

# ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА "ХПИ"

Сборник научных трудов

Тематический выпуск  
"Автоматика и приборостроение"

23'2009

Издание основано Национальным техническим университетом  
"Харьковский политехнический институт" в 2001 году

*Государственное издание*

Свидетельство Госкомитета по  
информационной политике Украины  
КВ № 5256 от 2 июля 2001 года

## КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:

### Председатель

Л.Л. Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

### Секретарь координационного совета

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.;

Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.;

Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.;

А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Т.С. Воропай, д-р фил. наук, проф.;

М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.;

А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.;

В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.;

П.А. Качанов, д-р техн. наук, проф.;

А.Ф. Кириченко, д-р техн. наук, проф.;

В.Е. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;

О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.;

П.Г. Перерва, д-р техн. наук, проф.;

Н.И. Поторелов, д-р техн. наук, проф.;

М.И. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;

В.П. Себко, д-р техн. наук, проф.;

В.И. Таран, д-р физ.-мат. наук, проф.;

Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

### Ответственный редактор:

П.А. Качанов, д-р техн. наук, проф.

### Ответственный секретарь:

А.П. Борисенко, канд. техн. наук, доц.

В.М. Босв, д-р техн. наук, проф.;

А.И. Гапон, канд. техн. наук, доц.;

Л.В. Дербунович, д-р техн. наук, проф.;

Л.М. Любчик, д-р техн. наук, проф.;

А.И. Овчаренко, д-р техн. наук, проф.;

Е.В. Рогожкин, д-р физ.-мат. наук, проф.;

В.И. Таран, д-р физ.-мат. наук, проф.;

Г.И. Загарий, д-р техн. наук, проф.;

А.С. Куценко, д-р техн. наук, проф.;

К.И. Богатыренко, д-р техн. наук, проф.;

М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.;

Б.И. Кузнецов, д-р техн. наук, проф.;

Г.К. Вороновский, д-р техн. наук, проф.;

А.И. Рогачев, д-р техн. наук, проф.

Планируются выпуски Вестника в ноябре и  
марте каждого года

### Адрес редколлегии:

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21.

НТУ "ХПИ", Каф. АУТС

Тел. (057) 707-21-01

Харьков 2009

*С.Н. БАЛЮТА*, доцент, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАВНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ КАК ТРЕХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Розроблена методика синтезу оптимальної системи управління головним електроприводом широкополосного стану гарячої прокатки як трьохмасової електромеханічної системи. Наведено динамічні характеристики синтезованої системи оптимального управління.

The method of optimal control synthesis for hot trip rolling mill main electric drive as three-mass electromechanics system is developed. There is example of dynamic characteristics of the synthesized optimal control system.

**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]. В силу этого окружные скорости валков клеток непрерывного стана должны быть строго согласованы и поддерживаться на заданном уровне, определяемом технологическими требованиями [3].

**Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме.** Для управления моталками и главными приводами широкополосных станов горячей прокатки используют различные типы исполнительных электрических приводов. Наиболее часто применяются электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением, которые питаются от тиристорных преобразователей. Для снижения моментов инерции и повышения мощности в некоторых случаях используют двухдвигательный электропривод. Для выравнивая нагрузок якорные обмотки двигателей включают последовательно, а сами двигатели работают на общий вал. При синтезе системы регулирования скорости вращения главного привода 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 главного привода с полосой пропускания контура скорости выше резонансной частоты механической системы часто приводит к появлению незатухающих колебаний. Устойчивую работу такой системы можно получить при использовании модели системы, которая учитывает наличие упругих элементов между валом двигателя и рабочим механизмом, например,

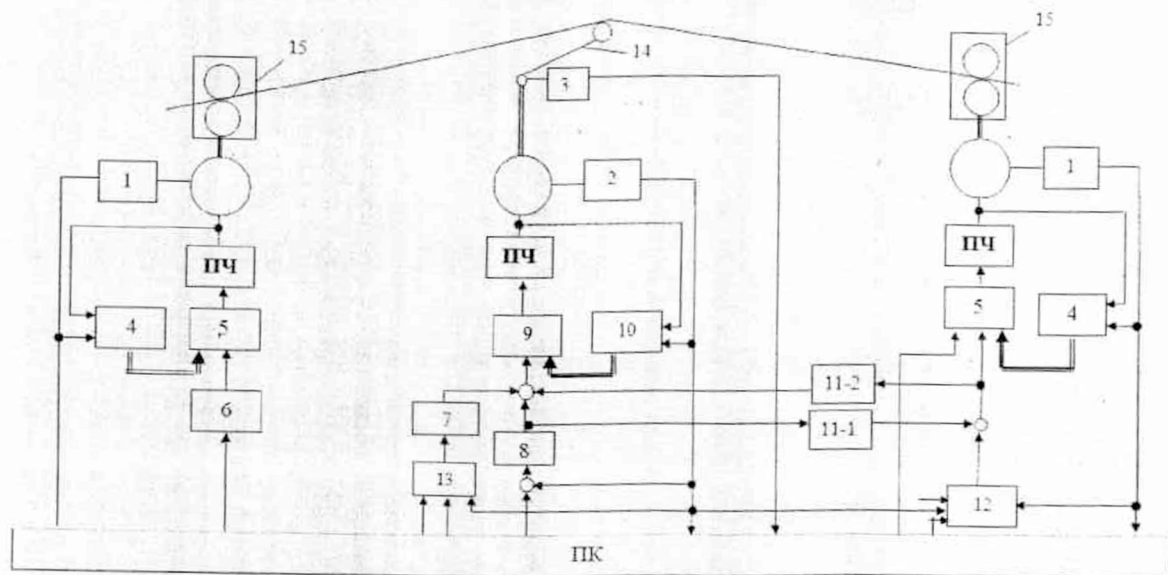


Рис. 1. Схема регулирования натяжения в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки

массовой системы, состоящей из сосредоточенных масс вала двигателя и рабочего механизма, между которыми имеется упругий элемент. Однако, в ряде случаев может понадобиться и более сложная модель привода, например, виде трехмассовой электромеханической системы [4].

**Цель работы.** Целью данной работы является исследование динамических характеристик системы оптимального управления главным электроприводом широкополосного стана горячей прокатки с математической моделью в виде трехмассовой электромеханической системы.

**Изложение материала исследования, полученных научных результатов.** Процесс горячей прокатки сопровождается колебаниями технологических параметров – толщины, давления прокатки, натяжения полосы и т.д. Причем, если колебания толщины полосы обусловлены как неравномерностью толщины и механических свойства проката, а также эксцентриситетами валков прокатной клетки, то колебания натяжения полосы и пропорциональные им колебания токов главных приводов обусловлены наличием упругих элементов в трансмиссиях передачи момента прокатки от приводного двигателя до прокатного валка. 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 клетка; ПЧ – преобразователь частоты.

Основная задача системы управления главным электроприводом широкополосного стана горячей прокатки заключается в поддержание заданного соотношения между частотами вращения рабочих валков клеток, что обеспечивает постоянство натяжения полосы между клетями и способствует уменьшению отклонения толщины прокатываемой полосы от заданной. Причем, при синтезе систем автоматического управления скоростью прокатных двигателей чистовых клеток непрерывного тонколистового стана горячей прокатки требует рассмотрение многодвигательной электромеханической системы клеток, связанных прокатываемой полосой, как единой электромеханической системы.

Для нормального ведения технологического процесса непрерывной прокатки горячей полосы электроприводы чистовых клеток должны удовлетворять следующим основным требованиям [3]:

- регулирование скорости валков клеток в диапазоне, необходимом для получения требуемых заправочной и рабочей скоростей;

- минимально возможные значения статического и динамического падений скорости при входе полосы в валки (не более 1-2);

- характер переходных процессов, вызванных входом полосы в клетку должен быть близок к апериодическому, а время протекания переходных процессов не более 0,1-0,3 с;

- требуемое быстродействие системы автоматического регулирования скорости электропривода по управляющему воздействию, необходимое для эффективной работы системы автоматического регулирования натяжения полосы и системы автоматического управления скоростным режимом прокатки;

- требуемое время торможения привода с рабочей скорости до запрошенной после выхода металла из валков;

- величина ударного падения скорости не более 2%;

- величина установившегося падения скорости не более 0,2%;

- отношение времени, соответствующего максимальному значению ударного падения скорости, ко времени восстановления скорости не более 0,25;

- время восстановления скорости не более 0,3 сек;

- величина чистого запаздывания системы не более 0,01 сек;

- передаточная функция замкнутой системы авторегулирования скорости вращения рабочих валков клетки должна приближаться к передаточной функции апериодического звена с эквивалентной постоянной времени  $T_{экв} \approx 0,1$  сек

Реализовать такие требования с помощью типовых пропорциональных интегральных регуляторов систем подчиненного регулирования, как правило не удастся. Поэтому рассмотрим синтез оптимального управления главным приводом широкополосного стана горячей прокатки с реализацией оптимального управления по полному вектору состояния.

На многих широкополосных станах горячей прокатки используется схема главного привода валков, показанная на рис. 2. Она состоит из двух электрических приводов, шестеренчатой клетки и передаточного механизма, с помощью которого момент приводного двигателя через два шпинделя передается соответственно на верхний и нижний рабочие валки. Если привод валков осуществляется от одного двигателя через редуктор, то модель такого привода целесообразно рассматривать как трехмассовую с сосредоточенными моментами инерции  $I_1$  – двигателя,  $I_2$  – редуктора и  $I_3$  – валков.

При индивидуальном приводе валков прокатного стана двигатели главных приводов расположены на различных расстояниях от прокатной клетки что обуславливает различную длину валов. При этом, для длинного вала соотношение упругостей участков вала от двигателя до муфты и от муфты до валка являются существенными совместно с моментом инерции муфты с точки зрения динамики и длинную ветвь целесообразно также рассматривать как трехмассовую систему.

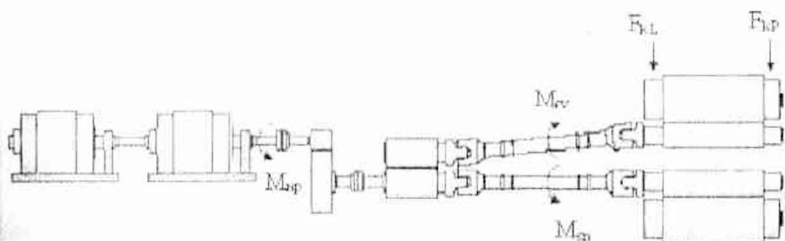


Рис. 2. Схема главного привода клетки кварто широкополосного стана горячей прокатки с шестеренчатой клетью

Уравнения динамики такой системы примут следующий вид:

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_{y23} + \beta_{23}(\omega_2 - \omega_3) + \beta_c \omega_1 + \beta_c \omega_3 - M_c,$$

$$\frac{dM_{y23}}{dt} = C_{23}(\omega_2 - \omega_3),$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{y12} + \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) - M_{y23} - \beta_{23}(\omega_2 - \omega_3),$$

$$\frac{dM_{y12}}{dt} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2),$$

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_o - M_{y12} - \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2),$$

$$T_M \frac{dM_o}{dt} = -M_o + K_o U.$$

В этих уравнениях:

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$  — скорости вращения двигателя, муфты и валков;  $M_{y12}, M_{y23}$  — моменты упругости в валах;  $C_{12}, C_{23}$ , и  $\beta_{12}, \beta_{23}$  — жесткости и коэффициенты внутреннего вязкого трения в валах на скручивание;  $T_M$  — эквивалентная постоянная времени контура прямого управления моментом;  $K_o$  — коэффициент усиления замкнутого контура прямого управления моментом двигателя;  $U$  — входное напряжение замкнутого контура прямого регулирования момента двигателя.

Введем вектор состояния системы  $\vec{X}(t)$  в следующем виде:

$$\vec{X}^T(t) = \{\omega_3(t), M_{y23}(t), \omega_2(t), M_{y12}(t), \omega_1(t), M_o(t)\}.$$

Тогда для уравнения состояния:

$$\frac{d\vec{X}(t)}{dt} = A\vec{X}(t) + BU^*(t).$$

может быть получено оптимальное управление по интегральному квадратичному критерию в виде управления по полному вектору состояния

$$U^*(t) = -R_2^{-1}(t)B^T(t)P(t)\bar{X}^*(t).$$

Для определения матрицы  $P(t)$  необходимо решить матричное дифференциальное уравнение Риккати

$$R_1(t) - P(t)B(t)R_2^{-1}(t)B^T(t)P(t) + A^T(t)P(t) + P(t)A(t) = 0.$$

Таким образом, для нахождения оптимального управления линейной системой по интегральному квадратичному критерию в форме обратной связи по полному вектору состояния необходимо решить матричное уравнение Риккати.

В трехмассовой системе непосредственно не измеряются моменты упругости  $M_{y12}(t)$  и  $M_{y23}(t)$ , а также скорости вращения муфты  $\omega_2(t)$  и вала  $\omega_3(t)$ . Для восстановления этих непосредственно не измеряемых переменных состояния построим такой наблюдатель, что входом этого наблюдателя будет момент двигателя  $M_d(t)$ , а измеряемым выходом будет скорость вращения двигателя  $\omega(t)$ .

Введем вектор состояния наблюдателя в следующем виде:

$$\bar{X}^T = \{\omega_3(t), M_{y23}(t), \omega_2(t), M_{y12}(t), \omega_1(t)\}.$$

Тогда матрицы состояния  $A_n$ , управления  $B_n$  и выхода  $C_n$  наблюдателя для трехмассовой системы примут следующий вид:

$$A_n = \begin{pmatrix} \frac{-\beta_c - \beta_{23}}{J_3} & \frac{1}{J_3} & \frac{\beta_{23}}{J_3} & 0 & 0 \\ -C_{23} & 0 & C_{23} & 0 & 0 \\ \frac{\beta_{23}}{J_2} & \frac{-1}{J_2} & \frac{-\beta_{12} - \beta_{23}}{J_2} & \frac{1}{J_2} & 0 \\ & & -C_{12} & 0 & C_{12} \\ & & \frac{\beta_{12}}{J_1} & \frac{1}{J_1} & \frac{-\beta_{12}}{J_1} \end{pmatrix} \quad B_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_1} \end{pmatrix}$$

$$C_n = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

В этом случае можно построить оптимальный наблюдатель, например, в форме оптимального фильтра Калмана-Бьюси, с помощью которого минимизируется дисперсия ошибки восстановления переменных состояния.



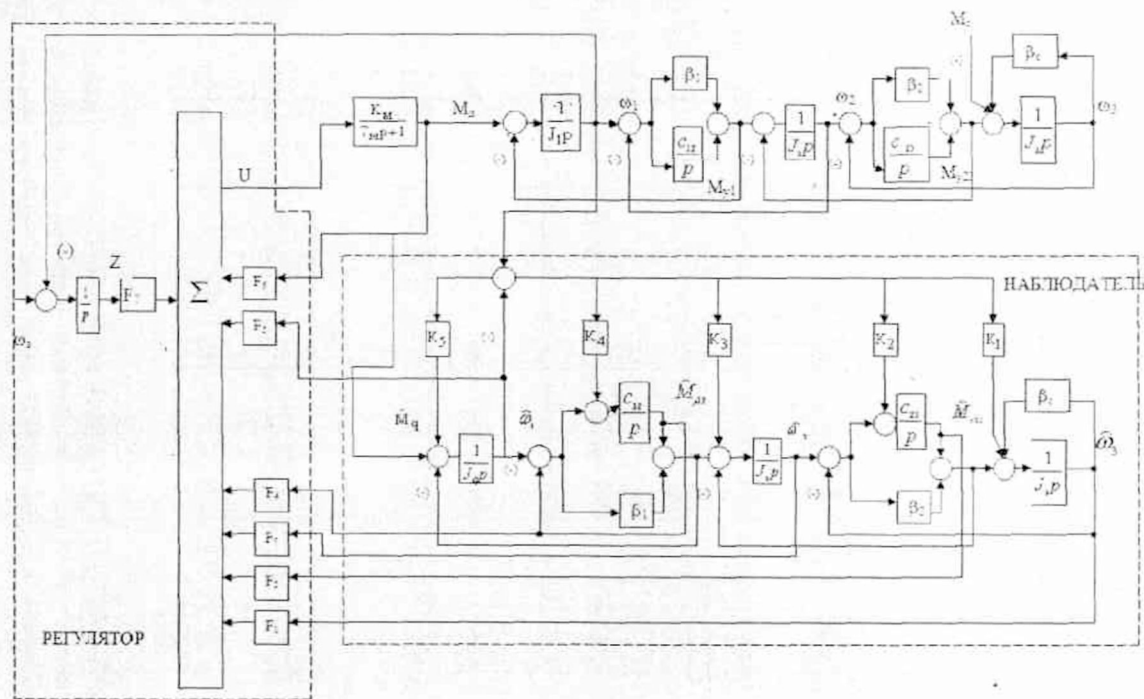


Рис.3. Схема системы оптимального управления главным приводом широкополосного стана горячей прокатки

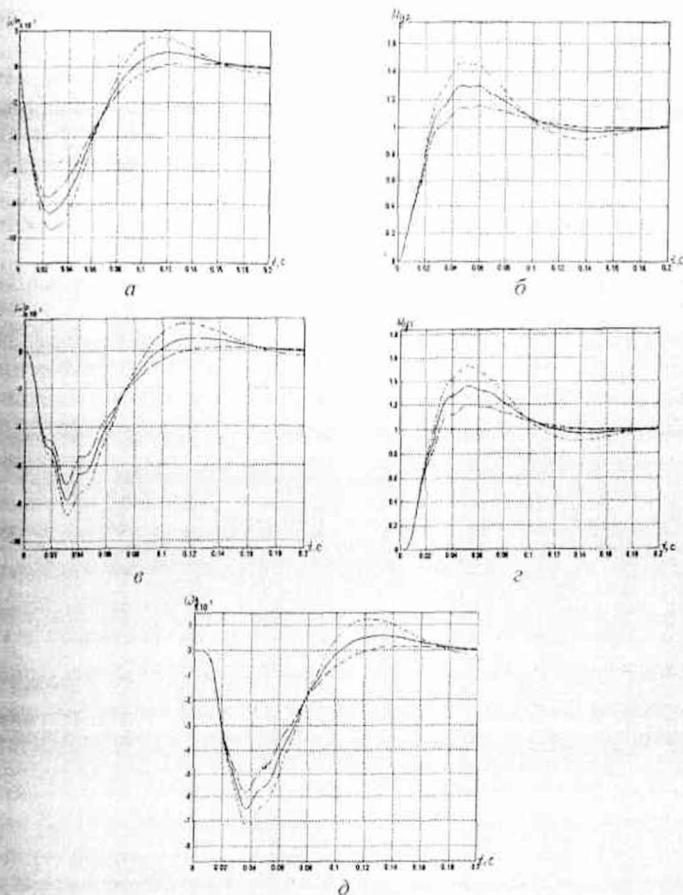


Рис. 4. Переходные процессы по возмущению переменных состояния оптимальной системы управления главным приводом широкополосного стана горячей прокатки

Матрица оптимальных коэффициентов усиления  $K(t)$  наблюдателя имеет следующий вид:

$$K(t) = Q(t)C^T(t)I_2^{-1}(t).$$

где  $Q(t)$  - решение матричного дифференциального уравнения Риккати:

$$\dot{Q}(t) = -I_1(t) - Q(t)C^T(t)I_2^{-1}(t)C(t)Q(t) + A(t)Q(t) + Q(t)A^T(t).$$

**Результаты моделирования.** Рассмотрим динамику оптимальной трехмассовой системы, замкнутой через оптимальный наблюдатель. Матрица

состояния такой системы показана на следующей странице, а схема этой системы показана на рис. 3.

Рассмотрим переходные процессы в оптимальной трехмассовой системе широкополосного стана горячей прокатки. В качестве примера на рис. 4 показаны переходные процессы по возмущенно переменным состояния оптимальной системы управления главным приводом широкополосного стана горячей прокатки для трех различных условий прокатки. Как видно из этих графиков, переходные процессы в синтезированной системе удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к системе.

**Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления.** Были рассчитаны переходные процессы в непрерывной трехмассовой системе с оптимальными регуляторами, замкнутыми через оптимальные наблюдатели применительно к главным приводам широкополосного стана горячей прокатки. Исследования переходных процессов этой трехмассовой системы показало их практическое совпадение с переходными процессами в одной оптимальной системе, замкнутой по полному вектору состояния. Переходные процессы наблюдателя достаточно близки к переходным процессам соответствующих переменных состояния систем.

Таким образом, с помощью оптимальных регуляторов удалось получить динамические характеристики системы, удовлетворяющие техническим требованиям, предъявляемым к системе управления главным приводом широкополосного стана горячей прокатки с учетом упругих элементов в главной линии стана в виде трехмассовой электромеханической системы.

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

Поступила в редакцию 15.01.