

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

Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

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

И.В. БОВДУЙ, канд. техн. наук, научный сотрудник НТЦ МТО
НАН Украины, Харьков

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ И С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЧЕРЕЗ ПРОКАТЫВАЕМЫЙ МЕТАЛЛ ПРИ ЦИФРОВОМ УПРАВЛЕНИИ

Розроблено математичні моделі головних приводів прокатних станів із синхронними двигунами при цифровому керуванні у вигляді двомасової електромеханічної системи для короткої лінії та у вигляді тримасової електромеханічної системи для довгої лінії з урахуванням пружних елементів у трансмісіях між виконавчими двигунами, редукторами й прокатними валками з урахуванням нелінійних моментів тертя між валками та взаємним впливом прокатних валків один на одного у ході прокатки через метал, що прокатується.

Разработаны математические модели главных приводов прокатных станов с синхронными двигателями при цифровом управлении в виде двухмассовой электромеханической системы для короткой линии и в виде трехмассовой электромеханической системы для длинной линии с учетом упругих элементов в трансмиссиях между исполнительными двигателями, редукторами и прокатными валками и с учетом нелинейных моментов трения между валками взаимным влиянием прокатных валков друг на друга в ходе прокатки через прокатываемый металл.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Большинство современных главных приводов прокатных станов комплектуются синхронными двигателями с частотными преобразователями.

При векторном управлении синхронными приводами в большинстве систем управления реализуется алгоритм прямого управления моментом двигателя. При этом по данным большинства фирм производителей частотных преобразователей, время нарастания момента не превышает нескольких миллисекунд, а время спада момента при таком

алгоритме управления вообще принимается нулевым. Поэтому будем предполагать, что в системе используется частотное управление приводными двигателями и реализовано программно-аппаратное прямое управление моментами.

Анализ последних достижений и публикаций. В работах [1-6] рассмотрены вопросы синтеза систем управления главными приводами для математических моделей в виде двух и трехмассовых электромеханических систем при непрерывном управлении. Все современные системы управления электроприводами строятся на цифровой элементной базе.

Цель работы. Целью данной работы является разработка математической модели главных приводов прокатных станов с синхронными двигателями переменного тока и с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл при цифровом управлении.

Результаты исследований. На рис. 1 показана схема прокатного

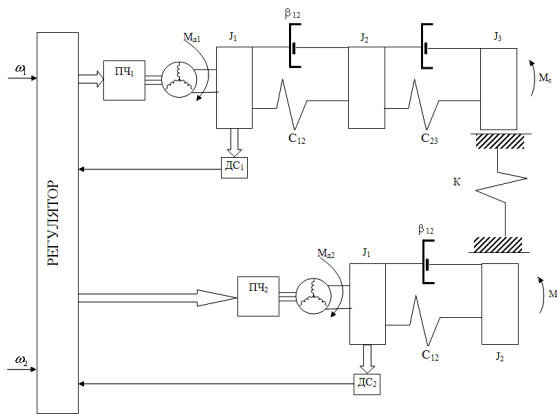


Рис. 1.

стана с индивидуальным приводом валков с синхронными двигателями и с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл.

Приведем основные уравнения динамики этой системы. Для короткой линии главного привода примем модель в виде

двухмассовой 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.

При этом учтено наличие подающего участка в зависимости момента внешнего трения от скорости вращения с жесткостью β_c [6].

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:

$$\begin{aligned}
 J_B \frac{d\omega_B}{dt} &= M_{y2} + \beta_2(\omega_M - \omega_B) - \beta_c \omega_B - M_c, \\
 \frac{dM_{y2}}{dt} &= C_2(\omega_M - \omega_B), \\
 J_P \frac{d\omega_M}{dt} &= M_{y1} + \beta_1(\omega_D - \omega_P) - M_{y2} - \beta_2(\omega_M - \omega_B), \\
 \frac{dM_{y1}}{dt} &= C_1(\omega_D - \omega_M), \\
 J_D \frac{d\omega_D}{dt} &= M_D - M_{y1} - \beta_1(\omega_D - \omega_M).
 \end{aligned}$$

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 .

Если скорости вращения верхнего и нижнего валков не равны друг другу, то 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 ко-

роткой – 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 апериодического звена первого порядка [1-3].

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

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

На основании этой математической модели рассмотрим построение робастного регулятора.

Для построения математической модели при цифровом управлении рассмотрим вспомогательную непрерывную динамическую систему. Введем вектор состояния этой системы, компонентами которой являются

$$\vec{X}(t) = \{ \omega_{B1}(t), M_{y12}(t), \omega_p(t), M_{y11}(t), \omega_{d1}(t), \omega_{B2}(t), M_{y2}(t), \omega_{d2}(t), M_c(t) \}^T .$$

Введем вектор управления, компонентами которого являются моменты первого и второго двигателей M_{d1} и M_{d2} , а также момент сопротивления M_c , так, что вектор управления примет следующий вид

$$\vec{U}(t) = \{ M_{d1}, M_{d2}, M_c \}^T$$

Матрицы состояния и управления примут следующий вид

$$\vec{X} = \{\omega_{в1}, M_{y12}, \omega_p, M_{y11}, \omega_{д1}, M_{д1}, \omega_{в2}, M_{y2}, \omega_{д2}, M_{д2}, M_c\}^T.$$

Тогда с учетом введенных обозначений блоков матриц состояния и управления вспомогательной дискретной системы матрицы состояния, управления B по вектору задающих воздействий моментов двигателей и матрица возмущения F по моменту сопротивления разомкнутой системы примут следующий вид:

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline A_{11} & B_{11} & A_{12} & & A_{13} \\ \hline & & & & \\ \hline A_{21} & & A_{22} & B_{22} & A_{23} \\ \hline & & & & \\ \hline & & & & A_{33} \\ \hline \end{array} \quad B = \begin{array}{|c|c|} \hline & \\ \hline 1 & \\ \hline & \\ \hline & 1 \\ \hline & \\ \hline \end{array}; \quad F = \begin{array}{|c|} \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline B_{33} \\ \hline \end{array}.$$

По полученным матрицам состояния, управления по моментам двигателей и возмущения по моменту сопротивления построим переходные процессы модели исходной системы управления.

Результаты моделирования. В качестве примера на рис. 2 показаны переходные процессы переменных состояния: а) скорости вращения верхнего валка $\omega_{в1}$; б) момента упругости в тихоходном валу M_{y12} верхнего валка; в) момента упругости в быстроходном валу верхнего валка M_{y11} и г) момента упругости вала нижнего валка M_{y2}

в цифровой модели системы по заданию на момент двигателя второго канала при наличии взаимосвязи между каналами. Несмотря на то, что задание на вход первого канала не подается, за счет наличия взаимосвязи между каналами, переменные состояния первого канала также изменяются – увеличение скорости вращения валков второго канала приводит к возрастанию скорости вращения валков первого канала, а с ними с ними возрастает и скорость вращения двигателя первого канала. Как видно из этих переходных процессов, моменты упругости быстроходного и тихоходного валов верхнего валка имеют отрицательные значения несмотря на то, что скорости вращения верхнего валка, редуктора и двигателя возрастают. Это связано с тем, что за счет наличия взаимосвязи между валками при вращении нижнего валка начинает вращаться и верхний валок за счет момента, передаваемого от нижнего к верхнему валку. В таком режиме работы двигатель верхнего валка работает в генераторном режиме. Момент взаимного влияния является движущим для валка, вращающегося с меньшей скоростью, однако этот момент является тормозящим для валка, вращающегося с большей скоростью. В зависимости от условий прокатки величина это-

го момента, характеризующего взаимодействие валков друг на друга через прокатываемый металл, может составлять различную долю от момента прокатки – являющегося моментом сопротивления для главных приводов блюминга.

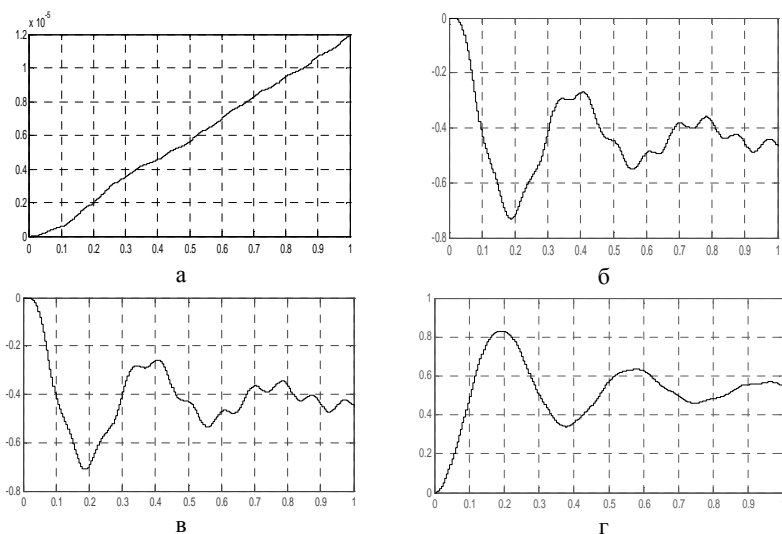


Рис. 2. Переходные процессы: а) скорости вращения верхнего валка $\omega_{в1}$; б) момента упругости в тихоходном валу M_{y12} верхнего валка; в) момента упругости в быстроходном валу верхнего валка M_{y11} и г) момента упругости вала нижнего валка M_{y2} в цифровой модели системы по заданию на момент двигателя второго канала при наличии взаимосвязи между каналами.

Переходные процессы в короткой и длинной линиях стана, представленных двух и трехмассовой системой существенно отличаются друг от друга, причем по мере увеличения взаимной связи через прокатываемый металл, переходные процессы становятся существенно менее колебательными за счет демпфирования собственных механических колебаний прокатных валков через прокатываемую полосу.

Рассмотрим теперь переходные процессы по возмущающему воздействию. На рис. 3 показаны переходные процессы переменных состояния: а) скорости вращения верхнего валка $\omega_{в1}$; б) момента упругости в тихоходном валу M_{y12} верхнего валка; в) момента упругости в быстроходном валу верхнего валка M_{y11} и г) момента упругости вала нижнего валка M_{y2} в цифровой модели системы по возмущению при

наличии взаимосвязи между каналами со значением коэффициента взаимосвязи $K=1e6$.

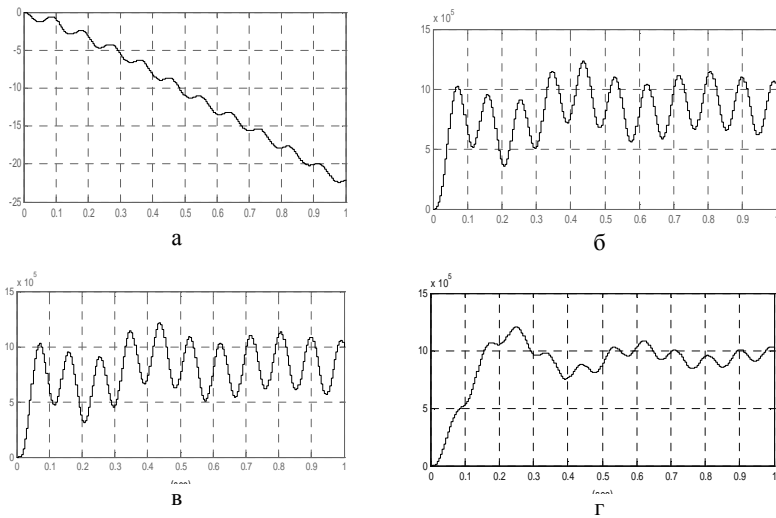


Рис. 3. Переходные процессы: а) скорости вращения верхнего валка ω_{y1} ; б) момента упругости в тихоходном валу M_{y12} верхнего валка; в) момента упругости в быстроходном валу верхнего валка M_{y11} и г) момента упругости вала нижнего валка M_{y2} в модели цифровой системы по заданию на момент двигателя второго канала при наличии взаимосвязи между каналами.

Под действием момента сопротивления скорости вращения всех механизмов – прокатных валков, редуктора и двигателей начинают уменьшаться. Причем, основную нагрузку берет на себя первый канал. Как показывает анализ полученных переходных процессов по возмущающему моменту сопротивления, за счет взаимного влияния каналов друг на друга увеличивается демпфирование каналов и, естественно, снижается перерегулирование в переходных процессах всех переменных состояния.

Выводы. Разработана математическая модель совместного управления скоростью вращения верхнего и нижнего валков прокатного стана при цифровом управлении с учетом взаимного влияния валков друг на друга через прокатываемый металл. Система является двухканальной, так как имеет два задающих воздействия по скорости 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 в сторону увеличения колебательности вплоть до потери устойчивости. Однако, если взаимосвязь через прокатываемый слиток 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. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Математическая модель индивидуальных главных электроприводов прокатных станов с синхронными двигателями и с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – Ч. 2. – С. 207-212. 2. 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"*. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2009. – № 44. – С. 56-61. 3. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Кузнецова Л.Г. Цифровое нелинейное робастное управление главным электроприводом блюминга в режиме пробуксовки валков // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – Одеса: 2006. – № 66. – С. 107-108. 4. Кузнецов Б.И., Волошко А.В., Бовдуй И.В., Виниченко Е.В. Динамические характеристики робастной системы управления синхронными приводами прокатных станов с учетом их взаимосвязи через прокатываемый металл // *Вестник НТУ "ХПИ"*. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2010. – № 36. – С. 58-68. 5. Кузнецов Б.И., Осичев А.В., Чаусов А.О. Оптимальное управление главным приводом блюминга в режиме пробуксовки валков // *Техническая электродинамика*. – 2000. – Ч. 6. – С. 23-28. 6. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков: УИПА, 2005. – 511 с.



Кузнецов Борис Иванович, д.т.н., проф., заведующий отделом Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины. Защитил докторскую диссертацию в 1990 году по синтезу структур и оптимизации многоканальных квазиитерационных систем управления.



Никитина Татьяна Борисовна, к.т.н., докторант кафедры системного анализа и управления Национального технического университета "ХПИ", защитила кандидатскую диссертацию в 2001 году по синтезу систем управления главными электроприводами блюминга в режиме пробуксовки валков



Волошко Александр Валерьевич, м.н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины



Бовдуй Игорь Валентинович, к.т.н., с.н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины



Виниченко Елена Владимировна м.н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины

*Поступила в редколлегию 31.01.2011
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*