

**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

### **СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ПРИВОДАМИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЧЕРЕЗ ПРОКАТЫВАЕМЫЙ МЕТАЛЛ**

Розроблено методику синтезу цифрового робастного 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. Наведено приклад динамічних характеристик синтезованої системи.

Разработана методика синтеза цифрового робастного 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. Приведен пример динамических характеристик синтезированной системы.

**Постановка проблемы.** 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. В работах [1-3] 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** – разработка методики синтеза цифрового робаст-



Примем математическую модель изменения момента двигателя в виде звена чистого запаздывания со временем запаздывания, равному периоду дискретности работы управляющего контроллера. Тогда разностные уравнения динамики, описывающие изменение моментов двигателей в двухканальной системе с отдельной нагрузкой, примут следующий вид:

$$M_{д1}(k+1) = M_{з1}(k);$$

$$M_{д2}(k+1) = M_{з2}(k).$$

Введем вектор состояния этой дискретной системы в следующем виде:

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

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:

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

Для реализации астатизма введем два цифровых интегратора, на вход которых подадим разности между заданными значениями скоростей вращения платформ и их фактическими значениями с учетом того, что скорость вращения второй платформы равна сумме скоростей вращения первой платформы и относительной скорости вращения второй платформы относительно первой платформы. При этом, разностные уравнения состояния, описывающие динамику этих цифровых интеграторов примут следующий вид:

$$z_1(k+1) = z_1(k) - \omega_{д1}(k) + \omega_{з1}(k);$$

$$z_2(k+1) = z_2(k) - \omega_{д2}(k) + \omega_{з2}(k).$$

Введем вектор состояния замкнутой дискретной системы в следующем виде

$$\vec{X}(t) = \{\omega_{в1}, M_{y12}, \omega_p, M_{y11}, \omega_{д1}, M_{д1}, Z_1, \omega_{в2}, M_{y2}, \omega_{д2}, M_{д2}, Z_2, M_c\}^T.$$

Тогда матрицы состояния, управления и возмущения примут следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & & A_{12} & & & A_{13} \\ & & & & & & \\ -C_1 & & 1 & & & & \\ A_{21} & & & A_{22} & B_{22} & & A_{23} \\ & & & & 1 & & \\ & & & -C_2 & & 1 & \\ & & & & & & A_{33} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} \quad B_3 = \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & B_{33} \end{bmatrix}$$

Здесь матрицы выхода по скорости вращения двигателя верхнего валка равна

$$C_1 = \begin{bmatrix} & & & & & & 1 \end{bmatrix},$$

а по скорости вращения двигателя нижнего валка равна

$$C_2 = \begin{bmatrix} & & & 1 \end{bmatrix}.$$

Следует заметить, что при синтезе системы используется матрица управления  $B$ , когда компонентами вектора управления являются задания на регуляторы моментов первого и второго двигателя. После синтеза робастных регуляторов для исследования динамических характеристик синтезированной системы используется матрица управления  $B_3$ , у которой компонентами вектора управления являются задающие воздействия на регуляторы скорости вращения верхнего и нижнего валков. Для исследования динамических характеристик синтезированной системы по возмущающему воздействию используется матрица возмущения  $F$ , у которой возмущением является момент сопротивления.

Для нахождения цифрового робастного регулятора необходимо решить уравнение Риккати по управлению

$$X = \bar{C}^T \bar{J} \bar{C} + A^T X A - \bar{L}^T R^{-1} \bar{L},$$

где

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \bar{D}^T \bar{J} \bar{D} + B^T X B; \quad \bar{L} = \bar{D}^T \bar{J} \bar{C} + B^T X A; \\ \bar{C} &= \begin{bmatrix} C_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ I_l & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{J} = \begin{bmatrix} I_p & 0 \\ 0 & -\gamma^2 I_l \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Для нахождения цифрового робастного наблюдателя необходимо решить уравнение Риккати по наблюдению

$$Z_q = \hat{B} \hat{J} \hat{B}^T + \hat{A} Z \hat{A}^T - \hat{L} \hat{R}^{-1} \hat{L}^T,$$

где

$$\widehat{R} = \widehat{D}\widehat{J}\widehat{D}^T + \widehat{C}\widehat{Z}\widehat{C}^T; \quad \widehat{L} = \widehat{B}\widehat{J}\widehat{D}^T + \widehat{A}\widehat{Z}\widehat{C}^T; \quad \widehat{J} = \begin{bmatrix} I_l & 0 \\ 0 & -\gamma^2 I_m \end{bmatrix}.$$

В этих выражениях  $\widehat{A}$ ,  $\widehat{B}$ ,  $\widehat{C}$ ,  $\widehat{D}$  реализация наблюдателя примет следующий вид

$$\begin{bmatrix} \widehat{A} & \widehat{B} \\ \widehat{C} & \widehat{D} \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{c|c|c} A + B_1 R_d^{-1} L_d & B_1 V_{21}^{-1} & 0 \\ \hline V_{12} R_3^{-1} (\widehat{L}_2 - \widehat{R}_2 R_2^{-1} L_d) & V_{12} \widehat{R}_3^{-1} V_{21}^{-1} & I \\ \hline C_2 - D_{21} R_d^{-1} L_d & D_{21} V_{21}^{-1} & 0 \end{array} \right],$$

где

$$R_d = \widehat{R}_1 - \widehat{R}_2^T \widehat{R}_3^{-1} \widehat{R}_2; \quad L_d = \widehat{L}_1 - \widehat{R}_2^T \widehat{R}_3^{-1} \widehat{L}_2; \quad V_{12}^T V_{12} = \widehat{R}_3; \\ V_{21}^T V_{21} = -\gamma^{-2} (\widehat{R}_1 - \widehat{R}_2^T \widehat{R}_3^{-1} \widehat{R}_2).$$

Тогда робастный регулятор и робастный наблюдатель представляет собой робастный компенсатор, входом которого является измеряемый вектор исходной системы  $\vec{y}(k)$ , а выходом является вектор управления исходной системы  $\vec{u}(k)$ . Робастный компенсатор с матрицами  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $C_p$  описывается следующим уравнением состояния:

$$\vec{x}_p(k+1) = A_p \vec{x}_p(k) + B_p \vec{y}(k); \\ \vec{u}(k) = C_p \vec{x}_p(k) + D_p \vec{y}(k),$$

где

$$A_p = \widehat{A} - B_2 V_{12}^{-1} \widehat{C}_1 + B_2 V_{12}^{-1} \widehat{R}_2 \widehat{R}_3^{-1} \widehat{C}_2 - \widehat{L}_2 \widehat{R}_3^{-1} \widehat{C}_2; \\ B_p = -B_2 V_{12}^{-1} \widehat{R}_2 \widehat{R}_3^{-1} + \widehat{L}_2 \widehat{R}_3^{-1}; \\ C_c = -V_{12}^{-1} \widehat{C}_1 + V_{12}^{-1} \widehat{R}_2 \widehat{R}_3^{-1} \widehat{C}_2; \quad D_p = -V_{12}^{-1} \widehat{R}_2 \widehat{R}_3^{-1}; \\ \widehat{R} = \begin{bmatrix} \widehat{R}_1 & \widehat{R}_2 \\ \widehat{R}_2^T & \widehat{R}_3 \end{bmatrix}; \quad \widehat{L} = [\widehat{L}_1 \quad \widehat{L}_2]; \quad \begin{bmatrix} \widetilde{R}_{\delta 1} & \widetilde{R}_{\delta 2} \\ \widetilde{R}_{\delta 2}^T & \widetilde{R}_{\delta 3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\gamma^2 I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}.$$

**Результаты моделирования.** Рассмотрим переходные процессы в системе, замкнутой синтезированными цифровыми робастными регуляторами. Для сравнения полученных результатов рассмотрим переходные процессы в системе для двух значений коэффициентов взаимосвязи между валками. Подадим на входы каналов единичные ступенчатые сигналы, приложим также возмущение и не будем учитывать влияние каналов друг на друга.

В качестве примера на рис. 1 показаны переходные процессы пе-

ременных состояния: а) скорости вращения верхнего валка  $\omega_{B1}$ ; б) момента упругости в тихоходном валу  $M_{y12}$ ; в) скорости вращения редуктора  $\omega_p$ ; г) момента упругости в быстроходном валу верхнего валка  $M_{y11}$ ; д) скорости вращения двигателя верхнего валка  $\omega_{d1}$ ; е) момента двигателя верхнего валка  $M_{d1}$  в цифровой системе с робастным регулятором при симметричной прокатке для двух значений коэффициентов взаимосвязи:  $K=1e6$  – сплошная линия и  $K=0$  – пунктирная линия.

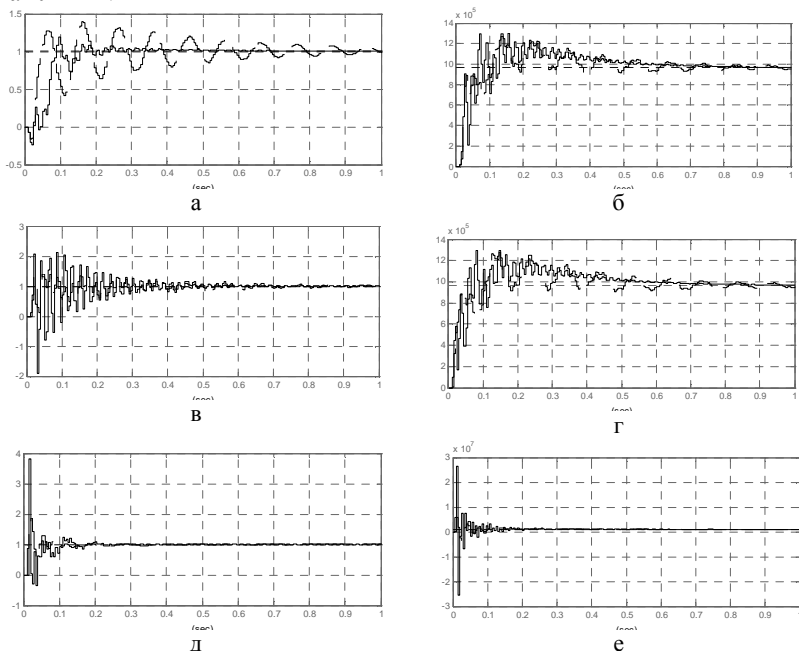


Рис. 1. Переходные процессы в цифровой системе с робастным регулятором.

На рис. 2 показаны переходные процессы: а) скорости вращения нижнего валка  $\omega_{e2}$ ; б) момента упругости вала нижнего валка  $M_{y2}$ ; в) скорости вращения двигателя нижнего валка  $\omega_{d2}$ ; г) момента двигателя нижнего валка  $M_{d2}$  в цифровой системе с робастным регулятором при симметричной прокатке для двух значений коэффициентов взаимосвязи:  $K=1e6$  – сплошная линия и  $K=0$  – пунктирная линия.

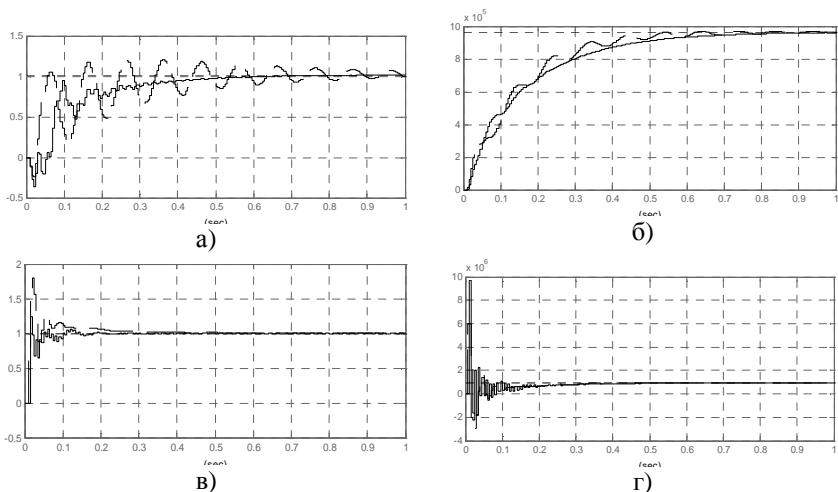


Рис. 2. Переходные процессы в цифровой системе с робастным регулятором.

Как видно из этих рисунков, с увеличением взаимной связи между каналами увеличивается демпфирование переходных процессов в системе.

**Выводы.** Разработана методика синтеза цифрового робастного управления скоростями вращения верхнего и нижнего валков прокатного стана 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, что соответствует режиму асимметричной прокатки. 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.

В режиме нормальной прокатки в системе имеется взаимное влияние каналов друг на друга через прокатываемый металл. 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.

**Список литературы:** 1. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Математическая модель индивидуальных главных элект-

троприводов 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 Национального технического университета "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*. – 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., 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 25.03.2011  
Рецензент д.т.н., проф. Лушков В.С.*

*ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПИ". 2011. № 12*