

# РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОКАТНОГО СТАНА НА ОСНОВЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ УПРУГОГО МОМЕНТА

**А.А. Радионов<sup>1</sup>, В.Р. Гасияров<sup>1</sup>, Е.А. Гартлиб<sup>1</sup>,  
Б.М. Логинов<sup>2</sup>, К.Э. Одинцов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия,

<sup>3</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия

Рассматривается электромеханическая система реверсивной клетки толстолистового прокатного стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). В результате экспериментальных исследований переходных процессов в режиме захвата металла валками установлены недопустимые динамические нагрузки, имеющие колебательный характер, и потеря управляемости электропривода. Это подтверждает актуальность разработки способов управления, обеспечивающих ограничение моментов двигателя и шпинделя. Отмечено, что известные системы управления скоростными режимами электропривода, обеспечивающие снижение упругого момента за счет предварительного замыкания угловых зазоров, по своей сути являются разомкнутыми системами задания скорости. Это не позволяет обеспечить контролируемое регулирование координат в динамических режимах. В качестве перспективного направления предложена разработка замкнутой системы автоматического регулирования координат двухмассовой электромеханической системы с наблюдателем момента упругого вала и скорости второй массы.

Разработан наблюдатель неизмеряемых параметров двухмассовой системы прокатного стана, обеспечивающий косвенное определение (восстановление) скорости вала и момента шпинделя в online-режиме. В его основу положена система уравнений в пространстве состояний. Путем сопоставления восстановленных и экспериментально полученных переходных процессов подтверждена удовлетворительная точность результатов. На основе предложенного наблюдателя разработана система автоматического регулирования (САР) скорости вала с подчиненными контурами упругого момента вала, скорости и момента двигателя. Обоснована настройка регуляторов замкнутых контуров. Рассмотрены переходные процессы моментов и скоростей при ударном приложении нагрузки при увеличенном быстродействии контура регулирования скорости второй массы. В результате анализа ЛАЧХ и ЛФЧХ подтверждена устойчивость разработанной системы в частотном диапазоне. На основе анализа экспериментальных данных констатирован вывод о влиянии углового зазора на точность восстановления упругого момента в режиме захвата металла валками. Отмечены перспективы внедрения разработок на стане 5000 и других прокатных станах, работающих с ударным приложением нагрузки.

*Ключевые слова:* двухмассовая электромеханическая система, координаты, упругий момент, скорость, наблюдатель, прокатный стан, динамические нагрузки, регулирование, система, разработка, моделирование, экспериментальные исследования, рекомендации.

## Введение

Разработка системы автоматического регулирования координат на основе наблюдателя упругого момента двухмассовой электромеханической системы не является новой задачей. В публикациях [1–3] отмечается, что эта задача изначально решалась для электроприводов прокатных станов. Большие инерции двигателя, валков и длинный вал создают упругую систему. В динамических режимах скорость двигателя отличается от скорости нагрузки, и вал испытывает большой крутящий момент.

### *Характеристика объекта исследований*

В научных публикациях [4–7] подчеркивается, что ограничение динамического момента явля-

ется актуальной проблемой для электроприводов клеток толстолистовых и широкополосных станов. Это связано с тем, что их электромеханические системы работают с ударным приложением нагрузки в момент захвата металла валками. Вследствие этого возникают усталостные разрушения, приводящие к поломкам механических соединений. Как показал опыт эксплуатации стана 5000 ПАО «ММК», наименее долговечным механическим узлом является шпиндель. Поломка шпиндельных соединений приводит к длительным простоям стана и значительным затратам на устранение последствий.

Кинематическая схема горизонтальной клетки стана 5000 представлена на рис. 1а. Рабочие валки

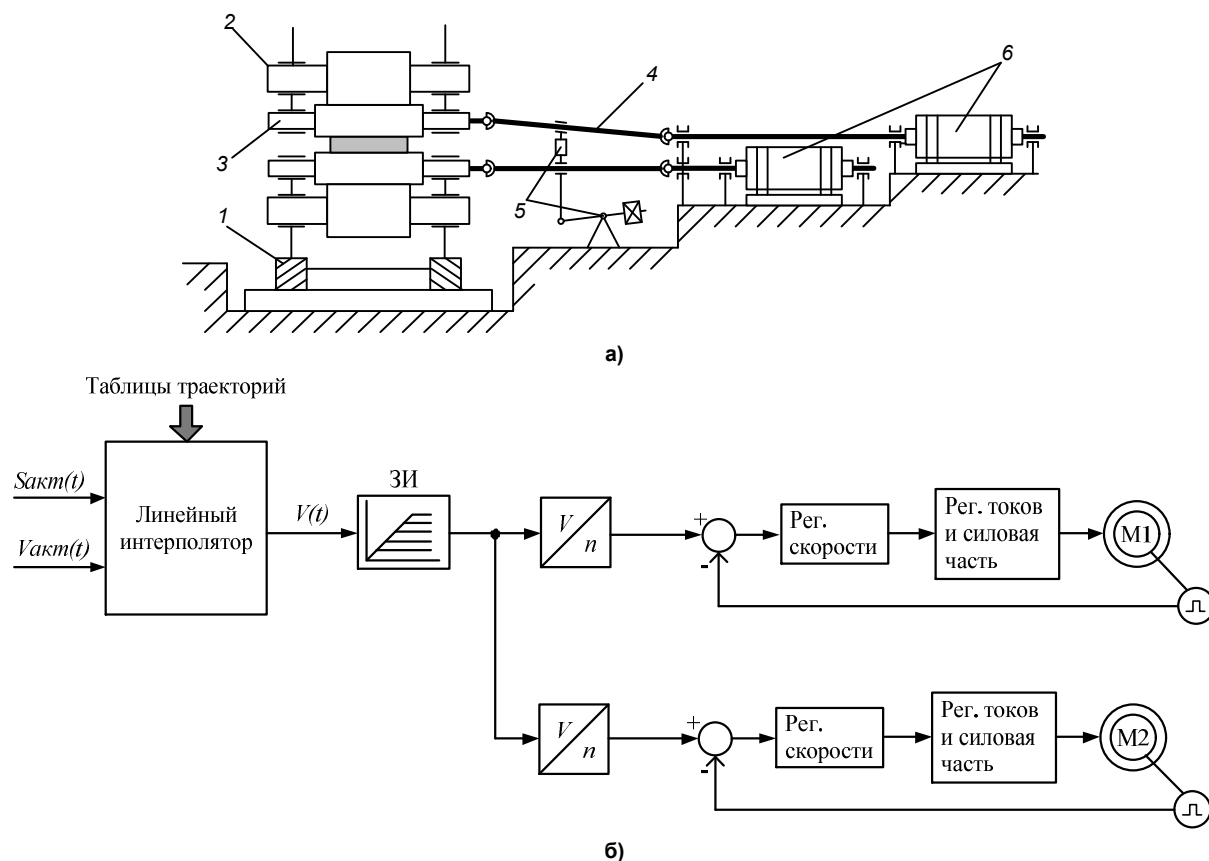


Рис. 1. Кинематическая схема горизонтальной клетки (а) и структурная схема системы управления приводами стана 5000 (б): 1 – станина; 2, 3 – опорные и рабочие валки; 4 – выдвигающие шпиндели; 5 – уравнивающее устройство; 6 – электродвигатели

приводятся во вращение через шпиндели выдвигающего типа. Линии главных электроприводов (главные линии) представляют собой двухмассовые электромеханические системы с упругими связями и угловыми зазорами в соединениях [8]. Соединение шпинделя с рабочим валком и ротором двигателя осуществляется с помощью головок специальной конструкции [9].

Структурная схема системы управления приводами верхнего и нижнего валков приведена на рис. 1б [10]. Электроприводы выполнены индивидуальными на основе синхронных двигателей с частотным регулированием скорости.

## Ударное приложение нагрузки

Данный динамический режим возникает в момент захвата металла валками и сопровождается увеличением момента двигателя и упругого момента на шпинделе. Исследования показали, что при прокатке листов из труднодеформируемых марок стали возникают динамические нагрузки, превышающие установившийся момент прокатки в два и более раза. Как правило, это приводит к выходу электропривода на ограничение по моменту, размыканию контура регулирования скорости и возникновению затухающих колебаний.

На рис. 2 представлены осциллограммы ли-

нейной скорости и момента двигателя нижнего валка и упругого момента шпинделя, подтверждающие этот вывод. Они зафиксированы при захвате металла (в момент  $t_1$ ) в режиме ускорения, т. е. при предварительно замкнутых зазорах. В течение длительного интервала времени ( $t_2 - t_3$ ) момент двигателя находится на ограничении, электропривод становится неуправляемым по скорости. Упругий момент шпинделя имеет колебательный характер, его амплитудное значение  $M_{В\max}$  достигает 6300 кН·м и практически в 1,5 раза превышает момент ограничения ( $M_{ДВ\max} = 4200$  кН·м или 240 % номинального). Колебания демфируются медленно, так как разомкнут регулятор скорости. Механическая часть при этом представляется двумя интеграторами, по сути, это колебательное звено.

Приведенные осциллограммы подтверждают актуальность разработки способов управления, обеспечивающих снижение моментов двигателя и шпинделя в режиме захвата. Перспективным направлением является разработка замкнутой системы прямого регулирования скорости валка на основе наблюдения, обеспечивающего восстановление скорости и упругого момента шпинделя по непрерывно измеряемым параметрам электропривода.

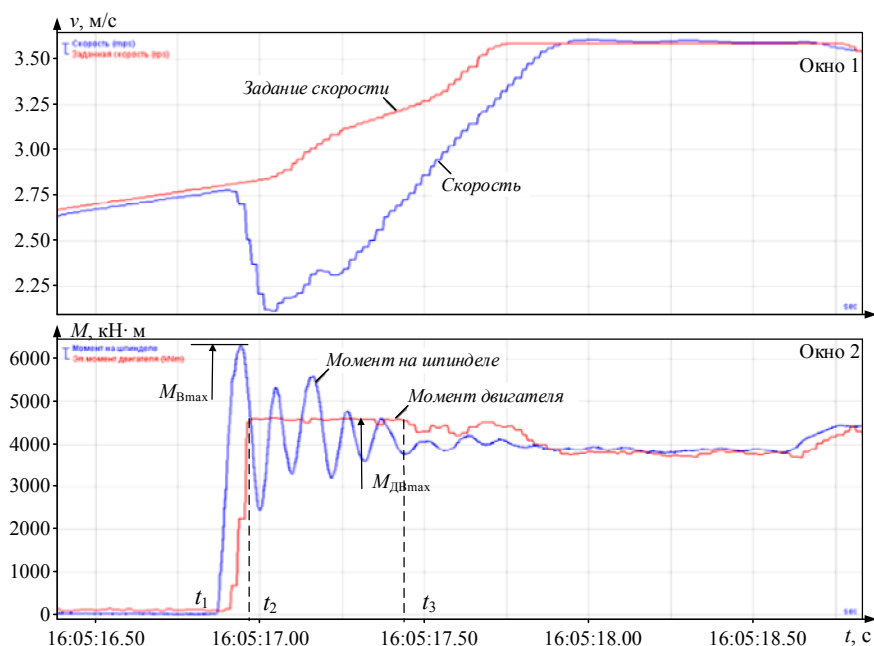


Рис. 2. Осциллограммы скоростей и моментов двигателя и шпинделя в режиме захвата с выходом на ограничение по моменту

### 1. Постановка задачи

Вопросам ограничения динамических нагрузок при захвате металла валками посвящены научные труды многих исследователей, в том числе ученых Южно-Уральского государственного университета и специалистов ПАО «ММК» [11–13]. В этих публикациях выполнена разработка способов снижения момента шпинделя путем формирования оптимальных скоростных режимов (тахограмм) электроприводов клети. Достижение поставленной цели обеспечивается за счет предварительного замыкания угловых зазоров в шпиндельных соединениях. В работах [14, 15] дополнительно предлагается ограничение упругого момента вала за счет кратковременного интенсивного торможения после захвата. Экспериментально подтверждено, что это обеспечивает улучшение динамических показателей.

Однако поставленную проблему нельзя считать решенной, так как разработанные системы являются разомкнутыми системами задания скорости. Контроль и автоматическое регулирование момента на шпинделе не производится. Альтернативным решением являются системы прямого регулирования упругого момента вала. Они обеспечивают высокую точность, однако для их реализации необходимо непосредственное измерение упругого момента шпинделя. Это вызывает затруднения, так как требует установки прецизионных датчиков на вращающееся оборудование [16–18].

Вместе с тем возникают проблемы и при разработке упомянутых систем автоматического управления с наблюдателями координат электромеханических устройств. В работе [3] отмечается,

что задача управления особенно сложна, когда не все переменные состояния системы поддаются измерению. Это часто происходит в промышленных электроприводах и вполне относится к прокатным станам. В публикации выполнен синтез системы управления с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором и дополнительными обратными связями, рекомендована система с двумя обратными связями.

В работе [19] указывается, что для улучшения характеристик «классической» структуры управления с ПИ-регулятором координат можно использовать дополнительный контур регулирования по одной выбранной переменной состояния. Согласно литературным источникам, в частности [3], распространено применение дополнительной обратной связи по сигналу крутящего момента на валу. Следует заметить, что подключение такой связи предусмотрено в системе, разработка которой представлена ниже в настоящей статье.

В перечисленных и других публикациях зарубежных авторов представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований, выполненных на лабораторных установках с двигателями малой мощности. Разработанные алгоритмы представляют академический интерес, однако не могут быть «напрямую» применены для управления промышленными электромеханическими системами с ударной нагрузкой.

### Обоснование разработки системы

В связи с изложенным обоснована задача разработки системы компенсации динамических нагрузок неуправляемой массы (валка) средствами

управляемой массы (двигателя). Для ее решения необходимы:

1) разработка наблюдателя, обеспечивающего восстановление динамических процессов второй массы по непрерывно измеряемым параметрам первой массы в online-режиме;

2) разработка и исследование замкнутой системы прямого регулирования скорости второй массы с подчиненным регулированием упругого момента на основе этого наблюдателя.

Разработке наблюдателей координат двух- и трехмассовых электромеханических систем, которые обеспечивают восстановление момента вала и скорости неприводной массы по параметрам электропривода, посвящены научные труды ряда выдающихся ученых. В числе значимых разработок следует отметить труды профессоров Ивановского государственного энергетического университета А.Р. Колганова и С.К. Лебедева [20–23], ученых Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (ИТМО) под руководством проф. В.С. Томасова [24–26], работы профессоров Донецкого государственного технического университета П.Х. Коцегуба и О.В. Толочко [27–29].

По результатам анализа этих и других публикаций обоснованы требования к «промышленному» наблюдателю координат электромеханической системы прокатного стана.

1. Динамические процессы должны представляться на основе непрерывно измеряемых физических параметров при минимуме вычислительных операций.

2. Координатами, доступными для контроля, являются скорость и момент двигателя, а также прикладываемый момент нагрузки. Выходными

координатами являются скорость вала и упругий момент шпинделя.

3. Разрабатываемые решения не должны требовать применения сложного математического аппарата (вычислителей) для обработки сигналов в online-режиме и должны быть реализуемыми на установленных контроллерах АСУ ТП прокатных станов.

Такой наблюдатель обеспечит высокое быстродействие, необходимое для регулирования динамических процессов, происходящих в двухмассовой системе при ударной нагрузке, прикладываемой ко второй массе.

## 2. Основная часть

### Разработка наблюдателя координат двухмассовой системы

Исследуемая система «электропривод – валок» может быть представлена в виде замкнутой двухконтурной структуры (рис. 3а). Блоки 3, 5–7 являются типовыми блоками модели двухмассовой системы [30]. Они определяют характер переходных процессов в механической части, в том числе естественное затухание колебаний, блок 5 моделирует зазоры в передачах. Обратная связь по скорости моделируется блоком 9 с коэффициентом  $k_{oc}$ . Замкнутый контур регулирования момента представлен звеном 2.

На схеме обозначены:  $T_\mu$  – постоянная времени контура момента;  $J_1, J_2$  – моменты инерции 1-й и 2-й масс;  $C_{12}$  – коэффициент упругости механической передачи;  $\beta$  – коэффициент, отвечающий за естественное демпфирование (типа вязкого трения);  $M_1$  – момент двигателя;  $M_{12}$  – упругий момент шпинделя;  $\omega_1, \omega_2$  – угловые скорости первой и второй масс. Численные значения этих и других

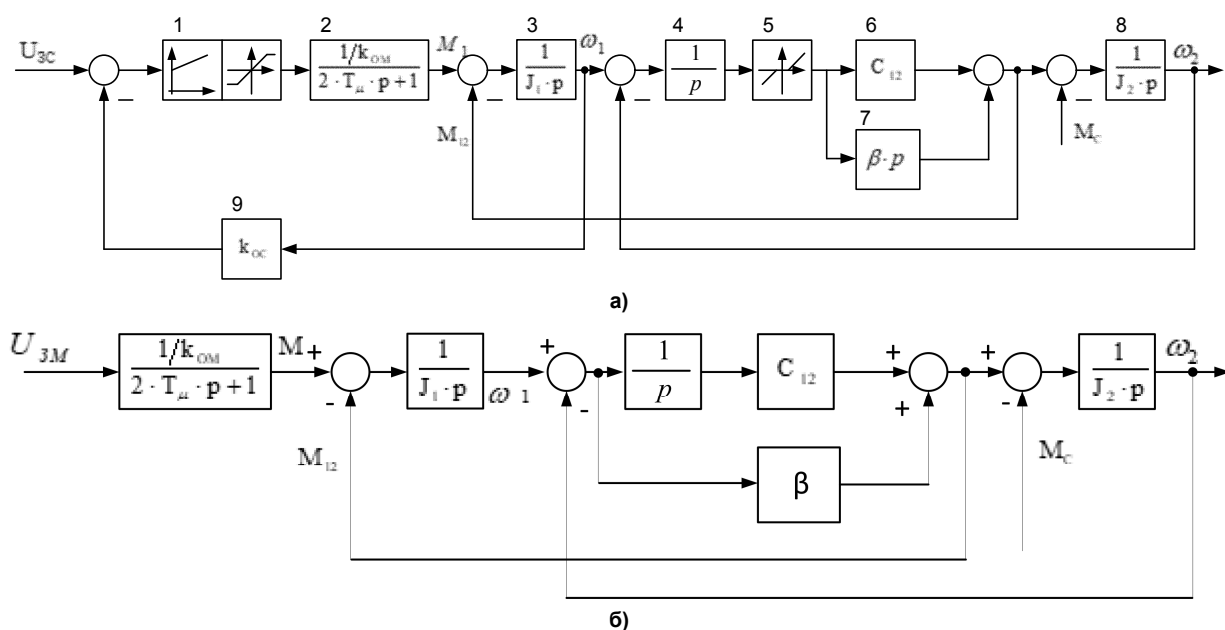


Рис. 3. Структурная схема двухмассовой электромеханической системы (а) и структура модели для разработки наблюдателя (б)

Параметры модели двухмассовой системы электропривода стана 5000

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Момент инерции первой движущейся массы (двигателя)	$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	125 000
Момент инерции второй движущейся массы	$J_2$	кг·м <sup>2</sup>	114 571
Жесткость упругой связи	$c_{12}$	Н·м/рад	76 489 587
Собственная частота упругих колебаний	$\omega_{12}$	рад/с	9,96
Ускорение электропривода	$\varepsilon_0$	рад/с <sup>2</sup>	1–3
Зазор в передаче	$\delta$	рад	0,017–0,051 (1–3°)
Средний упругий момент	$M_{12}$	МН·м	1,9
Коэффициент демпфирования	$\beta$	Н·м·с/рад	100 000
Декремент затухания	$\xi$	–	0,172
Коэффициент усиления регулятора скорости	$k_{рс}$	–	19,5
Постоянная времени регулятора скорости	$T_{рс}$	с	0,0041

параметров, необходимые для настройки регуляторов и моделирования, приведены в таблице.

При разработке наблюдателя из этой схемы исключаются нелинейный блок 5, моделирующий зазоры, и блоки 1, 8, реализующие контур регулирования скорости. Полученная структура представлена на рис. 3б. Для нее справедлива система дифференциальных уравнений в пространстве состояний:

$$\frac{dM_1}{dt} = -\frac{1}{T_m} M_1 + \frac{1}{T_m K_{ом}} M_{1ref};$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1} M_1 - \frac{1}{J_1} M_{12};$$

$$\frac{dM_{12}}{dt} = C_{12}\omega_1 - C_{12}\omega_2 + \frac{\beta}{J_1} M_1 - \beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} M_{12} + \frac{\beta}{J_2} M_c;$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} M_{12} - \frac{1}{J_2} M_c,$$

где  $M_{1ref}$  – заданный момент двигателя;  $T_m$  – электромеханическая постоянная времени.

На основе этих уравнений разработан наблюдатель упругого момента, скорости 2-й массы и

момента нагрузки, его схема приведена на рис. 4. Восстановление ненаблюдаемых переменных и момента нагрузки осуществляется по сигналам скорости и момента двигателя, измеренным в реальном времени.

На рис. 5 представлены графики восстановленных переменных и аналогичные осциллограммы, полученные на стане в режиме захвата металла валками. Кривые упругого момента вала, полученные от наблюдателя  $M_{В(восст)}$  и от системы измерения  $M_{В(измер)}$ , соответствуют друг другу как по характеру, так и по амплитудным значениям. Их совпадение обеспечивается с погрешностью не выше 5 %. Кривые скоростей  $n_{дв}$  и  $n_{в}$  сопоставить нельзя, так как они относятся к разным массам.

Представленные осциллограммы являются примером, подтверждающим удовлетворительную точность восстановления упругого момента шпинделя в режиме ударного приложения нагрузки. Аналогичные результаты получены при прокатке заготовок различных профилей в разных проходах. Это позволило рекомендовать разработку замкнутой САР координат двухмассовой системы на основе рассмотренного наблюдателя.

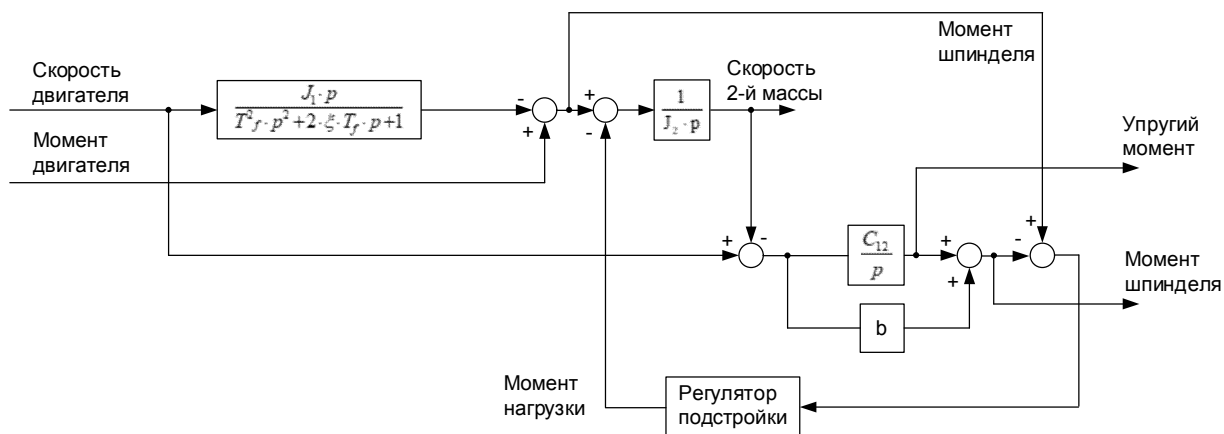


Рис. 4. Структурная схема разработанного наблюдателя

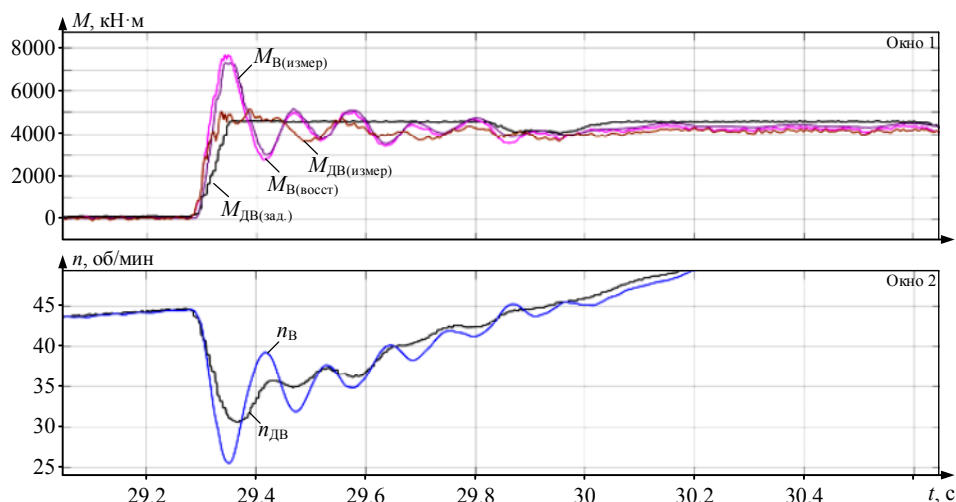


Рис. 5. Переходные процессы измеренных и восстановленных координат в режиме захвата

## Разработка замкнутой системы регулирования координат неуправляемой массы

Система автоматического регулирования разработана исходя из структуры объекта управления, представленной на рис. 3а. При ее разработке за основу приняты теоретические положения замкнутых систем с ограничением моментов в механических передачах, обоснованные в книге А.Р. Колганова [20]. Структура системы с ограничением сигналов на входах регуляторов внутренних контуров

представлена на рис. 6а. Для выполнения функций ограничения используются нелинейные блоки с насыщением. По этому принципу разработана система, схема которой приведена на рис. 6б. Она представляет собой замкнутую трехконтурную САР скорости второй массы с подчиненными контурами упругого момента, скорости и момента двигателя. При таком построении возможно ограничить не только задание на контур момента двигателя, но и задание на контур регулирования упругого момента.

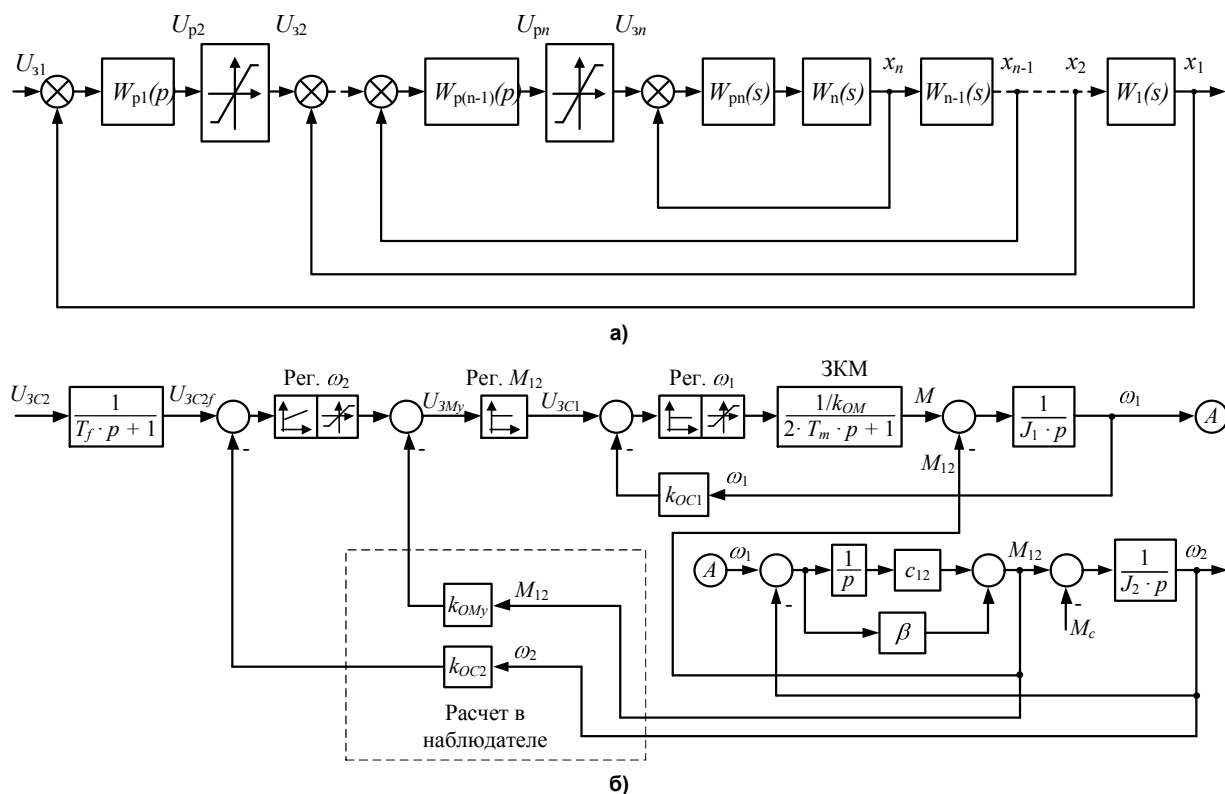


Рис. 6. Структуры системы с ограничением сигналов на выходах регуляторов (а) и разработанной трехконтурной САР скорости второй массы (б)

На рис. 6 показаны: внешний ПИ-регулятор (Рег. $\omega_2$ ) скорости 2-й массы  $J_2$ ; регулятор Рег. $M_{12}$  упругого момента; регулятор скорости (Рег. $\omega_1$ ) первой массы  $J_1$ , его выходом является задание на момент двигателя. Передаточные функции регуляторов синтезированы по правилам настройки контуров подчиненного регулирования координат [31]. Получены следующие функции:

$$W_{PC1}(p) = \frac{1}{2T_\mu p} \cdot \frac{1}{W_{OC1}(p)} = \frac{k_{OM} \cdot J_1}{2T_\mu \cdot k_{OC}} \quad \text{— для ре-}$$

гулятора скорости двигателя;

$$W_{PM12}(p) = \frac{1}{4T_\mu p} \cdot \frac{k_{OC}}{k_{OM}} \cdot \frac{p}{c_{12} + \beta p} \quad \text{— для регуля-}$$

тора упругого момента.

Если учитывать коэффициент затухания  $\beta$ , то

$$W_{PM12}(p) = \frac{1}{4T_\mu} \cdot \frac{k_{OC}}{k_{OM}} \cdot \frac{1}{c_{12} \left( \frac{\beta}{c_{12}} p + 1 \right)},$$

без учета коэффициента  $\beta$

$$W_{PM12}(p) = \frac{k_{OC}}{4T_\mu \cdot k_{OM} \cdot c_{12}}.$$

Передаточная функция регулятора скорости  $\omega_2$  второй массы:

$$W_{PC2}(p) = \frac{k_{OM} \cdot J_2}{8T_\mu \cdot k_{OC}}.$$

Для задания астатизма последовательно с ним включается корректирующее звено с передаточной функцией (на рис. 6б не показано):

$$W_K(p) = \frac{8T_\mu p + 1}{8T_\mu p}.$$

Очевидно, что промышленному внедрению разработанной системы должны предшествовать исследования методом моделирования. Как показано на схеме рис. 6б, в ней обеспечивается ограничение упругого момента. Поэтому наибольший интерес вызывает анализ переходных процессов при размыкании контура регулирования скорости двигателя, обусловленных данным ограничением.

### 3. Результаты исследований

#### Результаты имитационного моделирования

На рис. 7а приведены результаты моделирования процессов при заданных ограничениях: упругого момента на уровне 120 % и момента двига-

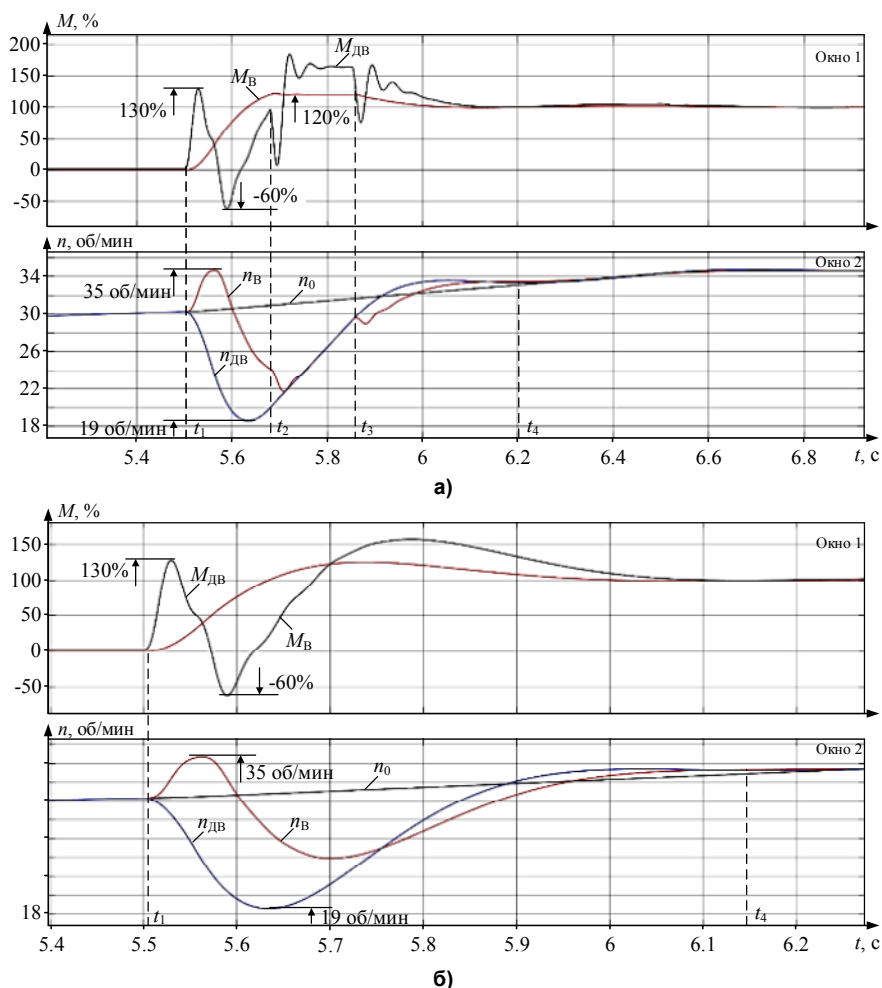


Рис. 7. Переходные процессы моментов и скоростей при ударном приложении нагрузки с ограничением (а) и без ограничения (б) упругого момента

теля на уровне 240 %. Последнее значение соответствует существующей настройке регулятора скорости двигателя. На рис. 7б представлены аналогичные процессы без выхода регуляторов на ограничение. Захват металла валками происходит в момент времени  $t_1$  на участке ускорения двигателя при замкнутых угловых зазорах.

Момент двигателя в обоих случаях не достигает ограничения. На рис. 7а момент на валу шпинделя ( $M_B$ ) в момент времени  $t_2$  достигает величины 120 % и удерживается на этом уровне системой регулирования. Таким образом реализуется ограничение упругого момента на шпинделе. В результате в интервале  $t_2 - t_3$  привод работает при разомкнутом контуре регулирования скорости 2-й массы. Вследствие этого переходный процесс момента двигателя  $M_{ДВ}$  приобретает сложный характер, момент изменяется в диапазоне  $-60...+130$  %. На рис. 7б размыкания контура скорости 2-й массы не происходит. Переходные процессы скоростей первой и второй масс ( $n_{ДВ}$ ,  $n_B$ ) в обоих случаях продолжают примерно одинаковое время в интервалах  $t_1 - t_4$ . Динамические отклонения скоростей также находятся в одинаковых диапазонах: 19–35 об/мин при скорости захвата 30 об/мин. Таким образом, диапазон отклонений скоростей относительно заданной составляет  $-37...+17$  %).

Из представленных временных зависимостей следует вывод, что разница (ошибка регулирования) скоростей 1-й и 2-й масс в обоих случаях имеет место только во время переходных процессов (в течение 0,5–0,7 с после приложения нагрузки). В это время проявляются упругие свойства двухмассовой системы. В целом обеспечиваются астатическое регулирование обеих скоростей с удовлетворительным быстродействием и ограничение упругого момента.

Далее дана оценка целесообразности увеличения быстродействия контуров регулирования

скоростей 1-й и 2-й масс. Для этого коэффициент регулятора скорости второй массы (Рег. $\omega_2$ ) увеличен в 2 раза, и уровни ограничения обоих моментов установлены равными 240 %. Расчетные зависимости представлены на рис. 8. В этом случае момент двигателя  $M_{ДВ}$  достигает ограничения. Упругий момент  $M_B$  на валу изменяется аналогично зависимости на рис. 7б и нарастает без перерегулирования. Характер переходных процессов скоростей на рис. 7б, 8 различается, однако их время одинаково и составляет около 0,5 с.

Сравнение расчетных зависимостей на рис. 7б и рис. 8 позволяет сделать вывод, что быстродействие контура регулирования скорости второй массы не оказывает существенного влияния на показатели регулирования момента на валу двухмассовой системы.

С целью обобщенной оценки динамических свойств на рис. 9а представлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ), построенные для традиционной двухконтурной САР скорости с ПИ-регулятором – характеристика 1 и предложенной трехконтурной системы без учета нелинейностей, связанных с ограничением сигналов, – характеристика 2. При их построении входным сигналом является задание скорости, контролируемым – скорость второй массы. Из них следует, что для скорости второй массы предложенная система обеспечивает большую полосу пропускания, следовательно, обладает менее колебательными свойствами.

На рис. 9б приведены ЛАЧХ и ЛФЧХ, построенные при разомкнутом внешнем контуре. Их анализ позволяет сделать следующие выводы.

– Запас по амплитуде составляет 10 дБ, что, согласно критерию Найквиста, является достаточным.

– ФЧХ клювовидная, переходов через  $-180^\circ$  левее частоты среза нет; запас по фазе около  $50^\circ$ , чего также вполне достаточно.

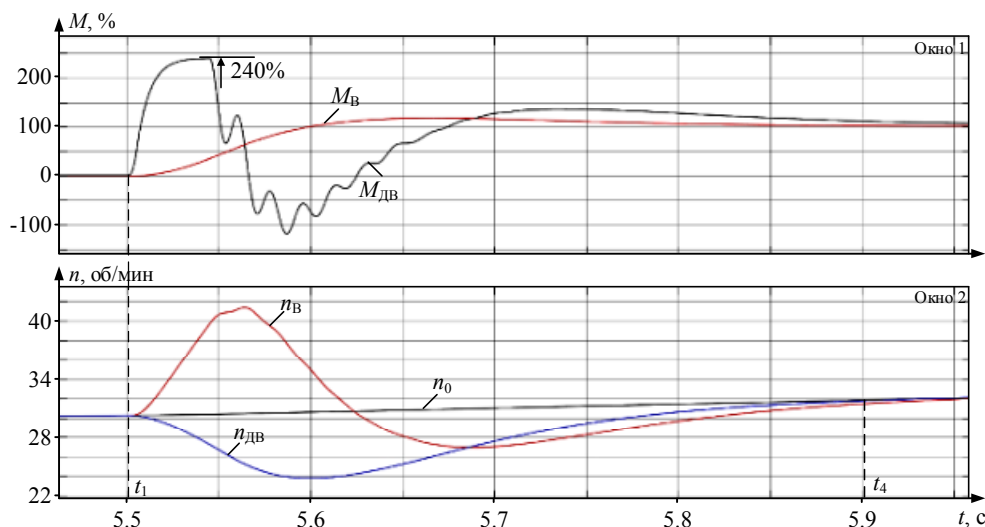


Рис. 8. Переходные процессы, аналогичные рис. 7, при увеличенном коэффициенте регулятора скорости второй массы



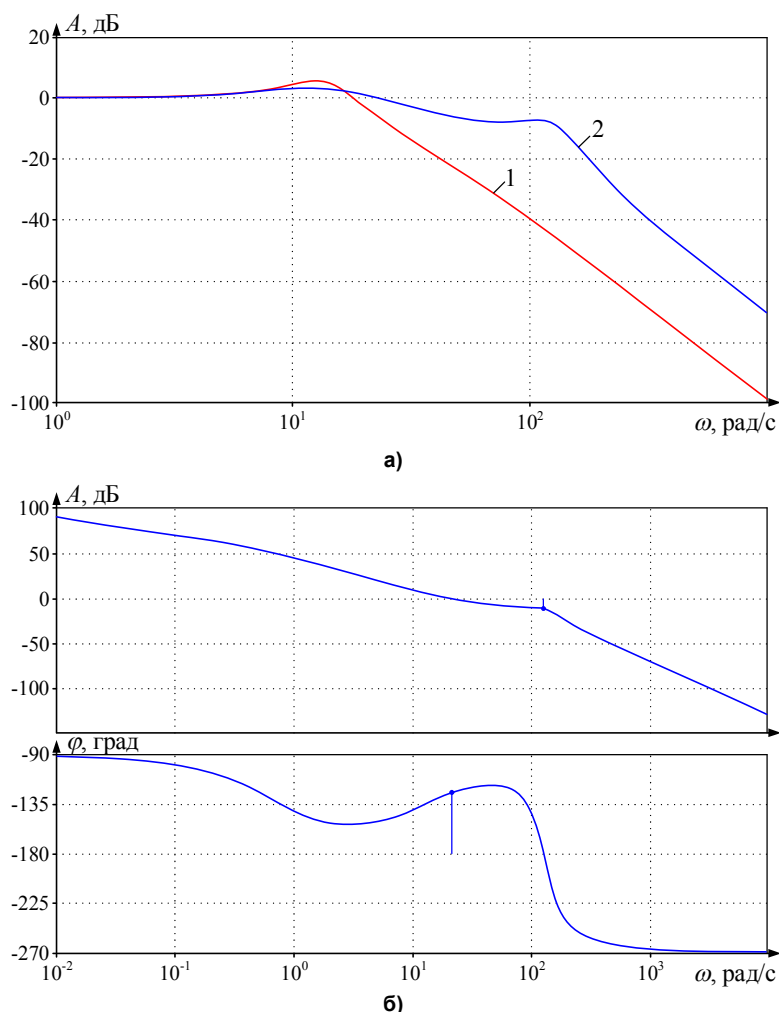


Рис. 9. ЛАЧХ замкнутых контуров регулирования скорости (а), ЛАЧХ и ЛФЧХ при разомкнутом внешнем контуре (б)

Аналогичные частотные характеристики были построены для рассмотренной «более жесткой» настройки регулятора скорости 2-й массы (здесь не приводятся). Сравнение характеристик позволило сделать вывод, что увеличение коэффициента усиления в два раза незначительно влияет на резонансную частоту и амплитуду колебаний 1-й массы.

Таким образом, проблем с устойчивостью разработанной системы независимо от настройки регулятора 2-й массы во всем диапазоне частот нет.

#### Экспериментальные результаты

Алгоритм разработанного наблюдателя упругого момента и скорости валка технически исполнен в программном обеспечении промышленного контроллера клетки стана 5000. Проведены опытно-промышленные испытания, получено большое количество восстановленных зависимостей и экспериментально снятых осциллограмм.

По результатам обработки более 100 зависимостей, аналогичных представленным на рис. 5, сделаны следующие выводы.

– В режиме захвата при предварительно замкнутых угловых зазорах в шпиндельных соедине-

ниях средняя разница амплитудных значений измеренного и восстановленного моментов составляет 5–7 %;

– Аналогичная разница в режиме захвата при разомкнутых зазорах достигает 10–15 %.

Это подтверждает известный вывод, что динамическая составляющая момента, обусловленная непосредственно ударом при замыкании углового зазора, относительно невелика. В работе [32] показано, что амплитуда динамического момента при упругом ударе (первая составляющая) не сильно зависит от величины углового зазора. При номинальном моменте двигателя 1,9 МН·м и угловом зазоре 1,5° она составляет 2,7 %. В то же время амплитуда составляющей, обусловленной упругими свойствами шпинделя, в 10–15 раз превышает амплитуду первой составляющей и за счет этого оказывает более сильное влияние на динамический момент при захвате.

В целом по результатам экспериментов сделаны следующие выводы.

1. Разработанный наблюдатель обеспечивает восстановление координат упругого момента и

скорости вала с точностью, достаточной для практических целей. Это создает предпосылки для промышленных испытаний представленной замкнутой системы автоматического регулирования скорости второй массы с ограничением момента на шпинделе.

2. В настоящее время наблюдатель находится на стадии опытно-промышленной эксплуатации. Проводится длительный пассивный эксперимент, целями которого являются подтверждение справедливости выводов и оценка возможных рисков при внедрении системы управления на его основе.

#### 4. Обсуждение результатов

Анализ временных зависимостей, представленных на рис. 7а, показывает, что переходный процесс момента двигателя в системе с наблюдателем имеет сложный характер и изменяется в диапазоне  $-60...+130\%$ . По сравнению с монотонным процессом момента на валу его переходный процесс ухудшается. Однако целями подключения внешнего контура являются исключение колебаний упругого момента и его ограничение на допустимом уровне. В исследуемом случае его изменение близко к настройке на модульный оптимум. Это позволяет утверждать, что цель регулирования достигнута.

Контур момента двигателя является подчиненным, это объясняет, почему форма кривой этого параметра является сложной. Но для синхронного двигателя колебания в диапазоне, указанном на рис. 7, не являются опасными. Поэтому можно сделать вывод, что переходные процессы моментов двигателя и шпинделя являются удовлетворительными.

Преимуществами разработанного наблюдателя являются простота настройки и возможность получения достоверных переходных процессов. В результате сравнения восстановленных и промышленных сигналов подтверждена удовлетворительная точность вычисления упругого момента с погрешностью  $5-15\%$ .

#### Заключение

Рассмотрен наблюдатель, обеспечивающий непрерывный контроль координат двухмассовой электромеханической системы клетки прокатного

стана. На его основе разработана трехконтурная система прямого регулирования скорости вала, обеспечивающая ограничение упругого момента в режиме ударного приложения нагрузки. При ее разработке за основу принята многоконтурная система регулирования координат с ограничением входных сигналов подчиненных контуров, рассмотренная в научных трудах проф. А.Р. Колганова.

Обосновано подключение следующих регуляторов:

- пропорционального регулятора скорости первой массы, его выходом является задание на момент двигателя;

- пропорционального регулятора упругого момента. Такая настройка является оптимальной, так как в структуре объекта есть интегратор, а данный регулятор обеспечивает высокое быстродействие;

- пропорционального регулятора скорости второй массы с корректирующим пропорционально-интегральным звеном на входе. Это звено повышает наклон ЛАЧХ в низкочастотной области и обеспечивает астатическое регулирование скорости второй массы.

Анализ переходных процессов, полученных методом математического моделирования, подтвердил снижение амплитуды упругого момента шпинделя и удовлетворительный характер переходных процессов момента и скорости двигателя. Аналогичные выводы сделаны по результатам построения ЛАЧХ и ЛФЧХ разработанной системы.

По результатам обработки более 100 экспериментальных зависимостей дано заключение, подтверждающее данные выводы.

Представленные разработки выполнены на примере электропривода клетки стана 5000. Они рекомендуются для применения на других агрегатах, электроприводы которых работают с ударным приложением нагрузки. К таким агрегатам относятся практически все станы горячей прокатки и черновые группы клеток сортовых станов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (фундаментальное научное исследование), договор № FENU-2020-0020 (2020071ГЗ).

#### Литература

1. Sugiura, K. *Vibration Suppression in 2- and 3-Mass System Based on the Feedback of Imperfect Derivative of the Estimated Torsional Torque* / K. Sugiura, Y. Hori // *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. – 1996. – Vol. 43, no. 2. – P. 56–64. DOI: 10.1109/41.481408
2. Ji, J.K. *Kalman Filter and LQ Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in a 2-Mass Motor Drive System* / J.K. Ji, S.K. Sul // *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. – 1995. – Vol. 42, no. 6. – P. 564–571. DOI: 10.1109/41.475496
3. Szabat, K. *Vibration Suppression in Two-Mass Drive System using PI Speed Controller and Additional Feedbacks – Comparative Study* / K. Szabat, T. Orłowska-Kowalska, // *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. – 2007. – Vol. 54, no. 2. – P. 1193–1206. DOI: 10.1109/41.475496

4. Технологические схемы управления электроприводами чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, И.Ю. Андрияшин и др. // Труды VII конгресса прокатчиков. Т.1. (Москва 15–18 октября 2007 г.). – М., 2007. – С. 71–75.
5. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов и др. // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 5–11.
6. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клетей стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, В.В. Головин и др. // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 31–35.
7. Головин, В.В. Оценка эффективности применения тиристорного электропривода с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения / В.В. Головин, А.С. Карандаев, В.Р. Храмин // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 4. – С. 40–45.
8. Khrumshin, V.R. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khrumshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev et al. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 101–111. DOI: 10.14529/power180109
9. Модель отказов шарниров универсальных шпинделей по критерию износостойкости бронзовых вкладышей / А.В. Анунов (мл), А.В. Анунов, М.В. Налимова и др. // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 4 (часть 1). – С. 9–12.
10. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1 (38). – С. 14–25. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25
11. Снижение динамических нагрузок в универсальных клетях прокатного стана / В.Р. Храмин, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов и др. // Металлург. – 2015. – № 4. – С. 41–47.
12. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели / А.А. Радионон, А.С. Карандаев, А.С. Евдокимов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 59–73. DOI: 10.14529/power150108
13. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клетей прокатного стана при прокатке толстых полос / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 12–17.
14. Limiting Dynamic Loads in the Main Line of a Rolling Mill through an Automated Drive / V.R. Khrumshin, A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov et al. // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2020. – P. 1122–1126. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208087
15. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khrumshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev et al. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 101–111. DOI: 10.14529/power180109
16. Implementation of telemetric on-line monitoring system of elastic torque of rolling mill line of shafting / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, M.M. Tverskoi et al. // 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon). – 2017. – P. 450–455. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120750
17. Krot, P.V. Nonlinear Vibrations and Backlashes Diagnostics in the Rolling Mills Drive Trains / P.V. Krot // Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2008), IPME RAS. – St. Petersburg. – June 30–July 4. – 2008. DOI: 10.13140/2.1.3353.1840
18. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2014. – № 1. – С. 129–136.
19. Szabat, K. Application of the MPC to the robust control of the two-mass drive system / K. Szabat, P. Serkies, M. Sychowski // 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. DOI: 10.1109/isie.2011.5984448
20. Колганов, А.Р. Электромехатронные системы. Современные методы управления, реализации и применения: учеб. пособие / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 256 с.
21. Лебедев, С.К. Управление движением промышленных манипуляторов: учеб. / С.К. Лебедев, А.Р. Колганов. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2018. – 340 с.
22. Колганов, А.Р. Современные методы управления в электромехатронных системах. Разработка, реализация, применение / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2012. – 256 с.
23. Колганов, А.Р. Математические основы теории автоматического управления: учеб. для вузов / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, А.В. Ханаев. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2010. – 340 с.

24. Томасов, В.С. Следящие электроприводы систем наведения оптико-механических комплексов нового поколения. Проблемы и достижения / В.С. Томасов, К.М. Денисов, В.А. Толмачев // Труды V Междунар. (XVI Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. 18–21 сентября 2007. – СПб., 2007. – С. 175–177.
25. Васильев, В.Н. Состояние и перспективы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений / В.Н. Васильев, В.С. Томасов, В.Д. Шаргородский, М.А. Садовников // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 5–12.
26. Толмачев, В.А. Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства / В.А. Толмачев, И.В. Антипова, С.Г. Фомин // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 44.
27. Коцегуб, П.Х. Цифровой наблюдатель состояния двухмассового электромеханического объекта / П.Х. Коцегуб, О.И. Толочко, Р.В. Федоряк // Збірник наукових праць Донецького державного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика, випуск 41: Донецьк: ДонДТУ, 2002. – С. 146–156. – <http://masters.donntu.org/2004/eltf/tsyb/library/art3.htm> (дата обращения: 11.05.2021)
28. Система подчиненного регулирования скорости с наблюдателем динамического и статического токов первого порядка / О.И. Толочко, П.Х. Коцегуб, В.Ю. Мариничев, П.И. Розкаряка // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. Вып. 1/2001 (10). – Кременчуг: КГПУ, 2001. – С. 103–109. <http://masters.donntu.org/2004/eltf/cherkasov/library/art1/art1.htm> (дата обращения: 11.05.2021)
29. Толочко, О.И. Параметрический синтез цифровой системы модального управления двухмассовым электромеханическим объектом / О.И. Толочко, П.Х. Коцегуб, Р.В. Федоряк // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск. – Харків: НТУ ХПІ. – 2003. – Т. 1, № 10. – С. 97–100.
30. Машины и агрегаты металлургических заводов. Машины и агрегаты для производства проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. – М.: Металлургия, 1988. – Т. 3. – 680 с.
31. Ключев, В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 760 с.
32. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use / V.R. Gasiyarov, V.R. Khrumshin, S.S. Voronin et al. // Machines. – 2019. Vol. 7 (4), 76. – <https://doi.org/10.3390/machines7040076> (дата обращения: 11.05.2021)

**Радионо́в Андре́й Алекса́ндрович**, д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе, профессор кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [andrey.a.radionov@susu.ru](mailto:andrey.a.radionov@susu.ru).

**Гасия́ров Вади́м Раши́тович**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [gasiyarovvr@susu.ru](mailto:gasiyarovvr@susu.ru).

**Гартли́б Екате́рина Андре́евна**, старший преподаватель кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [karyakina-katya@yandex.ru](mailto:karyakina-katya@yandex.ru).

**Логи́нов Бори́с Миха́йлович**, канд. техн. наук, ведущий инженер по наладке и испытаниям электрооборудования центральной электротехнической лаборатории, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск.

**Одинцо́в Константи́н Эдуа́рдович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; [eltech\\_mgtu@mail.ru](mailto:eltech_mgtu@mail.ru).

*Поступила в редакцию 12 мая 2021 г.*

## REGULATING THE COORDINATES OF THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF THE ROLLING MILL BASED ON THE ELASTIC TORQUE OBSERVER

A.A. Radionov<sup>1</sup>, andrey.a.radionov@susu.ru,  
V. R. Gasiyarov<sup>1</sup>, gasiiarovvr@susu.ru,  
E.A. Gartlieb<sup>1</sup>, maklakovaea@susu.ru,  
B.M. Loginov<sup>2</sup>,  
K.E. Odintsov<sup>3</sup>, eltech\_mgtu@mail.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works", Magnitogorsk, Russian Federation,

<sup>3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The paper considers the electromechanical system of the reversing stand of the plate rolling mill 5000 of PJSC "Magnitogorsk Metallurgical Plant" (PJSC "MMK"). The performed experimental studies of transient processes in the mode of gripping metal by rolls allowed establishing unacceptable dynamic loads of an oscillatory nature and a loss of controllability of the electric drive. This confirms the need for the development of control methods that limit the motor and spindle torques. It is noted that the known control systems for the speed modes of an electric drive, which decrease the elastic moment due to the preliminary closing of the angular gaps, are, in essence, open-loop speed control systems. This does not provide for the controlled regulation of coordinates in dynamic modes. The paper proposes the development of a closed system for automatic control of coordinates of a two-mass electromechanical system with an observer of the moment of the elastic shaft and the speed of the second mass.

An observer of the unmeasurable parameters of a two-mass rolling mill system has been developed. It provides an indirect determination (recovery) of the roll speed and the spindle torque in on-line mode. It is based on a system of equations in the state space. By comparing the reconstructed and experimentally obtained transient processes, the satisfactory accuracy of the results has been confirmed. Based on the proposed observer, the authors developed an automatic control system (ACS) of the roll speed with subordinate contours of the elastic shaft moment, speed and engine torque. The setting of closed-loop regulators has been substantiated. Transient processes of moments and velocities are considered at impact application of a load with increased speed of the second mass speed control loop. The analysis of the LAFC and LPFC confirmed the stability of the developed system in the frequency range. The analysis of experimental data substantiated a conclusion about the influence of the angular gap on the accuracy of the elastic moment recovery in the mode of metal capture by rolls. Prospects for the introduction of developments at mill 5000 and other rolling mills operating with shock load are noted.

**Keywords:** two-mass electromechanical system, coordinates, elastic moment, speed, observer, rolling mill, dynamic loads, regulation, system, development, modeling, experimental research, recommendations.

### References

1. Sugiura K., Hori, Y. Vibration Suppression in 2- and 3-Mass System Based on the Feedback of Imperfect Derivative of the Estimated Torsional Torque. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 1996, vol. 43, no. 2, pp. 56–64. DOI: 10.1109/41.481408
2. Ji J.K., Sul S.K. Kalman Filter and LQ Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in a 2-Mass Motor Drive System. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 1995, vol. 42, no. 6, pp. 564–571. DOI: 10.1109/41.475496
3. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Vibration Suppression in Two-Mass Drive System using PI Speed Controller and Additional Feedbacks – Comparative Study. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, no. 2, pp. 1193–1206. DOI: 10.1109/41.475496
4. Karandayev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyayev P.V. [Technological schemes for controlling electric drives of the finishing group of a broadband hot rolling mill]. *Trudy VII kongressa prokatchikov* [Proceedings of the VII Congress of distributors]. Moscow, 2007, vol. 1, pp. 71–75. (in Russ.)
5. Selivanov I.A., Karandayev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R. [Improvement of automated electric drives and diagnostics of power electrical equipment]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 5–11.

6. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandayev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R. [Automatic speed correction of electric drives of stands of mill 2000 when rolling a pipe billet]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 31–35.
7. Golovin V.V., Karandayev A.S., Khramshin V.R. [Evaluation of the effectiveness of the use of a thyristor electric drive with automatic change of the coordinate, regulated by the excitation circuit]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics], 2006, no. 4, pp. 40–45.
8. Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Baskov S.N., Loginov B.M. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 101–111. DOI: 10.14529/power180109
9. Antsupov A.V. (jr), Antsupov A.V., Nalimova M.V. [Model of failures of universal spindles hinges by the criterion of wear resistance of bronze inserts]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2017, no. 4 (part 1), pp. 9–12.
10. Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. [Substantiation of methods of limiting dynamic loads of electromechanical systems of rolling mill stand]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2018, no. 1 (38), pp. 14–25. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25
11. Khramshin V.R., Karandayev A.S., Evdokimov S.A. et al. [Decrease of dynamic loads in universal stands of the rolling mill]. *Metallurg* [Metallurgist], 2015, no. 4, pp. 41–47.
12. Radionov A.A., Karandayev A.S., Evdokimov A.S. and other. [Mathematical modeling of interconnected electromechanical systems of a continuous subgroup of rolling mill stands. Part 1. Development of a mathematical model]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 59–73. DOI: 10.14529/power150108
13. Galkin V.V., Karandayev A.S., Golovin V.V., Radionov A.A., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Zalogin O.A. [Algorithm for calculating the speed and load modes of electric drives of the rolling mill stands when rolling thick strips]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*. Vyp. 3: v 5 ch. Bulletin of TulSU. Technical science. Iss. 3: in 5 vol.], Tula, TulGU Publ., 2010, part. 2, pp. 12–17.
14. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Zinchenko M.A., Loginov B.M. Limiting Dynamic Loads in the Main Line of a Rolling Mill through an Automated Drive. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2020, pp. 1122–1126. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208087
15. Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Baskov S.N., Loginov B.M. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 101–111. DOI: 10.14529/power180109
16. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Tverskoi M.M., Khramshin V.R., Loginov B.M. Implementation of telemetric on-line monitoring system of elastic torque of rolling mill line of shafting. *2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon)*, 2017, pp. 450–455. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120750
17. Krot P.V. Nonlinear Vibrations and Backlashes Diagnostics in the Rolling Mills Drive Trains. *Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2008)*, IPME RAS, St. Petersburg. – June 30–July 4, 2008. DOI: 10.13140/2.1.3353.1840
18. Luk'yanov S.I., Karandayev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Khramshin V.R. [Development and implementation of intelligent systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Bulletin of G.I. Nosov MSTU], 2014, no. 1, pp. 129–136.
19. Szabat K., Serkies P., Cychowski M. Application of the MPC to the robust control of the two-mass drive system. *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. DOI: 10.1109/isie.2011.5984448
20. Kolganov A.R., Lebedev S.K., Gnezdov N.E. *Elektromekhanotronnyye sistemy. Sovremennyye metody upravleniya, realizatsii i primeneniya: uchebnoye posobiye* [Electromechanotronic systems. Modern methods of management, implementation and application: textbook]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2019. 256 p.
21. Lebedev S.K., Kolganov A.R. *Upravleniye dvizheniyem promyshlennykh manipulyatorov: uchebnik* [Motion control of industrial manipulators: textbook]. Ivanovo, FGBOU VPO “Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina” Publ., 2018. 340 p.
22. Kolganov A.R., Lebedev S.K., Gnezdov N.E. *Sovremennyye metody upravleniya v elektromekhanotronnykh sistemakh. Razrabotka, realizatsiya, primeneniye* [Modern control methods in electromechanotronic systems. Development, implementation, application]. Ivanovo, FGBOU VPO “Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V. I. Lenina” Publ., 2012. 256 p.
23. Kolganov A.R., Lebedev S.K., Khanayev A.V. *Matematicheskiye osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. dlya vuzov* [Mathematical foundations of the theory of automatic control: textbook. for universities], Ivanovo, GOU VPO “Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V. I. Lenina” Publ., 2010. 340 p.
24. Tomasov V.S., Denisov K.M., Tolmachev V.A. [Tracking electric drives of guidance systems of new generation optomechanical complexes. Problems and achievements]. *Trudy V Mezhdunar. (XVI Vseross.) konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2007* [Proceedings of the V Intern. (XVI All-Russian) Conf. on the automated electric drive AEP-2007], 2007, pp. 175–177. (in Russ.)

25. Vasil'yev V.N., Tomasov V.S., Shargorodskiy V.D., Sadovnikov M.A. [State and development prospects of precision electric drives of high-precision observation complexes]. *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye* [Proceedings of universities. Instrumentation], 2008, vol. 51, no. 6, pp. 5–12. (in Russ.)
26. Tolmachev V.A., Antipova I.V., Fomin S.G. [Mathematical model of the servo drive of the axis of the support-rotary device]. *Nauch.-tekhnich. vestn. SPbGU ITMO* [Scientific and Technical Bulletin SPbSU ITMO], 2007, no. 44. (in Russ.)
27. Kotsegub P.Kh., Tolochko O.I., Fedoryak R.V. [Digital observer of the state of a two-mass electromechanical object]. *Zbirnik naukovikh prats' Donets'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Elektrotekhnika i energetika* [Collection of Science Practitioners of the Donetsk State Technical University. Series: Electrical Engineering and Power Engineering], 2002, vol. 41, pp. 146–156. (in Russ.) Available at: <http://masters.donntu.org/2004/eltf/tsyb/library/art3.htm> (accessed 11.05.2021)
28. Tolochko O.I., Kotsegub P.Kh., Marinichev V.Yu., Rozkaryaka P.I. [Problems of creating new machines and technologies. Scientific works of the KSPU], 2001, iss. 1/2001 (10), pp. 103–109. (in Russ.). Available at: <http://masters.donntu.org/2004/eltf/cherkasov/library/art1/art1.htm> (accessed 11.05.2021)
29. Tolochko O.I., Kotsegub P.Kh., Fedoryak R.V. [Parametric synthesis of a digital system of modal control of a two-mass electromechanical object]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "Kharkivs'kiy politekhnichnyi institut". Zbirka naukovikh prats'. Tematichnyi vipusk* [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Collection of Science Works. Thematic release], 2003, vol. 1, no. 10, pp. 97–100. (in Russ.)
30. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. et al. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. Mashiny i agregaty dlya proizvodstva prokata* [Machines and units of metallurgical plants. Machines and aggregates for the production of rolled products]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988, vol. 3. 680 p.
31. Klyuchev V.I. *Teoriya elektropivoda: ucheb. dlya vuzov* [Electric drive theory: textbook. for universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 760 p.
32. Gasiyarov V.R., Khramshin V.R., Voronin S.S., Lisovskaya T.A., Gasiyarova O.A. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use. *Machines*, 2019, vol. 7 (4), no. 76. Available at: <https://doi.org/10.3390/machines7040076> (accessed 11.05.2021).

Received 12 May 2021

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Регулирование координат электромеханической системы прокатного стана на основе наблюдателя упругого момента / А.А. Радионо́в, В.Р. Гасия́ров, Е.А. Гартли́б и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 115–129. DOI: 10.14529/power210212

#### FOR CITATION

Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Gartlieb E.A., Loginov B.M., Odintsov K.E. Regulating the Coordinates of the Electromechanical System of the Rolling Mill Based on the Elastic Torque Observer. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 115–129. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210212