

На правах рукописи



ВОРОНИН СТАНИСЛАВ СЕРГЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
КЛЕТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТНОГО СТАНА
В РЕЖИМЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ
РАСКАТА**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – **Гасияров Вадим Рашитович**, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Кравченко Олег Александрович, доктор технических наук, профессор, и.о. ректора федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула;

Хакимьянов Марат Ильгизович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится **«03» февраля 2022 г.**, в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр-т им. В.И. Ленина, 76, ауд. 909.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте ЮУрГУ:

https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/06tekstdissertaciidoc_voronin.pdf

Автореферат разослан __ декабря 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр-т им. В.И. Ленина, д.76, гл. корпус, Учёный совет ЮУрГУ, тел./факс: +7(351) 267-91-23, e-mail: grigorevma@susu.ru

Ученый секретарь диссертационного совета
Д212.298.05 д-р техн. наук, проф.  М.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время в Российской Федерации находятся в эксплуатации три современных толстолистовых прокатных стана 5000, предназначенных для производства продукции высокого передела – высококачественных трубных марок, судостроительного листа, котельной и мостовой стали. Эти станы находятся в эксплуатации в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»), ОАО «ВМЗ» (г. Выкса) и ОАО «Северсталь» (г. Колпино). Их успешная эксплуатация позволила вытеснить с отечественного рынка зарубежных производителей трубного проката. Для закрепления позиций и расширения присутствия на зарубежных рынках требуется повышение конкурентоспособности за счет снижения материалоемкости производства. Для прокатного производства этот показатель определяется расходными коэффициентами на тонну готовой продукции.

Расходные коэффициенты при производстве листового проката определяются формой листа в плане (вид сверху), от которой зависит объем концевой и боковой обрезки. Наличие обрезки обусловлено течением металла во время обжатия слябовых заготовок не только в осевом, но и в боковых направлениях.

Известным способом решения этой проблемы является технология профилированной прокатки, которая обеспечивает двойной конический профиль на концах раската, получивший название «собачья кость». Технологические аспекты формирования профилей переменной толщины при прокатке на толстолистовых станах исследованы достаточно подробно. Однако вопросам совершенствования электротехнических систем реверсивной клетки и автоматизированных систем управления не уделено достаточного внимания.

Вопросам автоматизации прокатных станов, в том числе направленной на улучшение профиля и снижение потерь с обрезью, посвящены работы многих известных авторов, в том числе монографии Ю.М. Файнберга, В.Н. Выдрина, Ю.В. Коновалова, научные труды О.И. Осипова, В.Н. Мещерякова, а также сотрудников ИЧМ НАН Украины. Вклад в развитие теории и практики взаимосвязанных электромеханических внесли В.И. Ключев, Ю.С. Усынин, Г.Я. Пятитратов, О.А. Кравченко, И.А. Селиванов и др.

Анализ опыта эксплуатации стана 5000 ПАО «ММК» показал, что концепция регулирования толщины ROLL GAP CONTROLL, разработанная фирмой SMS group (Германия), не обеспечивает требуемой точности в режиме формирования конических профилей. Другим недостатком является отсутствие ограничения силовой взаимосвязи через металл электромеханических систем вертикальной и горизонтальной клетей. Таким образом, актуальными являются совершенствование алгоритмов существующей системы автоматического регулирования толщины (САРТ) и разработка способа согласования скоростей взаимосвязанных вертикальной и горизонтальной клетей.

Целью диссертационной работы является разработка комплекса научно-обоснованных технических решений, обеспечивающих повышение точности регулирования толщины раската в режиме профилированной прокатки и ограничение силового взаимодействия электромеханических систем реверсивной клетки толстолистового прокатного стана.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Анализ переходных процессов взаимосвязанных автоматизированных электроприводов горизонтальной и вертикальной клетей и гидравлической САРТ стана 5000 в режиме профилированной прокатки слябов.

2. Разработка способов управления электро- и гидроприводами горизонтальной клетки, обеспечивающих повышение точности регулирования толщины в динамическом режиме перемещения нажимных устройств (НУ) во время прокатки.

3. Разработка способа и системы ограничения силовой взаимосвязи электро-механических систем вертикальной и горизонтальной клетей через металл в режиме формирования профилей переменной толщины.

4. Разработка имитационных моделей электроприводов горизонтальной и вертикальной клетей и гидравлических приводов нажимных устройств (в структуре САРТ) с учетом их взаимосвязи через металл.

5. Исследование взаимосвязанных электротехнических систем клетки в режиме профилированной прокатки методом математического моделирования. Сравнительный анализ переходных процессов при проектном и разработанных алгоритмах управления.

6. Разработка алгоритмов регулирования гидравлического зазора клетки с целью ограничения динамических ударов при захвате.

Экспериментальные исследования разработанных технических решений, внедрение в опытно-промышленную эксплуатацию на стане 5000.

Методика проведения исследований. Постановка задачи и обоснование направлений исследований базировались на результатах литературного обзора, анализе известных разработок и экспериментальных исследованиях, выполненных на стане 5000 ПАО «ММК». В основу теоретических исследований положены положения теории электропривода, теории автоматического управления, в том числе разделы, посвященные применению логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) и преобразованию структурных схем. Имитационные модели разработаны в графической среде Simulink пакета MATLAB. Экспериментальные исследования разработанных алгоритмов выполнены на стане 5000.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтвердившие, что при перемещении НУ в режиме профилирования при существующей настройке САРТ возникает отклонение фактической толщины от заданной, что приводит к искажению формы листа в плане.

2. Система автоматического регулирования толщины, реализующая принцип упреждающего регулирования за счет положительной связи по задающему сигналу, включенной на вход регулятора положения НУ.

3. Способ согласования скоростей электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей в режиме профилированной прокатки, согласно которому осуществляется регулирование скорости электропривода валков вертикальной клетки пропорционально приращению линейной скорости металла на входе в горизонтальную клетку.

4. Способ ограничения динамических нагрузок горизонтальной клетки, согласно которому величина зазора валков до захвата устанавливается на уровне, близком к толщине головной части раската, а после захвата возвращается в положение, заданное программой обжатий. При этом осуществляется коррекция скорости вращения валков пропорционально изменению положения нажимного устройства.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающие повышение точности регулирования толщины раската на профилированных участках, дающих косвенное подтверждение снижения боковой и торцевой обреза за счет улучшения формы листа в плане.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждаются:

- проведением экспериментальных исследований на действующем прокатном стане на всех этапах работы над диссертацией: при обосновании задач, на этапе оценки существующих алгоритмов, при исследованиях разработанных алгоритмов;

- анализом и сопоставлением материалов, опубликованных другими авторами, с выводами, сделанными по результатам собственных исследований;

- совпадением экспериментальных результатов и данных, полученных при моделировании;

- корректным применением известных теоретических положений, их адаптацией к конкретным особенностям исследуемого объекта;

- применением характеристик действующего оборудования при разработке математических моделей.

Научная новизна

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований доказано, что известная концепция ASC профилирования широких граней раската горизонтальными валками, реализованная на станах 5000, обеспечивает точность регулирования толщины с погрешностью $\pm 1\%$ в квазиустановившемся режиме прокатки, но не обеспечивает требуемой точности в режиме формирования профиля переменной толщины.

2. Принцип автоматического регулирования положения в замкнутых САР с предупреждением за счет положительной обратной связи по сигналу задания получил развитие в направлении применения для автоматического регулирования положения нажимных устройств реверсивной клетки в режиме профилированной прокатки.

3. Обоснован принцип ограничения силового взаимодействия электромеханических систем горизонтальной и вертикальной клеток прокатного стана, суть которого заключается в согласовании скоростей электроприводов посредством динамической компенсации управляющих и возмущающих воздействий с передачей регулирующего воздействия против направления прокатки.

4. Теория прокатки в приводных валках с изменяющимся межвалковым зазором получила развитие в направлении приложения для толстолистовых станов в виде уточненных аналитических зависимостей для расчета энергосиловых параметров прокатки и опережения в проходах с профилированием раскатов горизонтальными валками.

Практическая значимость и реализация работы

1. Разработанная САРТ с предупредлением реализована в виде алгоритмов в АСУ ТП стана 5000. Дано экспериментальное подтверждение обеспечения регулирования толщины в режимах изменения зазора с погрешностью $\pm 1\%$.

2. Разработанный алгоритм управления гидравлическим зазором до и после захвата внедрен в эксплуатацию на стане 5000. Внедрение позволило повысить долговечность оборудования главной линии горизонтальной клетки за счет сокращения количества аварий.

3. Результатами внедрения разработанных алгоритмов являются:

- снижение расходного коэффициента за счет сокращения потерь металла с боковой и концевой обрезаю на 0,035 кг/т;

- увеличение нормативного срока эксплуатации механического оборудования главной линии клетки от 3-х до 8-и лет и снижение показателя аварийности.

Экономический эффект от сокращения затрат на аварийную замену шпинделя составляет 5,76 млн руб./год.

4. Разработанные методика расчета энергосиловых параметров прокатки и опережения в проходах с профилированием, способы управления электрическими и гидравлическими приводами рекомендуются для внедрения на действующих толстолистовых прокатных станах.

Апробация работы. Положения, выносимые на защиту, докладывались на 8-и международных конференциях, в том числе: 7th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM), Сингапур, 2016 г; 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Челябинск, 2016 г; 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Токио 2017 г; 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Санкт-Петербург 2017 г; 2017, 2018, 219 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus), Санкт-Петербург, 2017, 2018, 219 гг; 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Сочи 2019 г.

Публикации. По содержанию диссертационной работы опубликовано 17 научных трудов, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях, 2 статьи и 8 докладов в изданиях, входящих в базы данных WOS и Scopus, в том числе 1 статья – в издании, входящем во II квартал. Получен патент РФ на изобретение, зарегистрирована программа для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 184 наименований. Работа изложена на 150 страницах, содержит 53 рисунка, 13 таблиц и приложение объемом 9 страниц.

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).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность сокращения потерь металла с боковой и торцевой обрезаю при производстве листового проката. Обоснованы задачи

повышения точности регулирования толщины раската в проходах с профилированием и ограничения силовой связи вертикальных и горизонтальных валков через металл. Отмечена недостаточная проработанность данных вопросов в литературе. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В первой главе дана характеристика технологии и оборудования стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000). Рассмотрены причины отклонения геометрических размеров раската от заданных в режиме прокатки с большими обжатиями. Представлены способы повышения выхода готовой продукции за счет сокращения потерь с обрезью. Отмечено, что основным направлением решения данной проблемы является внедрение технологии профилированной прокатки слябов в одном либо нескольких черновых проходах. Дано обоснование совершенствования алгоритмов управления электроприводами и гидравлическими приводами НУ горизонтальной клетки.

Фотография клетки стана 5000 со стороны вертикальных валков представлена на рис. 1, а. Он состоит из четырехвалковой горизонтальной клетки и вертикальной клетки (эджера), расположенной перед клетью. В зависимости от технологии листы могут быть прокатаны за один проход (нормальная прокатка) или оставаться на рольганге для промежуточного охлаждения (прокатка при контролируемой температуре или термомеханическая прокатка). Во время прокатки вертикальная и горизонтальная клетки жестко связаны через металл. Установка зазора в заданное положение осуществляется электромеханическими нажимными устройствами в паузе между проходами, регулирование зазора во время прокатки, в том числе при профилировании горизонтальными валками, осуществляется гидравлическими НУ.

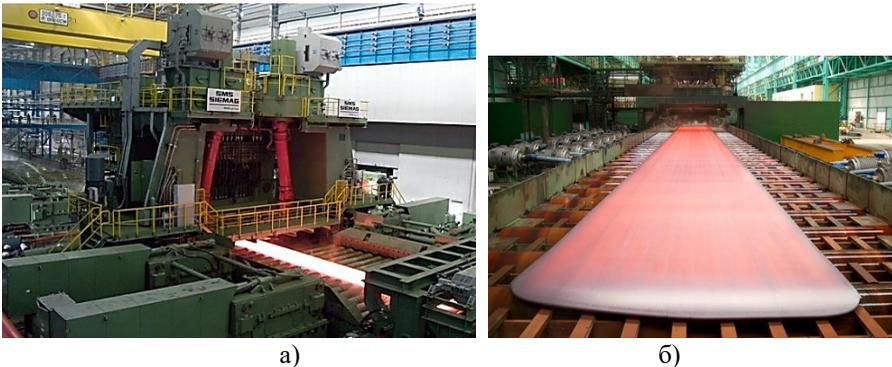


Рис. 1. Фотографии клетки стана 5000 (а) и готового листа на рольганге (б)

Выполнен анализ причин неудовлетворительных расходных коэффициентов на толстолистовых станах. Основной причиной являются высокие обжатия раскатов на первых двух стадиях прокатки (протяжки и разбивки ширины). Это сопровождается значительным отклонением ширины (уширением) и, как следствие, искажениями геометрии готового листа, представленными на рис. 2, б. Кроме того, возникают искажения формы концевых участков (рис. 2, а), что увеличивает концевую обрезь. Показано, что форма листа зависит от соотношения

коэффициентов вытяжек: отношений длины раската к длине сляба при протяжке и ширины раската к ширине сляба при разбивке ширины. Готовые листы характеризуются большими выпуклыми торцами, как правило, в виде «язычков» (рис. 1, б), их длина на тонких раскатах достигает 1000 мм.

Рассмотрены известные технологии, обеспечивающие улучшение формы листа в плане. К ним относятся: косая прокатка, изменение поперечного профиля сляба тянущей клетью, регулирование величины обжатия при протяжке, предварительное обжатие вертикальными валками. Отмечено, что эти способы получили ограниченное промышленное внедрение.

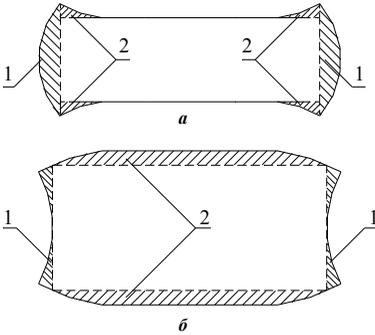


Рис. 2. Форма листа при различных соотношениях коэффициентов вытяжки: 1 – торцевая обреза, 2 – боковая обреза

приведена структура, поясняющая эту концепцию, перечислены системы технологической автоматизации, важнейшими из которых являются:

- система гидравлического регулирования раствора валков (*HGC, Hydraulic Gap Control*);
- система автоматического регулирования толщины (*AGC, Automatic Gap Control*) – аналог САРТ.

Дана оценка точности регулирования толщины в режиме изменения межвалкового зазора во время прокатки. На рис. 3, а представлены осциллограммы изменения толщины при формировании профиля переменной толщины на переднем конце раската. Они демонстрируют значительное отклонение фактической толщины (кривая 2) от заданной (кривая 1). В интервале t_1-t_3 отклонение Δh_T составляет 2 мм или 0,8% толщины после профилирования, равной 239 мм. Это вызвано задержкой сигнала регулирования при перемещении НУ. Интервал задержки $\Delta t_T \approx 0,2$ с.

В ходе экспериментальных исследований были зафиксированы отклонения толщины до 2,5% при допустимом пределе $\pm 1\%$. Данный недостаток обусловлен тем, что при проектной настройке САРТ регулирование осуществляется по

Наибольшее распространение получили технологии прокатки с профилированием широких граней раскатов в одном либо нескольких проходах при протяжке и/или разбивке ширины. К ним относятся прокатка по способу MAS, внедренная на нескольких станах Японии и стане 5000 в г. Колпино, и концепция автоматического контроля профиля (ASC), которая рассматривается ниже во втором разделе. Она реализована на отечественных и зарубежных станах, в том числе станах 5000 ПАО «ММК» и ОАО «ВМЗ».

Профилированная прокатка ASC обеспечивается средствами автоматического регулирования прокатного зазора и толщины листа, реализующих концепцию *ROLL-GAP CONTROLL*.

В диссертации

отклонению толщины. Отсюда возникает задача совершенствования алгоритмов САРТ с целью повышения быстродействия и точности регулирования в режиме профилированной прокатки.

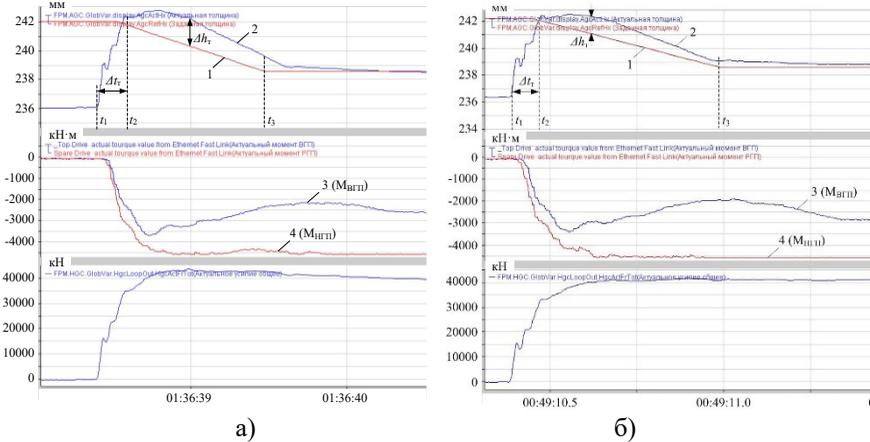


Рис. 3. Осциллограммы параметров прокатки в проходе с профилированием при существующей настройке (а) и при разработанном алгоритме САРТ (б): окно 1 (верхнее) – заданная и фактическая толщина; окно 2 – моменты электроприводов; окно 3 – усилие прокатки

Далее дано обоснование ограничения силовой связи вертикальной и горизонтальной клетей через металл. Недостатком алгоритма управления прокаткой в проходах с профилированием является отсутствие согласования скоростей электроприводов этих клетей при перемещении НУ. Это приводит к нарушению условия постоянства секундных объемов металла на выходе вертикальной и входе горизонтальной клетей. В результате возникает подпор (отрицательное натяжение), что может привести к аварии.

Обоснована разработка способа автоматического регулирования скорости электропривода валков вертикальной клетки пропорционально приращению линейной скорости металла на входе в горизонтальную клетку, вызванному перемещением НУ в режиме формирования профиля переменной толщины.

Выполнен анализ силовых линий нагрузок, возникающих при захвате металла валками. Показано что одной из причин колебаний давления и момента, является горизонтальное усилие, которое определяется соотношением линейных скоростей валков и раската, а также и величиной межвалкового зазора перед захватом. В качестве направления его снижения обоснована разработка способа управления с автоматическим регулированием зазора валков. Он является аналогом способа управления зазором при профилированной прокатке.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию САРТ с предупреждением за счет формирования положительной связи по производной задания толщины, подключаемой на вход регулятора положения НУ. Представлена имитационная модель системы «электропривод клетки – гидравлический привод НУ». Выполнены исследования методом математического моделирования.

Рассмотрена концепция ASC профилирования широких граней раската горизонтальными валками, разработанная фирмой SMS group, реализованная на стане. Для воздействия на форму головной и хвостовой частей на повернутом листе применяется конический профиль, показанный на рис. 4, а. Аналогичный профиль формируется для улучшения формы кромки листа после последнего калибровочного прохода.

Многоточечную стратегию задания профиля «собачья кость» поясняет рисунок 4, б. Формирование задания на толщину по длине заготовки согласно представленному продольному сечению осуществляется программным способом. В алгоритме задается ряд опорных точек 1, 2 ..., i , ..., каждая из которых находится на расстоянии Δl_i от предыдущей точки. Для каждой точки i из памяти ПК выдаются значения толщины h_i . В результате формируются задания на толщину для разных профилей при протяжке и разбивке ширины.

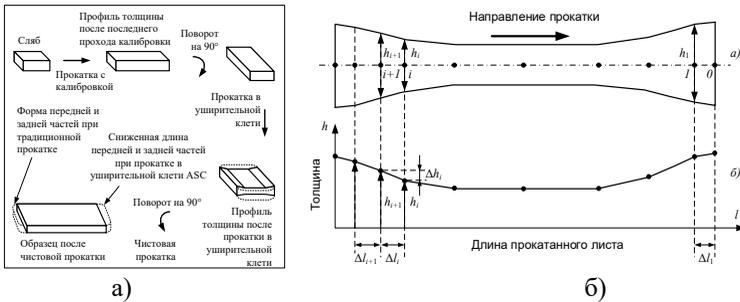


Рис. 4. Пояснения к концепции ASC (а) и многоточечной стратегии задания профиля (б)

Далее в главе представлена структура действующей системы автоматического регулирования толщины (AGC) с внутренним контуром регулирования положения НУ (HGC). Рассмотрен принцип действия САРТ, основанный на уравнении Головина-Симса.

Разработка САРТ с предупредлением. С целью повышения быстродействия и уменьшения ошибки регулирования толщины разработана САРТ, реализующая принцип управления положением нажимных устройств с упреждением. Он обеспечивается за счет введения положительной связи по задающему сигналу, выделенной на рис. 5 контуром.

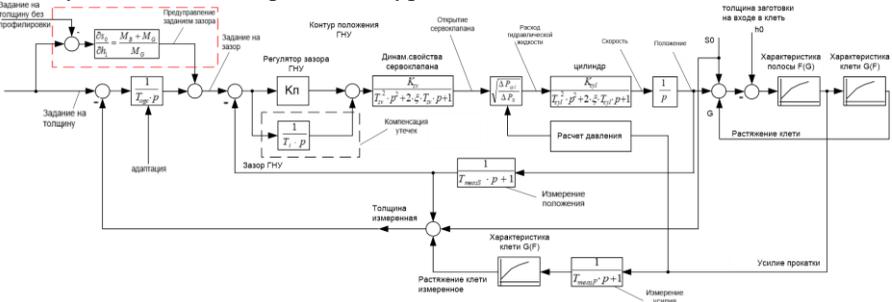


Рис. 5. Структурная схема САРТ с упреждающим регулированием толщины

Регулятор предупреждения принят пропорциональным. Коэффициент связи задания зазора s_0 и толщины h_1 зависит от модулей жесткости клетки M_G и металла M_B :

$$\frac{\partial s_0}{\partial h_1} = \frac{M_B + M_G}{M_G}. \quad (1)$$

Модуль жесткости клетки принимается по данным калибровки клетки, модуль жесткости металла задается программой (моделью) прокатки.

Разработка имитационной модели. С целью исследования этого и других технических решений разработана имитационная модель взаимосвязанных электро- и гидроприводов, реализованная в пакете Matlab-Simulink. Она содержит блоки, описывающие непосредственно электроприводы с механической частью, блок управления «лыжей» (задания разницы скоростей верхнего и нижнего валков), блок моделирования нагрузки и ее распределения по двигателям.

Выполнена разработка моделей гидравлических НУ в структуре САПР. Гидравлическое НУ как объект управления описывается тремя линеаризованными дифференциальными уравнениями: расхода жидкости для малых приращений координат, уравнением, описывающим соотношение усилий в клетке и линеаризованным уравнением сервоклапана. С использованием аппарата ЛАЧХ выполнена настройка регулятора положения. Он принят пропорциональным с настройкой на технические оптимум. Это сделано для обеспечения высокого быстродействия и низкой колебательности процессов при возникновении возмущений по толщине. Представлены упрощенная имитационная модель *HGC* и структура модели контура регулирования толщины.

Параметры всех звеньев разработанной модели определены по данным электро- и гидрооборудования и осциллограммам, полученным на стане. Путем сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментов подтверждена ее адекватность исследуемому объекту.

Выполнены исследования методом моделирования. На рис. 6 приведены временные зависимости скоростей (окно 1), моментов (окно 2) электроприводов верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП), а также зависимости заданной и актуальной толщины раската (окно 3). При моделировании учтено, что режим профилирования совпадает по времени с формированием «лыжи», который обеспечивается за счет задания рассогласования скоростей до захвата. Поэтому заданы начальные рассогласования скоростей в 15%.

В результате анализа зависимостей сделаны следующие выводы.

1. На рис. 6, а прослеживается отставание реальной толщины раската (кривая 2) от заданной (кривая 1). Это приводит к ошибке регулирования толщины в режиме профилирования $\Delta h_T=0,4\%$. Расчетные кривые с достаточной точностью повторяют процессы на осциллограммах, рис. 3, а. Это косвенно подтверждает адекватность модели исследуемому объекту.

2. Отличием анализируемых процессов на рис. 6, б является значительное снижение (практически отсутствие) задержки регулирования толщины. В ре-

зультате ошибка регулирования приближается к нулю ($\Delta h_T \approx 0,05\%$). Это происходит благодаря введению положительной связи по заданию толщины на вход регулятора положения НУ.

В целом, в результате моделирования сделан вывод, что профиль «кость» в разработанной системе формируется с более высокой точностью, чем при реализации проектного алгоритма управления НУ. Это подтверждает достижение конечной цели, заключающейся в максимальном приближении формы листа в плане к прямоугольной. Результаты экспериментальных исследования разработанной системы рассмотрены ниже в разделе 4.

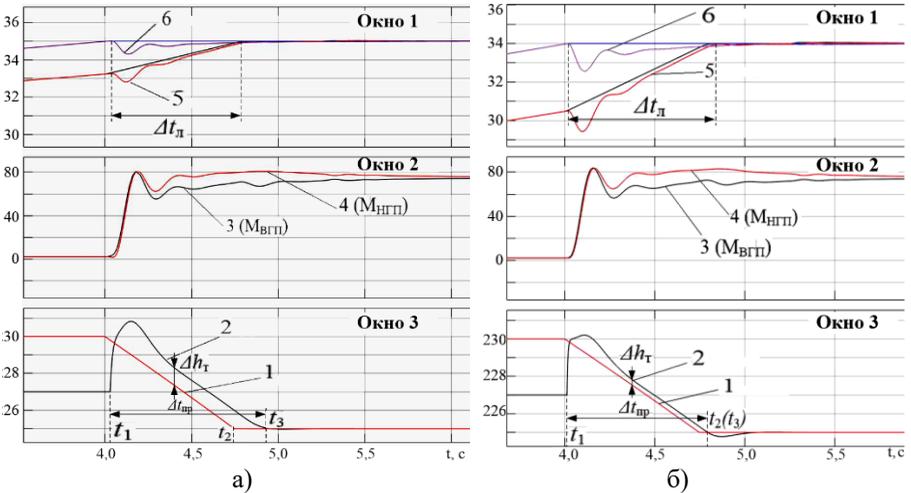


Рис. 6. Результаты моделирования при реализации проектного (а) и разработанного (б) алгоритмов управления: 1, 2 – заданная и фактическая толщина; 3, 4 – моменты ВГП и НГП; 5, 6 – скорости электроприводов

Третья глава посвящена разработке и исследованию способа ограничения силового взаимодействия электромеханических систем горизонтальной и вертикальной клетей. Это достигается путем согласования скорости металла на входе в горизонтальную клеть и линейной скорости валков вертикальной клетки. При этом учитывается изменение опережения в режиме регулирования межвалкового зазора при профилированной прокатке.

Разработанный способ согласования скоростей горизонтальных и вертикальных валков (ГВ и ВВ) при перемещении НУ. Схема системы управления представлена на рис. 7. При прокатке металла 3 в вертикальных валках 1, до захвата горизонтальными валками 2 устанавливается скорость ω_G электропривода 9 согласно зависимости

$$\omega_G = \omega_B \frac{D_B}{D_G} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_G}, \quad (2)$$

где ω_G , ω_B , D_G , D_B – угловые скорости и диаметры ГВ и ВВ; α_G – угол захвата металла горизонтальными валками.

При выводе аналитических зависимостей за основу приняты выражения, полученные учеными Белорусского национального технического университета под руководством проф. Исаевича Д.А. По ним составлена структура для расчета усилия и момента при прокатке с нарастающим обжатием, представленная на рис. 8. Формулы для вычисления углов и коэффициентов, входящих в структуру:

$$\alpha = \alpha_k - \beta; \quad D = 2f \left(1 + \frac{2R}{h} \right) / \sqrt{1 + \frac{4R}{h}}; \quad \alpha_k - \beta; \quad E = 1 + \frac{4R}{h}. \quad (4)$$

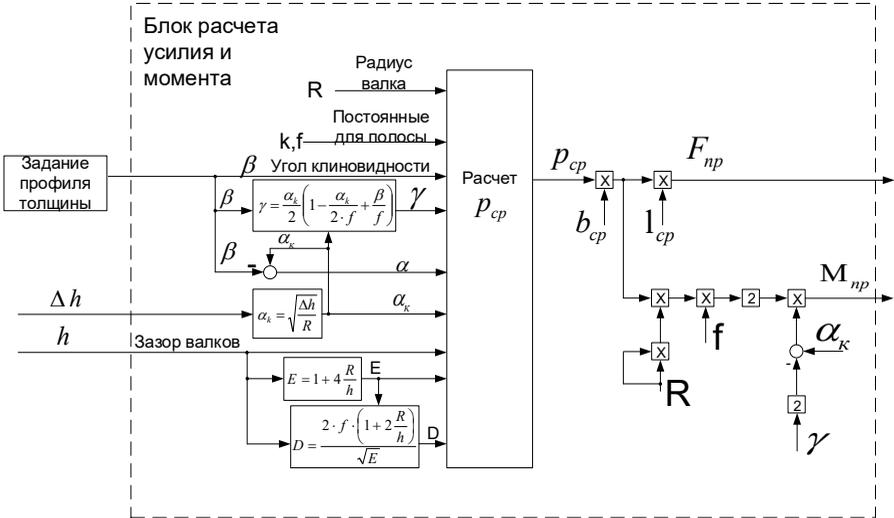


Рис. 8. Структура блока расчета усилия и момента при деформировании металла валками во время прокатки

Критический угол определяется по упрощенному уравнению, которое получено из условия равновесия сил в очаге деформации:

$$\gamma = \frac{\alpha_k}{2} \left(1 - \frac{\alpha_k}{2f} + \frac{\beta}{f} \right). \quad (5)$$

Мгновенное опережение в сечении выхода из очага деформации при прокатке металла переменного сечения с нарастающим обжатием

$$S = \frac{\left\{ 1 + \frac{R}{h} \beta^2 + 2 \frac{R}{h} \left[\gamma \beta + \frac{(\gamma - \beta)^2}{2} - \frac{\beta^2}{2} \right] \right\} \left[1 - \frac{(\gamma - \beta)^2}{2} \right]}{\left(1 + \frac{R}{h} \beta^2 \right) \left(1 - \frac{\beta^2}{2} \right)} - 1. \quad (6)$$

Представленная структура и зависимости (4)–(6) составляют основу методики расчета энергосиловых параметров прокатки с нарастающим обжатием. Они использованы при разработке имитационной модели электромеханических

систем вертикальной и горизонтальной клетей и гидравлических НУ, взаимосвязанных через металл (в связи с ограниченным объемом структура модели здесь не приводится).

В целом, в результате применения приведенных зависимостей *теория прокатки в приводных валках постоянного радиуса с изменяющимся межвалковым зазором в процессе деформирования металла получила развитие для профилированной прокатки слябов на толстолистовых станах.*

Результаты моделирования. Характерные расчетные зависимости, полученные при моделировании прокатки за один проход представлены на рис. 9. Они построены для случаев прокатки с профилированием по обычной технологии без коррекции скоростей (рис. 9, а) и при реализации разработанного способа согласования скоростей валков (рис. 9, б). Захват происходит в момент t_1 , далее в интервале t_2-t_3 осуществляется профилирование (продавливание) металла горизонтальными валками. Глубина профиля 5-7 мм, что при толщине сляба 250 мм, составляет 2-3 %.

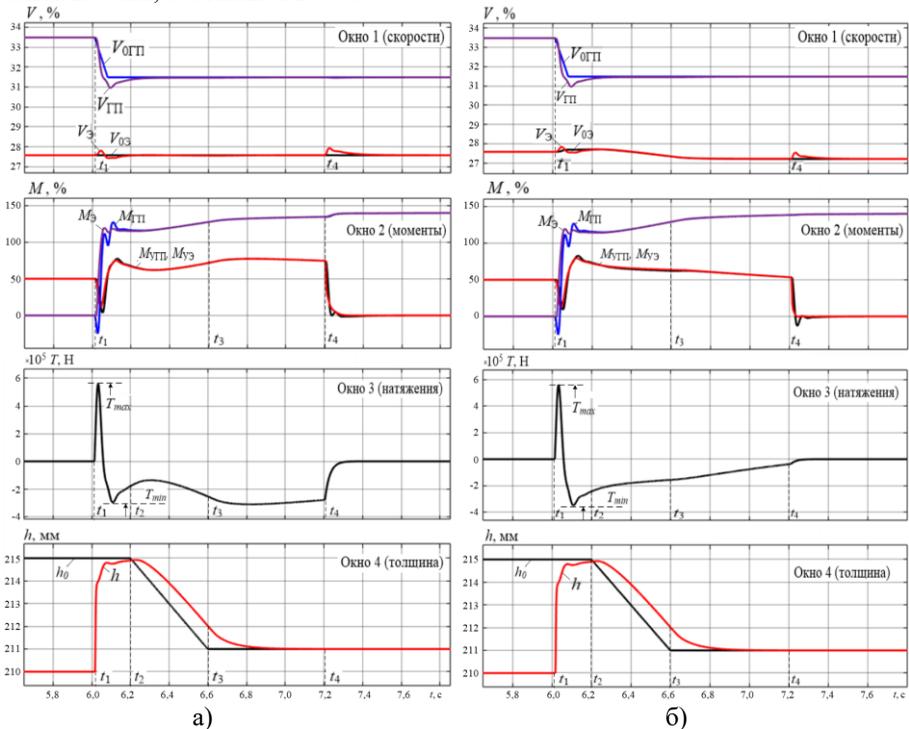


Рис. 9. Временные зависимости за цикл прокатки без коррекции скоростей (а) и при моделировании разработанного способа (б): окно 1 – заданные $V_{огп}$, $V_{оэ}$ и актуальные $V_{гп}$, $V_{э}$ скорости электроприводов клетки и эджера (в % максимальной); окно 2 – $M_{гп}$, $M_{э}$ – электромагнитные моменты двигателей главного привода ГВ и эджера; $M_{угп}$, $M_{уэ}$ – упругие моменты на шпинделях (в % номинальных); окно 3 – T – межклетевое натяжение (подпор), Н; окно 4 – задание толщины h_0 и фактическая толщина h раската на входе клетки, мм.

На рис. 9, а натяжение T (окно 3) изменяется в пределах $(-20) - (-30)$ т (за исключением первоначального броска) и не приходит к первоначальному нулевому значению. Подпор имеет место в течение всего прохода, поскольку согласования скоростей не осуществляется.

При реализации разработанного способа (рис. 9, б) натяжение T (окно 3) к моменту t_4 окончания прокатки приближается к нулевому значению. Это происходит вследствие коррекции задания V_0 и соответственно фактической скорости V двигателя эджера (окно 1).

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанных технических решений и их внедрения на стане 5000 ПАО «ММК».

В алгоритме САРТ реализован разработанный способ предупреждения, представленный в разделе 2. Проведены экспериментальные исследования прокатки раскатов различного сортамента. Характерные осциллограммы представлены на рис. 3, б. В результате их анализа сделаны следующие выводы:

1. На осциллограммах в окне 1 сдвиг между заданием и актуальной толщиной $\Delta t_T \approx 0,1$ с, т.е. по сравнению с рисунком 3, а он уменьшился в 2 раза. Это обеспечено за счет предупреждения. Ошибка регулирования $\Delta h_T = 1$ мм, снизилась также в 2 раза и составляет 0,4% установившегося значения.

2. Представленные осциллограммы соответствуют расчетным зависимостям, приведенным на рис. 6. Это подтверждает адекватность модели объекту и достоверность выводов, сделанных по результатам моделирования.

Результаты экспериментальных исследований также подтвердили, что при реализации разработанного способа согласования скоростей металла и валков, рассмотренного в разделе 3, обеспечивается ликвидация подпора вертикальных валков в динамическом режиме, вызванном перемещением НУ при наличии металла в валках (анализ приведен в диссертации).

Способ предупреждающего регулирования зазора валков перед захватом.

С целью ограничения динамических нагрузок при захвате металла валками разработан способ регулирования межвалкового зазора, аналогичный управлению НУ при профилированной прокатке. Его суть заключается в следующем. Перед входом металла в очаг деформации рабочие валки вращаются с линейной скоростью, горизонтальная составляющая, которой равна скорости движения металла на рольганге. При этом очаг деформации в вертикальном направлении установлен на толщину головной части раската. Через заданное время после входа «головы» раската в очаг деформации последний замыкается на предварительно определенное значение. Одновременно с этим регулируется скорость валков в функции скорости изменения межвалкового зазора.

Представленный способ поясняется осциллограммами, представленными на рис. 10. Их анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Непосредственно после захвата в момент времени t_1 зазор НУ уменьшается от 5,2 мм до 4,9 мм. Замыкание зазора происходит в два этапа, это сделано для надежного срабатывания датчика наличия металла в валках.

2. Через 0,35 с в момент t_2 вследствие перемещения НУ, зазор устанавливается равным требуемой толщине раската на выходе клетки.

3. Динамическая просадка скорости $\Delta n, \%$ составляет 15,6% (от 51 об/мин до 43 об/мин).

4. Перерегулирование моментов $M_{ДВ(В)}$, $M_{ДВ(Н)}$ двигателей электроприводов $\Delta M_{МАХ}=60\%$ (максимальное значение 4000 кН·м при установившемся 2500 кН·м). Эффект заключается в снижении перерегулирования и исключении колебаний момента при захвате.

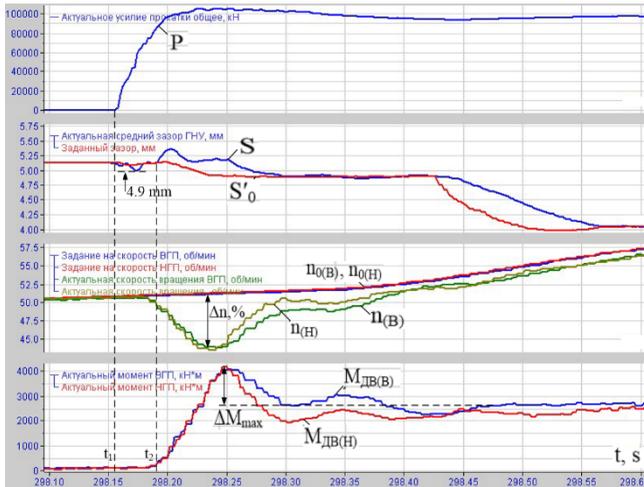


Рис. 10. Регулирование зазора валков после захвата

В результате реализации предложенного способа косвенно ограничивается влияние на динамический процесс рассогласования скорости металла на рольганге и окружающей скорости валков. Также устраняется влияние соотношения предварительно установленного межвалкового зазора и толщины «головы» раската. Проведенные исследования подтвердили, что

предложенный способ регулируемого изменения зазора перед захватом с точки зрения ограничения динамических нагрузок является эффективным.

В связи с этим выполнено внедрение разработанного способа на стане 5000. Это обеспечило следующие технические эффекты:

- сокращение времени аварийных простоев стана, обусловленных поломками оборудования линий главных приводов;
- сокращение затрат на устранение последствий аварий, замену и восстановление оборудования;
- повышение срока службы электрического и механического оборудования за счет снижения динамических нагрузок.

Благодаря внедрению алгоритма предупреждения обеспечивается снижение расходного коэффициента за счет сокращения обреза.

Ожидаемый годовой эффект, рассчитанный на изменении затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном и регламентном режимах составил 5,76 млн руб./год, что подтверждено соответствующим актом.

Выполненные разработки рекомендуются для промышленного внедрения на толстолистовых и широкополосных прокатных станах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. В результате проведенных исследований установлено, что эффективным способом улучшения геометрии листового проката является прокатка с профилированием широких граней раската горизонтальными валками. В результате формируется двойной конический профиль толщины «собачья кость». Это позволяет компенсировать отклонение формы раската от прямоугольной.

2. Разработана САРТ с упреждающим регулированием толщины (предупреждением). Отличительным признаком является включение положительной связи по заданию толщины на вход регулятора положения гидравлических НУ. В результате повышается быстродействие системы.

3. Разработаны способ и система ограничения силового взаимодействия электромеханических систем горизонтальной и вертикальной клетей в режиме профилированной прокатки. Согласно способу при изменении зазора валков, вызванном перемещением НУ, осуществляется регулирование скорости электропривода валков вертикальной клетки пропорционально приращению линейной скорости металла на входе в горизонтальную клетку. В результате обеспечивается постоянство объема металла в межклетевом промежутке.

4. Разработана имитационная модель взаимосвязанных электромеханических систем клетей стана 5000 и гидравлических НУ горизонтальной клетки в структуре САРТ. Она содержит блоки, моделирующие электроприводы как двухмассовые системы, блок моделирования нагрузки и ее распределения по двигателям, а также модели контура НГС (регулирования положения гидравлического НУ) и контура регулирования положения НУ (модель АГС), реализующего принцип Головина-Симса.

5. Представлены результаты моделирования, подтверждающие повышение точности и увеличение быстродействия регулирования толщины в режиме перемещения НУ при реализации разработанного алгоритма с предупреждением. Сделан вывод, что двойной конический профиль формируется с более высокой точностью. Это подтверждает достижение цели, заключающейся в приближении формы листа в плане к прямоугольной.

6. В результате моделирования сделан вывод, что при реализации разработанного способа согласования скоростей вертикальных и горизонтальных валков натяжение достигает заданного значения через 0,6 с после окончания профилирования. Это подтверждает ограничение силовой связи валков и исключение подпора в межклетевом промежутке.

7. Разработан способ ограничения динамических нагрузок, согласно которому величина зазора валков до захвата устанавливается на уровне, близком к толщине головной части, а после захвата возвращается в положение, соответствующее заданной толщине раската на выходе клетки. При этом осуществляется коррекция скорости валков пропорционально изменению положения нажимного устройства.

8. Алгоритм, реализующий разработанный способ, внедрен в программное обеспечение АСУ ТП реверсивной клетки стана 5000. В ходе экспериментов подтверждено снижение перерегулирования и колебаний момента на валу двигателя.

9. Выполненные разработки представляют собой комплекс технических решений, обеспечивающих совершенствование концепции ROLL-GAP CONTROLL с целью повышения точности формирования продольного профиля раската в режиме профилированной прокатки. Они рекомендуются к внедрению на толстолистовых станах.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Гасияров, В.Р. Ограничение динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана за счет регулирования зазора валков / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, **С.С. Воронин**, К.Э. Одинцов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 82–95. DOI 10.14529/power180210.
2. Гасияров, В.Р. Повышение точности регулирования толщины раската в режиме профилированной прокатки средствами электро- и гидропривода / В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, **С.С. Воронин** // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 2(43). – С. 43–53. DOI 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-43-53.
3. Карандаев, А.С. Совершенствование алгоритмов регулирования толщины и профиля зазора валков реверсивной клетки толстолиствого прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, **С.С. Воронин**, Б.М. Логинов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 53–64. DOI 10.17213/0136-3360-2019-4-53-64.

Статьи в журналах из баз Scopus и WoS

4. Gasiyarov, V.R. Automatic control system of speed of synchronous motor / V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, **S.S. Voronin**, E.A. Maklakova // Procedia Engineering – 2015. – Vol. 129. – Pp. 57-62. DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.008.
5. Gasiyarov, V.R. Dynamic torque limitation principle in the main line of a mill stand: explanation and rationale for use / V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin, **S.S. Voronin**, T.A. Lisovskaya, O.A. Gasiyarova // Machines – 2019. – 7(4). –76. DOI 10.3390/machines7040076.

Труды конференций из баз Scopus и WoS

6. **Voronin, S.S.** A development of the method of the control signal formation for the hot plate mill automation systems to improve the flatness of the finish plate / S.S. Voronin, V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov // MATEC Web of Conferences: 7th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM). – 2016. – Vol. 45. – 04001. DOI 10.1051/mateconf/20164504001.
7. Maklakova, E.A. Simulation modeling of the rolling mill stand 5000 OJSC MMK / E.A. Maklakova, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, **S.S. Voronin** // Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2016. – 7911498. DOI 10.1109/ICIEAM.2016.7911498.
8. Gasyarov, V.R. Improvement of work roll bending control system installed at plate mill stand / V.R. Gasyarov, A.A. Radionov, B.M. Loginov, **S.S. Voronin**, V.R. Khramshin // Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE). – 2017. – Pp. 269–273. DOI 10.1145/3057039.3057105.
9. Khramshin, V.R. Study of automated no-pull control system in the continuous mill train / V.R. Khramshin, A.G. Shubin, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, **S.S. Voronin**, 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 672-677. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317184.

Патенты РФ, свидетельства о гос. регистрации

10. **Воронин, С.С.** Расчет параметров жесткости клетки "КВАРТО" для толстолистовых станов горячей прокатки / С.С. Воронин, В.Р. Гасияров // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015618815, 19.08.2015. Заявка № 2015615931 от 02.07.2015.

Воронин Станислав Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
КЛЕТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТНОГО СТАНА В
РЕЖИМЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ РАСКАТА**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский Центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 11.2021. Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ.л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.