

**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**, к.т.н., научный сотрудник, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

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

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛАВНЫХ ПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЧЕРЕЗ ПРОКАТЫВАЕМЫЙ МЕТАЛЛ НА СТЕНДЕ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

The method of experimental research of rolling mills main drives with related through the rolled metal as a two-mass electromechanics system for the short line and as a three-mass electromechanics system for the long line on two-mass electromechanics system stand are developed. The example of experimental dynamic characteristics for such system is given.

Розроблено методику експериментального дослідження систем керування головними приводами прокатних станів із синхронними двигунами у вигляді двомасової електромеханічної системи для короткої лінії та тримасової електромеханічної системи для довгої лінії з урахуванням взаємного впливу прокатних валків один на одного у ході прокатки через метал, що прокатується, на стенді двомасової електромеханічної системи. Наведено приклади експериментальних характеристик системи.

Разработана методика экспериментального исследования систем управления главными приводами прокатных станов с синхронными двигателями в виде двухмассовой электромеханической системы для короткой линии и трехмассовой электромеханической системы для длинной линии с учетом взаимного влияния прокатных валков друг на друга в ходе прокатки через прокатываемый металл на стенде двухмассовой электромеханической системы. Приведен пример экспериментальных характеристик системы.

**Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами.** Главные приводы современных прокатных станов комплектуются синхронными двигателями с частотными преобразователями и

векторным управлением с реализацией алгоритма прямого управления моментом двигателя. 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 [1-3] рассмотрены вопросы синтеза систем управления главными приводами для математических моделей в виде двух и трехмассовых электромеханических систем при непрерывном управлении.

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка методики экспериментального исследования систем управления главными приводами прокатных станов с синхронными двигателями в виде двухмассовой электромеханической системы для короткой линии и трехмассовой электромеханической системы для длинной линии с учетом взаимного влияния прокатных валков друг на друга в ходе прокатки через прокатываемый металл на стенде двухмассовой электромеханической системы.

**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.

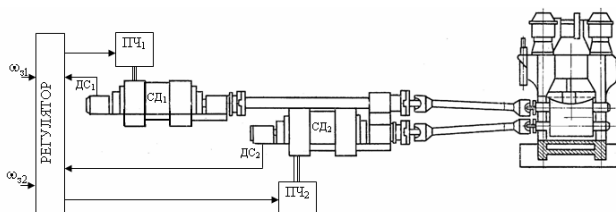


Рис. 1. Схема главных приводов прокатного стана с синхронными двигателями и преобразователями частоты.

Для короткой линии главного привода примем модель в виде двухмассовой системы, а для длинной линии примем модель в виде трехмассовой системы, как это показано на рис. 2.

Короткая линия главного привода верхнего валка прокатного стана в виде двухмассовой электромеханической системы макетируется с помощью стенда двухмассовой электромеханической системы. Длинная линия главного привода нижнего валка прокатного стана в виде трехмассовой электромеханической системы моделируется с помощью ПЭВМ, работающей в режиме реального времени. Схема такой системы показана на рис. 3.

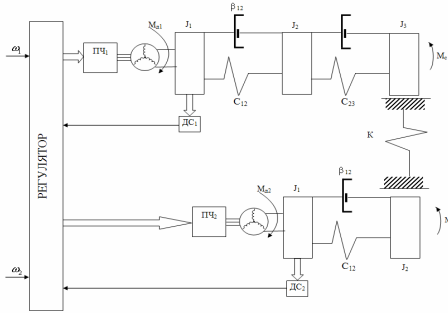


Рис. 2. Схема главных приводов прокатного стана с индивидуальным приводом валков.

Двигатель Д1 стана макетирует приводной двигатель короткой линии, а двигатель Д2 макетирует прокатный валок короткой линии. Управление первым двигателем осуществляется от преобразователя П1 с помощью регулятора скорости Р1 первого двигателя по сигналу с датчиком скорости ДС1 первого двигателя. С помощью второго двигателя стана моделируется момент нагрузки на прокатный валок, обусловленный взаимосвязью через прокатываемый металл пропорциональный разности скоростей вращения верхнего и нижнего валков, обусловленных скоростной асимметрией прокатки. Величина момента  $\Delta M$ , пропорциональна разности скоростей второго двигателя Д2, измеренного с помощью датчика скорости ДС2 второго двигателя, и скорости вращения валка длинной линии  $\omega_{в2}$ , моделируемого в реальном времени с помощью ПЭВМ. Эта величина момента  $\Delta M$  с помощью регулятора момента РМ2 второго двигателя, обрабатывается вторым двигателем Д2 и эта же величина момента с обратным знаком в виде момента сопротивления  $M_c$  поступает на модель длинной линии.

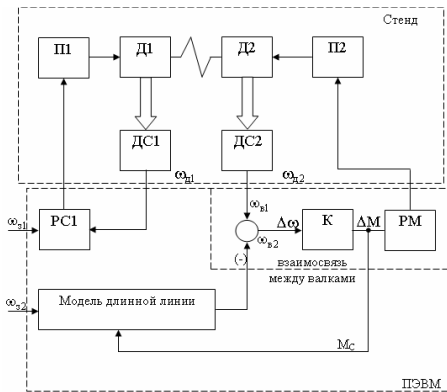


Рис. 3. Схема модели для экспериментального исследования робастного управления главных приводов прокатных станов с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл на стенде двухмассовой электромеханической системы.

Станд  
ПЭВМ

Рассмотрим математическую модель главных приводов, схема которых показана на рис. 2. Для длинной линии главного привода прокатного стана примем модель в виде трехмассовой системы с моментами инерции двигателя, муфты и вала.

Введем вектор состояния первого канала

$$\vec{X}(t) = \{\omega_{B1}(t), M_{y12}(t), \omega_p(t), M_{y11}(t), \omega_{д1}(t), M_{д1}(t), Z_1(t)\}^T.$$

Введем уравнение состояния первого канала в следующем виде:

$$\frac{dx_1}{dt} = A_1 x_1 + B_1 u_1 + B_{13} \omega_{31} - B_{c1} M_{c1},$$

где

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-\beta_{c1}-\beta_{12}}{J_{B1}} & \frac{K}{J_{B1}} & \frac{1}{J_{B1}} & \frac{\beta_{12}}{J_{B1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_{12} & 0 & 0 & C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_{12}}{J_p} & \frac{1}{J_p} & \frac{-\beta_{11}-\beta_{12}}{J_p} & \frac{1}{J_p} & \frac{\beta_{11}}{J_p} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_{11} & 0 & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\beta_{11}}{J_{д1}} & \frac{1}{J_{д1}} & \frac{\beta_{11}}{J_{д1}} & \frac{1}{J_{д1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{M1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \frac{K_{M1}}{T_{M1}} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \end{bmatrix}, \quad B_{31} = \begin{bmatrix} \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Для короткой линии главного привода примем модель в виде двухмассовой системы.

Введем вектор состояния второго канала

$$\vec{X}(t) = \{\omega_{B2}(t), M_{y2}(t), \omega_{д2}(t), M_{д2}(t), Z_2(t)\}^T.$$

Тогда в уравнение состояния второго канала

$$\frac{dx_2}{dt} = A_2 x_2 + B_2 u_2 + B_{23} \omega_{32} - B_{c2} M_{c2}$$

матрицы примут следующий вид:

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{\beta_{c2}-\beta_2-K}{J_{B2}} & \frac{1}{J_{B2}} & \frac{\beta_2}{J_{B2}} & 0 & 0 \\ -C_2 & 0 & C_2 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_2}{J_{д2}} & \frac{1}{J_{д2}} & \frac{\beta_2}{J_{д2}} & \frac{1}{J_{д2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{M2}} & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \frac{K_{M2}}{T_{M2}} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \end{bmatrix}, \quad B_{23} = \begin{bmatrix} \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Введем уравнение состояния с вектором состояния  $x_c$  для момента сопротивления  $M_c$  и уравнение выхода в следующем виде

$$\frac{dx_c}{dt} = A_c x_c + B_c F_c;$$

$$M_c = C_c x_c.$$

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. Если скорости вращения валков короткой  $\omega_{B2}$  и длинной  $\omega_{B1}$  линий главного привода прокатного стана различны и изменение момента  $\Delta M$ , вызванное разностью скоростей вращения верхнего и нижнего валков:

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

Тогда моменты сопротивления на верхний и нижний валки равны

$$M_{c1} = 0,5M_c + K_c(\omega_{B1} - \omega_{B2});$$

$$M_{c2} = 0,5M_c + K_c(\omega_{B2} - \omega_{B1}).$$

Введем вектор расширенной системы  $x(t)$  в следующем виде

$$x(t) = \{x_1^T, x_2^T, x_c^T\}^T.$$

Введем вектор управлений, компонентами которого будут заданные значения моментов синхронных двигателей

$$u(t) = \{M_{31}(t), M_{32}(t)\}^T.$$

Введем вектор заданных значений скоростей

$$\omega_3(t) = \{\omega_{31}(t), \omega_{32}(t)\}^T;$$

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + B_c F_c + B_3 \omega_3(t),$$

$$A = \begin{array}{|c|c|c|} \hline A_1 - B_{c1}C_1 & B_{c1}C_2 & -0,5B_{c1}C_c \\ \hline B_{c2}C_1 & A_2 - B_{c2}C_2 & -0,5B_{c2}C_c \\ \hline & & A_c \\ \hline \end{array}, \quad B = \begin{array}{|c|} \hline B_1 \\ \hline B_2 \\ \hline \\ \hline \end{array}, \quad B_c = \begin{array}{|c|} \hline \\ \hline \\ \hline B_c \\ \hline \end{array}.$$

Синтезируем систему с П регулятором. Сформируем напряжения на якорных цепях двигателей в следующем виде

$$u_{д1} = K_1(\omega_{31} - \omega_{д1}),$$

$$u_{д2} = -K_1(\omega_{д2} - \omega_{B}).$$

Момент сопротивления, обусловленный разностью скоростей вращения пропорционален разности скоростей вращения второго двигателя и валков длинной линии

$$M_c = K(\omega_{д2} - \omega_B).$$

**Результаты экспериментальных исследований.** Вначале рассмотрим переходные процессы в системе без учета взаимной связи через прокатные валки и при одинаковых скоростях вращения так, что на входы первого и второго каналов подаются одинаковые заданные значения скорости 10 рад/с и при этом коэффициент взаимной связи через прокатываемые валки равен нулю  $K=0$ . Переходные процессы переменных состояния в этой системе показаны на рис. 4.

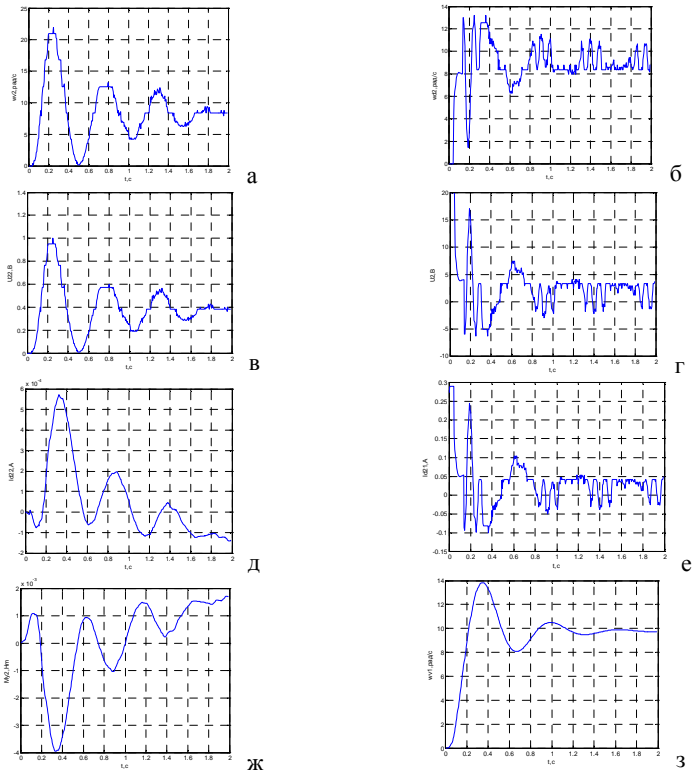


Рис. 4. Переходные процессы переменных состояния: скоростей вращения а) второго и б) первого двигателей; напряжений на якорных цепях в) второго и г) первого двигателей; токов якорных цепей д) второго и е) первого двигателей; ж) момента упругости и з) скорости вращения валков модели в системе без учета взаимной связи через прокатные валки

Как видно на рис. 4 скорость вращения второго двигателя, который имитирует прокатный валок короткой линии, при отсутствии взаимосвязи между валками через прокатываемый металл имеет слаботухающие колебания частотой 1.7 Гц.

Рассмотрим теперь переходные процессы в системе с учетом взаимной связи через прокатные валки при одинаковых скоростях вращения так, что на входы первого и второго каналов подаются одинаковые заданные значения скорости 10 рад/с и при этом коэффициент взаимной связи через прокатываемые валки равен  $K = 0.0003$ . Переходные процессы переменных состояния в этой системе показаны на рис. 5.

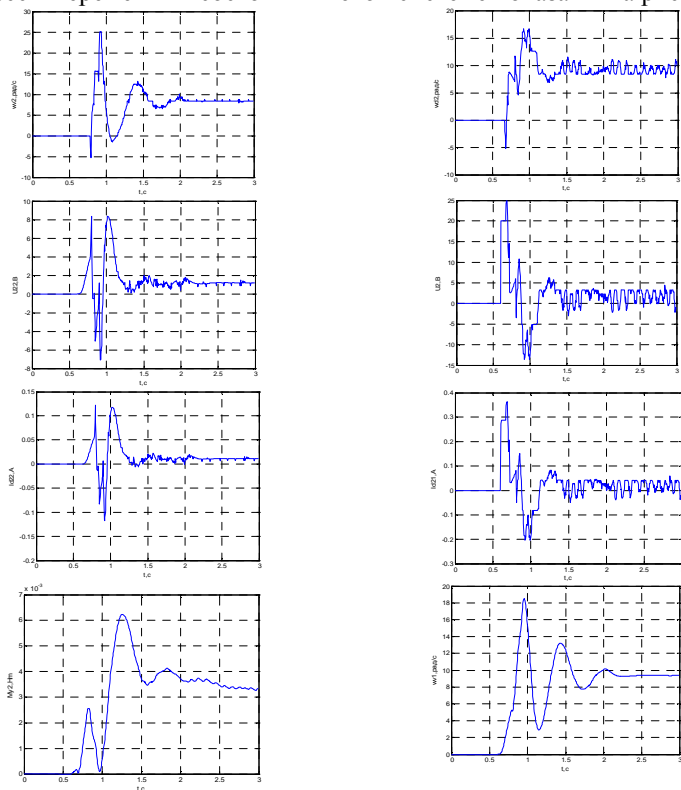


Рис. 5. Переходные процессы переменных состояния: скоростей вращения а) второго и б) первого двигателей; напряжений на якорных цепях в) второго и г) первого двигателей; токов якорных цепей д) второго и е) первого двигателей; ж) момента упругости и з) скорости вращения валков модели в системе с учетом взаимной связи через прокатные валки.

Как видно на рис. 5 скорость вращения второго двигателя, который имитирует прокатный валок короткой линии. при наличии взаимосвязи между валками через прокатываемый металл имеет существенно большее демпфирование по сравнению с переходным процессом, показанным на рис. 4 для системы без учета взаимной связи между прокатными валками.

**Выводы.** Разработана методика экспериментального исследования систем управления главными приводами прокатных станов с синхронными двигателями в виде двухмассовой электромеханической системы для короткой линии и трехмассовой электромеханической системы для длинной линии с учетом взаимного влияния прокатных валков друг на друга в ходе прокатки через прокатываемый металл на стенде двухмассовой электромеханической системы. Если в системе имеется взаимное влияние каналов друг на друга через прокатываемый металл, то чем больше это влияние, тем больше отличаются переходные процессы в системе от переходных процессов в автономных каналах в сторону повышения демпфирования переходных процессов в системе. Приведены примеры экспериментальных характеристик системы.

**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 // Вісник Национального технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 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. – 2006. – № 66. – С. 107-108.



**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., доцент 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 25.02.2012  
Рецензент д.т.н., проф. Лутиков В.С.*