

# Электротехнические комплексы и системы

## Electrotechnical complexes and systems

Научная статья  
УДК 621.311 + 621.34.001  
DOI: 10.14529/power220403

### НАБЛЮДАТЕЛЬ УПРУГОГО МОМЕНТА ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ\*

**А.С. Карандаев<sup>1</sup>**, askaran@mail.ru  
**Б.М. Логинов<sup>1</sup>**, lb18@yandex.ru  
**Е.Г. Бодров<sup>2</sup>**, bodrov.evgeniy@konar.ru  
**В.Р. Храмшин<sup>3</sup>**, hvrmgn@gmail.com  
**М.Н. Самодурова<sup>1</sup>**, samodurovamn@susu.ru

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

<sup>2</sup> АО «КОНАР», Челябинск, Россия

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

**Аннотация.** Для снижения аварийности и повышения ресурса электромеханических систем с ударным изменением нагрузки необходим мониторинг упругих моментов в механических передачах. Эта задача является актуальной для главных линий клетей станов горячей прокатки. Внедрение систем мониторинга на базе физических измерительных устройств является неэффективным в связи с их сложностью и низкой эксплуатационной надежностью. В качестве альтернативы предлагается относительно простой наблюдатель упругого момента, представляющий собой фрагмент программного обеспечения промышленного контроллера. Представлена структура наблюдателя, показаны его преимущества по сравнению с известными аналогами. На примере электромеханических систем клетки толстолистового стана 5000 доказана адекватность измеренных и восстановленных сигналов упругого момента. Обоснован квазиэкспериментальный анализ аварийных режимов, позволяющий выполнять обработку сигналов, сохраненных в виде массивов данных. На основе такого подхода дана оценка динамических моментов в аварийном режиме останова клетки с металлом в валках. Подчеркнута целесообразность создания системы онлайн-мониторинга перегрузок шпинделей и методики расчета их ресурса.

**Ключевые слова:** прокатный стан, электромеханическая система, ударная нагрузка, упругий момент, квазиэкспериментальный анализ, наблюдатель, разработка, исследование, внедрение

**Благодарности:** 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).

**Для цитирования:** Наблюдатель упругого момента двухмассовой электромеханической системы / А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, Е.Г. Бодров и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 4. С. 23–33. DOI: 10.14529/power220403

\* Публикуется в порядке дискуссии.

## ELASTIC TORQUE OBSERVER OF A TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM\*

A.S. Karandaev<sup>1</sup>, askaran@mail.ru

B.M. Loginov<sup>1</sup>, lb18@yandex.ru

E.G. Bodrov<sup>2</sup>, bodrov.evgeniy@konar.ru

V.R. Khramshin<sup>3</sup>, hvrmgn@gmail.com

M.N. Samodurova<sup>1</sup>, samodurovamn@susu.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> JSC "KONAR", Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** To reduce the accident rate and increase the service life of electromechanical systems with shock load changes, the monitoring of elastic moments in mechanical gears is necessary. This task is relevant for the main lines of stands of hot rolling mills. The implementation of monitoring systems based on physical measuring devices is inefficient due to their complexity and low operational reliability. As an alternative, a relatively simple elastic moment observer is proposed, which is a fragment of an industrial controller software. The structure of the observer is presented and its advantages in comparison with known analogues are shown. The adequacy of the measured and reconstructed elastic moment signals is proved using the example of electromechanical systems of the stand of the thick-sheet mill 5000. A quasi-experimental analysis of emergency modes is substantiated, which allows the processing of signals stored in the form of data arrays. Based on this approach, an assessment of the dynamic moments in the emergency shutdown mode of the crate with metal in the rolls is given. The expediency of creating an online monitoring system for overloads of spindles and methods for calculating their resource is emphasized.

**Keywords:** rolling mill, electromechanical system, shock load, elastic moment, quasi-experimental analysis, observer

**Acknowledgments:** Research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under a subsidy for a government-funded basic research project, Contract No. FENU-2020-0020 (2020071GZ).

**For citation:** Karandaev A.S., Loginov B.M., Bodrov E.G., Khramshin V.R., Samodurova M.N. Elastic torque observer of a two-mass electromechanical system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering.* 2022;22(4):23–33. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220403

\* Published in order of discussion.

### Введение

Анализ поломок механического оборудования клетей прокатных станов показывает, что наиболее вероятными причинами поломок являются разовые либо накопленные циклы перегрузок по крутильному моменту [1, 2]. Прокатные клетки работают в режиме периодически повторяющихся ударных нагрузок, обусловленных захватом раската (промежуточного продукта между заготовкой и готовым прокатом) валками. Поэтому целесообразно использовать параметры переходных процессов в диагностических целях.

Высокой информативностью обладает упругий момент в линии привода. Однако системы прямого измерения упругого момента на основе физических датчиков сложны в изготовлении и в агрессивной среде стана горячей прокатки имеют низкий эксплуатационный ресурс. Это подтверждает опыт эксплуатации (недолгий) системы измерения упругой деформации MANNER TG28TE, изготовленной фирмой Manner (Германия), которая была смонтирована на стане 5000 ПАО «Маг-

нитогорский металлургический комбинат» в 2011 г. В настоящее время на стане эксплуатируется система измерения упругого момента фирмы SMS group. Она также не является надежным устройством. Причинами низкой долговечности являются тяжелые условия эксплуатации и плановые замены шпинделей, после которых возникают сложности с повторной установкой измерительных (токосъемных) устройств. Положительным результатом внедрения этой системы является то, что она обеспечила возможность проверки адекватности сигналов, поступающих от разработанного наблюдателя упругого момента на шпинделе (информация о наблюдателе и пример его применения для анализа аварийного режима приводится ниже).

Альтернативой прямому измерению упругого момента является его вычисление (восстановление) с помощью наблюдателей, по сути, цифровых теней физической системы [3]. Согласно определению, данному в [4], «наблюдатель состояния – это модель, подключенная параллельно объекту управления и получающая непрерывную информа-

цию об изменениях регулирующего воздействия и регулируемой координаты». Разработка наблюдателей параметров двух- и трехмассовых электромеханических систем, которые обеспечивают восстановление момента вала и скорости неприводной массы по параметрам электропривода, является актуальной задачей. В отечественной практике ее решением занимаются представители научной школы Ивановского государственного энергетического университета под руководством профессоров А.Р. Колганова и С.К. Лебедева [5, 6]. В числе зарубежных публикаций, посвященных данной проблематике, следует выделить статьи [7–9].

Разработке цифрового наблюдателя упругого момента двухмассовой электромеханической системы посвящены авторские публикации [10–12]. Рассмотрен наблюдатель упругого момента приводного вала (шпинделя) и скорости валка клетки толстолистного стана. Представлены результаты его опытно-промышленных испытаний в электроприводах клетки стана 5000. В работах [11, 12] представлены результаты исследований системы автоматического регулирования упругого момента, разработанной на основе этого наблюдателя. Представление главной линии прокатной клетки с индивидуальным электроприводом в виде двухмассовой системы с упругим валом и зазором в шпindelных соединениях обосновано в [13]. В этой же статье рассмотрена методика экспериментального определения параметров двухмассовой системы.

Недостатком этой разработки, безусловно, заслуживающей внимания, является то, что восстановление упругого момента выполняется путем дифференцирования сигнала разности измеренной скорости двигателя и вычисленной скорости второй массы двухмассовой системы. Как известно,

операция дифференцирования снижает помехозащищенность и тем самым отрицательно влияет на достоверность восстанавливаемого сигнала. Стремление исключить данную процедуру и максимально упростить восстановление упругого момента привело к разработке более простого цифрового наблюдателя, который рассматривается ниже. Как и в предыдущих случаях, исследование выполняется на примере электропривода горизонтальной клетки стана 5000.

### Разработка наблюдателя упругого момента двухмассовой системы

**Структура наблюдателя.** Двухмассовая система «электропривод – валок» может быть представлена в виде замкнутой двухконтурной структуры, представленной на рис. 1. Параметры модели, рассчитанные по упомянутой методике [13], представлены в табл. 1. На схеме обозначены:  $T_m$  – постоянная времени контура момента;  $\omega_1, \omega_2$  – скорости первой и второй масс. Расшифровка остальных параметров приведена в табл. 1.

Для представленной структуры справедлива система дифференциальных уравнений, обоснованная в [10]:

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

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

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

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

При разработке учитывается, что момент, обусловленный трением, незначителен, соответственно блок 7 может быть исключен из схемы. Принимается, что для этой структуры нагрузка

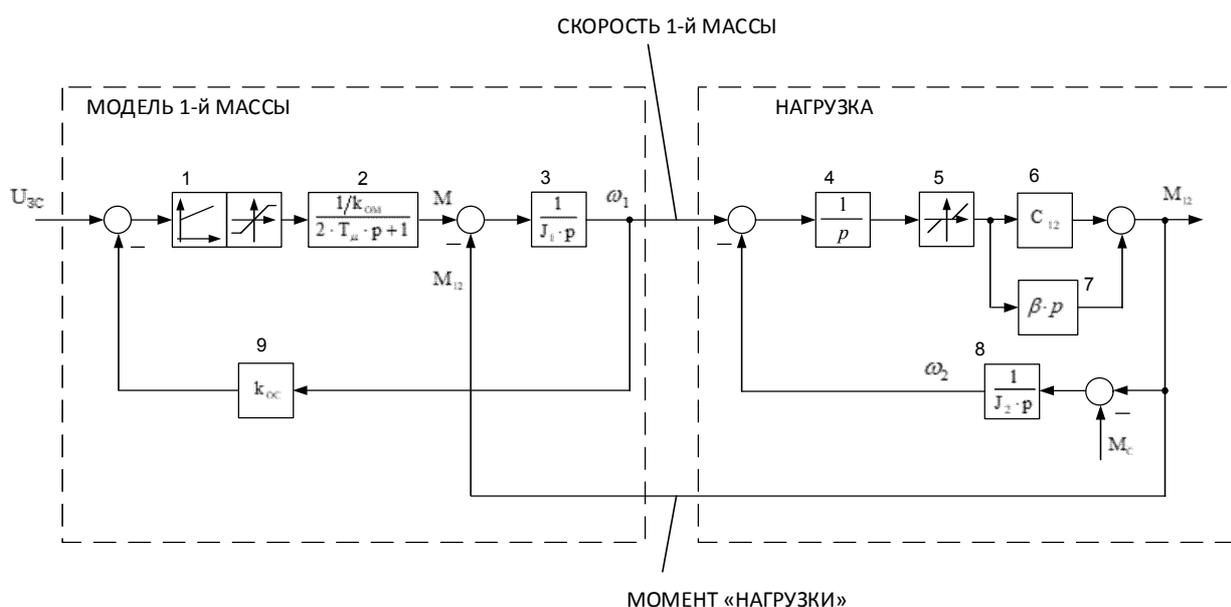


Рис. 1. Структура модели, поясняющая разработку наблюдателя  
Fig. 1. The structure of the model explaining the development of the observer

Таблица 1

Параметры модели двухмассовой системы клетки стана 5000  
Parameters of the model of the two-mass system of the mill 5000 crate

Table 1

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Момент инерции первой движущейся массы (двигателя)	$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	125 000
Момент инерции второй движущейся массы (валка)	$J_2$	кг·м <sup>2</sup>	114 571
Жесткость упругой связи	$C_{12}$	Н·м/рад.	5 934 842
Собственная частота упругих колебаний	$\omega_{12}$	рад/с	9,96
Ускорение электропривода	$\varepsilon_0$	рад/с <sup>2</sup>	1–3
Зазор в передаче (блок 5)	$\delta$	град.	1–3
Средний упругий момент	$M_{12}$	МН·м	1,9
Коэффициент демпфирования (типа, вязкое трение)	$\beta$	–	2,817
Декремент затухания	$\xi$	–	0,172
Коэффициент усиления регулятора скорости (блок 1 на рис. 1)	$k_{pc}$	–	19,5
Постоянная времени регулятора скорости	$T_{pc}$	с	0,0041

представляет собой «черный ящик». Ее воздействие на модель 1-й массы передается через упругий момент шпинделя. Идея заключается в том, что при этих условиях можно реализовать наблюдатель упругого момента аналогично наблюдателю нагрузки одномассовой системы. Для этого может быть применена схема без вычисления производных скорости. Структура разработанного наблюдателя представлена на рис. 2а.

Для расчета момента нагрузки используется специальный регулятор компенсации рассогласования скоростей (далее – регулятор автонастройки). Выполнена его автоматическая настройка по методу Циглера – Николса [14]. В базовой публикации [15] упомянуто, что «настройка конечного цикла Циглера – Николса или настройка с обратной связью широко известна как довольно точный эвристический метод для определения оптималь-

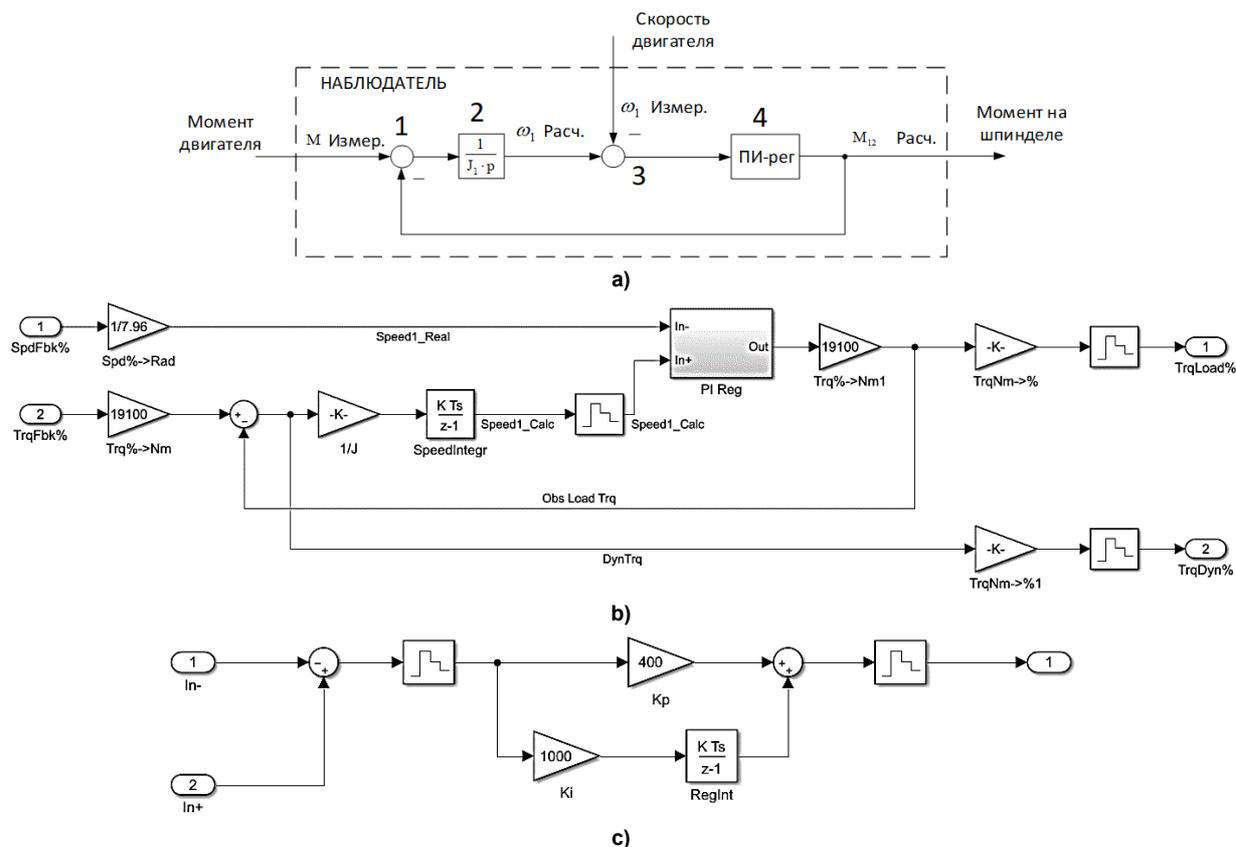


Рис. 2. Схема наблюдателя (а), ее реализация в MATLAB Simulink (b) и дискретная модель ПИ-регулятора автонастройки (с)  
Fig. 2. Observer diagram (a), its implementation in MATLAB Simulink (b) and a discrete model of the PI auto-tuning controller (c)

Параметры наблюдателя упругого момента

Таблица 2

Parameters of the torque observer

Table 2

Параметр	Значение	Ед. измерения
Номинальная скорость двигателя	7,96	рад/с
Номинальный момент двигателя	1 910 000	Н·м
Момент инерции двигателя	1 250 000	Н·м <sup>2</sup>
Коэффициент П-части регулятора автонастройки	400	–
Коэффициент И-части регулятора автонастройки	1000	–

ных настроек ПИД- и ПИ-регуляторов для широкого круга распространенных промышленных процессов». Методика автонастройки регуляторов на микроконтроллере изложена в [16]. Параметры регулятора приведены в табл. 2.

Этот регулятор «вычисляет» момент нагрузки первой массы и стремится «привести в ноль» разницу между измеренной и расчетной скоростями. Динамический момент в модели рассчитывается как разница между полным моментом двигателя, полученным из САР преобразователя частоты, и моментом нагрузки, полученным наблюдателем. Затем динамический момент интегрируется с коэффициентом ( $1/J_1$ ), таким образом вычисляется скорость 1-й массы.

На рис. 2b приведена структура наблюдателя в MATLAB Simulink. Она составлена по системе дифференциальных уравнений, приведенной выше. Регулятор автонастройки (рис. 2с) представляет собой обычный ПИ-регулятор и должен обладать достаточным быстродействием для минимизации ошибок расчета. Как видно, в структуре наблюдателя операция дифференцирования заменена процедурой интегрирования, что повышает помехозащищенность сигнала. Это является преимуществом по сравнению с известными техническими решениями. Вторым преимуществом является простота настройки. Недостатком, по сравнению с разработкой [10, 12], является то, что не восстанавливается сигнал скорости второй массы. Такой сигнал может быть необходим при разработке замкнутой системы регулирования упругого момента [11]. Однако такая задача в представленной публикации не рассматривается. Выделение сигнала скорости может быть выполнено в ходе дальнейших исследований.

Следует отметить, что в рассмотренном случае выполнена виртуальная настройка наблюдателя, при которой после отработки в MATLAB Simulink алгоритм наблюдателя был импортирован в программное обеспечение (ПО) промышленного контроллера. В результате осуществлен виртуальный ввод наблюдателя в работу. Для электроприводов исследуемого стана такой подход является обоснованным и достаточным. С целью обобщения результатов и рекомендаций по использованию наблюдателя на других объектах, целесообразно представить методику расчета параметров

регулятора автонастройки. Однако этот материал достаточно объемный, поэтому может быть изложен в отдельной публикации.

### Экспериментальные исследования

Программная структура наблюдателя, выполняющая вычисления для одного электропривода, приведена на рис. 3а. Она соответствует схеме, показанной на рис. 2а, и включает в себя последовательно соединенные блоки вычитания, интегратора расчетной скорости (CtrFull), вычитания сигнала расчетной скорости из сигнала измеренной скорости и ПИ-регулятора (CtrCTPi). На рис. 3b показана структура (бит) ограничения нагрузки по моменту для аварийных случаев. Установлены пороговые значения: 6500 кН·м – для предупреждения и 8000 кН·м – для торможения быстрым остановом.

**Проверка адекватности вычисления упругого момента.** При оценке адекватности восстанавливаемых величин, поступающих от наблюдателя, предложен подход, согласно которому осуществляется импорт сигналов скорости и момента двигателя в модель наблюдателя (см. рис. 2b). Они могут быть измерены заранее и сохранены в виде массивов либо подаваться на входы наблюдателя в онлайн-режиме. Здесь используются предварительно записанные сигналы, импортированные в MATLAB из информационно-измерительной системы IBA PDA. Такой подход получил название «квазиэкспериментального», в отличие от экспериментального анализа, когда сигналы поступают в виртуальную систему непосредственно после измерения. В [17] отмечается, что «этот подход обеспечивает баланс между преимуществами для практиков и методологической строгостью. Хотя эта процедура делает исследование неполным контролируемым экспериментом, часто удается сохранить характеристики квазиэксперимента». Данный термин также используется в публикациях [18–20].

Проверка адекватности выполняется на примере анализа динамических режимов. Предлагается методика, согласно которой выполняются следующие действия.

1. Данные, сохраненные в виде массивов, импортируются в MATLAB, где подаются на вход дискретной модели.

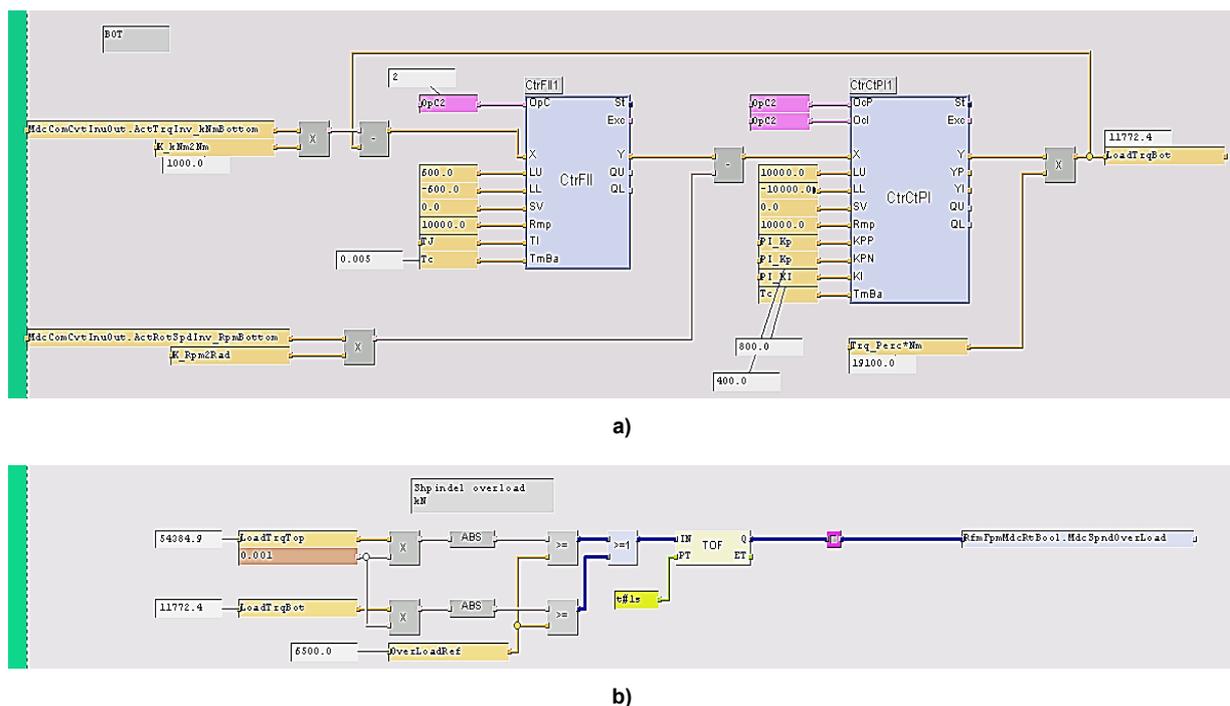


Рис. 3. Экранные формы ПО контроллера управления, реализующие алгоритмы наблюдателя (a) и ограничения нагрузки по моменту в аварийных режимах (b)  
Fig. 3. On-screen forms of the control controller software implementing observer algorithms (a) and load limits in emergency modes (b)

2. Выполняется моделирование процессов, ранее зафиксированных на осциллограммах.

3. Выполняется сопоставление осциллограмм с расчетными зависимостями методом их совмещения либо методом сравнения координат в характерных точках.

4. Для оценки достоверности могут быть применены методы статистической обработки результатов (здесь не приводятся).

#### Динамические режимы электропривода.

На рис. 4а представлены осциллограммы последовательных ускорения и замедления электропривода. Этот режим является наиболее информативным с точки зрения оценки адекватности наблюдателя, так как проявляются нелинейные свойства объекта, обусловленные наличием зазоров в шпиндельных соединениях. В режиме разгона происходит гарантированное замыкание зазора, в режиме торможения – его размыкание. На рис. 4b представлены аналогичные осциллограммы, зафиксированные в режиме ударного приложения нагрузки при входе металла в клеть. Момент двигателя  $M_{дв}$  (окно 2) сразу после захвата достигает уровня ограничения 240 % номинального значения.

Зависимости моментов на шпинделе – измеренного системой PDA  $M_{ш(измер)}$  и восстановленного наблюдателем  $M_{ш(восст)}$  – на рис. 4а, b полностью совпадают. Кривая  $M_{ш(восст)}$  момента с наблюдателя находится на фоне кривой  $M_{ш(измер)}$  момента, поступающего от физической измерительной систе-

мы, поэтому в черно-белой печати становится незаметной. Это позволяет сделать вывод, что, несмотря на влияние нелинейности, обусловленной зазором, восстановление сигнала наблюдателем обеспечивается с абсолютной точностью.

Нелинейные свойства электромеханической системы с зазором не могут быть описаны аналитически. Однако представленные осциллограммы позволяют утверждать, что предложенный принцип обработки измеренных сигналов при правильной настройке регулятора автонастройки позволяет максимально приблизить восстановленные сигналы к физическим. При этом автоматически обеспечивается учет нелинейных свойств объекта. Необходимости в проведении сравнительного анализа процессов с использованием математических методов нет, так как кривые переходных процессов абсолютно совпадают.

Сделанные выводы подтверждены результатами исследований различных режимов электроприводов клетки. Проведен уникальный анализ динамических моментов, возникающих на шпинделях в аварийных режимах, в том числе сопровождающихся поломками оборудования. Возможность таких исследований обеспечена применением предложенного квазиэкспериментального подхода. Следует отметить, что подобные исследования в литературных источниках не встречаются. В качестве примера ниже представлен краткий анализ аварийной ситуации.

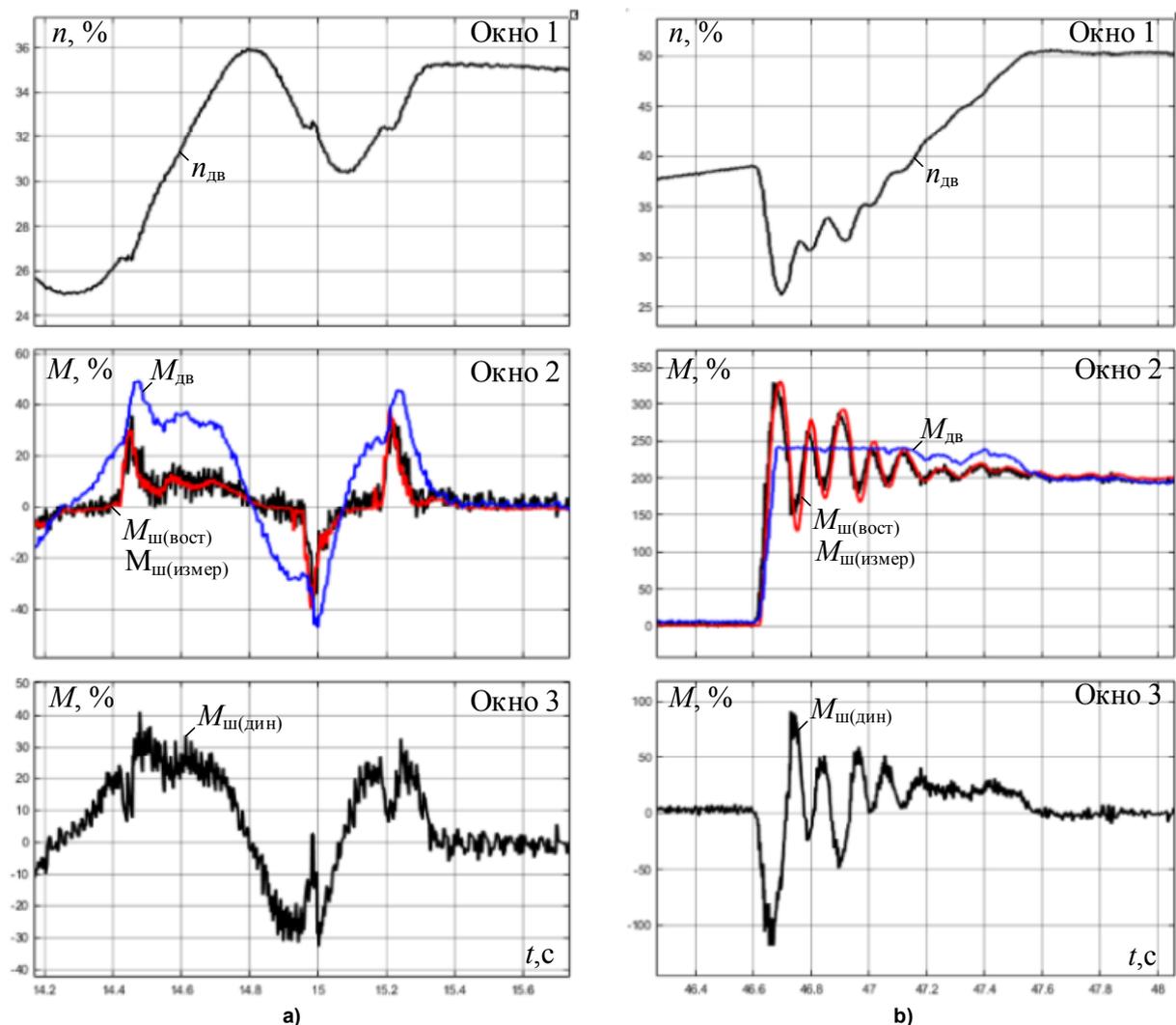


Рис. 4. Осциллограммы при последовательном ускорении и замедлении электропривода (а) и в режиме захвата металла валками (б):  $n_{дв}$  – скорость двигателя, % номинальной;  $M_{дв}$  – момент двигателя;  $M_{ш(измер)}$  – момент на шпинделе от датчика;  $M_{ш(восст)}$  – момент с наблюдателя;  $M_{ш(дин)}$  – динамический момент с наблюдателя  
Fig. 4. Oscillograms with sequential acceleration and deceleration of the electric drive (a) and in the mode of metal capture by rolls (b):  $n_{дв}$  – motor speed, % nominal;  $M_{дв}$  – motor torque;  $M_{ш(измер)}$  – torque on the spindle from the sensor;  $M_{ш(восст)}$  – torque from the observer;  $M_{ш(дин)}$  – dynamic moment from the observer

**Анализ аварийного отключения во время прокатки.** Рассматривается случай аварийного отключения электроприводов во время прокатки, вызвавшего останов клетки с металлом в валках. В этом конкретном случае не произошло поломок валков либо элементов шпиндельных соединений, поэтому анализ динамических нагрузок носит информативный характер. Полученная информация может быть использована при настройке системы аварийного торможения двигателей. Осциллограммы, полученные в данном режиме, представлены на рис. 5. В результате аварии скорости  $n_{НГП}$ ,  $n_{ВГП}$  (окно 1) и моменты  $M_{НГП}$ ,  $M_{ВГП}$  (окно 2) двигателей снизились до нулевых значений с небольшой разницей во времени. Индекс «ВГП» означает принадлежность сигнала к главному электроприводу верхнего валка, индекс «НГП» – к электроприводу нижнего валка.

Поставлена задача оценки упругого момента на шпинделях для этого режима. С этой целью предварительно записанные сигналы в виде цифровых массивов импортированы в модель наблюдателя (см. рис. 2b). Расчетные временные зависимости, полученные при обработке массивов, представлены на рис. 6. Видно, что этот режим является аварийным с точки зрения динамических нагрузок на шпинделях (окна 2, 3). Амплитудные значения моментов, восстановленных с помощью наблюдателя  $M_{шВmax}$ ,  $M_{шНmax}$ , на обоих шпинделях превышают установившийся момент прокатки ( $M_{СТ} = 200 \%$ ) более чем в 3,7 раза и достигают 750 % номинального момента двигателя, равного 1,91 МН·м.

Главными проблемами, возникающими при предотвращении аварийных режимов, являются своевременная фиксация начала аварии и форми-

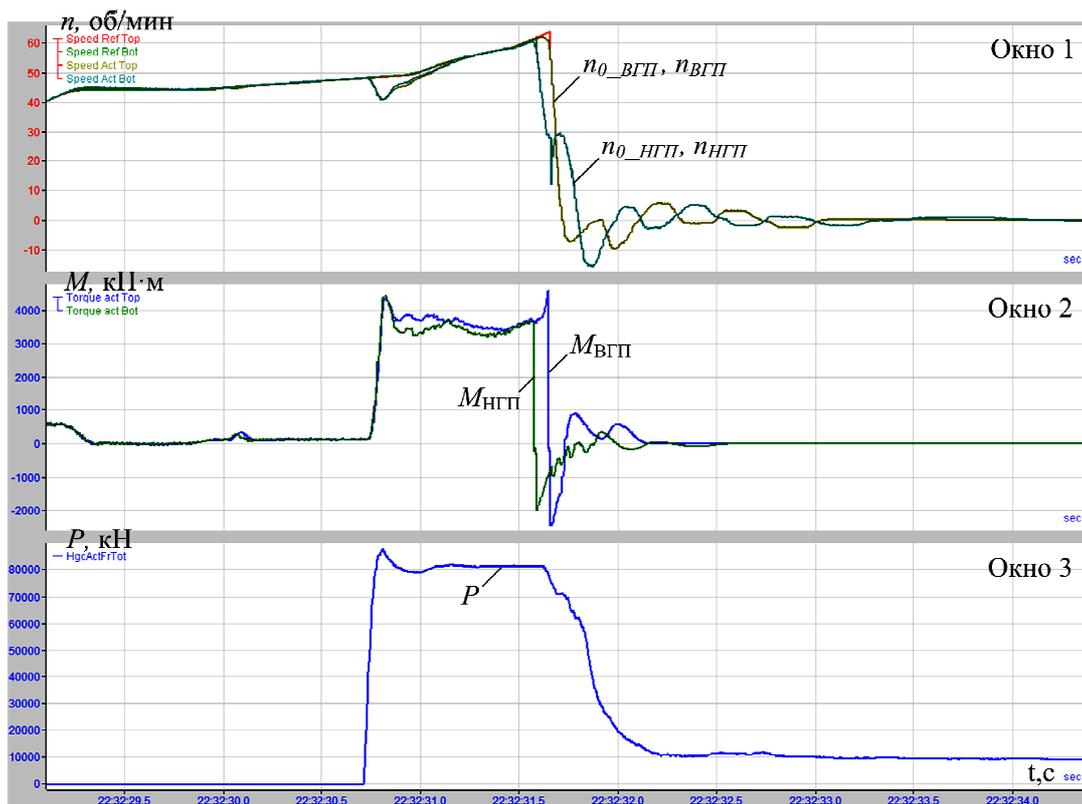


Рис. 5. Осциллограммы при аварийном отключении электроприводов во время прокатки:  
окно 1 – заданные и фактические скорости ВГП и НГП; окно 2 – моменты двигателей; окно 3 – усилие прокатки  
Fig. 5. Oscillograms in case of emergency shutdown of electric drives during rolling:  
window 1 – set and actual speeds of ВГП and НГП; window 2 – motor moments; window 3 – rolling force

рование сигнала на быстрый останов электроприводов. Также необходимо экстренное информирование оператора о подобных ситуациях, что обеспечит его своевременную реакцию на развитие аварии. В этом случае произойдет потеря заготовки, однако это позволит избежать поломок механического оборудования (также с потерей заготовки).

#### Обсуждение результатов и выводы

В настоящее время разработанный наблюдатель внедрен и находится в режиме опытно-промышленной эксплуатации на стане 5000. По сравнению с «контактными» измерительными системами он обладает следующими преимуществами:

- простотой и высокой надежностью;
- отсутствием необходимости какого-либо обслуживания;
- практически не имеет стоимости, так как является фрагментом программного обеспечения.

Поскольку нагрузка электропривода (см. рис. 1) представлена в виде «черного ящика», он может быть применен как в одномассовой, так и в двух- и трехмассовых системах. Принцип виртуальной настройки регулятора в этих случаях не изменяется.

Полученные сигналы упругих моментов на шпинделях не предназначены для использования в системах регулирования электроприводов. Их основное назначение – информация об амплитудах

упругого момента в динамических режимах. Также наблюдатель позволяет осуществлять контроль предаварийных ситуаций с целью предотвращения аварий, а в случае их возникновения – выполнять анализ причин и последствий.

Информацию о динамических моментах на шпинделе следует сохранять в специальной информационной базе, при этом амплитудные значения, многократно превышающие заданный порог, следует выводить в специальном окне на монитор оператора. Это позволит избежать последовательного повторения динамических ударов, приводящих к усталостным разрушениям.

Для полноценной реализации возможностей наблюдателя целесообразно разработать и внедрить на стане:

- 1) систему мониторинга перегрузок шпинделей, обеспечивающую фиксацию и подсчет перегрузок по моменту, превышающих заданные пороговые значения;
- 2) методику расчета ресурса шпинделей по результатам подсчета перегрузок и оценки их амплитуд;
- 3) способы ограничения динамических нагрузок.

Необходимо представить методику расчета параметров регулятора автонастройки. Это позволит рассчитывать и внедрять наблюдатель на дру-

гих прокатных станах. Также следует решить вопрос с восстановлением скорости неуправляемой массы – валка.

Решение перечисленных задач позволит трансформировать разработанный наблюдатель

в систему онлайн-мониторинга технического состояния шпинделей. На ее основе будет внедрен комплекс разработок, направленных на предупреждение аварий и минимизацию их последствий.

### Список литературы

1. Анализ причин аварий оборудования листопркатных станов и меры по их предупреждению / А.Ф. Кирсанов, В.Ф. Кузрман, Б.Н. Виноградов и др. М.: Ин-т «Черметинформация», 1985. 36 с.
2. Мюллер В. Обзор повреждений в приводах прокатных станов // Черные металлы. 1996. № 25–26. С. 9–14.
3. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 1. С. 54–68. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68
4. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М.: ЭФО, 2015. 61 с.
5. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Электромеханотронные системы. Современные методы управления, реализации и применения: учеб. пособие. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 256 с.
6. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Современные методы управления в электромеханотронных системах. Разработка, реализация, применение. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т им. В.И. Ленина, 2012. 256 с.
7. Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M. Indirect adaptive control of induction motor drive system with an elastic coupling // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009. Vol. 56, no. 10. P. 4038–4042. DOI: 10.1109/TIE.2009.2022514
8. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Control of the Drive System With Stiff and Elastic Couplings Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54, no. 1. P. 228–240. DOI: 10.1109/TIE.2006.888787
9. Muszynski R., Deskur J. Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57, no. 2. P. 544–552. DOI: 10.1109/TIE.2009.2036034
10. Разработка цифрового наблюдателя упругого момента электромеханической системы клетки прокатного стана / А.А. Радионов, Р.В. Гасияров, Б.М. Логинов и др. // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2 (51). С. 19–29. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29
11. Регулирование координат электромеханической системы прокатного стана на основе наблюдателя упругого момента / А.А. Радионов, В.Р. Гасияров, Е.А. Гартлиб и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2021. Т. 21, № 2. С. 115–129. DOI: 10.14529/power210212
12. Development of an Automatic Elastic Torque Control System Based on a Two-Mass Electric Drive Coordinate Observer / A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov et al. // Machines. 2021, Vol. 9. P. 305. DOI: 10.3390/machines9120305
13. Экспериментальное определение параметров двухмассовой электромеханической системы прокатного стана / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, Б.М. Логинов и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 3. С. 24–35. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-3-24-35
14. Hang C.C., Åström K.J., Ho W.K. Refinements of the Ziegler–Nichols tuning formula // IEE Proceedings D (Control Theory and Applications). 1991. Vol. 138, iss. 2. P. 111–118. DOI: 10.1049/ip-d.1991.0015
15. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 65. P. 759–765. URL: [http://davidr.no/iiav3017/papers/Ziegler\\_Nichols\\_%201942.pdf](http://davidr.no/iiav3017/papers/Ziegler_Nichols_%201942.pdf).
16. Настройка ПИД-регулятора. Метод Циглера – Никольса. URL: <https://microtechnics.ru/nastrojka-pid-regulyatora-metod-cziglera-nikolsa/>.
17. Laitenberger O., Rombach D. (Quasi-)Experimental Studies in Industrial Settings // Lecture Notes on Empirical Software Engineering. 2003. P. 167–227. DOI: 10.1142/9789812795588\_0005
18. O’Hara J.M. A Quasi-Experimental Model of Complex Human-Machine System Validation // Cognition, Technology & Work. 1999. Vol. 1 (1). P. 37–46. DOI: 10.1007/s101110050009
19. Kampenes V.B., Dybå T., Hannay J.E., Sjøberg D.I.K. A systematic review of quasi-experiments in software engineering // Information and Software Technology. 2009. Vol. 51 (1). P. 71–82. DOI: 10.1016/j.infsof.2008.04.006
20. Wang L., Freeman C., Rogers E. Experimental Evaluation of Automatic Tuning of PID Controllers for an Electro-Mechanical System // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50 (1). P. 3063–3068. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.676

**References**

1. Kirsanov A.F., Kuzerman V.F., Vinogradov B.N. et al. *Analiz prichin avariï oborudovaniya listoprokatnykh stanov i mery po ikh preduprezhdeniyu* [Analysis of the Causes of Equipment Accidents in Plate Mills and Measures to Prevent Them]. Moscow: Institute “Chermetinformatsiya”; 1985. 36 p. (In Russ.)
2. Muller W. [Overview of damage in rolling mill drives]. *Stahl und eisen*. 1996; 25–26:9–14. (In Russ.)
3. Radionov A.A., Karandayev A.S., Loginov B.M., Gasiyarova O.A. Conceptual directions of creating digital twins for electrotechnical systems of rolling mill facilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2021;64(1):54–68. (In Russ.) DOI:10.17213/0136-3360-2021-1-54-68
4. Kalachev Yu.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode* [State observers in vector electric drive]. Moscow: EFO; 2015. 61 p. (In Russ.)
5. Kolganov A.R., Lebedev S.K., Gnezdov N.E. *Elektromekhanotronnyye sistemy. Sovremennyye metody upravleniya, realizatsii i primeneniya: uchebnoye posobiye* [Electromechanotronic systems. Modern methods of control, implementation and application: textbook]. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya; 2019. 256 p. (In Russ.)
6. 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, realization, application]. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University; 2012. 256 p. (In Russ.)
7. Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M. Indirect adaptive control of induction motor drive system with an elastic coupling. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2009;56(10):4038–4042. DOI: 10.1109/TIE.2009.2022514
8. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Control of the Drive System With Stiff and Elastic Couplings Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007;54(1):228–240. DOI: 10.1109/TIE.2006.888787
9. Muszynski R., Deskur J. Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010;57(2):544–552. DOI: 10.1109/TIE.2009.2036034
10. Radionov A.A., Gasiyarov R.V., Loginov B.M., Gartlib E.A., Gasiyarova O.A. Digital controller for elastic modulus of an electromechanical system of a rolling mill stand. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes]. 2021;2(51):19–29. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29
11. 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;21(2):115–129. (In Russ.) DOI: 10.14529/power210212
12. Radionov A.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Gartlib E.A. Development of an Automatic Elastic Torque Control System Based on a Two-Mass Electric Drive Coordinate Observer. *Machines*. 2021;9:305. DOI: 10.3390/machines9120305
13. Karandaev A.S., Radionov A.A., Loginov B.M., Gasiyarova O.A., Gartlieb E.A., Khrumshin V.R. Experimental parametrization of the dual-mass electromechanical system of a rolling mill. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2021;64(3):24–35. (In Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2021-3-24-35
14. Hang C.C., Åström K.J., Ho W.K. Refinements of the Ziegler–Nichols tuning formula. *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*. 1991;138(2):111–118. DOI: 10.1049/ip-d.1991.0015
15. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*. 1942;65:759–765. Available at: [http://davidr.no/iiav3017/papers/Ziegler\\_Nichols\\_%201942.pdf](http://davidr.no/iiav3017/papers/Ziegler_Nichols_%201942.pdf).
16. *Nastroyka PID-regulyatora. Metod Tsiglera – Nikol’sa* [Setting up a PID controller. Ziegler–Nichols method]. (In Russ.) Available at: <https://microtechnics.ru/nastrojka-pid-regulyatora-metod-cziglera-nikolsa/>.
17. Laitenberger O., Rombach D. (Quasi-)Experimental Studies in Industrial Settings. In: *Lecture Notes on Empirical Software Engineering*; 2003. P. 167–227. DOI: 10.1142/9789812795588\_0005
18. O’Hara J.M. A Quasi-Experimental Model of Complex Human-Machine System Validation. *Cognition, Technology & Work*. 1999;1(1):37–46. DOI: 10.1007/s101110050009
19. Kampenes V.B., Dybå T., Hannay J.E., Sjøberg D.I.K. A systematic review of quasi-experiments in software engineering. *Information and Software Technology*. 2009;51(1):71–82. DOI: 10.1016/j.infsof.2008.04.006
20. Wang L., Freeman C., Rogers E. Experimental Evaluation of Automatic Tuning of PID Controllers for an Electro-Mechanical System. *IFAC-PapersOnLine*. 2017;50(1):3063–3068. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.676

***Информация об авторах***

**Карандаев Александр Сергеевич**, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; askaran@mail.ru.

**Логинов Борис Михайлович**, канд. техн. наук, магистрант, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; lb18@yandex.ru.

**Бодров Евгений Геннадьевич**, технический директор, АО «КОНАР», Челябинск, Россия; bodrov.evgeniy@konar.ru.

**Храмшин Вадим Рифатович**, д-р техн. наук, проф., директор Института энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; hvrmgn@gmail.com.

**Самодурова Марина Николаевна**, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; samodurovamn@susu.ru.

***Information about the authors***

**Alexander A. Karandaev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; askaran@mail.ru.

**Boris M. Loginov**, Cand. Sci. (Eng.), Master's Student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; lb18@yandex.ru.

**Evgeny G. Bodrov**, Technical Director, JSC "KONAR", Chelyabinsk, Russia; bodrov.evgeniy@konar.ru.

**Vadim R. Khramshin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Energy and Automated Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; e-mail: hvrmgn@gmail.com

**Marina N. Samodurova**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; samodurovamn@susu.ru.

*Статья поступила в редакцию 23.08.2022; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 28.10.2022.*

*The article was submitted 23.08.2022; approved after review 15.09.2022; accepted for publication 28.10.2022.*