валками, различной температуры верхних и нижней поверхностей подката и др.

Анализ последних достижений и публикаций. В работах [10-12] рассмотрены вопросы синтеза систем управления главными приводами с двигателями постоянного тока для математических моделей в виде двух и трехмассовых электромеханических систем. Однако современные главные приводы комплектуются синхронными двигателями с частотными преобразователями [1-7]. Мощные прокатные станы, как правило, выполняют с индивидуальным приводом без шестеренных клеток и с общим приводом, а вращение валкам передается посредством шпинделей от шестеренной клетки [8-9]. Расширенный сортамент продукции и соответствующую загруженность оборудования можно обеспечить только с применением новых приводных мощностей. Однако, при проведении модернизации существующих приводных линий в связи с ограниченностью производственного пространства замена оборудования часто затруднительно. Фирма Voestalpine Stahl [1] приняла решение в пользу двигателя переменного тока, обладающего неоспоримыми преимуществами: большей степенью загруженности, более высокой динамикой за счет пониженного момента инерции ротора и почти вдвое большей выходной мощностью при одинаковых требованиях к размеру площадки для установки.

Цель работы. Целью данной работы является разработка метода синтеза робастного управления главными приводами прокатных станов с синхронными двигателями переменного тока и с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл.

Изложение материала исследования и полученных результатов. На рис. 1 показана схема прокатного стана с индивидуальным приводом валков с синхронными двигателями и с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл. Большинство современных регулируемых мощных приводов комплектуются синхронными двигателями с частотными преобразователями.

При векторном управлении синхронными приводами в большинстве систем управления реализован алгоритм прямого управления моментом двигателя [13]. При этом по данным большинства фирм производителей частотных преобразователей [14], время нарастания момента не превышает 2 мс. Время спада момента при таком алгоритме

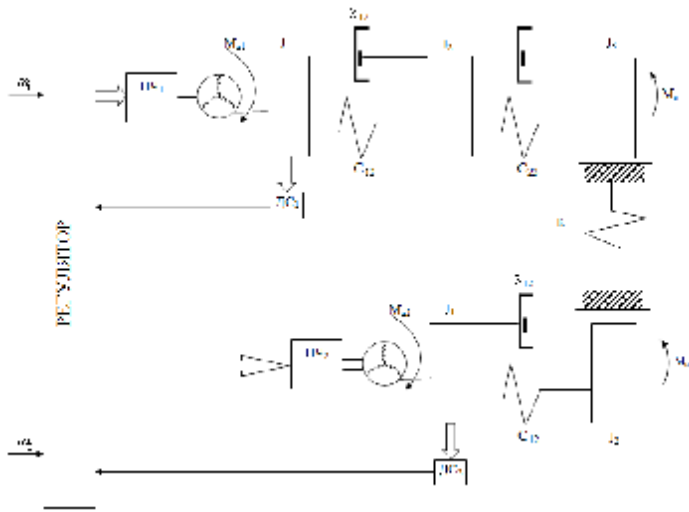


Рис. 1.

управления вообще принимается нулевым. Поэтому будем предполагать, что в системе используется частотное управление приводными двигателями, реализовано программно-аппаратное прямое управление моментами, а математические модели контуров прямого управления моментами примем в виде апериодических звеньев первого порядка с постоянными времени, равными времени нарастания моментов синхронных двигателей. Тогда уравнения динамики изменения моментов синхронных двигателей примут следующий вид:

$$T_{\mu 1} \frac{dM_{д1}}{dt} + M_{д1} = M_{31};$$

$$T_{\mu 2} \frac{dM_{д2}}{dt} + M_{д2} = M_{32}.$$

В этих уравнениях $T_{\mu 1}$, $T_{\mu 2}$ – постоянные времени частотных преобразователей, характеризующие время нарастания моментов двигателей; M_{31} , M_{32} – заданные значения моментов, поступающие на вход систем прямого управления моментами синхронных двигателей.

Для короткой линии главного привода примем модель в виде двух-массовой системы, которой соответствует система следующих уравнений:

$$J_B \frac{d\omega_B}{dt} = M_y + \beta(\omega_d - \omega_B) - \beta_c \omega_B - M_c ;$$

$$\frac{dM_y}{dt} = C(\omega_d - \omega_B);$$

$$J_d \frac{d\omega_d}{dt} = M_d - M_y - \beta(\omega_d - \omega_B).$$

В этих уравнениях: ω_B, ω_d – скорость вращения валка и двигателя; J_B, J_d – момент инерции валка и двигателя; M_y – момент упругости; C, β – жесткость и коэффициент внутреннего вязкого трения упругого вала на скручивание. Наличие подающего участка учтено в зависимости момента внешнего трения от скорости вращения с жесткостью β_c [15].

Для длинной линии главного привода прокатного стана примем модель в виде трехмассовой системы с моментами инерции двигателя, муфты и валка. Уравнения динамики такой системы примут следующий вид:

$$J_B \frac{d\omega_B}{dt} = M_{y2} + \beta_2(\omega_M - \omega_B) - \beta_c \omega_B - M_c ;$$

$$\frac{dM_{y2}}{dt} = C_2(\omega_M - \omega_B);$$

$$J_p \frac{d\omega_M}{dt} = M_{y1} + \beta_1(\omega_d - \omega_p) - M_{y2} - \beta_2(\omega_M - \omega_B);$$

$$\frac{dM_{y1}}{dt} = C_1(\omega_d - \omega_M);$$

$$J_d \frac{d\omega_d}{dt} = M_d - M_{y1} - \beta_1(\omega_d - \omega_M),$$

где $\omega_B, \omega_M, \omega_d$ – скорости вращения валка, редуктора и двигателя; M_{y1}, M_{y2} – моменты упругости в быстроходном и тихоходном валах; C_1, C_2 и β_1, β_2 – жесткости и коэффициенты внутреннего вязкого трения в быстроходном и тихоходном валах на скручивание; T_s – электромагнитная постоянная якорной цепи; T_u – постоянная времени тиристорного преобразователя; J_B, J_M, J_d – моменты инерции валка, муфты и двигателя.

В этих уравнениях также учтено наличие падающего участка в

характеристике внешнего трения с наклоном β_c .

Рассмотрим случай, когда скорости вращения верхнего и нижнего валков не равны друг другу. В этом случае за счет наличия связи через прокатываемый металл возникает перераспределение нагрузок так, что валок, который вращается с большей скоростью, берет на себя большую долю момента прокатки. Скорости вращения валков короткой ω_{B2} и длинной ω_{B1} линий главного привода прокатного стана различны и их уравнения динамики могут быть записаны в следующем виде (будем обозначать переменные и константы относящиеся к длинной линии с индексом 1, а к короткой – с индексом 2):

$$J_{B1} \frac{d\omega_{B1}}{dt} = M_{y12} + \beta_{12}(\omega_{d1} - \omega_{B1}) - \beta_{c1}\omega_{B1} - 0,5M_c - \Delta M ;$$

$$J_{B2} \frac{d\omega_{B2}}{dt} = M_{y2} + \beta_2(\omega_{d2} - \omega_{B2}) - \beta_{c2}\omega_{B2} - 0,5M_c - \Delta M ,$$

где изменение момента ΔM , вызванное разностью скоростей вращения верхнего и нижнего валков:

$$\Delta M = k(\omega_{B1} - \omega_{B2}).$$

Тогда эти уравнения динамики примут следующий вид:

$$J_{B1} \frac{d\omega_{B1}}{dt} = M_{y12} + \beta_{12}(\omega_{d1} - \omega_{B1}) - \beta_{c1}\omega_{B1} - 0,5M_c - k\omega_{B1} + k\omega_{B2} ,$$

$$J_{B2} \frac{d\omega_{B2}}{dt} = M_{y2} + \beta_2(\omega_{d2} - \omega_{B2}) - \beta_{c2}\omega_{B2} - 0,5M_c - k\omega_{B2} + k\omega_{B1} .$$

При захвате металла момент сопротивления изменяется не мгновенно и зависит от условий захвата. Примем модель изменения момента сопротивления в виде аperiodического звена первого порядка [16-21].

$$\frac{M_c(t)}{dt} = -\frac{1}{a} M_c(t) + \frac{1}{a} M(t) ,$$

где $M(t)$ – ступенчатое изменение внешнего воздействия.

На основании этой математической модели рассмотрим построение робастного регулятора. Основное назначение системы управления заключается в поддержании скоростей вращения ω_{B1} верхнего и ω_{B2} нижнего валков на заданных уровнях ω_{31} и ω_{32} . Для построения астатического регулятора введем вектор измеряемых координат: $\mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t) + D\mathbf{u}(t)$, компонентами которого являются: $\mathbf{y}(t) = \{\omega_{d1}, \omega_{d2}\}^T$ и вектор задающих воздействий: $\mathbf{y}_3(t) = \{\omega_{31}, \omega_{32}\}^T$.

Введем вектор вспомогательных переменных $\mathbf{z}(t)$, связанный с вектором регулируемых координат $\mathbf{y}(t)$ и вектором задающих воздействий $\mathbf{y}_3(t)$ уравнением состояния:

$$\frac{d\mathbf{z}(t)}{dt} = \mathbf{r}_3 \mathbf{y}_3(t) - \mathbf{r} \mathbf{y}(t).$$

Для уравнения состояния расширенной системы, включающей уравнение состояния объекта управления и уравнение состояния вектора вспомогательных переменных рассмотрим стандартную форму уравнения состояния, вектора контролируемых параметров $\mathbf{Z}(t)$ и вектора измеряемых переменных $\mathbf{y}(t)$, принятой в теории робастного управления [15]:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A\mathbf{X}(t) + B_1\mathbf{W}_1(t) + B_2\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Z}(t) &= C_1\mathbf{X}(t) + D_{11}\mathbf{W}_1(t) + D_{12}\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) &= C_2\mathbf{X}(t) + D_{21}\mathbf{W}_1(t) + D_{22}\mathbf{U}(t) \end{aligned}$$

Введем вектор состояния исходной системы $\mathbf{x}(t)$ в следующем виде

$$\mathbf{r} \mathbf{X}(t) = \left\{ \omega_{B1}(t), M_{y12}(t), \omega_p(t), M_{y11}(t), \omega_{d1}(t), M_{d1}(t), \right. \\ \left. Z_1(t), \omega_{B2}(t), M_{y2}(t), \omega_{d2}(t), M_{d2}(t), Z_2(t), M_c(t) \right\}^T$$

Матрица состояния приведена на следующее странице.

$$A = \begin{bmatrix} -\beta_{c1} - \beta_{12} & -\frac{K}{J_{d1}} & \frac{1}{J_{d1}} & \frac{\beta_{12}}{J_{d1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K}{J_{d1}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_{d1}} \\ -\dot{N}_{12} & 0 & 0 & \frac{\beta_{11}}{J_{d1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_{12}}{J_p} & -\frac{1}{J_p} & -\frac{\beta_{11} - \beta_{12}}{J_p} & \frac{1}{J_p} & \frac{\beta_{11}}{J_p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_{11} & 0 & C_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\beta_{11}}{J_{d1}} & -\frac{1}{J_{d1}} & -\frac{\beta_{11}}{J_{d1}} & \frac{1}{J_{d1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{i1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K}{J_{d2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{d2} - \beta_2 + K}{J_{d2}} & \frac{1}{J_{d2}} & \frac{\beta_2}{J_{d2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{J_{d2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_2 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_2}{J_{d2}} & -\frac{1}{J_{d2}} & -\frac{\beta_2}{J_{d2}} & \frac{1}{J_{d2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{i2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\alpha} \end{bmatrix}$$

Для синтеза робастного регулятора необходимо определить такой динамический блок, заданный матрицами A_p , B_p , C_p , D_p , входом

которого является измеряемый вектор исходной системы $\mathbf{y}(t)$, а выходом является вектор управления $\mathbf{u}(t)$ исходной системы

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} &= A_p \mathbf{x}_p + B_p \mathbf{y}; \\ \mathbf{u} &= C_p \mathbf{x}_p + D_p \mathbf{y}.\end{aligned}$$

Подставив в уравнение состояния исходной системы управление, сформированное с помощью регулятора, а в уравнение состояния регулятора подставив управление регулятора в виде вектора измеряемых координат исходной системы, получим следующие уравнения.

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{x}}{dt} &= A\mathbf{x} + B_1\mathbf{w} + B_2[C_p\mathbf{x}_p + D_p[C_2\mathbf{x} + D_{21}\mathbf{w}]]; \\ \mathbf{z} &= C_1\mathbf{x} + D_{12}[C_p\mathbf{x}_p + D_p[C_2\mathbf{x} + D_{21}\mathbf{w}]]; \\ \frac{d\mathbf{x}_p}{dt} &= A_p\mathbf{x}_p + B_p[C_2\mathbf{x} + D_{21}\mathbf{w}].\end{aligned}$$

После преобразования получим:

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{x}}{dt} &= (A + B_2D_pC_2)\mathbf{x} + B_2C_p\mathbf{x}_p + (B_1 + B_2D_pD_{21})\mathbf{w}; \\ \frac{d\mathbf{x}_p}{dt} &= B_pC_2\mathbf{x} + A_p\mathbf{x}_p + B_pD_{21}\mathbf{w}; \\ \mathbf{z} &= (C_1 + D_{12}C_2)\mathbf{x} + D_{12}C_p\mathbf{x}_p + D_{12}D_pD_{21}\mathbf{w}.\end{aligned}$$

Запишем эти уравнения в блочном виде:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{x}}{dt} \\ \frac{d\mathbf{x}_p}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A + B_2D_pC_2 & B_2C_p \\ B_pC_2 & A_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 + B_2D_pD_{21} \\ B_pD_{21} \end{bmatrix} \mathbf{w}; \\ \mathbf{z} &= \begin{bmatrix} C_1 + D_{12}C_2 & D_{12}C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_p \end{bmatrix} + D_{12}D_pD_{21}\mathbf{w}.\end{aligned}$$

Тогда уравнение состояния исходной системы, замкнутой этим регулятором, в расширенном пространстве состояний $\mathbf{x}_3(t) = \{\mathbf{x}^T(t), \mathbf{x}_p^T(t)\}^T$ и уравнение вектора контролируемых переменных примут следующий вид:

$$\frac{d\mathbf{x}_3}{dt} = A_3\mathbf{x}_3 + B_3\mathbf{w}; \quad \mathbf{z} = C_3\mathbf{x}_3 + D_3\mathbf{w},$$

где соответствующие матрицы равны:

$$A_3 = \begin{bmatrix} A + B_2 D_p C_2 & B_2 C_p \\ B_p C_2 & A_p \end{bmatrix}; \quad B_3 = \begin{bmatrix} B_1 + B_2 D_p D_{21} \\ B_p D_{21} \end{bmatrix};$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} C_1 + D_{12} C_2 & D_{12} C_p \end{bmatrix}; \quad D_3 = \begin{bmatrix} D_{12} D_p D_{21} \end{bmatrix}.$$

Синтез регулятора, минимизирующего H^∞ – норму, сводится к нахождению собственных значений матриц Гамильтона по управлению

$$H_\infty = \begin{bmatrix} A & \gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T \\ -C_1^T C_1 & -A^T \end{bmatrix},$$

и по фильтрации

$$J_\infty = \begin{bmatrix} A^T & \gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2 \\ -B_1 B_1^T & -A \end{bmatrix},$$

что соответствует решению уравнений Риккати по управлению:

$$A^T X_\infty + X_\infty A - X_\infty (B_2 B_2^T - \gamma^2 B_1 B_1^T) X_\infty + C_1^T C_1 = 0$$

и по фильтрации:

$$A Y_\infty + Y_\infty A^T - Y_\infty (C_2^T C_2 - \gamma^2 C_1^T C_1) Y_\infty + B_1 B_1^T = 0.$$

Результаты моделирования. В качестве примера на рис. 2 показаны переходные процессы переменных состояния робастного управления трехмассовой электромеханической системы верхнего валка: а) скорости вращения верхнего валка ω_{a1} ; б) момента упругости тихоходного вала M_{y12} ; в) скорости вращения редуктора ω_p ; г) момента упругости тихоходного вала M_{y11} ; д) скорости вращения верхнего двигателя ω_{d1} и е) момента верхнего двигателя M_{d1} трехмассовой электромеханической системы робастного управления верхним валком.

На рис. 3 показаны переходные процессы переменных состояния робастного управления двухмассовой электромеханической системы нижнего валка в системе управления индивидуальными приводами с синхронными двигателями с учетом взаимного влияния приводов через прокатываемый металл: а) скорости вращения нижнего валка ω_{B2} , б) момента упругости вала M_{y2} , в) скорости вращения двигателя ω_{d2} и г) момента двигателя нижнего валка M_{d2} , двухмассовой электромеханической системы робастного управления нижнего валка. На входы

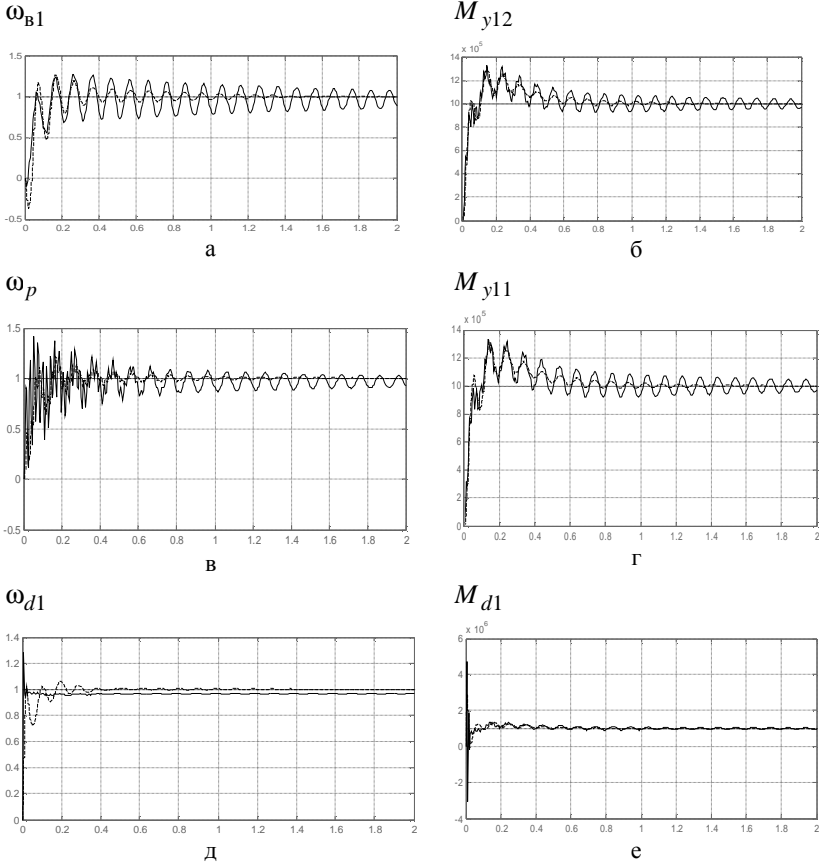


Рис. 2.

регуляторов поданы единичные ступенчатые воздействия и приложено возмущающее воздействие. Переходные процессы в короткой и длинной линиях стана, представленных в виде двух и трехмассовых систем существенно отличаются друг от друга, причем по мере увеличения взаимной связи через прокатываемый металл, переходные процессы становятся менее колебательными.

На рисунках показаны кривые, характеризующие переходные процессы с П-регулятором (сплошная линия) и с робастным регулятором (пунктирная линия). Как следует из сравнения этих переходных процессов при одинаковом быстродействии система с робастным ре-

гулятором имеет меньшую колебательность и отсутствие статической ошибки.

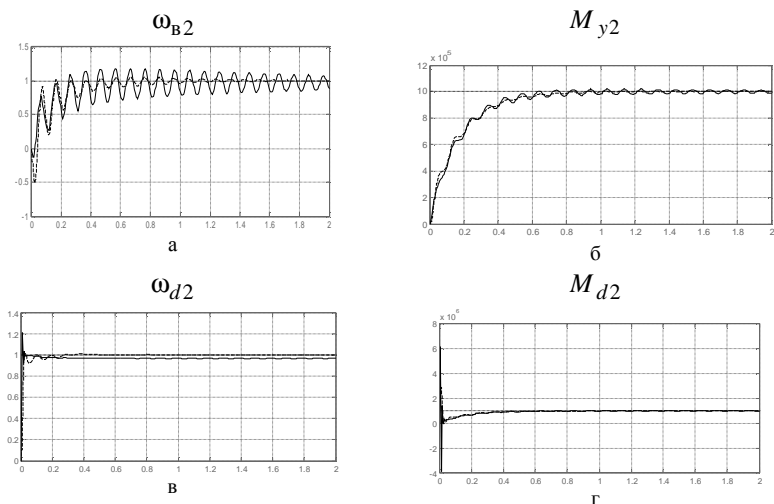


Рис. 3.

Выводы из приведенного исследования, перспективы этого направления. Таким образом, разработан метод синтеза робастного управления скоростями вращения верхнего и нижнего валков прокатного стана с синхронными двигателями с учетом взаимного влияния валков друг на друга через прокатываемый металл. Такая система фактически является двухканальной системой, так как имеет два задающих воздействия по скоростям вращения верхнего и нижнего валков. Эти два задающих воздействия могут быть различны, причем в системе имеется взаимное влияние каналов друг на друга через прокатываемый слиток. Чем больше это влияние, тем больше отличаются переходные процессы в системе от переходных процессов в автономных каналах. Однако, если взаимосвязь через прокатываемый металл разрывается, что имеет место в режиме буксования валков, то приводы верхнего и нижнего валков работают автономно, и их переходные процессы соответствуют переходным процессам в автономных каналах регулирования скорости.

Список литературы: 1. Айгнер Х., Фухс А. Модернизация приводов широкополосного стана горячей прокатки фирмы Voestalpine Stahl / Черные металлы. – 2006. – С. 45-47. 2. Джелали М., Мюллер У., Вольфф А., Унгерер В. Современные стратегии регулирования на прокатных станах / Черные металлы. – 2001. – №3. – С. 72-81.

3. Чжан Лю, Майерль Й., Пихлер Р., Зильберман У. Модернизация широкополосного стана горячей прокатки на заводе SHAGANG / Черные металлы. – 2003. – С. 27-33.
4. Дегнер М., Ратцек У. Разработки в области горячей и холодной прокатки / Черные металлы, декабрь. 2006. – С. 33-42.
5. Дегнер М., Франк А., Лакингер Х., Маук П.-Й. Третья Европейская конференция по прокатке. Актуальные разработки в области горячей и холодной прокатки / Черные металлы, апрель. 2004. – С. 28-35.
6. Шниц В., Пихлер Р., Айстляйтнер К., Кайнцель Г., Вольтерс Х. Новое поколение систем автоматизации от фирм производителей металлургического оборудования / Черные металлы, март. 2004. – С. 38-42.
7. Beck, H.P, Goslar, M.: Optimizing the Control of High-Power Electric Drives. Proceeding of the Fourth IASTED International Conference "Robotics and Manufacturing", 1996, P. 329-332.
8. Иванченко Ф.К., Красношанка В.А. Динамика металлургических машин. – М.: Металлургия, 1983. – 295 с.
9. Лехов О.С. Динамические нагрузки в линии привода обжимных станов. – М., Машиностроение, 1975. – 184 с.
10. Кузнецов Б.И., Новоселов Б.В., Богаенко И.Н. Проектирование многоканальных систем оптимального управления // Киев: Техника. – 1993. – 242 с.
11. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков, УИПА, 2005. – 511 с.
12. Кузнецов Б.И., Осичев А.В., Чаусов А.О. Оптимальное управление главным приводом блюминга в режиме пробуксовки валков // Техническая электродинамика. – Киев, 2000. – Ч. 6. – С. 23-28.
13. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с.
14. ABB Katalog 1990, Sanftalasser Typ DENE und DEHEd Nr. GSST 326590. – 43 p.
15. Moller-Pedersen, Martin Pagh Petersen. Control of Nonlinear Plants. Volume 1. – Technical University of Denmark, 1995. – 192 p.
16. Кузнецов Б.И., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Математическая модель главных приводов прокатных станов с учетом их взаимосвязи через прокатываемый металл как объекта робастной системы управления // Вестник НТУ "ХПИ": Тем. вып. "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2009. – №44. – С. 56 – 61.
17. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Кузнецова Л.Г. Цифровое нелинейное робастное управление главным электроприводом блюминга в режиме пробуксовки валков / Электромашинобудування та електрообладнання. Міжвідомчий науково-технічний зб. – Одеса, 2006. – Вип. №66. – С. 107-108.
18. Буряковский С.Г. Экспериментальные исследования процесса буксования валков прокатного стана на действующем электрооборудовании // Механіка та машинобудування. – 2000. – №1. – С. 113-115.
19. Буряковский С.Г., Басов А.В., Богаевский А.Б. Экспериментальные исследования процесса пробуксовки валков прокатного стана на действующем оборудовании // Вестник ХГПУ. Тем. вып. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 1999. – №61. С. 209-210.
20. Буряковский С.Г., Басов А.В., Богаевский А.Б., Кунченко Т.Ю. Динамические нагрузки в главной линии блюминга // Вестник ХГПУ. – 2000. – Вып. №113. – С. 240.
21. Буряковский С.Г., Богаевский А.Б., Басов А.В., Кунченко Т.Ю. Демпфирование упругих колебаний исполнительных механизмов средствами электропривода // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: Основа, 1997. – С. 262-263.

Поступила в редакцию 15.06.2010