

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТНОГО СТАНА

В.Р. Гасияров¹, Б.М. Логинов², С.С. Воронин¹, М.А. Зинченко^{1, 2}

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

² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия

При расширении сортамента продукции толстолистовых прокатных станов приобретает актуальность проблема совершенствования алгоритмов управления приводами мехатронной системы реверсивной клетки. Важнейшими задачами являются повышение точности геометрических размеров, а также улучшение профиля и планшетности проката. Представлена структура, поясняющая концепцию ROLL-GAP CONTROLL автоматического регулирования толщины и зазора валков фирмы SMS-Demag AG. Данная концепция реализована на стане 5000 Магнитогорского металлургического комбината. Приведена структурная схема системы расчета и автоматического регулирования толщины (САРТ). Рассмотрена функциональная схема системы регулирования положения гидравлических нажимных устройств Hydraulic Gap Control (HGC), включающая быстродействующий канал пропорционального регулирования и относительно медленный канал интегрального регулирования положения. Рассмотрен принцип автоматического регулирования толщины, реализованный в ресурсе системы Automatic Gap Control (AGC) контроллера TCS клетки. Представлены схема и зависимости для вычисления коэффициентов нелинейного регулятора толщины. Отмечены функции RAS-регулятора, предназначенного для компенсации разницы растяжений (перекоса) зазора по сторонам клетки. Рассмотрены функции системы динамической компенсации возмущающих воздействий. Обосновано исключение сигналов коррекции противогриза и деформации валков. Отмечены недостатки САРТ при прокатке листов толщиной менее 10 мм. Наиболее опасным является отрыв фрагментов металла от хвостовой части, вызванный некорректной работой системы задания толщины. Предложен способ управления гидравлическими нажимными устройствами, суть которого заключается в быстродействующем увеличении межвалкового зазора на «хвосте» раската в последнем проходе при прокатке тонких листов. Представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных на стане 5000. Подтверждена техническая эффективность внедрения предложенного способа управления. Рассмотрены осциллограммы сигналов, характеризующих разнотолщинность. Доказано, что при предложенных настройках систем HGC и AGC обеспечивается высокая точность регулирования положения нажимных устройств и толщины по длине и ширине листа.

Ключевые слова: толстолистовой прокатный стан, реверсивная клеть, мехатронная система, толщина, автоматическое регулирование, концепция, настройка, тонкий лист, недостатки, совершенствование, экспериментальные исследования.

Введение

Стан 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») является одним из наиболее производительных листопркатных агрегатов в Европе. Согласно проекту он предназначен для производства 1500 тыс. т в год листов размерами $(10-50) \times (2000-4600) \times (<18500)$ мм. Вместе с тем в настоящее время на стане успешно осуществляется прокатка продукции расширенного сортамента, в том числе толстых листов из труднодеформируемых марок стали и тонкого проката – листов толщиной 6–10 мм [1–4]. Также технология прокатки трубной заготовки внедрена на широкополосном стане 2000 ПАО «ММК» [5–8].

Как правило, освоение новых профилей проката наряду с решением вопросов технологического характера требует настройки и совершенствования систем автоматического регулирования технологических параметров. На совре-

менных станах такие системы исполнены в виде алгоритмов в программном обеспечении автоматизированных систем управления технологическим процессом. Поэтому решение задачи сводится к разработке и внедрению новых алгоритмов управления.

Важнейшими системами технологической автоматизации стана 5000 являются системы автоматического регулирования межвалкового зазора и толщины раската (полупродукта между исходным слябом и готовым листом) [9]. В комплексе они реализуют концепцию регулирования толщины ROLL-GAP CONTROLL, разработанную фирмой SMS Demag AG (в настоящее время – SMS group) для толстолистовых прокатных станов. Данная концепция рассмотрена в публикациях [10–13] и внедрена на стане 5000.

Принцип регулирования толщины и раствора валков поясняет функциональная схема, представ-

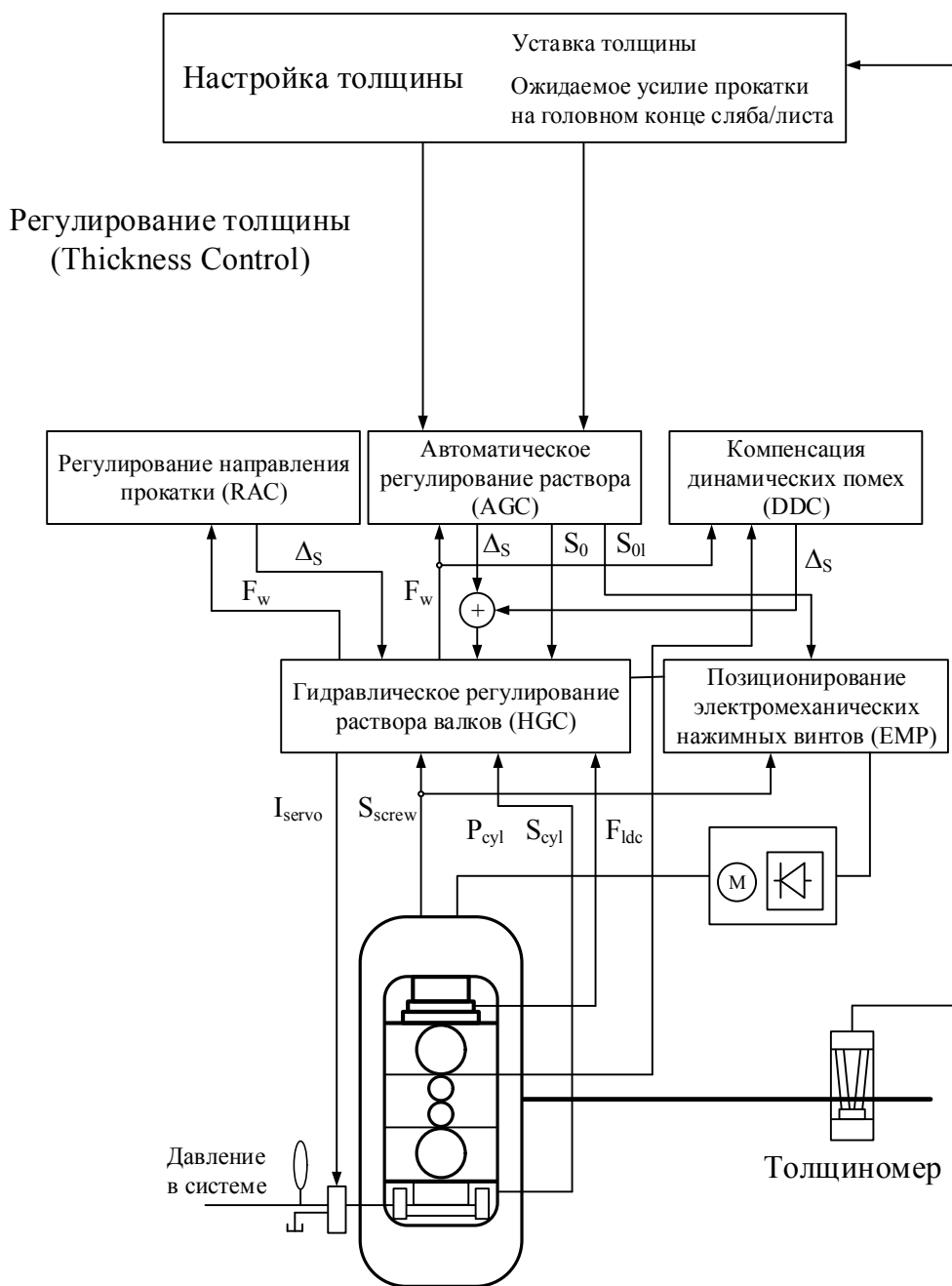


Рис. 1. Структура, поясняющая концепцию автоматического регулирования прокатного зазора и толщины листа в клетке стана 5000

ленная на рис. 1 [14]. Она состоит из следующих систем (модулей):

- гидравлического регулирования раствора валков (HGC);
- автоматического регулирования толщины (AGC);
- управления перекосом валков (RAC);
- динамической компенсации возмущающих воздействий клетки (DDC);
- позиционирования электромеханических нажимных винтов – Electro Mechanical Positioning (EMP).

Контур HGC обеспечивает выполнение следующих функций:

- регулирование положения и усилия отдельно по каждому гидравлическому цилиндру;
- плавное переключение от регулирования положения на регулирование усилия;
- синхронизацию работы цилиндров;
- адаптацию в зависимости от хода цилиндров и давления;
- активную защиту от перегрузки.

Автоматическое регулирование толщины (AGC) предназначено для поддержания постоян-

ного раствора валков путем воздействия на гидравлические нажимные устройства (ГНУ) при изменениях усилия прокатки. Возможна работа в абсолютном и в относительном режимах. В абсолютном режиме раствор валков регулируется по уставке толщины, определенной оператором, или по графику прокатки, рассчитанному в системе автоматизации уровня 2. В относительном режиме толщина раската, полученная через 0,5–1 с после начала прокатки, поддерживается на постоянном уровне по всей длине.

Также в структуре, реализующей концепцию ROLL-GAP CONTROLL, предусмотрен регулятор направления прокатки Roll Alignment Control (RAC-регулятор). В отечественных публикациях он получил название «регулятор перекося зазора валков». Его функцией является поддержание постоянства межвалкового зазора по ширине раската, т. е. обеспечение параллельности валков при нарушениях условий прокатки. Подобные регуляторы также применяются в чистовых группах клетей широкополосных станов. Варианты их разработки представлены в публикациях [15–18].

Также решению этой проблемы посвящены разработки [19, 20].

Структура задания толщины в САПТ стана 5000

Схема формирования сигнала задания толщины показана на рис. 2 [21]. Основу структуры составляют два контура регулирования: внутренний контур регулирования положения гидравлических НУ и внешний контур регулирования толщины. Конечной функцией является компенсация деформации клетки и различных возмущений, вызванных отклонениями технологических параметров во время прокатки. Внешний контур образован регулятором толщины, на входе которого сравниваются сигнал задания, поступающий (с учетом коррекций) от модели уровня 2, и сигнал актуальной толщины. Толщина определяется как сумма средних зазоров, формируемых гидравлическими и электромеханическими нажимными устройствами, и растяжения клетки. Сигнал, пропорциональный растяжению, формируется как нелинейная функция суммарного усилия прокатки, определяемая характеристикой жесткости клетки [22].

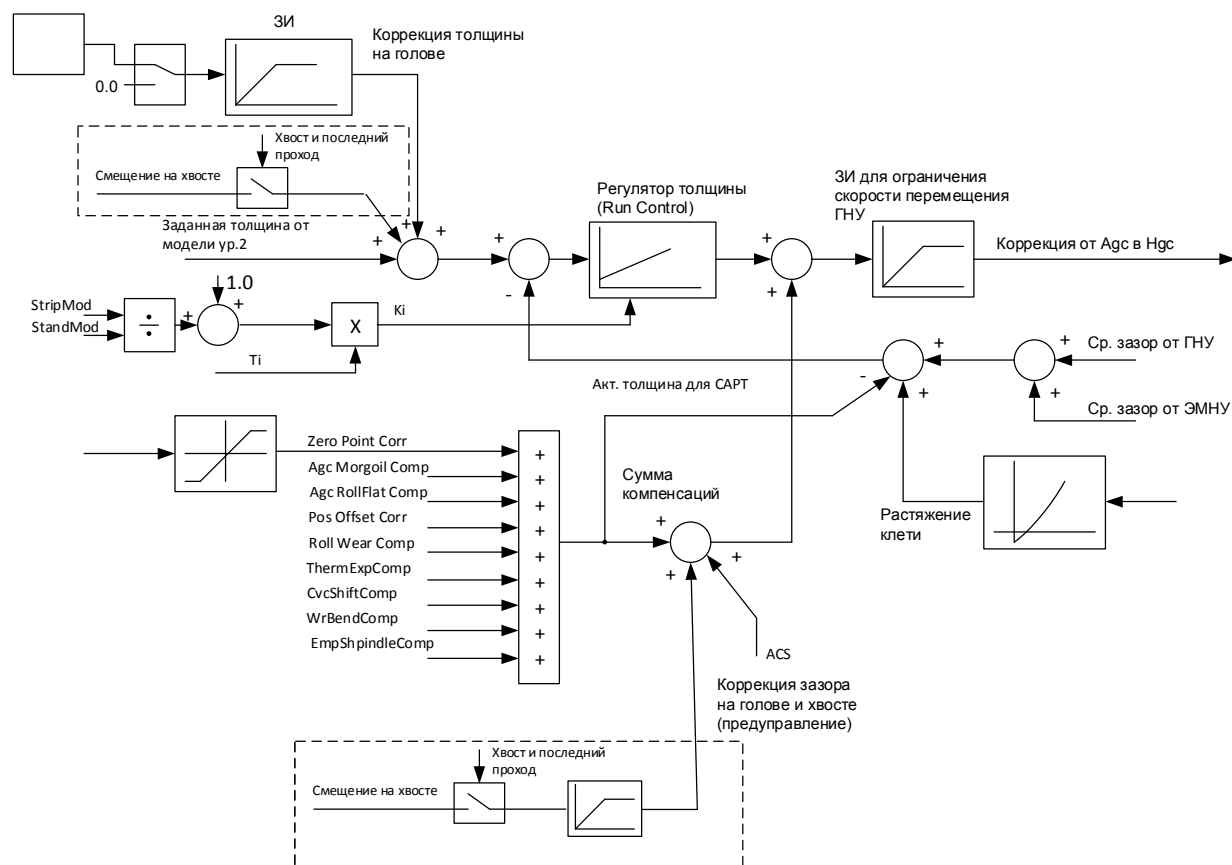


Рис. 2. Структурная схема системы задания толщины в САПТ стана 5000:

Zero Point Corr – коррекция толщины, формируемая после сравнения реальной толщины от толщиномеров и заданной толщины (компенсирует статическую ошибку при косвенном расчете толщины); Agc Morgoil Comp – компенсация толщины масляной пленки подшипников жидкостного трения опорных валков; Agc Roll Flat Comp – компенсация смятия валков; Roll Wear Comp – компенсация износа валков (от модели на уровне 2); ThermExpComp – компенсация теплового расширения валков (от модели нагрева вала); CvcShiftComp – компенсация влияния осевой сдвижки валков; WrbBendComp – компенсация влияния противоизгиба валков; EmpShpindleComp – компенсация влияния веса шпинделей

Регулятор толщины имеет переменные коэффициенты усиления, зависящие от модулей жесткости клетки и полосы (его структура рассматривается ниже). Актуальная толщина рассчитывается по сигналам датчиков положения HGC, EMP, распределения зазора по сторонам привода и оператора (DS и OS), растяжения клетки и возмущающих воздействий (толщины масляной пленки в подшипниках, теплового расширения, износа валков и др. [23]). Его выходной сигнал суммируется с сигналами компенсаций возмущений и коррекции зазора на головном и хвостовом участках. Далее он поступает на вход задатчика интенсивности (ЗИ), ограничивающего скорость перемещения гидравлических НУ. Выходной сигнал ЗИ является входным сигналом подчиненного контура регулирования положения НУ (на схеме, рис. 2, не показан).

Более подробно работа систем регулирования раствора валков и САРТ рассмотрена в работах [21, 24]. Структуры и настройки систем представлены в публикациях [14, 25–27],

Помимо перечисленных модулей в структуру на рис. 1 входят системы EMP и контроля конусообразности, функции которых в настоящей статье не рассматриваются.

1. Постановка задачи

Длительная эксплуатация САРТ стана 5000 подтвердила ее надежность и удовлетворительную точность регулирования параметров в установившемся режиме прокатки. Вместе с тем при производстве листов расширенного сортамента обнаружен ряд недостатков, для устранения которых потребовалось совершенствование алгоритмов.

Так, при прокатке тонких листов обнаружены следующие недостатки (к тонким отнесены листы толщиной менее 10 мм):

1. Наблюдаются отклонения реальной толщины, измеренной толщиномером после последнего прохода, в то время как в сигнале толщины, опре-

деленном косвенным способом и используемом в САРТ, такие отклонения отсутствуют.

2. Для обеспечения требуемой толщины автоматически устанавливается минимальный зазор (в некоторых случаях наблюдается предварительно сведение валков с усилием). Поскольку в последних проходах толщина листа мала, хвостовая часть успевает остыть. Для компенсации потери температуры регулятор толщины автоматически уменьшает зазор за счет дополнительного сведения валков. В результате сильного прижатия происходит отрыв кусков хвостовой части, которые обладают большой кинетической энергией. В результате возникают повреждения оборудования и создаются опасные условия для персонала. Это подтверждают фотографии, приведенные на рис. 3.

Устранение указанных недостатков потребовало совершенствования алгоритмов регулирования толщины. Ниже рассматриваются предложенные технические решения и результаты их промышленных испытаний. Предварительно приводится информация о настройке регуляторов систем HGC и AGC.

2. Основная часть

Управление гидравлическими нажимными устройствами

Все ресурсы управления нажимными устройствами реализованы в контроллере TCS клетки, который обеспечивает управление последовательностью прокатки, скоростью, сбор данных о температуре, слежение за заготовками в горячей зоне, управление охлаждением валков и гидросбивом.

Как отмечалось, система Hydraulic Gap Control служит для точной установки зазора валков и воздействия на зазор для регулирования толщины раската в процессе прокатки. Схема управления HGC показана на рис. 4. Также в ресурсе системы осуществляется распределение зазора между EMP и HGC.



Рис. 3. Отрыв фрагмента хвостовой части листа

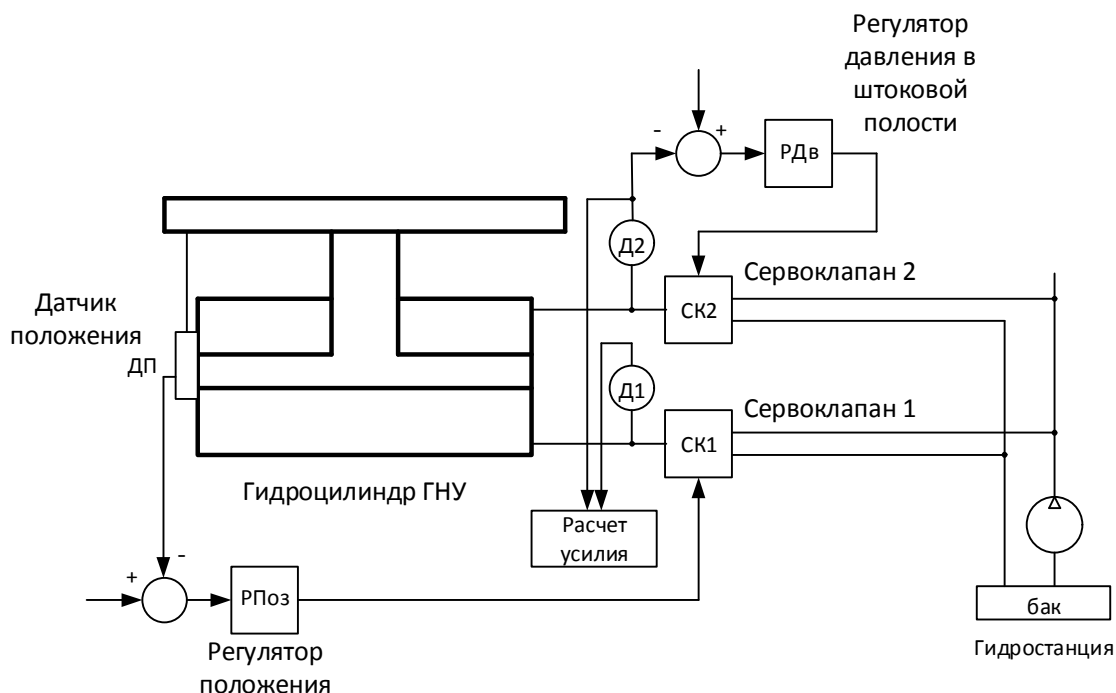


Рис. 4. Упрощенная схема управления НГС

Система работает в режиме контроля положения, регулируя зазор валков или ход поршня. В режиме калибровки дополнительно используется регулирование усилия гидроцилиндра. Регулятор положения НГС (РПоз) воздействует на сервоклапан СК1 нижней полости цилиндра. Для обратной связи по положению используются специальные датчики положения (ДП) с блоком обработки сигналов. Каждый цилиндр имеет два датчика положения. Сигналы усилия прокатки могут сниматься с датчиков усилия прокатки (мездоз) или могут быть вычислены по сигналам от датчиков давления масла (Д1, Д2). Для стабилизации давления в штоковой полости используется дополнительный контур регулирования давления. Регулятор давления (РДв) воздействует на сервоклапан СК2. В рабочем режиме поддерживается давление 30 бар, в режиме слива (сжатия цилиндра) – 120 бар.

От быстродействия НГС зависит точность регулирования толщины. Динамические характеристики контура положения (регулирования зазора) можно оценить по реакции системы на скачок задания. Такой тест проводится автоматически при калибровке зазора. Переходный процесс при обработке скачка задания показан на рис. 5. Из осциллограмм в окне 1 видно, что контур регулирования зазора НГС можно аппроксимировать фильтром 1-го порядка с постоянной времени 10–15 мс.

Структурная схема регулятора НГС показана на рис. 6. С помощью селектора в зависимости от режима работы на его вход подается сигнал ошибки регулирования (по усилию, по величине зазора или по ходу цилиндра). Регулятор в основном ра-

ботает как пропорциональный усилитель. В его структуре имеется медленная интегральная часть, имеющая ограничение порядка 10 %, не оказывающая влияния в динамике. Она служит для компенсации статических отклонений, в частности, для компенсации смещения нуля сервоклапана.

Коэффициенты усиления пропорциональной части зависят от давлений в цилиндре и в системе и определяются в соответствующем блоке контроллера по формулам:

$$K_{pp} = K_{pp_in} \cdot \sqrt{\frac{P_{sys} - P_{sym}}{P_{sys} - P_{cyl}}},$$

$$K_{pn} = K_{pn_in} \cdot \sqrt{\frac{P_{sym} - P_{tnk}}{P_{cyl} - P_{tnk}}},$$

где K_{pp_in} , K_{pn_in} – установленные коэффициенты усиления для движения с положительным и отрицательным открытием клапана;

P_{sys} , P_{syl} , P_{tnk} – давления в гидросистеме, цилиндре и баке;

P_{sym} – точка симметричного давления.

При наладке выставлено $P_{sys} = 290$ бар; $P_{sym} = 145$ бар; $P_{tnk} = 7$ бар; $K_{pp_in} = K_{pn_in} = 270$ – при наличии металла в клетке и $K_{pp_in} = K_{pn_in} = 210$ – при отсутствии металла.

Сигнал Overload protection поступает от регулятора перегрузки и служит для открытия зазора при перегрузке по усилию. Этот регулятор представляет собой интегратор, на вход которого подается максимальное из усилий по сторонам за вычетом половины уставки защиты. Выходной сигнал начинает нарастать при превышении усилием на любой из сторон половины уставки защиты.

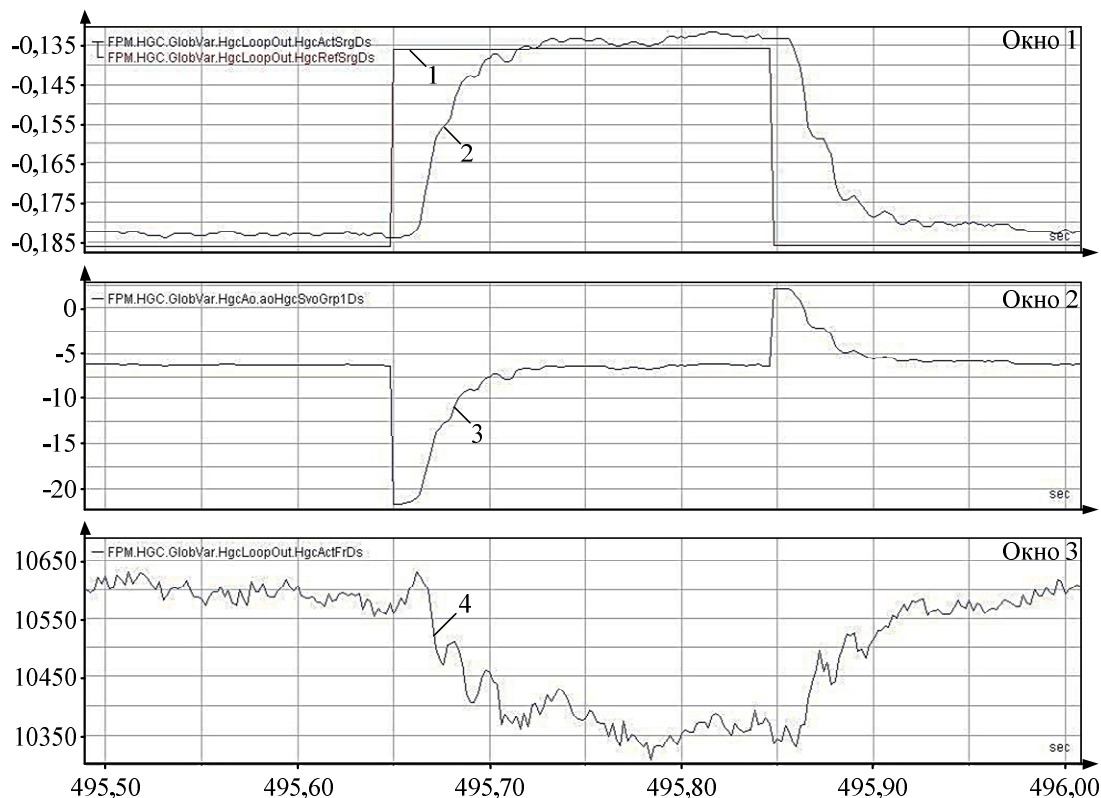


Рис. 5. Реакция контура регулирования положения НГС на скачок задания:
1, 2 – заданное и фактическое положения НУ (заданный и фактический зазор);
3 – задание на сервоклапан; 4 – усилие в гидроцилиндре

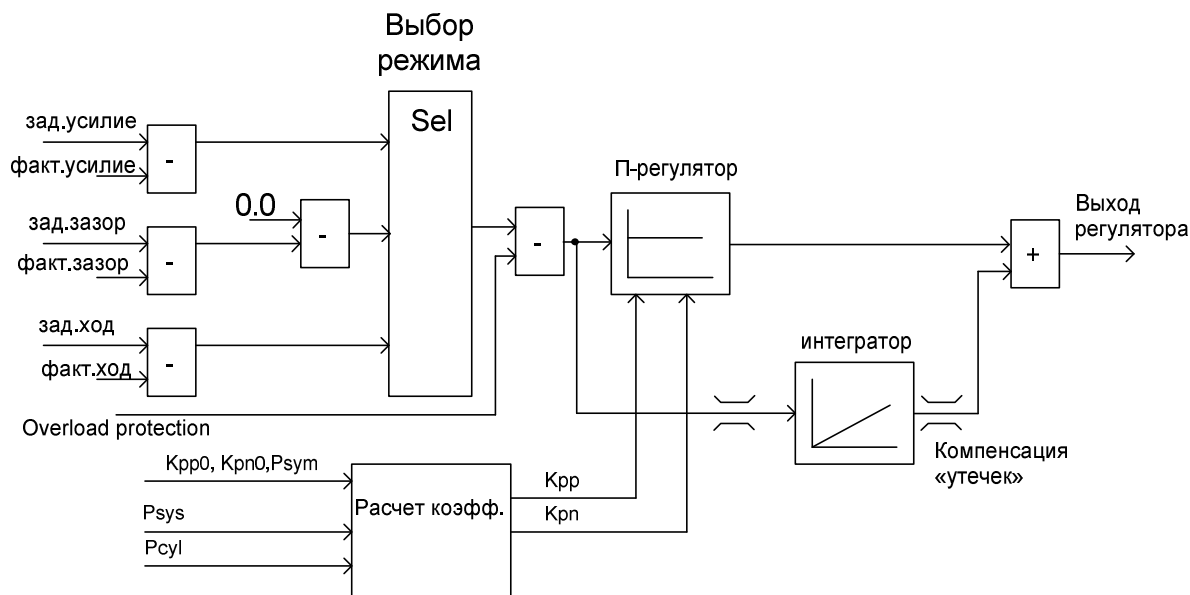


Рис. 6. Структура регулятора положения гидравлических НУ

Регулирование толщины полосы

Управление толщиной осуществляется в ресурсе АГС. Фактическая толщина рассчитывается по сигналам датчиков положения НГС и EMP, растяжения клетки и других упомянутых выше возмущающих воздействий (толщины масляной пленки и др.).

Принцип действия САРТ основан на известном уравнении Головина – Симса [28, 29]. Он поясняется характеристиками, представленными на рис. 7. Поскольку во время прокатки невозможно измерить фактический раствор валков, он рассчитывается по уравнению

$$h = S + g(F_w).$$

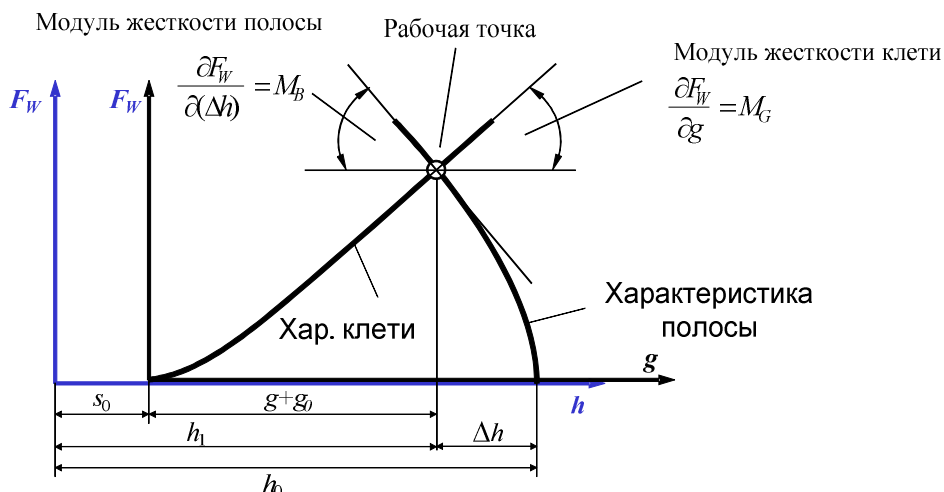


Рис. 7. Зависимость толщины на выходе клетки от величины зазора:
 h_0 – толщина на входе; h_1 – толщина на выходе; S_0 – начальный зазор валков (без металла в валках)

Таким образом, раcтвор валков h зависит от положения поршня цилиндра S и растяжения клетки g , которое является функцией усилия прокатки F_W . Задачей САРТ является компенсация колебаний растяжений клетки, вызванных процессом прокатки, согласно уравнению

$$\Delta h = \Delta S + \Delta g(F_W) = 0.$$

Приращение толщины Δh при изменении зазора ΔS_0 зависит от коэффициентов (модулей) жесткости клетки M_G и полосы M_B :

$$\Delta h = \Delta S_0 \frac{M_G}{M_B + M_G}.$$

Схема регулятора толщины (RunControl) показана на рис. 8. На его вход поступают задание

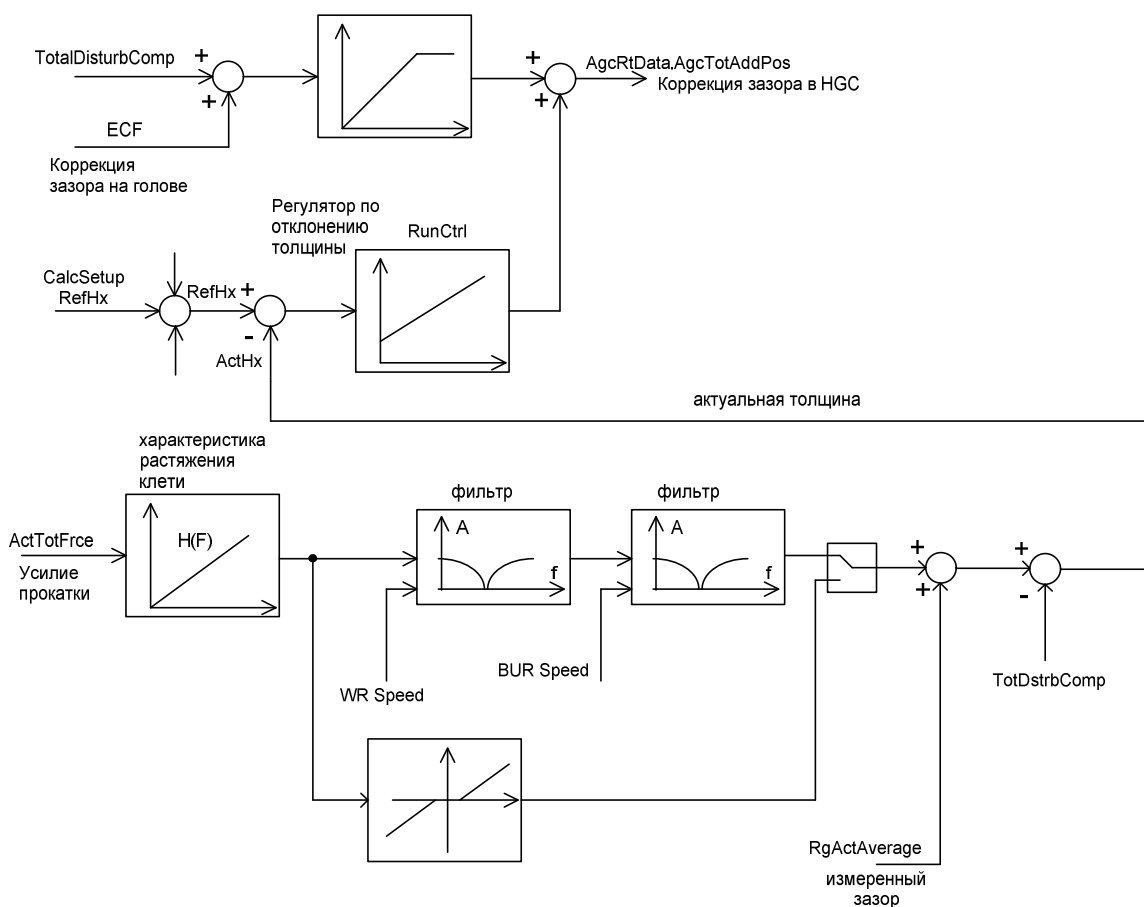


Рис. 8. Принцип построения регулятора толщины

толщины и обратная связь, формируемая по сигналам датчиков положения нажимных устройств и датчика усилия прокатки. Регулятор имеет переменные коэффициенты усиления, зависящие от модулей M_G и M_B . Коэффициенты усиления интегральной и пропорциональной частей определяются по зависимостям:

$$K_i = \left(\frac{M_B}{M_G} + 1 \right) \cdot \frac{1}{T_m};$$
$$K_p = \left(\frac{M_B}{M_G} + 1 \right) \cdot \frac{T_m - HGC}{T_m},$$

где $T_m - HGC$ – постоянная времени замкнутого контура положения HGC (0,01 с);

T_m – желаемая постоянная времени регулятора толщины (0,045 с при работе с мездозами и 0,45 с при работе с датчиками давления масла в HGC).

Модули жесткости полосы и клетки рассчитываются в приложении AgcLogicV4a в блоке ModulusV4aPM ресурса AGC. Модуль полосы рассчитывается по формуле в зависимости от ожидаемого усилия прокатки и обжатий, т. е. по данным от модели прокатки

$$M_B = \frac{ExpTotFr}{He - Hx} \cdot FactStrMod,$$

где $ExpTotFr$ – ожидаемое усилие прокатки (кН);

He – толщина на входе (мм);

Hx – толщина на выходе (мм);

$FactStrMod = 1,75$ – коэффициент.

Модуль клетки рассчитывается исходя из кривой растяжения клетки, которая снимается автоматически во время длинной калибровки (среднее рабочее значение 8300 кН/мм).

Для фильтрации эксцентриситета валков применяются режекторные фильтры с частотой фильтрации, зависящей от скоростей вращения рабочих и опорных валков. При низкой скорости вращения фильтрация отключается. Сумма сигналов регулятора и компенсации различных возмущений подается в качестве дополнительного задания на зазор HGC.

Перед захватом металла устанавливается предварительное значение зазора, которое определяется исходя из ожидаемого усилия прокатки, поступающего от модели прокатки, и модуля жесткости клетки. Заданный зазор HGC не должен достигать ограничений, которые определяются с учетом диаметров валков и положения ступенчатой плиты, обеспечивающей формирование уровня прокатки [30].

Динамическая компенсация возмущений (DDC)

В процессе прокатки возникают различные типы возмущений, связанные с отклонениями толщины. С помощью системы DDC они компенсируются путем коррекции раствора валков. Каждый вид нарушения компенсируется самостоятельно независимыми функциями.

Всплытие шеек валков в подшипниках жидкостного трения типа Mergoil

В качестве исходных параметров используются измеренные усилие и скорость вращения, которые учитываются при вычислении фактической толщины масляной пленки внутри подшипников. Известно, что чем выше скорость прокатки и чем меньше усилие, тем выше всплытие шеек опорных валков в подшипниках. Фактическая толщина масляной пленки используется для вычисления коррекции рабочего зазора ΔS (см. рис. 2).

Тепловая выпуклость рабочего валка; износ валков

Эти параметры вычисляются циклично системой контроля планшетности и профиля уровня 2 [31, 32]. Модуль DDC рассчитывает соответствующие поправки для зазора ΔS .

Изгиб рабочих валков

Влияние изгиба рабочих валков компенсируется с учетом производной $\Delta S / \Delta WRB$, которая вычисляется системой контроля планшетности и профиля и подается в контроллер вместе с настройками клетки. По ней с учетом фактического изгибающего усилия рассчитывается и формируется поправка зазора ΔS .

Более подробно функции динамической компенсации возмущающих воздействий рассмотрены в публикациях [33, 34].

Совершенствование САПТ для прокатки тонких листов

Как отмечалось при обосновании задач исследований, при прокатке тонких листов возможен отрыв фрагментов хвостовой части в последнем проходе. Для устранения данной проблемы предложен способ управления гидравлическими НУ, суть которого заключается в интенсивном увеличении межвалкового зазора на 0,5–2,5 мм в зависимости от толщины раската. При разработке за основу принят способ согласно патенту [35], аналогом данного предложения также является техническое решение [36].

Разведение валков должно обеспечиваться при выполнении следующих условий:

- осуществляется прокатка листов толщиной менее 10 мм;
- выполняется последний проход;
- остаток непрокатанной части листа в клетке менее 1,0 метра.

Для обеспечения высокого быстродействия при разведении валков предлагается в программе контроллера формировать сигналы:

- на увеличение задания толщины на входе контура регулирования толщины;
- на перемещение гидравлических НУ «в обход» регулятора толщины.

Дополнительные блоки, обеспечивающие выполнение этих условий, выделены на структурной схеме (см. рис. 2) контурами. Основной контур показан в верхней части рис. 2. При выполнении

условий «прокатка хвоста» и «последний проход» он обеспечивает подключение дополнительного сигнала на вход регулятора толщины. Одновременно подается сигнал на задатчик интенсивности, включенный на вход регулятора положения гидравлического НУ (на схеме это «ЗИ для ограничения скорости перемещения ГНУ», непосредственно регулятор положения на схеме не показан). Этот сигнал обеспечивает регулирование положения НУ, минуя регулятор толщины, и задается с целью повышения скорости разведения валков. Он обеспечивает упреждающее регулирование зазора валков при прокатке «хвоста» раската.

3. Экспериментальные исследования Настройка регулятора толщины

Эффективность рассмотренной выше настройки регуляторов подтверждают осциллограммы, представленные на рис. 9. Приняты обозначения: RefHx и ActHx (осц. 1, 2, окно 1) – соответственно заданная и фактическая толщина; AgcAddPos (осц. 3, окно 2) – выходной сигнал регулятора

толщины; TotalDistComp (осц. 4) – компенсация различных факторов, влияющих на толщину (как отмечалось, это масляная пленка в подшипнике, тепловое расширение, износ валка и др.); AgcTotAddPos (осц. 5) – корректирующий сигнал на зазор гидравлических НУ [мм]; HgcActSrgAvg (осц. 6, окно 3) – средняя величина зазора, отрабатываемого гидравлическими НУ (часть зазора которая обеспечивается их перемещением); AgcStandStretch (осц. 7, окно 4) – рассчитанное фактическое растяжение клетки [мм]; HgcActFrTot (осц. 8, окно 5) – суммарное усилие прокатки [кН].

Задание на толщину (сигнал RefHx – осц. 1) отрабатывается системой AGC (сигнал ActHx, осц. 2) практически без ошибки в течение основного периода прокатки. Наибольшие отклонения толщины происходят на головном и хвостовом участках. Это объясняется физическими свойствами полосы и переходными процессами в системах регулирования. При их обработке возникают значительные отклонения корректирующего сигнала на зазор (AgcTotAddPos, осц. 5). Данный сигнал, согласно

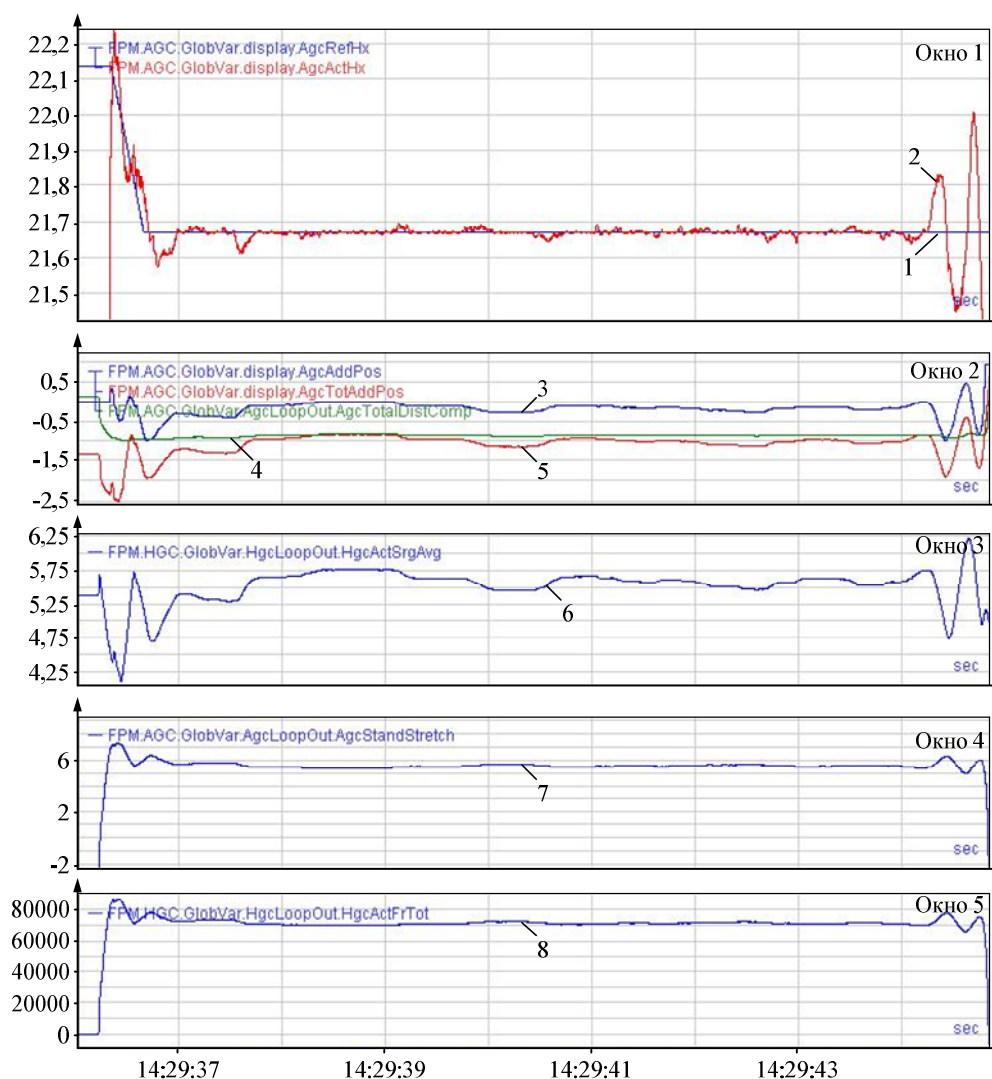


Рис. 9. Осциллограммы, поясняющие настройку регулятора толщины

рассмотренному принципу регулирования, формируется как сумма выходного сигнала регулятора толщины (AgcAddPos, осц. 3) и сигнала TotalDistComp (осц. 4), обеспечивающего компенсацию возмущающих факторов. Сигналы растяжения клетки AgcStandStretch (осц. 7) и суммарного усилия прокатки HgcActFrTot (осц. 8) идентичны друг другу. Это подтверждает, что коэффициенты, рассчитанные по приведенным выше зависимостям, обеспечивают линейные характеристики регуляторов и измерительных систем.

Осциллограммы коррекции толщины

На рис. 10 приведены осциллограммы регулирующих воздействий в системе DDC, полученные на стане. Они используются в системе расчета толщины, представленной на рис. 2. Независимые сигналы коррекции подаются на вход суммирую-

щего блока. Выходной сигнал блока суммируется с сигналом коррекции зазора на головном и хвостовом участках и с сигналом ACS на перемещение гидравлических НУ при профилированной прокатке [37, 38]. Суммарный сигнал «Коррекция от AGC и HGC» подается на входы замкнутых контуров регулирования положения гидравлических НУ по сторонам DS и ОС, которые на рис. 2 не показаны [39].

Осциллограммы представлены для случая, когда для расчета сигналов компенсаций противозгиба и деформаций (смятия) валков использовано фактическое усилие. Это вызвано тем, что для расчета реальных сигналов используется актуальное усилие прокатки $f(F_{пр.акт})$ – осциллограммы 8 и 9. При прокатке тонких листов сигнал толщины 13 в исходной схеме не реагирует на фактическое

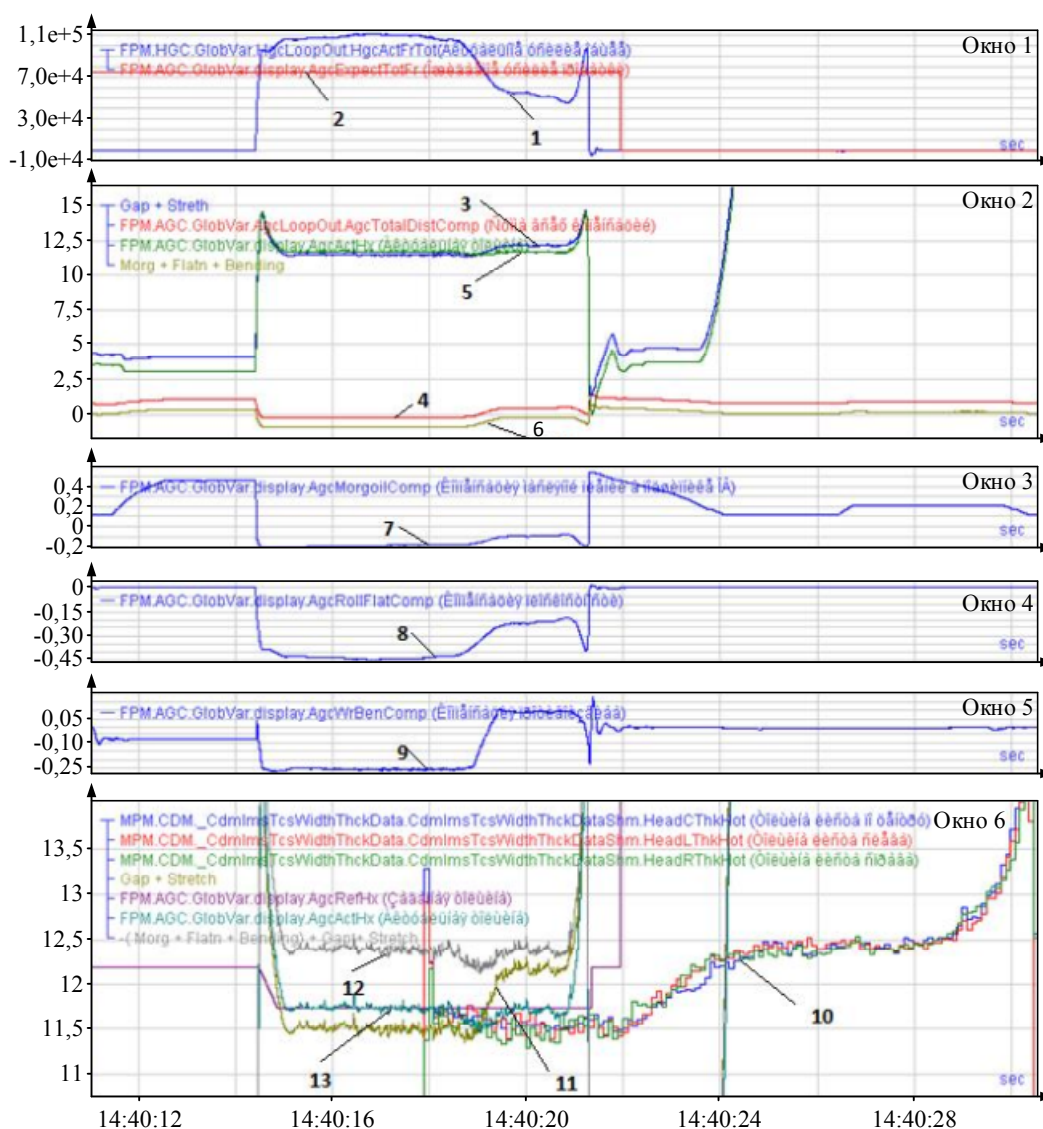


Рис. 10. Осциллограммы сигналов, используемых при расчете толщины:

- 1, 2 – заданное и ожидаемое усилие прокатки; 3 – суммарный сигнал зазора и растяжения клетки; 4 – сумма компенсаций толщины; 5 – толщина, измеренная косвенным способом; 6 – суммарный сигнал компенсации масляной пленки, деформации и изгиба валка; 7, 8 – сигналы компенсации масляной пленки и деформации валка; 9 – компенсация изгиба валка; 10 – толщина от толщиномера; 11 – сумма зазора и растяжения клетки; 12 – сумма всех корректирующих сигналов; 13 – суммарный сигнал толщины, определенной косвенным способом

Электромеханические системы

отклонение толщины (это подтверждает сравнение осциллограмм 10 и 13). Для корректной работы САРТ при расчете этих сигналов предложено использовать не актуальные значения усилий, а прогнозные величины, поступающие от модели уровня 2. Как показали результаты экспериментов, это позволило повысить точность регулирования толщины. Данное решение явилось первым усовершенствованием проектного варианта САРТ.

Прокатка с разведением валков

Осциллограммы, полученные при исследованиях второго предложенного способа, представлены на рис. 11. В окне 1 (рис. 11а) показана осциллограмма положения «хвоста» (наклонная линия, осц. 1) относительно положения клетки (горизонтальная линия, осц. 2). За один метр до конца раската в момент времени t_1 увеличивается сигнал

задания толщины (осц. 3). В результате в интервале времени t_1-t_2 изменяются задания позиций НУ (осц. 5, 6), и происходит перемещение поршней гидроцилиндров со стороны привода и оператора (СП и СО на осц. 7, 8). Общее усилие прокатки (осц. 9) уменьшается, благодаря этому снижается вероятность отрыва «хвоста» листа.

На рис. 11б представлены осциллограммы изменения толщины, построенные по сигналам толщиномера. Отклонение толщины в результате дополнительного разведения валков на «хвосте» не превышает 1 мм или 10 % выходной толщины листа. Это подтверждают осциллограммы заданной толщины (осц. 3). Хвостовая часть заготовки с отклонениями толщины длиной $\Delta l \approx 0,4$ м отрезается на линии отделки. Практика показывает, что обрезка такого участка листа производится прак-

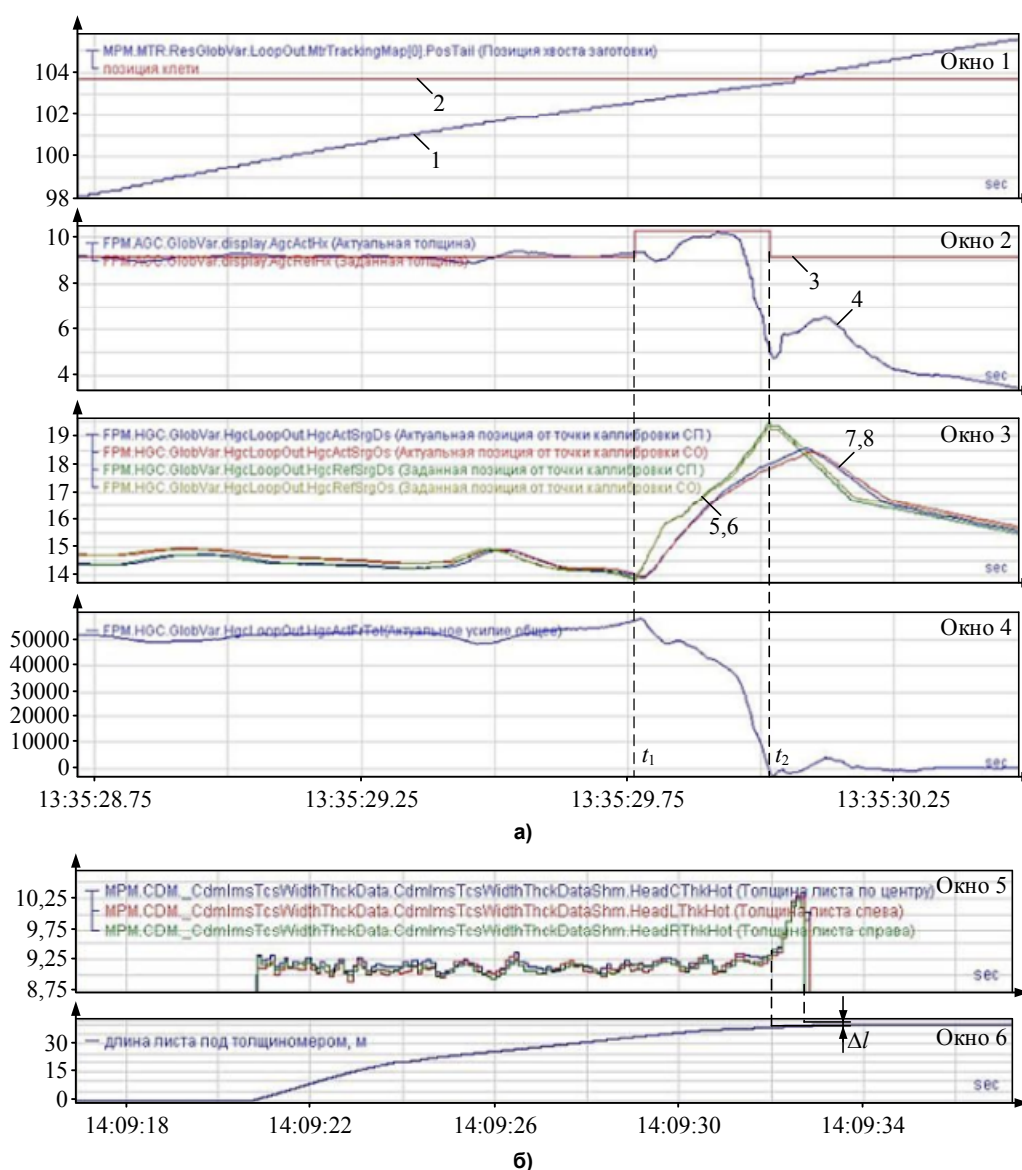


Рис. 11. Осциллограммы параметров НУ (а) и толщины по длине листа (б) при внедрении предлагаемых изменений: окно 1 – позиция «хвоста» (из системы слежения) относительно позиции клетки; окно 2 – актуальная и заданная толщина в САРТ; окно 3 – позиции гидравлических НУ относительно точки калибровки; окно 4 – усилие прокатки; окно 5 – толщина по центру и по краям листа

тически во всех случаях, так как он содержит дефекты качества. Поэтому предложенный способ фактически не приводит к увеличению потерь металла с обрезью. Кроме того, осциллограммы в окне 5 позволяют сделать вывод, что толщина по краям и по центру листа изменяется практически одинаково. Помимо точности регулирования толщины это подтверждает удовлетворительную настройку RAS-регулятора.

Разработанный способ позволил повысить безопасность персонала и увеличить надежность работы механизмов.

Заключение

Изложенная информация позволила сделать обобщения, представленные ниже.

Расширение сортамента толстолистовых прокатных станов происходит не только в направлении прокатки листов из хладостойких труднодеформируемых сталей, но и в направлении производства относительно тонких листов, которое не было предусмотрено проектом. Так, на стане 5000 ПАО «ММК» успешно ведется прокатка листов толщиной 6–10 мм (согласно проекту, минимальная толщина составляет 10 мм).

Для освоения новых сортов тов выполняются совершенствование алгоритмов управления мехатронным комплексом клетки, в том числе системы ROLL-GAP CONTROLL автоматического регулирования толщины и зазора валков. В представленной публикации рассмотрены настройки контуров AGC и HGC, составляющих основу этой системы. Впервые подробно представлена настройка регуляторов положения НУ и автоматического регулирования толщины с учетом изменений, внесенных в процессе эксплуатации. Приведены осциллограммы, подтвердившие техническую эффективность предложенной настройки.

Отмечены два недостатка, обнаруженные при прокатке тонких листов. Одним из них является различие толщины, измеренной толщиномером после последнего прохода, и аналогичного параметра, используемого в САРТ, определенного косвенным методом. Это приводит к нарушению контроля толщины по ходу прокатки и, как следствие, отклонению этого важнейшего параметра от заданных значений. Выявлена причина, обусловленная использованием сигналов компенсации проти-

воизгиба и деформации валков, рассчитанных по фактическим усилиям в цилиндрах НУ. Эти сигналы формируются в системе динамической компенсации возмущений DDC, входящей в структуру ROLL-GAP CONTROLL. Для устранения недостатка обосновано использование не актуальных усилий, а прогнозных величин, поступающих от модели уровня 2. Результаты экспериментов подтвердили, что это решение позволило улучшить качество регулирования толщины.

Вторым, более опасным недостатком является отрыв фрагментов хвостовой части раската в последнем проходе. Рассмотрены причины его возникновения, основной из которых является настройка САРТ на компенсацию разнотолщинности, обусловленной градиентом температуры по длине листа. Это приводит к увеличению усилий сжатия и, как следствие, возникновению названной ситуации. Для устранения недостатка разработан способ управления НУ, согласно которому осуществляется принудительное разведение валков при прокатке концевой части длиной менее 1 м в последнем проходе. Эксперименты подтвердили, что в результате возникает дополнительная разнотолщинность в пределах 1–2 мм на участке длиной 0,4 м. Фактически это не приводит к увеличению отходов с концевой обрезью, так как фрагменты такой длины отрезаются на участке отдели листа.

В заключение следует отметить, что совершенствование алгоритмов САРТ при прокатке листов расширенного сортамента является составной частью разработок, направленных на повышение точности геометрических размеров, улучшение профиля и планшетности листового проката. Результаты, полученные в данном направлении, опубликованы в работах [31, 32, 40–44]. Исследования, направленные на совершенствование способов и цифровых алгоритмов управления мехатронными комплексами прокатных станов, продолжаются.

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

Литература

1. Гугис, Н.Н. Развитие прокатного производства Российской Федерации в 2015–2017 годах / Н.Н. Гугис // Труды XI конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 2017. – Т. 1. – С. 11–21.
2. Денисов, С.В. Инновационные достижения ПАО «ММК» в производстве современного металлопроката / С.В. Денисов // Труды XI конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 2017. – Т. 2. – С. 21–29.
3. Повышение действенности системы управления качеством трубного листового проката на базе статистического прогнозирования свойств: моногр. / М.И. Румянцев, К.Е. Черкасов, Е.В. Якушев [и др.]. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 134 с.

4. Карандаев, А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства / А.С. Карандаев // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 1. – С. 3–15.
5. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов [и др.] // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2009. – № 1. – С. 5–11.
6. Технологические схемы управления электроприводами чистой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, И.Ю. Андрюшин и др. // *Труды VII конгресса прокатчиков*. – М., 2007. – Т. 1. – С. 71–75.
7. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клетей стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андрюшин, В.В. Галкин, В.В. Головин и др. // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 31–35.
8. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 3. Исследование способа согласования линейных скоростей вертикальных и горизонтальных валков / В.Р. Храмин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 47–57. DOI: 10.14529/power160108
9. Шияев, П.В. Автоматизация процесса прокатки толстого листа на стане 5000 / П.В. Шияев, Д.Ю. Усатый, А.А. Радионов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 15–18.
10. Peter Kucsera. Hot Rolling Mill Hydraulic Gap Control (HGC) thickness control improvement / Peter Kucsera, Zsolt Beres // *Acta Polytechnica Hungarica*. – 2015. – Vol. 12, no. 6. – P. 93–106.
11. Thickness control strategies of plate rolling mill / Fei Zhang, Yongjun Zhang, Jianxin Hou, Binbin Wang // *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. – 2015. – Vol. 11, no. 4. – P. 1227–1237.
12. Fei Zhang. Automatic Gauge Control of Plate Rolling Mill / Fei Zhang, Yongjun Zhang, Handan Chen // *International Journal of Control and Automation*. – 2016. – Vol. 9, no. 2. – P. 143–156. DOI: 10.14257/ijca.2016.9.2.14
13. Simulation and Analyzing on Model Parameters Effect of BISRA-AGC / Li Xu, Chen Shu-zong, Du De-shun et al. // *Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 22. – P. 571–576.
14. Identification and optimization for hydraulic roll gap control in strip rolling mill / Sun Jie, Chen Shu-zong, Han Huan-huan et al. // *J. Cent. South Univ.* – 2015. – Vol. 22. – P. 2183–2191. DOI: 10.1007/s11771-015-2742-0
15. Predictive Controller for Strip-Tracking during Tail-Out of the Finishing Mill / C.W. Jose Hol, J.D. Roo, L. Kampmeijer et al. // *16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*. – August 25–28, 2013. – San Diego, California, USA. – P. 397–402. DOI: 10.3182/20130825-4-US-2038.00082
16. VSS control of strip steering for hot rolling mills / M. Okada, K. Murayama, Y. Anabuki, Y. Hayashi // *16th Triennial World Congress, Prague, Czech Republic*. – 2005. – Vol. 38, iss. 1. – P. 19–24. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01682
17. Schausberger, F. Feedback control of the contour shape in heavyplate hot rolling / F. Schausberger, A. Steinboeck, A. Kugi // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2018. – Vol. 26, iss. 3. – P. 842–856. DOI: 10.1109/TCST.2017.2695168
18. Патент № 2449846 Российская Федерация, МПК В21В 37/68. Способ прокатки металлической полосы с регулированием ее бокового положения и соответствующий прокатный стан / М. Кристьян, Б. Реми, Ч. Патрик [и др.]. – Опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.
19. Патент № 2615670 Российская Федерация, МПК В21В 37/40. Способ горячей прокатки полос / Ю.А. Мухин, С.М. Бельский, К.В. Бахаев [и др.]. – Опубл. 06.04.2017, Бюл. № 10.
20. United States Patent US 4570472, В21В 39/16; В21В 37/00. Method and apparatus for controlling lateral unstable movement and camber of strip being rolled / H. Kuwano (Japan). – Опубл. 18.02.1986.
21. Гасияров, В.Р. Согласование скоростей электроприводов и гидравлических нажимных устройств при автоматическом контроле профиля раската / В.Р. Гасияров // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2018. – № 4 (41). – С. 22–29. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-22-29
22. Automatic Gauge Control System with Combined Control of the Screw-Down Arrangement Position / A.S. Karandaev, A.A. Radionov, V.R. Khrumshin et al. // *12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014)*. – Novosibirsk, 2014. – Vol. 1. – P. 88–94. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040794
23. Improvement of Algorithms for Automatic Gauge Control System of the Hot-Rolling Mill / A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin, I.Y. Andryushin et al. // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 756. – P. 592–597. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.592
24. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand / A.G. Shubin, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin et al. // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. – 2015. – P. 6. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858

25. John, P. A new strategy for optimal control of continuous tandem cold metal rolling / P. John, S.S. Nicholas, A.S. Marwan // *IEEE Transactions on Industry Application*. – 2010. – Vol. 46 (2). – P. 703–711.
26. Modeling and control of plate thickness in hot rolling mills / Roland Heeg, Andreas Kugi, Olivier Fichet et al. // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2005. – Vol. 38, iss. 1. – P. 13–18. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01681
27. Восканьянц, А.А. Автоматизированное управление процессами прокатки: Учеб. пособие / А.А. Восканьянц. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 85 с.
28. 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.
29. Gasiyarov, V.R. Correcting Electric Motor Drive Speed of Plate Mill Stand in Profiled Sheet Rolling / V.R. Gasiyarov, A.A. Karandaev, A.A. Radionov et al. // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). – 18–21 Dec. 2018. DOI: 10.1109/PEDES.2018.8707442
30. Канев, Н.Г. Особенности настройки уровня прокатки на широкополосных горячих станах / Н.Г. Канев // *Современная техника и технологии*. – 2013. – № 8. – <http://technology.snauka.ru/2013/08/2172> (дата обращения: 22.03.2021).
31. Coordinating the Modes of the Axial Roll Shifting and Roll Bending Systems of a Roll Mill Stand / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev et al. // *IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2019. – Vol. 1. – P. 330–335. DOI: 10.1109/IECON.2019.8927789
32. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, B.M. Loginov et al. // *Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017)*. Sydney, Australia, 2017. – P. 269–273. DOI: 10.1145/3057039.3057105
33. Alvarez, D. Slab curvature compensation in hot rolling mill by means of Fuzzy Control / Diego Alvarez, Alberto B. Diez, Faustino Obeso // *Paper at the III seminar on rolling Mill Rolls*. – Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero, Mexico, March 9 1988.
34. Algorithm Design and Application of Novel GMAGC based on Mill Stretch Characteristic Curve / Ji Yafeng, Zhang Dianhua, Chen Shuzong et al. // *Journal of Central South University*. – 2014. – Vol. 21, iss. 3. – P. 942–947.
35. Patent China CN103801565A, B21B 37/16, B21B 37/58, B21B 37/74. Gauge control technique for top and tail of hot rolled strip steel of Steckel mill / 韦培友, 钱智君, 李朝忠, 陈胜春 (China). Publication 2018-01-09 (кит.)
36. Патент № 2490078 Российская Федерация, B21B 1/00. Способ итучной прокатки листовой прокатки / Ю.В. Гесслер, В.В. Павленко, А.А. Горлова [и др.]. – Оpubл. 20.08.2013, Бюл. № 23.
37. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill / V.R. Khrumshin, E.A. Khrumshina, 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
38. Басков, С.Н. Энергосиловые параметры приводов и разработка систем профилированной прокатки слябов стана 2800 / С.Н. Басков, А.С. Карандаев, О.И. Осипов // *Приводная техника*. – 1999, № 1-2. – С. 21–24.
39. Предиктивное регулирование асимметрии зазора валков реверсивной клетки толстолистого прокатного стана / В.Р. Гасияров, А.С. Карандаев, В.Р. Храмушин и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2020. – Т. 63, № 1. – С. 19–30.
40. Improving the Algorithm of Automated Gage Control during Shaped Feed Rolling on a Plate Mill / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev et al. // *IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*. – 2020. DOI: 10.1109/ICMIMT49010.2020.9041207
41. 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. – P. 1753–1750. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.709
42. 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. – P. 1780–1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713
43. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолистого прокатного стана / С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов и др. // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 55–64.
44. Mathematical Modeling of an Automatic Control System for Profiled Rolling of Slabs in Reversing Plate-Mill Stands / V.R. Gasiyarov, S.N. Baskov, S.S. Voronin et al. // *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. – 2019. – P. 505–510. DOI: 10.1109/EIconRus.2019.8656797

Гасияров Вадим Рашитович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gasiiarovvr@susu.ru.

Логинов Борис Михайлович, канд. техн. наук, ведущий инженер по наладке и испытаниям электрооборудования центральной электротехнической лаборатории, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск.

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

Зинченко Марк Андреевич, аспирант кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; инженер центральной электротехнической лаборатории, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск.

Поступила в редакцию 4 марта 2021 г.

DOI: 10.14529/power210113

DEVELOPMENT OF DIGITAL CONTROL ALGORITHMS FOR THE MECHATRONICS SYSTEM DRIVES OF REVERSING PLATE MILL STANDS

V.R. Gasiyarov¹, gasiiarovvr@susu.ru,

B.M. Loginov²,

S.S. Voronin¹, voroninss@susu.ru,

M.A. Zinchenko^{1, 2}

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works", Magnitogorsk, Russian Federation

Expanding the plate mill product range implies the improvement of control algorithms for the mechatronics control system drives of the reversing stands. The most important objectives include increasing the accuracy of geometric dimensioning and tolerancing, as well as improving the profile and surface flatness of rolled products. The structure explaining the automatic ROLL-GAP CONTROL concept is provided, which allows controlling the thickness and gap between SMS-Demag AG rolls. This concept is implemented in the '5000' mill stand of Magnitogorsk Iron and Steel Works. The structural diagram of the automatic gauge control system (AGS) is presented. The functional diagram of the hydraulic gap control (HGC) system is presented, which includes a fast proportional control channel and a relatively slow integral position control channel. The principle of automatic thickness control is discussed, implemented in the automatic gauge control (AGC) system of the mill stand TCS controller. The diagram and dependences are prepared for the calculation of the nonlinear thickness controller parameters. The functions of the RAC regulator are described, intended for compensation of the tensile difference (gap spacing) at the mill stand sides. The dynamic impact compensation system functions are considered. The removal of the roll bending and deformation control signals is substantiated. The disadvantages of AGC are noted for sheets with a thickness below 10 mm. The most dangerous case is the tearing of metal fragments from the rear sheet side caused by the incorrect operation of the gauge control system. A method for hydraulic gap control is proposed based on the fast increase of the roll gap in the rear part of the rolled sheet during the last passage when rolling thin sheets. The results of experimental studies made on the '5000' mill are presented. The efficiency of the proposed control method has been confirmed. The oscillograms of signals are presented characterizing thickness variations. HGC and AGC systems with the proposed adjustments are proven to provide high-accuracy hydraulic position control and thickness control along the sheet length and width.

Keywords: plate mill, reversible mill stand, mechatronics system, thickness, automatic control, concept, adjustment, thin sheet, disadvantages, improvement, experimental studies.

References

1. Gugis N.N. [Development of rolling production in the Russian Federation in 2015–2017]. *Trudy XI kongressa prokatchikov* [Proceedings of the XI Congress of Distributors]. Magnitogorsk, 2017, vol. 1, pp. 11–21. (in Russ.)
2. Denisov S.V. [Innovative achievements of PJSC MMK in the production of modern rolled metal products]. *Trudy XI kongressa prokatchikov* [Proceedings of the XI Congress of Distributors]. Magnitogorsk, 2017, vol. 2, pp. 21–29. (in Russ.)

3. Rumyantsev M.I., Cherkasov K.E., Yakushev E.V. et al. *Povysheniye deystvennosti sistemy upravleniya kachestvom trubnogo listovogo prokata na baze statisticheskogo prognozirovaniya svoystv: monografiya* [Improving the effectiveness of the quality management system for tubular sheets based on statistical forecasting of properties: Monograph]. Magnitogorsk, Nosov MSTU Publ., 2014. 134 p.
4. Karandayev A.S. [Improvement of automated electric drives of rolling production units]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical engineering: network electronic scientific journal], 2014, no. 1, pp. 3–15. (in Russ.)
5. Selivanov I.A., Karandayev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R. et al. [Improvement of automated electric drives and diagnostics of power electrical equipment]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 5–11. (in Russ.)
6. Karandayev A.S., Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyayev P.V. [Technological schemes for controlling electric drives of the finishing group of a wide-strip hot rolling mill]. *Trudy VII kongressa prokatchikov* [Proceedings of the XI Congress of Distributors], 2007, vol. 1, pp. 71–75. (in Russ.)
7. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandayev A.S., Radionov A.A., Khrumshin V.R. [Automatic correction of the speeds of electric drives of the stands of mill 2000 when rolling a pipe billet]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 31–35. (in Russ.)
8. Khrumshin V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Shubin A.G., Loginov B.M. Mathematical Modelling of the Interrelated Electric and Mechanical Systems of Continuous Sub-Group of the Rolling Mill Stands. Part 3. Study of Way to Coordinate Linear Speeds of Edging and Horizontal Rolls. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 47–57. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160108
9. Shilyayev P.V., Usatyy D.Yu., Radionov A.A. [Automation of plate rolling on mill 5000]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 15–18. (in Russ.)
10. Peter Kucsera, Zsolt Beres. Hot Rolling Mill Hydraulic Gap Control (HGC) thickness control improvement. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2015, vol. 12, no. 6, pp. 93–106.
11. Fei Zhang, Yongjun Zhang, Jianxin Hou, Binbin Wang. Thickness control strategies of plate rolling mill. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 1227–1237.
12. Fei Zhang, Yongjun Zhang, Handan Chen. Automatic Gauge Control of Plate Rolling Mill. *International Journal of Control and Automation*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 143–156. DOI: 10.14257/ijca.2016.9.2.14
13. Li Xu, Chen Shu-zong, Du De-shun, Chen Hua-xin, Zhang Dian-hua. Simulation and Analyzing on Model Parameters Effect of BISRA-AGC. *Physics Procedia*, 2011, vol. 22, pp. 571–576.
14. Sun Jie, Chen Shu-zong, Han Huan-huan, Chen Xing-hua, Chen Qiu-jie, Zhang Dian-hua. Identification and optimization for hydraulic roll gap control in strip rolling mill. *J. Cent. South Univ.*, 2015, vol. 22, pp. 2183–2191. DOI: 10.1007/s11771-015-2742-0
15. Hol C.W. Jose, Roo J.D., Kampmeijer L., Dirkson T., Schipper G., La Maire M., J. van der Lugt. Predictive Controller for Strip-Tracking during Tail-Out of the Finishing Mill. *16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, August 25–28, 2013, San Diego, California, USA, pp. 397–402. DOI: 10.3182/20130825-4-US-2038.00082
16. Okada M., Murayama K., Anabuki Y., Hayashi Y. VSS control of strip steering for hot rolling mills. *16th Triennial World Congress*, Prague, Czech Republic, 2005, vol. 38, iss. 1, pp. 19–24. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01682
17. Schausberger F., Steinboeck A., Kugi A. Feedback control of the contour shape in heavyplate hot rolling. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, vol. 26, iss. 3, pp. 842–856. DOI: 10.1109/TCST.2017.2695168
18. Krist'yan M., Remi B., Patrik Ch. *Sposob prokatki metallicheskoj polosy s regulirovaniyem eye bokovogo polozheniya i sootvetstvuyushchiy prokatnyy stan* [Method of rolling a metal strip with regulation of its lateral position and the corresponding rolling mill]. Patent RF, no. 2449846, 2011.
19. Mukhin Yu.A., Bel'skiy S.M., Bakhayev K.V. et al. *Sposob goryachey prokatki polos* [Hot strip rolling method]. Patent RF, no. 2615670, 2017.
20. Kuwano H. (Japan). *Method and apparatus for controlling lateral unstable movement and camber of strip being rolled*. United States Patent US 4570472, 1986.
21. Gasiyarov V.R. [Coordination of the speeds of electric drives and hydraulic pressure devices for automatic control of the roll profile]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2018, no. 4 (41), pp. 22–29. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-22-29
22. Karandaev A.S., Radionov A.A., Khrumshin 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

23. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andryushin I.Y., Shubin A.G., Loginov B.M. Improvement of Algorithms for Automatic Gauge Control System of the Hot-Rolling Mill. *Applied Mechanics and Material*, 2015, vol. 756, pp. 592–597. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.592
24. Shubin A.G., Loginov B.M., Khrumshin 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, pp. 6. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858
25. 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, vol. 46 (2), pp. 703–711.
26. Roland Heeg, Andreas Kugi, Olivier Fichet, Laurent Irastorza, Christophe Pelletier. Modeling and control of plate thickness in hot rolling mills. *IFAC Proceedings Volumes*, 2005, vol. 38, iss. 1, pp. 13–18. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01681
27. Voskan'yants A.A. *Avtomatizirovannoye upravleniye protsessami prokatki: ucheb. posobiye* [Automated control of rolling processes: Textbook. manual]. Moscow, N.E. Bauman MSTU Publ., 2010. 85 p.
28. Salganik V.M., Gun I.G., Karandayev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovyye liteyno-prokatnyye agregaty dlya proizvodstva stal'nykh polos* [Thin-slab casting and rolling units for the production of steel strips]. Moscow, N.E. Bauman MSTU Publ., 2003. 506 p.
29. Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khrumshin V.R., Maklakov A.S. Correcting Electric Motor Drive Speed of Plate Mill Stand in Profiled Sheet Rolling. *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2018. DOI: 10.1109/PEDES.2018.8707442
30. Kanev N.G. [Features of setting the level of rolling on broadband hot mills]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii* [Modern equipment and technologies], 2013, no. 8. Available at: <http://technology.snauka.ru/2013/08/2172> (accessed 22.03.2021).
31. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Loginov B.M., Khrumshin V.R., Maklakov A.S. Coordinating the Modes of the Axial Roll Shifting and Roll Bending Systems of a Roll Mill Stand. *IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2019, vol. 1, pp. 330–335. DOI: 10.1109/IECON.2019.8927789
32. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khrumshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. *Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017)*. Sydney, Australia, 2017, pp. 269–273. DOI: 10.1145/3057039.3057105
33. Diego Alvarez, Alberto B. Diez, Faustino Obeso. Slab curvature compensation in hot rolling mill by means of Fuzzy Control. *III seminar on rolling Mill Rolls*, Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero, Mexico, March 9, 1988.
34. 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*, 2014, vol. 21, iss. 3, pp. 942–947.
35. Patent China CN103801565A, B21B 37/16, B21B 37/58, B21B 37/74. Gauge control technique for top and tail of hot rolled strip steel of Steckel mill / 韦培友, 钱智君, 李朝忠, 陈胜春 (China). Publication 2018-01-09.
36. Gessler Yu.V., Pavlenko V.V., Gorlova A.A. et al. *Sposob shtuchnoy prokatki listovoy produktsii* [Method of piece rolling of sheet products]. Patent RF, no. 2490078, 2013.
37. Khrumshin V.R., Khrumshina 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
38. Baskov S.N., Karandayev A.S., Osipov O.I. [Power parameters of drives and development of systems for profiled rolling of slabs of mill 2800]. *Privodnaya tekhnika* [Drive technology], 1999, no. 1-2, pp. 21–24.
39. Gasiyarov V.R., Karandayev A.S., Khrumshin V.R., Loginov B.M., Zinchenko M.A. [Predictive regulation of the gap asymmetry of the rolls of the reversing stand of the plate rolling mill]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics], 2020, vol. 63, no. 1, pp. 19–30.
40. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Loginov B.M. Improving the Algorithm of Automated Gauge Control during Shaped Feed Rolling on a Plate Mill. *IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*, 2020. DOI: 10.1109/ICMIMT49010.2020.9041207
41. 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

42. 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

43. Baskov S.N., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Khrumshin V.R., Odintsov K.E. [Development of a mathematical model of interconnected electrical systems for the stand of a plate rolling mill]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics], 2017, vol. 60, no. 6, pp. 55–64.

44. Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Voronin S.S., Loginov B.M., Khrumshin V.R. Mathematical Modeling of an Automatic Control System for Profiled Rolling of Slabs in Reversing Plate-Mill Stands. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2019, pp. 505–510. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656797

Received 4 March 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Разработка цифровых алгоритмов управления приводами мехатронной системы реверсивной клетки толстолистного прокатного стана / В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, С.С. Воронин, М.А. Зинченко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 122–139. DOI: 10.14529/power210113

FOR CITATION

Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Voronin S.S., Zinchenko M.A. Development of Digital Control Algorithms for the Mechatronics System Drives of Reversing Plate Mill Stands. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 122–139. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210113