

На правах рукописи



ГАСИЯРОВ ВАДИМ РАШИТОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТНОГО
СТАНА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск – 2020

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

- Научный консультант: доктор технических наук, профессор
РАДИОНОВ Андрей Александрович
- Официальные оппоненты: ОСИПОВ Олег Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва,
профессор кафедры автоматизированного
электропривода
- ПЯТИБРАТОВ Георгий Яковлевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Южно-Российский
государственный политехнический
университет (НПИ) имени М.И. Платова»,
г. Новочеркасск, профессор кафедры
электрооборудования и электропривода
- ХАКИМЬЯНОВ Марат Ильгизович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа,
заведующий кафедрой электротехники и
электрооборудования предприятий
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет», г. Липецк

Защита состоится 19 марта 2021 г. в 13 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.111.04 при ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.111.04
к.т.н., доцент



К.Э. Одинцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В истекшие два десятилетия на отечественных металлургических предприятиях введены в строй три современных толстолистовых прокатных стана 5000. Эти станы построены в ПАО «Северсталь» (г. Колпино) в 2000 г., ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») в 2009 г., и ОАО «ВМЗ» (г. Выкса, Нижегородская область – в 2011 г.). Генеральным подрядчиком строительства являлась компания SMS-group (Германия). Стан 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000) оснащен самой мощной прокатной клетью в Европе, обеспечивающей усилие до 12 тыс. т, двигатели каждого вала имеют мощность 12 МВт.

Прокатка слябов осуществляется в двух клетях: обжимной с вертикальными валами и горизонтальной клетки кварты. Прокатка в них ведется в реверсивном режиме и подразделяется на две стадии: черновую, включающую 5-6 проходов, и чистовую, включающую до 19 проходов. Могут применяться три технологии: нормальная, контролируемая и термомеханическая прокатка. В черновой стадии прокатываются последовательно все заготовки партии, в чистовой – каждая заготовка индивидуально.

Высокая производительность этих агрегатов, производственная кооперация с трубопрокатными заводами обеспечивают возможность полного импортозамещения за счет вытеснения с отечественного рынка зарубежных фирм-производителей металлопроката для труб большого диаметра.

Основными факторами, снижающими конкурентоспособность продукции отечественных металлургических предприятий, являются высокие расходные коэффициенты и большие эксплуатационные затраты. При производстве толстого листа это связано со сложностью управления технологическим процессом и неудовлетворительной точностью регулирования параметров прокатки. Неэффективная работа систем автоматического регулирования технологических параметров приводит к значительным потерям металла с боковой и концевой обрезью, увеличению процента брака.

Для повышения конкурентоспособности металлопроката наряду со снижением удельных затрат необходимо постоянное повышение его качества. Показатели качества, в первую очередь, определяются геометрическими размерами производимого листа и температурными режимами прокатки. Это предопределяет необходимость точного соблюдения скоростного режима и обеспечения заданных обжатий, которые определяют тепловое состояние металла в очаге деформации. Наряду с этим, предъявляются высокие требования к техническому состоянию оборудования клетей и вспомогательных механизмов.

Выполнение указанных требований определяет актуальность разработки новых и совершенствования существующих систем автоматического регулирования параметров прокатки. При этом ставится задача исследования взаимосвязей электротехнических (электромеханических и гидравлических) систем вертикальной и горизонтальной клетей в динамических режимах, вызванных захватом металла. Необходимо согласование работы сложных систем технологической автоматизации, объединенных концепцией ROLL-GAP CONTROLL, разработанной фирмой SMS-Demag AG (в настоящее время – SMS group), rea-

лизованной на стане. Конечной целью является обеспечение высокой точности геометрических размеров готового листа.

Недостаточный опыт эксплуатации современных толстолистовых станов, интенсивный технический прогресс прокатного производства, тенденции изменения сортамента, ужесточение требований к размерной точности потребовали корректировки ряда положений теории взаимосвязанных электротехнических систем реверсивной клетки и совершенствования способов управления.

В направлении разработки промышленных, в том числе металлургических, электроприводов наиболее значимых результатов добились российские ученые: В.П. Бычков, В.И. Ключев, А.И. Целиков, Н.Н. Дружинин, А.С. Филатов, И.А. Селиванов, О.И. Осипов, В.Н. Мещеряков. Вклад в развитие теории и практики взаимосвязанных электромеханических внесли Г.Я. Пятибратов, А.Р. Колганов, Ю.С. Усынин, О.А. Кравченко, С.И. Лукьянов. Следует также отметить труды сотрудников ИЧМ НАН Украины.

В направлении исследования реверсивных станов наиболее полными являются научные разработки М.Ю. Файнберга и В.Н. Выдрина. Однако они датируются 60-ми годами прошлого столетия, к тому же в них решались в основном проблемы технологии. Обобщенным научным исследованиям и разработкам взаимосвязанных электротехнических систем толстолистовых станов не уделено должного внимания.

Целью диссертационной работы является развитие теоретических положений и разработка комплекса научно-обоснованных технических решений, направленных на совершенствование автоматизированных электротехнических систем толстолиствого прокатного стана, обеспечивающих расширение сортамента, снижение материалоемкости и улучшение качества проката.

Задача расширения сортамента рассматривается с позиций оценки возможности прокатки толстых слябов из труднодеформируемых (хладостойких и специальных) марок стали. Снижение материалоемкости обеспечивается за счет сокращения боковой и торцевой обрезки и сокращения брака, улучшение качества – за счет повышения точности геометрических размеров. Важнейшим сопутствующим направлением является снижение аварийности силового электрического и механического оборудования. Это достигается путем ограничения динамических нагрузок и силового взаимодействия электромеханических систем валков горизонтальных и вертикальных клетей через металл.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Проведение исследований установившихся и динамических режимов электроприводов стана 5000 с целью анализа нагрузок при производстве листов расширенного сортамента. Анализ взаимосвязей электромеханических и гидравлических систем реверсивной клетки, обоснование направлений разработки алгоритмов согласованного управления.

2. Разработка математических моделей взаимосвязанных электроприводов горизонтальной и вертикальной клетей и гидравлических приводов нажимных устройств (НУ). Разработка способа ограничения силовой взаимосвязи клетей в режиме перемещения НУ при профилированной прокатке.

3. Разработка методики оценки ограничений, накладываемых электроприводом на технологический процесс, включающей:

– уточненные аналитические зависимости, алгоритм и программу расчета усилия прокатки при высоких очагах деформации;

– алгоритм расчета эквивалентных нагрузок индивидуальных электроприводов реверсивной клетки по результатам замеров токов (моментов) в on-line режиме.

4. Разработка систем автоматического управления электроприводами горизонтальных валков, обеспечивающих заданные параметры раската в режиме лыжеобразования и сокращение времени выравнивания нагрузок в квазиустановившемся режиме прокатки.

5. Развитие концепции ROLL-GAP CONTROLL регулирования толщины и положения нажимных устройств с целью повышения точности регулирования «геометрии» раската и снижения аварийности оборудования.

6. Развитие теории и практики двухмассовых электромеханических систем с наблюдателями упругого момента. Разработка системы компенсации динамических нагрузок неуправляемой массы (валка) средствами управляемой массы (электропривода). Для этого ставятся следующие задачи:

– разработка наблюдателя, обеспечивающего косвенное определение (восстановление) скорости и момента второй массы по непрерывно измеряемым параметрам первой массы;

– разработка и исследование системы ограничения упругого момента в режиме ударного приложения нагрузки на основе разработанного наблюдателя.

7. Научное обоснование и разработка алгоритмов задания скоростных режимов (тахограмм) электропривода с упругой связью, обеспечивающих снижение составляющих упругого момента и соответственно динамических нагрузок при входе металла в клеть.

8. Экспериментальные исследования и внедрение выполненных разработок на действующих прокатных станах. Опытно-промышленные испытания, оценка технической и экономической эффективности.

Методика проведения исследований. Разработка теоретических положений основывалась на базовых принципах теории электропривода, теории многосвязных систем, теории автоматического управления, теории прокатки. Использовались методы решения дифференциальных уравнений, операционного исчисления, логарифмических частотных характеристик.

При проведении исследований применен комплексный подход, включающий: анализ известных разработок, теоретический анализ, экспериментальные исследования в промышленных условиях, исследования методами математического моделирования, сопоставительный анализ и обобщение результатов.

Применены следующие методы исследования:

– имитационное моделирование с использованием средств программного пакета Matlab и входящего в его состав пакета Simulink;

– использование авторских программ, разработанных на языке Object Pascal для Windows Borland Delphi 7.0;

– проведение экспериментальных исследований и опытно-промышленных испытаний систем и алгоритмов на прокатных станах ПАО «ММК».

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Теоретически и экспериментально обоснованные концептуальные направления развития взаимосвязанных электротехнических систем толстолистовых прокатных станов, обеспечивающие снижение материалоемкости, улучшение качества и расширение сортамента проката.

2. Математическая модель электроприводов горизонтальных и вертикальных клетей и гидравлических приводов нажимных устройств, разработанная с учетом взаимосвязи очагов деформации через металл. Комплекс упрощенных моделей, обеспечивающих исследование проектных и разработанных алгоритмов управления.

3. Способ и система согласования скоростей электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей в режиме перемещения гидравлических НУ, обеспечивающие реализацию принципа «постоянства массы» металла в межклетевом промежутке.

4. Уточненные аналитические зависимости для расчета усилий прокатки при высоких очагах деформации. Алгоритм расчета эквивалентных нагрузок электроприводов горизонтальной клетки на основе измерения энергосиловых параметров в on-line режиме.

5. Система лыжеобразования и согласования нагрузок электроприводов с переключающейся структурой, обеспечивающая формирование заданных параметров «лыжи» независимо от толщины раската и сокращение времени выравнивания нагрузок в квазиустановившемся режиме прокатки.

6. Способ и система ограничения осевого смещения раската на входе в клеть и серповидности на выходе клетки путем быстродействующей компенсации текущей асимметрии поперечного профиля и предиктивного регулирования наследственного перекоса зазора валков.

7. Концептуальный подход, способы и алгоритмы снижения нагрузок главной линии прокатной клетки путем индивидуальной компенсации составляющих динамического момента, обусловленных замыканием углового зазора, упругими свойствами шпинделя и настройкой системы автоматического регулирования скорости электропривода.

8. Цифровой наблюдатель упругого момента в двухмассовой электромеханической системе и разработанная на его основе система ограничения динамического момента в режиме ударного приложения нагрузки.

9. Результаты опытно-промышленной эксплуатации и внедрения разработок, подтвердившие: создание технических предпосылок для расширения сортамента, улучшение качества листового проката, сокращение материалоемкости и снижение аварийности производства.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждаются:

– выбором направлений исследований, выполненным на основе анализа режимов электроприводов, систем и алгоритмов управления электротехнических комплексов агрегатов прокатного производства;

– анализом опыта эксплуатации толстолистовых прокатных станов;

- исследованием причин отклонений геометрических размеров листового проката и ухудшения показателей эксплуатационной надежности электротехнических систем стана 5000 ПАО «ММК»;

- корректным применением известных теоретических положений в области автоматизированного электропривода, обработки металлов давлением, теории автоматического управления;

- сопоставлением результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований, проводимых на всех этапах диссертационной работы;

- соответствием полученных результатов научным положениям, опубликованным другими авторами;

- результатами исследований и опытно-промышленной эксплуатации внедренных разработок.

Научная новизна. В работе получены следующие научные результаты:

1. Разработана методика оценки ограничений, накладываемых электроприводом на технологический процесс толстолистового стана, включающая аналитические зависимости расчета усилия прокатки в реверсивном режиме с большими обжатиями и алгоритм автоматизированного расчета эквивалентных параметров нагрузки (моментов либо мощностей) двигателей в on-line режиме.

2. Разработан способ управления электроприводами валков горизонтальной и вертикальной клетей в режимах прокатки с регулируемым формоизменением раската, обеспечивающий реализацию принципа «постоянства массы».

3. Научно обоснованы способы автоматического управления скоростными режимами электроприводов, обеспечивающие согласование режимов формирования «лыжи» и автоматического выравнивания нагрузок в квазиустановившемся режиме прокатки.

4. Получила развитие концепция ROLL-GAP CONTROLL реверсивной клетки толстолистового стана в направлении повышения точности регулирования «геометрии» раската и снижения аварийности оборудования.

5. Обоснован принцип перераспределения регулирующих воздействий на исполнительные устройства клетки, на основе которого разработана система регулирования асимметрии зазора валков, осуществляющая:

- измерение дифференциального рассогласования усилий в исполнительных устройствах (гидравлических НУ) в процессе прокатки;

- формирование управляющего воздействия пропорционально измеренному рассогласованию усилий на более нагруженное устройство либо разнонаправленного воздействия на оба устройства;

- согласование режимов взаимосвязанных систем автоматического регулирования положений НУ путем задания обратно пропорциональных коэффициентов передающих звеньев.

6. Обоснован принцип ограничения динамических нагрузок при ударном приложении нагрузки, согласно которому осуществляется индивидуальная компенсация составляющих динамического момента, обусловленных:

- непосредственно замыканием зазоров в механических сочленениях;

- характеристиками упругости и демпфирующими свойствами валопроводов;
- настройкой системы автоматического регулирования скорости электропривода.

Данный подход является концептуальным, т.к. относится к любым электромеханическим системам с упругой связью и зазором в передачах и может быть реализован различными способами.

7. Получила развитие теория двухмассовых электромеханических систем с наблюдателями упругого момента. Разработан наблюдатель (цифровой двойник) упругого момента в двухмассовой электромеханической системе, на основе которого предложена система компенсации динамических нагрузок второй массы (валка) средствами первой массы – двигателя электропривода.

Практическая ценность работы состоит в том, что по ее результатам созданы технические предпосылки для расширения сортамента проката толстолистовых и широкополосных станов. Независимо от сортамента внедрение разработанных решений обеспечивает снижение материалоемкости, аварийности производства и повышение качества выпускаемой продукции.

1. Разработанная методика, программы расчета усилий при высоких очагах деформации и нагрузочных режимов электроприводов переданы в калибровочное бюро ПАО «ММК», где используются при освоении новых профилей листового проката на стане 5000 и полос трубного сортамента на стане 2000.

2. Предложенный принцип перераспределения регулирующих воздействий на исполнительные устройства клетки получил техническую реализацию на стане 5000 в виде алгоритмов управления в системах:

- согласования режимов регулятора деления нагрузок (РДН) и системы лыжеобразования;
- компенсации асимметрии зазора валков в процессе прокатки за счет автоматического регулирования положений НУ, расположенных на приводной и неприводной сторонах клетки.

3. Комплекс разработок, обеспечивающий снижение аварийности силового электрического и механического оборудования за счет ограничения динамических нагрузок в режиме захвата металла валками внедрен в промышленную эксплуатацию на стане 5000.

4. Алгоритмы регулирования межклетевых натяжений и согласования нагрузок электроприводов в квазиустановившемся режиме прокатки (регулирование на «постоянства массы») внедрены в АСУ ТП непрерывной подгруппы стана 2000.

5. Внедрение разработанных систем и алгоритмов обеспечивает:

- улучшение качества за счет повышения размерной точности проката;
- повышение устойчивости прокатки листов расширенного сортамента;
- снижение расходного коэффициента за счет сокращения брака и потерь с обреза;
- снижение аварийности электрического и механического оборудования.

6. В результате экспериментальных исследований и длительной эксплуатации подтверждены показатели технико-экономической эффективности вне-

дренных систем: экономия металла в объеме 4,7 тыс. т/год, увеличение срока эксплуатации оборудования главной линии клетки от 3 до 8 лет, снижение затрат на замену шпинделя на 5,76 млн руб./год. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения на двух станах – 12,7 млн руб./год.

7. Разработанные способы и алгоритмы управления рекомендуются для внедрения на толстолистовых и широкополосных станах горячей прокатки. Программы расчета нагрузочных режимов рекомендуются для применения при прокатке новых сортов, преимущественно, трубной заготовки из труднодеформируемых марок стали.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 27 международных конференциях и заседаниях научных сообществ, в том числе: VI, X Международных конференциях по автоматизированному электроприводу (АЭП), Тула, 2010 г., Новочеркасск, 2018 г.; International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Томск, 2014 г.; Международной XVI научно-технической конференции “Электроприводы переменного тока (ЭППТ), Екатеринбург, 2015 г.; International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Омск, 2015 г.; 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Новосибирск, 2016 г.; 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Челябинск, 2016 г.; 7th, 9th, 10th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM), Сингапур, 2016 г., Пхукет, Таиланд, 2018, 2019 г.; IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), Санкт-Петербург, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.; 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Флоренция, Италия, 2016 г.; Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Омск, 2016 г.; IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Санкт-Петербург, 2017 г.; 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Австралия, 2017 г.; 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Челябинск, 2017 г.; 43rd, 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Пекин, Китай, 2017 г., Лиссабон, Португалия, 2019 г.; IEEE 12th, 13th International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Синай, Индия, 2018 г., Тулуза, Франция, 2019 г.; International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Сочи, 2018, 2020 г.; IEEE 10th, 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIIT), Кейптаун, ЮАР, 2019, 2020 г.

В 2010–2017 гг. работа выполнялась в рамках прямых договоров с ПАО «ММК». В 2017-2019 гг. исследования выполнялись в рамках Госзадания (№13.9656.2017/БЧ от 10.03.2017 г).

Публикации. По содержанию диссертационной работы опубликовано 59 научных трудов, в том числе монография, 16 статей в рецензируемых изданиях, 12 статей и 17 докладов в изданиях, входящих в базы данных WOS и Scopus, в том числе 2 статьи – в изданиях, входящих во II квартиль. Получен патент РФ на изобретение, зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 330 наименований. Работа изложена на 331 странице основного текста, содержит 119 рисунков, 44 таблицы и приложение объемом 28 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено современное состояние производства толстолиствого проката, дана характеристика стана 5000 ПАО «ММК», обоснованы направления исследований, сформулированы цель и задачи, изложено содержание диссертации по главам.

В первой главе рассмотрены технологический процесс и состав оборудования реверсивной клетки стана 5000, представлен анализ режимов электроприводов, исследованы причины возникновения дефектов раската и недопустимых динамических нагрузок.

Фотография клетки со стороны подводящего рольганга (печей) приведена на рис. 1, а. На ней видны наклонно расположенные шпиндели вертикальных валков, двигатели которых установлены сверху. На рис. 1, б приведена фотография шпинделя верхнего валка горизонтальной клетки.

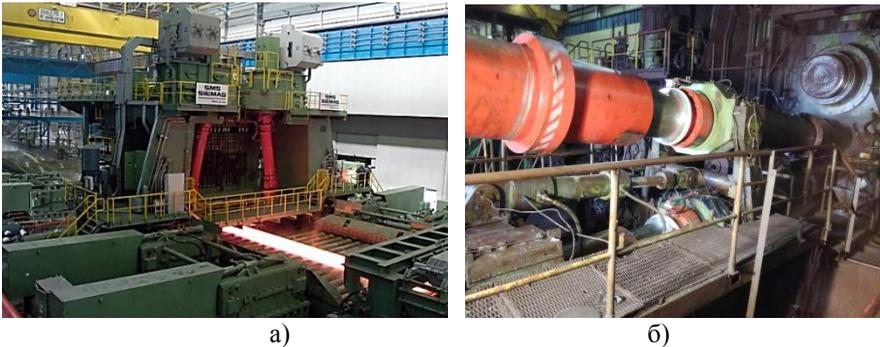


Рис. 1. Фотографии клетки стана 5000 (а) и шпинделя горизонтального валка (б)

Электроприводы верхнего и нижнего валков выполнены индивидуальными на основе синхронного двигателя (СД) с частотным регулированием скорости. Функциональная схема системы задания скоростей этих приводов приведена на рис. 2.

За время эксплуатации стана расширился сортамент проката в направлении производства толстых листов из труднодеформируемых марок стали. Это предопределило необходимость совершенствования электроприводов и систем автоматического регулирования (САР) технологических параметров.

Технология прокатки. Прокатка ведется в реверсивном режиме партиями в 5-6 слябов. Согласно технологии осуществляется черновая прокатка всех слябов партии, затем после подстуживания промежуточных заготовок (раскатов) на рольганге выполняется индивидуальная чистовая прокатка каждой заготовки до получения листа с заданной геометрией. В одном либо двух проходах черновой стадии осуществляется поперечная прокатка заготовки (разбивка

ширины). Для обеспечения прямоугольности листа в плане (вид сверху) применяется профилированная прокатка с автоматическим контролем профиля (ASC), схема которой показана на рис. 3.

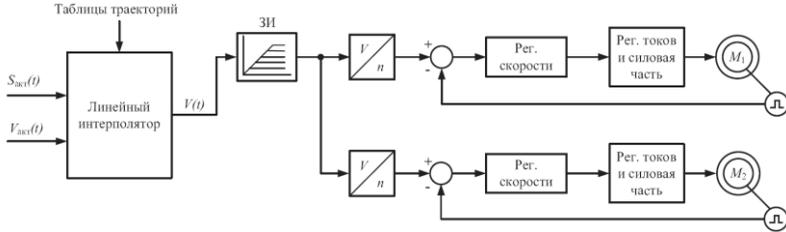


Рис. 2. Схема системы управления скоростью электроприводов клетки

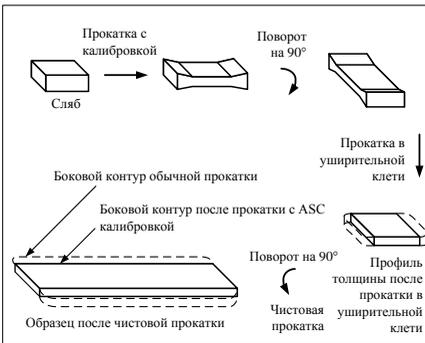


Рис. 3. Схема прокатки по технологии ASC

Функции формирования конических профилей на концах раската обеспечиваются системой автоматического регулирования толщины (САРТ), выполненной на базе гидравлических НУ. Уменьшение зазора при прокатке головного участка приводит к нарушению равенства секундных объемов металла в очаге деформации и межклетевом промежутке. Поэтому актуальной является разработка системы управления, обеспечивающей устранение данного недостатка за счет коррекции скорости вертикальных валков при перемещении НУ.

Причины ухудшения «геометрии» раската. Основным требованием к системам автоматического регулирования технологических параметров является обеспечение точной «геометрии» листа при минимальной головной и концевой обрезе. Наиболее часто встречающиеся нарушения «геометрии» обусловлены неправильным вертикальным изгибом раската (рис. 4, а, б) и его изгибом в горизонтальной плоскости («серповидностью», рис. 4, в).

При неправильном соотношении скоростей главных приводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков передний конец имеет значительный изгиб вверх («лыжа», рис. 4, а) либо может загнуться вниз (рис. 4, б). Это является недопустимым с точки зрения износостойкости оборудования рольгангов. Поэтому актуальной является задача формирования заданного изгиба, не зависящего от толщины и скорости раската. Она должна решаться путем совершенствования системы «лыжеобразования» (управления скоростями ВГП и НГП).

Причиной дефекта «серповидность» является непараллельность рабочих валков. Помимо «серпа» она приводит к боковому смещению раската на входе в клеть. При значительных искривлениях возникает опасность повреждения оборудования технологической линии, обрыва либо деформации листа. Поэтому задача устранения этого дефекта является актуальной. Она должна ре-

шаться воздействием на гидравлические НУ, расположенные на приводной (DS) и неприводной (OS) сторонах клетки. Разработка способов и алгоритмов управления, компенсирующих поперечную асимметрию зазора валков, является важной задачей, которая решается в диссертации.

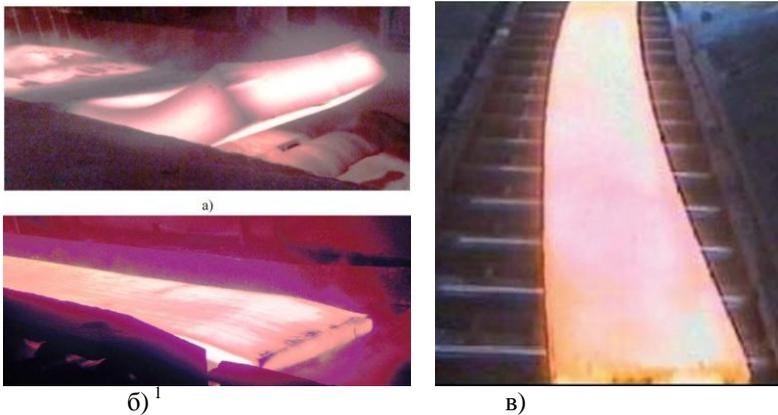


Рис. 4. Вертикальный изгиб раската– (а, б) и возникновение дефекта «серповидность» – (в)

АСУ ТП стана. Реверсивная клетка стана 5000 с точки зрения обеспечения заданных геометрических размеров листа представляет собой комплекс взаимосвязанных электро- и гидроприводов, оснащенных системами регулирования технологических параметров. Структура АСУ ТП клетки с отражением функциональных связей подсистем представлена на рис. 5.

Объектами, которые подлежат исследованию, являются автоматизированные электроприводы валков горизонтальной клетки и системы управления гидравлическими НУ, реализующие концепцию ROLL-GAP CONTROLL. В ней исполнены система автоматического регулирования толщины AGC (САРТ), и САР положения гидравлических НУ (НГС), расположенных внизу клетки под опорными валками. Кроме того, будет усовершенствована система регулирования асимметрии поперечного профиля раската на базе регулятора направления прокатки Roll Alignment Control (RAC регулятора на рис. 5 не показан). Анализ структуры и режимов систем, представленных на рис. 5, показал, что они имеют существенные взаимосвязи, обусловленные общим объектом управления. Имеют место жесткие связи электромеханических систем горизонтальной клетки, а также валков вертикальной и горизонтальной клетей при совместной прокатке.

В связи со сложностью представленной структуры, наличием жестких связей локальных САР, комплексное решение задач, поставленных в диссертации,

¹ Фотография из публикации: Система автоматического управления изгибом переднего конца раската в черновой клетке с индивидуальным приводом валков / Е.А. Варшавский и др. // Труды XI Конгресса прокатчиков. Магнитогорск – 2017. – С. 57-62.

можно охарактеризовать как вклад в развитие *теории взаимосвязанных электротехнических систем* прокатных станов.

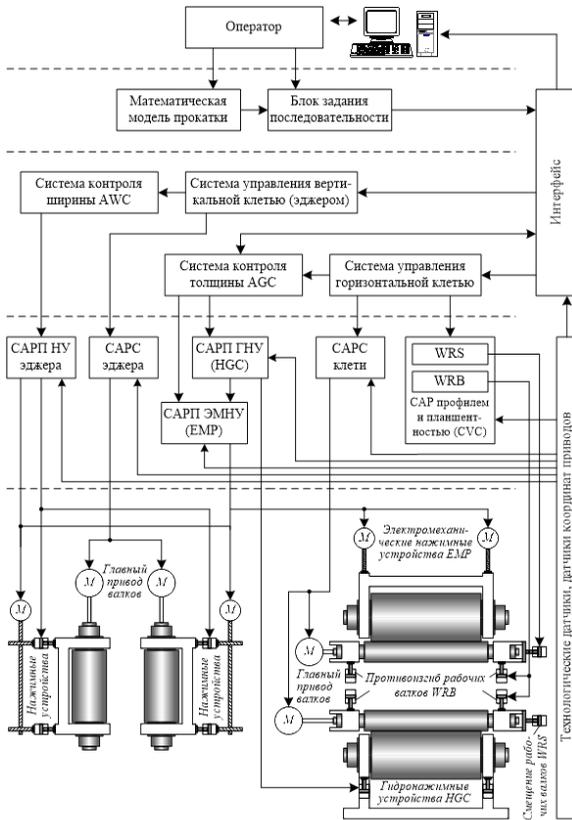


Рис. 5. Структура АСУ ТП горизонтальной и вертикальной клетей

необходимость решения задачи снижения динамических нагрузок при захвате, которая является актуальной, несмотря на давность постановки.

Вторая глава посвящена разработке математической модели электромеханических систем горизонтальной и вертикальной клетей, взаимосвязанных в процессе прокатки через металл. Она обеспечивает возможность исследования проектных и разработанных алгоритмов управления *Модели электропривода*. Анализ физических процессов, происходящих в многосвязной электротехнической системе, позволяет выделить основные узлы, показанные на рис. 6. К ним относятся электромеханические преобразователи, включающие электродвигатели, преобразователи частоты (ПЧ), клетки и межклетевые промежутки, очаги деформации.

Ограничение динамических нагрузок. Экспериментальные исследования показывают, что переходные процессы в режиме захвата металла валками сопровождаются ударными увеличениями моментов двигателя и шпинделя, которые имеют затухающий характер. При прокатке труднодеформируемых марок стали амплитуда упругого момента превышает статический момент в 2-3 раза. Выходной сигнал регулятора момента (тока) двигателя достигает насыщения, в результате электропривод переходит в неуправляемый режим.

Ударные нагрузки вызывают усталостные разрушения шпиндельных соединений и шеек валков. Поломки оборудования приводят к авариям и увеличению затрат на ликвидацию их последствий. Это предопределяет необ-

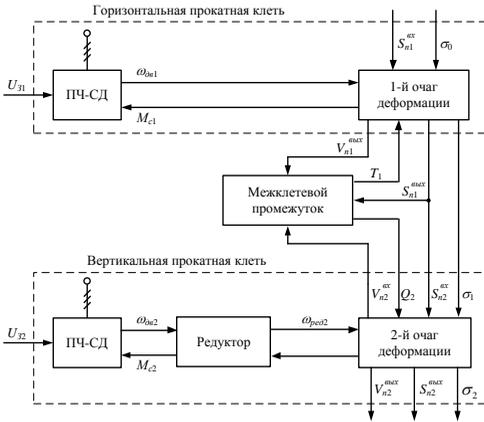


Рис. 6. Структурная схема модели электромеханических систем клетей

жений от разности скоростей:

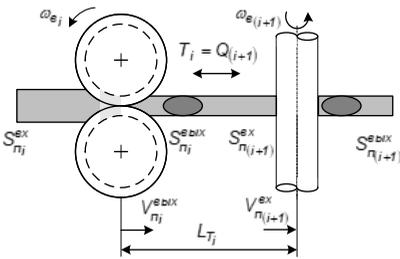


Рис. 7. Расчетная схема межклетевого промежутка

Модель СД построена на основе уравнений Парка-Горева в системе отсчета $d-q$. Действующая САР скорости осуществляет двухзонное регулирование скорости. Регуляторы синтезированы в системе координат $d-q$, контуры регулирования скорости подчинены внутренним контурам регулирования моментов и контурам регулирования потокосцепления ротора.

Схема модели взаимосвязи вертикальной и горизонтальной клетей через металл представлена на рис. 7. Ее основу составляют интегральные зависимости натя-

$$T_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{bix}}{L_{T_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_{(i+1)}}^{ex} - V_{n_i}^{bix}) \cdot dt - T_{нач_i},$$

$$Q_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{ex}}{L_{Q_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_i}^{ex} - V_{n_{(i-1)}}^{bix}) \cdot dt - Q_{нач_i},$$

где E_i – модуль упругости; L_{T_i} , L_{Q_i} – длины участков полосы, на которых действуют силы T_i и Q_i ; $T_{нач_i}$, $Q_{нач_i}$ – начальные переднее и заднее натяжения.

При разработке модели учтены зависимости скорости металла от скорости валков и формула Дрездена для расчета опережения.

Для исследования переходных процессов «внешних» координат разработана двухмассовая динамическая модель электромеханической системы. В ней учтены упругие свойства вала и зазор в передаче. При ее разработке за основу приняты математические выражения, приведенные в монографиях А.И. Целикова и учебниках В.И. Ключева.

При изменении скорости металла на входе горизонтальной клетки, возникающем при регулировании межвалкового зазора в режиме прокатки по технологии ASC, усиливается взаимодействие горизонтальных и вертикальных валков (ГВ и ВВ) через металл. Влияние разницы окружных скоростей ГВ и ВВ на натяжение описывается известным выражением, обоснованным Н.Н. Дружининым. Оно принято за основу при разработке модели поведения металла в межклетевом промежутке.

С помощью разработанной модели (рис. 6) выполнено исследование электромеханических систем клетей. Сделан вывод, что при превышении скорости ВВ над скоростью ГВ на 2% возникает подпор (отрицательное натяжение), имеющий колебательный характер с двукратной амплитудой. Это подтверждает актуальность задачи выравнивания скоростей электроприводов ГВ и ВВ в динамических режимах. Для этого необходима разработка системы согласования их скоростей при перемещении нажимных устройств.

Характеристика САРТ стана 5000. Принцип действия САРТ основан на уравнении Головина-Симса:

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

Согласно уравнению раствор валков h помимо величины зазора S зависит от растяжения клетки g , которое является функцией усилия прокатки F_W . Приращение толщины при перемещении НУ зависит от коэффициентов (модулей) жесткости клетки M_G и полосы M_B :

$$\Delta h = \Delta S_0 \frac{M_G}{M_B + M_G}. \quad (1)$$

Структурная схема САРТ приведена на рис. 8. Сигнал регулирования толщины вычисляется косвенным образом по сигналам от датчиков положения НУ и усилия прокатки. Также учитываются компенсации – корректирующие воздействия от теплового расширения валков, толщины масляной пленки в подшипниках и др. Выходной сигнал регулятора суммируется с корректирующим сигналом ACS на формирование конических профилей на концах раската. Суммарный сигнал подается на вход регулятора положения НУ (на схеме не показан).

Способ согласования скоростей электроприводов горизонтальных и вертикальных валков. При разработке за основу принят принцип управления взаимосвязанными электроприводами клетей чистой группы широкополосного стана, обоснованный в диссертации В.Р. Храмшина. В представленной работе он получил развитие в направлении применения для электроприводов толстолистового стана.

Предлагается осуществлять регулирование скорости электроприводов ВВ пропорционально разности угловых скоростей электроприводов ГВ, измеренных до и после захвата металла. Величина коррекции скорости определяется из уравнения равенства секундных объемов металла на входе и выходе клетки

$$h_0 \cdot v_0 = h_1 \cdot v_1, \quad (2)$$

где v_0, v_1 – соответствующие скорости металла.

Из (1), (2) следует выражение для приращения скорости на входе в клеть

$$\Delta v_0 = \frac{v_1}{h_0} \Delta S_0 \frac{M_G}{M_B + M_G}. \quad (3)$$

Коррекция скорости формируется звеньями, выделенными на рис. 8 контуром. Регулирующий сигнал вычисляется по выражению (3) и поступает в схему коррекции скоростей электроприводов вертикальных валков и рольгангов,

40%. Причинами такой погрешности является то, что в известных зависимостях не отражено влияние высоты очага деформации на величину угла захвата и на коэффициент трения. В результате преобразования аналитических выражений с учетом влияния данного фактора получены более точные выражения для расчета усилия P и момента прокатки M_{np} :

$$\left. \begin{aligned} P &= \sqrt{P_x^{*2} + P_y^{*2}}; \quad P_x^* = \frac{1}{2} \cdot \frac{G}{g \cdot l_1} \cdot (l_1 - x) \cdot \frac{j}{\lambda} + \frac{G}{g \cdot l_1} \cdot x \cdot j; \quad P_y^* = \frac{b_0 + b_1}{2} \int_0^\alpha P_\varphi \\ P_\varphi &= \mp t_x \cdot \operatorname{tg} \varphi \mp \frac{8 \cdot R_B^2}{(h + 2 \cdot R_B) \sqrt{h \cdot (h + 4 \cdot R_B)}} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{h + 4 \cdot R_B}{\sqrt{h \cdot (h + 4 \cdot R_B)}} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right) \mp \\ &\mp \frac{2 \cdot R_B}{h + 2 \cdot R_B} \cdot \ln \left| \frac{\operatorname{tg}(\varphi/2) + 1}{\operatorname{tg}(\varphi/2) - 1} \right| + k \cdot \ln \left| \frac{h}{2} + R_B \cdot (1 - \cos \varphi) \right| + k \cdot \left[1 - \ln \frac{h}{2} \right]; \\ M_{np} &= 2 \cdot \sqrt{P_x^{*2} + P_y^{*2}} \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot \sqrt{R_B \cdot (h_0 - h_1) - \frac{(h_0 - h)^2}{4}}; \quad \beta = 0,391 \cdot \alpha^{1,1459} \end{aligned} \right\}$$

где P_φ – удельное давление металла на валки; P_x^* , P_y^* – проекции равнодействующей давления P на соответствующие оси; G , j – вес и ускорение раската; l_1 – длина после прокатки; x – длина участка, прокатанного на текущий момент; λ – вытяжка; b_0 , b_1 – ширина на входе и выходе клетки; h_0 , h_1 – аналогичные толщины раската; t_x – удельная сила трения; φ – угол между касательной к дуге валка в точке расчета и горизонтальной плоскостью; R_B – радиус валка; β – угол точки приложения равнодействующей давления; α – угол захвата.

На основании этих зависимостей разработаны алгоритм и программа расчета энергосиловых параметров прокатки толстых заготовок. Наряду с уточненными зависимостями в них учтено ускорение при выходе металла из валков в режиме реверсивной прокатки. Выполнен сравнительный анализ результатов расчетов по известному и разработанному алгоритмам. Также дано сравнение с экспериментальными результатами, полученными на стане. Подтверждено, что погрешность расчета не превышает 7%.

Расчет среднеквадратичных значений моментов по результатам *on-line* замеров. Актуальность этой задачи поясняется осциллограммами, представленными на рис. 9. В окнах 1, 4, 5 приведены усилия прокатки, моменты и токи ВГП и НГП. Также показаны заданные и актуальные скорости валков (окно 2) и электроприводов (окно 3).

Осциллограммы моментов и токов ВГП ($M_{ВГП}$, $I_{ВГП}$) и НГП ($M_{НГП}$, $I_{НГП}$) имеют идентичный характер. При прокатке в каждом проходе среднее значение тока $I_{НГП(ср)}$ в три и более раза превышает величину $I_{ВГП(ср)}$, что недопустимо. Аналогичные осциллограммы, полученные в режиме чистовой прокатки листов той же партии демонстрируют противоположную картину: моменты и токи двигателя верхнего валка превышают аналогичные параметры двигателя нижнего валка. Это подтверждает сложность взаимосвязи ВГП и НГП через металл и актуальность тезиса, что эти электроприводы должны исследоваться в комплексе.

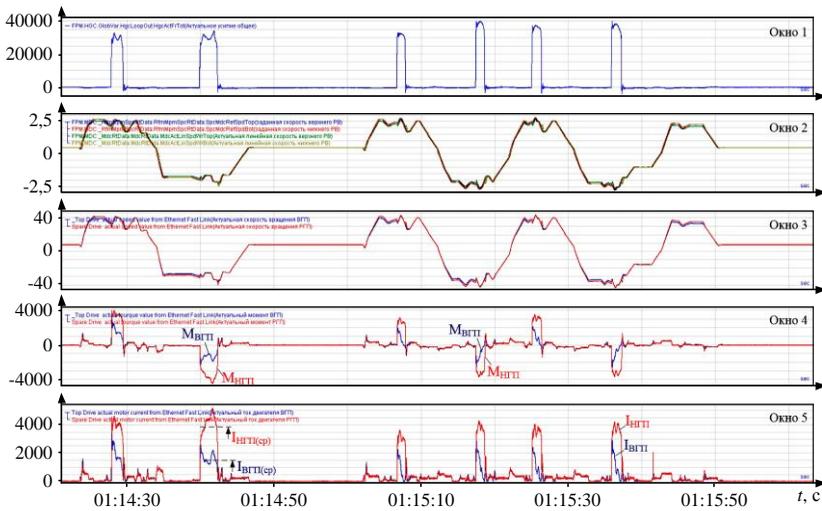


Рис. 9. Нагрузки двигателей ВГП и НГП в проходах черновой прокатки

Для получения информации об изменении эквивалентных моментов ВГП и НГП за цикл прокатки выполнена обработка массивов, полученных экспериментально. Оцифровка проводилась с заданным шагом, который для каждого прохода выбирался индивидуально. Проверка двигателя на нагрев производилась методом эквивалентного момента. Принималось, что режим работы СД происходит с минимизацией потерь энергии. В этом режиме реактивная составляющая тока статора не учитывается, следовательно, момент двигателя пропорционален его активной составляющей.

При черновой прокатке первого слитка зафиксировано $k=110\ 000$ точек с интервалом времени $\Delta t=0,002$ с. Анализ показал, что эквивалентные моменты, токи и мощности ВГП больше чем те же параметры НГП в среднем в $M_B/M_H \square 2,1$ раза. При анализе чистовой прокатки сделан противоположный вывод: $M_H/M_B \square 1,2$.

В приведенном примере осуществлялась обработка результатов измерений, выполненных заранее. Однако данный подход справедлив для расчетов по результатам замеров в on-line режиме. С этой целью разработаны алгоритм и программа, в которых предусмотрены вычисления и предварительная обработка телеметрической информации, включающая сглаживание (усреднение) измеряемых промышленных данных.

Алгоритм расчета эквивалентного момента на основе усредненных данных. Блок-схема разработанного алгоритма приведена на рис. 10.

Вопрос сглаживания возникает в связи с тем, что расчет эквивалентного момента по фактическим данным связан с обработкой больших объемов информации. Так, для расчета момента при черновой прокатке одного слитка необходимо хранение 220 000 данных вещественного типа. С целью уменьшения объема рекомендовано усреднение экспериментальных данных и проведение вычислений по известной формуле трапеций.

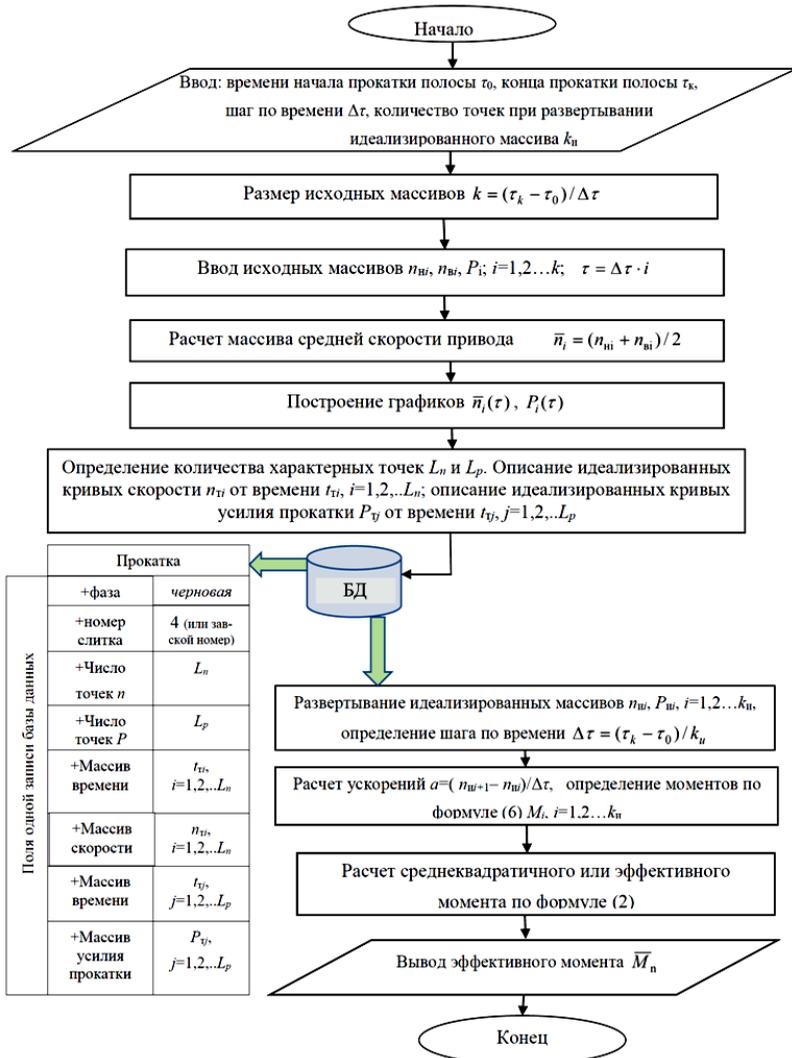


Рис. 10. Схема алгоритма расчета среднеинтегрального момента двигателя

В первой части алгоритма путем усреднения промышленных данных формируются идеализированные кривые моментов. Информация о них сохраняется в базе данных (БД) в качестве технической записи о прокатке слитков заданной партии. Во второй части на основе информации из БД определяются среднеквадратичные значения моментов двигателей ВГП и НГП, которые характеризуют их реальную загрузку. По информации, полученной за цикл прокатки, выполняется предиктивный анализ (прогнозирование) теплового состояния двигателя за полное количество циклов в партии. В случае неудовле-

творительного состояния это позволяет ввести ограничения в технологический процесс: изменить режим обжатий либо скорости прокатки.

На рис. 11 представлены результаты расчета среднеквадратичных значений момента по предложенному алгоритму для чистовой прокатки партии из пяти слитков. В окне 1 приведены осциллограммы моментов ВГП и НГП. В окне 2 – рассчитанные зависимости эквивалентных моментов этих двигателей. Результаты, полученные в конце цикла: эквивалентный момент ВГП равен 1143 кН·м, НГП – 813 кН·м, соответствующие среднеквадратичные токи 1135А, и 955 А. Таким образом в анализируемом режиме чистовой прокатки двигатель ВГП загружен в 1,4 раза больше, чем двигатель НГП.

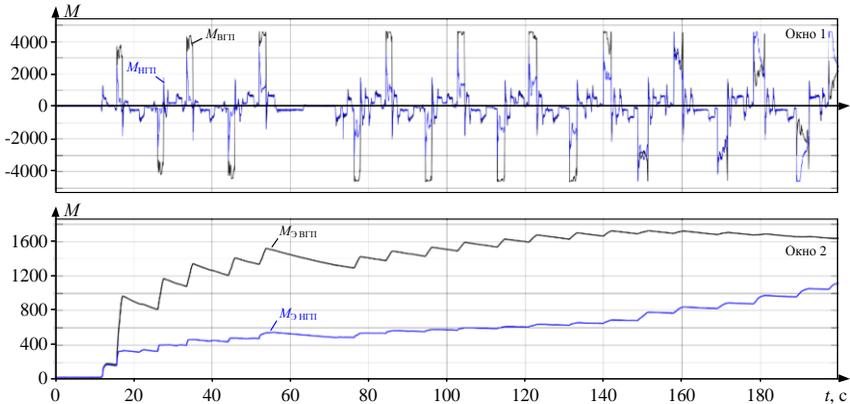


Рис. 11. Измеренные и эквивалентные моменты двигателей ВГП и НГП при чистовой прокатке пяти заготовок (фрагмент)

Для расчета эквивалентного момента согласно предложенному алгоритму необходимо хранение данных для 108 точек. Относительная ошибка расчета составляет 6–8%, что приемлемо для оценки состояния двигателя.

Таким образом, разработана методика расчета эквивалентных параметров нагрузки двигателей верхнего и нижнего валков по реальным параметрам прокатки. Она может быть применена для расчетов в любом интервале времени по данным, полученным в on-line режиме. Методика является инструментом, который позволяет в автоматизированном режиме определять ограничения, накладываемые электроприводом на формирование программ прокатки. Это позволяет оптимизировать скоростные и нагрузочные режимы, что является актуальным при освоении новых сортов проката.

Четвертая глава посвящена вопросам формирования «лыжи» и сокращения времени согласования нагрузок двигателей ВГП и НГП за счет разработки усовершенствованных алгоритмов управления.

Структурная схема проектной системы задания скоростных режимов, обеспечивающих формирование «лыжи» и согласование нагрузок двигателей ВГП и НГП, приведена на рис. 12. Блок формирования «лыжи» регулирует задание скорости ВГП в соответствии с вычисленным темпом снижения рассогласования скоростей (величиной лыжи). От начального рассогласования и

темпа выравнивания скоростей зависят радиус и протяженность изогнутого участка. Скорость НГП определяется заданием скорости прокатки и в формировании «лыжи» не участвует.

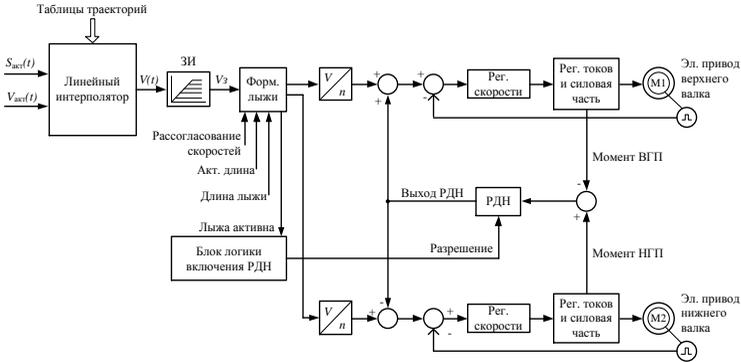


Рис. 12. Схема системы «лыжеобразования» и подключения РДН

Осциллограммы при проектной настройке. На рис. 13 показаны осциллограммы, дающие реальное представление о распределении моментов ВГП и НГП за один проход чистовой прокатки. Видно, что в интервале (t_1-t_6) , составляющем большую часть времени прокатки, выравнивание нагрузок электроприводов не обеспечивается. В промежутке t_2-t_3 средний фактический момент НГП (окно 3, кривая 1) более чем в 2 раза превышает момент ВГП (кривая 2). Он достигает ограничения 4200 кН·м, при этом момент ВГП изменяется в пределах 900–2000 кН·м.

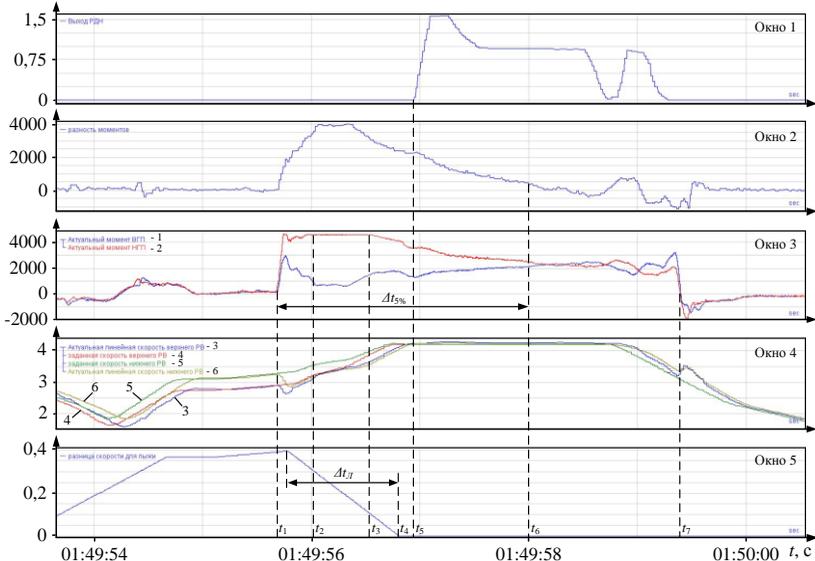


Рис. 13. Осциллограммы распределения нагрузок в течение одного прохода

Данные осциллограммы подтверждают, что при существующей настройке РДН не обеспечивается согласование нагрузок в течение значительной части периода прокатки. Кроме того, при черновой прокатке относительно коротких заготовок РДН не включается, что подтверждают осциллограммы на рис. 9.

Таким образом, существующая настройка РДН не обеспечивает равенства нагрузок двигателей ВГП и НГП. Это обусловлено несовершенством алгоритма блока формирования «лыжи» и низким быстродействием РДН. Интервал формирования «лыжи» $\Delta t_{л}$ на рис. 13 составляет около 1 с или 30% времени прохода 3,5 с. Решение этой проблемы за счет увеличения быстродействия САР скорости электропривода невозможно, вследствие выхода ВГП в режим ограничения по моменту (кривая 2 в окне 2). В этом случае целесообразным является формирование сигналов регулирования на оба электропривода.

Способ управления электроприводами в режиме лыжеобразования.

Целью разработки является формирование заданных параметров изгиба переднего конца раската за меньшее время. Это обеспечит сокращение времени выравнивания скоростей и соответственно нагрузок двигателей ВГП и НГП. Цель достигается за счет форсированного изменения скоростей электроприводов с противоположными знаками. Суть способа заключается в том, что регулирующий сигнал формируется пропорциональным линейной скорости, величине раствора валков перед захватом и обратно пропорциональным радиусу изгиба. Регулирование осуществляют до достижения равенства измеренной длины изогнутого конца заданной длине.

Структура системы, реализующей способ, представлена на рис. 14, а. Алгоритм формирования параметров «лыжи» поясняют графики на рис. 14, б. Выполняется следующая последовательность действий:

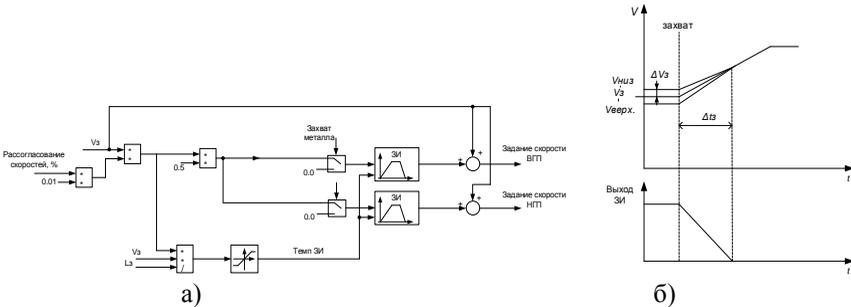


Рис. 14. Схема системы управления (а) и графики (б), поясняющие алгоритм задания скоростей

- для формирования заданного радиуса изгиба обеспечивается рассогласование скоростей ΔV_2 в режимах работы на установившейся скорости и ускорения перед захватом;

- непосредственно после захвата осуществляется снижение этого рассогласования до нуля путем формирования соответствующих сигналов на выходе датчиков интенсивности (ЗИ);

– темп снижения выходного сигнала каждого ЗИ формируется согласно представленному способу (определяется длиной и радиусом «лыжи»).

Результаты моделирования процессов при проектном и разработанном алгоритмах лыжеобразования показаны на рис. 15.

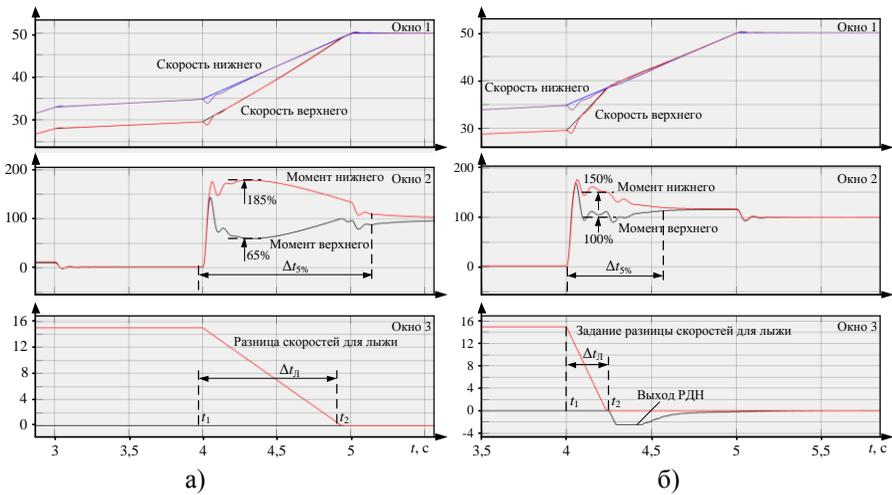


Рис. 15. Переходные процессы при проектном (а) и разработанном (б) способах лыжеобразования

На рис. 15, а темп замедления в интервале $\Delta t_{л}$ составляет 16%/с. Темп снижения на рис. 15, б вычисляется по алгоритму разработанного способа. В предложенном случае он увеличен в 3,6 раза ($\Delta t_{л}=0,25$ с на рис. 15, б при $\Delta t_{л}=0,9$ с на рис. 15, а). В результате подтверждено сокращение времени согласования нагрузок более чем в два раза. С учетом того, что продолжительность согласования скоростей в черновых проходах составляет от 20 до 80% времени прокатки, это приведет к снижению эквивалентной нагрузки и улучшению теплового режима двигателя нижнего вала. В интервалах $t > t_2$ обеспечивается режим согласования скоростей за счет действия РДН.

В пятой главе выполнено совершенствование системы автоматического регулирования перекоса зазора валков (направления прокатки). Разработаны системы компенсации наследственной и текущей асимметрии зазора. В сочетании с совершенствованием алгоритмов САРТ данные разработки являются развитием концепции ROLL-GAP CONTROLL на толстолистовом стане.

Система регулирования асимметрии поперечного профиля раската.

Принцип регулирования асимметрии в существующей системе поясняет схема включения пропорционального РАС регулятора в структуру САРТ, представленная на рис. 16.

С целью выравнивания растяжения клетки осуществляется формирование одинаковых сигналов (с коэффициентом 0,5) с разными знаками на гидравлические НУ по сторонам OS и DS. Задание на входе РАС регулятора формируется по разнице усилий в группах гидроцилиндров (ГЦ) с учетом суммарного

усилия прокатки и жесткости клетки. За счет этого компенсируется поперечная разнотолщинность (клиновидность раската), приводящая к возникновению дефекта «серп».

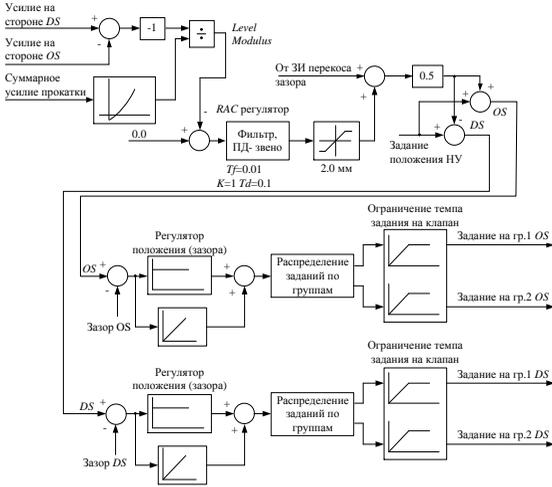


Рис. 16. Схема подключения RAC регулятора

Осциллограммы при проектной настройке RAC регулятора представлены на рис. 17. Целью регулирования является выравнивание усилий прокатки F_{DS} и F_{OS} (окно 2, [кН]) и соответственно зазоров валков S_{DS} и S_{OS} (окно 4) по сторонам клетки.

Кроме этих зависимостей на рисунке показаны осциллограммы актуальной h и заданной h_0 толщин раската (окно 1 [мм]). В окнах 3 и 5 приведены выходные сигналы U_{RAC} RAC регулятора и U_{AGC} регулятора толщины (размерность соответствует отклонениям толщины в мм).

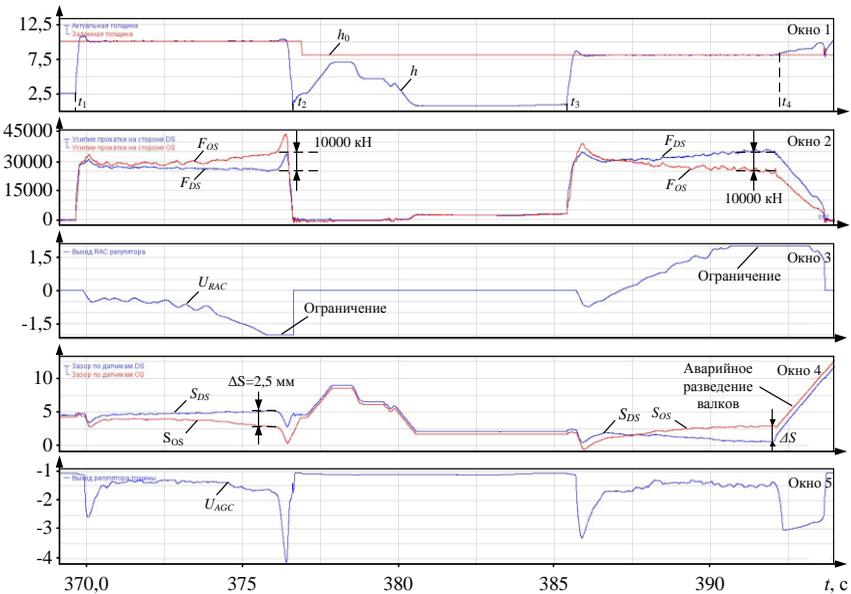


Рис. 17. Осциллограммы регулирования перекоса зазора валков

Согласно проектному принципу осуществляется перемещение того НУ, в гидроцилиндре которого давление больше, соответственно на его стороне усилие прокатки выше. Так, в первом проходе в интервале t_1-t_2 осуществляется регулирование зазора S_{OS} . В интервале t_3-t_4 – второй проход, напротив, осуществляется регулирование S_{DS} при практически постоянном зазоре на стороне OS. В обоих случаях возникает перекося зазора ΔS , который в конце проходов составляет 2,5 мм. Разность усилий в конце обоих проходов $F_{OS-DS}=10000$ кН, причем в первом $F_{OS} > F_{DS}$, а во втором соотношение обратное. Выходной сигнал RAC регулятора (окно 3) выходит в зону ограничения, что приводит к аварийному разведению валков в момент времени t_4 . В результате прокатываемая заготовка уходит в брак.

В ходе проведенных исследований установлено, что недопустимый перекося валков при существующей настройке RAC регулятора обусловлен двумя причинами: наследственной асимметрией зазора и текущей асимметрией, возникающей непосредственно во время прокатки.

Способ предиктивного регулирования перекося зазора валков. Наследственная асимметрия возникает после каждого прохода поэтому имеет свойство «накапливаться». Для ее устранения разработан способ регулирования, идея которого заключается в запоминании усилий в гидроцилиндрах по сторонам OS и DS в прямом проходе и принудительной установке их противоположного соотношения в обратном проходе. В паузе перед проходом выполняется расчет (прогнозирование) желаемых положений НУ. Этим обусловлен термин «предиктивное регулирование» в названии способа.

С целью обеспечения параллельности валков во время прокатки разработан **способ компенсации текущей асимметрии профиля раската**. Предусмотрено выполнение следующих операций:

1. Измерение усилий прокатки (давлений в ГЦ по сторонам OS и DS) и вычисление их разности (дифференциального усилия прокатки).
2. Вычисление противодавлений по сторонам OS-DS, которые необходимо создать для компенсации дифференциального усилия.
3. Использование сигнала, пропорционального разности противодавлений, в качестве управляющего воздействия на RAC регулятор.

В результате компенсируются поперечное растяжение клетки и асимметрия зазора. По сути, разработан метод непосредственной обратной связи, обеспечивающий регулирование поперечной асимметрии профиля толщины по возмущению с пропорционально-дифференциальным (ПД) RAC регулятором, который показан на рис. 16. Дифференциальный канал обеспечивает увеличение быстродействия и за счет этого – повышение точности регулирования при перемещении НУ.

Представленный способ регулирования текущей асимметрии зазора реализован в алгоритме АСУ ТП клетки стана 5000. Кроме того, внедрен ПД регулятор перекося зазора. Результаты исследований показали, что рассогласование положений НУ по сторонам DS и OS уменьшается в 2–2,5 раза, что обеспечивает уменьшение клиновидности раската. Это является косвенным подтверждением достижения поставленной цели: ограничения серповидности и осево-

го смещения раската. Дополнительный эффект заключается в снижении вероятности аварийного разведения валков, показанного на рис. 17.

В шестой главе дано научное обоснование и выполнена разработка способов ограничения динамических нагрузок за счет применения наблюдателей упругого момента и формирования оптимальных тахограмм электропривода. Осциллограммы ударного приложения нагрузки, подтверждающие актуальность решение этих задач, представлены ниже на рис. 24.

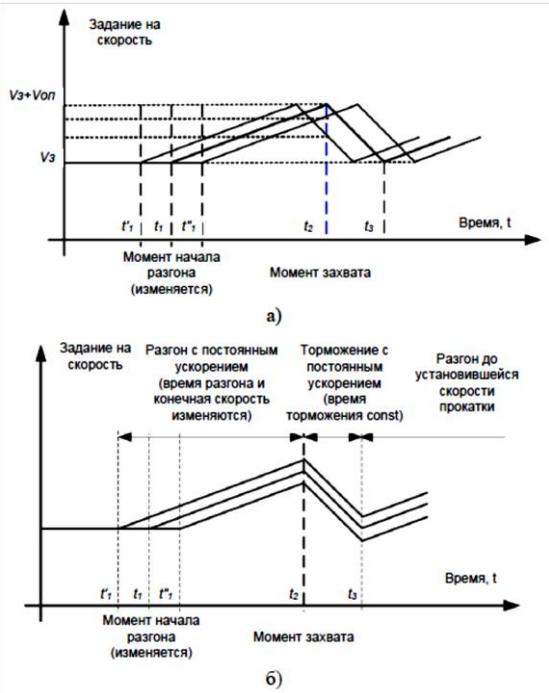


Рис. 18. Диаграммы задания скорости согласно разработанным способам

металла в режиме предразгона, что гарантирует предварительное замыкание угловых зазоров;

– в интервале t_2-t_3 осуществляется торможение электропривода до заданной скорости V_3 .

При $t > t_3$ согласно технологии происходит разгон до рабочей скорости.

Структурная схема системы управления, обеспечивающей рассмотренный способ, представлена на рис. 19. Отличительные признаки реализуются за счет включения блоков, выделенных контуром. Параметры скоростных режимов, показанных на рис. 18, формируются линейным интерполятором по таблицам траекторий, поступающим из модели второго уровня.

Реализацию функции ускорения перед захватом выполняет дополнительный задатчик интенсивности (ЗИ предразгона). В ходе настройки величина

Способ ограничения динамического момента за счет формирования оптимальных тахограмм.

На рис. 18, а представлены временные диаграммы задания скорости, поясняющие разработанный способ. Предусмотрена следующая последовательность действий (поясняется по «средней» диаграмме):

– в интервале t_1-t_2 выполняется ускорение (предразгон) электропривода до величины $(V_3 + V_{оп})$,

– приращение скорости $V_{оп}$ выбирается из условия компенсации динамической просадки скорости при ударном приложении нагрузки, просадка зависит от настройки САР скорости;

– момент t_1 и длительность интервала t_1-t_2 выбираются из условия захвата

ускорения принята равной $0,22 \text{ м/с}^2$. Начало ускорения определяется по сигналу системы слежения за перемещением заготовок, реализованной в АСУ ТП. При неточном определении положения заготовки относительно клетки (в моменты t'_1 , t''_1 на рис. 18, а) будет устанавливаться меньшее значение скорости по сравнению с расчетным в момент захвата t_2 . Путем моделирования установлено, что динамические броски моментов в этом случае увеличиваются.

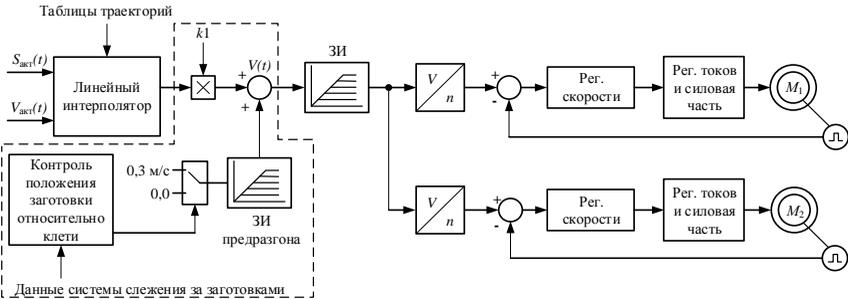


Рис. 19. Схема системы управления электроприводами: контуром выделены блоки, обеспечивающие формирование заданных тахограмм

С целью устранения названного недостатка разработан «инвариантный» способ управления электроприводами. Согласно способу, режим ускорения осуществляется до момента захвата t_2 независимо от времени его начала (t'_1 , t_1 , t''_1 на рис. 18, б). За счет этого обеспечивается «инвариантность» переходных процессов момента и скорости электропривода к точности определения времени начала предразгона. Это продиктовало название разработанного способа.

Разработка наблюдателя уругого момента.

Анализ литературных источников, посвященных разработке наблюдателей динамических моментов в двухмассовых системах, выявил следующие особенности:

1. Значительная часть разработок относится к системам, в которых обе массы, являются электрическими машинами. Ограничение динамических нагрузок осуществляется регулированием координат обеих машин. Такой подход для электроприводов прокатного стана не актуален, т.к. вторая масса (валок) является неуправляемой.
2. Известные разработки наблюдателей скоростей и моментов второй массы по параметрам первой массы (двигателя) требуют синтеза сложных регуляторов. Недостатком систем, выполненных на основе таких наблюдателей (вычислителей), является низкое быстродействие при отработке ударного приложения нагрузки.

В связи с этим в диссертации поставлена задача разработки системы компенсации динамических нагрузок второй массы (валка) средствами первой массы (электропривода) на основе наблюдателя, использующего физические величины, измеряемые в on-line режиме. Динамические процессы должны представляться при минимуме вычислительных операций, такой подход обеспечит необходимое высокое быстродействие.

Наблюдатель разрабатывается на основе системы уравнений, справедливых для разомкнутой двухмассовой системы:

$$\begin{aligned} \frac{dM_1}{dt} &= -\frac{1}{T_m} M_1 + \frac{1}{T_m K_{OM}} M_{1ref} \\ \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{1}{J_1} M_1 - \frac{1}{J_1} M_{12} \\ \frac{dM_{12}}{dt} &= C_{12} \omega_1 - C_{12} \omega_2 + \frac{\beta}{J_1} M_1 - \beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} M_{12} + \frac{\beta}{J_2} M_c, \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{1}{J_2} M_{12} - \frac{1}{J_2} M_c \end{aligned}$$

его схема представлена на рис. 20. Идея заключается в подстановке в модель сигналов скорости и момента двигателя, измеряемых в on-line режиме. Восстановление ненаблюдаемых переменных осуществляется по этим сигналам.

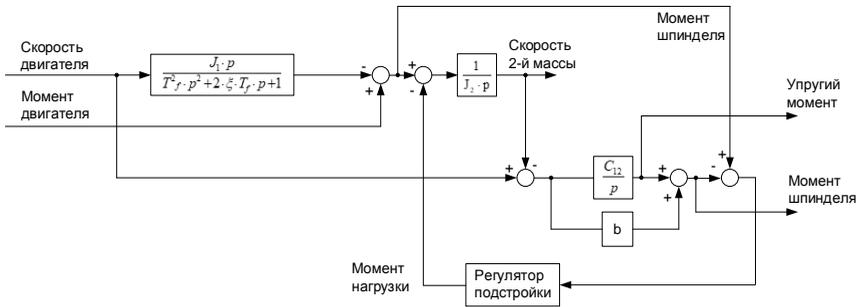


Рис. 20. Схема разработанного наблюдателя

Осциллограммы скоростей и моментов, полученные на стане, и аналогичные зависимости восстановленных переменных в режиме захвата металла валками представлены на рис. 21. Визуально, кривые моментов совпадают как по характеру, так и по амплитудным значениям, отличия не превышают 10%. Кривые скорости сопоставить нельзя, т.к. они соответствуют разным массам.

Разработка замкнутой системы регулирования координат второй массы. Исходя из структуры объекта управления разработана система регулирования скорости второй массы, схема которой приведена на рис. 22, а. Она может быть представлена как замкнутая четырехконтурная система регулирования скорости второй массы с подчиненным контуром упругого момента и подчиненным контуром скорости двигателя (рис. 22, б).

Внутренним контуром является контур момента двигателя, который содержит многомерный регулятор токов. При таком построении возможно ограничить не только задание на контур момента двигателя, но и задание на контур регулирования упругого момента. Подобных систем в литературных источниках не обнаружено.

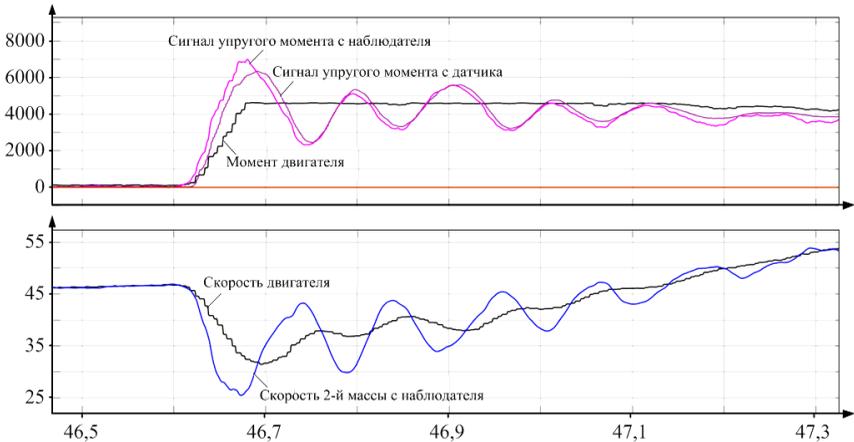


Рис. 21. Переходные процессы измеренных и восстановленных параметров

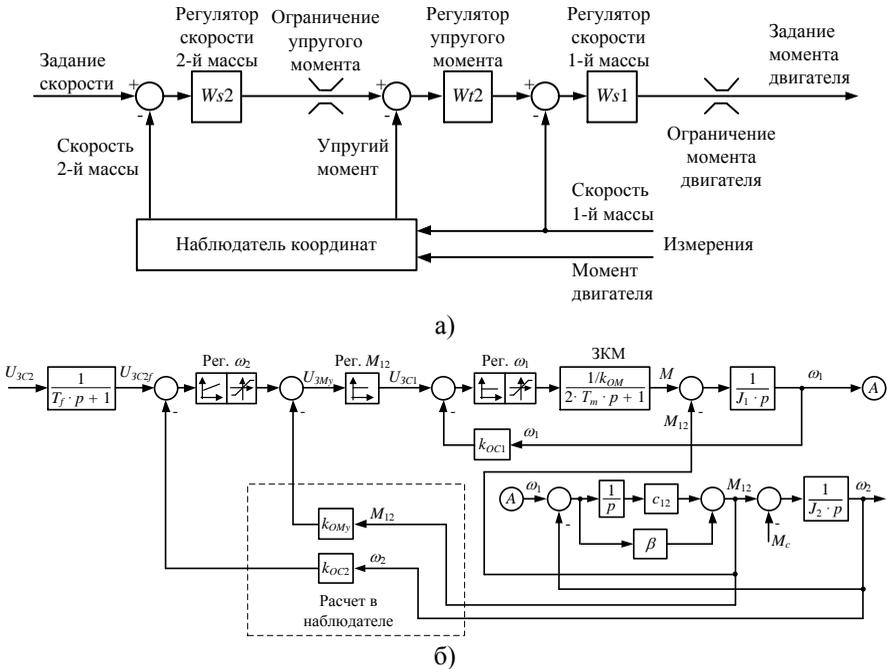


Рис. 22. Структура разработанной САР скорости второй массы (а) и ее представление в виде многоконтурной системы (б)

Внешний регулятор скорости $\text{Рег. } \omega_2$ массы J_2 (рис. 22, б) принят пропорционально-интегральным, регулятор упругого момента – пропорциональным, т.к. в контуре регулирования присутствует интегральное звено. Регулятор скорости массы J_1 – пропорциональный, его выходом является задание на момент

двигателя. Синтез регуляторов выполнен по правилам настройки систем подчиненного регулирования координат.

На рис. 23 показаны переходные процессы упругого момента M_B и момента двигателя $M_{ДВ}$, полученные при моделировании захвата без ограничений выходных сигналов регуляторов. Они имеют удовлетворительный характер, отклонения упругого момента находятся в пределах $-40-(+140)\%$, размыкания контуров не происходит. Скорости двигателя $n_{ДВ}$ и валка n_B выравниваются в течение $\square 0,5$ с.

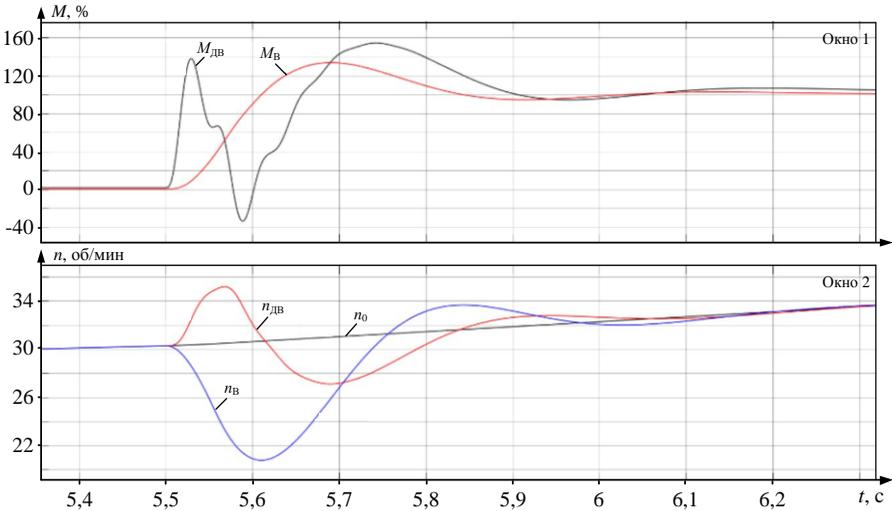


Рис. 23. Переходные процессы в системе с наблюдателем

Разработанный наблюдатель в ближайшей перспективе будет исполнен в электроприводах клетки стана 5000. По итогам длительного эксперимента будет принято решение о реализации разработанных алгоритмов наблюдателя и системы управления на стане.

Седьмая глава посвящена экспериментальным исследованиям и внедрению разработанных алгоритмов и систем управления на действующих прокатных станах 5000 и 2000 ПАО «ММК». Также представлены результаты оценки технико-экономической эффективности внедрений.

На рис. 24 приведены осциллограммы моментов $M_{ДВ}$ и M_B , заданной n_0 и фактических скоростей n_B , n_n электроприводов верхнего и нижнего валков. На рис. 24, а захват происходит в режиме торможения приводов при полностью открытых зазорах. Моменты двигателей выходят на ограничение $M_{ДВmax}$, установленное равным $4200 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Колебания моментов затухают благодаря диссипативным силам. Однако влияние демпфирующих свойств двигателя ограничено вследствие кратковременной потери управляемости электропривода. Кратность моментов на валах $k_{ВМ}=2,2$. В такое число раз динамический момент превышает установившийся момент ($M_{Вmax} = 6500 \text{ кН}\cdot\text{м}$ при $M_{ст}=3000 \text{ кН}\cdot\text{м}$).

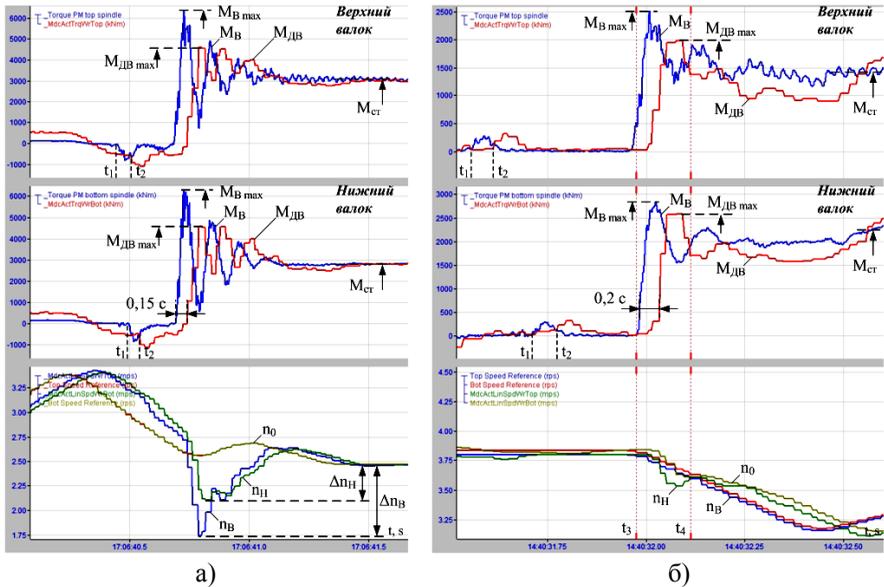


Рис. 24. Переходные процессы при открытых зазорах (а) и реализации разработанных алгоритмов (б)

На стане 5000 внедрен алгоритм ограничения динамических нагрузок, по сути, являющийся результатом объединения преимуществ разработанных способов замыкания угловых зазоров и опережающего увеличения скорости перед захватом. Соответствующие осциллограммы приведены на рис. 24, б. Захват происходит при замкнутых зазорах, что подтверждают «всплески» на осциллограммах M_B и $M_{ДВ}$ в моменты t_1 и t_2 . Согласно внедренному алгоритму в интервале t_3-t_4 осуществляется принудительное замедление электропривода.

По результатам анализа осциллограмм сделаны следующие выводы:

1. Кратность динамического момента на валу при первоначальной настройке $k_{ВМ}=2,2$, а при внедренном алгоритме $k_{ВМ}=1,67$. Это значит, что амплитуда момента уменьшилась в 1,3 раза.
2. Кратность момента $M_{ДВ}$ снижается от $k_{ВМ}=1,5$ на рис. (а) до $k_{ВМ}=1,33$ на рис. (б), т.е. в 1,13 раза.
3. Время затухания упругих колебаний уменьшается не менее чем в 2 раза.

Таким образом, в результате внедрения предложенных алгоритмов обеспечивается снижение динамических нагрузок в линиях главных электроприводов реверсивной клетки.

Применение методики расчета энергосиловых параметров при разработке программ прокатки трубного сортамента на стане 2000. На рис. 25 представлен фрагмент технологической линии стана 2000 ПАО «ММК», на котором схематично показано расположение клеток черновой группы. Универсальные клетки №4, 5, 6 образуют непрерывную подгруппу, это значит, что прокатка в них осуществляется одновременно. Каждая из таких клеток содер-

жит вертикальные и горизонтальные валки, взаимосвязанные в процессе прокатки через металл. Они оснащены тиристорными электроприводами постоянного тока.

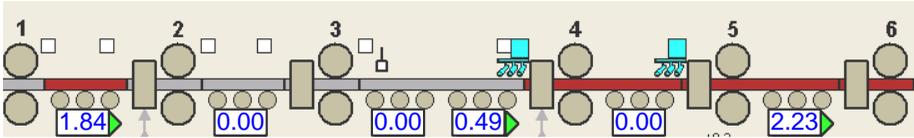


Рис. 25. Схема расположения клеток черновой группы стана 2000

На данном стане осваивается производство новых профилей для труб большого диаметра. Целесообразность этого обусловлена необходимостью выпуска листов длиной более 18 м, что невозможно на толстолистовых станах. Освоение прокатки трубной заготовки предопределяет необходимость расчета энергосиловых параметров. Ресурс электроприводов является ограничивающим фактором, накладываемым на технологический процесс, поэтому его анализ необходим для формирования программ прокатки.

Анализ нагрузок электроприводов 4–6-й клеток показал, что моменты двигателей ВГП и НГП при прокатке трубных сталей при расчетных обжатиях находятся в диапазоне 60–117%. При неравномерном распределении нагрузок по клетям фактические моменты прокатки могут значительно превышать расчетные. Данный факт предопределяет актуальность совершенствования алгоритмов расчета нагрузочных режимов на основе разработанной методики, рассмотренной в гл. 3. С этой целью разработано программное обеспечение (ПО) для анализа энергосиловых параметров прокатки толстых листов и полос.

Выполнен расчет эквивалентных токов двигателей черновых и чистовых клеток стана 2000 и электромагнитного момента СД клетки стана 5000. Анализ подтвердил, что разработанные алгоритмы обеспечивают более точные результаты. Ошибка расчетов относительно экспериментальных данных для разработанной методики находится в пределах от -1,5% до +5,1%, а для известной, основанной на выражениях А.И. Целикова, – от -6,3% до +11,2%.

Предложенное ПО передано в калибровочное бюро, где используется при разработке программ прокатки профилей расширенного сортамента на станах ПАО «ММК». Независимо от сортамента полос (листов) ПО рекомендуется для оптимизации скоростных и нагрузочных режимов с целью снижения энергозатрат при прокатке. Равномерное распределение нагрузок по клетям обеспечивает увеличение производительности станом и повышение ресурса электрооборудования.

Согласование скоростей вертикальных и горизонтальных валков универсальных клеток. Разработанный способ внедрен в опытно-промышленную эксплуатацию на стане 2000. Результаты экспериментов показали, что при любых рассогласованиях (положительных либо отрицательных) система обеспечивает выравнивание линейных скоростей ВВ и ГВ. Это подтверждает ограничение натяжения либо подпора при совместной прокатке.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения разработок.

Технические эффекты, обеспечиваемые в результате снижения ударных нагрузок на стане 5000:

- снижение количества аварий, сокращение продолжительности простоев стана, вызванных поломками оборудования;
- сокращение затрат на устранение последствий аварий, замену и восстановление оборудования.

Эффекты от внедрения системы согласования скоростей горизонтальных валков непрерывной подгруппы стана 2000:

- снижение разнотолщинности и отклонений ширины проката за счет повышения точности регулирования натяжений и исключения подпора при совместной прокатке;
- снижение статических и динамических нагрузок электроприводов вследствие ограничения силовой связи клетей через металл.

Результаты оценки технико-экономической эффективности внедрения разработанных систем и алгоритмов приведены в таблице. Суммарный экономический эффект составляет 12,7 млн руб./год.

Таблица

Технико-экономическая эффективность внедрения выполненных разработок

Внедренная система либо ПО	Стан	Год	Технический эффект			Эконом. эффект, млн руб./год
			Экономия металла, тыс. т/год	Доп. срок экспл. (лет)	Сокращение простоев, час/год	
САР скорости	5000	2016	1,48	5	–	5,8
САРНН	2000	2012	1,04	–	9	3,1
СУРС		2014	0,735	–	18	2,1
ПО		2010	1,48	–	–	1,7
Суммарная эффективность			4,735	5	27	12,7

В целом, промышленное внедрение разработанных алгоритмов управления скоростными режимами электроприводов, усовершенствованных систем автоматического регулирования параметров прокатки и программ обеспечивает:

- ресурсосбережение за счет снижения материалоемкости продукции;
- повышение точности регулирования геометрических размеров проката;
- снижение затрат на техническое обслуживание оборудования и устранение последствий аварий;
- энергосбережение за счет повышения КПД электроприводов.

В итоге создаются технические предпосылки расширения сортамента, импортозамещения за счет производства высококачественного листа и толстой полосы из труднодеформируемых марок стали при сокращении затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности, уточняющие представления о взаимном влиянии технологических параметров прокатки толстых листов. Получили развитие положения теории взаимосвязанных электротехнических систем толстолистовых прокатных станов. Обоснованы комплексные исследования:

- силового взаимодействия электромеханических систем горизонтальной и вертикальной клетей в режиме перемещения гидравлических НУ при профилированной прокатке;

- электроприводов верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки в режимах формирования вертикального изгиба переднего конца раската и согласования нагрузок;

- гидравлических НУ по сторонам OS и DS клетки с целью ликвидации дефекта «серповидность» и осевого смещения раската;

- динамических режимов электромеханических систем горизонтальной клетки в режиме захвата металла валками.

2. Разработана математическая модель взаимосвязанных исполнительных устройств: электроприводов горизонтальных и вертикальных клетей и гидравлических приводов НУ реверсивной клетки в структурах систем автоматического регулирования технологических параметров. Разработан комплекс упрощенных моделей, обеспечивающих эффективное исследование проектных и разработанных алгоритмов управления.

3. Разработаны способ и система согласования скоростей электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей в режиме перемещения гидравлических НУ, обеспечивающие реализацию принципа «постоянства массы» металла в межклетевом промежутке.

4. Получены уточненные аналитические зависимости расчета усилий прокатки при высоких очагах деформации, основанные на выражениях акад. А.И. Целикова, отличающиеся учетом влияния толщины на вертикальное напряжение и инерции металла при ускорении, обеспечивающие повышение точности вычисления энергосиловых параметров прокатки толстых листов.

5. Предложен алгоритм расчета нагрузочных режимов электроприводов клетей на основе вычисления энергосиловых параметров в on-line режиме, обоснована методика оценки ограничений, накладываемых электроприводом на технологический процесс.

6. Разработана система лыжеобразования и выравнивания нагрузок электроприводов верхнего и нижнего валков с переключающейся структурой, обеспечивающая формирование заданных параметров «лыжи» независимо от толщины раската и сокращение времени согласования нагрузок в квазиустановившемся режиме прокатки.

7. Обоснован принцип перераспределения регулирующих воздействий на исполнительные устройства, на основе которого разработан способ ограничения дефекта «серповидность» путем предиктивного регулирования наследст-

венного перекося зазора валков и быстродействующей компенсации текущей асимметрии профиля раската.

8. Обоснован концептуальный подход, разработаны способы и алгоритмы ограничения динамических нагрузок электромеханических систем прокатной клетки путем индивидуальной компенсации составляющих динамического момента, обусловленных замыканием углового зазора, упругими свойствами главной линии клетки и настройкой системы автоматического регулирования скорости электропривода.

9. Получила развитие теория двухмассовых электромеханических систем с наблюдателями упругого момента. Разработана система компенсации упругого момента в режиме ударного приложения нагрузки на основе наблюдателя, обеспечивающего восстановление динамических режимов второй массы (валка) по непрерывно измеряемым параметрам первой массы (электропривода).

10. Разработанные электроприводы и алгоритмы управления внедрены в промышленную эксплуатацию на станах 5000 и 2000 ПАО «ММК». Подтверждены показатели технико-экономической эффективности: экономия металла в объеме 4,7 тыс. т/год, сокращение затрат на аварийную замену шпинделя – 5,8 млн руб./год, суммарный экономический эффект –12,7 млн руб./год.

11. Разработанные технические решения рекомендуются для расширенного внедрения на толстолистовых и широкополосных станах независимо от рода тока и типа электроприводов. Их преимуществом является высокая эффективность при минимальных затратах на внедрение.

Практические результаты, полученные при выполнении диссертационной работы обеспечивают повышение конкурентоспособности продукции отечественных металлургических заводов за счет повышения энергетической эффективности, снижения материалоемкости производства, улучшения качества листового проката. Выполненные разработки будут способствовать импортозамещению за счет конкурентного вытеснения с отечественного рынка зарубежных производителей аналогичной продукции.

Результаты исследований способствуют инновационному развитию отечественной металлургической отрасли.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Галкин, В.В. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клеток прокатного стана при прокатке толстых полос / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, **В.Р. Гасияров**, О.А. Залогин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 3. – 2010. – Ч. 2. – С. 12–17.

2. **Гасияров, В.Р.** Разработка уточненной методики расчета момента на валу двигателя клетки толстолистового стана горячей прокатки и проверка ее адекватности / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 78-81.

3. Радионов, А.А. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Ч. 2. Исследование динамических нагрузок в универсальных клетях / А.А. Радионов, А.С.

Карандаев, А.С. Евдокимов, И.Ю. Андришин, А.Н. Гостев, А.Г. Шубин, **В.Р. Гасияров** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2015. – Т. 15. – №2. – С. 67–76.

4. **Гасияров, В.Р.** Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1(34). – С. 4–9.

5. Басков, С.Н. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолистного прокатного стана / С.Н. Басков, **В.Р. Гасияров**, Б.М. Логинов, В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 55–64.

6. Шубин, А.Г. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, **В.Р. Гасияров**, Е.А. Маклакова // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1(38). – С. 14–25.

7. Khrumshin, V.R. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khrumshin, **V.R. Gasiyarov**, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 101–111. DOI 10.14529/power180109.

8. **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.

9. **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.

10. **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.

11. **Гасияров, В.Р.** Способ согласования нагрузок электроприводов горизонтальных валков клетки толстолистного прокатного стана / В.Р. Гасияров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2019. – Т. 19. – № 2. – С. 107–117. DOI 10.14529/power190212.

12. **Гасияров, В.Р.** Способ повышения быстродействия системы управления электроприводами горизонтальной клетки прокатного стана в режиме лыжеобразования / В.Р. Гасияров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3. – С. 33–43. DOI 10.17213/0136-3360-2019-3-33-43.

13. **Гасияров, В.Р.** Способ компенсации динамических нагрузок электропривода прокатной клетки за счет опережающего увеличения скорости / В.Р. Гасияров // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 3(44). – С. 39–46.

14. Карандаев, А.С. Совершенствование алгоритмов регулирования толщины и профиля зазора валков реверсивной клетки толстолистного 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.

15. **Гасияров, В.Р.** Предиктивное регулирование асимметрии зазора валков реверсивной клетки толстолистового прокатного стана / В.Р. Гасияров, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, Б.М. Логинов, М.А. Зинченко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 19–30.

16. **Гасияров, В.Р.** Разработка цифрового наблюдателя углового зазора в шпиндельных соединениях главной линии прокатной клетки / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, О.А. Гасиярова, Б.М. Логинов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 137–147. DOI:10.14529/power200314

Статьи в журналах в наукометрических базах Scopus и WoS

17. Maklakova, E.A. The work roll bending control system of the hot plate rolling mill / E.A. Maklakova, A.S. Maklakov, **V.R. Gasiyarov**, S.S. Voronin // Procedia Engineering – 2015. – Vol. 129. – Pp. 37–41. DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.005.

18. Voronin, S.S. The determination of energy-power parameters of hot plate mill mechatronic system / S.S. Voronin, E.A. Maklakova, A.S. Maklakov, **V.R. Gasiyarov** // Procedia Engineering – 2015. – Vol. 129. – Pp. 51–56.

19. **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.

20. Gasiyarova, O.A. Experimental determination of resultant roll force at hot plate mill 5000 / O.A. Gasiyarova, S.S. Voronin, E.A. Maklakova, **V.R. Gasiyarov** // Procedia Engineering – 2016. – Vol. 150. – Pp. 1415–1418.

21. Radionov, A.A. Improving reliability of hot plate mill electromechanical system / A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov**, E.A. Maklakova // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – Pp. 417–421.

22. Radionov, A.A. Reactive power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters / A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov**, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems – 2017. – Vol. 8. – №4. – Pp. 1455–1466.

23. Andryushin, I.Yu. Automatic tension control in the continuous roughing train of a wide-strip hot-rolling mill / I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin, A.N. Gostev, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, **V.R. Gasiyarov**, V.R. Khrumshin // Metallurgist – 2017. – Vol. 61. – Is. 5-6. – Pp. 366–374. DOI 10.1007/s11015-017-0502-0.

24. Karandaev, A.S. Setting automated roll axial shifting control system of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov** // Procedia Engineering – 2017. – Vol. 206. – Pp. 1753–1750.

25. Karandaev, A.S. Force limiting at roll axial shifting of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, **V.R. Gasiyarov**, V.R. Khrumshin // Procedia Engineering – 2017. – Vol. 206. – Pp. 1780–1786. DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.713.

26. Khrumshin, V.R. Method of reduction of an edging and horizontal rolls electromechanical systems interrelation in universal stand of a rolling mill / V.R. Khrumshin, **V.R. Gasiyarov**, A.S. Karandaev, A.G. Shubin // Procedia Engineering – 2017. – Vol. 206. – Pp. 1761–1767. DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.710.

27. Radionov, A.A. Use of automated electric drives for limiting dynamic loads in shaft lines of roll mill stands / A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov**, A.S. Karandaev,

V.R. Khramshin // Journal of Engineering – 2019. – Vol. 6. – No. 17. – Pp. 3578–3581. DOI 10.1049/joe.2018.8135.

28. **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, цитируемые в базах Scopus и WoS

29. Radionov, A.A. Methods of calculation of load modes of roughing stand electric drives of wide-strip hot rolling mill / A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov**, A.G. Shubin, R.R. Khramshin // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – 2016. – Pp. 160–164. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7807045.

30. **Gasiyarov, V.R.** Improvement of work roll bending control system installed at plate mill stand / V.R. Gasiyarov, 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.

31. Khramshin, V.R. Control methods and systems providing reduced consumption index at rolled product manufacture at plate mill / V.R. Khramshin, E.A. Khramshina, A.S. Karandaev, **V.R. Gasiyarov**, S.S. Voronin // Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIcon Rus). – 2017. – Pp. 1540–1544. DOI 10.1109/EIconRus.2017.7910865.

32. Radionov, A.A. Implementation of telemetric on-line monitoring system of elastic torque of rolling mill line of shafting / A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov**, M.M. Tverskoi, V.R. Khramshin, B.M. Loginov // Proceedings of 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon). – 2017. – Pp. 450–455.

33. Karandaev, A.S. Method limiting dynamic loads of electromechanical systems of plate mill stand / A.S. Karandaev, **V.R. Gasiyarov**, E.A. Maklakova, B.M. Loginov, E.A. Khramshina // Proceedings of the IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIcon Rus). – 2018. – Pp. 651–656. DOI 10.1109/EIconRus.2018.8317180.

34. **Gasiyarov, V.R.** Method of load calculation of electrical drives of rolling mills during heavy plate manufacturing / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – 361. – 012014. DOI 10.1088/1757-899X/361/1/012014.

35. Radionov, A.A. Mathematical modeling of mechatronics system "hydraulic screwdown mechanism - electric drive of rolling mill stand" / A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov**, S.N. Baskov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 361. – 012020.

36. **Gasiyarov, V.R.** Correcting electric motor drive speed of plate mill stand in profiled sheet rolling / V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, A.A. Radionov, V.R. Khramshin, A.S. Maklakov // Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). – 2018. – 8707442.

37. Radionov, A.A. Designing automated control system for profiled slab rolling on plate mill / A.A. Radionov, S.N. Baskov, **V.R. Gasiyarov**, O.I. Karandayeva, R.R. Khramshin // Proceedings of International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018. – 5 p. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501803.

38. **Gasiyarov, V.R.** Mathematical modeling of an automatic control system for proffed rolling of slabs in reversing plate-mill stands / V.R. Gasiyarov , S.N. Baskov, S.S. Voronin, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin // Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). – 2019. – Pp. 505–510. DOI 10.1109/EIconRus.2019.8656797.

39. **Gasiyarov, V.R.** Method of limiting the dynamic loads on hot plate mill's mechatronics system / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin // Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). – 2019. – Pp. 43–47.

40. Radionov, A.A. Improving the mechatronic system for automatic control of the reversing stands of mill 5000 / A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov**, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 635. – 012019 DOI 10.1088/1757-899X/635/1/012019.

41. **Gasiyarov, V.R.** 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, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin, A.S. Maklakov // Proceedings of 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). – 2019. – Vol. 1. – Pp. 330–335. DOI 10.1109/IECON.2019.8927789.

42. Radionov, A.A. Controlling the Electric Drives of the Reversing Rolling Stand Rolls of a Rolling Mill to Form a Curvature at the Workpiece Front End / A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov**, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin // IEEE 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). – 2019. – 7 p. DOI: 10.1109/PEDS44367.2019.8998801.

43. Radionov, A.A. Dynamic Load Limitation in Electromechanical Systems of the Rolling Mill Stand during Biting / A.A. Radionov, **V.R. Gasiyarov**, A.S. Karandaev, D.Yu. Usatiy, V.R. Khrumshin // IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). – 2020. – 6 p.

44. **Gasiyarov, V.R.** Improving the Algorithm of Automated Gage Control during Shaped Feed Rolling on a Plate Mill / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin, B.M. Loginov // IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). – 2020. – 6 p.

45. Khrumshin V.R., Karandaev A.S., **Gasiyarov V.R.**, Zinchenko M.A., Loginov B.M. Limiting Dynamic Loads in the Main Line of a Rolling Mill through an Automated Drive. International Russian Automation Conference (RusAu-toCon). 2020. Pp. 1122-1126. DOI 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208087.

Патенты РФ, свидетельства о гос. регистрации

46. Гасияров В.Р. Расчет энергосиловых параметров прокатки толстых полос и нагрузочных режимов электропривода клетки реверсивного толстолистого стана горячей прокатки / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, О.С. Малахов, Д.Ю. Усатый // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2011616618, 25.08.2011.

47. Воронин, С.С. Расчет параметров жесткости клетки "КВАРТО" для толстолистных станов горячей прокатки / С.С. Воронин, **В.Р. Гасияров** // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015618815, 19.08.2015.

48. Радионов, А.А. Способ согласования скоростей вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки прокатного стана / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, **В.Р. Гасияров**, Б.М. Логинов, С.Н. Басков, С.С. Воронин // Патент №2687354 C1, 13.05.2019.

Монография

49. Бодров Е.Э. Многосвязная система управления электроприводами непрерывного прокатного стана / Е.Э. Бодров, **В.Р. Гасияров**, О.И. Петухова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – 158 с.

Публикации в периодических изданиях

50. **Гасияров, В.Р.** Методика расчета момента прокатки на толстолистовом стане 5000 / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, Е.А. Пузанкова // Электротехнические системы и комплексы. – 2009. – № 16. – С. 100–109.

51. **Гасияров, В.Р.** Математическое описание главного электропривода толстолистого стана 5000 горячей прокатки / В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. № 3. – С. 62–66.

52. Маклаков, А.С. Математическое моделирование синхронного электропривода реверсивной прокатной клетки / А.С. Маклаков, Е.А. Маклакова, **В.Р. Гасияров** // В сборнике: Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока (ЭППТ)». УрФУ. – 2015. – С. 131–136.

53. **Гасияров, В.Р.** Нагрузочные режимы электроприводов клеток стана 2000 при прокатке трубной заготовки / В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова, А.Г. Шубин // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 3. № 2. – С. 32–39.

54. Voronin, S.S. Development of automatic control system of hot-strip mill process parameters / S.S. Voronin, **V.R. Gasiyarov**, Е.А. Maklakova, А.А. Radionov // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2016. – Т. 16. № 1. – С. 121–136.

55. Андриюшин, И.Ю. Автоматическое регулирование нулевого натяжения в непрерывной группе черновых клеток широкополосового стана горячей прокатки / И.Ю. Андриюшин, А.Г. Шубин, А.Н. Гостев, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, **В.Р. Гасияров**, В.Р. Храмшин // Металлург. 2017. № 5. С. 28-36.

56. Евдокимов, С.А. Контроль упругого момента в валопроводах клетки толстолистого прокатного стана / С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин, **В.Р. Гасияров**, Б.М. Логинов // Проблемы автоматизации и управления. – 2018. – № 2 (35). – С. 157–160.

57. Храмшин, В.Р. Способ снижения динамических нагрузок электроприводов клетки толстолистого прокатного стана / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, С.Н. Басков, **В.Р. Гасияров**, Логинов Б.М. // В сб.: Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2018). – 2018. – С. 157–164.

58. **Гасияров В.Р.** Способ ограничения динамических нагрузок мехатронных систем клетки толстолистого прокатного стана / В.Р. Гасияров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2019. Т. 19. № 2. С. 5-18.

59. **Гасияров В.Р.** Снижение динамического момента в главной линии прокатной клетки толстолистого стана / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, О.А. Гасиярова, Б.М. Логинов, Д.Ю. Усатый // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2019. Т. 19. № 3. С. 22-32.