

Гасияров В.Р.¹, Логинов Б.М.², Воронин С.С.¹¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ РАСКАТА В РЕЖИМЕ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПРОКАТКИ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРО- И ГИДРОПРИВОДА

Отмечена актуальность снижения потерь металла с боковой и торцевой обрезаю при производстве проката на толстолистовых станах. Дана оценка влияния соотношения коэффициентов вытяжки при протяжке и разбивке ширины на геометрическую форму раската. Показаны преимущества прокатки с формированием двойного конического профиля на головном и хвостовом участках. Представлена технология ASC, в которой реализована многоточечная стратегия задания толщины по длине раската. Обоснована важность повышения точности автоматического регулирования положения гидравлических нажимных устройств и толщины при реализации этой стратегии. Приведена структура и дана характеристика системы автоматического регулирования толщины (САРТ) стана 5000. Выполнен анализ осциллограмм толщины раската во время прохода с профилированием при существующей настройке САРТ. Зафиксированы отклонения, вызванные запаздыванием сигнала регулирования по отношению к фактическому отклонению толщины при перемещении нажимных устройств. С целью повышения быстродействия САРТ и уменьшения динамической ошибки предложен способ регулирования толщины с предупредлением. Рассмотрена структура двухконтурной САРТ с положительной связью по сигналу задания, обоснована передаточная функция канала предупредления. Представлена структура имитационной модели взаимосвязанных электротехнических систем реверсивной клетки, обеспечивающей возможность совместного исследования профилированной прокатки и формирования изгиба переднего конца раската в форме «лыжи». Рассмотрены схемы отдельных блоков модели. Выполнен сравнительный анализ временных зависимостей толщины раската при реализации проектного и разработанного алгоритмов регулирования, подтверждено увеличение быстродействия САРТ. Представлены осциллограммы, полученные при реализации разработанного алгоритма в АСУ ТП реверсивной клетки стана 5000. В результате их сравнения с осциллограммами при проектной настройке САРТ доказано повышение точности регулирования толщины. Отмечены технические преимущества внедрения разработанного алгоритма, основным из которых является улучшение качества продукции.

Ключевые слова: толстолистовой прокатный стан, реверсивная клетка, профилированная прокатка, автоматическое регулирование толщины, система, точность, предупредление, способ, структура, имитационная модель, разработка, моделирование, экспериментальные исследования, внедрение.

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее влияние на расход металла при производстве толстых листов оказывают отходы с боковой и торцевой обрезаю, вызванные отклонением формы листа в плане (вид сверху) от прямоугольной. Форма готового листа зависит от соотношения коэффициентов вытяжек: отношения длины раската к длине сляба при протяжке и ширины раската к ширине сляба при разбивке ширины [1]. Когда коэффициент вытяжки при протяжке превышает аналогичный коэффициент при разбивке ширины, форма готового листа характеризуется выпуклостью переднего и заднего концов и вогнутостью боковых кромок (рис. 1, а). При обратном соотношении коэффициентов вытяжки передняя и задняя кромки листа становятся вогнутыми, а боковые грани – выпуклыми (рис. 1, б).

Эффективным способом улучшения формы листа в плане и снижения удельного расхода металла является профилирование широких граней раската горизонтальными валками. Суть этого способа заключается в том, что в последнем пропуске при протяжке или разбивке ширины производят деформацию раската с переменным обжатием по длине с тем, чтобы компенсировать дальнейшее отклонение формы от прямоугольной. В результате формируется профиль с переменной толщиной на головном и хвостовом участках, получивший название «собачья кость» [2].

Для практической реализации профилирования известны несколько технологий: MAS-прокатка,

ЕГО-прокатка, Plan View Control (управление геометрией) [3–5]. Для обеспечения почти полной прямоугольности раската в плане на современных толстолистовых станах применяется автоматический контроль профиля (ASC). Для воздействия на форму головной и хвостовой частей применяется двойной конический профиль толщины, показанный на рис. 1, в. Поскольку неровности края встречаются на головном, хвостовом концах и на кромках листа, функция ASC применяется как при протяжке, так и при разбивке ширины (на повернутом листе). Более подробно технологии профилированной прокатки рассмотрены в работах [6, 7], анализ технологии ASC приведен в публикациях [1, 8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для задания профиля переменной толщины в технологии ASC разработана многоточечная стратегия, которая поясняется графиками изменения толщины и давления в функции длины раската, представленными на рис. 1, в. Согласно этой стратегии рассчитывается ряд заданных точек, каждая из которых определяется по удаленности от «головы» раската. Для каждой точки моделью настройки АСУ ТП выдаются опорные значения толщины, усилия прокатки, скорости, опережения и других контролируемых либо вычисляемых параметров. Текущее положение «головы» вычисляется в функции суммы скорости прокатки и опережения. Соответствующие опорные значения устанавливаются между заданными точками. При прокатке с автоматическим контролем формы опорные значения толщины и усилия прокатки постоянно обновляются во время прохода в зависимости от длины прокатанной части.

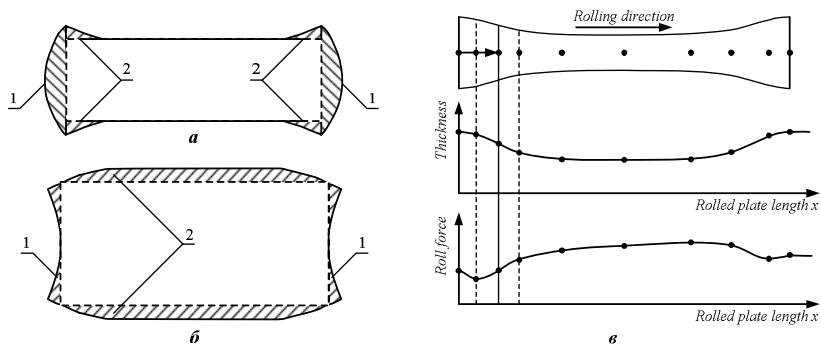


Рис. 1. Форма листа при различных соотношениях коэффициентов вытяжки (а), (б) и графики, поясняющие профиль раската и многоточечную стратегию (в): 1 – торцевая обрезь; 2 – боковая обрезь; rolling direction – направление прокатки; thickness – толщина; rolled plate length x – длина прокатанного листа; roll force – давление на валки

Функции формирования переменного профиля по длине раската обеспечиваются системой автоматического регулирования толщины, управляющей гидравлическими нажимными устройствами (НУ). В представленной публикации этот процесс рассматривается на примере НУ и САРТ толстолистового стана 5000.

Очевидно, что точность отработки профиля раската, задаваемого согласно рис. 1, в, определяется точностью автоматического регулирования положения нажимных устройств и толщины. Анализ настройки и показатели САРТ стана 5000 представлены в [9]. Показано, что в установленном режиме прокатки они удовлетворительны. Вместе с тем при формировании профиля «кость» возникает отклонение толщины от заданной. Это предопределило необходимость исследования точности регулирования толщины в динамическом режиме формоизменения раската и разработки способа управления НУ в структуре САРТ, обеспечивающего ее повышение.

Поскольку проведение активных экспериментов по регулированию профиля на действующем стане не представляется возможным, в качестве основного метода принято математическое моделирование. Результаты экспериментов анализируются только на этапах исследования быстродействия САРТ и оценки эффективности разработанных решений.

ХАРАКТЕРИСТИКА САРТ СТАНА 5000

Автоматическое регулирование толщины на современных прокатных станах обеспечивается средствами двух взаимосвязанных систем: гидравлического регулирования раствора валков (HGC, Hydraulic Gap Control) и непосредственно автоматического регулирования толщины (AGC, Automatic Gap Control) [10, 11]. Эти системы реализованы в виде двух контуров: внутреннего контура регулирования положения НУ и внешнего контура регулирования толщины. Структуры и настройки этих систем на различных станах представлены в ряде публикаций, в том числе в [12–14].

Схема подключения регуляторов толщины и положения НУ стана 5000 показана на рис. 2. В САРТ реализуется известная зависимость Головина-Симса [15]. На вход регулятора толщины поступают сигналы задания и обратной связи. Текущая (актуальная) толщина рассчитывается по сигналам датчиков положения, распределения зазора по сторонам относительно оси прокатки, растяжения клетки и других воздействий (толщины масляной пленки в подшипниках, теплового расширения вала, износа валков и др. [16, 17]).

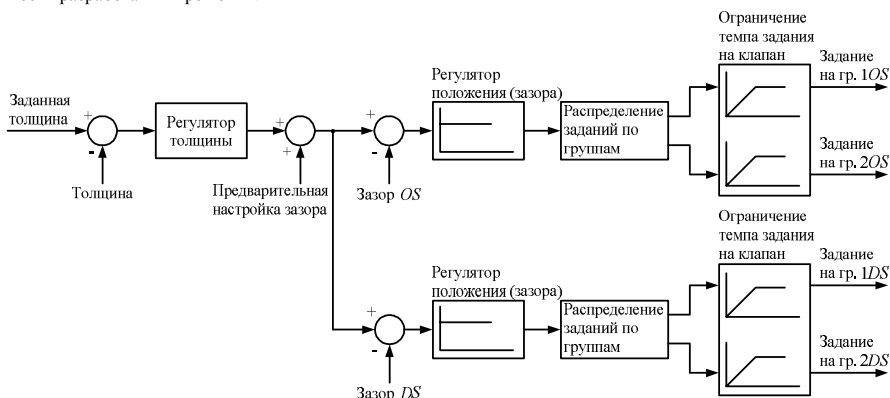


Рис. 2. Упрощенная структура САРТ

Более подробно техническая реализация и настройка систем HGC и AGC стана 5000 рассмотрены в работе [9].

АНАЛИЗ ОСЦИЛЛОГРАММ ПРИ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ НАСТРОЙКЕ САРТ

На рис. 3 представлены осциллограммы заданной и фактической толщины (окно 1), моментов главных приводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков (окно 2) и усилия прокатки (окно 3). Характер осциллограмм толщины и усилия прокатки соответствует графикам, приведенным на рис. 1, в. Формирование профиля переменной толщины происходит на переднем конце раската в интервале времени t_1-t_3 непосредственно после захвата металла валками и на заднем конце – в интервале t_4-t_5 . Это происходит за счет уменьшения и увеличения зазора валков соответственно.

В результате анализа представленных зависимостей определены следующие недостатки проектной САРТ:

1. Значительное отклонение фактической толщины (кривая 2) от заданной (кривая 1) в режиме формирования профиля раската. В интервале t_1-t_3 отклонение Δh_T составляет 2 мм или 0,8% толщины после профилирования (239 мм). Это вызвано задержкой сигнала регулирования при перемещении НУ. Интервал задержки $\Delta t_T \approx 0,2$ с. Данный недостаток обусловлен тем, что при проектной настройке САРТ регулирование осуществляется по отклонению толщины.

Следует отметить что в ходе экспериментальных исследований были зафиксированы отклонения толщины до 2,5% при допустимом пределе $\pm 1\%$.

2. Значительное различие между моментами ВГП (кривая 3) и НГП (кривая 4) как в режиме профилирования, так и в установившемся режиме прокатки. Как показали исследования, это обусловлено рассогласованием

скоростей этих приводов (на рис. 3 не показаны). Изначально рассогласование устанавливается с целью формирования изгиба переднего конца раската вверх в форме «лыжи». По окончании режима лыжеобразования в работу должен вступать регулятор деления нагрузок (РДН), в функции которого входит выравнивание скоростей и, соответственно, нагрузок ВГП и НГП.

Однако при прокатке коротких раскатов из-за несогласованной работы системы лыжеобразования и РДН, последний не успевает включиться в работу, поэтому момент ВГП в несколько раз ниже момента НГП. Такой режим возникает при прокатке коротких раскатов на черновой стадии. Сказанное подтверждают осциллограммы в окне 2, на которых момент НГП достигает уровня ограничения -4500 кН·м, в то время как момент ВГП изменяется в пределах от -2000 кН·м до -3500 кН·м (отрицательные значения моментов означают, что прокатка проходит в режиме реверса – в направлении от подвижного ролянга к подводящему).

Наиболее простым решением первой названной проблемы является повышение быстродействия контура регулирования толщины. Однако этот путь является ограниченным, т.к. при увеличении коэффициента регулятора возникает колебательный процесс, что нежелательно. Поэтому необходим поиск других решений, обеспечивающих уменьшение динамической ошибки регулирования толщины.

Для устранения второго недостатка необходимы согласование режимов системы лыжеобразования и РДН и повышение их быстродействия. Решение этой задачи является предметом отдельных исследований, поэтому здесь не рассматривается. В представленной работе предлагается решение, направленное на повышение точности регулирования толщины за счет увеличения быстродействия без изменения настройки контуров САРТ.

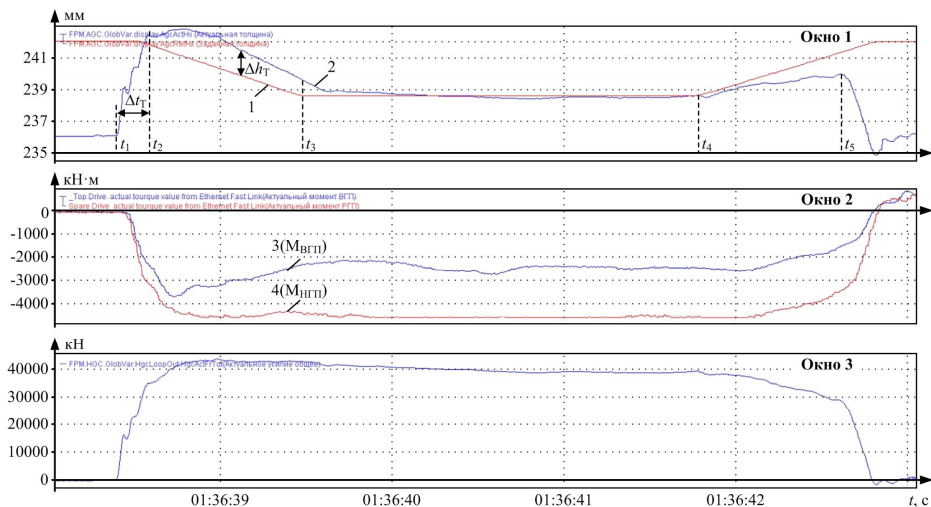


Рис. 3. Осциллограммы параметров прокатки в проходе с профилированием при существующей настройке САРТ: окно 1 – заданная и фактическая толщина; окно 2 – моменты электроприводов; окно 3 – усилие прокатки

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ

Эффективным способом ускорения работы САРТ и, соответственно, уменьшения динамической ошибки регулирования толщины является предупредание положением НУ [10]. Для этого сигнал задания, формирующий профиль «кость», подается на вход регулятора положения «в обход» регулятора толщины. В этом случае система не будет «ждать» отклонения толщины, а будет воздействовать на положение НУ в функции сигнала ее задания.

В публикациях [18, 19] рассмотрены принципы построения систем автоматического регулирования с предварительным управлением за счет формирования положительного сигнала по управляющему воздействию. В публикации [20] рассмотрены структуры двухконтурной и трехконтурной систем регулирования положения, обосновано включение положительной

связи с пропорциональным регулятором. В работе [10] рассмотрено включение интегрального регулятора, что обеспечивает регулирование не только самого сигнала, но и его производной.

На основании анализа известных решений, с учетом того, что для регулирования межвалкового зазора в режиме профилированной прокатки не требуется высокого быстродействия, обосновано применение положительной связи по задающему сигналу с пропорциональным каналом (регулятором) предупредания. В этом случае будет обеспечено достаточное быстродействие при минимальном влиянии связи на устойчивость процесса.

Функциональная схема двухконтурной САРТ с внутренним контуром регулирования положения НУ представлена на рис. 4. Дополнительно введенный канал предупредания выделен контуром.

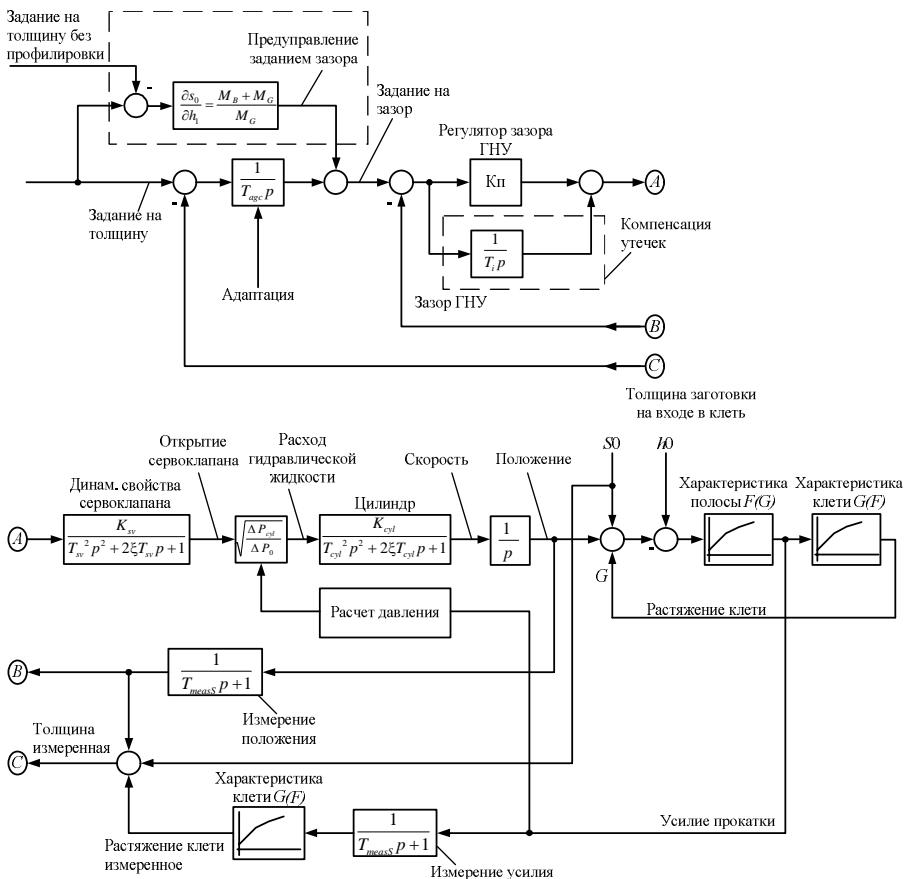


Рис. 4. Структурная схема САРТ с реализацией предупредания

При выборе коэффициента регулятора положительной связи принято во внимание, что изменение толщины и изменение зазора отличаются друг от друга. Поэтому введен коэффициент, описывающий отношение изменения зазора к изменению толщины, который зависит от модулей жесткости клетки M_G и металла M_B [7]:

$$\frac{\partial s_0}{\partial h_1} = \frac{M_B + M_G}{M_G}$$

На схеме это учитывается введением блока с соответствующей передаточной функцией. Модуль жесткости клетки принимается по данным калибровки клетки, модуль жесткости полосы определяется моделью прокатки.

С целью оценки эффективности предложенного решения обосновано исследование точности регулирования толщины методом математического моделирования. В связи с этим возникла задача разработки имитационной математической модели. Поскольку в реальном электроприводе имеет место значительное рассогласование моментов ВПП и НПП (см. рис. 2), для обеспечения адекватности процессов в ней должны быть предусмотрены структуры системы управления «лыжей», РДН, а также задания и распределения нагрузок ВПП и НПП.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Структурная схема имитационной модели взаимосвязанных электротехнических систем реверсивной

клетки толстолистового стана представлена на рис. 5. Она содержит блоки, описывающие электроприводы с механической частью, блок управления «лыжей» (задания разницы скоростей), блок РДН (входит в структуру модели распределения моментов), блок моделирования нагрузки и ее распределения по двигателям. Также в представленной схеме содержатся контуры НГС и АГС. При реализации модели они выполнены в виде структуры, представленной на рис. 4, поэтому отдельно не рассматриваются.

Математическая модель электромеханической системы вала (модели ВПП и НПП) представляет собой известную модель двухмассовой системы с упругой связью. Система автоматического регулирования скорости принята двухконтурной, настроенной на симметричный оптимум, внутренний контур регулирования момента настроен на технический оптимум. Такие системы описаны в литературных источниках [21, 22], в том числе в публикациях авторов [23–25], поэтому здесь не рассматриваются.

Структура блока управления «лыжей» представлена на рис. 6, а. Он обеспечивает снижение задания скорости электропривода верхнего вала в соответствии с вычисленным темпом. Скорость электропривода нижнего вала является базовой и зависит только от скорости прокатки. Темп снижения задания регулируется воздействием на датчик интенсивности 2. По окончании формирования «лыжи» осуществляется переключение входа блока коммутации (селектора) 1 на нулевой сигнал задания.

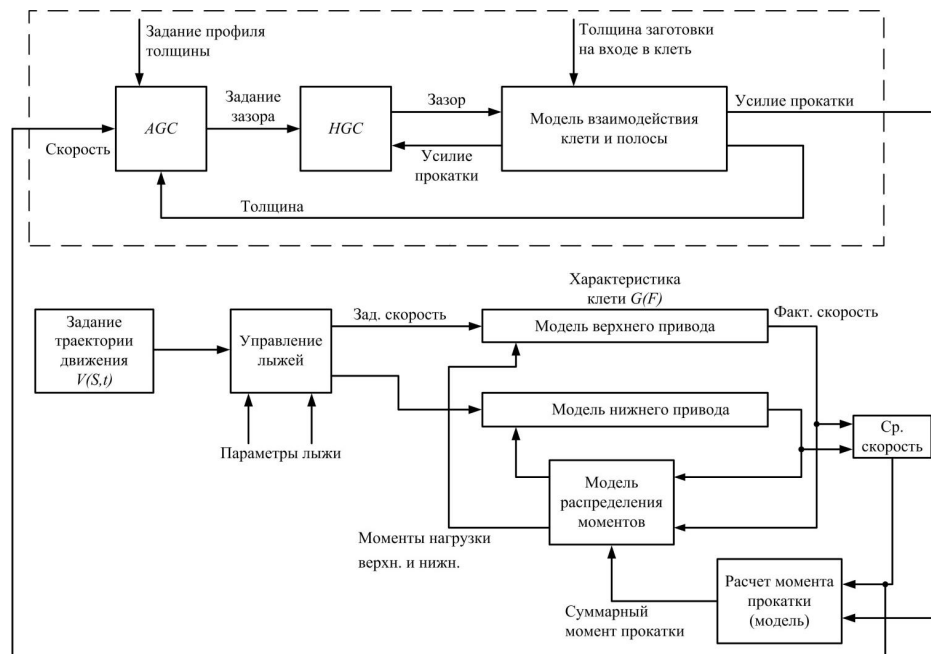


Рис. 5. Структура имитационной модели взаимосвязанных электротехнических систем реверсивной клетки

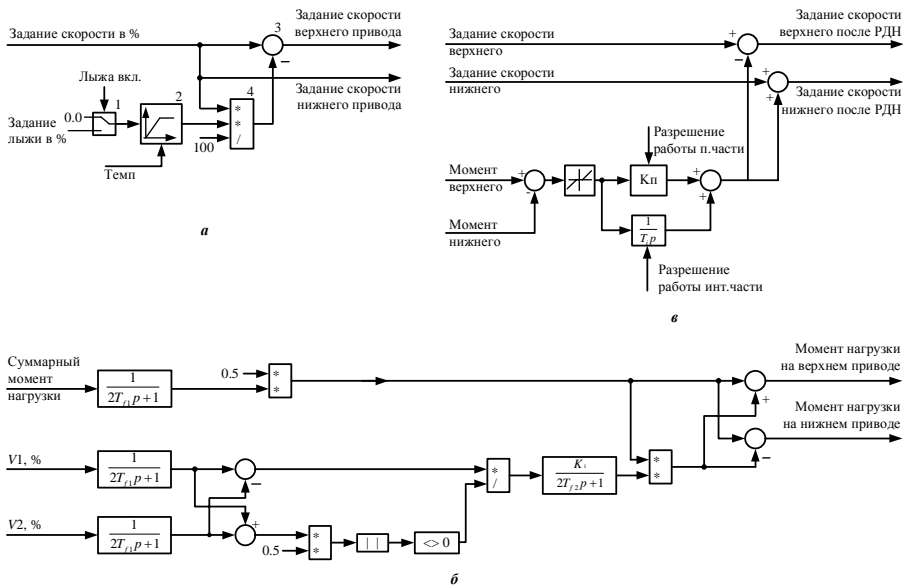


Рис. 6. Схемы моделей блока задания скоростей (а), распределения нагрузок ВГП и НГП (б) и схема РДН (в): 1 – селектор; 2 – задатчик интенсивности; 3 – сумматор; 4 – умножитель

Схема блока имитации распределения нагрузки между электроприводами верхнего и нижнего валков представлена на рис. 6, б. Она описывает изменение моментов в зависимости от разницы линейных скоростей двигателей. Входными сигналами являются суммарный момент нагрузки на оба электропривода и их относительные скорости ($V_1, \%$ и $V_2, \%$). Выходные сигналы – это моменты ВГП и НГП. В данной модели разница моментов формируется пропорциональной рассогласованию скоростей. Для повышения точности моделирования в схему введен фильтр с коэффициентом усиления K_1 и постоянной времени T_p . Их значения определены по результатам анализа осциллограмм. Более подробно описание аналогичных моделей приведено в публикациях [26, 27].

Схема регулятора деления нагрузок приведена на рис. 6, в. Он имеет пропорциональный и интегральный каналы, которые вступают в работу не одновременно. Если момент электропривода верхнего валка превышает момент электропривода нижнего валка, на входе регулятора формируется «ошибка» с положительным знаком. В этом случае сигнал на выходе РДН также положительный, он воздействует на скорость ВГП в сторону ее уменьшения и на скорость НГП – в сторону увеличения. При обратном соотношении моментов осуществляются регулирующие воздействия с противоположными знаками. В результате формируются разнонаправленные коррекции заданий, что повышает быстротечные при компенсации рассогласования скоростей. Сигнал на разрешение работы П-части подается в момент окончания формирования «лыжи».

Разработанная имитационная модель, включающая рассмотренные блоки, реализована в среде Matlab Simulink.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Параметры модели определены по данным электрооборудования и осциллограммам, полученным на стане 5000. Путем сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментов подтверждена ее адекватность объекту. Доказана целесообразность использования модели для исследования разработанного способа совершенствования САРТ и разработки алгоритмов деления нагрузок и формирования «лыжи» (здесь не рассматриваются).

В подтверждение сказанному на рис. 7 представлены расчетные временные зависимости скоростей (окно 1), моментов (окно 2) электроприводов верхнего и нижнего валков, а также зависимости заданной и фактической толщины раската (окно 3). Масштабы по осям ординат указаны в процентах, для перевода в абсолютные величины следует воспользоваться соотношениями: масштаб скоростей – $100\% = 8 \text{ м/с}$; масштаб моментов – $100\% = 1910 \text{ кН·м}$; выход РДН – $100\% = 0,8 \text{ м/с}$. Начальное рассогласование скоростей, необходимое для формирования «лыжи», в обоих случаях установлено равным проектному значению 15% .

В момент времени t_1 происходит захват металла валками. Темп замедления скорости в режиме лыжеобразования (интервал $\Delta t_3 = t_2 - t_1$) на обоих рисунках составляет $16\%/с$. В интервале $\Delta t_{п} = t_3 - t_1$ осуществляется формирование профиля переменной толщины на головном участке раската. Таким образом, режим образования «лыжи» совпадает по времени с режимом профилирования. Однако наложение этих режимов не оказывает заметного влияния на переходные процессы скоростей (кривые 5, 6) и рассогласование моментов двигателей ВГП и НГП (кривые 3, 4).

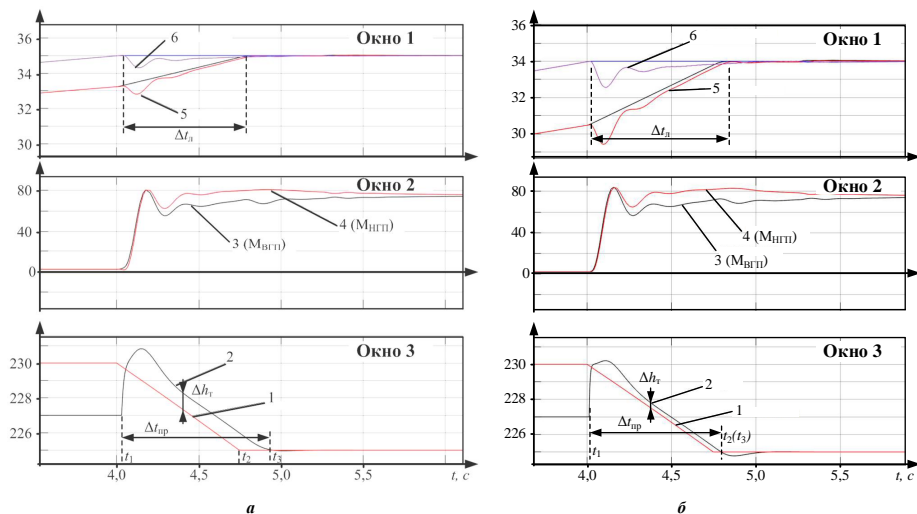


Рис. 7. Результаты моделирования при реализации проектного (а) и разработанного (б) алгоритмов управления: 1, 2 – заданная и фактическая толщина; 3, 4 – моменты верхнего и нижнего вала; 5, 6 – скорости верхнего и нижнего вала

Анализ приведенных зависимостей позволил сделать следующие выводы.

1. На **рис. 7, а** прослеживается отставание реальной толщины раската (кривая 2) от заданной (кривая 1). Это приводит к ошибке регулирования толщины в квазиустановившемся режиме профилирования $\Delta h_1=0,35\%$. Расчетные кривые с достаточной точностью повторяют процессы на осциллограммах, **рис. 3**, что косвенно подтверждает адекватность модели исследуемому объекту. Различие в конкретных значениях параметров в фиксированных точках объясняется различием начальных условий в эксперименте и при моделировании. 2. Отличием анализируемых процессов на **рис. 7, б** является значительное снижение (практически отсутствие) задержки регулирования толщины, в результате ошибка регулирования приближается к нулю ($\Delta h_1 \approx 0,05\%$). Это происходит благодаря введению положительной связи по заданию толщины на вход регулятора положения ГНУ (см. **рис. 4**).

3. Установившиеся рассогласования моментов (кривые 3 и 4) в режиме формирования «лыжи» в интервале $\Delta t_n = t_2 - t_1$ на обоих рисунках одинаковы и составляют 12,5% ($M_{НПП}=80\%$ при $M_{НПП}=70\%$). Это объясняется тем, что совершенствование алгоритмов «лыжеобразования» и деления нагрузок не предусмотрено.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают повышение точности и увеличение быстродействия регулирования толщины, что приводит к сокращению протяженности разнотолщинного участка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На завершающем этапе выполнены экспериментальные исследования точности регулирования толщины в режиме профилированной прокатки. Для этого в АСУ ТП стана 5000 внедрен алгоритм, реализующий предложенный способ предупреждения в САРТ. Проведены экспериментальные исследования прокатки раскатов различного сортамента, характерные осциллограммы представлены на **рис. 8**.

В результате их анализа сделаны выводы:

1. На осциллограммах в окне 1 сдвиг между заданием и актуальной толщиной $\Delta t_1 \approx 0,1$ с, т.е. по сравнению с **рис. 3** он уменьшился в 2 раза. Это обеспечено за счет формирования сигнала предупреждения. Ошибка регулирования в $\Delta h_1=1$ мм, т.е. снизилась также в 2 раза и не превышает 0,4% установившегося значения.

2. Поскольку задача повышения быстродействия системы лыжеобразования и РДН в представленной работе не решалась, графики моментов ВГП и НГП (окно 2) аналогичны графикам, представленным на **рис. 3**. Рассогласование моментов не изменилось. Как отмечалось выше, устранение данного недостатка представляет собой сложную, самостоятельную задачу.

В целом, результаты экспериментов подтвердили повышение точности регулирования толщины на головном и, как видно из **рис. 3** и **8**, хвостовом участках в режимах профилированной прокатки. Это подтверждает правильность выбора структуры САРТ и оптимальную настройку регулятора предупреждения.

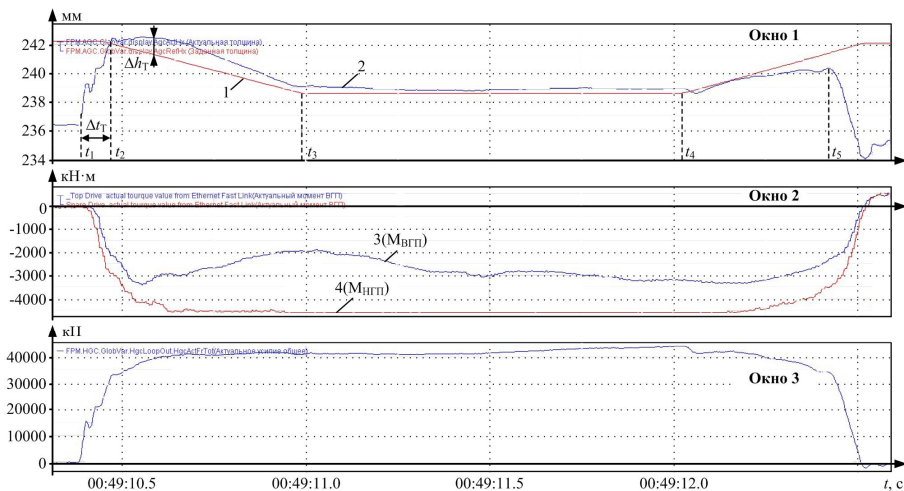


Рис. 8. Осциллограммы параметров прокатки при разработанном алгоритме САРТ (обозначения соответствуют принятым на рис. 3)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По существу, в представленной публикации впервые исследованы режимы совместной работы системы формирования двойного конического профиля «собачья кость» и системы изгиба переднего конца раската в форме «лыжи».

Следует отметить, что на осциллограммах, представленных на рис. 3, отклонения толщины от заданной находятся в пределах допуска ±1%. Поэтому необходимости повышать точность регулирования толщины в данном случае нет. Однако, как отмечалось выше, при прокатке «тяжелых» профилей с высокими очагами деформации и большими обжатиями в проходах с профилированием возникает отклонение толщины до 2,5%. В связи со сложностью проведения активного эксперимента на действующем стане зафиксировать режим профилированной прокатки заготовок такого сортамента не удалось. Вместе с тем осциллограммы, представленные на рис. 3 и 8, наглядно демонстрируют возможность совершенствования проектного алгоритма САРТ и эффективность предложенного способа регулирования. Представленные результаты, хотя и носят качественный характер, не ставят под сомнение приведенные рассуждения и сделанные выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически и экспериментально подтверждено, что проектный алгоритм САРТ обеспечивает высокую точность регулирования толщины в установившемся режиме прокатки. Однако при принудительном перемещении НУ в режиме профилирования возникает запаздывание сигнала на выходе регулятора толщины. В результате появляется временной сдвиг актуальной толщины относительно задания, что подтверждают расчетные зависимости и экспериментальные осциллограммы.

Для устранения данного недостатка разработан способ повышения точности регулирования толщины

раската в режиме профилированной прокатки за счет введения предупредования. Алгоритм, реализующий предупредование, технически исполнен в АСУ ТП реверсивной клетки стана 5000 и находится в опытно-промышленной эксплуатации.

Исследования, проведенные методом математического моделирования, и экспериментальные исследования на стане подтвердили снижение ошибки регулирования толщины при линейном перемещении НУ в 2 раза. С учетом того, что протяженность конического профиля на концах раската составляет от 15 до 30% общей длины, это приводит к существенному снижению разнотолщинности на концах готового листа.

Внедрение предложенного алгоритма САРТ способствует улучшению качества продукции и уменьшению обрези на головном и хвостовом участках проката. Разработанный способ управления рекомендуется для внедрения на толстолистовых прокатных станах, где реализована технология профилированной прокатки.

Работа выполнялась в рамках госзадания Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (№ 13.9656.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Hashimoto T. Прокатка листа с формированием промежуточного профиля «собачья кость» // Adv. Mater. and Process, 1989. №2. P. 386.
3. Development of new plane view control technique in plate rolling (NCC-DBR) // Nippon Kokan Technical Report. 1983. No.39. P. 21-30.
4. Heary plates with special process design to meet extreme customer requirements / Oswald W., Streisselberger A.,

- Thul R., Nehrenberg M.-J., Kirsch J. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2. Dusseldorf, 1994. P. 42-51.
5. New developments in improving shape control, yield and flexibility of heavy plate mills / Aqrusti K., De Vito A., Liq-uory A.G., Paolicchi M. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2. Dusseldorf, 1994. P. 86-92.
 6. Nomiya Y., Yazawa Takeo, Yasui Hirotsugu. Latest Plate Production Technology of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation // Nippon Steel & Sumitomo metal technical report. No.110. September 2015. P. 8-16.
 7. Басков С.Н., Карандаев А.С., Осипов О.И. Энергосиловые параметры приводов и разработка систем профилированной прокатки слэбов стана 2800 // Приводная техника. 1999, № 1-2. С. 21-24.
 8. Гасияров В.Р. Согласование скоростей электроприводов и гидравлических нажимных устройств при автоматическом контроле профиля раската // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(1). С. 22-29. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(1)-22-29.
 9. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (ME-ACS). 2015. 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
 10. 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-2014). Novosibirsk. 2014. Vol. 1. Pp. 88-94. DOI 10.1109/APEIE.2014.7040794.
 11. Prinz K., Steinboeck A., Müller M., Ettl A., Kugi A. Automatic gauge control under laterally asymmetric rolling conditions combined with feedforward, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 3, pp. 2560-2568, 2017. DOI: 10.1109/TIA.2017.2660458.
 12. Identification and optimization for hydraulic roll gap control in strip rolling mill / SUN Jie, CHEN Shu-zong, HAN Huan-huan, CHEN Xing-hua, CHEN Qiu-jie, ZHANG Dian-hua // J. Cent. South Univ. (2015) 22: 2183-2191/ DOI: 10.1007/s11771-015-2742-0.
 13. John P, Nicholas S.S, Marwan A.S. A new strategy for optimal control of continuous tandem cold metal rolling. IEEE Transactions on Industry Application, 2010, 46(2), pp. 703-711.
 14. Modeling and control of plate thickness in hot rolling mills / Roland Heeg, Andreas Kugi, Olivier Fichet, Laurent Irsatorza, Christophe Pelletier // IFAC Proceedings Volumes. Vol. 38, Issue 1, 2005, pp. 13-18. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01681.
 15. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 506 с.
 16. Diego Alvarez, Alberto B. Diez, Faustino Obeso. Slab curvature compensation in hot rolling mill by means of Fuzzy Control, Paper at the III seminar on rolling Mill Rolls, Institute Latinoamericano del Fierro v Acero, Maxico, March, 9, 1988.
 17. Ji Yafeng, Zhang Dianhua, Chen Shuzong, Sun Jie, LI Xu, Di Hongshuang. Algorithm Design and Application of Novel GMAGC based on Mill Stretch Characteristic Curve, Journal of Central South University March 2014, Vol. 21, Issue 3, pp. 942-947.
 18. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2005. 300 с.
 19. Плотноков Ю.В., Поляков В.Н. Системы управления электроприводами постоянного тока (преобразователь Sinamics DCM): учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 96 с.
 20. <http://bssystem.ru/Portals/0/store/docs/f1055642-9184-4742-b677-e55c51ca15ce.pdf>.
 21. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1971. 380 с.
 22. Целиков А.И. Полухин П.И., Гребеник В.М. Машины и агрегаты металлургических заводов. Машины и агрегаты для производства проката. М.: Металлургия, 1988. т. 3. 680 с.
 23. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолистового прокатного стана / С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов // Изв. вузов. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 6. С. 55-64.
 24. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Mathematical Modeling of Mechatronics System "Hydraulic Screwdown Mechanism - Electric Drive of Rolling Mill Stand", 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, 361, 012020. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012020.
 25. Гасияров В.Р., Маклакова Е.А. Математическое описание главного электропривода толстолистового стана 5000 горячей прокатки // Russian Internet Journal of Electrical Engineering. 2015. Vol. 2, no. 3, pp. 62-66.
 26. Шохин В.В., Пермьякова О.В., Кисель Е.С. Исследование электромеханической системы прокатной клетки // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №23. С. 40-43.
 27. Reifenstal U., Nguzen Hong Ha, Bannack A. Beseitigung der Ebenheitsabweichungen im Walzgut bei Umkerwalymaschinen in Twindrive-Ausführung durch eine Winkelgleichlaufregelung der Antiebsstränge Magdeburg, 1996. 44 p.

Поступила в редакцию 11 декабря 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE CONTROL ACCURACY OF THE STRIP PLATE DURING SHAPED ROLLING USING ELECTRIC AND HYDRAULIC DRIVES

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.

Stanislav S. Voronin

Assistant Professor, the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

It is important to reduce the amount of metal waste caused by scrap edge and scrap ends in the process of rolling at plate rolling mills. The influence of the correlation of the elongation ratio during drawing and spreading on the geometric shape of the strip plate was estimated. The paper shows the advantages of rolling process forming a double-cone profile at the head and tail sections. The ASC technology was introduced, which makes use of the multipoint strategy of thickness setting along the strip plate length. The importance of improving the accuracy of automatic control of position of screw-down structures and thickness was established when this strategy is used. The paper shows the structure and characteristics of the thickness automatic control system of the plate mill 5000. The analysis of oscillograph records of the strip plate thickness was carried out during the shaping pass for the current settings of the thickness automatic control system. Some deviations were recorded, which were caused by the lag of the regulating signal with respect to the actual deviation of thickness during displacement of the screw-down structures. To improve the response speed of the thickness automatic control system and to reduce the dynamic lag, a method of thickness control with pre-control was offered. The research group considered the double-circuit thickness automatic control system with the feed forward control of the target signal and established the transfer function of the pre-control channel. The paper demonstrated the structure of the simulation model of interrelated electric systems of a reverse rolling stand providing the opportunity of the joint research of shaped rolling and forming of a bend at the head end of the strip plate. The circuits of individual blocks of the model were considered. Comparative analysis of time curves of the strip plate thickness was carried out for the implementation of the design and the developed control algorithms and the increase in the response speed of the thickness automatic control system was proved. The paper demonstrates the oscillograph records obtained during the implementation of the developed algorithm in the automatic process control system of the reverse stand of the plate mill 5000. As a result of their comparison with the oscillograph records of the designed settings of the thickness automatic control system, it was proved that the accuracy of the thickness control improved. The paper notes that the main technological advantage of implementation of the developed algorithm is improving of the final product quality.

Keywords: plate mill, reverse rolling stand, shaped rolling, automatic thickness control, system, accuracy, pre-control, method, structure, simulation model, development, simulation, experimental investigation, implementation.

REFERENCES

1. 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.
2. Hashimoto T. Rolling of strip with the intermediate shape of a dogbone // Adv. Mater. and Process, 1989, no. 2, 386 p.
3. Development of new plane view control technique in plate rolling (NCC-DBR) // Nippon Kokan Technical Report. 1983, no. 39, pp. 21-30.
4. Heavy plates with special process design to meet extreme customer requirements / Oswald W., Streisselberger A., Thul R., Nehrenberg M.-J., Kirsch J. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2.- Dusseldorf, 1994. pp. 42-51.
5. New developments in improving shape control, uield and flexibility of heavy plate mills / Agrusti K., De Vito A., Liq-uory A.G., Paollichi M. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2. Dusseldorf, 1994. pp. 86-92.
6. Latest Plate Production Technology of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation / Yuji Nomiya, Takeo Yaza-wa, Hirotsugu Yasui // Nippon Steel & Sumitomo metal technical report, no. 110, September 2015, pp. 8-16.
7. Baskov S.N., Karandaev A.S., Osipov O.I. Electric power parameters of electric drives and development of systems of forming rolling of slabs for 2800 rolling mill // *Privodnaya tekhnika* [Electric drive equipment], 1999, no. 1-2, pp. 21–24. (In Russian)
8. Gasiyarov V.R. Adjustment of speeds of electric drives and hydraulic screw-down structures at automatic control of the strip plate shape. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekxy* [Electrotechnical systems and complexes], 2018, no. 4(41), pp. 22-29. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-22-29. (In Russian)
9. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), 2015, 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
10. 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 Insrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk, 2014. Vol. 1. P. 88-94. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040794.
11. Prinz K., Steinboeck A., Müller M., Etl A., Kugi A. Automatic gauge control under laterally asymmetric rolling conditions combined with feedforward, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 3, pp. 2560–2568, 2017. DOI: 10.1109/TIA.2017.2660458.
12. Identification and optimization for hydraulic roll gap control in strip rolling mill / SUN Jie, CHEN Shu-zong, HAN Huanhuan, CHEN Xing-hua, CHEN Qiu-jie, ZHANG Dian-hua // J. Cent. South Univ. (2015) 22: 2183–2191/ DOI: 10.1007/s11771-015-2742-0.
13. John P., Nicholas S.S., Marwan A.S. A new strategy for optimal control of continuous tandem cold metal rolling. IEEE Transactions on Industry Application, 2010, 46(2), pp. 703–711.
14. Modeling and control of plate thickness in hot rolling mills / Roland Heeg, Andreas Kugi, Olivier Fichet, Laurent Iras-torza, Christophe Pelletier // IFAC Proceedings Volumes. Vol. 38, issue 1, 2005, pp. 13-18. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01681.
15. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovyye litino-prokatnyye agregaty dlya proizvodstva stalnykh polos* [Thin slab casting and rolling plants for steel strip production]. M.: Bauman MSTU, 2003. 506 p. (In Russian)
16. Diego Alvarez , Alberto B. Diez, Faustino Obeso. Slab curvature compensation in hot rolling mill by means o Fuzzy Control, Paper at the III seminar on rolling Mill Rolls , Institute Latinoamericano del Fierro v Acero, Maxico, March, 9, 1988.
17. Ji Yafeng, Zhang Dianhua, Chen Shuzong, Sun Jie, LI Xu, Di Hongshuang, Algorithm Design and Application of Novel GMAGC based on Mill Stretch Characteristic Curve,

- Journal of Central South University March 2014, Vol. 21, Issue 3, pp. 942-947.
18. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. M.: Academy, 2005. 300 p. (In Russian)
 19. Plotnikov Yu.V., Polyakov V.N. *Sistemy upravleniya elektroprivodami postoyannogo toka* [Control systems of direct current electric drives] (Sinamics DCM converter): textbook. Yekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2017. 96 p. (In Russian)
 20. <http://bssystem.ru/Portals/0/store/docs/f1055642-9184-4742-b677-e55c51ca15ce.pdf>.
 21. Klyuchev V.I. *Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivoda* [Limitation of dynamic loads of electric drive]. Moscow: Energy, 1971. 380 p. (In Russian)
 22. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. Mashiny i agregaty dlya proizvodstva prokata* [Machines and equipment of metallurgical plants. Machines and equipment for rolling]. Moscow: Metallurgy, 1988. vol. 3. 680 p. (In Russian)
 23. Baskov S.N., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Khramshin V.R., Odintsov K.E. [Development of mathematical model of interrelated electric systems of a rolling stand of a plate mill]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electrical engineering]. 2017, vol. 60, no. 6, pp. 55–64. (In Russian)
 24. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Mathematical Modeling of Mechatronics System "Hydraulic Screwdown Mechanism - Electric Drive of Rolling Mill Stand". 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, 361, 012020. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012020.
 25. Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Mathematical description of the main electric drive of the hot plate rolling mill 5000. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 62–66.
 26. Shokhin V.V., Permyakova O.V., Kisel E.S. Investigation of electrical system of a rolling stand. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2014, no. 23, pp. 40–43. (In Russian)
 27. Reifenthal U., Nguyen Hong Ha, Bannack A. Beseitigung der Ebenweits-abweichungen im Walzgut bei Umkerwalymaschinen in Twindrive-Ausführung durch eine Winkelgleichlaufregelung der Antiebsstränge Magdeburg, 1996, 44 p.

Гасияров В.Р., Логинов Б.М., Воронин С.С. Повышение точности регулирования толщины раската в режиме профилированной прокатки средствами электро- и гидропривода // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 43-53. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-43-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-43-53)

Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Voronin S.S. Improving the Control Accuracy of the Strip Plate During Shaped Rolling Using Electric and Hydraulic Drives. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 43-53. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-43-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-43-53)