

ОГРАНИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА ЗА СЧЕТ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАЗОРА ВАЛКОВ

В.Р. Гасияров^{1,2}, С.Н. Басков¹, С.С. Воронин¹, К.Э. Одинцов²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

Отмечено расширение сортамента прокатных станов за счет производства листового проката из труднодеформируемых марок стали. Обоснована актуальность разработки способов снижения динамических нагрузок электромеханических систем реверсивной клетки толстолистового стана при захвате металла валками. Показано, что в системе управления электроприводами горизонтальных валков стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») отсутствуют технические решения, обеспечивающие снижение динамического момента и отклонений скорости при ударном приложении нагрузки. Представлены осциллограммы, подтверждающие неудовлетворительный характер переходных процессов при прокатке листов из труднодеформируемых сталей. Обоснована разработка способа ограничения момента за счет увеличения межвалкового зазора перед захватом металла с последующим возвращением валков в заданную позицию. Представлена схема системы регулирования, реализующая предложенный способ. Рассмотрена структура математической модели мехатронной системы прокатной клетки, включающая модели электропривода горизонтальных валков и гидравлического привода нажимных устройств (НУ), взаимосвязанных через металл. Приведены математические зависимости, описывающие переходные процессы гидравлического НУ и изменение давления и момента при деформации. Выполнено моделирование динамического режима захвата заготовки с одновременным изменением зазора при различных темпах перемещения НУ. В результате подтверждена целесообразность внедрения алгоритма, реализующего предложенный способ, в АСУ ТП стана 5000. Представлены осциллограммы, полученные в режиме захвата заготовки при существующем и разработанном алгоритмах управления. Подтверждено улучшение динамических показателей скорости и момента. Отмечена целесообразность проведения исследований с целью оценки эффективности внедрения разработанного способа в электромеханических системах клеток широкополосных и сортовых прокатных станов.

Ключевые слова: толстолистовой прокатный стан, реверсивная клетка, электропривод, динамические нагрузки, ограничение, гидравлическое нажимное устройство, зазор валков, регулирование, способ, математическое моделирование, экспериментальные исследования, опытно-промышленная эксплуатация, внедрение.

Введение

Проблема ограничения динамических нагрузок, возникающих в электромеханических системах клеток прокатных станов в момент захвата заготовки (полосы либо листа) валками, приобретает особую актуальность в связи с расширением сортамента продукции металлургических предприятий. В условиях растущего спроса на трубы большого диаметра увеличивается производство листового проката из труднодеформируемых марок стали на толстолистовых станах [1, 2]. Прокатка толстых листов из специальных сталей сопровождается увеличением как статического момента в установившемся режиме, так и динамической составляющей при ударном приложении нагрузки.

Физические процессы при заполнении очага деформации в момент входа заготовки в клетку исследовались многими авторами. Изучению условий захвата проката при высоких очагах деформации посвящены труды известных отечественных ученых А.И. Целикова [3], И.М. Павлова [4],

В.И. Выдрина [5], А.А. Радионова [6, 7] и других. В научных публикациях [8–11] представлены разработки, направленные на ограничение динамических нагрузок электромеханических систем широкополосных станов горячей прокатки. Усовершенствованные алгоритмы управления, обеспечивающие снижение динамических нагрузок электроприводов вертикальных валков универсальных клеток, прошли промышленные испытания на широкополосном стане 2000 ПАО «ММК» [12–14] и рекомендуются для внедрения на других прокатных станах. Однако проблема ограничения упругих моментов в валопроводах горизонтальных валков остается нерешенной.

Названная проблема актуальна для стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000), главным технологическим устройством которого является прокатная клетка «кварто», обеспечивающая усилие прокатки до 12000 т. Она является самой мощной среди мировых аналогов и предназначена для прокатки листов по продольно-поперечной схеме с разбивкой ширины.

Конструкция клетки поясняется кинематической схемой, представленной на рис. 1 [15]. Клеть оснащена двумя опорными и двумя рабочими валками, очаг деформации регулируется сверху электромеханическими нажимными устройствами и снизу – гидравлическими НУ. Привод каждого рабочего валка осуществляется синхронным двигателем через универсальные шпиндели.

Структурная схема системы задания и регулирования скоростей двигателей М1, М2 электроприводов верхнего и нижнего валков показана на рис. 2. Траектория прохода формируется программой модели 2-го уровня АСУ ТП по критериям производительности стана и получения нужного температурного режима. При формировании задания на скорость в автоматическом режиме из модели прокатки в контроллер уровня 1 поступает

таблица из точек желаемой траектории движения. Задатчик интенсивности (ЗИ) служит для аварийного ограничения темпа задания.

В представленной системе управления не предусмотрены какие-либо алгоритмы, ограничивающие перерегулирование момента и динамические отклонения скорости при ударном приложении нагрузки. Динамические нагрузки, возникающие в момент захвата металла валками, приводят к ударам в передачах от двигателя к валку, износу и преждевременному выходу из строя электрического и механического оборудования. Также повышается вероятность возникновения аварий, наиболее опасной из которых является поломка шпиндельных соединений. Это предопределило разработку способов управления электромеханическими системами стана 5000, обеспечивающих устранение указанных недостатков.

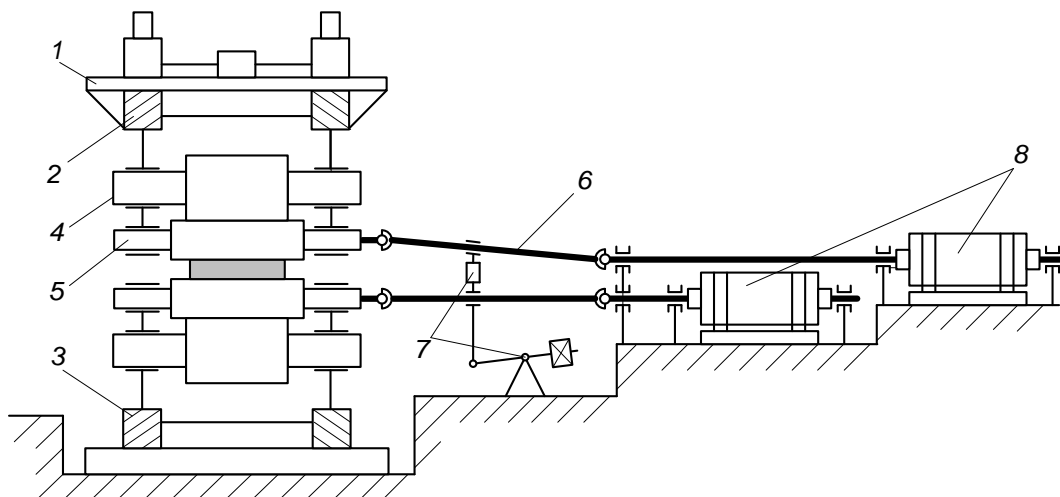


Рис. 1. Кинематическая схема реверсивной клетки стана 5000: 1 – станина; 2 – электромеханическое НУ; 3 – гидравлическое НУ; 4 – опорные валки; 5 – рабочие валки; 6 – выдвигаемые шпиндели; 7 – уравнивающее устройство; 8 – двигатели

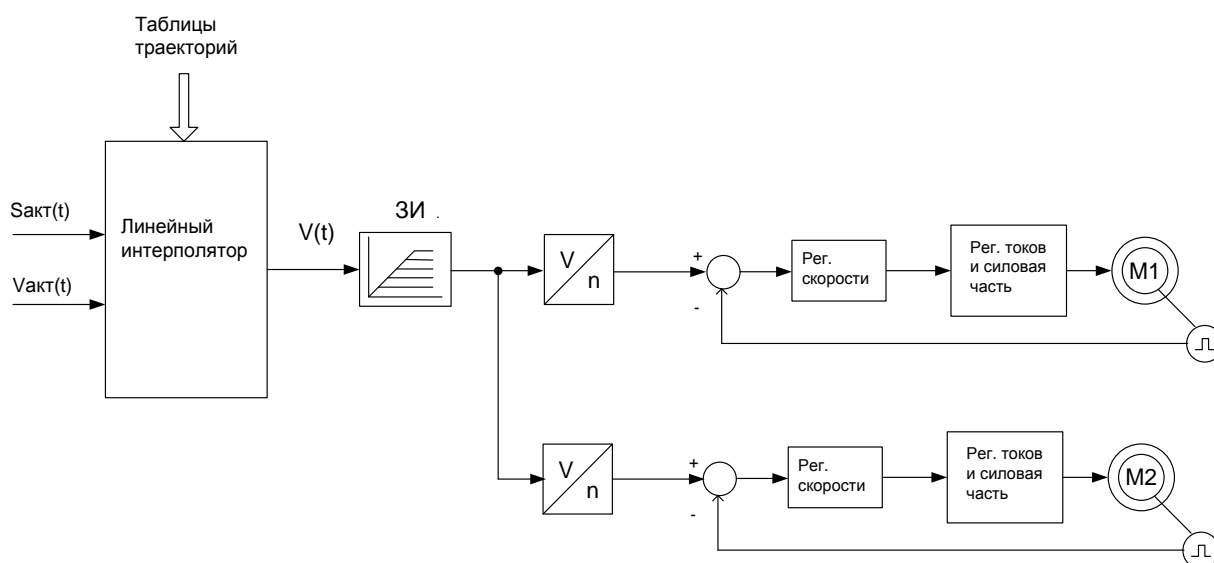


Рис. 2. Схема системы управления скоростью электроприводов горизонтальных валков клетки стана 5000

Постановка задачи

Как показали экспериментальные исследования, проведенные на стане, прокатка листов из специальных марок стали осуществляется с нагрузками, значительно превышающими номинальные [16]. При этом моменты двигателей верхнего и нижнего валков могут достигать 150–200 % номинального значения. Очевидно, что динамические увеличения момента, возникающие при входе заготовки в клеть, в таких случаях превышают номинальный момент в 2–2,5 раза. В подтверждение сказанному на рис. 3 показаны осциллограммы скоростей, моментов и усилий прокатки при захвате листа «тяжелого» сортамента при существующей настройке электропривода. Их анализ подтверждает, что в электромеханических системах возникают значительные колебания скорости и момента. Просадка скорости электропривода нижнего валка составляет 27 % (от 48 до 35 об/мин). Амплитуду динамического момента определить нельзя, так как момент превышает уровень ограничения 240 %.

В представленном случае происходит кратковременное размыкание контура регулирования скорости электропривода вследствие ограничения сигнала регулятора скорости (см. рис. 2). Это подтверждается наличием «плоских» горизонтальных участков на осциллограмме момента электропривода нижнего валка. В таком режиме электропривод становится неуправляемым, переходный процесс затягивается и сопровождается колебаниями.

Приведенный пример подтверждает актуальность разработки способов и алгоритмов управления электро- и гидроприводами реверсивной клетки стана 5000, обеспечивающих ограничение динамических нагрузок при захвате металла.

В результате проведенных исследований выявлены основные факторы, влияющие на амплитуду динамических нагрузок:

1. Ударные моменты, связанные с выбором зазоров в шпиндельных соединениях. Они не могут контролироваться, но могут быть устранены средствами электропривода.

2. Несогласованность скорости входа заготовки в клеть и линейной скорости вращения валков.

3. Неудовлетворительные условия захвата, связанные с тем, что зазор валков изначально устанавливается равным заданной толщине металла после прохода.

Следует отметить, что устранение первых двух причин обеспечивается за счет захвата заготовки в режиме ускорения электропривода [17]. В то же время изучению вопросов влияния межвалкового зазора на динамические нагрузки электромеханических систем уделяется недостаточно внимания. Предварительные исследования показали, что имеется возможность ограничения нагрузок в результате кратковременного увеличения зазора валков перед захватом заготовки [18].

В связи с изложенным, поставлена задача разработки способа управления, который обеспечит ограничение динамических моментов в валопроводе

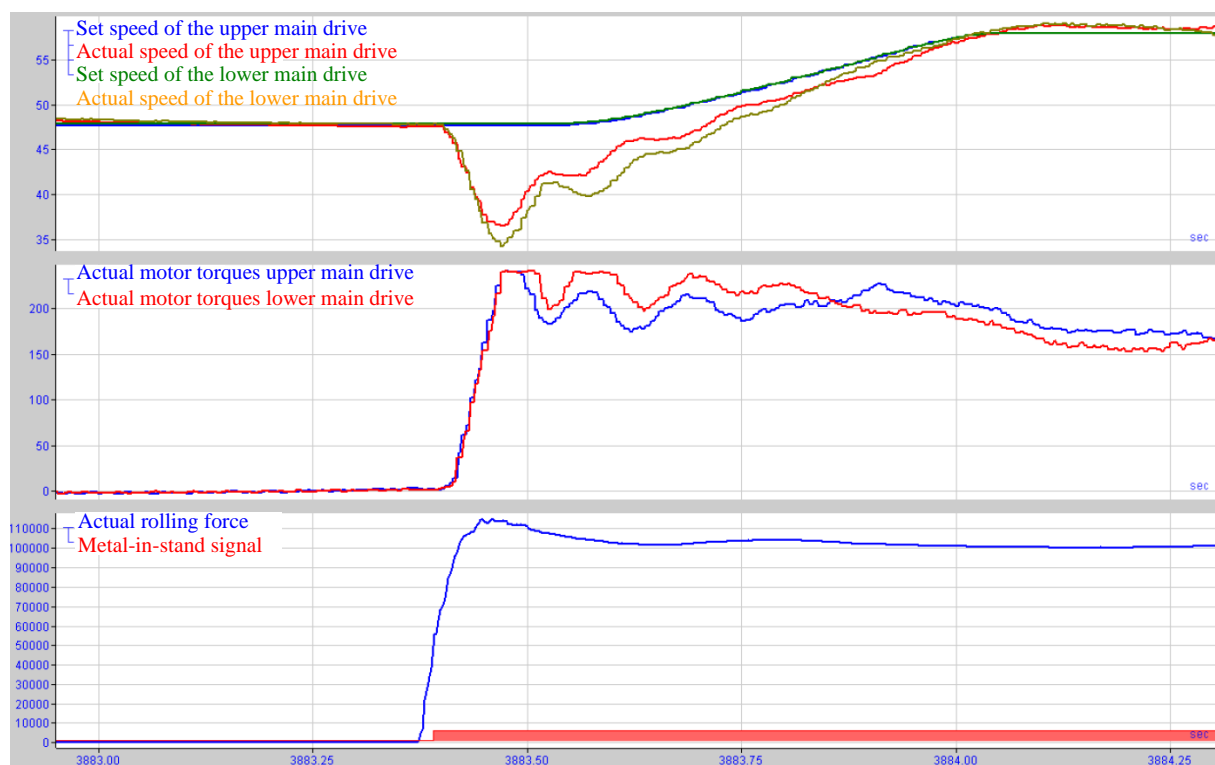


Рис. 3. Переходные процессы скорости и момента в режиме захвата заготовки «тяжелого» сортамента

водах горизонтальной клетки путем увеличения зазора валков перед захватом заготовки с последующим возвращением валков в заданную позицию. В представленной публикации рассматривается ее решение применительно к реверсивной клетке стана 5000. В качестве методов использованы математическое моделирование и экспериментальные исследования.

Основная часть

Суть разработанного способа управления заключается в следующем. Перед захватом заготовки рабочие валки вращаются с линейной скоростью, горизонтальная составляющая которой равна скорости ее движения на рольганге. При этом очаг деформации в вертикальном направлении устанавливается равным толщине головной части проката на входе в клетку. Через заданное время после захвата межвалковый зазор уменьшается до величины, обеспечивающей заданную толщину проката после прохода. Одновременно с этим увеличивается окружная скорость валков пропорционально скорости перемещения нажимных устройств.

Как следует из представленного описания, данный алгоритм достаточно близок к алгоритму формирования переменной толщины по длине полосы (профиля «собачья кость»), который применяется на современных толстолистовых прокатных станах [19].

Для реализации алгоритма управления, реализующего предложенный способ, разработана функциональная схема, показанная на рис. 4.

В данной структуре логика управления, наряду с реализацией рассмотренного алгоритма, запрещает работу регулятора толщины пока головная часть заготовки не пройдет заданное расстояние в валках. Дополнительно отключается предва-

рительная компенсация растяжения клетки. Затем происходит активация регулятора толщины и за счет этого – введение сигнала компенсации растяжения клетки.

Структура математической модели

С целью исследования предложенного способа управления разработана динамическая математическая модель мехатронной системы «электропривод клетки – гидравлическое НУ в структуре САРТ». За основу приняты ранее выполненные разработки, рассмотренные в [7, 20, 21]. Она содержит модели следующих объектов:

- двухмассовой электромеханической системы линии главного электропривода;
- гидравлического нажимного устройства;
- системы автоматического регулирования (САР) положения НУ с пропорциональным регулятором положения;
- системы автоматического регулирования толщины (САРТ) на основе уравнений Головина – Симса;
- металла в очаге деформации (модель взаимосвязи электро- и гидропривода через металл).

Подробно каждая из этих моделей рассмотрена в [22]. Они сформированы в единую комплексную структуру, приведенную на рис. 5.

Как следует из рис. 1, электропривод каждого валка выполнен индивидуальным. В механических соединениях отсутствуют устройства, обладающие инерцией (массой), соизмеримой с инерцией двигателя и приведенной инерцией рабочих и опорных валков. Поэтому исследуемая электромеханическая система на рис. 5 принята двухмассовой с упругой связью и зазором в механических соединениях. Блоки 1, 4, 5 являются стандартными блоками двухмассовой модели [15]. Блок 2 определяет характер переходных процессов в механической

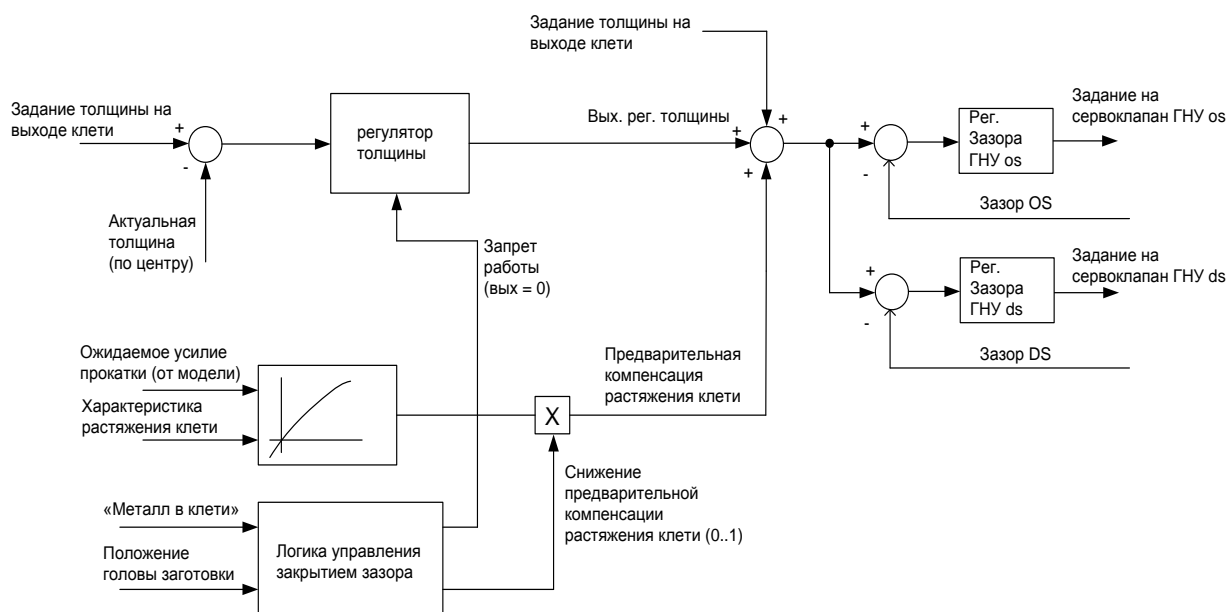


Рис. 4. Функциональная схема системы регулирования зазора валков при входе металла в клетку

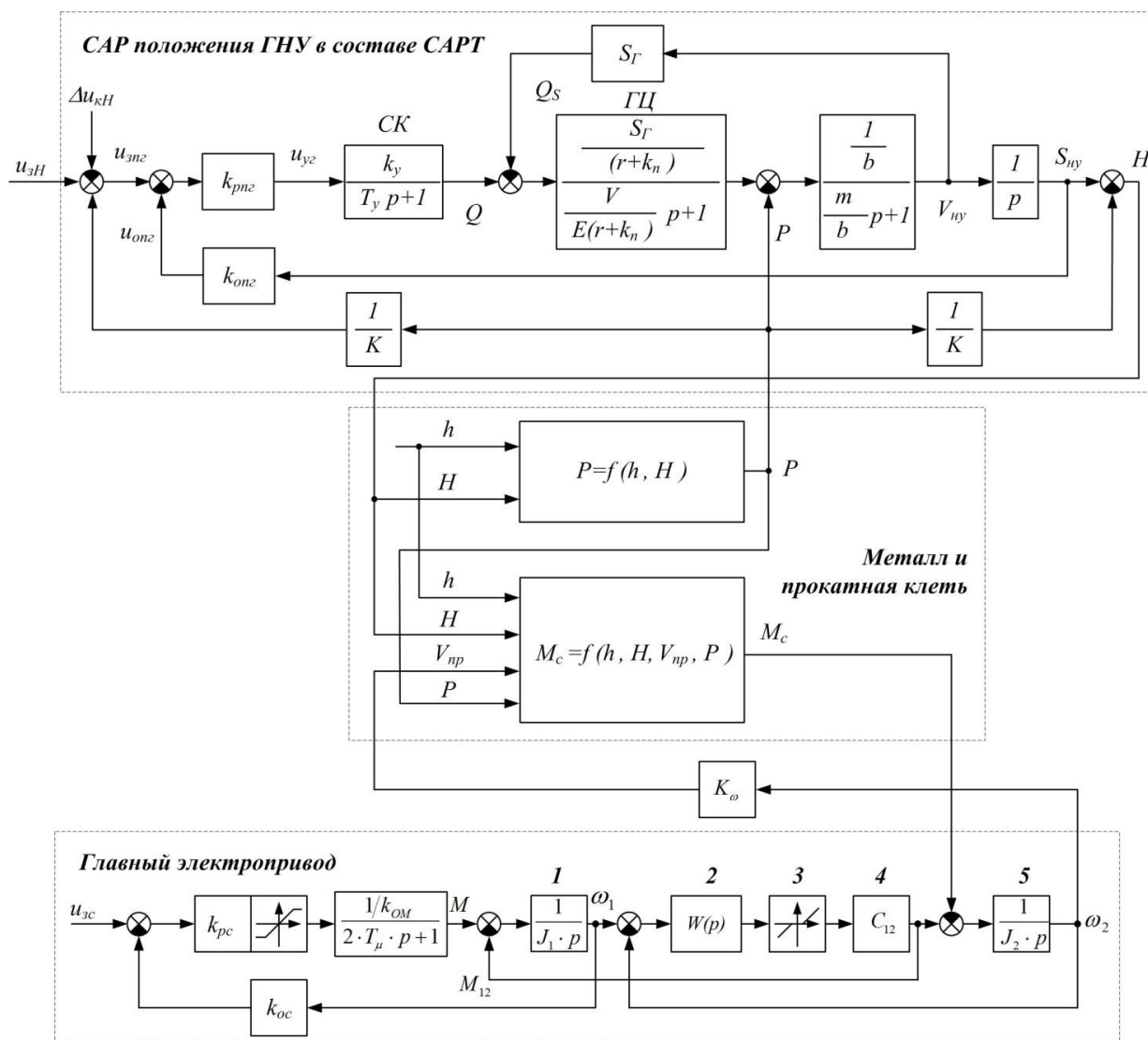


Рис. 5. Структурная схема математической модели мехатронной системы «электропривод клетки – гидравлический привод нажимного устройства»

части, в том числе естественное затухание колебаний, блок 3 моделирует зазоры в механических передачах. Система управления электропривода выполнена двухконтурной с внешним контуром регулирования скорости. Внутренний замкнутый контур регулирования тока представлен апериодическим звеном первого порядка.

Модель гидравлического НУ [23, 24]

Гидравлическое НУ как объект управления описывается тремя линеаризованными дифференциальными уравнениями для малых приращений координат.

1. Уравнение расхода жидкости:

$$Q = S_{\Gamma} \frac{dS_{\text{Hy}}}{dt} + \frac{V_{\text{Hy}}}{E} \frac{dP_{\Gamma}}{dt} + rP_{\Gamma}, \quad (1)$$

где Q – расход жидкости, поступающей в поршневую полость гидроцилиндра; S_{Hy} , S_{Γ} – положение и площадь поршня гидроцилиндра; V_{Hy} – объем поршневой полости при исходном положении

поршня; E – объемный модуль упругости рабочей жидкости; P_{Γ} – давление в поршневой полости; r – коэффициент утечек.

2. Уравнение, описывающее соотношение усилий в клетке:

$$P_{\Gamma} S_{\Gamma} = P + m \frac{d^2 S_{\text{Hy}}}{dt^2} + b \frac{dS_{\text{Hy}}}{dt}, \quad (2)$$

где P – полное давление металла на валки; m – масса перемещающихся механических частей клетки, а также масса жидкости в трубопроводе от аккумулятора до гидроцилиндра, приведенная к площади поршня; b – коэффициент вязкого трения, определяющий величину силы трения, пропорциональной скорости перемещения НУ.

3. Линеаризованное уравнение сервоклапана:

$$T_y \frac{dQ}{dt} + Q = k_y u_y - k_{\text{np}} P, \quad (3)$$

где T_y – постоянная времени сервоклапана; u_y – на-

пряжение управления; $k_y = \frac{dQ}{du_y}$ – постоянный рас-

ходный коэффициент сервоклапана; $k_{пр} = \left(\frac{dQ}{dm}\right)_0$ –

коэффициент жесткости перепадно-расходных характеристик при давлении в поршневой полости (P_0), принятом за начальное.

Представленные уравнения (1)–(3) не учитывают:

- волновые процессы в трубопроводе между аккумулятором, сервоклапаном и гидроцилиндром;
- падение давления в трубопроводе;
- сухое трение.

Передаточная функция регулятора положения НУ при настройке на технический оптимум:

$$W_{пр}(p) = \frac{1}{W_{оу}(p)} \frac{1}{k_y k_{оуг} 2T_y p},$$

где $k_{оуг} = \frac{U_{зп\max}}{S_{ну\max}}$ – коэффициент обратной связи

по положению поршня гидроцилиндра; $W_{оу}(p)$ – передаточная функция гидравлического НУ как объекта управления.

Управление НУ осуществляется с помощью системы косвенного регулирования толщины, построенной по уравнению Головина – Симса:

$$H = d + \frac{P}{M_K}, \quad (4)$$

где H – толщина листа на выходе из клетки; d – величина межвалкового зазора; P – давление металла на валки; M_K – модуль жесткости клетки.

По выражению (4) построена структурная схема САРТ в модели на рис. 5.

Математическая модель металла в очаге деформации [22]

Прокатываемый лист как объект управления описывается уравнениями, известными из теории прокатки. Для определения опережения при прокатке используется формула Дрездена. Для расчета давления металла на валки используется выражение, предложенное акад. А.И. Целиковым:

$$P = \frac{B X H}{2\mu} \left[\frac{1}{\phi} \left(\frac{X_{i-1}}{X_i} \right)^\phi e^m - \left(\frac{X_{i-1}}{X_i} - 1 \right) - \frac{1}{\phi} \right], \quad (5)$$

где B – ширина листа; $\phi = \frac{h}{h+H}$; $m = \frac{2\mu l}{h+H}$;

$X_{i-1} = 1,15\sigma_{s\ i-1} - \sigma_{i-1}$; $X_i = 1,15\sigma_{s\ i} - \sigma_i$ – коэффициенты; $\sigma_{s\ i-1}$, $\sigma_{s\ i}$ – пределы текучести металла до и после обжатия в клетки (при свободной прокатке в реверсивной клетке принимаются одинаковыми, поэтому в схеме на рис. 5 не учитываются); μ – коэффициент трения между рабочей поверхностью валков и металлом; $l = \sqrt{R(h-H)}$ – длина дуги захвата с учетом сплющивания валков.

Статический момент на валу двигателя электропривода определяется как сумма составляющих:

$$M_{ст} = M_{пр} + M_{тр1} + M_{тр2}, \quad (6)$$

где $M_{пр} = 2P\psi l$ – момент прокатки, определяемый по

давлению металла на валки; $M_{тр1} = PD\mu_1$ – момент

добавочных сил трения; $M_{тр2} = \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \frac{M_{пр} - M_{тр1}}{i}$ –

момент трения в передаточных механизмах.

В этих выражениях: R – радиус валков; ψ – коэффициент плеча прокатки; D – диаметр шейки валка; μ_1 – коэффициент трения для подшипников жидкостного трения; η – КПД передачи; i – передаточное число редуктора.

Структурная схема модели на рис. 5 построена с использованием представленного математического описания. В ней зависимости (5), (6) реализованы в функциональных блоках $P = f(h, H)$ и $M_c = f(h, H, V_{пр}, P)$.

Оценка адекватности модели исследуемому объекту была проведена для всей электромеханической системы, а также индивидуально для главного электропривода и гидравлического привода нажимных устройств. Анализ выполнялся путем сопоставления результатов моделирования с данными, полученными методом осциллографирования на стане 5000. Анализовались переходные процессы координат электро- и гидроприводов при прокатке по «традиционной» схеме и по предложенному способу. Результаты сравнения характера процессов, а также расчетных и экспериментальных величин в фиксированных точках, позволили сделать вывод об их взаимном соответствии. В результате подтверждена адекватность модели и объекта с достаточной точностью.

Результаты математического моделирования

С целью оценки технической возможности внедрения предложенного способа управления выполнены исследования методом математического моделирования. Важной задачей, возникающей при моделировании, является определение характера изменения давления металла на валки при перемещении НУ в процессе прокатки. Достоверное математическое описание этого процесса вызывает затруднения. Поэтому для решения задачи использованы осциллограммы координат гидравлического НУ в структуре САРТ при отработке скачка задания на изменение зазора валков, полученные на стане 5000, представленные на рис. 6.

Как следует из осциллограмм, показанных в первом окне, отработка задания имеет характер, близкий к апериодическому. Соответственно контур регулирования зазора можно аппроксимировать фильтром 1-го порядка с постоянной времени, равной 10–15 мс. При этом время выхода на уста-

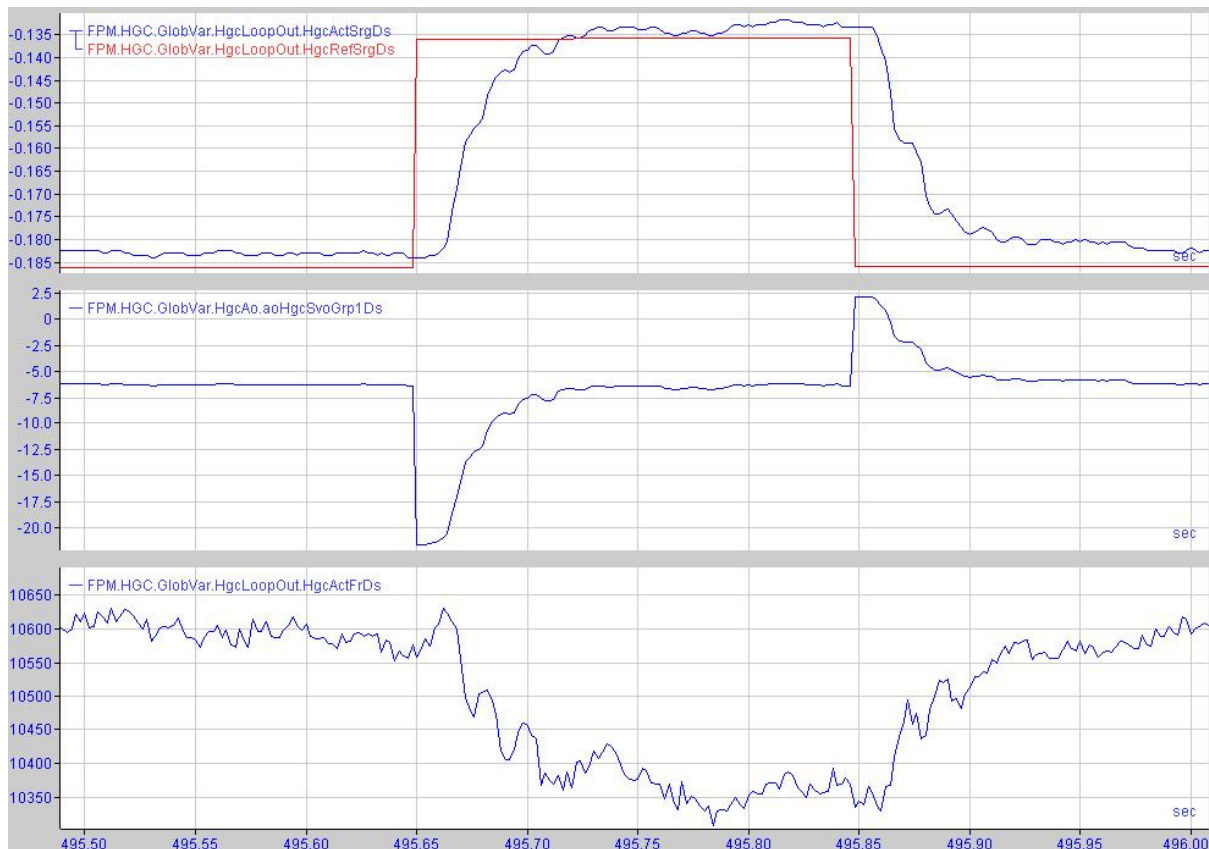


Рис. 6. Реакция контура регулирования положения на скачок задания: окно 1 – сигнал задания и actualный зазор валков; окно 2 – задание на сервоклапан; окно 3 – усилие, развиваемое гидроцилиндром

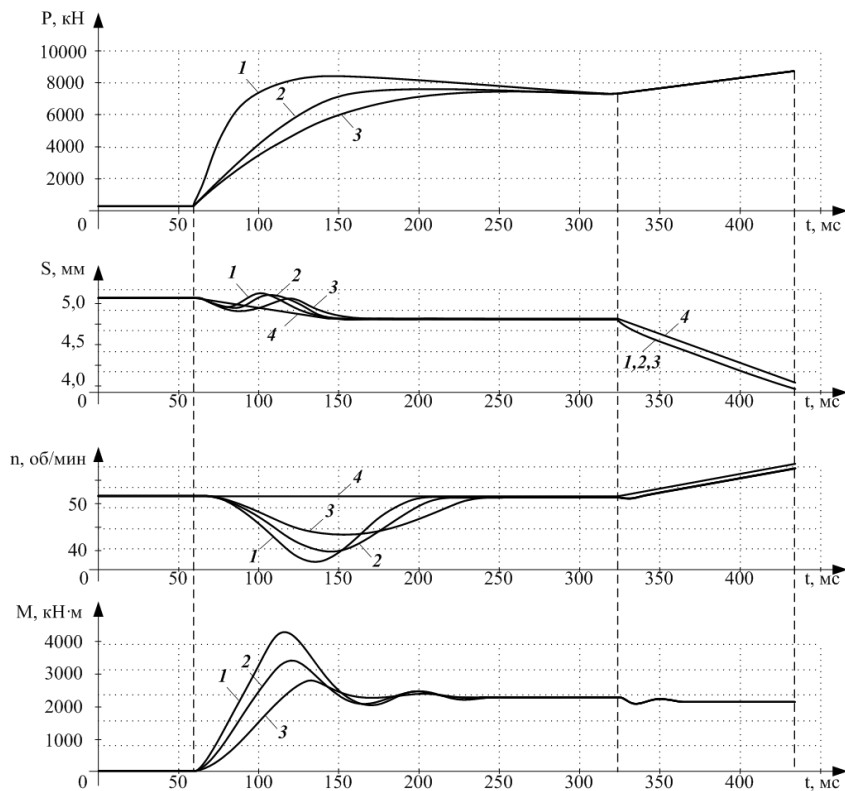


Рис. 7. Переходные процессы при различных темпах изменения зазора после захвата металла

Таблица 1

Интенсивность нарастания момента на расчетных кривых, рис. 7

Номер кривой	Максимальное значение, кН·м	Интервал времени, с	Интенсивность, кН·м/с
1	2500	0,05	57 000
2	2500	0,15	19 000
3	2500	0,25	11 400

новившееся значение составляет около 0,5 с. Постоянная времени зависит от настройки двухконтурной системы регулирования положения НУ. Если выполнить сглаживание кривой в окне 3, характер изменения усилия, развиваемого гидроцилиндром, также близок к апериодическому.

Моделирование динамического процесса захвата с одновременным изменением зазора выполнено с учетом зависимостей изменения давления,

полученных при различных темпах уменьшения зазора. На рис. 7 представлены расчетные кривые координат электропривода, соответствующие экспериментальным осциллограммам, две из которых приведены ниже на рис. 8. Захват металла происходит в момент времени 2,25 с. Обозначения кривых соответствуют скоростям нарастания момента, представленным в табл. 1. Переходный процесс давления при захвате имеет характер, близкий к

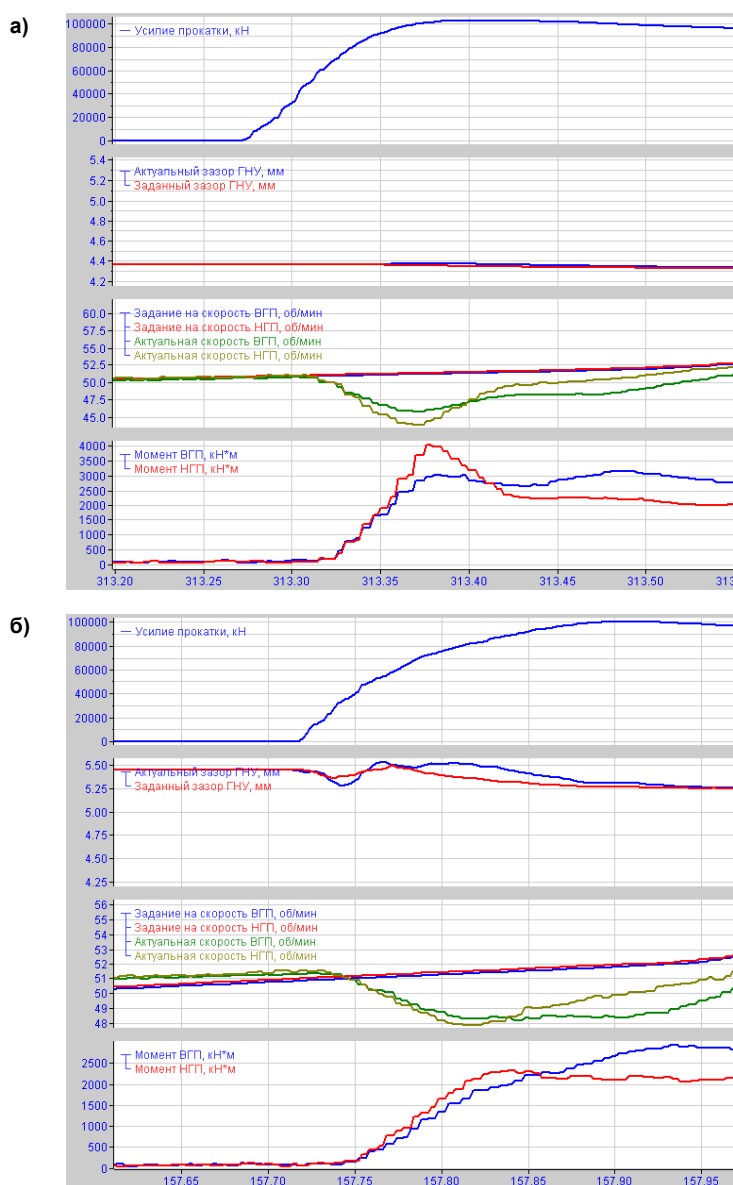


Рис. 8. Захват металла в существующей (а) и в разработанной (б) системах управления: окно 1 – усилие прокатки, кН; окно 2 – фактический и заданный зазоры гидравлического НУ (ГНУ), мм; окно 3 – задания и скорости двигателей верхнего и нижнего валков, об/мин; окно 4 – моменты двигателей, кН·м; по горизонтальной оси – время в секундах

Динамические показатели электроприводов при работе существующей и предложенной систем управления

Параметр	Значение	Электропривод ВГП		Электропривод НГП	
		рис. 8, а	рис. 8,б	рис. 8, а	рис. 8,б
Скорость	Установившееся, об/мин	52	53	52	53
	Минимальное, об/мин	45,5	48	43	48
	Динамическое отклонение, %	12,5	8,5	17,3	9,4
Момент	Установившееся, кН·м	2500	2500	2500	2500
	Максимальное, кН·м	3000	2500	4000	2500
	Перерегулирование, %	20	0	60	0

апериодическому, с постоянными времени 17; 30 и 50 мс (кривые 1, 2 и 3, соответственно).

Полученные результаты приняты при настройке блоков системы задания толщины и усилия прокатки (см. рис. 4), выполненной в виде алгоритма АСУ ТП клетки стана 5000.

Результаты экспериментов

На рис. 8 представлены осциллограммы, полученные в ходе экспериментальных исследований. Результаты на рис. 8, а приведены для исходной системы, когда зазор изначально установлен равным толщине проката на выходе из клетки. На рис. 8, б показаны аналогичные процессы в разработанной системе.

При существующем алгоритме управления (см. рис. 8, а) первоначальный зазор НУ установлен равным толщине листа на выходе из клетки 4,4 мм. Принудительной коррекции зазора после захвата не происходит. При реализации предложенного алгоритма (см. рис. 8, б) зазор валков перед захватом установлен равным 5,45 мм, т. е. больше, чем толщина листа после прохода, которая в этом случае равна 5,25 мм. Через 0,25 с после захвата в момент времени ~ 157,9 с гидравлические НУ устанавливаются в положение, соответствующее заданной толщине листа после прохода, при этом усилии прокатки выходит на установившееся значение.

Результаты сравнения динамических показателей скоростей и моментов главных электроприводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков в анализируемых системах представлены в табл. 2. Они подтверждают значительное уменьшение динамической ошибки регулирования скорости и полное исключение перерегулирования момента при реализации предложенного алгоритма управления. Усилие прокатки при сведении валков изменяется незначительно. По сравнению со случаем, показанным на рис. 2, эффект заключается в снижении динамических отклонений скорости и исключении колебаний момента при захвате.

Недостатком рассмотренного способа является его относительная сложность, так как необходимо согласование скоростей главных электроприводов и гидравлических приводов нажимных устройств.

Обсуждение результатов

Рассмотренный способ управления является примером реализации принципа параметрического регулирования толщины головного участка полосы путем упреждающего регулирования зазора валков перед ее входом в клетку [25]. Данный принцип реализован в электромеханических системах клетей широкополосного стана 2000 [26, 27]. Целью внедрения является компенсация разнотолщинности головного участка полосы, возникающей вследствие неравномерного нагрева подката на входе в непрерывную группу стана. В работах [1, 19] рассмотрена его реализация применительно к толстолистовому стану для формирования переменного профиля по длине проката в проходах с профилированием широких граней горизонтальными валками. С этой целью разработана следящая система автоматического регулирования толщины косвенного типа [28].

Вместе с тем следует учитывать, что перемещение валков после захвата оказывает влияние на толщину головного участка проката. Теоретически это может привести к увеличению концевой обрести, однако практические исследования, выполненные на стане 5000, не подтверждают этого предположения. Целесообразно проведение дополнительных исследований влияния изменения межвалкового зазора на разнотолщинность головного участка, а также на упомянутое выше формирование переменного профиля по длине проката.

Заключение

Представленные результаты исследований показали, что перерегулирование момента и динамическая просадка скорости зависят от темпа нарастания момента при захвате. Этот параметр определяется соотношением линейных скоростей проката и валков, температурой и формой переднего конца заготовки, соотношением зазора и толщины заготовки, а также другими факторами. Одновременное влияние этих параметров на динамические процессы достоверно описать невозможно. Соответственно практически невозможно разработать алгоритм управления, который обеспечил бы компенсацию их воздействия.

Предложенный способ автоматического регулирования зазора валков при захвате заготовки

обеспечивает ограничение влияния одного из наиболее значимых факторов: соотношения предварительно установленного зазора и реальной толщины головной части заготовки.

Разработанный способ прошел опытно-промышленные испытания на стане 5000. В результате дано подтверждение снижения перерегулирования и колебаний момента на валу двигателя. В связи с этим рекомендовано внедрение предложенного алгоритма управления в АСУ ТП клетки стана 5000.

Практическое применение результатов исследований рекомендуется для улучшения условий захвата проката валками черновых клетей широкополосных и сортовых станов. Поскольку разработанный алгоритм управления реализуется в программном обеспечении АСУ ТП клетки, род тока электропривода и настройка системы автоматического регулирования скорости не имеют принципиального значения.

Работа выполняется при поддержке гранта Президента РФ МД-979.2017.8

Литература

1. Басков, С.Н. Энергосиловые параметры приводов и система профилированной прокатки слэбов стана 2800 / С.Н. Басков, А.С. Карандаев, О.И. Осипов // *Приводная техника*. – 1999. – № 1–2. – С. 21–24.
2. 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.
3. Целиков, А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. – М.: Металлургияиздат, 1962. – 494 с.
4. Павлов, И.М. Теория прокатки / И.М. Павлов. – М.: Металлургияиздат, 1950. – 610 с.
5. Выдрин, В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н. Выдрин. – Свердловск: Металлургия, 1960. – 256 с.
6. Радионов, А.А. Автоматизированный электропривод для производства стальной проволоки / А.А. Радионов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 2007. – 311 с.
7. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, А.С. Евдокимов и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 59–73. DOI: 10.14529/power150108
8. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки / В.Р. Храмушин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов и др. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 2. – С. 69–77.
9. System for Speed Mode Control of the Electric Drives of the Continuous Train of the Hot-Rolling Mill / V.R. Khrumshin, A.S. Evdokimov, G.P. Kornilov et al. // *Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. – Omsk: Omsk State Technical University, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147264
10. 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.
11. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill / V.R. Khrumshin, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov et al. // *Metallurgist*. – 2015. – Vol. 59, no. 3–4. – P. 315–323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8.
12. Технологические схемы управления электроприводами чистой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмушин, П.В. Шляев и др. // VII междунар. конгресс прокатчиков: сб. тр. – М., 2007. – Т. 1. – С. 71–75.
13. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмушин, А.А. Радионов и др. // *Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу*. – Иваново: ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет», 2012. – С. 652–657.
14. Карандаев, А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства / А.С. Карандаев // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 1. – С. 3–15.
15. Гасияров, В.Р. Математическое описание главного электропривода толстолистового стана 5000 горячей прокатки. / В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 62–66.
16. 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. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-14-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25)
17. 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/power180113
18. Способ коррекции разнотолщинности

головного участка полосы в системе автоматического регулирования толщины широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, И.Ю. Андрияшин и др. // *Электротехника*. – 2013. – № 8. – С. 34–38.

19. *Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill* / V.R. Khramshin, E.A. Khramshina, A.S. Karandaev et al. // *Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRus)*. – 2017. – P. 1540–1544. DOI: 10.1109/EIconRus.2017.7910865

20. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмин, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 1. – С. 12–21.

21. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклеточного промежутка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, А.Ю. Андрияшин и др. // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2009. – № 1. – С. 12–20.

22. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолистного прокатного стана / С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов и др. // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 55–64.

23. Кузицин, В.А. Моделирование гидравлических нажимных устройств прокатных станов /

В.А. Кузицин, Ю.Ю. Гедымин // *Конструирование и исследование современных прокатных станов: сб. науч. тр.* – М.: ВНИИметмаш, 1985. – С. 113–118.

24. Браун, А.Е.. Некоторые вопросы динамики гидронажимных устройств / А.Е. Браун, Б.Н. Дралюк, А.Е. Тикоцкий // *Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод*. – 1982. – Вып. 8. – С. 13–17.

25. Храмин, В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.Р. Храмин. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013. – 40 с.

26. Автоматическая коррекция толщины головного участка полосы в гидро-САРТ широкополосного стана горячей прокатки / В.В. Галкин, С.А. Петряков, А.С. Карандаев, В.Р. Храмин // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 46–50.

27. *Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods* / V.R. Hramshin, A.S. Karandaev, A.A. Radionov, R.R. Hramshin // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2013 – Вып. 13, № 1. – С. 144–151.

28. *Automatic Gauge Control System with Combined Control of the Screw-Down Arrangement Position* / A.S. Karandaev, A.A. Radionov, V.R. Khramshin et al. // *12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. – Novosibirsk, 2014. – Vol. 1. – С. 88–94. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040794

Гасияров Вадим Рашитович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; gasiyarovvr@gmail.com.

Басков Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sbaskov@mail.ru.

Воронин Станислав Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; voroninss@susu.ru.

Одинцов Константин Эдуардович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; kosodin@mail.ru.

Поступила в редакцию 9 мая 2018 г.

LIMITATION OF DYNAMIC LOADS OF ROLL STEEL CELLS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS BY MEANS OF ROLL ADJUSTMENT

V.R. Gasiyarov^{1,2}, gasiyarovvr@gmail.com,
S.N. Baskov¹, sbaskov@mail.ru,
S.S. Voronin¹, voroninss@susu.ru,
K.E. Odintsov², kosodin@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The paper discusses the expansion of the rolling mills gauge due to the flat products production from hard-to-form steels. The research substantiates the relevance of the development of methods used to reduce the dynamic loads of thick plate mill reversible stands electromechanical systems occurring when the rollers grip metal. As it is shown, the control system of the horizontal rolls electric drives of Mill 5000 used at PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" (PJSC "MMK") features no technical solutions providing for a reduction in the dynamic moment and speed deviations under the impact load. The paper presents oscillograms illustrating the unsatisfactory nature of transients during the rolling of hard-formed steel sheets. Thus, a method for limiting the torque by increasing the spacing between the rollers prior to metal gripping followed by the rolls return to a set position is justified. The paper presents a control system scheme with the suggested solution in place. The structure of the mathematical model of a rolling stand mechatronic system is considered. The model includes models of the horizontal rollers electric drive and the pressure devices (PD) hydraulic drive interconnected through metal, while the mathematical dependences describing the transient processes of the hydraulic PD and the change in pressure and moment under deformation are given. The dynamic mode of the workpiece grip with simultaneous change of the gap at various rates of PD movement is performed. As a result, the implementation of the algorithm based on the suggested method in 5000 camp automated process control system is considered a viable method. The oscillograms obtained during the workpiece gripping under the existing and the developed control algorithms are presented. The improvement of the dynamic speed and torque indicators is confirmed. The feasibility of studies aiming at the efficiency evaluation of the developed method implementation in the stands electromechanical systems of broadband and long rolling mills is noted.

Keywords: plate rolling mill, reversible stand, electric drive, dynamic loads, limitation, hydraulic pressure device, roll gap, regulation, method, mathematical modeling, experimental research, pilot operation, introduction.

References

1. Baskov S.N., Karandaev A.S., Osipov O.I. [Power-Driven Parameters of Drives and System of Profiled Rolling of Slabs of the Mill 2800]. *Privodnaya tekhnika* [Drive Technology], 1999, no. 1–2, pp. 21–24. (in Russ.)
2. Galkin V.V., Karandaev 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 in Rolling Mill Stands for Rolling Thick Strips]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of TulGU. Technical Science], 2010, iss. 3, in 5 parts, Tula, TulGU Publ., 2010, part 2, pp. 12–17. (in Russ.)
3. Tselikov A.I. *Teoriya rascheta usilii v prokatnykh stanakh* [Theory of Calculating the Forces in Rolling Mills]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962. 494 p.
4. Pavlov I.M. *Teoriya prokatki* [Theory of Rolling]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1950. 610 p.
5. Vydrin V.N. *Dinamika prokatnykh stanov* [Dynamics of Rolling Mills]. Sverdlovsk, Metallurgiya Publ., 1960. 256 p.
6. Radionov A.A. *Avtomatizirovannyi elektroprivod dlya proizvodstva stal'noy provoloki* [Automated Electric Drive for Production of Steel Wire]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2007. 311 p.
7. Radionov A.A., Karandaev A.S., Evdokimov A.S., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Shubin A.G. Mathematical Modelling of the Interrelated Electric and Mechanical Systems of Continuous Sub-Group of the Rolling Mill Stands. Part 1. Development of the Mathematical Model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 59–73. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150108
8. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. [Reduction of Dynamic Loads of Mechanical and Electrical Equipment of the Draft Subgroup of Hot Rolling Mill Stands].

Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal [Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal], 2013, no. 2, pp. 69–77. (in Russ.)

9. Khramshin V.R., Evdokimov A.S., Kornilov G.P., Radionov A.A., Karandaev A.S. System for Speed Mode Control of the Electric Drives of the Continuous Train of the Hot-Rolling Mill. *Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147264

10. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R. [Automatic Correction of the Speeds of the Electric Drives of Mill Stands 2000 when Rolling a Pipe Blank]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of High Schools. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 31–35. (in Russ.)

11. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. *Metallurgist*, 2015, vol. 59, no. 3–4, pp. 315–323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8.

12. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V. [Technological Schemes for Controlling Electric Drives of the Finishing Group of a Broadband Hot Rolling Mill]. *VII mezhdunar. kongress prokatchikov: sb. tr.* [VII Intern. Congress of Distributors: Proceedings]. Moscow, 2007, iss. 1, pp. 71–75. (in Russ.)

13. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. [Coordination of the Speeds of the Interconnected Electric Drives of the Rolling Mill Rolling Stands]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the International Research Institute of the All-Russian Scientific and Technical Conference on Automated Electric Drives], Ivanovo, 2012, pp. 652–657. (in Russ.)

14. Karandaev A.S. [Perfection of the Automated Electric Drives of Aggregates of Rolling Manufacture]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal], 2014, no. 1, pp. 3–15. (in Russ.)

15. Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. [Mathematical Description of the Main Electric Drive of a Thick Plate Mill 5000 Hot Rolling]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Electrical Engineering: Web-Based Electronic Scientific Journal], 2015, iss. 2, no. 3, pp. 62–66. (in Russ.)

16. Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. [Substantiation of Ways to Limit Dynamic Loads of Electromechanical Systems of Rolling Stand Mill]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 14–25. (in Russ.) [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-14-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25)

17. 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/power180113

18. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Petryakov S.A., Khramshin R.R. [Method for Correcting the Thickness of the Head Portion of a Strip in a System for Automatically Adjusting the Thickness of a Broadband Hot Rolling Mill]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2013, no. 8, pp. 34–38. (in Russ.)

19. Khramshin V.R., Khramshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. *Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus)*, 2017, pp. 1540–1544. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910865.

20. Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. [Mathematical Model of Interconnected Electrotechnical Systems of a Continuous Group of a Broadband Mill]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal], 2013, no. 1, pp. 12–21. (in Russ.)

21. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin A.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V. [Mathematical Modeling of Interconnected Electromechanical Systems of the Intercellular Gap of a Broadband Hot Rolling Mill]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 12–20. (in Russ.)

22. Baskov S.N., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Khramshin V.R., Odintsov K.E. [Development of Mathematical Model of Interconnected Electrotechnical Systems of Stand of Thick Plate Rolling Mill]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2017, iss. 60, no. 6, pp. 55–64. (in Russ.)

23. Kuzishchin V.A., Gedymin Yu.Yu. [Modeling of Hydraulic Pressing Devices of Rolling Mills]. *Konstruirovaniye i issledovaniye sovremennykh prokatnykh stanov: Sb. nauch. trudov.* [Modern Rolling Mills Design and Research: Collection of Research Papers], 1985, pp.113–118. (in Russ.)

24. Braun A.E., Dralyuk B.N., Tikotskiy A.E. [Some Questions of the Dynamics of Hydraulic Clamping Devices]. *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Ser. Elektroprivod* [Electrotechnical industry. Ser. Electric Drive], 1982, iss. 8, pp. 13–17. (in Russ.)

25. Khramshin V.R. *Razrabotka elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy stana goryachey prokatki pri rasshirenii sortamenta polos: avtoref. dis. d-ra tekhn. Nauk* [Development of Electrotechnical Systems of a Continuous Group of a Hot Rolling Mill with the Widening of the Range Gauge. Abstract of Doct. Scie. Diss.]. Magnitogorsk, FGBOU VPO "MGTU" Publ., 2013. 40 p.

26. Galkin V.V., Petryakov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. [Automatic Correction of the Thickness of the Head Portion of the Strip in the Hydro-SART of a Broadband Hot Rolling Mill]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 46–50. (in Russ.)

27. Hramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Hramshin R.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, iss. 13, no. 1, pp. 144–151.

28. Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Shubin A.G. Automatic Gauge Control System with Combined Control of the Screw-Down Arrangement Position. *12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 88–94. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040794.

Received 9 May 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ограничение динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана за счет регулирования зазора валков / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, С.С. Воронин, К.Э. Одинцов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 82–95. DOI: 10.14529/power180210

FOR CITATION

Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Voronin S.S., Odintsov K.E. Limitation of Dynamic Loads of Roll Steel Cells Electromechanical Systems by Means of Roll Adjustment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 82–95. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180210