

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.311+621.34.001

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-19-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29)Радионов А.А.¹, Гасияров Р.В.¹, Логинов Б.М.², Гартлиб Е.А.¹, Гасиярова О.А.¹¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ УПРУГОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

Обоснована задача разработки наблюдателя упругого момента приводного вала (шпинделя) и скорости вала электромеханической системы клетки толстолистового прокатного стана. Рассмотрена конструкция главной линии горизонтальной клетки стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Приведены осциллограммы, подтверждающие колебательный характер упругого момента на шпинделе в момент захвата металла валками. Показано, что его амплитуда в несколько раз превышает установившийся момент прокатки. Рассмотрена структура модели двухмассовой электромеханической системы с упругой связью и угловым зазором в соединениях. Записаны уравнения в пространстве состояний, на основе которых разработан наблюдатель координат второй массы (валка) и момента упругого вала по параметрам первой массы: моменту и скорости двигателя электропривода. Представлена структура наблюдателя, основной проблемой при его настройке является обеспечение высокого быстродействия для восстановления переходных процессов в режиме ударного приложения нагрузки. Отмечено, что известные наблюдатели, являющиеся вычислителями координат со сложными алгоритмами, не обладают необходимым быстродействием. Предложен подход, суть которого заключается в симуляции процессов на модели с последующей прямой настройкой на объекте. Рассмотрены переходные процессы восстановленных координат двухмассовой системы при отработке захвата металла валками. Дано сравнение с экспериментальными осциллограммами, полученными на стане. Подтверждено совпадение процессов с удовлетворительной точностью. Представлены обобщенные результаты, полученные при анализе восстановленных зависимостей и экспериментально снятых осциллограмм упругого момента при прокатке заготовок различной толщины. Сделаны выводы о существенном влиянии толщины раската и составляющей, обусловленной упругими свойствами вала, на амплитуду момента на шпинделе. Рекомендовано применение разработанного наблюдателя в системах замкнутого регулирования упругого момента, определены направления их разработки. Отмечено, что необходимым условием эффективной работы таких систем является обеспечение захвата металла при предварительно замкнутых угловых зазорах.

Ключевые слова: прокатный стан, электромеханическая система, двухмассовая модель, координаты, наблюдатель, динамические процессы, восстановление, осциллограммы, анализ, рекомендации.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно определению, данному в [1], наблюдатель состояния – это модель, подключенная параллельно объекту управления и получающая непрерывную информацию об изменениях регулирующего воздействия и регулируемой координаты. Это определение соответствует понятию «цифровая тень», которое в публикации [2] названо частным случаем цифрового двойника. При использовании наблюдателя в систему не добавляются новые информационные каналы, только в регулятор вводится корректирующее устройство, в результате чего образуется новый регулятор, работающий в обычной одноконтурной системе [1].

В публикациях [3–5] отмечается, что задача разработки наблюдателей координат двухмассовых электромеханических систем изначально была поставлена для электроприводов прокатных станов. Однако эту задачу нельзя считать до конца решенной. Например, с развитием технологии толстолистовых станов возникают проблемы, обусловленные недостаточным исследованием колебательных процессов в двухмассовых системах главных линий клетей, оснащенных сверхмощными индивидуальными электроприводами. К исследуемым процессам относятся:

– ударные нагрузки, приводящие к усталостному

разрушению механического оборудования;

– вибрации, возникающие как в валопроводах клетей, так и в электромеханических системах, жестко связанных через прокатываемый металл;

– неустойчивая работа систем управления, обусловленная выходом электроприводов в режим ограничения по моменту, и другие неприятные явления.

В представленной публикации выполняется разработка наблюдателя координат электромеханических систем реверсивной клетки толстолистового стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000). Передача вращения от двигателей на валки осуществляется с помощью универсальных шпинделей слипперного (выдвижного) типа, показанных на **рис. 1, а**. Непосредственно сочленение вала со шпинделем осуществляется с помощью головки специальной конструкции, которая крепится к рабочему валу. Аналогичная головка устанавливается со стороны двигателя. Вал шпинделя имеет шлицевую конструкцию с балансировочными цилиндрами для компенсации осевого смещения при сдвиге валков *CVCplus* [6, 7]. Опорный подшипник расположен в районе середины вала.

Главные электроприводы верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП) выполнены индивидуальными с синхронными двигателями и частотным регулированием скорости. Упрощенная структурная схема системы автоматического регулирования (САР) скоростей приведена на **рис. 1, б** [8].

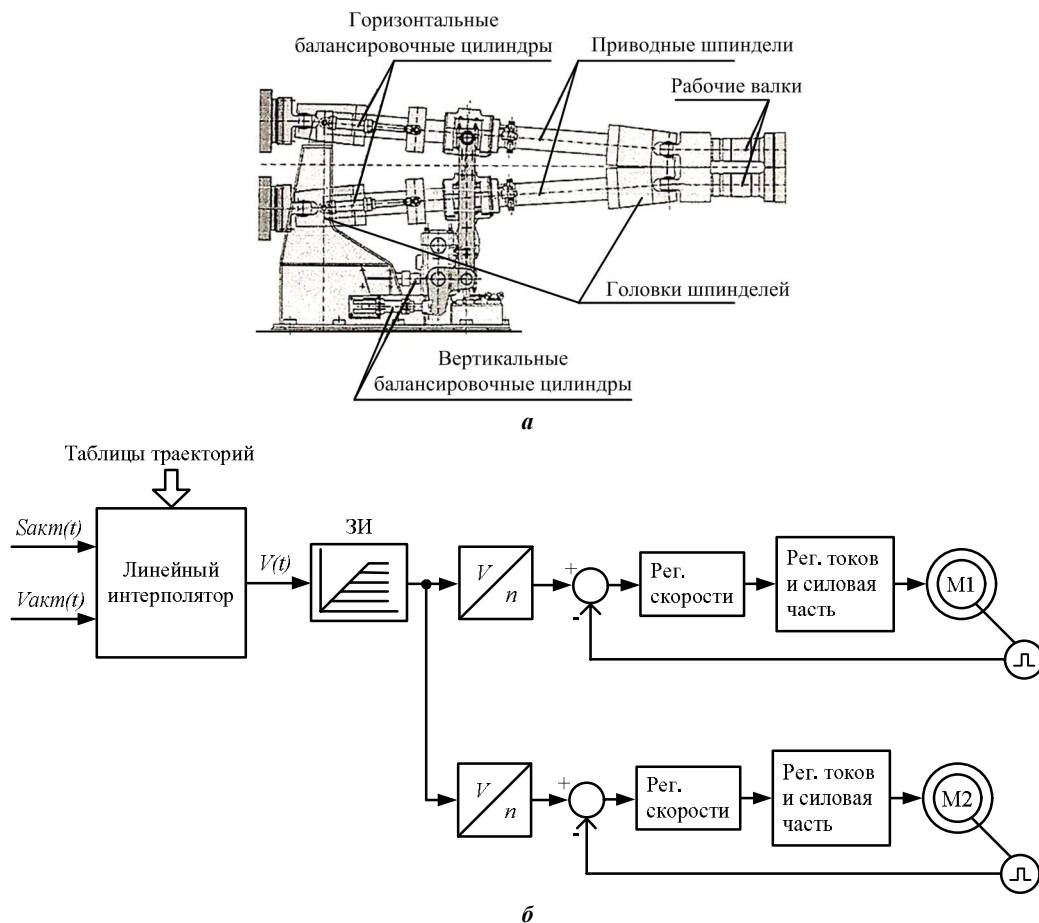


Рис. 1. Конструкция главной линии (а) и структурная схема системы управления ВПП и НПП (б) горизонтальной клетки стана 5000

Линии электроприводов (главные линии) представляют собой двухмассовые электромеханические системы с упругими связями и угловыми зазорами в шпиндельных соединениях [9]. Первой (управляемой) массой является ротор двигателя, второй (неуправляемой) массой является валок. Они имеют значительные моменты инерции, которые представлены ниже, в табл. 1 (момент ротора практически в 3 раза больше момента валка). В неустановившихся режимах скорости первой и второй масс различаются, и вал испытывает крутящий момент.

Основной причиной возникновения динамических перегрузок шпинделей является ударное приложение нагрузки в момент захвата металла валками. Это подтверждают осциллограммы, представленные на рис. 2 [10]. Они получены с помощью системы мониторинга крутящего момента, разработанной фирмой SMS (Германия), которая установлена на шпинделях стана 5000.

Захват металла происходит в момент времени t_2 в режиме торможения электропривода, т.е. при полностью открытых угловых зазорах в шпиндельных соединениях. Размыкание зазоров подтверждают кратковременные отрицательные «всплески» моментов в интервале t_1-t_2 . Динамические моменты обоих шпинделей имеют колебательный характер, их амплитудные значения $M_{B_{max}}$ более чем в 1,5 превышают ограничение момента $M_{дв_{max}}$ двигателя, установленное на уровне 4200 кН·м. Колебания демпфируются медленно, т.к. разомкнут регулятор скорости, механическая часть при этом представляется двумя интеграторами, по сути, это колебательное звено.

Таблица 1
Параметры модели двухмассовой системы

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Момент инерции 1-й массы	J_1	кг·м ²	125000
Момент инерции 2-й массы	J_2	кг·м ²	40570
Жесткость шпинделя	C_{12}	Н·м/рад	76489587
Коэффициент усиления регулятора скорости	k_{pc}	-	19,5
Постоянная времени регулятора скорости	T_{pc}	с	0,0041

Динамические нагрузки негативно влияют на эксплуатационные характеристики электрического и механического оборудования. Наименее долговечным узлом являются головки шпиндельных соединений со стороны валка (рис. 1, а). Их поломка приводит к длительным простоям и большим затратам на устранение последствий. Это подтверждает актуальность снижения динамических нагрузок при захвате, которое должно осуществляться средствами автоматизированного электропривода. Для этого необходимо, прежде всего, осуществлять непрерывный контроль упругого момента шпинделя и скорости второй массы (валка) двухмассовой электромеханической системы.

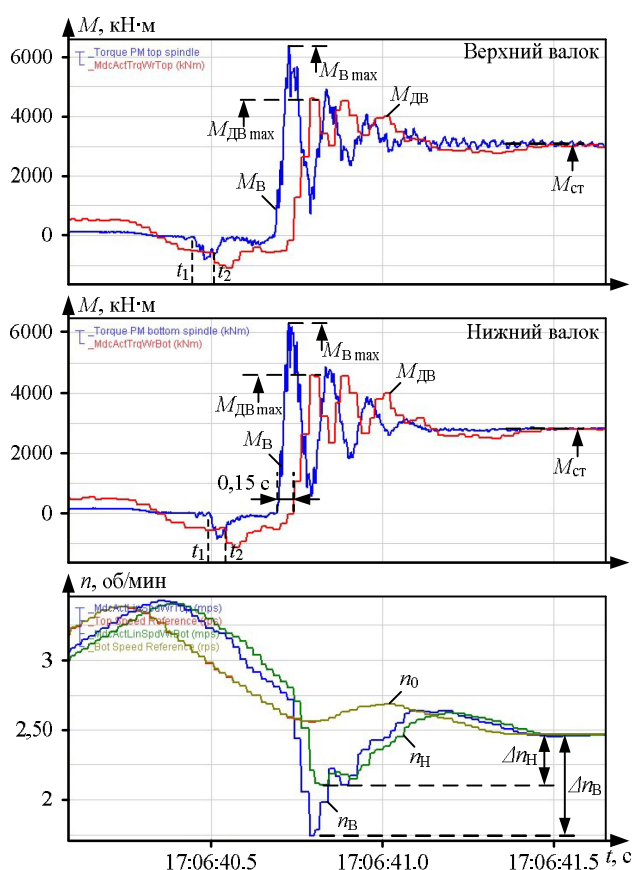


Рис. 2. Осциллограммы упругих моментов на валах шпинделей верхнего и нижнего валков в режиме захвата металла

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определение упругого момента в *on-line*-режиме по электрическим параметрам приводных двигателей не позволяет получить пиковые динамические нагрузки на частотах собственных колебаний механической системы (10–25 Гц), показанные на **рис. 2**. К тому же данный метод не обеспечивает приемлемой точности в частотно-регулируемых приводах [11]. В связи с этим применяются системы прямых измерений упругих колебаний, датчики которых устанавливаются непосредственно на шпинделях. При этом наряду с моментом регистрируются координаты двигателя (скорость вращения, ток) и усилие прокатки.

Однако системы прямого измерения упругого момента валопровода не являются надежными устройствами. Это подтверждает тот факт, что упомянутая система мониторинга момента фирмы *SMS* является третьей по счету со времени ввода стана 5000 в эксплуатацию в 2009 году. Причинами низкой долговечности являются тяжелые условия эксплуатации и плановые замены шпинделей, после которых возникают сложности с повторной установкой датчиков.

Перспективным направлением ограничения динамических нагрузок является разработка замкнутых систем регулирования координат двухмассовых электромеханических систем с наблюдателями координат неуправляемой массы. В исследуемом случае такими координатами являются скорость валка и упругий момент шпинделя. Преимуществом наблюдателей является возможность построения систем регулирования

без применения дополнительных информационно-измерительных устройств (датчиков, считывающих устройств, средств передачи сигналов) [12, 13].

Анализ литературных источников, посвященных разработке и исследованию наблюдателей динамических процессов в двухмассовых системах, выявил два их существенных недостатка:

1. Значительная часть разработок относится к системам, в которых осуществляется контроль параметров обеих масс, которые являются электрическими машинами [14–17]. Соответственно, ограничение динамических нагрузок осуществляется регулированием координат этих машин. Экспериментальные исследования таких систем выполняются на специальных лабораторных установках с электрическими машинами малой мощности и специальными упругими валами. Очевидно, что такой подход для электроприводов прокатного стана неприемлем.

2. Известные системы управления на основе наблюдателей координат неуправляемой массы по параметрам электропривода сложны и требуют синтеза многомерных регуляторов, которые, по существу, являются вычислителями координат [18–23]. Недостатком таких систем является недостаточное быстродействие при отслеживании режимов ударного изменения нагрузки.

Это потребовало разработки относительно простого наблюдателя упругого момента главной линии клети прокатного стана и замкнутой системы автоматического регулирования координат на его основе (здесь не рассматривается). Критериями создания являются высокое быстродействие при обработке динамического процесса в момент захвата металла валками и возможность реализации алгоритмов в программном обеспечении промышленных контроллеров действующего стана. В системе и наблюдателе не должны применяться сложные алгоритмы регулирования координат, в частности генетические алгоритмы, фильтры Калмана и т.п. [4, 5], поскольку в этом случае не будет обеспечено необходимого быстродействия. Поэтому требованиями, предъявляемыми к создаваемому наблюдателю, являются относительная простота и возможность внедрения в промышленных условиях.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Структура двухмассовой системы

Исследуемая система «электропривод-валок» может быть представлена в виде замкнутой двухконтурной структуры (**рис. 3**). Блоки 3, 5–7 являются типовыми блоками модели двухмассовой системы [10, 24]. Они определяют характер переходных процессов в механической части, в том числе естественное затухание колебаний (блок 7), 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 (**рис. 3**) обозначены: T_μ – некомпенсируемая постоянная времени; J_1, J_2 – моменты инерции 1-й и 2-й масс; C_{12} – коэффициент упругости механической передачи; β – коэффициент, отвечающий за естественное демпфирование (типа вязкого трения); M_1 – момент двигателя; M_{12} – упругий момент шпинделя; ω_1, ω_2 – скорости двигателя и валка (1-й и 2-й масс соответственно).

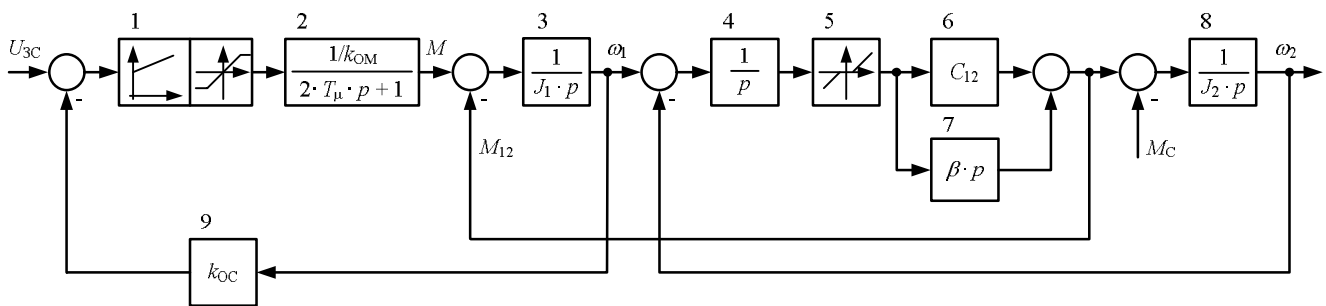


Рис. 3. Структурная схема двухмассовой электромеханической системы

Методика и расчет параметров динамических звеньев модели по данным электрооборудования и осциллограммам, полученным на стане, приведены в работе [25]. Параметры модели, в том числе регуляторов, приведены в табл. 1.

Разработка наблюдателя координат неуправляемой массы

При разработке наблюдателя из структуры, представленной на рис. 3, исключены нелинейный блок 5, моделирующий зазоры, и блоки 1, 8, реализующие контур регулирования скорости [10]. Полученная схема представлена на рис. 4, а.

Матричной структуре (рис. 4, б) соответствует уравнение в пространстве состояний:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} M_1 \\ \omega_1 \\ M_{12} \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 \\ \frac{\beta}{J_1} & C_{12} & -\beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} & -C_{12} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ \omega_1 \\ M_{12} \\ \omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_m K_{OM}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{J_2} \\ 0 & -\frac{1}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{1ref} \\ M_c \end{bmatrix},$$

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

Для нее записаны вектор состояния $X = [M_1, \omega_1, M_{12}, \omega_2]$ и матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 \\ \frac{\beta}{J_1} & C_{12} & -\beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} & -C_{12} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_m K_{OM}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{J_2} \\ 0 & -\frac{1}{J_2} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Соответственно, справедлива система дифференциальных уравнений:

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

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

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

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

На основе этих уравнений разработан наблюдатель упругого момента, скорости 2-й массы и момента нагрузки, структура которого представлена на рис. 5. Схема наблюдателя в пакете *Matlab Simulink* с указанием параметров модели приведена на рис. 5, б (в этой программе для обозначения оператора Лапласа используется символ s).

В соответствии с рис. 4, а необходимо обеспечить восстановление скорости ω_2 при задании момента $U_{3м}$. Для непосредственного измерения доступны момент двигателя M и скорость ω_1 первой массы, возмущающим воздействием является момент нагрузки M_c . Сложность настройки заключается в том, что наблюдатель должен обеспечивать восстановление переходных процессов при изменении статического момента M_c практически скачком. В замкнутой системе регулирования координат неуправляемой массы отработка этого режима без перерегулирования и колебаний требует больших коэффициентов усиления регуляторов (в пределах тысяч – десятков тысяч единиц), что в реальных условиях невозможно. К тому же такая настройка неизбежно приводит к потере устойчивости системы.

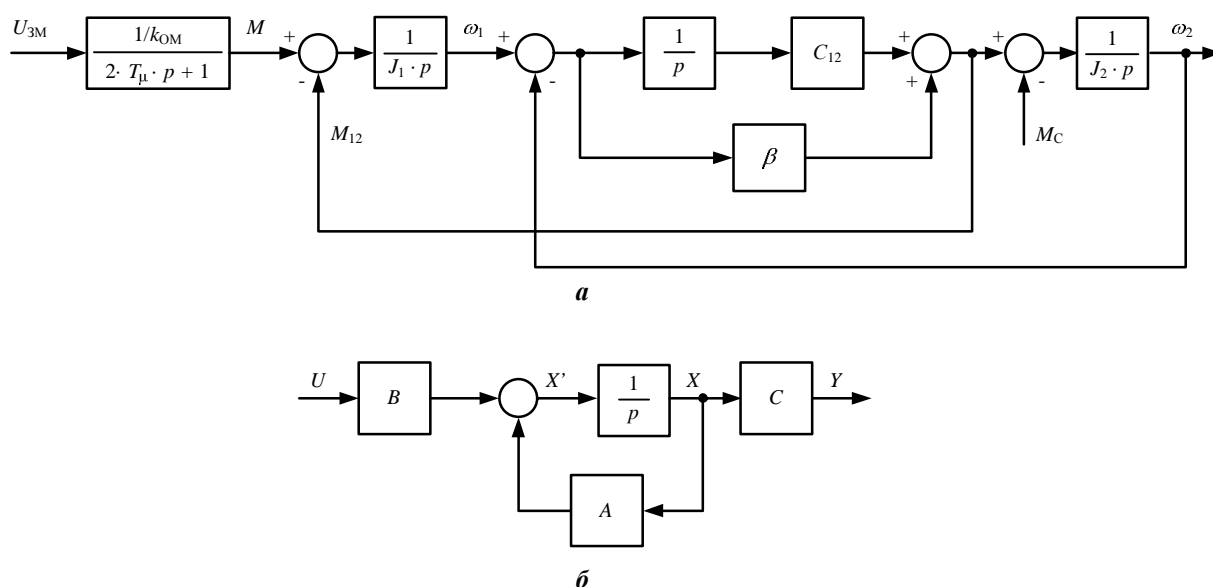


Рис. 4. Представление модели двухмассовой системы для разработки наблюдателя (а) и в матричном виде (б)

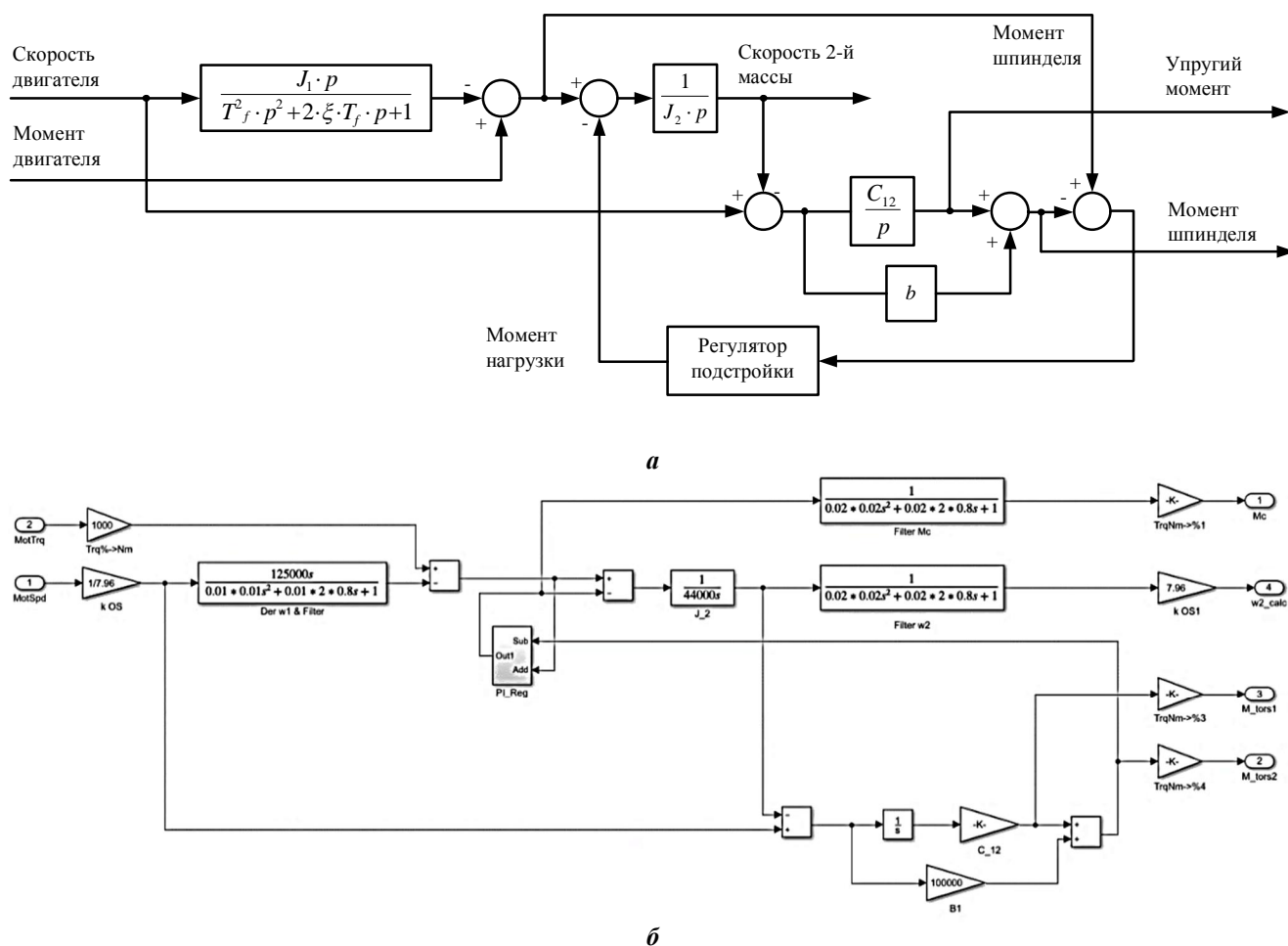


Рис. 5. Структурная схема разработанного наблюдателя (а) и ее реализация в Matlab Simulink (б)

Поэтому при разработке наблюдателя предложен подход, суть которого заключается в подключении в модель, построенную на основе представленных выше уравнений, реальных сигналов скорости и момента двигателя в *on-line*-режиме. Это позволяет выполнить расчет параметров двойника с учетом фактического темпа нарастания момента, который существенно ниже, чем при идеализированном изменении скачком.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Осциллограммы, подтверждающие это утверждение, приведены на **рис. 6**. Показаны реальные сигналы момента нагрузки $M_{ДВ(измер)}$ и скорости $n_{ДВ}$ двигателя, полученные из системы сбора данных *PDA* (*Process data aquisition*), установленной на стане. По ним с использованием наблюдателя восстановлены переходные процессы упругого момента $M_{B(восст)}$ и скорости валка

n_B . Также приведены реальные кривые $M_{B(измер)}$ упругого момента, полученные от датчиков на стане. Их них следует, что сигнал статического момента нарастает за время $\Delta t \approx 0,07$ с. Это облегчает настройку разрабатываемого наблюдателя.

На рис. 6, а переходные процессы упругих моментов, восстановленного $M_{B(восст)}$ и полученного экспериментально $M_{B(измер)}$, совпадают как по характеру, так и по амплитудам. Погрешность не превышает 5%. Кривые скорости проверяются только на модели, т.к. на стане скорость вала не измеряется. Эти зависимости

получены для случая, когда угловые зазоры в шпиндельных соединениях предварительно замкнуты. Поэтому динамический удар, вызванный их замыканием в момент захвата отсутствует (и не вносит погрешности в восстановление момента).

Как будет показано ниже, на реальном объекте принимаются специальные меры, чтобы в момент захвата зазоры были замкнуты. Поэтому модель и объект являются адекватными, и рассматриваемые переходные процессы совпадают.

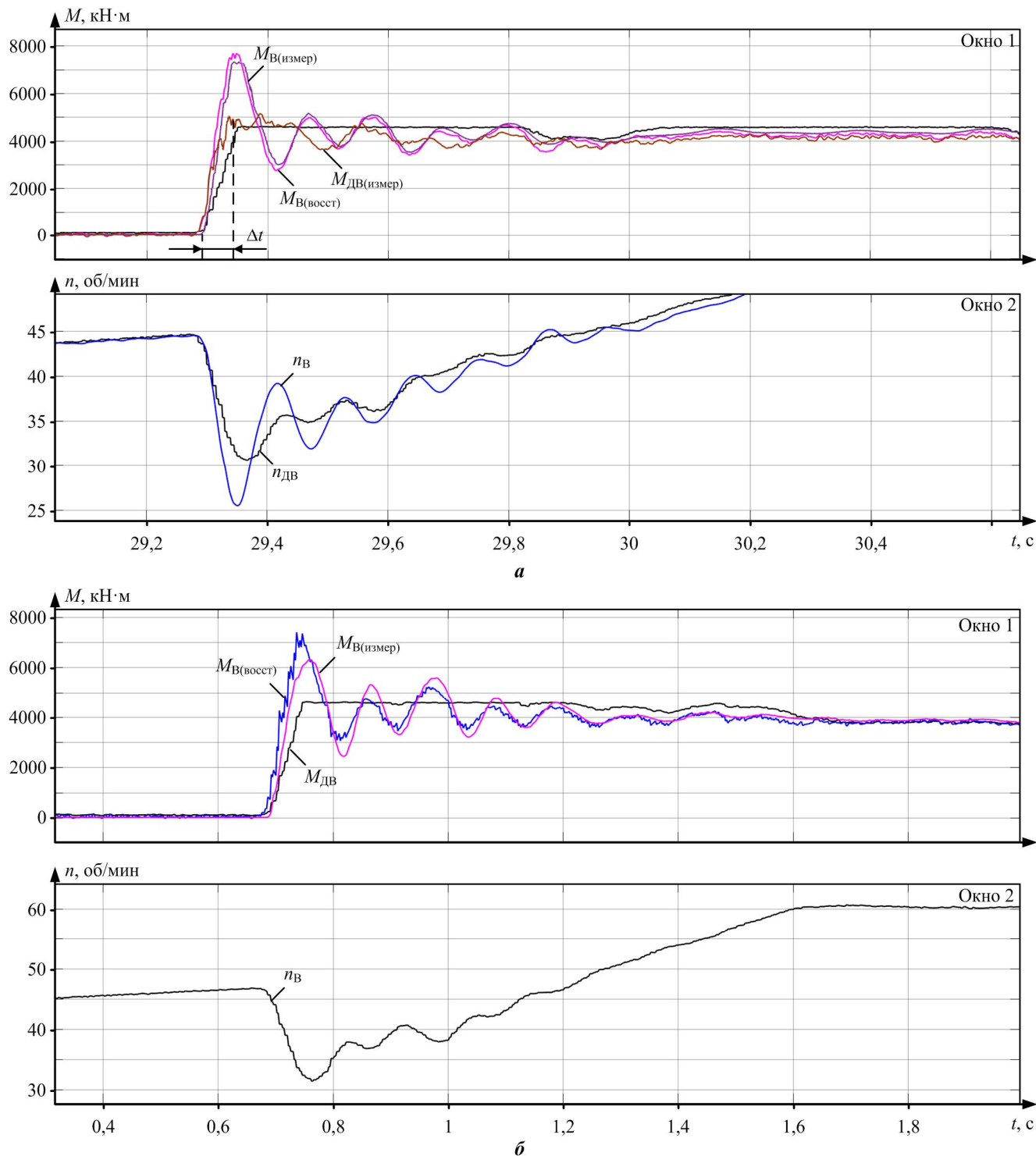


Рис. 6. Переходные процессы измеренных и восстановленных координат при отработке захвата в виртуальной системе (а) и непосредственно на стане (б)

По существу, представленные временные зависимости иллюстрируют подход к настройке цифровых двойников, который применяется при виртуальном вводе систем управления в эксплуатацию [26]. Согласно этому подходу осуществляется отладка алгоритмов управления (в данном случае алгоритма восстановления наблюдаемых сигналов) в пакете *Matlab Simulink*. Это позволяет выполнить отладку наблюдателя с использованием сигналов не из АСУ реального стана, а поступающих от его виртуальной модели (цифрового двойника системы приводов).

Далее отлаженные виртуальные модели наблюдателя были «перенесены» в контроллеры второго уровня АСУ ТП стана. Результаты проверки работы наблюдателя при подключении реальных сигналов приведены на **рис. 6, б**. Сопоставление зависимостей на **рис. 6, а** и **б** позволяет сделать вывод об их идентичности. Принятый подход, согласно которому наблюдатель отлажен на модели, а затем подключен к реальным системам на стане, значительно облегчил его настройку и ввод в работу.

В ходе проведенных экспериментов было получено большое количество осциллограмм захвата металла при полностью открытых угловых зазорах в шпиндельных соединениях. Они аналогичны представленным на **рис. 6, б** и здесь не приводятся. В этом случае возникает дополнительная составляющая динамического момента, вызванная непосредственно ударом при замыкании зазора. За счет этого сигнал упругого момента $M_{B(измер)}$, поступающий от датчика, увеличивается, в то время как характер восстановленного мо-

мента $M_{B(восст)}$ остается прежним. В результате погрешность восстановления возрастает и составляет 8-10%, при этом амплитуда восстановленного момента превышает амплитуду момента на реальной осциллограмме.

Эксперименты, проведенные при прокатке заготовок одного сортамента в одинаковых проходах, позволили сделать вывод, что замыкание зазоров оказывает существенное влияние на динамический момент шпинделя. Поэтому необходимым условием успешного применения систем регулирования координат на основе разработанного наблюдателя является обеспечение замыкания угловых зазоров в шпинделе перед входом металла в клеть.

Обобщенные результаты, полученные при анализе восстановленных зависимостей и экспериментально снятых осциллограмм упругого момента для раскатов различной толщины, представлены на **рис. 7**. Показаны диаграммы амплитудных значений момента на шпинделе при замкнутых и разомкнутых зазорах в соединениях (диаграммы «с зазором» и «без зазора» соответственно). Предварительное замыкание зазора обеспечивалось за счет захвата в режиме ускорения электропривода. Данный режим подробно рассмотрен в публикациях [27–29]. Захват при разомкнутых зазорах обеспечивался путем торможения электропривода, характерные осциллограммы показаны выше, на **рис. 2**. Также на **рис. 7** приведены диаграммы, построенные по осциллограммам, восстановленным с помощью наблюдателя. Результаты обобщения приведены в **табл. 2**.

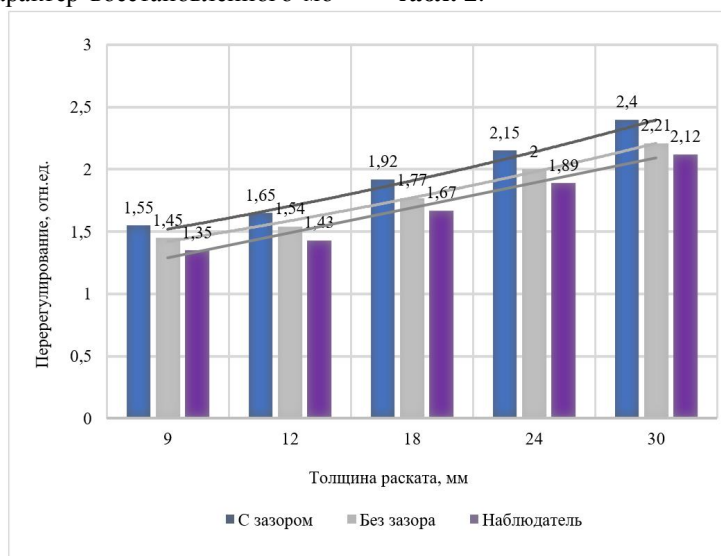


Рис. 7. Диаграммы максимальных значений моментов в режиме захвата, полученные экспериментально и при восстановлении наблюдателем

Таблица 2

Максимальные отклонения момента в режиме захвата

Толщина, мм	Измеренные				Восстановленные				
	M_{\max} (зазор)	M_{\max} (без)	ΔM_{\max} (заз./без)		M_{\max} (восст)	$ \Delta M_{\max} $ (вос./зазор)		$ \Delta M_{\max} $ (вос./без)	
	о.е.	о.е.	о.е.	%	о.е.	о.е.	%	о.е.	%
9	1,55	1,45	0,1	6,9	1,35	0,2	13,8	0,1	6,9
12	1,65	1,54	0,11	7,1	1,43	0,22	14,3	0,11	7,1
18	1,92	1,77	0,15	8,5	1,67	0,25	14,1	0,1	5,6
24	2,15	2	0,15	7,5	1,89	0,26	12,1	0,11	5,5
30	2,4	2,21	0,19	8,6	2,12	0,28	11,7	0,09	4,1

Анализ представленных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. С увеличением толщины раската перерегулирование момента увеличивается. Так, при толщине 9 мм, т.е. в последних проходах, амплитуда при захвате «без зазора» составляет 35%, а «с зазором» – 45%. При толщине 30 мм (в первых проходах) – 240 и 212% соответственно.

2. Влияние составляющей момента, обусловленной непосредственно ударом при замыкании зазора, относительно невелико – 6,9% при толщине 9 мм (разница амплитуд 1,55 и 1,45 о.е.) и 8,6% при толщине раската 30 мм (соответственно 2,4 и 2,21 о.е.). Это косвенно подтверждает, что максимальное влияние на перерегулирование момента оказывает «упругая» составляющая момента [30].

3. Относительная разница реально измеренных и восстановленных значений с увеличением толщины уменьшается. Так, при толщине 9 мм она составляет 6,9%, при толщине 18 мм – 5,6%, а при 30 мм – 4,1% (дать однозначное объяснение этому выводу сложно).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленный наблюдатель служит основой для разработки замкнутых систем регулирования координат второй массы двухмассовой системы прокатного стана. В настоящее время выполняется разработка САР, теоретические основы которых рассмотрены в работах А.Р. Колганова [18, 31, 32]. К таким системам относятся:

1. Замкнутая двухконтурная САР скорости валка и упругого момента шпинделя с наблюдателем координат и регулятором состояния. Она обеспечивает лучшие показатели в системах с жесткой механикой. Недостатком является сложность настройки вычислителя регулируемых координат.

2. Трехконтурная система регулирования скорости валка с подчиненными контурами регулирования упругого момента и скорости двигателя. Ее преимуществом является возможность ограничения сигналов на входах регуляторов внутренних контуров. Недостатком является то, что введение дополнительного (в данном случае третьего) контура в 2 либо в 4 раза снизит быстродействие замкнутой системы по каналу регулирования возмущения [33].

Очевидно, что каждая из этих систем и каждый из названных принципов имеют право на развитие. Однако в многомассовых системах с зазорами лучшие динамические свойства обеспечивает система с регулятором состояния. По этому принципу могут быть построены замкнутые системы с ограничителями выходов регуляторов и более сложные системы с переключающимися структурами [31].

Предложенный алгоритм настройки наблюдателя является конкретным примером применения цифровых двойников для виртуального ввода систем управления электроприводами в эксплуатацию. Данное направление подробно рассмотрено в публикации [26] и названо перспективным для создания и совершенствования электротехнических и мехатронных систем прокатных станов. Там же обоснована методика, согласно которой выполняется настройка систем и алгоритмов управления с помощью моделей в среде виртуального модели-

рования *Matlab Simulink*. Далее структуры моделей «переносятся» из пакета Simulink в программу промышленных контроллеров, осуществляющих управление объектом.

Цифровые двойники, создаваемые для виртуального ввода в эксплуатацию, должны решать в реальном времени уравнения объекта управления с необходимой точностью. Этому требованию соответствует разработанный наблюдатель координат двухмассовой системы. Временные зависимости, представленные на рис. 7, подтверждают, что он обеспечивает удовлетворительную точность восстановления параметров и может быть применен при разработке замкнутых САР упругого момента на шпинделе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный наблюдатель обеспечивает достоверное восстановление момента упругого вала и скорости неуправляемой массы двухмассовой электромеханической системы. В настоящее время алгоритм наблюдателя исполнен в программном обеспечении контроллеров электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 и находится в работе. Проводится длительный пассивный эксперимент, целями которого являются анализ влияния неучтенных факторов и оценка возможных рисков. По итогам будет принято решение об исследовании и реализации вышеуказанных замкнутых систем ограничения динамического момента на стане.

Представленные разработки выполнены на примере электропривода реверсивной клетки стана 5000. Они могут быть применены на других агрегатах, электроприводы которых работают с ударным приложением нагрузки. К ним относятся станы горячей прокатки и черновые группы клетей 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М.: ЭФО, 2015. 61 с.
2. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Iss. 11. Pp. 1016-1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Setting automated roll axial shifting control system of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, A.A. Radionov,

- V.R. Gasiyarov // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. Pp. 1753-1750. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.709.
7. Force limiting at roll axial shifting of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Gasiyarov, V.R. Khrumshin // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. Pp. 1780-1786. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
8. 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.
9. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khrumshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2018. Т. 18. № 1. С. 101-111. doi: 10.14529/power180109.
10. Гасияров В.Р. Совершенствование электротехнических систем реверсивной клетки толстолистного прокатного стана: дис. ... докт. техн. наук / Гасияров Вадим Рашитович. Челябинск: ЮУрГУ, 2021. 358 с.
11. Крот П.В. Телеметрические системы мониторинга динамических нагрузок в линиях привода прокатных станов // *Вибрация машин: измерение, снижение, защита: научно-технический и производственный сборник статей*. Донецк: ДонНТУ, 2008. Вып. 1. С. 46-53.
12. 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, V.R. Khrumshin, B.M. Loginov // *2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon)*. 2017. Pp. 450-455. doi: 10.1109/URALCON.2017.8120750.
13. Krot P.V. Nonlinear vibrations and backlashes diagnostics in the rolling mills drive trains // *Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC)*. 2008. doi: 10.13140/2.1.3353.1840.
14. Hori Yo., Sawada H., Chun Y. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1999. Vol. 46. Iss. 1. Pp. 162-168. doi: 10.1109/41.744407.
15. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Influence of control structures and load parameters on performance of a pseudo direct drive // *Machines*. 2014. No. 2. Pp. 158-175. doi: 10.3390/machines2030158.
16. Szabat K., Orlowska-Kowalska T. adaptive control of the electrical drives with the elastic coupling using Kalman filter // *Open access peer-reviewed chapter*, 2009. doi: 10.5772/6507.
17. Orlowska-Kowalska T., Kaminski M., Szabat K. Implementation of a sliding-mode controller with an integral function and fuzzy gain value for the electrical drive with an elastic joint // *Industrial Electronics IEEE Transactions on*. 2010. Vol. 57. No. 4. Pp. 1309-1317. doi: 10.1109/TIE.2009.2030823.
18. Лебедев С.К., Колганов А.Р., Гнездов Н.Е. Электромехатронные системы позиционирования с наблюдателями нагрузки: монография. Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. 340 с.
19. Лебедев С.К., Колганов А.Р., Гнездов Н.Е. Выбор модели динамики для систем векторного управления электроприводами переменного тока // *Электроприводы переменного тока: труды XVI междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»*. 2015. С. 103-106.
20. Szabat K., Orlowska-Kowalska T. Performance improvement of industrial drives with mechanical elasticity using nonlinear adaptive Kalman filter // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55. Iss. 3. Pp. 1075-1084. doi: 10.1109/TIE.2008.917081.
21. Cychowski M., Orlowska-Kowalska T. Constrained model predictive control of the drive system with mechanical elasticity // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 56. Iss. 6. Pp. 1963-1973. doi: 10.1109/TIE.2009.2015753.
22. Orlowska-Kowalska T., Dybkowski M., Szabat K. Adaptive sliding-mode neuro-fuzzy control of the two-mass induction motor drive without mechanical sensors // *Industrial Electronics IEEE Transactions on*. 2010. Vol. 57. Iss. 2. Pp. 553-564. doi: 10.1109/TIE.2009.2036023.
23. Thomsen S., Hoffmann N., Wilhelm F. Fuchs PI control, PI-based state space control and model-based predictive control for drive systems with elastically coupled loads – a comparative study // *Industrial Electronics IEEE Transactions on*. 2011. Vol. 58. Iss. 8. Pp. 3647-3657. doi: 10.1109/TIE.2010.2089950.
24. Машины и агрегаты металлургических заводов. Машины и агрегаты для производства проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник, Ф.К. Иванченко. М.: Металлургия, 1988. Т. 3. 680 с.
25. Calculating simulation model parameters for electromechanical system of rolling mill stand / A.S. Karandaev, S.N. Baskov, O.A. Gasiyarova, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin // *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con)*. 2020. Pp. 469-474. doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216265.
26. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2021. Т. 64. № 1. С. 54-68. doi:10.17213/0136-3360-2021-1-54-68.
27. 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.
28. Use of automated electric drives for limiting dynamic loads in shaft lines of roll mill stands / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin // *Journal of Engineering*. 2019. Iss. 17. Pp. 3578-3581. doi: 10.1049/joe.2018.8135.
29. Гасияров В.Р. Способ ограничения динамических нагрузок мехатронных систем клетки толстолистного прокатного стана // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Машиностроение*. 2019. Т. 19. № 2. С. 5-18.
30. 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, T.A. Lisovskaya, O.A. Gasiyarova // *Machines*. 2019. No. 7(4). 76. doi: 10.3390/machines7040076.
31. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Электромехатронные системы. Современные методы управления, реализации и применения: учебное пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 256 с.
32. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Современные методы управления в электромехатронных системах. Разработка, реализация, применение. Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2012. 256 с.
33. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 760 с.

Поступила в редакцию 30 марта 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DIGITAL CONTROLLER FOR ELASTIC MODULUS OF AN ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF A ROLLING MILL STAND

Andrey A. Radionov

D.Sc. (Engineering), Professor, Vice-Rector, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: radionovaa@susu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3914-4429>

Vadim R. Gasiyarov

Ph.D. (Engineering), Head of the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>.

Boris M. Loginov

Senior Maintenance and Test Engineer, Central Electric Laboratory, PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works", Magnitogorsk, Russia. E-mail: lb18@yandex.ru.

Ekaterina A. Gartlib

Senior Lecturer of the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gartlibea@susu.ru.

Olga A. Gasiyarova

Junior Researcher, Senior Lecturer of the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gasiariovaao@susu.ru.

The paper is concerned with the justification of the task of a controller development for elastic modulus of the driver shaft (spindle) and the roll speed of the electromechanical system of a plate mill stand. The structure of the main line of the horizontal stand at the 5000 plate mill, PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Plant" (PJSC "MMK"), was considered. Oscillograph records are shown, which confirm the oscillating character of the elastic modulus on the spindle at the moment of gripping the metal by the rolls. It is shown that its amplitude is several times higher than the steady rolling torque. The model of a double-mass electromechanical system with an elastic coupling and an angular joint gap is analyzed. The recorded state-space equations are used to develop the controller of the second mass (roll) position and the elastic spindle torque by the following parameters of the first mass: the electric drive motor torque and velocity. The structure of the controller was presented, the main problem of adjustment is to provide the high rate of response to restore the transient processes in impact load mode. It was noted that the well-known controllers, which are coordinate calculators with complex algorithms, are not able to provide the necessary fast response. A new approach was proposed, the main idea of this approach is to simulate the processes using a model with further direct adjustment on the site. The research group carried out the analysis of transient processes of restored coordinates of the double-mass system during metal gripping by the rolls. The results were compared with the experimental oscillograph records obtained on the mill. The agreement of the processes with reasonable accuracy was confirmed. The paper presents the integrated results obtained in the process of analysis of the restored relationships and experimental oscillograph records of the elastic modulus in the process of rolling of slabs of various thickness. A conclusion was made about the significant influence of the slab thickness and the component defined by the elastic properties of the spindle on the torque amplitude on the spindle. It was recommended to apply the developed controller in closed-loop control systems of elastic modulus. It was noted that the necessary condition of effective operation of such systems provision of metal gripping at preset closed angular gaps.

Keywords: rolling mill, electromechanical system, double-mass model, coordinates, controller, dynamic processes, restoration, oscillograph records, analysis, recommendations.

REFERENCES

1. Kalachev Yu.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektropivode* [State controllers in vector electric drive]. Moscow, EFO Publ., 2015. 61 p. (In Russian)
2. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Iss. 11. Pp. 1016-1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
3. 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. IEEE, 1996. Vol. 43. No. 2. Pp. 56-64. doi: 10.1109/41.481408.
4. 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.
5. 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.
6. Karandaev A.S., Loginov B.M., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Setting automated roll axial shifting control system of plate mill. Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 1753-1750. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.709.
7. Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Khrumshin V.R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill. Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 1780-1786. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
8. Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Justification of methods of dynamic load limitation in electromechanical systems of a rolling mill stand. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 14-25. doi: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25. (In Russian)
9. Khrumshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Baskov S.N., Loginov B.M. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series "Power engineering"], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 101-111. doi: 10.14529/power180109.

10. Gasiyarov V.R. *Sovershenstvovanie elektrotekhnicheskikh system reversivnoy kleti tololistovogo prokatnogo stana. Diss. Dokt. Tekhn. Nauk.* [Improvement of electrotechnical systems of plate mill reverse stand. D.Sc. Diss.]. Chelyabinsk, 2021. 358 p. (In Russian)
11. Krot P.V. Telemetric systems of dynamic load monitoring in rolling mill drives. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita: nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi sbornik statey* [Machine vibration: measuring, reduction, protection: scientific, technical and industrial collection of scientific papers]. Donetsk, DonNTU Publ., 2008. Iss. 1, pp. 46-53. (In Russian)
12. 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. 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon). IEEE, 2017. Pp. 450-455. doi: 10.1109/URALCON.2017.8120750.
13. Krot P.V. Nonlinear vibrations and backlashes diagnostics in the rolling mills drive trains. Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC). 2008. doi: 10.13140/2.1.3353.1840.
14. Hori Yo., Sawada H., Chun Y. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system. IEEE Transactions on Industrial Electronics. IEEE, 1999. Vol. 46. Iss. 1. Pp. 162-168. doi: 10.1109/41.744407.
15. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Influence of control structures and load parameters on performance of a pseudo direct drive. Machines. 2014. No. 2. Pp. 158-175. doi: 10.3390/machines2030158.
16. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. adaptive control of the electrical drives with the elastic coupling using Kalman filter. Open access peer-reviewed chapter, 2009. doi: 10.5772/6507.
17. Orłowska-Kowalska T., Kaminski M., Szabat K. Implementation of a sliding-mode controller with an integral function and fuzzy gain value for the electrical drive with an elastic joint. Industrial Electronics IEEE Transactions on. 2010. Vol. 57. No. 4. Pp. 1309-1317. doi: 10.1109/TIE.2009.2030823.
18. Lebedev S.K., Kolganov A.R., Gnezdov N.E. *Elektromekhatronnye sistemy pozitsionirovaniya s nablyudatelyami nagruzki* [Electrical and mechatronic positioning systems with load controllers]. Ivanovo, FGBOU VPO "Ivanovo V.I. Lenin State Power University" Publ., 2016. 340 p.
19. Lebedev S.K., Kolganov A.R., Gnezdov N.E. Selection of dynamic model for vector control systems of alternating current drives. *Elektroprivody peremennogo toka: trudy XVI mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf.* [Alternating current drives: collection of scientific papers of XVI international scientific and technical conference]. Yekaterinburg, FGAOU VPO "UrFU named after the first President of Russia B.N.Yeltsin" Publ., 2015, pp. 103-106. (In Russian)
20. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Performance improvement of industrial drives with mechanical elasticity using nonlinear adaptive Kalman filter. Industrial Electronics IEEE Transactions on. 2008. Vol. 55. Iss. 3. Pp. 1075-1084. doi: 10.1109/TIE.2008.917081.
21. Cychowski M., Orłowska-Kowalska T. Constrained model predictive control of the drive system with mechanical elasticity // Industrial Electronics IEEE Transactions on. 2009. Vol. 56. Iss. 6. Pp. 1963-1973. doi: 10.1109/TIE.2009.2015753.
22. Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M., Szabat K. Adaptive sliding-mode neuro-fuzzy control of the two-mass induction motor drive without mechanical sensors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. Iss. 2. Pp. 553-564. doi: 10.1109/TIE.2009.2036023.
23. Thomsen S., Hoffmann N., Wilhelm F. Fuchs PI control, PI-based state space control and model-based predictive control for drive systems with elastically coupled loads – a comparative study. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58. Iss. 8. Pp. 3647-3657. doi: 10.1109/TIE.2010.2089950.
24. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M., Ivanchenko F.K. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. Mashiny i agregaty dlya proizvodstva prokata* [Machines and equipment of metallurgical plants. Machines and equipment for rolling]. Moscow, Metallurgy Publ., 1988. vol. 3, 680 p. (In Russian)
25. Karandaev A.S., Baskov S.N., Gasiyarova O.A., Loginov B.M., Khramshin V.R. Calculating simulation model parameters for electromechanical system of rolling mill stand. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con). IEEE, 2020. Pp. 469-474. doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216265.
26. Radionov A.A., Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarova O.A. Conceptual trends in development of digital twins of electrotechnical systems of rolling equipment. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. [Proceedings of Universities. Electrical engineering], 2021, vol. 64, no. 1, pp. 54-68. doi: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68. (In Russian)
27. Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Justification of methods of dynamic load limiting for electromechanical systems of a rolling mill stand. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2018, no. 1(38), pp. 14-25. doi: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25. (In Russian)
28. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Use of automated electric drives for limiting dynamic loads in shaft lines of roll mill stands. Journal of Engineering. 2019. Iss. 17. Pp. 3578-3581. doi: 10.1049/joe.2018.8135.
29. Gasiyarov V.R. The method of dynamic load limiting for mechatronic systems of a plate rolling mill stand. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South-Ural State University. Series "Machine-building"], 2019, vol. 19, no. 2, pp. 5-18. (In Russian)
30. 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. 7(4). 76. doi: 10.3390/machines7040076.
31. Kolganov A.R., Lebedev S.K., Gnezdov N.E. *Elektromekhatronnye sistemy. Sovremennyye metody upravleniya, realizatsii i primeneniya: uchebnoe gosobie* [Electromechatronic systems. Modern methods of control, implementation and application: study guide]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2019. 256 p. (In Russian)
32. Kolganov A.R., Lebedev S.K., Gnezdov N.E. *Sovremennyye metody upravleniya v elektromekhatronnykh sistemakh. Razrabotka, realizatsiya, primeneniye*. [Modern control methods in electromechatronic systems. Development, implementation, application]. Ivanovo, FGBOU VPO "Ivanovo V.I. Lenin State Power University" Publ., 2012. 256 p. (In Russian)
33. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 760 p. (In Russian)

Разработка цифрового наблюдателя упругого момента электромеханической системы клетки прокатного стана / А.А. Радионов, Р.В. Гасияров, Б.М. Логинов, Е.А. Гартлиб, О.А. Гасиярова // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 19-29. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-19-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29)

Radionov A.A., Gasiyarov V.R., 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* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 19-29. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-19-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29)