

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



**ВОРОНИН СТАНИСЛАВ СЕРГЕЕВИЧ**

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

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
доцент Гасияров В.Р.

Челябинск 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b>  | 5  |
| <b>Глава 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПРОКАТКИ. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРО- И ГИДРОПРИВОДАМИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ РАСХОДНОГО КОЭФФИЦИЕНТА</b> | 15 |
| 1.1. Технологическая линия и технология прокатки на стане 5000   | 16 |
| 1.2. Оборудование реверсивной клетки   | 19 |
| 1.3. Анализ причин неудовлетворительных расходных коэффициентов на толстолистовых станах   | 26 |
| 1.4. Способы повышения качества и выхода готовой продукции   | 31 |
| 1.4.1. Технологии прокатки с коррекцией формы листа в плане  | 31 |
| 1.4.2. Технология прокатки с профилированием широких граней раскатов горизонтальными валками   | 33 |
| 1.5. Концепция регулирования толщины ROLL-GAP CONTROLL   | 36 |
| 1.6. Режим профилированной прокатки  | 38 |
| 1.7. Обоснование направлений совершенствования алгоритмов управления электроприводами реверсивной клетки   | 40 |
| 1.7.1. Ограничение силовой связи вертикальной и горизонтальной клеток через металл   | 40 |
| 1.7.2. Ограничение динамических нагрузок при захвате раската валками   | 42 |
| 1.8. Выводы и постановка задачи исследований   | 45 |
| <b>Глава 2. РАЗРАБОТКА СПОСОБА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ В РЕЖИМЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ РАСКАТА</b>  | 48 |
| 2.1. Задание профиля переменной толщины в системе ASC  | 49 |
| 2.2. Совершенствование алгоритмов САРТ в режиме профилированной прокатки   | 52 |
| 2.2.1. Структурные схемы систем регулирования зазора и толщины   | 52 |
| 2.2.2. Разработка САРТ с регулированием с упреждением  | 56 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.3. Разработка имитационной модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки  | 58  |
| 2.4. Разработка моделей гидравлических НУ в структуре САРТ  | 64  |
| 2.5. Результаты моделирования   | 70  |
| <b>ВЫВОДЫ</b>   | 73  |
| <b>Глава 3. ОГРАНИЧЕНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ КЛЕТЕЙ ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА</b> | 74  |
| 3.1. Обоснование направления исследований   | 74  |
| 3.2. Анализ известного способа согласования скоростей валков  | 76  |
| 3.3. Разработка способа ограничения силового взаимодействия   | 79  |
| 3.4. Аналитические зависимости для расчета энергосиловых параметров в режиме профилированной прокатки                                     | 84  |
| 3.4.1. Расчет по известной методике   | 84  |
| 3.4.2. Кинематика очага деформации  | 87  |
| 3.4.3. Расчет усилия и момента при прокатке с нарастающим обжатием  | 90  |
| 3.5. Расчет критического угла и опережения  | 92  |
| 3.6. Разработка модели взаимосвязанных электроприводов горизонтальной и вертикальной клеток   | 97  |
| 3.7. Результаты моделирования   | 101 |
| <b>ВЫВОДЫ</b>   | 107 |
| <b>Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТОК НА СТАНЕ 5000</b>  | 110 |
| 4.1. Экспериментальные исследования точности регулирования толщины в САРТ с предуправлением   | 111 |
| 4.2. Реализация способа согласования скоростей электроприводов клеток   | 112 |
| 4.3. Способ упреждающего регулирования зазора валков перед захватом   | 115 |
| 4.4. Результаты экспериментальных исследований  | 118 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.5. Техничко-экономическое обоснование внедрения алгоритма согласования скоростей раската и валков | 121 |
| <b>ВЫВОДЫ</b>   | 125 |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>   | 128 |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>  | 130 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>   | 150 |

## ВВЕДЕНИЕ

В период с 2009 года в Российской Федерации построены два современных толстолистовых прокатных стана 5000, предназначенных для производства продукции высокого передела – высококачественных трубных марок стали. Эти станы введены в эксплуатацию в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») в 2009 г и ОАО «Выксунский металлургический завод» (ОАО «ВМЗ», г. Выкса, Нижегородская область) – в 2011 г. Ранее был построен аналогичный широкоформатный стан в ОАО «Северсталь» (г. Колпино), он находится в эксплуатации с 2000 года. Разработчиком технологии и генеральным подрядчиком строительства этих станов выступила компания SMS-Siemag (в настоящее время – SMS group, Германия), которая является основным производителем прокатного оборудования и имеет большой опыт строительства прокатных станом.

Сумма производственных мощностей трех названных станом составляет до 3,5 млн. т горячекатаного широкого листа, толщина которого может варьироваться от 8 до 100 мм. Они производят лист из качественных сортов стали, нужных не только трубникам, но и машиностроителям, атомным энергетикам, строителям судов [1]. В результате действующие и завершённые мегапроекты: «Северный поток-2», «Сила Сибири», «Восточная Сибирь - Тихий океан» и другие, обеспечиваются продукцией отечественных металлургических предприятий. Ранее подобный сортамент марок стали производился только отдельными предприятиями Японии и Германии.

В диссертационной работе [2] приведены графики, характеризующие динамику и структуру рынка стальных труб в 2013-2017 гг. и прогноз до 2025 года. Они подтверждают, что в истекшее десятилетие произошло практически полное вытеснение зарубежных производителей с отечественного рынка труб большого диаметра. Для закрепления достигнутых позиций и расширения присутствия на зарубежных рынках металлопродукции требуется повышение конкурентоспособности за счет снижения материалоемкости и повышения ее качества. В условиях современного производства листового проката задачи

повышения конкурентоспособности и снижения себестоимости являются актуальными. Применительно к толстолистовому стану себестоимость определяется расходными коэффициентами на тонну готовой продукции.

В научной публикации [3] отмечается, что *«Рентабельность изготовления листового проката существенно зависит от выхода годного, который в значительной мере определяется формой листа в плане<sup>1</sup>, то есть формой концов проката и колебаниями ширины по длине полосы, обуславливающих концевую и боковую обрезь. Уменьшение металлоемкости требует уменьшения боковой и торцевой обреза, что возможно при приближении формы проката в плане к прямоугольной»*. Аналогичные выводы сделаны в работах [4–7].

Согласно «Инструкции» на проектирование стана 5000 ПАО «ММК» годовое производство листа должно составлять 1.462.400 т (в настоящее время этот показатель превышен). При этом масса заготовок в слябах – 1.589.600 т в год. Таким образом, выход листа из слябов (выход годного) должен составлять 92%. В настоящее время этот показатель достигнут далеко не для всех прокатываемых профилей.

Основной причиной потерь металла с боковой и торцевой обрезью является отличие формы листа в плане от прямоугольной. Наибольшие потери возникают при производстве листа из высокопрочных сталей из толстых слябов (толщиной до 35 мм) с большими обжатиями. Это обусловлено течением металла во время обжатия не только в осевом, но и в боковых направлениях (пояснения к этому утверждению даны в разделе 1).

Вопросам улучшения формы листов посвящены научные труды многих исследователей – специалистов по прокатке и автоматизации технологических процессов. К числу наиболее значимых публикаций отечественных авторов и авторов из ближнего зарубежья относятся монографии и учебные пособия [8–12], научные статьи [13–17]. Также следует отметить диссертации [18–21] и

---

<sup>1</sup> Здесь и далее под общепринятым термином «форма листа в плане» понимается вид листа сверху, а величина обреза определяется отличием этой формы от прямоугольника, который может быть вписан в нее

патенты на изобретения [22–26]. Значительный вклад в развитие данного научного направления внесли научные школы Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова под руководством проф. Салганика В.М. [27–29], Санкт-Петербургского государственного политехнического университета под руководством проф. Рудского А.И. [30], Донецкого национального технического университета под руководством проф. Коновалова Ю.В. и Руденко Е.А. [31–34].

Вопросам электропривода и автоматизации толстолистовых станов, в том числе направленной на улучшение профиля и снижение потерь с обрезью посвящены научные книги [35–38], ряд работ зарубежных авторов, в том числе статьи [39–43]. В публикациях [44–47] и других рассмотрена реализация концепции ROLL GAP CONTROLL регулирования толщины листа средствами гидравлических нажимных устройств. В работах [48–52] обосновано применение технологии профилированной прокатки с двойным коническим профилем на концах раската<sup>2</sup>, получившей название «собачья кость». Доказано, что применение этой технологии обеспечивает улучшение формы листа в плане.

Проведенный анализ известных публикаций показал, что проблема формирования профилей переменной толщины при прокатке на толстолистовых станах не является до конца изученной. Технологические аспекты ее решения исследованы достаточно подробно. Однако вопросам совершенствования электротехнических систем реверсивной клетки и автоматизированных систем управления уделено недостаточное внимание. Разработке систем управления профилированной прокаткой посвящены диссертационные работы [53] – для стана 2800 ОАО «НОСТА» (в настоящее время – ОАО «Уральская сталь») и [2] – для стана 5000. Однако эти исследования нельзя назвать окончательными, так как совершенствование технологии и опыт эксплуатации прокатных станов постоянно предъявляют новые, все более сложные требования к электро-

---

<sup>2</sup> Под термином «раскат» понимается полупродукт между исходной заготовкой (слябом) и готовым прокатом (листом), который изменяет свою форму в каждом проходе реверсивной прокатки

и гидроприводам и системам управления, которые в представленной диссертации объединены понятием «электротехнические системы».

Анализ опыта эксплуатации стана 5000 ПАО «ММК» показал, что концепция автоматического регулирования толщины ROLL GAP CONTROL, реализованная на стане, не обеспечивает требуемой точности регулирования толщины в режиме формирования конических профилей на концах раската.

Другим недостатком является отсутствие ограничения силовой взаимосвязи через металл электромеханических систем вертикальных и горизонтальных валков реверсивной клетки. Силовое взаимодействие валков аналогично процессам в универсальных клетях черновых групп широкополосных станов горячей прокатки, рассмотренным в диссертационных работах [54, 55], а также публикациях [56–60]. В них доказано, что возникновение натяжения приводит к отклонениям ширины (уширению) раската, а возникновение подпора (отрицательного натяжения) приравнивается к аварийному режиму. Допустимое значение натяжения не должно превышать 10 т (100 кН).

Отличием реверсивной клетки толстолистого стана является возникновение подпора при перемещении гидравлических нажимных устройств (НУ) в режиме формирования профиля «собачья кость». Данный режим является недостаточно изученным, поэтому его рассмотрение является актуальной задачей.

Таким образом, актуальными являются задачи совершенствования алгоритмов существующей системы автоматического регулирования толщины (САРТ), с целью снижения отходов с боковой и торцевой обрезью, и разработки способа согласования скоростей взаимосвязанных вертикальной и горизонтальной клетей.

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



Для достижения цели поставлены следующие задачи:

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

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

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

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

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

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

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

Решение перечисленных задач выполняется применительно к стану 5000 ПАО «ММК». В завершающем разделе диссертации даются рекомендации по расширенному применению разработок.

Содержание диссертации соответствует поставленным задачам и изложено в следующей последовательности:

В первой главе дана характеристика технологического процесса и силового электрооборудования горизонтальной и вертикальной клетей стана 5000.

Дана краткая характеристика гидравлических НУ реверсивной клетки. Рассмотрены причины отклонения геометрических размеров раската от заданных в режиме прокатки с большими обжатиями. Представлены способы повышения качества и выхода готовой продукции за счет сокращения потерь с обрезью. Дана оценка точности регулирования толщины в режиме изменения межвалкового зазора во время прокатки. Приведена структура, поясняющая концепцию регулирования толщины ROLL-GAP CONTROL. Представлены осциллограммы, подтверждающие необходимость совершенствования алгоритмов САРТ, с целью повышения быстродействия и точности регулирования толщины в режиме изменения межвалкового зазора при профилированной прокатке. Обоснованы и конкретизированы направления исследований.

Во второй главе рассмотрена концепция ASC профилирования широких граней раската горизонтальными валками, реализованная на стане. Рассмотрена структура существующей системы автоматического регулирования толщины (AGC) с внутренним контуром регулирования положения НУ (HGC). Разработана САРТ, реализующая принцип регулирования толщины с упреждением за счет введения положительной связи по задающему сигналу с пропорциональным регулятором предупреждения. Разработана имитационная модель взаимосвязанных электро- и гидроприводов, обеспечивающая возможность исследования разработанных технических решений, реализованная в пакете Matlab-Simulink. Выполнены исследования методом моделирования. Подтверждены увеличение быстродействия регулирования толщины, что обеспечивает повышение точности формирования заданного профиля разнотолщинных участков раската.

Третья глава посвящена ограничению силового взаимодействия электро-механических систем валков вертикальной и горизонтальной клетей, возникающему при перемещении НУ. Разработан способ автоматического регулирования скорости электропривода валков вертикальной клетки пропорционально приращению линейной скорости металла на входе в горизонтальную клеть,

вызванному изменением ее межвалкового зазора (патент РФ №2687354). Представлена структура имитационной модели, учитывающая взаимосвязь электромеханических систем через металл, обеспечивающая возможность исследования данного способа. Выполнен сравнительный анализ переходных процессов натяжения, вызванных формированием профиля переменной толщины, при проектной настройке и при реализации предложенного способа. Подтверждены повышение быстродействия и точности согласования скоростей, а также ликвидация подпора (отрицательного натяжения) в межклетевом промежутке, возникающего при проектной настройке САРТ.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям и промышленному внедрению разработанных технических решений. Разработан способ управления электроприводами валков горизонтальной клетки и гидравлическими нажимными устройствами, обеспечивающий ограничение динамических нагрузок за счет автоматического регулирования гидравлического зазора валков. При этом осуществляется коррекция скорости валков пропорционально изменению положения нажимного устройства. Дано экспериментальное подтверждение снижения перерегулирования и колебаний момента на валу двигателя. Проведены опытно-промышленные испытания, подтвердившие, что реализация технологии профилированной прокатки слябовой заготовки обеспечивает улучшение геометрической формы выпускаемого листа и за счет этого – снижение отходов с боковой и торцевой обрезью.

В заключении сделаны выводы по работе.

#### **Научная новизна.**

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

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

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

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

#### **Практическая значимость и реализация работы.**

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

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

3. Результатами внедрения разработанных алгоритмов являются:

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

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

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

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

#### **Методика проведения исследований.**

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

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

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

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

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

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

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

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

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

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

## **Глава 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПРОКАТКИ. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРО- И ГИДРОПРИВОДАМИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ РАСХОДНОГО КОЭФФИЦИЕНТА**

Прежде чем приступить к решению задач, поставленных в диссертации, необходимо дать описание объекта исследований: взаимосвязанных электро-технических систем горизонтальной и вертикальной клетей стана 5000 ПАО «ММК». Здесь эти клетки объединяются термином «реверсивная прокатная клеть». Следует привести описание технологий толстолистовой прокатки, охарактеризовать стадии прокатки и связать их с процессами профилирования широких граней горизонтальными валками. Также следует представить характеристики электроприводов клетей, рассмотреть их кинематические схемы. Эти сведения необходимы для последующей разработки математических моделей электро- и гидроприводов нажимных устройств (в структуре САРТ).

Важной задачей является анализ причин высоких расходных коэффициентов. Как было отмечено во введении, максимальная доля потерь металла обусловлена боковой и торцевой обрезью. Средняя длина отрезаемого головного участка примерно равна длине хвостового участка и составляет 0,8 м. Потери с боковой обрезью обусловлены спецификой толстолистовой прокатки, когда, вследствие больших обжатий, металл течет не только в осевом, но и боковых направлениях. Однако максимальные отклонения формы листа в плане возникают на концевых участках раската.

Следует дать характеристику известных технологий, направленных на улучшение формы раската и снижение расходного коэффициента. Также важно привести описание концепции ROLL-GAP CONTROLL. Это необходимо для анализа точности регулирования технологических параметров и обоснования направлений совершенствования алгоритмов управления.

Как было отмечено во введении, важной задачей является ограничение силовой взаимосвязи вертикальных и горизонтальных валков в межклетевом

промежутке. Недостаточно изученным вопросом является возникновение подпора вследствие удлинения металла при перемещении НУ в режимах формирования конических профилей на концах раската. Это является следствием как непосредственно увеличения обжатия на переднем конце, так и динамики опережения металла в очаге деформации. Данный вопрос исследован в диссертационной работе [2], однако не может считаться полностью решенным. Необходимо продолжение исследований в этом направлении.

Итоговыми результатами представленной главы должны стать конкретные направления исследований, обеспечивающие достижение цели диссертационной работы.

### **1.1. Технологическая линия и технология прокатки на стане 5000**

Стан 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000) – это толстолистовой прокатный стан с одной четырехвалковой клетью годовой производительностью 1,5 млн т. Агрегат соответствует современным требованиям рынка по следующим критериям:

– широкий диапазон размеров производимого листа с узкими допусками и хорошей планшетностью. Согласно проекту обеспечиваются: толщина от 8 до 100 мм, ширина от 0,9 до 4,8 м, длина от 6000 до 24000 мм. Возможна поставка листов шириной от 900 до 2400 мм после продольной резки по оси;

– широкий сортамент продукции по пределу текучести и прочности от 235 Н/мм<sup>2</sup> до 1200 Н/мм<sup>2</sup> из низколегированной марок стали типа 09Г 2ФБ, 10Г 2ФБЮ, 13Г 1СУ и других, прокатываемых по контролируемому режиму [61].

Для изготовления листа используются нерерывнолитые слябы необходимого размера толщиной до 350 мм. Основные операции состоят из нагрева сляба до прокатной температуры, прокатки, охлаждения, резки на мерные длины, термообработки (при необходимости), испытаний и контроля. Размеры листов, их предельные отклонения и плоскостность должны соответствовать



требованиям стандартов или технических условий на поставку толстолистовой продукции. Основные марки стали, прокатываемые на стане, приведены в таблице П.1.1 Приложения 1. В таблице П.1.2 представлены предельные отклонения показателей, оказывающих влияние на качество проката. Схема расположения технологического оборудования представлена рисунке 1.1.

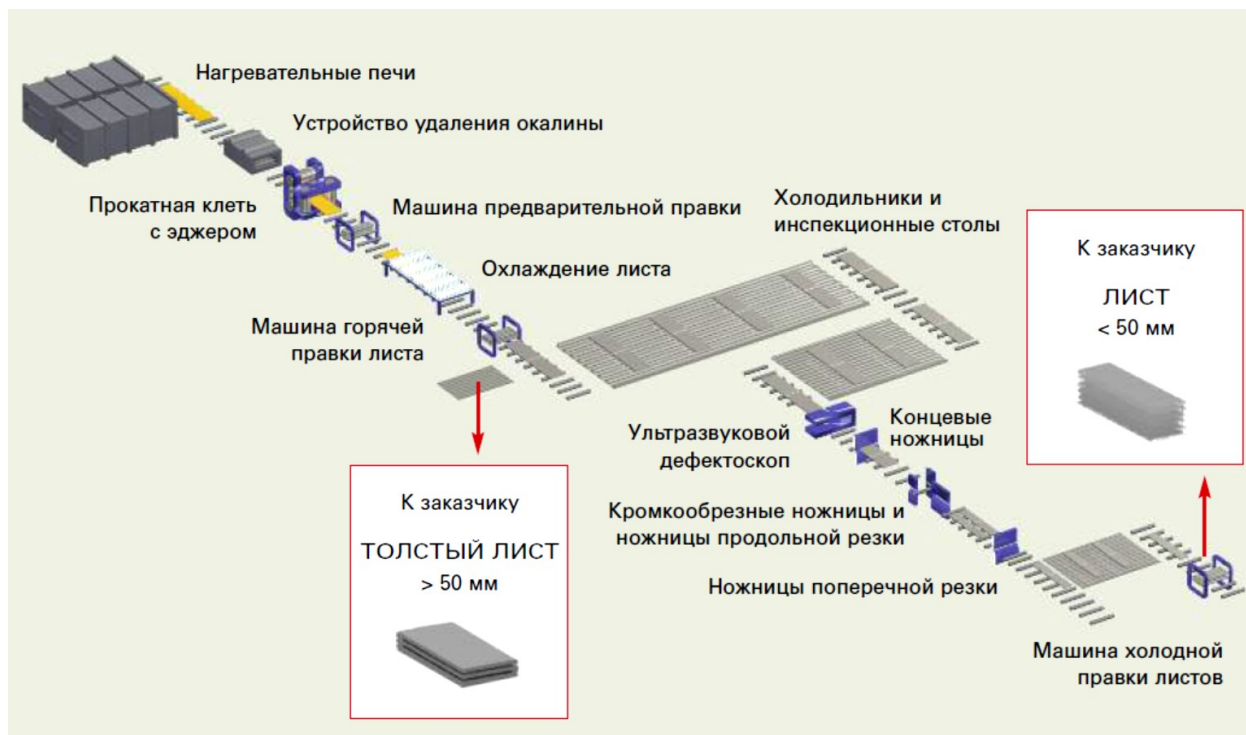


Рисунок 1.1 – Фрагмент технологической линии стана 5000

Слябы загружаются в печь загрузочным устройством и подогреваются до температуры, которая зависит от сортамента стали: для углеродистых сталей – до 1150–1250°C, а для высокопрочных низколегированных сталей с последующей термомеханической прокаткой – до 1100–1150°C. Очищенный от окалины слэб передается подающим рольгангом в клетку, оборудованную поворотными столами и боковыми направляющими на входной и выходной сторонах. Сляб можно развернуть перед и за клетку.

Стан состоит из четырехвалковой реверсивной клетки и вертикальной клетки (эджера). В зависимости от режима прокатки листы могут быть прокатаны за один проход (нормальная прокатка) или остаться на рольганге для промежуточного охлаждения (прокатка при контролируемой температуре или

термомеханическая прокатка). Процесс прокатки включает три основные стадии:

- стадия калибровки: продольный(е) проход(ы) для обеспечения постоянной толщины слябов;
- стадия поперечной прокатки: после разворота на  $90^\circ$  выполняются поперечные проходы для получения заданной ширины листа;
- редуционная стадия: после разворота на  $90^\circ$  производятся продольные проходы до достижения заданной толщины листа.

После чистовой прокатки лист уходит из чистовой клетки и транспортируется в направлении системы ламинарного охлаждения. В зависимости от материала и технологии лист пропускается без охлаждения или подвергается ускоренному контролируемому охлаждению (АСС). Охлаждение может производиться либо в один проход, либо это будет возвратно-поступательное охлаждение (*oscillating*) с заданными параметрами скорости охлаждения.

Характерной особенностью станов 5000 является отсутствие отдельной черновой клетки, которая установлена на станах предыдущих поколений, например, станах 2800 ПАО «Северсталь» и ОАО «Уральская сталь» [62, 63]. Поэтому прокатка разделена на две стадии: черновую и чистовую. Прокатка ведется в реверсивном режиме партиями по 5-6 заготовок. Согласно технологии контролируемой прокатки осуществляются черновая прокатка всех слябов партии, затем подстуживание промежуточных заготовок (раскатов) на рольганге и дальнейшая индивидуальная чистовая прокатка каждой заготовки до получения заданной геометрии листа. В одном либо двух проходах черновой стадии осуществляется придание заготовке заданной ширины (разбивка ширины). Для этого сляб поворачивают на  $180^\circ$  с последующим возвращением в исходную ориентацию относительно оси прокатки.

Прокатка производится по расчетной схеме, формируемой моделью второго уровня АСУ. При поперечной прокатке получают заданную ширину

листа с припуском на ширину обрезаемых кромок. Суммарное обжатие зависит от ширины раската и размеров сляба. При этом длина получаемого раската не должна превышать 4900 мм.

После охлаждения листы транспортируются рольгангом на концевые ножницы, где производится отрезка переднего и заднего концов, и, если необходимо, – предварительное деление раската. Далее по линии установлены кромкообрезные ножницы для обрезки кромок листа на нужную ширину. После обрезки кромок и продольной резки листы транспортируются рольгангом к делительным ножницам для резки на мерные длины.

На стане 5000, как и на большинстве толстолистовых станов, в одном либо двух проходах черновой стадии предусмотрена прокатка с калибровкой сляба горизонтальными валками (профилированная прокатка). Ее целью является формирование двойного конического профиля по длине заготовки («собачья кость»). Это обеспечивает получение практически полной прямоугольности листа в плане и, как следствие, – снижение боковой обрезки [64].

## **1.2. Оборудование реверсивной клетки**

Главным агрегатом технологической линии является реверсивная прокатная клетка. Она состоит из горизонтальных и вертикальных валков, прокатка в которых происходит одновременно. Вследствие этого электромеханические системы этих клеток связаны в рабочем процессе через металл. Фотографии стана со стороны вертикальной клетки и со стороны отводящего рольганга приведены на рисунках 1.2, а и б, соответственно.

На рисунке 1.3 показана упрощенная конструкция горизонтальной клетки. Она оснащена рабочими валками, передающими усилие прокатки и мощность привода на обрабатываемый металл [65]. Очаг деформации регулируется электромеханическим и гидравлическим нажимными устройствами. Механическая прижимная система работает между проходами без нагрузки. Для регулирования положения рабочих и опорных валков под подушкой нижнего опорного валка устанавливаются гидроцилиндры HGC (Hydraulic Gap Control - регулирования раствора валков).



a)



б)

Рисунок 1.2 – Вид на прокатную клетку со стороны вертикальных валков (а) и со стороны отводящего рольганга (б)

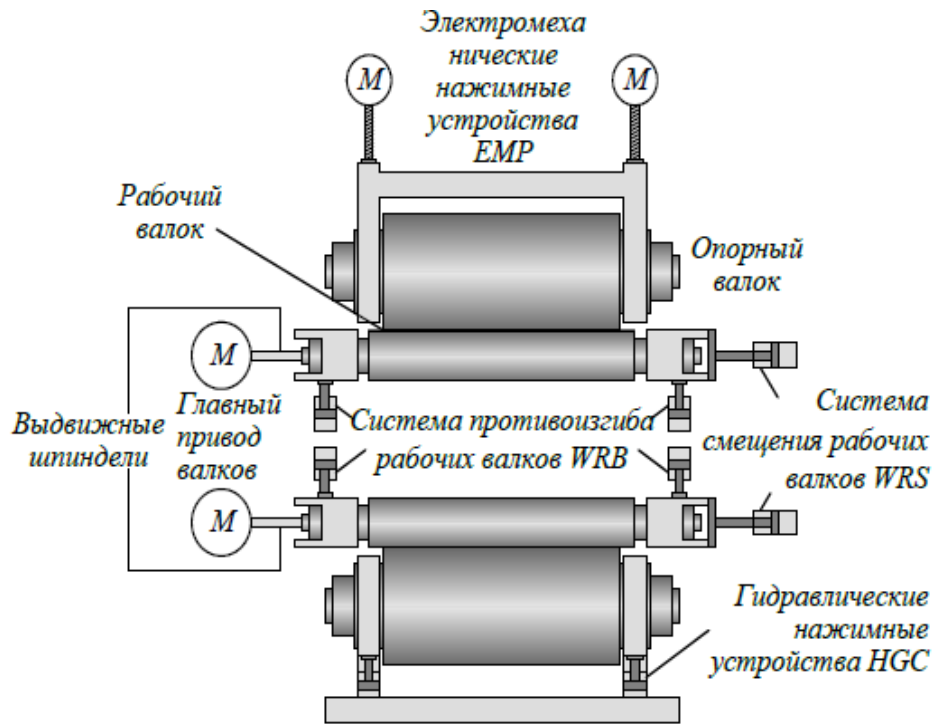
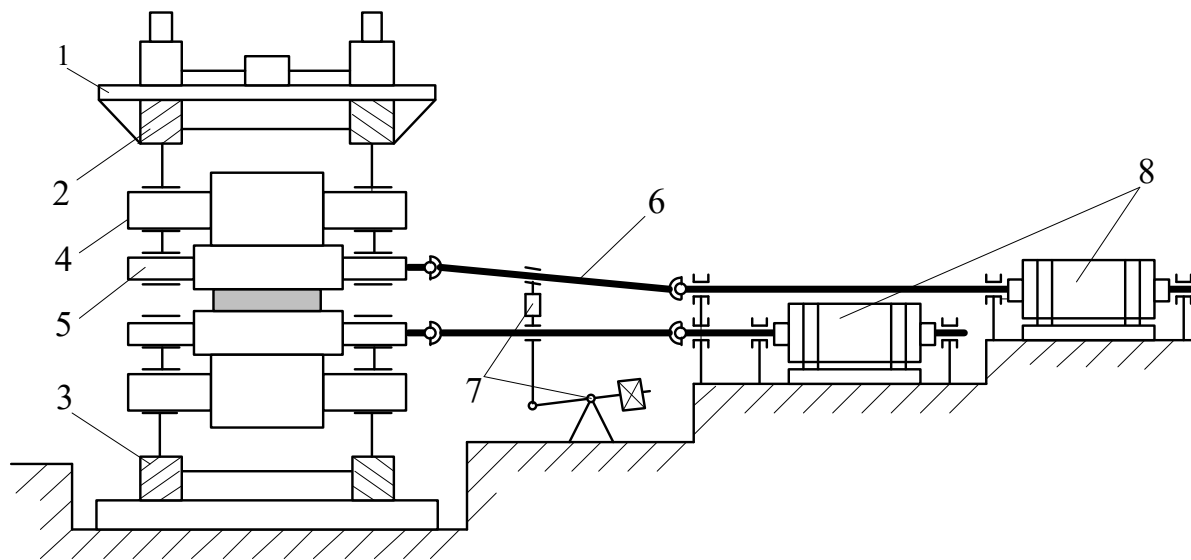


Рисунок 1.3 – Схема расположения оборудования горизонтальной клетки

На рисунках 1.4 и 1.5 представлены кинематические схемы горизонтальных и вертикальных клеток [2]. Они имеют индивидуальные электроприводы валков. Параметры клеток и электроприводов приведены в таблицах 1.1 и 1.2. Привод каждого валка осуществляется синхронным двигателем с частотным регулированием скорости. Технические характеристики двигателей клетки и эджера приведены в таблицах П.1.3, П.1.4 Приложения 1.

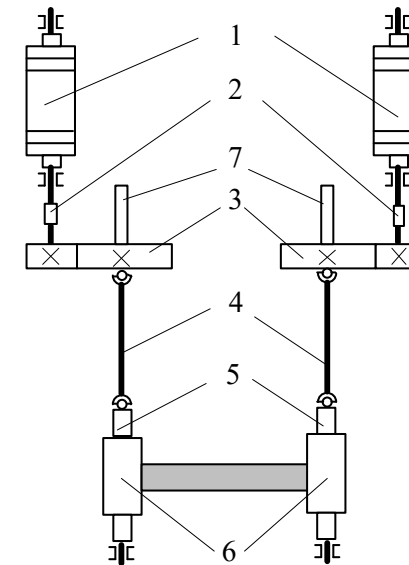
#### **Схема главного электропривода**

Принципиальная схема и описание электроприводов горизонтальной клетки представлены в диссертации [66] и публикациях [67, 68]. Преобразователь частоты (ПЧ) типа MV7308 SA AFE работает по принципу широтно-импульсной модуляции и имеет 3 уровня. Его номинальные параметры приведены в таблицах П.1.5, П.1.6 Приложения 1. Для трех ПЧ, работающих параллельно и синхронно, используется раздельное питание через соответствующие понижающие трансформаторы.



- 1) Станина
- 2) Электромеханическое нажимное устройство
- 3) Гидравлическое нажимное устройство
- 4) Опорные валки
- 5) Рабочие валки
- 6) Выдвижные шпиндели
- 7) Уравновешивающее устройство
- 8) Электродвигатели

Рисунок 1.4 – Кинематическая схема горизонтальных валков



- 1) Двигатели
- 2) Соединительные муфты
- 3) Редукторы
- 4) Шарнирные валы
- 5) Трефы на стороне валков
- 6) Рабочие валки
- 7) Уравновешивающее устройство

Рисунок 1.5 – Кинематическая схема эджерных валков

Таблица 1.1 – Характеристики четырехвалковой реверсивной клетки

| Устройство                                       | Параметр   | Значение или описание                    |
|--|--|--|
| Прокатные валки                                  | Диаметр рабочих валков   | 1210- 1110 мм                            |
|  | Длина рабочих валков   | 5300 мм                                  |
|  | Диаметр опорных валков   | 2300-2100 мм                             |
|  | Длина опорных валков   | 4950 мм                                  |
|  | Подшипники рабочих валков  | 4-рядные конические радиальные роликовые |
|  |  | 2-рядные осевые подшипники               |
|  | Подшипники опорных валков  | ПЖТ МОРГОИЛ                              |
| Скорость рабочих валков при макс. диаметре валка | (0-3,17)/7,30 м/с  |  |
| Максимально допустимое усилие прокатки           | Максимальное усилие на цилиндрах НГС при давлении 300 бар со стороны поршня, 30 бар со стороны штока | 120 МН<br>более 140 МН                   |
|  |  |  |
| Главный привод                                   | Тип  | спаренный                                |
|  | Мощность главного привода  | 2х12 МВт                                 |
|  | Частота вращения вала двигателя  | (0-60)/115 об/мин                        |
|  | Номинальный крутящий момент  | 2х1,91 МНм                               |
|  | Максимальный крутящий момент при прокатке  | 2х3,82 МН м (200% номин.)                |
|  | Максимальный крутящий момент перегрузки (двигатель)  | 2х4,23 МН м (225% номин.)                |
|  | Крутящий момент при отключении двигателя   | 2х5,25 МН м (275% номин.)                |
| Гидронажимное устройство                         | Место установки  | внизу                                    |
|  | Диаметр поршня   | 1750/1600 мм                             |
|  | Ход  | 95 мм (действ. 85 мм)                    |
|  | Максимальное давление в гидросистеме   | 29 МПа                                   |
| Механическое нажимное устройство                 | Раствор между рабочими валками (новые валки)   | 320 мм                                   |
|  | Высота подъема   | 520 мм                                   |
|  | Скорость   | 0-50 мм/с                                |
|  | Мощность привода   | 2х560 кВт                                |
|  | Частота вращения привода   | 800 об/мин                               |
| Нажимной винт:                                   |  |  |
| диаметр  | 950 мм,  |  |
| шаг  | 60 мм  |  |

Таблица 1.2 – Характеристики вертикальной обжимной клетки

| Наименование технической характеристики   | Значение           |
|---|--------------------|
| Диаметр роликов:<br>максимальный  | 1000 мм            |
| минимальный   | 900 мм             |
| Длина бочки вала:   | 600 мм             |
| Максимальное усилие прокатки  | 5 МН               |
| Скорость прокатки при максимальном диаметре вала  | (0–2,19)/7,3 м/с   |
| Мощность главного привода   | 2x1,25 МВт         |
| Частота вращения привода  | (0–230)/800 об/мин |
| Передаточное число  | 5,5                |
| Раствор валков  | 1350–5000 мм       |
| Расстояние от оси до 4-валковой клетки  | 4,8 м              |
| Максимальное обжатие по ширине (при температуре более 1100 °С) при толщине раската 250 мм | до 50 мм           |
| Высота прохода над уровнем рольганга  | 0,6 м              |

На рисунке 1.6 представлена функциональная схема системы управления скоростями электродвигателей М1, М2 применительно к верхнему и нижнему валку реверсивной клетки. Модель второго уровня генерирует параметры прокатки, основываясь на требованиях к выходной продукции и температуре режима прокатки. Из программируемого логического контроллера клетки стана поступает задание на скорость  $V_{\text{акт}}(t)$ , формируемое на основе точек кривой  $S_{\text{акт}}(t)$ . Ограничение на торможение и разгон электродвигателей генерируется интерполятором, реализуемым в виде задатчика интенсивности (ЗИ), на вход которого подается рассчитанная линейная скорость  $V(t)$ . Этот блок необходимо для лимитирования темпа задания в случае аварийной ситуации. Далее сигнал корректируется в задание угловой скорости двигателя, учитывая диаметр валков, который поступает на замкнутый контур скорости.

### ***Гидравлические цилиндры нажимных устройств***

Клетки оборудованы системой гидравлической настройки валков с коротким ходом (рис. 1.7, а) и электромеханической системой предварительной настройки валков. Гидравлические НУ (рис. 1.7, б) состоят из двух цилиндров,



которые установлены под подушками нижних опорных валков со стороны электропривода (DS) и со стороны оператора (OS). Характеристики нажимных устройств представлены в таблице П.1.7 Приложения 1.

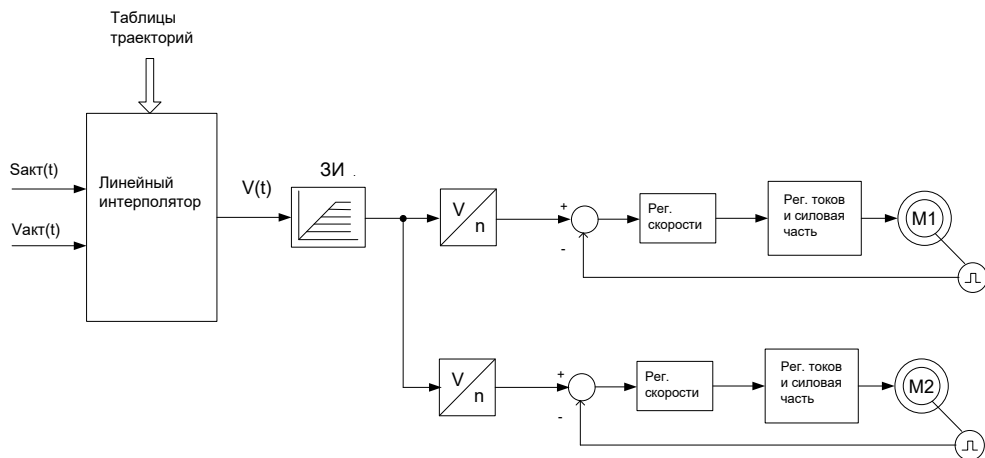
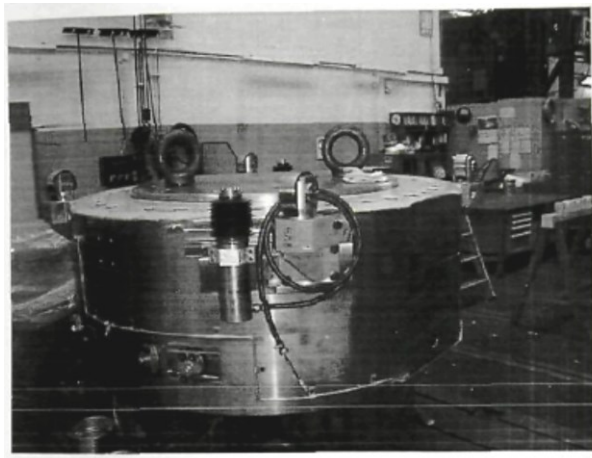
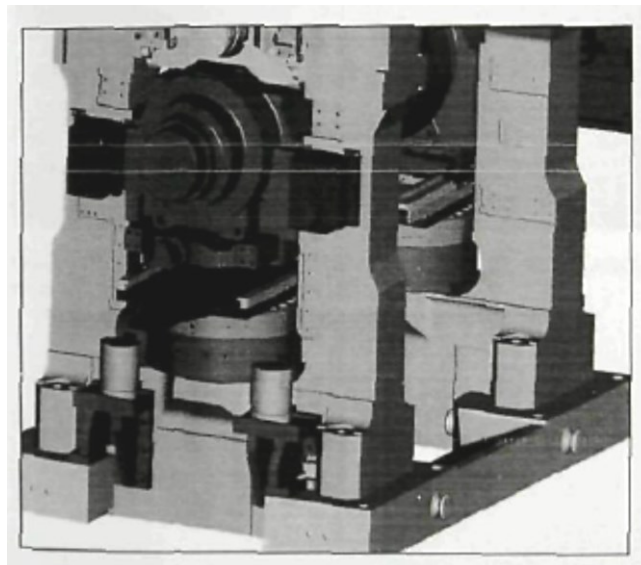


Рисунок 1.6 – Функциональная схема системы управления скоростями электроприводов клетки стана 5000



а)



б)

Рисунок 1.7 – Гидроцилиндр нажимного устройства (а) и его установка под нижними опорными валками клетки (б)

Нажимные устройства являются основными элементами системы регулирования прокатного зазора (AGC), которая выполняет следующие технологические функции:

- управления толщиной во время прохода;
- управления расположением валков (автоматическое выравнивание);
- управления профилем ASC (Automatic Shape Control – рассматривается в разделе 2);
- настройку прокатной линии (возвышения нижнего валка над уровнем рольганга).

Цилиндр AGC компенсирует нагрузку от усилия прокатки, веса нижних валков (рабочего и опорного) и силы изгиба, прилагаемой нижним цилиндром противоизгиба. В каждом цилиндре установлены преобразователи положения и давления, передающие в АСУ ТП текущие данные.

### **1.3. Анализ причин неудовлетворительных расходных коэффициентов на толстолистовых станах**

Рост значений расходных коэффициентов в условиях прокатки на толстолистовых станах приводится рядом авторов. Например, в статье [70] говорится, что *«Прокатка толстых листов характеризуется наибольшим расходом металла на тонну годного. Расходный коэффициент для листов из легированных сталей достигает 1,25, а в среднем по сортаменту составляет 1,16–1,18. Металл в основном перерасходуется на боковую и торцевую обрезь, величина которой определяется отклонением формы листовых раскатов в плане от прямоугольной. Уменьшение расхода металла при прокатке толстых листов является актуальной и экономически важной проблемой»*.

В публикации [71] говорится, что *«Средний расходный коэффициент металла на толстолистовых станах в странах с современными технологиями прокатки находится на уровне 1175 кг/т, а в Японии на станах 5500 – 1085*

кг/т. Тогда как на реверсивных толстолистовых станах стран СНГ расходный коэффициент находится в пределах 1180 – 1285 кг/т, что значительно снижает конкурентоспособность производителей». Разработка систем управления формой раскатов в плане и алгоритмов расчетов параметров формы и управляющих воздействий названо актуальной задачей.

Авторы публикации [72] утверждают, что «Самые высокие показатели по выходу годного до 94,8% получены на японских ТЛС. Этот уровень достигнут в основном за счет применения переменных по длине раскатов обжатий в горизонтальных валках черновой клетки в определенных проходах (МАС-процесс)». Аналогичный способ прокатки толстых листов разработали сотрудники Донничермета [73].

### ***Показатели расхода металла***

Размеры листов, их предельные отклонения и плоскостность должны соответствовать требованиям стандартов или технических условий на поставку листовой продукции. Качество поверхности листов должно соответствовать требованиям ГОСТ 14637.

На фактический расход металла на толстолистовом прокатном стане влияют следующие факторы:

- отклонения геометрических размеров листа (толщина, ширина, длина) от заданных;
- отклонение плоскостности листа;
- отклонение толщины листа по длине (продольная разнотолщинность);
- отклонение толщины листа по ширине (поперечная разнотолщинность);
- наличие боковой и концевой обрезки (отклонение формы листа в плане от прямоугольной);
- прочие дефекты (коробоватость, окалина и др.).

Расход металла учитывают двумя показателями – расходным коэффициентом и выходом годного проката [75]. Расходный коэффициент является основной характеристикой материалоемкости производства. Это показатель определяется как отношение массы заданного металла к массе годного проката, т.е. он выражает относительное количество металла, которое нужно за-

дать в производство для получения 1 т проката. При расчете учитывается весь расход металла при прокатке, в том числе на брак всех видов и на дополнительную обрезь из-за удаления дефектов металла [76].

Выход годного определяют обратным отношением и выражают в процентах:  $\text{Выход годного} = A/B \times 100$  (%), где  $A$  – вес готовой продукции;  $B$  – вес сляба. Согласно проектной документации, выход годного для главной производственной линии стана 5000 должен составлять не менее 92,0%.

Геометрические размеры, определяющие расход металла и качество проката, должны находиться в пределах допусков по ширине и толщине. В соответствии с технологической инструкцией для стана 5000 допуск по ширине составляет  $\pm 3$  мм. Точность настройки толщины (абсолютная толщина) определяется как разница между фактическим средним значением, измеренным по оси листа, и целевым значением. Допуски по толщине приведены в таблице 1.3). Они обеспечиваются, прежде всего, согласованной работой всех механизмов клетки и стана в целом, а также точностью и быстродействием гидравлических нажимных устройств.

Таблица 1.3 – Допуски по толщине (абсолютные значения)

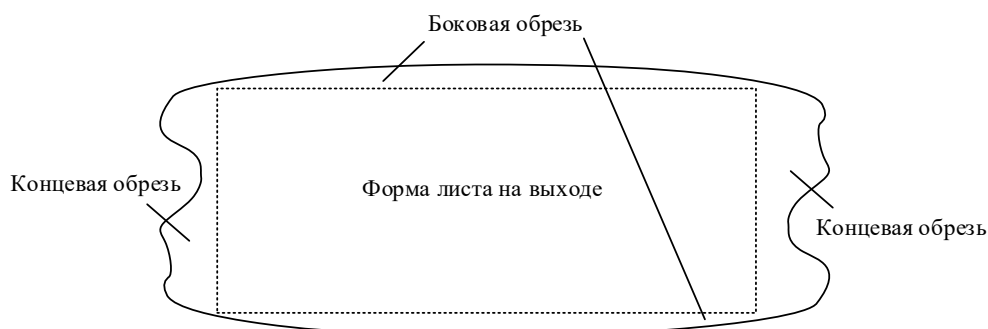
| Толщина                                    | Гарантийное значение*  |
|--|------------------------|
| $8,0 \text{ мм} \leq h < 15,0 \text{ мм}$  | $\pm 0,160 \text{ мм}$ |
| $15,0 \text{ мм} \leq h < 25,0 \text{ мм}$ | $\pm 0,200 \text{ мм}$ |
| $25,0 \text{ мм} \leq h < 40,0 \text{ мм}$ | $\pm 0,250 \text{ мм}$ |
| $40,0 \text{ мм} \leq h < 80,0 \text{ мм}$ | $\pm 0,350 \text{ мм}$ |

\* 95,4% измеренных толщин должны соответствовать допускам, указанным в данной таблице. Оставшиеся 4,6% должны соответствовать допускам согласно нормам EN 10029, издание от октября 1991 г.

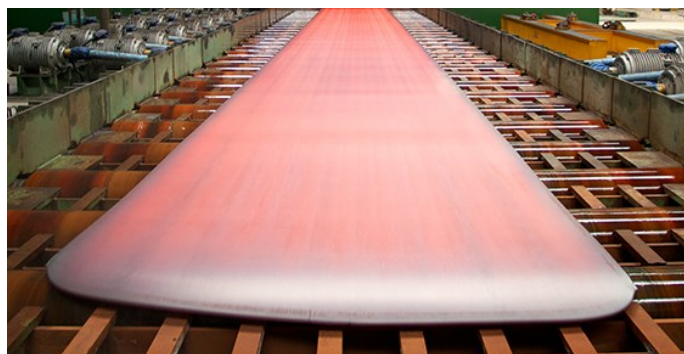
Форма раската в плане условно показана на рисунке 1.8, а. Она зависит от обжатий в горизонтальной и вертикальной клетях. Ширина сляба при прокатке по чисто продольной схеме и длина сляба при прокатке по чисто поперечной схеме должны быть больше ширины готового листового раската на величину припуска (120–160 мм) и меньше длины бочки валков на 200–400 мм [5].

Готовые раскаты, прокатанные по этим схемам, характеризуются большими выпуклыми торцами в виде «языков» (рисунок 1.8, б), достигающими

на тонких раскатах 1000 мм. Наряду с этим дефектом возможны другие искажения формы концов раската, которые зависят от обжатий в вертикальных и горизонтальных валках. Они приведены на рисунке 1.9 с соответствующими подрисуночными подписями [77]. Зависимость формы концов от обжатий также подтверждается в публикациях [26, 78] и других.



а)



б)

Рисунок 1.8 – Условная форма листа в плане (а) и форма переднего конца листа

Основным параметром, характеризующим форму переднего и заднего концов, является стрела изгиба  $f_{CP} = \frac{f_{II} + f_3}{2}$ . Величины  $f_{II}$  и  $f_3$  при выпуклом конце (рис. 1.9, а) считаются положительными, а при вогнутом конце (рис. 1.9, в) – отрицательными.

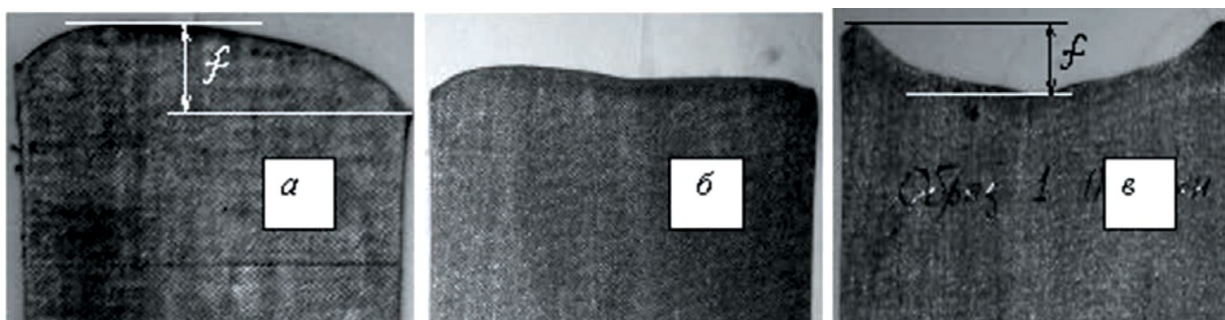


Рисунок - 1.9. Форма концов раската при различном обжатии вертикальными валками: а – недостаточное или отсутствующее обжатие; б – рациональное обжатие; в – повышенное обжатие

### ***Причины увеличения боковой и торцевой обрезки***

Как было показано выше, процесс прокатки на толстолистовом стане включает три стадии: протяжка (продольная прокатка сляба в 1 – 4 прохода), разбивка ширины листа (прокатка в поперечном направлении, выполняется после разворота на  $90^\circ$ ) и продольная прокатка до требуемой толщины (выполняется после обратного разворота).

При такой последовательности операций форма готового листа значительно отличается от прямоугольной. Это связано с тем, что при прокатке имеет место деформация не только в продольном, но и в поперечном направлениях (уширение), причем наибольшее уширение возникает на переднем и заднем концах сляба. Это явление имеет место при высоком очаге деформации, т.е. на этапах протяжки и разбивки ширины. На рисунке 1.10 показаны характерные формы листа в плане после протяжки (рис. 1.10, а) и разбивки ширины (рис. 1.10, б).

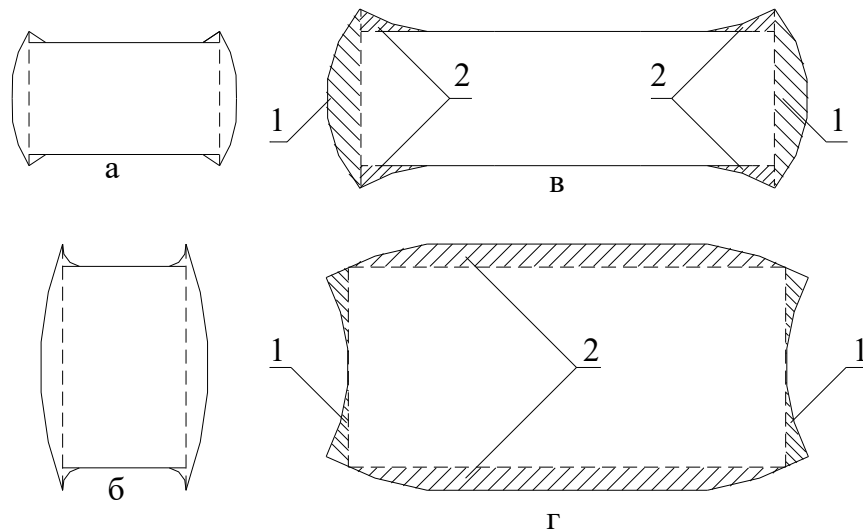


Рисунок 1.10 – Форма листа в плане: 1 – торцевая обрезь, 2 – боковая обрезь

Штриховыми линиями показана торцевая и боковая обрезь, на величину которой можно повлиять за счет изменения суммарных обжатий в момент поперечного и продольного прохода. Конечную форму заготовки можно описать

коэффициентами вытяжек при протяжке и при разбивке ширины. Такие коэффициенты для сляба представляют собой отношение либо длины раската к его длине, либо ширины раската к его ширине. Если коэффициент вытяжки выше коэффициента разбивки, то сляб на выходе из клетки приобретает форму с выпуклостью на концах (рис. 1.10, в) и наоборот, если коэффициент разбивки выше коэффициента вытяжки, то боковые участки сляба становятся выпуклыми (рис. 1.10, г).

Наиболее сильно уширение проявляется на переднем и заднем концах раската. Поэтому при дальнейшей прокатке на концах раската и по боковым кромкам образуются участки неправильной формы, схематично показанные на рисунке 1.10, в. Они вызывают потери в обрезь до 5–7%, при этом продольная разноширинность раскатов в виде расширенных концов длиной от 0,2 до 1,5 м и величиной до 100 мм обуславливает боковую обрезь. Она значительно меньше, чем концевая.

#### **1.4. Способы повышения качества и выхода готовой продукции**

##### **1.4.1. Технологии прокатки с коррекцией формы листа в плане**

Как было отмечено во введении, разработке технологий прокатки, направленных на достижение прямоугольной формы листа, посвящено большое количество публикаций. Исследования в данном направлении проводят многие специалисты. Отдельные технологии доведены до промышленного внедрения и эксплуатируются, в основном, на зарубежных толстолистовых станах. Ниже приводится их краткий анализ, опубликованный в авторской работе [81].

**1. Косая прокатка.** Способ заключается в том, что в первом проходе раскат ориентируют под углом  $\alpha_1$  к направлению прокатки, а в следующем проходе – под углом  $\alpha_2$ , выбранным с таким расчетом, чтобы произошла взаимная компенсация искажения формы в двух проходах (рис. 1.11). В данном способе ключевым моментом является расчет оптимального угла поворота листа

к направлению прокатки и управление угловым положением раската. Важно учитывать то, что такая прокатка сопровождается увеличенным уширением.

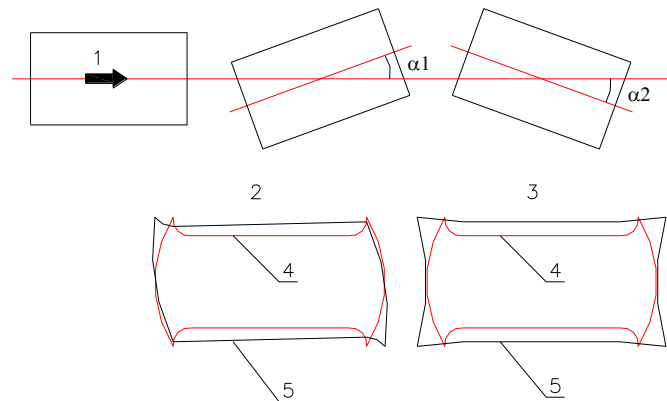


Рисунок 1.11 – Схема косой прокатки: 1 – направление прокатки; 2, 3 – косая прокатка; 4, 5 – форма листа в плане после обычной и косой прокатки

Возможности данного способа ограничены и позволяют лишь улучшить форму переднего и заднего концов листа. К достоинствам способа следует отнести возможность его реализации на любом стане практически без реконструкции оборудования. К недостаткам – необходимость точного расчета оптимальных углов поворота и сложность управления угловым положением сляба. Более подробная информация о разработке и промышленном применении данного способа приведена в публикации [40].

**2. Изменение поперечного профиля сляба.** Если слябу заранее придать вогнутый поперечный профиль, то можно уменьшить выпуклость концов листа. Это можно обеспечить следующими способами (рис. 1.12):

– приданием выпуклой профилировки группе верхних валков тянущей клетки на слябовой машине непрерывного литья заготовок и вытягиванием затвердевшего сляба с приложением усилия обжатия;

– обжатием по ширине в последнем проходе, что обеспечит утолщение сляба у боковых кромок по сравнению с центральной частью.

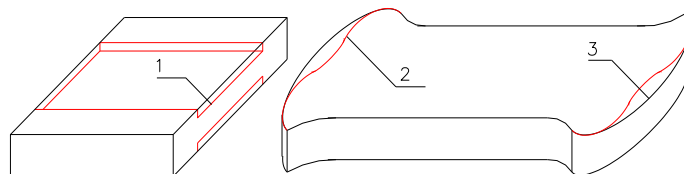




Рисунок 1.12 – Способ изменения поперечного профиля сляба: 1 – изменение поперечного профиля; 2, 3 – формы раската, полученного из профилированного и обычного слябов

Данный способ не позволяет регулировать отклонение формы листа от прямоугольной в зависимости от режимов обжатий. Это связано с тем, что профиль сляба невозможно изменять в широких пределах в процессе прокатки с коэффициентом вытяжки при разбивке ширины большим, чем при протяжке. Эта технология требует жесткой согласованности работы электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей, гидравлических НУ и гидравлического устройства контроля зазора валков эджеров, а также системы автоматического регулирования ширины на их основе. Информация о реализации подобного способа приводится в публикации [70]

**3. Предварительное обжатие вертикальными валками.** В ходе прокатки в вертикальной клети слябу придают профиль, показанный на рисунке 1.13. Параметры профиля задают такими, чтобы величина вогнутости кромки раската после первого пропуска была достаточной для компенсации бочкообразности раската, возникающей при прокатке в горизонтальных валках.

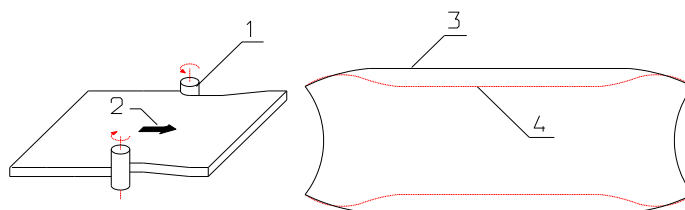


Рисунок 1.13. Способ предварительного обжатия вертикальными валками: 1 – вертикальные валки; 2 – направление прокатки; 3, 4 – форма раската при обычной прокатке и после профилирования

Такой способ обеспечивает компенсацию последующего неравномерного уширения при разбивке ширины и улучшение формы листа в плане.

### 1.4.2. Технология прокатки с профилированием широких граней раскатов горизонтальными валками

Наиболее эффективным способом улучшения формы раскатов в плане является прокатка с профилированием широких граней раската горизонтальными валками. Последовательность операций при такой прокатке показана на рисунке 1.14.

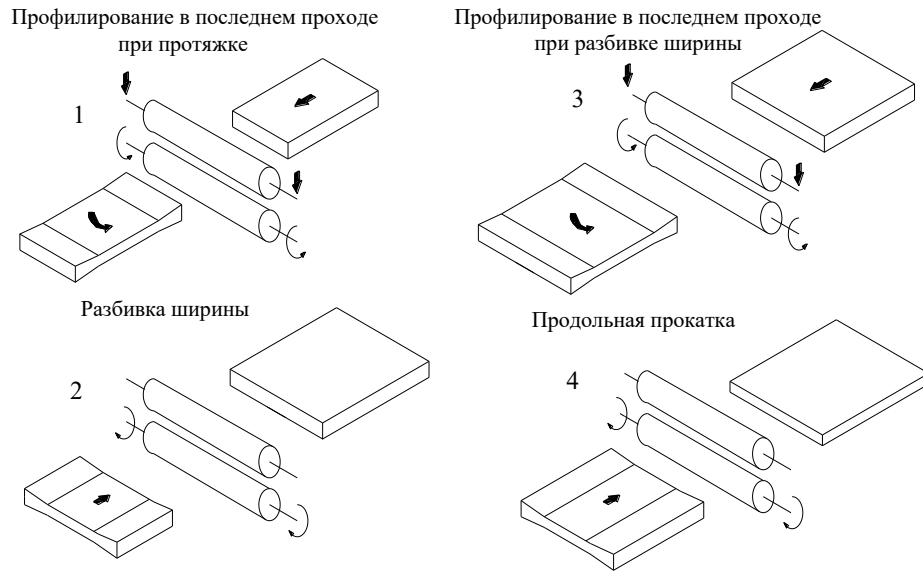


Рисунок 1.14 – Последовательность операций при продольной прокатке с профилированием

Суть способа заключается в том, что в последних пропусках при протяжке (позиция 1 на рис. 1.14) или разбивке ширины (позиция 3) производят деформацию раската с переменным обжатием горизонтальными валками по длине в форме «собачья кость», схематично показанной на рисунке 1.15 [79]. Затем производятся кантовка и прокатка профилированного сляба с постоянным обжатием (позиции 2, 4 на рис. 1.14).

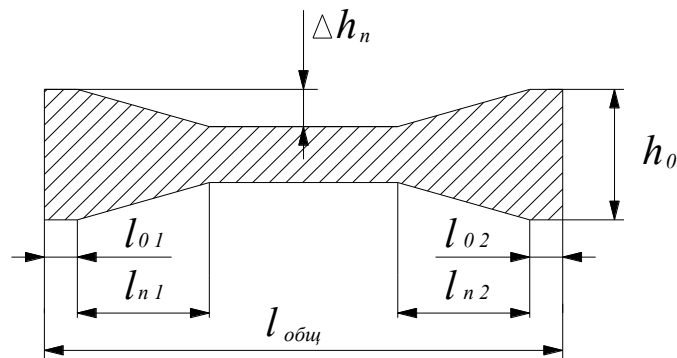


Рисунок 1.15 – Поперечное сечение раската при профилированной прокатке:

$l_{n1}, l_{n2}$  – длины профилированных участков;  $l_{01}, l_{02}$  – длины участков, прокатываемых с постоянным обжатием;  $l_{\text{общ}}$  – общая длина раската после профилирования;  $h_0$  – толщина раската после профилирования;  $\Delta h_n$  – глубина профилирования

Так как профилированный сляб после поворота на  $90^\circ$  имеет переменную толщину по ширине, после прокатки с постоянным обжатием торцевые грани раската приобретают форму, близкую к прямоугольной. При поперечной схеме прокатки возможно управление только формой торцевых граней готового листа. В этом случае производятся только первые две операции – профилирование в последнем проходе при протяжке (позиция 1) и поперечная прокатка профилированного сляба (позиция 2) [16].

Использование данной технологии на ряде зарубежных станов позволило активно управлять формой листов и получать различную форму готовых раскатов в плане (круглую, овальную, трапециидальную) при минимальной обрезки [82]. Внедрение профилированной прокатки на толстолистовом стане 5500 завода в г. Мидзусима (Япония, прокатка по способу MAS) обеспечило снижение расхода металла в обрезь с 5,5% до 1,1% [16].

Технологические аспекты данного способа изучены и освещены в литературе [32, 83] и др. Принципы расчета параметров конического профиля: глубины и протяженности, рассмотрены в работах [3, 84]. Способ реализован в 2008 г. на толстолистовом стане (ТЛС) 3000 ОАО «Алчевский меткомбинат» (Украина). В России предпринимались попытки внедрения данного способа прокатки на нескольких металлургических предприятиях. Необходимыми условиями являются наличие гидравлических нажимных устройств и управление от промышленного контроллера для расчета и регулирования конических профилей. В 2007 г. способ внедрен на ТЛС 5000 ОАО «Северсталь» после установки на нем гидравлических НУ [78]. В [51, 52] выполнена разработка системы управления гидравлическим НУ и электроприводом черновой клетки стана 2800 ОАО «Уральская сталь». Тем не менее, данные результаты на практике не были выполнены.

В связи с уникальностью каждого толстолиствого стана практически в каждом случае необходимо решение комплекса инженерных задач, в частности, определения энергосиловых параметров профилированной прокатки, быстродействия нажимных устройств, создания системы взаимосвязанного управления приводами клетки и НУ и др.

На толстолистных станах 5000 ПАО "ММК", ОАО "ВМЗ" а также на современных зарубежных ТЛС для получения листа прямоугольной формы используется система автоматического контроля профиля (ASC). Эта концепция схожа с профилированной прокаткой MAS и за счет использования системы автоматического регулирования толщины называется ROLL-Gap CONTROL.

### **1.5. Концепция регулирования толщины ROLL-GAP CONTROL**

На стане 5000 концепция регулирования толщины ROLL-GAP-CONTROL реализована за счет систем технологической автоматизации, таких как система автоматического регулирования зазора между валками и система регулирования толщины раската. Данная концепция разработана фирмой Demag AG применительно к толстолистным станам горячей прокатки. На рисунке 1.16 показана функциональная схема, реализующая принцип регулирования толщины и раствора валков и состоящая из следующих подсистем:

- HGC, Hydraulic Gap Control (гидравлическое регулирование раствора валков);
- AGC, Automatic Gap Control (автоматическое регулирование толщины);
- (RAC) управление перекосом валков;
- (DDC) динамическая компенсация возмущающих воздействий клетки;
- EMP, Electro Mechanical Positioning (позиционирование электромеханических нажимных винтов).

Контур *HGC* обеспечивает выполнение следующих функций:

- регулирование положения и усилия отдельно по каждому гидравлическому цилиндру;
- плавное переключение от регулирования положения на регулирование усилия;

- синхронизацию работы цилиндров;
- адаптацию в зависимости от хода цилиндров и давления;
- активную защиту от перегрузки.

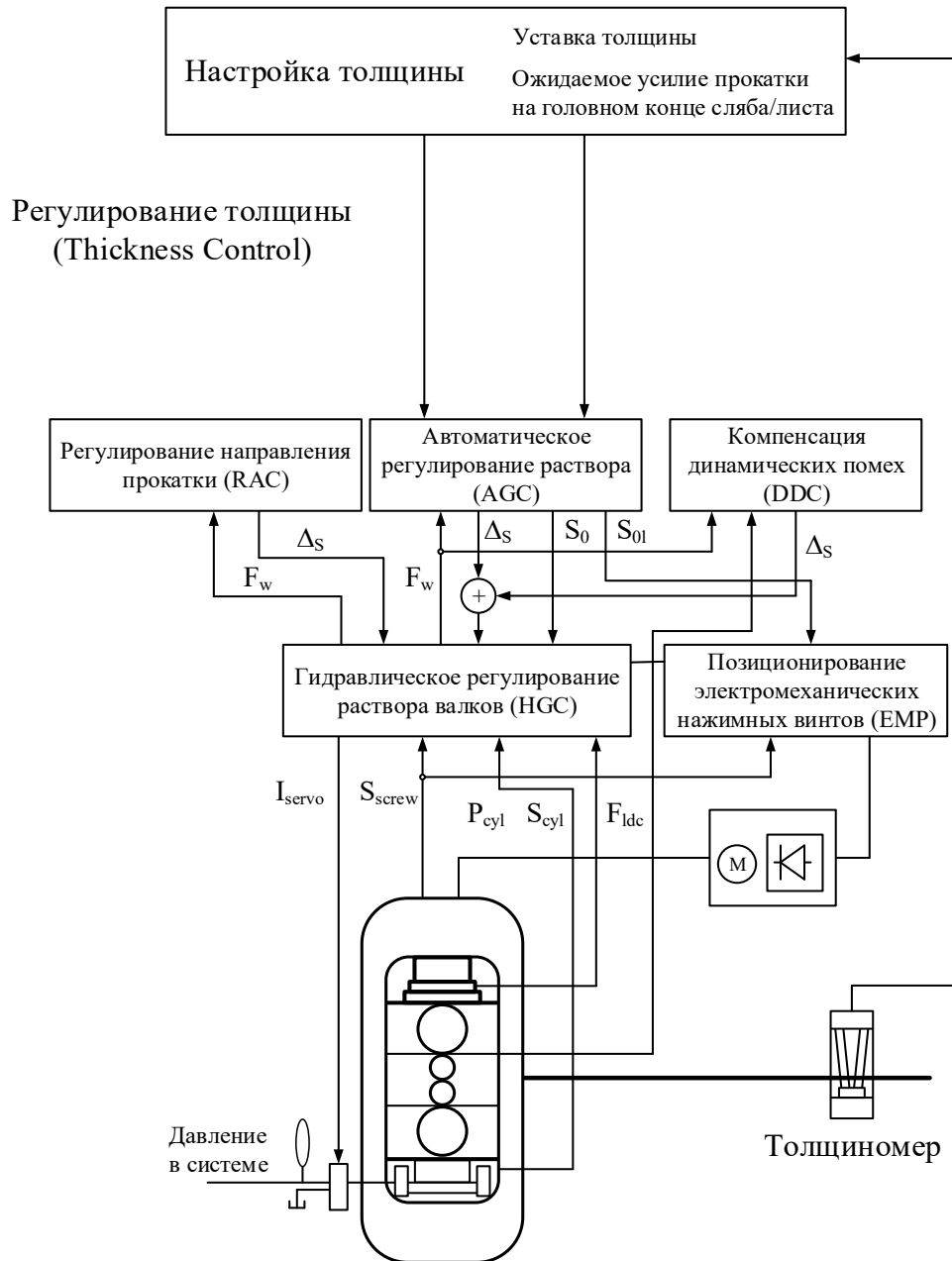


Рисунок 1.16 – Реализация концепции автоматического регулирования зазора между валками и толщины листа, представленная в виде структурной схемы (для стана 5000)

Система автоматического регулирования раствора валков за счет изменения положения гидроцилиндров нажимного устройства поддерживает зазор между валками на постоянном уровне при изменяющихся значениях усилий

прокатки. Существует два режима работы САРТ: абсолютный и относительный. Для первого режима модель второго уровня рассчитывает значение уставки толщины для регулирования раствора валков. Для второго режима в качестве уставки принимается значение зазора валков, полученное через 0,5-1 секунду после захвата металла. Далее установившееся значения подается на вход регулятора толщины как сигнал задания. В качестве функции регулирования выступает компенсация отклонений и деформаций технологических координат во время прокатки.

Структурные схемы САРТ и НГС уже были рассмотрены авторами работ [87-90], а в публикациях [91, 92] приведена настройка регуляторов для этих систем. Настройка системы компенсации возмущений DDC показана в работах [93, 94].

Существующая концепция САРТ на примере эксплуатации стана 5000 ОАО "ММК" показала высокую надежность и хорошие значения по регулированию параметров для прокатки с постоянным обжатием (установившийся режим). Однако для динамических обжатий (профилированная прокатка) в настоящий момент времени необходимая точность регулирования зазора не достигнута. Это доказано экспериментально, о чем более подробно написано в следующем подразделе.

Такой недостаток в конечном итоге влияет на качество готовой продукции, поэтому для его устранения необходимо разработать комплекс технических решений.

### **1.6. Режим профилированной прокатки**

На рисунке 1.17 представлены осциллограммы заданной и актуальной толщины раската (окно 1), моментов главных приводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков (окно 2) и усилия прокатки (окно 3). Формирование профиля переменной толщины происходит на переднем конце раската в интервале времени  $t_1-t_3$  непосредственно после захвата металла валками и на заднем конце – в интервале  $t_4-t_5$ . Это происходит за счет уменьшения и увеличения зазора валков, соответственно.

В результате анализа представленных временных зависимостей определены следующие недостатки проектной САРТ:

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

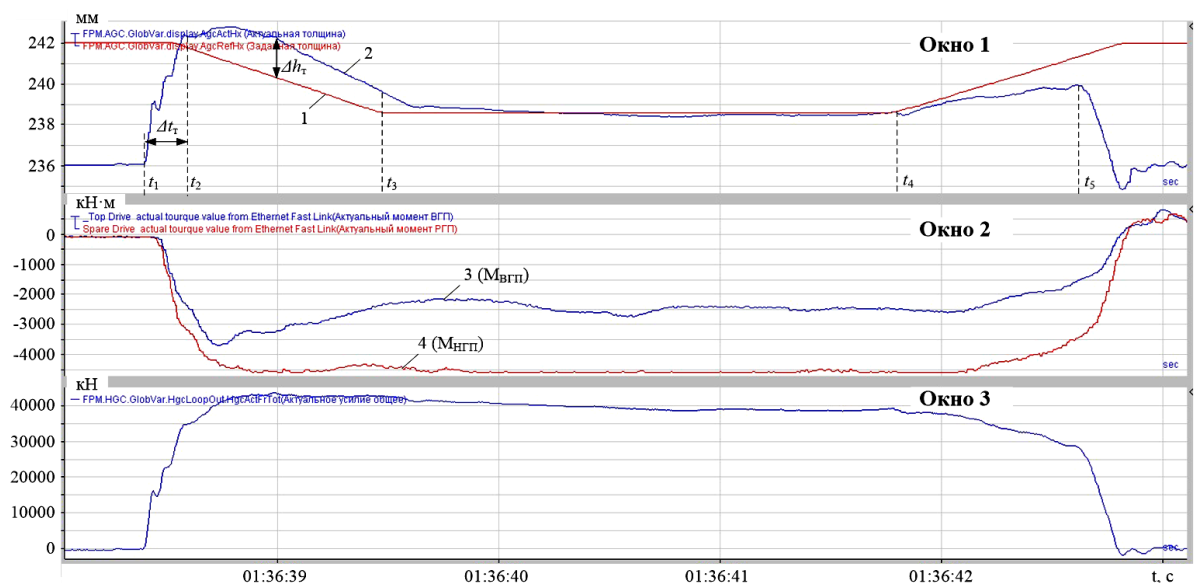


Рисунок 1.17 – Осциллограммы параметров прокатки в проходе с профилированием при существующей настройке САРТ: окно 1 – заданная и актуальная толщина; окно 2 – моменты электроприводов; окно 3 – усилие прокатки

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

2. Значительное различие между моментами ВГП (кривая 3) и НГП (кривая 4) как в режиме профилирования, так и в установившемся режиме прокатки. Как показали исследования, это обусловлено рассогласованием скоростей этих приводов (на рисунке не показаны). Изначально рассогласование устанавливается с целью формирования изгиба переднего конца раската вверх в форме «лыжи» [95, 96]. По окончании режима лыжеобразования в работу

должен вступать регулятор деления нагрузок (РДН), в функции которого входит выравнивание скоростей и соответственно нагрузок ВГП и НГП.

Однако при прокатке коротких раскатов из-за несогласованной работы системы лыжеобразования и РДН, последний не успевает включиться в работу, поэтому момент ВГП в несколько раз ниже момента НГП. Для устранения второго недостатка необходимы согласование режимов системы лыжеобразования и РДН и повышение их быстродействия. Решение этой задачи является предметом отдельных исследований, поэтому здесь не рассматривается. Варианты решения рассматривались в диссертации [2].

Причиной неудовлетворительной точности формирования профилей концевых участков раската в динамическом режиме, вызванном перемещением НУ, является недостаточное быстродействие системы регулирования толщины. В связи с этим наблюдается запаздывание актуальной толщины по отношению к линейному сигналу задания. Наиболее простым решением этой проблемы является повышение быстродействия контура регулирования толщины. Однако этот путь является ограниченным, т.к. при увеличении коэффициента регулятора возникает колебательный процесс, что нежелательно. Поэтому необходим поиск других решений, обеспечивающих уменьшение динамической ошибки регулирования толщины.

Анализ литературных источников показал, что *перспективным методом, обеспечивающим повышение быстродействия регулирования параметров, в частности, толщины, является упреждающее регулирование* [97–101]. Результаты исследований, представленные в диссертации [2], подтвердили данный вывод. В связи с этим для устранения перечисленных недостатков и повышения точности регулирования толщины в режиме перемещения НУ рекомендуется регулирование с предупреждением. Разработка такой системы является актуальной и является одной из задач, поставленных в диссертации.



## **1.7. Обоснование направлений совершенствования алгоритмов управления электроприводами реверсивной клетки**

### **1.7.1. Ограничение силовой связи вертикальной и горизонтальной клетей через металл**

Как было отмечено во введении, недостатком существующих алгоритмов управления скоростными режимами вертикальной и горизонтальной клетей является отсутствие компенсации удлинения раската в межклетевом промежутке, возникающего вследствие перемещения НУ в режиме формирования конического профиля на концевых участках раската. Это приводит к нарушению условия постоянства секундных объемов металла на выходе вертикальной и входе горизонтальной клетей. В результате возникает нежелательное уменьшение натяжения либо возникновение подпора, который недопустим по технологии. Это предопределяет актуальность согласования скоростей вертикальных и горизонтальных валков при перемещении НУ.

Несоответствие скоростей обусловлено тем, что на фактическую скорость металла помимо скорости вращения валков оказывают влияние отставание и опережение. Эти параметры определяются величиной межвалкового зазора и соответственно его изменением в процессе профилирования. В результате возникает несоответствие реальной скорости металла и скорости валков. Это приводит к увеличению силовой взаимосвязи клетей, возникновению дополнительных усилий (в том числе ударов) в механических передачах и их разрушению. Кроме того, возрастает риск застревания раската при выходе на рольганг. Для устранения данных недостатков предложено осуществлять коррекцию скорости электропривода вертикальных валков в проходах с формированием профиля переменной толщины.

Исследование данного вопроса выполнено в диссертации [2]. Доказано, что гипотеза плоских сечений, на основе которой построено условие постоянства секундных объемов, при принудительном изменении зазора валков во

время прокатки неприменима. Соответственно задание соотношений скоростей, основанное на равенстве секундных объемов, при прокатке толстых полос не является корректным. Это связано с тем, что при деформации раската изменяется плотность металла на входе и выходе очага деформации. К тому же при больших обжатиях увеличивается течение металла в направлениях, перпендикулярных направлению прокатки. Эти факторы оказывают существенное влияние на условие непрерывности прокатки и должны учитываться при разработке алгоритмов управления.

В диссертации [2] разработана методика формирования скоростных режимов прокатки, основанная на условии баланса масс прокатываемого металла (данный термин известен из монографии Ю.М. Файнберга [35] и более поздних публикаций [102, 103]). Дано обоснование и выполнена разработка способа согласования скоростей взаимосвязанных электроприводов клеток по принципу «постоянства масс». По результатам моделирования подтверждена компенсация силового взаимодействия клеток, однако это выполнено только для установившегося режима прокатки. Исследования изменений натяжения (подпора) в режиме профилирования не проводились.

Устранение этих недостатков требует совершенствования способа согласования скоростей вертикальных и горизонтальных валков, представленного в работе [2].

### **1.7.2. Ограничение динамических нагрузок при захвате раската валками**

Одним из наиболее опасных повреждений, возникающих в линиях главных электроприводов толстолистовых станов, является разрушение головок шпинделей. Это во многих случаях вызывает заклинивание и поломку самого шпинделя. Согласно перечню аварийного акта, ущерб, вызванный поломкой шпинделя клетки стана 5000 в 2012 г, составил: 57,3 млн руб. Аналогичные аварии произошли в 2016 г и в последующие годы. С учетом роста стоимости импортного оборудования ущерб при аналогичной аварии в настоящее время может составить 80–100 млн руб.

В публикациях отечественных и зарубежных ученых выполнен анализ причин возникновения неудовлетворительных динамических нагрузок при захвате металла валками [104–107]. Выделены три составляющие динамического момента, которые поясняют силовые линии, схематично показанные на рисунке 1.18, а [108]:

1. Момент, возникающий при вращении (главная силовая линия 1). При ударном приложении нагрузки он имеет характер затухающих колебаний, относительно установившегося момента прокатки. Амплитуда колебаний определяется двумя факторами:

- непосредственно ударом, возникающим вследствие замыкания угловых зазоров, которые неизбежно имеются в механических передачах;
- упругими свойствами передающего вала, которые характеризуются коэффициентом упругой связи вращающихся масс.

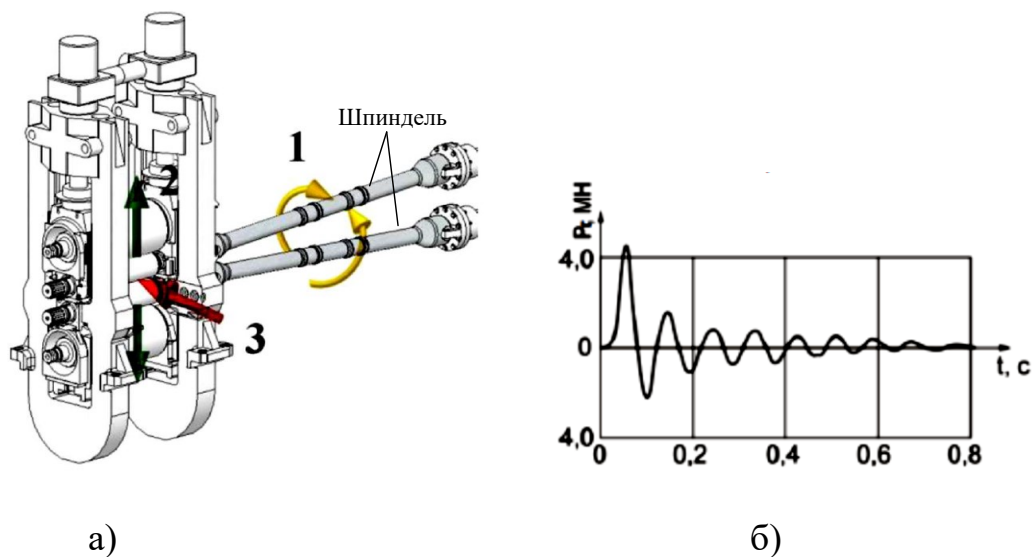


Рисунок 1.18 – Силовые линии нагрузок при захвате (а) и динамика горизонтальной составляющей усилия прокатки (б)

2. Вертикальная составляющая (силовая линия 2), которая определяется свойствами металла и условиями захвата. Без учета неравномерности заполнения очага деформации данная составляющая представляет собой полезный момент прокатки. Она имеет характер ударной нагрузки без колебаний.

3. Горизонтальная составляющая (силовая линия 3), которая определяется:

- соотношением скорости входа металла в клеть и горизонтальной составляющей линейной скорости валков;
- величиной межвалкового зазора (указан стрелкой 3), установленного перед захватом.

Эта составляющая момента представляет собой затухающие колебания, которые стремятся к нулю. Ее изменение аналогично переходному процессу усилия прокатки, показанному на рисунке 1.18, б. Обоснование разделения динамического момента на отдельные составляющие и их анализ подробно рассмотрены в работе [109].

Указанные составляющие динамического момента определяют уровень нагрузок, которые отрицательно сказываются на износостойкости оборудования главных линий верхнего и нижнего валков. В связи с этим актуальной является задача снижения каждой из них.

Проблема ограничения составляющей под номером 1 решалась многими авторами. Результаты опубликованы, в частности, в трудах сотрудников ИЧМ НАН Украины и зарубежных авторов [110–114]. Непосредственно для стана 5000 она рассматривалась в диссертациях [2, 115] и научных статьях [116–121]. В качестве основных технических решений обоснованы и исследованы: предварительный разгон электроприводов горизонтальной клетки перед захватом и кратковременное интенсивное торможение непосредственно после входа металла в клеть. Первое решение обеспечивает захват металла при гарантированно замкнутых зазорах в шпиндельных соединениях главных линий клетки, что снижает удары. Второе – компенсацию упругого момента в шпинделе, имеющего характер затухающих колебаний.

Снижение горизонтальной составляющей (номер 2 на рис. 1.18) рассматривалось в трудах В.Л. Мазура [123–125], В.Г. Артюха [126–128] и других представителей украинских научных школ. Эта проблема, в основном, решалась путем повышения прочности механических узлов и применения дополнительных технических средств (вкладышей и др.). Вместе с тем, в работе [126] утверждается, что параметром, максимально влияющим на пиковые нагрузки, является скорость захвата.

Нерешенность данной проблемы предопределяет актуальности разработки нового технического решения, которое обеспечило бы снижение влияния как скорости входа металла в клеть, так и величины межвалкового зазора. Его реализация должна быть обеспечена средствами электроприводов валков и гидроприводов нажимных устройств за счет совершенствования алгоритмов управления без применения дополнительных средств. Перспективным направлением представляется разработка системы управления гидравлическим зазором валков.

## **1.8. Выводы и постановка задачи исследований**

### **Выводы:**

1. Выполнен анализ технологии прокатки толстолистовой стали на стане 5000 ПАО «ММК». Даны характеристики электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей и гидравлических нажимных устройств. Представленные материалы необходимы для анализа и совершенствования алгоритмов управления и разработки математических моделей электро- и гидроприводов в структурах систем автоматического регулирования технологических параметров.

2. Выполнен анализ причин увеличения расходных коэффициентов. Со ссылкой на литературные источники показано, что прокатка толстых листов характеризуется наибольшим расходом металла на тонну годного. Основной причиной являются высокие обжатия раскатов на первых двух стадиях прокатки (протяжки и разбивки ширины), что сопровождается значительным уширением и искажением формы концов раската.

3. Рассмотрены причины искажения формы концевых участков, которые определяют потери металла с обрезью. Форма листа зависит от соотношения коэффициентов вытяжек: отношений длины раската к длине сляба при протяжке и ширины раската к ширине сляба при разбивке ширины.

4. Дана характеристика технологий прокатки, обеспечивающих улучшение формы листа в плане. К известным способам относятся: косая прокатка, изменение поперечного профиля сляба, предварительное обжатие вертикаль-

ными валками и др. Показано, что эффективным способом улучшения геометрии листа является прокатка с профилированием широких граней раската горизонтальными валками. В результате формируется двойной конический профиль толщины «собачья кость». Это позволяет компенсировать дальнейшее отклонение формы раската от прямоугольной.

5. Приведена структура, поясняющая концепцию автоматического регулирования прокатного зазора и толщины листа ROLL-GAP CONTROLL стана 5000. Основными подсистемами, обеспечивающими точность регулирования толщины и продольного профиля проката, являются контур автоматического регулирования толщины (AGC) и подчиненный контур гидравлического регулирования раствора валков (HGC), т.е. положения нажимных устройств.

6. Представлены осциллограммы параметров прокатки в проходе с профилированием при существующей настройке САРТ. Их анализ подтвердил неудовлетворительную точность регулирования толщины концевых участков раската в динамическом режиме, вызванном перемещением НУ. Были зафиксированы отклонения толщины до 2,5% при допустимом пределе  $\pm 1\%$ . Основной причиной отклонений толщины является низкое быстродействие САРТ.

7. Показано, что недостатком алгоритма управления прокаткой в проходах с профилированием является отсутствие коррекции скорости электроприводов валков при перемещении НУ. Это приводит к нарушению условия постоянства секундных объемов металла на выходе вертикальной и входе горизонтальной клетей. В результате возникает подпор (отрицательное натяжение), что приводит к аварийному режиму.

8. На основе анализа силовых линий нагрузок, возникающих при захвате, показано, что одной из причин, вызывающих колебания усилий и момента, является горизонтальная составляющая нагрузки. Она определяется соотношением скоростей валков и металла, а также величиной зазора валков. В качестве направления снижения ее влияния обоснована разработка способа автоматического регулирования межвалкового зазора.

**Постановка задачи исследований.** На основании проведенного литературного обзора и анализа причин искажений формы листа в плане обоснованы

следующие задачи, решение которых необходимо для достижения цели диссертационной работы:

1. Анализ структурных схем систем регулирования зазора и толщины. Анализ концепции автоматического контроля профиля ASC. Разработка двухконтурной системы автоматического регулирования толщины с реализацией регулирования с упреждением, обеспечивающей повышение точности регулирования толщины на концевых участках раската.

2. Разработка имитационной модели в пакете Matlab-Simulink, реализующей алгоритмы разработанной системы. Проведение исследований методом математического моделирования, анализ быстродействия и точности регулирования толщины и положения НУ.

3. Разработка способа автоматического регулирования скорости электропривода валков вертикальной клетки пропорционально приращению линейной скорости металла на входе в горизонтальную клетку, вызванному перемещением НУ в режиме формирования конического профиля. Проведение исследований методом моделирования. Анализ быстродействия, точности согласования скоростей валков и регулирования натяжения/подпора в межклетевом промежутке.

4. Разработка системы управления гидравлическим зазором валков с целью ограничения ударных нагрузок при входе раската в клетку. Разработка способа управления гидравлическими НУ.

5. Экспериментальные исследования, оценка возможности и целесообразности промышленного внедрения разработанных решений. Проведение опытно-промышленных испытаний и внедрение выполненных разработок на стане 5000 ПАО «ММК». Рекомендации по расширенному промышленному внедрению.

В целом, обоснованные разработки являются направлениями совершенствования концепции ROLL-GAP CONTROL с целью повышения точности регулирования профиля раската в режиме профилированной прокатки. Подобная постановка вопроса либо разработки в принятом направлении в ранее опубликованных литературных источниках не встречаются.





## **Глава 2. РАЗРАБОТКА СПОСОБА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ В РЕЖИМЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ РАСКАТА**

Согласно поставленным задачам, необходима разработка способа и системы автоматического регулирования профиля раската с высокой точностью на участках переменной толщины. Прежде чем приступить к решению этой задачи, следует рассмотреть концепцию автоматического контроля профиля (ASC) и многоточечную стратегию задания толщины, которые выполнены на стане. Необходимо дать характеристику существующей САРТ, реализующей принцип Головина-Симса, рассмотреть структурные схемы контуров регулирования толщины и управления положением гидравлических нажимных устройств.

Погрешность регулирования толщины в динамическом режиме, вызванном перемещением НУ, должна быть не выше  $\pm 1\%$ . По осциллограммам, снятым на стане 5000 (рисунок 1.17), можно заметить, что текущие значения параметров САРТ приводят к "запаздыванию" изменения сигнала толщины к уставке. Причиной такой задержки является невысокое быстродействие контура регулирования толщины. В качестве решения данной задачи предлагается добавить положительную обратную связь на вход регулятора положения гидравлических НУ. Такое решение, на основе проведенных исследований, должно увеличить точность профилированной прокатки в форме "кости". На основе этого была поставлена задача по разработке модели взаимосвязанных систем регулирования толщины (САРТ) с учетом контуров HGC и AGC.

Для оценки точности регулирования толщины при работе гидравлических нажимных устройств (ГНУ) необходимо провести анализ переходных процессов, полученных в разработанной модели и на реальном объекте.

Данная глава диссертации посвящена решению перечисленных задач.

## 2.1. Задание профиля переменной толщины в системе ASC

### Концепция ASC

Для получения формы сляба максимально приближенной к прямоугольной на современных толстолистовых прокатных станах используется профилированная прокатка, основанная на концепции ASC - автоматический контроль профиля листа (рисунок 2.1). Данная концепция применяется на разных проходах, что оказывает влияние на устранение неровных профилей либо в головной и хвостовой части листа, либо на его кромках. На рисунке 2.1, а, показан пример воздействия на головную и хвостовую части листа. Для исправления формы кромки сляба используется технология прокатки ASC, показанная на рисунке 2.1, б.

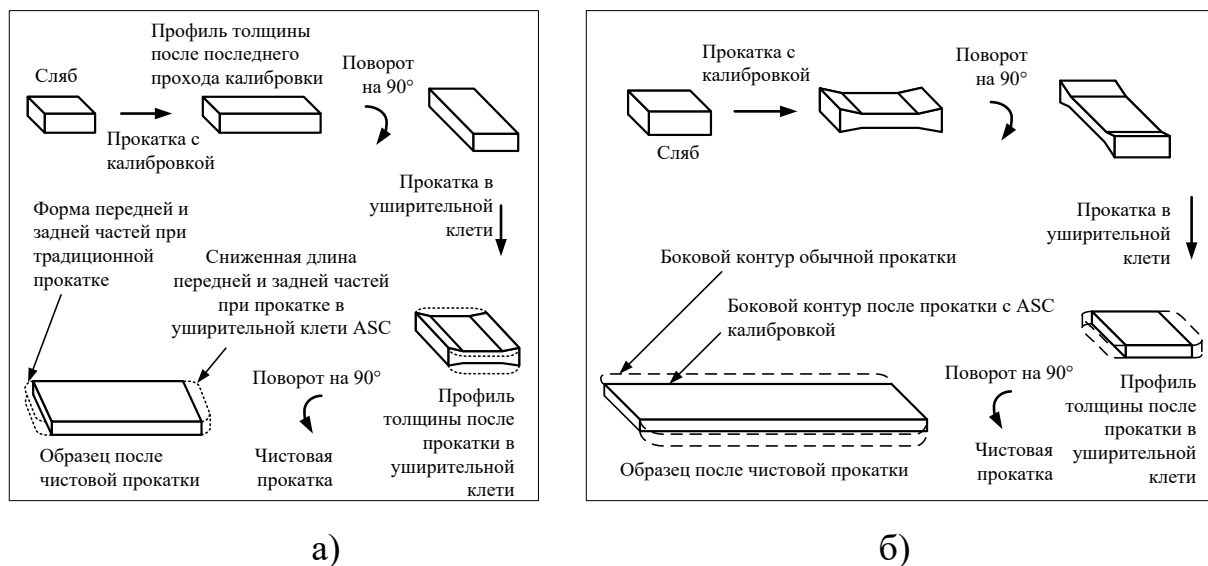


Рисунок 2.1 – Схемы прокатки по технологии ASC

### Использование многоточечной стратегии

Одним из способов задания профиля толщины листа является многоточечная стратегия. Начиная с "головы" листа, участки различной толщины разбиваются на точки, для которых определяются ряд параметров. Для построения модели прокатки задаются параметры толщины, скорости прокатки, силы качения, опережения, изгибающей силы и т.д. Текущее положение листа вычисляется путем сложения скорости прокатки и опережения. Соответствующие опорные значения «вставляются» между заданными точками. При прокатке с автоматическим контролем формы опорные значения для толщины и силы качения постоянно обновляются во время прохода в зависимости от

длины листа [129]. Задание профиля осуществляется программным способом в структуре управляющих контроллеров клетки. Функции обеспечения точности профиля обеспечиваются САРТ.

На рисунке. 2.2, а показано продольное сечение заготовки, поясняющее принцип формирования задания на толщину. На рисунке 2.2, б представлена диаграмма задания толщины  $h$  в функции длины  $l$ . Алгоритм вычисления задания задает ряд опорных точек 1, 2 ...,  $i$ , ..., каждая из которых находится на расстоянии  $\Delta l_i$  от предыдущей точки. При этом точка 1 определяется по расстоянию  $\Delta l_1$  от «головы» проката. Для каждой точки  $i$  выдаются опорные значения толщины  $h_i$ .

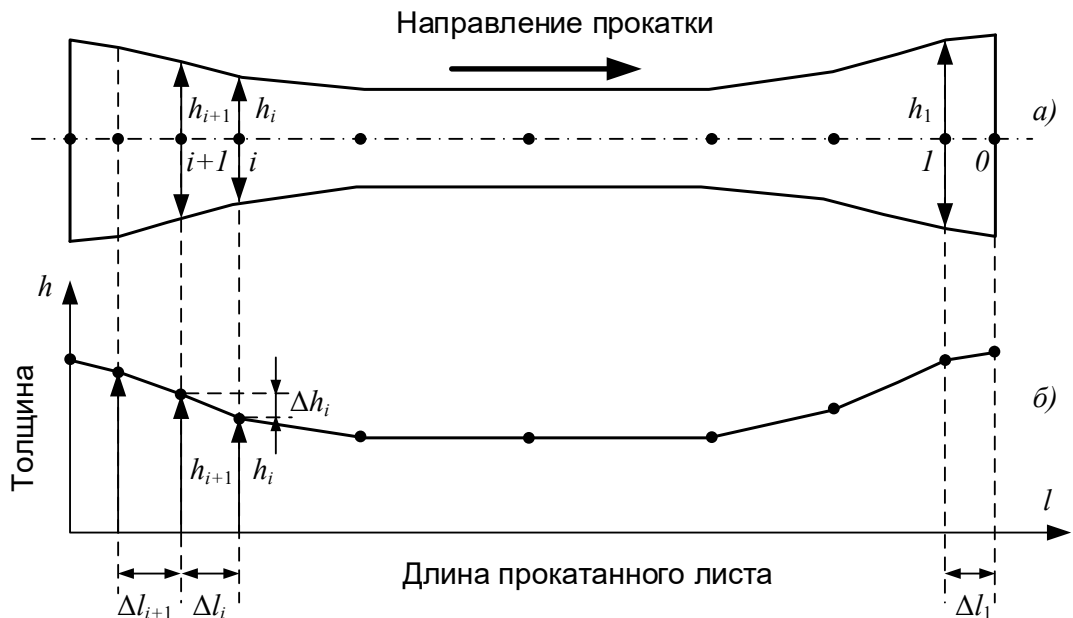
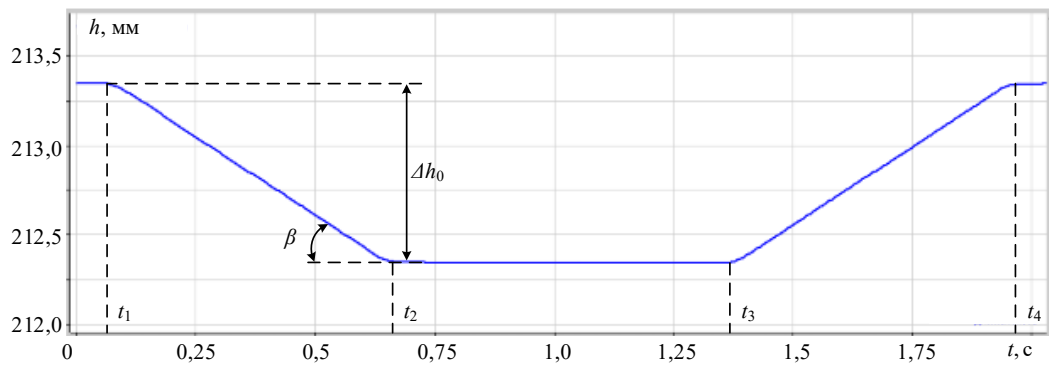
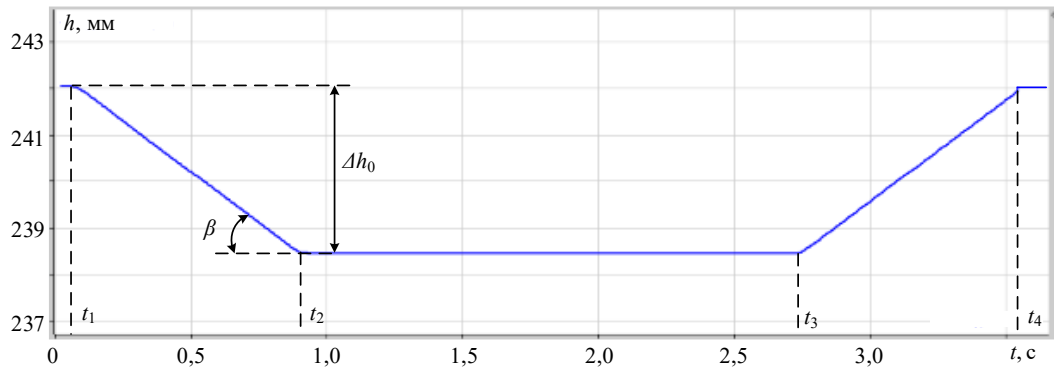


Рисунок 2.2 – Графики, поясняющие многоточечную стратегию

На рисунке 2.3 показаны задания на толщину для двух различных раскатов при разбивке ширины и протяжке. Они соответствуют профилю «кость», показанному на рисунке 1.15. В первом случае (рис. 2.3, а) глубина профиля  $\Delta h$  составляет около 1 мм, во втором (рис. 2.3, б) – 3,5 мм. Следует заметить, что для отдельных раскатов эта величина достигает 5–7 мм. Это подтверждают осциллограммы, представленные ниже на рисунках 3.5 и 4.3. Протяженность профилированных участков также различна.



а)



б)

Рисунок 2.3 – Задания толщины раската от модели АСУ ТП в проходах с формированием профиля «кость» для проходов при разбивке ширины (а) и протяжке (б)

Как видно из осциллограмм, суммарная длина конических участков, прокатанных в интервалах  $t_1-t_2$  и  $t_3-t_4$  соизмерима с длиной, прокатанной в квазиустановившемся режиме в интервале  $t_2-t_3$ . Так, длины профилированных участков на рисунке 2.2, а составляют около 0,5 м, их суммарная протяженность 1 м превышает длину участка, прокатанную при постоянном зазоре валков. На рисунке 2.2, б суммарная длина профилированных участков составляет 1,5 м при длине участка постоянной толщины около 3 м.

Таким образом, длина участков, прокатанных с переменным обжатием, в первом случае составляет половину общей длины раската (2 м), во втором – около 30% общей длины (4,5 м). Это говорит о том, что формирование профиля «кость» в соответствии с заданными параметрами: протяженностью, глубиной профилирования, является важной задачей. Точность ее решения определяет форму раската после прохода, и соответственно точность геометрических размеров готового листа.

В связи с изложенным, к системам HGC и AGC в режиме профилированной прокатки предъявляются повышенные требования. Как было показано в п. 1.5, они составляют основу концепции ROLL-GAP CONTROL, разработанной фирмой SMS Demag AG для толстолистовых станов.

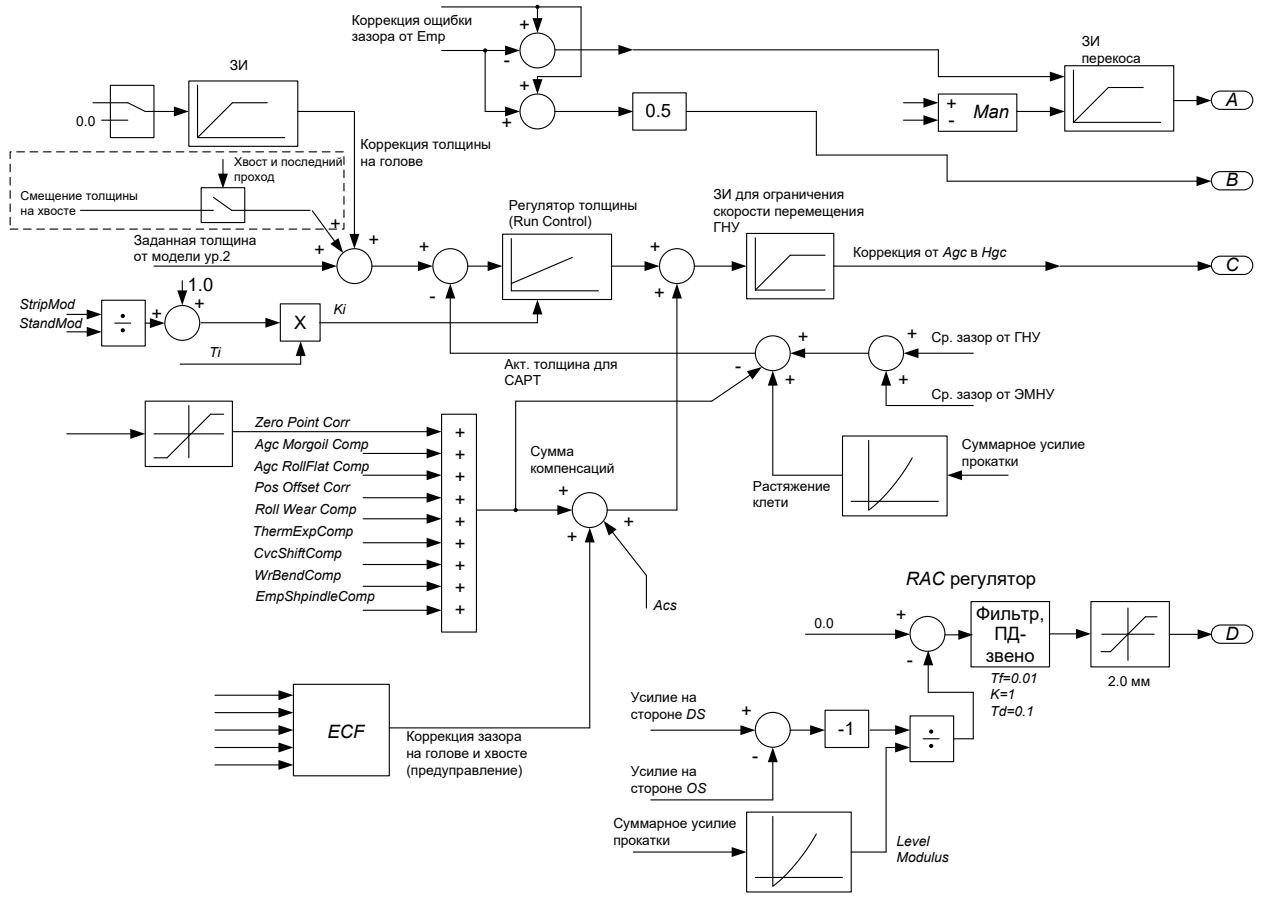
## **2.2. Совершенствование алгоритмов САРТ в режиме профилированной прокатки**

### **2.2.1. Структурные схемы систем регулирования зазора и толщины [130]**

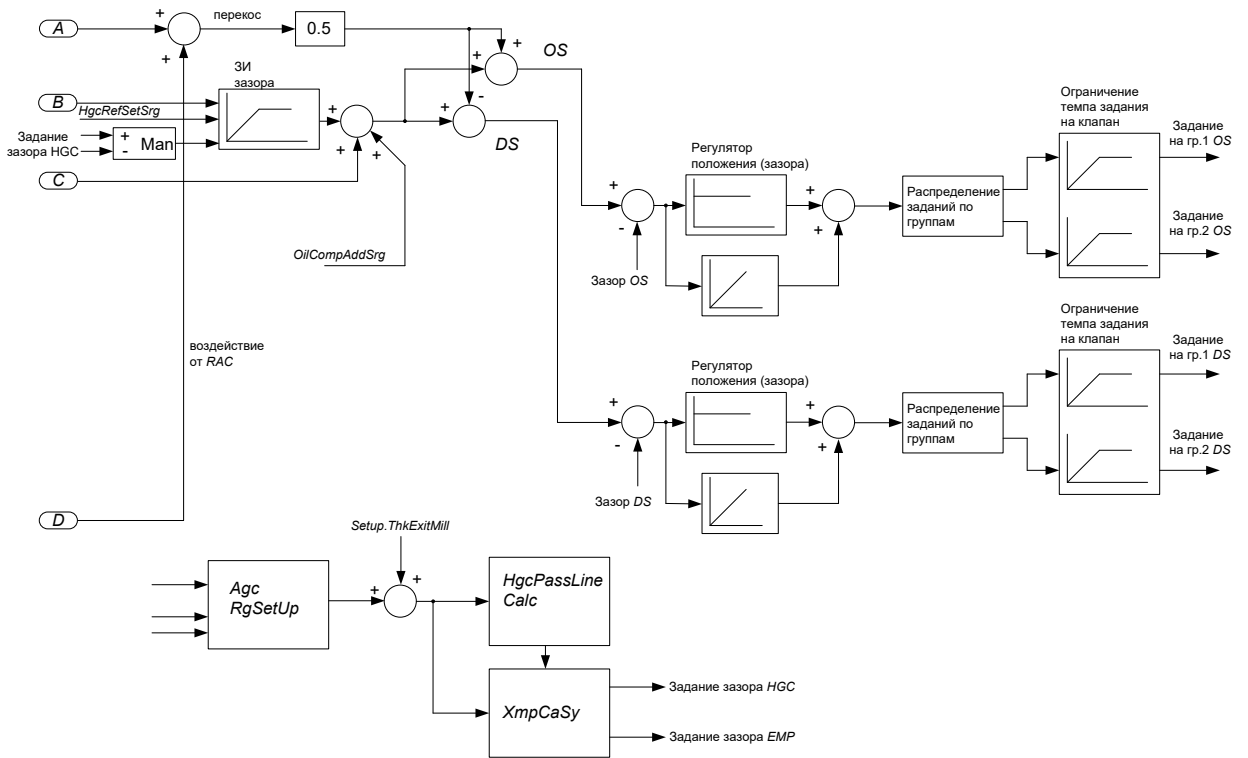
Схема формирования сигнала задания толщины раската показана на рисунке 2.4, а [131]. Внешний контур образован регулятором толщины, на входе которого сравниваются сигнал задания, поступающий (с учетом коррекций) от модели уровня 2, и сигнал актуальной толщины. Толщина определяется как сумма средних зазоров, формируемых гидравлическими и электромеханическими нажимными устройствами (HGC и EMP), и растяжения клетки. Сигнал, пропорциональный растяжению, формируется как нелинейная функция усилия прокатки, определяемая характеристикой жесткости клетки [92].

Регулятор толщины имеет переменные коэффициенты усиления, зависящие от модуля жесткости клетки и полосы. Актуальная толщина рассчитывается по сигналам датчиков положения HGC, EMP, распределения зазора по сторонам DS и OS, растяжения клетки и возмущающих воздействий (толщины масляной пленки в подшипниках, теплового расширения вала, износа валков и др.).

Выходной сигнал регулятора толщины суммируется с сигналами коррекции зазора на головном и хвостовом участках. Далее он поступает на вход датчика интенсивности (ЗИ), ограничивающего скорость перемещения НУ. Выходной сигнал ЗИ является входным сигналом подчиненного контура регулирования положения НУ, показанного на схеме на рисунке 2.4, б. На вход регулятора поступают задание толщины и сигналы обратной связи от датчиков положения НУ и датчика усилия прокатки.



а)



б)

Рисунок 2.4 – Структурные схемы систем регулирования толщины (а) и управления положением гидравлических НУ (б) клетки стана 5000

На рисунке обозначены: *Zero Point Corr* – коррекция толщины, формируемая после сравнения реальной толщины от толщиномера и заданной толщины (компенсирует статическую ошибку при косвенном расчете толщины); *Agc Morgoil comp* – компенсация толщины масляной пленки подшипников жидкостного трения опорных валков; *Agc Roll Flat Comp* – компенсация смятия валков; *Roll Wear comp* – компенсация износа валков (от модели на уровне 2); *ThermExpComp* – компенсация теплового расширения валков (от модели нагрева валка); *CvcShiftComp* – компенсация влияния осевой сдвижки валков; *WrbBendComp* – компенсация влияния противоизгиба валков; *EmpShpindleComp* – компенсация влияния веса шпинделей;  $T_f$  – постоянная фильтра;  $T_d$  – постоянная регулятора;  $K$  – коэффициент усиления

Для компенсации искажения профиля раската вследствие перекоса зазора валков служит РАС регулятор, показанный на рисунке 2.4, а отдельной схемой. Он обеспечивает выравнивание растяжения клетки в случаях, когда усилия по сторонам различаются. Для этого на вход регулятора подается нулевой сигнал, который сравнивается с фактическими величинами зазоров со стороны оператора и со стороны привода. По фактическим усилиям в гидроцилиндрах на входе регулятора формируется задание на разницу толщины по краям заготовки и соответственно зазоров по сторонам DS и OS. Эта величина вычисляется путем деления измеренного давления на валки (усилия) на модуль упругости полосы (*Level Modulus*). Кривая зависимости модуля упругости от усилия хранится в виде таблицы в файле АСУ ТП.

На выходе РАС регулятора (вывод D) формируется задание, которое подается на регуляторы положения НУ и компенсирует возникающую разнотолщинность. Ограничение выходного сигнала устанавливается с целью исключения недопустимых перекосов зазора. Это вызвано тем, что при прокатке тонкого раската и значительных перекосах возникает опасность соприкосновения краев верхнего и нижнего валков. Установленное ограничение находится в пределах от 0,7 до 2 мм и зависит от профиля проката.

Принцип действия САРТ основан на известном уравнении Головина-Симса [132]. Он поясняется характеристиками, представленными на рисунке 2.5. Поскольку во время прокатки невозможно измерить фактический раствор валков, он рассчитывается, по уравнению

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

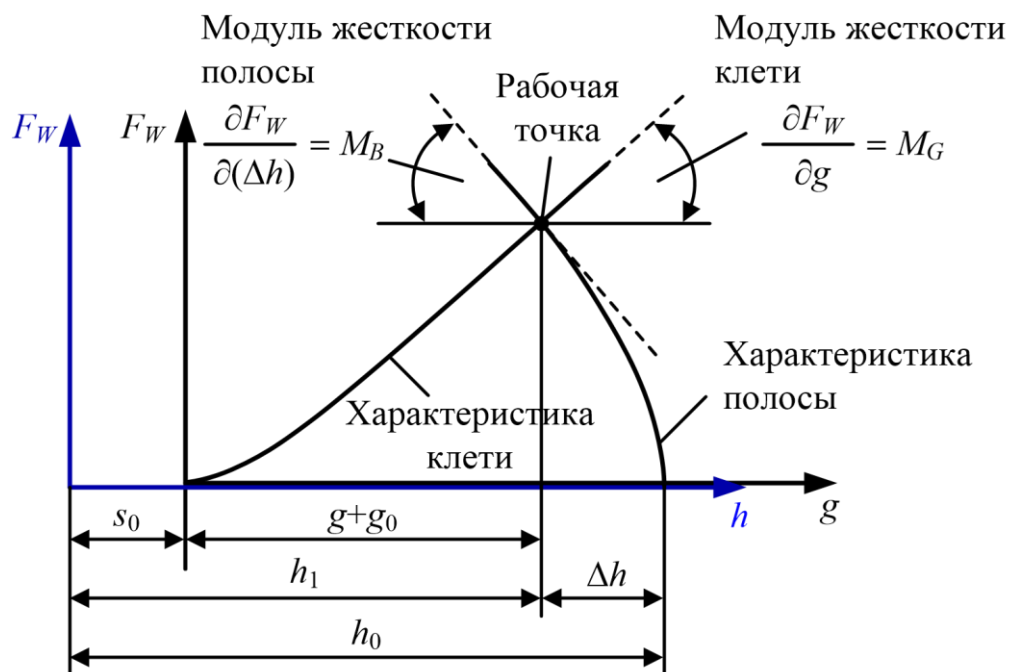


Рисунок 2.5 – Зависимость толщины на выходе клетки от величины зазора:  $h_0$  – толщина на входе;  $h_1$  – толщина на выходе;  $S_0$  – начальный зазор валков (без металла в валках)

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

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

Приращение толщины  $\Delta h$  при изменении зазора  $\Delta S_0$  зависит от коэффициентов (модулей) жесткости клетки  $M_G$  и полосы  $M_B$ :

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

Более подробно работа систем регулирования раствора валков и САРТ рассмотрена в [90, 91].



### 2.2.2. Разработка САРТ с регулированием с упреждением

При формировании профиля «кость» в динамическом режиме, вызванном перемещением НУ, возникает ошибка регулирования толщины. Это подтверждается результатами моделирования, представленными ниже на рисунке 2.15, и результатами экспериментов, представленными на рисунке 1.17. При этом повышение быстродействия системы путем увеличения коэффициентов регулятора толщины неэффективно, т.к. усиливается колебательный процесс.

С целью повышения быстродействия и уменьшения ошибки регулирования толщины при изменении зазора валков разработана САРТ, реализующая принцип управления положением НУ с упреждением. Он рассмотрен в учебниках по ТАУ, в том числе в [98, 133]. В трудах [99, 134] этот принцип получил название «предуправление». Для его реализации, сигнал задания, формирующий профиль «кость», подается «в обход» регулятора толщины на вход регулятора положения НУ. В этом случае система не будет «ждать» отклонения толщины, а будет регулировать положение НУ в функции задания толщины.

В публикациях [100, 135] рассмотрены принципы построения инвариантных систем с предупреждением за счет формирования положительного сигнала по управляющему воздействию. В публикации [99] рассмотрены структуры одно- и двухконтурной систем регулирования положения, обосновано включение контура с пропорциональным регулятором. В работе [101] предложено включение интегрального регулятора, что обеспечивает снижение динамической ошибки регулирования.

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

Функциональная схема двухконтурной САРТ с внутренним контуром регулирования положения НУ представлена на рисунке 2.6 [129]. Дополнительно введенный канал предупреждения выделен контуром.

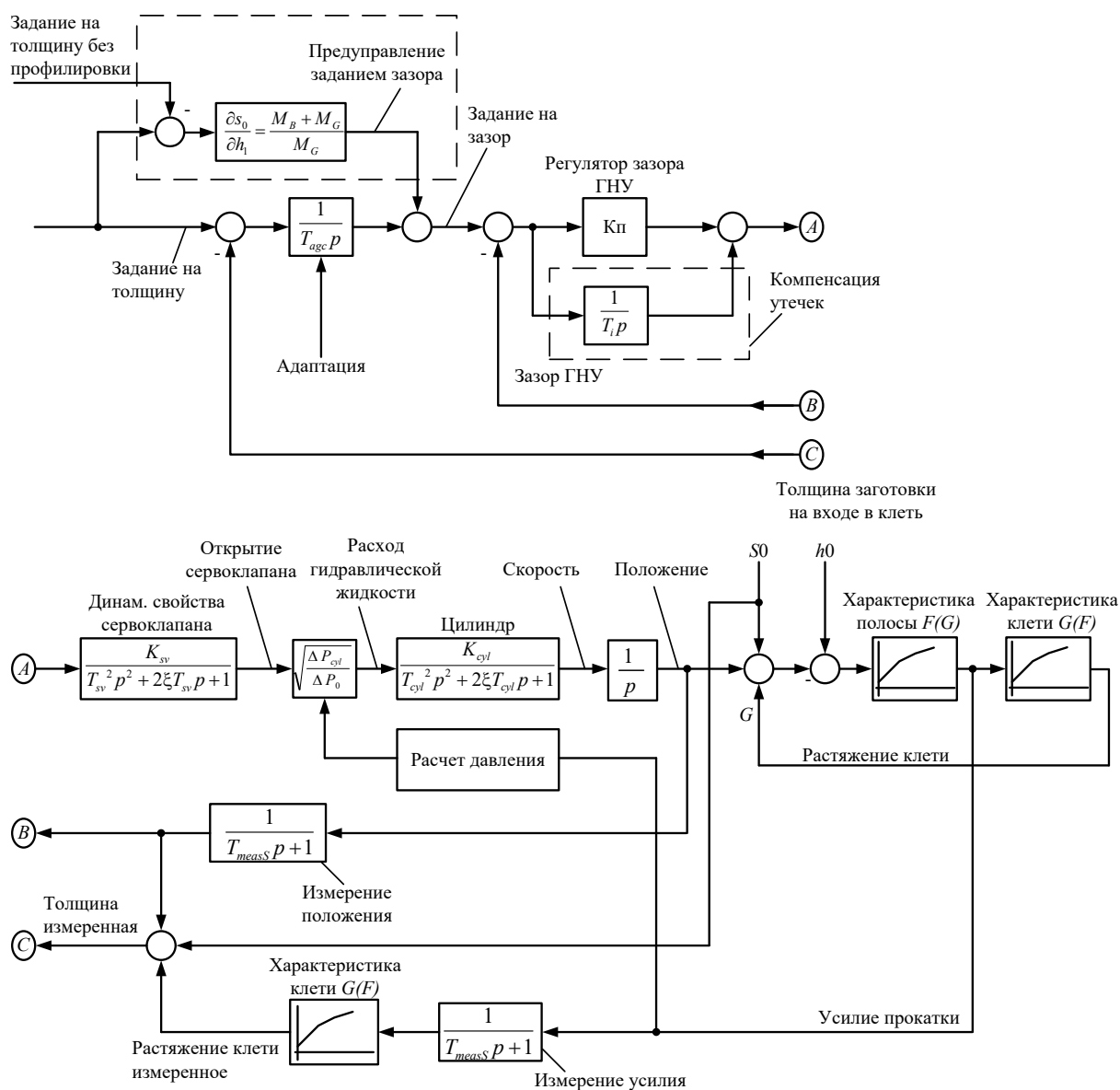


Рисунок 2.6 – Структурная схема САРТ с упреждающим регулированием толщины

При выборе коэффициента регулятора положительной связи принято во внимание, что изменение толщины и изменение зазора отличаются друг от друга. Коэффициент, описывающий отношение изменения зазора от изменения толщины, зависит от модулей жесткости  $M_G$  и  $M_B$  [52]. Поэтому введен коэффициент связи задания зазора  $S_0$  и толщины  $h_1$ , определяемый этими величинами:

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

При формировании задания на регулятор зазора (положения нажимных устройств) заданное отклонение толщины умножается на этот коэффициент. Модуль жесткости клетки принимается по данным предварительной настройки (калибровки) клетки, модуль жесткости металла задается программой обжатий по проходам.

### **2.3. Разработка имитационной модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки**

#### *Структура модели*

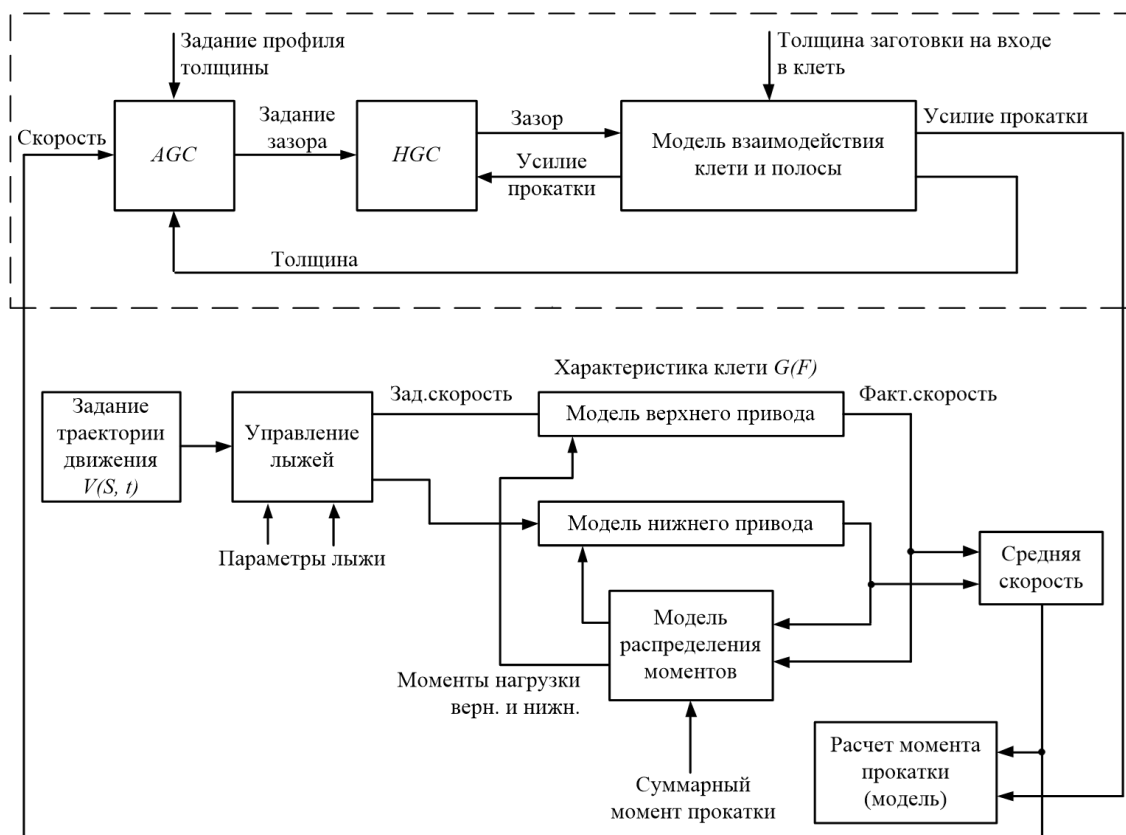
Обобщенная структура разработанной модели взаимосвязанных электроприводов верхнего и нижнего валков и гидравлических НУ в составе САРТ представлена на рисунке 2.7, а [129]. На рисунке 2.7, б приведена схема модели электроприводов в пакете Matlab Simulink. Эта модель содержит блоки, описывающие непосредственно электроприводы с механической частью, блок управления «лыжей» (задания разницы скоростей), блок моделирования нагрузки и ее распределения по двигателям (входят в структуру модели распределения моментов). Эти блоки рассмотрены ниже.

#### *Модель двухмассовой электромеханической системы*

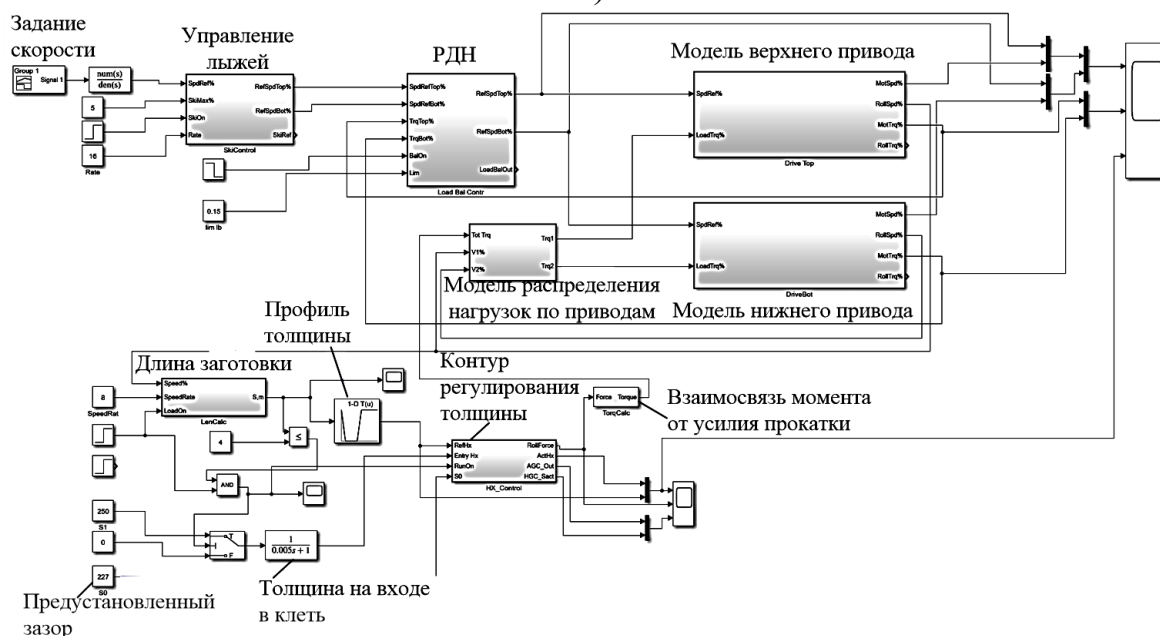
Как следует из кинематической схемы, представленной на рисунке 1.4, электроприводы горизонтальных валков клетки стана 5000 выполнены индивидуальными. В механических соединениях отсутствуют устройства, обладающие инерцией (массой), соизмеримой с инерцией двигателя и приведенной инерцией рабочих и опорных валков. Поэтому модель электромеханических систем ВГП и НГП может быть принята как двухмассовая с упругой связью и зазором в передаче.

Кинематическая схема двухмассовой системы представлена на рисунке 2.8, а. Приняты обозначения:  $J_1=J_{дв}$  – момент инерции первой массы (двигателя);  $J_2$  – приведенный момент инерции второй массы (рабочего и опорного

валков);  $c_{12}$ ,  $M_{12}$  – жесткость и момент упругой связи;  $\beta$  – показатель затухания;  $M_1$ ,  $\omega_2$  – момент на входе и угловая скорость на выходе системы.



а)



б)

Рисунок 2.7 – Структурная схема имитационной модели взаимосвязанных электроприводов ВГП и НГП и гидравлических НУ (а) и ее реализация в Matlab Simulink (без НУ)

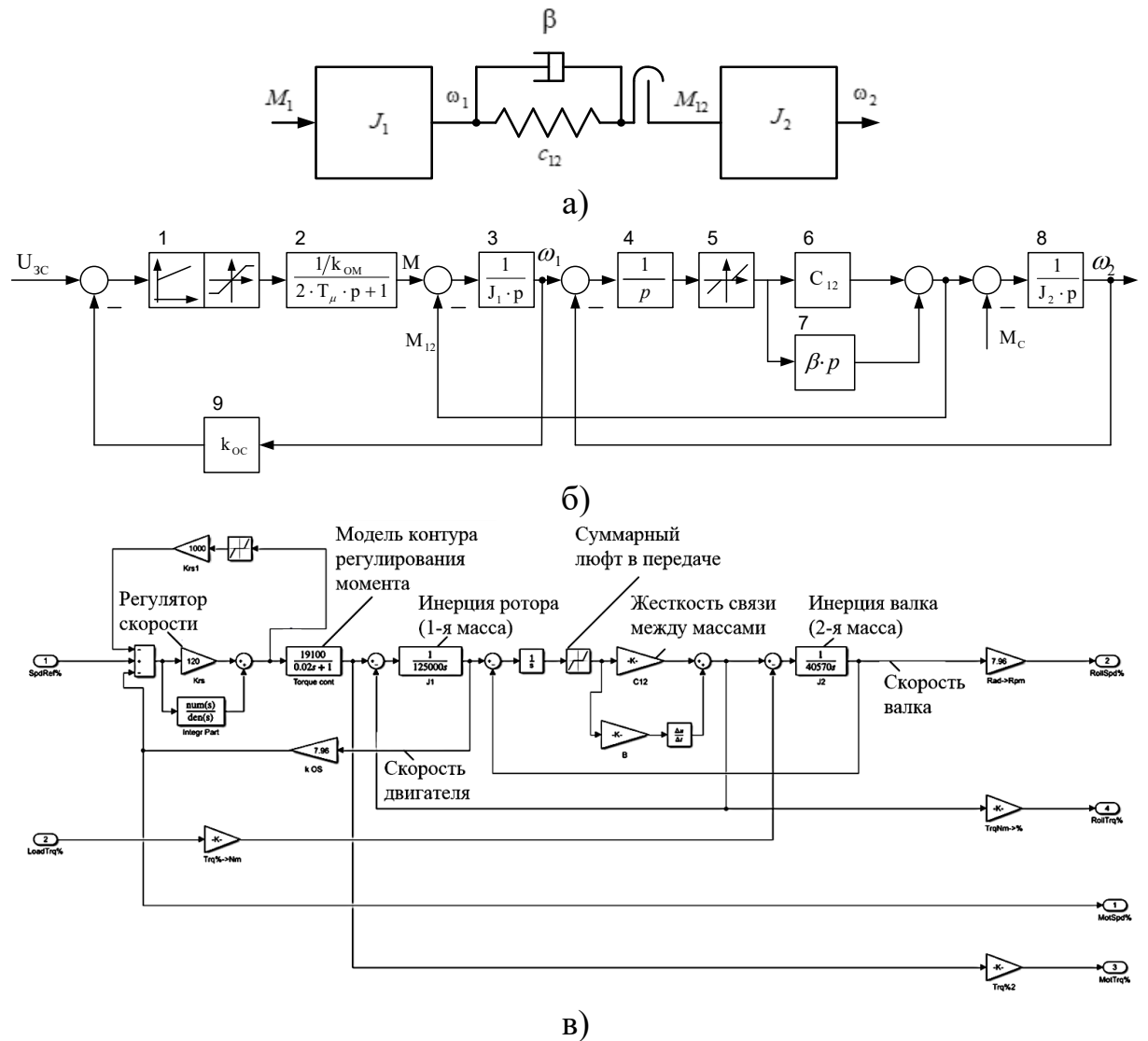


Рисунок 2.8 – Кинематическая схема механической передачи (а), структурная схема двухмассовой электромеханической системы (б) и схема в Matlab Simulink (в)

Структурная схема модели представлена на рисунке 2.8, б. Блоки 3–7 являются типовыми блоками модели двухмассовой системы [136]. Они определяют характер переходных процессов в механической части, в том числе естественное затухание колебаний, блок 5 моделирует зазоры в механических передачах. Обратная связь по скорости моделируется блоком 9 с коэффициентом  $k_{oc}$ . Замкнутый контур регулирования момента представлен звеном 2. Схема в пакете Simulink приведена на рисунке 2.8, в.

В научных публикациях [137, 138] разработана методика расчета параметров двухмассовой электромеханической системы прокатного стана по экспериментальным данным. Определены параметры модели стана 5000, которые используются в модели, представленной на рисунке 2.8. Методика экспериментального определения углового зазора в механических передачах (шпиндельных соединениях) представлена в работе [139]. Однако в структуре на рисунке 2.8, б блок имитации зазора не показан. Это объясняется тем, что модель предназначена только для исследования процессов при перемещении НУ после захвата. Замыкания (размыкания) угловых зазоров в этом режиме не происходит. Режим захвата с учетом влияния зазора в шпиндельных соединениях исследован в диссертационных работах [2, 115]. Разработаны способы преодоления его негативного влияния на переходные процессы упругого момента в шпинделе. Мероприятия по исключению влияния зазора на динамику при захвате внедрены на стане. По названным причинам неучет углового зазора в модели двухмассовой системы является обоснованным.

Передаточная функция замкнутой системы механической части при пренебрежении нелинейностью, вызванной зазором в передачах

$$W_{3M}(p) = \frac{c_{12} \cdot W(p)}{c_{12} \cdot W(p) + J_1 \cdot p}.$$

Экспериментальные исследования показали, что изменения скорости электропривода при отключении имеют характер затухающих колебаний. Поэтому данная система моделируется колебательным звеном второго порядка:

$$W_{3M}(p) = \frac{1}{T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_1 \cdot \xi \cdot p + 1}.$$

Отсюда передаточная функция блока 4

$$W(p) = \frac{J_1}{T_1^2 \cdot c_{12} \cdot p + 2 \cdot T_1 \cdot \xi \cdot c_{12}}.$$

В модели принимается, что контур регулирования момента настроен на технический оптимум. Поэтому для упрощения анализа процессов в механической части он представлен апериодическим звеном первого порядка (блок

2). Контур регулирования скорости настроен на симметричный оптимум с ПИ регулятором скорости (блок 1). На его выходе установлен блок ограничения с изменяемыми пределами.

Численные значения параметров, использованных в модели, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры модели двухмассовой системы электропривода стана 5000

| Параметр   | Обозначение     | Размерность        | Значение                   |
|--|-----------------|--------------------|----------------------------|
| Момент инерции первой движущейся массы (двигателя) | $J_1$           | кг·м <sup>2</sup>  | 125000                     |
| Момент инерции второй движущейся массы             | $J_2$           | кг·м <sup>2</sup>  | 114571                     |
| Жесткость упругой связи                            | $c_{12}$        | Н·м/рад.           | 5934842                    |
| Собственная частота упругих колебаний              | $\omega_{12}$   | рад/с              | 9,96                       |
| Ускорение электропривода                           | $\varepsilon_0$ | рад/с <sup>2</sup> | 1 – 3                      |
| Зазор в передаче                                   | $\delta$        | рад                | 0,017–<br>0,051<br>(1°–3°) |
| Средний упругий момент                             | $M_{12}$        | МН·м               | 1,9                        |
| Коэффициент демпфирования                          | $\beta$         | -                  | 2,817                      |
| Декремент затухания                                | $\zeta$         | -                  | 0,172                      |
| Коэффициент усиления регулятора скорости           | $k_{рс}$        | -                  | 19,5                       |
| Постоянная времени регулятора скорости             | $T_{рс}$        | с                  | 0,0041                     |

### *Модель взаимосвязи электромеханических систем через металл*

Схема модели блока имитации распределения моментов нагрузки между электроприводами верхнего и нижнего валков (модель взаимосвязи через металл) представлена на рисунке 2.9 [2]. Она описывает изменение моментов в зависимости от разницы линейных скоростей двигателей ВГП и НГП.

Входными сигналами являются суммарный момент нагрузки на оба электропривода и относительные скорости ( $V_1, \%$  и  $V_2, \%$ ). Выходные сигналы – моменты двигателей. В данной модели разница моментов формируется пропорциональной рассогласованию скоростей. Для повышения точности расчетов в схему включен фильтр с коэффициентом усиления  $K_1$  и постоянной времени  $T_{f2}$ . Их значения определены по осциллограммам. Параметры модели указаны

непосредственно на рисунке. Более подробно описание моделей приведено в работах [140, 141].

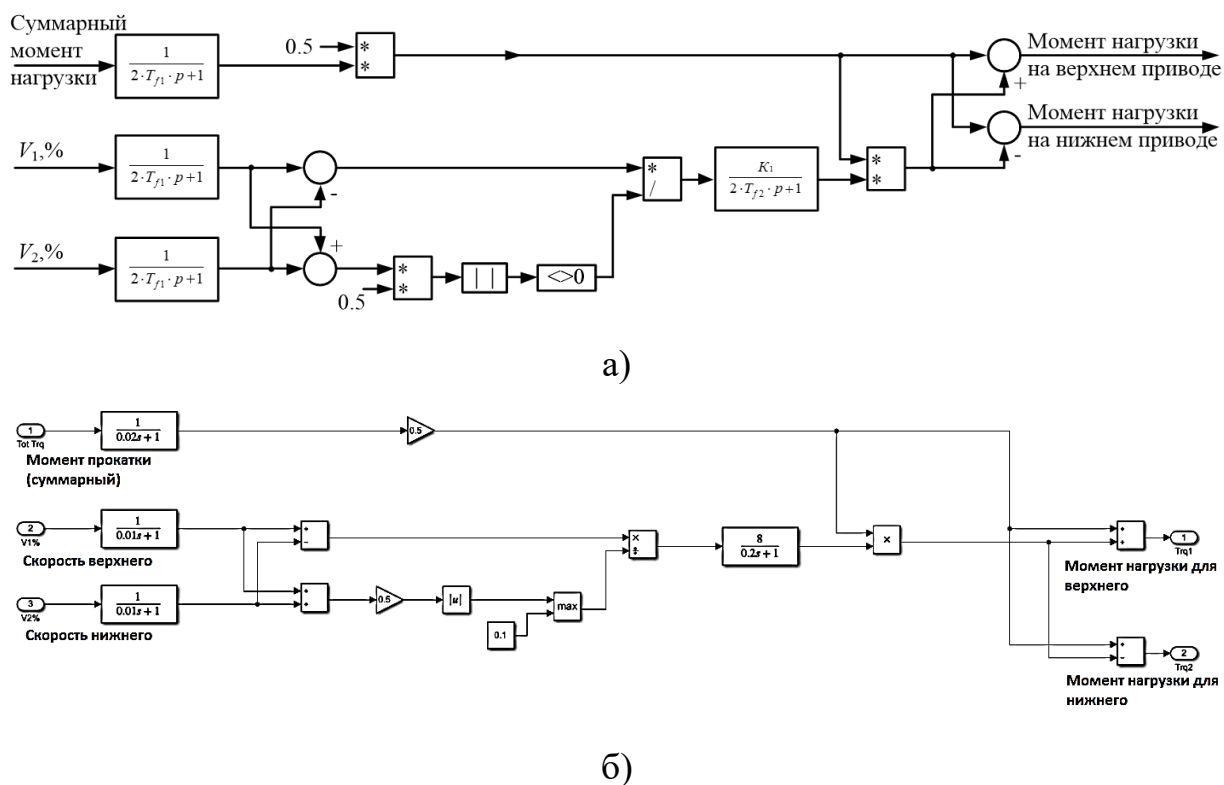


Рисунок 2.9 – Структура модели распределения нагрузок ВГП и НГП (а) и ее реализация в Matlab Simulink (б)

### Система формирования «лыжи»

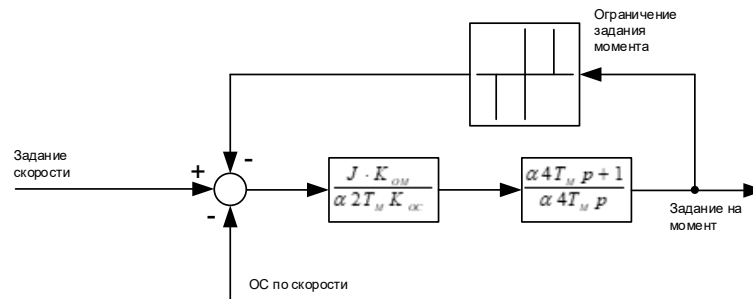
В структуре модели на рисунке 2.7 присутствует «блок управления лыжей». В реальности он предназначен для формирования изгиба переднего конца раската вверх с заданным радиусом и исключения загиба вниз, который может привести к застреванию раската на рольганге.

Структура данного блока рассмотрена в диссертации [2] и публикациях [142, 143] поэтому ее описание здесь не приводится.

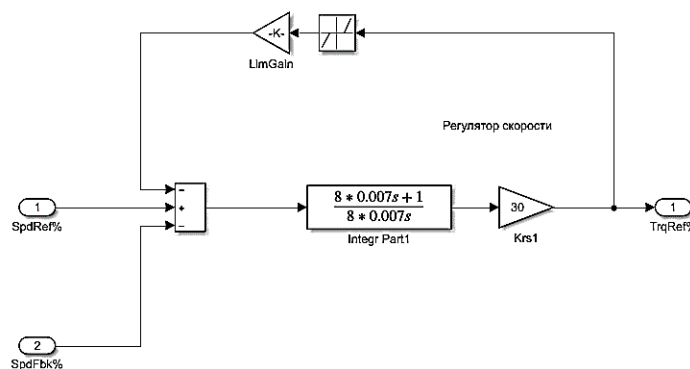
**Модель регулятора скорости** приведена на рисунке 2.10, а, структура в Matlab Simulink с указанием параметров настройки – на рисунке 2.10, б. Действующая система выполнена с ПИ регулятором скорости и настроена на пониженное быстродействие. Это означает, что занижены пропорциональная и интегральная части: коэффициент усиления уменьшен в 2 раза, постоянная



времени  $T_n$  увеличена в 2 раза. Это сделано с целью уменьшения перерегулирования и колебательности момента и тока двигателя при набросе нагрузки [144, 145]. Такая настройка выполнена на стане.



а)



б)

Рисунок 2.10 – Функциональная схема регулятора скорости (а) и его схема в Matlab Simulink (б)

Блок ограничения задания момента охватывает обе части регулятора. В отличие от известных моделей, где отдельно ограничиваются  $P$  и  $I$  части, данное представление модели наиболее точно описывает реализацию ограничения регулятора в реальной системе электропривода.

## 2.4. Разработка моделей гидравлических НУ в структуре САПР

### *Математическая модель нажимного устройства*

Проведенный литературный обзор показал, что существует несколько вариантов математического описания гидравлического НУ. Ниже представлены зависимости для построения математической модели, подробно обоснованные в [146, 147].

Гидравлическое НУ как объект управления описывается тремя линеаризованными дифференциальными уравнениями.

1. Уравнение расхода жидкости для малых приращений координат

$$Q = S_{\Gamma} \frac{dS_{ny}}{dt} + \frac{V_{ny}}{E} \frac{dP_{\Gamma}}{dt} + rP_{\Gamma} \quad (2.1)$$

где  $Q$  – расход жидкости, поступающей в поршневую полость гидроцилиндра (ГЦ);

$S_{ny}, S_{\Gamma}$  – положение и площадь поршня;

$V_{ny}$  – объем поршневой полости при начальном положении поршня;

$E$  – объемный модуль упругости рабочей жидкости;

$P_{\Gamma}$  – давление в поршневой полости;

$r$  – коэффициент утечек при условии, что расход, вследствие утечек, пропорционален давлению.

2. Уравнение, описывающее соотношение усилий в клетке

$$P_{\Gamma} S_{\Gamma} = P + m \frac{d^2 S_{ny}}{dt^2} + b \frac{dS_{ny}}{dt}, \quad (2.2)$$

где  $P$  – полное давление металла на валки;

$m$  – масса механических частей, перемещающихся вместе с ГЦ, а также масса жидкости в трубопроводе от аккумулятора до гидроцилиндра, приведенная к площади поршня;

$b$  – коэффициент вязкого трения, определяющий величину силы трения, пропорциональной скорости перемещения гидравлического НУ.

3. Линеаризованное уравнение сервоклапана для малых приращений координат:

$$T_y \frac{dQ}{dt} + Q = k_y u_y - k_{np} P, \quad (2.3)$$

где  $T_y$  – постоянная времени сервоклапана;

$u_y$  – напряжение управления (напряжение на входе усилителя, задающего управляющий ток в электромагнитную катушку сервоклапана);

$k_y = \frac{dQ}{du_y}$  – расходный коэффициент сервоклапана, постоянный практически во всем диапазоне изменения напряжения;

чески во всем диапазоне изменения напряжения;

$k_{np} = \left( \frac{dQ}{dm} \right)_0$  – коэффициент жесткости перепадно-расходных характеристик сервоклапана при давлении в поршневой полости, принятом за начальное.

При этом уравнения, описывающие гидравлическое НУ, не учитывают:

- волновые процессы в трубопроводе между аккумулятором, сервоклапаном и гидроцилиндром;

- падение давления в трубопроводе;

- сухое трение.

Структурная схема модели, построенная по уравнениям (2.1) – (2.3) с учетом принятых допущений, приведена на рисунке 2.11.

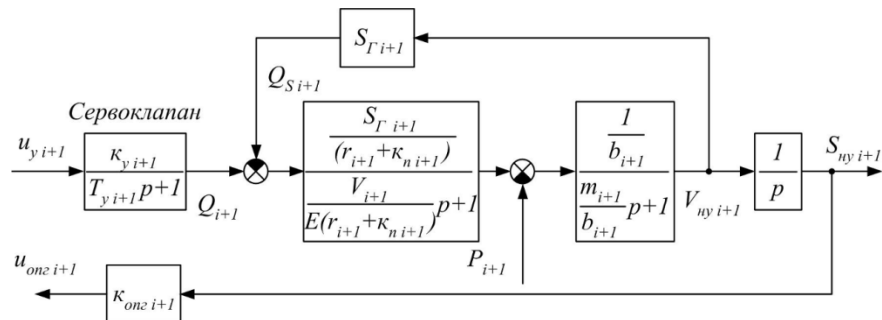


Рисунок 2.11 – Структурная схема гидравлического НУ как объекта управления

Нажимные устройства, установленные на клетки стана 5000, оснащены двумя сервоклапанами на каждый цилиндр, которые включаются в работу последовательно по мере увеличения сигнала задания. Особенностью конструкции является расположение блока сервоклапанов непосредственно на ГЦ, что уменьшает длину гидравлических передач и повышает скорость реакции системы. Используются сервоклапаны с номинальным расходом 700 л/мин, мак-

симальная скорость перемещения НУ при этом составляет 25 мм/с, максимальное давление металла на валки 40 МН. Эти условия были приняты в качестве исходных при расчете параметров модели НУ.

### ***Настройка регулятора положения***

Передаточная функция регулятора положения НУ при настройке на технический оптимум

$$W_{pнг}(p) = \frac{1}{W_{oy}(p)} \frac{1}{k_y k_{онг} 2T_y p},$$

где  $k_{онг} = \frac{U_{зп max}}{S_{ну max}}$  – коэффициент обратной связи по положению поршня ГЦ;

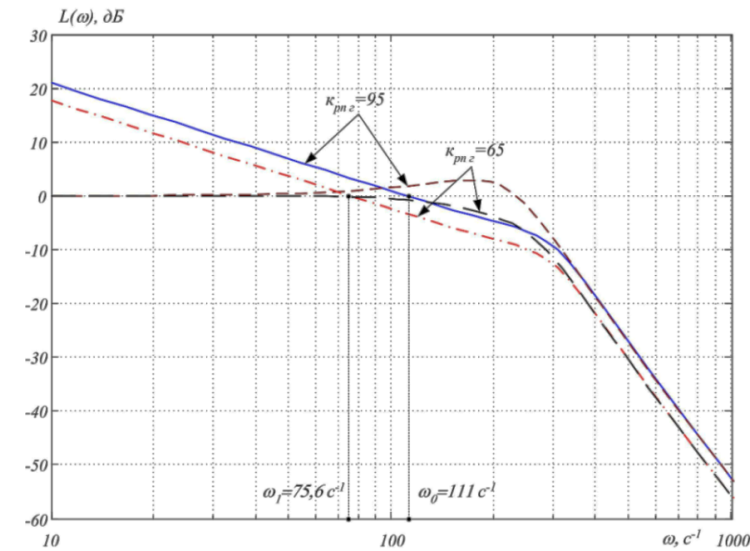
$W_{oy}(p)$  – передаточная функция гидравлического НУ как объекта управления.

В [92] показано, что, если пренебречь величинами высокого порядка в передаточной функции объекта управления, то может быть принят пропорциональный регулятор положения НУ с коэффициентом усиления  $k_{пнз}$ . На рисунке 2.12, а представлены ЛАЧХ разомкнутого и замкнутого контуров регулирования положения при  $k_{пнз} = 95$ . Кривые переходного процесса при изменении задания представлены на рисунке 2.12, б. При указанной настройке перерегулирование положения НУ составляет 30%.

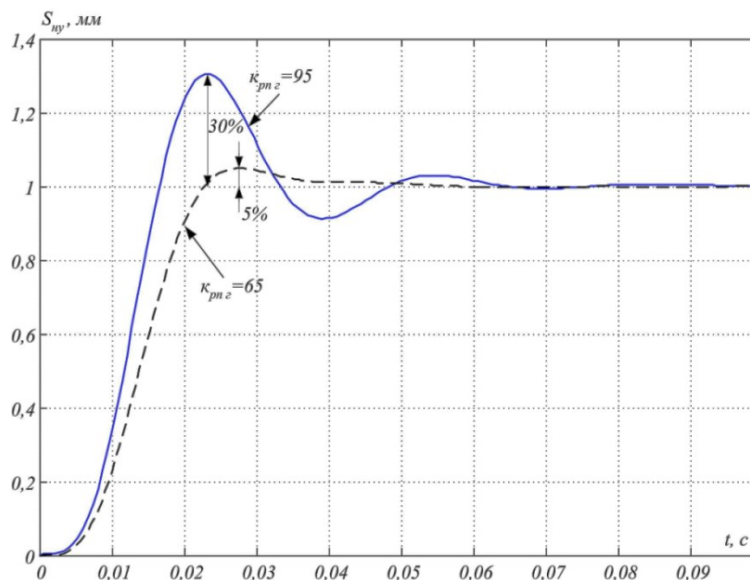
Согласно [148], величина перерегулирования при изменении задания на входе системы регулирования не должна превышать 5%. Поэтому при разработке модели принят коэффициент  $k_{пнз} = 65$ , при котором перерегулирование не превышает указанную величину. ЛАЧХ разомкнутого и замкнутого контуров регулирования и график переходного процесса при  $k_{пнз} = 65$  также приведены на рисунках 2.12, а и 2.1, б. Их анализ позволяет сделать вывод об устойчивости системы и соответствии рекомендациям по настройке замкнутых систем с гидравлическими НУ [92].

### ***Упрощенная имитационная модель НГС***

Схема включения блоков САРТ, содержащая последовательно соединенные структуры АГС и НГС, приведена выше на рисунке 2.7, а. На рисунке 2.13 представлена схема модели контура регулирования положения нажимных устройств. Использована упрощенная модель НУ, которая, тем не менее, выдает результаты по зазорам, совпадающие с реальными, за исключением предельных усилий прокатки.



а)



б)

Рисунок 2.12 – ЛАЧХ разомкнутого и замкнутого контуров регулирования положения (а) и график переходного процесса (б) при  $\kappa_{pnz} = 95$  и  $\kappa_{pnz} = 65$

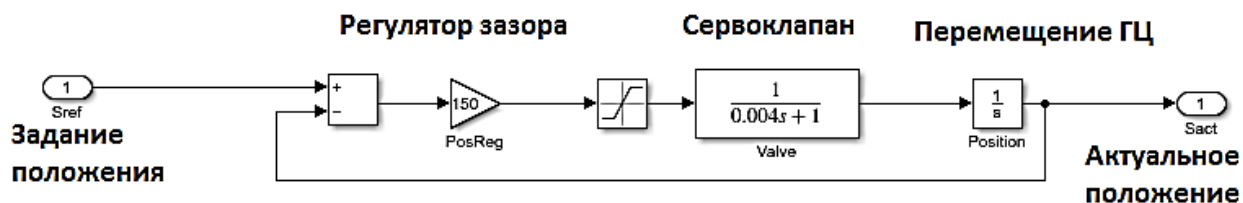
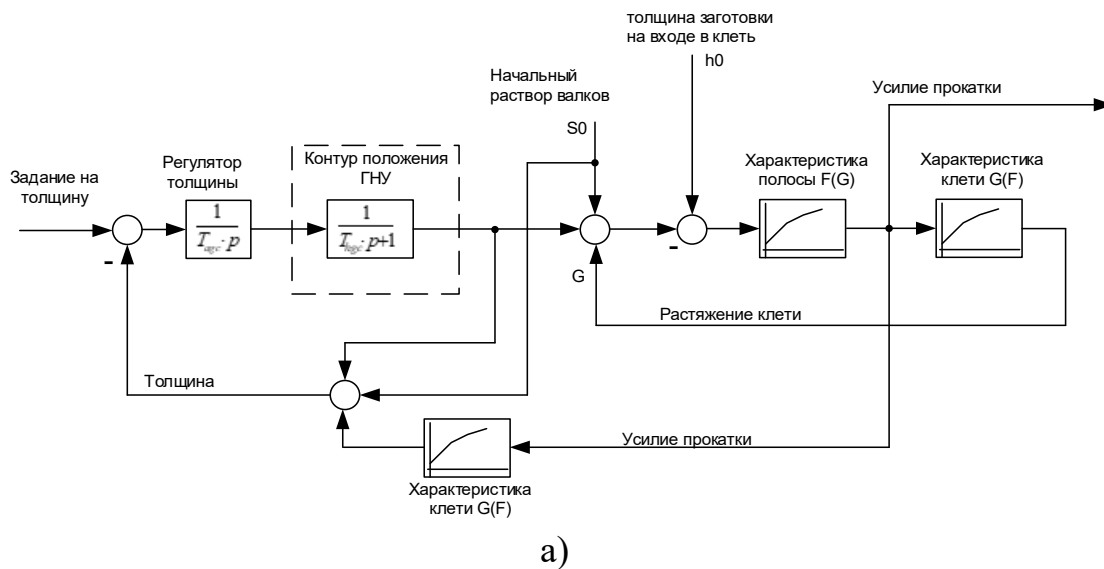


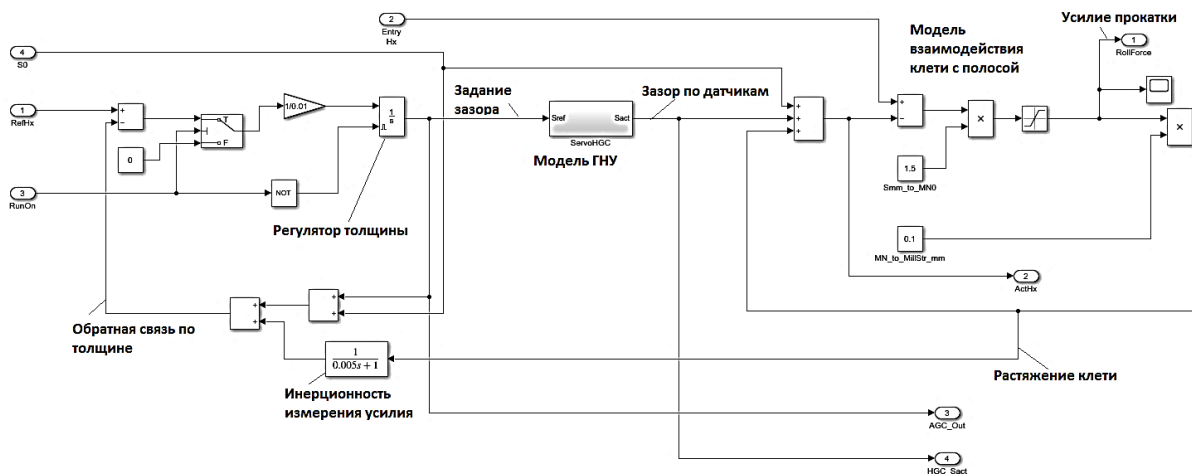
Рисунок 2.13 – Структура модели контура регулирования положения НУ

### Модель САРТ

Структура разработанной модели AGC и схема в Matlab Simulink приведены на рис. 2.14, а и б, соответственно. В структуре на рис. 2.14, а принят интегральный регулятор толщины с постоянной времени 0,01 с. Он воздействует на уставку зазора модели НГС. Выходным сигналом НГС является зазор без учета деформации станины. Показания датчиков зазора поступают во фрагмент модели, описывающий взаимодействие полосы и упругую деформацию станины с валками. В результате этого взаимодействия вычисляются усилие прокатки, зазор с учетом упругой деформации клетки и фактическая толщина полосы. Данная структура реализует принцип Головина-Симса, рассмотренный в п. 2.2.1.



а)



б)

Рисунок 2.14 – Структура модели контура регулирования толщины (а) и ее схема в Matlab Simulink (б)

Параметры всех звеньев разработанной комплексной модели (рисунок 2.7, а) определены по данным электро- и гидрооборудования и осциллограммам, полученным на стане. Путем сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментов подтверждена ее адекватность исследуемому объекту. Реализуемость предложенных технических решений и целесообразность использования модели для исследования разработанных способов подтверждается результатами моделирования ниже.

## 2.5. Результаты моделирования

С целью оценки эффективности предложенного решения выполнены исследования изменения межвалкового зазора в процессе профилированной прокатки. При моделировании учтено, что режим профилирования совпадает по времени с формированием «лыжи», который обеспечивается за счет задания рассогласования скоростей до захвата. С точки зрения анализа толщины раската на участке профилирования, это рассогласование не имеет какого-либо значения. Хотя следует заметить, что совместное исследование этих процессов в ранее опубликованных источниках не встречается. Расчет переходных процессов выполнялся с помощью разработанной имитационной модели, представленной на рисунке 2.7, а.

На рисунке 2.15 приведены временные зависимости скоростей (окно 1), моментов (окно 2) электроприводов верхнего и нижнего валков, а также зависимости заданной и фактической толщины раската (окно 3). Масштабы по осям ординат указаны в процентах, для перевода в абсолютные величины следует воспользоваться соотношениями: масштаб скоростей –  $100\%=8\text{ м/с}$ ; масштаб моментов –  $100\%=1910\text{ кН}\cdot\text{м}$ . Начальное рассогласование скоростей, необходимое для формирования «лыжи», в обоих случаях установлено равным максимальному проектному заданию  $15\%$ .

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

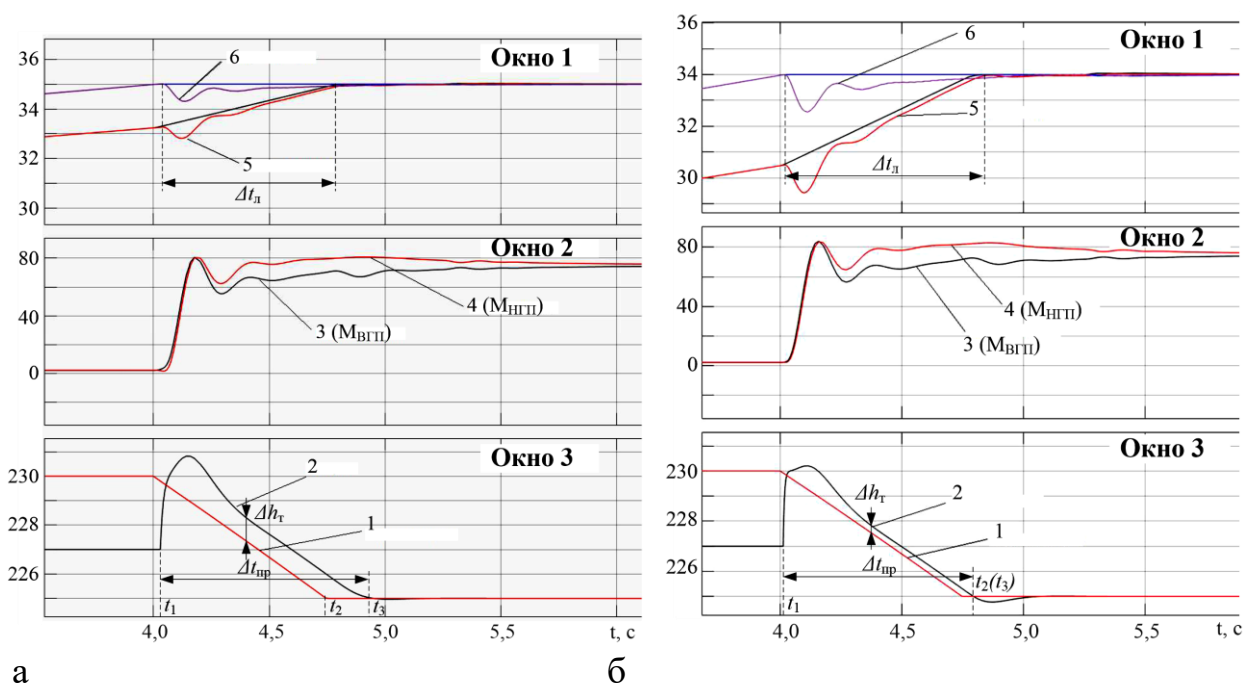




Рисунок 2.15 – Результаты моделирования при реализации проектного (а) и разработанного (б) алгоритмов управления: 1, 2 – заданная и фактическая толщина; 3, 4 – моменты ВГП и НГП; 5, 6 – скорости электроприводов

В результате моделирования сделаны следующие выводы.

1. На рисунке 2.15, а прослеживается отставание реальной толщины раската (кривая 2) от заданной (кривая 1). Это приводит к ошибке регулирования толщины в режиме профилирования  $\Delta h_T=0,35\%$ .

2. Расчетные кривые с достаточной точностью повторяют процессы на осциллограммах, рисунок 1.17, что косвенно подтверждает адекватность модели исследуемому объекту. Различие конкретных значений параметров в фиксированных точках объясняется несоответствием начальных условий в эксперименте и при моделировании.

3. Отличием анализируемых процессов на рисунке 2.15, б является значительное снижение (практически отсутствие) задержки регулирования толщины, в результате ошибка регулирования приближается к нулю ( $\Delta h_T \approx 0,05\%$ ). Это происходит благодаря введению положительной связи по заданию толщины на вход регулятора положения НУ.

4. Установившиеся рассогласования моментов (кривые 3 и 4) в режиме формирования «лыжи» в интервале  $\Delta t_{Л} = t_2 - t_1$  на обоих рисунках одинаковы и составляют 12,5% ( $M_{НГП}=80\%$  при  $M_{ВГП}=70\%$ ). Это объясняется тем, что совершенствование алгоритмов лыжеобразования и деления нагрузок в данной диссертационной работе не предусмотрено. Эти задачи подробно исследованы в диссертации [2].

Таким образом, результаты моделирования подтверждают повышение точности и увеличение быстродействия регулирования толщины, что обеспечит сокращение протяженности разнотолщинного участка раската.

## ВЫВОДЫ

1. Представлены концепция автоматического контроля профиля ASC, разработанная фирмой SMS group, и многоточечная стратегия задания профиля переменной толщины. Они применяются на современных толстолистовых станах, в том числе на стане 5000 ПАО «ММК» и, как утверждается, обеспечивают практически полную прямоугольность листа в плане.

2. Представлена структурная схема САРТ с предупредлением (упреждающим регулированием) в контуре регулирования толщины. Отличительным признаком системы является включение положительной связи по производной задания толщины на вход регулятора положения гидравлических НУ. Благодаря этому сигнал задания на регулирование межвалкового зазора подается «в обход» регулятора толщины, что повышает быстродействие системы.

3. Коэффициент связи задания зазора  $s_0$  и толщины  $h_1$ , вычисляется как функция модулей жесткости клетки  $M_G$ , который определяется по данным калибровки клетки, и металла  $M_B$ , который задается моделью прокатки. При формировании задания на регулятор положения НУ задание толщины умножается на этот коэффициент, что обеспечивает упрощенное вычисление производной.

4. Разработана имитационная модель взаимосвязанных электроприводов верхнего и нижнего валков и гидравлических НУ в структуре САРТ, реализованная в пакете Matlab Simulink. Модель содержит блоки, описывающие электроприводы как двухмассовые электромеханические системы, блок моделирования нагрузки и ее распределения по двигателям.

5. Представлены упрощенные модели контура НГС (регулирования положения гидравлического нажимного устройства) и контура регулирования толщины (модель АГС), реализующего принцип Головина-Симса. В модели НГС использован пропорциональный регулятор зазора, воздействующий на задание положения сервоклапана. Выходным сигналом модели сервоклапана является расход жидкости, путем интегрирования которого вычисляется перемещение поршня гидроцилиндра.

6. Представлены результаты моделирования, подтверждающие повышение точности и увеличение быстродействия регулирования толщины в режиме перемещения НУ при реализации разработанного алгоритма с предупредле-

нием. Сделан вывод, что двойной конический профиль «собачья кость» в разработанной системе формируется с более высокой точностью, чем при реализации проектного алгоритма управления НУ. Это подтверждает достижение цели, заключающейся в максимальном приближении формы листа в плане к прямоугольной.

## **Глава 3. ОГРАНИЧЕНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ КЛЕТЕЙ ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА**

### **3.1. Обоснование направления исследований**

При перемещении НУ в проходах с профилированной прокаткой изменяются зазор валков и соответственно обжатие в горизонтальной клетки. По сути, на процесс прокатки накладывается деформация, характерная для процессаковки. Поэтому термин «прокатка» логично заменить термином «обработка» металла, который в этом случае подразумевает процесс прокатки в сочетании деформированием путем обжатия за счет перемещения валка в проходах с профилированием.

Как было отмечено выше, недостатком алгоритма управления прокаткой с профилированием является отсутствие согласования скоростей металла и электроприводов вертикальной клетки. Необходимость согласования вызвана тем, что на фактическую скорость раската помимо скорости вращения валков оказывает влияние отставание (снижение скорости) металла на входе в горизонтальную клетку. Этот параметр определяется величиной обжатия и соответственно его изменением в процессе прокатки. Поэтому при перемещении НУ возникает рассогласование реальной скорости раската и линейной скорости валков предыдущей вертикальной клетки. Это приводит к усилению силового взаимодействия в виде отрицательного натяжения (подпора), который по условиям прокатки недопустим.

При разработке способа ограничения взаимодействия горизонтальных и вертикальных валков (ГВ и ВВ) в качестве прототипа целесообразно принять способ, представленный в диссертации [2]. Должны быть определены недостатки, которые будут устранены при его совершенствовании. Для исследования способа необходима разработка математической модели электромеханических систем клеток с учетом их взаимосвязи через металл. При ее создании за основу целесообразно принять модель «электропривод – гидравлическое НУ в структуре САРТ», рассмотренную в предыдущем разделе.

Серьезные проблемы при разработке модели связаны со сложностью математического описания формоизменения раската при обжатии горизонтальными валками в процессе прокатки. Теория прокатки в приводных валках постоянного радиуса с изменяющимся межвалковым зазором развивалась применительно к производству профилей переменной толщины, в частности, периодических профилей [149–151]. Однако специфика деформирования металла в режиме формирования профиля «кость» при толстолистовой прокатке не учитывалась. В связи с этим ставится задача разработки модели, пригодной для изучения процессов при больших перемещениях НУ, характерных для исследуемого процесса.

Не менее важной задачей является математическое описание изменения натяжения (подпора) в межклетевом промежутке. В большинстве литературных источников процесс взаимосвязи смежных клеток описывается интегральными уравнениями, обоснованными Н.Н. Дружининым. Они учитывают влияние переднего и заднего натяжений на упругую деформацию раската в очаге деформации [152]. Эти уравнения следует принять за основу при разработке модели силовой взаимосвязи ВВ и ГВ. Отличием является математическое описание изменения натяжения, которое в процессе прокатки с одновременной деформацией валками изменяется по сложному закону. Это является задачей, которая должна быть решена в настоящей главе.

При разработке модели возникает задача расчета энергосиловых параметров: усилия и момента прокатки, которые целесообразно рассчитывать по уравнениям, предложенным акад. Целиковым А.И. [153]. Они должны быть приняты за основу при разработке модели. Для определения опережения при прокатке целесообразно использовать формула Дрездена [132]. Однако названные зависимости должны применяться не в «традиционной» форме записи. Необходима их трансформация для учета деформации при прокатке с нарастающим обжатием.

Разработанные математические зависимости, по сути, будут являться развитием положений теории прокатки с переменным обжатием в направлении применения к толстолистовому прокатному стану.

В завершающей части раздела должны быть представлены результаты моделирования переходных процессов при изменении межвалкового зазора. Целью является анализ натяжения (подпора) в промежутке вертикальных и горизонтальных валков при исходной настройке и при применении разработанного алгоритма коррекции скорости электропривода эджера.

### **3.2. Анализ известного способа согласования скоростей валков**

В диссертации [2] разработан способ согласования скоростей электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей в режиме перемещения гидравлических НУ. Он обеспечивает реализацию принципа «постоянства массы» металла в межклетевом промежутке. При его разработке за основу принят принцип управления электроприводами клетей чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки, обоснованный в диссертационной работе В.Р. Храмшина [154] и получивший развитие в работах [54, 55]. Суть данного принципа заключается в последовательной передаче регулирующего воздействия «против хода прокатки» и согласовании скоростей электроприводов взаимосвязанных клетей за счет динамической компенсации управляющих и возмущающих воздействий. В представленной работе данный принцип получает развитие в направлении применения для электроприводов реверсивной клетки толстолистового стана.

Согласно способу [2], приращение скорости металла на входе в клеть вычисляется по выражению

$$\Delta V_B = \frac{V_\Gamma}{H_B} \Delta S \frac{M_K}{M_B + M_G} \quad (3.1)$$

где  $\Delta V_B$  – регулируемое приращение линейной скорости вертикальных валков при изменении зазора горизонтальной клетки;

$V_\Gamma$  – линейная скорость металла на выходе из горизонтальной клетки;

$H_B$  – толщина металла на входе в горизонтальную клеть;

$\Delta S$  – приращение зазора валков при перемещении гидравлического нажимного устройства;

Расшифровка обозначений  $M_B$  и  $M_G$  дана выше.

Из этого равенства следует, что для обеспечения постоянства объема металла в межклетевом промежутке регулирование скорости раската на входе в горизонтальную клетку должно осуществляться пропорционально изменению зазора  $\Delta S$  при перемещении НУ.

Регулирующее воздействие, осуществляемое по выражению (3.1), подается в схему ограничения нагрузок электроприводов, реализованную в программе АСУ ТП. Это обеспечивает пропорциональное регулирование скорости  $\Delta V_B$  при возникновении приращения зазора валков  $\Delta S$ . В результате осуществляется автоматическое согласование скорости металла на входе в клетку и линейной скорости роликов рольганга.

Первым недостатком данного способа является то, что не учитывается и не компенсируется исходное различие скоростей, которое может быть обусловлено многими причинами: ошибками вычислений заданных скоростей, износом валков, различием углов захвата и др. Это может привести к возникновению недопустимых натяжений либо подпора в квазиустановившемся режиме прокатки.

Сказанное подтверждают расчетные осциллограммы, полученные в результате моделирования процессов при захвате металла валками с последующим изменением межвалкового зазора, представленные на рисунке 3.1. Они рассчитаны с помощью имитационной модели, описание которой приведено в настоящем разделе ниже.

Первоначально до входа раската в клетку (до момента  $t_1$ ) металл находится в вертикальных валках (эджере). После захвата горизонтальной клеткой возникают переходные процессы всех координат, обусловленные изменением электромагнитных моментов двигателей, упругими свойствами валопроводов, силовым взаимодействием электромеханических систем клетей и другими факторами, учтенными при разработке модели.

Изначально скорость электропривода и соответственно валков горизонтальной клетки (окно 1) больше, чем скорость электропривода эджера. Поэтому в течение моделируемых процессов в интервале  $t_1-t_4$  в межклетевом промежутке имеет место подпор: натяжение в окне 3 находится в области отрица-

тельных значений. При существующей «относительно мягкой» настройке регулятора скорости электропривода горизонтальной клетки приближение натяжения к заданному нулевому значению (окно 3) происходит медленно в интервале  $t_1-t_2$ , составляющем около 0,4 с. Толщина металла (окно 4) удерживается на заданном уровне, динамическое отклонение натяжения при захвате составляет около 10 т, что допустимо.

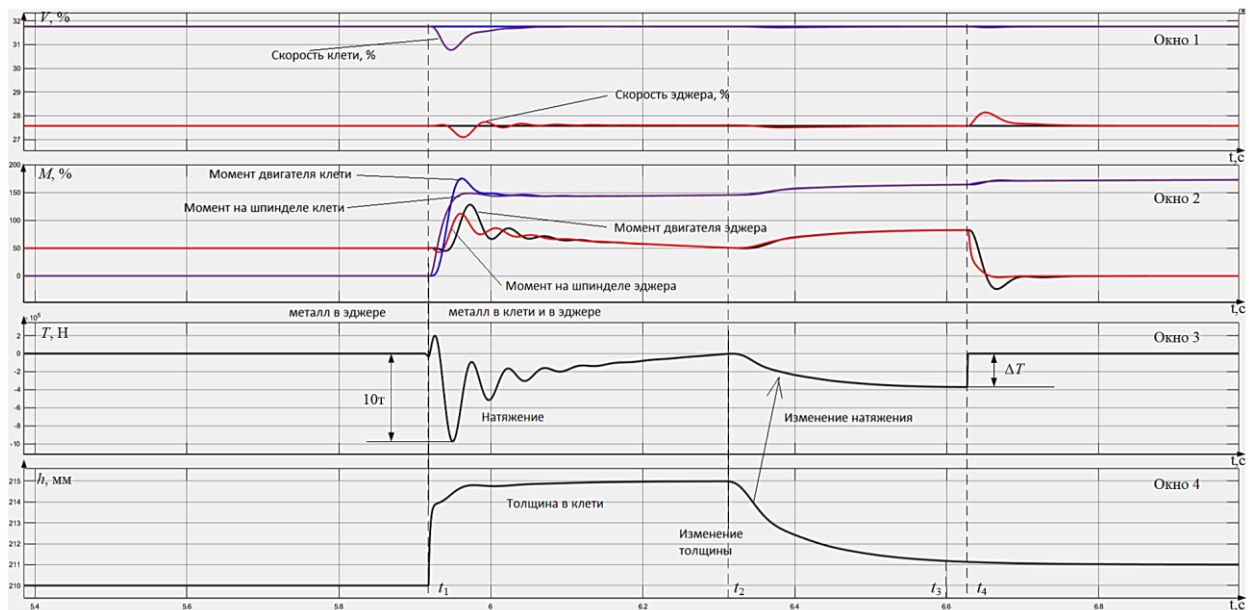


Рисунок 3.1 – Переходные процессы при моделировании захвата с последующим изменением обжатия в клетке

В момент времени  $t_2$  начинается принудительное уменьшение межвалкового зазора (толщины – окно 4), которое продолжается в интервале  $t_2-t_3$ . Изменение толщины от 215 до 211 мм приводит к росту подпора  $\Delta T$  (по модулю) от 0 до 4 т (окно 3). Вследствие этого моменты двигателей горизонтальной клетки и эджера (окно 2) увеличиваются. В момент  $t_4$  металл выходит из эджера. После этого момент двигателя клетки немного возрастает, т.к. исчезает натяжение.

Анализ приведенных зависимостей позволил сделать следующие выводы:

1. Первоначальные значения скоростей валков должны рассчитываться с учетом их диаметров, исходя из условий захвата (с учетом угла захвата) и фактической скорости вертикальной клетки при движении раската в прямом



направлении от вертикальной клетки к горизонтальной. При обратном направлении в качестве базовой должна приниматься скорость валков горизонтальной клетки.

2. При движении металла в прямом направлении должна осуществляться коррекция скорости вертикальных валков с целью компенсации изменения фактической скорости металла при перемещении НУ.

Вторым недостатком является то, что исследование влияние перемещения НУ на скорость металла на входе в клетку в работе [2] было выполнено только косвенным образом – путем изменения скорости электропривода валков. Для оценки ситуации, связанной с динамическим изменением натяжения, моделировалось изменение задания скорости горизонтальных валков скачком на  $\pm 2\%$ . Такое исследование не является полностью корректным, хотя позволило дать качественную картину влияния компенсации рассогласования скоростей на натяжение (подпор) в промежутке. Поэтому необходимо проведение исследований методом математического моделирования с использованием разработанной имитационной модели с учетом дополнения ее блоками, моделирующими связь вертикальных и горизонтальных валков через металл.

### **3.3. Разработка способа ограничения силового взаимодействия**

В режиме свободной прокатки металла в вертикальной клетке до захвата горизонтальной клеткой скорость электропривода валков горизонтальной клетки устанавливается согласно зависимости

$$\omega_{\Gamma} = \omega_{\text{В}} \frac{D_{\text{В}}}{D_{\Gamma}} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_{\Gamma}}, \quad (3.2)$$

где  $\omega_{\Gamma}$ ,  $\omega_{\text{В}}$ ,  $D_{\Gamma}$ ,  $D_{\text{В}}$  – скорости и диаметры горизонтальных и вертикальных валков;  $\alpha_{\Gamma}$  – угол захвата горизонтальными валками.

Согласно предложенному способу при изменении зазора валков горизонтальной клетки осуществляют регулирование скорости электропривода вертикальной клетки пропорционально приращению линейной скорости металла на входе в горизонтальную клетку, согласно зависимости (3.1) (в этом сходство

разработанного решения со способом, рассмотренным в диссертации [2]). Это обеспечивает компенсацию приращения скорости металла в промежутке между вертикальными и горизонтальными валками при изменении зазора в динамическом режиме, вызванном перемещением НУ. За счет этого обеспечивается постоянство секундного объема металла в межклетевом промежутке, и уменьшается силовое взаимодействие клеток. В результате устраняется (либо ограничивается) подпор валков вертикальной клетки и снижается вероятность возникновения аварийных ситуаций.

На рисунке 3.2, а представлена схема системы управления, поясняющая разработанный способ [155]. При прокатке металла 3 в вертикальных валках 1, до захвата горизонтальными валками 2 устанавливается скорость  $\omega_{\Gamma}$  электропривода 9 горизонтальных валков 2 согласно зависимости (3.2). Она получена из условия совместной прокатки без натяжения:

$$V_{\alpha} = V_{\text{В}} = V_{\text{Л}} \cdot \cos \alpha_{\Gamma};$$

где  $V_{\alpha}$  – горизонтальная составляющая линейной скорости  $V_{\text{Л}}$  горизонтальных валков 2 в точке захвата металла 3 (рис. 3.2, а);

$V_{\text{В}}$  – скорость металла на выходе из вертикальных валков 1.

При этом к моменту захвата металла 3 валками 2 горизонтальная составляющая  $V_{\alpha}$  линейной скорости валков 2 горизонтальной клетки становится равной линейной скорости  $V_{\text{В}}$  металла, выходящего из валков 1 вертикальной клетки. Это обеспечивает захват металла валками 2 с минимальными динамическими нагрузками. Косинус угла захвата рассчитывают по зависимости (см. рис. 3.2, а)

$$\cos \alpha_{\Gamma} = 1 - \frac{H_{\text{В}} - H_{\Gamma}}{D_{\Gamma}}, \quad (3.3)$$

где  $H_{\text{В}}$ ,  $H_{\Gamma}$  – толщины металла на выходе из вертикальных и горизонтальных валков, соответственно.

При совместной прокатке металла в валках вертикальной и горизонтальной клеток должно выполняться условие постоянства секундных объемов [36]. Без учета уширения выражение имеет вид:

$$H_{\text{В}} \cdot V_{\text{В}} = H_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma} \quad (3.4)$$

где  $V_G$  – скорость металла на выходе из горизонтальных валков.

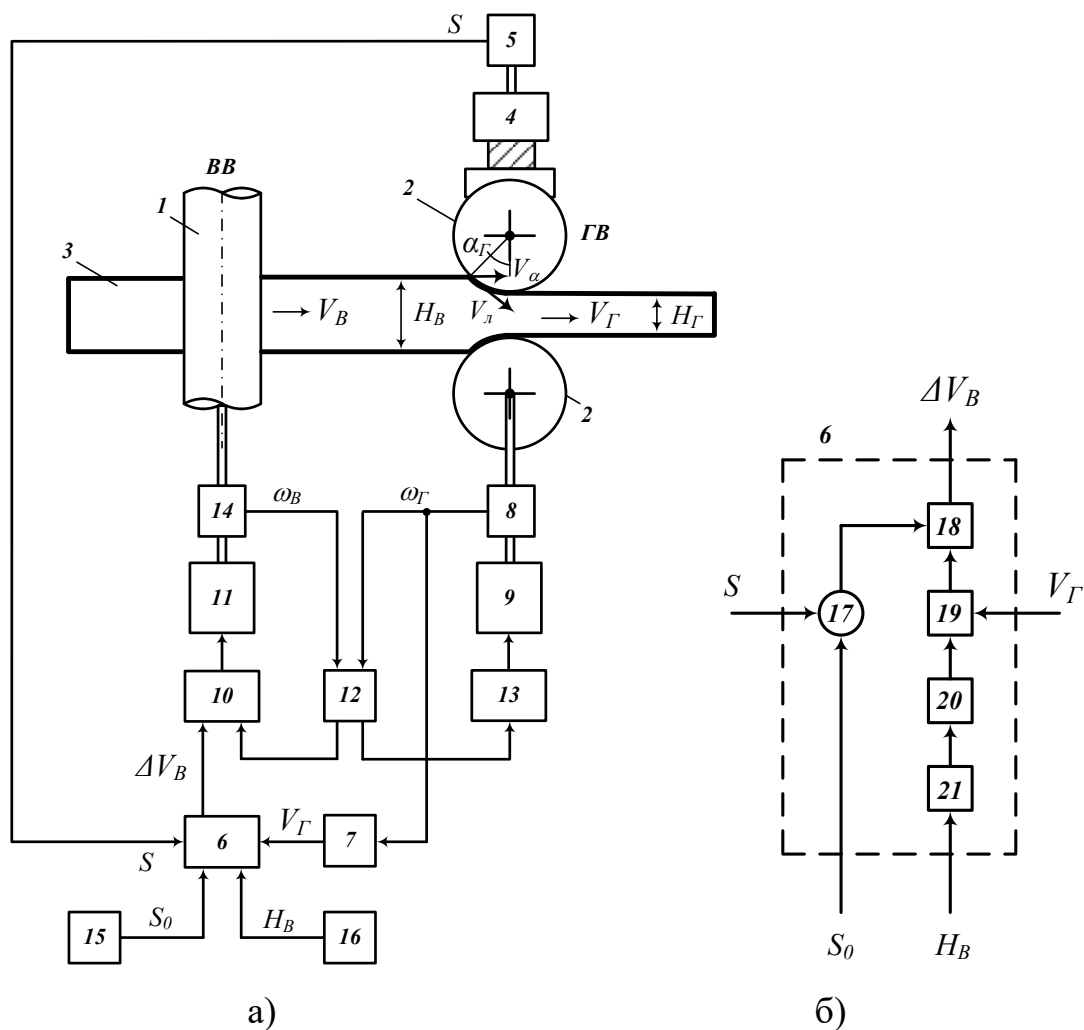


Рисунок 3.2 – Функциональная схема системы согласования скоростей ВВ и ГВ, поясняющая разработанный способ (а) и схема блока вычисления корректирующего сигнала (б):

1, 2 – вертикальные и горизонтальные валки (клетки); 3 – раскат; 4 – гидравлическое НУ (условно показано сверху); 5 – датчик зазора валков; 6 – вычислительный блок; 7 – датчик линейной скорости ГВ; 8, 14 – датчики угловых скоростей электроприводов ГВ и ВВ; 9, 11 – электроприводы ГВ и ВВ; 10, 13 – блоки управления электроприводами ВВ и ГВ; 12 – блок задания скорости; 15 – блок задания зазора валков  $S_0$  при отсутствии металла; 16 – блок задания толщины  $H_B$  по проходам; 17 – суммирующий элемент; 18, 19 – блоки перемножения; 20 – усилитель; 21 – блок, реализующий гиперболическую функцию  $(1/X)$ , где  $X$  – переменная на входе блока.

Отсюда приращение линейной скорости металла на выходе вертикальной (входе горизонтальной) клетки

$$\Delta V_B = \frac{V_G}{H_B} \cdot \Delta H_G. \quad (3.5)$$

Для устойчивой прокатки равенство (3.5) должно соблюдаться как в установившемся, так и в динамических режимах, в том числе в режиме, вызванном изменением зазора валков при перемещении НУ.

Изменение толщины полосы  $\Delta H_G$  на выходе горизонтальных валков при изменении зазора валков  $\Delta S$  выражается зависимостью Головина-Симса:

$$\Delta H_G = \Delta S \frac{M_K}{M_B + M_G},$$

где  $\Delta S = S - S_0$ ;  $S$  – текущая величина зазора валков, измеряемая датчиком 5. С учетом этого выражение (3.5) преобразуется в выражение (3.1). Из него следует, что для обеспечения постоянства объема металла в межклетевом промежутке необходимо дополнительно ввести регулирование скорости электропривода (собственной) горизонтальной клетки пропорционально изменению зазора  $\Delta S$  при перемещении гидравлических НУ. Это является дополнительным отличительным признаком разработанного способа согласования скоростей валков.

Устройство работает следующим образом. На вход блока управления 10 электроприводом 11 вертикальных валков 1 с блока 12 задания поступает постоянный сигнал задания скорости. В промежуток времени до захвата металла валками 2 со второго выхода блока 12 задания скорости на вход блока управления 13 электроприводом 9 валков 2 поступает сигнал управления скоростью, обеспечивающий ее регулирование согласно выражению (3.2). В результате после захвата устанавливается соотношение скоростей валков  $\omega_B$  и  $\omega_G$ , обеспечивающее совместную прокатку без натяжения. Корректирующий сигнал  $\Delta V_B$  на первом входе блока управления 10 электропривода 11 вертикальных валков 1 отсутствует.

При перемещении нажимных устройств 4 вниз, возникающем при формировании переднего конца заготовки согласно профилю «кость», сигнал  $S$ , поступающий с выхода датчика зазора 5 на первый вход вычислительного блока 6, уменьшается. Схема устройства 6 показана на рисунке 3.2, б, в нем осуществляется вычисление регулирующего сигнала по зависимости (3.1). Для этого на вход множительного устройства 19 подается сигнал  $V_G$ , пропорциональный скорости металла на входе горизонтальной клетки. На второй вход устройства 19 с выхода усилителя 20 поступает сигнал  $\frac{1}{H_B} \cdot \frac{M_K}{M_B + M_G}$ , который для каждого прохода определяется толщиной полосы  $H_B$ , на входе в горизонтальную клетку. При этом модули жесткости клетки и полосы принимаются постоянными и задаются в алгоритм вычисления заранее.

Модуль клетки рассчитывается исходя из кривой растяжения клетки, показанной на рисунке 3.3, которая снимается автоматически во время калибровки. Его среднее рабочее значение 8300 кН/мм. Для вычислений согласно разработанному алгоритму используются кривые жесткости, представленные в виде таблиц. При изменении сортамента они должны корректироваться. С целью определения параметров жесткости клетки для толстолистовых станов разработана и официально зарегистрирована авторская программа [156]. Она предназначена для расчета таблиц и кривых, аналогичных представленным на рисунке 3.3 при различных сортаментах проката.

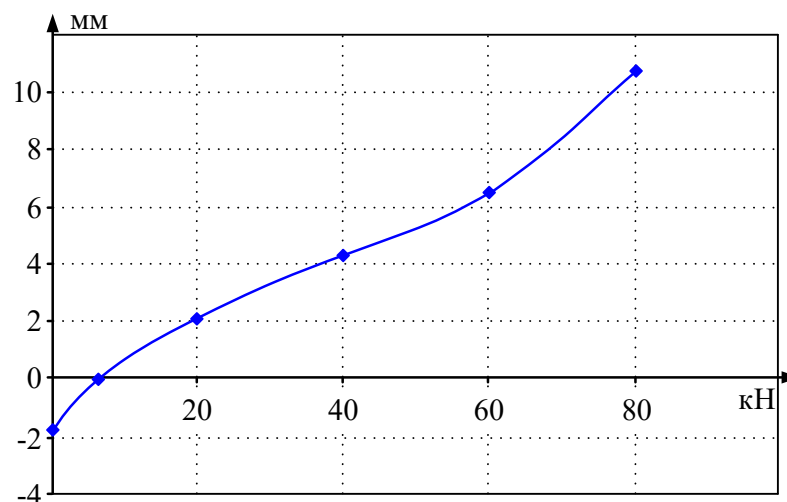


Рисунок 3.3 – Зависимость растяжения клетки от усилия

Полученный сигнал с выхода второго множительного устройства 19 подается на вход устройства 18, где умножается на приращение  $\Delta S$  зазора валков, поступающее с выхода суммирующего элемента 17. Сигнал приращения  $\Delta S$  получается путем суммирования с разными знаками заданного  $S_0$  и текущего  $S$  зазоров горизонтальных валков 2.

В результате при изменении зазора валков при перемещении НУ на выходе вычислительного блока 6 формируется сигнал на снижение скорости вертикальных валков 1, вычисляемый по зависимости (3.1). Он поступает на вход блока управления 10 электроприводом 11. В результате осуществляется регулирование скорости этих валков пропорционально перемещению НУ с учетом модулей жесткости клетки и металла.

Аналогичное регулирование скорости вертикальных валков 1 осуществляется в режиме увеличения зазора горизонтальных валков 2 при перемещении НУ 4 вверх. Отличием является формирование на выходе вычислительного устройства 6 сигнала на увеличение скорости валков 1.

Более подробное описание работы устройств, представленных на рисунках 3.2, а и б, приведено в тексте [155].

### **3.4. Аналитические зависимости для расчета энергосиловых параметров в режиме профилированной прокатки**

#### **3.4.1. Расчет по известной методике**

В математических моделях для расчета энергосиловых параметров прокатки принимаются следующие допущения:

- уширение при прокатке отсутствует;
- исходная толщина раската на входе в клетку не изменяется;
- распределение скорости выхода металла по высоте сечения равномерное.

При таких условиях прокатываемый металл как объект управления описывается уравнениями.

1. Для расчета давления на валки используется выражение, обоснованное А.И. Целиковым [153]:

$$P = \frac{B \cdot X \cdot H}{2\mu} \left[ \frac{1}{\varphi} \left( \frac{X_{i-1}}{X_i} \right)^\varphi e^m - \left( \frac{X_{i-1}}{X_i} - 1 \right) - \frac{1}{\varphi} \right], \quad (3.6)$$

где  $B$  – ширина листа;

$$\varphi = \frac{h}{h+H}; \quad m = \frac{2\mu \cdot l}{h+H}; \quad X_{i-1} = 1,15\sigma_{s_{i-1}} - \sigma_{i-1}; \quad X_i = 1,15\sigma_{s_i} - \sigma_i \quad -$$

коэффициенты;

$\sigma_{s_{i-1}}, \sigma_{s_i}$  – пределы текучести металла до и после обжатия в клетки (при свободной прокатке принимаются одинаковыми);

$\mu$  – коэффициент трения между рабочей поверхностью валков и металлом;

$$l = \sqrt{R(h-H)} \quad - \text{длина дуги захвата с учетом сплющивания валков.}$$

2. Статический момент на валу двигателя определяется как сумма составляющих:

$$M_{CT} = M_{\text{ПР}} + M_{\text{ТР1}} + M_{\text{ТР2}}, \quad (3.7)$$

где  $M_{\text{ПР}} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l$  – момент прокатки;

$$M_{\text{ТР1}} = P \cdot D \cdot \mu_1 \quad - \text{момент добавочных сил трения;}$$

$$M_{\text{ТР2}} = \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \cdot \frac{M_{\text{ПР}} - M_{\text{ТР1}}}{i} \quad - \text{момент трения в передаточных ме-}$$

ханизмах.

В этих выражениях:  $R$  – радиус валков;  $\psi$  – коэффициент плеча прокатки;  $D$  – диаметр шейки валка;  $\mu_1$  – коэффициент трения для подшипников жидкостного трения;  $\eta$  – КПД передачи;  $i$  – передаточное число редуктора.

Представленные выражения использованы для моделирования изменения энергосиловых параметров при деформации как в горизонтальной, так и вертикальной клетях. В структурной схеме на рисунке 3.4 они входят в блоки расчета моментов прокатки клетки и эджера. Эта структура поясняет формирование моментов нагрузки двигателей с учетом натяжения в промежутке.

Вместе с тем, зависимости (3.6), (3.7) не пригодны для расчета энергосиловых параметров в режиме прокатки с одновременным деформированием металла валками. В них не учитывается изменение толщины, которое в режиме

профилированной прокатки оказывает значительное влияние на давление. Максимальная глубина профилирования составляет 5-7 мм, что при толщине сляба 250 мм, составляет 2-3 %.

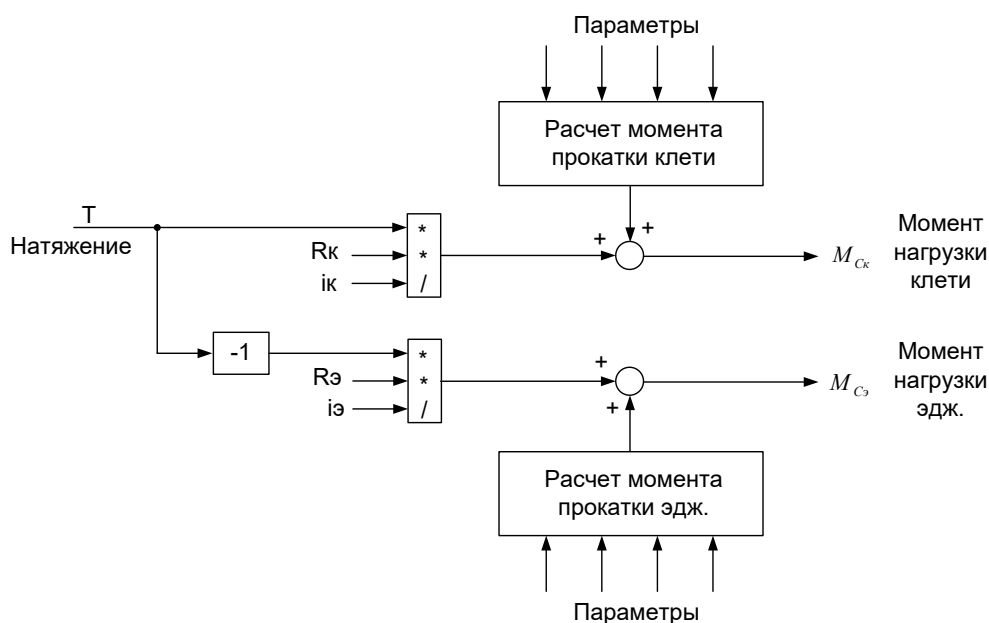


Рисунок 3.4 – Структура модели вычисления моментов нагрузки

Это подтверждают осциллограммы, представленные на рисунке 3.5. Они получены для режима перемещений НУ после захвата металла валками в момент  $t_1$ . Профилирование осуществляется на  $\Delta h=5$  мм при заданном зазоре до захвата  $h_0=285,75$  мм (окно 1), толщина «тела» раската  $h_1=280,75$  мм.

Усилие прокатки (окно 5) в процессе деформирования валками в интервале  $t_2-t_4$  изменяется от 20 МН до 25 МН, т.е. на 25%. Аналогичное отклонение возникает при разведении валков в интервале  $t_5-t_7$ . При этом задания на сервоклапаны  $U_{S0}$  нажимных устройств (окно 4) в интервалах  $t_3-t_4$  и  $t_6-t_7$  выходят на ограничение  $\pm 100\%$ . Очевидно, что такое существенное отклонение должно учитываться при моделировании переходных процессов, обусловленных перемещением НУ. Поэтому в динамической модели должны быть применены зависимости, в которых учитывается изменение усилия, обусловленное изменением межвалкового зазора.

Аналогичное требование относится к зависимостям для расчета моментов электроприводов. Это подтверждает осциллограмма момента  $M_{ВГП}$ , представленная на рисунке 1.17, на которой момент интервале переменного обжатия



изменяется в диапазоне (-2000) – (-3500) кН·м. Сделать аналогичный вывод в отношении момента  $M_{НГП}$ , не представляется возможным, т.к. он превышает установленное ограничение (-4200) кН·м.

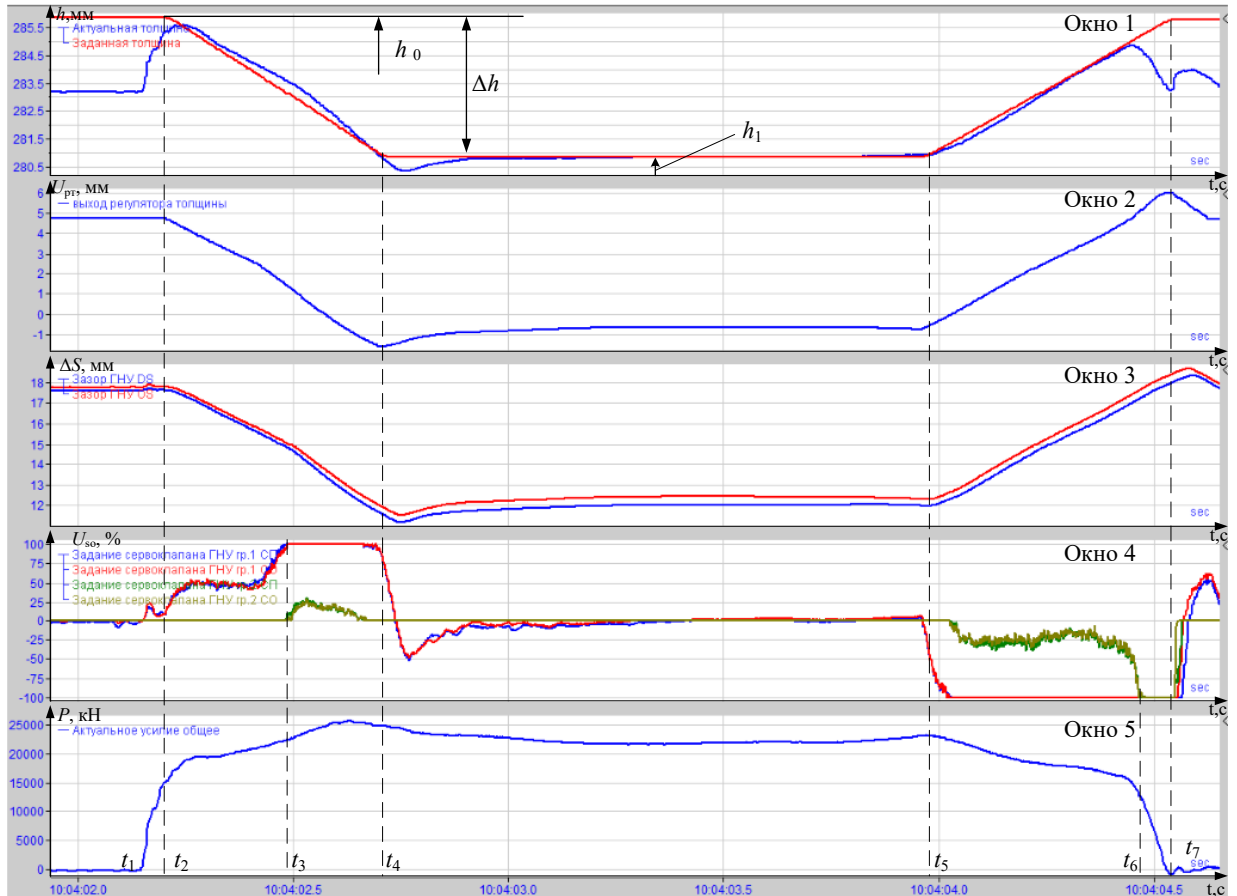


Рисунок 3.5 – Переходные процессы при профилировании раската на 5 мм

Варианты аналитических зависимостей для расчета давления металла на вальки при прокатке с нарастающим обжатием предлагались разными авторами. Результаты отражены в статьях и монографиях, в числе которых следует отметить труды, И.Я. Тарновского, С.Л. Коцаря [149], Н.М. Воронцова [150], А.В. Степаненко [151], А.П. Чекмарева [157], и других.

### 3.4.2. Кинематика очага деформации

Методика расчета параметров очага деформации при продольной прокатке профилей переменного сечения представлена в публикациях В.Д. Данилова, Т.М. Голубева и некоторых других авторов. В работах [158, 159] получены формулы для расчета опережения при переменном обжатии. Доказано,

что на него существенно влияет критический (нейтральный) угол, он определяет положение нейтрального сечения, которое делит очаг деформации на зоны отставания и опережения (пояснения к данным терминам даются ниже).

На рисунках 3.6 представлены: векторная диаграмма скоростей перемещения металла и валков на контактной поверхности (рис. 3.6, а) и изменения горизонтальных составляющих окружной скорости валков (кривая 1) и скорости перемещения металла на контактной поверхности (кривая 2) на рис. 3.6, б.

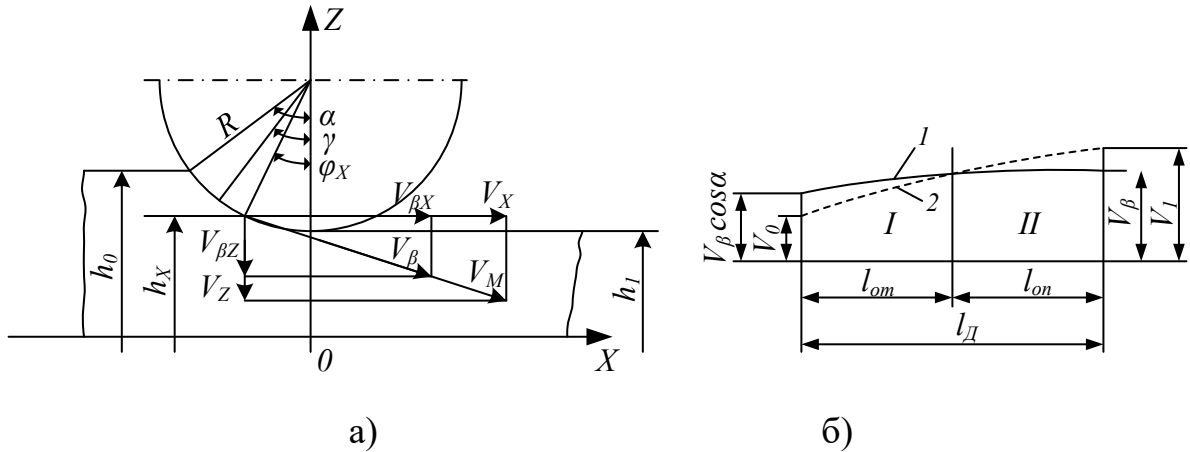


Рисунок 3.6 – Изменения углов и скоростей в очаге деформации (а) и разделение очага на зоны отставания I и опережения II (б) [160]

Исходя из условий сплошности деформируемого металла должно соблюдаться равенство секундных объемов, которое для двумерной прокатки без учета уширения имеет вид  $V_0 h_0 = V_x h_x = V_1 h_1$  где  $V_0, V_x, V_1$  – горизонтальные составляющие скорости перемещения металла на контактной поверхности на входе, в текущем сечении и на выходе очага деформации;  $h_0, h_x, h_1$  – высоты раската на входе в этих сечениях.

Из рисунка 4.6, а следует, что  $h_x = h_1 + 2R(1 - \cos \varphi_x)$ , где  $\varphi_x$  – текущий центральный угол. С учетом этих уравнений получено выражение

$$V_x = \frac{V_0 h_0}{h_1 + 2R(1 - \cos \varphi_x)} = \frac{V_1 h_1}{h_1 + 2R(1 - \cos \varphi_x)}.$$

Анализ данного уравнения показывает, что при стационарном режиме прокатки величина  $V_x$  изменяется от  $V_0$  до  $V_1$ , при этом для  $\varphi_x = \alpha$ , скорость  $V_x = V_0$ , а для  $\varphi_x = 0$  скорость  $V_x = V_1$ . Таким образом, на входе в очаг деформации

величина  $V_x=V_0$  имеет минимальное значение, на выходе  $V_x=V_1$  имеет максимальное значение, а в очаге деформации при  $\alpha > \varphi_x > 0$  эта переменная принимает промежуточные значения.

На рисунке 3.6, б показано изменение горизонтальных составляющих скорости металла и окружной скорости валков на контактной поверхности по длине очага деформации. Как видно, в начале очага, характеризующемся длиной  $l_{от}$ , имеется зона I, в которой горизонтальная составляющая скорости перемещения металла меньше горизонтальной составляющей окружной скорости валков. Эта часть очага деформации называется зоной отставания. В зоне II, характеризующейся длиной  $l_{оп}$ , горизонтальная составляющая скорости перемещения металла больше горизонтальной составляющей окружной скорости валков. Эта часть очага деформации называется зоной опережения. Таким образом, согласно рисунку 3.6, б, на всей длине очага деформации наблюдается скольжение (различие скоростей) металла относительно поверхности валков.

Относительное скольжение металла на контактной поверхности в текущем сечении очага

$$S_x = (V_x - V_{ex}) / V_{ex} = (V_m - V_e) / V_e, \quad (3.8)$$

Здесь  $V_x = V_m \cos \varphi_x$  – горизонтальная составляющая скорости перемещения металла;  $V_{ex} = V_e \cos \varphi_x$  – горизонтальная составляющая окружной скорости валков;  $V_m$  – тангенциальная скорость перемещения металла на контактной поверхности в текущем сечении.

Точка пересечения кривых 1 и 2 на рисунке 3.6, б, в которой горизонтальные составляющие скорости перемещения металла и окружной скорости равны, соответствует положению сечения на контактной поверхности, которое называется нейтральным или критическим. Это сечение делит очаг деформации на зоны отставания и опережения. В этом сечении  $V_x = V_e \cos \gamma$ , где  $\gamma$  нейтральный (критический) угол.

Относительное скольжение металла:

- в нейтральном сечении, согласно уравнению (3.8) равно нулю;
- в плоскости входа металла в валки (отставание) при  $\varphi_x = \alpha$

$$S_{OT} = (V_0 - V_6 \cos a) / (V_6 \cos a),$$

где  $\alpha$  угол захвата;

– в плоскости выхода из валков (опережение) определяется из уравнения (3.8) при  $\varphi_x=0$ :  $S_{OT} = (V_1 - V_6) / V_{II}$ .

Очевидно, что при увеличении либо уменьшении зазора валков нейтральный угол изменяется, соответственно происходит смещение нейтрального сечения, что приводит к изменению протяженности зон опережения и отставания. Это затрудняет расчет усилий (и соответственно моментов) прокатки, а также опережения и отставания.

Как было показано выше, последние параметры влияют на изменение секундных объемов на входе (выходе) горизонтальной клетки, а, следовательно, на горизонтальные усилия в межклетевом промежутке, возникающие при перемещении НУ в процессе профилирования. Поэтому достоверный расчет опережения в данном динамическом режиме важен как с позиций моделирования усилий деформации, так и с точки зрения расчета натяжения (подпора) между вертикальной и горизонтальной клетями.

### **3.4.3. Расчет усилия и момента при прокатке с нарастающим обжатием**

Наиболее полные результаты в данном направлении получены представителями научной школы Белорусского национального технического университета под руководством проф. Исаевича Д.А. Они опубликованы в большом количестве работ, которые находятся в свободном доступе, в том числе, в публикациях ссылки на которые приводятся ниже. Эти исследования приняты за основу при разработке методики расчета давления и момента в режиме профилированной прокатки.

В публикации [161] со ссылкой на более раннюю публикацию [162] утверждается, что для определения усилия прокатки могут быть использованы формулы, пригодные для случая стационарного процесса. В таком случае эту величину находят умножением среднего нормального контактного напряжения на горизонтальную проекцию площади контакта

$$P = p_{\text{ср}} b_{\text{ср}} l_{\text{ср}} , \quad (3.9)$$

где  $b_{\text{ср}}, l_{\text{ср}}$  – средние значения ширины и длины проекции очага деформации;  
 $p_{\text{ср}}$  – среднее нормальное контактное напряжение.

Момент прокатки в валках постоянного радиуса при переменном межосевом расстоянии вычисляют по известной для стационарной прокатки формуле [150]

$$M = 2p_{\text{ср}} b_{\text{ср}} R^2 f(\alpha_k - 2\gamma), \quad (3.10)$$

где  $\gamma$  – нейтральный угол.

Значение среднего нормального контактного напряжения  $p_{\text{ср}}$  определяется по выражению [159]:

$$p_{\text{ср}} = \frac{1}{\alpha_k} \left( \int p_{\varphi_{\text{оп}}} + \int p_{\varphi_{\text{отп}}} \right) d\varphi , \quad (3.11)$$

где  $p_{\varphi_{\text{оп}}}, p_{\varphi_{\text{от}}}$  – нормальные контактные напряжения по дуге касания в зоне опережения на участке  $CD$  и в зоне отставания на участке  $AB$ ;

$$\alpha_k = \sqrt{\Delta h / R} \text{ – угол касания (контакта) валков с металлом [163];}$$

$\varphi$  – текущий центральный угол [164].

В зависимости от положения критического угла  $\gamma$  угол  $\varphi$  (рис. 1) определяется как [161]

$$\varphi = \gamma - \beta \text{ либо } \varphi = \beta - \gamma ,$$

где  $\beta$  – центральный угол, определяющий положение сечения выхода раската из валков (угол клиновидности, показанный выше на рисунке 2.3).

Для случая прокатки с нарастающим обжатием, когда критическое сечение расположено слева от осевой плоскости (рис. 3.6, б), после преобразований получено **уравнение для среднего контактного напряжения**:

$$\frac{p_{\text{ср}}}{2k} = \frac{1}{\alpha_k} \left\{ -\alpha_k + D(\gamma - \beta) \arctg \left( \frac{0.5\sqrt{E}(\beta - \alpha)}{1 + 0.25E\beta\alpha} \right) + (\gamma - \beta) \ln \left( \frac{\frac{h}{R} + \alpha^2}{\frac{h}{R} + \beta^2} \right) + \right. \\ \left. \frac{D}{\sqrt{E}} \ln \left( \frac{\left(1 + \frac{0}{25E\beta^2}\right)(1 + 0.25E\alpha^2)}{[1 + 0.25E(\gamma - \beta)^2]^2} \right) + \left( \frac{2}{\sqrt{\frac{R}{h}}} \right) \left[ \arctg \left( \alpha \sqrt{\frac{R}{h}} \right) + \arctg \left( \beta \sqrt{\frac{R}{h}} \right) \right] \right\} . \quad (3.12)$$

Формулы для вычисления углов и коэффициентов, входящих в это выражение:

$$\alpha = \alpha_k - \beta ; D = \frac{2f(1+\frac{2R}{h})}{\sqrt{1+\frac{4R}{h}}} ; E = 1 + \frac{4R}{h} ; 2k - \text{предел текучести.}$$

После подстановки выражения (3.12) в (3.9) и (3.10) рассчитываются усилие и момент прокатки с нарастающим обжатием.

На рисунке 3.7 приведена структурная схема модели расчета энергосиловых параметров прокатки, построенная с учетом представленных зависимостей. В ней присутствует выражение для расчета критического угла  $\gamma$ . Его расчет также необходим для вычисления контактного напряжения по формуле (3.12). Зависимости для вычисления этого параметра рассматриваются ниже.

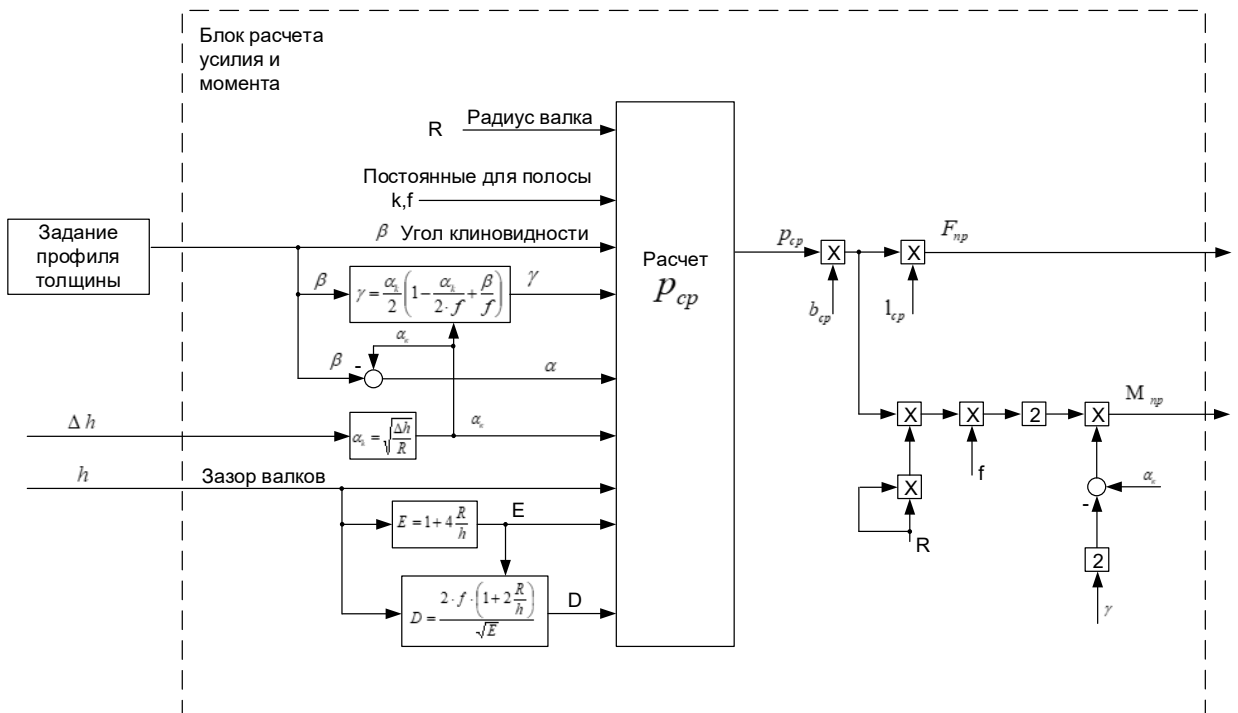


Рисунок 3.7 – Структура блока расчета усилия и момента при деформировании металла валками во время прокатки

### 3.5. Расчет критического угла и опережения

*Анализ известных зависимостей* [54]

Для определения опережения при прокатке используется формула Дрездена, которая при отсутствии натяжения имеет вид

$$S = \left( \frac{r}{h_1} - 0,5 \right) \cdot \left( \frac{h_1^2}{r \cdot \Delta h} \right) \cdot \left( \frac{h_n}{h_1} - 1 \right)^2. \tag{3.13}$$

Опережение зависит от величины нейтрального (критического) угла  $\gamma$  и соотношения толщины полосы  $h_\gamma$  в нейтральном сечении и толщины  $h_1$  на выходе из очага деформации:

$$S_1 = \left( \frac{h_\gamma \cos \gamma}{h_1} \right) - 1, \quad (3.14)$$

Если толщина  $h_\gamma$  неизвестна, рекомендуется применить формулу Головина-Дрездена:

$$S_1 = (R/h_1)\gamma^2 \quad (3.15)$$

Если необходимо учитывать уширение, например, при прокатке толстых полос, то для определения опережения рекомендуется зависимость

$$S_1 = (R/h_1)\gamma^2(1 - R \cdot \gamma/b_1). \quad (3.16)$$

Отставание, т.е. относительное скольжение полосы на входе в валки, без учета уширения рассчитывается по формуле А.И. Целикова:

$$S_0 = 1 - \left[ \frac{h_1 D (1 - \cos \gamma)}{h_0} \right] \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha}. \quad (3.17)$$

С точностью, достаточной для инженерных расчетов, уравнения скоростей металла  $v_0$  на входе и выходе  $v_1$  валков (относительно скорости валков  $v_B$ ) имеют вид:

$$V_0 = V_B (1 - S_0) \quad (3.18)$$

$$V_1 = V_B (1 + S_1). \quad (3.19)$$

В этих выражениях величины опережения и отставания рассчитывают по одной из формул (3.14) – (3.17).

**Выражение для расчета опережения с учетом натяжения**

$$S_1 = \left[ 2 \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_1} \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^{\delta-1}} \right] - 1. \quad (3.20)$$

где  $\delta, \xi_0, \xi_1$  – коэффициенты, зависящие от заднего  $\sigma_0$  и переднего  $\sigma_1$  натяжений, они определяются зависимостями:

$$\delta = \frac{2fl_d}{\Delta h}; \quad \xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{2k_0}; \quad \xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{2k_1},$$

здесь  $2k_0 = 1,15 \sigma_{S0}$ ;  $2k_1 = 1,15 \sigma_{S1}$  – пределы текучести на входе и выходе очага деформации.

В результате *реальная скорость выхода металла из валков при непрерывной прокатке* определяется зависимостью (3.19), которая с учетом (3.20) принимает вид

$$V_1 = V_B \left[ \frac{\xi_0}{\xi_1} \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^{\delta-1} \right]^{1/2 \cdot \delta}. \quad (3.21)$$

Полученное выражение, по сути, характеризует влияние переднего и заднего натяжений на разницу между скоростью вращения валков и реальной скоростью движения металла на выходе из клетки.

### *Расчет при переменном обжатии*

При прокатке полос переменной толщины с нарастающим обжатием происходит непрерывное изменение расстояния между двумя вращающимися валками (рисунок 3.8) [161]. В связи с этим изменяются геометрические размеры очага деформации, в том числе критический угол. Поэтому получение полос переменной толщины с заданными размерами требует определения критического угла на разных участках длины заготовки, поскольку от него зависит величина опережения, а, значит, и точность формируемого профиля.

При продольной прокатке опережение, сопровождающее процесс, изменяется по мере увеличения или уменьшения обжатия [165]. От величины опережения существенно зависит точность прокатки с переменным обжатием [166]. Кроме того, выше было показано, что от опережения и соответственно отставания зависит величина усилий в межклетевом промежутке, проявляющихся в виде натяжения либо подпора.

Для расчетов критического угла и опережения используют сложные методики, например, методику расчета переменных скоростей [157]. В публикациях [163] со ссылкой на работу [150], был предложен подход, согласно которому формула для расчета опережения может быть получена из закона сохранения потоков металла. Допускается, что в этом случае не будет изменяться величина критического угла  $\gamma$ . Кроме того, учет опережения выполняется на различных фиксированных участках полосы.



Принципы сохранения объемов или масс справедливы для расчета критического угла и соответственно опережения и отставания в стационарных очагах деформации. При этом могут учитываться влияние натяжения, уширения и некоторых других технологических факторов [30]. Изменения зазора валков в этом случае во внимание не принимаются.

Предлагаемая методика расчета названных параметров основана на постоянстве потоков металла, проходящих через соответствующие сечения очага деформации в произвольный момент времени. Этот принцип обоснован в работах [150, 167] и поясняется схемой, представленной на рисунке 3.8.

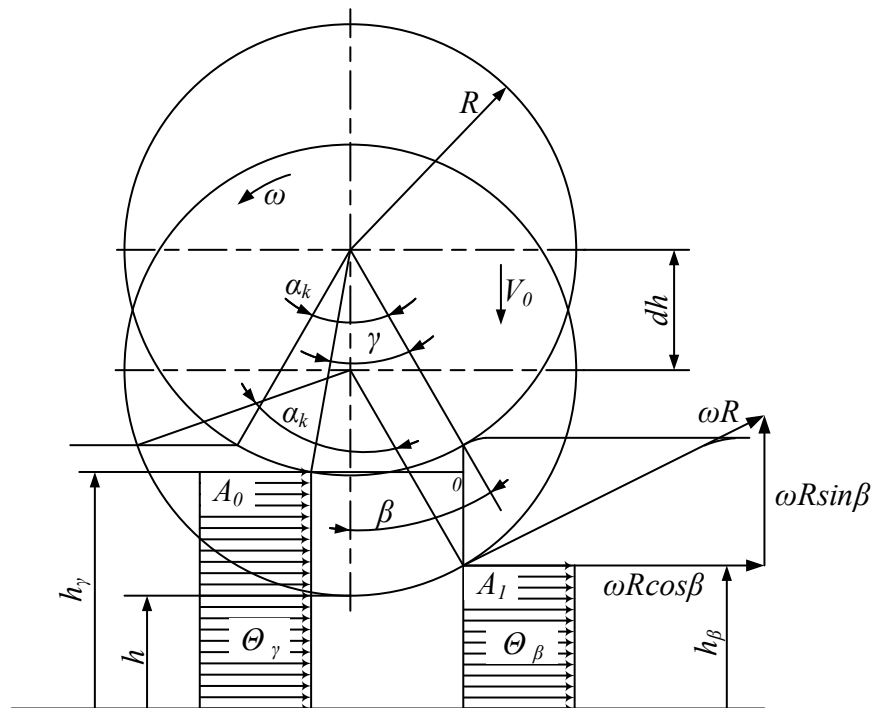


Рисунок 3.8 – Схема потоков скорости относительно критического сечения в нестационарном очаге деформации [166]

Для любого момента времени согласно рисунку 3.8 справедливо условие

$$\Theta_{\beta} = \Theta_{\gamma}, \quad (3.22)$$

где  $\Theta_{\beta}$  и  $\Theta_{\gamma}$  – потоки металла, проходящие через соответствующие сечения очага деформации в произвольный момент времени.

В критическом сечении очага деформации поток продольной скорости металла описывается уравнением

$$\Theta_{\gamma} = h_{\gamma} b_{\gamma} R \omega \cos(\gamma - \beta), \quad (3.23)$$

где  $h_{\beta}$  и  $h_{\gamma}$  – высота и ширина раската в критическом сечении.

Соответственно поток в сечении выхода металла из валков:

$$\Theta_{\beta} = h_{\beta} b_{\beta} R (1 + S) \omega \cos \beta, \quad (3.24)$$

где  $\beta$  – угол, определяющий положение сечения выхода;  $\beta > 0$  при возрастании обжатия и  $\beta < 0$  при уменьшении обжатия.

Получено уравнение для определения мгновенного опережения металла в сечении выхода из очага деформации при прокатке переменного сечения с нарастанием обжатия

$$S = \frac{\{h_{\beta} + 2R[\gamma \sin \beta - \cos(\gamma - \beta) + \cos \beta]\} \cos(\gamma - \beta)}{h_{\beta} \cos \beta} - 1. \quad (3.25)$$

После преобразований и перехода от тригонометрических функций к их аргументам это выражение приобретает вид:

$$S = \frac{\left\{ 1 + \frac{R}{h} \beta^2 + 2 \frac{R}{h} \left[ \gamma \beta + \frac{(\gamma - \beta)^2}{2} - \frac{\beta^2}{2} \right] \right\} \left[ 1 - \frac{(\gamma - \beta)^2}{2} \right]}{\left( 1 + \frac{R}{h} \beta^2 \right) \left( 1 - \frac{\beta^2}{2} \right)} - 1. \quad (3.26)$$

Пояснения к обозначениям толщины  $h_{\beta}$  раската на выходе из валков и величины  $h$  приведены на рисунке 3.8.

Входящий в выражение (3.26) критический угол определяется (с учетом знака  $\beta$ ) по уравнению, которое получено из условия равновесия сил в очаге деформации. Для случая прокатки с нарастающим обжатием оно записывается как [167, 168]

$$\gamma = \sqrt{\frac{h}{R}} \operatorname{tg} \left\{ 0,5 \left[ \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{h}{R}} a \right) - \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{h}{R}} \beta \right) \right] - \left( \frac{0,25}{f} \right) \sqrt{\frac{h}{R}} \ln \left[ \frac{\left( \frac{h}{R} + a^2 \right)}{\left( \frac{h}{R} + \beta^2 \right)} \right] \right\} + \beta, \quad (3.27)$$

После упрощения это выражение примет вид

$$\gamma = \frac{\alpha_k}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_k}{2f} + \frac{\beta}{f} \right). \quad (3.28)$$

Зависимости (3.27), (3.28) здесь приводятся без вывода, более подробно они рассмотрены в работах [161, 169].

Таким образом, в результате обоснования приведенных зависимостей можно утверждать, что *теория прокатки в приводных валках постоянного*

*радиуса с изменяющимся межвалковым зазором в процессе деформирования металла получила применение для профилированной прокатки на толстолистовых станах.*

### 3.6. Разработка модели взаимосвязанных электроприводов горизонтальной и вертикальной клетей

Структурная схема модели представлена на рисунке 3.9. За основу при ее разработке приняты структуры взаимосвязанных электромеханических систем вертикальной и горизонтальной клетей и схемы моделей гидравлических НУ в структуре САРТ, рассмотренные в п. 2.3.

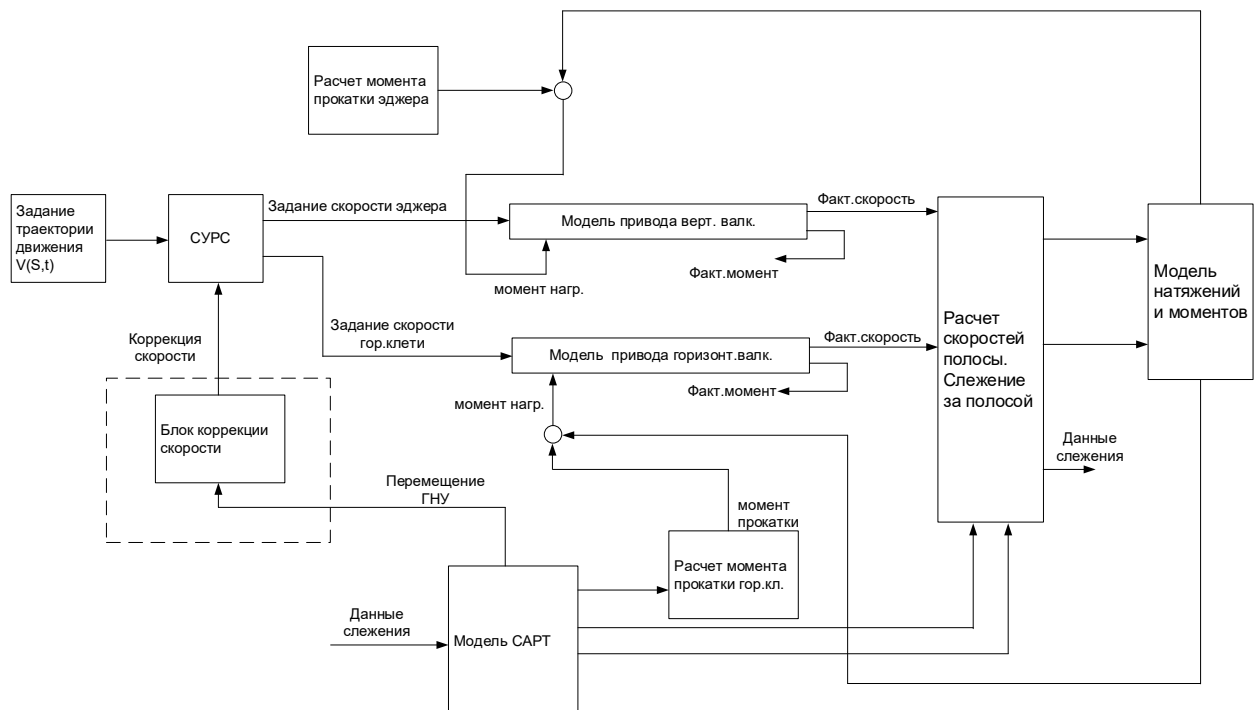


Рисунок 3.9 – Структура модели взаимосвязанных электротехнических систем вертикальных и горизонтальных клетей с блоком коррекции скорости электропривода горизонтальных валков

В отличие от модели, представленной на рисунке 2.7, эта структура содержит модели раската в промежутке «клеть – эджер», модель вычисления натяжения (подпора) и блоки расчета моментов прокатки в вертикальных и горизонтальных валках. В структуре они распределены по блокам «Модель натяжений и моментов», «Расчет скоростей полосы. Слежение за полосой», «Расчет момента прокатки горизонтальной клетки», «Расчет момента прокатки

эджера». Также отличием, относящимся к разработанному способу, является включение блока коррекции скорости эджера, который выделен контуром.

### **Модель влияния натяжения**

Выражения, представленные в п.п. 3.4 –3.6, использованы для моделирования энергосиловых параметров при деформации горизонтальной клетки в проходах с профилированием. Они входят в блок расчета моментов прокатки клетки, показанный в схеме на рисунке 3.10. Эта структура поясняет формирование моментов нагрузки двигателей с учетом натяжения в промежутке. В ней в общем виде показано влияние переднего либо заднего натяжений на моменты нагрузки двигателей клетки и эджера. Блок расчета момента прокатки эджера построен на зависимостях (3.6), (3.7).

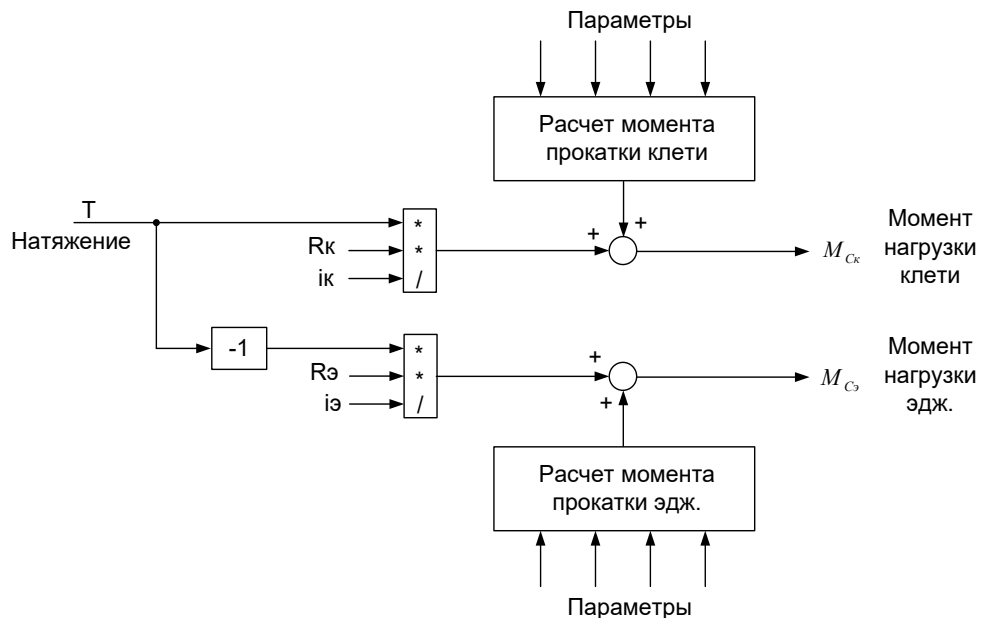


Рисунок 3.10 – Структура модели вычисления моментов нагрузки с учетом натяжения:  $R_k$ ,  $R_э$  – радиусы валков клетки и эджера;  $i_k$ ,  $i_э$  – коэффициенты редукторов

Динамическая модель, разработанная для расчета усилия и момента прокатки при изменении межвалкового зазора, представлена на рисунке 3.11. Управляющим сигналом является задание на толщину раската в проходах с профилированием. Также задается угол конуса  $\beta$ , характеризующий «наклон» участков переменной толщины на концах раската, показанный на рисунке 2.3

в интервалах времени  $t_1-t_2$  и  $t_3-t_4$ . Остальные блоки, за исключением блока расчета усилия и момента, соответствуют моделям гидравлических НУ в структуре САРТ, рассмотренным в п. 2.4. Структура блока расчета усилия и момента при деформировании металла валками в проходах с профилированием приведена на рисунке 3.7.

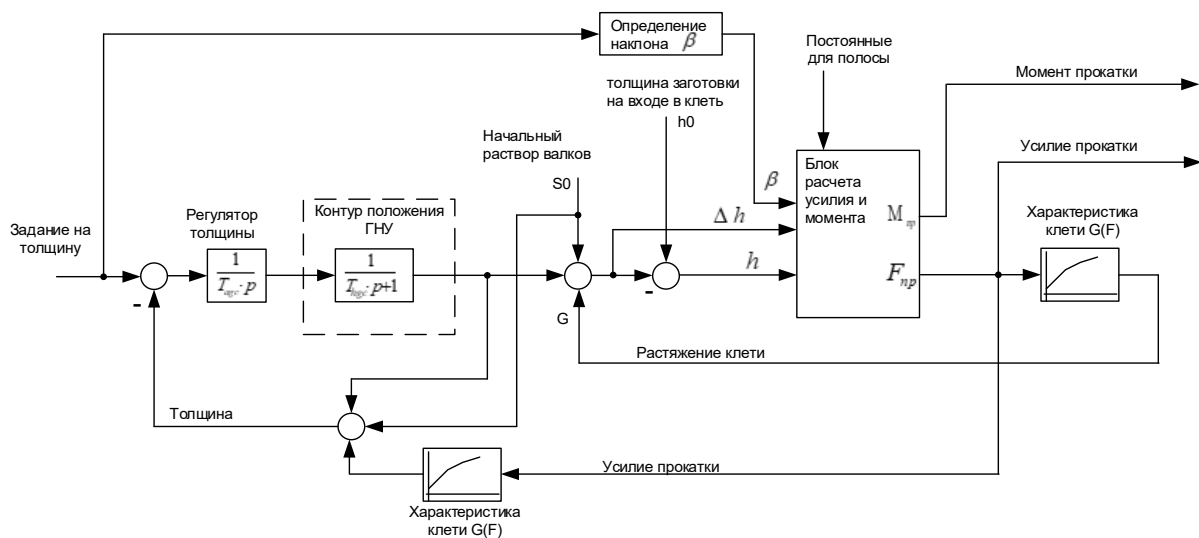


Рисунок 3.11 – Структура модели вычисления энергосиловых параметров при прокатке с изменением межвалкового зазора

В модели (рис. 3.11) также присутствует структура САРТ, представленная на рисунке 2.14, а. На рисунке 3.9 она входит в структуру блока «Модель натяжений и моментов». Кроме того, в структуру на рис. 3.9 входит блок расчета скоростей полосы, который совместно с этим блоком представляет модель формирования натяжения в межклетевом промежутке, которая рассматривается ниже.

### *Модель межклетевого промежутка*

Расчетная схема горизонтальной и вертикальной клетей с учетом усилий в межклетевом промежутке представлена на рисунке 3.12 [2, 170]. Она поясняет изменение свойств раската на участках между очагами деформации (клетями).

Вследствие несоответствия мгновенных значений скоростей выхода раската из предыдущей и входа в последующую клетки возникает натяжение (подпор). Под действием этих сил раскат упруго деформируется: при натяжении – удлиняется и утончается; при подпоре – укорачивается и уширяется. При этом

наиболее приемлемой формой математического описания данных процессов являются интегральные уравнения [152]:

$$T_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{6ыx}}{L_{T_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_{(i+1)}}^{6x} - V_{n_i}^{6ыx}) \cdot dt - T_{нач_i}, \quad (3.29)$$

$$Q_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{6x}}{L_{Q_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_i}^{6x} - V_{n_{(i-1)}}^{6ыx}) \cdot dt - Q_{нач_i}. \quad (3.30)$$

Здесь  $T_i$  и  $Q_i$  – переднее и заднее натяжения в  $i$ -м межклетевом промежутке.

После перехода к операторным изображениям они принимают вид

$$p \cdot T_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{6ыx}}{L_{T_i}} \cdot (V_{n_{(i+1)}}^{6x} - V_{n_i}^{6ыx}), \quad (3.31)$$

$$p \cdot Q_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{6x}}{L_{Q_i}} \cdot (V_{n_i}^{6x} - V_{n_{(i-1)}}^{6ыx}). \quad (3.32)$$

Согласно этим выражениям в установившемся режиме

$$T_i = Q_{(i+1)}. \quad (3.33)$$

При прокатке с натяжением  $T_i = Q_{(i+1)} > 0$ , а при подпоре  $T_i = Q_{(i+1)} < 0$ .

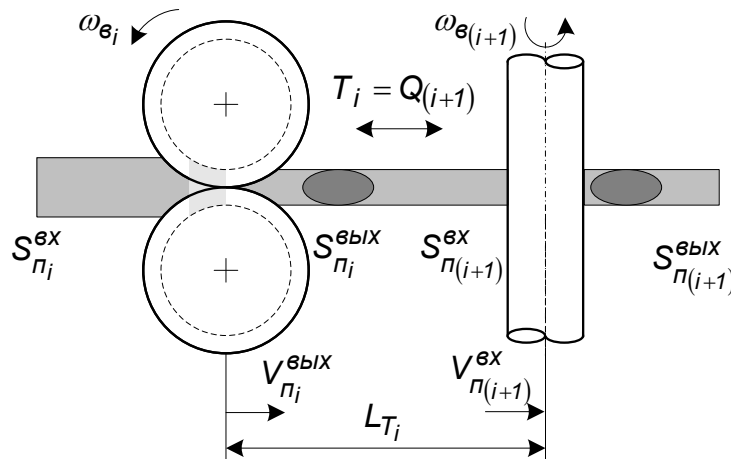


Рисунок 3.12 – Расчетная схема межклетевого промежутка горизонтальной и вертикальной клеток

На рисунке 3.13 приведена структурная схема динамической математической модели данного промежутка, составленная по уравнениям (3.31) и (3.32). Она определяет взаимосвязь между четырьмя входными координатами  $V_{Э}$ ,  $V_{К}$ ,

$S_{\text{Э}}$ ,  $S_{\text{К}}$  (расшифровка обозначений дана в подписях под рисунком) и выходной координатой – положительным либо отрицательным натяжением  $T$ .

Ниже рассматриваются результаты моделирования процессов, полученные с использованием модели, представленной на рисунке 3.9 с учетом разработанных моделей расчета энергосиловых параметров в режиме профилирования (рис. 3.7) и взаимосвязи вертикальных и горизонтальных валков через металл (рис. 3.13).

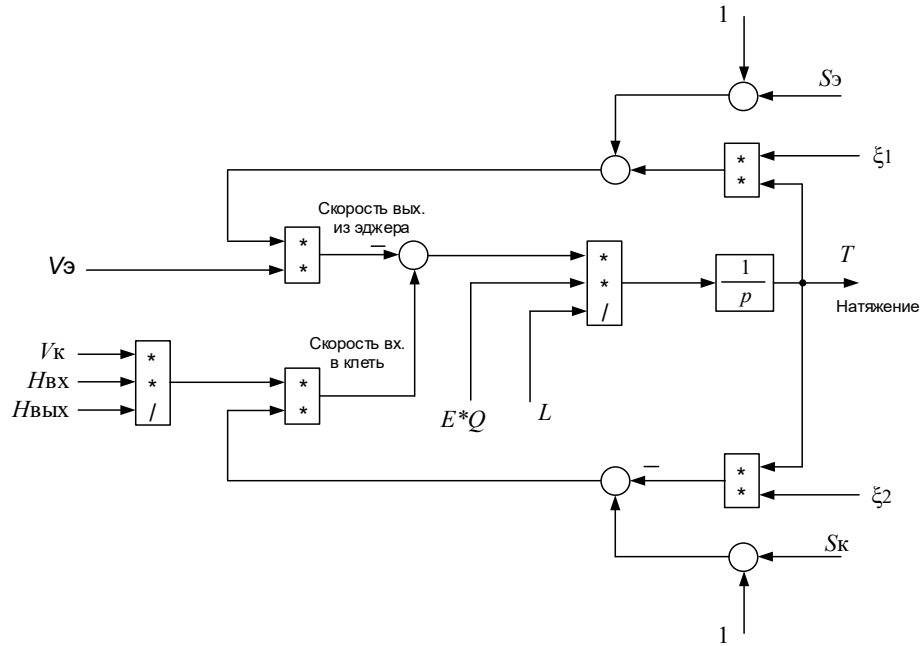


Рисунок 3.13 – Схема модели раската в промежутке «клетка – эджер»:

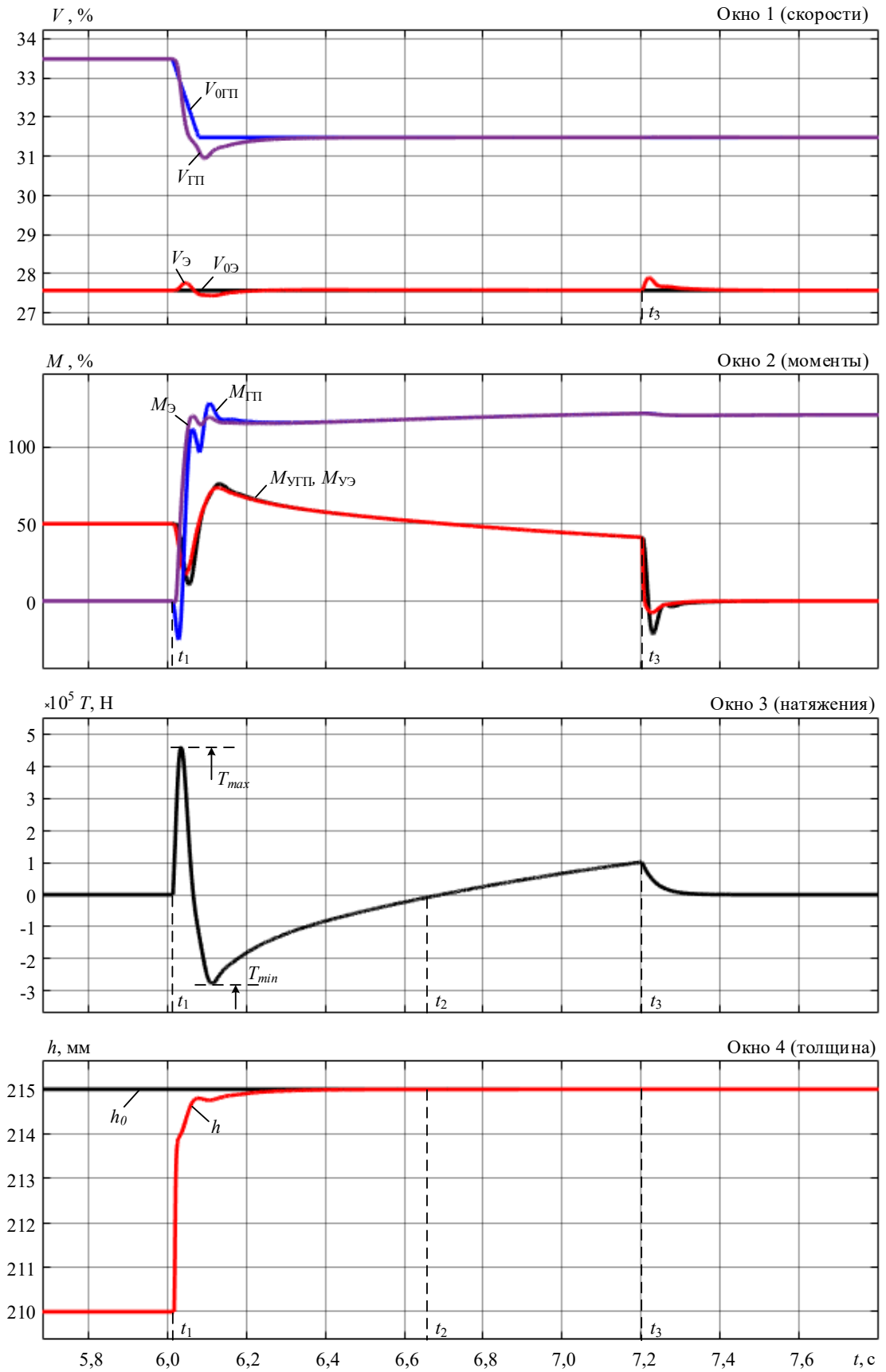
$V_{\text{Э}}$ ,  $V_{\text{К}}$  – окружные скорости валков эджера и клетки;  $H_{\text{ВХ}}$ ,  $H_{\text{ВЫХ}}$  – толщины на входе и выходе клетки;  $L$  – длина промежутка клетка – эджер;  $Q$  – сечение раската в промежутке;  $E$  – модуль упругости полосы;  $S_{\text{Э}}$ ,  $S_{\text{К}}$  – опережения металла при прокатке с нулевым натяжением на выходе из эджера и на выходе клетки;  $T$  – натяжение в промежутке;  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  – коэффициенты пропорциональности между опережением и натяжением (зависят от свойств полосы)

### 3.7. Результаты моделирования

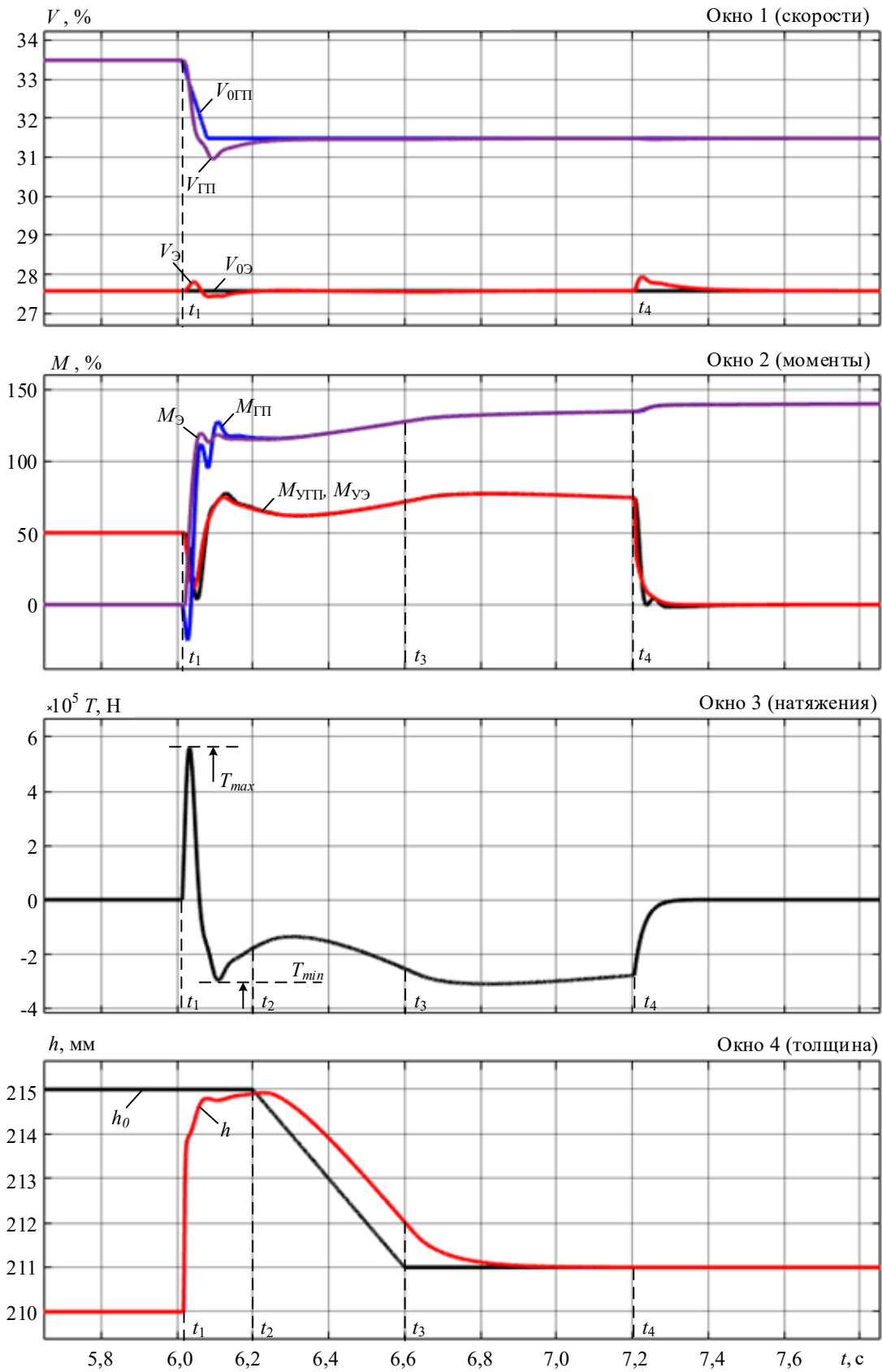
Характерные временные зависимости, полученные в результате моделирования режима прокатки за один проход, представлены на рисунке 3.14. Приняты обозначения: окно 1 – заданные  $V_{0\text{ГП}}$ ,  $V_{0\text{Э}}$  и актуальные  $V_{\text{ГП}}$ ,  $V_{\text{Э}}$  скорости

электроприводов клетки и эджера (в % максимальной); окно 2:  $M_{ГП}$ ,  $M_{Э}$  – электромагнитные моменты двигателей главного привода горизонтальной клетки и эджера;  $M_{уГП}$ ,  $M_{уЭ}$  – упругие моменты на шпинделях (в % номинальных); окно 3:  $T$  – межклетевое натяжение (подпор), Н; окно 4 – задание толщины  $h_0$  и фактическая толщина  $h$  раската на входе клетки, мм.





а)



б)

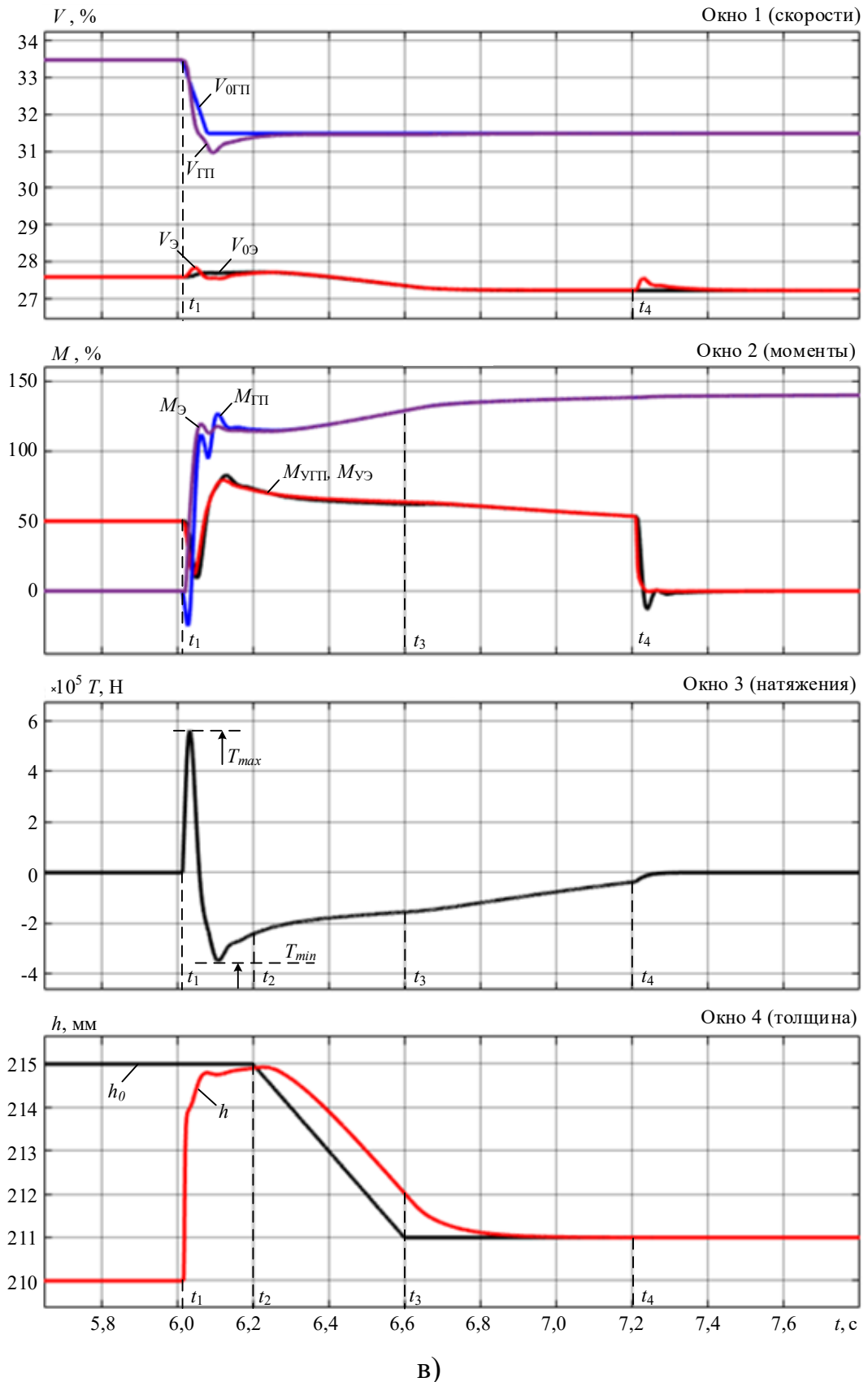


Рисунок 3.14 – Координаты электроприводов, натяжение и толщина в проходах без профилирования (а), с профилированием после захвата без коррекции (б) и то же с коррекцией скорости эджера (в)

Сравниваются три случая:

1. Обычная прокатка без изменений толщины за счет регулирования зазора (рис. 3.14, а).
2. Прокатка с профилированием за счет перемещения НУ без коррекции скоростей валков вертикальной клетки (рис. 3.14, б).
3. Прокатка при реализации разработанного способа согласования скоростей валков за счет коррекции скорости электропривода вертикальной клетки при перемещении НУ (рис. 3.14, в).

В представленном разделе не ставится задача анализа переходных процессов при захвате раската валками. Как отмечалось выше, эти вопросы исследованы в диссертациях [2, 115] и в авторских публикациях, в том числе написанных при участии автора [109, 116, 171, 172]. Исследуемой задачей является сопоставление переходных процессов натяжения (подпора) в исходной системе, в режимах профилирования при проектной настройке, и при исполнении разработанного алгоритма согласования скоростей валков.

При прокатке без профилирования (рис. 3.14, а) толщина  $h_0$  раската (окно 4) не изменяется. Непосредственно после захвата, происходящего в момент  $t_1$ , возникают динамические отклонения натяжения в диапазоне  $T_{\max}=(+50)-T_{\min}=(-30)$  т – окно 3. Такой большой диапазон отклонений натяжения обусловлен значительным рассогласованием линейных скоростей валков и эджера. Заданные скорости (окно 1) составляют 33,5% – для привода клетки и 27,5% – для привода эджера.

Момент двигателя клетки  $M_{ГП}$  (окно 2) нарастает до установившегося значения практически скачком и далее не изменяется. Более мощный двигатель клетки «не чувствует» переходных процессов натяжения при принудительной деформации металла валками. Далее происходит самовыравнивание натяжения (окно 3), оно стабилизируется на уровне 100 кН (10 т), что является предельно допустимым значением [173].

В интервале  $t_2-t_3$  имеет место подпор вертикальных валков горизонтальными, что нежелательно по техническим условиям. Поскольку заданная скорость валков клетки больше скорости валков эджера (на 6%), натяжение  $T$  по

окончании переходного процесса должно стремиться к положительному значению, что мы видим в окне 3.

В режиме профилированной прокатки (рис. 3.13, б) захват также происходит в момент  $t_1$ , далее в интервале  $t_2-t_3$  осуществляется профилирование раската горизонтальными валками. Задание толщины  $h_0$  (окно 4) уменьшается от 215 до 211 мм в течение 0,4 с. Такое изменение соответствует реальным процессам на стане. После этого до момента окончания профилирования ( $t_4$ ) происходит прокатка в квазиустановившемся режиме. За исключением первоначального броска, натяжение  $T$  (окно 3) изменяется в пределах (-20)–(-30) т, и, в отличие от рис. 3.14, а, не приходит к нулевому значению. Подпор имеет место в течение всего прохода, поскольку согласования скоростей ВВ и ГВ не осуществляется.

Момент двигателя клетки  $M_{ГП}$  (окно 2) по окончании профилирования в момент  $t_3$  незначительно возрастает, что связано с увеличением обжатия (окно 4). Момент двигателя эджера  $M_{Э}$  увеличивается примерно на 10% вследствие возникновения подпора (окно 4). В течение всего времени прокатки имеет место недопустимый подпор, что может привести к возникновению аварийной ситуации.

Из зависимостей, представленных в окне 4, следует, что фактическая толщина  $h$  отстает по времени от сигнала задания  $h_0$  примерно на 0,1 с. Это приводит к ошибке регулирования толщины  $\Delta h=1$  мм, что составляет около 0,5% заданного значения 211 мм. Данный недостаток подтверждает целесообразность регулирования толщины с предупреждением и внедрения САРТ, рассмотренной в предыдущем разделе.

Преимуществом разработанного способа (рис. 3.14, в) является согласование скоростей вертикальных и горизонтальных валков в режиме изменения межвалкового зазора. Натяжение  $T$  (окно 3) к моменту  $t_4$  окончания прокатки приближается к первоначально заданному нулевому значению. Это происходит за счет коррекции задания  $V_0(\%)$  и соответственно фактической скорости  $V(\%)$  электропривода эджера (окно 1).

Переходные процессы всех координат за исключением натяжений (подпора) во всех трех случаях имеют идентичный характер. Это говорит об отсутствии влияния коррекции скорости электропривода вертикальной клетки на усилия прокатки, моменты двигателей и шпинделей и динамические показатели при захвате.

В целом, результаты моделирования позволяют рекомендовать разработанный способ согласования скоростей электроприводов горизонтальной и вертикальной клетей к внедрению на стане 5000 после проведения промышленных экспериментов.

### ВЫВОДЫ

1. Рассмотрен известный способ согласования скоростей электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей в режиме перемещения гидравлических НУ, обеспечивающий реализацию принципа «постоянства массы» металла в межклетевых промежутках, получивший развитие в диссертации [2]. В качестве недостатков отмечены следующие:

1.1. Согласование скоростей валков вертикальной и горизонтальной клетей осуществляется только при перемещении НУ. Исходное различие скоростей не учитывается и не компенсируется, что может привести к возникновению недопустимых натяжений либо подпора в межклетевом промежутке.

1.2. Не было выполнено исследование влияние перемещения НУ на скорость металла на входе в клеть. Проведено моделирование процессов только при изменении скорости электропривода валков горизонтальной клетки. Это не является достаточным, поскольку обеспечивает лишь качественную картину влияния компенсации рассогласования скоростей на натяжение (подпор) в промежутке.

2. Разработан способ ограничения силового взаимодействия электромеханических систем горизонтальной и вертикальной клетей в режиме профилированной прокатки. Отличительными признаками являются следующие:

– при изменении зазора валков, вызванном перемещением гидравлических НУ, осуществляется регулирование скорости электропривода валков вертикальной клетки пропорционально приращению линейной скорости металла на входе в горизонтальную клеть;

– приращение линейной скорости металла вычисляется пропорционально его заданной скорости, модулю жесткости клетки, обратно пропорционально толщине раската на входе в клетку и суммарной жесткости металла и клетки.

Представлена функциональная схема системы согласования скоростей ВВ и ГВ, реализующая разработанный способ.

3. Представлена структурная схема математической модели взаимосвязанных электромеханических систем ГВ и ВВ стана 5000. В дополнение к функциональным блокам, рассмотренным в предыдущем разделе, она содержит математическую модель металла в очаге деформации и модель взаимосвязи вертикальных и горизонтальных валков через металл. Модель учитывает влияние изменения натяжения в межклетевом промежутке и предназначена для исследования переходных процессов в режимах регулируемого формоизменения раската.

4. Для учета изменения опережения/отставания при перемещении НУ использованы положения теории прокатки в приводных валках постоянного радиуса с изменяющимся межвалковым зазором в процессе деформирования металла. Теория получила развитие в качестве приложения для толстолистовых станов в виде уточненных аналитических зависимостей для расчета энергосиловых параметров прокатки и опережения в проходах с профилированием раскатов горизонтальными валками.

5. В качестве результатов исследования представлены расчетные зависимости, полученные при моделировании прокатки за один проход для следующих случаев:

- прокатка без профилирования (без изменений толщины вследствие регулирования зазора валков);
- прокатка с профилированием без коррекции скоростей валков вертикальной клетки (согласно проектному варианту);
- прокатка при реализации разработанного способа согласования скоростей валков ГВ и ВВ.

Сделан вывод, что переходные процессы всех координат за исключением натяжений во всех случаях имеют идентичный характер. Это говорит об отсутствии влияния коррекции скорости электропривода вертикальной клетки на

усилия прокатки, моменты двигателей и шпинделей и динамические показатели при захвате.

6. В результате сравнительного анализа временных зависимостей подтверждено, что разработанный способ обеспечивает удовлетворительное согласование скоростей вертикальных и горизонтальных валков в режиме изменения межвалкового зазора. Натяжение приближается к первоначально заданному значению через 0,6 с после окончания профилирования. Это подтверждает ограничение силовой связи валков через металл и снижение подпора в межклетевом промежутке.



## Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТОК НА СТАНЕ 5000

В соответствии с поставленными задачами на завершающем этапе работы над диссертацией должны быть выполнены экспериментальные исследования разработанных технических решений и их внедрение в опытно-промышленную эксплуатацию.

С рамках достижения этой цели алгоритм автоматического регулирования толщины, в котором реализован принцип предупредления, внедрен в опытно-промышленную эксплуатацию в программном обеспечении промышленного контроллера (ПК) клетки стана 5000. В настоящей главе представлены результаты экспериментальных исследований точности регулирования толщины в переходном режиме, вызванном перемещением НУ во время прокатки. Поставлена задача сравнения осциллограмм с результатами экспериментальных исследований при проектной настройке САРТ, представленными в п. 1.6. Также целесообразно провести сравнение с результатами моделирования, приведенными в п. 2.5.

В качестве перспективного приложения разработанных технических решений в разделе 1 была названа разработка системы управления гидравлическим зазором валков с целью ограничения ударных нагрузок при входе раската в клеть.

Это обеспечит ограничение горизонтальной составляющей динамического момента, которая зависит от нескольких факторов:

- соотношения скорости раската и линейной скорости валков;
- величины зазора, установленного для текущего прохода;
- формы переднего конца раската;
- температуры и других параметров.

Учет и компенсация влияния всех этих факторов одновременно в реальных условиях невозможны. Поэтому в качестве решения проблемы улучшения динамики обосновано предварительное разведение валков перед входом металла в клеть с последующим возвращением нажимных устройств на уровень, обеспечивающий заданное обжатие.

Режим перемещения валков во время прокатки аналогичен профилированию широких граней горизонтальными валками при формировании профиля «кость». Поэтому экспериментальные исследования алгоритма управления положением НУ после захвата позволят сделать выводы о перспективах практической реализации разработанных алгоритмов управления электро- и гидроприводами в режиме профилированной прокатки.

В завершение диссертации целесообразно дать оценку технико-экономической эффективности внедрения результатов, подкрепленную расчетом экономического эффекта. Также следует дать рекомендации по внедрению разработанных технических решений на действующих прокатных станах.

#### **4.1. Экспериментальные исследования точности регулирования толщины в САРТ с предупредлением**

Выполнены экспериментальные исследования точности регулирования толщины в режиме профилированной прокатки. Для этого в алгоритме САРТ реализован разработанный способ предупредления, представленный в разделе 2. Проведены экспериментальные исследования прокатки раскатов различного сортамента. Характерные осциллограммы представлены на рисунке 4.1.

В результате их анализа сделаны следующие выводы:

1. На осциллограммах в окне 1 сдвиг между заданием и актуальной толщиной  $\Delta t_T \approx 0,1$  с, т.е. по сравнению с рисунком 1.17 он уменьшился в 2 раза. Это обеспечено за счет реализации предупредления. Ошибка регулирования  $\Delta h_T = 1$  мм, снизилась также в 2 раза и составляет 0,4% установившегося значения.

2. Поскольку задача повышения быстродействия системы лыжеобразования и РДН в данном случае не решалась, графики моментов ВГП и НГП (окно 2) аналогичны графикам, представленным на рисунке 1.7. Рассогласование моментов не изменилось. Способы устранения данного недостатка рассмотрены в диссертации [2].

3. Представленные осциллограммы соответствуют расчетным зависимостям, приведенным на рисунке 2.15. Это косвенно подтверждает адекватность

модели объекту и достоверность выводов, сделанных по результатам моделирования.

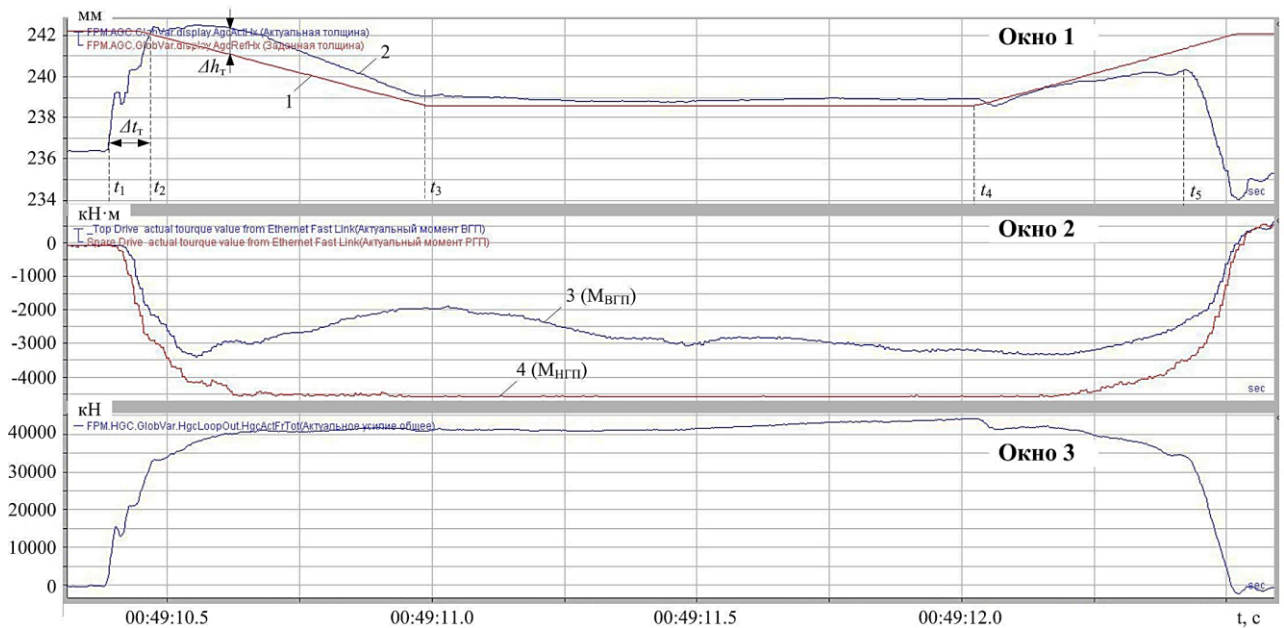


Рисунок 4.1 – Осциллограммы параметров прокатки при разработанном алгоритме САРТ (обозначения соответствуют принятым на рисунке 1.17)

В целом, результаты экспериментов подтвердили повышение точности регулирования толщины на головном и, как видно из рисунков 1.17 и 4.1, хвостовом участках в режиме профилированной прокатки. Это подтверждает правильность выбора структуры САРТ и оптимальную настройку регулятора преуправления.

#### 4.2. Реализация способа согласования скоростей электроприводов клетей

Схема системы вычисления сигнала толщины в структуре САРТ стана показана на рисунке 2.4, а. Воздействие, формирующее перемещение гидравлических НУ при профилированной прокатке, показано в виде сигнала ACS. Он суммируется с сигналом коррекции зазора на головном и хвостовом участках и компенсирующими воздействиями. Суммарный сигнал подается на вход регулятора положения гидравлических НУ.

Для реализации разработанного способа эта схема преобразуется в рисунок 4.2. Для этого она дополняется звеньями, выделенными контуром. Регулирующий сигнал вычисляется по выражению (3.2) и подается в схему задания

толщины, реализованную в программе промышленного контроллера. Это обеспечивает пропорциональное регулирование скорости  $\Delta V_0$  при возникновении приращения зазора валков  $\Delta S_0$ . В результате осуществляется автоматическое согласование скорости металла на входе в горизонтальную клеть и линейной скорости валков вертикальной клетки.

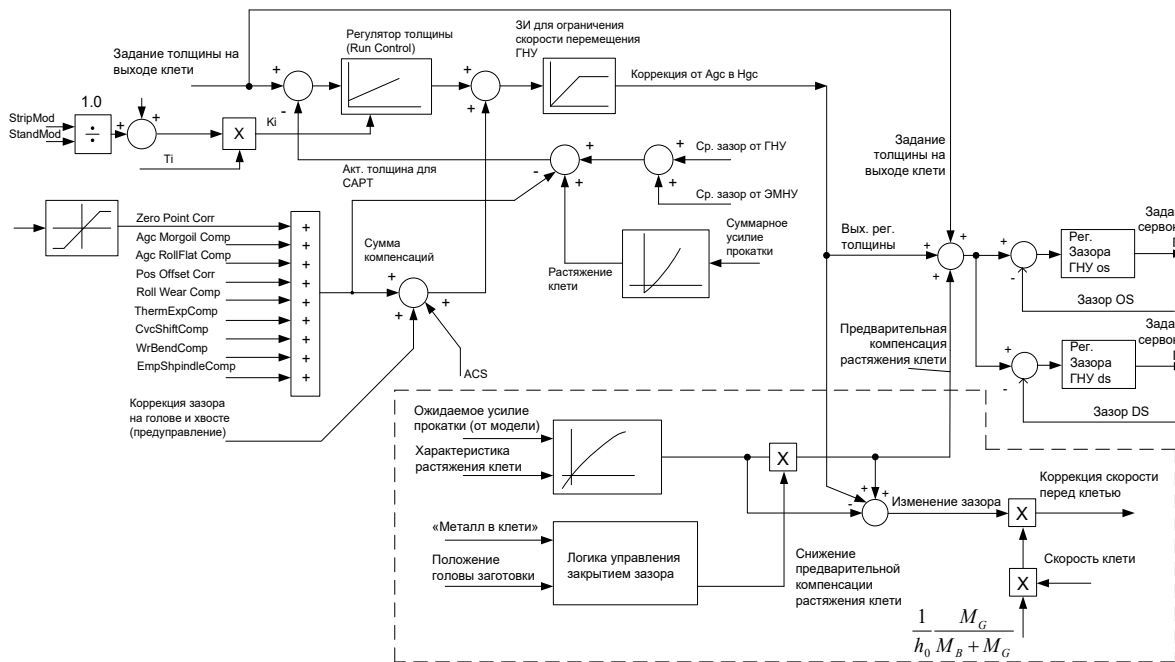


Рисунок 4.2 – Функциональная схема расчета сигнала задания толщины в CAPT стана 5000

### Результаты эксперимента

На рисунке 4.3 представлены осциллограммы координат гидравлических НУ и скоростей электроприводов в проходе с профилированием. Как следует из графиков в окне 1, в данном проходе формируется конический профиль на головном и хвостовом участках проката. Это обеспечивается перемещением НУ со стороны привода и со стороны оператора, показанным в окне 2. В окне 3 показано усилие прокатки, которое к окончанию динамического процесса изменения зазора увеличивается до 25 МН. В окне 4 представлены осциллограммы заданных и актуальных скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков. В данном эксперименте осуществляется автоматическая коррекция скоростей этих электроприводов во время перемещения нажимных устройств. Однако в связи с тем, что величина обжатия при профилировании

составляет менее 2% заданной толщины, коррекцию скорости на осциллограммах в окне 4 визуально отследить затруднительно.

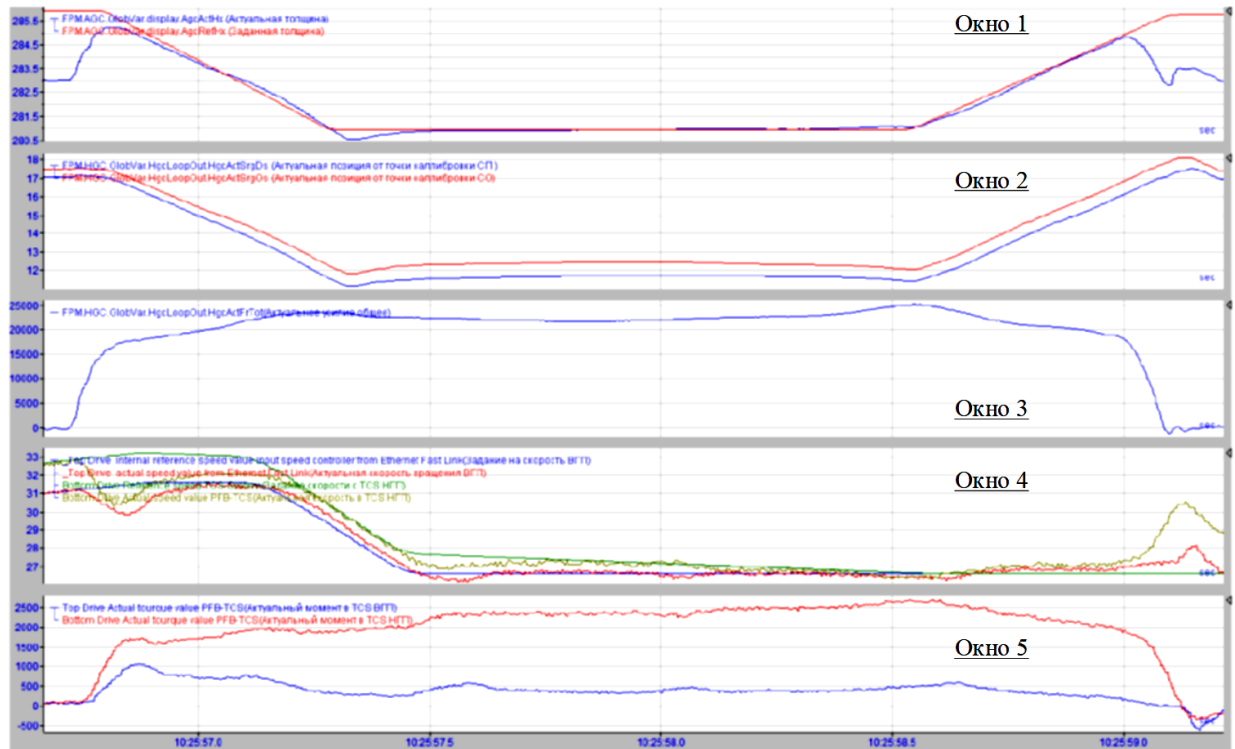


Рисунок 4.3. Осциллограммы параметров прокатки в проходе с профилированием: окно 1 – заданная и фактическая толщина, мм; окно 2 – зазор НУ, мм; окно 3 – фактическое усилие прокатки, кН; окно 4 – заданные и фактические скорости электроприводов, об/мин; окно 5 – фактические моменты ВГП и НГП, кН·м

Результаты длительных экспериментальных исследований подтвердили, что при реализации разработанного способа осуществляется автоматическое регулирование скорости вертикальных валков пропорционально изменению скорости металла на входе в горизонтальные валки при их сведении либо разведении. Это обеспечит постоянство объема металла в межклетевом промежутке, что является необходимым условием совместной прокатки в двух клетях. За счет этого обеспечивается снижение подпора, вызванного неравенством объемов металла на выходе из вертикальных валков и на входе в горизонтальные валки.

В целом, результаты экспериментов подтвердили удовлетворительную точность регулирования положения гидравлических НУ и толщины раската.

Более точное согласование скорости перемещения НУ и линейной скорости металла обеспечивает повышение точности формирования профиля «кость». Это позволяет получить прокат с улучшенными геометрическими размерами.

### **4.3. Способ упреждающего регулирования зазора валков перед захватом**

#### *Обоснование разработки*

Как показали экспериментальные исследования, проведенные на стане, прокатка заготовок из труднодеформируемых марок стали осуществляется с нагрузками, значительно превышающими номинальные. При этом моменты двигателей верхнего и нижнего валков могут достигать 150–200% номинального значения. Динамические увеличения момента, возникающие при входе заготовки в клеть, в таких случаях превышают номинальный момент в 2–2,5 раза. В подтверждение этому на рисунке 4.4 показаны осциллограммы скоростей, моментов и усилий прокатки при захвате раската «тяжелого» сортамента при существующей настройке электропривода [116]. Их анализ подтверждает, что в электромеханических системах возникают колебания скорости и момента. Это также подтверждено результатами моделирования [174, 175]. Пропуск скорости электропривода нижнего валка  $\Delta n_0$  составляет 27% (от 48 об/мин до 35 об/мин). Амплитуду динамического момента определить нельзя, т.к. момент превышает уровень ограничения 240%.

Вследствие этого происходит кратковременное размыкание контура регулирования скорости вследствие выхода регулятора скорости в насыщение. Это подтверждается наличием «плоских» горизонтальных участков на осциллограмме момента электропривода нижнего валка  $M_{НГП}$ . В таком режиме электропривод становится неуправляемым, переходный процесс затягивается и сопровождается колебаниями.

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

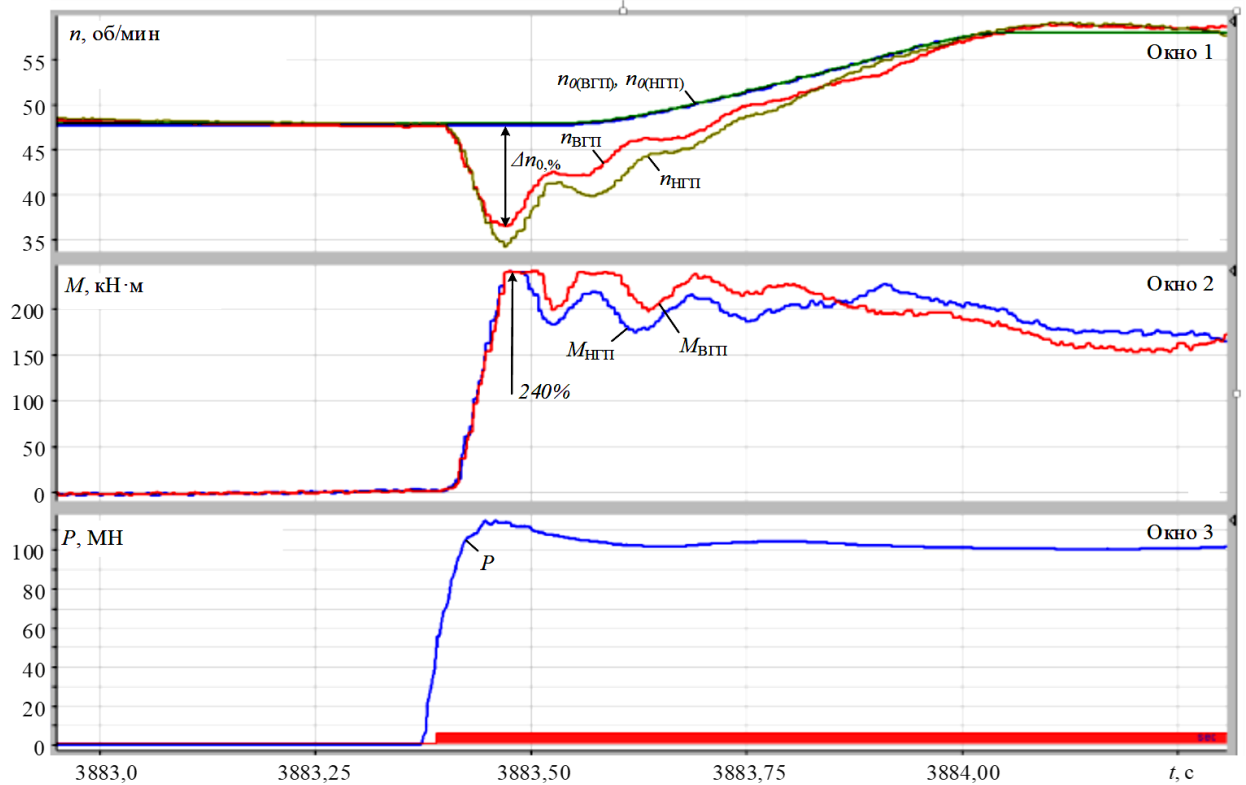


Рисунок 4.4 – Переходные процессы скорости и момента в режиме захвата заготовки

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

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

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

3. «Тяжелые» условия захвата, связанные с тем, что зазор валков изначально устанавливается равным заданной толщине металла после прохода. При прокатке тонкого раската в последних проходах может даже устанавливаться нулевой зазор валков. Необходимая толщина в этом случае обеспечивается за счет упругой деформации (распора) клетки.

Следует отметить, что устранение первой причины обеспечивается за счет захвата заготовки в режиме ускорения электропривода [118]. В то же время изучению вопросов влияния межвалкового зазора на динамические нагрузки электромеханических систем уделяется недостаточно внимания.

Предварительные исследования показали, что имеется практическая возможность ограничения нагрузок путем кратковременного увеличения зазора валков перед захватом заготовки.

В связи с изложенным, поставлена задача разработки способа управления, который обеспечит ограничение динамических моментов в валопроводах горизонтальной клетки путем увеличения зазора валков перед захватом с последующим возвращением валков в заданную позицию. В качестве методов использованы математическое моделирование и экспериментальные исследования на стане.

### ***Описание способа***

Суть разработанного способа заключается в следующем. Зазор перед захватом металла устанавливается больше, чем требуется для получения целевой толщины после прохода, а затем при заходе головной части раската в клетку уменьшается до величины, обеспечивающей целевую толщину с учетом упругости клетки и раската. Перед входом раската в очаг деформации рабочие валки вращаются с линейной скоростью, горизонтальная составляющая которой согласована со скоростью раската. При этом очаг деформации в вертикальном направлении установлен на толщину прокатываемого металла со стороны входа. Через заданное время после входа головной части в очаг деформации последний замыкается до величины, обеспечивающей заданную толщину раската со стороны выхода после прохода. При прокатке хвостовой части раската производятся обратные действия. При разведении валков их окружная скорость должна снижаться.

Для реализации такого алгоритма управления предлагается функциональная схема, показанная на рисунке 4.5. На данной схеме логика управления запрещает работу регулятора толщины до момента времени, пока «голова» раската не пройдет заданное расстояние в валках, и отключает предварительную компенсацию растяжения клетки (т.е. увеличивает зазор на эту величину). Далее происходит активация регулятора толщины и за счет этого – полное введение сигнала компенсации растяжения клетки.



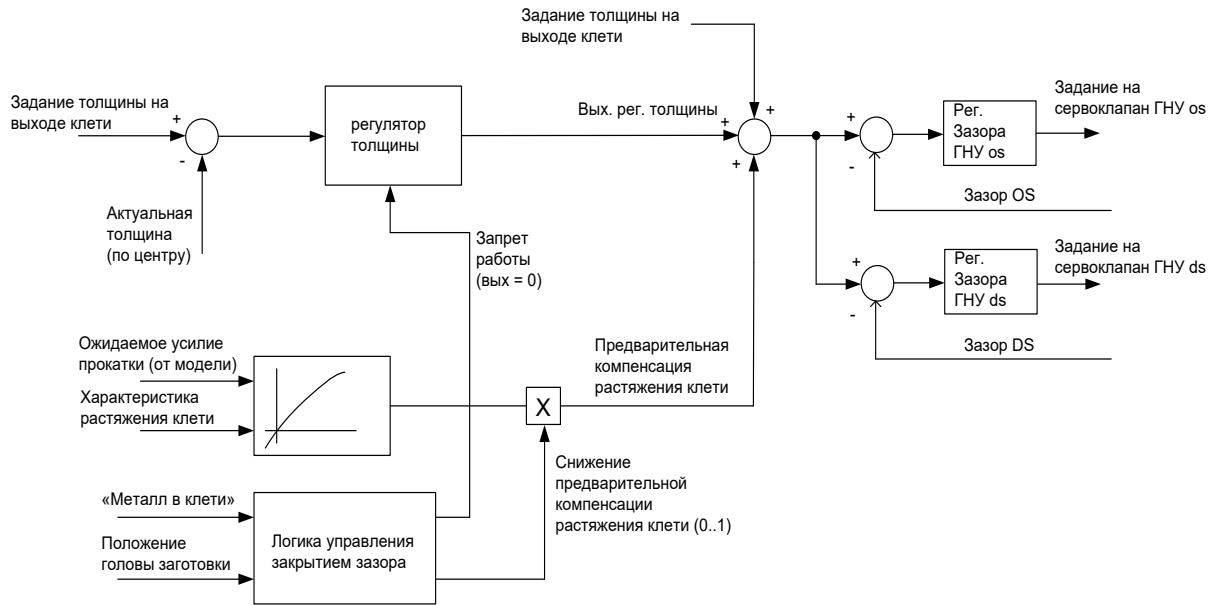


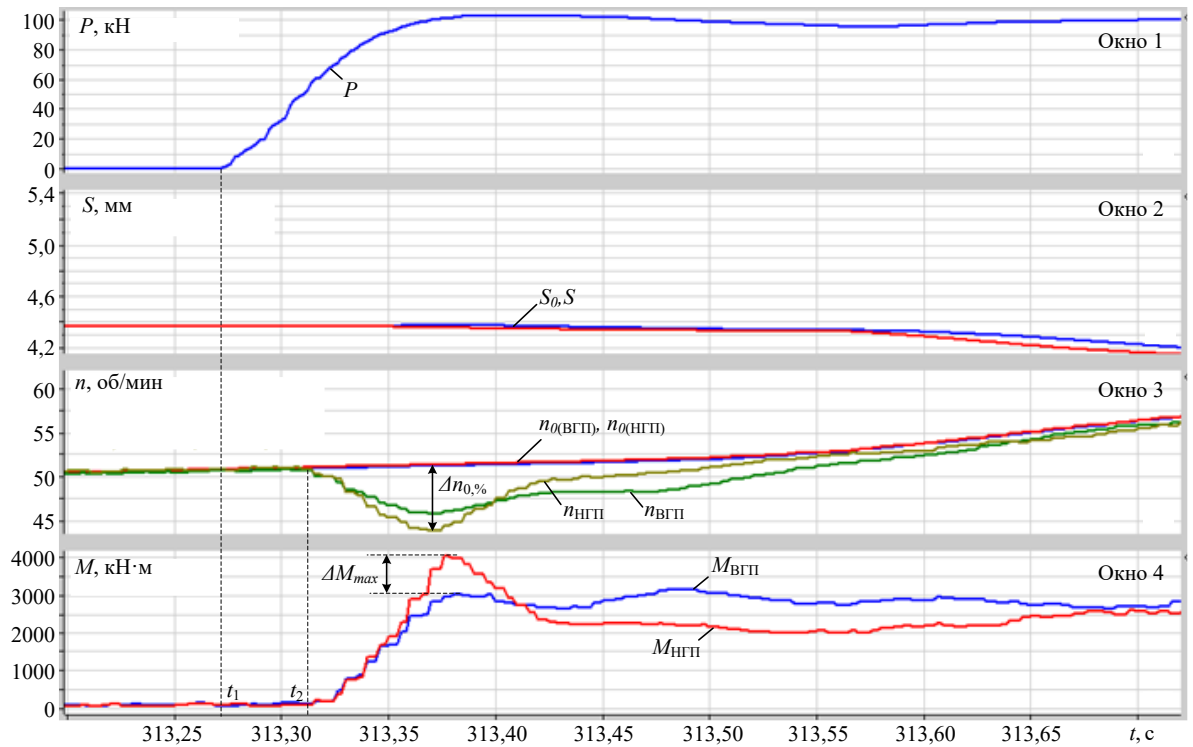
Рисунок 4.5 – Функциональная схема системы упреждающего регулирования зазора валков при входе металла в клеть

Перед началом промышленных испытаний проведены исследования способа методом моделирования с помощью имитационной модели, рассмотренной в разделе 2. Одной из задач являлся анализ влияния настройки (быстродействия) контура регулирования толщины на изменение усилия прокатки. Для этого проведены исследования изменения давления металла на валки при перемещении НУ при различной настройке САРТ. Результаты представлены в авторской публикации [116], они подтвердили целесообразность промышленного внедрения данного решения.

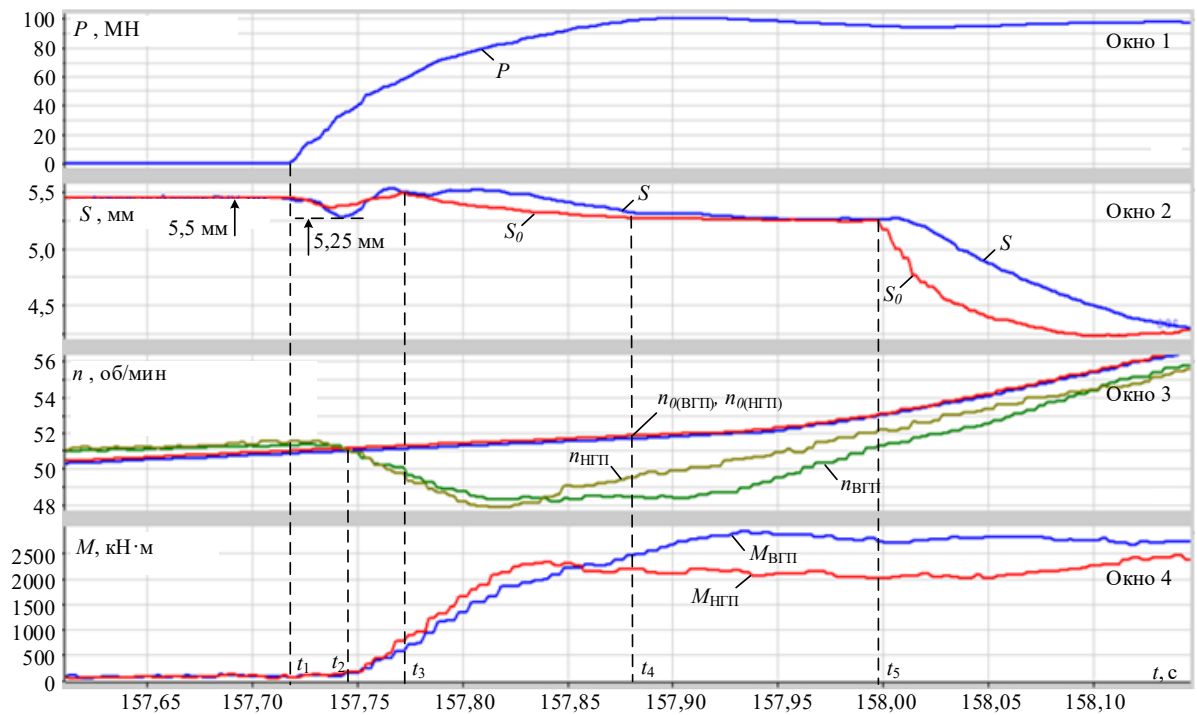
#### 4.4. Результаты экспериментальных исследований

##### *Анализ осциллограмм*

На рисунке 4.6 представлены результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований. Осциллограммы на рис. 4.6, а приведены для исходной системы, когда зазор изначально установлен равным толщине раската на выходе из клетки. На рисунке 4.6, б показаны аналогичные процессы в разработанной системе.



а)



б)

Рисунок 4.6. Захват металла в действующей (а) и разработанной (б) системах управления: окно 1 – усилие прокатки, кН; окно 2 – актуальный и заданный зазоры гидравлического НУ, мм; окно 3 – задания и скорости двигателей верхнего и нижнего валков, об/мин; окно 4 – моменты двигателей, кН·м

При существующем алгоритме управления (рис. 4.6, а) первоначальный зазор НУ установлен равным толщине раската на выходе из клетки 4,4 мм. Принудительной коррекции зазора после захвата не происходит. При реализации предложенного алгоритма (рис. 4.6, б) зазор валков перед захватом установлен равным 5,45 мм, т.е. больше, чем толщина раската после прохода, которая равна 5,25 мм. Через 0,15 с после захвата в момент времени  $t_4$  НУ устанавливаются в положение, соответствующее заданной толщине листа после прохода, при этом усилие прокатки  $P$  выходит на установившееся значение.

Результаты сравнения динамических показателей скоростей и моментов ВГП и НГП в анализируемых системах представлены в таблице 4.1. Они подтверждают значительное уменьшение динамической ошибки регулирования скорости и полное исключение перерегулирования момента при реализации предложенного алгоритма управления. Усилие прокатки при сведении валков изменяется незначительно. По сравнению со случаем, показанным на рис. 3, эффект заключается в снижении динамических отклонений скорости и исключении колебаний момента при захвате.

Таблица 4.1 – Динамические показатели электроприводов при работе существующей и предложенной систем управления

| Параметр | Значение                   | Электропривод ВГП |             | Электропривод НГП |             |
|----------|----------------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
|          |                            | рис. 4.6, а       | рис. 4.6, б | рис. 4.6, а       | рис. 4.6, б |
| Скорость | Установившееся, об/мин     | 52                | 53          | 52                | 53          |
|          | Минимальное, об/мин        | 45,5              | 48          | 43                | 48          |
|          | Динамическое отклонение, % | 12,5              | 8,5         | 17,3              | 9,4         |
| Момент   | Установившееся, кН·м       | 2500              | 2500        | 2500              | 2500        |
|          | Максимальное, кН·м         | 3000              | 2500        | 4000              | 2500        |
|          | Перерегулирование, %       | 20                | 0           | 60                | 0           |

Недостатком рассмотренного способа является его относительная сложность, т.к. необходимо согласование скоростей электроприводов и гидравлических приводов нажимных устройств.

### *Обсуждение результатов [116]*

*Рассмотренный способ управления является примером реализации принципа параметрического регулирования толщины головного участка путем упреждающего регулирования зазора валков перед входом раската в клеть [154]. При его внедрении следует учитывать, что перемещение валков после захвата оказывает влияние на толщину головного участка проката. Теоретически, это может привести к увеличению концевой обрезки, однако практические исследования, выполненные на стане, не подтверждают этого предположения. Это объясняется тем, что разнотолщинность концов «выкатывается» в последующих проходах.*

Вместе с тем, целесообразно проведение дополнительных исследований влияния изменения межвалкового зазора на протяженность разнотолщинного головного участка, а также на упомянутое выше формирование переменного профиля по длине проката.

Предложенный способ автоматического регулирования зазора валков при захвате заготовки обеспечивает ограничение влияния на динамику процессов наиболее значимых факторов:

- соотношения предварительно установленного зазора и реальной толщины головной части заготовки;
- соотношения линейных скоростей раската и валков горизонтальной клетки.

Способ прошел опытно-промышленные испытания на стане 5000 и внедрен в эксплуатацию совместно с другими техническими решениями, обеспечивающими снижение динамических нагрузок электромеханических систем клетки при захвате металла валками.

#### **4.5. Технико-экономическое обоснование внедрения алгоритма согласования скоростей раската и валков**

Внедрение разработанного алгоритма управления было выполнено в рамках НИОКР по договору Южно-Уральского государственного университета и ПАО «ММК», на тему «Разработка и внедрение способов снижения динамических нагрузок в валопроводах главных электроприводов горизонтальной

клетки стана 5000». Акт о внедрении результатов НИОКР и акт опытно-промышленных испытаний алгоритмов снижения динамических нагрузок приведены в Приложении 2. Ниже приводится технико-экономическое обоснование, которое предшествовало выполнению НИОКР (поэтому рассчитанный эффект назван ожидаемым).

### **Техническое обоснование**

Основными видами повреждений деталей в линиях главных электроприводов прокатного стана, обусловленных динамическими нагрузками, являются поломки рабочих валков по шейкам, разрушение головок шпинделей по зеву, а также выход из строя подшипников.

Согласно перечню аварийного акта 2012 года, затраты на устранение последствий, связанных с поломкой шпинделя составили:

- стоимость шпинделя: 53,044 млн. руб.;
- стоимость услуг на установку шпинделя: 0,875 млн. руб.;
- стоимость запасных частей на установку шпинделя по регламенту: 2,653 млн. руб.;
- потери коксового газа во время простоя при замене шпинделя: 0,745 млн. руб.

Общий ущерб, вызванный аварией, составил: 57,3 млн. руб. С учетом роста стоимости импортного оборудования ущерб при аналогичной аварии в настоящее время составил бы от 80 до 100 млн. руб.

Таким образом, внедрение способов ограничения динамического момента и упругих колебаний в валопроводах электроприводов горизонтальной клетки является актуальной и обоснованной задачей.

**Целями выполненной НИОКР** являлись разработка и промышленное внедрение на стане 5000 способов и системы ограничения динамического момента, обеспечивающих снижение динамических нагрузок электрического и механического оборудования горизонтальной клетки за счет улучшения условий захвата и снижения колебаний упругого момента в валопроводах главных электроприводов; снижение внеплановых простоев за счет сокращения аварий по причине поломки электрооборудования.

**Внедрение системы обеспечивает:**

- сокращение времени аварийных простоев стана, обусловленных поломками оборудования линий главных приводов;
- сокращение затрат на устранение последствий аварий, замену и восстановление аварийного оборудования;
- повышение срока службы электрического и механического оборудования за счет снижения ударных нагрузок при захвате полосы валками;
- снижение расходного коэффициента за счет сокращения брака, связанного с аварийными застреваниями полосы, и концевой обрезки.

**Расчет годового ожидаемого экономического эффекта** от внедрения способов ограничения динамического момента в валопроводах горизонтальной клетки.

Экономическая эффективность достигается за счет изменения затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном и регламентном режимах. Расчет выполнен согласно методике расчета ожидаемого годового эффекта вследствие сокращения простоев стана, связанных с поломками оборудования в линиях главных электроприводов.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 4.2:

1. Расчет выполнен по информации о затратах аварийного выхода из строя шпинделя стана 5000 в 2012 году.

2. Стоимость НИОКР включает разработку, полное комплектование системы ограничения динамического момента и упругих колебаний, затраты на аппаратное оборудование, программное обеспечение, расходные материалы.

3. Ожидаемый годовой эффект от реализации НИОКР рассчитан на изменении затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном и регламентном режимах с учетом ожидаемой стойкости по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{Год}} = ((\mathcal{C} + C_{\text{у}} + C_{\text{МТР2}} + \Gamma) / T_2 - (\mathcal{C} + C_{\text{у}} + C_{\text{МТР1}} + \Gamma) / T_1 - C_{\text{НИОКР}} \times E_{\text{н}}) \times K_{\text{д}};$$

$$\mathcal{E}_{\text{Год}} = ((53044 + 874,6 + 6665,3 + 744,5) / 3 - (53044 + 874,6 + 2652,7 + 744,5) / 8 - 5300 \times 0,33) \times 0,45 = (61328,4 / 3 - 57315,8 / 8 - 5300 \times 0,33) \times 0,3 = (20442,8 - 7164,5 - 1749,0) \times 0,5 = 5764,6 \text{ тыс. руб.}$$

Как было отмечено, с учетом роста стоимости импортного оборудования ущерб при аналогичной аварии в настоящее время может составить 80–100 млн руб., то есть возрасти в 1,5–2 раза. В соответствующее число раз возрастает экономический эффект, достигаемый в результате предотвращения каждой поломки шпинделя. Указанный эффект достигается посредством совершенствования алгоритмов управления электроприводами без дополнительных затрат, за исключением стоимости НИОКР.

Таблица 4.2 – Исходные данные для расчета экономической эффективности

| № п/п | Наименование показателя   | Ед. изм.         | Условное обозначение | До внедрения | После внедрения | Примечание                           |
|-------|---|------------------|----------------------|--------------|-----------------|--------------------------------------|
| 1     | Стоимость шпинделя  | тыс. руб./шт.    | Ц                    | 53044        | 53044           | по перечню аварийного акта 2012 года |
| 2     | Стоимость услуг на установку шпинделя   | тыс. руб./шт.    | С <sub>у</sub>       | 84,6         | 84,6            |                                      |
| 3     | Стоимость запасных частей на установку шпинделя по регламенту                             | тыс. руб./замену | С <sub>МТР1</sub>    |              | 2652,7          |                                      |
| 4     | Стоимость запасных частей при аварийной замене шпинделя                                   | тыс. руб.        | С <sub>МТР2</sub>    | 6665,3       |                 |                                      |
| 5     | Потери коксового газа в объеме 4 тыс. м <sup>3</sup> во время простоя при замене шпинделя | тыс. руб.        | Г                    | 744,5        |                 |                                      |
| 6     | Срок службы   |                  |                      |              |                 |                                      |
| 6.1   | до внедрения системы (межремонтный срок)  | лет              | Т <sub>1</sub>       | 3,0          |                 |                                      |
| 6.2   | после внедрения системы   | лет              | Т <sub>2</sub>       |              | 8,0             |                                      |
| 7     | Стоимость НИОКР   | тыс. руб.        | С <sub>НИОКР</sub>   |              | 4500            |                                      |
| 8     | Нормативный коэффициент эффективности   |                  | Е <sub>н</sub>       |              | 0,33            |                                      |
| 9     | Коэффициент долевого участия  |                  | К <sub>д</sub>       |              | 0,5             |                                      |

### **Рекомендации по внедрению.**

Кроме исследуемого стана выполненные разработки рекомендуются для внедрения на станах 5000 металлургических заводов в г. Выкса и в г. Колпино, где реализована технология профилирования широких граней слябовой заготовки горизонтальными валками.

В рамках работы над диссертацией также были выполнены исследования перспектив внедрения системы профилирования на стане 2800 ОАО «Уральская сталь». В публикации [81] на примере этого стана рассмотрены известные технологии, обеспечивающие снижение расходного коэффициента. Статьи [43, 176, 177] посвящены разработке и математическому моделированию системы автоматического управления профилированной прокаткой слябов на этом стане. Разработке методики расчета быстродействия гидравлических НУ и расчету энергосиловых параметров прокатки при внедрении технологии профилирования посвящена публикация [63].

Согласование скоростей вертикальных и горизонтальных валков актуально для универсальных клетей широкополосных и сортовых прокатных станов. Такие исследования проведены для черновой группы клетей стана 2000 ПАО «ММК». Результаты опубликованы в статьях [117, 178–184] и частично внедрены в промышленную эксплуатацию.

В целом, представленная диссертационная работа является вкладом в концептуальное научное направление по совершенствованию электротехнических и мехатронных систем прокатных станов, реализуемое ФГАОУ «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» в течение более чем 10 лет.

## **ВЫВОДЫ**

1. Разработанный алгоритм автоматического регулирования толщины с предупреждением прошел опытно-промышленные испытания на стане 5000. В результате экспериментальных исследований подтверждено, что в режиме профилированной прокатки обеспечивается снижение ошибки регулирования толщины в 2 раза. Экспериментальные результаты соответствуют расчетным, что косвенно подтверждает адекватность модели объекту и достоверность выводов, сделанных по результатам моделирования.

2. Приведена функциональная схема системы управления электроприводами, реализующей способ автоматической коррекции скорости при перемещении НУ. Представленные осциллограммы и результаты экспериментальных исследований подтвердили, что при реализации разработанного способа осу-



оществляется автоматическое согласование линейных скоростей металла и вертикальных валков в динамических режимах. Это обеспечивает ограничение силового взаимодействия клетей, что способствует снижению нагрузок и устранению подпора при совместной прокатке.

3. Дано обоснование разработки способов управления электро- и гидроприводами реверсивной клетки стана 5000, обеспечивающих ограничение динамических нагрузок при захвате металла валками. Отмечены факторы, влияющие на амплитуду динамических нагрузок, в числе которых неудовлетворительные условия захвата, связанные с тем, что зазор валков изначально устанавливается равным заданной толщине металла после прохода.

4. Разработан способ управления электроприводами валков горизонтальной клетки и гидравлическими нажимными устройствами, согласно которому величина зазора валков до захвата устанавливается на уровне, близком к толщине головной части раската, а после захвата возвращается в положение, соответствующее заданной толщине раската на выходе из клетки.

5. Разработанный способ прошел опытно-промышленные испытания на стане 5000. В результате дано подтверждение снижения перерегулирования и колебаний момента на валу двигателя. Выполнено внедрение алгоритма управления в программное обеспечение ПК реверсивной клетки.

6. Основные технические эффекты, обеспечиваемые в результате внедрения разработанных алгоритмов регулирования толщины и согласования скоростей электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей:

- снижение расходного коэффициента за счет сокращения брака, вызванного боковой и торцевой обрезью;
- сокращение потерь производства продукции, вызванного внеплановыми простоями;
- повышение срока службы электрического и механического оборудования;
- сокращение затрат на устранение последствий аварий, замену и восстановление оборудования.

Согласно приведенному акту, экономический эффект от внедрения, рассчитанный на изменении затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном

и регламентном режиме составил 5,76 млн руб./год. Расчет выполнен согласно методике расчета ожидаемого годового эффекта за счет сокращения простоев стана, связанных с поломками оборудования в линиях главных электроприводов.

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

2. Результаты экспериментов показали неудовлетворительную точность регулирования толщины концевых участков раската в динамическом режиме, вызванном перемещением гидравлических нажимных устройств. Зафиксированы отклонения толщины до 2,5% при допустимом пределе  $\pm 1\%$ . Основной причиной отклонений толщины является низкое быстродействие САРТ.

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

4. Теория прокатки в приводных валках постоянного радиуса с изменяющимся межвалковым зазором получила развитие в качестве приложения для прокатки с деформацией сляба горизонтальными валками на толстолистовых станах. Обоснованы аналитические зависимости для расчета энергосиловых параметров и опережения в проходах с профилированием.

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

6. Разработана имитационная модель взаимосвязанных электромеханических систем клетей стана 5000 и гидравлических НУ горизонтальной клетки в структуре САРТ. Она содержит блоки, моделирующие электроприводы как двухмассовые системы, блок моделирования нагрузки и ее распределения по

двигателям, а также модели контура HGC (регулирования положения гидравлического НУ) и контура регулирования положения НУ (модель AGC), реализующего принцип Головина-Симса.

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

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

9. Разработан способ ограничения динамических нагрузок, согласно которому величина зазора валков до захвата устанавливается на уровне, близком к толщине головной части, а после захвата возвращается в положение, соответствующее заданной толщине раската на выходе клетки.

10. Алгоритм, реализующий разработанный способ, внедрен в программное обеспечение АСУ ТП реверсивной клетки стана 5000. В ходе экспериментов подтверждено снижение перерегулирования и колебаний момента на валу двигателя. В результате внедрения разработанных решений достигнут годовой экономический эффект – 5,8 млн руб./год, что подтверждено соответствующим актом.

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

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Металлургия и внешняя политика [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vologodski.livejournal.com/214717.html>.
2. Гасияров, В.Р. Совершенствование электротехнических систем реверсивной клетки толстолиствого прокатного стана: дис. ... докт. техн. наук / Гасияров Вадим Рашитович. – Челябинск: ЮУрГУ, 2021. – 358 с.
3. Иевлев, Н.Г. Автоматическое управление формообразованием листа в плане на реверсивном стане горячей прокатки / Н.Г. Ивлеев // Математичні машини і системи. 2019. № 3. – С. 111–119. DOI: 10.34121/1028-9763-2019-3-111-119
4. Oswald W., Streisselberger A., Thul R., Nehrenberg M. -J., Kirsch J. Heavy plates with special process design to meet extreme customer requirements. METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf.: Proc., vol. 2, 1994, pp. 42-51.
5. Васекин, А.В. Снижение потерь металла в обжимном и листопрокатном производствах в условиях ОАО «ММК им. Ильича» / А.В. Васекин, Н.А. Карнаушенко // Вісник Приазовського державного технічного університету: Збірник. 15. – Маріуполь, ПДТУ, 2005. – Вип. 15. – С. 93-96.
6. Development of New Plan View Pattern Control in Plate Rolling / H. Watanabe [et al.] // Tetsu-to-Hagane. – 1981. – Iss.15. Vol.67. – P. 2412-2418.
7. Quality control and production optimization in plate mills using the HYDRO-PLATE system / M. Morel [et al.] // Iron and Steel Engineer. – 1984. – No.5. Vol.61. – P. 48-53.
8. Меерович, И.М. Повышение точности листового проката / И.М. Меерович, А.И. Герцев, В.С. Горелик и др. – М.: Metallurgy, 1969. – 264 с.
9. Бровман, М.Я. Усовершенствование технологии прокатки толстых листов / М.Я. Бровман, Б.Ю. Зеличенко, А.И. Герцев. – М.: Metallurgy, 1969. – С. 256-264
10. Клименко, В.М. Кинематика и динамика процессов прокатки / В.М. Клименко, А.М. Онищенко. – М.: Metallurgy, 1984. – 232 с.
11. Шабалов, И.П. Ресурсосберегающие технологии производства толстолиствого проката с повышенными потребительскими свойствами / И.П. Шабалов, З.К. Шафигин, А.Н. Муратов. – М.: Metallurgizdat, 2007. – 353 с.

12. Выдрин, В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н. Выдрин. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 225 с.
13. Агишев, Л.А. Влияние параметров прокатки на формообразование толстых листов / Л.А. Агишев, А.Ш. Гиндин, В.В. Шавкун // Сталь. – 1973. – №3. – С. 252–253.
14. Руденко, Е.А. Исследование нового металлосберегающего способа прокатки толстых листов с профилированием угловых участков сляба / Е.А. Руденко, О.М. Юрьев, Л.А. Забира // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С. 167–169.
15. Остапенко, А.Л. Программное обеспечение проектирования технологии прокатки листов и полос / А.Л. Остапенко, Э.Е. Бейгельзимер, Н.В. Миненко, А.В. Кузьмин // Сталь. – 2006. – № 8. – С. 56–59.
16. Тосаки С. Прогресс в области регулирования формы в плане при прокатке толстых листов // Нихон киндзоку гаккай кайхо, 1980. № 2. – С. 79–84 (пер. с япон.).
17. Обручев, В.А. Математическое моделирование формоизменения толстого листа в плане при прокатке на стане 5000 / В.А. Обручев, И.М. Гриднев, В.П. Полухин и др. // Снижение материальных и энергетических затрат при производстве листовой стали: Сб. статей. – М.: Металлургия. –1990. – С. 41-45.
18. Шабалов, И.П. Разработка научных основ, создание и реализация ресурсосберегающих технологий производства толстолистового проката с повышенными потребительскими свойствами для металлических конструкций: дис. ... докт. техн. наук / Шабалов Иван Павлович. – М.: ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии», 2005. – 412 с.
19. Трайно, А.И. Исследование и разработка ресурсосберегающих режимов производства листовой стали: дис. ... докт. техн. наук / Трайно Александр Иванович. – М.: Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2009. – 251 с.
20. Юрченко Ю.И. Разработка, исследование и совершенствование режимов деформирования с целью повышения эффективности процесса прокатки толстых листов: Дис...канд. техн. наук: 05.16.05. – Донецк, 1980. – С. 218-226

21. Шкурко Н.Н. Разработка и исследование металлосберегающей технологии производства толстолистного проката, в том числе с профилированием широких граней раскатов горизонтальными валками: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Донецк: ДПИ, 1990. – 22 с.
22. Авторское свидетельство №716653 СССР, МКИ В21В 1/38. Способ прокатки листов / Ю.В. Коновалов, Ю.В. Фурман, В.Г. Носов. – Оpubл. 25.02.80, Бюл. №7.
23. Авторское свидетельство №1328012 СССР, В21В 1/38. Способ прокатки полос / В.М. Данько, А.И. Герцев, Н.М. Хорошилов и др. – Оpubл. 07.08.1987, Бюл. №29.
24. Патент №86476 Україна, МПК В21В 1/38. Спосіб прокатки товстих листів / А.Л. Остапенко, Є.О. Руденко, О.М. Юр'єв, Ю.В. Коновалов. – Оpubл. 27.04.2009, Бюл. №8.
25. Патент №2019324 Россия, МКИ В 21 В 1/38. Способ прокатки толстых листов с обжатыми кромками / Н.Ш. Орджоникидзе, А.Н. Рыбкин, Е.А. Руденко и др. – Оpubл. 15.09.94, Бюл. № 17.
26. Патент №2490080 Российская Федерация, В21В 1/22, В21В 1/32. Способ прокатки толстых листов на реверсивном стане / В.М. Салганик, С.В. Денисов, А.М. Песин и др. – Оpubл. 20.08.2013, Бюл. №23.
27. Салганик, В.М. Развитие теории и технологии инновационных процессов прокатного производства / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, С.В. Денисов, П.П. Полецков, М.И. Румянцев, Г.А. Куницын // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2014. №1 (45). – С. 48-51.
28. Салганик, В.М. Разработка технологии толстолистовой горячей прокатки с достижением комплекса заданных свойств готовой продукции / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов, С.В. Денисов, П.А. Стеканов // Моделирование и развитие процессов ОМД, 2013. №19. – С. 76-82.
29. Салганик, В.М. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 506 с.
30. Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства / А.И. Рудской, В.А. Лунев. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 528 с.

31. Коновалов, Ю.В. Рациональные режимы прокатки толстых листов / Ю.В. Коновалов, К.Н. Савранский, А.П. Парамошин, В.Я. Тишков. – К.: Техніка, 1988. – 172 с.
32. Долженков, Ф.Е. Повышение качества толстых листов / Ф.Е. Долженков, Ю.В. Коновалов, В.Г. Носов и др. – М.: Металлургия, 1984. – 246 с.
33. Руденко, Е.А. Новые металлосберегающие способы прокатки толстых листов / Е.А. Руденко, Л.А. Курдюкова // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – №3. – С. 19-25.
34. Руденко, Е.А. Исследование влияния локальных обжатий на горизонтальном прессе угловых участков торцов слябов на форму слябов в плане / Е.А. Руденко, А.З. Юрейко // Металлургия и обработка металлов. – Донецк, 2007. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.masters.donntu.org/2010/fmf/borzenkov/library/tez5.htm>.
35. Файнберг, Ю.М. Автоматизация непрерывных станов горячей прокатки: монография / Ю.М. Файнберг. – М.: Металлургиздат, 1963. – 326 с.
36. Бычков, В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства / В.П. Бычков – М.: Высшая школа, 1977. – 391 с.
37. Фомин, Г.Г. Механизация и автоматизация широкополосных станов горячей прокатки / Г.Г. Фомин, А.В. Дубейковский, П.С. Гринчук – М.: Металлургия, 1979. – 232 с.
38. Восканьянц, А.А. Автоматизированное управление процессами прокатки: Учеб. пособие / А.А. Восканьянц. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 85 с.
39. Camber Control Techniques in Plate Rolling/ Y. Tanaka [et al.] // Kawasaki Steel Technical Re-port. – 1987. – No.16. – P. 12-20.
40. Tadaaki Iwamura (2008) Breakthrough Control Technologies in the Japanese Steel Industry, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 1:5, 352-361, DOI: 10.9746/jcmsi.1.352
41. Lohmar, J., Vambach, M., Hirt, G., Kiefer, T., & Kotliba, D. (2014). The Precise Prediction of Rolling Forces in Heavy Plate Rolling Based on Inverse Modeling Techniques. Steel Research International, 85(11), pp. 1525-1532. doi:10.1002/srin.201300431



42. Eldho Joy, Unnikrishnan L. A Brief History of Power Electronics and Drives. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Vol. 3 Issue 4, April – 2014, pp 2571–2576.
43. Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Voronin S.S., Loginov B.M., Khramshin V.R. Mathematical Modeling of an Automatic Control System for Profiled Rolling of Slabs in Reversing Plate-Mill Stands. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). 2019. Pp. 505-510. DOI 10.1109/EIconRus.2019.8656797
44. Radionov, A.A.; Gasiyarov, V.R.; Karandaev, A.S.; Loginov, B.M.; Khramshin, V.R. Advancement of Roll-Gap Control to Curb the Camber in Heavy-Plate Rolling Mills. Appl. Sci. 2021, 11, 8865. <https://doi.org/10.3390/app11198865>
45. Kucsera, P. Hot Rolling Mill Hydraulic Gap Control (HGC) thickness control improvement / P. Kucsera, Z. Beres // Acta Polytechnica Hungarica. – 2015. – Vol. 12, № 6. – P. 93-106.
46. Zhang, F. Thickness control strategies of plate rolling mill / F. Zhang, Y. Zhang, J. Hou, B. Wang // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – August 2015. – Volume 11, Number 4. – P. 1227-1237.
47. Zhang, F. Automatic Gauge Control of Plate Rolling Mill / F. Zhang, Y. Zhang, H. Chen // International Journal of Control and Automation. – 2016. – Vol. 9, № 2. – P. 143-156. DOI 10.14257/ijca.2016.9.2.14.
48. Yuji, Takeo Yazawa, Hirotugu. Latest Plate Production Technology of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT No. 110 SEPTEMBER 2015, pp 8–16.
49. Tadaaki YANASAWA, Takahiro IKEYA, Jun MIYOSHI. Development of a New Plan View Pattern Control System In Plate Rolling. KAWASAKI STEEL TECHNICAL REPORT No. 1 September 1980, pp. 33–45.
50. Hashimoto, T. Прокатка листа с формированием промежуточного профиля «собачья кость» // Adv. Mater. and Process. – 1989. – № 2. – 386 с.
51. Гуркалов, П.И. Перспективы внедрения технологического режима профилированной прокатки слябов на стане 2800 ОАО “НОСТА” (ОХМК) / П.И. Гуркалов, Е.К. Шафигин, С.Н. Басков // Сталь. – 1999. – № 4. – С. 17–22.
52. Басков, С.Н. Энергосиловые параметры приводов и систем профилированной прокатки слябов стана 2800 / С.Н. Басков, А.С. Карандаев, О.И. Осипов // Приводная техника. – 1998. – № 1/2. – С. 21-24.

53. Басков, С.Н. Разработка и исследование автоматизированных электроприводов черновой клетки толстолиствого стана в режимах регулируемого формоизменения прокатываемого металла: дис. ... канд. техн. наук. / Басков Сергей Николаевич – М., МЭИ 1999. – 162 с.
54. Шубин, А.Г. Совершенствование системы согласования скоростей электроприводов непрерывной черновой группы клеток широкополосного прокатного стана: дис. ... канд. техн. наук / Шубин Андрей Григорьевич. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2018. – 168 с.
55. Гостев, А.Н. Ограничение динамических нагрузок электроприводов универсальных клеток непрерывной подгруппы широкополосного стана горячей прокатки: дис. ... канд. техн. наук / Гостев Анатолий Николаевич. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015. – 158 с.
56. Карандаев, А.С. Технологические схемы управления электроприводами чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки /А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андриюшин, В.В. Головин, П.В. Шиляев //Труды VII конгресса прокатчиков. Т.1. (Москва 15-18 октября 2007 г.). – М., 2007. – С. 71–75.
57. Селиванов, И.А. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин и др. // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 1. – С. 5–11.
58. Карандаев, А.С. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клеток черновой группы стана горячей прокатки /А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». Вып. 16. – Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 2011. № 34 (251). – С. 35–41.
59. Карандаев, А.С. Согласование скоростных режимов электроприводов клеток непрерывной группы прокатного стана /А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андриюшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // «Вестник ИГЭУ» – Иваново: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ», 2013. Вып. 1. – С. 98–103.
60. Карандаев, А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства / А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – №1. – С. 3–15.

61. Авдеев, В.А. Основы проектирования металлургических заводов: Справочное издание / В.А. Авдеев, В.М. Друян, Б.И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 464 с.
62. ПАО «Северсталь» ППП, ЛПЦ-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lektsii.org/6-78878.html>
63. Baskov, S.N. Problems of Reconstructing Mechatronic Systems of a Plate Mill During Implementing Shaped Slabbing Technology / S.N. Baskov, S.S. Voronin, D.Yu. Usaty, V.A. Zhilina, E.A. Khramshina. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2019. 5 p. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867791.
64. Development of new plane view control technique in plate rolling (NCC-DBR) // Nippon Kokan Technical Report. – 1983. – № 39. – P. 21-30.
65. Gasyarov, V.R. Improvement of work roll bending control system installed at plate mill stand / V.R. Gasyarov, A.A. Radionov, B.M. Loginov, S.S. Voronin, V.R. Khramshin // Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE). – 2017. – Pp. 269–273. DOI 10.1145/3057039.3057105.
66. Маклаков, А.С. Повышение эффективности работы трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью в составе электропривода большой мощности: дис. ... канд. техн. наук / Маклаков Александр Сергеевич. – Челябинск: ФГБОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», 2017. – 128 с.
67. Маклаков, А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолиствого стана 5000 / А.С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 16-25.
68. Радионов, А.А. Трехуровневый активный двунаправленный преобразователь частоты в составе реверсивных электроприводов среднего напряжения: современное состояние и способы управления / А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 6(542). – С. 80-87.
69. Шубин, А.Г. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана [Электронный ресурс] / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1(38). – С. 14-25. – Режим доступа: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-14-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25).

70. Руденко, Е.А. Разработка способа прокатки толстых листов с необрезными кромками / Е.А. Руденко, В.Е. Гончаров, Ю.И. Юрченко, С.В. Закарлюка // Физика и техника высоких давлений 2021, том 31, № 1. С. 104–110.
71. Шабалов, И.П. Исследование формообразования раскатов на толстолистовом стане 2800 / И.П. Шабалов // Производство проката. – 2004, №8. – С. 2-8.
72. Руденко, Е.А. Разработка базовой математической модели процесса формоизменения и алгоритма расчета параметров формы раскатов в плане при реверсивной прокатке толстых листов с кантовкой и профилированием широких граней / Е.А. Руденко, О.М. Юрьев // Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». Наукові праці. «Металургія». 2008. Випуск 10 (141). – С. 140–148
73. Коновалов Ю.В. Разработка и опробование нового способа улучшения формы раскатов в плане на листовых станах / Ю.В. Коновалов, Ю.В. Фурман, Н.Н. Шкурко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1985. – №4. – С. 23-24.
74. Чернер, М.И. Исследование закономерностей формоизменения раскатов при прокатке толстых листов / М.И. Чернер, А.П. Воропаев, Н.М. Хорошилов // Сталь. – 1978. – №8. – С. 26-28.
75. Технично-економічні показателі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://studopedia.ru/2\\_59904\\_tehniko-ekonomicheskie-pokazateli.html](https://studopedia.ru/2_59904_tehniko-ekonomicheskie-pokazateli.html)
76. Бахтин, А.С. Определение составляющих расхода металла при прокатке на реверсивном стане и непрерывном 4-х клетевом стане 1400 / А.С. Бахтин, С.В. Бахтин // Современные материалы, техника и технологии, №4 (12), 2017. – С. 4-7.
77. Васекин, А.В. Модели формоизменения концов толстых широких раскатов в плане при прокатке в системе горизонтальных и вертикальных валков / А.В. Васекин // Металл и литье Украины – 2009. - №6. – С. 14-17.
78. Формоизменение раскатов на ТЛС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://infopedia.su/2x6a21.html>
79. Васекин, А.В. Влияние вогнутости широких граней слябов на форму концов раскатов в плане после черновой группы клеток ШСГП / А.В. Васекин, Ю.В. Сергиенко, Е.В. Капанова, Н.Н. Каширина // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії №1 (22), 2011. – С. 189–192

80. Карнаушенко, Н.А. Стабилизация ширины полос и снижение концевой обреза на непрерывном широкополосном стане 1700 / Н.А. Карнаушенко, А.В. Васекин, Э.Н. Шебаниц, В.А. Клименко, И.А. Пасько // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії : міжвузівський тематичний зб. наук. праць. – Краматорськ, 1999. – С. 214–217.
81. Khramshin V.R., Khramshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRus). 2017. Pp. 1540-1544. DOI: 10.1109/EIconRus.2017.7910865.
82. Development of the new plan view pattern control system in plate rolling / Kazuya T., Hiroyuki K., Kazushi B., Shigeru I. // Int. Conf. Steel Roll., 1980. – P.193 – 204.
83. Алгоритм расчета параметров прокатки с профилированием широких граней раскатов горизонтальными валками / Коновалов Ю.В., Фурман Ю.В., Шкурко Н.Н. и др. // Теория и технология производства толстого листа: Темат. отрасл. сб. – М: Металлургия, 1986. – С. 10 – 13.
84. Руденко, Е.А. Эффективность нового металлосберегающего способа прокатки толстых листов / Е.А. Руденко, Л.А. Курдюкова, А.Е. Голованова // Обработка материалов давлением [Электронный ресурс]: сборник научных трудов. №2(31) / Донбас. гос. машиностр. акад.; редкол.: И.С. Алиев (пред.) и др.- Краматорск: ДГМА, 2012. – С.201–205.
85. Шиляев, П.В. Автоматизация процесса прокатки толстого листа на стане 5000 / П.В. Шиляев, Д.Ю. Усатый, А.А. Радионов // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 15-18.
86. Identification and optimization for hydraulic roll gap control in strip rolling mill / Sun Jie, Chen Shu-zong, Han Huan-huan, Chen Xing-hua, Chen Qiu-jie, Zhang Dian-hua // J. Cent. South Univ. – 2015. – Vol. 22. – P. 2183–2191. DOI: 10.1007/s11771-015-2742-0
87. JOHN P, NICHOLAS S S, Marwan A S. A new strategy for optimal control of continuous tandem cold metal rolling [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2010, 46(2): 703–711.

88. Modeling and control of plate thickness in hot rolling mills / Roland Heeg, Andreas Kugi, Olivier Fichet, Laurent Irastorza, Christophe Pelletier // IFAC Proceedings Volumes. Volume 38, Issue 1, 2005, Pages 13-18. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01681
89. K. Prinz, A. Steinboeck, M. Müller, A. Ettl, A. Kugi. Automatic gauge control under laterally asymmetric rolling conditions combined with feedforward, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 3, pp. 2560–2568, 2017, issn: 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.2017.2660458
90. Гасияров, В.Р. Разработка цифровых алгоритмов управления приводами мехатронной системы реверсивной клетки толстолистого прокатного стана / В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, С.С. Воронин, М.А. Зинченко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 122–139. DOI: 10.14529/power210113
91. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
92. Karandaev A.S. Radionov A.A., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Shubin A.G. Automatic Gauge Control System with Combined Control of the Screw-Down Arrangement Position // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). – Novosibirsk. 2014. Vol. 1. Pp. 88-94. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040794.
93. Diego Alvarez , Alberto B. Diez, Faustino Obeso. Slab curvature compensation in hot rolling mill by means o Fuzzy Control, Paper at the III seminar on rolling Mill Rolls , Institute Latinoamericano del Fierro v Acero, Maxico, March 9 1988.
94. Ji Yafeng, Zhang Dianhua, Chen Shuzong, Sun Jie, LI Xu, Di Hongshuang, Algorithm Design and Application of Novel GMAGC based on Mill Stretch Characteristic Curve, Journal of Central South University March 2014, Volume 21, Issue 3, pp. 942-947
95. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Loginov B.M., Khramshin V.R. Controlling the Electric Drives of the Reversing Rolling Stand Rolls of a

- Rolling Mill to Form a Curvature at the Workpiece Front End. IEEE 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). 2019. 7 p. DOI: 10.1109/PEDS44367.2019.8998801.
96. Гасияров, В.Р. Способ согласования нагрузок электроприводов горизонтальных валков клетки толстолистового прокатного стана / В.Р. Гасияров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – Серия: Энергетика. – 2019. – № 2. – С. 107-117.
97. Ang K. H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology. IEEE Trans. on Control Syst. Tech., vol.13, No. 4, July 2005, p. 559-576.
98. Волкова, В.Н. Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата [Электронный ресурс] / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. – Москва: Издательство «Юрайт», 2015. – 616 с. – Режим доступа: <https://www.uraic.ru/bcode/383539>
99. Передаточная функция регулятора положения с FFW [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bssystem.ru/Portals/0/store/docs/f1055642-9184-4742-b677-e55c51ca15ce.pdf>
100. Терехов, В.М. Непрерывные и цифровые системы управления скоростью и положением электроприводов / В.М. Терехов. – М.: Изд-во МЭИ, 1996. – 100 с.
101. Карандаев, А.С. Следящая система автоматического регулирования толщины полосы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, С.А. Петряков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. – № 3. – С. 25-29.
102. Кохан, Л.С. Усовершенствованная методика расчета уширения прокатываемых металлических полос / Л.С. Кохан, А.В. Алдунин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 10, ч. 2. – С. 178-184.
103. Роде, В. Новые концепции экономического и гибкого производства высококачественных горячих штрипсов / В. Роде // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке: Сб. трудов междунар. конф. – М.: Металлургия. – 1994. – С. 268-273. – 3 т.
104. Ichihara, A. Progress in Equipment Diagnosis Techniques at Kawasaki Steel Corporation / Akira Ichihara, Satoshi Kasai, Hiromasa Yamamoto and others // Kawasaki Steel Giho. – 1990. – №22. – Pp. 69-73.

105. Bhowal P., Mukherjee S.K. Modeling and Simulation of Hydraulic Gap Control System in a Hot Strip Mill. // *ISIJ International*, vol. 36 (1996), No. 5, pp. 553–562.
106. Radionov, A.A. Information and Measurement System for Control of Technical State of Asynchronous Electric Motors with Group Supply from Frequency Converter / A.A. Radionov, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). – Novosibirsk. 2014. Vol. 1. Pp. 280-285. DOI 10.1109/APEIE.2014.7040897.
107. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of Calculation of the Reliability Indexes and Life Time of the Electric and Mechanical Systems. Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2014. 6 p. doi: 10.1109/MEACS.2014.6986866.
108. Артюх, В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок / В.Г. Артюх. – Мариуполь, Издат. группа «Университет», 2015. – 288 с.
109. Gasiyarov V.R., Khramshin V.R., Voronin S.S., Lisovskaya T.A., Gasiyarova O.A. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use. *Machines* 2019, 7(4), 76; <https://doi.org/10.3390/machines7040076>
110. Кожевников, С.Н. Динамика машин с упругими звеньями / С.Н. Кожевников. – Киев: Изд. АН УССР, 1961. – 312 с.
111. Кожевников, С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С.Н. Кожевников. – Киев: Наук. Думка, 1986. – 288 с.
112. Большаков, В.И. Методика исследования динамики приводов металлургических машин / В.И. Большаков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – №3. – С. 72-78.
113. Веренев, В.В. Диагностика и динамика прокатных станов: монография / В.В. Веренев, В.И. Большаков, А.Ю. Путноки, А.А. Коринь, С.В. Мацко. – Д.: ИМА-пресс, 2007. – 144 с.
114. Krot, P.V. Nonlinear Vibrations and Backlashes Diagnostics in the Rolling Mills Drive Trains / P.V. Krot // Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2008), IPME RAS. – St. Petersburg. – June 30–July 4. – 2008.



115. Логинов, Б.М. Ограничение динамических нагрузок электроприводов горизонтальной клетки толстолиствого прокатного стана: дис. ... канд. техн. наук / Логинов Борис Михайлович. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», 2019. – 164 с.
116. 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.
117. Voronin, S.S. Development of automatic control system of hot-strip mill process parameters / S.S. Voronin, V.R. Gasiyarov, E.A. Maklakova, A.A. Radionov // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2016. – Т. 16. № 1. – С. 121–136.»
118. Khramshin, V.R. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khramshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – № 1. – С. 101–111. – 18 т. DOI 10.14529/power180113
119. Гасияров, В.Р. Снижение динамического момента в главной линии прокатной клетки толстолиствого стана / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, О.А. Гасиярова, Б.М. Логинов, Д.Ю. Усатый // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 22-32. – 19 т.
120. Гасияров, В.Р. Способ ограничения динамических нагрузок мехатронных систем клетки толстолиствого прокатного стана / В.Р. Гасияров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 5-18. – 19 т.
121. 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.
122. Khramshin 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 (RusAutoCon). 2020. Pp. 1122-1126. DOI 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208087.
123. Мазур, В.О. Горизонтальная сила при прокатке как показатель технологичности процесса прокатки и технического состояния основного прокатного оборудования [Электронный ресурс] / В.О. Мазур // Захист. металургійних машин від поломок. – 2013. – Вып. 15. – С. 15-22. – Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmmvp\\_2013\\_15\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmmvp_2013_15_4).
124. Mazur, V. Current views on the detailed design of heavily loaded components for roll-ing mills / V. Mazur, V. Artyukh, G. Artyukh, M. Takadzhi // Engineering Designer. – 2012. – V. 37, № 1. – P. 26-29.
125. Артюх, В.Г. Возможность горячей прокатки стального листового проката большей массы / В.Г. Артюх, В.О. Мазур // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2011. – Вып. 13 – С. 148-153.
126. Артюх, В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок / В.Г. Артюх. – Мариуполь: Издат. группа «Университет», 2015. – 288 с.
127. Артюх, В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах / В.Г. Артюх. – Мариуполь: ПГТУ, 2008. – 246с.
128. Артюх, В.Г. Горизонтальные силы при прокатке / В.Г. Артюх, Г.В. Артюх, В.О. Мазур // Мариуполь: Вестник Приазовского Государственного Технического Университета. – 2009. – Вып. №19. – С. 128-132.
129. 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.
130. Карандаев, А.С. Совершенствование алгоритмов регулирования толщины и профиля зазора валков реверсивной клетки толстолистового 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
131. Гасияров, В.Р. Согласование скоростей электроприводов и гидравлических нажимных устройств при автоматическом контроле профиля раската // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 22-29. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-22-29.

132. Стефанович, В.Л. Автоматизация непрерывных и полунепрерывных широкополосных станов горячей прокатки / В.Л. Стефанович. – М.: Metallurgiya, 1975. – 208 с.
133. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Изд-во «Наука», 1975. – 768 с.
134. Гельднер, К. Кибернетика и ее будущее / К. Гельднер; пер. с нем. под ред. В.И. Мудрова. – М.: Радио и связь, 1983. – 96 с.
135. Фатеев, А.В. Расчет автоматических систем / А.В. Фатеев, А.А. Вавилов, Л.П. Смольников и др. – М.: Высш. школа, 1973. – 336 с.
136. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.
137. Karandaev A.S., Baskov S.N., Gasiyarova O.A., Loginov V.M., Khramshin V.R. Calculating Simulation Model Parameters for Electromechanical System of Roll-ing Mill Stand. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con). 2020. Pp. 469-474. DOI 10.1109/UralCon49858.2020.9216265.
138. Экспериментальное определение параметров двухмассовой электромеханической системы прокатного стана / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова, Е.А. Гартлиб, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 3. – С. 24-35. DOI:10.17213/0136-3360-2021-3-24-35.
139. Гасияров, В.Р. Разработка цифрового наблюдателя углового зазора в шпindelных соединениях главной линии прокатной клетки / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, О.А. Гасиярова, Б.М. Логинов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 137–147. DOI:10.14529/power200314
140. Шохин, В.В. Исследование электромеханической системы прокатной клетки / В.В. Шохин, О.В. Пермякова, Е.С. Кисель // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – №23. – С. 40-43.
141. Reifental, U. Beseitigung der Ebenweits-abweichungen im Walzgut bei Umkerwalymashienen in Twindrive-Ausführung durch eine Winkelgleichlaufregelung der Antiebsstränge / U. Reifental, H.H. Nguzen, A. Bannack. – Magdeburg, 1996. – 44 с. (нем).

142. Гасияров, В.Р. Способ повышения быстродействия системы управления электроприводами горизонтальной клетки прокатного стана в режиме лыжеобразования / В.Р. Гасияров // Известия высших учебных заведений. Электротехника. – 2019. – № 3. – С. 33-43. – 62 т.
143. Improving the Load Balancing System of the Rolling Mill Stand Drives / V.R. Gasiyarov, B.M. Loginov, M. A. Zinchenko, A.Yu. Semitko // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2021. Pp. 1067-1073. doi: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537462.
144. Шрейнер, Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997. – 279 с.
145. Лебедев, Е.Д. Управление вентиляемыми электроприводами постоянного тока / Е.Д. Лебедев, В.Е. Неймарк, М.Я. Пистрак, О.В. Слежановский – М.: Энергия, 1970. – 200 с.
146. Кузицин, В.А. Моделирование гидравлических нажимных устройств прокатных станов / В.А. Кузицин, Ю.Ю. Гедымин // Конструирование и исследование современных прокатных станов: Сб. науч. трудов. – М.: ВНИИметмаш, 1985. – С. 113–118.
147. Браун, А.Е. Некоторые вопросы динамики гидронажимных устройств / А.Е. Браун, Б.Н. Дралюк, А.Е. Тикоцкий // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод, 1982. Вып. 8. – С. 13–17.
148. САРТ для 7–клетевого полосопрокатного стана горячей прокатки 2500 Магнитогорского меткомбината: Руководство по эксплуатации // Davy McKee. – 1993. – 19 с.
149. Тарновский, И.Я. Продольная прокатка профилей переменного сечения / И.Я. Тарновский, В.К. Смирнов, С.Л. Коцарь. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 366 с.
150. Воронцов, Н.М. Периодические профили продольной прокатки (оборудование и технология) / Н.М. Воронцов, В.Т. Жадан, Н.Ф. Грицук и др. – М.: Металлургия, 1978. – 232с.
151. Степаненко, А. В. Прокатка полос переменного профиля / А.В. Степаненко, В.А. Король, Л.С. Смирнова. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2001. – 180 с.

152. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н.Н. Дружинин. – М.: Металлургия, 1975. – 336 с.
153. Целиков, А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 494 с.
154. Храмшин, В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... докт. техн. наук / Храмшин Вадим Рифхатович. – Магнитогорск: МГТУ, 2013. – 393 с.
155. Патент на изобретение №2687354 Российская Федерация, МПК В21В 37/52. 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. – Оpubл. 13.05.2019.
156. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015618815В. Расчет параметров жесткости клетки «КВАРТО» для толстолистовых станов горячей прокатки / С.С. Воронин, В.Р. Гасияров. – Оpubл. 19.08.2015.
157. Чекмарев, А.П. Некоторые вопросы продольной периодической прокатки: Тр. Днепропетр. металлург. ин-та / А.П. Чекмарев, А.Ф. Смольянинов. – Днепропетровск: ДМетИ, 1958. – Вып. 37. – С. 185-203.
158. Голубев, Т.М. Опережение при прокатке с равномерно изменяющимся обжатием в цилиндрических валках / Т.М. Голубев, Л.В. Морозов // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1966, № 6. – С. 105-111.
159. Данилов, В.Д. Опережение при прокатке профилей переменного сечения // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1974, №1. – С. 82-86.
160. Клименко, В.М. Кинематика и динамика процессов прокатки / В.М. Клименко, А.М. Онищенко. М.: Металлургия, 1984. – 232 с.
161. Исаевич, Л.А. Определение параметров процесса продольной прокатки для получения полос переменной толщины с нарастающим обжатием / Л.А. Исаевич М.И. Сидоренко, Д.М. Иваницкий, М.М. Малекиан // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. – 2008. – № 3. – С. 18-26.
162. Смольянинов, А.Ф. Обработка металлов давлением / А.Ф. Смольянинов, Г.Л. Лебедик, В.С. Лиханский // ДМетИ. науч. тр. Металлургия. – 1967. – № 53. – С. 255–262.

163. Исаевич, Л.А. Расчет опережения при прокатке полос переменной толщины с постоянным обжатием / Л.А. Исаевич М.И. Сидоренко, Д. М. Иваницкий, М.М. Малекиан // Repository of Belarusian National Technical University (BNTU) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://core.ac.uk/reader/323158772>
164. Максименко, О.П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография / О.П. Максименко, Д.И. Лобойко, М.К. Измайлова. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2016. – 213 с.
165. Аникеенко, И.Н. Параметры калибровки валков и прокатки заготовок турбинных лопаток / И.Н. Аникеенко, А.Г. Сочам // Теоретические проблемы прокатного производства: Тез. докл. 3-й Всесоюз. конф. Днепропетровск: ДМетИ, 1980. – С. 300–301.
166. Исаевич, Л.А. Определение режимов обжатия полос переменной толщины для достижения требуемой размерной точности формообразуемого профиля / Л.А. Исаевич, Д.М. Иваницкий, М.И. Сидоренко // Литье и металлургия. – 2016. – № 1 (82). – С. 91–95.
167. Исаевич, Л.А. Расчет опережения при прокатке с нарастающим обжатием / Л.А. Исаевич, М.И. Сидоренко, М.М. Малекиан // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы II Международ. науч.-техн. конф. В 2-х т. – Минск, 2007. Т. 2. – С. 42–45.
168. Петюшик, Е.Е. Достижение размерной точности полос переменной по длине толщины при прокатке / Е.Е. Петюшик, А.Д. Крицкий, Д.М. Иваницкий // Литье и металлургия. – 2018. – №1 (90). – С. 128–131
169. Исаевич, Л.А. Определение параметров процесса продольной прокатки для получения полос переменной толщины с нарастающим обжатием / Л.А. Исаевич, М.И. Сидоренко, Д.М. Иваницкий, М.М. Малекиан // Наука и техника. – 2008. – №3. – С. 18–26.
170. Радионов, А.А. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Ч. 1. Разработка математической модели / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, А.С. Евдокимов, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев, А.Г. Шубин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2015. – Т. 15. № 1. – С. 59–73.

171. Воронин, С.С. Использование системы осевой сдвижки валков для корректировки межвалкового зазора на толстолистовых станах горячей прокатки / С.С. Воронин, Д.Ю. Усатый, В.Р. Гасияров, А.А. Радионов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3. № 1. – С. 45–49.
172. Voronin, S.S. A development of the method of the control signal formation for the hot plate mill automation systems to improve the flatness of the finish plate / S.S. Voronin, V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov // MATEC Web of Conferences: 7th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM). – 2016. – Vol. 45. – 04001. DOI 10.1051/matecconf/20164504001.
173. 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. Андрюшин, А.Н. Гостев, А.Г. Шубин, В.Р. Гасияров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2015. – Т. 15. № 2. – С. 67–76.
174. 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.
175. Maklakova, E.A. Simulation modeling of the rolling mill stand 5000 OJSC MMK / E.A. Maklakova, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, S.S. Voronin // Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2016. – 7911498. DOI 10.1109/ICIEAM.2016.7911498.
176. Baskov, S.N. Problems of Reconstructing Mechatronic Systems of a Plate Mill During Implementing Shaped Slabbing Technology / S.N. Baskov, S.S. Voronin, D.Yu. Usaty, V.A. Zhilina, E.A. Khramshina // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2019. 5 p. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867791.
177. Radionov A.A. Designing Automated Control System for Profiled Slab Rolling on Plate Mill / Radionov A.A., Baskov S.N., Gasiyarov V.R., Karandayeva O.I., Khramshin R.R. // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2018. 5 p. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501803.

178. Андрюшин, И.Ю. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клетей стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андрюшин, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. – С. 31–35.
179. Карандаев, А.С. Новые технические решения в электроприводах и системах регулирования технологических параметров станов горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, В.В. Головин, П.В. Шилиев, С.А. Петряков, А.А. Лукин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – С. 34–40. – Ч. 2.
180. Храмшин, В.Р. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №1. – С. 12–21.
181. Карандаев, А.С. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрюшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Труды VII Междунар. (XVIII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. – Иваново: Изд-во ИГЭУ. – 2012. – С. 652–657.
182. Галкин, В.В. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клетей 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 ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 2. – С. 12–17.
183. Khramshin, V.R. Study of automated no-pull control system in the continuous mill train / V.R. Khramshin, A.G. Shubin, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, S.S. Voronin // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 672-677. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317184.
184. Khramshin, V.R. Method of Reduction of an Edging and Horizontal Rolls Electromechanical Systems Interrelation in Universal Stand of a Rolling Mill / V.R. Khramshin, 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



**ПРИЛОЖЕНИЯ**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ**  
**РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ СТАНА 5000**

Таблица П.1.1 - Основные марки стали, прокатываемые на стане 5000

| Поз. | Марка стали   | НД на       |                 |
|------|---|-------------|-----------------|
|      |   | марку стали | тех. требования |
| 1    | Сталь углеродистая обыкновенного качества СтО - Ст 5, СтЗГпс и др.  | ГОСТ 380    | ГОСТ 14637      |
| 2    | Сталь низколегированная для мостостроения марок 10ХСНД, 15ХСНД  | ГОСТ 6713   | ГОСТ 6713       |
| 3    | Сталь углеродистая и низколегированная из марок 15К, 20К, 09Г 2С для котлов и сосудов под давлением                             | ГОСТ 5520   | ГОСТ 5520       |
| 4    | Сталь углеродистая и низколегированная для судостроения из марок А, В, D, А 32, D32, А 36                                       | ГОСТ 5521   | ГОСТ 5521       |
| 5    | Сталь низколегированная конструкционная повышенной прочности марок 16ГС, 17ГС, 17Г 1С, 09Г 2, 09Г 2 С(Д) 10Г 2С 1(Д), 10-15ХСНД | ГОСТ 19281  | ГОСТ 19281      |
| 6    | Сталь углеродистая качественная конструкционная из марок 08-25(пс, сп),30-70  | ГОСТ 1050   | ГОСТ 1577       |
| 7    | Сталь легированная конструкционная из марок 15Г, 20Г, 30Г, 40Г, 50Г, 20Х, 40Х   | ГОСТ 4543   | ГОСТ 1577       |

Таблица П.1.2 - Показатели, оказывающие влияние на качество, и их предельные отклонения

| Параметр проката толстолистового 12 ×1500× 6000 из стали марки 09ГС | Предельные отклонения |
|---|-----------------------|
| Толщина 12 мм   | +0,30<br>-0,80        |
| Ширина 1500 мм  | +10                   |
| Длина 6000 мм   | +10                   |
| Временное сопротивление разрыву 560 Н/мм <sup>2</sup>               | не менее 470          |
| Предел текучести 340 Н/мм <sup>2</sup>                              | не менее 325          |
| Относительное удлинение 30%   | не менее 21           |
| Содержание Mn 1,5%  | 1,3-1,7               |
| Содержание С 0,09%  | не более 0,12         |

Таблица П. 1.3 – Технические данные двигателя горизонтальных валков

| Тип   | Синхронный двигатель VEM<br>DMMYZ 3867-20V |                  |
|---|--|------------------|
| Исполнение возбуждения на роторе                        | явнополюсный                               |                  |
| Количество полюсов                                      | 20   |                  |
| Производитель   | VEM Sachsenwerk GmbH                       |                  |
| Мощность  | 12000                                      | кВт              |
| Номинальное напряжение                                  | 3300                                       | В                |
| Номинальная скорость                                    | 70   | об/мин           |
| Максимальная скорость                                   | 115  | об/мин           |
| Номинальная частота                                     | 10   | Гц               |
| Максимальная частота                                    | 19,2                                       | Гц               |
| Перегрузка при минимальной скорости                     | 225  | % в течение 30 с |
| Перегрузка при номинальной скорости                     | 225  | % в течение 30 с |
| Перегрузка при максимальной скорости                    | 225  | % в течение 30 с |
| Ток при номинальной скорости и нагрузке 100%            | 2460                                       | А                |
| Ток при номинальной скорости и максимальной перегрузке  | 5650                                       | А                |
| Ток при максимальной скорости и нагрузке 100%           | 2458                                       | А                |
| Ток при максимальной скорости и максимальной перегрузке | 5650                                       | А                |
| Максимальный ток  | 6000                                       | А                |
| Номинальный крутящий момент                             | 1910                                       | кНм              |
| Максимальный крутящий момент при прокатке               | 3820                                       | кНм (200%)       |
| Максимальный крутящий момент перегрузки                 | 4298                                       | кНм (225 %)      |
| Крутящий момент отключения                              | 5252                                       | кНм (275%)       |
| Коэффициент мощности                                    | 1  |                  |
| Напряжение возбуждения без нагрузки                     | 138,7                                      | В                |
| Напряжение возбуждения номинальное                      | 220  | В                |
| Напряжение возбуждения при максимальной нагрузке        | 520  | В                |
| Ток возбуждения без нагрузки                            | 568  | А                |
| Ток возбуждения номинальный                             | 898  | А                |
| Ток возбуждения при максимальной нагрузке               | 1680                                       | А                |
| Класс изоляции  | F  |                  |
| Тип охлаждения  | IC86W                                      |                  |
| Степень защиты  | IP 55                                      |                  |
| Степень защиты токосъемных контактных колец             | IP55                                       |                  |
| Подшипники  | 2  |                  |

|                 |         |
|-----------------|---------|
| Тип конструкции | IM 7315 |
|-----------------|---------|

Таблица П.1.4 – Технические данные приводного двигателя эджерных валков

| Тип   | Синхронный двигатель<br>DYMMZ 8025-8V |                  |
|---|---------------------------------------|------------------|
| Производитель   | VEM Sachsenwerk                       |                  |
| Исполнение возбуждения на роторе                        | явнополюсный                          |                  |
| Количество полюсов                                      | 8                                     |                  |
| Мощность  | 1250                                  | кВт              |
| Минимальная скорость                                    |                                       | об/мин           |
| Расчетная скорость                                      | 230                                   | об/мин           |
| Номинальная скорость                                    | 230                                   | об/мин           |
| Максимальная скорость                                   | 800                                   | об/мин           |
| Минимальная частота                                     |                                       | Гц               |
| Расчетная частота                                       | 15,33                                 | Гц               |
| Номинальная частота                                     | 15,33                                 | Гц               |
| Максимальная частота                                    | 53,30                                 | Гц               |
| Перегрузка при минимальной скорости                     | 225                                   | % в течение 30 с |
| Перегрузка при расчетной скорости                       | 225                                   | % в течение 30 с |
| Перегрузка при номинальной скорости                     | 225                                   | % в течение 30 с |
| Перегрузка при максимальной скорости                    | 225                                   | % в течение 30 с |
| Тип охлаждения  | IC86W                                 |                  |
| Класс изоляции  | F                                     |                  |
| Номинальное напряжение                                  | 3300                                  | В                |
| Ток при номинальной скорости и нагрузке 100%            | 250                                   | А                |
| Ток при номинальной скорости и максимальной перегрузке  | 580                                   | А                |
| Ток при расчетной скорости и нагрузке 100%              | 250                                   | А                |
| Ток при расчетной скорости и максимальной перегрузке    | 580                                   | А                |
| Ток при максимальной скорости и нагрузке 100%           | 250                                   | А                |
| Ток при максимальной скорости и максимальной перегрузке | 580                                   | А                |
| Максимальный ток  | 620                                   | А                |
| Вес   | 18.200                                | кг               |
| Инерционность   | 620                                   | кгм <sup>2</sup> |
| КПД   | 93,7                                  | %                |
| Коэффициент мощности                                    | 1                                     |                  |
| Давление воды   | 6                                     | бар              |
| Степень защиты  | IP55                                  |                  |
| Степень защиты токосъемных контактных колец             | IP55                                  |                  |

|            |   |
|------------|---|
| Подшипники | 2 |
|------------|---|

Таблица П.1.5 – Технические характеристики преобразователя частоты двигателя горизонтальных валков

| <b><u>Выходные данные</u></b>   |  |
|---|--|
| Выходное напряжение   | 3,3 кВ   |
| Выходной коэффициент мощности   | От -1 до 1   |
| Выходная частота  | От 0 до 90 Гц  |
| Тип инвертора   | С ШИМ, 3-уровневое исполнение NPC (Neutral Point Clamped – фиксированная нейтральная точка) с IGBT |
| <b><u>Входные данные</u></b>  |  |
| Входное напряжение  | 3,3 кВ   |
| Частота сети  | 50/60 Гц $\pm 5\%$   |
| Выпрямитель сетевого тока   | AFE (активный выпрямитель)   |
| Входной коэффициент мощности  | 1  |
| <b><u>Общие данные</u></b>  |  |
| Охлаждение  | Теплообменник сырая вода деионизированная вода   |
| Уровень шума  | <75 dB на расстоянии 1м от шкафа   |
| Температура окружающей среды при эксплуатации   | 5°C – 45°C   |
| Относительная влажность воздуха   | 5 – 95% без конденсации  |
| Высота установки  | <1000 м над уровнем моря   |
| Установка   | Внутреннее помещение   |
| Степень защиты  | IP31 – блокировка двери с системой замков  |
| <b><u>Характеристики системы регулирования</u></b>  |  |
| Структура регулирования   | Векторное регулирование потока с/без датчиком для синхронного двигателя                            |
| Электронная защита  | Ограничение тока, перенапряжение, понижение напряжения звена постоянного тока,                     |
| Точность частоты вращения   | <0,5% без датчика и <0,1% с датчиком   |
| <b><u>Опции</u></b>   |  |
| Входной фильтр AFE, выходной du/dt – фильтр при 3,3 кВ, чоппер, обогрев при простое, входной и выходной разъединитель, кинетическая поддержка |  |

Таблица П.1.6 – Технические параметры MV7308 SAAFE

| Тип                          | Увх.ном.,<br>В | Ином,<br>А | Рном,<br>МВт | Увых.<br>В | Охла-<br>ждение | Примечание   |
|------------------------------|----------------|------------|--------------|------------|-----------------|--|
| Converteam MV<br>7308 SA AFE | 3300           | 800        | 8,4          | 3300       | Водя-<br>ное    | Три преобразова-<br>теля подключены<br>параллельно |

Таблица П.1.7 – Характеристики гидравлических и электромеханических нажимных устройств горизонтальной клетки

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| <b><u>Гидронажимное устройство</u></b>         |                                      |
| установлено внизу                              |                                      |
| диаметр поршня и ход                           | Ø 1,750/1.600×95 мм (действ. 85 мм)  |
| давление в гидросистеме                        | макс. 290 бар                        |
| <b><u>Механическое нажимное устройство</u></b> |                                      |
| Раствор между рабочими валками (новые валки)   | 320 мм                               |
| Подъем припл.                                  | 520 мм                               |
| скорость                                       | 0-50 мм/с                            |
| Привод   | 2×0-560 кВт, n=800 мин <sup>-1</sup> |
| Нажимной винт                                  |                                      |
| <b><u>Станина</u></b>                          |                                      |
| Вес станины                                    | прибл. 547 т                         |
| Расстояние между осями станин                  | прибл. 7000 мм                       |
| Сечение стоек станины прибл.                   | 950-1.100 мм, т.е. >1 м <sup>2</sup> |
| <b><u>Тип шпинделя</u></b>                     |                                      |
|  | выдвижной                            |
| <b><u>Количество задающих роликов</u></b>      |                                      |
|  | 3 на каждую сторону                  |

## АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

УТВЕРЖДАЮ:  
Начальник технического  
деп. ПАО «ММК»

А.А. Мухин

\_\_\_\_\_ 2017 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов НИОКР по договору № 2... 2016 г.

**«Разработка и внедрение способов снижения динамических нагрузок в валопроводах главных электроприводов горизонтальной клетки стана 5000»**

Работа проводится в рамках раздела VI «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», пункта 4 «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», подпункта 21 «Разработка технологий диагностики остаточного ресурса силового электрооборудования» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п.7 ст.262 ч.2 НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 6 февраля 2012 г. № 96)

**Краткое описание выполненной работы:**

Разработаны и внедрены в эксплуатацию в системах управления главными электроприводами горизонтальной клетки стана 5000 способы и алгоритмы снижения динамических нагрузок, обеспечивающие:

- выбор зазора в шпindelных соединениях за счет захвата заготовки в режиме ускорения валков;
- компенсацию динамической просадки скорости и перерегулирования момента за счет предварительного увеличения скорости электропривода на величину расчетной динамической ошибки регулирования скорости;
- снижение задания скорости после захвата с заданным регулируемым темпом.

**Основные технические эффекты:**

- сокращение времени аварийных простоев стана, обусловленных поломками оборудования линий главных электроприводов;
- сокращение затрат на устранение последствий аварий, замену и восстановление аварийного оборудования;
- повышение срока службы электрического и механического оборудования за счет снижения ударных нагрузок при захвате;
- снижение расходного коэффициента за счет сокращения брака, связанного с застреваниями при захвате.

Экономическая эффективность достигается за счет сокращения затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном и регламентном режимах. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 5,8 млн. руб./год.

Дата фактического внедрения 10 ноября 2017 г.

Срок полезного использования 2 года

Главный энергетик ПАО «ММК»

Журавлев Ю.П.

Начальник ЦЭТЛ

Шубин А.Г.

И.о. начальника ПТЛ

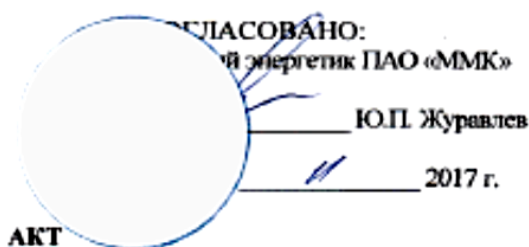
Банщиков В.С.

И.о. инженера по техническому надзору (электрооборудования)

Шапарь А.А.

Научный руководитель НИОКР

Радионов А.А.



### **АКТ опытно-промышленных испытаний**

алгоритмов снижения динамических нагрузок в валопроводах главных электроприводов горизонтальной клетки стана 5000  
(по договору НИОКР № 228203 от 23.05.2016 г.)

Работа проводится в рамках раздела VI «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», пункта 4 «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», подпункта 21 «Разработка технологий диагностики остаточного ресурса силового электрооборудования» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п.7 ст.262 ч.2 НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 6 февраля 2012 г. №96)

#### **Характеристика внедряемых способов и алгоритмов**

В системе автоматического управления скоростными режимами электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 внедрены алгоритмы, обеспечивающие:

- выбор зазора в шпиндельных соединениях за счет захвата заготовки в режиме ускорения валков;
- компенсацию динамической просадки скорости и перерегулирования момента за счет предварительного увеличения скорости электропривода на величину расчетной динамической ошибки регулирования скорости;
- снижение задания скорости после захвата с регулируемым темпом.

Внедренные алгоритмы управления прошли опытно-промышленные испытания. Проведен комплекс экспериментальных исследований при прокатке листов различного сортамента (пассивный эксперимент).

#### **Программа эксперимента**

Анализировались следующие динамические режимы за цикл прокатки:

- разгон электропривода с металлом в валках;
  - захват металла валками на установившейся скорости и на участке разгона электропривода;
  - выход металла из валков.
- Фиксировались осциллограммы:
- скоростей двигателей электроприводов верхнего и нижнего валков;
  - токов электроприводов;
  - моментов двигателей верхнего и нижнего валков.

#### **Результаты испытаний**

Характерные осциллограммы скоростей и моментов в исследуемых режимах представлены на рис. 1 и рис. 2. Проведенные испытания позволяют сделать следующие выводы:

1. Амплитуда ударного момента при захвате превышает установившийся момент прокатки до 1,5–2 раз. Ударные нагрузки связаны с выбором зазоров в шпиндельных соединениях, которые не контролируются, но могут быть устранены средствами электропривода.



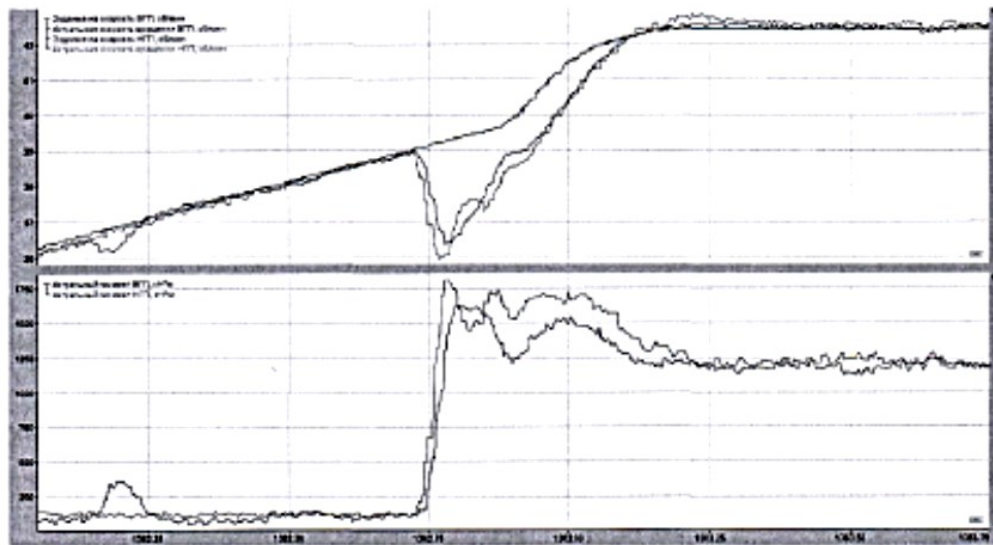


Рис. 1. Захват на участке ускорения с последующим разгоном

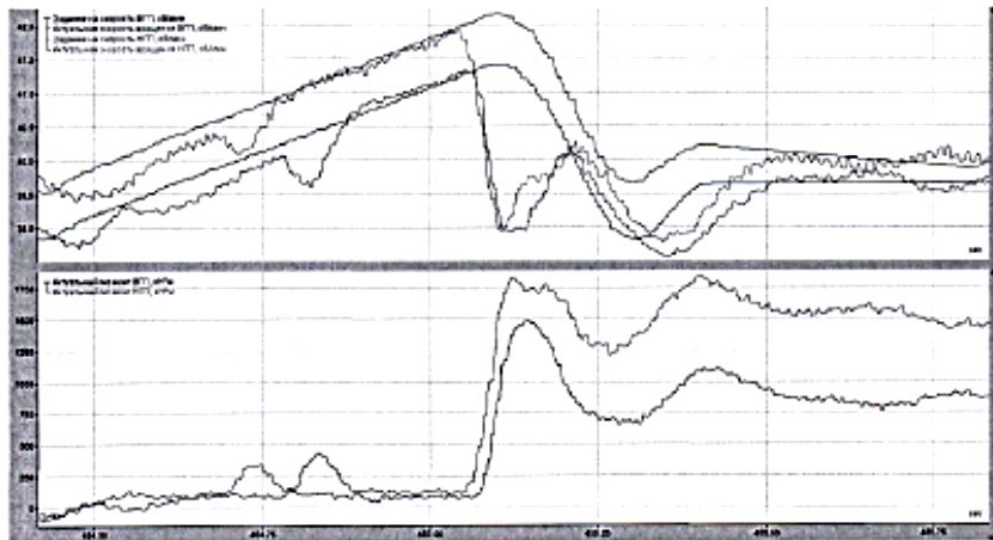


Рис. 2. Захват на участке ускорения с компенсацией динамического момента

2. При захвате проката на участке ускорения электропривода зазоры в шпиндельных соединениях полностью закрыты. Амплитуда ударного момента составляет 20% установившегося значения (рис. 1).

3. Снижение задания скорости после захвата создает дополнительный отрицательный момент, частично компенсирующий динамический момент, вызванный ударным приложением нагрузки (рис. 2). Величина дополнительного момента может регулироваться путем изменения темпа снижения скорости. Это обеспечивает ограничение динамического момента при захвате.

4. Существует проблема неравномерной загрузки электроприводов верхнего и нижнего валков в связи с несогласованной работой регулятора деления нагрузок и системы лыжеобразования (рис. 2).

**Выводы**

1. Промышленное внедрение на стане 5000 комплекса разработанных технических решений обеспечивает:

- снижение динамических нагрузок электрического и механического оборудования горизонтальной клетки;
- снижение внеплановых простоев за счет сокращения аварий по причине поломки электрического и механического оборудования.

2. В ходе экспериментальных исследований алгоритмов, реализующих предложенные способы, подтверждена эффективность их промышленного внедрения.

**Рекомендации:**

1. Обеспечить опытно-промышленную эксплуатацию внедренных алгоритмов снижения динамических нагрузок.

2. Провести сбор и обработку информации о динамических режимах электроприводов горизонтальной клетки, с целью наиболее точной оценки результатов внедрения.

3. Выполнить разработку и внедрение взаимосвязанной системы лыжеобразования и выравнивания нагрузок электроприводов верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки.

Выполненные разработки могут быть рекомендованы для внедрения в черновой группе стана 2000 после доработки.

Начальник ЦЭТЛ

И.о. начальника ПТЛ

И.о. инженера по техническому надзору (электрооборудования)

Научный руководитель НИОКР

Шубин А.Г.

Банщикова В.С.

Шапарь А.А.

Радионова А.А.