

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

На правах рукописи



ГАСИЯРОВ ВАДИМ РАШИТОВИЧ

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

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук,

профессор

Радионов А.А.

Челябинск 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b>  | 8  |
| <b>Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СТАНА 5000</b>  | 26 |
| 1.1. Анализ производства трубного проката  | 27 |
| 1.2. Характеристика стана 5000 ПАО «ММК»   | 31 |
| 1.3. Технология прокатки на толстолистовых станах  | 34 |
| 1.4 Оборудование реверсивной клетки  | 37 |
| 1.5. Характеристика силового электрооборудования   | 42 |
| 1.6. Характеристика системы автоматизации горизонтальной и вертикальной клетей   | 47 |
| 1.7. Реализация концепции ROLL-GAP CONTROL   | 50 |
| 1.8. Технология профилированной прокатки   | 54 |
| 1.9. Анализ режимов лыжеобразования и деления нагрузок   | 57 |
| 1.9.1. Формирование изгиба переднего конца раската   | 58 |
| 1.9.2. Распределение нагрузок двигателей при существующем алгоритме управления электроприводами  | 61 |
| 1.10. Возникновение дефекта «серповидность»  | 63 |
| 1.11. Анализ динамических нагрузок при захвате   | 66 |
| 1.12. Выводы и постановка задачи исследований  | 72 |
| <b>Глава 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ. СПОСОБ СОГЛАСОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КЛЕТЕЙ</b> | 79 |
| 2.1. Постановка задачи   | 79 |
| 2.2. Разработка модели электропривода клетки   | 81 |
| 2.2.1. Модель синхронного двигателя  | 81 |
| 2.2.2. Моделирование системы ПЧ-СД с векторным управлением   | 83 |
| 2.3. Упрощенная модель электромеханической системы   | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.4. Разработка модели взаимосвязанных электроприводов последовательно расположенных клеток                               | 94  |
| 2.4.1. Математическое описание очага деформации   | 96  |
| 2.4.2. Математическая модель раската в межклетевом промежутке   | 104 |
| 2.4.3. Результаты моделирования   | 107 |
| 2.5. Обоснование способа согласования скоростей взаимосвязанных электроприводов клеток по принципу «постоянства массы»    | 109 |
| 2.6. Соотношение скоростей металла и валков в очаге деформации  | 114 |
| 2.7. Разработка способа регулирования скоростей по принципу «постоянства массы»   | 118 |
| 2.7.1. Принцип Головина-Симса   | 118 |
| 2.7.2. Описание способа   | 119 |
| <b>ВЫВОДЫ</b>   | 123 |
| <b>Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КЛЕТИ</b> | 126 |
| 3.1. Постановка задачи  | 126 |
| 3.2. Разработка уточненной методики расчета момента прокатки при высоких очагах деформации                                | 128 |
| 3.2.1. Обоснование исследований   | 128 |
| 3.2.2. Аналитические зависимости для расчета  | 129 |
| 3.2.3. Расчет усилия прокатки с учетом реверсивного движения заготовки  | 137 |
| 3.2.4. Экспериментальное определение угла точки приложения равнодействующей давления металла на валки                     | 138 |
| 3.3. Разработка программы расчета энергосиловых параметров прокатки толстого листа  | 140 |
| 3.4. Проверка адекватности разработанной методики расчета момента прокатки  | 143 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.5. Обоснование разработки программы автоматизированного анализа нагрузочных режимов двигателей ВГП и НГП  | 146 |
| 3.6. Расчет эквивалентной нагрузки по результатам on-line замеров   | 149 |
| 3.7. Разработка алгоритма расчета эквивалентного момента двигателя на основе осредненных данных   | 156 |
| 3.7.1. Аппроксимация скоростных диаграмм  | 156 |
| 3.7.2. Расчет эффективного момента двигателя по аппроксимированным нагрузочным диаграммам   | 158 |
| 3.7.3. Алгоритм программы   | 161 |
| <b>ВЫВОДЫ</b>   | 164 |
| <b>Глава 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ВАЛКОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КЛЕТИ В РЕЖИМАХ ЛЫЖЕОБРАЗОВАНИЯ И ДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК</b> | 166 |
| 4.1. Обоснование направлений исследований   | 167 |
| 4.2. Исследование режимов системы лыжеобразования и РДН при существующей настройке  | 170 |
| 4.3. Методика согласования режимов систем лыжеобразования и деления нагрузок  | 174 |
| 4.3.1. Основные позиции методики  | 174 |
| 4.3.2. Способ управления электроприводами в режиме лыжеобразования  | 175 |
| 4.3.3. Способ выравнивания нагрузок электроприводов в квазиустановившемся режиме  | 180 |
| 4.4. Разработка имитационной модели   | 182 |
| 4.5. Исследования методом математического моделирования   | 185 |
| 4.5.1. Переходные процессы при моделировании разработанного способа лыжеобразования   | 185 |
| 4.5.2. Исследование моментов ВГП и НГП в режиме деления нагрузок  | 188 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.6. Результаты экспериментальных исследований разработанных решений  | 190 |
| <b>ВЫВОДЫ</b>   | 192 |
| <b>Глава 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИММЕТРИИ ЗАЗОРА ВАЛКОВ РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ</b>         |     |
| 5.1. Причины возникновения дефекта «серповидность»  | 195 |
| 5.2. Анализ настройки РАС регулятора  | 199 |
| 5.3. Разработка способа регулирования асимметрии профиля раската  | 203 |
| 5.3.1. Принцип перераспределения регулирующих воздействий   | 203 |
| 5.3.2. Повышение быстродействия системы регулирования   | 209 |
| 5.4. Способ предиктивного регулирования перекоса зазора валков клетки толстолиствого стана                    | 212 |
| 5.5. Экспериментальные исследования   | 214 |
| 5.6. Обсуждение результатов   | 216 |
| <b>ВЫВОДЫ</b>   | 217 |
| <b>Глава 6. ОГРАНИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РЕЖИМЕ ЗАХВАТА МЕТАЛЛА ВАЛКАМИ</b> |     |
| 6.1. Обоснование направлений исследований   | 220 |
| 6.2. Анализ режима захвата металла валками  | 225 |
| 6.3. Способ ограничения динамического момента с предразгоном и замедлением после захвата                      | 227 |
| 6.3.1. Принцип ограничения динамического момента  | 227 |
| 6.3.2. Описание способа   | 230 |
| 6.3.3. Исследование методом математического моделирования   | 232 |
| 6.4. «Инвариантный» способ управления скоростным режимом с компенсацией динамической ошибки                   | 236 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.4.1. Описание способа   | 236 |
| 6.4.2. Способ компенсации динамической ошибки скорости  | 237 |
| 6.4.3. Экспериментальные исследования разработанного способа  | 240 |
| 6.5. Разработка наблюдателя упругого момента  | 242 |
| 6.6. Разработка замкнутой системы регулирования координат неуправляемой массы (валка)   | 246 |
| <b>ВЫВОДЫ</b>   | 250 |
| <b>Глава 7. ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТОК НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОКАТНЫХ СТАНАХ. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ</b> |     |
| 7.1. Внедрение разработанного способа ограничения динамических нагрузок на стане 5000   | 254 |
| 7.2. Результаты экспериментальных исследований  | 257 |
| 7.3. Внедрение разработанной методики расчета усилий прокатки на стане 2000   | 261 |
| 7.3.1. Обоснование задачи   | 262 |
| 7.3.2. Интерфейс программного обеспечения   | 264 |
| 7.3.3. Проверка адекватности методики расчета. Экспериментальные исследования   | 266 |
| 7.4. Промышленное внедрение способа регулирования межклетевых натяжений в черновой группе стана 2000                          | 268 |
| 7.4.1. Анализ режимов действующей САРНН   | 268 |
| 7.4.2. Функциональная схема системы, реализующей способ   | 270 |
| 7.4.3. Экспериментальные исследования натяжений при внедрении разработанного алгоритма  | 273 |
| 7.4.4. Результаты опытно-промышленных испытаний   | 276 |
| 7.5. Внедрение способа согласования скоростей электроприводов вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки       | 277 |
| 7.6. Оценка технико-экономической эффективности внедрения результатов диссертационных исследований                            | 280 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.6.1. Оценка эффективности внедрения алгоритмов ограничения динамических нагрузок электроприводов стана 5000              | 281 |
| 7.6.2. Оценка технико-экономической эффективности внедрения разработок на стане 2000                                       | 283 |
| 7.6.3. Оценка суммарного эффекта от внедрения результатов диссертационных исследований                                     | 287 |
| <b>ВЫВОДЫ</b>  | 288 |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>  | 291 |
| <b>ЛИТЕРАТУРА</b>  | 294 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>  | 332 |
| Приложение 1. Технические характеристики оборудования реверсивной клетки стана 5000  | 333 |
| Приложение 2. Результаты расчетов и экспериментальных исследований энергосиловых параметров прокатки на станах 5000 и 2000 | 339 |
| Приложение 3. Экспериментальная оценка влияния натяжений на момент прокатки  | 342 |
| Приложение 4. Акты внедрения и опытно-промышленных испытаний   | 343 |

## ВВЕДЕНИЕ

Строительство магистральных трубопроводов в районах континентального шельфа Российской Федерации, реализация масштабных проектов «Восточная Сибирь - Тихий океан», «Сила Сибири» и ряда других требуют увеличения выпуска и расширения сортамента труб большого диаметра. Постоянно возрастает спрос на толстостенные трубы из специальных хладостойких, труднодеформируемых сталей [1–3]. Эта задача приобретает дополнительную актуальность в связи с необходимостью замены изношенных участков нефтегазопроводов, находящихся в эксплуатации длительное время.

Долгое время отечественный рынок металло- и трубопродукции обслуживался зарубежными производителями из Германии, Италии, Японии, Франции. В истекшие 10-12 лет ситуация изменилась в пользу отечественных металлургических предприятий. Этот вывод подтверждают показатели ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»): только за 2019 год отгрузка продукции трубным предприятиям выросла на 27% и достигла 2,56 млн тонн (второй результат в истории ММК) [4]. Всего в адрес трубников в 2019 году был отгружен 31% всех поставок комбината. Толстолистовой прокат ММК идет на крупнейшие заводы страны и используется во всех ключевых трубопроводных проектах XXI века [5, 6].

Названный технологический прорыв произошел благодаря вводу в строй на отечественных заводах нескольких толстолистовых прокатных станов. В их числе три современных стана 5000, сданных в эксплуатацию в ПАО «ММК» в 2009 г., ОАО «Северсталь» (г. Колпино) в 2000 г. и ОАО «Выксунский металлургический завод» (ОАО «ВМЗ», г. Выкса, Нижегородская область) – в 2011 г.

Сумма производственных мощностей трех сверхкрупных станов – Колпинского, Магнитогорского и Выксунского - составляет до 3,5 млн. тонн горячекатаного широкого листа, толщина которого может варьироваться от 15 до 100 мм. Причем это лист из качественных сортов стали, нужных не только трубникам, но и машиностроителям, атомным энергетикам, строителям судов,

в том числе подводных лодок [7]. В мире подобный сортамент марок стали производился только отдельными предприятиями Японии и Германии.

Разработчиком технологии и генеральным подрядчиком строительства этих станов выступила компания SMS-Demag (в настоящее время – SMS group, Германия). Эта фирма является безусловным лидером в разработке и строительстве толстолистовых (и не только) прокатных станов. Отличительной особенностью технологии является совмещение черновой и чистой прокатки в одной реверсивной клетки. При этом черновая прокатка осуществляется последовательно для партии (до шести заготовок), а чистовая – индивидуально для каждой заготовки.

Основным потребителем трубной заготовки, производимой ПАО «ММК», является Челябинский трубопрокатный завод (ПАО «ЧТПЗ») – крупнейший отечественный производитель труб для газопроводов и магистральных нефтепроводов. Технологические агрегаты этого завода позволяют производить толстостенную трубу из хладостойких сталей в требуемых объемах.

Однако ужесточение требований потребителей и переход на международные стандарты требуют повышения качества продукции. Это предопределяет ужесточение требований к трубной заготовке. Показатели качества, в первую очередь, определяются геометрическими размерами листа и температурными режимами прокатки [8–10]. Это предопределяет необходимость жесткого соблюдения скоростного режима и обеспечения заданных обжатий, которые определяют тепловое состояние металла в очаге деформации. Также предъявляются высокие требования к техническому состоянию электрического и механического оборудования клеток и вспомогательных механизмов.

Основными факторами, снижающими конкурентоспособность листового проката, являются высокие расходные коэффициенты и большие эксплуатационные затраты. При производстве толстого листа это связано со сложностью управления технологическим процессом и неудовлетворительной точностью регулирования параметров прокатки. Неэффективная работа систем автомати-

ческого регулирования технологических параметров приводит к значительным потерям металла с боковой и концевой обрезью, а аварийные отключения – к увеличению процента брака.

В связи с изложенным, сокращение брака и повышение качества продукции являются важнейшими задачами современного прокатного производства. Эти задачи должны решаться на основе комплексного подхода, сочетающего развитие технологии и совершенствование автоматизированных электроприводов и систем управления. Для их решения применительно к толстолистовому стану потребовались корректировка положений теории взаимосвязанных систем автоматического регулирования и разработка на их основе новых методов управления.

Стан 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000) оснащен самой мощной прокатной клетью в Европе, обеспечивающей усилие до 12 тыс. т, двигатели каждого валка которой имеют мощность 12 МВт [11]. Основными технологическими узлами стана являются вертикальная обжимная (эджерная) клеть, и универсальная четырехвалковая прокатная клеть. Прокатка в них ведется в реверсивном режиме и подразделяется на две стадии: черновую, включающую 5-6 проходов, и чистовую, включающую до 19 проходов. В процессе совместной прокатки обе клетки имеют жесткую взаимосвязь через металл.

Задачи вертикальной клетки – снятие уширения (увеличения ширины вследствие течения металла в направлении перпендикулярном оси прокатки) и формирование боковых кромок раската (промежуточного продукта между слябом и готовым листом). Основные функции по формированию профиля и свойств конечной продукции возлагаются на горизонтальную клеть. Она представляет собой сложный многосвязный комплекс, оснащенный системами автоматического регулирования технологических параметров, имеющих функциональные и алгоритмические связи в системе АСУ ТП и человеко-машинного интерфейса.

Основные исследования и разработки, выполняемые в представленной диссертационной работе относятся горизонтальной клетю. Поэтому далее под термином «реверсивная клеть» понимается горизонтальная клеть стана 5000.

Основными электромеханическими системами горизонтальной клетки являются индивидуальные электроприводы верхнего и нижнего валков. Каждый привод выполнен на основе синхронного двигателя с частотным регулированием скорости. Система регулирования скорости выполнена двухконтурной с внутренним контуром регулирования момента. Передача вращающего момента от двигателя к валку осуществляется с помощью шпинделя, имеющего сложную конструкцию.

Повышение требований к характеристикам выпускаемой продукции предопределяет актуальность разработки новых способов управления электроприводами и совершенствования существующих систем автоматического регулирования технологических параметров. В свою очередь, это требует исследования взаимосвязанных электромеханических и гидравлических систем горизонтальной клетки, а также взаимосвязей вертикальной и горизонтальной клеток. Необходимо согласование работы сложных систем технологической автоматизации, объединенных концепцией ROLL-GAP CONTROL автоматического управления гидравлическими и электромеханическими нажимными устройствами (НУ). Данная концепция разработана фирмой SMS Demag AG и полностью реализована на стане [12–15]. Не менее важной задачей является ограничение динамических нагрузок, возникающих при захвате металла валками.

Динамические нагрузки, возникающие в валопроводах верхнего и нижнего валков клетки, негативно влияют на эксплуатационные характеристики электрического и механического оборудования. Как показал опыт эксплуатации стана 5000, наименее долговечным механическим узлом является шпиндель. Поломка шпиндельных соединений приводит к длительным простоям стана и значительным затратам на устранение последствий. Достаточно заметить, что стоимость шпинделя горизонтальной клетки на сегодняшний день составляет около 100 млн руб., простой стана при его замене может составлять до трех суток.

Возможности современных электроприводов, выполненных по системе «преобразователь частоты-синхронный двигатель» с векторным управлением

координатами, ресурсы интеллектуальных систем автоматического регулирования создают технические предпосылки для решения проблем толстолистовых станов. Наибольшие сложности при этом вызваны недостаточным опытом эксплуатации станов 5000 и недостаточной изученностью комплекса взаимосвязей электромеханических систем реверсивной прокатной клетки.

Необходимость учета взаимосвязей, обеспечения согласованной работы в установившемся и динамических режимах, повышение требований к точности регулирования параметров прокатки предопределили актуальность проведения комплексных исследований автоматизированных электрических и гидравлических приводов и систем автоматического регулирования технологических параметров, объединенных в диссертации термином «взаимосвязанные электротехнические системы» клетки толстолистого прокатного стана.

Большой вклад в развитие теории и разработку автоматизированных электроприводов и систем автоматического регулирования прокатных станов внесли отечественные ученые: В.П. Бычков [16], В.И. Ключев [17, 18], А.И. Целиков [19, 20], Н.Н. Дружинин [21, 22], А.С. Филатов [23, 24], И.А. Селиванов [25, 26], О.И. Осипов [27–29], В.Н. Мещеряков [30–32]. Вклад в развитие теории и практики взаимосвязанных электромеханических систем внесли Г.Я. Пятибратов [33–36], А.Р. Колганов [37–40], О.А. Кравченко [41–43], С.И. Лукьянов [44–46]. Следует отметить труды сотрудников ИЧМ НАН Украины, в исследованиях вопросов динамики прокатных станов ведущая роль принадлежит С.Н. Кожевникову [47, 48], В.И. Большакову, В.В. Вереневу [49–52], П.В. Кроту [53, 54]. Значительный вклад в развитие теории и практики отказоустойчивости оборудования прокатных станов и исследование динамических режимов электромеханических систем внес В.Г. Артюх [55–60].

В направлении исследования реверсивных станов наиболее полными являются научные разработки М.Ю. Файнберга [61], В.Н. Выдрина [62]. Однако они датируются 60-ми годами прошлого столетия, к тому же в них решались в основном проблемы прокатки, а не электроприводов и систем автоматического управления.

Ведущими зарубежными фирмами, работающими в данном направлении, являются Siemens (Германия), General Electric (США), VAI (Австрия), SMS-Demag (Германия), Ansaldo (Италия) и ряд японских фирм.

В подтверждение актуальности совершенствования производства и повышения качества листового проката достаточно заметить, что за истекшее десятилетие развитию технологии толстолистовых станов посвящено более 20 диссертаций, в том числе докторские диссертации [63–67]. Непосредственно совершенствованию технологий станов 5000 посвящены кандидатские диссертации [68–72]. В то же время диссертаций, посвященных совершенствованию электротехнических систем таких станов, не было.

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

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

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Все исследования проводятся для реверсивной клетки стана 5000 ПАО «ММК». Вместе с тем, полученные результаты являются в значительной степени универсальными и могут быть внедрены на толстолистовых и широкополосных станах.

**Результаты решения поставленных задач отражены в семи главах.**

В первой главе дана характеристика технологии современных толстолистовых станов и оборудования стана 5000 ПАО «ММК». Представлены силовые схемы электроприводов горизонтальных валков, рассмотрены функции и структура системы автоматизации реверсивной клетки. Приведена структура, поясняющая концепцию ROLL-GAP CONTROL, рассмотрены схемы систем регулирования толщины и управления положением гидравлических НУ. Рассмотрены схемы профилированной прокатки по технологии ASC, реализованной на стане. Схематично представлен принцип формирования изгиба переднего конца раската (лыжеобразования). Экспериментально подтверждено неравномерное распределение нагрузок двигателей верхнего и нижнего валков при существующем алгоритме управления. Показан механизм возникновения дефекта «серповидность», обоснована актуальность разработок, направленных на его устранение. Экспериментально подтверждены недопустимые динамические нагрузки двигателя и механических передач, обоснованы направления их ограничения. Конечным результатом является уточнение поставленных задач и методов исследований.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей взаимосвязанных электромеханических систем реверсивной клетки. Представлена модель электропривода, выполненного по системе ПЧ-СД с векторным управлением

скоростью. Рассмотрена упрощенная модель двухмассовой электромеханической системы валков с упругой связью и зазором в механических соединениях. Приведены математическое описание и структурная схема модели очага деформации. Разработана модель упругой взаимосвязи электроприводов последовательно расположенных клеток через металл. Дано обоснование и выполнена разработка способа регулирования скоростей по принципу «постоянства массы». Представлена структурная схема системы автоматического регулирования толщины (САРТ) стана 5000, обеспечивающая коррекцию скорости электроприводов валков при перемещении НУ. Выполнен анализ переходных процессов, подтверждающих компенсацию силового взаимодействия клеток в квазиустановившемся режиме прокатки.

Третья глава посвящена разработке комплексной методики анализа и прогнозирования нагрузок электроприводов горизонтальной клетки на основе уточненного расчета энергосиловых параметров прокатки и измерения моментов (токов) двигателей в on-line режиме. Получены уточненные аналитические зависимости для расчета давления металла на валки при высоких очагах деформации. Разработаны алгоритм и программное обеспечение, выполнен анализ эквивалентных нагрузок двигателей главных приводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков. Разработана методика расчета эквивалентных нагрузок по параметрам, зафиксированным непосредственно во время прокатки с заданным интервалом опроса. Разработаны алгоритм и программа расчета эквивалентных моментов по упрощенным нагрузочным диаграммам. Представлены результаты расчета и выполнен анализ моментов ВГП и НГП для стадий черновой и чистовой прокатки. Обоснована проблема согласования (выравнивания) нагрузок двигателей.

Четвертая глава посвящена совершенствованию алгоритмов управления электроприводами верхнего и нижнего валков в режиме формирования «лыжи» и проблеме выравнивания нагрузок двигателей. Рассмотрены действующая система лыжеобразования и регулятор деления нагрузок (РДН). На основе анализа осциллограмм скоростей и моментов двигателей отмечены не-

достатки их настройки. Разработан способ согласования режимов, обеспечивающий формирование заданных параметров «лыжи» и сокращение времени выравнивания нагрузок в квазиустановившемся режиме. Предложен нелинейный РДН с переключающейся структурой, обеспечивающий повышение быстродействия при компенсации рассогласования скоростей. Проведены исследования методом математического моделирования и экспериментальные исследования, подтвердившие преимущества разработанных решений.

Пятая глава посвящена проблеме устранения перекоса зазора валков, являющегося причиной дефекта «серповидность». Показан механизм возникновения изгиба в плоскости прокатки. Обоснован принцип регулирования асимметрии поперечного профиля путем перераспределения регулирующих воздействий на гидравлические НУ со стороны электропривода (DS) и со стороны обслуживания (OS). Выполнена разработка комплекса технических решений, направленных на компенсацию асимметрии межвалкового зазора. Разработаны способы устранения «наследственной» клиновидности заготовки и текущего перекоса зазора, обусловленного разницей усилий по сторонам OS и DS, возникающей во время прокатки. В результате математического моделирования и экспериментальных исследований подтверждено снижение разнотолщинности по ширине раската. Выполненные разработки представляют собой развитие концепции ROLL-GAP CONTROLL реверсивной клетки толстолистого стана.

В шестой главе обоснована концепция ограничения нагрузок в режиме захвата металла валками, согласно которой осуществляется индивидуальная компенсация динамических составляющих упругого момента шпинделя. Разработаны способы ограничения момента, осуществляющие реализацию концепции за счет формирования специальных тахограмм электропривода. Теоретически и экспериментально доказано, что при реализации способов достигается ограничение моментов двигателей и упругих моментов шпинделей. В развитие теории и практики двухмассовых электромеханических систем разработан наблюдатель скорости валка, обеспечивающий восстановление переходных процессов по непрерывно измеряемым параметрам электропривода.

Разработана система «прямого» регулирования скорости валка, обеспечивающая ограничение упругого момента в валопроводе клетки в режиме ударного приложения нагрузки. Путем математического моделирования подтверждена эффективность данного решения.

Седьмая глава посвящена промышленному внедрению выполненных разработок на станах 5000 и 2000 ПАО «ММК». Дано описание способа ограничения динамического момента за счет предразгона и компенсации ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки, внедренного на стане 5000. Результатами, внедренными на стане 2000, являются алгоритмы регулирования межклетевых натяжений в непрерывной подгруппе черновой группы клеток и согласования скоростей электроприводов вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки. Также представлена программа расчета энергосиловых параметров прокатки слябов повышенной толщины на широкополосном стане горячей прокатки. Путем сопоставления результатов, обеспечиваемых существующими и разработанными алгоритмами, подтверждены технические преимущества предложенных решений. Представлены расчеты технико-экономической эффективности внедрения каждого решения и суммарный экономический эффект. Даны рекомендации по расширенному внедрению результатов диссертационных исследований.

**Научная новизна** работы заключается в том, что она обеспечивает новые знания о взаимосвязанном регулировании координат электроприводов и технологических параметров толстолистного прокатного стана, обосновывает новые принципы и алгоритмы управления электротехническими системами, раскрывает возможности и резервы снижения материалоемкости и повышения качества продукции средствами автоматизированных электроприводов и систем автоматического управления.

В работе получены следующие основные научные результаты:

1. Разработана методика оценки ограничений, накладываемых электроприводом на технологический процесс толстолистного стана, включающая аналитические зависимости расчета усилия прокатки в реверсивном режиме с

большими обжатиями и алгоритм автоматизированного расчета эквивалентных параметров нагрузки (моментов либо мощностей) двигателей в on-line режиме.

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

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

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

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

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

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

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

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

- непосредственно замыканием зазоров в механических сочленениях;
- характеристиками упругости и демпфирующими свойствами валопроводов;

– настройкой системы автоматического регулирования скорости электропривода.

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

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

**Практическая ценность работы** состоит в том, что в результате совершенствования автоматизированных электроприводов и систем управления созданы технические предпосылки для производства листового проката расширенного сортамента. Независимо от сортамента, внедрение разработанных решений обеспечивает снижение материалоемкости, аварийности прокатного производства и повышение качества выпускаемой продукции.

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

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

– согласования режимов регулятора деления нагрузок (РДН) и системы лыжеобразования;

– компенсации асимметрии зазора валков в процессе прокатки за счет автоматического регулирования положений НУ, расположенных на приводной и неприводной сторонах клетки.

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

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

5. Внедрение разработанных систем и алгоритмов обеспечивает:

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

6. В результате экспериментальных исследований и длительной эксплуатации подтверждены показатели технико-экономической эффективности внедренных систем: экономия металла в объеме 4,7 тыс. т/год, увеличение срока эксплуатации оборудования главной линии клетки от 3 до 8 лет, снижение затрат на замену шпинделя на 5,76 млн руб./год. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения на двух станах – 12,7 млн. руб./год.

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

В целом, внедрение результатов исследований в прокатное производство расширяет возможности действующих и вновь создаваемых толстолистовых и широкополосных станов, способствует повышению конкурентоспособности продукции отечественных металлургических предприятий.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Обоснованность и достоверность научных положений** подтверждаются:

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

– анализом опыта эксплуатации толстолистовых прокатных станов;

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

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

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

– соответствием полученных результатов научным положениям, опубликованным другими авторами;

– результатами исследований и опытно-промышленной эксплуатации внедренных разработок.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 27 международных конференциях и заседаниях научных сообществ, в том числе: VI, X Международных конференциях по автоматизированному электроприводу (АЭП), Тула, 2010 г.,

Новочеркасск, 2018 г.; International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Томск, 2014 г.; Международной XVI научно-технической конференции “Электроприводы переменного тока (ЭППТ), Екатеринбург, 2015 г.; International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Омск, 2015 г.; 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Новосибирск, 2016 г.; 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Челябинск, 2016 г.; 7<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup>, 10th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM), Сингапур, 2016 г., Пхукет, Таиланд, 2018, 2019 г.; IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), Санкт-Петербург, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.; 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Флоренция, Италия, 2016 г.; Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Омск, 2016 г.; IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Санкт-Петербург, 2017 г.; 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Австралия, 2017 г.; 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Челябинск, 2017 г.; 43<sup>rd</sup>, 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Пекин, Китай, 2017 г., Лиссабон, Португалия, 2019 г.; IEEE 12th, 13th International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Синай, Индия, 2018 г., Тулуза, Франция, 2019 г.; International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Сочи, 2018 г.; IEEE 10th, 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), Кейптаун, ЮАР, 2019, 2020 г.

В 2010–2017 гг. работа выполнялась в рамках пяти прямых договоров с ПАО «ММК». В 2017-2019 гг. исследования выполнялись в рамках госзадания «Проведение комплекса научных исследований и разработок, обеспечивающих повышение энергетической эффективности и ресурсосбережение при производстве толстолиствого проката» (№13.9656.2017/БЧ от 10.03.2017 г). В настоящее время выполняется НИОКР по теме «Разработка и внедрение ал-

горитмов оптимизации нагрузочных и тепловых режимов электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 при прокатке слябов расширенного сортамента» с ПАО «ММК».

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

Считаю своим долгом выразить благодарность научному консультанту д.т.н., профессору Радионову А.А., а также д.т.н., профессору Карандаеву А.С. и д.т.н., профессору Храмшину В.Р. за ценные советы и научные консультации. Выражаю признательность коллективу кафедры мехатроники и автоматизации ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» за поддержку, оказанную при работе над диссертацией. Особая благодарность ученикам и ближайшим помощникам – сотрудникам ПАО «ММК» к.т.н. Шубину А.Г., к.т.н. Логинову Б.М. специалистам электрослужб ПТЛ, ЛПЦ-10 и ОСК к.т.н. Маколову В.Н., к.т.н. Гостеву А.Н. и многим другим за помощь при проведении экспериментальных исследований и внедрении результатов.

## **Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СТАНА 5000**

Задачи совершенствования автоматизированных электротехнических систем толстолистовых прокатных станов, направленные на снижение материалоемкости и улучшение качества проката, требуют обоснования путей решения и конкретизации методов исследования. Для этого необходим анализ технологии толстолистовой прокатки, характеристик силового электрооборудования и проектной настройки систем автоматического регулирования технологических параметров реверсивной клетки стана 5000. Целью является исследование взаимосвязей электромеханических и гидравлических систем и обоснование направлений разработки алгоритмов согласованного управления.

Возникает задача оценки возможностей расширения сортамента проката с учетом ресурса электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров. Необходимо обоснование разработки технических решений, обеспечивающих согласование нагрузок двигателей верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки в комплексе с повышением точности формирования изгиба переднего конца промежуточной заготовки (раската). Эта задача должна решаться путем совершенствования алгоритмов задания и регулирования скоростей.

С целью оценки возможностей повышения точности регулирования геометрических размеров готового листа (проката) необходим анализ технологии с выявлением дефектов, обусловленных недостатками проектных настроек систем автоматического регулирования. Необходимы исследования взаимного влияния электромеханических систем вертикальной и горизонтальной клетей в квазиустановившемся и динамических режимах.

Необходимо обоснование направлений совершенствования концепции **ROLL-GAP CONTROL** в плане повышения точности регулирования толщины и ликвидации дефекта «серповидность», вызванного перекосом зазора валков и наследственной разнотолщинностью по ширине раската. Требуется

оценка взаимосвязей гидравлических нажимных устройств в структуре САРТ и электроприводов клетей в режиме формирования конического профиля на концах раската.

Ставится задача обоснования способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем горизонтальной клетки в режиме захвата металла валками и силовой взаимосвязи электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей через металл.

Обоснование направлений и методов решения перечисленных задач должно выполняться по результатам экспериментальных исследований, проведенных на стане. Конечными целями являются конкретизация задач по совершенствованию электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров и определение путей достижения цели диссертационной работы.

### **1.1. Анализ производства трубного проката**

Для страны, имеющей длинные магистрали нефте- и газопроводов, гигантские заводы, многочисленные мосты, большой флот, свою атомную промышленность, требуются большие объемы широкоформатного листового проката. В середине 2006 года только производители труб оценивали потребность в 1 млн т. качественного толстого листа [73]. Но на протяжении долгого времени в России был лишь один широкоформатный стан (Ижорский в Колпино), который был построен в СССР.

Очевидно, что развитие отечественного рынка электросварных труб большого диаметра произошло благодаря вводу в строй прокатных станов 5000. Это является результатом производственной кооперации трубопрокатных и металлургических заводов. Наглядным примером является кооперация крупнейших отечественных объединений: группы «ЧТПЗ» и ПАО «ММК», которую наглядно иллюстрирует рисунок 1.1.

В России неоднократно пытались построить современный толстолистовой стан. В 1996 году заявили о строительстве стана 5000 в Нижнем Тагиле. Вместе с ним предполагалось строительство трубосварочного цеха, но под

этот проект не смогли получить гарантированный заказ труб [73]. В 2004 году была еще одна совместная попытка «EvrazGroup» и «Северстали», но и этот проект не был выполнен. В 2006 году сразу несколько крупных инвесторов заговорили о строительстве своих станов 5000. Тогда планировалось построить четыре новых стана. В итоге в России к 2010-2011 годам могло бы быть пять станов 5000, что вызвало бы сильнейшую конкуренцию при сбыте их продукции. На момент планирования постройки новых станов (2006 год) в мире было всего 12 действующих заводов, способных выпускать лист для нужд трубников, пять из которых в Японии и три – в Германии.



а)

б)

Рисунок 1.1 – Толстолистовой прокат ПАО «ММК» – (а) и сварная труба большого диаметра ПАО «ЧТПЗ» – (б)

В итоге к 2010 году из заявленных четырех станов 5000 построили и ввели в эксплуатацию только один – в Магнитогорске (рисунок 1.2, а). Таким образом в России по состоянию на лето 2010 года, было два действующих стана 5000 – в Колпино, в Магнитогорске. Третий стан введен в эксплуатацию 25 ноября 2011 года на Выксунском металлургическом заводе (рисунок 1.2, б).

В результате строительства новых станов в период с 2003 по 2011 годы российский рынок сварных труб вырос на 3,6 млн. тонн, т.е. произошел прирост практически в 2 раза. По данным Росстата и других экспертных компаний, объем потребления на рынке стальных труб в 2017 году составил 9 598 тыс. т, что на 3,1% выше уровня 2016 года (рисунок 1.3, а) [74]. Это связано с интенсификацией нефте- и газодобычи, расширением сети трубопроводов, развитием транспортной инфраструктуры (строительство Крымского моста, портов Усть-Луга и Санкт-Петербург, скоростных автомобильных и железных

дорог и т.д.). В среднесрочной перспективе ожидается сдержанный рост потребления стальных труб на 1-2% ежегодно в основном за счет растущего спроса со стороны нефте- и газодобывающих компаний. Дополнительными драйверами роста рынка могут стать потребности в строительной сфере и дорожном строительстве.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Комплекс по производству толстолистового проката (ПТЛ)  
ПАО «ММК» – (а) и МКС-5000 ОАО «ВМЗ» – (б)

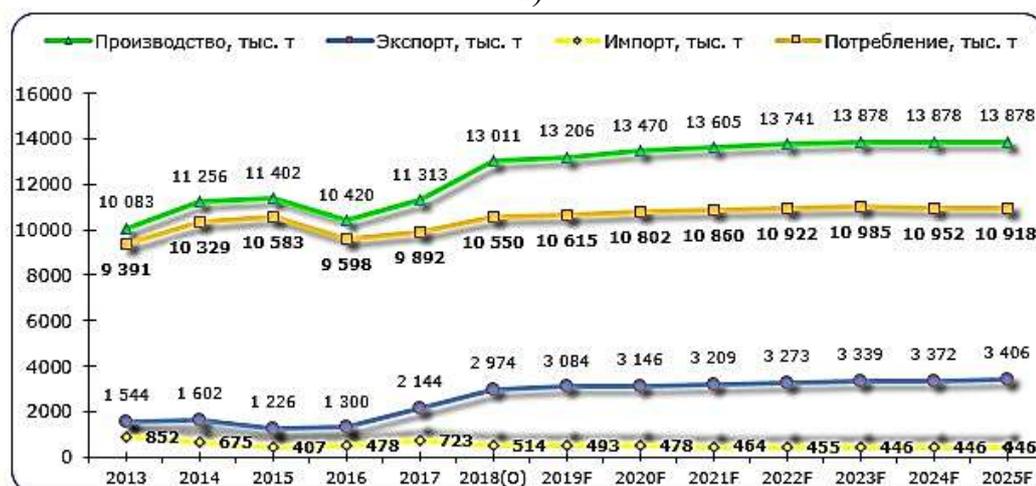
Динамика и структура рынка стальных труб в 2013-2017 гг. и прогноз до 2025 г. (в рамках базового сценария развития) показаны на диаграмме, рисунок

1.3, б. Как видно, преобладает продукция российского производства: в 2016 году на нее пришлось около 95%.



Источник: Данные Росстата, ФТС, экспертные оценки, аналитика IndexBox

а)



Источник: данные компаний, Росстат, ФТС, экспертные оценки, аналитика IndexBox

б)

Рисунок 1.3 – Объем потребления – (а) и динамика рынка стальных труб – (б) в 2013-2017 гг. и прогноз на 2018-2025 гг., тыс. т

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод, что в последнее 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.

Согласно выводам «Ежегодной международной конференции металлургов СТАЛЬ 2010» (Дюссельдорф, Германия) *«Российская металлургия ставит целью стать более эффективной и конкурентоспособной при сбалансированном соотношении внутреннего потребления и экспорта стали. Для обеспечения конкурентоспособности необходимы модернизация оборудования и снижение расходов»* [75].

Несмотря на относительно давность постановки этой задачи, ее решение остается актуальным и в настоящее время.

## **1.2. Характеристика стана 5000 ПАО «ММК»**

Технологию получения труб можно разделить на три основных этапа, которые связаны в жесткую производственную цепочку, – это выплавка стали, прокатка и формовка труб. Толстолистовой прокат производят толщиной 4–6 мм с интервалом 0,5 мм; 6–30 мм – 1,0 мм; 30–60 мм – 2,0 мм; больше 60 мм – 2,0–5,0 мм. Длина листа должна быть кратной 100 мм, но не менее 1200 мм. Большая часть трубной заготовки производится из углеродистой и низколегированной стали.

Стан 5000, составляющий основу ПТЛ ПАО «ММК», построен по самым передовым мировым технологиям. На нем освоены технологии высокотемпературной и низкотемпературной прокатки листов различной толщины и ширины, исходя из требований потребителей к трубам большого диаметра. На стане производится высокорентабельный толстолистовой прокат шириной до 4850 мм из марок стали с категорией прочности до X120 для нефтегазовой отрасли, судо-, мосто- и машиностроения. Производительность стана составляет 1,5 млн тонн в год.

Характеристика прокатываемых сталей: предел прочности от 50 до 90 кг/мм<sup>2</sup>; предел текучести от 37 до 83 кг/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение от 23 до 18,5%. Исходной заготовкой служат слябы толщиной 250–400 мм, шириной 1300–2600 мм, длиной 2500–4800 мм, массой до 40 т.

Производится горячекатаный лист со следующими параметрами:

- толщина листа: 5 – 400 мм;
- ширина листа: 1300 – 4900 мм;

- длина: 6 – 52 м;
- вес загружаемого материала: 25 – 60 т;
- усилие прокатки до 108 МН.

На рисунке 1.4 схематично показано расположение оборудования толстолистового стана. Состав основного оборудования приведен в подрисуночной подписи. Общая протяженность линии составляет 1100 метров.

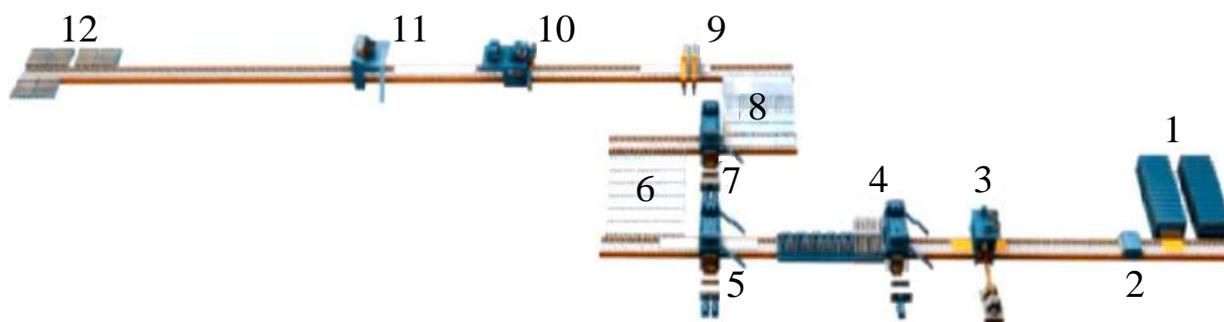


Рисунок 1.4 – Схема расположения оборудования стана 5000:

1 – нагревательные методические печи; 2 – гидросбив окалины; 3 – четырехвалковая клетка; 4 – установка контролируемого ускоренного охлаждения; 5 – машина горячей правки; 6 – холодильник; 7 – машина холодной правки; 8 – инспекционный стол с кантователем; 9 – установка ультразвукового контроля; 10 – комбинированные ножницы для обрезки кромок и для продольной резки; 11 – роликотправительная машина; 12 – карманы

Прокатка слябов осуществляется с помощью двух клетей: обжимной клетки с двумя вертикальными валками и горизонтальной клетки кварто с двумя рабочими и двумя опорными валками. Она предназначена для прокатки листов в несколько проходов в соответствии с требованиями по сортаменту. Фотография клетки со стороны подводящего рольганга (печей) приведена на рисунке 1.5, а. На ней видны наклонно расположенные шпиндели вертикальных валков, двигатели которых установлены сверху.

На стане может прокатываться одновременно до шести раскатов (рисунок 1.5, б). Технологический процесс включает следующие последовательные операции:

- слябы и полураскаты нагреваются в двух печах с шагающими балками, температурный диапазон нагрева 900-1300°С;



a)



б)

Рисунок 1.5 – Вид на прокатную клетку со стороны печей (а) и одновременная прокатка шести раскатов (б)

- далее слябы по подводящему рольгангу передаются в клетку, оборудованную поворотными столами и линейками на входе и выходе;
- прокатка осуществляется в клетке в несколько проходов;

- перемещение слябов из печей на разгрузочный рольганг с помощью устройств безударной выдачи;
- удаление печной окалины водой под высоким давлением (до 235 атм.);
- прокатанный на конечную толщину раскат правится (при необходимости) в машине предварительной горячей правки.

После завершения прокатки листы передаются по отводящему рольгангу к машине предварительной правки и далее в направлении систем спреерного и ламинарного охлаждения. В зависимости от марки стали и соответствующей технологии лист может пропускаться сквозь систему охлаждения без охлаждения либо подвергаться ускоренному контролируемому охлаждению (АСС) или закалке (DQ). Охлаждение может производиться за один проход либо в возвратно-поступательном режиме с соответствующими параметрами расхода воды и скорости охлаждения.

### 1.3. Технология прокатки на толстолистовых станах

Толстолистовую продукцию различают по свойствам, перечисленным в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Свойства и критерии качества толстолистого проката

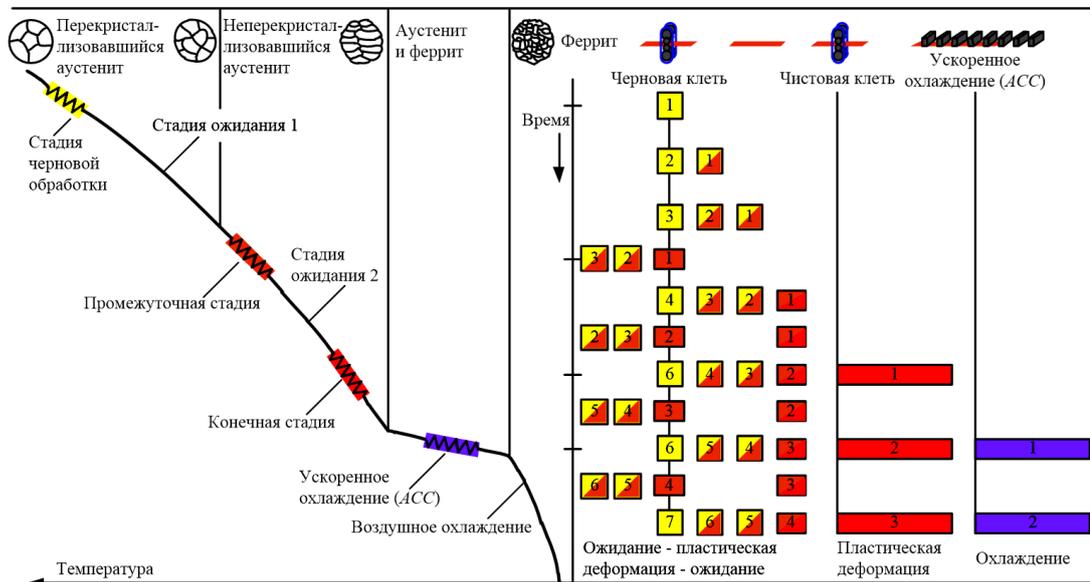
| Свойство                 | Контролируемые показатели  |
|--------------------------|--|
| Прочность                | Предел текучести при растяжении.<br>Предел прочности при растяжении.<br>Отношение предела текучести к временному сопротивлению.<br>Твердость по Бриннелю (НВ). |
| Вязкость                 | Работа разрушения (надрезанного образца).<br>Температура перехода.<br>Зона статического разрушения.  |
| Технологические свойства | Углеродный эквивалент СЕg.<br>Температура подогрева.   |
| Форма продукта           | Плоскость.<br>Геометрия.   |
| Стойкость к средам       | Погодостойкие листы.<br>Стойкость к кислым газам.  |

Основные стратегии достижения указанных свойств, реализуемые на современных толстолистовых станах, представлены на рисунке 1.6, а [76]. Они обеспечиваются с помощью заданных режимов пластической деформации и

температурного режима (рисунок 1.6, б). Могут применяться три технологии: нормальная прокатка; контролируемая прокатка; термомеханическая прокатка.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Современные стратегии прокатки толстого листа (а) и стадии многолистовой прокатки (б)

Обычная прокатка производится в одну стадию без промежуточного подстуживания. Низкотемпературная термомеханическая прокатка производится

в 2, 3 и 4 стадии в интервале температур 630-1200°C с использованием как продольной, так и продольно-поперечной прокатки, с промежуточным охлаждением как на воздухе, так и водой [77]. Как отмечалось выше, на стане может прокатываться одновременно до шести раскатов. Для отдельных сталей (около 20% всего объема) производится прокатка до достижения длины подката до 10 м, далее полураскат возвращается на склад слябов, охлаждается, разрезается пополам и затем нагревается в печи до температуры ~1100°C с последующей прокаткой в несколько стадий.

Термомеханическая прокатка применяется для микролегированных и высокопрочных низколегированных сталей. Она осуществляется за две либо три фазы (рисунок 1.6, б). На первой фазе сляб прокатывается до толщины в 2,5 – 4,0 раза большей, чем конечная толщина листа. Черновой раскат охлаждается приблизительно до 850°C, после чего начинается вторая фаза прокатки до конечной толщины листа. Путем комбинации соответствующих микролегирующих элементов и прокатки в специальном температурном диапазоне можно избежать рекристаллизации стали, поэтому полученная микроструктура обеспечивает высокую прочность и хорошую вязкость. Прокатка высокопрочных низколегированных сталей при температуре окружения на второй фазе термомеханического процесса сопряжена с высоким сопротивлением деформации и, следовательно, с высокими значениями давления металла на валки и крутящими моментами.

Некоторые марки стали (низколегированные высокопрочные) требуют медленного охлаждения после процесса прокатки (противофлоккенное охлаждение) [78]. Для этого листы снимают краном с рольганга и штабелируют для медленного охлаждения. После истечения требуемого времени охлаждения листы снова помещают на рольганг. Затем листы поступают на участок холодильников. Здесь их загружают на холодильник с шагающими балками и передают на сторону разгрузки. Фактическую температуру листа вычисляет модель охлаждения.

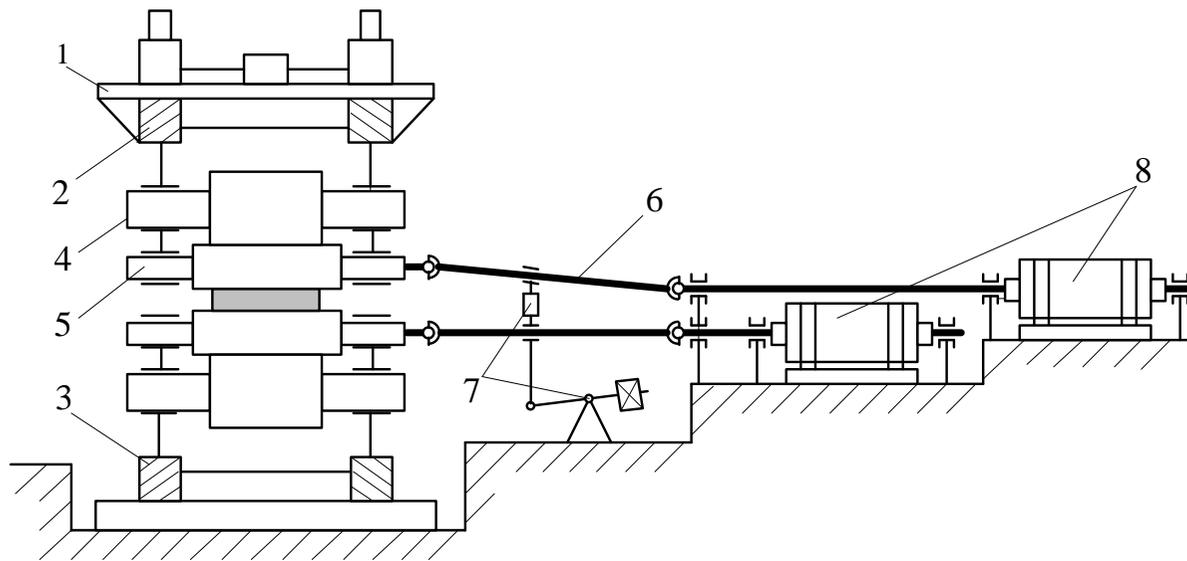
Подробную информацию о технологиях, реализованных на толстолистовых станах, можно получить в учебных пособиях и монографиях [79–82], научных статьях [6, 83 – 87] и др., а также в диссертациях, упомянутых во введении.

#### **1.4 Оборудование реверсивной клетки**

На рисунках 1.7 и 1.8 представлены кинематические схемы горизонтальных и вертикальных валков. Основные технические характеристики четырехвалковой клетки приведены в таблице 1.2, а вертикальной обжимной клетки – в таблице П.1.1 Приложения 1. Рабочие валки установлены на специальных роликовых подшипниках, опорные валки – на подшипниках жидкостного трения «Моргойл», смазываемых с помощью специальной системы масляной смазки. Устройства блокировки рабочего и опорного валков располагаются со стороны оператора. При замене валков они отводятся гидроприводом. Верхний опорный валок уравнивается одним гидроцилиндром.

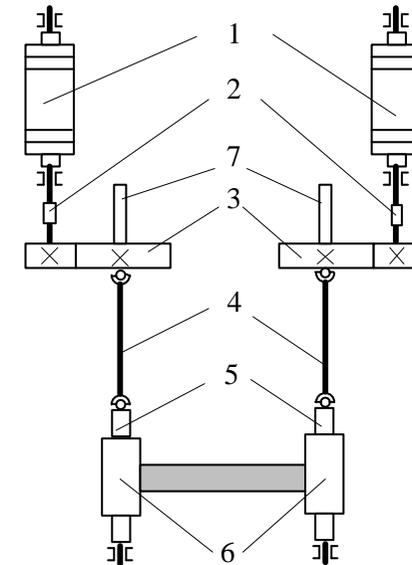
Раствор валков регулируется двумя электродвигателями через червячную передачу, прижимные винты и гайки. Механическая прижимная система работает между проходами без нагрузки. Для регулировки нижних рабочих и опорных валков под подушкой каждого нижнего опорного валка устанавливается один гидроцилиндр AGC (Automatic Gap Control - регулирование толщины).

Верхний рабочий валок прижимается к верхнему опорному валку с помощью гидроцилиндров. Соответственно нижний рабочий валок прижимается к нижнему опорному валку. Эти гидроцилиндры используются системой противоизгиба рабочих валков. Для управления геометрией и планшетностью листа клетка оборудована системой противоизгиба и сдвига рабочих валков CVC<sup>Plus</sup> (Continuously Variable Crown – непрерывно изменяющаяся бочкообразность).



- 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 1.7 – 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 1.8 – Кинематическая схема эджерных валков

Таблица 1.2 – Характеристики четырехвалковой реверсивной клетки

| Устройство                       | Параметр   | Значение или описание                    |
|----------------------------------|--|--|
| Прокатные валки                  | Диаметр рабочих валков<br>Длина рабочих валков   | 1210- 1110 мм<br>5300 мм                 |
|                                  | Диаметр опорных валков<br>Длина опорных валков   | 2300-2100 мм<br>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 вала  | (0-3,17)/7,30 м/с                        |
|                                  | Максимально допустимое усилие прокатки<br>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<br>Ход  | 1750/1600 мм<br>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<br>Частота вращения привода   | 2х560 кВт<br>800 об/мин                  |
|                                  | Нажимной винт:<br>диаметр<br>шаг   | 950 мм,<br>60 мм                         |

Конструктивное исполнение механического оборудования главной линии клетки представлено на рисунке 1.9. Рабочие валки приводятся во вращение электродвигателями через шпиндели выдвижного типа. Вал шпинделя имеет шлицевую конструкцию для компенсации осевого смещения при сдвиге валков системой SVC<sup>plus</sup> [88]. Опорный подшипник шпинделя расположен в районе середины вала. Каждый шпиндель уравнивается индивидуально с помощью гидроцилиндра, рычагов и штоков в вертикальном и (при использовании SVC<sup>plus</sup>) горизонтальном направлениях [89, 90].

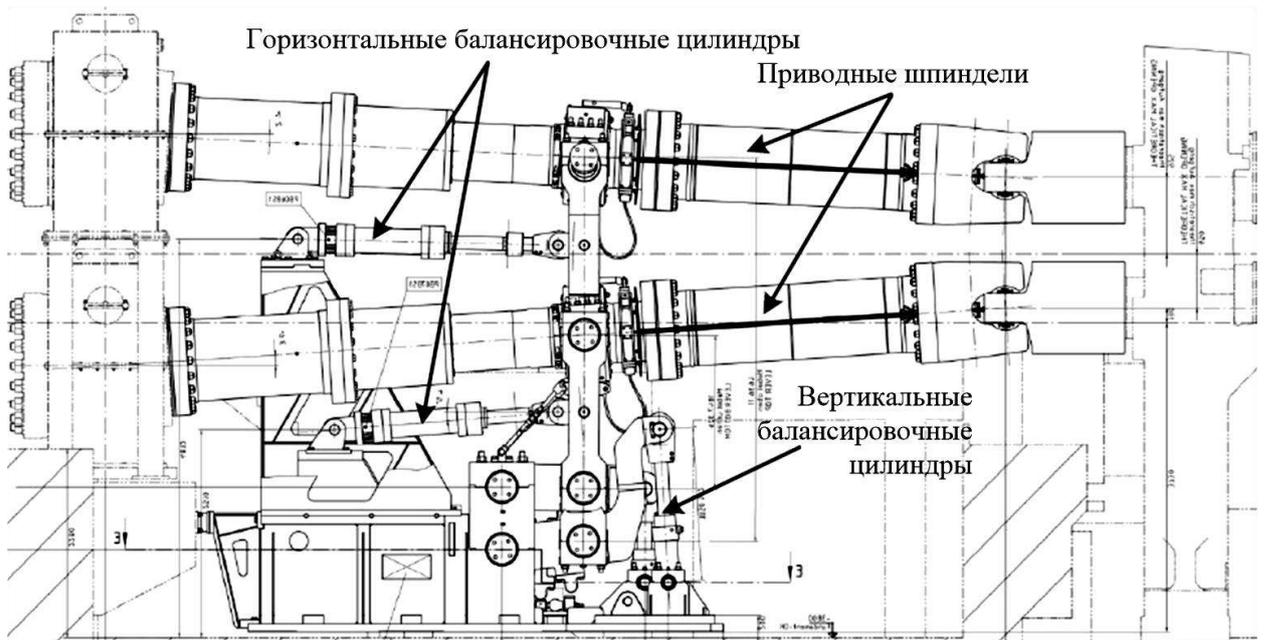


Рисунок 1.9 – Конструкция главной линии горизонтальной клетки

Электроприводы верхнего и нижнего валков выполнены индивидуально на основе синхронного двигателя (СД) с частотным регулированием скорости. Структурная схема системы задания скоростей ВГП и НГП приведена на рисунке 1.10 [91].

### ***Требования к электроприводам***

Технологический процесс прокатки в реверсивной клетки 5000 предопределяет следующие основные требования к электроприводам горизонтальных валков и электроприводу эджера:

- 1) Обеспечение минимально возможных статических и динамических падений скорости при входе раската в валки (не более 2%);

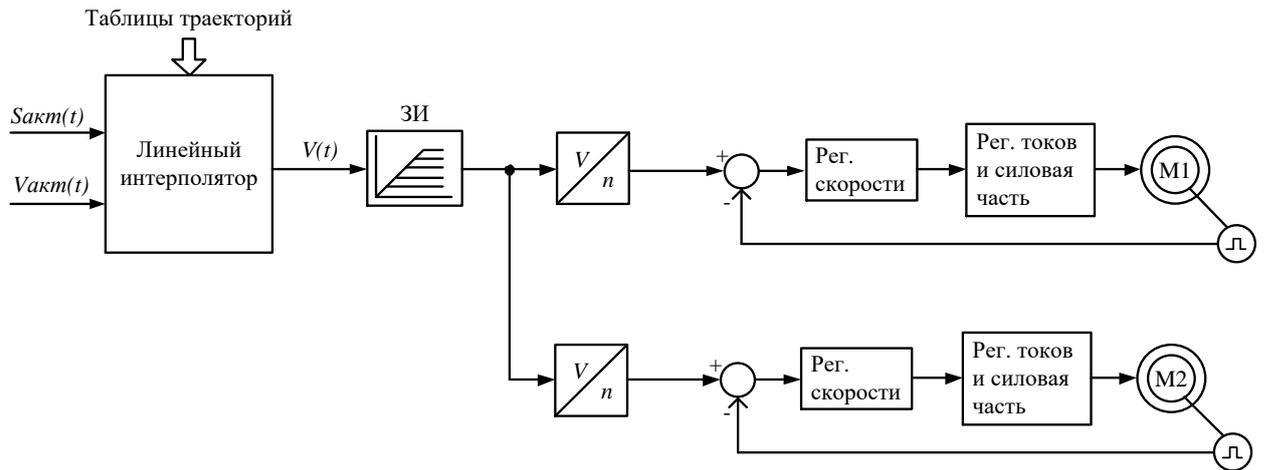


Рисунок 1.10 – Структурная схема системы управления скоростью электроприводов горизонтальной клетки

2) Диапазон регулирования скорости при минимальных потерях не ниже 100:1; 3) Минимальное время протекания переходных процессов при заданных значениях максимума динамического тока;

4) Независимость величины ускорения от скорости, до которой разгоняется двигатель;

5) Большая частота включения приводного двигателя (1000 включений в час и больше);

6) Надежная защита двигателя от перегрузок и аварий;

7) Высокая перегрузочная способность приводного двигателя по току и моменту с учетом того, что после захвата металла в течение некоторого промежутка времени двигатель должен преодолевать одновременно динамические усилия деформации металла ( $\lambda = 2,25 \div 2,75$ );

8) Высокий коэффициент полезного действия (КПД);

9) Минимальный момент инерции;

10) Система электропривода должна обеспечивать минимально возможное время ускорения и замедления стана;

11) Высокая степень надежности работы электропривода.

Исследования показали, что при прокатке листов из труднодеформируемых марок стали возникают динамические нагрузки, в два и более раза превы-

шающие установившийся момент прокатки. Как правило, это приводит к выходу электропривода на ограничение по моменту, размыканию контура регулирования скорости и возникновению затухающих колебаний.

## 1.5. Характеристика силового электрооборудования

### *Электрооборудование горизонтальных валков*

В качестве главного приводного двигателя используется трехфазный СД. Синхронные двигатели в качестве прокатных более надежны по сравнению с асинхронными. КПД такого двигателя на 0,5–3% выше, чем у асинхронных двигателей той же мощности. По сравнению с двигателями постоянного тока они имеют лучшие показатели по мощности, перегрузочной способности и скорости нарастания тока. Технические данные двигателя горизонтальных валков приведены в таблице 1.3, технические параметры его обмоток – в таблице П.1.2 Приложения 1.

Преобразователь частоты работает по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). ШИМ имеет 3 уровня, это позволяет: продлить срок службы обмоток высоковольтного двигателя, поскольку при коммутации ключей будут возникать большие перенапряжения; получить график изменения тока во времени близкого к синусоидальному сигналу и, как следствие, возможность исключить субгармоники до 40-ой. Номинальные параметры преобразователя MV7308 SA AFE приведены в таблице П.1.3.

Параметры ПЧ представлены в таблице П.1.4. Для трех ПЧ MV7308 SA AFE, работающих параллельно и синхронно, используется отдельное питание через соответствующие понижающие трансформаторы. К ним предъявляются следующие требования:

1. Высокое напряжение короткого замыкания  $U_{кз}$ , так как проект составлен без дополнительных реакторов, являющихся фильтрами тока.

2. Группы соединения обмоток:  $\Delta(+20^\circ)/\Delta$  – для первого ПЧ;  $\Delta/\Delta$  – для второго ПЧ;  $\Delta(-20^\circ)/\Delta$  – для третьего ПЧ. Такая схема позволяет улучшить гармонический состав сети, питающий эти преобразователи.

Таблица 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                                    |                  |

3. Достаточно большой ток короткого замыкания в течение 1-3 секунд.

Технические данные трансформаторов для первого, второго и третьего преобразователей частоты в таблицах П.1.5, П.1.6 и П.1.7, соответственно.

Для питания обмотки возбуждения СД используется тиристорный возбудитель типа Maxisemi S 750/2000 А фирмы ConverTeam. Он подключается к сети через понижающий трансформатор типа DTTHG 1100/10, параметры которого представлены в таблице П.1.8.

Сигналы управления электроприводами поступают от контроллера управления станом TCS FPM (Finishing Plate Mill) 1VME1 в контроллер ASLPA C80-HPi MDC (Main Drive Control). В свою очередь контроллер MDC опрашивает сигналы состояния электроприводов в контроллер TCS. Обмен сигналами между контроллерами TCS и MDC осуществляется телеграммами по интерфейсу Profibus. Между контроллером MDC и контроллерами AFE и MV7000 связь осуществляется по сети EFL (Ethernet Fast Link) через оптоволокно. Структура системы микропроцессорного управления представлена на рисунке 1.11. На рисунке 1.12 показана силовая схема электропривода горизонтальных валков.

### *Электрооборудование вертикальных (эджерных) валков*

В электроприводах эджерных валков также используются синхронные двигатели. Их технические данные приведены в таблице П.1.9, параметры преобразователя MV7308 SA AFE приведены в таблице П.1.10. Технические параметры инвертора и трансформатора приведены в таблицах П.1.11 и П.1.12, соответственно. Для питания обмотки возбуждения СД эджерных валков используется тиристорный возбудитель типа Maxisemi S 250/500 А фирмы ConverTeam. Он подключается к сети через понижающий трехобмоточный трансформатор типа DTTHG 400/10, технические данные которого представлены в таблице П.1.13. Управление электроприводом эджерных валков осуществляется по такому же принципу, как и электроприводом горизонтальных.

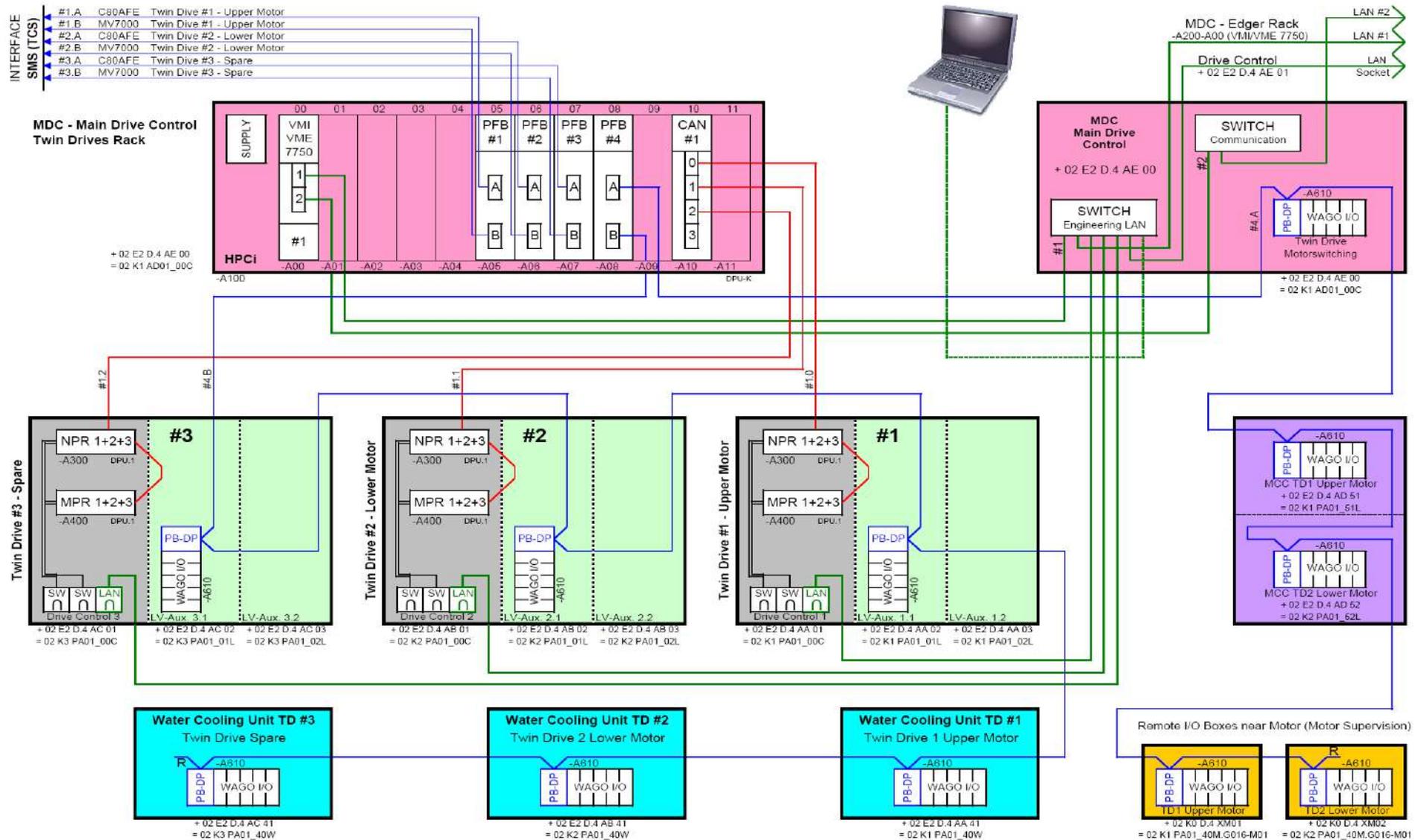


Рисунок 1.11 – Шинная структура микропроцессорного управления электроприводом горизонтальных валков

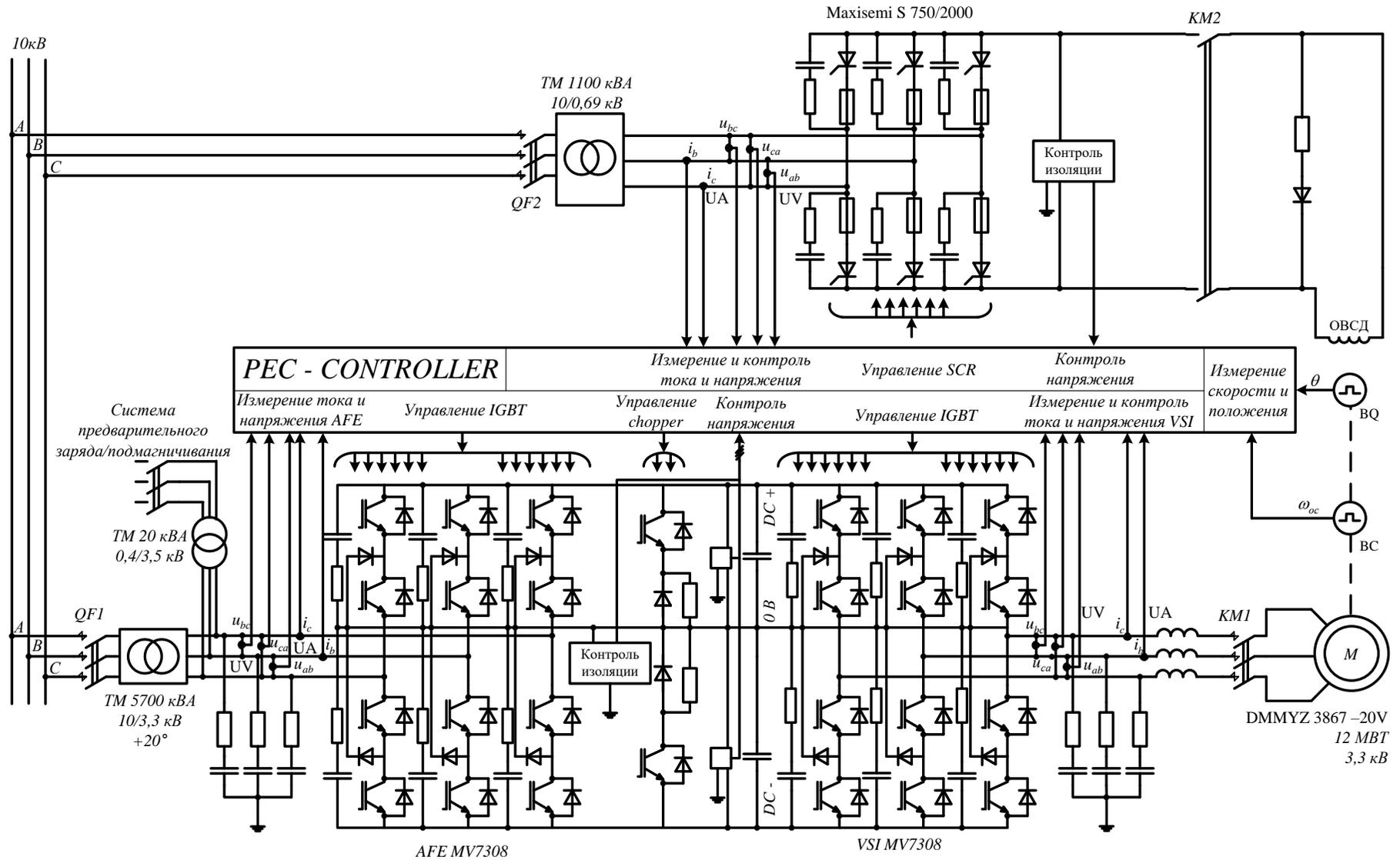


Рисунок 1.12 – Силовая схема электропривода горизонтальных валков

## 1.6. Характеристика системы автоматизации горизонтальной и вертикальной клетей

На рисунке 1.13 приведена структурная схема системы автоматизации горизонтальной и вертикальной клетей стана [92]. Система имеет многоуровневую иерархическую структуру. Локальные системы исполнительного уровня обеспечивают регулирование отдельных технологических координат (скорости валков, межвалкового зазора, профиля и планшетности раската). Системы автоматического регулирования (САР) скорости и положения электроприводов выполнены по принципу подчиненного регулирования координат, САР гидроприводов имеют замкнутые контуры управления положением.

Для первоначальной установки зазора между прокатными валками и регулирования толщины используется комбинированная система, состоящая из электромеханических и гидравлических НУ. Система электромеханического позиционирования EMP (Electro Mechanical Positioning) используется для предварительной установки зазора между рабочими валками и устанавливает межвалковый зазор таким образом, чтобы система гидравлической регулировки зазора HGC (Hydraulic Gap Control) всегда работала в оптимальном диапазоне и обеспечивала быстрое и точное регулирование отклонений толщины, возникающих в процессе прокатки [93].

С целью обеспечения высоких показателей геометрии листов прокатная клеть снабжена системой смещения рабочих валков WRS (Work Roll Shifting) и системой изгиба рабочих валков WRB (Work Roll Bending), объединенных на стане в единую систему управления профилем и планшетностью листа.

К основным показателям качества профиля проката относится продольная и поперечная разнотолщинность [94]. Причиной продольной разнотолщинности (изменения толщины по длине листа) является изменение условий деформации при прокатке. В результате этого изменяется давление металла на валки, а, следовательно, происходит отклонения межвалкового зазора. Поперечная разнотолщинность (изменение толщины раската в поперечном направ-

лении) является следствием неравномерности усилий по ширине очага деформации. Причина возникновения – упругий прогиб валков, их тепловая выпуклость, сплющивание и неравномерный по ширине очага износ бочек валков.

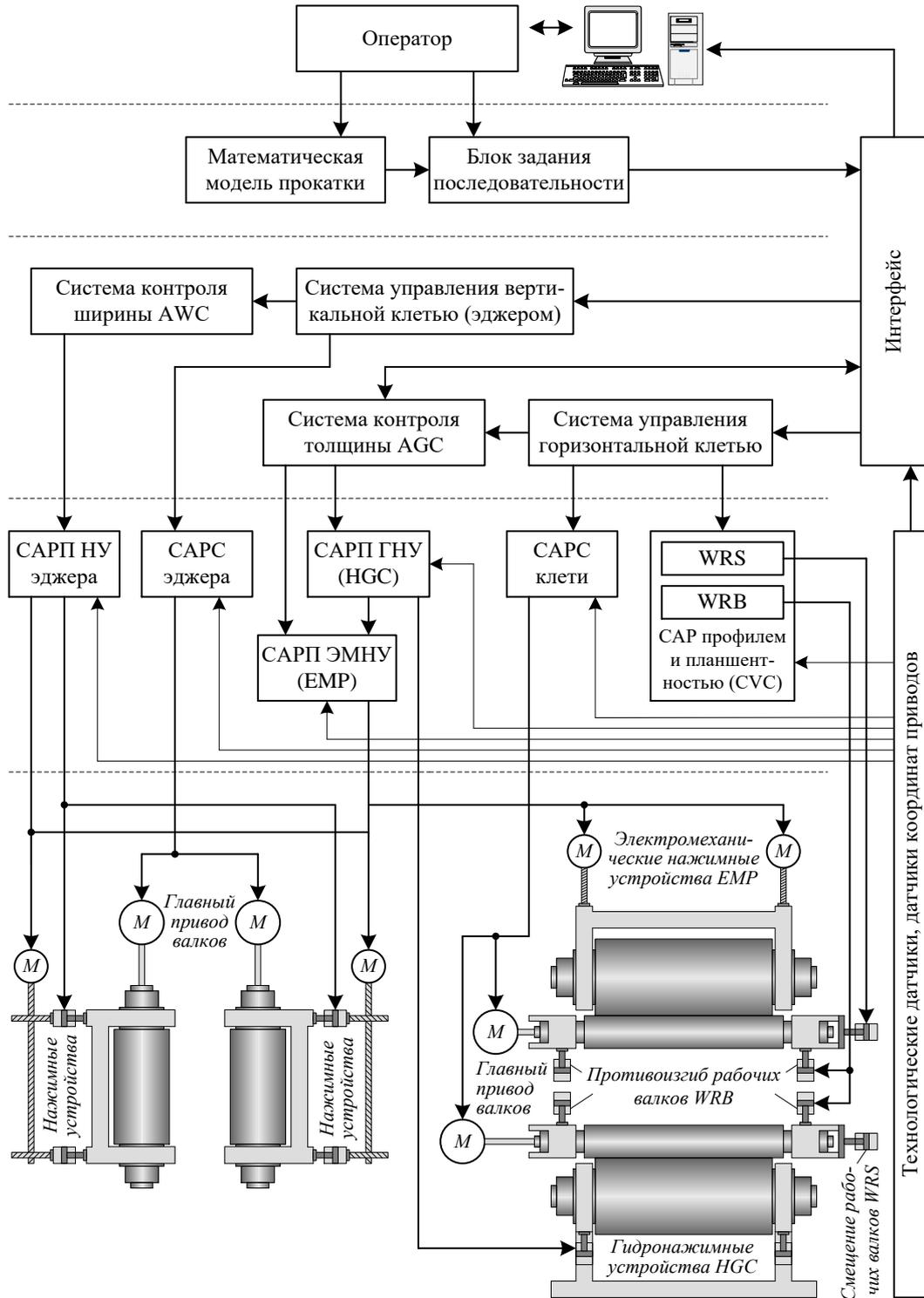


Рисунок 1.13 – Структура системы автоматизации клеток стана 5000

Дефекты планшетности являются следствием неравномерности распределения коэффициента вытяжки по ширине очага деформации, а также следствием различия относительной поперечной разнотолщинности раската на входе и выходе из валков [94]. При превышении упругими сжимающими напряжениями критической величины происходит потеря продольной устойчивости с образованием дефектов планшетности в виде волнистости.

С целью устранения неплоскостности и поперечной разнотолщинности листового проката используется противоизгиб рабочих валков – механическое воздействие на профили валков в процессе прокатки. Противоизгиб осуществляют с помощью гидравлических цилиндров, которые создают изгибающий момент. Приложение дополнительного изгибающего момента к валкам позволяет изменять профиль бочки валка в процессе прокатки и тем самым регулировать распределение вытяжки по ширине. Система противоизгиба установлена между подшипниками шейки верхнего и нижнего рабочих валков.

Система смещения рабочих валков WRS используется для предварительной установки профиля раствора валков между проходами. Смещением валков между пропусками от листа к листу автоматически обеспечивается коррекция износа рабочих валков, в результате чего увеличивается их стойкость.

Второй, тактический уровень автоматизации, обеспечивает управление технологическим процессом в соответствии с программой, определяемой оператором, формирует сигналы задания для локальных САУ и состоит из канала управления горизонтальной клетью и канала управления эджером. Система управления эджером формирует сигнал задания на скорость вертикальных валков и сигнал в систему контроля ширины раската AWC, которая задает положение гидроцилиндров в соответствии с траекторией обжатия, полученной от модели прокатки.

Третий уровень управления предназначен для планирования технологического процесса: расчета программы прокатки, определения последовательности движения отдельных механизмов клетки. По команде оператора, в соответствии с расчетами на математической модели, блоком задания последовательности осуществляется задание согласованного движения всех электро- и гидроприводов, а также всех листов, находящихся на технологической линии

стана. Фактически само устройство задания последовательности подразделено на несколько подустройств, каждое из которых функционирует по своему алгоритму и задействовано на различных логических участках отслеживания.

На этом же уровне решается задача обеспечения качества формы листов в плане (вид сверху) – снижения удельного расхода и минимизации кромочной обрезки путем определения очередности прокатки листа в продольном и поперечном направлениях с промежуточной кантовкой раската на рольганге на 90 град. На стане применена технология ASC (Automation Size Control), аналогичная известным с названиями MAS-прокатка, EGO-прокатка и Plan View Control (управление геометрией) [95–97].

### 1.7. Реализация концепции ROLL-GAP CONTROL

Важнейшими системами технологической автоматизации стана 5000 являются системы автоматического регулирования зазора валков и толщины, выполненные на основе гидравлических и электромеханических НУ. В комплексе они реализуют концепцию ROLL-GAP CONTROL, разработанную фирмой SMS Demag AG [11–14]. Принципы регулирования и взаимосвязи отдельных модулей поясняет схема, представленная на рисунке 1.14 [76].

Структура включает следующие основные системы:

- гидравлического регулирования раствора валков (*HGC, Hydraulic Gap Control*);
- автоматического регулирования толщины (*AGC, Automatic Gap Control*);
- управления перекосом зазора валков (*RAC*);
- динамической компенсации возмущающих воздействий клетки (*DDC*).

Модуль *HGC* выполняет следующие функции:

- регулирование положения гидроцилиндров (регулирование зазора);
- переключение от регулирования положения на регулирование усилия в режиме калибровки;
- синхронизацию работы гидроцилиндров;
- адаптацию регулятора в зависимости от хода поршня гидроцилиндра и давления в полостях;
- активную защиту от перегрузки.

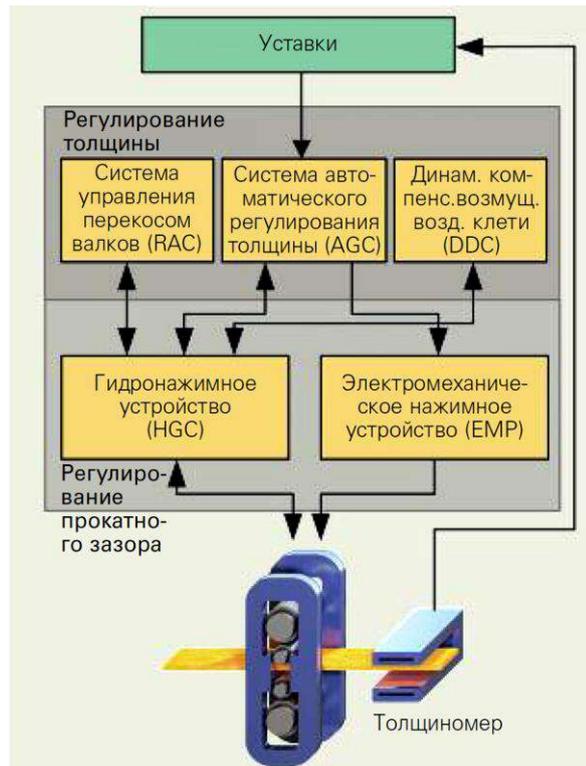


Рисунок 1.14 – Структура, поясняющая концепцию ROLL-GAP CONTROL

Система AGC (по существу, САРТ) предназначена для поддержания постоянства раствора валков при изменениях усилия прокатки путем воздействия на гидравлические НУ. Работа САРТ возможна в абсолютном и в относительном режимах. В абсолютном режиме раствор валков регулируется по уставке толщины, определенной оператором, или по графику прокатки, рассчитанному в системе автоматизации уровня 2. В относительном режиме толщина раската, полученная через 0,5–1 с после начала прокатки, поддерживается на постоянном уровне по всей длине. Конечной функцией является компенсация деформации клетки и различных возмущений, вызванных отклонениями технологических параметров во время прокатки.

#### ***Структура задания и регулирования толщины раската***

Схема формирования сигнала задания толщины показана на рис. 1.15, а [98]. 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 электро-механическими нажимными устройствами, и растяжения клетки. Сигнал, пропорциональный

растяжению, формируется как нелинейная функция суммарного усилия прокатки, определяемая характеристикой жесткости клетки [99].

Регулятор толщины имеет переменные коэффициенты усиления, зависящие от модулей жесткости клетки и полосы. Актуальная толщина рассчитывается по сигналам датчиков положения HGS, EMP, распределения зазора по сторонам DS и OS, растяжения клетки и возмущающих воздействий (толщины масляной пленки в подшипниках, теплового расширения валка, износа валков и др. [100]).

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, рисунок 1.15, б. В системе регулирования положения реализуется известная зависимость Головина-Симса [101]. На вход регулятора поступают задание толщины и сигналы обратной связи от датчиков положения НУ и датчика усилия прокатки.

Для компенсации искажения профиля раската вследствие перекоса зазора валков служит RAC регулятор, показанный на рисунок 1.15, 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.

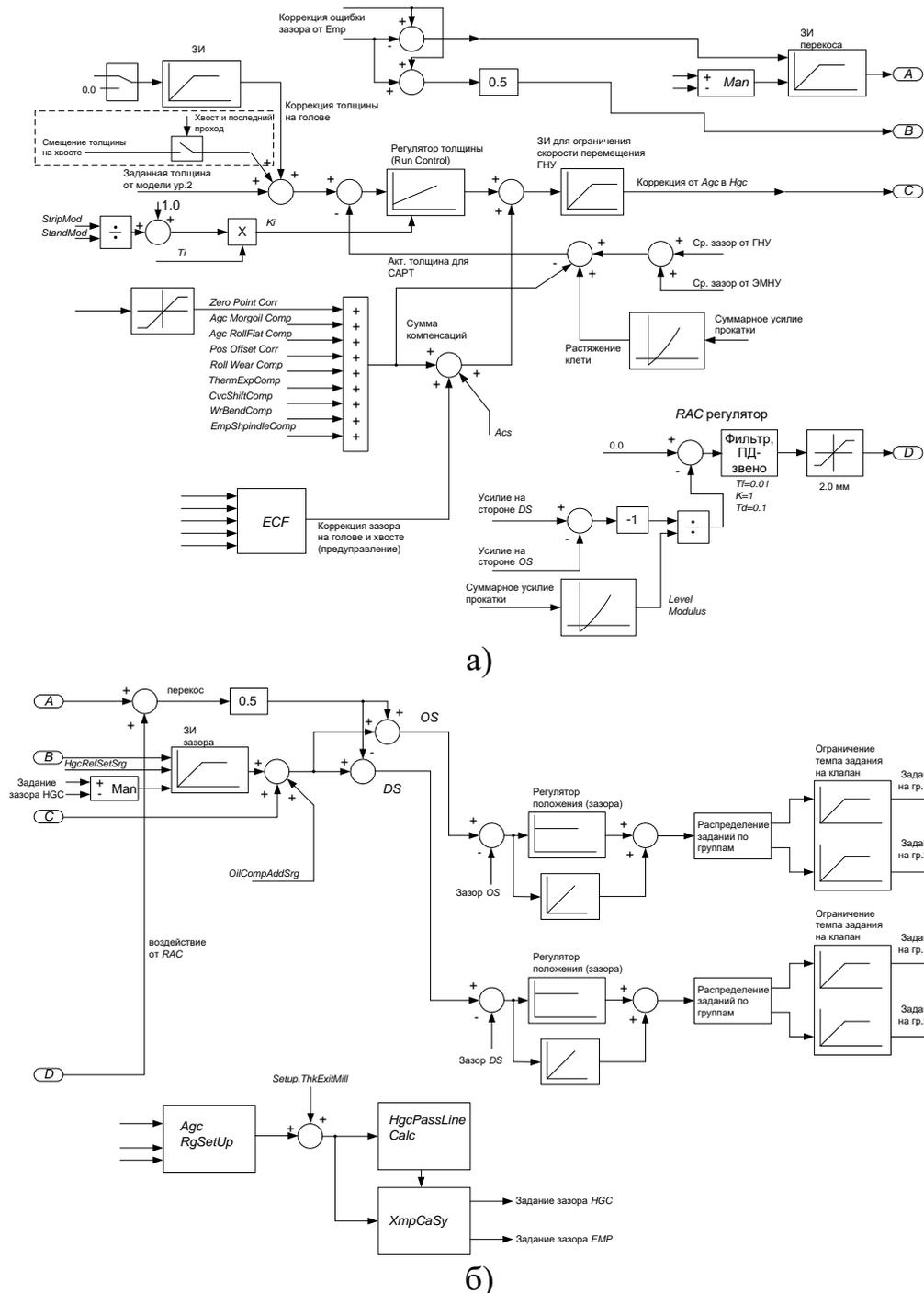


Рисунок 1.15 – Структурные схемы систем регулирования толщины (а) и управления положением гидравлических НУ (б) клетки стана 5000:

*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

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 раската.

Более подробно работа систем регулирования раствора валков и САРТ рассмотрена в работах [98, 102].

### **1.8. Технология профилированной прокатки**

Наряду с рассмотренными выше стратегиями используются различные режимы продольной и поперечной прокатки. Они учитывают геометрию исходного сляба и готового продукта, а также требования к поперечной прокатке, обуславливающей растяжение материала в поперечном направлении.

Процесс прокатки включает в себя три основных этапа:

1. Протяжка (калибрующие проходы): один либо два продольных прохода для обеспечения постоянной и точной толщины слябов.
2. Разбивка ширины (поперечная прокатка): после разворота на  $90^\circ$  выполняются поперечные проходы для получения заданной ширины листа.
3. Завершающие проходы (редукционный этап): после разворота на  $90^\circ$  производятся продольные проходы до достижения заданной толщины листа.

Уменьшение сечения на первых двух стадиях вследствие относительно большой толщины сляба сопровождается значительным изменением его ширины (уширением). Это связано с тем, что при высоком очаге деформации имеет место деформация в поперечном относительно оси прокатки направлении. Это приводит к отклонению формы листа в плане (в проекции сверху) от прямоугольной и, как следствие, к увеличению боковой и торцевой обрезки (рисунки 1.16).

Форма листа оказывает наибольшее влияние на отходы с обрезью и соответственно на расход металла. Она зависит от соотношения коэффициентов вытяжек: отношений длины раската к длине сляба при протяжке и ширины

раската к ширине сляба при разбивке ширины [98]. Когда коэффициент вытяжки при протяжке превышает аналогичный коэффициент при разбивке ширины, форма листа характеризуется выпуклостью переднего и заднего концов и вогнутостью боковых кромок (рисунок 1.16, а). При обратном соотношении коэффициентов вытяжки передняя и задняя кромки листа становятся вогнутыми, а боковые грани – выпуклыми (рисунок 1.16, б).

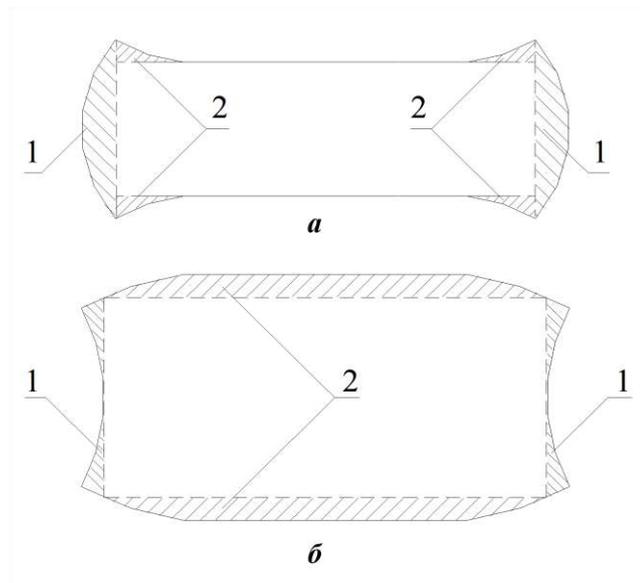


Рисунок 1.16 – Форма листов при различных соотношениях коэффициентов продольной и поперечной вытяжки

По мере увеличения деформаций при поперечной прокатке процент концевой обрезки уменьшается.

#### ***Характеристика известных технологий***

Исследованию способов снижения потерь металла с обрезью и улучшению геометрической формы листов в плане посвящены исследования многих авторов, в том числе работы [64, 103–105]. В статье [106] выполнен анализ способов снижения расходного коэффициента за счет регулируемого изменения формы раската. К основным способам относятся: косая прокатка, изменение поперечного профиля сляба, предварительное обжатие вертикальными валками и др. Показано, что наиболее эффективным способом является прокатка с профилированием широких граней раската горизонтальными валками (профилированная прокатка). Суть этого способа заключается в том, что в последнем пропуске при протяжке или разбивке ширины производят деформацию раската с переменным обжатием по длине с тем, чтобы скомпенсировать

дальнейшее отклонение его формы от прямоугольной. В результате формируется двойной конический профиль толщины, получивший название «собачья кость». В направлении создания систем, обеспечивающих реализацию данного способа, следует отметить публикации специалистов SMS-Demag [107], японских фирм Nippon Steel, Sumitomo Metal Corporation [108, 109] и др.

Для практической реализации профилированной прокатки применяются несколько технологий: MAS-прокатка, EGO-прокатка, Plan View Control (управление геометрией) [109–111]. Для обеспечения практически полной прямоугольности листа на современных станах применяется автоматический контроль профиля (ASC), схемы которого показаны на рисунке 1.17. Поскольку неровности краев встречаются на головном и хвостовом участках, а также на кромках листа, функция ASC применяется на разных этапах прокатки. Для воздействия на форму головной и хвостовой частей на повернутом листе применяется конический профиль, показанный на рисунке 1.17, а. В свою очередь, форма кромки листа улучшается при использовании ASC после последнего калибровочного пропуса (рисунок 1.17, б).

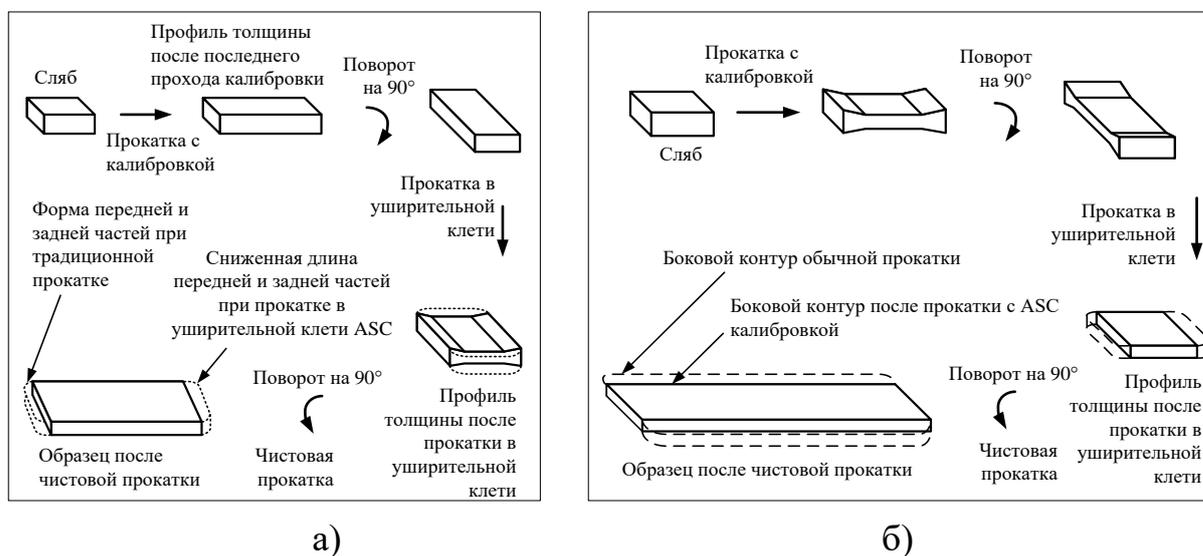


Рисунок 1.17 – Схемы прокатки по технологии ASC

## 1.9. Анализ режимов лыжеобразования и деления нагрузок

Как отмечалось во введении, основным требованием к качеству производимой продукции является строгое соблюдение геометрии готового листа при

минимальной головной и концевой обрезки. Выполнение этого требования обеспечивается средствами автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров. Нарушения геометрии раската наиболее часто обусловлены неправильным вертикальным изгибом переднего конца – «лыжей» (рисунок 1.18, а, б) [112] и изгибом в горизонтальной плоскости (дефект «серповидность», показанный на рисунке 1.18, в) [113].

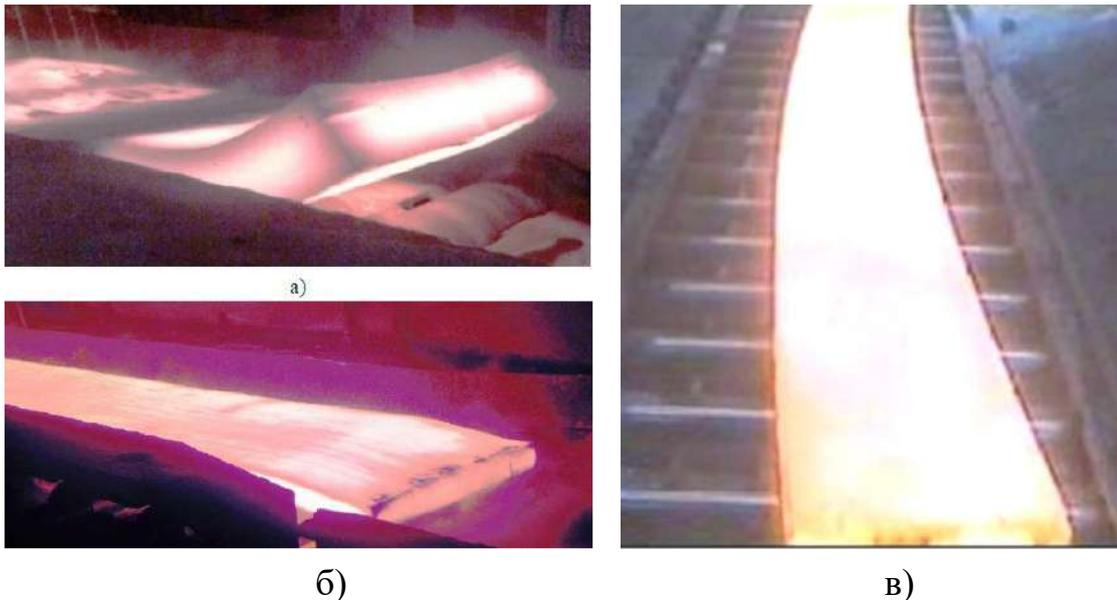


Рисунок 1.18 – Изгиб переднего конца раската (а, б) и дефект «серповидность» (в)

После выхода раската из валков осуществляется его перемещение по роликам подводящего либо отводящего рольгангов. Как показали исследования, на форму (протяженность и радиус) «лыжи» оказывает влияние несколько технологических факторов (разность температур верхней и нижней поверхностей, величина и скорость деформации, уровень прокатки и др.) При неправильном согласовании скоростей передний конец может иметь неконтролируемый изгиб вверх либо загибаться вниз (рис. 1.18, б). Это является недопустимым с точки зрения износостойкости оборудования рольганга и опасности застревания раската.

Развитие дефектов «серповидность» и боковое смещение менее заметно в черновых проходах. Это связано с тем, что после каждого выхода из клетки осуществляется центровка раската на рольганге с помощью боковых линеек.

Кроме того, длина раската невелика, поэтому горизонтальный изгиб проявляется незначительно. Однако по мере увеличения количества проходов происходят наследственное увеличение «клина» зазора и развитие дефектов. Искривления раската особенно четко видны в последних проходах, что приводит к ухудшению формы готового листа в плане.

Причины возникновения дефектов «серповидность» и «лыжа» более подробно рассматриваются ниже.

### **1.9.1. Формирование изгиба переднего конца раската**

Из-за неопределенности некоторых технологических параметров существует опасность чрезмерного изгиба переднего конца вверх, что может привести к аварии. Кроме того, рассогласование скоростей приводит к неравномерной нагрузке электроприводов верхнего и нижнего валков. Также от качества настройки этих систем зависят ударные нагрузки вспомогательных механизмов (рольгангов), возникающие при неправильном изгибе конца раската на выходе клетки. В конечном счете это снижет срок эксплуатации оборудования и повышает риск возникновения аварий. Вместе с тем, проведенный анализ показал, что вопросы управления электроприводами валков при формировании «лыжи» не являются решенными.

Устранение указанного недостатка осуществляется путем формирования оптимального изгиба переднего конца раската, показанного на рисунке 1.19 [114]. Такой способ реализуется на большинстве толстолистовых и широкополосных станов горячей прокатки. Изгиб достигается за счет рассогласования скоростей верхнего и нижнего валков. Для достижения нужной формы скорость нижнего валка должна быть выше скорости верхнего валка. Такая технология получила название асимметричной прокатки, ее изучению посвящено значительное количество публикаций, в том числе, работы [115–117].

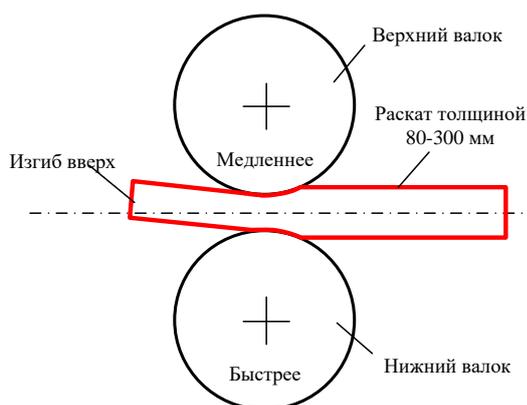


Рисунок 1.19 – Формирование изгиба за счет рассогласования скоростей валков

Для придания переднему концу заданной формы существует специальная система лыжеобразования. Однако, как показывает практика, на стане 5000 она работает неудовлетворительно. Так, в определенном диапазоне толщин раската (30-300 мм) при заданной разнице скоростей (скорость нижнего валка выше скорости верхнего) обеспечивается изгиб раската вверх. В диапазоне толщин (8-30 мм) в чистовых проходах при том же соотношении скоростей раскат изгибается вниз. Это свойство наблюдается не только на стане 5000 ПАО «ММК», но и на других аналогичных станах [118]. Поэтому задача формирования изгиба переднего конца, в идеале, не зависящего от толщины и скорости раската (т.е. инвариантного к номеру прохода) является актуальной. Она должна решаться путем совершенствования системы управления скоростными режимами ВГП и НГП.

Обеспечение заданного радиуса изгиба, несмотря на кажущуюся простоту, является сложной задачей. Причины возникновения вертикальной асимметрии проката исследовались многими авторами, в том числе известными учеными М.Ю. Файнбергом [61], А.И. Целиковым [19], А.П. Грудевым [119]. В числе публикаций последних лет следует отметить труды ученых МГТУ им. Г.И. Носова В.М. Салганика, Д.Н. Чикишева [114, 120, 121], специалистов ПАО «НЛМК» Е.А. Варшавского, В.М. Басурова [112], АО «Выксунский металлургический завод» В.М. Максимова, О.А. Хлыбова [118] и других. Известны патентные разработки, начиная от авторских свидетельств [122–126] до современных патентов [127–129]. Значительное внимание этому вопросу уделяется в зарубежных публикациях, в том числе в [117, 130–133].

Помимо технологических факторов, которые должны обеспечиваться во всех режимах (минимальная разнотолщинность и др.), рассогласование скоростей оказывает влияние на распределение моментов прокатки и, как следствие, на загрузку двигателей ВГП и НГП. Для компенсации различий их моментов предназначен регулятор деления нагрузок (РДН), его функцией является выравнивание скоростей и соответственно нагрузок. Таким образом, требования, предъявляемые к системе лыжеобразования и РДН являются противоречивыми. Поэтому в действующей системе их воздействия разведены во времени (по длине заготовки). Когда формируется «лыжа», РДН не работает, он включается в работу после окончания изгиба раската через заданную паузу.

Однако следует констатировать, что работа системы лыжеобразования и РДН не являются согласованными. Они не обладают необходимым быстродействием в режиме выравнивания скоростей. В результате в проходах черновой стадии РДН «не успевает» включиться в работу. К тому же система формирования лыжи не обеспечивает заданных параметров изгиба переднего конца. Его форма зависит от толщины раската, скорости прокатки (т.е. от номера прохода) и ряда других технологических факторов.

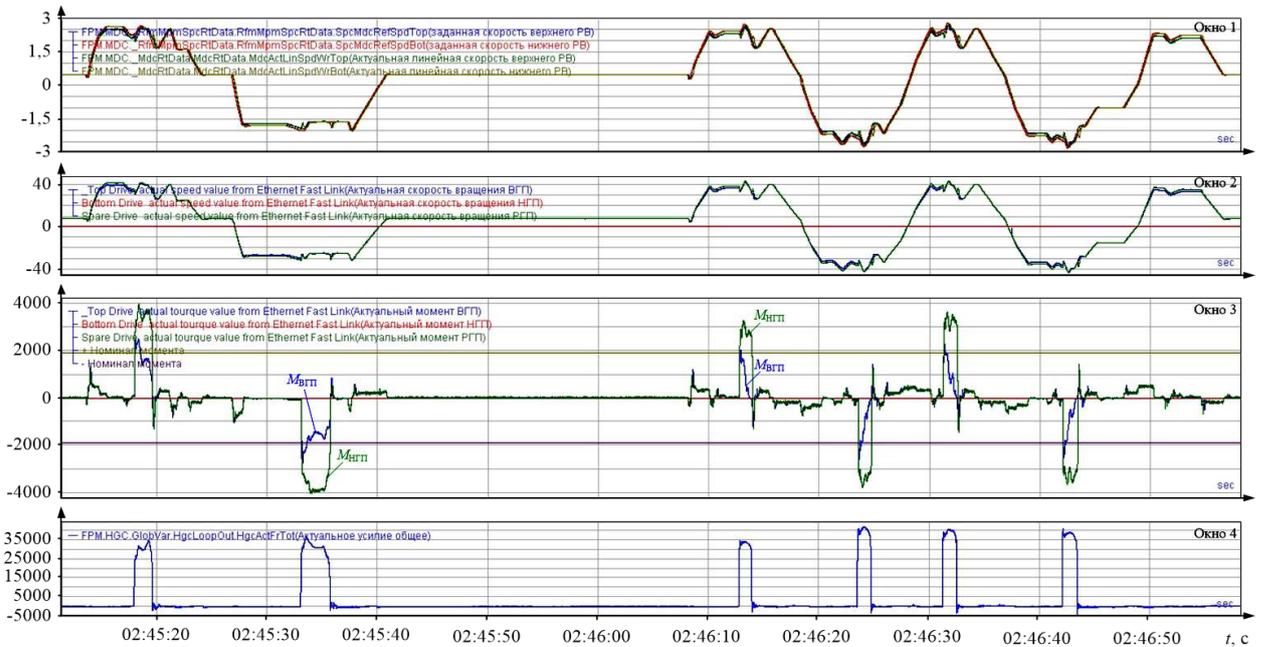
Исследования показали, что для устранения указанных недостатков необходимо решение следующих взаимосвязанных задач:

- повышение быстродействия системы лыжеобразования за счет совершенствования алгоритма управления электроприводами верхнего и нижнего валков;
- согласование режимов системы лыжеобразования и регулятора деления нагрузок, реализованного в АСУ ТП клетки;
- увеличение быстродействия системы выравнивания нагрузок за счет изменения структуры и повышения быстродействия РДН.

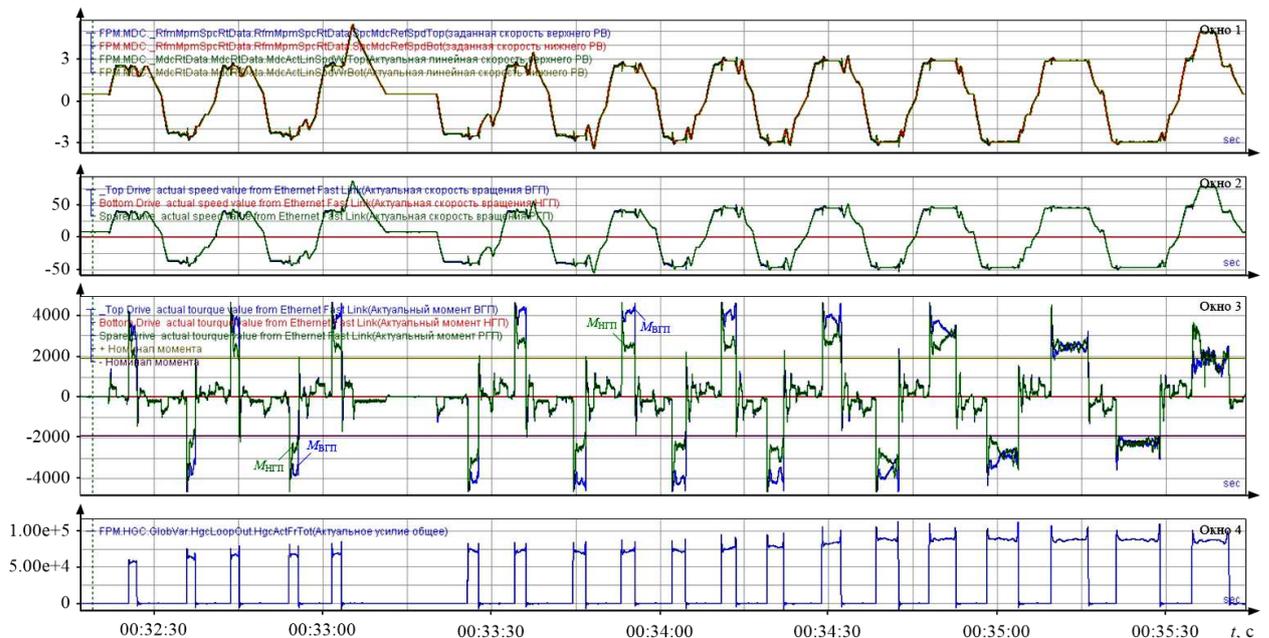
Эти задачи поставлены для решения в представленной диссертации.

## 1.9.2. Распределение нагрузок двигателей при существующем алгоритме управления электроприводами

Подтверждение тому, что в большинстве проходов двигатели ВГП и НГП работают с разными нагрузками, дают осциллограммы, представленные на рисунке 1.20.



а)



б)

Рисунок 1.20 – Распределение нагрузок ВГП и НГП в черновой (а) и чистовой (б) фазах

В окне 1 приведены осциллограммы заданных и актуальных (измеренных) скоростей верхнего и нижнего рабочих валков (РВ). Во втором окне показаны осциллограммы скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков (на нижнем валке задействован резервный электропривод – РГП). Кривые в этих окнах полностью совпадают, поэтому их обозначений не сделано. В окне 3 представлены осциллограммы моментов двигателей электроприводов ( $M_{ВГП}$ ,  $M_{НГП}$ ), в окне 4 – осциллограммы усилия прокатки.

Они подтверждают сделанный ранее вывод о кратном отличии моментов ВГП и НГП в черновых проходах. Сложность ситуации усугубляется тем, что в проходах черновой прокатки (рисунок 1.20, а) момент двигателя нижнего валка  $M_{НГП}$  превышает момент  $M_{ВГП}$ , в то время как в проходах чистовой прокатки их соотношение противоположное ( $M_{ВГП} > M_{НГП}$ ). Только в последних проходах чистовой стадии на рисунке 1.20, б происходит выравнивание нагрузок двигателей. Это обеспечивается действием РДН, т.к. при большой длине заготовки система лыжеобразования успевает отключиться, и он своевременно вступает в работу.

Неравномерная загрузка приводов приводит к нагреву двигателей, увеличенной нагрузке на механическое оборудование. Это приводит к нарушению теплового режима более загруженного двигателя, сокращению ресурса изоляции и повышает риск возникновения аварий [134, 135]. Также при низкой нагрузке частотно-регулируемых электроприводов снижается их КПД, что вызывает увеличение потерь электрической энергии [136, 137].

Приведенный пример демонстрирует сложность взаимосвязи ВГП и НГП через металл и подтверждает тезис о том, что электроприводы верхнего и нижнего валков клетки толстолистового стана должны исследоваться в комплексе. В квазиустановившемся режиме прокатки такие исследования должны быть направлены на определение реальных нагрузок ВГП и НГП, которые должны быть рассчитаны по фактическим, а не расчетным моментам нагрузки (токам, мощностям). Эквивалентные нагрузки должны вычисляться для каждой партии листов, желательно, в on-line режиме. Эта задача приобретает особую актуальность при расширении сортамента за счет прокатки труднодеформируемых хладостойких марок стали. В этом случае ее решение рассматривается с

позиций ограничений, которые накладываются на технологический процесс со стороны электропривода. Следует заметить, что решение такой задачи в диссертационной работе сформулировано впервые.

### 1.10. Возникновение дефекта «серповидность»

Горизонтальный изгиб раската в плоскости прокатки (дефект «серповидность», рисунок 1.18, б) индуцируется в полосе разницей деформации в поперечном сечении (рис. 1.21, а), что приводит к разнице в удлинениях по сторонам. Возникающее дифференциальное удлинение проявляется в виде искривления раската, вызывая боковое и угловое смещение, как показано на рисунке 1.21, б [113]. При исследовании данного процесса предполагается, что изменение толщины полностью трансформируется в изменение длины, боковой перенос материала не учитывается.

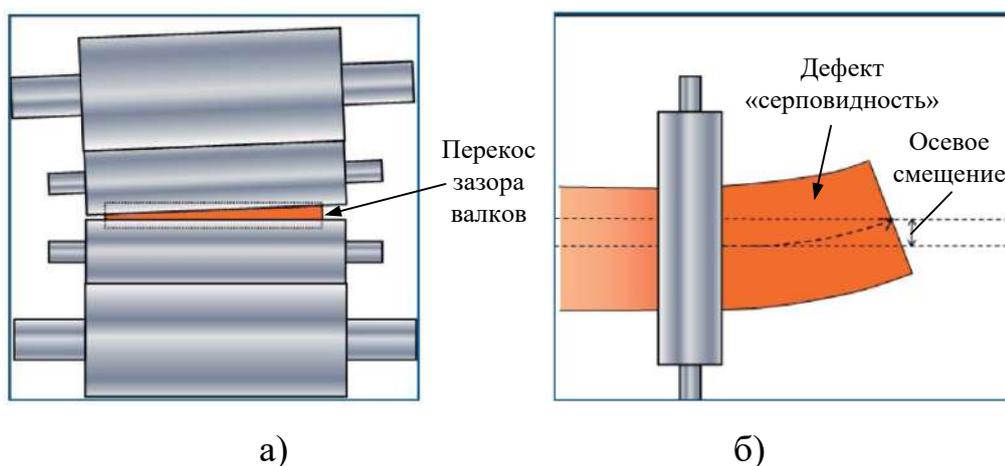


Рисунок 1.21. Асимметрия (перекас) зазора валков (а), «серповидность» и осевое смещение раската (б)

При больших обжатиях и неравномерной толщине по ширине раската возникает поперечная асимметрия (перекас) межвалкового зазора (рисунок 1.21, а). Это приводит к формированию клиновидного профиля раската в очаге деформации. При поперечной асимметрии скорость вытягивания металла со стороны меньшего зазора выше, чем со стороны более высокого зазора. Вследствие этого раскат изгибается в горизонтальном направлении, что приводит к возникновению дефекта «серповидность» на выходе из валков. Изгиб раската вызывает его смещение относительно оси прокатки на входе в

валки. Это приводит к негативным последствиям, таким как поворот относительно оси прокатки, боковые удары и др.

Для предотвращения возможных неприятностей, например, столкновений раската с ограждениями или схода с рольганга, известно on-line измерение изгиба, на основании чего осуществляется регулирование усилий гидравлических НУ либо управление линейками манипуляторов [138]. Однако оборудование для непосредственного измерения изгиба (как, правило, на основе фотодатчиков) [139] устанавливается индивидуально и далеко не на всех прокатных станах.

Целесообразность рассмотрения проблемы подтверждена результатами исследований многих отечественных и зарубежных авторов. Результаты представлены в литературных источниках. Так, в работе [140] на примере стана компании Tata Steel (Порт-Талбот, Уэльс) продемонстрировано искажение продольной формы раската в различных проходах черновой прокатки. В публикации [141] приведена кривая смещения осевой линии раската на стане 2250 (Китай), построенная в функции длины прокатанного участка. Максимальное отклонение позиции листа от оси прокатки составляет 15 мм, что для конкретного сортамента признано недопустимым. Результаты аналогичных исследований для стана 1580 представлены в публикации [142].

В диссертационной работе [143] выполнено исследование возникновения вышеназванных дефектов на непрерывном широкополосном стане 2000 ПАО «НЛМК». Приведен пример аварийной ситуации, связанной с выбросом полосы с рольганга на участке черновой группы клетей, который был вызван ее недопустимым боковым смещением. Также решению поставленной проблемы посвящены патентные публикации [144, 145].

Для устранения указанных недостатков на стане 5000 в структуре, реализующей концепцию ROLL-GAP CONTROLL, предусмотрен регулятор направления прокатки Roll Alignment Control (RAC регулятор). В отечественных публикациях он получил название «регулятор перекоса зазора валков». Следует заметить, что более корректным было бы использование термина «раствор валков», который отличается от зазора на величину упругого растяжения

клетей и вызывает непараллельность валков. Однако, в связи с тем, что термин «зазор валков» является более употребительным, он используется далее с учетом сделанной оговорки.

Функцией РАС регулятора является обеспечение постоянства межвалкового зазора по ширине раската, т.е. параллельности валков при нарушениях условий прокатки. Подобные регуляторы также применяются в чистовых группах клеток широкополосных станов. Варианты их разработки представлена в публикациях [146–149 и др.].

Большинство известных решений основано на компенсации рассогласования усилий, возникающих в гидроцилиндрах DS и OS при отклонениях параметров прокатки и нарушении температурного баланса по ширине раската. Так, в работе [146] с целью минимизации различий в силе крена разработана система управления с использованием модели прогнозирующего контроллера (Model Predictive Controller – MPC). В ней в режиме реального времени вычисляются поправки наклона, минимизирующие разность усилий по сторонам при соблюдении заданных ограничений. Контроллер наклона реагирует на отклонения в начальной фазе перекося зазора. Утверждается, что применение MPC обеспечивает преимущества по сравнению с обычными регуляторами (ПИ, ПИД), благодаря прогнозированию разности усилий по ширине зазора. Однако, как следует из публикации, данное техническое решение находится в стадии апробации и не получило промышленного внедрения.

В научных трудах [143, 144] предлагается система управления, принцип которой основан на непрерывном контроле температурного градиента по ширине раската. С этой целью предлагается установка датчиков сканирования температуры, что создает сложности при внедрении разработки. Кроме того, как будет показано ниже, на поперечный профиль помимо температурного градиента оказывает влияние ряд других факторов, вызывающих поперечную асимметрию силы реакции обрабатываемого металла.

В работах [145, 150], а также в разработках фирмы SMS [151] предлагается обеспечить решение проблемы за счет согласования системы регулирова-

ния положений НУ и устройств перемещения боковых линеек, расположенных перед и за реверсивной клетью. Данное решение является перспективным для толстолистовых станов, однако требует серьезной проработки.

Анализ представленных и других публикаций подтвердил актуальность разработки системы компенсации перекоса зазора валков клетки толстолиствого стана. Данное решение должно быть эффективным и не требовать значительных изменений алгоритмов управления. Основными задачами, поставленными для достижения цели, являются:

1. Разработка способа управления гидравлическими НУ, обеспечивающего компенсацию перекоса за счет настройки межвалкового зазора в паузах между проходами (предиктивного управления).

2. Обоснование передаточной функции и настройка РАС регулятора, обеспечивающих повышение его быстродействия при сохранении устойчивости процесса регулирования.

### **1.11. Анализ динамических нагрузок при захвате**

#### *Конструкция шпинделя*

В реверсивной клетке стана 5000 установлены шпиндели выдвижного (слипперного) типа, фотография показана на рисунке 1.22, а [152]. Непосредственно сочленение валка со шпинделем осуществляется с помощью головки специальной конструкции (рисунок 1.22, б), которая крепится к рабочему валу. Аналогичная головка смонтирована со стороны двигателя. На этом же рисунке схематично показано замыкание углового зазора  $\delta$ . Если зазор разомкнут, то при захвате раската валками происходит его замыкание, сопровождающееся механическим ударом и колебаниями упругого момента в шпинделе. Наиболее сильно динамические удары проявляются на стороне клетки. Это вызвано большими массами вращающегося валка и перемещаемого слитка.

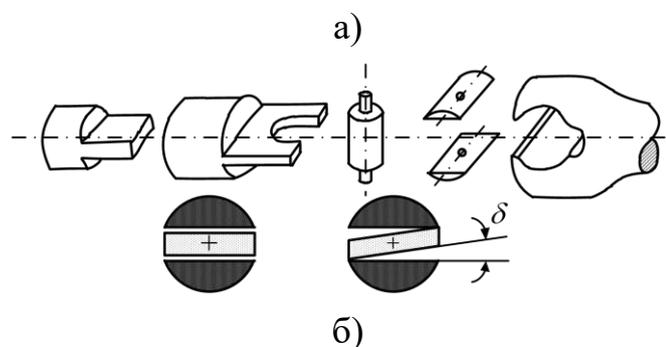


Рисунок 1.22 – Фотография шпинделя (а) и изображение деталей шпиндельного соединения (б)

На вновь устанавливаемом механизме угловой зазор в соединении небольшой и составляет 1-2 град. Он необходим для сочленения двух вращающихся устройств (непосредственно шпинделя и валка) и обеспечения свободного движения при вертикальном перемещении валков. Величину углового зазора определяет износ вилок и головок шпинделей (рисунок 1.22, б). Они наиболее подвержены усталостным разрушениям.

#### *Анализ осциллограмм моментов*

Очевидно, что определение упругого момента по электрическим параметрам приводных двигателей не позволяет получить пиковые динамические нагрузки и составляющие момента на частотах собственных колебаний механической системы (10–25 Гц). К тому же данный метод не обеспечивает приемлемой точности в синхронных электроприводах и частотно-регулируемых приводах переменного тока [153]. В связи с этим применяются системы прямых измерений крутильных колебаний, датчики которых устанавливаются непосредственно на шпинделях. При этом наряду с моментом регистрируют параметры двигателя (скорость вращения, ток) и усилие прокатки.

Такая информационно-измерительная система установлена в 2019 году для контроля состояния валопроводов клетки стана 5000. Она разработана и смонтирована специалистами фирмы SMS и находится в эксплуатации до

настоящего времени. На рисунке 1.23 представлены осциллограммы линейных скоростей и моментов двигателей верхнего и нижнего валков и упругих моментов валопроводов, измеренные этой системой. Они получены при прокатке профиля «тяжелого» сортамента.

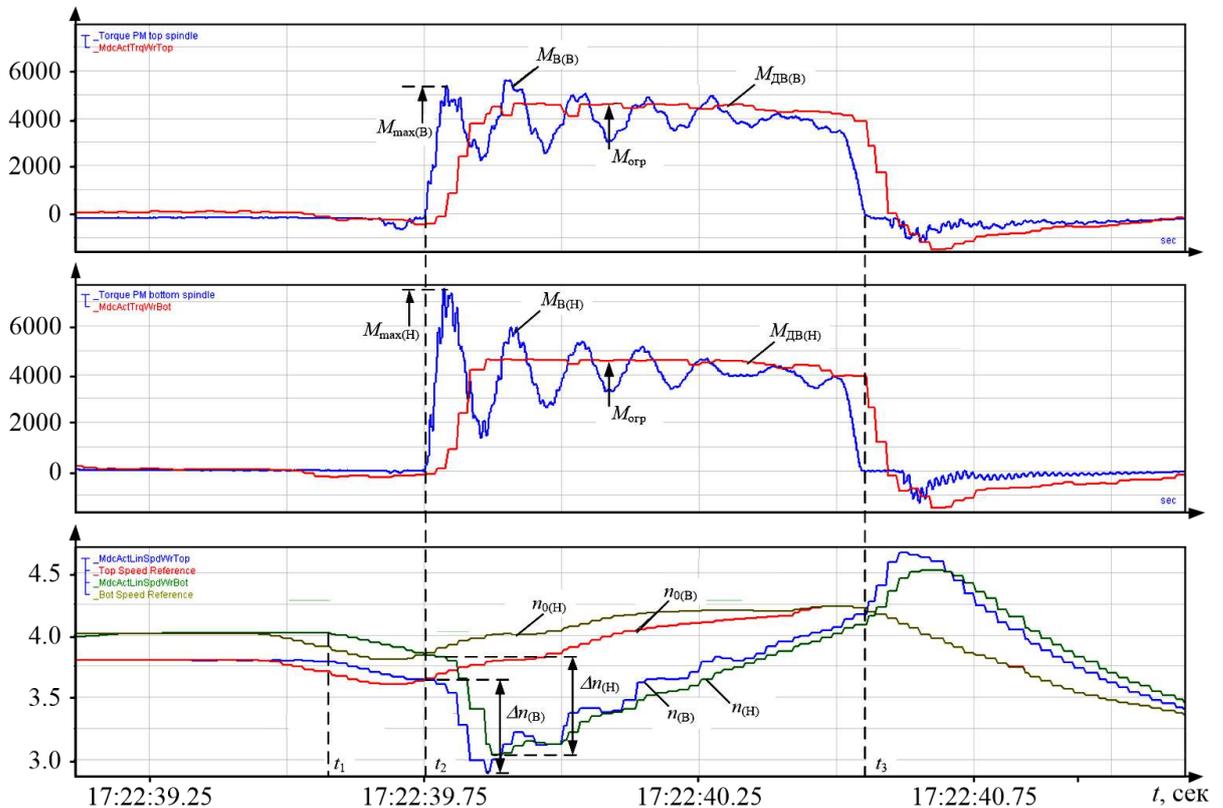


Рисунок 1.23. Осциллограммы скоростей и моментов в режиме захвата и прокатки металла

Захват металла происходит в момент времени  $t_2$ . Практически в течение всего прохода (интервал  $t_2-t_3$ ) моменты двигателей  $M_{дв(В)}$ ,  $M_{дв(Н)}$  обоих валков находятся на уровне ограничения  $M_{огр}$ , равном 4500 кН·м. Дополнительным условием эксперимента является захват металла в режиме торможения электропривода (интервал  $t_1-t_2$ ), т.е. при полностью открытых угловых зазорах в шпиндельных соединениях.

Очевидно, что при выходе электропривода в режим ограничения по моменту возникает размыкание контура регулирования скорости. Вследствие этого переходные процессы приобретают следующие негативные свойства:

1. Скорости  $n_B$ ,  $n_H$  обоих электроприводов не выходят на заданные значения в течение всего прохода.

2. Электроприводы не обеспечивают демпфирования колебаний упругих моментов  $M_{B(B)}$ ,  $M_{B(H)}$  на передающих валах (шпинделях). Поэтому возникают колебания момента, затухание которых происходит только под действием диссипативных сил (вязкого трения, нагрева и др.).

3. Максимальные значения моментов  $M_{MAX(B)}$ ,  $M_{MAX(H)}$  на валах шпинделей значительно превышают уровень ограничения электромагнитного момента двигателя 4500 кН·м. Так, максимальное значение момента  $M_{MAX(B)}$  на шпинделе верхнего валка составляет 5500 кН·м, на шпинделе нижнего валка  $M_{MAX(H)}=7500$  кН·м, что недопустимо.

Разные амплитуды моментов на верхнем и нижнем шпинделях объясняются изначальной разницей заданий скоростей электроприводов. Это обусловлено работой системы лыжеобразования, которая рассмотрена выше.

При выходе электропривода в режим ограничения по моменту возникают затухающие колебания с большой амплитудой. Ударные нагрузки вызывают усталостные разрушения механического оборудования главной линии клетки, чаще всего – головок шпиндельных соединений. Также снижаются надежность и долговечность силового электрооборудования: СД и преобразователей частоты. Это подтверждает актуальность ограничения электромагнитного момента двигателей и упругого момента в валопроводах клетки.

Анализ литературных источников и экспериментальные исследования, проведенные на стане, указывают следующие причины возникновения неблагоприятных динамических процессов:

1. Ударные механические нагрузки, связанные с выбором зазоров в шпиндельных соединениях, которые не могут контролироваться, но могут быть устранены средствами электропривода.

2. Неудовлетворительные условия захвата, связанные с тем, что зазор валков изначально устанавливается исходя из заданной толщины раската после прохода. При этом условия захвата не принимаются во внимание.

3. Колебательные процессы, вызванные настройкой пропорционально-интегрального регулятора скорости в двухконтурной САР скорости. Известно, что переходные процессы момента электропривода при такой настройке

имеют периодический затухающий характер. Они приводят к возникновению крутильных колебаний на валу и росту динамического момента.

4. Несогласованность скорости входа листа в клеть и линейной скорости вращения валков.

Недопустимые нагрузки, имеющие колебательный характер, и потеря управляемости электропривода подтверждают актуальность разработки способов управления, обеспечивающих ограничение динамических моментов в режиме захвата металла валками.

Анализ приведенных осциллограмм и сделанные выводы позволяют сформулировать следующие задачи, решение которых должно быть обеспечено путем разработки алгоритмов управления электроприводами:

1. Ограничение ударного момента, возникающего вследствие замыкания углового зазора в механических соединениях.

2. Компенсацию колебаний момента, вызванных упругими свойствами механических передач.

В представленной работе эти задачи решаются путем формирования специальных скоростных режимов (тахограмм) электропривода валка.

#### ***Обоснование разработки наблюдателя упругого момента***

Очевидно, что системы управления, разрабатываемые для решения поставленных задач, будут являться системами косвенного ограничения момента. Достижение эффекта без применения дополнительных технических средств может быть достигнуто только за счет совершенствования алгоритмов управления электроприводом. Альтернативным решением может являться разработка системы прямого регулирования упругого момента валопровода. Такая система обеспечит более высокую точность регулирования внешнего параметра. Однако для ее реализации необходимо прямое измерение упругого момента шпинделя и/или скорости второй массы (валка), что вызывает серьезные затруднения.

Упомянутая выше система измерения упругого момента фирмы SMS не является надежным устройством. Это подтверждает тот факт, что она является третьей по счету, установленной на стане с момента его ввода в эксплуатацию

в 2009 году. Причинами низкой долговечности являются тяжелые условия эксплуатации, относительно частые плановые замены шпинделей, после которых возникают сложности с установкой датчиков, и человеческий фактор.

Достойным альтернативным решением является разработка современных наблюдателей параметров двухмассовой системы. Наряду с бесконтактным вычислением упругого момента, их преимуществом является возможность построения замкнутых систем регулирования без применения дополнительных электромеханических устройств (датчиков, съемных колец и др.).

Разработка такого наблюдателя и системы регулирования скорости вала являются задачами, поставленными в диссертационной работе.

### ***Обоснование согласования скоростей электроприводов горизонтальной и вертикальной клетей при совместной прокатке***

Валки горизонтальной и вертикальной клетей толстолистового стана в режиме совместной прокатки жестко связаны через металл, их линейные скорости выравниваются принудительно. В такой ситуации любое изменение скорости горизонтальных валков приведет к изменению скорости металла на входе/выходе клетки, рассогласованию скоростей раската и линейной скорости валков вертикальной клетки. Это вызовет усиление взаимодействия валков вертикальных и горизонтальных клетей, возникновению подпора и динамическим ударам в электромеханических системах во время повторного переходного процесса при захвате раската горизонтальными валками (при движении от вертикальных валков к горизонтальным). Аналогичный режим возникает в универсальных клетях широкополосных станов горячей прокатки, он исследован в диссертационной работе [154] и публикациях [155–158].

Нежелательные процессы, вызванные рассогласованием скоростей горизонтальных и вертикальных валков, также возникают при изменении межвалкового зазора в процессе прокатки. Регулирование зазора при наличии металла в валках предусмотрено при профилированной прокатке слябов. Как отмечалось выше, согласно данной технологии формируется переменная толщина по длине на концах раската. Это осуществляется за счет перемещения валков в направлении уменьшения зазора при прокатке головного участка и в противоположном направлении при прокатке концевой участка.

Регулирование зазора в динамическом режиме сведения валков приводит к изменению скоростей металла на входе и выходе клетки. Это вызвано динамическим увеличением опережения (отставания). Возникающее рассогласование скорости раската и линейной скорости валков вертикальной клетки приводит к упомянутым выше нежелательным последствиям, в том числе возникновению подпора. Этот режим является недопустимым, т.к. приводит к снижению устойчивости раската в валках. В результате нарушается режим прокатки и снижается точность геометрических размеров раската.

Сказанное предопределяет постановку и решение задачи ограничения силовой взаимосвязи в промежутке между вертикальными и горизонтальными валками за счет согласования скоростей электроприводов.

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

### **Выводы.**

1. В истекшие 12 лет, благодаря вводу в эксплуатацию трех современных толстолистовых станов 5000, произошло практически полное вытеснение зарубежных производителей с российского рынка труб большого диаметра. Для закрепления достигнутых позиций и расширения присутствия отечественных предприятий на зарубежных рынках требуется повышение конкурентоспособности за счет снижения материалоемкости и повышения качества трубной заготовки.

2. На основании анализа технологии и экспериментальных исследований определены электротехнические системы реверсивной клетки стана 5000, которые подлежат исследованию и совершенствованию в диссертационной работе. Таковыми являются: автоматизированные электроприводы валков горизонтальной клетки, оснащенные системами задания скоростных режимов, системы формирования изгиба переднего конца раската (лыжеобразования), принудительного выравнивания скоростей и нагрузок верхнего и нижнего валков, а также системы управления гидравлическими нажимными устройствами, реализующие концепцию ROLL-GAP CONTROL.

3. Недостатком ранее проведенных исследований является то, что работа каждой электротехнической системы толстолистостанов рассматривалась

обособленно, вне взаимосвязи с другими системами. Опыт эксплуатации стана 5000 и проведенные экспериментальные исследования, показали, что при расширении сортамента продукции подобный подход является недостаточным. Возможности современных контроллеров позволяют разрабатывать новые способы и алгоритмы управления, учитывающие комплекс взаимосвязей сложного технологического объекта, которым является реверсивная прокатная клеть.

4. В результате анализа технологии профилированной прокатки установлено, что недостатком алгоритма управления в проходах с профилированием является отсутствие коррекции скорости электроприводов валков при перемещении НУ. Вследствие этого возникает рассогласование реальной скорости металла и скорости валков вертикальной клетки. Это приводит к возникновению дополнительных динамических нагрузок и подпора, что недопустимо по технологии прокатки. Кроме того, возрастает риск застревания раската при выходе на рольганг. Для устранения данных недостатков предложено осуществлять автоматическую коррекцию скоростей электроприводов вертикальной клетки в проходах с профилированием.

5. Анализ технологии формирования «лыжи» показал, что вследствие неопределенности отдельных технологических параметров возникает опасность чрезмерного изгиба конца раската вверх либо вниз. От формы переднего конца зависят ударные нагрузки вспомогательных механизмов (рольгангов). Это снижет срок эксплуатации оборудования и повышает риск возникновения аварий. Данный факт предопределил целесообразность совершенствования алгоритмов лыжеобразования и разработки системы управления скоростями ВГП и НГП, обеспечивающих заданные параметры «лыжи» во всех проходах.

6. Экспериментально подтверждено, что рассогласование скоростей приводит к неравномерной нагрузке электроприводов верхнего и нижнего валков. Моменты двигателей отличаются 2-3 раза, причем в черновых проходах момент НГП превышает момент ВГП, а в чистовых проходах соотношение обратное. Это приводит к повышенному нагреву двигателей, снижению КПД, увеличению динамических нагрузок оборудования. Данные недостатки предопределяют актуальность исследований взаимосвязанных электроприводов

верхнего и нижнего валков. Целью является разработка технических решений, обеспечивающих согласование нагрузок за минимальное время.

7. Вследствие кратного различия моментов (токов) двигателей ВГП и НГП в квазиустановившемся режиме прокатки обоснована актуальность определения их реальных эквивалентных нагрузок в on-line режиме. Они должны быть рассчитаны по фактическим (а не расчетным) моментам нагрузки для каждой партии проката. Эта задача приобретает особую актуальность при расширении сортамента за счет прокатки труднодеформируемых марок стали.

8. Рассмотрен механизм возникновения дефекта «серповидность» раската на выходе из клетки. На основе анализа известных разработок подтверждена актуальность разработки системы компенсации перекоса зазора горизонтальных валков. Основными требованиями к системе являются компенсация «наследственного» перекоса за счет настройки межвалкового зазора в паузах между проходами и повышение быстродействия РАС регулятора.

9. В результате экспериментальных исследований переходных процессов в режиме захвата металла валками подтверждены недопустимые динамические нагрузки, имеющие колебательный характер, и потеря управляемости электропривода. Это подтверждает актуальность разработки способов управления, обеспечивающих ограничение моментов двигателя и шпинделя в этом режиме. Для решения задачи обоснованы: ограничение удара, возникающего вследствие замыкания углового зазора в механических соединениях и компенсация колебаний момента, вызванных упругими свойствами механических передач.

10. В качестве перспективного направления решения данной проблемы названа разработка замкнутой системы «прямого» регулирования скорости валка на основе наблюдателя, обеспечивающего восстановление скорости и упругого момента шпинделя на основе непрерывно измеряемых параметров электропривода.

#### **Постановка задачи исследований.**

Для достижения цели, поставленной в диссертации, обоснованы следующие направления исследований и разработок.

1. Разработка математических моделей взаимосвязанных электротехнических систем реверсивной клетки стана 5000.

1.1. Разработка математической модели системы «преобразователь частоты – синхронный двигатель» с векторным управлением.

1.2. Разработка имитационной модели электромеханических и гидравлических систем горизонтальной клетки, взаимосвязанных через металл. Моделирование взаимосвязи электромеханических систем вертикальных и горизонтальных клеток.

1.3. Разработка упрощенной модели двухмассовой электромеханической системы валков с упругой связью и зазором в механических соединениях.

2. Разработка методики оценки ограничений, накладываемых электроприводом на технологический процесс толстолистного стана, позволяющей определить технические возможности расширения сортамента за счет освоения перспективных профилей и марок стали.

3. Совершенствование электротехнических систем, направленное на ограничение силовой взаимосвязи и согласование скоростных режимов электроприводов верхнего и нижнего валков, а также валков вертикальной и горизонтальных клеток.

3.1. Научное обоснование и разработка способа управления электроприводами валков горизонтальной и вертикальной клеток в проходах с регулируемым формоизменением раската, обеспечивающий реализацию принципа «постоянства массы».

3.2. Разработка способов автоматического управления, обеспечивающих согласование режимов формирования «лыжи» и автоматического выравнивания нагрузок в квазиустановившемся режиме прокатки.

3.3. Разработка системы выравнивания нагрузок электроприводов верхнего и нижнего валков с переключающейся структурой с нелинейным регулятором деления нагрузок.

4. Научное обоснование и реализация принципа перераспределения регулирующих воздействий на исполнительные устройства клетки. Разработка системы регулирования асимметрии зазора валков, обеспечивающей устранение дефекта «серповидность» раската на выходе из клетки.

5. Научное обоснование и разработка способов управления скоростными режимами электропривода горизонтальной клетки, обеспечивающих ограничение динамических нагрузок в режиме захвата металла валками.

5.1. Обоснование принципа ограничения динамических нагрузок при ударном приложении нагрузки, согласно которому осуществляется индивидуальная компенсация составляющих динамического момента, обусловленных:

- ударом при замыкании углового зазора;
- упругими свойствами механической передачи;
- настройкой системы автоматического регулирования скорости электро-

привода.

5.2. Разработка замкнутой системы «прямого» регулирования скорости вала, обеспечивающей ограничение упругого момента в валопроводе клетки в режиме ударного приложения нагрузки. Разработка наблюдателя параметров двухмассовой системы на основе непрерывно измеряемых координат электропривода.

6. Математическое моделирование и экспериментальные исследования проектных и разработанных алгоритмов управления электроприводами и усовершенствованных систем автоматического регулирования технологических параметров. Сопоставление характеристик в установившем и динамических режимах, оценка технической эффективности и целесообразности внедрения.

7. Экспериментальные исследования и промышленное внедрение разработанных алгоритмов и технических решений в электроприводах и АСУ ТП станков 5000 и 2000 ПАО «ММК». Оценка экономической эффективности, рекомендации по расширенному внедрению.

#### **Описание научных подходов**

При проведении исследований будет применен комплексный подход, включающий анализ известных разработок, теоретический анализ и экспериментальные исследования, обобщение результатов.

Будут применены следующие методы исследования:

- математическое моделирование с использованием лицензионных пакетов прикладных программ, в частности пакета Matlab и входящей в его состав графической среды программирования Simulink;

– автоматизированный анализ с использованием авторского программного обеспечения; разработка программ будет выполнена с использованием языков программирования VBA в среде MS Excel и Turbo Pascal 7.0;

– проведение опытно-промышленных испытаний и экспериментальных исследований разработанных систем и алгоритмов в промышленных условиях.

Экспериментальные исследования будут проводиться на прокатных станках 5000 и 2000 ПАО «ММК». В связи со сложностью изготовления действующих физических моделей, исследования в лабораторных условиях не планируется.

Решение поставленных задач должно быть обеспечено путем совершенствования автоматизированного электропривода и алгоритмов систем автоматического регулирования технологических параметров. Дополнительные затраты на оборудование и реконструкцию не предусматриваются.

#### **Ожидаемые практические результаты.**

1. Создание технических возможностей производства трубной заготовки расширенного сортамента из труднодеформируемых, в том числе хладостойких марок стали.

2. Снижение энергоемкости производства за счет оптимизации нагрузочных режимов электроприводов и выравнивания нагрузок двигателей верхнего и нижнего валков.

3. Улучшение качества листового проката за счет повышения точности геометрических размеров.

4. Снижение потерь металла за счет уменьшения отходов с обрезью и сокращения брака, вызванного аварийными остановками стана.

5. Повышение долговечности и эксплуатационной надежности оборудования. Снижение эксплуатационных затрат на техническое обслуживание и устранение последствий аварий.

Решение поставленных задач и практическое внедрение результатов обеспечат повышение конкурентоспособности отечественной продукции на рынке труб большого диаметра.

## **Глава 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ. СПОСОБ СОГЛАСОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КЛЕТЕЙ**

### **2.1. Постановка задачи**

Исследование сложных электротехнических систем стана 5000 должно выполняться методами математического моделирования. В отношении реверсивной клетки толстолистного стана должны быть исследованы режимы электромеханических и гидравлических систем горизонтальной клетки взаимосвязанных, в процессе прокатки. Это требует, прежде всего, разработки математической модели системы преобразователь частоты-синхронный двигатель (ПЧ-СД) с векторным управлением скоростью. Для исследования взаимного влияния электромеханических систем горизонтальной и вертикальной клетей ставится задача моделирования их силовой взаимосвязи через металл.

Кроме того, в соответствии с задачами, поставленными в диссертационной работе, необходимы исследования взаимосвязанных систем верхнего и нижнего валков в режиме лыжеобразования и выравнивания нагрузок двигателей. В связи с этим ставится задача разработки имитационной модели, пригодной для исследования процессов во всех режимах за цикл прокатки (ускорение, захват металла валками, квазиустановившийся процесс прокатки, выход металла из валков, торможение). Для решения задачи компенсации перекаса зазора валков она должна быть дополнена моделью гидравлических нажимных устройств по сторонам OS и DS с учетом их связи через металл.

Необходимо исследования динамических режимов при захвате металла валками. В этом случае нет необходимости моделирования переходных процессов «внутренних» координат электропривода (токов, напряжений, потоков двигателя). При этом на первый план выходят задачи анализа упругой связи двигателя и валка. Для этого целесообразна разработка упрощенной модели двухмассовой системы «двигатель – валок», учитывающей наличие зазоров в механических соединениях.

Как подчеркнуто во введении, недостатком алгоритма управления прокаткой в проходах с профилированием является отсутствие коррекции скоростей электроприводов валков при перемещении НУ. Необходимость такой коррекции вызвана тем, что на фактическую скорость металла помимо скорости вращения валков оказывает влияние отставание (снижение скорости) металла на входе в горизонтальную клеть. Этот параметр определяется величиной обжатия, т.е. межвалкового зазора и соответственно его изменением в процессе профилированной прокатки. Вследствие перемещения НУ возникает рассогласование реальной скорости металла и линейной скорости смежной клетки. Это приводит к возникновению силового взаимодействия электромеханических систем клеток, которое проявляется в чрезмерном натяжении либо возникновении подпора, который по условиям прокатки недопустим.

Как показали результаты литературного обзора, задание соотношений скоростей электроприводов, основанное на равенстве секундных объемов, при совместной прокатке толстых полос не является корректным. В связи с этим, возникла задача разработки усовершенствованного способа формирования скоростных режимов прокатки, основанного не на постоянстве секундного объема, а на условии баланса масс прокатываемого металла. Данный термин встречается в монографии М.Ю. Файнберга [61] и применяется авторами других публикаций, ссылки на которые даются ниже.

При перемещении НУ в режиме профилированной прокатки изменяется зазор валков и соответственно обжатие в клетях. Поэтому, прежде чем перейти к разработке способа, необходимо рассмотреть влияние относительного обжатия на опережение (отставание) и соответственно скорость металла на выходе (входе) валков. Кроме того, целесообразно дать краткую характеристику принципа Головина-Симса регулирования толщины, реализованного в САРТ клетях. Это обусловлено тем, что разрабатываемый способ согласования скоростей при перемещении НУ непосредственно связан с работой САРТ.

Разработанные модели должны обеспечить возможность исследования как проектных, так и разрабатываемых алгоритмов управления. Их адекватность исследуемым объектам должна доказываться в каждом случае путем сопоставления с результатами осциллографирования, полученными на стане.

## 2.2. Разработка модели электропривода клетки

### 2.2.1. Модель синхронного двигателя

Математическая модель синхронного двигателя (СД) построена на основе уравнений Парка-Горева в системе отсчета  $d-q$ . Действующая САР скорости электропривода построена по принципу подчиненного регулирования координат с последовательной коррекцией. Схемы замещения СД в осях  $d-q$  представлены на рисунке 2.1, а и б, соответственно.

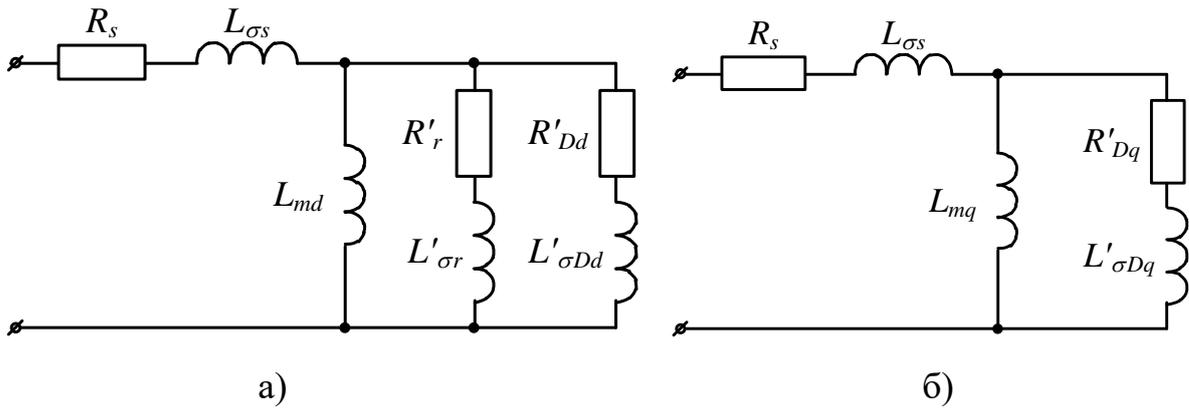


Рисунок 2.1 – Схемы замещения СД в осях  $d-q$

Построение структурной схемы модели осуществляется в соответствии со следующими уравнениями. Уравнение движения электропривода в относительных единицах (о.е.):

$$T_j \cdot p \cdot \nu = m_\psi - m_c, \quad (2.1)$$

где  $T_j$  - электромагнитная постоянная времени, с:

$$T_j = J_\Sigma \cdot \frac{\Omega_{\bar{\sigma}}}{M_{\bar{\sigma}}}, \quad (2.2)$$

$\nu = \frac{\omega}{\Omega_s}$  - угловая скорость в о.е.;

$m_c$  - статический момент;

$m_\psi$  - электромагнитный момент:

$$m_\psi = \psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd}, \quad (2.3)$$

Для теоретического анализа статических и динамических режимов СД целесообразно в структурной схеме двигателя выделить четыре контура: два для токов статора и два для потокосцеплений ротора. Им соответствуют дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = \frac{\Omega_s}{p} \cdot (U_{sd} + \nu \cdot \psi_{sq} - r_s \cdot i_{sd}), \\ \psi_{rd} = \frac{\Omega_s}{p} \cdot (U_{rd} - r_{rd} \cdot i_{rd}), \\ \psi_{sd} = x_{sd} \cdot i_{sd} + x_{md} \cdot i_{rd}, \\ \psi_{rd} = x_{md} \cdot i_{sd} + x_{rd} \cdot i_{rd}. \end{cases}$$

Решение этих уравнений дает выражения:

$$i_{rd} = \frac{\psi_{rd}}{x_{rd}} - \frac{x_{md}}{x_{rd}} \cdot i_{sd}, \quad (2.4)$$

$$\psi_{rd} = \frac{x_{rd}}{\left( r_{rd} + x_{rd} \cdot \frac{p}{\Omega_s} \right)} \cdot \left( U_{rd} + \frac{x_{md} \cdot r_{rd}}{x_{rd}} \cdot i_{sd} \right). \quad (2.5)$$

Выполнено преобразование представленных соотношений к следующим выражениям для переменных статора по оси  $d$ :

$$\psi_{sd} = x'_{sd} \cdot i_{sd} + \frac{x_{md}}{x_{rd}} \cdot \psi_{rd}, \quad (2.6)$$

$$i_{sd} = \frac{1}{\left( r_s + x'_{sd} \cdot \frac{p}{\Omega_s} \right)} \cdot \left[ U_{sd} + \nu \cdot \psi_{sq} - \frac{x_{md}}{x_{rd}} \cdot (U_{rd} - r_{rd} \cdot i_{rd}) \right]. \quad (2.7)$$

Для токов и потокосцеплений поперечных контуров получены соотношения:

$$i_{rq} = \frac{\psi_{rq}}{x_{rq}} - \frac{x_{mq}}{x_{rq}} \cdot i_{sq}, \quad (2.9)$$

$$\psi_{rq} = \frac{x_{rq}}{\left( r_{rq} + x_{rq} \cdot \frac{p}{\Omega_s} \right)} \cdot \left( U_{rq} + \frac{x_{mq} \cdot r_{rq}}{x_{rq}} \cdot i_{sq} \right), \quad (2.10)$$

$$\psi_{sq} = x'_{sq} \cdot i_{sq} + \frac{x_{mq}}{x_{rq}} \cdot \psi_{rq}, \quad (2.11)$$

$$i_{sq} = \frac{1}{\left( r_s + x_{sq} \cdot \frac{p}{\Omega_s} \right)} \cdot [U_{sq} - \nu \cdot \psi_{sd}]. \quad (2.12)$$

Приведенным уравнениям (2.1) – (2.12) соответствует структурная схема СД, представленная на рис. 2.2 [159, 160]. Из нее следует, что СД представляет собой нелинейный многосвязный объект с внутренними перекрестными связями. Так, в контурах токов статора имеются внутренние обратные связи по ЭДС вращения  $v \cdot \Psi_{sd}$  и  $v \cdot \Psi_{sq}$ , которые определяют взаимное влияние продольных и поперечных контуров машины.

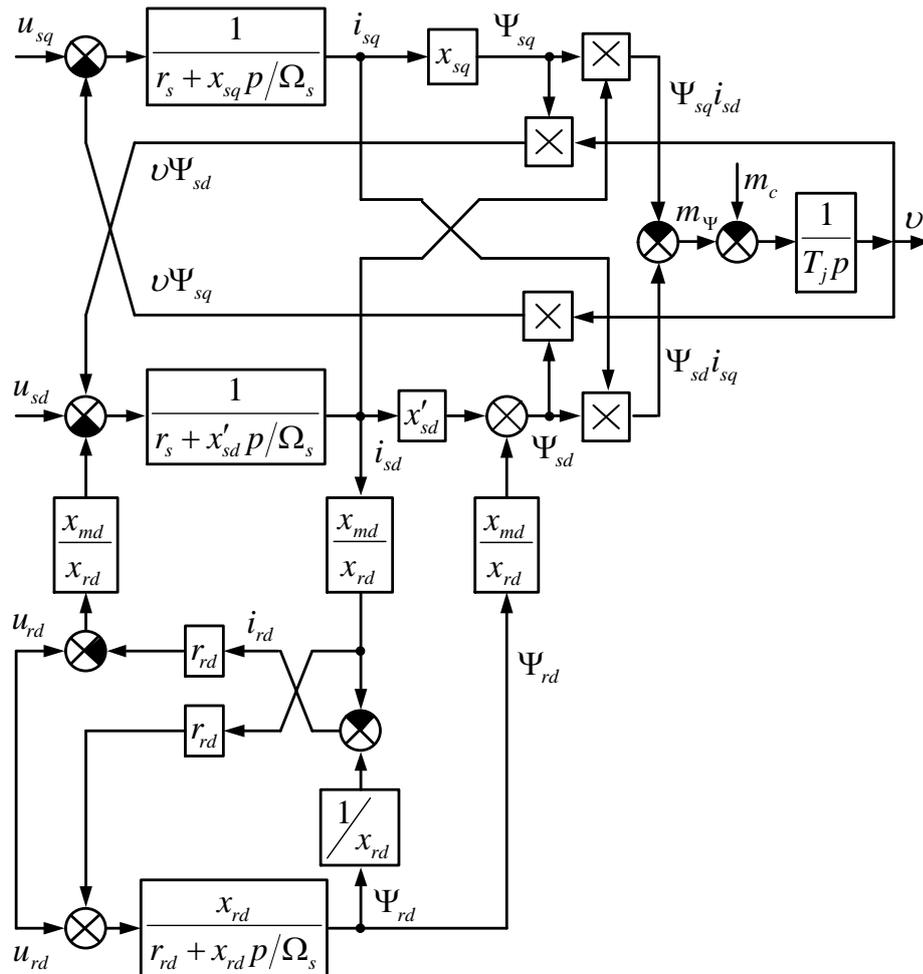


Рисунок 2.2 – Структурная схема модели СД

### 2.2.2. Моделирование системы ПЧ-СД с векторным управлением

Для рассматриваемого электропривода используется метод векторного управления с самосинхронизацией, обратными связями по скорости и положению [161]. Синтез системы выполнен на основе рассмотренной динамической модели СД в системе координат  $(d-q)$ , ориентированной по магнитной оси ротора):

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} \cdot (U_d - R_s \cdot I_d + \omega \cdot L_q \cdot I_q);$$

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_q} \cdot (U_q - R_s \cdot I_q - \omega \cdot L_d \cdot I_d - \omega \cdot \psi_f);$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c - \beta \cdot \Omega); \quad \omega = Z_p \cdot \Omega;$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot [\psi_f \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q]$$

где  $I_d, I_q, U_d, U_q$  – токи и напряжения статора по осям  $d$  и  $q$ ;

$M, M_c$  – электромагнитный и нагрузочный моменты;

$\omega$  – частота вращения ротора, электрическая;

$J$  – момент инерции ротора;

$\beta$  – коэффициент вязкого трения (коэффициент демпфирования);

$\psi_f$  – потокосцепление, создаваемое обмоткой возбуждения;

$L_d, L_q$  – индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям ротора.

Для минимизации тока статора при заданной величине момента нагрузки необходимо, чтобы векторы тока и напряжения были параллельны. В этом случае ток статора во всех режимах направлен перпендикулярно магнитной оси ротора (по оси  $q$ ) в соответствии с векторной диаграммой, представленной на рисунке 2.3.

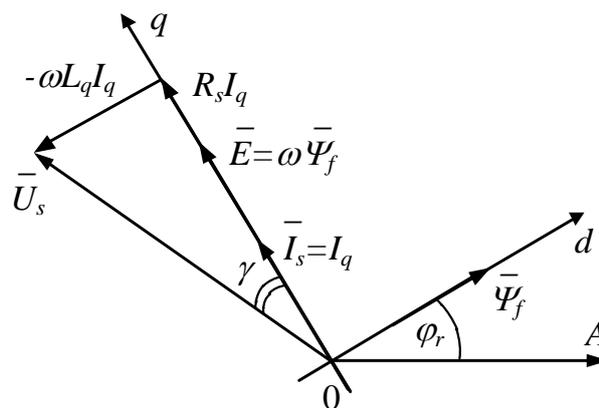


Рисунок 2.3 – Векторная диаграмма СД

Преобразователь координат  $ABC \rightarrow d-q$  выполняет преобразование фазных токов статора СД из естественной трехфазной системы координат  $(A, B, C)$  в ортогональную синхронную систему координат  $(d, q)$  по уравнениям:

$$I_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ I_A \cdot \sin\left(\varphi_r + \frac{\pi}{3}\right) + I_B \cdot \sin(\varphi_r) \right];$$

$$I_q = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ I_A \cdot \cos\left(\varphi_r + \frac{\pi}{3}\right) + I_B \cdot \cos(\varphi_r) \right],$$

где  $\varphi_r$  – угловое положение ротора, полученное от датчика положения.

Блок компенсации перекрестных связей описывают следующие уравнения:

$$U_{kd} = -\frac{1}{k_{nc}} \cdot L_q \cdot \omega \cdot I_q;$$

$$U_{kq} = \frac{1}{k_{nc}} \cdot \omega \cdot (L_d \cdot I_d + \psi_f).$$

Синтез регуляторов выполняется на основе принципов подчиненного регулирования с использованием метода компенсации нелинейных связей.

Синтез регулятора тока по оси  $d$ .

Структурные схемы контура тока по оси  $d$  и контура скорости изображены на рисунках 2.4, а и б, соответственно.

На схемах обозначены:

$$T_d = \frac{L_d}{R_s} \text{ – постоянная времени статорной цепи по оси } d;$$

$$U_{kd} = -\frac{1}{K_{nc}} \cdot \omega \cdot L_q \cdot I_q \text{ – сигнал компенсации влияния нелинейной перекрестной связи.}$$

При условии полной компенсации влияния перекрестной связи, выполнена настройка контура на модульный оптимум с малой некомпенсированной постоянной времени  $T_{км} = T_{nc}$ . В результате получены выражения передаточных функций:

$$H_{PT}(p) \frac{K_{nc} \cdot K_{\text{ом}} \cdot 1/R_s}{(T_{км} \cdot p + 1)(T_d \cdot p + 1)} = \frac{1}{2 \cdot T_{км} \cdot p(T_{км} \cdot p + 1)};$$

$$H_{PT}(p) = \frac{R_s(T_d \cdot s + 1)}{2 \cdot K_{nc} \cdot K_{\text{ом}} \cdot T_{км} \cdot p} = \frac{L_d}{2 \cdot K_{nc} \cdot K_{\text{ом}} \cdot T_{км}} + \frac{R_s}{2 \cdot K_{nc} \cdot K_{\text{ом}} \cdot T_{км}} \cdot \frac{1}{p}.$$

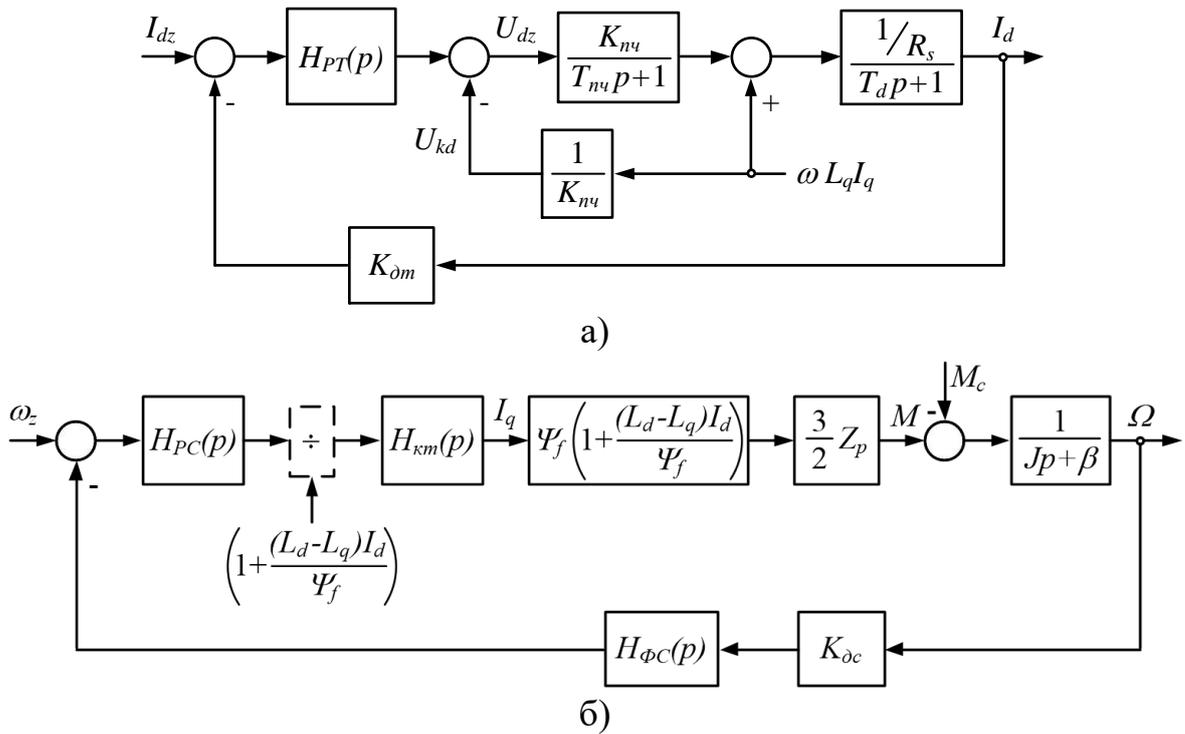


Рисунок 2.4 – Структурные схемы контура тока по оси  $d$  (а) и контура скорости (б)

Таким образом, коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих ПИ регулятора тока по оси  $d$  определяются выражениями:

$$K_{pid} = \frac{L_d}{2 \cdot K_{nc} \cdot K_{dm} \cdot T_{km}}; K_{iid} = \frac{R_s}{2 \cdot K_{nc} \cdot K_{dm} \cdot T_{km}}.$$

Передаточная функция замкнутого контура тока:

$$H_{km}(p) = \frac{1/k_{dm}}{2 \cdot T_{km}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{km} \cdot p + 1}.$$

Синтез регулятора тока по оси  $q$  выполняется аналогично, с учетом следующих условий:

$$T_q = \frac{L_q}{R_s}; \quad H_{PT}(p) = \frac{L_q}{2 \cdot K_{nc} \cdot K_{dm} \cdot T_{km}} + \frac{R_s}{2 \cdot K_{nc} \cdot K_{dm} \cdot T_{km}} \cdot \frac{1}{p};$$

Сигнал возмущающей перекрестной связи, подлежащей компенсации:

$$U_{kq} = \omega \cdot (L_d \cdot I_d + \psi_f).$$

Синтез регулятора скорости.

Структурная схема контура скорости для общего случая изображена на рисунке 2.4, б. Момент двигателя:

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \psi_f \cdot I_q,$$

где  $\psi_f = \text{var}$ .

Для частного случая  $\beta \neq 0$  настройка контура скорости выполняется на симметричный оптимум. В результате получается ПИ-регулятор скорости с передаточной функцией:

$$H_{PC}(p) = k_{op} + \frac{k_{oi}}{p},$$

$$\text{где } k_{op} = \frac{K_{\partial m} \cdot J}{3 \cdot T_{kc} \cdot \psi_f \cdot Z_p \cdot K_{\partial c}}; k_{oi} = \frac{K_{\partial m} \cdot J}{12 \cdot T_{kc}^2 \cdot \psi_f \cdot Z_p \cdot K_{\partial c}};$$

$T_{kc} = 2 \cdot T_{km} + T_{fc}$ ,  $T_{fc}$  – постоянная времени фильтра скорости.

С учетом схемы модели двигателя и передаточных функций регуляторов разработана структурная схема системы «ПЧ-СД» с векторным управлением, представленная на рисунке 2.5. Регуляторы синтезированы в системе координат  $d$ - $q$ , контуру регулирования скорости подчинены внутренние контуры токов по осям  $d$  и  $q$  и контур регулирования потокосцепления ротора. Эта модель подробно рассмотрена в публикации [162].

Система управления осуществляет двухзонное регулирование скорости СД, что обеспечивает прокатку на скоростях выше номинальной, а также минимизирует ток статора за счет включения блоков БН1, 2, 5 [163]. Реализовано зависимое регулирование скорости путем ограничения ЭДС на уровне  $E_{s\text{огр}}$ , который достигается при скорости, меньшей, чем максимальная. Поэтому в определенном диапазоне скоростей и нагрузок (в верхней зоне) ЭДС поддерживается на уровне ограничения. Это обеспечивается за счет ослабления магнитного потока СД. Более подробно принцип двухзонного регулирования скорости СД рассмотрен в работах [164–166]. Подробная модель трехуровневого преобразователя частоты рассмотрена в авторских публикациях [167, 168].

По аналогичной методике разработана математическая модель электропривода валков вертикальной клетки (здесь не приводится).

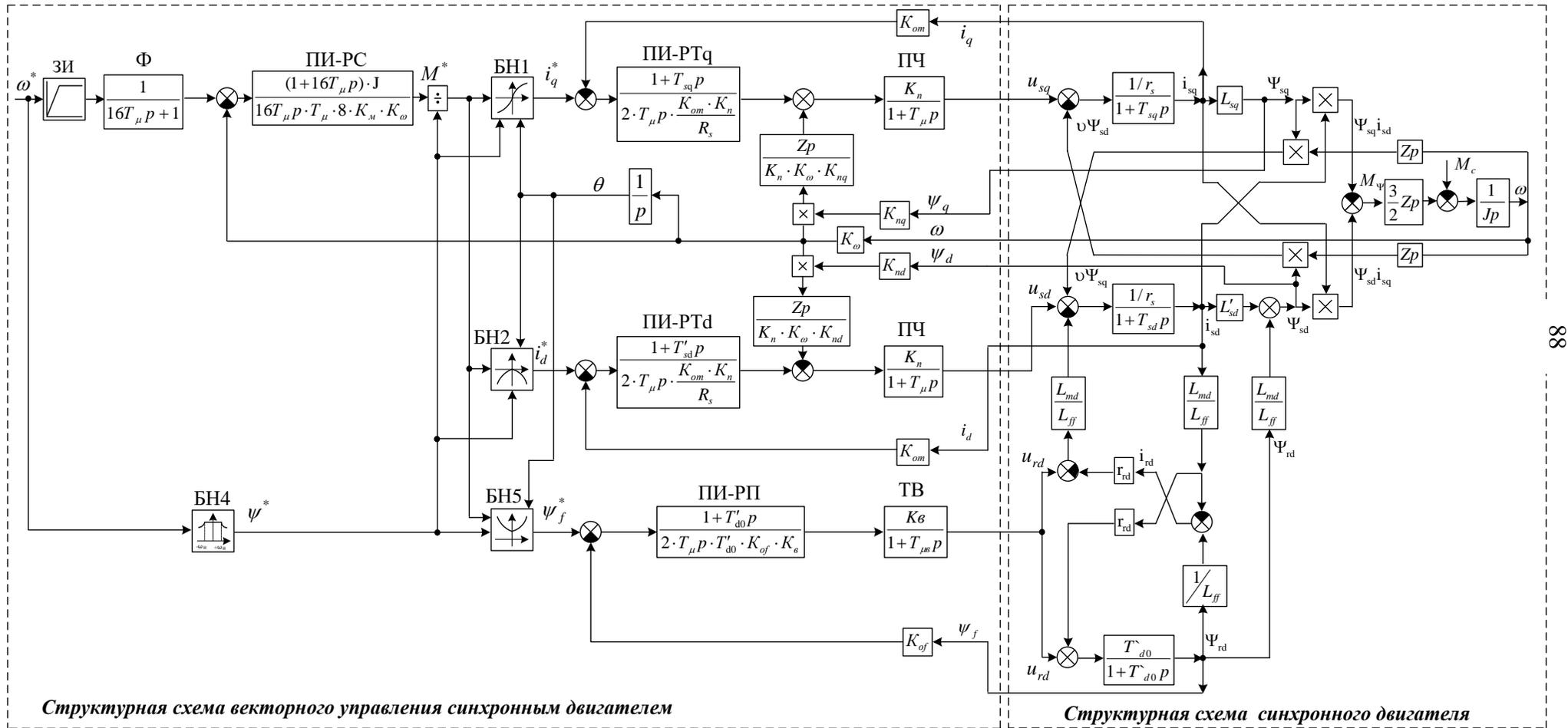


Рисунок 2.5 – Структурная схема электропривода по системе ПЧ-СД с векторным управлением

Разработанная модель может быть использована для исследования координат электропривода в режимах, когда проявление свойств механической передачи не является определяющим. Для исследования динамических процессов в режимах ударного приложения нагрузки, перемещения нажимных устройств и др. разработана упрощенная динамическая модель электромеханической системы, которая представлена ниже. Наряду с учетом упругих свойств передачи, ее отличием является упрощенное моделирование контура регулирования момента двигателя. Это связано с тем, что при исследовании процессов в системах, являющихся «внешними» по отношению к электроприводу, анализ переходных процессов «внутренних» координат двигателя (токов, магнитного потока и др.) не является актуальным. Безусловно, допустимость такого упрощения должна быть подтверждена экспериментально.

### 2.3. Упрощенная модель электромеханической системы

В связи с тем, что частота собственных колебаний механизма значительно выше частоты, определяющей быстродействие автоматизированной системы управления электроприводом, необходимо учесть упругость электромеханической системы, заменив ее на двухмассовую обобщенную систему [169, 170].

#### *Структура модели*

Электропривод каждого валка клетки толстолиствого стана выполнен индивидуальным. В механических соединениях отсутствуют устройства, обладающие инерцией (массой), соизмеримой с инерцией двигателя и приведенной инерцией рабочих и опорных валков. Поэтому электромеханическая система валков принята как двухмассовая с упругой связью и зазором в механических соединениях [169]. Кинематическая схема системы «двигатель – валок», разработанная в соответствии с этими условиями, представлена на рисунке 2.6, а.

Приняты обозначения:  $J_1=J_{дв}$  – момент инерции первой массы (двигателя);  $J_2$  – приведенный момент инерции второй массы (рабочего и опорного валков, промежуточных валов и т.д.);  $c_{12}$ ,  $M_{12}$  – жесткость и момент упругой связи;  $\beta$  – показатель затухания;  $M_1$ ,  $\omega_2$  – момент на входе и угловая скорость на выходе системы.

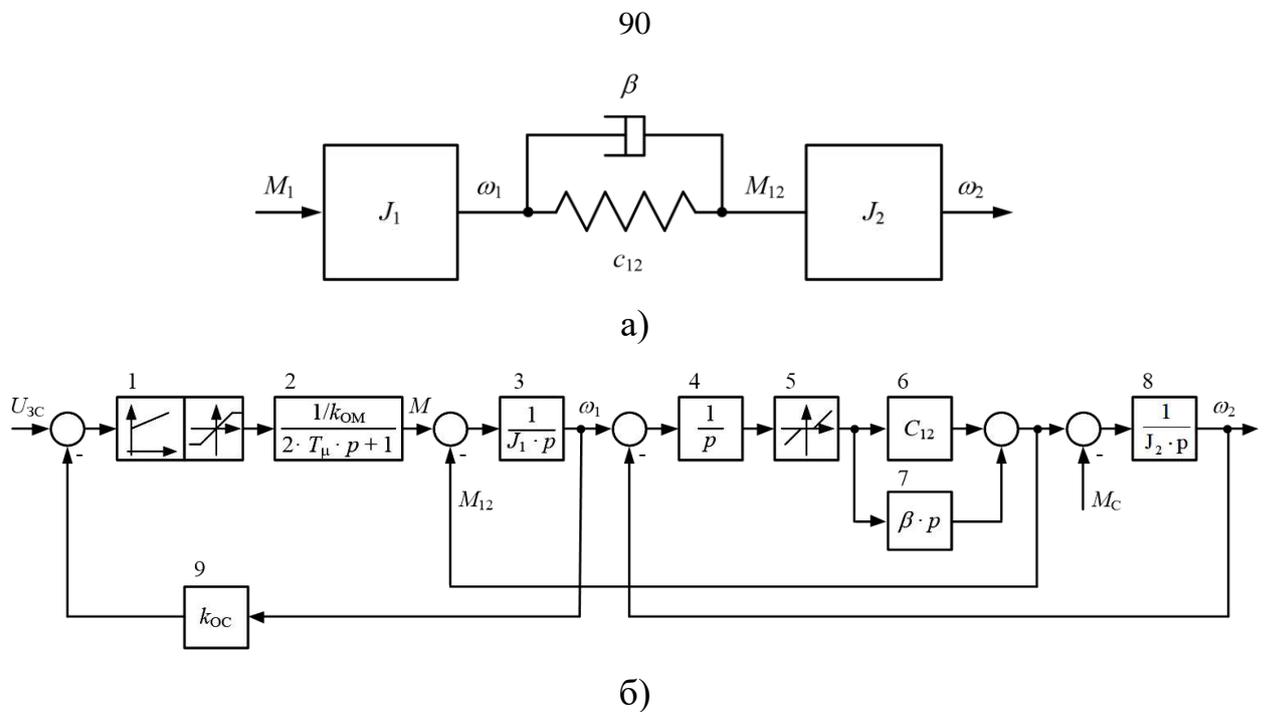


Рисунок 2.6 – Кинематическая схема механической передачи (а) и структурная схема двухмассовой электромеханической системы (б)

Структурная схема модели представлена на рисунке 2.6, б. Блоки 3, 5–7 являются типовыми блоками модели двухмассовой системы [171]. Блок 4 определяет 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  $k_{oc}$ .

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

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

Для ее определения проведены экспериментальные исследования, которые показали, что изменения скорости электропривода при отключении имеют характер затухающих колебаний. Поэтому данная система должна моделироваться колебательным звеном второго порядка:

$$W_{3M}(p) = \frac{1}{T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_1 \cdot \xi \cdot p + 1}. \quad (2.13)$$

Отсюда передаточная функция блока 4

$$W(p) = \frac{J_1}{T_1^2 \cdot c_{12} \cdot p + 2 \cdot T_1 \cdot \xi \cdot c_{12}}. \quad (2.14)$$

Параметры всех звеньев системы определены по данным электрооборудования и осциллограммам, полученным на стане. Подробно этот вопрос рассмотрен в диссертационной работе Б.М. Логинова [172] и в публикации [173]. 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 пропорционально-интегральным регулятором скорости (блок 1). Так как при работе электропривода необходимо ограничение момента, на его выходе установлен блок ограничения с изменяемыми пределами.

Параметры моделируемого объекта представлены в таблице 2.1. В ней отсутствует важный параметр – величина зазора в шпинделе, который не может быть определен теоретически либо измерен экспериментально. Поэтому величина зазора принимается по данным литературных источников в пределах от 1° до 5°.

На схеме на рисунке 2.6, б замкнутый контур регулирования момента представлен звеном 2. Возможность такой замены подтверждена сравнением переходных процессов момента, полученных с помощью моделей, представленных на рис. 2.5 и 2.6, б.

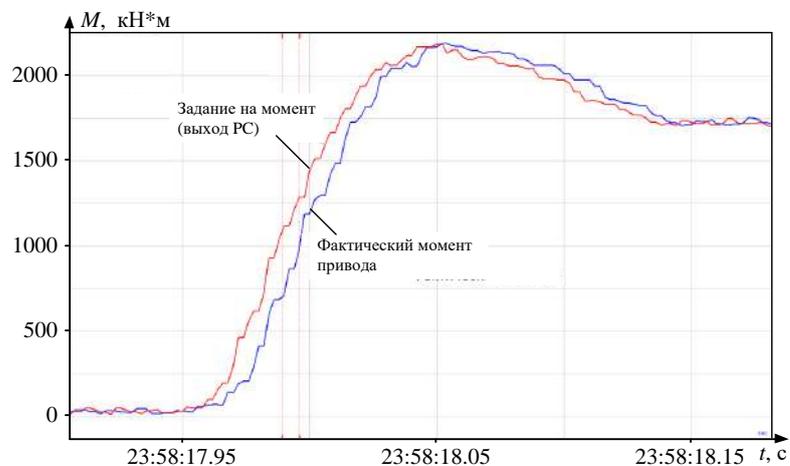
Таблица 2.1 – Данные для определения параметров двухмассовой системы

| Параметр                 | Значение                 |
|--------------------------|--------------------------|
| Момент инерции двигателя | 125000 кг·м <sup>2</sup> |
| Масса рабочего вала      | 63000 кг                 |
| Диаметр рабочего вала    | 1,2 м                    |
| Масса опорного вала      | 226400 кг                |
| Диаметр опорного вала    | 2,3 м                    |

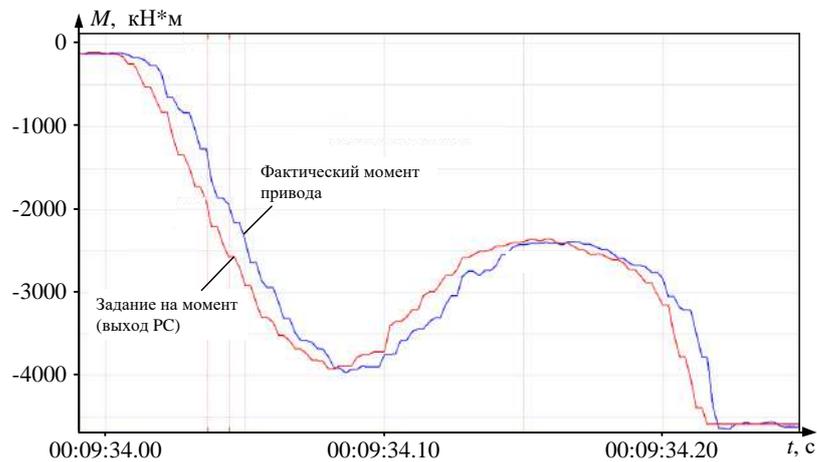
### ***Передаточная функция контура регулирования момента***

Важной задачей при аппроксимации реального контура момента звеном с передаточной функцией (2.13) является определение постоянной времени  $T_1$ .

Аппроксимация (замена) замкнутого контура регулирования токов может быть выполнена звеньями 1-го либо 2-го порядков. Определение их эквивалентных постоянных времени удобно выполнить по запаздыванию кривой фактического момента двигателя относительно заданного момента при отработке скачка задания на скорость. Такие переходные процессы представлены на рисунке 2.7. На них приведены кривые задания момента (выходного сигнала регулятора скорости) и фактического (актуального) момента электропривода (единицы измерения кН·м). Они получены экспериментально при разных уровнях входных сигналов контура скорости (с разными знаками).



а)



б)

Рисунок 2.7 – Переходные процессы задания и фактического момента при отработке скачка задания на скорость без выхода на ограничение (а) и с выходом на ограничение (б)

Исходя из приведенных временных зависимостей, контур момента можно аппроксимировать фильтром с постоянной времени 7–8 мс. После введения

численных параметров этих кривых в программу пакета Matlab получены следующие передаточные функции аппроксимирующих звеньев:

$$1) \frac{1}{0,008p + 1} \text{ – фильтр 1-го порядка;}$$

$$2) \frac{1}{0,007 \cdot 0,007 p^2 + 2 \cdot 0,65 \cdot 0,007 p + 1} \text{ – фильтр 2-го порядка}$$

На рисунке 2.8 представлены переходные процессы выходного сигнала регулятора скорости и реального момента двигателя, полученные экспериментально и рассчитанные после аппроксимации фильтрами.

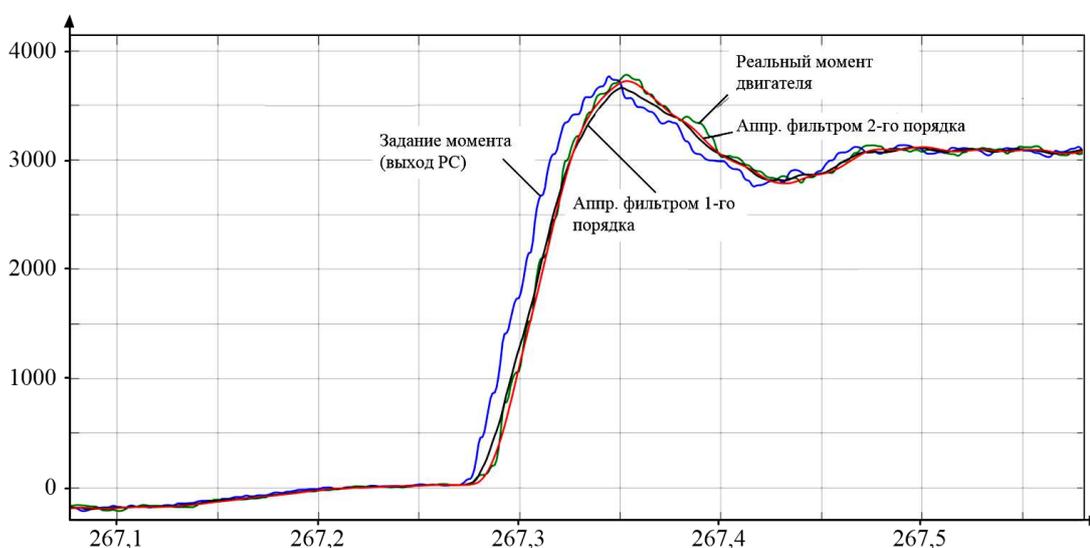


Рисунок 2.8 – Экспериментальные и расчетные переходные процессы при аппроксимации контура момента

Как следует из кривых, порядок аппроксимирующих фильтров практически не оказывает влияния на точность отработки заданного сигнала: аппроксимирующие кривые и реальный момент отличаются незначительно. Таким образом, контур регулирования момента можно аппроксимировать фильтром Баттерворта 1-го или 2-го порядков с постоянной времени 7–8 мс. Это приводит к упрощению моделей взаимосвязанных электротехнических систем клетки практически без потери точности результатов моделирования.

На рисунке 2.9 представлены частотные характеристики исследуемого замкнутого контура регулирования момента. Характеристики 1 построены при его аппроксимации фильтром 1-го порядка, ЛАЧХ и ФЧХ с индексом 2 – при аппроксимации фильтром 2-го порядка. В обоих случаях полоса пропускания

контура момента составляет около 100 рад/с, это является подтверждением возможности предлагаемой замены без нарушения свойств системы.

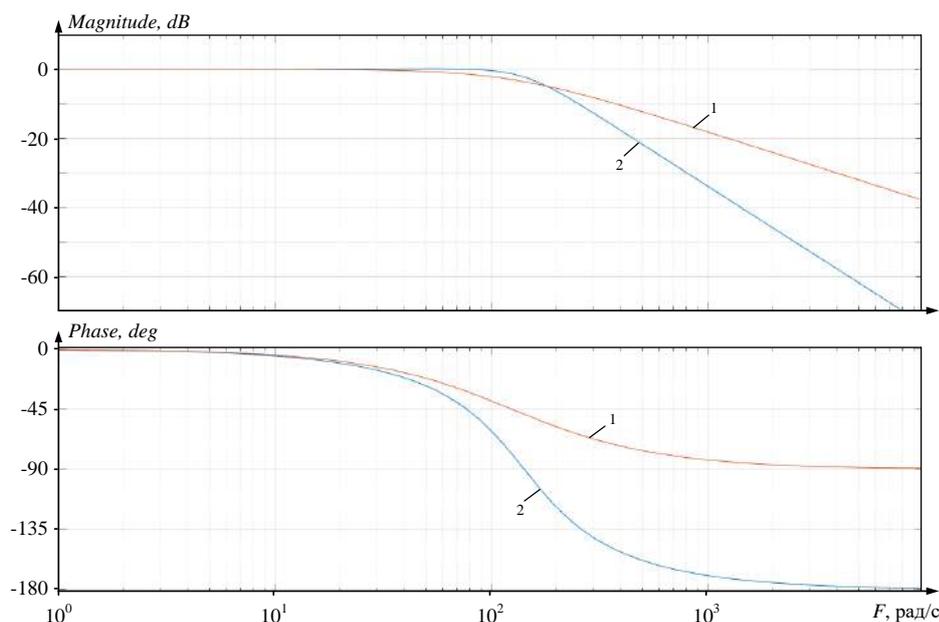


Рисунок 2.9 – ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутого контура момента при аппроксимации фильтрами Баттерворта 1-го или 2-го порядков

Упрощенная имитационная модель, структура которой представлена на рисунке 2.6, б, использована при разработке моделей взаимосвязанных электротехнических систем клетки стана 5000, которые представлены в последующих главах. Там же приводится сравнение результатов моделирования с переходными процессами, полученными на стане. Во всех случаях сделан вывод, что разработанная имитационная модель электромеханической системы позволяет исследовать динамические свойства электропривода клетки с достаточной точностью. Это дает возможность удобного исследования существующих и усовершенствованных алгоритмов управления при высокой степени достоверности результатов.

#### **2.4. Разработка модели взаимосвязанных электроприводов последовательно расположенных клеток**

Структурная схема комплексной математической модели взаимосвязанных электромеханических систем горизонтальной и вертикальной клеток представлена на рис. 2.10. В структуру входят: электромеханические преобразователи (электродвигатели, силовая часть преобразователей частоты);

клетки, включая редукторы; очаги деформации; металл в межклетевом промежутке. Причем, если первые представляют собой различные технологические узлы и физические границы между ними легко определяемы, то границы между очагами деформации и межклетевым промежутком устанавливаются на поверхностях, все точки которых имеют скорости, равные скорости входа (выхода) металла из клетки.

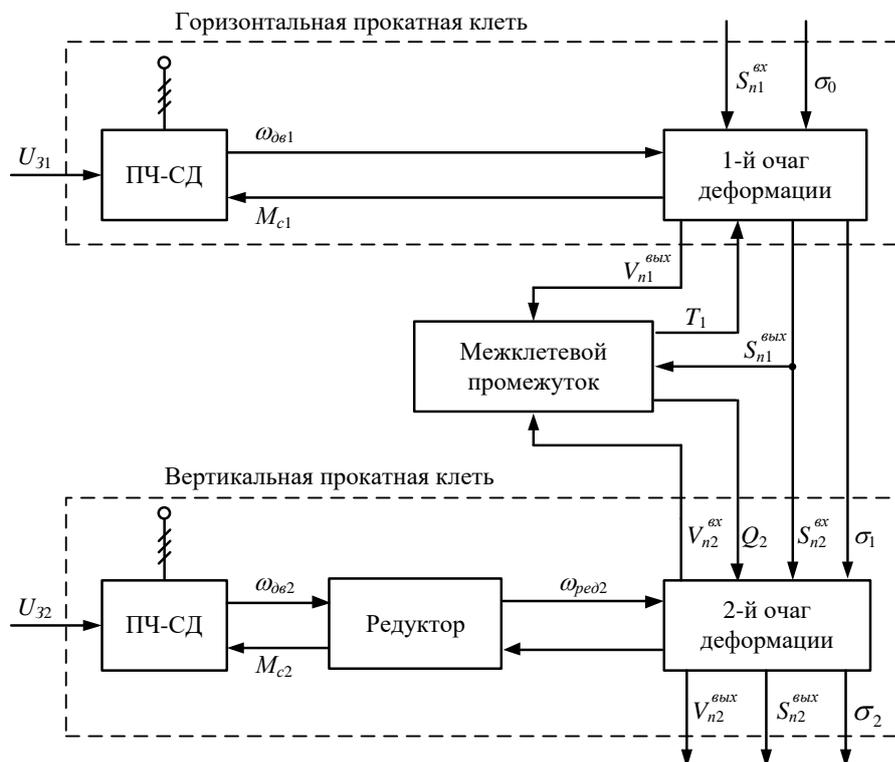


Рисунок 2.10 – Структурная схема математической модели взаимосвязанных электромеханических систем клеток стана 5000

Модель раската представлена блоками “ $i$ -й очаг деформации”, содержащими математическое описание изменения давления и момента прокатки. В структуру также входит блок “Межклетевой промежуток”, включающий математическое описание упругих свойств раската между валками горизонтальной и вертикальной клеток.

В структуре модели содержатся логически связанные объекты, которые должны иметь входные и выходные координаты, согласующиеся между собой в количественных соотношениях. Входными воздействиями являются напряжения управления на входах ПЧ, выходные координаты – скорости металла на выходе из вертикальных и горизонтальных валков, натяжения

либо подпор в межклетевых промежутках, возмущающие воздействия – переднее либо заднее натяжения в зависимости от направления прокатки. Далее рассматриваются математические описания каждого из этих объектов.

### 2.4.1. Математическое описание очага деформации

Математическая модель очага деформации разработана на основе закона сохранения энергии, упрощенная формула которого для процесса прокатки предложена В.Н. Выдриным [62]:

$$N_{\varepsilon_i} \mp N_{Q_i} \pm N_{T_i} = N_{\phi_i} + N_{m_i}, \quad (2.15)$$

где  $N_{\varepsilon}$  – мощность, подводимая к очагу деформации со стороны электропривода;  $N_Q$  – мощность, подводимая к очагу деформации подпором  $Q$  (знак “–”) либо натяжением (знак “+”) через задний конец раската;  $N_T$  – мощность, подводимая к очагу деформации тянущим усилием  $T$  (знак “+”) либо подпором (знак “–”) через передний конец раската;  $N_{\phi}$  – мощность, затрачиваемая на формоизменение металла;  $N_m$  – мощность сил трения скольжения на контактной поверхности раската с валками;  $i$  – порядковый номер клетки (1 либо 2).

В данном выражении не приняты во внимание мощность, расходуемая на упругую деформацию раската, мощность, затрачиваемая на создание дополнительных деформаций (сдвигов), обусловленных формой очага деформации, и другие виды мощностей (на изменение кинетической энергии металла и др.), удельный вес которых в балансе мощностей не превышает 2–3% [174, 175].

Мощности, подводимые за счет переднего натяжения (либо подпора) и заднего подпора (либо натяжения), определяются по зависимостям [62, 174]

$$N_T = T \cdot V_n^{\text{блх}}; \quad N_Q = Q \cdot V_n^{\text{вх}} = Q \cdot \frac{V_n^{\text{блх}}}{\mu}, \quad (2.16)$$

где  $V_n^{\text{вх}}$ ,  $V_n^{\text{блх}}$  – скорости раската на входе и выходе очага деформации;

$$\mu = \frac{S_n^{\text{вх}}}{S_n^{\text{блх}}} = \frac{L_n^{\text{блх}}}{L_n^{\text{вх}}} \text{ – вытяжка при прокатке;}$$

$S_n^{\text{вх}}$ ,  $S_n^{\text{блх}}$ ,  $L_n^{\text{вх}}$ ,  $L_n^{\text{блх}}$  – соответственно сечения и длины раската на входе в очаг деформации и на выходе из него.

Мощность, подводимая к очагу деформации от приводного двигателя, определяется как произведение элементарных сил трения  $\tau$ , направление которых совпадает с траекторией перемещения точек контактной поверхности, на окружную скорость валков  $V_g$ , просуммированное по поверхности  $S$  соприкосновения металла с валками:

$$N_g = \iint_S \tau(S) \cdot V_g(S) \cdot dS. \quad (2.17)$$

С учетом предположения о прямолинейном законе изменения ширины  $b$  и предела текучести металла вдоль очага деформации

$$\sigma = \frac{\sigma^{6x} + \sigma^{6bx}}{2}, \quad b = \frac{b^{6x} + b^{6bx}}{2} \quad (2.18)$$

и отсутствия упругой деформации валков

$$R_g = \text{const}, \quad V_g = \text{const} \quad (2.19)$$

выражение (2.17) принимает вид

$$N_g = V_g \cdot R_g \cdot b \cdot \int_{\alpha} \tau \cdot d\alpha. \quad (2.20)$$

где  $R_g$  – радиус валков клетки;  $\alpha$  – текущее значение угла в очаге деформации (в пределах от 0 до  $\alpha_0$ , см. рисунок 2.11).

Направление продольной силы трения  $\tau$  в очаге деформации изменяется. Согласно теории жестких концов, предложенной И.М. Павловым [176], скорости  $V_n^{6x}$  частиц входного сечения, как и скорости  $V_n^{6bx}$  частиц выходного сечения очага деформации, равны между собой. При этом выполняется условие

$$V_n^{6x} < V_g < V_n^{6bx}.$$

Очевидно, что в этом случае в очаге деформации имеют место две зоны, показанные на рисунке 2.11 [174]. В первой – зоне отставания скорость металла ниже окружной скорости валков, поэтому энергия в ней передается от валка к металлу. Во второй зоне – зоне опережения, наоборот, скорость металла выше окружной скорости валков, следовательно, энергия передается в обратном направлении (от металла к валкам). Существует некоторый центральный угол  $\gamma$ , определяющий линию на поверхности валков, в которой скорости металла и валка равны. Этот угол, как и указанную линию, принято называть критическим.

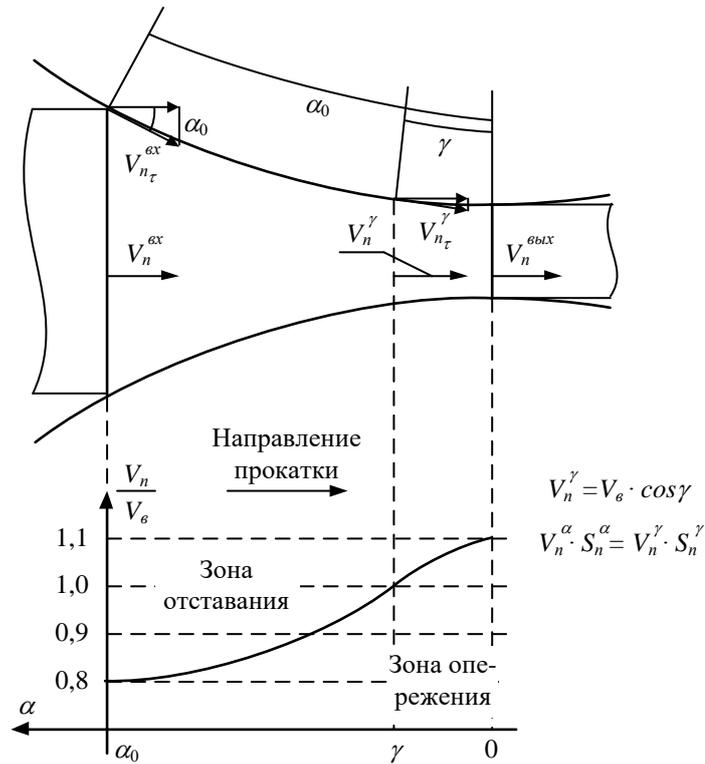


Рисунок 2.11 – Скольжение на поверхности раската в очаге при равномерной деформации

Данная схема построена для “классического” случая прокатки с передним натяжением и задним подпором, возникающим вследствие отставания металла. Вместе с тем, представленные ниже выкладки справедливы для случая обратного распределения сил натяжения (подпора). Отличия режимов натяжения и подпора должны быть учтены в конечной модели введением соответствующих знаков во взаимосвязях между блоками.

В зонах отставания и опережения продольные силы трения  $\tau'$  и  $\tau''$  направлены противоположно, поэтому выражение (2.20) для двух валков следует переписать в виде

$$N_g = 2 \cdot V_g \cdot R_g \cdot b \cdot \left( \int_0^\alpha \tau^I \cdot d\alpha - 2 \cdot \int_0^\gamma \tau^{II} \cdot d\alpha \right). \quad (2.21)$$

При условии, что

$$\tau = f \cdot \sigma, \quad f = \text{const}_{0 < \alpha < \alpha_0} \quad (2.22)$$

выражение (2.21) принимает вид

$$N_g = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot V_g \cdot R_g \cdot b \cdot (\alpha_0 - 2 \cdot \gamma), \quad (2.23)$$

где  $\alpha_0$  – угол захвата;  $\sigma$  – сопротивление деформации;  $f$  – коэффициент трения.

Мощность формоизменения может быть получена путем дифференцирования зависимости Финка [62]:

$$N_{\phi} = \frac{dA_{\phi}}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot (\theta \cdot \sigma \cdot \ln \mu) = \sigma \cdot \frac{d\theta_{см}}{dt}. \quad (2.24)$$

где  $A_{\phi}$  – работа, затрачиваемая на формоизменение раската;  $\theta$  – объем металла;  $\theta_{см}$  – смещенный объем при деформации.

В интервале  $\Delta t$  через очаг деформации проходит объем металла, равный площади его критической поверхности  $S_n^{\gamma}$  (поверхности внутри очага деформации, все точки которой имеют скорость, равную окружной скорости валков), умноженной на поступательную скорость частиц этой поверхности, соответствующей поступательной скорости валков в точке критического сечения  $V_e^{\gamma}$ :

$$\Delta\theta = S_n^{\gamma} \cdot V_e^{\gamma} \cdot \Delta t = S_n^{\gamma} \cdot V_e \cdot \cos \gamma \cdot \Delta t.$$

Площадь при принятом прямолинейном законе изменения ширины (рисунок 2.12) определяется зависимостью [174]

$$S_n^{\gamma} = b^{\gamma} \cdot h^{\gamma} = \left[ b^{6x} + \frac{b^{6bx} - b^{6x}}{\alpha_0 / \gamma} \right] \cdot \left[ h^{6bx} + 2 \cdot R_e \cdot (1 - \cos \gamma) \right]. \quad (2.25)$$

Указанный объем, определяемый размерами ( $S_n^{6x}$ ;  $V_n^{6x} \cdot \Delta t$ ), входит в очаг деформации, подвергается там конечной деформации  $\ln \mu$  и выходит из него с новыми размерами ( $S_n^{6bx}$ ;  $V_n^{6bx} \cdot \Delta t$ ). Таким образом, смещенный объем за время  $\Delta t$  будет определен как

$$\Delta\theta_{см} = \Delta\theta \cdot \ln \mu = S_n^{\gamma} \cdot V_e \cdot \cos \gamma \cdot \ln \mu \cdot \Delta t,$$

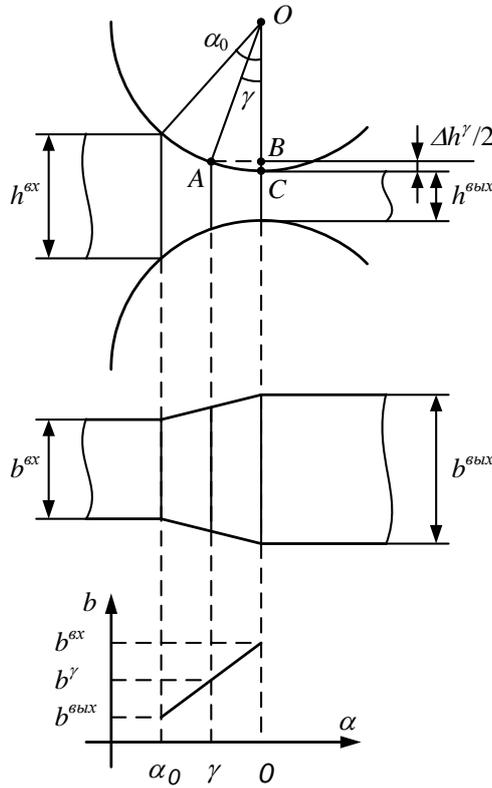
или при условии, что  $\Delta t \rightarrow 0$

$$d\theta_{см} = S_n^{\gamma} \cdot V_e \cdot \cos \gamma \cdot \ln \mu \cdot dt. \quad (2.26)$$

После подстановки (2.26) в (2.24) получено выражение для определения мощности формоизменения при прокатке

$$N_{\phi} = \sigma \cdot S_n^{\gamma} \cdot V_e \cdot \cos \gamma \cdot \ln \mu.$$

(2.27)



$$\cos \gamma = \frac{OB}{R} \Rightarrow OB = R_g \cdot \cos \gamma$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta h^\gamma}{2} = BC &= R_g - OB = \\ &= R_g - R_g \cdot \cos \gamma = R_g \cdot (1 - \cos \gamma) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h^\gamma &= h^{bby} + 2 \cdot \Delta h^\gamma = \\ &= h^{bby} + 2 \cdot R_g \cdot (1 - \cos \gamma) \end{aligned}$$

$$b^\gamma = b^{ex} + \frac{b^{bby} - b^{ex}}{\alpha_0 / \gamma}$$

Рисунок 2.12 – К определению площади критической поверхности

Мощность трения скольжения на контактной поверхности  $N_m$  также следует определять с учетом зон отставания и опережения. В общем случае для двух валков величина трения скольжения может быть найдена по выражению:

$$N_m = 2 \cdot \iint_S \tau(S) \cdot \Delta V(S) \cdot dS,$$

или с учетом (2.18), (2.19), (2.22)

$$N_m = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot R_g \cdot b \cdot \int_\alpha \Delta V \cdot d\alpha. \quad (2.28)$$

Скорость скольжения металла относительно валков определяется зависимостями:

– для зоны отставания

$$\Delta V(\alpha) = V_g - V_n^\alpha = \left( 1 - \frac{S_n^\gamma \cdot \cos \gamma}{S_n^\alpha \cdot \cos \alpha} \right) \cdot V_g; \quad (2.29)$$

– для зоны опережения

$$\Delta V(\alpha) = V_n^\alpha - V_g = \left( \frac{S_n^\gamma \cdot \cos \gamma}{S_n^\alpha \cdot \cos \alpha} - 1 \right) \cdot V_g. \quad (2.30)$$

где  $S_i^\alpha$ ,  $V_i^\alpha$  – площадь поверхности соприкосновения и поступательная скорость валков в точке, соответствующей текущему значению угла  $\alpha$ .

При подстановке (2.29) и (2.30) в (2.28) получаем выражения мощностей трения скольжения:

– для зоны отставания

$$N_m^I = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot V_\varepsilon \cdot R_\varepsilon \cdot b \cdot \int_{\gamma}^{\alpha_0} \left( 1 - \frac{S_n^\gamma \cdot \cos \gamma}{S_n^\alpha \cdot \cos \alpha} \right) \cdot d\alpha;$$

– для зоны опережения

$$N_m^{II} = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot V_\varepsilon \cdot R_\varepsilon \cdot b \cdot \int_0^{\gamma} \left( 1 - \frac{S_n^\gamma \cdot \cos \gamma}{S_n^\alpha \cdot \cos \alpha} \right) \cdot d\alpha;$$

– для полной мощности трения

$$N_m = N_m^I - N_m^{II} = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot V_\varepsilon \cdot R_\varepsilon \cdot b \times \\ \times \left[ \int_{\gamma}^{\alpha_0} \left( 1 - \frac{S_n^\gamma \cdot \cos \gamma}{S_n^\alpha \cdot \cos \alpha} \right) \cdot d\alpha - \int_0^{\gamma} \left( 1 - \frac{S_n^\gamma \cdot \cos \gamma}{S_n^\alpha \cdot \cos \alpha} \right) \cdot d\alpha \right]. \quad (2.31)$$

При условии постоянства угловой скорости валков на протяжении всего очага деформации с учетом соотношения момента и мощности  $M = N/\omega$  выражения (2.15), (2.16), (2.27), (2.31) для  $i$ -й клетки можно представить в виде

$$M_{\varepsilon_i} = M_{Q_i} - M_{T_i} + M_{\phi_i} + M_{m_i}, \quad (2.32)$$

$$M_{T_i} = \frac{T_i \cdot V_{n_i}^{6bix}}{\omega_{\varepsilon_i}}, \quad (2.33)$$

$$M_{Q_i} = \frac{Q_i \cdot V_{n_i}^{6x}}{\omega_{\varepsilon_i}}, \quad (2.34)$$

$$M_{\phi_i} = \sigma_i \cdot S_{n_i}^\gamma \cdot R_{\varepsilon_i} \cdot \cos \gamma_i \cdot \ln \mu_i, \quad (2.35)$$

$$M_{m_i} = 2 \cdot f_i \cdot \sigma_i \cdot R_{\varepsilon_i}^2 \cdot b_i \times \left[ \int_{\gamma_i}^{\alpha_{0_i}} \left( 1 - \frac{S_{n_i}^\gamma \cdot \cos \gamma_i}{S_{n_i}^\alpha \cdot \cos \alpha_i} \right) \cdot d\alpha_i + \int_0^{\gamma_i} \left( \frac{S_{n_i}^\gamma \cdot \cos \gamma_i}{S_{n_i}^\alpha \cdot \cos \alpha_i} - 1 \right) \cdot d\alpha_i \right], \quad (2.36)$$

где площадь в произвольном сечении (в том числе нейтральном) может быть найдена из (2.25) при пренебрежении уширением:

$$S_{n_i}^\alpha = S_{n_i}^{6bix} + 2 \cdot R_{\varepsilon_i} \cdot b_i \cdot (1 - \cos \alpha_i), \quad (2.37)$$

$$S_{n_i}^\gamma = S_{n_i}^{6bix} + 2 \cdot R_{\epsilon_i} \cdot b_i \cdot (1 - \cos \gamma_i). \quad (2.38)$$

где  $S_{n_i}^{ex}$ ,  $S_{n_i}^{6bix}$  – площади поперечного сечения полосы на входе и выходе  $i$ -го очага деформации.

Угол нейтрального сечения может быть определен по зависимости (2.23):

$$\gamma_i = \frac{\alpha_{0i}}{2} - \frac{M_{\epsilon_i}}{4 \cdot f_i \cdot \sigma_i \cdot R_{\epsilon_i}^2 \cdot b_i}. \quad (2.39)$$

Скорость металла на выходе из клетки определяется угловой скоростью вращения валков и зависит от величины критического угла

$$V_{n_i}^{6bix} = \omega_{\epsilon_i} \cdot R_{\epsilon_i} + \frac{2 \cdot \omega_{\epsilon_i} \cdot R_{\epsilon_i}^2 \cdot b_i}{S_{n_i}^{6bix}} \cdot (1 - \cos \gamma_i). \quad (2.40)$$

Скорость металла на входе в клеть

$$V_{n_i}^{ex} = \frac{V_{n_i}^{6bix}}{\mu_i}. \quad (2.41)$$

Изменения сечения обрабатываемого металла и его сопротивления деформации могут быть определены как

$$S_{n_i}^{6bix} = \frac{S_{n_i}^{ex}}{\mu_i}, \quad (2.42)$$

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} \cdot \sqrt[4]{\mu_i}, \quad (2.43)$$

$$\sigma_{cp_i} = \frac{\sigma_{i-1} + \sigma_i}{2}. \quad (2.44)$$

На рисунке 2.13 приведена структурная схема математической модели очага деформации, составленная по уравнениям (2.32) – (2.44). Функциональные преобразователи  $\Phi П 1 \dots \Phi П 3$  реализуют зависимости (2.36), (2.35) и (2.39), соответственно. Представленная математическая модель наиболее точно определяет взаимосвязь между входными и выходными координатами структуры, приведенной на рисунке 2.10.

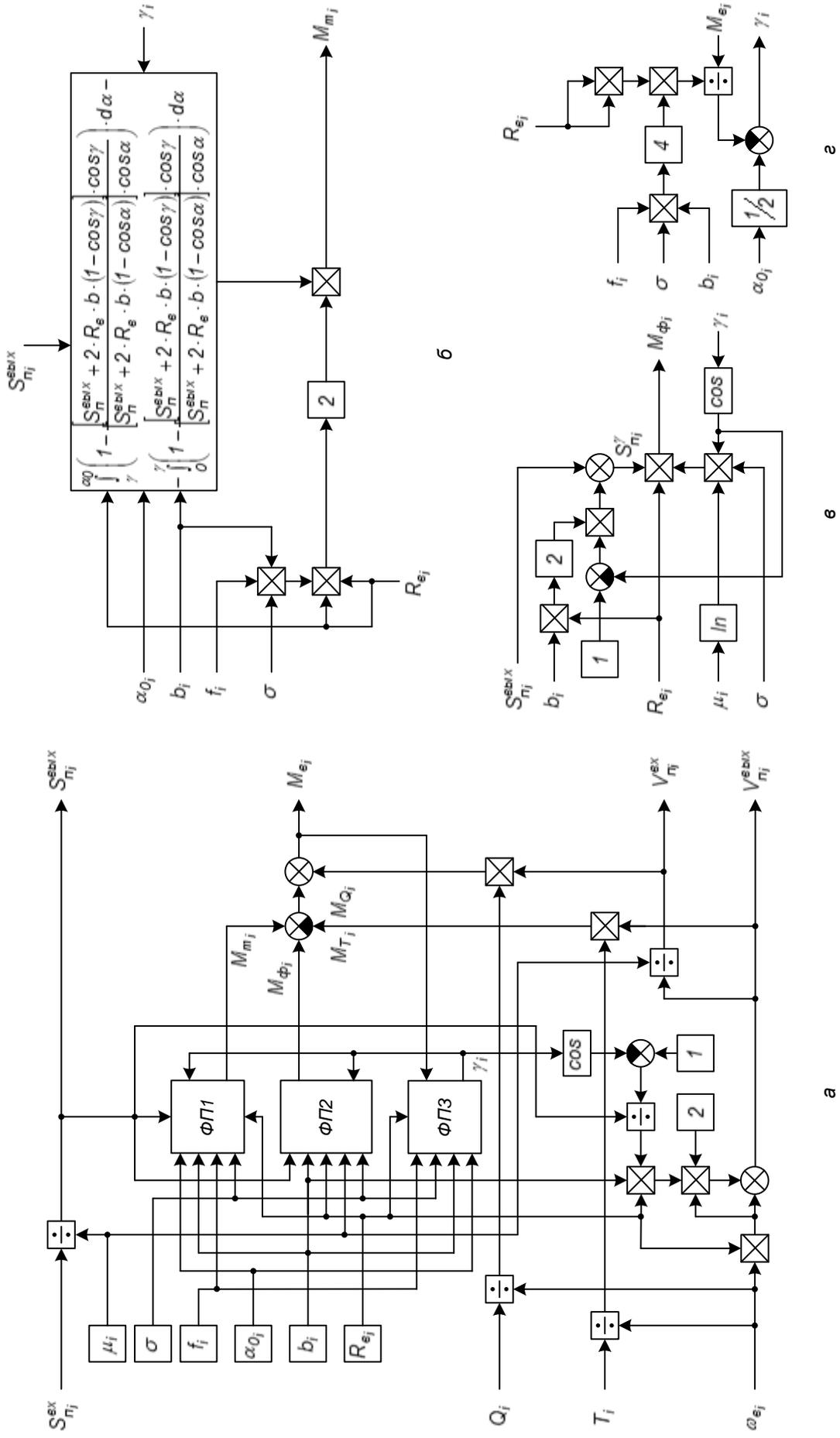


Рисунок 2.13 - Структурная схема математической модели очага деформации:  
 а - укрупненная структурная схема; б, в, з - структурные схемы функциональных преобразователей  $\Phi\Pi 1$ ,  $\Phi\Pi 2$  и  $\Phi\Pi 3$ , соответственно

## 2.4.2. Математическая модель раската в межклетевом промежутке

Изменение свойств раската на участках между очагами деформации горизонтальной и вертикальной клетей поясняет рисунок 2.14, а. Он аналогичен рисунку 2.14, б, который соответствует межклетевому промежутку непрерывной подгруппы клетей стана горячей прокатки. Приведенные ниже рассуждения справедливы для обоих случаев.

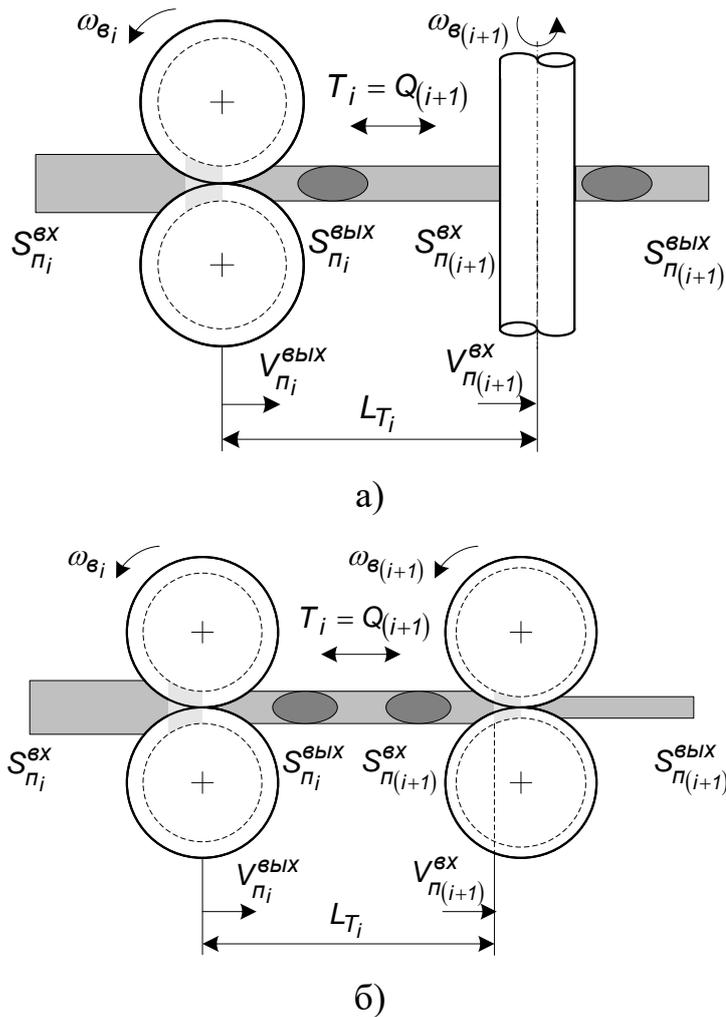


Рисунок 2.14 – Расчетная схема межклетевых промежутков горизонтальной и вертикальной клетей (а) и двух горизонтальных клетей (б)

Добавление рисунка 2.14, б поясняет возможность применения представленных ниже математических выражений для моделирования электромеханических систем универсальных клетей стана 2000, где внедрена система согласования скоростей электроприводов вертикальных и горизонтальных валков. Информация о внедрении представлена в главе 7, результаты моделирования

электромеханических систем клеток стана 2000 приведены в публикациях [155, 177, 178]. Поэтому, чтобы не нарушать единство принятой терминологии ниже вместо слова «раскат» применяется термин «полоса».

Исследованию взаимосвязанных электромеханических систем непрерывного прокатного стана посвящена авторская монография [179]. В ней подробно рассмотрены физические процессы, происходящие при регулировании натяжения. Дано математическое описание непрерывной группы клеток как объекта автоматического управления. Все вопросы рассматриваются на примере непрерывного стана холодной прокатки, поэтому здесь подробно не представлены. Однако физические процессы, происходящие при возмущающих воздействиях, обусловленных изменением скорости электропривода одной из клеток, являются одинаковыми для групп всех прокатных станов. Также имеют полное сходство принципы автоматического регулирования натяжения и соответственно математические модели полосы (в нашем случае раската) в межклетевых промежутках без петледержателей.

Вследствие несоответствия мгновенных значений скоростей выхода полосы из предыдущей клетки и входа в последующую клетку возникает натяжение (подпор). Под действием этой силы полоса упруго деформируется: при натяжении – удлиняется и утончается, при подпоре – укорачивается и уширяется. При этом упругая деформация может быть описана интегральными уравнениями [21]:

$$T_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{6yx}}{L_{T_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_{(i+1)}}^{6x} - V_{n_i}^{6yx}) \cdot dt - T_{нач_i}, \quad (2.45)$$

$$Q_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{6x}}{L_{Q_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_i}^{6x} - V_{n_{(i-1)}}^{6yx}) \cdot dt - Q_{нач_i}, \quad (2.46)$$

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

Дифференцируя зависимости (2.45), (2.46) и переходя к операторным изображениям, получаем

$$p \cdot T_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{6blx}}{L_{T_i}} \cdot (V_{n(i+1)}^{6x} - V_{n_i}^{6blx}), \quad (2.47)$$

$$p \cdot Q_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{6x}}{L_{Q_i}} \cdot (V_{n_i}^{6x} - V_{n(i-1)}^{6blx}). \quad (2.48)$$

Согласно этим выражениям в условиях свободной прокатки  $T_i = Q_{(i+1)}$ . При возникновении натяжения  $T_i = Q_{(i+1)} > 0$ , при подпоре  $T_i = Q_{(i+1)} < 0$ .

Влияние вертикальных валков на процесс формирования межклетевого натяжения и подпора значимо, но невелико, поскольку мощность установленных электродвигателей меньше мощности двигателей приводов горизонтальных валков. Влияние на натяжение (подпор) несогласованности окружной скорости вертикальных валков может быть учтено выражением

$$\Delta T_i = \Delta Q_{(i+1)} = \frac{M_{63} - M_{xx3} - M_{деф3}}{R_{63}}, \quad (2.49)$$

где  $M_{63}$  – момент на бочке вертикального валка (эджера);  $M_{xx3}$  – момент холостого хода;  $M_{деф3}$  – момент, необходимый для деформации металла в вертикальных валках;  $R_{63}$  – радиус вертикальных валков.

На рисунке 2.15 приведена структурная схема динамической модели межклетевого промежутка, составленная по уравнениям (2.47)–(2.49). Она наглядно представляет взаимосвязь между тремя входными, одной выходной координатами и одним возмущающим воздействием.

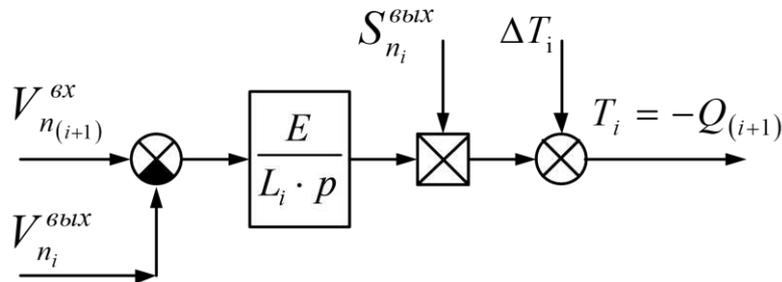


Рисунок 2.15 – Структурная схема модели межклетевого промежутка

### **Модель редуктора**

Статический момент, создаваемый электродвигателем клетки, может быть определен как сумма момента на бочке валков  $M_{\delta_i}$ , идущего на деформацию металла, и момента, необходимого для преодоления сил трения  $M_{xx_i}$ , приведенного к валу двигателя. В этом случае, при пренебрежении упругими свойствами, поведение редуктора описывается системой операторных уравнений

$$\left. \begin{aligned} M_{c_i}(p) &= \frac{M_{\delta_i}(p)}{j_{ред_i}} + M_{xx_i}(p) \\ \omega_{\delta_i}(p) &= \frac{\omega_{дв_i}(p)}{j_{ред_i}} \end{aligned} \right\},$$

где  $j_{ред_i}$  – передаточное число редуктора (для понижающего  $j_{ред_i} > 1$ );  $M_{c_i}$  – момент сил статического сопротивления, приведенный к валу двигателя;  $\omega_{\delta_i}$  – угловая скорость двигателя  $i$ -го валка.

Преимуществом разработанной модели, является то, что она может быть применена для исследования динамических режимов в электромеханических системах универсальных клетей независимо от рода тока электропривода. Так, для исследования электроприводов постоянного тока в структуру модели на рисунке 2.10 (блоки “ПЧ-СД”) должны быть включены модели замкнутых двухконтурных систем регулирования скорости двигателей постоянного тока, рассмотренные, например, в [180, 181].

### **2.4.3. Результаты моделирования**

С помощью разработанной математической модели выполнено исследование взаимосвязанных электромеханических систем горизонтальных и вертикальных клетей стана 5000. Они получены при существующей настройке электроприводов. На рисунке 2.16 представлены кривые переходных процессов при изменении задания на скорость электропривода горизонтальной клетки скачком. Исследовались процессы при увеличении скорости на 2% (рисунок 2.16, а) и уменьшении на 1,5% (рисунок 2.16, б).

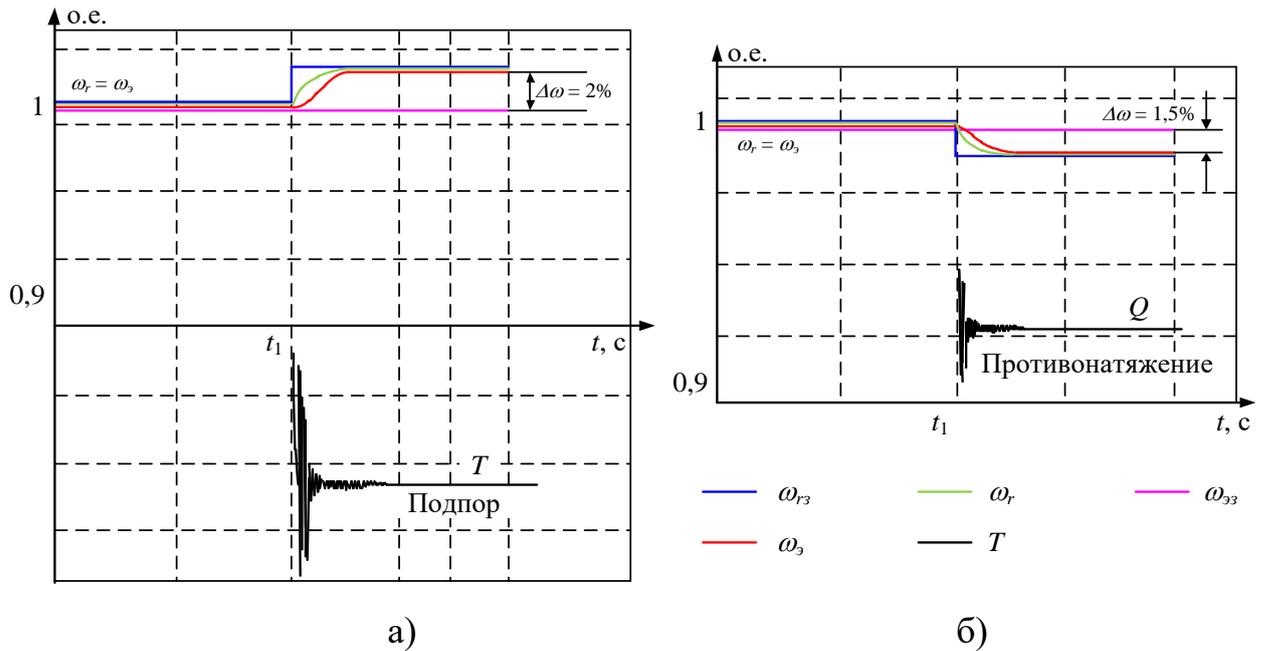


Рисунок 2.16 – Переходные процессы скоростей и натяжений при исходной настройке САР при увеличении (а) и при уменьшении (б) задания скорости

Результаты сравнения установившихся и максимальных значений натяжений представлены в столбцах таблицы 2.2. Кроме того, в таблице приведены результаты, полученные из осциллограмм, представленных ниже на рисунках 2.21, а и б.

Таблица 2.2 – Натяжения в межклетевых промежутках при существующей и разработанной системах согласования скоростей

| Параметр                       | Значение | Величина на осциллограммах |              |              |              |
|--------------------------------|----------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                                |          | рис. 2.16, а               | рис. 2.16, б | рис. 2.21, а | рис. 2.21, б |
| $\Delta\omega, \%$             | стат.    | 2                          | -1,5         | 0            | 0            |
| натяжение (+)<br>подпор (-), % | стат.    | 7                          | 3,5          | 0            | 0            |
|                                | макс.    | 15                         | 10           | 25           | 15           |
|                                | мин.     | -12                        | -7           | -10          | -12          |

Отработка скачков задания скорости в обоих случаях происходит без перерегулирования, кривые угловых скоростей электроприводов горизонтальных валков  $\omega_{Г}$  и эджеров  $\omega_{Э}$  изменяются по закону, близкому к аperiodическому, что можно объяснить демпфирующими свойствами полосы. При этом происходит незначительное отставание скорости эджера  $\omega_{Э}$  от кривой  $\omega_{Г}$ .

Увеличение скорости привода горизонтальных валков на рисунке 2.16, а приводит к возникновению подпора  $T$  в полосе, составляющего около 7% заданного (нулевого значения). Снижение задания скорости на 1,5% (рисунок 2.16, б) приводит к возникновению установившегося натяжения в 3,5%. При этом следует учитывать, что максимально допустимое значение натяжения составляет 5%, а возникновение подпора недопустимо. В обоих случаях возникают затухающие колебания с максимальной амплитудой 12-15%. С учетом жесткой взаимосвязи валков через металл это вызывает перегрузки механического и электрического оборудования.

Представленные результаты моделирования подтверждают актуальность поставленной выше задачи согласования скоростей электроприводов горизонтальных и вертикальных валков. Решение этой задачи рассмотрено в следующих параграфах, предварительно дается анализ причин силового взаимодействия исследуемых электромеханических систем.

## **2.5. Обоснование способа согласования скоростей взаимосвязанных электроприводов клеток по принципу «постоянства массы»**

Рассогласование скоростей горизонтальных и вертикальных валков, приводящее к возникновению натяжения или подпора, может быть вызвано отклонениями скоростей электроприводов в установившемся режиме прокатки либо в динамическом режиме захвата металла последующей клетью. Причем в последнем случае при движении раската от вертикальных валков к горизонтальным возникает повторный переходный процесс, обусловленный неравенством скорости выхода металла из вертикальных валков и линейной скорости горизонтальных валков. В условиях жесткой взаимосвязи это режим приводит к динамическим ударам и колебаниям натяжения. Переходные процессы при повторном ударе исследованы в диссертационной работе Гостева А.Н. [154] и рассмотрены в публикациях [155, 156, 182].

Второй причиной, приводящей к возникновению подпора (натяжения) в межклетевом промежутке толстолистого стана, является изменение скорости металла на входе (выходе) горизонтальных валков, не зависящее от скорости электропривода. Как отмечалось выше, это происходит вследствие изменения отставания (опережения), возникающего при перемещении гидравлических НУ в проходах с профилированной прокаткой. Данный процесс приводит к нарушению условия постоянства секундных объемов металла в очаге деформации и соответственно смещению его объемов на входе и выходе клетки. Это потребовало исследования влияния изменения зазора валков на фактическую скорость металла в межклетевом промежутке. Результаты такого исследования представлены в следующем параграфе.

При совместной прокатке скорости вращения валков смежных клеток (горизонтальных либо вертикальных) должны находиться в таком соотношении, чтобы в пространстве между плоскостью выхода металла из предшествующих валков и плоскостью его входа в последующие валки (рис. 2.14, а, б) не происходило чрезмерного сжатия или натяжения. При невыполнении этого условия в результате взаимодействия клеток возникают нерегулируемые продольные усилия, которые приводят к дополнительным нагрузкам оборудования, а в случаях относительно тонкой полосы – к колебаниям ее размеров.

Непрерывная прокатка в нескольких клетях требует выполнения условия равенства секундных объемов металла в каждом межклетевом промежутке [16, 183]:

$$v_1 F_1 = v_2 F_2 = \dots = v_i F_i = \dots = v_n F_n = C \quad (2.50)$$

где  $v_i, F_i$  – скорость и площадь сечения раската на выходе из  $i$ -й клетки.

При отсутствии силовой связи валков последовательно расположенных клеток скорость выхода металла из  $i$ -й клетки [184]:

$$v_{\text{вых.}i} = \frac{\omega_i D_i}{2} (1 + S_i),$$

где  $\omega_i, D_i$  – угловая скорость и диаметр валков  $i$ -й клетки;  $S_i$ , – коэффициент опережения (опережение).

Как подчеркнуто в [183], опережение (т.е. относительное скольжение полосы в плоскости выхода из валков) является наиболее чувствительным кинематическим показателем процесса прокатки. Изменение любого параметра, например, толщины подката, диаметра валков, температуры, натяжения и др., влияет на его величину. Значительное влияние на опережение оказывает обжатие.

С учетом опережения условие (2.50) постоянства объема при прокатке принимает вид

$$v_{B1}(1+S_1)h_1b_1 = v_{B2}(1+S_2)h_2b_2 = \dots = v_{Bn}(1+S_n)h_nb_n = C, \quad (2.51)$$

где  $h_n$  и  $b_n$  – толщина и ширина полосы на выходе из валков  $n$ -й клетки.

Это выражение, в отличие от (2.50), оперирует не с мгновенными скоростями движения полосы, которые сложно измерить, а с линейными скоростями валков, которые подлежат измерению, и характеристиками проката, которые в большинстве случаев принимаются постоянными.

Произведение  $v_n F_n$  либо  $v_{Bn}(1+S_n)h_nb_n$  называют постоянной непрерывного стана, она обозначается как  $C_n$  [183]. При настройке стана согласно выражению (2.51), т.е. при  $C_n = \text{const}$ , прокатка ведется без натяжения и подпора. Такой режим является идеализированным, т.к. условия деформации, на которые влияют температура, контактное трение, величина зазора и другие параметры, постоянно изменяются. В связи с этим силовое взаимодействие между последовательно расположенными клетями возникает всегда.

Следует заметить, что натяжение в межклетевых промежутках станов горячей прокатки ограничивается значениями 5–10 т (50–100 кН) [185]. Это требование относится как к универсальным клетям, так и промежуткам между вертикальными и горизонтальными клетями толстолиствого стана.

Условие постоянства секундных объемов в случае одной клетки для трех сечений – входного  $F_0$ , любого промежуточного  $F_\varphi$  и выходного  $F_1$ , записывается в виде [186, 187]:

$$v_0 F_0 = v_\varphi F_\varphi = v_1 F_1 = \text{const}. \quad (2.52)$$

где  $v_0$ ,  $v_1$ ,  $v_\varphi$  – скорости раската на входе, выходе клетки и в очаге деформации. Его обычно записывают в виде равенства двух крайних членов:

$$v_0 F_0 = v_1 F_1, \quad (2.53)$$

которое позволяет использовать другое соотношение:

$$v_1 = v_0 F_0 / F_1 = v_0 \cdot \lambda, \quad (2.54)$$

где  $\lambda$  – коэффициент вытяжки (вытяжка), равный отношению площадей входного  $F_0$  и выходного  $F_1$  сечений.

В работах [188–191] представленное условие постоянства секундных объемов названо «одним из спорных положений теории прокатки». Справедливо утверждается, что его применимость ограничена участками раската, находящимися за пределами очага деформации. В пределах зоны деформации (рисунок 2.17) это условие не выполняется [186, 192]. При такой записи условие постоянства секундных объемов названо «условным объемным критерием», поскольку оно включает площади. Объем, в привычном понимании, в представленные выражения не входит. Более точным было бы назвать выражения (2.52) и (2.53) условиями постоянства секундных площадей (размерность  $[м^2/с]$ ).

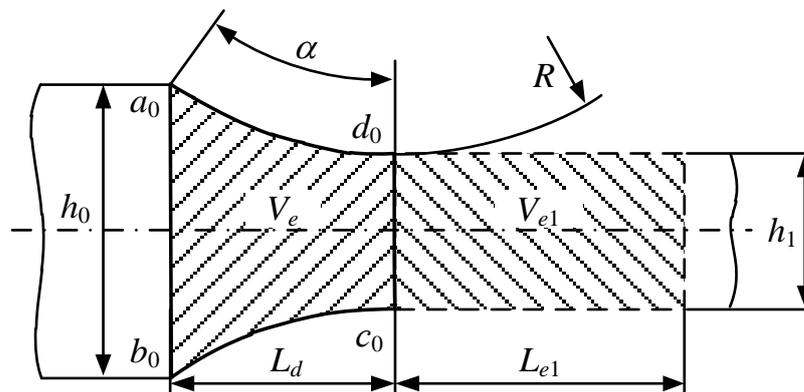


Рисунок 2.17 – Очаг деформации в исходном положении

Не останавливаясь на пояснении данного вывода (это сделано в отмеченных публикациях), следует согласиться, что для применения понятия «объем» в данном выражении необходим учет толщины раската, которая при регулировании зазора валков изменяется.

С этих позиций *наиболее близким к условию равенства объемов металла при прокатке является термин «постоянство массы»*. Справедливость такого утверждения поясняется выражением, где масса слитка (заготовки)  $G$  определяется как произведение объема  $V_0$  на плотность металла  $\gamma$  [193]

$$G = V_0 \cdot \gamma = h_0 \cdot b_0 \cdot L_0 \cdot \gamma, \quad (2.55)$$

где  $L_0$  – длина заготовки.

Этот термин не является новым, в частности он упомянут в публикации [194] при расчете объемов с учетом уширения. Принцип контроля массы предложен в работе [195], где зафиксировано, что контроль массы заменил контроль петлеобразования при чистовой прокатке горячих штрипсов на непрерывных станах. Согласно данному принципу регулирование расхода по массе проводится путем изменения зазора между валками и таким образом корректируется высота петли. Высокие динамические характеристики гидравлического нажимного устройства позволяют улучшить динамический контроль и таким образом повысить качество проката.

В варианте [195], по существу, реализовано взаимосвязанное регулирование толщины и натяжения при изменении скорости прокатки независимо от природы возникающего возмущения. При этом номинальная скорость вращения валков может изменяться в сторону ускорения или замедления вплоть до пороговых величин. В качестве регулирующего воздействия используется зазор валков, изменяемый путем перемещения НУ.

При профилированной прокатке слябов на толстолистовых станах регулируемое изменение межвалкового зазора, напротив, является возмущающим воздействием, влияющим на объем металла и соответственно натяжение/подпор в межклетевом промежутке. Применение принципа контроля массы в этом случае должно осуществляться путем коррекции скоростей металла на входе либо выходе клетки. Таким образом, регулирующее и возмущающие воздействия в случае профилированной прокатки должны «поменяться местами» по сравнению с принципом, рассмотренным в [195].

С учетом указанных изменений, принцип регулирования на «постоянство массы» (по существу, являющийся более точным регулированием постоянства объема) представляется перспективным в направлении применения для толстолистого прокатного стана.

## 2.6. Соотношение скоростей металла и валков в очаге деформации

### *Влияние частного обжатия на опережение и скорость выхода металла из валков*

Как было отмечено выше, причиной силового взаимодействия в межклетевом промежутке при перемещении НУ является изменение опережения. Согласно выражению (2.51) величина  $S_i$  оказывает влияние на условие постоянства объема металла в клетях и межклетевых промежутках. Опережение зависит от нейтрального (критического) угла  $\gamma$  и соотношения толщин полосы  $h_\gamma$  в нейтральном сечении и  $h_1$  на выходе очага деформации [183, 196]:

$$S_1 = \left( \frac{h_\gamma \cos \gamma}{h_1} \right) - 1, \quad (2.56)$$

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

$$S_1 = (R/h_1)\gamma^2 \quad (2.57)$$

где  $R$  – радиус валков.

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

$$S_1 = (R/h_1)\gamma^2(1 - R \cdot \gamma/b_1). \quad (2.58)$$

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

$$S_0 = 1 - \left[ \frac{h_1 D (1 - \cos \gamma)}{h_0} \right] \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha}, \quad (2.59)$$

где  $\alpha$  – угол захвата полосы.

С точностью, достаточной для инженерных расчетов, уравнения скоростей металла на входе и выходе валков имеют вид:

$$v_0 = v_B(1 - S_0) \quad (2.60)$$

$$v_1 = v_B(1 + S_1). \quad (2.61)$$

В этих выражениях величины опережения и отставания рассчитывают по одной из формул (2.56) – (2.59).

### *Зависимость опережения от величины обжатия*

По утверждению автора публикации [197], в научно-технической литературе сформировалось устойчивое представление, что зависимость  $S = \varphi(\varepsilon)$ , т.е. опережения  $S$  от частного относительного обжатия  $\varepsilon$  описывается кривой типа несимметричной параболы (рисунок 2.18, а) [119]. Опережение с ростом обжатия вначале увеличивается до некоторого значения, а затем плавно убывает вплоть до нуля. В этих источниках утверждается, что такой характер зависимости отражает закономерности кинематики очага деформации при прокатке тонких полос и полос средней толщины с небольшими частными относительными обжатиями и сравнительно низкими значениями коэффициента трения.

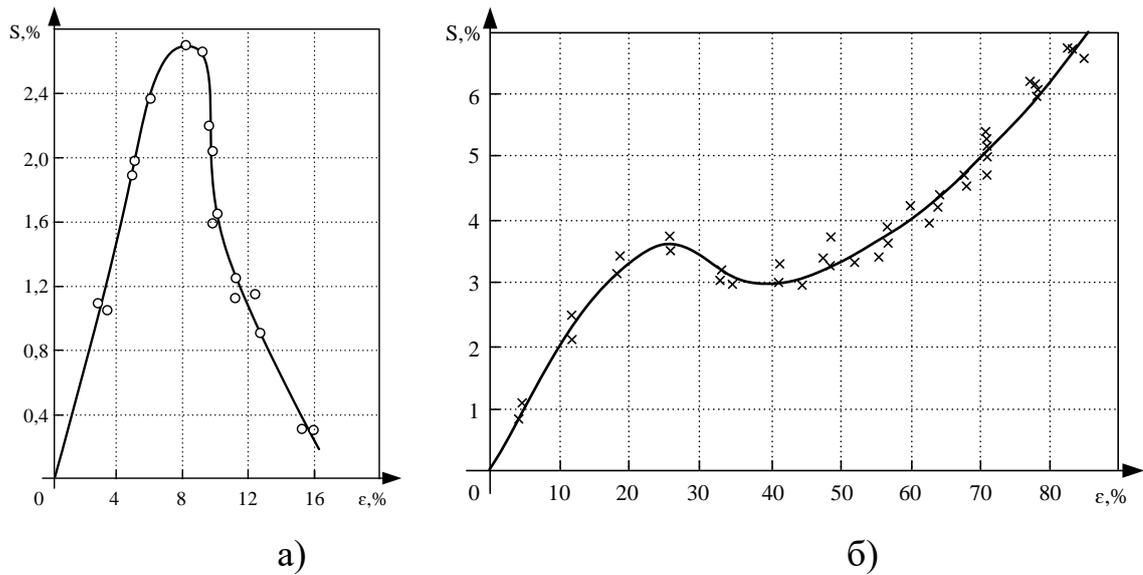


Рисунок 2.18 – Экспериментальные зависимости опережения от величины обжатия, полученные А.П. Грудевым [119] (а) и Ф.Е. Долженковым [189] (б)

При прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения установлена иная зависимость  $S = \varphi(\varepsilon)$ , вид которой показан на рисунке 2.18, б. Эта зависимость получена Ф.Е. Долженковым экспериментальным путем и опубликована в работе [189]. Автор отмечает, что при увеличении частного относительного обжатия опережение вначале увеличивается, после чего «незначительно падает, а затем резко возрастает и при обжатии 0,85 достигает

0,068 (6,8%). *Такой аномальный рост опережения при повышенных обжатиях не может быть объяснен с позиций современной теории прокатки».*

В работе [197] проведен анализ представленной экспериментальной зависимости  $S = \varphi(\varepsilon)$  при прокатке с повышенными обжатиями. В результате дано подтверждение, что с увеличением частного относительного обжатия происходит интенсивный рост опережения. Результаты теоретического исследования опережения с использованием уточненной формулы для определения нейтрального угла показали, что в зависимости от величины коэффициента трения  $f$  и параметра  $R/h_1$  изменение опережения с ростом частного относительного обжатия может выражаться возрастающей или куполообразной кривой (здесь  $R, h_1$  – радиус валков и толщина полосы на выходе из очага деформации, мм). Поэтому рост опережения при повышенных обжатиях, квалифицируемый автором работы [189] как «аномальный», аномалией не является. Это является закономерным изменением опережения при прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения.

Представленные кривые и проведенный анализ публикаций показали, что зависимость опережения от относительного обжатия имеет существенный и сложный характер. Исследования, проведенные авторами представленных работ, подтверждают необходимость коррекции изменений секундного объема металла в зависимости от опережения. Очевидно, что аналогичный вывод может быть сделан и в отношении отставания металла на входе в клеть.

Величина, называемая отставанием, характеризует соотношение скоростей полосы и валков на входе в очаг деформации. Этот термин подчеркивает, что скорость движения полосы на входе меньше окружной скорости валков. Отставание  $S_{OT}$  рассчитывается по формуле [119]:

$$S_{OT} = (v_B \cdot \cos \alpha - v_0) / (v_B \cdot \cos \alpha). \quad (2.62)$$

В теории прокатки основное внимание уделяется исследованию опережения. Эта величина необходима для решения ряда практических задач, когда требуется достаточно точное определение скорости выхода полосы из валков. Если опережение известно, то отставание можно посчитать по формуле

$$S_{OT} = 1 - (1 + S) / (\lambda \cdot \cos \beta). \quad (2.63)$$

где  $\beta$  – угол поворота валка.

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что в большинстве случаев прокатки опережение находится в пределах 1–10%, т.е. его значение невелико, что же касается отставания, то оно может быть гораздо больше, например, может составлять 20–30% и более [119]. Это подтверждает простой численный пример. Допустим,  $S=0,05$  (5%);  $\cos\alpha = 0,92$  ( $\alpha=23^\circ$ );  $\lambda=1,5$ ; тогда по формуле (2.63)  $S_{от}=1-1,05/(1,5\cdot 0,92)=0,24$ , т.е. 24%. Этот пример подтверждает, что наибольшее влияние на силовую взаимосвязь при перемещении НУ будет влиять именно подпор, вызванный отставанием металла на входе в горизонтальную клеть.

Кроме того, литературный обзор показал, что все больше авторов указывают на недостатки «классической теории прокатки». Так, д.т.н. Огинский в докладе «Спорные положения и противоречия современной теории прокатки» [191] со ссылкой на источники [189, 190, 198–200] констатирует, что «Тема спорных положений и противоречий современной теории прокатки, будучи не новой, не утратила своей актуальности, остроты и дискуссионности».

Как отмечено в работах И.К. Огинского [186, 188], одним из положений, подвергающихся жесткой критике, является условие постоянства секундных объемов при непрерывной прокатке. Одной из причин этого является то, что оно основано на гипотезе плоских сечений. В работах Ф.Е. Долженкова, Ю.В. Зильберга, на которые выше сделаны ссылки, справедливость и универсальность этой гипотезы подвергаются критике, т.к. не учитывается объемные смещения металла на входе в клеть. Это вызывает погрешности при расчете скорости металла в предыдущем межклетевом промежутке (в нашем случае – между вертикальной и горизонтальной клетями). На основании этого предлагается переход к методике, основанной на постоянстве объемов при прокатке.

Данное утверждение сделано без учета опережения и отставания, которые определяются объемным смещением металла, поэтому изменяются при регулировании зазора. Очевидно, что учет влияния этого фактора внесет дополнительную погрешность в вычисление секундных объемов при «классической» форме записи (2.50). На основании этого можно утверждать, что *гипотеза*

*плоских сечений, на основе которой построено условие постоянства секундных объемов, при принудительном изменении зазора валков во время прокатки неприменима.* Наиболее точной представляется условие постоянства секундных объемов, которое, согласно выражению (2.55), является условием постоянства массы.

В связи с изложенным, поставлена задача разработки усовершенствованной методики формирования скоростных режимов прокатки, основанной не на постоянстве секундного объема, *а на условии баланса масс прокатываемого металла.* Как отмечалось выше, данный термин известен из классической монографии [61]. Идея предлагаемого принципа заключается в регулировании скорости валков предыдущей вертикальной клетки с целью компенсации увеличения объема на входе в горизонтальную клетку. Это должно компенсировать увеличение секундного объема в межклетевом промежутке при перемещении НУ.

## **2.7. Разработка способа регулирования скоростей по принципу «постоянства массы»**

### **2.7.1. Принцип Головина-Симса**

Принцип действия САРТ стана 5000 основан на известном уравнении Головина-Симса [201]. Он поясняется характеристиками, представленными на рисунке 2.19. Поскольку во время прокатки невозможно измерить фактический растрвал валков, он рассчитывается, по известному уравнению

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

Таким образом, растрвал валков  $h$  зависит от положения 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 при изменении зазора зависит от коэффициентов (модулей) жесткости клетки  $M_G$  и полосы  $M_B$ :

$$\Delta h = \Delta S_0 \frac{M_G}{M_B + M_G}. \quad (2.64)$$

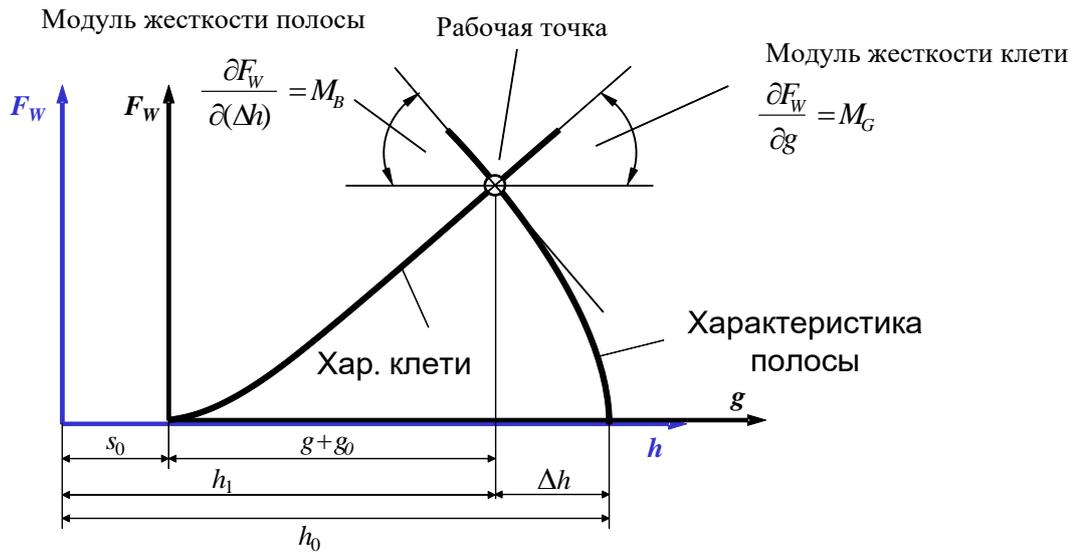


Рисунок 2.19 – Зависимость толщины на выходе клетки от величины зазора:  $h_0$  – толщина на входе;  $h_1$  – толщина на выходе;  $S_0$  – начальный зазор валков

Схема системы вычисления сигнала толщины в структуре САРТ стана 5000 показана в гл. 1 на рисунке 1.15. Толщина проката определяется косвенно по сигналам от датчиков положения НУ, усилию прокатки с учетом различных компенсаций (толщины масляной пленки в подшипниках, теплового расширения, износа валков и др. [202]), подаваемых на общий сумматор. Воздействие, формирующее перемещение гидравлических НУ при профилированной прокатке, показано на рис. 1.15 в виде сигнала ACS, который суммируется с сигналом коррекции зазора на головном и хвостовом участках и перечисленными компенсирующими воздействиями. Суммарный сигнал подается на вход регулятора положения гидравлических НУ. Более подробно работа системы регулирования раствора валков и САРТ рассмотрена в [102].

### 2.7.2. Описание способа

С целью устранения указанных выше нарушений условия непрерывной прокатки разработан способ согласования скоростей электроприводов вертикальной и горизонтальной клетей в режиме перемещения гидравлических НУ. Он обеспечивает реализацию принципа «постоянства массы» металла в меж-

клетевом промежутке. При его разработке за основу принят принцип управления электроприводами клеток чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки, обоснованный в диссертационной работе В.Р. Храмина [203] и получивший развитие в работах [154, 196]. Суть данного принципа заключается в последовательной передаче регулирующего воздействия «против хода прокатки» и согласовании скоростей электроприводов взаимосвязанных клеток за счет динамической компенсации управляющих и возмущающих воздействий. В представленной работе названный принцип получил развитие в направлении применения для электроприводов реверсивной клетки толстолистового стана.

Отличительным признаком разработанного способа является *регулирование скорости электропривода валков вертикальной клетки пропорционально приращению линейной скорости металла на входе в горизонтальную клетку, вызванному изменением зазора валков горизонтальной клетки*. При этом «приращение линейной скорости металла вычисляется пропорционально заданной линейной скорости металла на выходе клетки, модулю жесткости клетки, обратно пропорционально толщине металла на входе в клетку и суммарной жесткости металла и клетки» [204].

#### ***Коррекция скорости валков при перемещении НУ***

Наиболее просто величину коррекции скорости при изменении обжатия можно обосновать исходя из «классического» уравнения секундных объемов металла на входе и выходе клетки

$$h_0 \cdot v_0 = h_1 \cdot v_1.$$

С учетом выражения (2.64) приращение скорости металла на входе в клетку

$$\Delta v_0 = \frac{v_1}{h_0} \Delta S_0 \frac{M_G}{M_B + M_G}. \quad (2.65)$$

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

Для реализации способа схема системы регулирования толщины, представленная на рисунке 1.15, а, преобразуется в рисунок 2.20, т.е. дополняется звеньями, выделенными контуром. Регулирующий сигнал вычисляется по выражению (2.65) и подается в схему задания толщины, реализованную в программе АСУ ТП. 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.

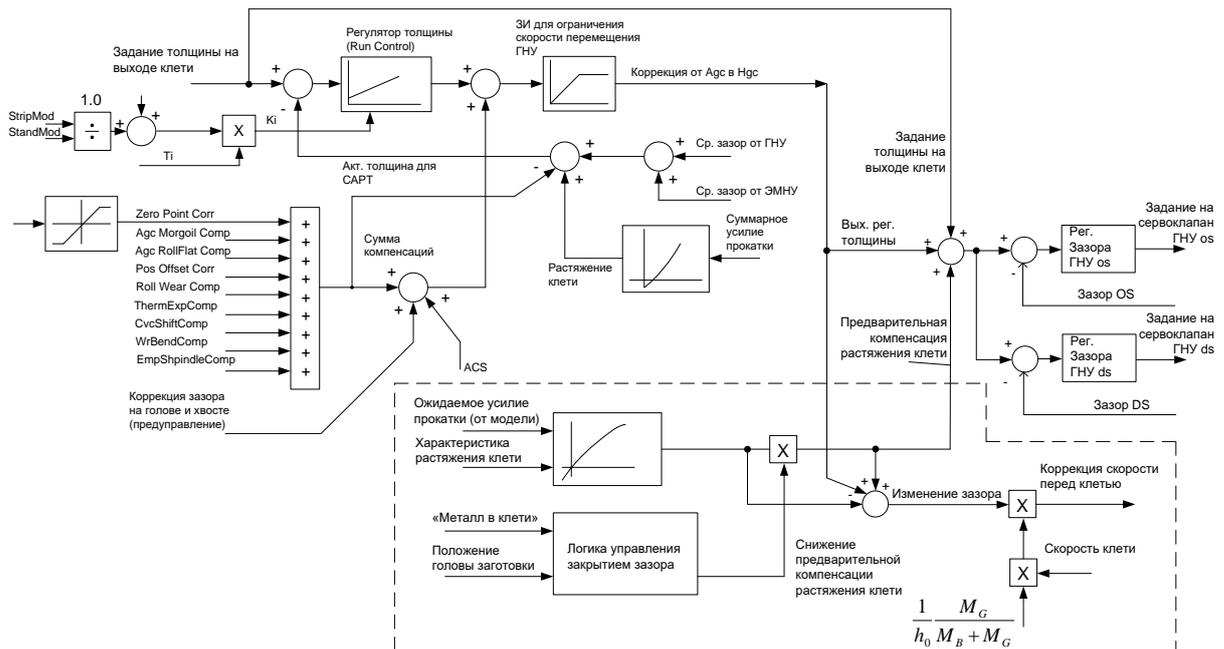


Рисунок 2.20 – Структурная схема расчета сигнала задания толщины в САРТ стана 5000

Внесенные изменения позволяют ликвидировать подпор валков вертикальной клетки, возникающий при уменьшении зазора валков горизонтальной клетки в процессе прокатки. Ликвидация подпора обеспечивает постоянство секундного объема (массы) металла в межклетевом промежутке между вертикальными и горизонтальными валками. В результате обеспечиваются более точные геометрические размеры проката, и снижается вероятность возникновения аварийных ситуаций.

На рисунке 2.21 представлены расчетные осциллограммы, аналогичные рисунку 2.16, полученные при моделировании разработанного способа. Численные значения установившихся и максимальных (по модулю) отклонений натяжений приведены выше в таблице 2.2.

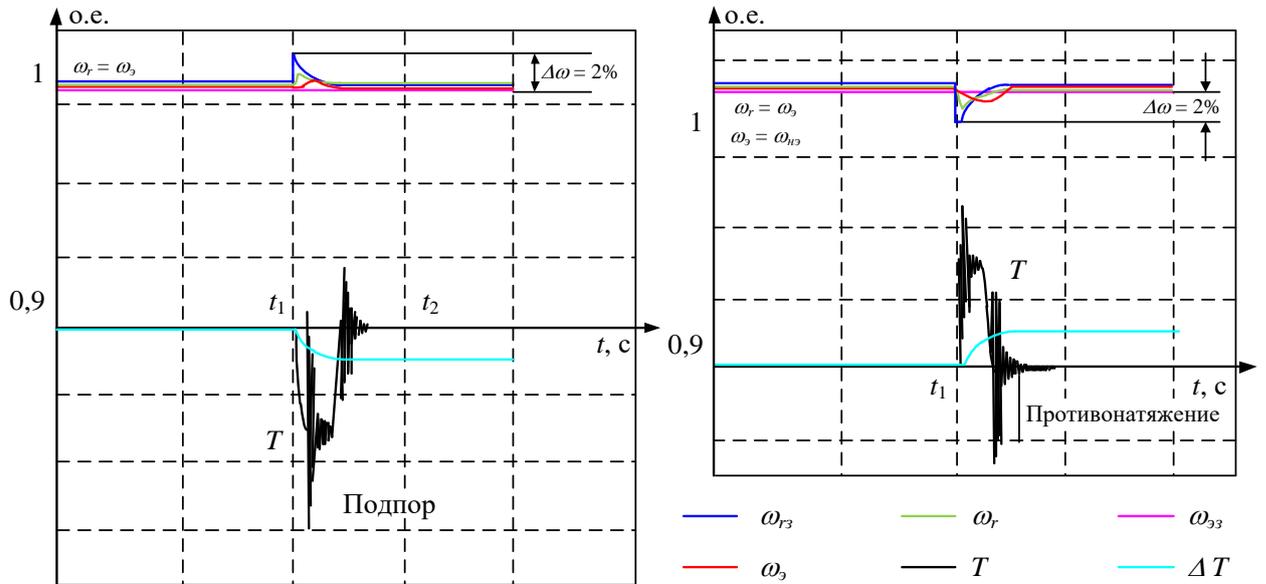


Рисунок 2.21 – Кривые переходных процессов, аналогичных рисунку 2.16, при реализации разработанного способа компенсации рассогласования скоростей

В разработанной математической модели взаимосвязанных электромеханических систем вертикальной и горизонтальной клетей (рис. 2.10) модель нажимных устройств не предусмотрена. Поэтому исследовать влияние их перемещения на скорость металла на входе в клеть можно только косвенным образом – путем изменения скорости электропривода валков. Такое исследование не является абсолютно корректным, однако может дать качественную картину влияния компенсации рассогласования скоростей на натяжение (подпор) в промежутке. Для оценки экстремальной ситуации, связанной с динамическим ударом натяжения моделировалось изменение задания скорости  $\omega_{ГЗ}$  горизонтальных валков скачком на  $\pm 2\%$ . Результаты представлены на рисунке 2.21, а и б и в соответствующих строках таблицы 2.2.

Сравнение кривых с результатами, представленными на рисунке 2.16, и анализ данных таблицы 2.2 позволяют сделать следующие выводы.

1. При изменении задания скорости возникают подпор (рисунок 2.21, а) и натяжение (рисунок 2.21, б), установившиеся значения которых не отличаются от аналогичных значений на рисунке 2.16.

2. За счет согласования скоростей, которое имитируется снижением задания  $\Delta\omega$  до нуля, возникает дополнительный сигнал  $\Delta T$ , обеспечивающий компенсацию возникающего натяжения (подпора). Поэтому натяжения возвращаются в заданные нулевые значения.

3. Максимальные (по амплитуде) динамические значения подпора на рисунке 2.21, а и натяжения на рисунке 2.21, б аналогичны отклонениям на рисунке 2.16, они приведены в таблице 2.2 и составляют 12-15%. Это объясняется тем, что в обоих случаях моделируются процессы при скачке задания скорости.

В целом, приведенные результаты моделирования подтверждают компенсацию силового взаимодействия клетей в установившемся режиме прокатки. Динамические броски и колебания натяжения в условиях перемещения НУ будут отсутствовать. Подтверждение этого вывода дано по результатам исследований с использованием модели гидравлических НУ в структуре САРТ, которые опубликованы в статьях [205, 206].

Таким образом, разработанный способ обеспечивает автоматическое регулирование скорости металла пропорционально перемещению гидравлических нажимных устройств в проходах с профилированием.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель синхронного электропривода с частотным регулированием скорости. Модель СД построена на основе уравнений Парка-Горева в системе отсчета  $d-q$ . Разработана модель векторного управления скоростью, выполнен синтез регулятора скорости. При разработке использованы параметры электротехнических систем горизонтальной клетки стана 5000.

2. Представлена структура универсальной математической модели электротехнических систем реверсивной клетки, взаимосвязанных через металл. В структуру модели входят модели электроприводов, оснащенных системами двухзонного регулирования скорости, модели очагов деформации и модель раската в межклетевом промежутке вертикальной и горизонтальной клетей.

3. Рассмотрена упрощенная двухмассовая модель электромеханической системы клетки, учитывающая упругую связь двигателя и вала с учетом зазоров в шпиндельных соединениях. Выполнено сравнение экспериментальных и расчетных переходных процессов при аппроксимации контура момента фильтрами 1-го или 2-го порядков. Подтверждена удовлетворительная точность такой аппроксимации. Принятое допущение позволяет упростить разработку сложных моделей взаимосвязанных электротехнических систем реверсивной клетки.

4. Представлена математическая модель очага деформации, разработанная на основе формулы закона сохранения энергии, предложенной В.Н. Выдриным. В модели учтены мощности, подводимые за счет переднего и заднего натяжений, мощности потерь, обусловленные разнонаправленными продольными силами трения, мощность, затрачиваемая на формоизменение, и мощность потерь на трение скольжения. С учетом этого получена наиболее точная модель, пригодная для исследования процессов деформации металла в клетях станов горячей прокатки.

5. Представлена математическая модель раската в промежутке двух последовательно расположенных клеток. В ее основу положены интегральные уравнения натяжений, предложенные Н.Н. Дружининым, основанные на законе Гука. По результатам моделирования подтверждена актуальность поставленной задачи согласования скоростей взаимосвязанных электроприводов горизонтальных и вертикальных валков.

6. На основании анализа литературных источников установлено, что условие постоянства секундных объемов в «классической» формулировке является одним из спорных теоретических положений, т.к. его применимость ограничена участками раската, находящимися за пределами очага деформации. Данное условие невыполнимо при изменении зазора валков непосредственно в режиме прокатки. По результатам проведенного анализа обоснована разработка способа регулирования скоростей взаимосвязанных электроприводов клеток по принципу «постоянства массы».

7. Разработан способ согласования скоростей электроприводов вертикальной и горизонтальной клеток в режиме перемещения гидравлических НУ.

Отличительным признаком является регулирование скорости электропривода валков вертикальной клетки пропорционально приращению линейной скорости металла на входе в горизонтальную клетку, вызванному изменением зазора валков горизонтальной клетки.

8. В результате математического моделирования процессов, имитирующих изменение зазора валков, доказано, что реализация разработанного способа обеспечивает ограничение силовой взаимосвязи вертикальных и горизонтальных клеток. Данный способ рекомендуется для согласования скоростей электромеханических систем клеток толстолистного стана в режиме профилированной прокатки.

## **Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КЛЕТИ**

### **3.1. Постановка задачи**

Представленная глава посвящена разработке комплексной методики прогностического анализа эквивалентных нагрузок электроприводов горизонтальной клетки на основе уточненного расчета энергосиловых параметров прокатки и измерения моментов (токов) двигателей в on-line режиме. Методика включает:

- уточненные аналитические зависимости и алгоритм расчета давления металла (усилия прокатки) при высоких очагах деформации;
- алгоритм расчета эквивалентных нагрузок электроприводов реверсивной клетки по результатам замеров токов (моментов) двигателей непосредственно в процессе прокатки;
- предиктивный (прогностический) анализ нагрузочных режимов двигателей при прокатке листов перспективных сортов сталей из труднодеформируемых марок стали.

Актуальность решаемой задачи связана с тем, что при освоении нового сорта металла возникает задача повышения точности расчета энергосиловых параметров прокатки. В результате проведенных исследований показано, что известные методики не обеспечивают необходимой точности расчета усилий при деформации толстых раскатов. С целью устранения данного недостатка поставлена задача совершенствования методики расчета давления металла на валки. Для этого необходимо получение аналитических зависимостей, учитывающих особенности деформации металла в высоких очагах и его ускоренного движения в реверсивном режиме.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в первой главе, показали, что моменты нагрузки двигателей электроприводов верхнего и нижнего валков в реальных условиях прокатки могут отличаться в 2 и более

раза. При этом на стадиях черновой и чистовой прокатки рассогласования моментов имеют разные знаки (разнонаправленный характер). Очевидно, что эта особенность является характерной не только для толстолистовых станов, но и для клетей других прокатных станов с индивидуальными электроприводами валков, например, для черновых клетей широкополосных станов.

Вместе с тем, методики расчета эквивалентных нагрузок, известные из теории электропривода, не учитывают эту особенность. Эквивалентные моменты (токи, мощности) двигателей рассчитываются по упрощенным нагрузочным диаграммам, одинаковым для двигателей ВГП и НГП. Очевидно, что для электроприводов, работающих при экстремальных нагрузках, такое упрощение не является корректным и ведет к недостоверной оценке тепловых и нагрузочных режимов. Необходим расчет, учитывающий неравномерное распределение нагрузок, с учетом изменения их соотношения в каждом проходе.

В связи с изложенным ставится задача разработки методики расчета эквивалентных нагрузок двигателей по фактическим нагрузкам (моментам либо токам), измеряемым в on-line режиме. Очевидно, что результаты таких замеров, представляют собой большие массивы данных, зафиксированных с определенным интервалом (шагом). Они не могут быть наглядно представлены в тексте диссертации. Поэтому обработка результатов замеров выполняется на основе предварительно полученных массивов и сопровождается представлением осциллограмм.

Наряду с разработкой методики расчета эквивалентных нагрузок в on-line режиме, ставится задача совершенствования методики анализа нагрузок на основе упрощенных диаграмм. Она необходима для снижения трудоемкости операций с большими массивами данных и пригодна для предварительной оценки теплового состояния двигателей ВГП и НГП. Поэтому следующей решаемой задачей является разработка методики, предусматривающей аппроксимацию нагрузочных диаграмм линейными участками (фрагментами треугольников либо трапеций). В этом плане она аналогична известным методикам, но оперирует с фактическими нагрузками по проходам, которые для ВГП и НГП различаются. Для оценки эффективности разрабатываемых методик необходима проверка достоверности получаемых результатов.

Разрабатываемый методологический подход направлен на определение эквивалентных нагрузок двигателей ВГП и НГП по фактическим моментам прокатки, которые должны определяться для каждой партии листов. Он представляет собой методику оценки ограничений, накладываемых со стороны электропривода на технологический процесс. Это необходимо при реализации новых либо оптимизации существующих программ прокатки. Такая задача является актуальной при расширении сортамента трубной заготовки.

## **3.2. Разработка уточненной методики расчета момента прокатки при высоких очагах деформации**

### **3.2.1. Обоснование исследований**

Разработка новых и уточнение применяемых технологических программ всегда базируется на результатах расчета давления металла на валки и момента двигателей. Особенностью прокатки трубной заготовки является большое отношение высоты очага деформации к радиусу рабочих валков. Для невысоких очагов деформации, имеющих место при прокатке на большинстве станков, в литературе имеются аналитические выражения, дающие точность, достаточную для инженерных расчетов. Так в работе [207] академик А.И. Целиков исследовал методы численного определения давления металла на валки. В расчетах для решения дифференциального уравнения удельного давления

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{P_x - \sigma_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} - \frac{t_x}{y} = 0 \quad (3.1)$$

он рассматривал зависимость между удельным давлением  $P_x$  и напряжением  $\sigma_x$ . Для этого была использована формула главного вертикального напряжения

$$\sigma_1 = \left( P_x \cdot \frac{dx}{\cos \varphi_x} \cdot \cos \varphi_x \pm t_x \cdot \frac{dx}{\cos \varphi_x} \cdot \sin \varphi_x \right) \cdot \frac{1}{dx}, \quad (3.2)$$

в которой пренебрегалось вторым слагаемым ввиду его незначительности по сравнению с первым слагаемым (вывод этого выражения приводится ниже).

В этом случае решение дифференциального уравнения (3.1) дает следующую формулу для расчета давления металла на валки

$$P = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot \frac{l}{\Delta h} \cdot \frac{k \cdot h_\gamma}{\delta} \cdot \left( \left( \frac{h_0}{h_\gamma} \right)^\delta + \left( \frac{h_\gamma}{h_1} \right)^\delta - 2 \right). \quad (3.3)$$

В выражениях (3.1) - (3.3) приняты обозначения:  $x, y$  – координаты расчетного сечения очага деформации на поверхности валка;  $\varphi_x$  – угол между касательной к дуге валка в точке расчета и горизонтальной плоскостью;  $t_x$  – удельная сила трения между прокатываемым металлом и поверхностью валков;  $h_0, h_1$  и  $b_0, b_1$  – толщина и ширина сляба до и после прокатки;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие;  $l$  – длина пояса деформации;  $h_\gamma$  – высота прокатываемой полосы в нейтральном сечении;  $\delta$  – коэффициент, зависящий от параметров валка.

Однако для случая толстого листа, особенно в первых проходах, такое пренебрежение недопустимо. Это связано с тем, что при максимальной толщине подкатываемого сляба 300 мм и более и диаметре рабочего валка 1100–1200 мм, угол  $\varphi_x$  может достигать  $20^\circ$ , и вес второго члена в уравнении (3.2) становится значимым. В связи с этим была разработана новая методика, учитывающая указанный фактор [208]. Ее суть излагается ниже.

### 3.2.2. Аналитические зависимости для расчета

Схема напряженного состояния очага деформации приведена на рисунке 3.1 [160]. Выделим из прокатываемой полосы в очаге деформации некоторый элемент  $abcd$ , ограниченный цилиндрическими поверхностями обоих прокатных валков и двумя плоскостями, перпендикулярными направлению прокатки и расположенными одна от другой на бесконечно малом расстоянии  $dx$ . Рассмотрим условия равновесия этого элемента, проецируя все действующие на него силы на направление прокатки.

Действие правой части полосы на элемент будет выражаться силой [207]:

$$2 \cdot \sigma_x \cdot y \quad (3.4)$$

где  $\sigma_x$  – среднее нормальное напряжение сжатия в металле по сечению  $b-d$ ;  $y$  – половина высоты сечения  $b-d$ . При этом ширина прокатываемой полосы принимается равной единице, а влиянием уширения пренебрегается (принимается отношение ширины к высоте сечения достаточно большим).

В плоскости  $a-c$  среднее нормальное напряжение и половина высоты сечения определяются соответственно, как  $(\sigma_x + d\sigma_x)$  и  $(y + dy)$  [207]. Тогда действие левой части полосы на выделенный элемент выражается силой:

$$2 \cdot (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot (y + dy). \quad (3.5)$$

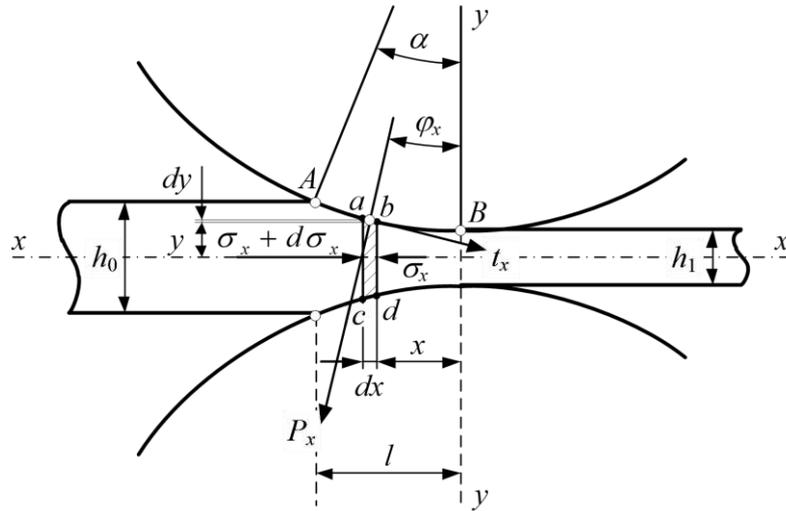


Рисунок 3.1 – Схема напряженного состояния при прокатке

Если выделенная область находится в зоне отставания, т.е. частицы обрабатываемого металла, соприкасающиеся с валками, скользят по их поверхности в сторону, противоположную направлению вращения валков, то горизонтальная проекция сил, действующих на элемент со стороны валков, выразится в виде

$$2 \cdot \left( P_x \cdot \frac{dx}{\cos \varphi_x} \cdot \sin \varphi_x - t_x \cdot \frac{dx}{\cos \varphi_x} \cdot \cos \varphi_x \right)$$

или

$$2 \cdot (P_x \cdot \operatorname{tg} \varphi_x \cdot dx - t_x \cdot dx), \quad (3.6)$$

где  $P_x$  – удельное давление валков на металл;  $\varphi_x$  – угол между касательной к дуге  $a-b$  и горизонтальной плоскостью;  $t_x$  – удельная сила трения между металлом и поверхностью валков.

Сумма горизонтальных проекций всех сил, действующих на элемент, выразится формулой

$$\begin{aligned} \Sigma x = & 2 \cdot (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot (y + dy) - \\ & - 2 \cdot \sigma_x \cdot y - 2 \cdot P_x \cdot \operatorname{tg} \varphi_x \cdot dx + 2 \cdot t_x \cdot dx = 0. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ввиду того, что  $x$  и  $y$  – это координаты дуги захвата,  $\operatorname{tg} \varphi_x$  можно выразить как

$$\operatorname{tg} \varphi_x = \frac{dy}{dx}. \quad (3.8)$$

Подставляя это отношение в выражение (3.7) и пренебрегая величинами второго порядка, получаем

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{P_x - \sigma_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} + \frac{t_x}{y} = 0. \quad (3.9)$$

Если рассматриваемый элемент  $adcd$  находится в зоне опережения (вблизи точки  $B$ ), его частицы, соприкасающиеся с валками, будут стремиться скользить по их поверхности в направлении вращения валков. Условия равновесия этого элемента, очевидно, останутся такими же, только силы трения будут направлены в противоположную сторону. Следовательно, уравнение равновесия (3.9) для зоны опережения выразится как

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{P_x - \sigma_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} - \frac{t_x}{y} = 0. \quad (3.10)$$

Для решения уравнений (3.9) и (3.10) необходимо найти зависимость между удельным давлением  $P_x$  и напряжением  $\sigma_x$ . Для этой цели можно воспользоваться уравнением пластичности, выведенном в работе [176] на основании четвертой теории предельного состояния

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = k_f, \quad (3.11)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные нормальные напряжения;  $k_f$  – предел текучести или сопротивление пластической деформации при простом растяжении.

Приняв, что для прокатки среднее главное напряжение определяется выражением, рекомендуемым в [207]:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad (3.12)$$

и подставив его в уравнение (3.11), получим:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot k_f \approx 1.15k_f. \quad (3.13)$$

В дальнейших рассуждениях произведение  $1,15 \cdot k_f$  обозначено символом  $k$ , т.е.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k. \quad (3.14)$$

Принимая за главные напряжения в рассматриваемом элементе вертикальные и горизонтальные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , можно получить выражение (3.2). Традиционно в известных работах вторым членом правой части этого уравнения пренебрегается ввиду его незначительности по сравнению с первым членом. Однако, как было отмечено выше, для случая прокатки трубной заготовки влияние второго члена в уравнении (3.12) становится значимым, соответственно

$$\sigma_1 = P_x \pm t_x \cdot \operatorname{tg} \varphi_x \text{ и } \sigma_3 = \sigma_x. \quad (3.15)$$

Отсюда, согласно уравнению (3.14):

$$P_x - \sigma_x \pm t_x \cdot \operatorname{tg} \varphi_x = k. \quad (3.16)$$

Подставляя значение  $P_x - \sigma_x$  в уравнения (3.9) и (3.10), получаем основное дифференциальное уравнение удельного давления прокатываемого металла на валки:

$$\frac{d(P_x - k \pm t_x \cdot \operatorname{tg} \varphi_x)}{dx} - \frac{k \mp t_x \cdot \operatorname{tg} \varphi_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{t_x}{y} = 0, \quad (3.17)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты дуги захвата. Знаки “плюс” в первом и перед третьим членами этого уравнения относятся к зоне отставания, а знаки “минус” – к зоне опережения. Во втором члене, наоборот “плюс” – к зоне опережения, минус – к зоне отставания.

Постоянные величины, получающиеся в результате интегрирования этого уравнения, определяются из начальных условий. Для этой цели необходимо найти удельные давления в точках  $A$  и  $B$ . При этом прокатываемая полоса при входе в валки и при выходе из валков не подвергается натяжению. Тогда согласно уравнению (3.17) удельные давления составят:

- в точке  $A$

$$P_0 = k + t_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

- в точке  $B$

$$P_l = k.$$

Если при решении уравнения (3.17) принять величину  $k$  по дуге захвата постоянной (одно из частных решений уравнения (3.17) при переменном  $k$  было дано А.А. Королевым в работе [209]), то согласно уравнению (3.16), получаем

$$d\sigma_x = dP_x \pm dt_x \cdot dy. \quad (3.18)$$

Тогда дифференциальное уравнение удельного давления запишется как

$$\frac{dP_x}{dx} \pm \frac{dt_x}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} - \frac{k \mp t_x \cdot \operatorname{tg} \varphi_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{t_x}{y} = 0. \quad (3.19)$$

Общее решение этого уравнение в точном виде представляет значительные трудности ввиду неопределенности соотношения между  $P_x$  и  $t_x$ . Поэтому рассмотрим решения этого уравнения для двух различных случаев трения между прокатываемым металлом и поверхностью валков:

– в 1-ом случае при наличии скольжения с сухим трением (теория Кармана), когда  $t_x = f \cdot P_x$ ;

– во 2-ом случае при наличии частичного скольжения (теория Зибеля), принимая  $t_x = \text{const}$ .

Для первого варианта силы трения ( $t_x = f \cdot P_x$ ) выражение (3.16) с учетом (3.8) принимает вид

$$\sigma_x = P_x \pm f \cdot P_x \cdot \frac{dy}{dx} - k, \quad (3.20)$$

это значит, что

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{dP_x}{dx} \pm \left( f \cdot P_x \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} + f \cdot \frac{dP_x}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} \right). \quad (3.21)$$

После подстановки (3.17) и (3.18) в (3.6) или (3.7), получаем выражение

$$\begin{aligned} \frac{dP_x}{dx} \pm \left( f \cdot P_x \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} + f \cdot \frac{dP_x}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} \right) - \frac{P_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} + \\ + \frac{P_x \pm t_x \cdot \frac{dy}{dx} - k}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{t_x}{y} = 0, \end{aligned} \quad (3.22)$$

которое в результате преобразований можно привести к виду

$$\begin{aligned} \frac{dP_x}{dx} \cdot (1 \pm f \cdot \operatorname{tg} \varphi) \pm f \cdot P_x \cdot \left( \frac{1}{R_g \cdot \cos^3 \varphi} + \frac{1}{[h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)] \cdot \cos^2 \varphi} \right) = \\ = \frac{k \cdot \operatorname{tg} \varphi}{h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)}, \end{aligned} \quad (3.23)$$

где  $R_g$  – радиус валка.

Переходя к полярной системе координат, приняв

$$\begin{cases} x = R_g \cdot \cos \varphi \\ y = h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi) \end{cases}, \quad (3.24)$$

и, следовательно,

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi \quad \text{и} \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{R_g \cdot \cos^3 \varphi}, \quad (3.25)$$

получим

$$\frac{dP_x}{dx} = \frac{1}{R_g \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{dP_\varphi}{d\varphi}. \quad (3.26)$$

Отсюда запишем линейное дифференциальное уравнение 1 порядка

$$\begin{aligned} \frac{dP_\varphi}{d\varphi} \cdot (1 \pm f \cdot \operatorname{tg} \varphi) \pm f \cdot P_\varphi \cdot \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi} + \frac{R_g}{[h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)] \cdot \cos \varphi} \right) = \\ = \frac{k \cdot R_g \cdot \sin \varphi}{h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)} \end{aligned} \quad (3.27)$$

или в результате несложных преобразований

$$\begin{aligned} \frac{dP_\varphi}{d\varphi} \pm f \cdot P_\varphi \cdot \left( \frac{1}{\cos \varphi \cdot (\cos \varphi \pm f \cdot \sin \varphi)} + \frac{R_g}{[h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)] \cdot (\cos \varphi \pm f \cdot \sin \varphi)} \right) = \\ = \frac{k \cdot R_g \cdot \sin \varphi}{[h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)] \cdot (1 \pm f \cdot \operatorname{tg} \varphi)}. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} q(\varphi) = \pm f \cdot \left( \frac{1}{\cos \varphi \cdot (\cos \varphi \pm f \cdot \sin \varphi)} + \right. \\ \left. + \frac{R_g}{[h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)] \cdot (\cos \varphi \pm f \cdot \sin \varphi)} \right) \end{aligned} \quad (3.29)$$

и

$$u(\varphi) = \frac{k \cdot R_g \cdot \sin \varphi}{\left[ h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi) \right] \cdot (1 \pm f \cdot \operatorname{tg} \varphi)}. \quad (3.30)$$

Тогда общее решение дифференциального уравнения (3.19) для закона трения по Карману примет вид

$$P_\varphi = e^{-\int g(\varphi) d\varphi} \left( \int u(\varphi) e^{\int g(\varphi) d\varphi} d\varphi + C \right). \quad (3.31)$$

Произвольную константу  $C$  можно определить, подставив начальные условия  $P(\varphi = 0) = k$ .

Для второго варианта силы трения ( $t_x = \text{const}$ ) выражение (3.16) с учетом (3.8) примет вид

$$\sigma_x = P_x \pm t_x \frac{dy}{dx} - k, \quad (3.32)$$

а значит

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{dP_x}{dx} \pm t_x \frac{d^2 y}{dx^2}. \quad (3.33)$$

Подставив (3.29) и (3.30) в (3.6) или (3.7), получим выражение

$$\frac{dP_x}{dx} \pm t_x \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{P_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} + \frac{P_x \pm t_x \cdot \frac{dy}{dx} - k}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{t_x}{y} = 0. \quad (3.34)$$

Откуда в результате преобразований выразим

$$\begin{aligned} \frac{P_x}{dx} = \mp \frac{t_x}{R_g \cdot \cos^3 \varphi} \mp \frac{t_x}{\left[ h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi) \right] \cdot \cos^2 \varphi} + \\ + \frac{k \cdot \operatorname{tg} \varphi}{h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)}. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Или, перейдя к полярной системе координат с учетом (3.26), получим

$$\begin{aligned} \frac{P_\varphi}{d\varphi} = \mp \frac{t_x}{\cos^2 \varphi} \mp \frac{t_x \cdot R_g}{\left[ h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi) \right] \cdot \cos \varphi} + \\ + \frac{k \cdot R_g \cdot \sin \varphi}{h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

В результате интегрирования выражение (3.36) приводится к виду

$$P_\varphi = \mp \int \frac{t_x}{\cos^2 \varphi} \cdot d\varphi \mp t_x \cdot \int \frac{R_g}{\left[ h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi) \right] \cdot \cos \varphi} \cdot d\varphi$$

$$+ \int \frac{k \cdot R_g \cdot \sin \varphi}{h/2 + R_g \cdot (1 - \cos \varphi)} \cdot d\varphi \quad (3.37)$$

или

$$P_\varphi = \mp t_x \cdot \operatorname{tg} \varphi \mp \frac{8 \cdot R_g^2}{(h + 2 \cdot R_g) \cdot \sqrt{h \cdot (h + 4 \cdot R_g)}} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{h + 4 \cdot R_g}{\sqrt{h \cdot (h + 4 \cdot R_g)}} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right) \mp$$

$$\mp \frac{2 \cdot R_g}{h + 2 \cdot R_g} \cdot \ln \left| \frac{\operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) + 1}{\operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) - 1} \right| + k \cdot \ln \left| \frac{h}{2} + R_g \cdot (1 - \cos \varphi) \right| + C. \quad (3.38)$$

Подставив начальные условия  $P(\varphi = 0) = k$ , получим

$$C = k \cdot \left( 1 - \ln \frac{h}{2} \right). \quad (3.39)$$

Окончательно выражение для расчета давления металла на валки для закона трения по Зибелю принимает вид

$$P_\varphi = \mp t_x \cdot \operatorname{tg} \varphi \mp \frac{8 \cdot R_g^2}{(h + 2 \cdot R_g) \sqrt{h \cdot (h + 4 \cdot R_g)}} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{h + 4 \cdot R_g}{\sqrt{h \cdot (h + 4 \cdot R_g)}} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right) \mp$$

$$\mp \frac{2 \cdot R_g}{h + 2 \cdot R_g} \cdot \ln \left| \frac{\operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) + 1}{\operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) - 1} \right| + k \cdot \ln \left| \frac{h}{2} + R_g \cdot (1 - \cos \varphi) \right| + k \cdot \left[ 1 - \ln \frac{h}{2} \right]. \quad (3.40)$$

Пренебрегая изменением удельного давления по ширине раската [207] и произведя суммирование удельного давления на протяжении всей дуги захвата (рисунок 3.1) при простом процессе прокатки, получаем формулу общего давления металла на валки:

$$P = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot \int_0^\alpha P_\varphi \cdot d\varphi, \quad (3.41)$$

где  $b_0$ ,  $b_1$  – ширина раската до и после очага деформации,  $\alpha$  – угол захвата металла валками (см. рисунок 3.1)

$$\alpha = \arccos \left( 1 - \frac{h_0 - h_1}{2 \cdot R_g} \right) \quad (3.42)$$

$h_0$ ,  $h_1$  – толщина раската до и после очага деформации

### 3.2.3. Расчет усилия прокатки с учетом реверсивного движения заготовки

Разнонаправленное движение заготовки на реверсивных станах является неравномерным, отличным от идеального случая прокатки, следовательно, и направление действия сил будет иным.

При неравномерном вращении валков полоса выходит из них с ускорением  $j$ . Согласно теореме Даламбера прокатываемую полосу допускается рассматривать в покое, если к системе действующих на нее сил прибавить силу инерции  $U$ , как показано на рисунке 3.2 [207].

$$U = \frac{G}{g \cdot l_1} \cdot (l_1 - x) \cdot \frac{j}{\lambda} + \frac{G}{g \cdot l_1} \cdot x \cdot j,$$

где  $G$  – вес полосы;  $l_1$  – длина прокатанной полосы после ее выхода из валков;  $\lambda$  – вытяжка, полученная при пропуске;  $x$  – длина участка, вышедшего из валков к данному моменту.

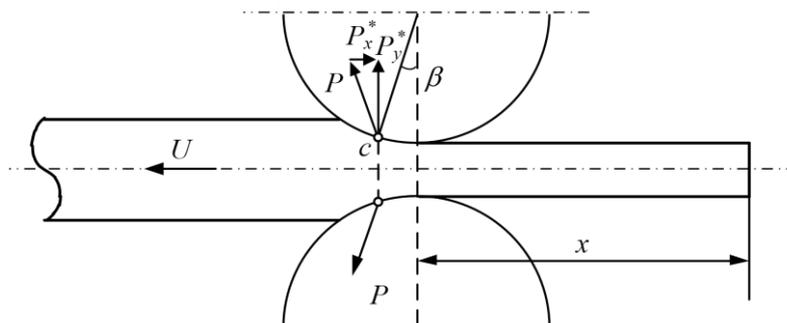


Рисунок 3.2 – Направление сил, действующих на валки при неравномерном (ускоренном) движении металла

Для выполнения условия равновесия необходимо, чтобы сумма горизонтальных проекций равнодействующих давления валков на металл была равна

$$2P_x^* = U,$$

где  $P_x^*$  – горизонтальная проекция силы  $P$ , равнодействующей давления валков на полосу.

Ввиду появления горизонтальной проекции силы  $P$ , равнодействующая давления на валки не будет направлена вертикально. Она будет наклонена при положительном ускорении в сторону, противоположную движению полосы, а

при отрицательном ускорении, т.е. при замедлении, – в сторону движения полосы.

Вертикальную проекцию  $P_y^*$  силы  $P$  можно найти как

$$P_y^* = \frac{b_0 - b_1}{2} \int_0^\alpha P_\varphi,$$

где  $P_\varphi$  – удельное давление, определяемое по (3.40).

Тогда формула для расчета давления металла на валки принимает вид

$$P = \sqrt{P_x^{*2} + P_y^{*2}}.$$

### **3.2.4. Экспериментальное определение угла точки приложения равнодействующей давления металла на валки**

Важной задачей, возникающей при разработке уточненной методики расчета момента прокатки, является определение точки приложения равнодействующей давления металла на валки (точки  $C$  на рисунке 3.2). Иными словами, это определение угла  $\beta$  приложения силы  $P$  давления валков на полосу. Исследования показали, что для толстолистовых станов, где «рядовая» толщина подкатываемого сляба равна 300 мм, сложно определить, каким будет угол  $\beta$  в первых проходах [210].

Для решения данного вопроса был проведен комплекс экспериментов на стане [211]. Исследовалась прокатка сталей марок К52, К56, 09Г2С, 15ХСНД, 10Г2ФБЮ, 15пс, Х70, РС D40, химический состав которых и количество проходов приведены в таблице 3.1.

Изменение угла точки приложения равнодействующей давления металла на валки от угла захвата представлено на рисунке 3.3 [212, 213]. Результаты исследования показали, что угол  $\beta$  для каждой марки стали находится в одной области по отношению к углу  $\alpha$ . Следовательно, его величина зависит не от марки стали, а от высоты очага деформации. Зависимость  $\beta = f(\alpha)$  аппроксимируется выражением:

$$\beta = 0,391 \cdot \alpha^{1,1459}. \quad (3.43)$$

Таблица 3.1 – Химический состав и количество пропусков исследуемых сталей

| Марка стали | Количество пропусков | Содержание, % |      |      |      |      |       |       |       |
|-------------|----------------------|---------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|             |                      | C             | Mn   | Si   | Cr   | Ni   | Nb    | V     | Ti    |
| 09Г2С       | 19                   | 0,1           | 1,48 | 0,67 | 0,04 | 0,03 | 0     | 0,006 | 0,01  |
| 10Г2ФБЮ     | 13                   | 0,11          | 1,77 | 0,28 | 0,2  | 0,22 | 0,062 | 0,051 | 0,019 |
| X70         | 19                   | 0,06          | 1,56 | 0,35 | 0,02 | 0,2  | 0,046 | 0,005 | 0,015 |
| K52         | 21                   | 0,1           | 1,56 | 0,46 | 0,02 | 0,02 | 0,036 | 0,008 | 0,019 |
| РС D40      | 17                   | 0,08          | 1,18 | 0,22 | 0,02 | 0,05 | 0,037 | 0,038 | 0,008 |
| 15пс        | 15                   | 0,18          | 0,55 | 0,13 | 0,02 | 0,02 | 0,001 | 0,006 | 0,001 |
| K56         | 23                   | 0,11          | 1,6  | 0,48 | 0,02 | 0,02 | 0,028 | 0,04  | 0,019 |
| 15ХСНД      | 17                   | 0,16          | 0,67 | 0,57 | 0,76 | 0,42 | 0,002 | 0,007 | 0,016 |

Эта зависимость, показанная сплошной линией, отражает тенденцию изменения угла  $\beta$ . Величина достоверности аппроксимации  $R^2$  показывает, какое число точек из представленной выборки принадлежит данной кривой. Чем больше  $R^2$ , тем полнее отражается динамика изменения параметра аппроксимации, в данном случае достоверность составляет 98 %.

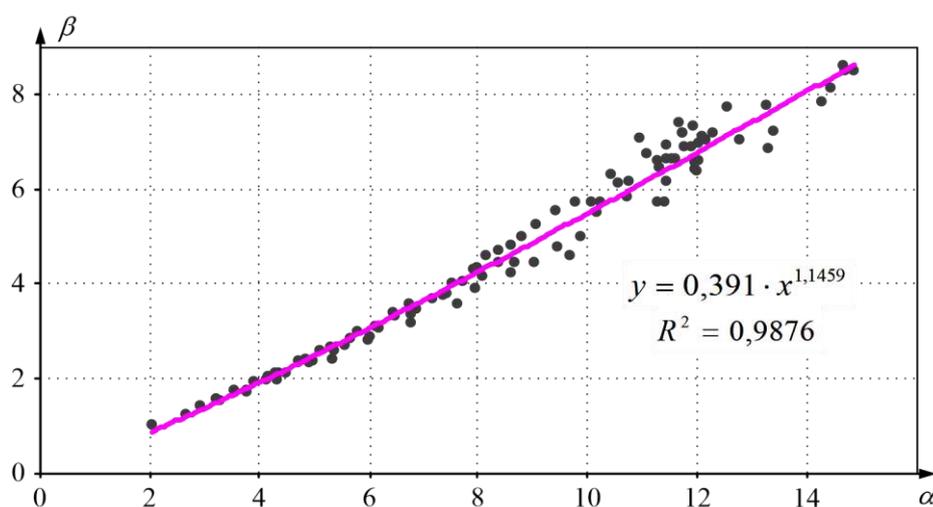


Рисунок 3.3 – Экспериментальная зависимость  $\beta = f(\alpha)$

Использование этой зависимости при расчетах энергосиловых параметров стана 5000 позволяет более точно определять момент прокатки и соответственно моменты двигателей клетки.

### 3.3. Разработка программы расчета энергосиловых параметров прокатки толстого листа

#### *Зависимости для расчета момента прокатки*

Момент прокатки, необходимый для осуществления пластической деформации металла, находящегося в валках, рассчитывается по известной зависимости [214]:

$$M_{np} = 2 \cdot P \cdot a_M, \quad (3.44)$$

где  $a_M$  – плечо момента прокатки (см. рисунок 3.4).

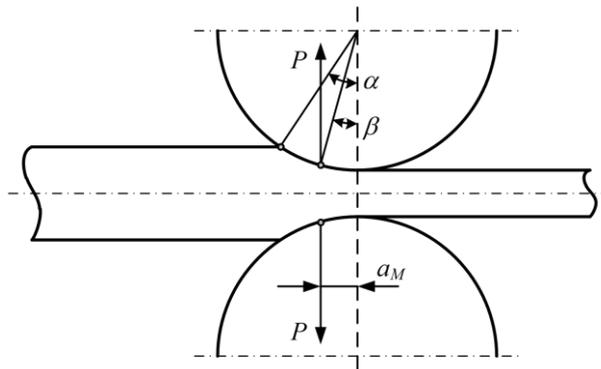


Рисунок 3.4 – Направление сил, действующих при простом процессе прокатки

Плечо  $a_M$  или угол  $\beta$  определяются по расстоянию точки приложения равнодействующей давления металла на валки от плоскости, проходящей через оси последних.

Отношение углов  $\beta/\alpha$  обозначим через  $\psi$  и будем его в дальнейшем называть коэффициентом положения равнодействующей давления на валки. При простом случае прокатки, когда равнодействующая давления направлена вертикально, можно принять [207]

$$\psi = \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{a_M}{l}, \quad (3.45)$$

где  $l$  – длина пояса деформации

$$l = \sqrt{R_s \cdot (h_0 - h_1) - \frac{(h_0 - h)^2}{4}}. \quad (3.46)$$

Тогда величина  $a_M$  согласно уравнению (3.45) может быть определена:

$$a_M = \psi \cdot l = \psi \cdot \sqrt{R_s \cdot (h_0 - h_1) - \frac{(h_0 - h)^2}{4}}. \quad (3.47)$$

Подставляя это выражение в уравнение (3.44), получим момент, необходимый для вращения обоих валков при простом случае прокатки

$$M_{np} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot \sqrt{R_s \cdot (h_0 - h_1) - \frac{(h_0 - h)^2}{4}}. \quad (3.48)$$

Вебер К.Х. в работе [215] на основании работы А.И. Целикова [216] вывел следующую формулу для расчета коэффициента положения равнодействующей давления на валки

$$\psi = \frac{a_M}{l} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + 2 \cdot \frac{P_0}{P_1}}{1 + \frac{P_0}{P_1}}. \quad (3.49)$$

Анализ формул (3.47) и (3.49) показывает, что при  $l/h = 1$  и  $p_0/p_1 \rightarrow \infty$ , максимально возможное значение  $\psi = a_M/l$  равно 0,67. При  $l/h \rightarrow 0$  величина  $\psi$  асимптотически приближается к 0,5. При  $l/h \rightarrow \infty$  величина  $\psi$  приближается к 0,33. Для клетки стана 5000 при  $h=300$  мм коэффициент положения равнодействующей находится в пределах от 0,5 до 0,6 [217].

Таким образом, в результате проведенных исследований получены уточненные аналитические зависимости для расчета момента прокатки при высоких очагах деформации. Согласно разработанной методике, момент рассчитывается по формуле (3.48), при этом давление на валки определено для двух законов трения – Кармана, выражение (3.31), и Зибеля, выражение (3.40).

Расчет нагрузочных режимов электроприводов толстолистного стана является трудоемкой задачей, связанной с многочисленными вычислениями. Существенно упростить вычисления возможно с использованием программного обеспечения. Поэтому на основе разработанной уточненной методики расчета момента прокатки разработана специализированная программа [218]. Расчет

момента прокатки реализован согласно полученным выше выражениям (3.48), (3.40) и (3.43), совместное рассмотрение которых дает зависимости для вычислений [219]:

$$M_{np} = 2 \cdot \sqrt{P_x^{*2} + P_y^{*2}} \cdot \frac{0,391 \cdot \alpha^{1,1459}}{\alpha} \cdot \sqrt{R_g \cdot (h_0 - h_1) - \frac{(h_0 - h)^2}{4}}, \quad (3.50)$$

где  $P_x^* = \frac{1}{2} \cdot \frac{G}{g \cdot l_1} \cdot (l_1 - x) \cdot \frac{j}{\lambda} + \frac{G}{g \cdot l_1} \cdot x \cdot j$ ;  $P_y^* = \frac{b_0 + b_1}{2} \int_0^\alpha P_\varphi$ ;

$$P_\varphi = \mp t_x \cdot \operatorname{tg} \varphi \mp \frac{8 \cdot R_g^2}{(h + 2 \cdot R_g) \sqrt{h \cdot (h + 4 \cdot R_g)}} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{h + 4 \cdot R_g}{\sqrt{h \cdot (h + 4 \cdot R_g)}} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right) \mp$$

$$\mp \frac{2 \cdot R_g}{h + 2 \cdot R_g} \cdot \ln \left| \frac{\operatorname{tg}(\varphi/2) + 1}{\operatorname{tg}(\varphi/2) - 1} \right| + k \cdot \ln \left| \frac{h}{2} + R_g \cdot (1 - \cos \varphi) \right| + k \cdot \left[ 1 - \ln \frac{h}{2} \right]$$

### **Алгоритм программы**

Блок-схема алгоритма разработанной программы приведена на рисунке 3.5 [220]. Работа с программой начинается с ввода данных (констант), которые могут вводиться вручную или из предварительно сформированного файла. Последняя функция предусмотрена для удобства повторного ввода части данных, их корректировки и осуществления нового расчета. При вводе данных из файла они отображаются в пользовательской форме программы и могут быть изменены вручную. После заполнения полей исходных данных по команде пользователя выполняется расчет нагрузок. Исходные и расчетные данные выводятся на экран и по желанию пользователя – на принтер.

Программа написана на языке программирования Object Pascal в среде визуального объектно-ориентированного программирования и создания приложений для Windows Borland Delphi 7.0. Пакет Delphi сочетает в единой среде высокопроизводительный компилятор с языком Object Pascal, визуальные механизмы программирования, инструмент создания приложений. Выбор этой среды обусловлен простотой создания приложений, достаточно богатой библиотекой стандартных компонентов, число которых превышает тысячу. Это многообразие базовых элементарных объектов позволило обойтись при написании программы стандартными библиотеками.

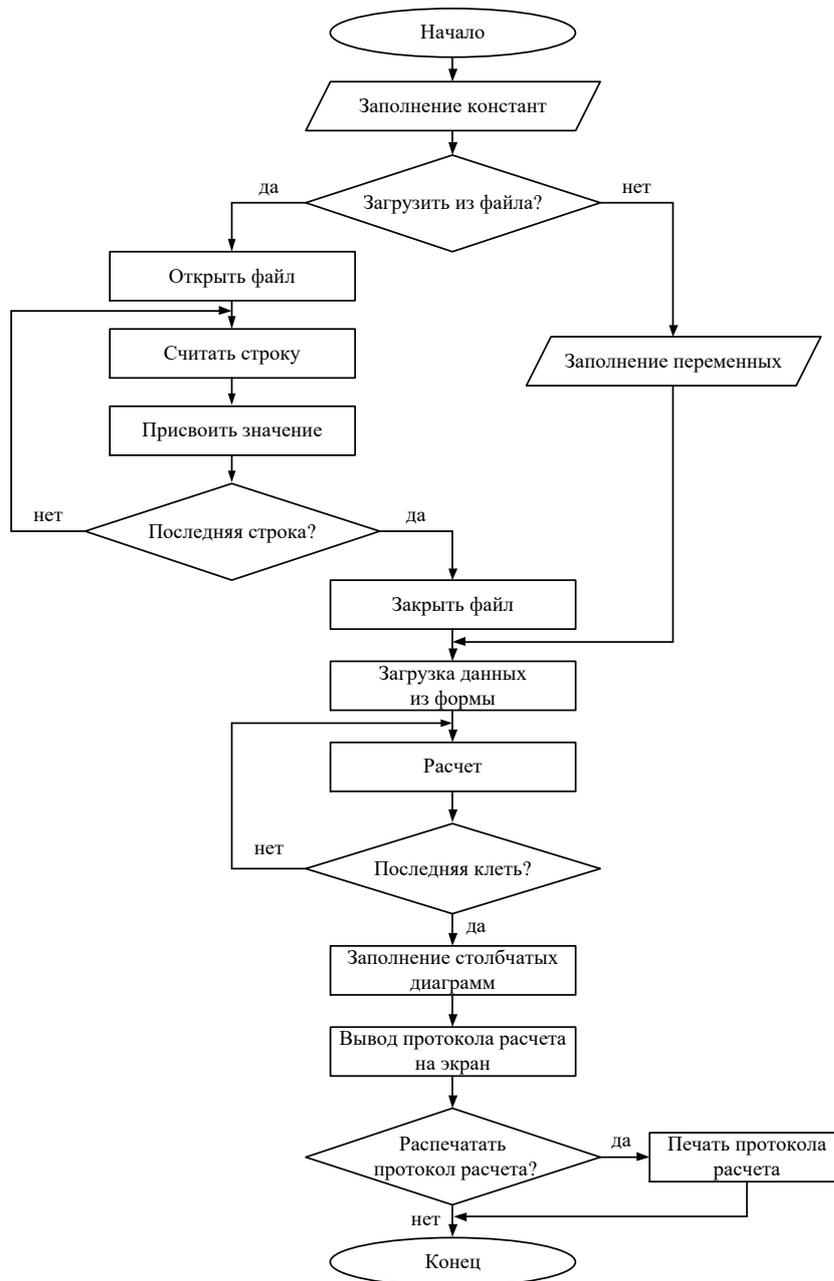


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритма программы

### 3.4. Проверка адекватности разработанной методики расчета момента прокатки

С целью оценки достоверности выполнены расчеты энергосиловых параметров прокатки по двум методикам: упрощенной, рекомендованной А.И. Целиковым для листовых станов, и разработанной уточненной с использованием представленных выше зависимостей. Для каждой марки стали рассчитывались энергосиловые параметры на каждый проход. Посчитано отличие от экспери-

ментальных данных, полученных путем регистрации координат электропривода (ошибка). Результаты расчета, выполненные по методике А.И. Целикова, приведены в таблице 3.2 и в таблицах П.2.1 – П.2.5 Приложения 2 [217].

Таблица 3.2 – Результаты расчетов и экспериментальных исследований энергосиловых параметров прокатки стали марки К52

| № прохода | $h_0$            | $h_1$   | $b_0$ | $b_1$ | Эксперимент | Расчет | Ошибка |
|-----------|------------------|---------|-------|-------|-------------|--------|--------|
|           | м                | м       | м     | м     | кН·м        | кН·м   | %      |
| 1         | 0,3              | 0,2608  | 2,05  | 2,06  | 4838        | 3200   | 33,86  |
| 2+поворот | 0,2607           | 0,2349  | 3,267 | 3,233 | 5585        | 3674   | 34,22  |
| 3         | 0,2349           | 0,2100  | 3,233 | 3,235 | 6108        | 3889   | 36,33  |
| 4         | 0,2100           | 0,1855  | 3,235 | 3,237 | 5322        | 3628   | 31,83  |
| 5         | 0,1855           | 0,1621  | 3,237 | 3,239 | 5318        | 3697   | 30,48  |
| 6+поворот | 0,1621           | 0,1357  | 3,323 | 3,326 | 6281        | 4780   | 23,90  |
| 7         | 0,1357           | 0,1096  | 3,326 | 3,33  | 6610        | 5338   | 19,24  |
| 8         | 0,1096           | 0,0864  | 3,33  | 3,334 | 6110        | 5197   | 14,94  |
| 9         | Холостые проходы |         |       |       |             |        |        |
| 10        |                  |         |       |       |             |        |        |
| 11        | 0,0864           | 0,07146 | 3,334 | 3,324 | 5535        | 4718   | 14,76  |
| 12        | 0,0715           | 0,05947 | 3,324 | 3,326 | 5785        | 5065   | 12,45  |
| 13        | 0,0595           | 0,04938 | 3,326 | 3,328 | 5137        | 4580   | 10,84  |
| 14        | 0,0494           | 0,04099 | 3,328 | 3,33  | 4548        | 4267   | 6,18   |
| 15        | 0,0410           | 0,03431 | 3,33  | 3,331 | 3628        | 3598   | 0,83   |
| 16        | 0,0343           | 0,02902 | 3,331 | 3,332 | 3101        | 3052   | 1,58   |
| 17        | 0,0290           | 0,0246  | 3,332 | 3,332 | 2787        | 2840   | 1,90   |
| 18        | 0,0246           | 0,02092 | 3,332 | 3,333 | 2606        | 2691   | 3,26   |
| 19        | 0,0209           | 0,0178  | 3,333 | 3,334 | 2506        | 2636   | 5,19   |

Анализ результатов подтвердил, что применение упрощенных методик дает большие погрешности при прокатке полос толщиной свыше 150 мм, т.е. в черновых проходах. Так, ошибка в первых проходах составляет до 38% и с уменьшением толщины листа снижается до 2–6%.

В таблицах 3.3, 3.4, приведены результаты расчетов по уточненной методике для тех же технологических условий, что и в таблицах 3.2, П.2.1, П.2.2. Они выполнены для прокатки в клетки стана 5000 (таблица 3.3) и в клетях №№7-12 стана 2000 (таблица 3.4). Анализ показывает, что, в отличие от методики А.И. Целикова, разработанная методика, обеспечивает расчет энергосиловых параметров с ошибкой в пределах 6–7%.

Таблица 3.3 – Результаты расчетов и экспериментальных исследований энергосиловых параметров прокатки сталей марок К52, Х70 и 10Г2ФБЮ2 на стане 5000

| № прохода | Сталь К52         |              |           | Сталь Х70         |              |           | Сталь 10Г2ФБЮ2    |              |           |
|-----------|-------------------|--------------|-----------|-------------------|--------------|-----------|-------------------|--------------|-----------|
|           | эксперимент, кН·м | расчет, кН·м | ошибка, % | эксперимент, кН·м | расчет, кН·м | ошибка, % | эксперимент, кН·м | расчет, кН·м | ошибка, % |
| 1         | 4838              | 4714         | 2,56      | 6343              | 6552         | 3,29      | 2010              | 1924         | 4,28      |
| 2         | 5585              | 5451         | 2,40      | 3340              | 3236         | 3,11      | 5026              | 4778         | 4,93      |
| 3         | 6108              | 5699         | 6,70      | 5690              | 5383         | 5,40      | 4837              | 4693         | 2,98      |
| 4         | 5322              | 5231         | 1,71      | 6023              | 5820         | 3,37      | 4614              | 4392         | 4,81      |
| 5         | 5318              | 5245         | 1,37      | 4998              | 5128         | 2,60      | 4739              | 4805         | 1,39      |
| 6         | 6281              | 6545         | 4,20      | 4654              | 4844         | 4,08      | Холостой проход   |              |           |
| 7         | 6610              | 6885         | 4,16      | Холостые проходы  |              |           | 7284              | 6956         | 4,50      |
| 8         | 6110              | 6477         | 6,01      |                   |              |           | 6970              | 7175         | 2,94      |
| 9         | Холостые проходы  |              |           | 4752              | 4822         | 1,47      | 6825              | 6497         | 4,81      |
| 10        |                   |              |           | 5220              | 5038         | 3,49      | 6633              | 6304         | 4,96      |
| 11        | 5535              | 5740         | 4718      | 5201              | 5029         | 3,31      | 6409              | 6143         | 4,15      |
| 12        | 5785              | 5986         | 5065      | 5119              | 4961         | 3,09      | 6271              | 6065         | 3,28      |
| 13        | 5137              | 5221         | 4580      | 5015              | 5114         | 1,97      | 6040              | 6173         | 2,20      |
| 14        | 4548              | 4649         | 4267      | 4778              | 4888         | 2,30      | -                 | -            | -         |
| 15        | 3628              | 3802         | 3598      | 4563              | 4687         | 2,72      | -                 | -            | -         |
| 16        | 3101              | 3146         | 3052      | 3946              | 4162         | 5,47      | -                 | -            | -         |
| 17        | 2787              | 2828         | 2840      | 3390              | 3490         | 2,95      | -                 | -            | -         |
| 18        | 2606              | 2543         | 2691      | 2932              | 2888         | 1,50      | -                 | -            | -         |
| 19        | 2506              | 2371         | 2636      | 2439              | 2316         | 5,04      | -                 | -            | -         |

Таблица 3.4 – Результаты расчетов и экспериментальных исследований энергосиловых параметров прокатки сталей марок 22ГЮ, 09Г2Д и 10Г2ФБЮ2 на стане 2000

| № клетки | Сталь 22ГЮ        |              |           | Сталь 09Г2Д       |              |           | Сталь 10Г2ФБЮ2    |              |           |
|----------|-------------------|--------------|-----------|-------------------|--------------|-----------|-------------------|--------------|-----------|
|          | эксперимент, кН·м | расчет, кН·м | ошибка, % | эксперимент, кН·м | расчет, кН·м | ошибка, % | эксперимент, кН·м | расчет, кН·м | ошибка, % |
| 7        | 1133              | 1161         | 2,5       | 1136              | 1217         | 7,1       | 908               | 955,1        | 5,2       |
| 8        | 980               | 931,4        | 5,0       | 1122              | 1190         | 6,1       | 732               | 675,3        | 7,7       |
| 9        | 526               | 557,8        | 6,0       | 795               | 832,5        | 4,7       | 513               | 539,3        | 5,1       |
| 10       | 372               | 385,4        | 3,6       | 453               | 477,8        | 5,5       | 386               | 365          | 5,4       |
| 11       | 282               | 263,2        | 6,7       | 295               | 305,5        | 3,6       | 233               | 217          | 6,9       |
| 12       | 214               | 207,3        | 3,1       | 271               | 280          | 3,3       | 222               | 213,5        | 3,8       |

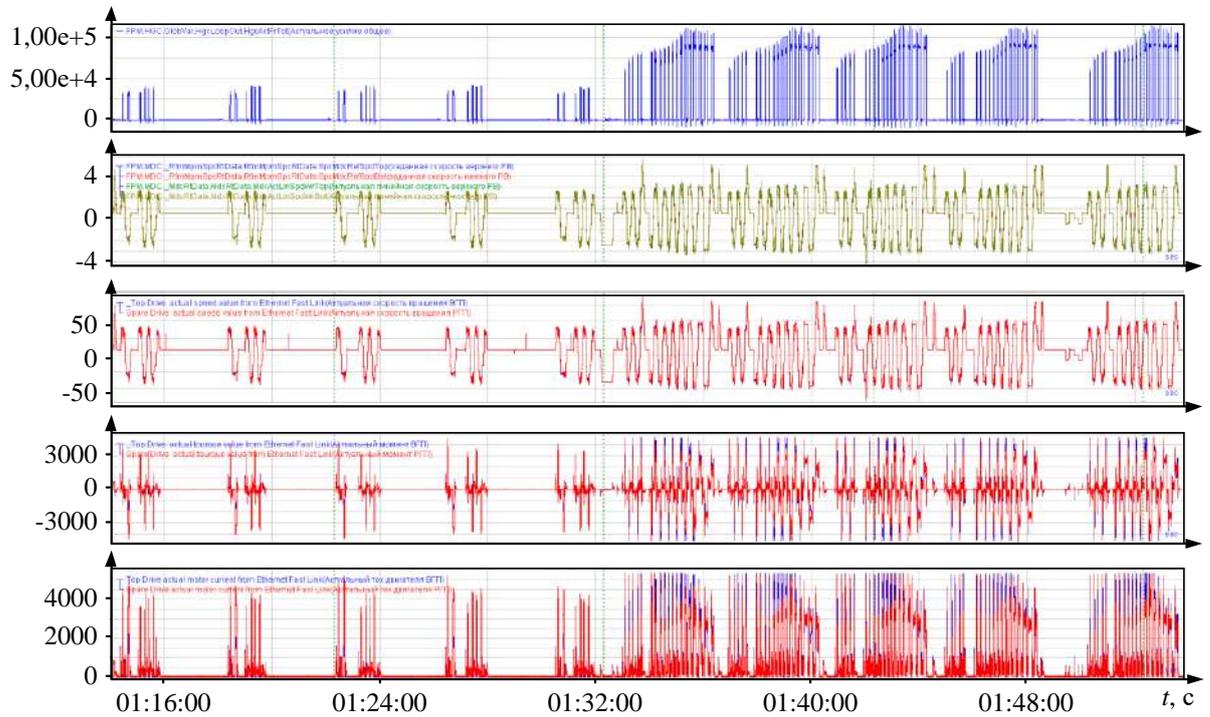
Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать к применению разработанную методику определения энергосиловых параметров процесса прокатки на станах 5000 и 2000 ПАО «ММК». Результаты ее применения для расчетов параметров прокатки в черновой группе стана 2000 рассмотрены ниже в главе 7.

### 3.5. Обоснование разработки программы автоматизированного анализа нагрузочных режимов двигателей ВГП и НГП

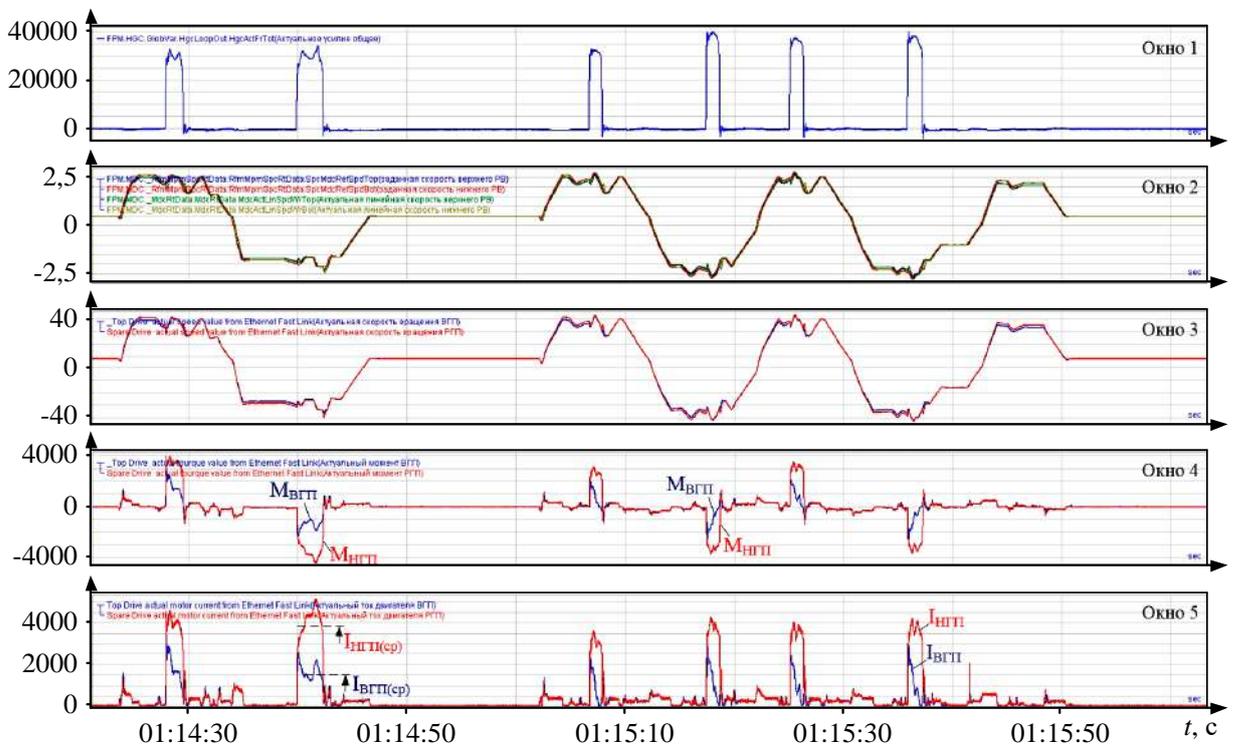
В разделе 1 на рисунке 1.5, б приведена фотография, демонстрирующая прокатку партии, состоящей из нескольких заготовок. На рисунке 1.21 представлены осциллограммы, подтверждающие вывод о различии моментов ВГП и НГП. Из них следует, что в черновых проходах момент двигателя нижнего валка  $M_{НГП}$  превышает момент  $M_{ВГП}$ , двигателя верхнего валка. В чистовых проходах их соотношение обратное, причем такая ситуация наблюдается при прокатке практически всех профилей.

Это подтверждают осциллограммы, полученные при прокатке партии из шести заготовок, представленные на рисунке 3.6, а. На рисунке 3.6, б приведены аналогичные осциллограммы за 6 проходов черновой прокатки. В окнах

1, 4, 5 представлены усилия прокатки, моменты и токи двигателей, соответственно. Также показаны заданные и фактические скорости валков (окно 2) и аналогичные скорости электроприводов (окно 3).



а)



б)

Рисунок 3.6 – Распределение нагрузок двигателей ВГП и НГП во всех проходах (а) и в шести проходах черновой прокатки (б)

Осциллограммы на рисунке 3.6, а подтверждают выводы о существенном различии усилий, моментов прокатки и токов двигателей и о разнонаправленном распределении нагрузок. Это приводит к неравномерной загрузке двигателей ВГП и НГП и нежелательным последствиям.

На рисунке 3.6, б в окнах 4 и 5 приведены осциллограммы моментов и токов ВГП (кривые  $M_{ВГП}$ ,  $I_{ВГП}$ ) и НГП (кривые  $M_{НГП}$ ,  $I_{НГП}$ ). Они имеют идентичный характер, из чего следует, что в каждом черновом проходе средняя нагрузка двигателя нижнего валка  $I_{НГП(ср)}$  в три раза превышает нагрузку двигателя ВГП  $I_{ВГП(ср)}$ . Аналогичные осциллограммы, полученные на стадии чистой прокатки листов той же партии демонстрируют противоположную картину: моменты и токи двигателя верхнего валка превышают аналогичные параметры двигателя нижнего валка в два и более раза. Такие осциллограммы приведены на рисунке 1.21, б.

Как отмечалось в п. 1.9.2, неравномерное распределение моментов прокатки приводит к нарушению теплового режима более загруженного двигателя, сокращению ресурса изоляции, снижению КПД и другим негативным последствиям. На основании этого сделан вывод о целесообразности разработки методики расчета эквивалентных моментов (токов), которые рассчитываются по актуальным (фактическим) параметрам нагрузки, измеряемым непосредственно во время прокатки.

### ***Оцифровка массива данных***

Для получения информации о реальных нагрузках электроприводов выполнена «оцифровка» массивов за цикл прокатки (промышленных данных), полученных путем прямых (on-line) измерений на стане. Она проводилась с заданным шагом, одинаковым для графиков моментов ВГП и НГП, который для каждого прохода выбирался индивидуально. Количество точек  $k$  для разных проходов составляло от 70 до 203. В качестве примера, на рисунке 3.7, а представлены осциллограммы моментов ВГП и НГП за один проход черновой прокатки, на рисунке 3.7, б – их «оцифрованные кривые».

При расчете эквивалентных нагрузок принимается, что режим работы синхронного двигателя происходит с минимизацией потерь энергии. В этом

режиме реактивная составляющая тока статора не учитывается, следовательно, момент двигателя будет пропорционален активной составляющей тока статора.

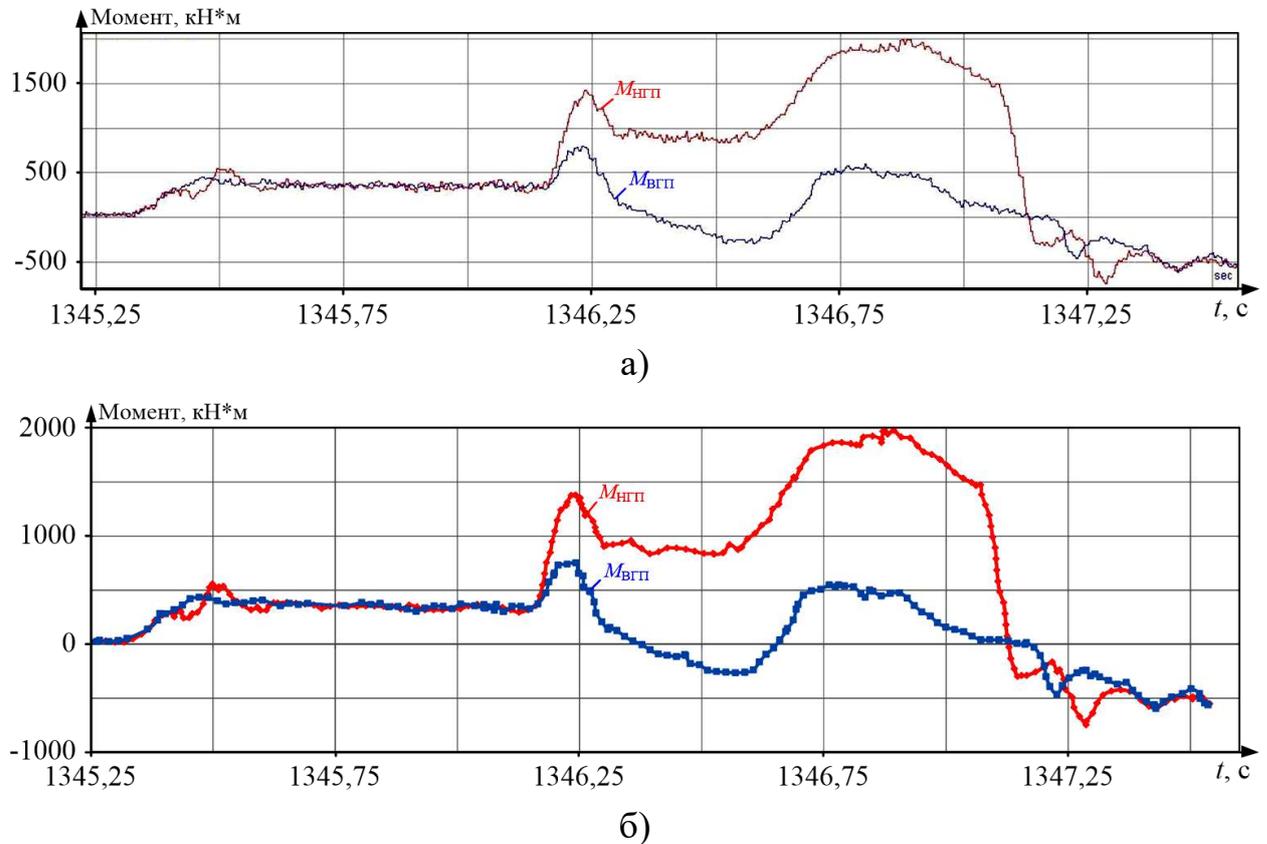


Рисунок 3.7 – Осциллограммы моментов двигателей за один проход (а) и их оцифрованные кривые (б)

### 3.6. Расчет эквивалентной нагрузки по результатам on-line замеров

#### *Черновая прокатка одной заготовки*

При оцифровке моментов рассматриваемый интервал для шести проходов черновой прокатки с паузами составляет 220 с. Шаг по времени принимается постоянным  $\Delta\tau=0,002$  с, соответственно число точек, в которые фиксируются моменты,  $k=110\,000$ . Эффективный момент и эффективный ток двигателя за рассматриваемый период определяются как среднеинтегральные значения. Для расчета эквивалентного момента в  $n$ -м интервале применяется формула:

$$\bar{M}_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{n2} - t_{n1}} \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} M^2(\tau) d\tau},$$

где  $t_{n1}$ ,  $t_{n2}$  – время начала и окончания интервала.

Для наглядности, в качестве примера ниже рассматривается прокатка одной заготовки, соотношение эквивалентных (эффективных) параметров анализируется для одного прохода. Моменты электроприводов верхнего нижнего валков, полученные путем оцифровки, приведены на рисунке 3.8, а результаты расчета эквивалентных моментов  $M_{\text{ЭВГП}}$  и  $M_{\text{ЭНГП}}$  – в таблице 3.5. В ней приведены результаты расчетов без учета и с учетом паузы между прокаткой двух последовательных заготовок за шесть проходов (осреднение за 110 с и 220 с, соответственно). Видно, что с увеличением паузы эффективные моменты ВГП и НГП уменьшаются, но их отношение не изменяется. Согласно паспортным данным, номинальный момент двигателя  $M_{\text{Н}}=1910$  кН м, следовательно, запас по моменту вполне достаточный.

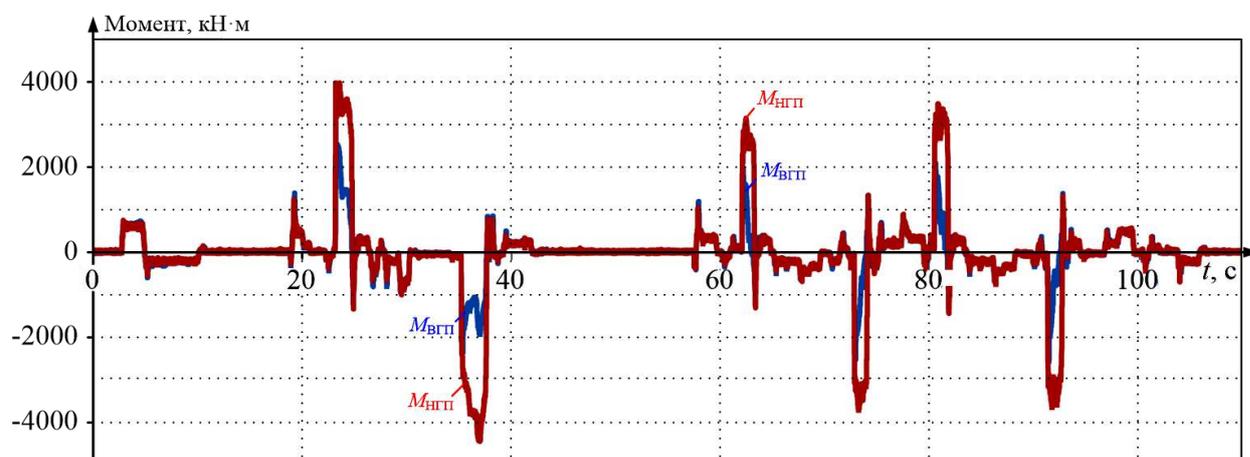


Рисунок 3.8 – Оцифрованные моменты двигателей ВГП и НГП при черновой прокатке одной заготовки за шесть проходов

Таблица 3.5 – Эквивалентные моменты ВГП и НГП при черновой прокатке

| Параметр   | Осреднение от 0 до 110 с | Осреднение от 0 до 220 с |
|--|--------------------------|--------------------------|
| Момент двигателя ВГП $M_{\text{ЭВГП}}$ , кН·м                        | 448,7                    | 317,6                    |
| Момент двигателя НГП $M_{\text{ЭНГП}}$ , кН·м                        | 965,6                    | 683,0                    |
| Сумма $M_{\text{ЭВГП}}+M_{\text{ЭНГП}}$ , кН·м                       | 1414,                    | 1000,6                   |
| Отношение $M_{\text{ЭНГП}} / M_{\text{ЭВГП}}$                        | 2,15                     | 2,15                     |
| Отношение $M_{\text{ЭВГП}} / (M_{\text{ЭВГП}}+ M_{\text{ЭНГП}})$ , % | 31,73                    | 31,74                    |

Аналогичные расчеты проведены для эквивалентных токов и мощностей двигателей ВГП и НГП. Сделан вывод, подтверждающий что между моментами и токами имеет место линейная зависимость, т.е. по модулю  $I \sim |M|$ . Это

демонстрирует рисунок 3.9, где приведена зависимость тока двигателя ВГП от момента. Номинальный ток двигателей  $I_H=2460$  А.

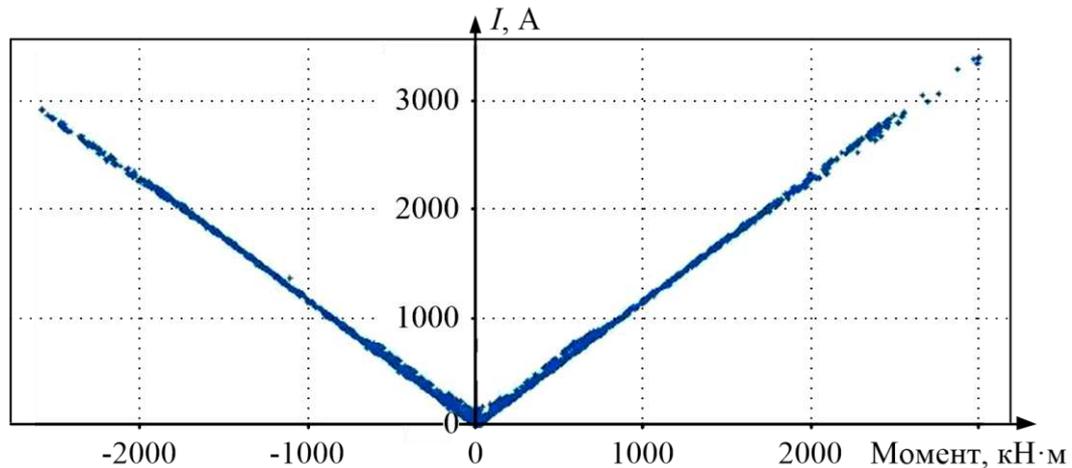


Рисунок 3.9 – Зависимость эквивалентного тока от момента двигателя ВГП

Эквивалентная мощность двигателя для рассматриваемого случая определяется как среднеинтегральное значение, которое приближенно может быть представлено суммой мощностей по интервалам:

$$\bar{P}_\Theta = \frac{1}{t_{n2} - t_{n1}} \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} P(\tau) d\tau \approx \frac{1}{k-1} \left[ \sum_2^{k-1} P_i + \frac{P_1}{2} + \frac{P_k}{2} \right].$$

Оцифрованные графики мощностей ВГП и НГП приведены на рисунке 3.10, результаты их обработки – в таблице 3.6. Видно, что, как и в случаях с моментами и токами, с учетом паузы эффективные мощности ВГП и НГП снижаются, но их отношение не изменяется. Номинальная электрическая мощность двигателей  $P_H=12000$  кВт.

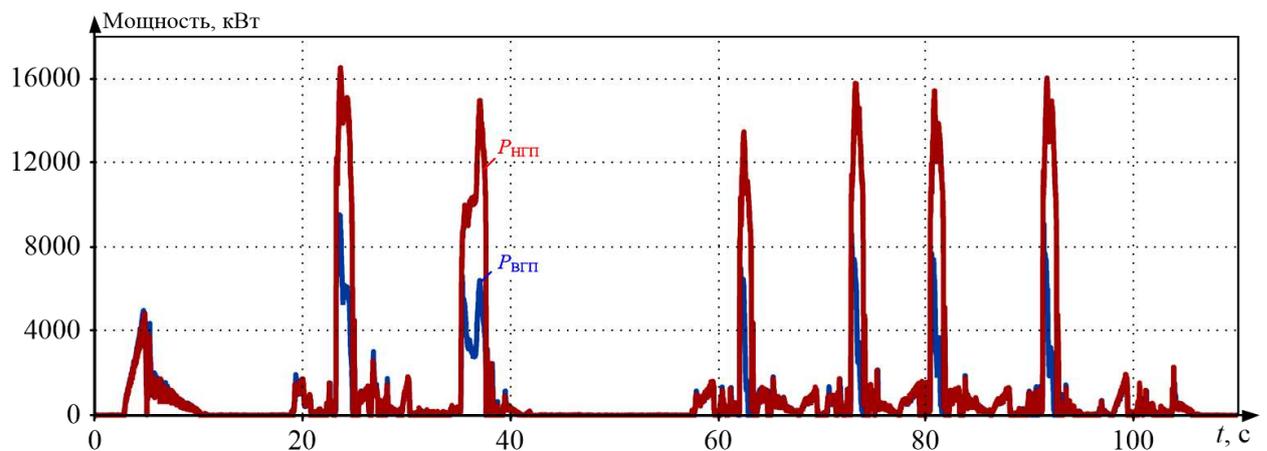


Рисунок 3.10 – Оцифрованные графики мощностей двигателей ВГП и НГП при черновой прокатке одной заготовки за шесть проходов

Таблица 3.6 – Эквивалентные мощности ВГП и НГП при черновой прокатке заготовки, кВт

| Параметр                           | Осреднение от 0 до 220 с | Осреднение от 0 до 110 с |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Экв. мощность двигателя ВГП, $P_B$ | 183,4                    | 359,0                    |
| Мощность двигателя НГП, $P_H$      | 346,9                    | 684,9                    |
| Сумма $P_B+P_H$                    | 530,3                    | 1044,0                   |
| Отношение $P_H/P_B$                | 1,89                     | 1,91                     |
| Отношение $P_B/(P_B+P_H)$ , %      | 34,6                     | 34,4                     |

Полученные соотношения эквивалентных моментов, токов и мощностей говорят о том, что эквивалентная нагрузка, а, следовательно, и количество тепла, выделяемого в двигателе НГП, примерно в 2 раза выше, чем количество тепла, выделяемого в двигателе ВГП.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. В случае расчета эквивалентных параметров по традиционной методике с использованием одинаковых нагрузочных диаграмм для ВГП и НГП в режиме черновой прокатки одного слитка будет получена двукратная ошибка.

2. Проверку двигателей по нагреву целесообразно проводить на основе расчета эффективных моментов или токов, построенных по оцифрованным временным диаграммам, зафиксированным при прокатке партии конкретного сортамента.

3. Сравнение теплового состояния двигателей ВГП и НГП рационально проводить на основе определения отношений эффективных моментов или токов за один и тот же период работы.

#### ***Черновая прокатка партии из пяти заготовок***

Эквивалентные моменты, токи и механические мощности для электроприводов верхнего и нижнего валков при черновой прокатке партии из 5-и заготовок вычисляются по зависимости

$$\bar{M}_{1-5} = \frac{\sum_{i=1}^5 \bar{M}_i \Delta \tau_i}{\sum_{i=1}^5 \Delta \tau_i},$$

где  $\bar{P}_i$  и  $\Delta\tau_i$  – эквивалентный параметр и интервал времени при прокатке  $i$ -й заготовки, соответственно. Так как все интервалы времени выбирались одинаковыми ( $\Delta\tau_i=220$  с), это выражение можно упростить:

$$\bar{P}_{1-5} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \bar{P}_i.$$

**Эквивалентные параметры нагрузки верхнего и нижнего электроприводов по проходам** при прокатке пяти заготовок приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Эквивалентные моменты, токи и мощности ВГП и НГП при черновой прокатке пяти заготовок

| Параметр                      | Номер прохода |        |         |        |         |         |
|-------------------------------|---------------|--------|---------|--------|---------|---------|
|                               | 1             | 2      | 3       | 4      | 5       | 6       |
| Момент ВГП $M_B$ , кН м       | 718,3         | 753,7  | 406,6   | 540,7  | 465,5   | 476,4   |
| Момент НГП $M_H$ , кН м       | 1332,8        | 1644,6 | 892,5   | 1101,6 | 1 088,0 | 1 154,9 |
| Отношение $M_H/M_B$           | 1,86          | 2,18   | 2,20    | 2,04   | 2,34    | 2,42    |
| Отношение $M_B/(M_B+M_H)$ , % | 35,02         | 31,43  | 31,30   | 32,92  | 29,96   | 29,20   |
| Ток двигателя ВГП $I_B$ , А   | 828,1         | 868,1  | 469,4   | 621,4  | 537,2   | 547,4   |
| Ток двигателя НГП $I_H$ , А   | 1534,1        | 1896,7 | 1 027,8 | 1268,8 | 1 253,8 | 1 330,2 |
| Отношение $I_H/I_B$           | 1,85          | 2,18   | 2,19    | 2,04   | 2,33    | 2,43    |
| Отношение $I_B/(I_B+I_H)$ , % | 35,06         | 31,40  | 31,35   | 32,88  | 29,99   | 29,15   |
| Мех мощность ВГП $P_B$ , кВт  | 686,9         | 559,1  | 374,6   | 485,3  | 472,5   | 388,8   |
| Мех мощность НГП $P_H$ , кВт  | 1196,3        | 1145,4 | 751,2   | 935,9  | 966,7   | 962,2   |
| Отношение $P_H/P_B$           | 1,74          | 2,05   | 2,01    | 1,93   | 2,05    | 2,47    |
| Отношение $P_B/(P_B+P_H)$ , % | 36,48         | 32,80  | 33,27   | 34,14  | 32,83   | 28,78   |

На основе данных по проходам получены **осредненные энергосиловые параметры за цикл черновой прокатки пяти заготовок**, представленные в таблице 3.8.

Из таблицы следует, что **для черновой прокатки осредненные моменты, токи и мощности ВГП больше чем те же параметры НГП в среднем в 2,1 раза** ( $M_B/M_H \approx 2,1$ ). Для отношений моментов и токов двигателей среднеквадратическое отклонение в разных проходах  $\sigma=0,2$ , для отношения мощностей –  $\sigma=0,24$ . Это составляет примерно 9% и 12% средних значений.

#### **Чистовая прокатка пяти заготовок**

В качестве примера, на рисунке 3.11 приведены графики моментов ВГП и НГП, зафиксированные при чистовой прокатке одной заготовки за 19 проходов. Время прокатки составляет  $\sim 240$  с, в результате имеем массив данных из

120 000 точек. Аналогичные графики получены для пяти заготовок, входящих в одну партию. Результаты обработки массивов, полученных при прокатке партии, приведены в таблице 3.9. Из нее следует, что при чистовой прокатке среднеинтегральные моменты, токи и мощности двигателя ВГП больше чем двигателя НГП в среднем в  $M_B/M_H \approx 1,2$  раза.

Таблица 3.8 – Осредненные эквивалентные параметры нагрузки ВГП и НГП за цикл черновой прокатки

| Параметр                              | Осреднение<br>учетом пауз | Осреднение<br>без учета пауз |
|---------------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Момент ВГП $M_B$ , кН·м               | 325,6                     | 460                          |
| Момент НГП $M_H$ , кН·м               | 688,6                     | 973,6                        |
| Среднее отношение $M_H/M_B$           | 2,11                      | 2,12                         |
| Среднее отношение $M_B/(M_B+M_H)$ , % | 32,1                      | 32,1                         |
| Ток двигателя ВГП $I_B$ , А           | 375,5                     | 530,2                        |
| Ток двигателя НГП $I_H$ , А           | 794                       | 1122,4                       |
| Среднее отношение $I_H/I_B$           | 2,11                      | 2,12                         |
| Среднее отношение $I_B/(I_B+I_H)$ , % | 32,1                      | 32,1                         |
| Мощность двигателя ВГП $P_B$ , кВт    | 171,1                     | 333,2                        |
| Мощность двигателя НГП $P_H$ , кВт    | 333                       | 656                          |
| Среднее отношение $P_H/P_B$           | 1,95                      | 1,97                         |
| Среднее отношение $P_B/(P_B+P_H)$ , % | 33,9                      | 33,7                         |

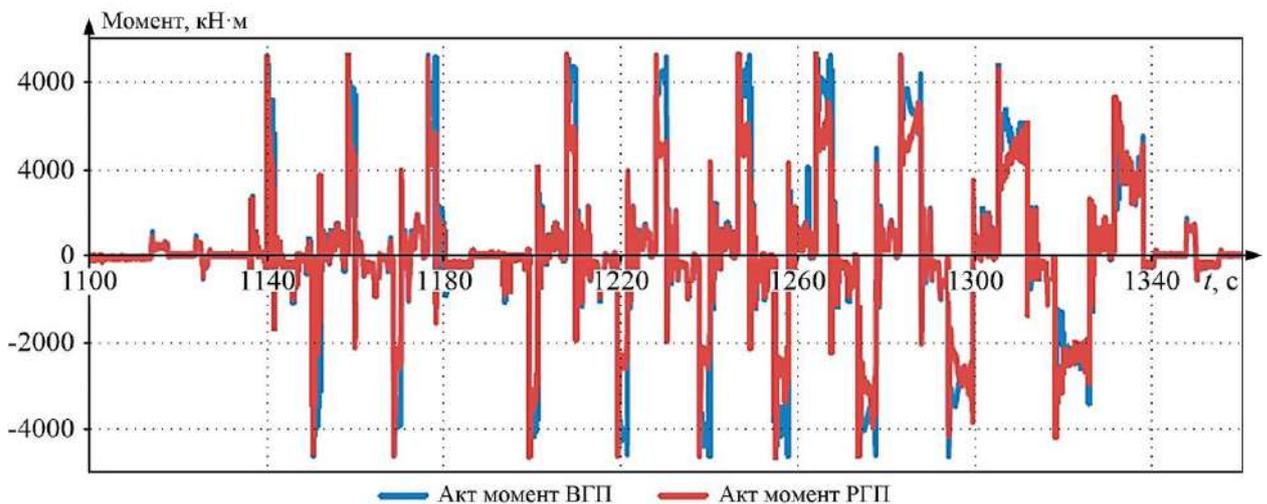


Рисунок 3.11 – Осциллограммы моментов двигателей ВГП и НГП при чистовой прокатке одной заготовки

Результаты, аналогичные приведенным в таблице 3.8, показали, что для электропривода верхнего вала:

– средний момент  $\bar{M} = 1745$  кН·м, что составляет 0,9 номинального значения 1910 кН·м;

- средний ток  $\bar{I}=2022$  А, что соответствует 0,82 номинального (2460 А);
- средняя мощность  $\bar{P}=2272$  кВт.

Следовательно, рассмотренный режим является тяжелым, при этом средние моменты, токи и мощности при чистовой прокатке существенно больше, чем при черновой.

Таблица 3.9 – Эквивалентные моменты, токи, механические мощности ВГП и НГП при чистовой прокатке пяти заготовок (по проходам)

| Параметр                                    | Номер прохода |        |        |        |        |
|---|---------------|--------|--------|--------|--------|
|   | 1             | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Момент верхнего $M_B$ , кН м                | 1689,6        | 1743,9 | 1735,1 | 1772,1 | 1784,3 |
| Момент нижнего $M_H$ , кН м                 | 1364,3        | 1464,4 | 1457,1 | 1453,8 | 1494,1 |
| Сумма $M_B+M_H$ , кН м                      | 3053,9        | 3208,3 | 3192,2 | 3225,9 | 3278,4 |
| Отношение $M_H/M_B$                         | 0,81          | 0,84   | 0,84   | 0,82   | 0,84   |
| Отношение $M_B/(M_B+M_H)$ , %               | 55,33         | 54,36  | 54,35  | 54,93  | 54,43  |
| Ток верхнего двигателя $I_B$ , А            | 1957,6        | 2019,8 | 2013,3 | 2052,4 | 2066,6 |
| Ток нижнего двигателя $I_H$ , А             | 1586,8        | 1703,2 | 1697,8 | 1691,4 | 1738,2 |
| Сумма $I_B+I_H$ , А                         | 3544,5        | 3723,0 | 3711,1 | 3743,7 | 3804,7 |
| Отношение $I_H/I_B$                         | 0,81          | 0,84   | 0,84   | 0,82   | 0,84   |
| Отношение $I_B/(I_B+I_H)$ , %               | 55,23         | 54,25  | 54,25  | 54,82  | 54,32  |
| Мех мощность верхнего двигателя $P_B$ , кВт | 2138,5        | 2276,9 | 2277,8 | 2319,6 | 2348,6 |
| Мех мощность нижнего двигателя $P_H$ , кВт  | 1787,8        | 1983,9 | 1973,1 | 1966,9 | 2032,8 |
| Сумма $P_B+P_H$ , кВт                       | 3926,3        | 4260,8 | 4250,9 | 4286,6 | 4381,3 |
| Отношение $P_H/P_B$                         | 0,84          | 0,87   | 0,87   | 0,85   | 0,87   |
| Отношение $P_B/(P_B+P_H)$ , %               | 54,47         | 53,44  | 53,58  | 54,11  | 53,60  |

Выше при анализе черновой прокатки сделан противоположный вывод момент НГП больше момента ВГП:  $M_B/M_H \approx 2,1$ . Это подтверждает вывод о «разнонаправленном» распределении моментов ВГП и НГП в режимах черновой и чистовой прокатки.

Таким образом, *предложена методика расчета нагрузок, позволяющая выполнять автоматизированную проверку двигателей по нагреву*. Методика включает:

- определение эффективных моментов, токов и мощностей по результатам замеров фактических нагрузок с заданным шагом;
- вычисление эквивалентных параметров нагрузки для заданного интервала времени (один проход, стадия черновой либо чистовой прокатки, полный цикл);

– осреднение и сравнение результатов с номинальными параметрами двигателя.

В приведенном примере определены отношения эффективных моментов, токов и мощностей на стадиях черновой и чистовой прокатки. Осуществлялась обработка результатов предварительно выполненных измерений. Однако *данный подход может быть применен для расчетов по результатам замеров в on-line режиме*. С этой целью разработаны алгоритм и программа, в которых предусмотрены вычисления и предварительная обработка информации, включающая сглаживание (аппроксимацию) измеряемых промышленных данных.

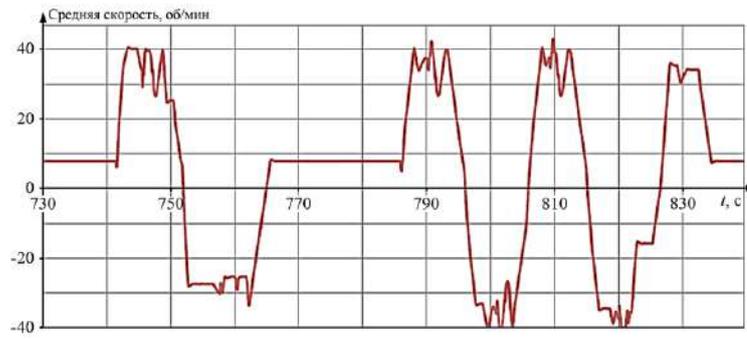
### **3.7. Разработка алгоритма расчета эквивалентного момента двигателя на основе осредненных данных**

#### **3.7.1. Аппроксимация скоростных диаграмм**

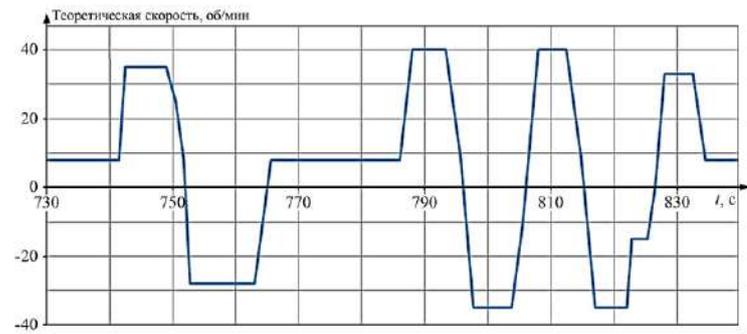
Из приведенных расчетов следует, что при обработке параметров нагрузки, зафиксированных в on-line режиме, необходимо выполнение операций с большими объемами данных. Так, черновая прокатка одной заготовки включает в себя данные за 220 с. При выбранном интервале дискретизации  $\Delta\tau=0,002$  с необходимы хранение и обработка в on-line режиме 110 тыс. точек для каждого контролируемого параметра. Для расчета эффективных моментов двух двигателей необходимо хранение 220 000 данных вещественного типа, что вызывает затруднения. В связи с этим предлагается замена (аппроксимация) оцифрованных диаграмм, полученных при черновой и чистовой прокатке, упрощенными (ломаными) кривыми.

Ниже выполнена аппроксимация скоростных диаграмм при черновой и чистовой прокатке одной заготовки. Принимается, что электроприводы верхнего и нижнего валков имеют одинаковые скорости вращения. Также должны быть известны следующие величины: время начала  $\tau_0$  и окончания  $\tau_k$  прокатки; шаг по времени  $\Delta\tau$ ; массивы усилия прокатки  $P$ , скоростей верхнего и нижнего валков  $n_v, n_n$ .

Диаграммы средней скорости электропривода  $n = (n_g + n_n) / 2$  при черновой прокатке показаны на рисунке 3.12, а, при чистовой – на рисунке 3.13, а.

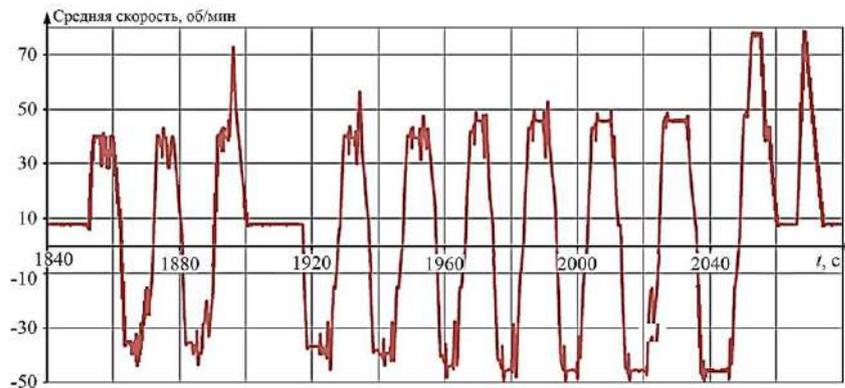


а)

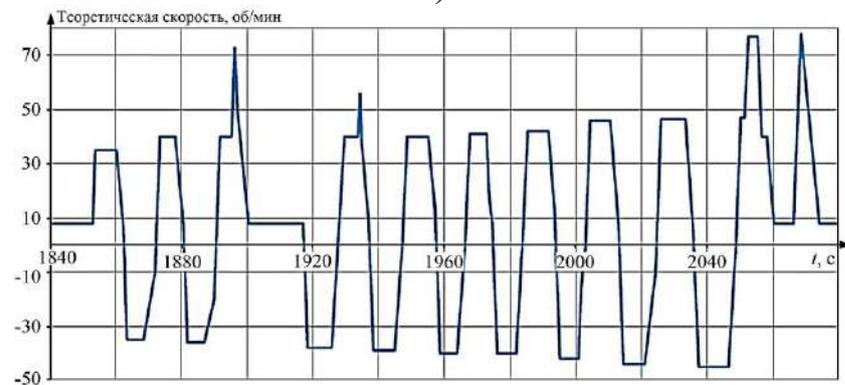


б)

Рисунок 3.12 – Временные диаграммы скоростей двигателей при черновой прокатке: а – экспериментальная; б – упрощенная



а)



б)

Рисунок 3.13 – Временные диаграммы скоростей двигателей при чистовой прокатке: а – экспериментальная; б – упрощенная

Согласно предложенной методике при обработке оцифрованных массивов выполняется их осреднение на характерных участках. Далее кривая скорости заменяется ломанной линией, состоящей из минимального, но достаточного для описания ее формы, количества элементов, включающих фрагменты трапеций и треугольников. В таблице 3.10 показан пример аппроксимации скорости по 28 точкам при черновой прокатке одной заготовки.

Таблица 3.10 – Параметры аппроксимации скорости двигателя при черновой прокатке заготовки

|                        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Время, с               | 730,0 | 741,5 | 742,5 | 749,0 | 750,5 | 751,8 | 752,8 | 763,0 | 765,6 | 786,0 |
| Скорость, $n$ , об/мин | 7,9   | 7,9   | 35    | 35    | 25    | 7,9   | -28   | -28   | 7,9   | 7,9   |

Продолжение таблицы 3.10

|                        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Время, с               | 788,0 | 793,3 | 795,7 | 797,7 | 803,8 | 805,5 | 808,0 | 812,4 | 814,8 | 817,0 |
| Скорость, $n$ , об/мин | 40    | 40    | 7,9   | -35   | -35   | -11   | 40    | 40    | 7,9   | -35   |

Продолжение таблицы 3.10

|                        |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Время, с               | 822,0 | 822,8 | 825,3 | 826,5 | 828,0 | 832,5 | 834,5 | 840,0 |
| Скорость, $n$ , об/мин | -35   | -15   | -15   | 0     | 33    | 33    | 7,9   | 7,9   |

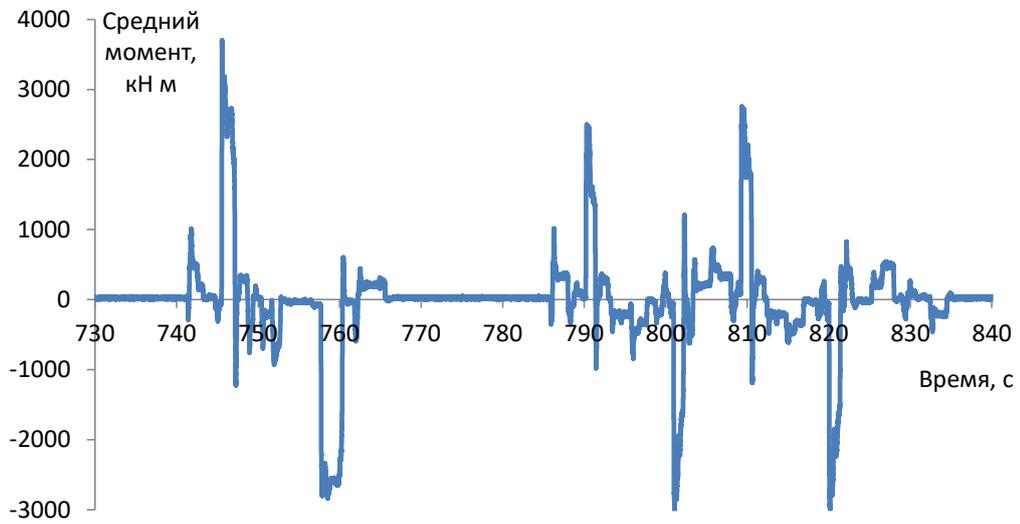
По данным таблицы 3.10 на рисунке 3.12, б построена идеализированная зависимость для упрощенного расчета скорости. Аналогичная зависимость аппроксимированной скорости для чистовой прокатки представлена на рисунке 3.13, б. Она построена по данным аналогичной таблицы, содержащей 73 точки (здесь не приводится).

Аналогично путем осреднения экспериментальных данных получены аппроксимированные зависимости для усилий прокатки и эквивалентных моментов двигателей ВГП и НГП.

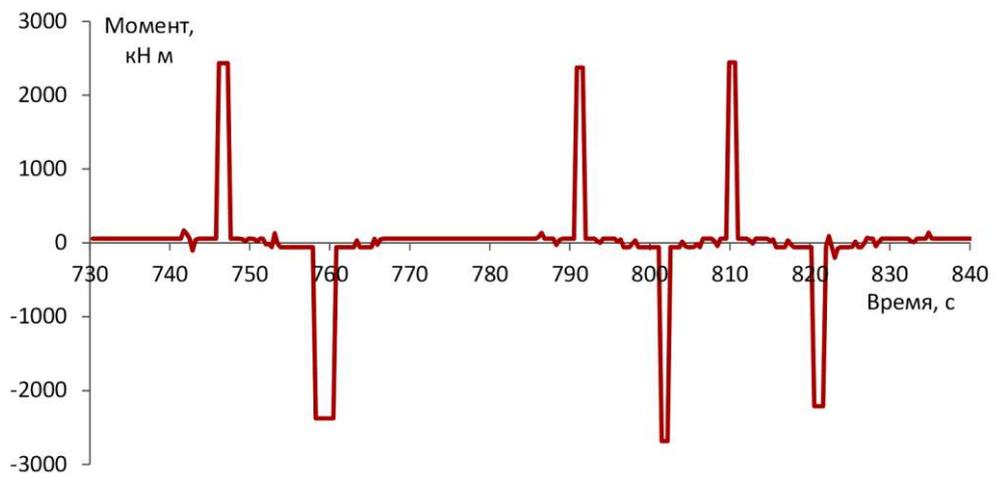
### 3.7.2. Расчет эквивалентного момента двигателя по аппроксимированным нагрузочным диаграммам

На рисунках 3.14, а и 3.15, а приведены диаграммы осредненных моментов  $\bar{M} = (M_{\text{в}} + M_{\text{н}}) / 2$  двигателей верхнего и нижнего валков, построенные

по экспериментальным данным для черновой и чистовой прокатки. На рисунках 3.14, а и 3.15, б приведены расчетные (аппроксимированные) моменты двигателей для этих случаев.



а



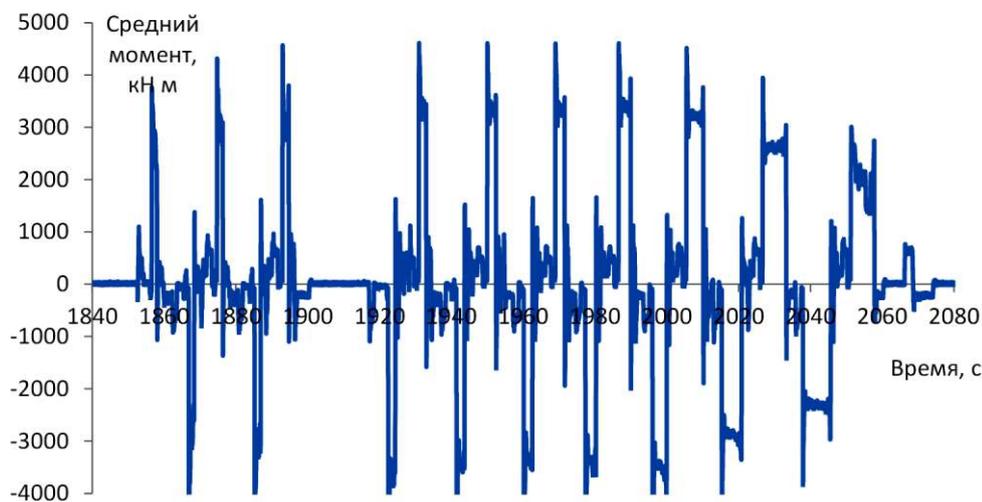
б

Рисунок 3.14 – Оцифрованные экспериментальные (а) и упрощенные (б) диаграммы моментов двигателя при черновой прокатке за 6 проходов

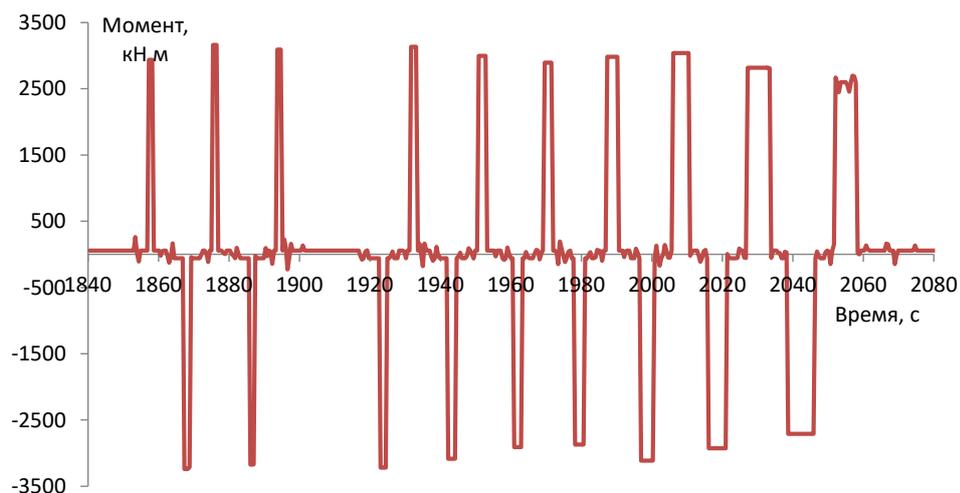
При расчете интервалы времени  $t_u=730-840$  с черновой прокатки и  $t_u=1840-2080$  с чистовой прокатки, разбивались на  $k=500$  подинтервалов (шагов). В этом случае эквивалентный момент можно вычислить по формуле трапеций

$$\bar{M}_\Theta \approx \sqrt{\frac{1}{k-1} \left[ \sum_2^{k-1} M_i^2 + \frac{M_1^2}{2} + \frac{M_k^2}{2} \right]} \quad (3.51)$$

В результате обработки данных, показанных на рисунке 3.14, б, рассчитан эквивалентный момент  $\bar{M}_\Omega = 685$  кН м. При обработке данных чистовой прокатки (рисунок 3.15, б) эквивалентный момент  $\bar{M}_\Omega = 1490$  кН м.



а



б

Рисунок 3.15 – Оцифрованные экспериментальные (а) и упрощенные (б) диаграммы моментов двигателя при чистовой прокатке за 19 проходов

Выше при обработке экспериментальных данных были получены аналогичные значения моментов:

- для черновой прокатки момент ВГП  $M_B = 466,5$  кН·м, момент НГП  $M_H = 991,9$  кН·м; среднее значение этих моментов  $\bar{M}_{\text{черн}} = 729$  кН·м;
- для чистовой прокатки  $M_B = 1772,1$  кН·м,  $M_H = 1453,8$  кН·м; среднее значение  $\bar{M}_{\text{чист}} = 1613$  кН·м.

Видно, что средний эффективный момент электроприводов верхнего и нижнего валков, полученный экспериментально, выше, чем расчетный эффективный момент при черновой прокатке на 6%, а при чистовой – на 7,6%. Объяснить это можно тем, что при расчетах не учитывается множество факторов, возникающих при реальной прокатке и влияющих на скорости и усилия. Номинальный момент двигателя  $M_{ном}=1910$  кН м, поэтому даже для более нагруженного двигателя ВГП при чистовой прокатке не возникает риска перегрева.

### 3.7.3. Алгоритм программы

Для реализации представленной упрощенной методики разработаны алгоритм и программа расчета эффективного момента на основе осредненных экспериментальных данных. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 3.16. Вычисление эквивалентного момента выполняется по формуле (3.51).

В первой части алгоритма путем осреднения промышленных данных формируются идеализированные (аппроксимированные) кривые моментов. Информация о них сохраняется в базе данных (БД) в качестве технической записи о прокатке заготовок заданной партии.

Во второй части на основе информации из БД определяются среднеквадратичные значения моментов двигателей ВГП и НГП, которые характеризуют их реальную загрузку. По информации, полученной за цикл прокатки, выполняется прогнозирование (предиктивный анализ) теплового состояния двигателя за полное количество циклов в партии заданного сортамента. В случае неудовлетворительного состояния это позволяет ввести ограничения на технологический процесс: изменить режим обжатый либо скорости прокатки.

Для расчета эквивалентного момента по параметрам идеализированных диаграмм скоростей и усилий необходимо хранение данных таблиц 3.7 и 3.9, то есть хранение и обработка  $2 \cdot 28 + 2 \cdot 26 = 108$  точек. Как показано выше, относительная ошибка подобной идеализации составляет 6–8%, что вполне приемлемо для задачи оценки теплового состояния двигателя.

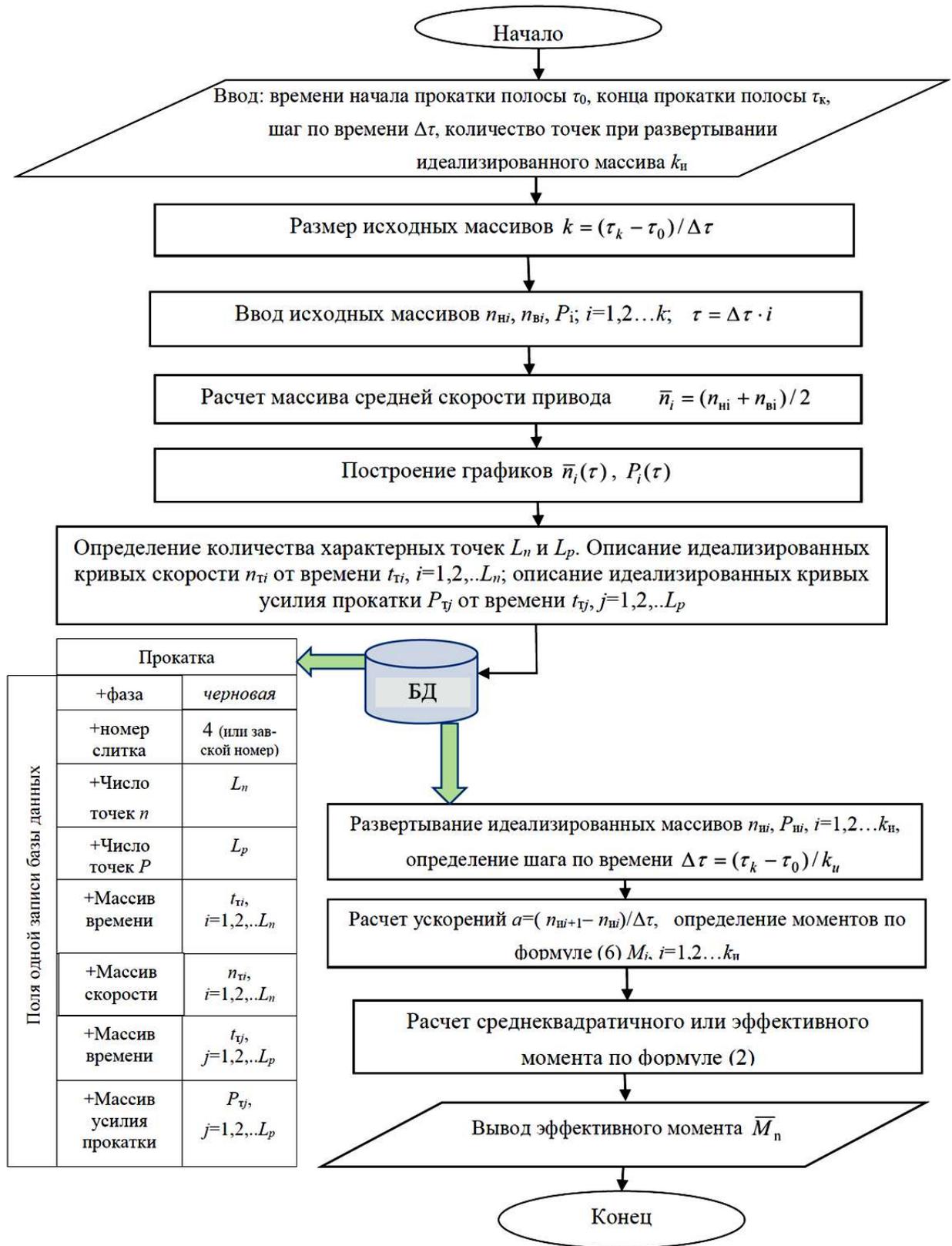


Рисунок 3.16 – Блок-схема алгоритма расчета эквивалентного момента двигателя

На рисунке 3.17 представлены результаты расчета среднеквадратичных значений момента по предложенному алгоритму для чистовой прокатки партии из пяти слитков. В окне 1 приведены осциллограммы моментов ВГП и НГП. В окне 2 – рассчитанные зависимости эквивалентных моментов этих двигателей.

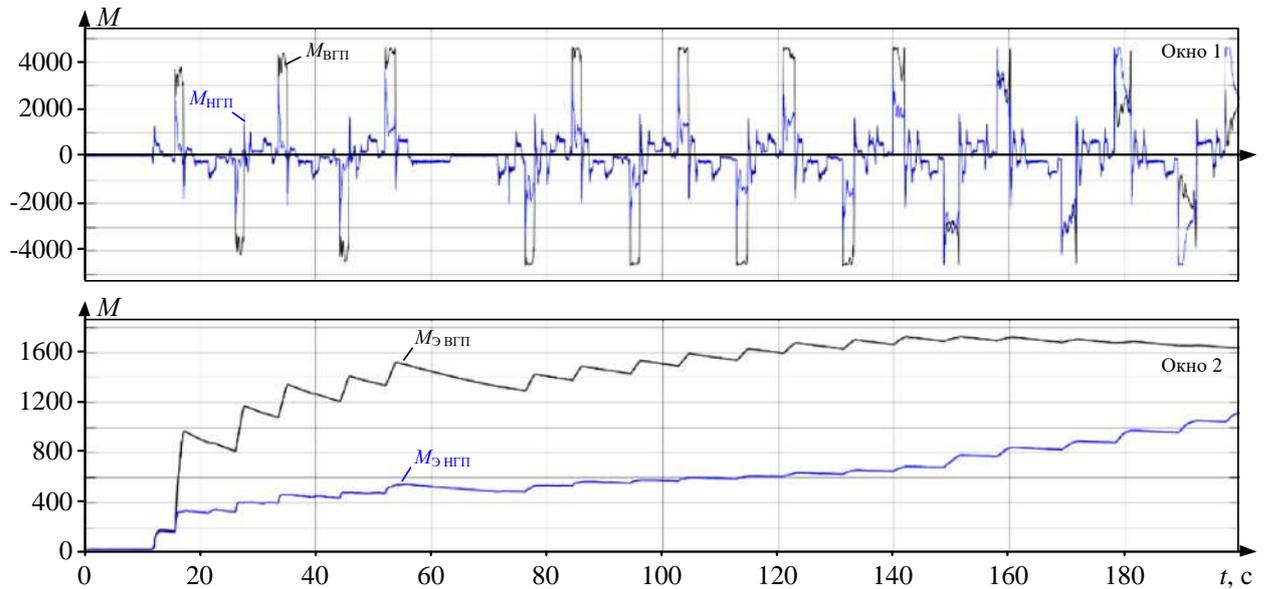


Рисунок 3.17 – Измеренные и эквивалентные моменты двигателей ВГП и НГП при чистовой прокатке пяти заготовок (фрагмент)

Результаты, полученные в конце цикла: эквивалентный момент  $M_{\text{э ВГП}}=1143$  кН·м, момент  $M_{\text{э НГП}}=813$  кН·м, соответствующие среднеквадратичные токи 1135А и 955 А. Таким образом, в анализируемом режиме чистовой прокатки двигатель ВГП загружен в 1,4 раза больше, чем двигатель НГП.

### Обобщение результатов

Для расчета эффективного момента по предложенному алгоритму с помощью идеализированных графиков необходимо хранение данных для 108 точек, что примерно в 1000 раз меньше, чем при обработке в on-line режиме. Относительная ошибка расчета эквивалентного момента при осреднении составляет 6–8%, что приемлемо для оценки состояния двигателя.

По результатам расчетов, выполненных по реальным осциллограммам, превышений среднеквадратичных значений над номинальными нет. Однако имеются значительные динамические превышения моментов и токов на уровне отсечки (240% для момента). При этом экстремальные моменты на

шпинделях могут составлять до 150% момента двигателя, т.е. достигать  $1,5 \cdot 240\% = 360\%$ . Это снижает ресурс шпинделей и электроприводов. Кроме того, при резком темпе нарастании тока в ключах ПЧ это может привести к его отключению.

Таким образом, имеет смысл далее рассматривать не нагрев электрической машины, а вредное ударное воздействие больших моментов. Также необходимо исследовать проблему выравнивания установившихся моментов, т.к. из-за неправильного распределения один из моментов в 2–3 (и более) раза превышает другой. Нужно оптимизировать работу систем задания и согласования нагрузок с целью выравнивания нагрузок в квазиустановившемся режиме прокатки.

## ВЫВОДЫ

1. Получены уточненные аналитические зависимости для расчета давления металла на валки, учитывающие изменения угла захвата и коэффициента трения при различной высоте очага деформации. В них также учитываются особенности ускоренного движения металла при выходе из очага деформации при реверсивной прокатке.

2. Разработаны алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного расчета энергосиловых параметров прокатки при высоких очагах деформации. В результате проверки адекватности разработанной методики показано, что она обеспечивает расчет нагрузок электропривода с ошибкой, не превышающей 7%.

3. В результате анализа эквивалентных нагрузок двигателей ВГП и НГП сделаны следующие выводы:

3.1. При расчете эквивалентных параметров (моментов либо токов) с использованием одинаковых нагрузочных диаграммам ВГП и НГП возникает различие в 2 и более раза по сравнению с величинами, рассчитанными по значениям, измеренным с заданным шагом.

3.2. Проверку двигателей по нагреву целесообразно проводить на основе расчета эффективных моментов или токов, построенных по оцифрованным

временным диаграммам, зафиксированным при прокатке партии конкретного сортамента.

3.3. Сравнительную оценку теплового состояния двигателей ВГП и НГП следует проводить на основе определения отношений эффективных моментов или токов за один и тот же временной интервал.

4. Разработана методика расчета эквивалентных параметров нагрузки (момента, тока, мощности) двигателей верхнего и нижнего валков по параметрам, зафиксированным непосредственно во время прокатки с заданным интервалом времени. Методика применена для расчета эквивалентных нагрузок двигателей на основе данных, полученных при прокатке партии листов. Подтверждено различие нагрузок ВГП и НГП в 3 раза при черновой прокатке и 2 и более раза при чистовой прокатке.

5. С целью уменьшения объема обрабатываемых данных разработаны алгоритм и программа расчета эквивалентных моментов по упрощенным нагрузочным диаграммам. Представлены результаты расчета моментов ВГП и НГП для чистовой прокатки партии из пяти заготовок. Показано, что относительная ошибка расчета по предложенному алгоритму составляет 6–8%, что приемлемо для оценки теплового состояния двигателя.

6. Разработанные решения представляют собой комплексную методику, объединяющую предложенные аналитические зависимости расчета усилий прокатки и алгоритм расчета эквивалентных нагрузок по экспериментальным данным. Данная методика является средством оценки ограничений, накладываемых электроприводом на технологический процесс. Она позволяет выполнять предиктивный (прогностический) анализ нагрузочных режимов двигателей при прокатке листов перспективных сортаментов из труднодеформируемых марок стали.

7. На основании анализа полученных результатов сделан вывод о значительном запасе двигателей ВГП и НГП по нагрузке. При дальнейших исследованиях следует уделить наибольшее внимание ограничению ударных воздействий больших моментов, возникающих при захвате металла валками и исследованию проблемы выравнивания нагрузок двигателей в квазиустановившемся режиме прокатки.

## Глава 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ВАЛКОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КЛЕТИ В РЕЖИМАХ ЛЫЖЕОБРАЗОВАНИЯ И ДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК

При прокатке в «асимметричных условиях», таких как температурные различия верхней и нижней поверхностей раската, различные окружные скорости валков и коэффициенты трения, заготовка (раскат) изгибается в направлении одного из валков, в результате возникает так называемый ski-эффект или эффект «лыжи» [117, 121]. В целом, этот эффект нежелателен, поскольку представляет потенциальную опасность для компонентов стана [115–117]. В то же время оптимальный изгиб переднего конца вверх необходим, т.к. исключает соударение раската с роликами рольганга при выходе из клетки и дальнейшей транспортировке [221].

Как показывает практика, стратегия автоматического управления, реализованная на толстолистовых станах, «не справляется» с задачей формирования оптимальной «лыжи». Это подтверждают результаты эксплуатации станов 5000 ПАО «ММК» и ОАО «ВМЗ» [118, 222, 223]. В результате при одинаковых исходных рассогласованиях скоростей (когда скорость нижнего валка больше скорости верхнего) при прокатке раскатов толщиной 32-300 мм происходит изгиб переднего конца вверх, а при толщинах 8-32 мм – изгиб вниз.

Причиной этой, на первый взгляд, парадоксальной ситуации является то, что в существующей стратегии управления не учитывается влияние технологических факторов. К ним, в первую очередь, относятся градиент температур по толщине раската, который может изменять свое направление, и условия трения на верхнем и нижнем валках [118, 224]. Вместе с тем, несмотря на различную физическую природу, их влияние может быть устранено одним мероприятием – автоматическим регулированием заданной разницы скоростей ВГП и НГП при прокатке переднего конца раската.

При существующей настройке системы задания скоростей электроприводов стана 5000 возникают следующие проблемы [225]:

1. Длина лыжи задается человеко-машинным интерфейсом (НМИ) равной 2800 мм независимо от длины прокатываемой заготовки. При формировании

«лыжи» работа РДН блокируется. В результате возникают ситуации, когда РДН не успевает включиться либо отработать заданное рассогласование. Наиболее часто это происходит на черновой стадии прокатки.

2. При прокатке коротких заготовок нагрузка электропривода нижнего валка в несколько раз превышает нагрузку электропривода верхнего валка (разница составляет до 100% номинального момента).

3. Для формирования «лыжи» подается большой сигнал задания рассогласования скоростей, при проектной настройке равный 15% установившейся скорости электропривода нижнего валка. В результате при большой «лыже» один из двигателей загружен под отсечку, а второй может перейти в генераторный режим, что подтверждается осциллограммами, приведенными в [225-227].

4. Выходной сигнал РДН ограничен на постоянном (низком) уровне, независимо от рассогласования сигналов, поступающих на его вход от датчиков нагрузки электроприводов верхнего и нижнего валков. Темп снижения выходного сигнала РДН в режиме согласования скоростей недостаточно высок.

Для устранения перечисленных проблем необходимо, прежде всего, сократить время формирования «лыжи» и повысить быстродействие РДН. При этом важнейшим требованием является обеспечение заданного радиуса (желательно, постоянного во всех проходах) и заданной, желательно минимальной, длины изогнутого участка. В настоящем разделе представлены разработанные технические решения, направленные на выполнение этих требований.

#### **4.1. Обоснование направлений исследований**

##### ***Технологический причины изгиба переднего конца раската***

Эффект изгиба раската возникает вследствие вертикальной асимметрии очага деформации и соответственно скоростной асимметрии металла под воздействием различных технологических факторов. В статье [118] выполнены моделирование и экспериментальные исследования причин его возникновения при толстолистовой прокатке на стане 5000 ОАО «ВМЗ». В качестве причин возникновения выделены:

- наличие температурного градиента по толщине листа;
- превышение линии прокатки над уровнем подводящего рольганга;

- различие диаметров и/или скоростей рабочих валков;
- различные условия трения между валками и листом.

Под действием перечисленных факторов раскат изгибается в направлении одного из валков, в результате возникает эффект «лыжи», схематично показанные на рисунке 4.1, а [133]. При этом возможен изгиб головного участка раската как вверх (поз. 4 на рисунке 4.1, б), так и вниз (поз. 5) относительно горизонтального положения (поз. 6) [128]. Фотографии конца раската для этих случаев были показаны в гл. 1 на рисунках 1.19, а и б, соответственно.

Вертикальный изгиб характеризуется радиусом кривизны  $R = (4C^2 + L^2)/8C$  и его обратной величиной – кривизной  $\rho = 1/R$ . Положительное значение  $\rho$  соответствует изгибу вверх, отрицательное – изгибу вниз.

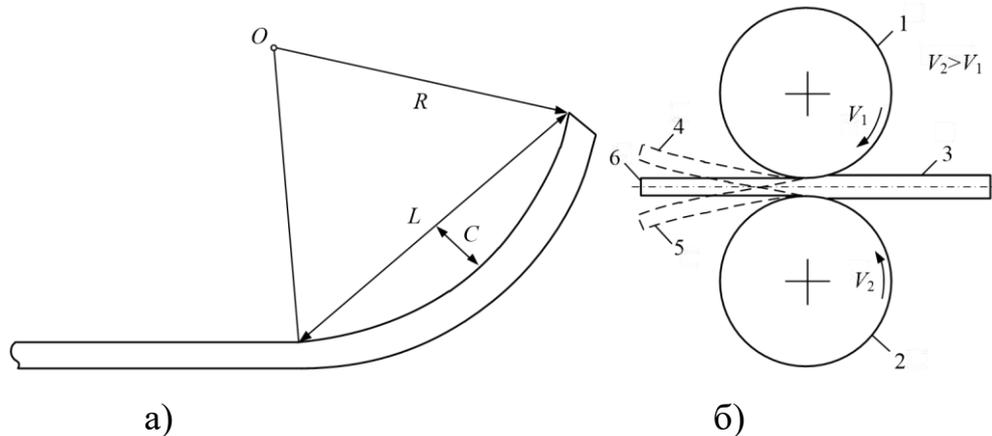


Рисунок 4.1 – Параметры кривизны (а) и направления изгиба (б) головного участка

Исследования влияния этих и других факторов на параметры изгиба раската выполнялись многими авторами. Так, в публикациях [118, 228–230] представлены результаты исследования температурного градиента с использованием программы DEFORM. В работах [231, 232] рассмотрено влияние коэффициентов трения с применением конечно-элементных моделей. Влияние на изгиб раската разницы скоростей верхнего и нижнего валков изучено в публикациях [117, 232–235]. Наиболее полно процессы, возникающие при асимметричной прокатке, представлены в монографиях [224, 236].

По утверждению большинства авторов главной причиной асимметрии раската на выходе из клетки является температура. При наличии температурного градиента по толщине *изгиб всегда происходит в направлении более холодной по-*

*верхности*. Если сляб имеет более холодную нижнюю поверхность, то при прокатке без рассогласования скоростей валков происходит смещение раската от линии прокатки вниз. При этом чем больше длина раската, тем больше величина неплоскостности по длине. Загиб раската вниз объясняется более высокой скоростью течения верхней поверхности (более пластичной) в сравнении с нижней (менее пластичной).

Как утверждают специалисты, де-факто управлять «лыжным эффектом» можно путем корректировки заданных скоростей валков. Однако механизмы его возникновения и чувствительность влияющих параметров при асимметричной прокатке до настоящего времени изучены недостаточно [230, 237–239].

### *Совершенствование режимов системы лыжеобразования и РДН*

Для управления вертикальным изгибом переднего конца раската применяют фактор кинематической асимметрии [128]. Для этого при прокатке переднего участка заданной длины создают рассогласование скоростей валков, величина которого зависит от обжата за проход, толщины и температуры раската. С этой целью в системах задания скоростей электроприводов станов 5000 (в том числе ММК и ВМЗ) реализована стратегия контроля образования «лыжи» в автоматическом и ручном режимах [118]. Автоматический режим предполагает лишь один вариант действий – замедление верхнего валка относительно нижнего. В ручном режиме оператор назначает знак и величину рассогласования в зависимости от ситуации.

Формирование изгиба переднего конца за счет разницы скоростей осуществляет система лыжеобразования. Ее задачей является обеспечение оптимальных параметров «лыжи»: радиуса и протяженности изогнутого участка (рисунк 4.1, а), которая, по возможности, должна быть минимальной. Необходимость оптимизации длины обусловлена тем, что при формировании «лыжи» скорости и моменты нагрузки двигателей существенно различаются, что приводит к ряду негативных последствий.

Для выравнивания моментов используется регулятор деления нагрузок, воздействующий на задания скоростей ВГП и НГП. Система лыжеобразования также воздействует на их скорости, при этом она и РДН осуществляют противоположное регулирование. Поэтому при работе системы лыжеобразования работа

РДН запрещается. Это приводит к тому, что практически во всех проходах черновой прокатки выравнивания нагрузок ВГП и НГП не происходит. Такая ситуация возникает практически всегда при длинах раскатов до 10 метров. Данный вывод подтверждают осциллограммы, представленные в главе 1 на рисунке 1.20. Причиной этого является несогласованная работа РДН и системы лыжеобразования. Это подтверждает актуальность исследования режимов этих систем, с целью обеспечения согласованной работы.

## **4.2. Исследование режимов системы лыжеобразования и РДН при существующей настройке**

### *Структурная схема системы формирования лыжи и РДН*

Структурная схема системы задания скоростей стана 5000, реализующая алгоритмы лыжеобразования и деления нагрузок, представлена на рисунке 4.2. На вход системы подается сигнал задания скорости  $V_3$ , который формируется интерполятором по заданной траектории движения [91]. На выход задатчика интенсивности ЗИ подключен блок формирования «лыжи», в его функции входит обеспечение заданного радиуса и длины изогнутого участка (длины «лыжи»). Эти параметры формируются системой НМІ, их соотношение может корректироваться оператором. Блок регулирует задание скорости электропривода верхнего вала в соответствии с вычисленным темпом снижения рассогласования скоростей (задания лыжи в %) после захвата. Скорость электропривода НГП является базовой и зависит только от заданной скорости прокатки. Темп снижения задания регулируется воздействием на ЗИ. По окончании формирования «лыжи» осуществляется переключение входа блока на нулевой сигнал (на схеме не показан).

Разница скоростей, необходимая для формирования «лыжи» с заданными параметрами, вызывает рассогласование моментов электроприводов. Для компенсации рассогласования предназначен РДН, в его функции входят устранение рассогласований скоростей после «лыжи», компенсация отклонений, возникающих при вводе в систему заданий диаметров валков, их износа и других влияющих факторов. Данный регулятор имеет пропорционально-интегральную структуру. Принцип его действия поясняется непосредственно включением в схему системы управления. При возникновении рассогласования измеряемых

сигналов «Момент ВГП» и «Момент НГП» на выходе РДН появляется управляющий сигнал, который с разными знаками поступает на входы схем задания скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков.

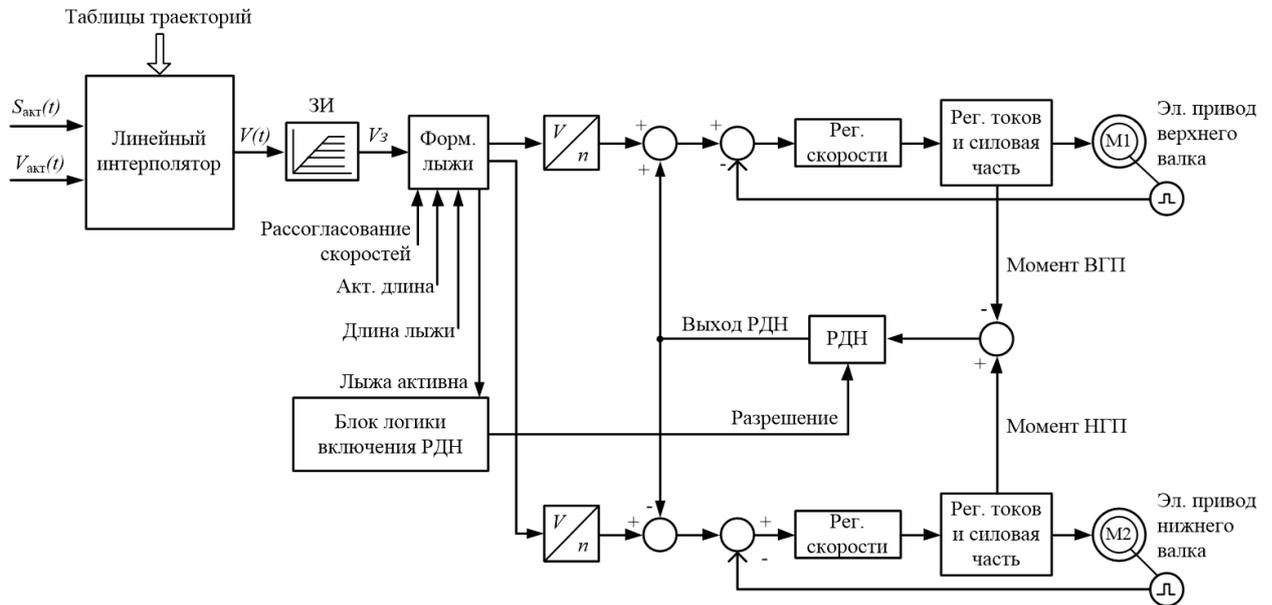
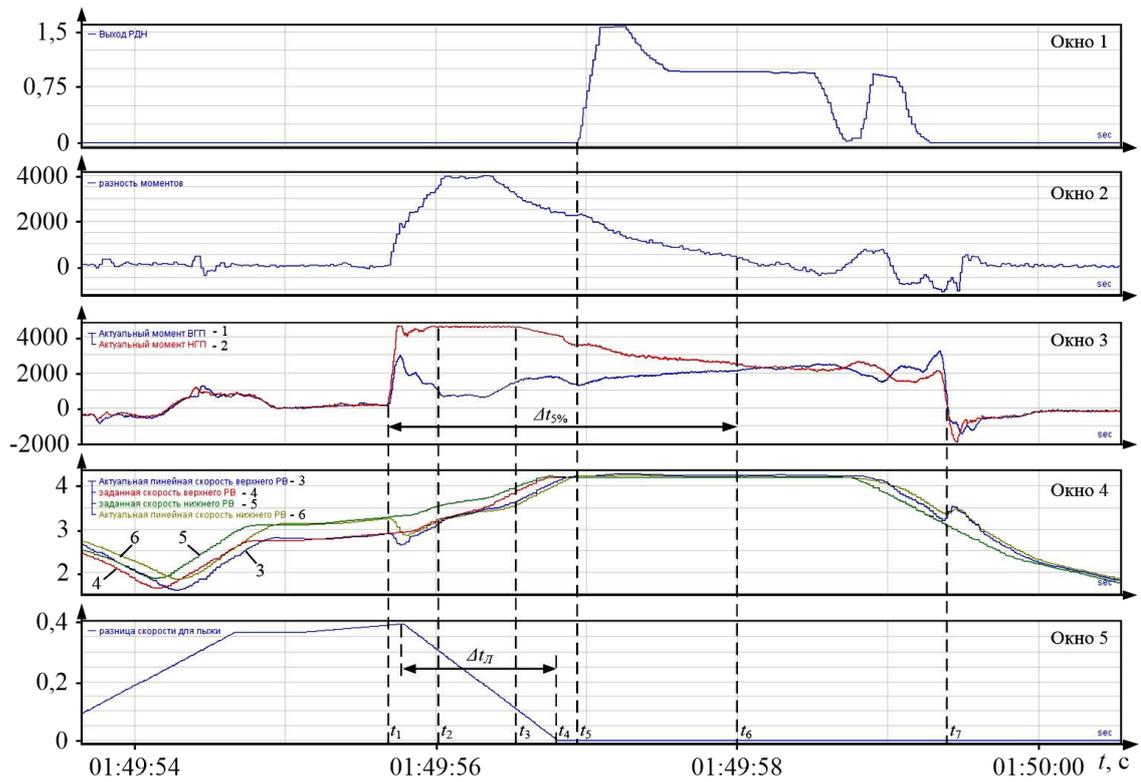


Рисунок 4.2 – Структурная схема системы управления электроприводами с реализацией функций формирования «лыжи» и деления нагрузок

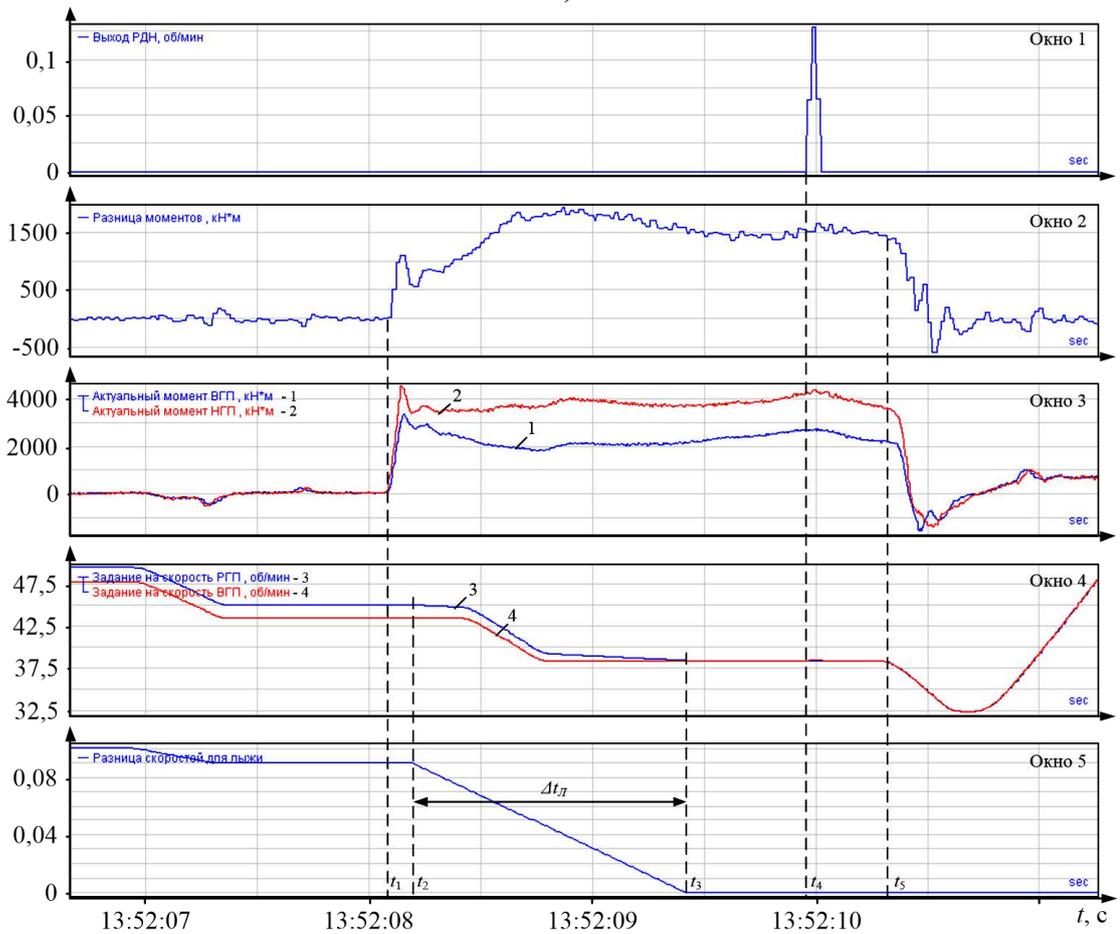
Анализ структуры, представленной на рисунке 4.2, показывает, что требования, предъявляемые к системе лыжеобразования и РДН, противоречивы. Поэтому в действующем алгоритме управления скоростными режимами их воздействия разведены во времени. Когда формируется «лыжа», РДН не работает, он включается в работу после окончания изгиба полосы через заданную паузу. Управление режимами осуществляется по сигналу разрешения, поступающего от блока логики включения РДН.

#### *Анализ осциллограмм при существующей настройке*

На рисунке 4.3 приведены осциллограммы скоростей и моментов двигателей верхнего и нижнего валков, характеризующие распределение нагрузки во время прокатки в интервале времени  $t_1-t_7$ . Из них следует, что при прокатке коротких заготовок фактически отсутствует выравнивание нагрузок электроприводов, которое должно обеспечиваться средствами РДН. Момент нагрузки НГП (рис. 4.3, а кривая 1) в интервале  $t_2-t_3$  более чем в 2 раза превышает нагрузку ВГП (кривая 2). При этом он достигает уровня ограничения 4200 кН·м, в то время как момент ВГП находится в пределах 800–1900 кН·м.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Осциллограммы скоростей и моментов двигателей при существующей настройке (а) и без включения РДН в работу (б)

Выравнивание моментов происходит в интервале  $t_2-t_4$ , при этом сигнал «Разница скоростей для лыжи» (окно 5) снижается с заданным темпом. Далее в момент  $t_5$  появляется сигнал на выходе РДН (окно 1), после чего скорости (окно 4) и моменты (окно 3) выравниваются принудительно. Однако темп «сближения» моментов таков, что снижение их разности до нуля (окно 2) происходит только к моменту времени  $t_6$ . В результате большая часть прокатки осуществляется при неравенстве моментов. Это подтверждает, что существующая настройка РДН не обеспечивает согласования нагрузок двигателей ВГП и НГП.

На рисунке 4.3, б показаны аналогичные осциллограммы для случая, когда РДН в течение всего цикла прокатки не включается в работу. В момент времени  $t_3$  происходит попытка его включения, что подтверждает появление кратковременного импульса выходного сигнала РДН на осциллограмме в окне 1. В продолжение всего времени прокатки момент НГП в 1,5–2 раза превышает момент ВГП. Разница моментов составляет около 1500 кН·м, что соответствует 78% номинального момента двигателя, равного 1,91 МН·м.

Анализ осциллограмм, представленных на рисунке 4.3, а, позволил сделать следующие выводы:

1. При работе системы лыжеобразования работа РДН блокируется. Сигнал коррекции скорости на выходе РДН (окно 1) появляется только после снижения до нуля сигнала «Разница скорости для лыжи» (окно 5). Причем он подается с задержкой во времени и практически сразу же достигает уровня насыщения.

2. Во время работы системы лыжеобразования момент НГП (окно 3) достигает уровня ограничения (220% номинального момента). Нагрузка ВГП при этом приблизительно в 2 раза ниже номинальной.

3. После появления сигнала на выходе РДН (окно 4) происходит медленный процесс выравнивания моментов.

Представленные результаты подтвердили, что причиной различий нагрузок электроприводов является несогласованная работа РДН и системы лыжеобразования. Второй причиной неудовлетворительного качества регулирования является низкий темп снижения рассогласования скоростей, показанный в интервале  $\Delta t_{\text{л}}$  на осциллограмме «Разница скоростей для лыжи» (окно 5). Снижение задания до нуля происходит более чем за 1 с при общем времени прокатки около

3,5 с. Увеличение темпа регулирования скорости электропривода одного верхнего валка невозможно, т.к. приведет к выходу сигнала регулятора на ограничение. Наиболее простым и эффективным решением в данном случае является одновременное воздействие на скорости электроприводов обоих валков. Поэтому снижение времени работы в режиме лыжеобразования предложено осуществлять за счет формирования разных темпов задания скоростей ВГП и НГП. Это должно обеспечить заданный изгиб и длину «лыжи» за меньший промежуток времени и тем самым повысить быстродействие системы.

### **4.3. Методика согласования режимов систем лыжеобразования и деления нагрузок**

#### **4.3.1. Основные позиции методики**

Разрабатываемый способ согласования нагрузок должен обеспечить следующие требования:

1. Повышение быстродействия системы лыжеобразования, с целью минимизации длины изогнутого участка при обеспечении заданной кривизны, одинаковой для всех проходов. Автоматическое вычисление и задание длины лыжи в каждом проходе.

2. Сокращение паузы между окончанием формирования «лыжи» и временем подключения РДН. Так, на рисунке 4.4, б пауза  $\Delta t_{II}$  составляет  $\sim 0,5$  с, что соответствует 25% времени прокатки (интервал  $t_1-t_7$  составляет около 2 с). Это делает невозможным выравнивание нагрузок.

3. После включения РДН форсированное согласование скоростей и соответственно выравнивание нагрузок ВГП и НГП. С этой целью предлагается:

– «временное» отключение интегральной части для уменьшения постоянной времени РДН;

– увеличение коэффициента пропорциональной части регулятора.

#### ***Методика решения задач***

1. Решение первой задачи потребовало совершенствования структуры и алгоритма существующей системы лыжеобразования, что, по сути, потребовало разработки способа управления электроприводами ВГП и НГП в режиме прокатки переднего конца раската.

2. Решение второй задачи обеспечивается путем перенастройки существующего алгоритма задания скорости без изменения структуры системы лыжеобразования и РДН.

3. Решение третьей задачи потребовало разработки способа согласования скоростей в режиме совместной прокатки и совершенствования структуры РДН.

*Перечисленные задачи, по существу, представляют собой совокупность методов (методику), обеспечивающих согласование режимов и повышение быстродействия систем лыжеобразования и деления нагрузок.* Ниже рассматриваются разработанные способы управления, составляющие основу такой методики, разработанной применительно к электроприводам клетки стана 5000.

#### **4.3.2. Способ управления электроприводами в режиме лыжеобразования**

##### *Пояснения к формированию параметров «лыжи»*

В основу разрабатываемого усовершенствованного алгоритма лыжеобразования положен принцип обеспечения идентичности параметров «лыжи» во всех проходах. Под этим подразумевается обеспечение одинаковых радиусов закругления и длины нижней поверхности раската при различных скоростях захвата и различной толщине металла на выходе клетки. При разработке способа управления ВГП и НГП в качестве прототипа принят способ лыжеобразования слитка на реверсивном стане горячей прокатки с индивидуальным приводом валков, согласно авторскому свидетельству [240]. Данный способ поясняет рисунок 4.4, а, на котором схематично показан процесс формирования «лыжи».

В описании прототипа приводятся следующие рассуждения (они также приняты за основу при разработке нового способа). Частота вращения верхнего валка  $n_2$  меньше частоты вращения нижнего валка  $n_1$  на величину рассогласования  $\Delta n$ , т.е.

$$n_2 = n_1 - \Delta n. \quad (4.1)$$

Окружные скорости  $V_{\text{низ}}$  нижнего и  $V_{\text{верх}}$  верхнего валков определяются выражениями

$$V_{\text{низ}} = 2\pi R_1 \cdot n_1, \quad (4.2)$$

$$V_{\text{верх}} = 2\pi R_2 \cdot n_2, \quad (4.3)$$

где  $R_1, R_2$  – радиусы нижнего и верхнего валков.

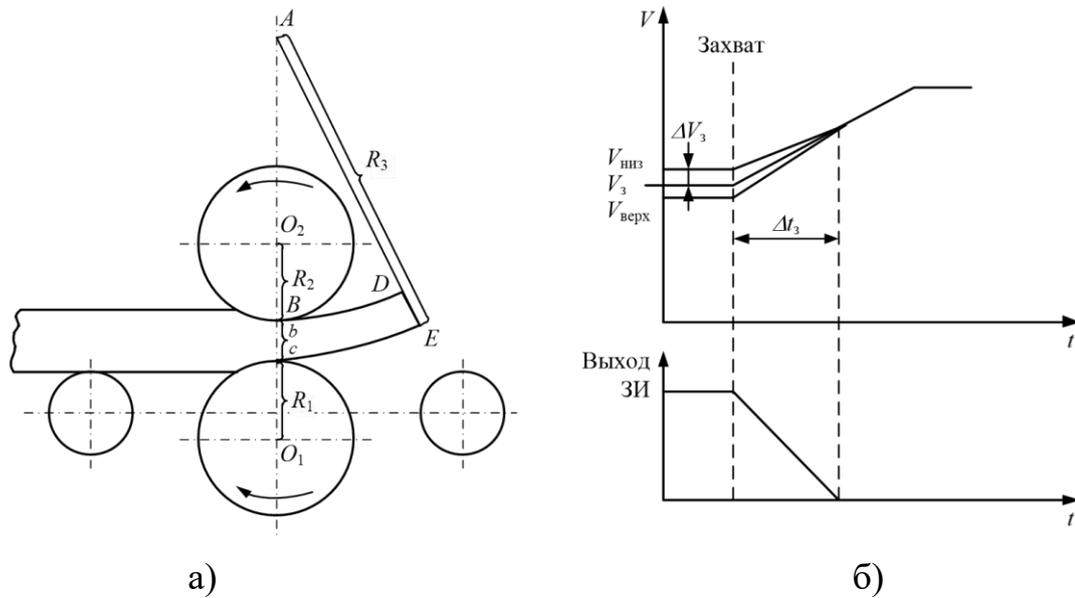


Рисунок 4.4 – Схема формирования изгиба конца раската (а) и графики заданий линейных скоростей ВГП и НГП (б)

Окружные скорости нижней  $V_H$  и верхней  $V_B$  поверхностей раската

$$V_H = 2\pi R_3 \cdot n_3, \quad (4.4)$$

$$V_B = 2\pi(R_3 - h) \cdot n_3, \quad (4.5)$$

где  $n_3$  – частота вращения любой точки «лыжи» относительно центра в точке  $A$ ;  $R_3$  и  $h$  – заданный радиус и толщина «лыжи».

Принимается, что влияние опережения на скорость выхода металла из валков несущественно, поэтому с небольшой погрешностью можно считать, что  $V_{\text{низ}} \approx V_H$  и  $V_{\text{верх}} \approx V_B$ . Приравняв правые части выражений (4.2), (4.4) и (4.3), (4.5), получаем

$$n_1 \cdot R_1 = n_3 \cdot R_3 \quad (4.6)$$

$$n_2 \cdot R_2 = n_3 \cdot (R_3 - h). \quad (4.7)$$

Определив  $n_3$  из (4.6) и подставив в (4.7), имеем

$$n_2 = n_1 \frac{R_1 \cdot (R_3 - h)}{R_2 \cdot R_3}. \quad (4.8)$$

С учетом того, что диаметры прокатных валков одинаковы, выражение (4.8) приобретает вид

$$n_2 = n_1 \frac{(R_3 - h)}{R_3} = n_1 - n_1 \frac{h}{R_3}. \quad (4.9)$$

Из формулы (4.9) с учетом (4.1) получено выражение для величины рассогласования частот вращения валков при лыжеобразовании

$$\Delta n_1 = n_1 \frac{h}{R_3}. \quad (4.10)$$

Из полученной зависимости (4.10) следует, что при заданном радиусе «лыжи»  $R_3$  величина рассогласования скоростей вращения  $\Delta n$ , обеспечивающая постоянство  $R_3$  во всех пропусках, пропорциональна частоте вращения нижнего вала  $n_1$  и толщине  $h$  раската после клетки (толщине «лыжи»).

Длина  $L_{\text{факт}}$  прокатанной части переднего конца определяется интегрированием частоты вращения вала  $n_1$ , начиная от момента захвата. Для нижней, обращенной к рольгангу, поверхности раската выражение длины прокатанной части

$$L_{\text{факт}} = \int n_1 \cdot dt \quad (4.11)$$

Формирование постоянной длины «лыжи»  $L_{\text{факт}}$  может быть обеспечено путем регулирования параметров по зависимости (4.9). При этом следует принять во внимание следующие условия:

1. Радиус  $R_3$  изменять нельзя, т.к. заданный изгиб переднего конца должен быть выдержан. Соответственно соотношение  $h/R_3$  остается заданным и не подлежит регулированию.
2. Скорость  $n_1$  также задается программой прокатки, к тому же в режиме ускорения после захвата она линейно растет.

Поэтому формирование длины «лыжи» может быть осуществлено только изменением разницы скоростей  $\Delta n$ , т.е. при заданной скорости  $n_1$  – регулированием скорости верхнего вала  $n_2$ . Причем в режиме ускорения скорость  $n_2$  должна уменьшаться пропорционально росту  $n_1$ .

#### ***Способ формирования заданной длины «лыжи»***

На рисунке 4.4, б представлены графики задания скоростей двигателей верхнего и нижнего валков, поясняющие алгоритм задания скоростей согласно разработанному способу [226]. Они построены после «обратного» перехода от частот вращения двигателей к окружным скоростям валков.

Для формирования оптимальной длины «лыжи» должно поддерживаться соотношение скоростей двигателей верхнего и нижнего валков при заданном темпе его снижения. Темп изменения задания скорости (сигнала «выход ЗИ») при фиксированной длине «лыжи»  $L_3$  зависит от заданных параметров: средней скорости прокатки  $V_3$  и рассогласования линейных скоростей валков  $\Delta V_3$ :

$$dV_3/dt = \frac{V_3 \cdot \Delta V_{3(\text{нач})}}{L_3}$$

или в приращениях  $\Delta V_3/\Delta t = \frac{V_3 \cdot \Delta V_{3(\text{нач})}}{L_3}$ .

В каждый момент времени

$$L_{\text{Факт}} = \frac{V_3 \cdot \Delta V_{3(\text{нач})} dt}{dV_3} = \frac{dL \cdot \Delta V_{3(\text{нач})}}{dV_3},$$

где  $dL = V_3 \cdot dt$  – элементарная длина раската за элементарное время после захвата при неизменной заданной средней скорости и постоянном темпе ее снижения.

Переходя к приращениям, имеем:

$$L_{\text{Факт}} = \frac{V_3 \cdot \Delta V_{3(\text{нач})} \Delta t}{\Delta V_3} = \frac{\Delta L \cdot \Delta V_{3(\text{нач})}}{\Delta V_3}$$

Из выражения следует, что для обеспечения постоянства длины мы можем регулировать две величины: время изменения скорости  $\Delta t$ , влияющее на  $\Delta L$ , и начальное рассогласование скоростей  $\Delta V_3$ .

Согласно разработанному способу:

1. Задают радиус  $R_3$  и длину лыжи  $L_3$ , одинаковые для всех проходов.
2. Начальное рассогласование частот вращения двигателей вычисляют по зависимости:

$$\Delta n = n_1 \frac{h}{R_3} \text{ или } n_1 - n_2 = n_1 \frac{h}{R_3}, \text{ или } n_2 = n_1 - n_1 \frac{h}{R_3}.$$

3. Регулирование длины «лыжи» выполняют согласно зависимостям:

$$\Delta V_3/\Delta t = \frac{V_3 \cdot \Delta V_{3(\text{нач})}}{L_3} \text{ или } L_3 = \frac{V_3 \cdot \Delta V_{3(\text{нач})}}{\Delta V_3/\Delta t} \quad (4.12)$$

Таким образом, чтобы обеспечить одинаковую заданную длину «лыжи»  $L_3$  при разных начальных рассогласованиях скоростей  $\Delta V_3$ , нужно темп снижения скорости устанавливать пропорциональным величине  $\Delta V_{3(\text{нач})}$ .

Это будет справедливым, если процесс формирования лыжи происходит на установившейся скорости. Однако по технологии прокатки на толстолистовых станах после захвата металла валками осуществляется разгон электроприводов,

соответственно условие (4.12) нарушается. Поэтому в этом случае должно регулироваться соотношение скорости  $n_1$  и  $n_2$ , желательно, в следящем режиме.

Реализация способа обеспечивается системой задания параметров «лыжи», структура которой представлена на рисунке 4.5.

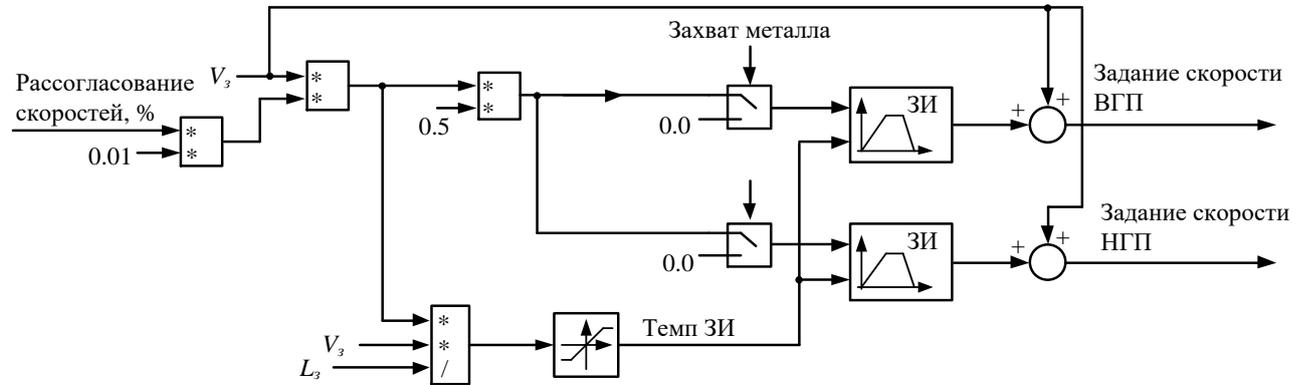


Рисунок 4.5 – Схема системы формирования «лыжи»

Перед захватом металла устанавливается заданная разность  $\Delta V_3$  линейных скоростей нижнего  $V_{\text{низ}}$  и верхнего  $V_{\text{верх}}$  валков относительно значения  $V_3$  (см. рис. 4.4, б). Величина рассогласования вычисляется по значениям скорости  $V_3$  и длины  $L_3$  изогнутого участка и подается на входы датчиков интенсивности (сигнал «Темп ЗИ»). Датчики формируют «добавки» к скорости  $V_3$  электроприводов с разными знаками. Коммутация добавочных сигналов выполняется управляемыми ключами (селекторами) по сигналу о захвате металла. В момент захвата они подключают на входы ЗИ нулевой сигнал, в результате в интервале  $\Delta t_3$  их выходные сигналы снижаются с заданным темпом. Темп ЗИ вычисляется по формуле

$$\frac{dV_3}{dt} = \frac{V_3 \cdot \Delta V_3}{L_3}.$$

В этом случае выходной сигнал достигает нулевого значения, когда головная часть раската пройдет расстояние, равное  $L_3$ .

Этот алгоритм соответствует разработанному способу управления лыжеобразованием. В проектом варианте осуществляется коррекция скорости только электропривода верхнего валка, при этом задание скорости НГП остается постоянным.

**Отличительные признаки разработанного способа:**

1. Для обеспечения постоянства длины «лыжи» темп снижения рассогласования скоростей устанавливают обратно пропорциональным начальному рассогласованию скоростей  $\Delta V_{z(нач)}$ . В этом случае заданное значение  $L_3$  будет обеспечено как при постоянной скорости после захвата, так и в режиме ускорения.

2. Если в известном способе согласование скоростей осуществляется путем снижения скорости только электропривода верхнего валка, то в разработанном способе осуществляется регулирующее воздействие на обе скорости  $n_1$  и  $n_2$ . Таким образом, обе скорости будут отслеживать увеличение задания (рост задания  $V_3$ ) в следящем режиме. В результате будет достигнуто снижение времени формирования лыжи, что обеспечит сокращение длины изогнутого участка при заданной кривизне.

В целом, реализация способа обеспечит уменьшение продолжительности согласования скоростей в режиме лыжеобразования и соответственно времени работы двигателей с разными нагрузками. Это обеспечит решение первой задачи методики, сформулированной выше.

#### **4.3.3. Способ выравнивания нагрузок электроприводов в квазиустановившемся режиме**

Согласно разработанному способу, с целью повышения быстродействия в режиме выравнивания нагрузок, осуществляют форсированное согласование скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков за счет исключения интегральной части РДН и увеличения коэффициента усиления пропорциональной части. По окончании данного режима в установившемся режиме прокатки обеспечивают пропорционально-интегральное регулирование нагрузок с целью компенсации рассогласований скоростей, а коэффициент усиления переключают на расчетное значение. При этом регулирование рассогласования осуществляют путем суммирования с разными знаками сигнала с выхода РДН с сигналами задания скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков, как это показано на рисунке 4.3.

Реализация разработанного способа потребовала разработки блока деления нагрузок с переключающейся структурой регулятора, который рассматривается ниже.

### Схема блока деления нагрузок

Разработанный блок РДН с регулятором с переключаемой структурой имеет пропорциональный и интегральный каналы, которые вступают в работу не одновременно. Схема блока представлена на рисунке 4.6 [226]. Помимо структуры, его отличием от проектного варианта является переменный коэффициент усиления  $K_p$  регулятора.

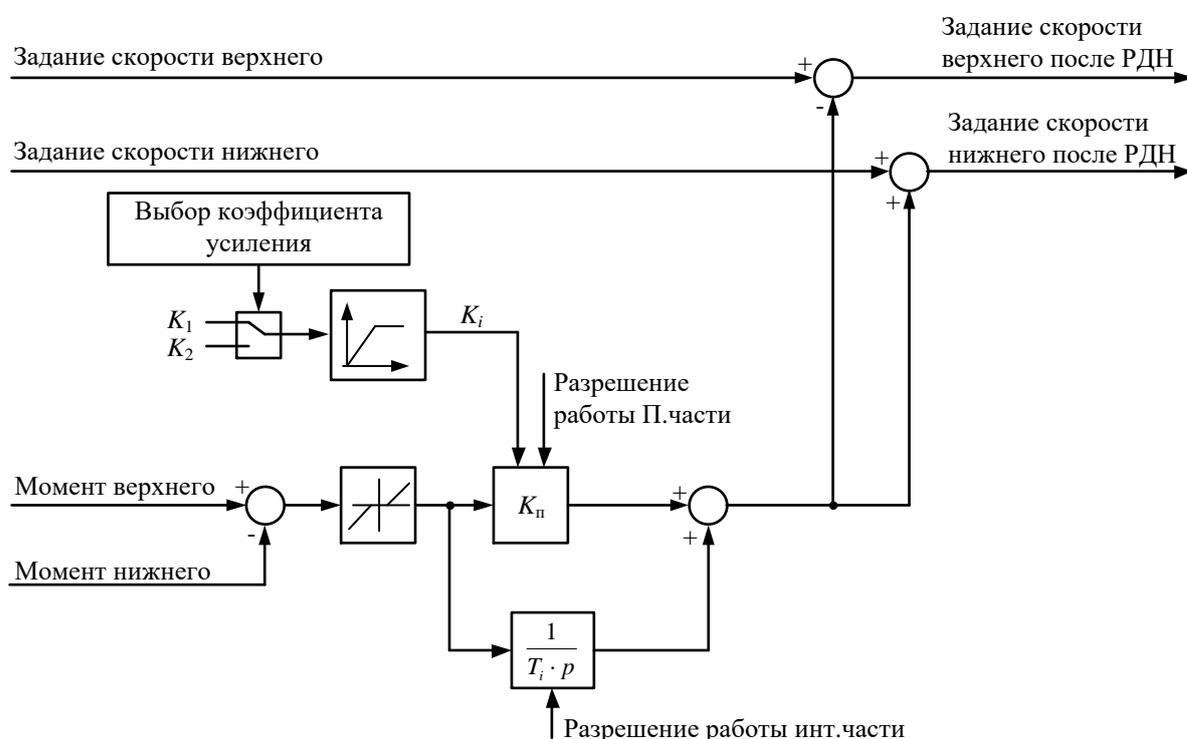


Рисунок 4.6 – Схема устройства, обеспечивающего реализацию разработанного способа согласования нагрузок ВГП и НГП

Если момент электропривода верхнего валка превышает момент электропривода нижнего валка, на входе регулятора формируется «ошибка» с положительным знаком. В этом случае сигнал на выходе РДН также положительный, он воздействует на скорость ВГП в сторону ее уменьшения, а на скорость НГП – в сторону увеличения. При обратном соотношении моментов осуществляются регулирующие воздействия с противоположными знаками. В результате формируются разнонаправленные коррекции заданий скоростей, что повышает быстродействие при компенсации их рассогласования. Сигнал на разрешение работы

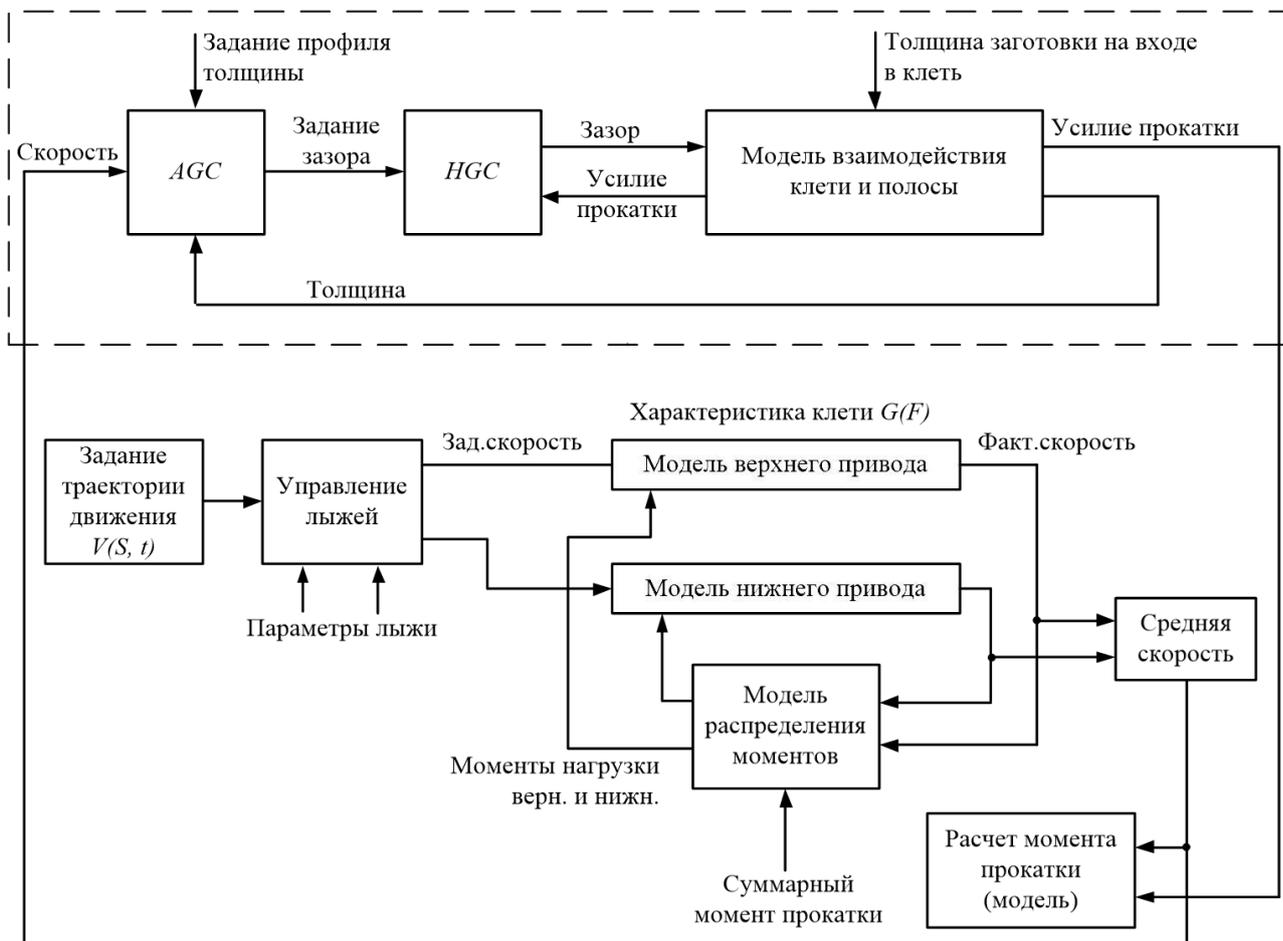
П-части подается в момент окончания действия лыжи без паузы. Таким образом обеспечивается *первый отличительный признак разработанного способа*.

Для реализации *второго отличия* до захвата металла валками на селектор  $K_{\text{п}}$  выбора коэффициентов усиления пропорциональной части подается увеличенное (по сравнению с расчетным) значение коэффициента  $K_i=K_1$ . Большой коэффициент обеспечивает повышение быстродействия при компенсации рассогласования заданий скоростей. В результате обеспечивается форсированное выравнивание скоростей ВГП и НГП и соответственно нагрузок. Как показали исследования, время снижения рассогласования уменьшается в 2-2,5 раза.

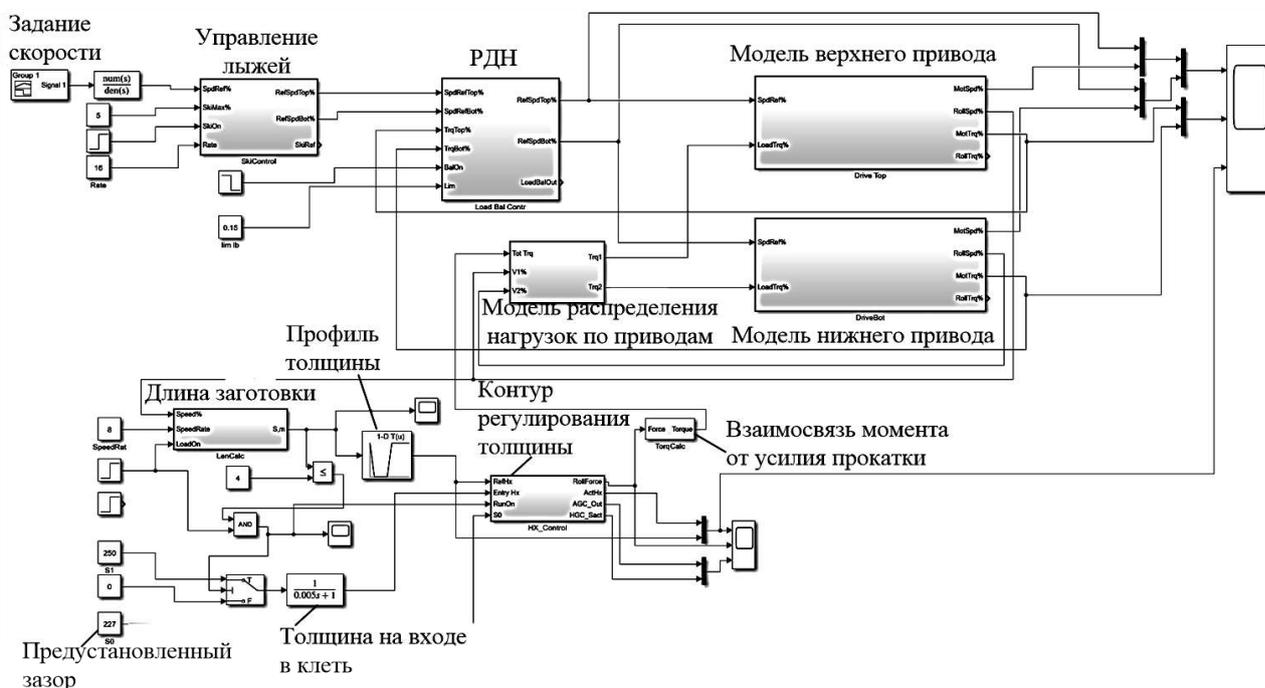
После уменьшения рассогласования моментов до 10% установившегося значения производится переключение на второе (меньшее) значение коэффициента усиления  $K_i=K_2$ . Одновременно вводится в работу интегральная часть, необходимая для компенсации рассогласований моментов, возникающих в установившемся режиме прокатки. Она подключается по сигналу «Разрешение работы интегральной части», поступающему в момент окончания режима РДН и обеспечивает достаточно большую постоянную времени  $T_i$ . Для того чтобы не возникало регулирующих воздействий на скорости при малых отклонениях моментов электроприводов, на вход регулятора включено звено с зоной нечувствительности. Зона нечувствительности устанавливается равной разности  $\Delta V_3$ , определяющей начальное рассогласование скоростей в режиме формирования «лыжи» (рисунок 4.4, б).

#### 4.4. Разработка имитационной модели

Общая структура разработанной модели взаимосвязанных электроприводов верхнего и нижнего валков и гидравлических НУ в структуре САПР представлена на рисунке 4.7, а [241]. На рисунке 4.7, 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 рассматриваются ниже.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Структурная схема имитационной модели взаимосвязанных электроприводов ВГП и НГП и гидравлических НУ (а) и ее реализация в Matlab Simulink (без НУ)

При реализации структуры использована упрощенная модель электромеханических систем валков, структурная схема которой представлена в гл. 2 на рисунке 2.6, б. Описание модели приведено в п. 2.3, схема в пакете Simulink – на рисунке 4.8.

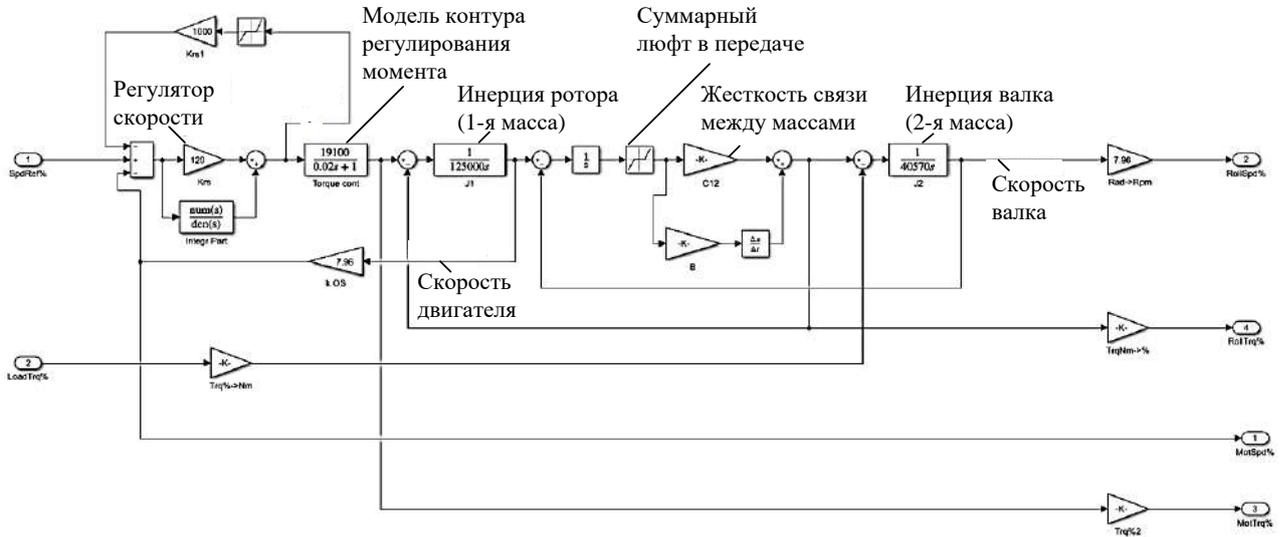
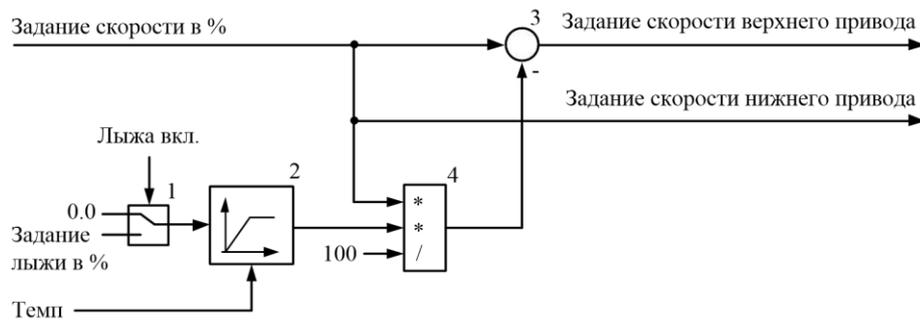


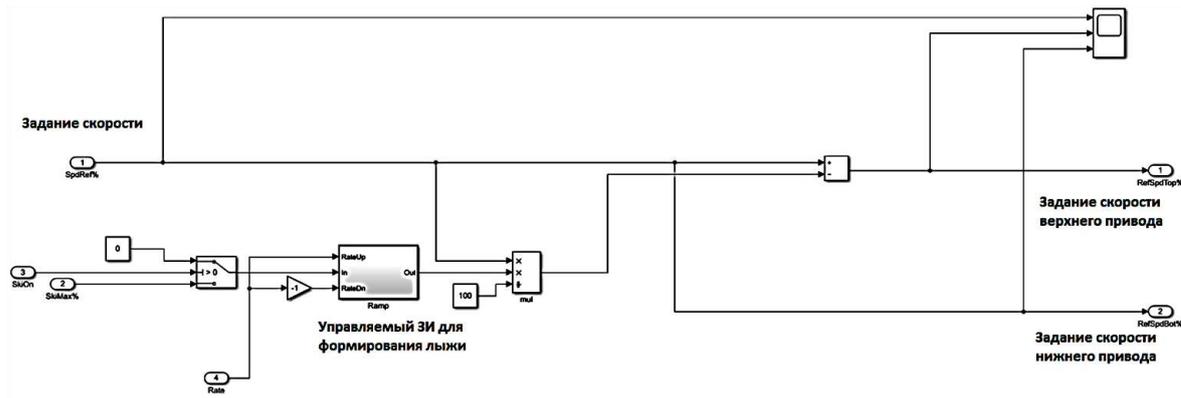
Рисунок 4.8 – Схема модели двухмассовой электромеханической системы валка

Структура модели блока задания разницы скоростей (управления «лыжей») представлена на рисунке 4.9. Она является упрощенным вариантом схемы, представленной на рисунке 4.5. Данный блок обеспечивает снижение задания скорости ВГП в соответствии с вычисленным темпом. Пояснения к его работе даны в п. 4.4.1.

Схема модели блока имитации распределения моментов нагрузки между электроприводами верхнего и нижнего валков представлена на рисунке 4.10. Она описывает изменение моментов в зависимости от разницы линейных скоростей двигателей ВГП и НГП и соответствует структуре, представленной на рисунке 4.6. Входными сигналами являются суммарный момент нагрузки на оба электропривода и относительные скорости ( $V_1, \%$  и  $V_2, \%$ ). Выходные сигналы – это моменты двигателей. В данной модели разница моментов формируется пропорциональной рассогласованию скоростей. Для повышения точности моделирования в схему включен фильтр с коэффициентом усиления  $K_1$  и постоянной времени  $T_{f2}$ . Их значения определены по результатам анализа осциллограмм. Более подробно описание моделей приведено в публикациях [242, 243].



а)



б)

Рисунок 4.9 – Структура модели блока управления «лыжей» (а) и схема в Matlab Simulink (б): 1 – селектор; 2 – задатчик интенсивности; 3 – сумматор; 4 – умножитель

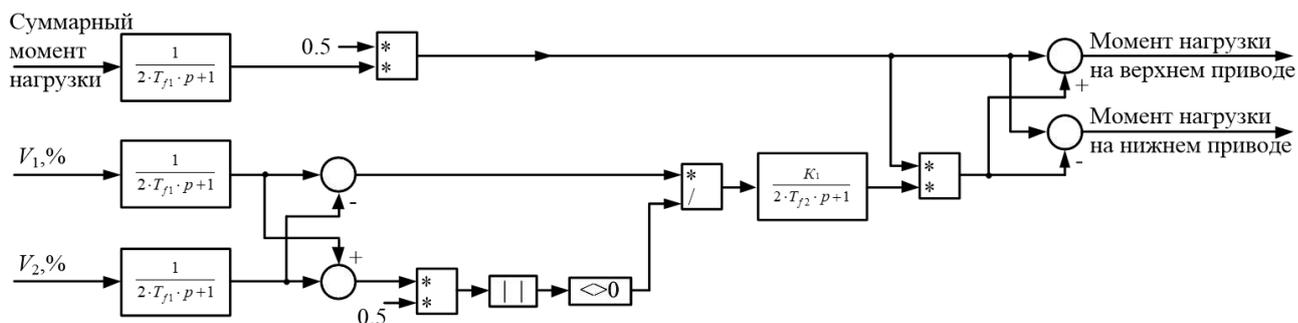


Рисунок 4.10 – Структура модели распределения нагрузок ВГП и НГП

## 4.5. Исследования методом математического моделирования

### 4.5.1. Переходные процессы при моделировании разработанного способа лыжеобразования

Результаты моделирования переходных процессов скоростей и моментов электроприводов, соответствующие проектной настройке системы лыжеобразо-

вания и РДН, представлены на рисунке 4.11, а [222]. На рисунке 4.11, б представлены аналогичные процессы, полученные при реализации разработанного способа.

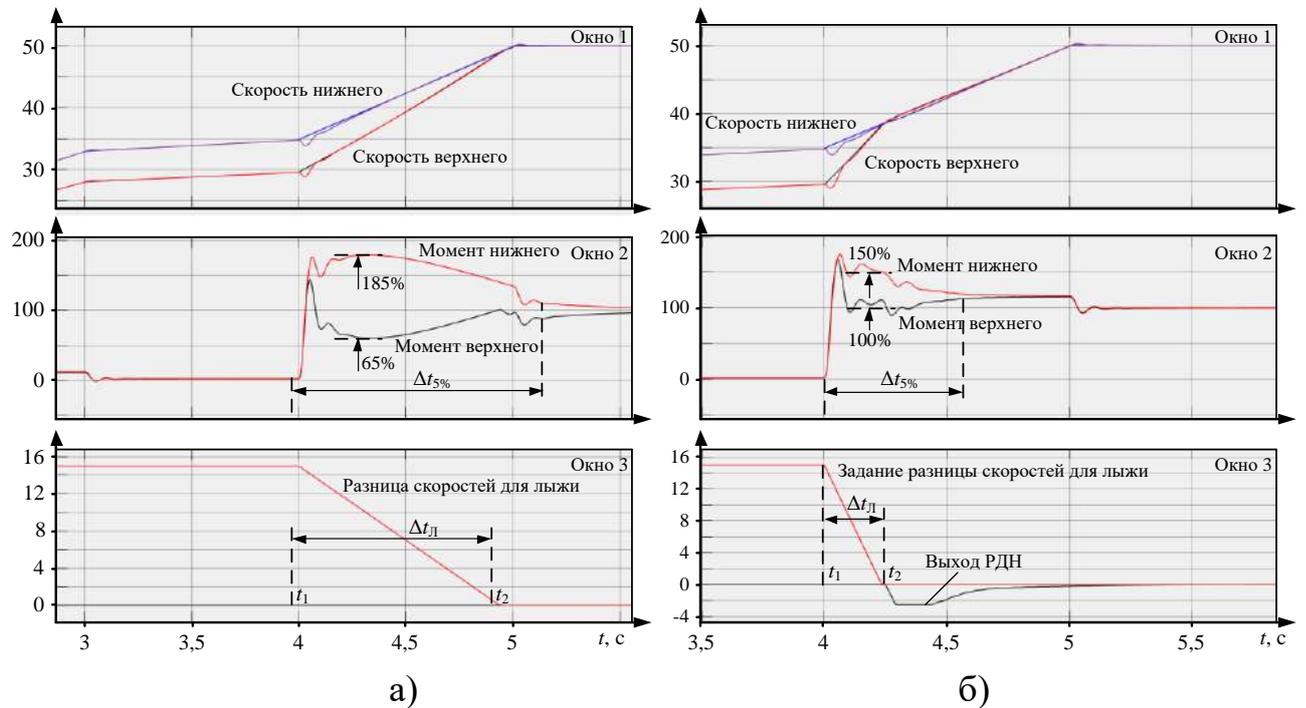


Рисунок 4.11 – Зависимости линейных скоростей и моментов электроприводов при реализации проектного (а) и разработанного (б) алгоритмов управления

На рисунках показаны: в окне 1 – заданные и фактические линейные скорости; в окне 2 – моменты двигателей; в окне 3 – выходной сигнал РДН. Масштабы по осям ординат указаны в процентах, для перевода в абсолютные величины следует воспользоваться соотношениями: масштаб скоростей – 100%=8м/с; масштаб моментов – 100%=1910 кН·м; выход РДН – 100%=0,8 м/с. Начальное рассогласование скоростей, необходимое для формирования «лыжи», в обоих случаях установлено равным проектному заданию 15%.

Принципиальным отличием анализируемых процессов является регулируемое изменение темпа снижения задания скорости после захвата. Так, на рисунке 4.11, а темп замедления в интервале  $\Delta t_{Л} = t_2 - t_1$  составляет 16%/с, на рисунке 4.11, б, согласно разработанному способу, осуществляется форсированное снижение заданного рассогласования скоростей путем сообщения валкам ускорений

разного знака. Темп снижения вычисляется автоматически по заданным значениям радиуса кривизны изогнутого участка, длине «лыжи» и скорости прокатки, как это изложено выше в описании способа. В предложенном случае он увеличен в 3,6 раза ( $\Delta t_{\text{Л}}=0,25$  с на рисунке 4.11, б при  $\Delta t_{\text{Л}}=0,9$  с на рисунке 4.11, а). Результаты сопоставления моментов представлены таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Рассогласования моментов при анализе сравниваемых вариантов

| Вид анализа   | № рисунка (варианта)    | Момент двигателя, % |     |           | Интервал $\Delta t_{5\%}$ , с |
|---------------|-------------------------|---------------------|-----|-----------|-------------------------------|
|               |                         | НПП                 | ВПП | Кратность |                               |
| Моделирование | 4.11, а (исходный)      | 185                 | 65  | 2,8       | 1,2                           |
|               | 4.11, б (разработанный) | 150                 | 100 | 1,5       | 0,6                           |
| Эксперимент   | 4.3, а (исходный)       | 225                 | 47  | 4,8       | 2,2                           |
|               | 4.13 (разработанный)    | 210                 | 110 | 1,9       | 0,9                           |

В результате анализа кривых на рисунке 4.11 и данных таблицы сделаны следующие выводы:

1. Характер зависимостей скоростей и моментов на рисунке 4.11, а с достаточной точностью соответствуют осциллограммам, представленным на рисунке 4.3. Это косвенно подтверждает адекватность модели исследуемому объекту.

2. Момент двигателя нижнего валка в квазиустановившемся режиме после захвата на рисунке 4.11, а превышает аналогичный момент двигателя верхнего валка в 2,8 раза (185% и 65%). Аналогичное превышение на рисунке 4.11, б составляет 1,5 раза (150% и 110%), т.е. снижается в 1,9 раза.

3. Интервал времени после захвата до входа моментов в 5%-ю зону отклонения относительно установившегося значения ( $\Delta t_{5\%}$ ) сокращается в 2 раза от 1,2 с до 0,6 с. В связи с малым масштабом диапазон  $\pm 5\%$  на осциллограммах (рисунки 4.3 и 4.13) не показан.

Выполнено математическое моделирование аналогичных процессов при различных начальных рассогласованиях скоростей в диапазоне от 5 до 15% и различных темпах их снижения в диапазоне от 8%/с до 32%/с. Результаты подтверждают двукратное снижение разницы моментов нагрузки двигателей верхнего и нижнего валков и аналогичное сокращение времени их согласования.

#### 4.5.2. Исследование моментов ВГП и НГП в режиме деления нагрузок

Далее с помощью разработанной модели было выполнено исследование режимов согласования нагрузок ВГП и НГП после окончания формирования «лыжи». Ниже представлен сравнительный анализ процессов электроприводов с проектным пропорционально-интегральным РДН и с разработанным регулятором с переключающейся структурой (рисунок 4.6).

На рисунке 4.12 приведены временные зависимости скоростей (окно 1), моментов (окно 2) и разницы скоростей (окно 3) ВГП и НГП для проектного и разработанного алгоритмов управления. Аналогично рисунку 4.11 масштабы по осям ординат указаны в процентах. Начальное рассогласование скоростей при формировании «лыжи» в обоих случаях установлено равным 15%.

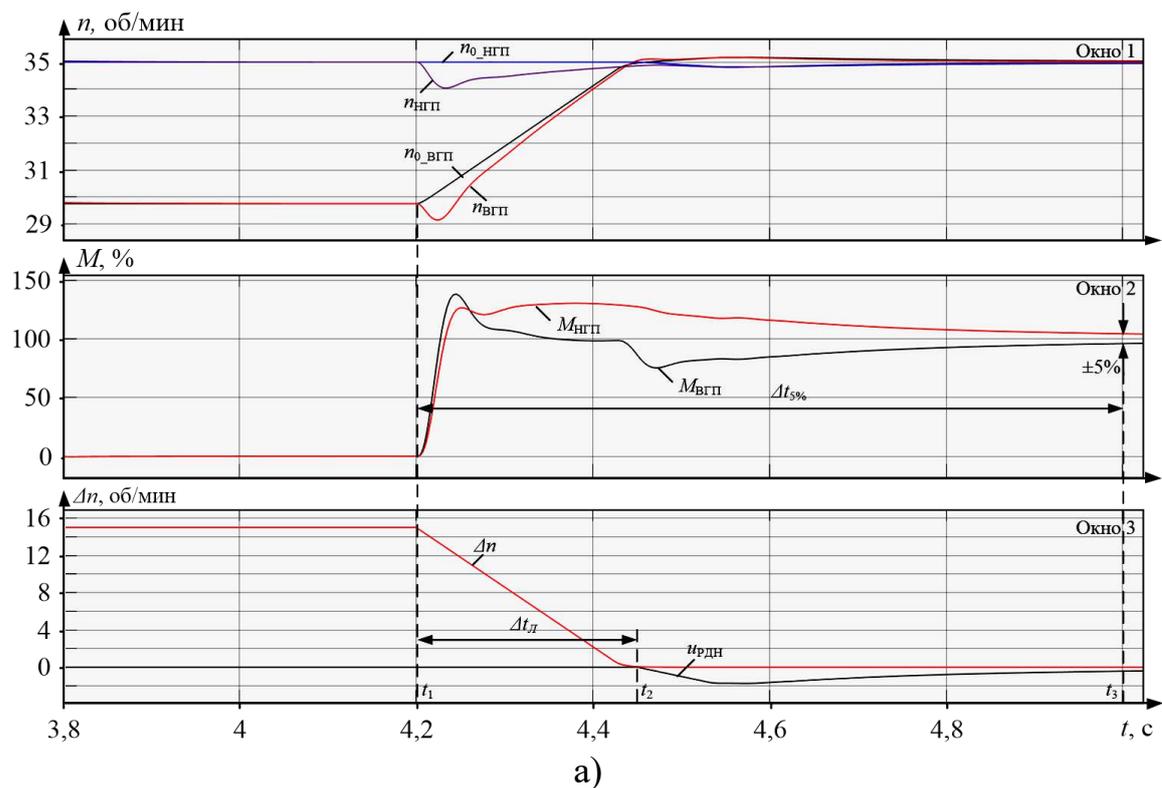
На представленных графиках отсутствует воздействие на скорость электропривода нижнего валка, т.е. принят проектный вариант формирования «лыжи». Это не является принципиальным, поскольку при исследовании настройки РДН процесс лыжеобразования подробно не анализируется.

В момент времени  $t_1$  происходит захват металла валками. В интервале  $\Delta t_{\text{л}} = t_2 - t_1$  происходит воздействие на скорость электропривода нижнего валка в режиме формирования «лыжи». Темп замедления (окно 3) для обоих случаев составляет 16%/с. Далее в интервале  $t_2-t_3$  осуществляется выравнивание моментов (окно 2) за счет действия РДН.

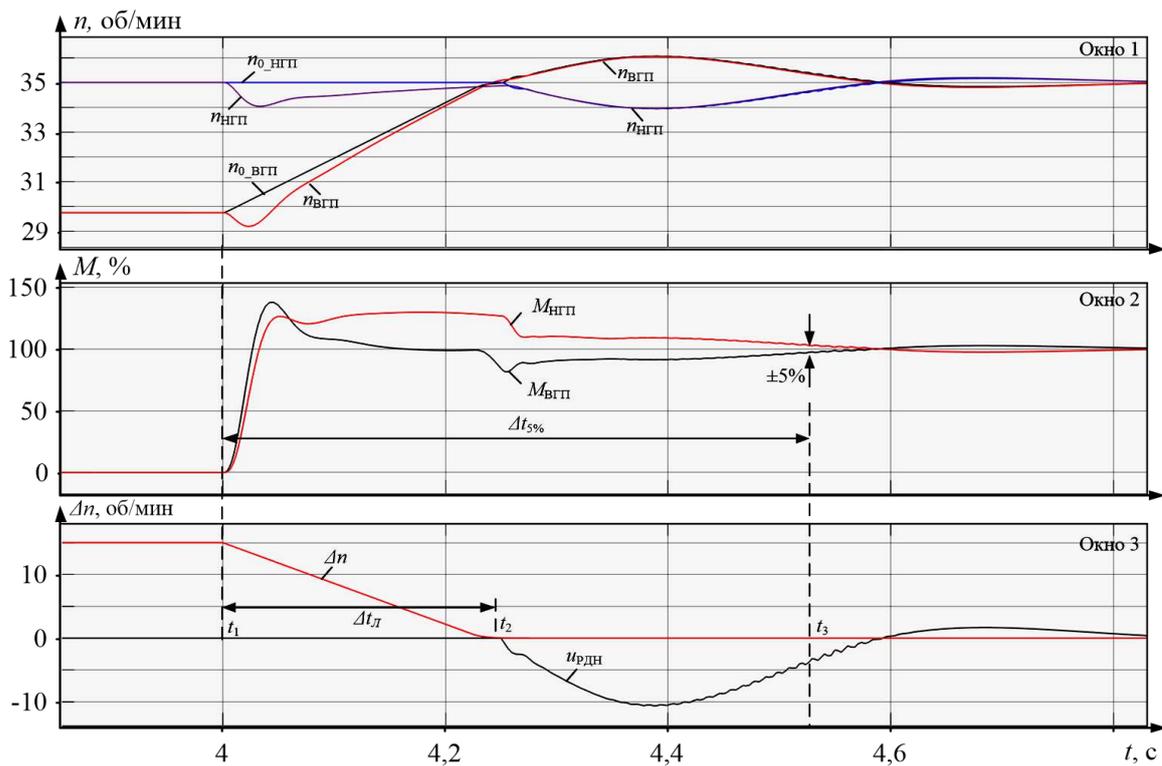
Отличием процессов на рисунке 4.12, б является форсированное регулирование рассогласования скоростей  $t_2-t_3$  (окно 3). Соответственно выравнивание моментов происходит за меньший интервал по сравнению с процессом на рисунке 4.12, а. Выходные сигналы РДН на обоих рисунках показаны в отрицательной области окна 3.

Анализ приведенных временных зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

1. Установившееся рассогласование моментов в режиме формирования «лыжи» в интервале  $t_1-t_2$  одинаково и составляет 30% (момент НГП составляет 130% при моменте ВГП, равном 100%). Это объясняется тем, что работа РДН на режим лыжеобразования влияния не оказывает.



а)



б)

Рисунок 4.12 – Зависимости линейных скоростей и моментов ВГП и НГП при реализации проектного (а) и разработанного (б) алгоритмов управления

2. Среднее рассогласование моментов в режиме РДН в интервале  $t_2-t_3$  составляет 20% на рисунке 4.12, а и 10% на рисунке 4.12, б, таким образом, сокращается в 2 раза.

3. Время входа в 5%-ю зону отклонений относительно установившегося момента, равного 100%, уменьшается в 1,8 раза от  $\Delta t_{5\%}=0,45$  с до  $\Delta t_{5\%}=0,25$  с.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают значительное сокращение времени согласования моментов за счет форсированного регулирования выходного сигнала РДН. Суммарное сокращение времени переходных процессов в режиме лыжеобразования и действия РДН сокращается не менее чем в 2 раза. Соответственно в 2 раза снижается время выхода электроприводов в установившийся режим. С учетом того, что продолжительность согласования скоростей в черновых проходах на стане 5000 составляет от 20 до 80% времени прокатки, уменьшение средней нагрузки приведет к улучшению теплового состояния двигателя нижнего валка.

#### **4.6. Результаты экспериментальных исследований разработанных решений**

##### ***Способ формирования «лыжи»***

На рисунке 4.13 представлены осциллограммы, аналогичные рис. 4.3, а, полученные при реализации разработанного алгоритма управления лыжеобразованием, реализованного в АСУ стана 5000 [222]. Прокатка заготовки происходит в интервале времени  $t_1-t_5$ . Задание на формирование «лыжи» (окно 5) поступает в интервале  $t_2-t_3$ , темп согласования скоростей («Разница скоростей для лыжи») по сравнению с показателем в существующей системе увеличен в 2 раза (от  $\Delta t_{л}=1,2$  с на рисунке 4.3, а до  $\Delta t_{л}=0,6$  с на рисунке 4.13). Это связано с тем, что добиться увеличения темпа более чем в 3,5 раза, как это показано на рисунке 4.11, в условиях эксперимента затруднительно. При этом сигналы регулирования подаются на электроприводы как верхнего, так и нижнего валков.

Алгоритм выравнивания нагрузок с помощью РДН здесь не реализован. Поэтому в момент времени  $t_4$  происходит «неудачная попытка» включения РДН, что подтверждает появление кратковременного импульса на осциллограмме в окне 1. Таким образом, РДН не включается в работу в течение всего времени прокатки.

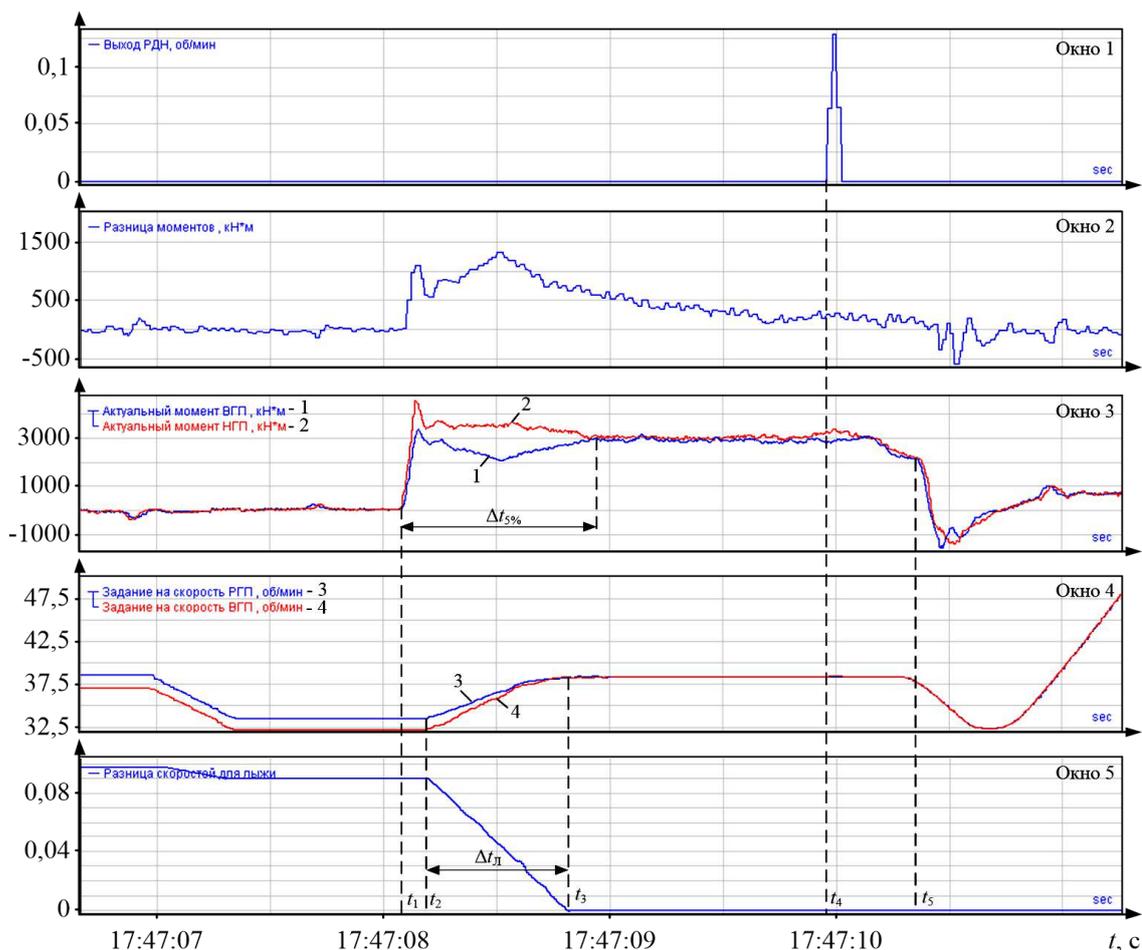


Рисунок 4.13 – Осциллограммы, аналогичные рис. 4.3, а при реализации разработанного способа формирования «лыжи»

Показатели регулирования скорости и момента на осциллограммах на рисунках 4.3, а и 4.13 приведены выше в последних строках таблицы 4.1. Их сравнение показывает, что в результате реализации предложенных отличительных признаков время входа скоростей в 5%-ю зону сокращается в 2,4 раза (от 2,2 с до 0,9 с). За счет более интенсивного согласования скоростей соотношение (кратность) моментов двигателей ВГП и НГП в квазиустановившемся режиме после захвата снижается в 2,5 раза (от 4,8 до 1,9).

На рисунке 4.14 приведены осциллограммы координат электроприводов за один проход при внедрении алгоритма, реализующего способ согласования нагрузок за счет действия разработанного нелинейного РДН [226]. В окне 1 представлены заданные и фактические скорости электроприводов; в окне 2 – фактические моменты; в окне 3 – сигнал коррекции скорости от РДН; в окне 4 – разность моментов двигателей верхнего и нижнего валков.

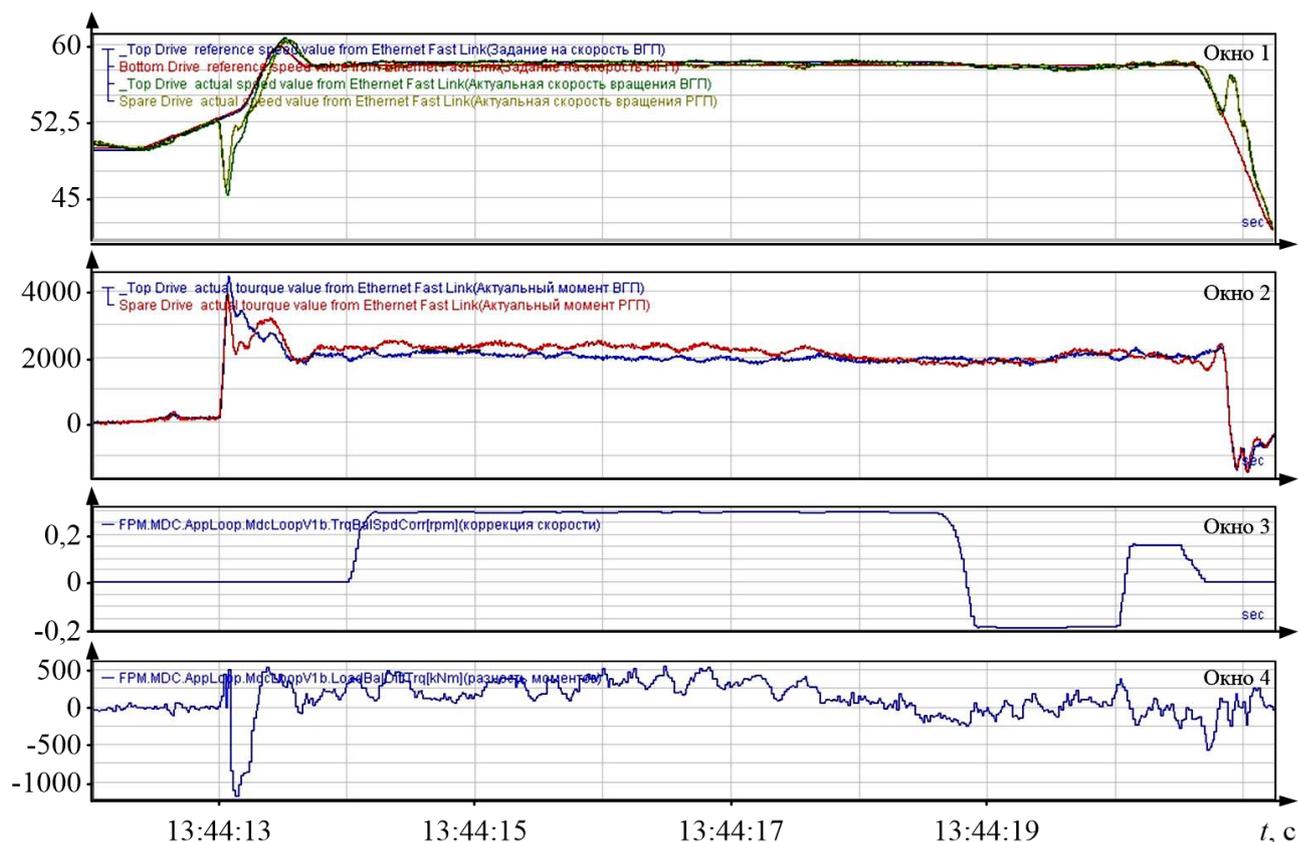


Рисунок 4.14 – Осциллограммы координат ВГП и НГП при реализации разработанного алгоритма

Анализ подтверждает идентичность представленных осциллограмм и расчетных кривых, приведенных на рисунке 4.12, б. Это позволяет сделать вывод о соответствии экспериментальных и теоретических результатов. В установившемся режиме прокатки рассогласование скоростей отсутствует, при этом разность моментов близка к нулю. Вместе с тем, согласование скоростей не может быть признано «идеальным», т.к. РДН входит в зону ограничения. Устранение данного режима требует разработки дополнительных технических решений.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена структура действующей системы управления скоростными режимами электроприводов клетки стана 5000, включающей систему лыжеобразования и регулятор деления нагрузок. Отмечено, что ее недостатками являются низкое быстродействие и несогласованность алгоритмов формирования «лыжи» и деления нагрузок. Выполнен анализ осциллограмм скоростей и моментов двигателей ВГП и НГП, подтвердивший указанные недостатки.

2. Разработаны методика и способ согласования режимов систем лыжеобразования и деления нагрузок электроприводов верхнего и нижнего валков. Разработан алгоритм, обеспечивающий формирование заданных параметров «лыжи» по проходам и сокращение времени выравнивания нагрузок в установившемся режиме.

3. Разработан нелинейный РДН с переключающейся структурой, обеспечивающий повышение быстродействия при компенсации рассогласования заданий скоростей, отличительными признаками которого являются:

- форсированное выравнивание моментов двигателей путем одновременного формирования коррекций заданий скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков;

- повышение быстродействие за счет отключения интегральной части и увеличения коэффициента усиления в режиме согласования нагрузок;

- «возвращение» структуры ПИ регулятора в квазиустановившемся режиме прокатки.

4. Разработана комплексная имитационная модель электроприводов и гидравлических НУ реверсивной клетки, включающая модели двухмассовых систем ВГП и НГП, взаимосвязанных через металл, модели блока формирования «лыжи», блока распределения нагрузок с переключающейся структурой, а также модели САРТ и контура регулирования положения НУ.

5. Путем математического моделирования доказано, что предложенный усовершенствованный способ согласования работы системы лыжеобразования и РДН обеспечивает следующие преимущества:

- интервал формирования «лыжи» сокращается в 1,8 раза;

- начальное рассогласование моментов двигателей ВГП и НГП в момент включения РДН уменьшается в 2 раза, что обеспечивает пропорциональное сокращение времени согласования нагрузок.

6. Рассмотрены осциллограммы, полученные при внедрении алгоритмов, реализующих способ, в АСУ ТП стана 5000. Подтверждены улучшение показателей регулирования и соответствие экспериментальных результатов расчетным.

## Глава 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИММЕТРИИ ЗАЗОРА ВАЛКОВ РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ

Как показано в первой главе, одним из распространенных отклонений, возникающих при прокатке на толстолистовом стане, является клиновидность сечения заготовки в очаге деформации, вызванная поперечной асимметрией зазора рабочих валков. Это приводит к возникновению дефекта «серповидность» раската на выходе из клетки, а также его боковому смещению на входе в клетку. При значительных искривлениях возникает опасность повреждения оборудования технологической линии, обрыва либо деформации листа в последних проходах.

С целью устранения названных нарушений необходима разработка комплекса технических решений, направленных на компенсацию асимметрии межвалкового зазора, возникающей как вследствие «наследственной» клиновидности заготовки, имеющейся до захода в клетку, так и «текущего» перекоса зазора, обусловленного разницей усилий по сторонам DS и OS непосредственно в процессе прокатки.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- экспериментальные исследования с целью оценки быстродействия и точности регулирования перекоса зазора валков при проектной настройке RAS регулятора;
- разработка способа компенсации текущей асимметрии на основе косвенного определения разницы положений гидравлических нажимных устройств;
- разработка способа регулирования «наследственного» перекоса за счет предиктивного регулирования положений НУ по сторонам DS и OS;
- повышение быстродействия RAS регулятора за счет реализации принципа упреждающего регулирования.

Как и в предыдущих разделах должны быть предусмотрены комплексные исследования, включающие математическое моделирование и эксперименты в условиях производства. С этой целью ставятся задачи разработки имитаци-

онной модели, учитывающей взаимодействие гидравлических НУ через металл и упругие свойства клетки и раската. В результате моделирования должен быть выполнен сравнительный анализ процессов при исходной настройке и при разработанных изменениях.

В ходе экспериментальных исследований должны быть решены следующие задачи:

1. Практическое подтверждение технической эффективности внедрения предложенных решений.

2. Исследование взаимодействия системы регулирования перекося и САРТ с целью оценки целесообразности разделения регулирующих воздействий в частотном диапазоне.

Конечным результатом должна стать оценка технической эффективности предложенных решений.

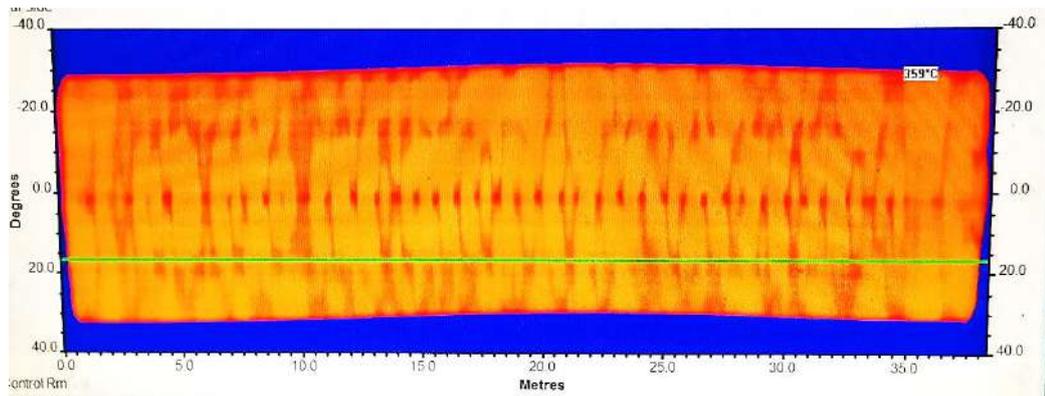
### **5.1. Причины возникновения дефекта «серповидность»**

#### ***Характеристики серповидности раскатов***

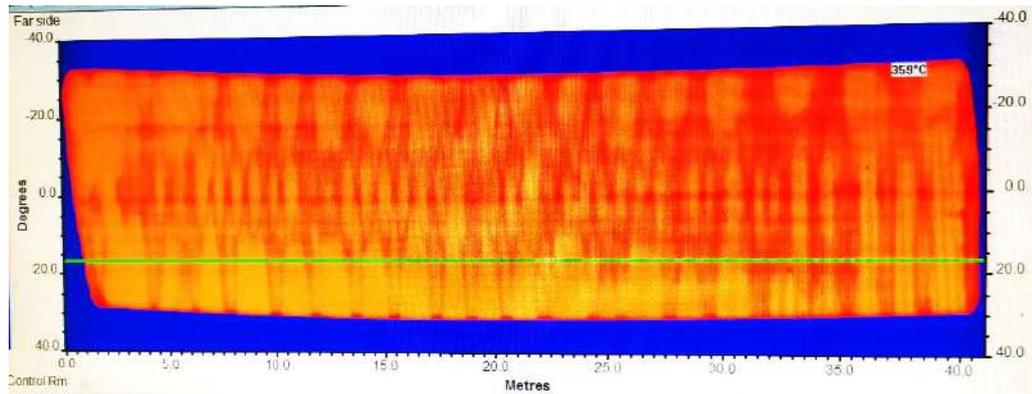
Реальные формы двух листов в плане, на которых отчетливо видна серповидность, представлены на рисунке 5.1. Длина листа составляет 39,9 м, ширина – 3,34 м. При представлении листа на экране монитора на посту оператора пропорции длины и ширины изменяются (масштабы по длине и ширине принимаются разными).

Количественно серповидность определяется как искривление осевой линии прокатанного листа, показанное в виде эскиза на рисунке 5.2. Допустимые значения серповидности листов для стана 5000 в контрольных точках в зависимости от длины прокатанной части приведены в таблице 5.1. Из оценки исключается по 1 м головного и хвостового участков.

Результаты обследования более 100 листов, форма которых аналогична представленной на рисунке 5.1, показали, что реальные отклонения позиции оси раската на отдельных профилях превышают допуски с 1,5–2 раза. Это предопределяет актуальность исследований причин возникновения данного дефекта и проведения мероприятий по его устранению.



а)



б)

Рисунок 5.1 – Формы листов в плане с дефектами «серповидность» с искривлениями в разные стороны относительно оси прокатки

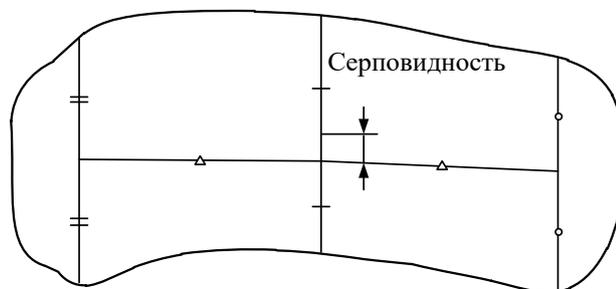


Рисунок 5.2 – Эскиз для определения серповидности листа

Таблица 5.1 – Допустимые величины серповидности раскатов стана 5000\*

| Длина прокатанной части | Отклонение позиции оси раската от оси прокатки (серповидность на рис. 5.2) |
|-------------------------|--|
| 10 м                    | 25 мм  |
| 20 м                    | 35 мм  |
| 30 м                    | 58 мм  |
| 40 м                    | 70 мм  |
| 50 м                    | 90 мм  |

\*данные приняты из технической документации фирмы SMS

### ***Механизм возникновения дефекта***

Механизм возникновения дефекта «серповидность» и бокового смещения раската схематично поясняют рисунки 5.3, а и 5.3, б [244]. Видно, что на первом рисунке раскат выходит из клетки в изогнутой форме, возникает кривизна в плоскости зазора (односторонняя ошибка формы). Во втором случае раскат перемещается в сторону из-за вращения, которое происходит непосредственно в межвалковом промежутке. Это происходит потому, что процесс деформации не является равномерным по ширине, поэтому скорости металла на выходе из клетки на сторонах DS и OS будут различаться.

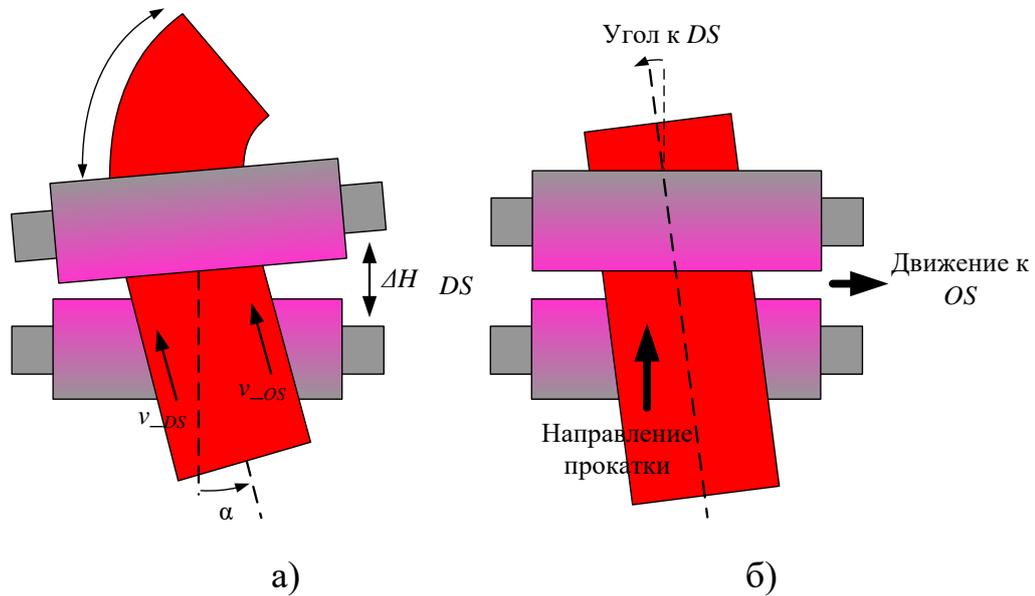


Рисунок 5.3 – Пояснения к возникновению изгиба в плоскости прокатки (а) и бокового смещения раската (б)

Вследствие этого раскат будет поворачиваться на угол:

$$\alpha = \frac{\Delta v}{W},$$

где  $W$  – ширина раската;  $\Delta v = v_{DS} - v_{OS}$  – рассогласование скоростей металла на входе в клеть.

При условии незначительного бокового распространения (течения) металла условие сохранения массового потока предполагает выполнение равенства:

$$h\Delta v + v\Delta h = H\Delta V + V\Delta H,$$

где  $H$  и  $h$  – толщины раската на входе и выходе клетки;  $V$  и  $v$  – скорости металла на входе и выходе.

Разница  $\Delta h$  толщины DS-OS определяется отклонениями входной толщины  $H$ , неравномерной деформацией в валках, обусловленной рядом факторов, в том числе, температурными различиями.

Если раскат поворачивается на угол  $\alpha$ , имеет место его перемещение  $\alpha(y)$  по отношению к направлению прокатки (рисунок 5.3, а). На рисунке 5.4 показано изменение позиции оси  $x$ , возникающее в этом случае, оно рассчитывается по формуле:

$$x(t) = V \cdot \tan(\alpha(y)).$$

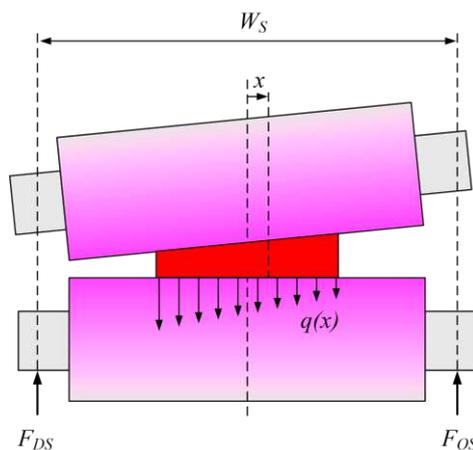


Рисунок 5.4 – Усилия на полосе, смещенной на расстояние  $x$ , при клиновидном поперечном сечении

Из рисунка следует, что раствор валков деформируется неравномерно в зависимости от разницы  $\Delta F$  усилий  $F_{DS}$  и  $F_{OS}$ . Величина деформации зависит от параметра «жесткость при асимметричной нагрузке на валки», которая в работе [244] называется модуль жесткости асимметричной клетки  $M_{as}$ . Изменения толщины определяются по уравнению:

$$\Delta h = \frac{W}{W_s} \left( \Delta S + \frac{\Delta F}{M_{as}} \right),$$

где  $\Delta S$  – разность (асимметрия) зазора валков по сторонам;  $W_s$  – расстояние между осями гидравлических цилиндров (см. рис. 5.4).

Со стороны входа в валки раскат вращается в сторону с меньшим изменением толщины, т.е. с большим сечением (рис. 5.3, а). Основная причина асимметричной деформации вызвана изменением удельного давления по ширине, что показано на рис. 5.4 стрелками. Разница в удельном давлении описывается с использованием модели смещения усилия:

$$\Delta q = q_{OS} - q_{DS}.$$

Давление металла в каждой точке замера зависит от параметров деформации:

$$q = f(\sigma, R', H, h, T, \tau),$$

где  $\sigma$  – предел текучести;  $R'$  – радиус деформированного крена;  $T$  и  $\tau$  – напряжения на входе и выходе клетки;  $f$  – функция, представляющая модель давления.

Также на величину  $\Delta q$  влияют различия коэффициентов трения, натяжений полосы (для непрерывных станов), температуры и твердости металла. Однако, поскольку эти параметры не измеряются, они рассматриваются как задаваемые возмущения.

## 5.2. Анализ настройки РАС регулятора

### *Структура системы регулирования перекоса зазора валков*

Схема системы компенсации искажения профиля раската в клетки стана 5000 представлена на рисунке 5.5. Система обеспечивает выравнивание растяжения клетки в случаях, когда усилия по сторонам DS и OS различаются. Для этого на вход РАС регулятора подается нулевой сигнал (задается нулевой перекоп), который сравнивается с фактическими величинами зазоров со стороны привода и со стороны оператора. По усилиям в гидроцилиндрах на входе регулятора формируется обратная связь по разнице толщин по краям заготовки и соответственно зазоров по сторонам DS и OS. Эта величина вычисляется путем деления разницы измеренных усилий на модуль упругости полосы (Level Modulus). Кривая зависимости модуля упругости от усилия хранится в виде таблицы в АСУ ТП стана.

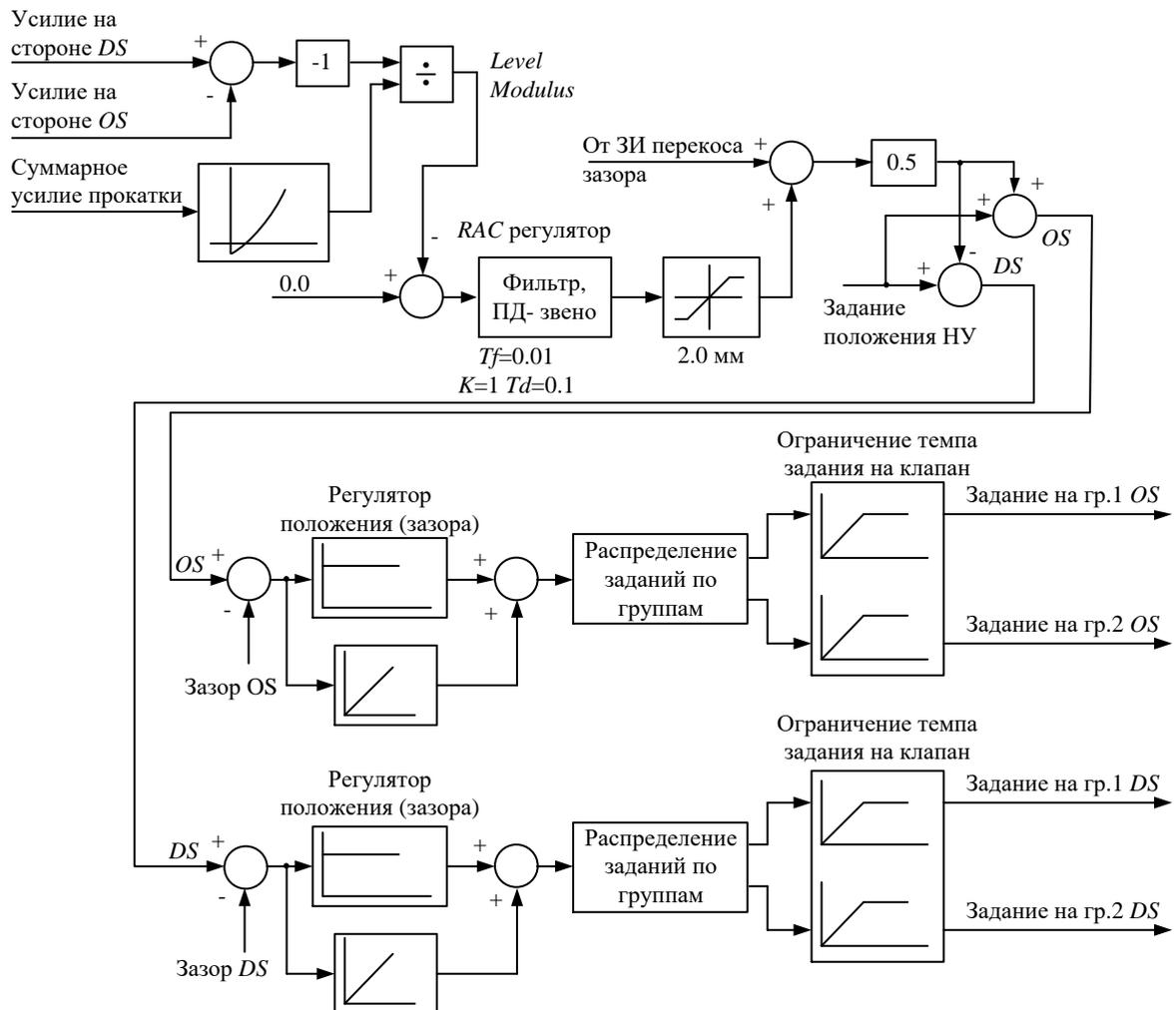


Рисунок 5.5 – Схема подключения RAC регулятора в систему регулирования положения гидравлических НУ

На выходе RAC регулятора формируется задание, которое с коэффициентом 0,5 подается в виде «добавки» на регуляторы положения НУ и компенсирует разнотолщинность. С целью исключения недопустимого перекося зазора устанавливается ограничение выходного сигнала. Это вызвано тем, что при прокатке тонкого раската и значительных перекосях возникает опасность соприкосновения краев верхнего и нижнего валков. Установленное ограничение находится в диапазоне от 0,7 до 2 мм и зависит от толщины листа.

Более подробно работа RAC регулятора и системы автоматического регулирования толщины рассмотрена в работах [12, 98].

### ***Анализ осциллограмм при проектной настройке системы***

В ходе эксплуатации стана 5000 выявлены недостатки регулирования перекося при существующей настройке RAC регулятора. Основными

являются низкое быстродействие и несогласованность перемещения гидравлических НУ по сторонам DS и OS. На рисунке 5.6 представлены осциллограммы толщины раската и координат НУ, подтверждающие этот вывод [245]. В окне 1 приведены кривые задания  $h_0$  и фактической толщины  $h$  раската на выходе клетки. В окне 2 показаны усилия  $F_{DS}$  и  $F_{OS}$ , которые изменяются в процессе прокатки. В окнах 3 и 5 приведены выходные сигналы РАС регулятора  $U_{РАС}$  и регулятора толщины  $U_{АГС}$ , в окне 4 – величины межвалковых зазоров  $S_{DS}$  и  $S_{OS}$ . Размерности по осям во всех окнах, кроме второго, указаны в мм, размерность усилий во втором окне – кН.

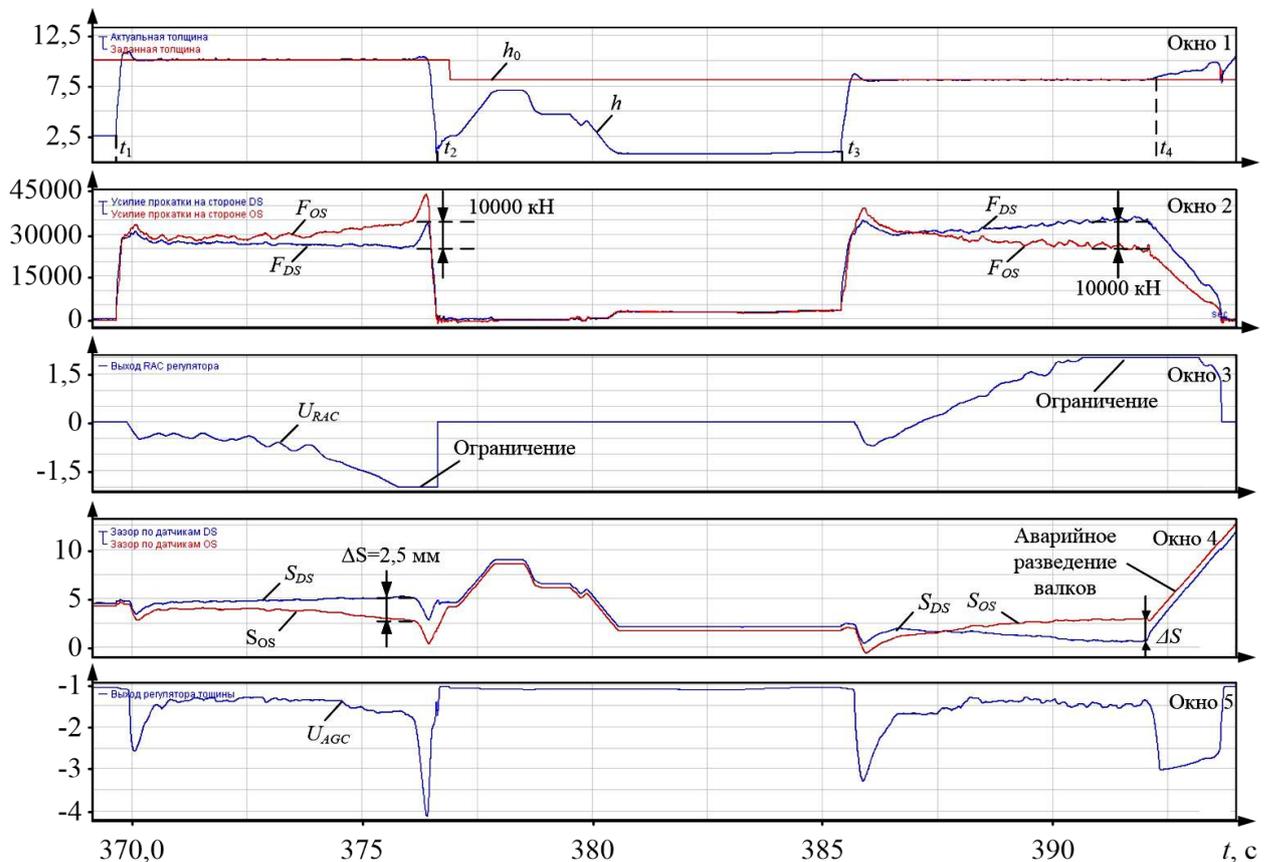


Рисунок 5.6 – Осциллограммы координат системы регулирования перекоса зазора валков при проектной настройке

Согласно проектному алгоритму регулятор оказывает воздействие на то нажимное устройство, усилие в котором больше. Так, в первом проходе (интервал  $t_1-t_2$ ) он «зажимает» раскат со стороны OS. Зазор  $S_{OS}$  (окно 4) уменьшается, при этом усилие  $F_{DS}$  (окно 2) и величина зазора  $S_{DS}$  на противоположной стороне остаются практически постоянными. Во втором

проходе (интервал  $t_3-t_4$ ) наблюдается противоположная картина: зазор  $S_{DS}$  уменьшается, при этом воздействие на  $S_{OS}$  осуществляется в меньшей степени. Максимальный перекося  $\Delta S$  составляет 2,5 мм, разность усилий по проходам  $F_{OS-DS}=10000$  кН, причем в конце первого прохода  $F_{OS} > F_{DS}$ , в конце второго прохода соотношение обратное.

Такое неравномерное распределение регулирующих воздействий снижает быстродействие и эффективность выравнивания зазора. Большое рассогласование усилий в обоих проходах приводит к выходу РАС регулятора на ограничение (окно 3). В результате во втором проходе произошло аварийное разведение валков (указано стрелкой). Это приводит к выходу прокатываемой заготовки в брак и потерям производства. Анализ осциллограмм позволил определить следующие недостатки проектной системы регулирования перекося:

1. При постоянстве толщины по центру раската (окно 1) возникает существенное различие позиций гидравлических НУ (окно 4). Как отмечалось, максимальная асимметрия положений НУ  $\Delta S$  составляет 2,5 мм при ограничении выходного сигнала РАС регулятора 2 мм. Это вызвано тем, что, согласно проекту, принята пропорциональная структура регулятора. При такой настройке возникает статическая ошибка регулирования положения, что подтверждается осциллограммами. В режиме перемещения НУ дополнительно возникает динамическая ошибка регулирования.

2. Регулирующее воздействие при проектной настройке рассчитано на обеспечение компенсации рассогласований в диапазоне нескольких процентов. При значительном отличии положений НУ регулятор «не справляется» с этой задачей.

3. В процессе эксплуатации выявлен недостаток пропорционального РАС регулятора, который выражается в неудовлетворительном быстродействии. Это приводит к рассогласованию усилий прокатки практически в течение всего прохода, что подтверждено осциллограммами (окно 2).

Кроме того, в программе отсутствует алгоритм компенсации «наследственной» асимметрии раската, увеличивающейся после каждого прохода реверсивной прокатки. Причины возникновения такой асимметрии рассматриваются ниже.

Очевидно, что более эффективным является одновременное формирование регулирующих воздействий на регуляторы положения обоих НУ с противоположными знаками. При этом коэффициенты передачи должны быть одинаковыми. Эти условия необходимы для обеспечения равенства статических ошибок регулирования положений НУ по сторонам DS и OS при отсутствии сигнала на выходе регулятора. Такое задание сигналов показано на схеме, рисунок 5.5.

В связи с изложенным, потребовались разработка способа управления, обеспечивающего одновременное регулирование положений обоих НУ, и изменение настройки RAC регулятора.

### **5.3. Разработка способа регулирования асимметрии профиля раската**

#### **5.3.1. Принцип перераспределения регулирующих воздействий**

Способ устранения указанных выше недостатков разработан на основе принципа перераспределения регулирующих воздействий на исполнительные устройства клетки прокатного стана, обоснованного автором в работе [245]. Согласно данному принципу регулирование осуществляется в функции дифференциальных отклонений контролируемых параметров: скоростей, усилий либо положений (перемещений) исполнительных устройств в установившемся режиме прокатки. Предусматриваются следующие действия (на примере регулирования перекоса зазора валков):

- измерение дифференциального рассогласования усилий в исполнительных устройствах (гидравлических НУ по сторонам DS и OS) в процессе прокатки;

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

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

Предложенный принцип получил практическую реализацию на стане 5000 в системах:

– согласования нагрузок электроприводов верхнего и нижнего валков в структуре регулятора деления нагрузок (РДН) [225];

– осевой сдвижки ( $CVC^{plus}$ ) и противоизгиба валков [88–90, 246, 247];

– согласования режимов РДН и системы лыжеобразования [222, 226];

– согласования скоростей электроприводов клетки и гидравлических НУ при профилированной прокатке [248].

#### **Описание способа**

В плане реализации данного принципа *разработан способ регулирования перекаса зазора валков, суть которого состоит в измерении дифференциального усилия прокатки, расчете величины противодействия и его использовании в качестве управляющего воздействия*. Половина этого воздействия подается в качестве сигнала регулирования положения НУ на стороне DS, вторая половина – для регулирования на стороне OS. Поступающие сигналы компенсируют поперечное растяжение клетки, возникающее в результате действия дифференциальных усилий, и тем самым обеспечивают компенсацию асимметрии зазора.

По сути, разрабатывается метод непосредственной обратной связи, обеспечивающий регулирование поперечной асимметрии профиля толщины по возмущению. Усилия прокатки  $F_{OS}$  и  $F_{DS}$ , выраженные через обжатия, жесткость прокатываемого металла, растяжение и жесткость станины, имеют вид [143]:

$$F_{OS}=C_K \cdot X_{OS}=C_{OS} \cdot \Delta X_{OS}; \quad F_{DS}=C_K \cdot X_{DS}=C_{DS} \cdot \Delta X_{DS}, \quad (5.1)$$

где  $C_K$  – жесткость станины, т/мм;  $C_{OS}$ ,  $C_{DS}$  – жесткости раската;  $X_{OS}$ ,  $X_{DS}$  – растяжения клетки с соответствующих сторон, мм.

Разница усилий

$$\Delta F = F_{OS} - F_{DS} = C_K(X_{OS} - X_{DS}) = C_K \Delta S, \quad (5.2)$$

откуда перекося (асимметрия) зазора валков  $\Delta S = \Delta F / C_K$ . Этот сигнал используется для регулирования положений НУ по сторонам OS и DS.

Вместе с тем, известна зависимость для более точного вычисления асимметрии межвакового зазора, мм [144]:

$$\Delta S = \frac{\Delta \sigma_s \sqrt{R \Delta h}}{C_K} \cdot \frac{B}{2} \cdot 10^{-3}, \quad (5.3)$$

где  $R$  – радиус рабочего валка, мм;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие, мм;  $B$  – ширина раската, мм;  $\Delta \sigma_s = \sigma_s(T_L) - \sigma_s(T_P)$ ;  $\sigma_s(T_L)$  и  $\sigma_s(T_P)$  – сопротивления пластической деформации металла при температурах  $T_L$  и  $T_P$  левой и правой кромок, кг/мм<sup>2</sup>.

В этой зависимости учитывается влияние на величину асимметрии двух важнейших параметров – ширины раската и разницы температур по его краям. Непосредственная реализация этой зависимости в алгоритме регулирования перекося зазора валков затруднительна, т.к. требует постоянного контроля указанных температур. В упомянутой разработке [144] это предлагается реализовать путем установки пирометров, измеряющих температуру краев раската на входе в клетку. Однако такое решение не обеспечит достоверного определения температуры, т.к. на показания пирометров будет оказывать влияние вода, поступающая из системы охлаждения валков. В то же время учет ширины раската при вычислении перекося зазора  $\Delta S$  целесообразен.

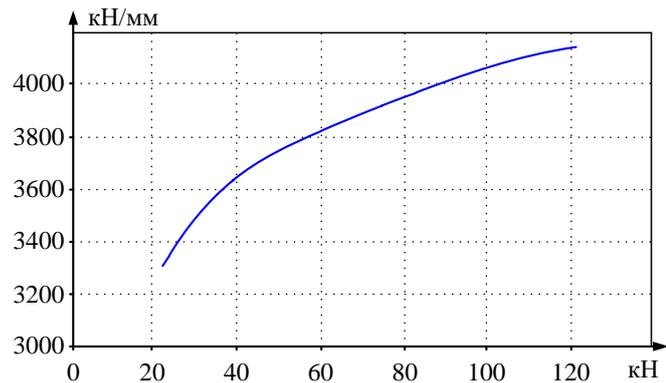
**Согласно разработанному способу регулирования текущей асимметрии зазора валков**, выполняют следующие операции:

1. Предварительно при каждой калибровке получают кривые модуля упругости отдельно для левого и правого НУ от усилий прокатки, т.е.  $\sigma_s(F_L)$  и  $\sigma_s(F_P)$ . В настоящее время экспериментально определяется такая зависимость для оси прокатки. Пример кривой, измеряемой для РАС регулятора показан на рисунке 5.7, а. Такие зависимости сохраняются в виде таблиц в программе

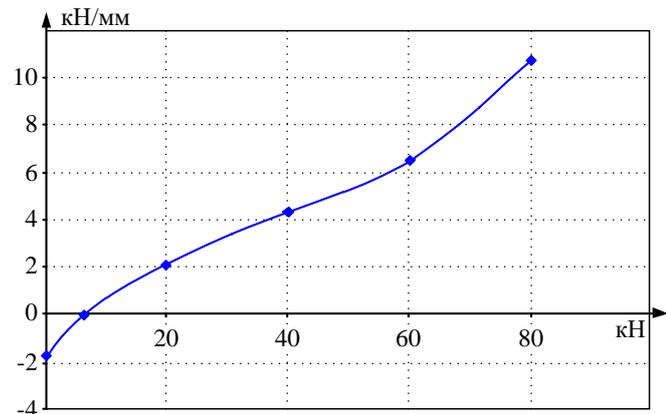
АСУ ТП. По этим кривым для каждого прохода определяют уточненные значения  $C_{OS}$ ,  $C_{DS}$  и  $\sigma_{sOS}$  и  $\sigma_{sDS}$  по сторонам проката.

2. Перед захватом металла валками вычисляют фактические межвалковые зазоры  $S_{OS}$  и  $S_{DS}$  по сторонам клетки по зависимостям

$$S_{OS} = \frac{\sigma_{sOS} \sqrt{R\Delta h}}{C_{K(OS)}} \cdot \frac{B}{2} \cdot 10^{-3} \quad \text{и} \quad S_{DS} = \frac{\sigma_{sDS} \sqrt{R\Delta h}}{C_{K(DS)}} \cdot \frac{B}{2} \cdot 10^{-3}. \quad (5.4)$$



а)



б)

Рисунок 5.7 – Зависимости модуля упругости (кН/мм) для РАС регулятора (а) и растяжения клетки (мм) (б) от усилия прокатки (кН)

В этих зависимостях учитывается влияние ширины, а также влияние упругости клетки и раската по сторонам OS, DS. Затем вычисляют разницу (перекос) зазора валков

$$\Delta S = S_{OS} - S_{DS}. \quad (5.5)$$

Это позволяет компенсировать наследственный перекося зазора валков (более подробные пояснения приводятся ниже).

3. По кривым, аналогичным рисунку 5.7 (точнее, по таблицам в АСУ ТП), определяют уточненные значения  $C_{OS}$ ,  $C_{DS}$  и  $\sigma_{sOS}$  и  $\sigma_{sDS}$ . В итоге вычисляется задание на коррекцию перекоса зазора валков с учетом всех влияющих факторов:

$$\Delta S = \frac{\sigma_{s(OS)} \sqrt{R\Delta h}}{C_{K(OS)}} \cdot \frac{B}{2} \cdot 10^{-3} - \frac{\sigma_{s(DS)} \sqrt{R\Delta h}}{C_{K(DS)}} \cdot \frac{B}{2} \cdot 10^{-3} = \frac{\sqrt{R\Delta h} \cdot B}{2} \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{\sigma_{s(OS)}}{C_{K(OS)}} - \frac{\sigma_{s(DS)}}{C_{K(DS)}} \right). \quad (5.6)$$

4. По этой зависимости выполняют автоматическое регулирование текущих позиций НУ по сторонам клетки. Для этого путем изменения положений НУ выставляют перекося межвалкового зазора так, что на стороне с большим усилием прокатки позиция рабочего валка принимает значение  $(S - \Delta S/2)$ , т.е. сдавливает сильнее, а на противоположной стороне –  $(S + \Delta S/2)$ .

Следует заметить, что при практической реализации способа в АСУ ТП стана (результаты рассматриваются ниже) промежуточные вычисления по зависимости (5.4) не выполняются. Непосредственно вычисляется разность  $\Delta S$  по зависимости (5.6), половина которой добавляется с разными знаками к текущему заданию среднего положения, которое идет от регулятора толщины.

#### ***Отличия разработанного способа:***

1. Положения НУ по сторонам  $S_{OS}$  и  $S_{DS}$  рассчитываются более точно, чем в известном патенте, т.к. рассчитываются с учетом:

- фактических усилий по сторонам, которые непрерывно измеряются;
- фактических модулей упругости  $\sigma_{sOS}$  и  $\sigma_{sDS}$  (удельных жесткостей металла), которые по сторонам раската могут быть разными, т.к. зависят от многих параметров прокатки; в прототипе разность модулей упругости  $\Delta\sigma_s$  определяется только с учетом разницы температур;
- фактической ширины, которая в проектном алгоритме не учитывается;
- фактических растяжений (жесткостей) клетки по сторонам OS-DS.

Пояснения к данному отличию дают экспериментально снятые зависимости, представленные на рисунке 5.7. На рисунке 5.7, а, в качестве примера,

приведена зависимость  $\sigma_s(F_{OS})$  либо  $\sigma_s(F_{DS})$ , полученная для одной стороны клетки. Аналогичная зависимость получена для противоположной стороны клетки (здесь не приводится). Она имеет отличия от представленной кривой, т.к. технологические параметры по сторонам раската более или менее различаются. Эти кривые, представленные в виде таблиц, используются для вычислений согласно разработанному алгоритму. С целью определения параметров жесткости клетки для толстолистовых станов разработана и официально зарегистрирована авторская программа [249]. Она предназначена для расчета таблиц и кривых, аналогичных представленным на рис. 5.7 при различных сортаментах проката.

На рисунке 5.7, б построена зависимость средней жесткости станины  $S_K$  от усилия без учета влияния ширины раската. Такая зависимость используется при управлении положением НУ согласно проектному алгоритму.

2. В разработке, принятой за прототип, корректирующие сигналы вычисляются и подаются на регуляторы положения НУ, как только голова зайдет под пирометры. То есть задания и перекос зазора валков корректируются заранее. Предложенный способ управления обеспечивает следующие функции:

- предиктивная установка зазора валков, которая обеспечивает компенсацию перекоса, возникающую при предыдущем проходе (рассматривается ниже);

- осуществляется компенсация текущей асимметрии зазора, возникающей вследствие отклонения технологических факторов непосредственно во время прокатки.

Таким образом, можно констатировать, что для реализации разработанного принципа перераспределения регулирующих воздействий разработана методика вычисления положений НУ по сторонам раската. Данная методика реализована в алгоритме АСУ ТП и прошла опытно-промышленные испытания, о чем будет сказано ниже.

### 5.3.2. Повышение быстродействия системы регулирования

#### Структура системы

Указанные выше отличительные признаки реализованы в усовершенствованной системе регулирования перекося зазора валков, осуществляющей разработанный способ. Функциональная схема формирования задания на регуляторы положений НУ, разработанная с учетом отличий, приведена на рисунке 5.8. Принцип действия этой системы рассмотрен в п. 5.2, он аналогичен рассмотренному принципу для проектного варианта. Отличия заключаются в настройке РАС регулятора и формировании задания на регулирование перекося зазора валков.

С целью учета влияния ширины раската при вычислении перекося зазора  $\Delta S$  на вход РАС регулятора подается сигнал коррекции по фактической ширине, которая для каждого прохода вычисляется по формуле (5.3). Если изменение ширины незначительно, например, в чистовых проходах, то задание  $B$  принимается постоянным. В этом случае коэффициент  $K_b$  пропорционален квадратному корню из произведений радиуса валков  $R$  на абсолютное обжатие  $\Delta h$ , которые задаются в программе прокатки для каждого прохода. Зависимости сопротивления пластической деформации от температуры  $\sigma_s(T_{л})$  и  $\sigma_s(T_{п})$  принимаются постоянными и одинаковыми.

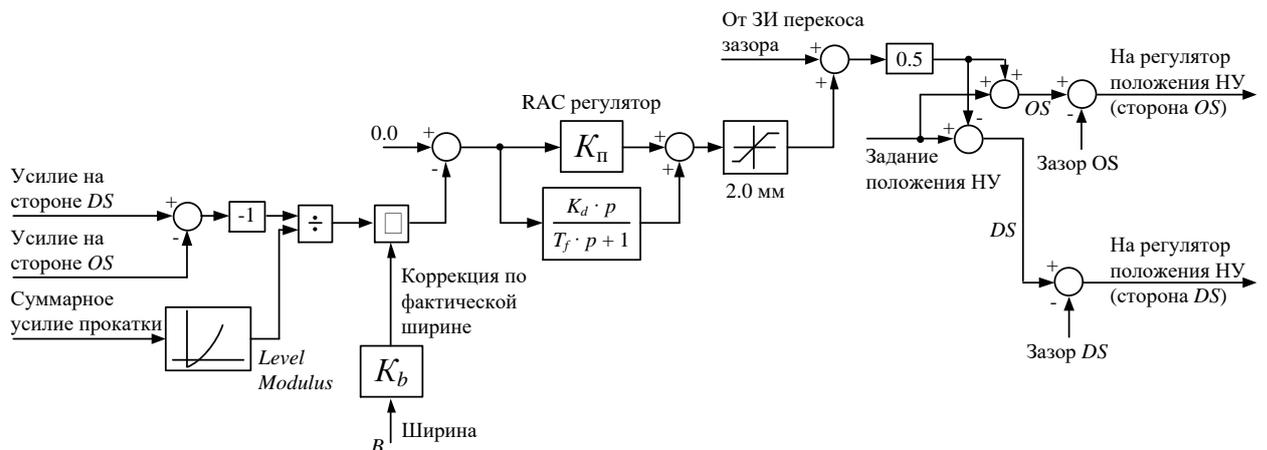


Рисунок 5.8 – Структурная схема формирования сигнала задания перекося зазора валков

Как было обосновано выше, требованием к разрабатываемой системе автоматического регулирования перекоса зазора валков является повышение быстродействия. Это предлагается обеспечить путем формирования положительного сигнала по производной управляющего сигнала, что обеспечит форсированное уменьшение ошибки регулирования положения НУ [250, 251]. В этом случае в системе *будет реализован принцип регулирования с упреждением*. Система не будет «ждать» изменения положения НУ, а будет воздействовать в функции сигнала его задания. В результате будет обеспечено повышение быстродействия при минимальном влиянии дополнительной связи на устойчивость процесса.

### *Изменение настройки РАС регулятора*

С целью повышения быстродействия предложено применение пропорционально-дифференциального (ПД) РАС регулятора, который, по существу, регулирует отфильтрованную производную входного сигнала. Причиной выбора является то, что регуляторы такого типа обеспечивают формирование управляющего воздействия с учетом как ошибки регулирования, так и скорости ее изменения. Введение регулирования по производной увеличивает скорость реакции системы. Это приводит к снижению погрешностей в динамическом режиме, вызванном перемещением нажимных устройств.

Этот вывод поясняется идеализированными временными диаграммами, представленными на рисунке 5.9 [252]. Плавными линиями показаны сигналы на выходе замкнутого контура регулирования выходного параметра при линейном изменении входного сигнала, показанного ломаными линиями. В системе автоматического регулирования с пропорциональным регулятором (рисунк 5.9, а) возникает динамическая ошибка регулирования – задержка выходного сигнала по отношению к входному. В системе с ПД регулятором (рисунк 5.9, б), напротив, выходной сигнал опережает сигнал задания на величину ускорения. Это происходит благодаря регулированию по производной

входного сигнала. Введение регулирования по производной увеличивает скорость реакции системы. Это приводит к снижению погрешностей в динамическом режиме, вызванном перемещением нажимных устройств.

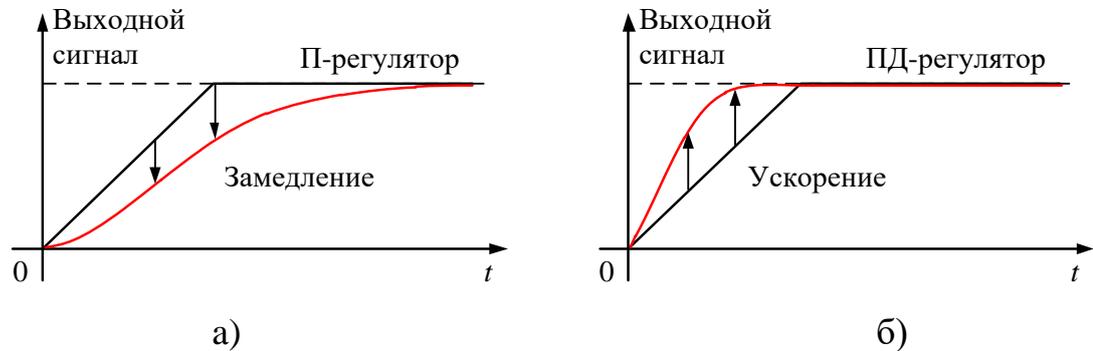


Рисунок 5.9 – Временные диаграммы выходного сигнала замкнутого контура с задержкой (а) и упреждением (б)

При настройке регулятора необходимо учитывать следующие условия:

- коэффициент усиления (пропорциональная часть) должен быть равным 1 для полной компенсации перекоса;
- дифференциальная часть регулятора должна быть настроена на обработку сигнала с упреждением, что позволит повысить быстродействие регулирования;
- поскольку операция чистого дифференцирования приводит к снижению помехоустойчивости системы, на вход регулятора должен быть включен фильтр.

Передаточная функция ПД регулятора с фильтром с передаточной функцией  $W_f = \frac{K_d \cdot p}{T_f \cdot p + 1}$  показана в структуре на рис. 5.8 отдельным блоком. Здесь

$K_d$  – коэффициент усиления, может быть принят равным 1;  $T_f$  – постоянная времени, принимается равной  $\sim 0,01$  с.

Такая структура, по существу, является аналогом пропорционально-дифференциального фильтр-регулятора, рассмотренного в публикациях [253–257]. Благодаря такой конфигурации в предложенной системе осуществляется

совмещение принципов обратной связи и управления с упреждением, известных из теории автоматического управления [258, 259]. Преимуществом такого регулирования является повышение быстродействия и исключение статической ошибки.

#### 5.4. Способ предиктивного регулирования перекоса зазора валков клетки толстолистового стана

Исследования, проведенные автором работы [143], показали, что фактором, оказывающим наибольшее влияние на рассогласование давлений, является разница выходных толщин по сторонам раската. Причем, если не применять регулирующих воздействий, то эта разница «накапливается» после каждого прохода, т.е. приобретает наследственный характер. Результаты исследований, выполненных на стане 5000, подтвердили данный вывод. Это позволило обосновать идею, положенную в основу способа предиктивного регулирования перекоса зазора валков при реверсивной прокатке. Данный способ реализует предложенный принцип компенсации наследственной асимметрии раската, его схематично поясняет рисунок 5.10.

Суть заключается в запоминании усилий по сторонам DS и OS в конце прокатки в прямом проходе (условно, при прокатке «вперед»), рисунок 5.10, а и принудительной установке обратного перекоса валков перед проходом «назад», рисунок 5.10, б.

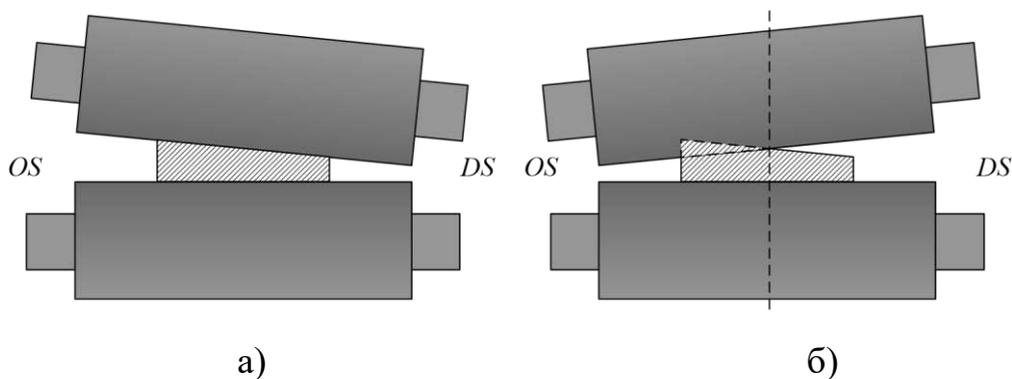


Рисунок 5.10 – Клиновидная форма раската при выходе из валков (а) и «обратный» перекос зазора при входе в валки (б)

Во время реверса осуществляется вычисление (прогнозирование) положений НУ. Поэтому способ получил название предиктивного (прогностического). Прототипом разработанного решения является способ горячей прокатки полос согласно патенту [144], упомянутому выше. В нем предложено осуществлять регулирование межвалкового зазора в функции разности температур левой и правой кромок раската. Измерение температуры осуществляется с помощью пирометров, установленных по сторонам клетки. В результате при компенсации асимметрии зазора учитывается влияние на усилия прокатки и соответственно на давления в гидроцилиндрах только фактора разницы температур. При этом наследственный перекося, полученный в предыдущем проходе, не учитывается. Эти недостатки приводят к снижению точности регулирования положений НУ по сторонам DS-OS.

*Согласно предлагаемому способу* для компенсации асимметрии  $\Delta S$  межвалкового зазора необходимо до входа раската в клетку создать «обратный» перекося  $\Delta S^* = -\Delta S$ . Для вычисления величины  $\Delta S^*$  следует сохранить в памяти величины давлений  $F_{DS}$  и  $F_{OS}$  в предыдущем проходе. Расчет регулирующих воздействий выполняется по выражению (5.1). При вычислениях  $\Delta S$  по выражению (5.3) учитываются ширина  $B$  раската, заданное обжатие  $\Delta h$  (разность толщин на входе  $H$  и на выходе  $h$  валков), а также зависимости жесткости клетки от усилия прокатки по сторонам DS-OS и другие факторы, которые при «традиционных» расчетах, как правило, принимаются постоянными.

Каждый из сигналов, подаваемых на регуляторы положений НУ, равен половине рассчитанной величины  $\Delta S^*$ . Далее перед реверсом раската выставляют предварительный перекося зазора так, что на стороне с большим усилием прокатки позиция рабочего валка принимает значение  $(S - \Delta S/2)$ , а на противоположной стороне –  $(S + \Delta S/2)$ . Это обеспечивает компенсацию перекося, возникшего в предыдущем проходе.

Данный способ позволяет компенсировать рассогласование толщин по сторонам раската, предотвратить накопление ошибки регулирования и тем са-

мым повысить его точность. В дополнение к этому снижается вероятность выхода РАС регулятора в зону ограничения выходного сигнала, как это показано на рисунке 5.6.

При реализации способа целесообразно решить следующие задачи:

1. Сохранить регулирование в функции разницы температуры по краям раската, предложенное в способе-прототипе [144]. Это может быть эффективным для прокатных станов, на которых установлены датчики сканирования температуры по сторонам раската (на стане 5000 такие датчики отсутствуют, и их установка затруднительна). При этом предлагаемое предиктивное регулирование вводится как функция, являющаяся отличительным признаком нового решения.

2. Определить номера проходов, в которых возникают недопустимые отклонения давлений, и исключить проходы, в которых нет необходимости их компенсации. Вероятно, что серповидность наиболее сильно проявляется на длинных тонких раскатах, т.е. в последних проходах. Однако в каждом случае этот вопрос требует исследований.

### **5.5. Экспериментальные исследования**

Разработанный способ регулирования перекося зазора валков реализован в алгоритме управления нажимными устройствами реверсивной клетки стана 5000. Также внедрен пропорционально-дифференциальный РАС регулятор. С целью оценки достоверности ожидаемых результатов проведены экспериментальные исследования прокатки заготовок различных сортаментов. На рисунке 5.11 представлены осциллограммы, аналогичные приведенным на рисунке 5.6, но полученные при внесенных изменениях [245].

На обоих рисунках они зафиксированы при прокатке одного и того же профиля в аналогичных проходах, соответственно толщина по проходам (окна 1) и установившиеся усилия прокатки (окна 2) одинаковы. Поэтому сравнение сигналов является корректным. При возникновении рассогласований моментов в обоих проходах (рис. 5.11, окно 2) сигнал на выходе РАС регулятора

(окно 3) снижается, однако в отличие от осциллограммы на рис. 5.6, он не выходит на уровень ограничения. Регулирующие воздействия подаются одновременно на оба гидравлических цилиндра. Это подтверждают отклонения зазоров по сторонам DS и OS в противоположных направлениях относительно заданного значения (окно 4). Перекос зазора  $\Delta S$  по датчикам положения в конце прокатки не превышает 1 мм, т.е. уменьшается в 2,5 раза по сравнению со случаем на рис. 5.6.



Рисунок 5.11 – Осциллограммы, аналогичные рис. 5.6, при внедрении разработанного способа и ПД регулятора перекоса зазора валков

### *Анализ результатов*

Сопоставление осциллограмм, представленных на рисунках 5.6 и 5.11, позволяет сделать следующие выводы.

1. При предложенной настройке РАС регулятора повышается быстродействие регулирования перекоса зазора валков. Это происходит по следующим причинам:

– осуществляется коррекция задания зазора валков после каждого реверса раската (предиктивное регулирование перекося), что обеспечивает компенсацию наследственной разнотолщинности;

– обеспечивается упреждающее регулирование (предуправление) путем регулирования положения гидравлического НУ в функции производной задающего сигнала (за счет введения дифференциальной части регулятора);

– РАС регулятор не выходит на уровень ограничения, что обеспечивает непрерывность регулирования в течение всей прокатки.

2. Уменьшается рассогласование положений гидроцилиндров по сторонам DS и OS от 2,5 мм на рис. 5.6 до 1 мм на рис. 5.11. Очевидно, что это приводит к снижению разницы толщин по сторонам раската, т.е. к уменьшению его клиновидности.

3. Благодаря отмеченным положительным результатам обеспечивается ограничение серповидности и осевого смещения раската. Кроме того, снижается вероятность возникновения предаварийных ситуаций, сопровождающихся форсированным разведением валков.

В целом, результаты проведенных исследований подтверждают достижение поставленных целей, суть которых заключается в повышении качества листового проката и снижении аварийности производства.

## **5.6. Обсуждение результатов**

Разработанный способ можно считать в определенной степени упрощенным, т.к. зависимость усилий прокатки от растяжения клетки по сторонам OS и DS принята пропорциональной и рассчитывается по выражению (5.1). Разность давлений, которая принимается в качестве задания положений НУ, также рассчитывается исходя из этих допущений по выражению (5.2). Более точные зависимости, полученные по уравнениям Головина-Симса, рассмотрены в публикациях [141, 142, 260]. Они разработаны применительно к черновым группам широкополосных станов горячей прокатки. Оценка возможности и целесообразности их применения для регулирования перекося зазора валков

клетки стана 5000 и других толстолистовых станов является самостоятельной задачей, которая требует отдельных исследований. Ее решение возможно в ближайшей перспективе.

Целесообразность внедрения разработанных алгоритмов подтверждена результатами моделирования и экспериментальными исследованиями. Также в ходе экспериментов подтверждена эффективность применения пропорционально-дифференциального РАС регулятора.

Разработки, представленные в настоящей главе, по существу, ***являются развитием концепции ROLL-GAP CONTROLL регулирования толщины и раствора валков клетки.*** Эта задача является одной из основных, поставленных в диссертационной работе. Конечным результатом является повышение точности регулирования «геометрии» раската и снижения аварийности оборудования.

Полученные результаты подтверждают возможность повышения качества листового проката за счет снижения дефектов «серповидность» и бокового смещения раската, вызванных асимметрией межвалкового зазора. Разработанный способ управления положением нажимных устройств рекомендуется для расширенного внедрения на толстолистовых прокатных станах [261]. В сочетании с усовершенствованными системами осевого перемещения (CVC<sup>plus</sup>) и противоизгиба рабочих валков [88, 89], а также с разработанными системами управления электроприводами выполненные разработки приобретают концептуальный характер.

## ВЫВОДЫ

1. В ходе эксплуатации и экспериментальных исследований системы регулирования асимметрии поперечного профиля раската установлены недостатки существующей настройки РАС регулятора. К ним относятся низкое быстродействие и несогласованность перемещений НУ по сторонам клетки.

Это приводит к развитию дефекта «серповидность» и возникновению предаварийных ситуаций, обусловленных выходом РАС регулятора в режим ограничения.

2. Обоснован принцип регулирования асимметрии поперечного профиля зазора валков на основе перераспределения регулирующих воздействий на исполнительные устройства, согласно которому осуществляются:

- вычисление дифференциального усилия прокатки на основе измерения давлений в гидроцилиндрах нажимных устройств по сторонам OS и DS;

- вычисление противодавлений по сторонам OS-DS, которые необходимо создать для компенсации дифференциального усилия;

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

- согласование режимов систем автоматического регулирования положений НУ по сторонам OS-DS путем установки обратно пропорциональных коэффициентов передающих звеньев.

3. Обосновано применение пропорционально-дифференциального РАС регулятора, обеспечивающего исключение статической ошибки и повышение быстродействия при сохранении устойчивости процесса регулирования. Предложенное решение представляет собой новое практическое приложение известного принципа регулирования с упреждением за счет введения дополнительной связи по производной входного сигнала.

4. Разработан способ предиктивного регулирования наследственного перекоса зазора валков, идея которого заключается в запоминании усилий в гидроцилиндрах по сторонам DS и OS, условно, при прокатке «вперед», и принудительной установке обратного перекоса валков перед прокаткой «назад». Обоснованы зависимости для вычисления положений НУ, устанавливаемых во время реверса.

5. В результате анализа осциллограмм, полученных при прокатке профиля тяжелого сортамента, дано экспериментальное подтверждение повышения быстродействия регулирования асимметрии зазора валков за счет компенсации наследственной разнотолщинности и упреждающего регулирования положения гидравлического НУ в функции производной задающего сигнала.

6. В ходе экспериментальных исследований подтверждено, что в результате увеличения быстродействия РАС регулятора обеспечиваются повышение точности регулирования межвалкового зазора по сторонам клетки и снижение разнотолщинности по ширине раската.

7. Выполненные разработки представляют собой развитие концепции ROLL-GAP CONTROLL реверсивной клетки толстолистого стана и рекомендуются для промышленного внедрения. Технический эффект заключается в снижении дефекта «серповидность», повышении точности формы раската в плане и соответственно улучшении «геометрии» готового листа.

## **Глава 6. ОГРАНИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РЕЖИМЕ ЗАХВАТА МЕТАЛЛА ВАЛКАМИ**

### **6.1. Обоснование направлений исследований**

Представленная глава посвящена научному обоснованию и разработке способов ограничения динамических нагрузок электромеханической системы валков за счет формирования оптимальных тахограмм электропривода. Также решаются вопросы разработки наблюдателя упругого момента двухмассовой системы с неуправляемой второй массой и разработке на его основе системы «прямого» регулирования упругого момента в режиме ударного приложения нагрузки.

Механизм возникновения ударов при закрытии (замыкании) углового зазора в шпиндельном соединении рассмотрен в п. 1.11, он поясняется рисунком 1.23. Основными причинами возникновения недопустимых динамических нагрузок являются большая инерционность двухмассовой системы, образованной массой валка с одной стороны и вращающихся частей двигателя – с другой. Это приводит к тому, что при замыкании угловых зазоров возникают удары в шпиндельных соединениях. Кроме этого на амплитуду динамических нагрузок оказывают влияние упругие свойства шпинделя. Поэтому изменения момента на валу в режиме захвата металла валками имеют колебательный характер. Амплитуда колебаний в 2-3 раза превышает величину динамического момента, обусловленного непосредственно замыканием зазора [172, 262].

#### *Динамические процессы при захвате*

В подтверждение сказанному, на рисунке 6.1 приведены осциллограммы моментов на валах верхнего и нижнего шпинделей клетки стана 5000, а также осциллограммы крутильных колебаний валопроводов [263, 264]. Они получены с помощью системы измерения упругой деформации «MANNER TG28TE», изготовленной фирмой MANNER (Германия), которая была смонтирована на стане в 2011 г. Она является аналогом системы, упомянутой в п. 1.11.

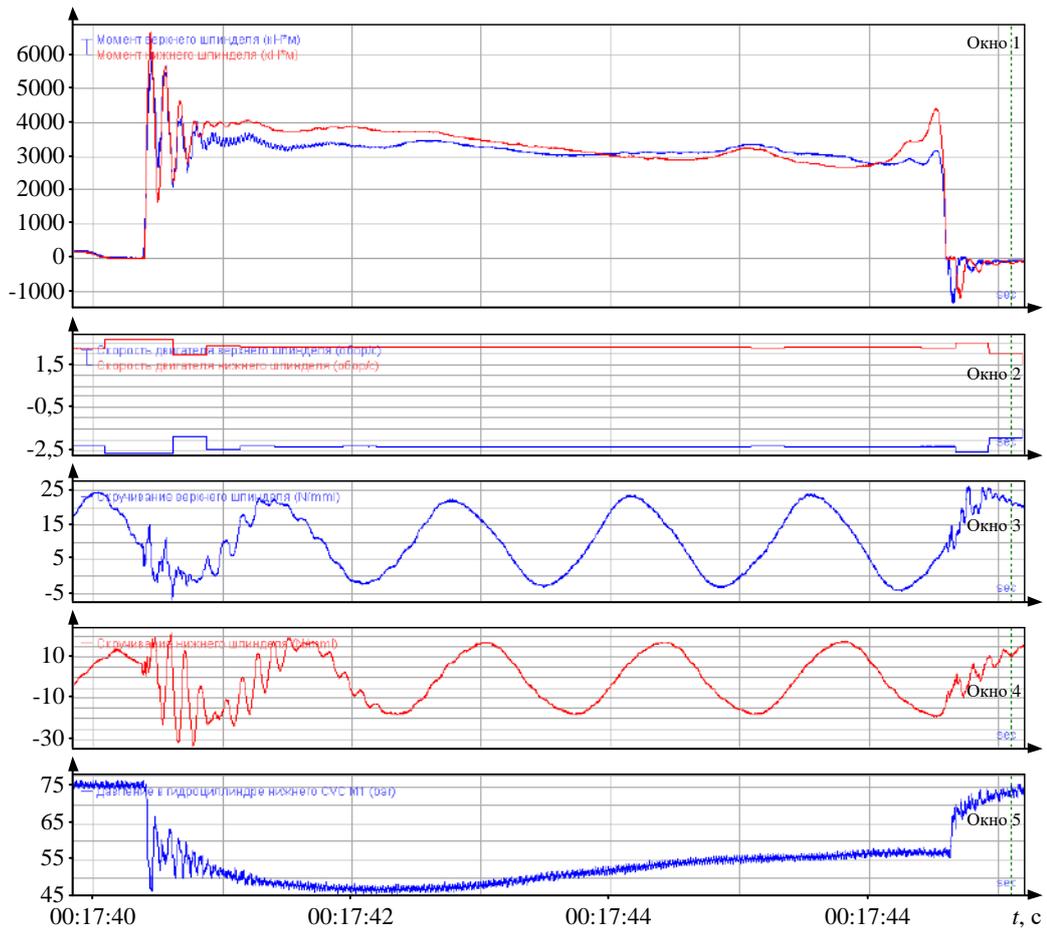


Рисунок 6.1 – Осциллограммы моментов на валу верхнего и нижнего шпинделей горизонтальной клетки стана 5000

Анализ осциллограмм позволяет сделать следующие выводы:

1. Амплитуда ударного момента при захвате более чем в 2 раза превышает установившийся момент прокатки и достигает 6,5–7 МН·м. Также значительные динамические моменты возникают при выходе раската из валков.

2. Крутильные колебания, накладывающиеся на синусоиду, вызванную вращением валков, имеют значительную амплитуду в особенности на нижнем шпинделе.

Исследованию динамических процессов при замыкании угловых зазоров посвящены научные труды многих авторов. Применительно к электромеханическим системам прокатных станов наиболее подробно материал представлен в монографиях [17, 19]. В работе [265] выполнена следующая градация известных способов снижения динамических нагрузок:

- использование оптимальных законов управления электроприводом;
- уменьшения жесткости механических передач;

– использование программных наблюдателей упругого момента и др.

В работе [266] упоминаются различные способы и технические решения, направленные на частичное или полное закрытие зазоров к моменту захвата: новые конструкции вкладышей, различные конструкции систем уравнивания, приложение тормозного момента к валкам [267–271], ускорение электропривода перед входом головы в клеть [272–274]. В большинстве известных публикаций в качестве основного подхода названо изменение скоростного режима. С этой целью предложены технические решения, большинство из которых обеспечивает выбор зазора в валопроводах либо путем предварительного ускорения двигателя, либо за счет снижения скорости (подтормаживания) валков.

Вместе с тем, известные технические решения не нашли широкого промышленного применения. В литературных источниках не содержится информации об их внедрении на толстолистовых станах (за исключением публикаций при участии автора). Это подтверждает актуальность разработок, направленных на ограничение динамических нагрузок в электромеханических системах валков. В представленной главе рассматриваются результаты исследований, выполненных для клетки стана 5000. Предварительно дается анализ известного способа управления, обеспечивающего захват металла в режиме предварительного разгона (предразгона) электропривода.

### ***Способ предразгона электропривода***

В публикациях [50, 275] рассмотрены способы ограничения динамического момента, в основу которых положен принцип захвата металла во время ускорения электропривода, что обеспечивает предварительное замыкание углового зазора. Упрощенная функциональная схема электроприводов валков клетки стана 5000, реализующая данный принцип, показана на рисунке 6.2 [276]. Для определения момента начала предразгона используется информация из существующей системы слежения за металлом на рольгангах. Для формирования добавочной скорости используется дополнительный задатчик интенсивности (ЗИ предразгона), выходной сигнал которого суммируется с сигналом с выхода интерполятора. Время предразгона должно быть рассчитано исходя из условия полного закрытия зазора. Темп дополнительного ускорения

устанавливается экспериментально, для рассматриваемого электропривода он составляет  $0,22 \text{ м/с}^2$ . Схема реализована программно в управляющем контроллере клетки.

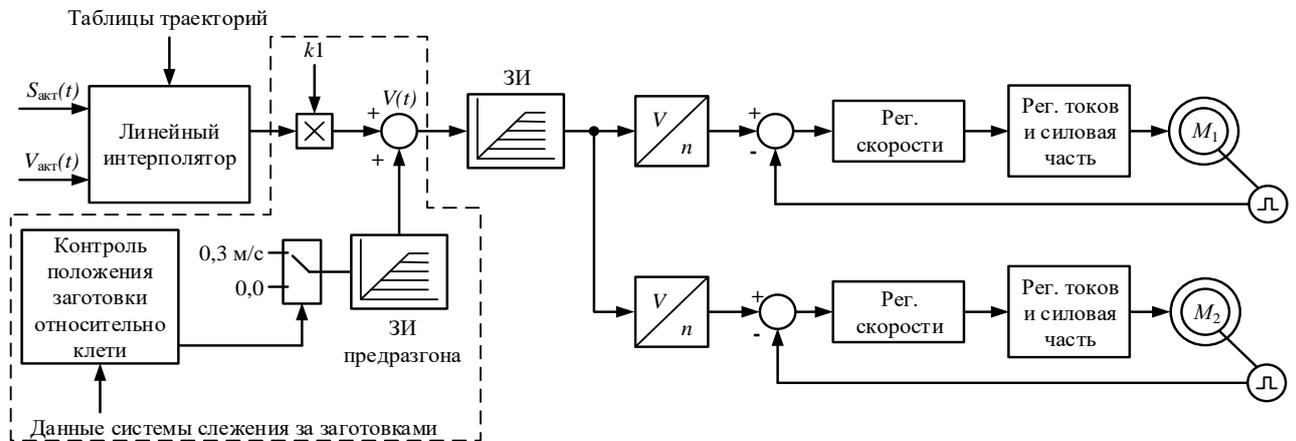


Рисунок 6.2 – Функциональная схема системы управления скоростью электроприводов (контуром выделены блоки, обеспечивающие предразгон)

В работах [91, 277] доказано, что при точном определении момента начала и правильном выборе ускорения данная система обеспечивает снижение динамических нагрузок двигателя и механического оборудования. В большинстве случаев амплитуда динамического момента снижается в 1,3-1,5 раза, в аналогичной пропорции уменьшается динамическая просадка скорости.

Вместе с тем, внедрение и эксплуатация системы показали, что такая положительная картина обеспечивается не во всех случаях. Это обусловлено тем, что, наряду с динамическим ударом, вызванным непосредственно замыканием зазора, причиной динамических нагрузок в шпинделях являются затухающие колебания момента. Их амплитуда зависит от упругих свойств валопровода, а степень затухания определяется диссипативными силами (трение, нагрев и др.).

По результатам экспериментальных исследований сделаны два основных вывода [278]:

1. Известный способ выбора зазора в механических передачах за счет предварительного разгона обеспечивает частичное ограничение динамического момента двигателя и соответственно момента на передающем валу в режиме захвата.

2. При реализации известного способа перерегулирование момента и посадка скорости устраняются не полностью. Это означает, что одного только предразгона для полной компенсации динамического момента недостаточно.

Кроме того, динамические показатели скорости и момента при ударном приложении нагрузки определяются быстродействием двухконтурной системы автоматического регулирования скорости. Известно, что при настройке этой системы на симметричный оптимум перерегулирование момента двигателя при ударном приложении нагрузки составляет 43% [16]. Это вызывает аналогичные динамические увеличения упругого момента шпинделя. В связи с этим ставится задача снижения составляющей динамического момента, связанной с настройкой САР скорости электропривода.

### ***Обоснование разработки наблюдателя упругого момента***

Вместе с тем, следует учитывать, что известные и предложенные к разработке системы обеспечивают косвенное и, по существу, разомкнутое регулирование упругого момента в валопроводах клетки. Это объясняется тем, что системы прямого измерения упругого момента являются сложными в изготовлении и требуют высокой культуры обслуживания. К тому же, как отмечалось выше, в агрессивной среде стана горячей прокатки они являются недолговечными. Поэтому системы прямого регулирования моментов шпинделей не нашли промышленного применения.

Единственным альтернативным решением является вычисление упругого момента с помощью наблюдателей, по сути, цифровых двойников измерительной системы. Однако литературный обзор показал отсутствие готовых технических решений, которые обладали бы быстродействием, необходимым для вычисления параметров в режиме ударного приложения нагрузки, и могли бы быть применены на прокатном стане.

В соответствии с задачами диссертационной работы, в настоящей главе поставлена задача разработки цифрового наблюдателя упругого момента. Он должен обеспечить возможность определения параметров неуправляемой вто-

рой массы (в нашем случае валка) по измеряемым параметрам первой (управляемой) массы – двигателя. Вычисление должно осуществляться в on-line режиме, поэтому не должно содержать громоздких вычислительных операций и работы с массивами данных.

Разработка наблюдателя, отвечающего таким требованиям, обеспечит возможность создания системы «прямого» регулирования упругого момента в валопроводе клетки без его непосредственного измерения. Решение данной задачи также рассматривается в представленной главе.

## 6.2. Анализ режима захвата металла валками

На рисунке 6.3 приведены осциллограммы моментов  $M_{ДВ}$  двигателей, моментов  $M_{В}$ , измеренных на валах шпинделей, и скоростей  $n$  электроприводов верхнего и нижнего валков [279]. Они зафиксированы в режиме захвата при прокатке профиля «тяжелого» сортамента. В окне 3 представлены осциллограммы сигналов заданий  $n_0$  и фактических скоростей  $n_{в}$ ,  $n_{н}$  для обоих электроприводов. Захват происходит в режиме торможения электроприводов при полностью открытых зазорах в шпиндельных соединениях. Размыкание углового зазора подтверждают небольшие отрицательные отклонения моментов на валах  $M_{В}$  и электромагнитных моментов двигателей  $M_{ДВ}$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ . При отработке данного режима моменты обоих двигателей достигают уровня ограничения  $M_{ДВmax}$ , установленного равным 4500 кН·м.

Динамические отклонения моментов на осциллограммах для верхнего валка приведены в таблице 6.1 в столбцах со ссылкой «рис. 6.3». Их амплитуду характеризуют коэффициенты кратности  $k_{ВМ}$  (либо  $k_{ДВМ}$ ), которые определяются как отношение максимального момента  $M_{Вmax}$  (либо  $M_{ДВmax}$ ) к установившемуся моменту прокатки  $M_{ст}$ .

В результате анализа осциллограмм сделаны следующие выводы:

1. Кратность динамического момента  $k_{ВМ}$  на валах обоих шпинделей в 2,2 раза превышает установившийся момент прокатки ( $M_{Вmax} = 6500$  кН·м при  $M_{ст} = 3000$  кН·м).

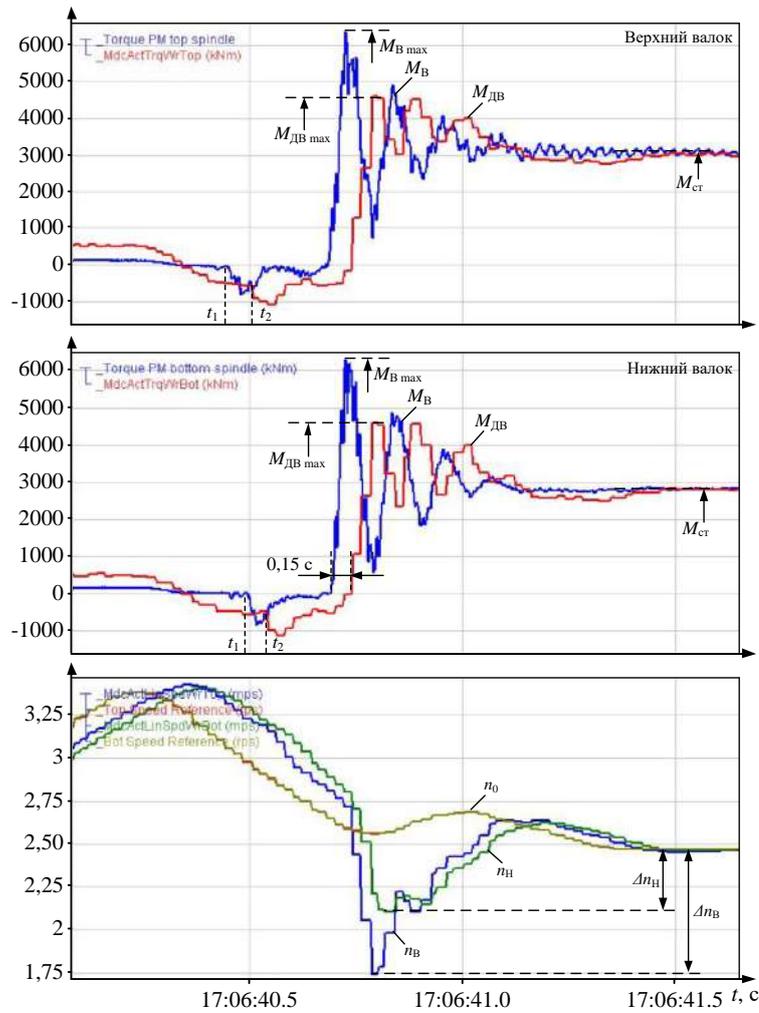


Рисунок 6.3 – Осциллограммы моментов и скоростей в режиме захвата при открытых угловых зазорах в шпиндельных соединениях

Таблица 6.1 – Динамические отклонения моментов при захвате

| Параметр         | Величина на осциллограммах |             |           |           |             |          |
|------------------|----------------------------|-------------|-----------|-----------|-------------|----------|
|                  | рис. 6.3                   |             |           | рис. 6.14 |             |          |
| Момент на валу   | $M_{ст}$                   | $M_{вmax}$  | $k_{вм}$  | $M_{ст}$  | $M_{вmax}$  | $k_{вм}$ |
|                  | кН·м                       |             | ед.       | кН·м      |             | ед.      |
|                  | 3000                       | 6500        | 2,2       | 1500      | 2500        | 1,67     |
| Момент двигателя | $M_{ст}$                   | $M_{двmax}$ | $k_{двм}$ | $M_{ст}$  | $M_{двmax}$ | $k_{вм}$ |
|                  | кН·м                       |             | ед.       | кН·м      |             | ед.      |
|                  | 3000                       | 4500        | 1,5       | 1500      | 2000        | 1,33     |

2. Амплитуду электромагнитного момента двигателя определить невозможно, т.к. момент достигает уровня ограничения 4500 кН·м. Это происходит в течение первых двух колебаний момента. Но даже в этом случае  $k_{вм}=1,5$ .

3. После захвата возникают колебания моментов, которые затухают только благодаря диссипативным силам в передаче (вязкому трению, нагреву и др.). Влияние демпфирующих свойств двигателя происходит не в полной мере вследствие ограничения по моменту и кратковременной потери управляемости электропривода.

4. Осциллограммы моментов двигателей  $M_{ДВ}$  и шпинделей  $M_B$  имеют идентичный характер с отличиями по максимальным значениям и времени их достижения. В силу инерционности электрической системы момент на валу достигает максимального значения  $M_{Bmax}$  раньше, чем момент двигателя достигает величины  $M_{ДВmax}$ . Разница составляет 0,15–0,2 с, эти данные подтверждаются выводами, сделанными в работах [6, 55].

5. Поскольку динамические процессы момента на валу и электромагнитного момента двигателя идентичны, в качестве основного контролируемого параметра достаточно принять момент двигателя электропривода. Такая возможность подтверждается авторами публикаций [6, 280].

Представленные осциллограммы подтверждают, что амплитуда динамического момента наряду с ударом при замыкании зазора определяется упругими свойствами механической передачи в двухмассовой системе. На них прослеживаются затухающие колебания моментов, при этом максимальные значения наблюдаются на первом пике после захвата металла. При этом *амплитуда колебательных процессов может иметь значительно большие значения, чем максимум составляющей момента, вызванного непосредственно ударным замыканием зазора*. Ниже дается подтверждение данному выводу.

### **6.3. Способ ограничения динамического момента с предразгоном и замедлением после захвата**

#### **6.3.1. Принцип ограничения динамического момента**

В результате выполненной декомпозиции временных зависимостей и анализа отдельных составляющих упругого момента в двухмассовой электромеханической системе с зазором *обоснован общий принцип (концепция) ограничения динамических нагрузок при замыкании углового зазора*. Согласно

данному подходу предлагается осуществлять индивидуальную компенсацию составляющих динамического момента, обусловленных:

- ударом при замыкании углового зазора;
- упругими свойствами механической передачи;
- настройкой САР скорости электропривода.

Реализацию принципа в электроприводах клетей прокатных станов предлагается осуществлять путем формирования тахограмм с положительным и отрицательным ускорениями соответственно до и после захвата металла. Его практическая реализация в двухмассовой системе с ударным приложением нагрузки осуществляется следующим образом:

1. До ударного приложения нагрузки обеспечивается предразгон с минимальным ускорением с целью выбора зазора независимо от его величины. Это позволит компенсировать составляющую  $M_{12\delta}$ , вызванную ударом (меньшую составляющую упругого момента).

2. С целью компенсации составляющей  $M_{12y}$ , после приложения нагрузки осуществляется снижение скорости с заданным отрицательным ускорением (темпом замедления).

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

В плане его практического приложения к электроприводам толстолистого стана *разработан способ управления, согласно которому:*

- захват металла осуществляют на участке ускорения электропривода;
- скорость в момент захвата формируют равной величине, необходимой для компенсации динамической ошибки регулирования скорости (рассматривается ниже в п. 6.4.2);

- начало ускорения электропривода определяют по расстоянию «головой» заготовки от клетки, вычисленному по зависимости

$$S = (V_3 + 0,5V_{\text{оп}}) \cdot (t_2 - t_1); \quad (6.1)$$

– снижение скорости после захвата осуществляют по линейному закону с заданным отрицательным ускорением (как показали результаты моделирования, оптимальным для электропривода валков клетки стана 5000 является ускорение от  $-2,5$  до  $-3,5$  рад/с<sup>2</sup>, обоснование представлено ниже).

На рисунке 6.4 представлено пояснение к вычислению расстояния от головного участка заготовки до клетки по формуле (6.1). По известным значениям заправочной скорости  $V_3$  и скорости опережения  $V_{оп}$  (конечной скорости предразгона) вычисляется требуемый темп изменения  $V_{оп}/(t_2-t_1)$ . Исходя из этого рассчитывается расстояние  $S$  от «головы» заготовки до клетки, при достижении которого начинается предразгон. При поступлении сигнала «Данные системы слежения за заготовками» о подходе раската на расстояние  $S$  подается управляющий сигнал на вход ЗИ предразгона. После захвата металла задание на предразгон обнуляется.

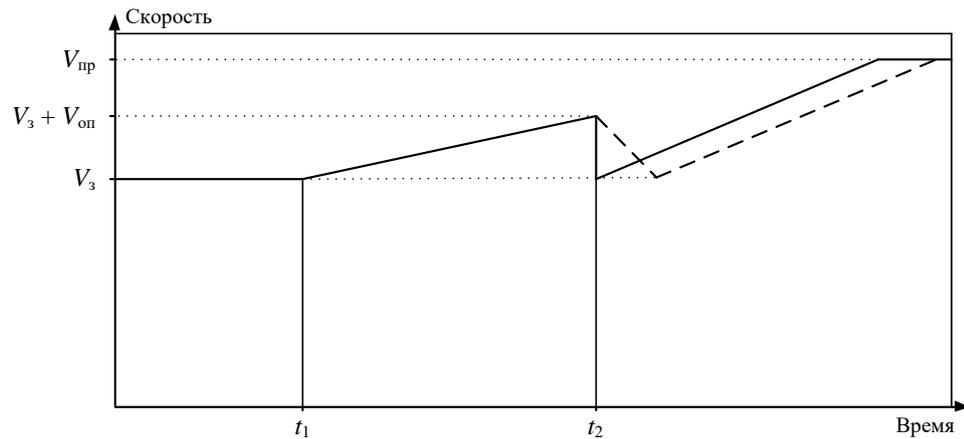


Рисунок 6.4 – Пояснение к вычислению расстояния от «головы» раската до клетки

Из тахограммы, показанной сплошной линией, следует, что торможение после захвата может осуществляться путем снижения задания скорости скачком. Однако было установлено, что такой вариант не обеспечивает ограничения динамического момента двигателя, хотя позволяет получить удовлетворительный переходный процесс упругого момента на валу [277]. Для устранения этого недостатка обоснован способ, обеспечивающий снижение скорости с заданным отрицательным ускорением, он поясняется фрагментом тахограммы, показанным прерывистой линией.

Кроме того, разработаны алгоритмы, обеспечивающие инвариантность регулирования скорости к точности определения положения металла на рольганге, в том числе за счет «привязки» начала разгона к фиксированному положению раската относительно клетки. Перечисленные способы управления скоростными режимами электроприводов рассматриваются ниже.

### 6.3.2. Описание способа

Суть разработанного способа поясняется графиком задания скорости электропривода, представленным на рисунке 6.5 [279]. Он включает выполнение следующих операций (показаны на средней тахограмме):

– до захвата металла валками в интервале  $t_1-t_2$  осуществляется повышение скорости электропривода на величину, компенсирующую динамическое снижение (просадку) скорости  $\Delta n_{\text{в}}$  либо  $\Delta n_{\text{н}}$  (см. рис. 6.3);

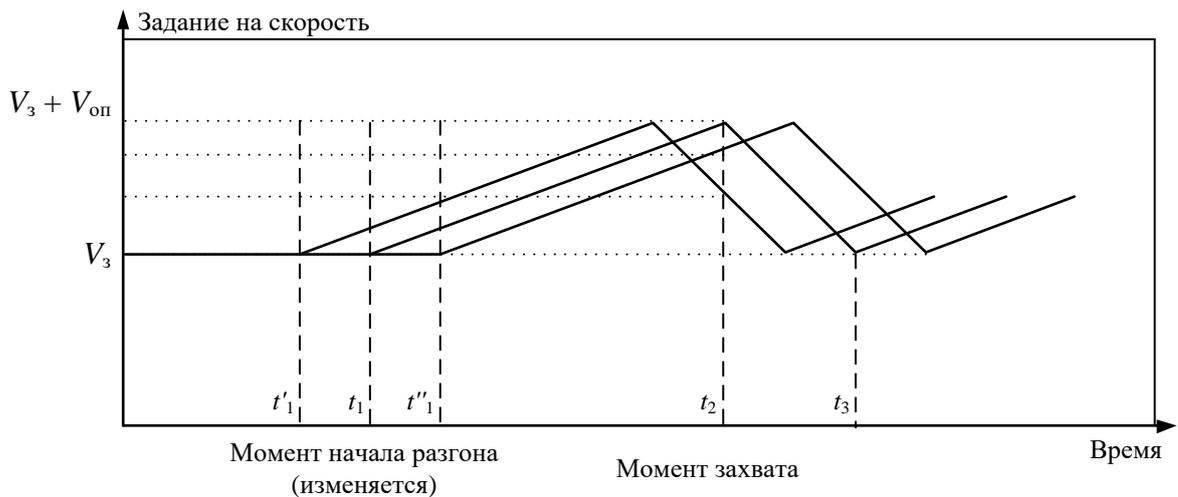


Рисунок 6.5 – Задание скорости электропривода клетки с предразгоном и торможением после захвата

– момент  $t_1$  начала предразгона и длительность интервала  $t_1-t_2$  рассчитываются таким образом, чтобы захват металла осуществлялся на участке ускорения электропривода, это обеспечивает гарантированное замыкание зазоров в шпиндельных соединениях;

– после входа металла в клеть (в момент  $t_2$ ) в интервале  $t_2-t_3$  дополнительно увеличенная скорость снижается на величину полученного прираще-  
ния;

– при  $t > t_3$  в соответствии с технологией происходит ускорение до рабочей скорости.

Алгоритм управления реализован программным путем в контроллере электроприводов клетки. Схема системы управления, поясняющая реализацию данного способа, представлена на рисунке 6.6 [281]. Отличием является наличие блока управления компенсацией просадки скорости. Величина компенсации рассчитывается в модели второго уровня по ожидаемому моменту электропривода и характеристикам САР скорости, показанным в п. 6.4.2.

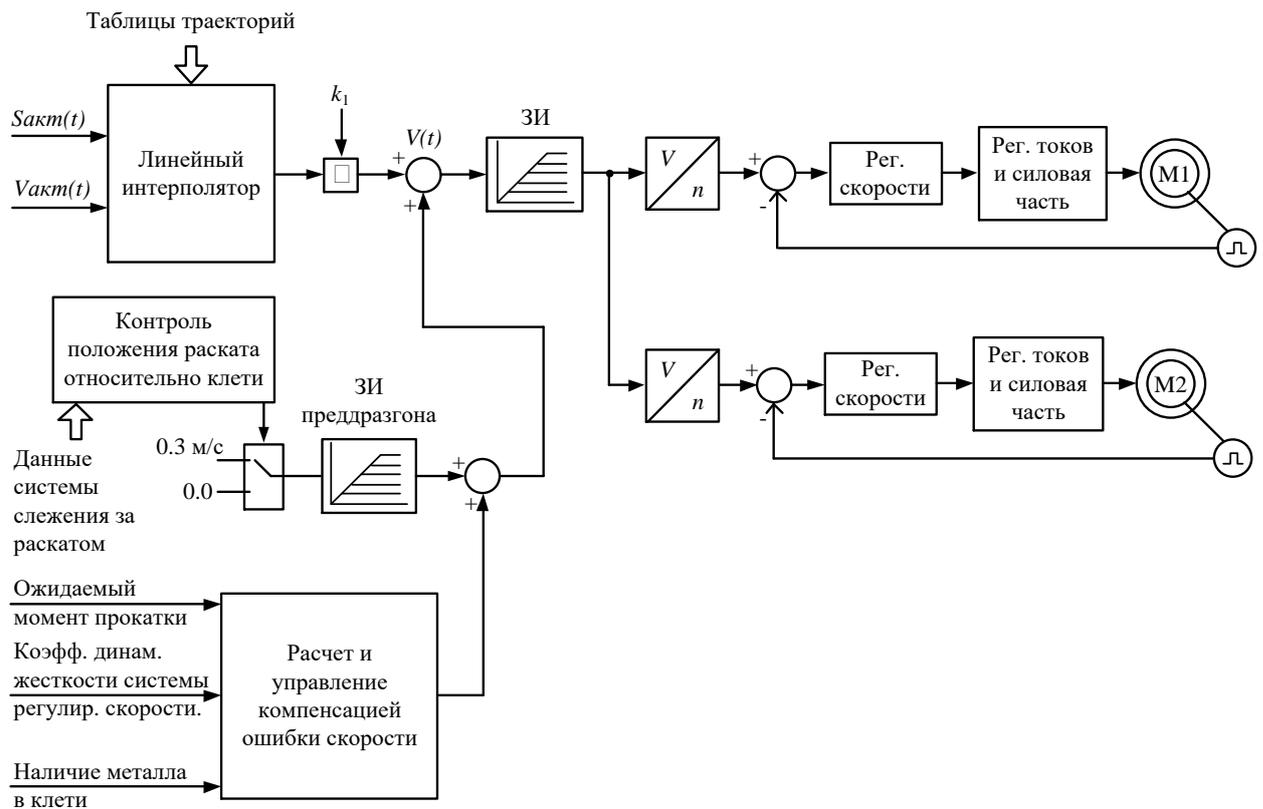


Рисунок 6.6 – Функциональная схема системы управления, реализующая способ управления с замедлением после захвата

Для определения сигнала компенсации предварительно получена экспериментальная зависимость величины просадки скорости от момента нагрузки. По этой характеристике определяется коэффициент динамической жесткости электромеханической системы. Величина ускорения определена экспериментально и, как отмечалось выше, равна  $0,22 \text{ м/с}^2$ . Для определения момента начала ускорения используется информация, поступающая из системы слежения за металлом на рольгангах, показанной блоком «Контроль положения раската относительно клетки».

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что качество переходных процессов в момент захвата зависит от точности измерения расстояния, обеспечиваемой системой слежения за заготовками. При возникновении ошибки в определении положения «головы» раската (рис. 6.5, моменты  $t'_1, t''_1$ ) при его входе в клеть в момент  $t_2$  будет устанавливаться меньшее значение опережающей скорости по сравнению с расчетным ( $V'_{оп}$  либо  $V''_{оп}$ ). Ломаная линия 1 соответствует раннему началу ускорения электропривода, линия 2 – точному определению момента ускорения, линия 3 – поступлению задания на ускорение «с опозданием». В обоих случаях неточного задания начала ускорения динамические отклонения моментов на валах шпинделей увеличиваются (на рис. 6.5 не показаны). Это было подтверждено результатами моделирования.

### 6.3.3. Исследование методом математического моделирования

Выполнялся сравнительный анализ следующих режимов:

1. Проектный режим, при котором захват осуществляется на установившейся заправочной скорости.
2. Режим предварительного выбора люфтов, когда электропривод предварительно разгоняется с заданным ускорением для замыкания зазоров в механических передачах.
3. Режим, реализующий разработанный комбинированный способ ограничения динамического момента за счет ускорения и компенсации динамической ошибки.

На рисунке 6.7 приведены графики изменения сигнала задания скорости (окно 1), актуальной скорости (окно 2) и момента (окно 3) электропривода (ЭП) [259]. Обозначения кривых соответствуют номерам сравниваемых режимов. Захват металла валками происходит в момент времени 2,25 с.

Анализ графиков показал, что динамическая просадка скорости в первом режиме составляет 13%, во втором – 5,2%, в третьем – 18% исходных значений скорости перед захватом. При этом в третьем случае скорость после сброса приращения практически соответствует скорости до захвата. Таким образом,

благодаря компенсации динамической ошибки, обеспечивается уменьшение просадки скорости при захвате практически до нуля.

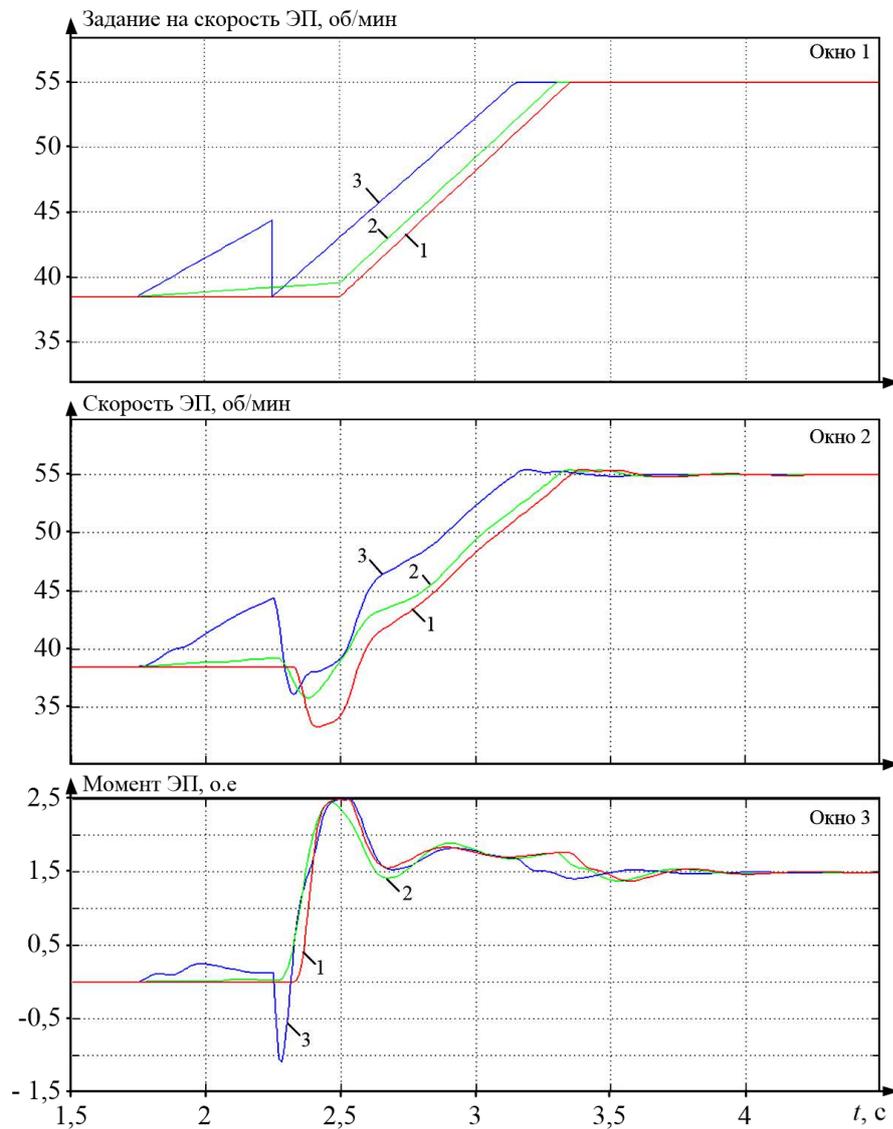


Рисунок 6.7 – Переходные процессы при сравнении способов компенсации динамических моментов

Если рассматривать переходные процессы момента, то в первом и третьем случаях регулятор скорости входит в насыщение, перерегулирование момента достигает предельного значения. Кроме того, в третьем случае наблюдаются значительные знакопеременные колебания момента непосредственно после захвата. Существенным недостатком этого варианта также являются значительные отклонения кривой 3 скорости от заданной тахограммы (от кривой 1 в окне 1). При внедрении это потребует постоянной перенастройки вспомогательных механизмов.

### Совершенствование алгоритма управления

В связи с указанными недостатками предложен усовершенствованный алгоритм управления, согласно которому снижение задания скорости в момент захвата предлагается осуществлять не скачком, как это показано на тахограмме рис. 6.4, а с заданным регулируемым темпом (отрицательным ускорением). Этот вариант поясняется с помощью расчетных кривых, представленных на рисунке 6.8.

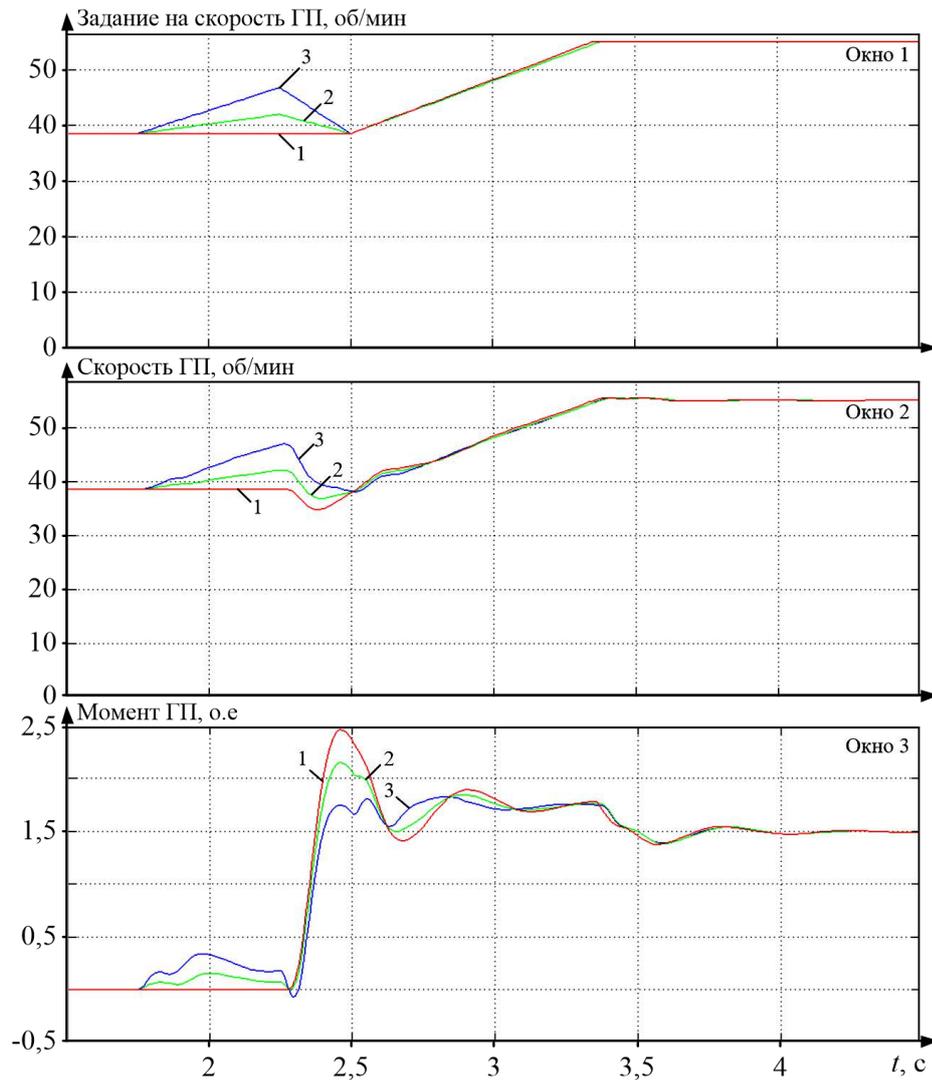


Рисунок 6.8 – Компенсация динамического момента при различных отрицательных ускорениях после захвата

На графике 1 в окне 1 ускорение до рабочей скорости начинается через 0,25 с после захвата, который, как и в предыдущем случае, происходит в момент времени 2,25 с. В предлагаемом варианте после захвата металла валками

происходит замедление электропривода с заданным отрицательным ускорением. Положительный эффект заключается в том, что при торможении электропривода возникает отрицательный динамический момент, который частично компенсирует динамический момент, возникающий при захвате. В результате перерегулирование момента уменьшается на величину, зависящую от темпа замедления электропривода. Это подтверждают зависимости 2 и 3, рассчитанные при различных темпах ускорения и замедления, причем положительные и отрицательные ускорения для каждого графика не одинаковы. Кривые с индексом 2 соответствуют отрицательному ускорению  $-1,5 \text{ с}^{-2}$ , с индексом 3 – ускорению  $-3,5 \text{ с}^{-2}$ .

### ***Обоснование оптимального темпа замедления после захвата***

Возникает задача обоснования оптимального отрицательного ускорения после захвата, обеспечивающего минимальное перерегулирование момента. Результаты, полученные при моделировании захвата с различными темпами замедления, представлены на рисунке 6.9 [281].

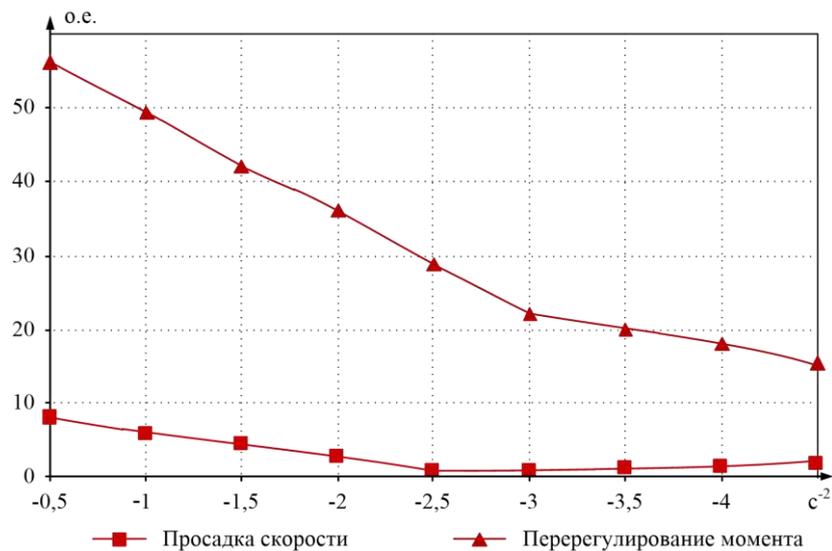


Рисунок 6.9 – Зависимости максимального динамического момента и просадки скорости от отрицательного углового ускорения

Приведены графики изменения просадки скорости и перерегулирования момента в зависимости от отрицательного ускорения. До величины углового ускорения  $-3 \text{ с}^{-2}$  происходит интенсивное уменьшение максимального момента. Уменьшение просадки скорости происходит в диапазоне до  $-2,5 \text{ с}^{-2}$ . При

дальнейшем увеличении отрицательного ускорения ее величина незначительно возрастает, а темп уменьшения перерегулирования момента (наклон кривой 2 снижается). Это объясняется тем, что уменьшается первый пик, но увеличивается второй пик (кривая 3 в окне 3 на рис. 6.8), который становится больше, чем первый.

Как следует из представленных результатов, оптимальным для исследуемого электропривода является диапазон отрицательных ускорений от  $-2,5 \text{ с}^{-2}$  до  $-3,5 \text{ с}^{-2}$ . В этом случае просадка скорости минимальна, первый и второй пики момента равны по величине и практически не превышают установившегося значения. Для подтверждения сделанного вывода проведены экспериментальные исследования, позволившие учесть особенности реального процесса захвата. Информация о них приводится в п. 6.4.3.

#### **6.4. «Инвариантный» способ управления скоростным режимом с компенсацией динамической ошибки**

##### **6.4.1. Описание способа**

Для устранения недостатков, вызванных неточностью определения положения заготовки на рольганге, показанных в п. 6.3.2, разработан *способ управления электроприводами с формированием сигнала на замедление в момент захвата металла валками*. Он обеспечивает захват в режиме ускорения независимо от точности определения положения «головы» раската на рольганге. Это поясняют диаграммы задания скорости, представленные на рисунке 6.10 [279]. Предлагается осуществлять ускорение электропривода вплоть до захвата металла (момент времени  $t_2$ ) независимо от времени начала предразгона (моменты  $t'_1$ ,  $t_1$ ,  $t''_1$ ). В этом случае момент начала торможения совпадает с моментом захвата. В результате негативные последствия от более раннего либо позднего ускорений будут сведены к минимуму.

На рисунке 6.11 показаны временные зависимости, полученные при формировании сигналов задания согласно разработанному способу. Для этого использована имитационная модель электропривода, рассмотренная в п. 2.2 [282]. Захват металла (окно 2) происходит в момент времени  $t_2=2,25 \text{ с}$ . В этот

же момент начинается торможение электропривода (окно 1). Как видно из графиков, благодаря этому устраняется влияние неточности определения положения раската на рольганге на переходный процесс. Перерегулирование момента остается на одном уровне, практически исключаются его колебания.

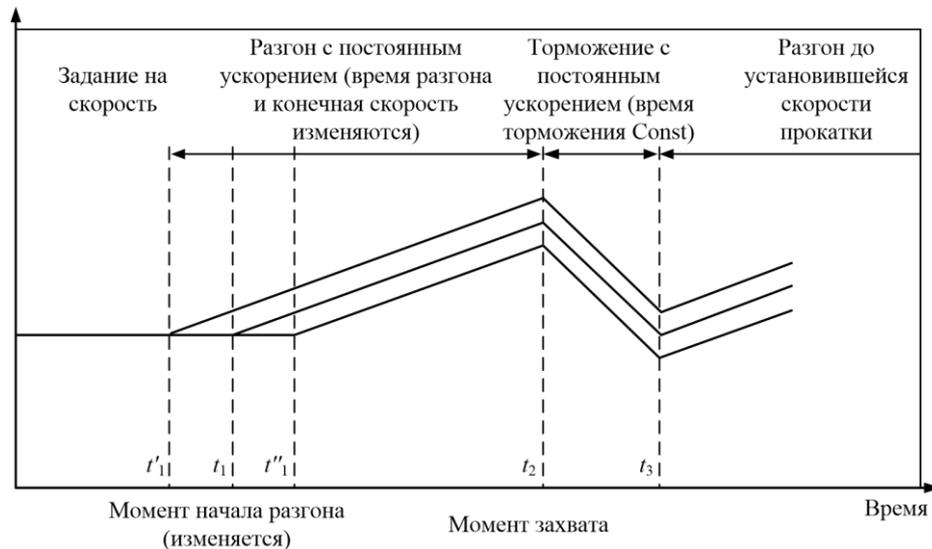


Рисунок 6.10 – Задание скорости электропривода клетки согласно разработанному «инвариантному» способу управления

Данное отличие объясняется тем, что момент окончания предразгона (и соответственно начала торможения) определяется по усилию прокатки. Ошибка в определении положения «головы» раската относительно клетки не влияет на перерегулирование момента при захвате. Это является преимуществом разработанного способа.

#### 6.4.2. Способ компенсации динамической ошибки скорости

Динамические показатели скорости и момента при ударном приложении нагрузки наряду с механическими свойствами передачи определяются быстродействием двухконтурной системы автоматического регулирования скорости. Как отмечалось в п. 6.1, при настройке такой системы на симметричный оптимум перерегулирование момента двигателя в идеальных условиях ударного приложения нагрузки составляет 43%. Это вызывает аналогичные динамические увеличения момента на передающем валу. В связи с этим ставится задача снижения составляющей динамического момента, связанной с настройкой САР скорости электропривода.

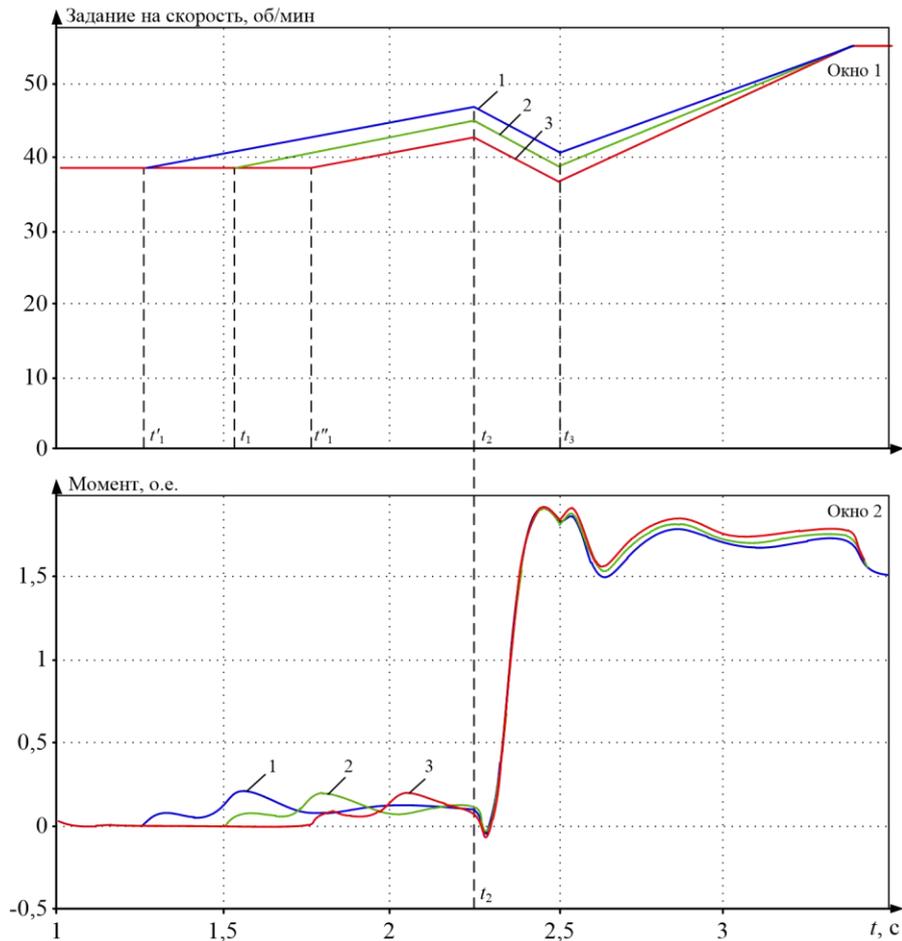


Рисунок 6.11 – Переходные процессы момента двигателя при моделировании способа

На рисунке 6.12 приведены графики переходных процессов момента двигателя, полученные с помощью модели двухмассовой системы электропривода. Они рассчитаны для ударного приложения номинальной нагрузки при различных постоянных времени пропорционально-интегрального регулятора. Перерегулирование момента составляет от 44% до 63%, это подтверждает необходимость разработки решений по его ограничению.

*Суть разработанного способа заключается в ограничении динамического момента электропривода посредством упреждающего увеличения задания скорости на величину динамической ошибки ее регулирования при ударном приложении нагрузки.* В результате обеспечиваются компенсация просадки скорости при захвате и ограничение влияния настройки САР скорости на динамический момент.

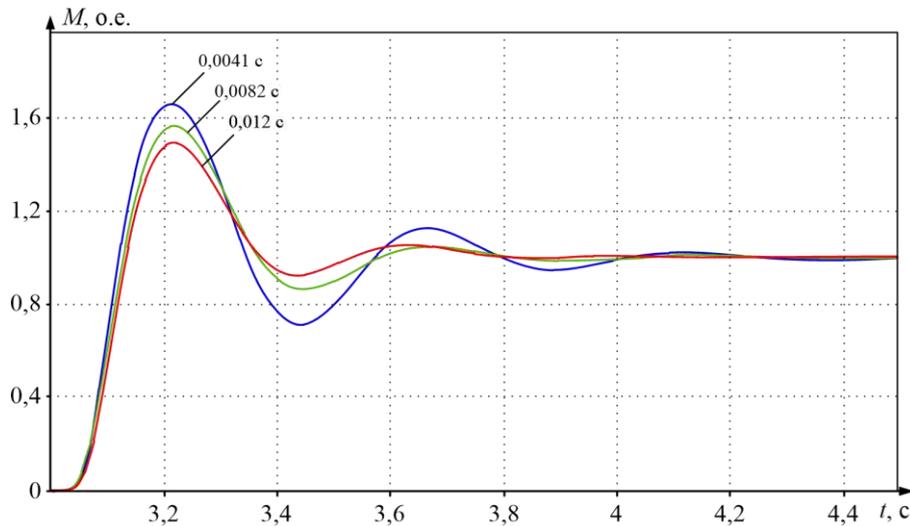


Рисунок 6.12 – Переходные процессы момента при различных постоянных времени регулятора скорости

На рисунке 6.13 представлены переходные процессы скорости и тока в однократно-интегрирующей (кривые 1, 3) и двукратно-интегрирующей (кривые 2, 4) САР скорости электропривода в режиме ударного приложения нагрузки [283]. В однократно-интегрирующей системе имеет место статическая ошибка регулирования скорости  $\Delta\omega_c$ . Ее величина определяется по формуле:

$$\Delta\omega_c = (2T_M / J_{\text{пр}}) \Delta M_c \quad (6.2)$$

где  $J_{\text{пр}}$  – момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя;

$\Delta M_c$  – прикладываемый момент статической нагрузки;

$T_M$  – электромеханическая постоянная времени.

В двукратно-интегрирующей системе статическая ошибка регулирования скорости отсутствует. Максимальную динамическую ошибку в такой системе можно оценить по эмпирической формуле [283, 284]:

$$\Delta\omega_d = (1,9T_M / J_{\text{пр}}) \Delta M_c \quad (6.3)$$

Таким образом, для компенсации динамической просадки согласно разработанному способу скорость к моменту приложения нагрузки должна быть увеличена на составляющие, рассчитанные по выражениям (6.2) либо (6.3) в зависимости от настройки САР скорости электропривода. Этот вывод справедлив как для синхронных электроприводов с частотным регулированием

скорости, так и для тиристорных электроприводов постоянного тока, которые установлены на действующих прокатных станах.

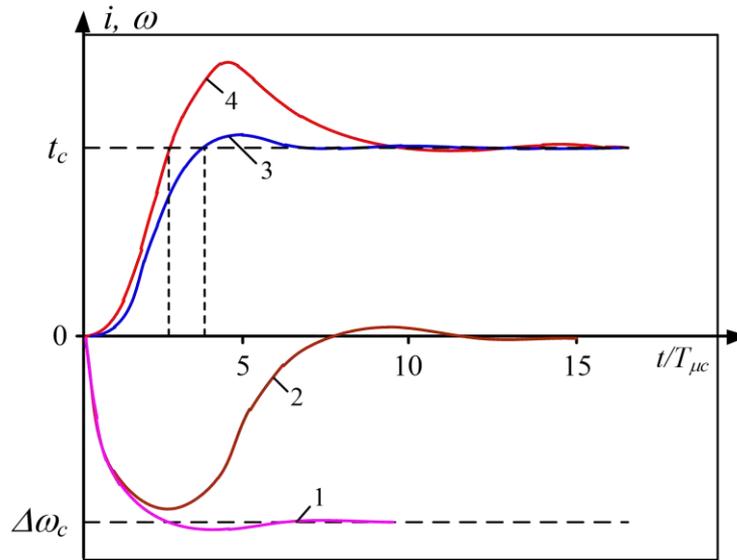


Рисунок 6.13 – Идеализированные переходные процессы электропривода при ударном приложении нагрузки

### 6.4.3. Экспериментальные исследования разработанного способа

На рисунке 6.14 представлены осциллограммы, полученные на стане 5000 при опытно-промышленных испытаниях алгоритма, реализующего разработанный способ [285]. Захват металла валками происходит в режиме ускорения при замкнутых угловых зазорах в шпинделях. Это подтверждают положительные приращения моментов  $M_B$  и  $M_{дв}$  в моменты времени  $t_1, t_2$ . Непосредственно после захвата в интервале  $t_3-t_4$ , выделенном пунктирными линиями, осуществляется принудительное замедление электропривода.

Динамические приращения момента представлены выше в столбцах таблицы 6.1 с обозначением «рис. 6.14». Результаты их сравнения с показателями, соответствующими режиму, представленному на рис. 6.3, позволили сделать следующие выводы:

1. Кратность ударного момента на валу шпинделя при реализации разработанного алгоритма  $k_{BM}=1,2$ , в то время как при исходном алгоритме  $k_{BM}=2,1$ . Таким образом, максимальный динамический момент уменьшился в 1,75 раза.

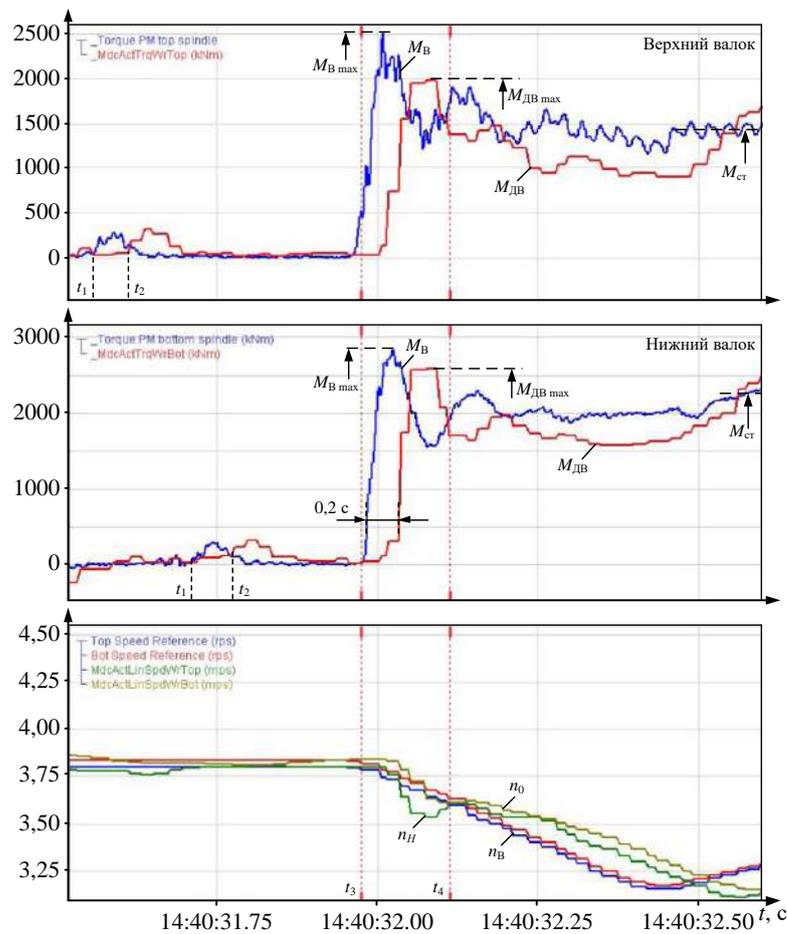


Рисунок 6.14 – Осциллограммы захвата, аналогичные рис. 6.3, при реализации разработанного способа

2. Аналогичная кратность электромагнитного момента двигателя снижается в 1,4 раза от  $k_{ДВМ}=1,55$  до  $k_{ДВМ}=1,1$ . Этот вывод не является до конца корректным, т.к. на рис. 6.3 момент двигателя выходит на уровень ограничения.

3. Затухание колебаний происходит за меньшее время, с меньшей амплитудой. При этом количество колебаний момента уменьшилось.

Разработанный способ позволяет добиться снижения момента двигателя и соответственно упругого момента в передающем механизме за счет предварительного ускорения электропривода перед захватом и последующего снижения скорости после захвата. Преимуществом данного способа является то, что не нужно формировать отдельно сигнал на ускорение для выбора угловых зазоров. Сигнал задания на предразгон формируется таким образом, чтобы приращение скорости в момент захвата соответствовало величине, необходимой для компенсации предварительно рассчитанной динамической просадки скорости.

Представленные результаты подтверждают техническую эффективность разработанного «инвариантного» способа ограничения динамического момента. Более подробно результаты экспериментальных исследований представлены в следующем разделе, посвященном промышленному внедрению разработанных алгоритмов.

### **6.5. Разработка наблюдателя упругого момента**

Анализ литературных источников, посвященных разработке и исследованию наблюдателей динамических процессов в двухмассовых системах, выявил два основных недостатка:

1. Значительная часть разработок относится к системам, в которых осуществляется контроль параметров (скоростей, моментов и др.) обеих масс, которые являются электрическими машинами [286–289]. Соответственно ограничение динамических нагрузок осуществляется регулированием координат обеих машин. Очевидно, что такой подход для электроприводов прокатного стана неприемлем.

2. Известные разработки наблюдателей скоростей и моментов неуправляемой второй массы по параметрам первой массы сложны, требуют синтеза многомерных регуляторов [290–295]. Недостатком систем, выполненных на основе таких наблюдателей (по существу, вычислителей) является недостаточное быстродействие при отслеживании режимов ударного изменения нагрузки.

В связи с этим была обоснована задача разработки системы компенсации динамических нагрузок второй неуправляемой массы (в нашем случае валка) средствами первой управляемой массы (двигателя). Для ее решения необходимо:

1. Разработка наблюдателя, обеспечивающего моделирование динамических процессов второй массы по непрерывно измеряемым параметрам первой массы в on-line режиме.

2. Разработка и исследование замкнутой системы «прямого» регулирования скорости второй массы с подчиненным регулированием упругого момента на основе этого наблюдателя.

Выходными координатами наблюдателя являются скорость второй массы и упругий момент механической передачи – шпинделя. Динамические процессы должны представляться на основе непрерывно измеряемых физических параметров при минимуме вычислительных операций. Координатами, доступными для контроля, являются скорость и момент двигателя. Такой подход обеспечит высокое быстродействие, необходимое для регулирования динамических процессов, происходящих в двухмассовой системе при ударном изменении нагрузки, прикладываемой ко второй массе.

### Структура наблюдателя

Наблюдатель разрабатывается на основе структурной схемы двухмассовой электромеханической системы, представленной выше на рис. 2.6. Для этого из нее исключены нелинейный блок 5, моделирующий зазоры, и блоки 1, 8, реализующие контур регулирования скорости. Полученная структура представлена на рисунке 6.15.

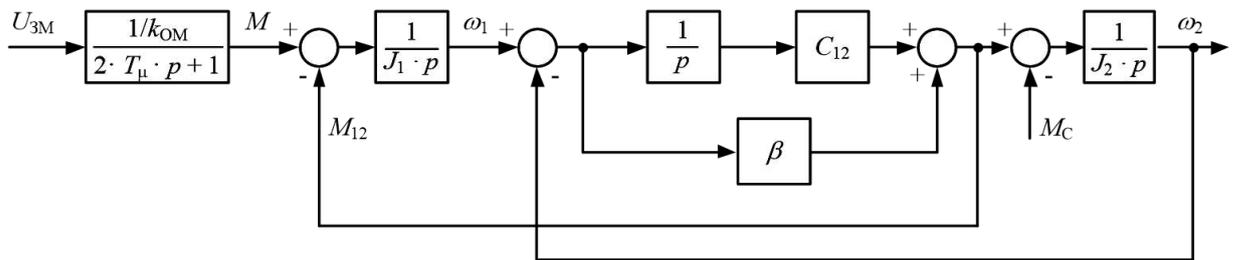


Рисунок 6.15 – Представление модели двухмассовой системы для разработки наблюдателя

Для нее справедлива система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dM_1}{dt} = -\frac{1}{T_m} M_1 + \frac{1}{T_m K_{OM}} M_{1ref}$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1} M_1 - \frac{1}{J_1} M_{12}$$

$$\frac{dM_{12}}{dt} = C_{12}\omega_1 - C_{12}\omega_2 + \frac{\beta}{J_1} M_1 - \beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 * J_2} M_{12} + \frac{\beta}{J_2} M_c$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} M_{12} - \frac{1}{J_2} M_c$$

При разработке наблюдателя предложен принципиально новый подход. *Идея состоит в подстановке в модель, построенную на основе представленных уравнений, реально измеряемых сигналов скорости и момента двигателя.* Эти сигналы могут быть измерены заранее и сохранены в виде массива данных либо подаваться на входы наблюдателя в on-line режиме.

Поставлена задача обеспечения стабилизации скорости второй массы  $\omega_2$  при этом управление может осуществляться только заданием момента двигателя  $U_{3M}$ . Для непосредственного измерения доступны величины текущего момента  $M$  и скорости 1-й массы  $\omega_1$ . Возмущающим воздействием является момент нагрузки  $M_c$ . Применительно к исследуемому стану можно принять, что он прикладывается скачком. На основе предложенного подхода разработан наблюдатель, схема которого представлена на рисунке 6.16.

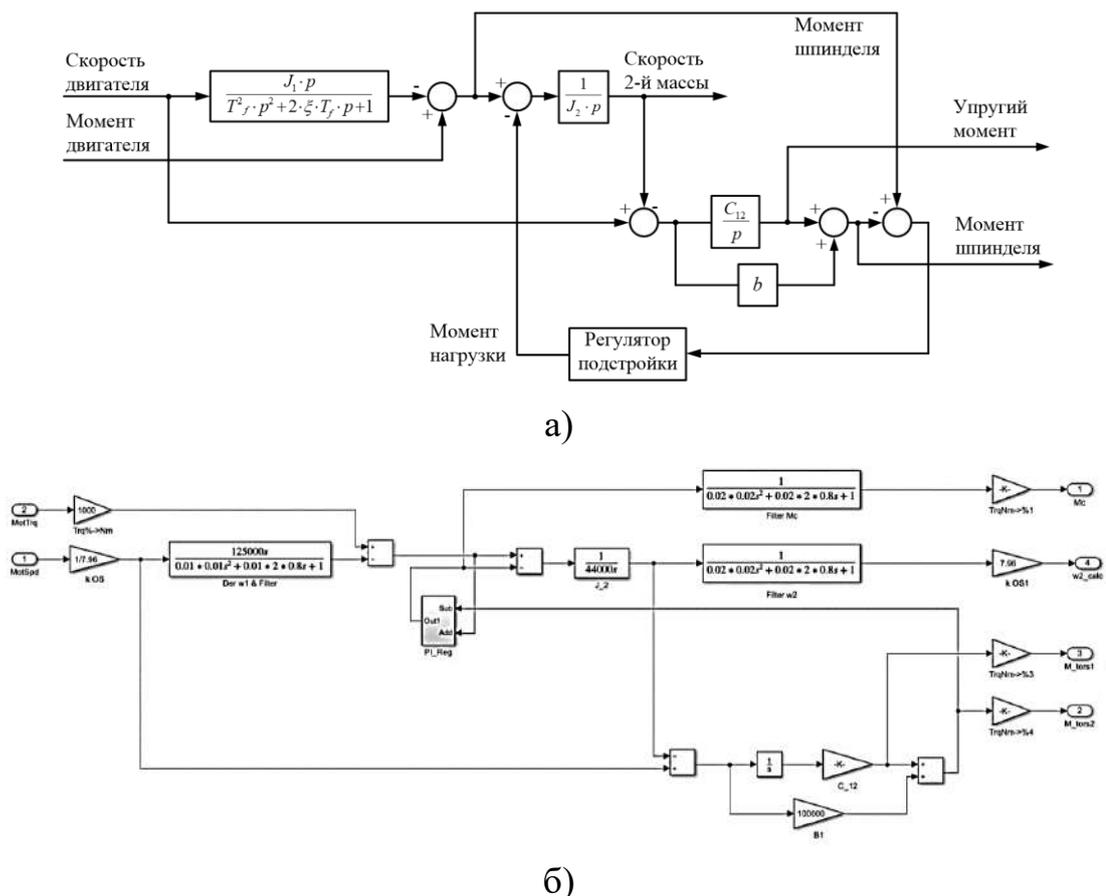
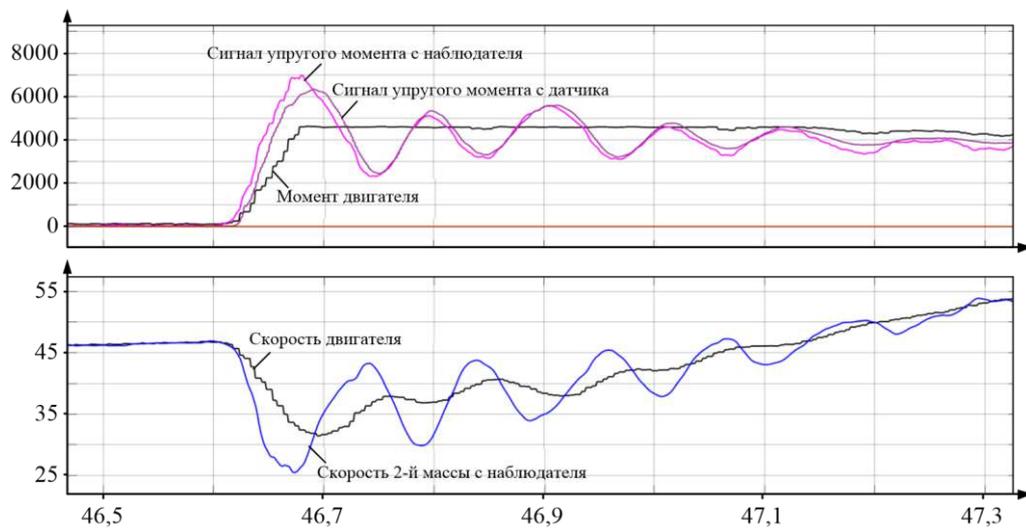


Рисунок 6.16 – Структурная схема разработанного наблюдателя (а) и ее реализация в Matlab Simulink (б)

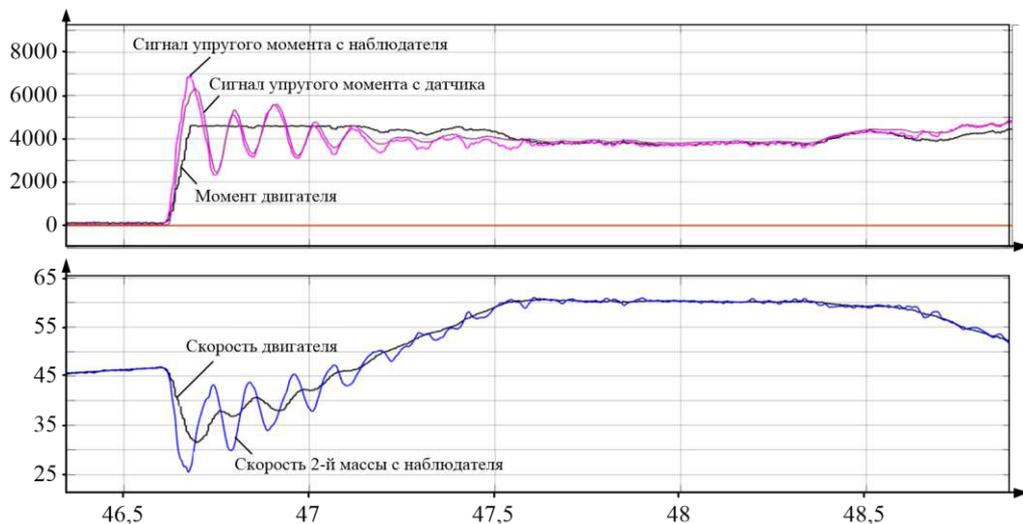
Ненаблюдаемыми переменными являются скорость валка, момент нагрузки валка и упругий момент шпинделя. Их восстановление (вычисление

в on-line режиме) осуществляется по контролируемым параметрам: скорости и моменту двигателя.

Осциллограммы скоростей и моментов, полученные экспериментально, и аналогичные графики восстановленных переменных в режиме захвата металла валками представлены на рисунке 6.17, а. Аналогичные зависимости в течение всего прохода представлены на рисунке 6.17, б. Визуально, переходные процессы моментов совпадают как по характеру, так и по амплитудным значениям, погрешность не превышает 10%. Кривые скорости сопоставить нельзя, т.к. они относятся к разным массам.



а)



б)

Рисунок 6.17 – Переходные процессы измеренных и восстановленных параметров в режиме захвата (а) и за проход (б)

## 6.6. Разработка замкнутой системы регулирования координат неуправляемой массы (валка)

Исходя из структуры объекта управления разработана система регулирования скорости 2-й массы с использованием наблюдателя координат и эквивалентным внутренним контуром момента двигателя, который содержит многомерный регулятор токов. Схема приведена на рисунке 6.18, а. Она может быть представлена в виде замкнутой 4-х контурной системы регулирования скорости второй массы с подчиненными контурами: упругого момента, скорости двигателя и момента двигателя (рисунок 6.18, б). При таком построении возможно ограничить не только задание на контур момента двигателя, но и задание на контур регулирования упругого момента. Подобных систем в известных литературных источниках не обнаружено.

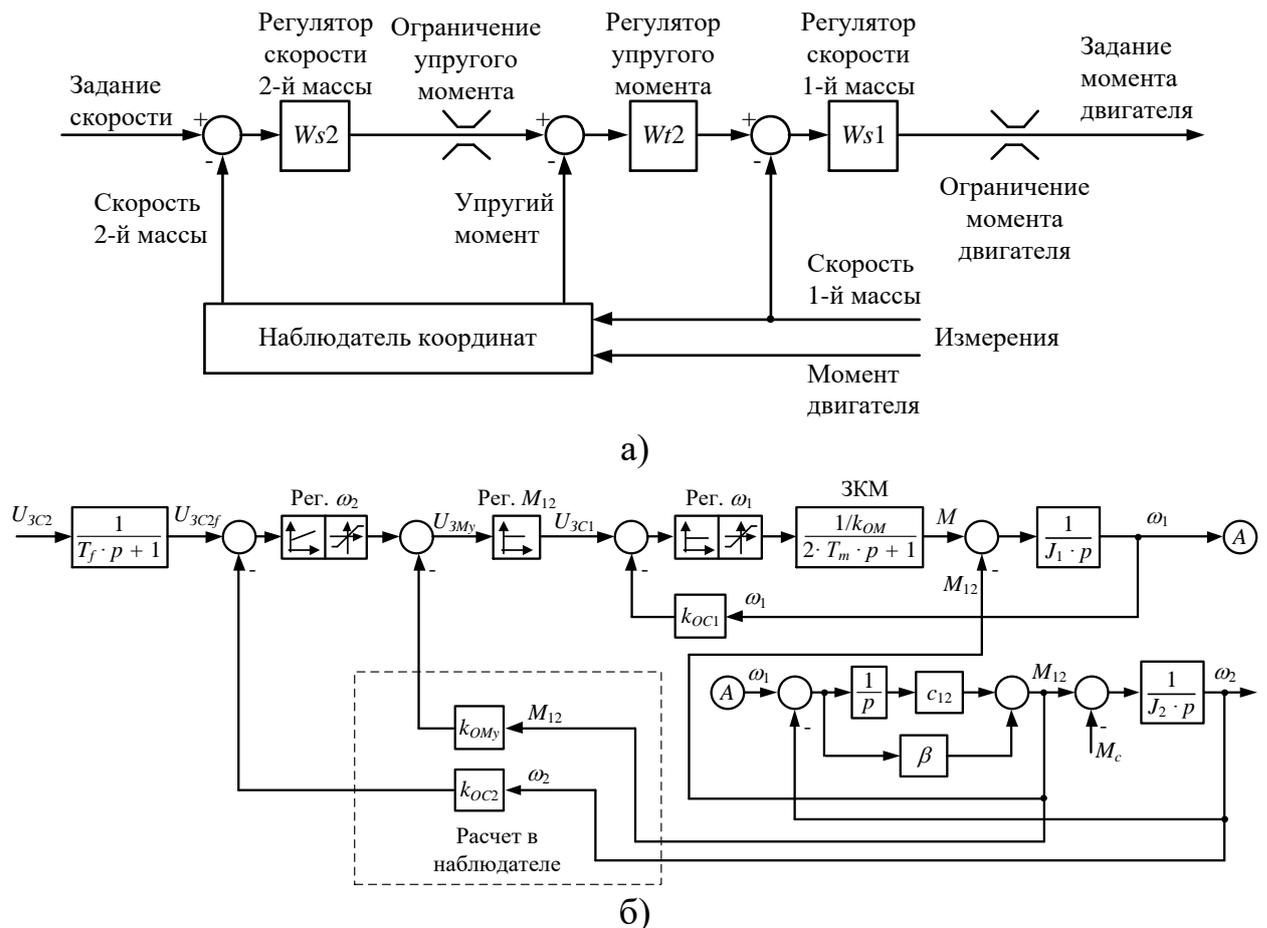


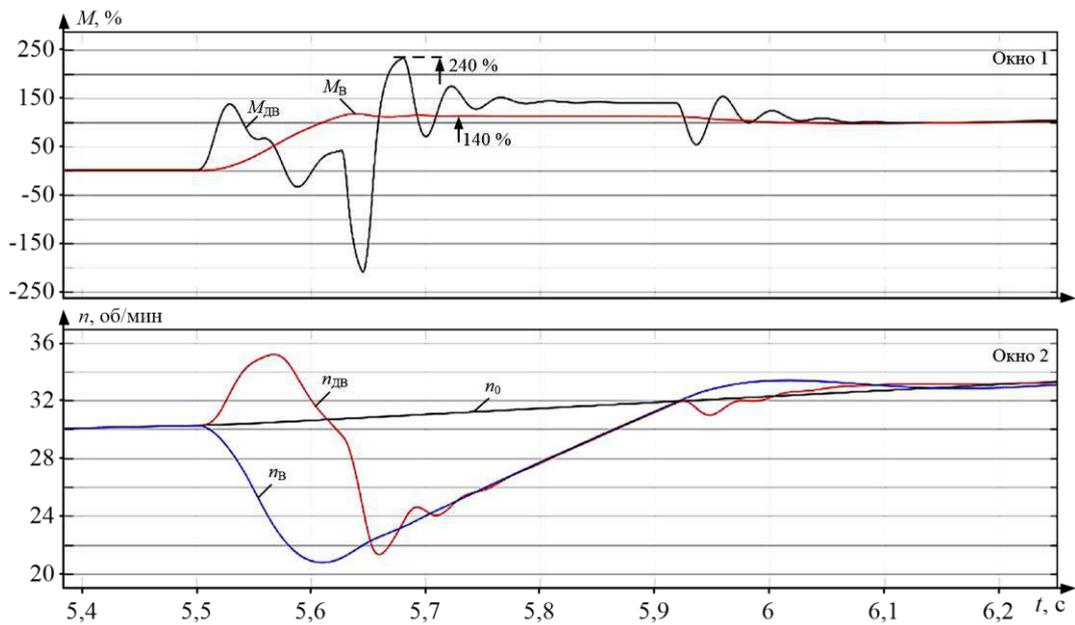
Рисунок 6.18 – Структура разработанной САР скорости второй массы (а) и ее представление в виде четырехконтурной системы (б)

При разработке подобных сложных систем важнейшими задачами являются синтез регуляторов и проверка быстродействия методом математического моделирования. На рисунке 6.18, б внешний регулятор скорости  $\text{Reg.}\omega_2$  (по сути, регулятор скорости 2-й массы  $J_2$ ) принят пропорционально-интегральным, регулятор упругого момента – пропорциональным. Так как в контуре регулирования присутствует интегральное звено, регулятор скорости 1-й массы  $J_1$  пропорциональный, его выходом является задание на момент двигателя.

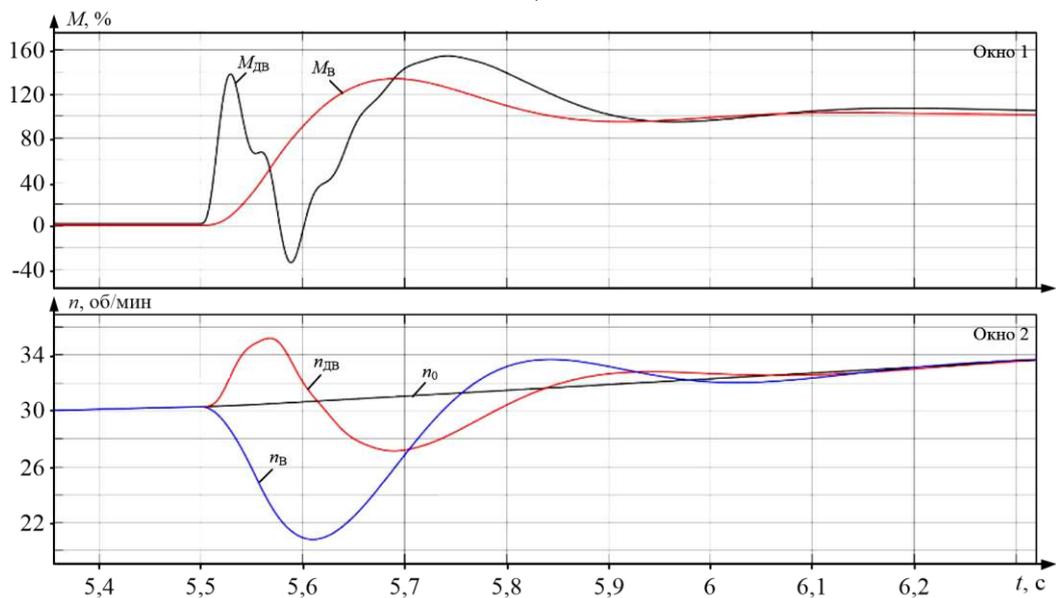
На рисунке 6.19, а показаны результаты моделирования системы при установленных ограничениях: упругого момента на уровне 120% и момента двигателя на уровне 240%. На рисунке 6.19, б представлены аналогичные процессы, но при ограничениях обоих регуляторов на уровне 240%. Видно, что в первом случае, вследствие размыкания контура упругого момента, переходный процесс момента двигателя приобретает сложный характер и изменяется в диапазоне  $\pm 200\%$ , а переходный процесс скорости второй массы затянут. На втором рисунке эти недостатки устраняются, т.к. размыкания контура момента не происходит.

Из представленных временных зависимостей следует вывод, что разница скоростей 1-й и 2-й масс в обоих случаях имеет место только во время отработки переходных процессов (в течение 0,5-0,7 с после приложения нагрузки), когда проявляются упругие свойства двухмассовой системы. Аналогично ведут себя кривые моментов на рис. 6.19, б. Дать анализ моментов на рис. 6.19, а затруднительно, т.к. кривая упругого момента на валу  $M_B$  выходит на ограничение 140%.

С целью сравнительной оценки динамических свойств на рисунке 6.20, а представлены ЛАЧХ: традиционной двухконтурной САРС с ПИ регулятором – характеристика 1 и предложенной системы – характеристика 2. При измерении ЛАЧХ входным сигналом является задание скорости, контролируемым – скорость второй массы. Из них следует, что при оценке скоростей 2-й массы предложенная система обеспечивает большую полосу пропускания, следовательно, обладает большим быстродействием и меньшей колебательностью.



а)



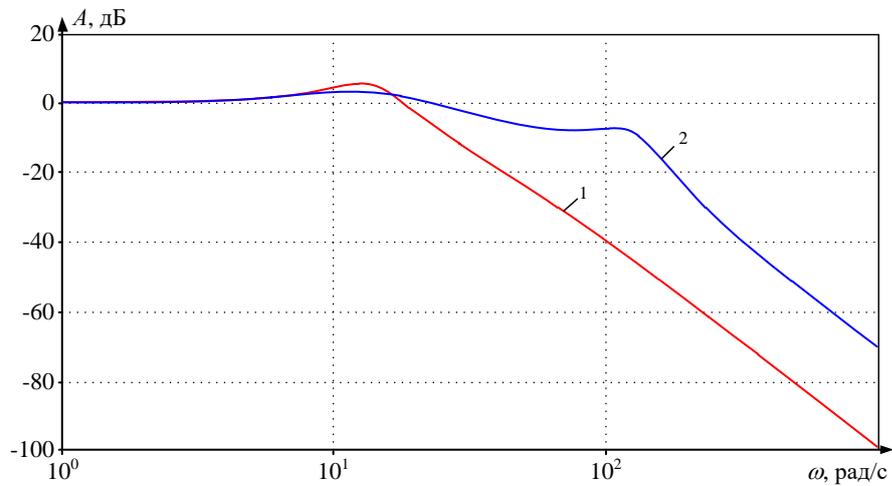
б)

Рисунок 6.19 – Переходные процессы моментов и скоростей при ударном приложении нагрузки с ограничением (а) и без ограничения (б) упругого момента

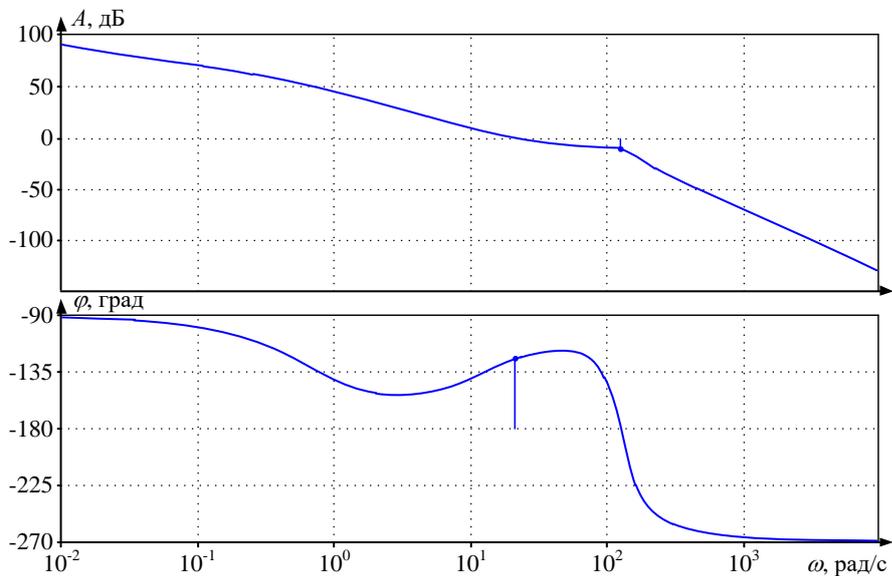
На рисунке 6.20, б приведены ЛАЧХ и ЛФЧХ, построенные при разомкнутом внешнем контуре регулирования скорости второй массы. Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

– запас по амплитуде составляет около 10 дБ, что согласно критерию Найквиста, является достаточным;

– ФЧХ клювовидная, переходов через  $-180^\circ$  левее частоты среза нет; запас по фазе около  $50^\circ$ , что также вполне достаточно.



а)



б)

Рисунок 6.20 – ЛАЧХ замкнутых контуров регулирования скорости (а), ЛАЧХ и ЛФЧХ при разомкнутом внешнем контуре (б)

Таким образом, проблем с устойчивостью разработанной системы нет.

Расчетные осциллограммы и восстановленные кривые, аналогичные представленным выше на рис. 6.17, получены для большого количества переходных процессов. Во всех случаях расхождение амплитуд моментов не превышает 10%, причем в сторону превышения амплитуды восстановленного момента. Это позволяет предположить, что ее компенсация гарантированно улучшит реальные (менее быстродействующие) переходные процессы.

Разработанный наблюдатель в ближайшей перспективе будет установлен в электроприводах клетки и оставлен в работе на длительное время. Целями являются анализ достоверности получаемых результатов с учетом реальных зазоров в механических соединениях и оценка возможных рисков. По итогам длительного эксперимента будет принято решение о реализации разработанных алгоритмов наблюдателя и системы управления на стане.

## ВЫВОДЫ

1. На основании проведенного анализа динамических режимов электро-механических систем толстолистного прокатного стана сделан вывод о неудовлетворительных переходных процессах скоростей и моментов двигателей при захвате металла валками. Существенное влияние на динамические характеристики оказывают угловые зазоры в шпиндельных соединениях и упругие свойства валопроводов главных линий клетки.

2. В результате экспериментальных исследований известного способа управления электроприводами, обеспечивающего замыкание углового зазора в шпиндельных соединениях за счет захвата металла в режиме ускорения, показано, что он не обеспечивает полного ограничения динамических нагрузок.

3. Выполнена декомпозиция временных зависимостей упругого момента на передающем валу с выделением следующих составляющих:

- обусловленной упругим ударом при замыкании углового зазора;
- обусловленной упругими свойствами валопровода;
- зависящей от настройки САР скорости электропривода.

Это позволило рассматривать переходные процессы при захвате как результат суперпозиции трех перечисленных воздействий.

4. Обоснована концепция ограничения динамических нагрузок при захвате металла валками, согласно которой осуществляется индивидуальная компенсация каждой из выделенных составляющих упругого момента, за счет чего достигается снижение их суммарного воздействия. Решение этой задачи

обеспечивается путем формирования тахограмм, предусматривающих положительное и отрицательное ускорения электропривода до и после захвата металла, соответственно.

5. Разработан способ ограничения момента, согласно которому до захода металла в клеть осуществляют повышение скорости электропривода на величину, компенсирующую динамическую просадку скорости при захвате, а после захвата снижают эту скорость до первоначальной. Данный способ обеспечивает реализацию предложенной концепции и объединяет преимущества способов выбора зазоров в валопроводах за счет ускорения в момент захвата и опережающего увеличения скорости на величину динамической ошибки регулирования скорости.

6. Разработан способ управления скоростными режимами электроприводов клетки, обеспечивающий инвариантность регулирования скорости к точности определения положения металла на рольганге. Его отличительным признаком является то, что торможение с заданным замедлением начинается в момент захвата металла валками. Это обеспечивает формирование заданной тахограммы независимо от точности определения расстояния от раската до клетки в начальный момент предразгона.

7. Теоретически и экспериментально доказано, что при реализации способа достигается практически двукратное ограничение упругого момента на валу и электромагнитного момента двигателя. Уменьшение динамических нагрузок способствует снижению аварийности оборудования главных линий прокатной клетки.

8. Получила развитие теория двухмассовых электромеханических систем с наблюдателями координат. Разработан наблюдатель скорости второй массы, обеспечивающий восстановление (косвенное определение) переходных процессов скорости валка и упруго момента на валу по измеряемым параметрам электропривода. Его преимуществом является простота настройки и возможность получения контролируемых сигналов в on-line режиме.

9. На основе предложенного наблюдателя разработана система «прямого» регулирования скорости валка, обеспечивающая ограничение упругого момента в режиме ударного приложения нагрузки. В результате сравнения восстановленных и промышленных сигналов подтверждена удовлетворительная точность вычисления упругого момента с погрешностью не выше 10%.

10. В результате теоретических и экспериментальных исследований подтверждена эффективность предложенных технических решений. Разработанные способы управления рекомендуются для внедрения в электроприводах прокатных станов, работающих с ударным изменением нагрузки. Разработанный «инвариантный» способ рекомендован для промышленного внедрения в электроприводах реверсивной клетки стана 5000.

## **Глава 7. ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТОК НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОКАТНЫХ СТАНАХ. ОЦЕНКА ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Итогом диссертационной работы, подтверждающим ее практическую значимость, является промышленное внедрение. Представленная глава посвящена результатам экспериментальных исследований выполненных разработок в промышленных условиях, оценке технической эффективности и расчету экономического эффекта от внедрения.

Основными разработками, внедренными на станах 5000 и 2000 ПАО «ММК», являются:

- способ ограничения динамического момента за счет предразгона и компенсации ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки, внедренный на стане 5000;
- система регулирования межклетевых натяжений в непрерывной подгруппе черновой группы стана 2000;
- программа и методика расчета энергосиловых параметров прокатки слябов повышенной толщины, переданная в ЛПЦ-10 ПАО «ММК», где используется при расчете программ прокатки трубной заготовки;
- алгоритм согласования скоростей электроприводов вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки, внедренный в АСУ ТП черновой группы клеток стана 2000.

В представленной главе поставлены задачи анализа результатов экспериментальных исследований, сопоставления режимов, обеспечиваемых существующими и разработанными алгоритмами, подтверждения технических преимуществ предложенных решений. Предварительно необходимо дать описание и краткую характеристику разработок.

Наряду с оценкой технической эффективности ставится задача расчета экономического эффекта. Должен быть представлен анализ технико-экономической эффективности внедрения разработок, подтвержденный соответствующими документами. В завершение следует дать рекомендации по расширенному промышленному внедрению результатов диссертационной работы.

## 7.1. Внедрение разработанного способа ограничения динамических нагрузок на стане 5000

### *Экспериментальное обоснование внедрения*

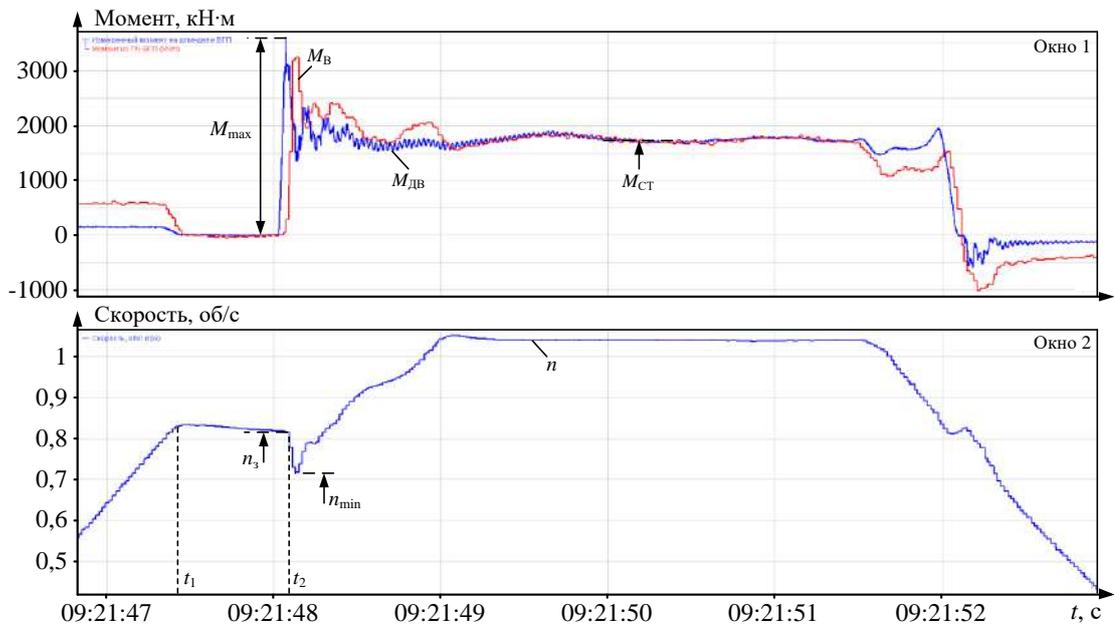
На рисунке 7.1 представлены осциллограммы момента  $M_{дв}$  и скорости  $n$  двигателя, а также момента  $M_B$ , измеренного на валу шпинделя верхнего валка реверсивной клетки стана 5000. Осциллограммы на рис. 7.1, а получены в режиме захвата металла при полностью открытых угловых зазорах. Это обеспечивается путем замедления электропривода в интервале времени  $t_1-t_2$ . Зависимости на рис. 7.1, б получены при предварительно закрытых зазорах за счет ускорения электропривода в аналогичном интервале времени. Замыкание углового зазора происходит в момент времени  $t_3$ , это подтверждают небольшие увеличения (всплески) на осциллограммах моментов двигателя и шпинделя.

Из осциллограмм следует, что динамические отклонения моментов  $M_{дв}$  и  $M_B$  идентичны, их амплитуды отличаются незначительно. Поэтому ниже анализируется только электромагнитный момент двигателя, а полученные результаты также могут быть отнесены к динамическим показателям момента на валу шпинделя.

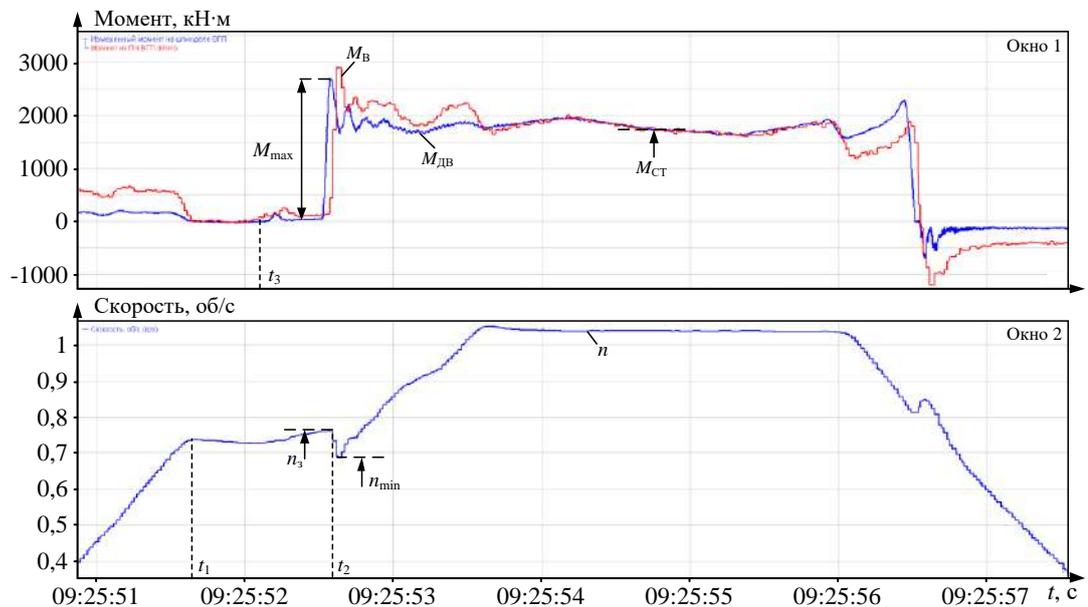
Динамические отклонения момента и скорости для сравниваемых случаев приведены в столбцах таблицы 7.1 со ссылкой на рис. 7.1. Здесь же показаны параметры процесса захвата, осциллограммы которого приведены ниже на рисунке 7.3 [278]. Амплитуду ударного момента характеризует кратность  $k_m$ , которая определяется как отношение максимального значения  $M_{max}$  к установившемуся  $M_{ст}$ . Для оценки динамического снижения скорости приведена ошибка регулирования (просадка,  $\Delta$ , %), которая определяется как процентное отношение минимальной скорости  $n_{min}$  к ее значению перед захватом  $n_3$ .

Анализ осциллограмм и данных таблицы позволяет сделать следующие выводы:

– амплитуда ударного момента при захвате с разомкнутым зазором (рис. 7.1, а) в 1,9 раза превышает установившийся момент прокатки (максимальное значение  $M_{max}=3250$  кН·м, установившееся  $M_{ст}=1750$  кН·м);



а)



б)

Рисунок 7.1 – Осциллограммы при захвате металла валками: окно 1 – моменты двигателя  $M_{дв}$  и шпинделя  $M_{в}$ ; окно 2 – скорость двигателя  $n$

– динамическое отклонение скорости электропривода, благодаря замыканию зазора, уменьшается в 1,5 раза от 13,4% на рис. 7.1, а до 9,2% на рис. 7.1, б;

– аналогично, кратность динамического момента  $M_{дв}$  снижается в 1,2 раза (от 1,9 на рис. 7.1, а до 1,6 на рис. 7.1, б).

В целом, по результатам экспериментальных исследований сделаны два основных вывода:

1. Известный способ предварительного выбора зазора в механических передачах обеспечивает значительное ограничение динамического момента двигателя и соответственно момента на передающем валу в режиме захвата.

2. При реализации известного способа перерегулирование момента и просадка скорости устраняются не полностью. Это означает, что одного только предварительного разгона для полной компенсации динамического момента недостаточно.

Таблица 7.1 – Динамические отклонения моментов и скоростей при захвате

| Параметр         | Величина на осциллограммах |           |          |             |           |          |          |           |          |
|------------------|----------------------------|-----------|----------|-------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|
|                  | рис. 7.1, а                |           |          | рис. 7.1, б |           |          | рис. 7.3 |           |          |
| Момент двигателя | $M_{СТ}$                   | $M_{max}$ | $k_M$    | $M_{СТ}$    | $M_{max}$ | $k_M$    | $M_{СТ}$ | $M_{max}$ | $k_M$    |
|                  | кН·м                       |           | ед.      | кН·м        |           | ед.      | кН·м     |           | ед.      |
|                  | 1750                       | 3250      | 1,9      | 1750        | 2850      | 1,6      | 1400     | 1550      | 1,1      |
| Скорость         | $n_3$                      | $n_{min}$ | $\Delta$ | $n_3$       | $n_{min}$ | $\Delta$ | $n_3$    | $n_{min}$ | $\Delta$ |
|                  | об/с                       |           | %        | об/с        |           | %        | об/мин   |           | %        |
|                  | 0,82                       | 0,71      | 13,4     | 0,76        | 0,69      | 9,2      | 43       | 41        | 4,6      |

Динамические показатели скорости и момента при ударном приложении нагрузки и замкнутых зазорах определяются упругими свойствами шпинделей и быстродействием двухконтурной системы автоматического регулирования скорости.

### ***Структура внедренной системы***

Схема системы задания и регулирования скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков, поясняющая внедренный алгоритм, реализованный в программном обеспечении АСУ ТП реверсивной клетки, представлена на рисунке 7.2 [276]. Принцип ее работы аналогичен принципу системы, рассмотренной выше в п. 6.1.

В схеме реализован принцип разгона электроприводов перед захватом. Он обеспечивается за счет включения в проектную систему (рис. 1.10) дополнительных блоков, выделенных на рис. 4 контуром. Для определения момента

начала ускорения используется информация из системы слежения за металлом на рольгангах. Она поступает с выхода блока «Контроль положения заготовки». Для формирования приращения скорости используется дополнительный датчик интенсивности ЗИ предразгона. Максимальная линейная скорость принята равной 0,3 м/с, темп дополнительного ускорения составляет 0,22 м/с<sup>2</sup> [296].

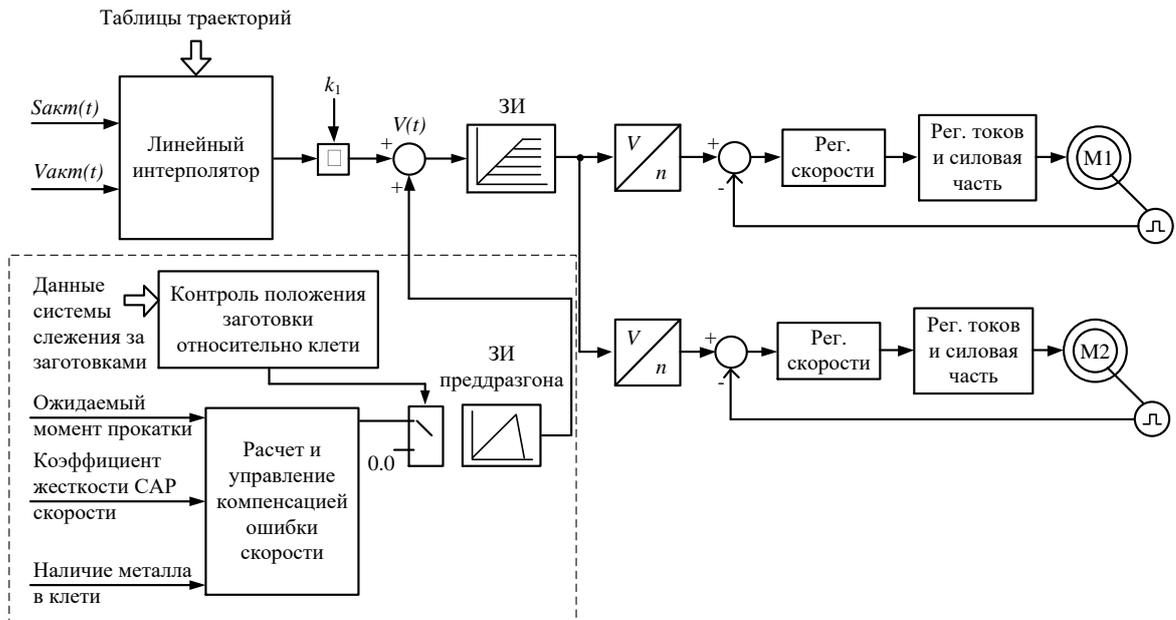


Рисунок 7.2 – Структурная схема системы формирования тахограмм электроприводов клетки

Разработанная система внедрена в промышленную эксплуатацию на стане 5000. Акты внедрения и опытно-промышленных испытаний представлены в Приложении. 4.1. Проведены экспериментальные исследования, результаты которых рассматриваются ниже.

## 7.2. Результаты экспериментальных исследований

### *Динамические процессы при захвате*

На рисунке 7.3 приведены осциллограммы заданий скоростей  $n_0$ , актуальных скоростей  $n_{ВГП}$ ,  $n_{НГП}$  и моментов двигателей  $M_{ВГП}$ ,  $M_{НГП}$  электроприводов верхнего и нижнего валков [278, 284]. Они получены при испытаниях алгоритма, реализующего предложенный способ. С этой целью до захвата металла

валками к основному заданию скорости прибавляется величина динамического приращения скорости электропривода, рассчитанная по выражению (6.9). Она компенсирует динамическую просадку скорости при захвате. Это обеспечивается за счет предварительно ускорения электропривода в интервале  $t_1-t_2$ . При появлении усилия прокатки в момент  $t_2$  сигнал компенсации просадки из сигнала задания скорости вычитается. Происходит снижение задания (и соответственно скорости) в интервале  $t_2-t_3$  с заданным замедлением. Затем регулирование скорости осуществляется согласно технологии (происходят разгон до рабочей скорости и дальнейшее торможение).

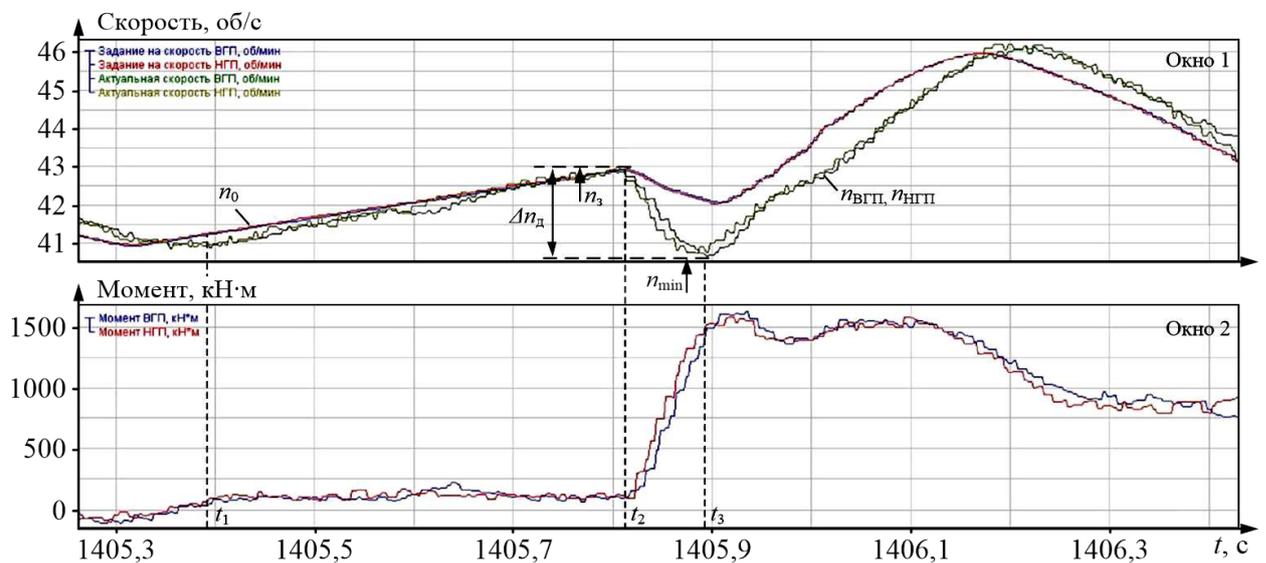


Рисунок 7.3 – Осциллограммы при захвате металла в разработанной системе:  
окно 1 – скорости ВГП и НГП; окно 2 – моменты двигателей

Динамические отклонения скорости и момента представлены выше в столбцах табл. 7.1 с обозначением «рис. 7.3». Результаты их сравнения с показателями, соответствующими режиму предразгона без компенсации упругого момента и динамической ошибки скорости (рис. 7.1, б), позволили сделать следующие выводы:

1. Кратность ударного момента в предложенной системе составляет 1,1, в системе с предразгоном – 1,6. Таким образом, максимальный динамический момент снижен в 1,45 раза.

2. Динамическое отклонение скорости электропривода снижается в 2 раза от 9,2% до 4,5%.

3. На представленных осциллограммах предразгон осуществляется на 4,6% от  $n_3=41$  об/мин до  $n_{\min}=43$  об/мин. Динамическое снижение скорости при захвате  $\Delta n_{\text{д}}=n_3-n_{\min}$  происходит практически на ту же величину, что наглядно демонстрируют осциллограммы. Это подтверждает справедливость расчета приращения скорости по зависимости (6.10).

Представленные результаты подтверждают техническую эффективность разработанного способа ограничения динамического момента за счет предразгона и компенсации ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки.

### ***Обобщение результатов внедрения***

Представленный способ управления электроприводами реализован в алгоритме контроллера АСУ ТП и обеспечивается во всех проходах реверсивной прокатки. Это наглядно демонстрируют осциллограммы, полученные при девяти проходах чистовой прокатки, представленные на рисунке 7.4 [277]. О реализации предразгона можно судить по наличию на осциллограммах скорости «полочки» перед захватом (перед моментами роста усилий прокатки в первом окне). Небольшие отрицательные «всплески» скорости в моменты, практически совпадающие с последующим ускорением до рабочей скорости, демонстрируют реализацию торможения после захвата.

Анализ осциллограмм позволил сделать вывод, что динамический момент прокатки при захвате во всех проходах не превышает 15% установившегося значения. Такие перерегулирования момента возникают в первых трех проходах, в то время как в последних проходах динамический рост момента незначителен. Это подтверждает полное закрытие зазоров в шпиндельных соединениях при рекомендованных ускорении и продолжительности предразгона, а также компенсацию упругих колебаний за счет отрицательного динамического момента, формируемого при торможении.

Разработанный способ позволяет добиться снижения динамического момента двигателя и соответственно упругого момента в передающем механизме

за счет предварительного ускорения электропривода перед захватом и последующего снижения скорости после захвата.

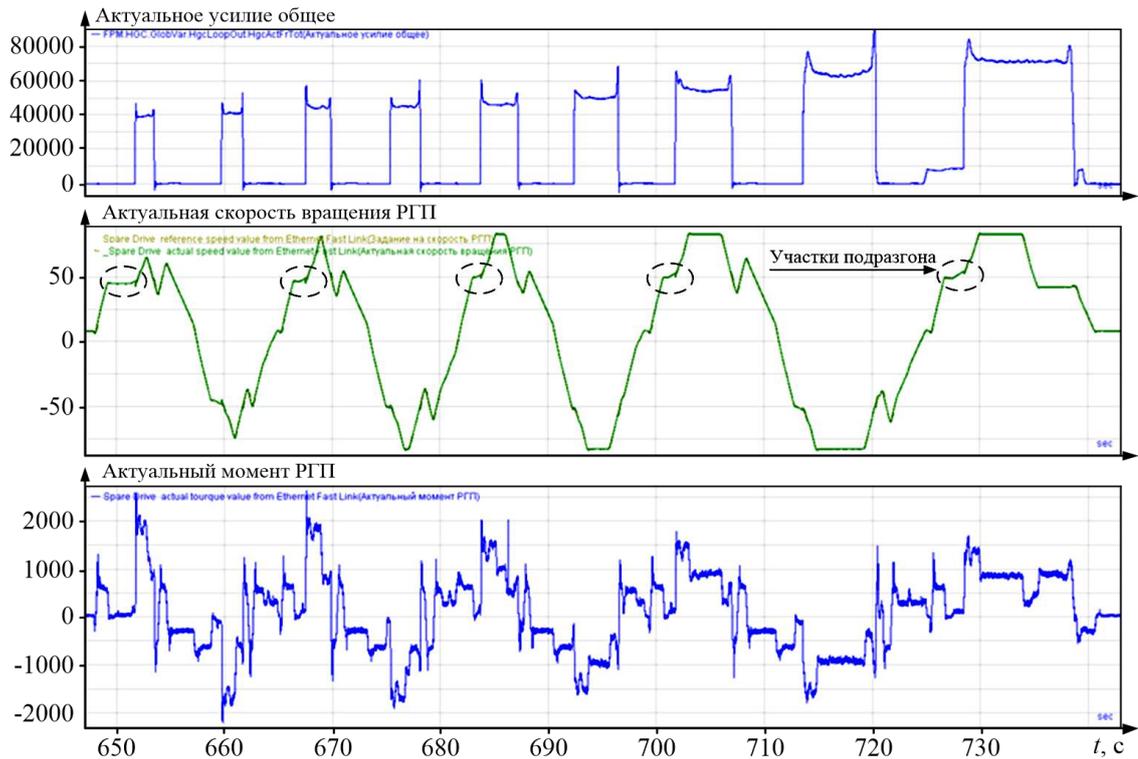


Рисунок 7.4. Осциллограммы параметров электропривода нижнего валка в чистой фазе прокатки

Преимуществом данного способа является то, что не нужно формировать отдельно сигнал на ускорение для выбора угловых зазоров. Сигнал задания на предразгон формируется таким образом, чтобы приращение скорости в момент захвата соответствовало величине, необходимой для компенсации предварительно рассчитанной динамической просадки скорости. При его реализации обеспечивается компенсация приращения момента, вызванного настройкой электропривода.

Он также обеспечивает компенсацию влияния упругой составляющей момента за счет формирования тахограмм электропривода, предусматривающих торможение двигателя после захвата с заданным отрицательным ускорением. Сочетание преимуществ перечисленных разработок позволяет получить максимальное снижение динамических нагрузок при захвате металла валками.

В целом, в результате проведенных исследований подтверждена техническая эффективность внедрения предложенного способа ограничения динамических нагрузок на стане 5000.

### **7.3. Внедрение разработанной методики расчета усилий прокатки на стане 2000**

Широкополосные станы горячей прокатки (ШСГП) являются основными агрегатами металлургических предприятий, определяющими объем производства и качество выпускаемой продукции. В настоящее время в России находятся в эксплуатации ШСГП третьего поколения: непрерывные станы 2000 ПАО «Северсталь» (г. Череповец) и 2000 ПАО «ММК». Характерной особенностью этих станов является объединение трех черновых универсальных клеток в непрерывную подгруппу [297–299]. В результате обеспечивается снижение капитальных затрат, значительно улучшаются энергетические показатели прокатки [101, 297, 300].

На отечественных широкополосных станах осваивается производство полос расширенного сортамента. Значительная часть новых профилей предназначена для производства труб большого диаметра из труднодеформируемых хладостойких и специальных сталей [9, 301–304]. Освоение производства трубной заготовки предопределяет необходимость предварительного анализа энергосиловых параметров прокатки. Возможность обеспечения заданных обжатий и скоростей, т.е. реализуемость скоростных и нагрузочных режимов электроприводов является ограничивающим фактором, накладываемым на технологический процесс. Поэтому адекватный анализ этих режимов необходим для формирования новых и уточнения имеющихся программ прокатки.

Наиболее явно эта задача возникла при внедрении технологии прокатки трубной заготовки толщиной 18 мм и более из сляба толщиной 300 мм (сляб 300) на стане 2000 ПАО «ММК». Она обусловлена низкими скоростями прокатки (до 2-х раз ниже номинальной), высокими обжатиями и их неравномерным распределением по клетям [305, 306].

### 7.3.1. Обоснование задачи

На рисунке 7.5 представлен фрагмент технологической линии, выделенный из основного экрана АСУ ТП черновой группы [220]. Технологическая линия содержит непрерывную подгруппу, состоящую из трех универсальных клеток (№4–№6), прокатка в которых осуществляется одновременно [182]. Токи нагрузки и скорости электроприводов вертикальных валков (эджеров) и горизонтальных валков показаны в цифровом виде непосредственно под клетями и в правой части экрана в виде диаграмм. Аналогично выводится информация о скоростях прокатки.

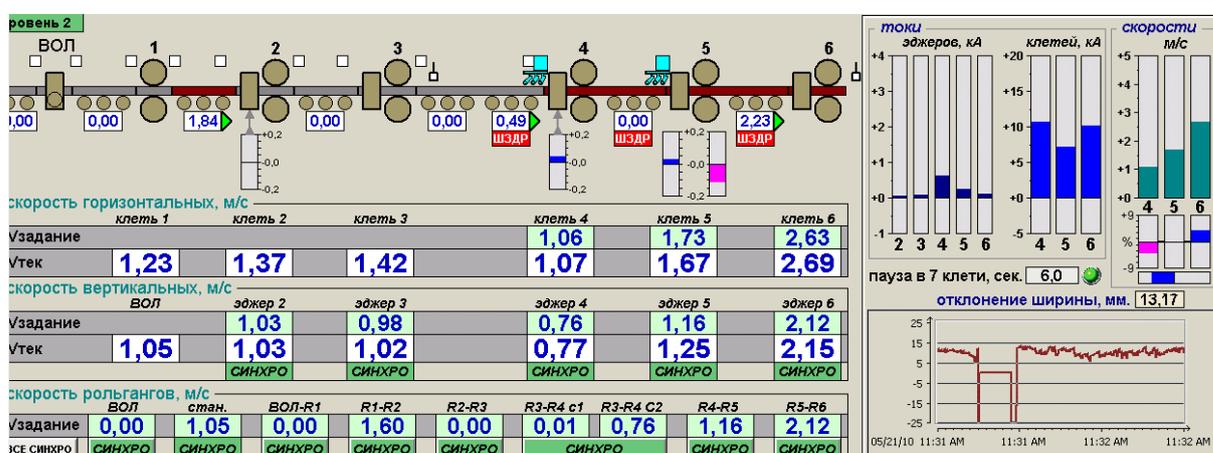


Рисунок 7.5 – Схема расположения клеток черновой группы стана 2000

Параметры электроприводов горизонтальных валков представлены в таблице 7.2. Они выполнены по системе тиристорный преобразователь-двигатель, с двухконтурными системами регулирования скорости. Более подробная информация об электроприводах приведена в диссертации [196] и публикациях [220, 307, 308].

Таблица 7.2 – Параметры электроприводов горизонтальных валков клеток непрерывной подгруппы

| Номер клетки | Данные электропривода |              |                  |
|--------------|-----------------------|--------------|------------------|
|              | мощность, кВт         | ток якоря, А | скорость, об/мин |
| 4            | 7100                  | 8020         | 125/250          |
| 5            | 7100                  | 8020         | 125/250          |
| 6            | 2×6300                | 2×7280       | 50/100           |

При прокатке толстых полос из труднодеформируемых марок стали возникают проблемы, связанные повышением риска потери управляемости, что в

условиях непрерывной прокатки приводит к аварийной остановке. Это вызвано размыканием контура регулирования скорости при низких скоростях и высокой нагрузке [309]. Также эта проблема связана со значительными отклонениями напряжения на шинах 10 кВ, питающих электроприводы, и ухудшенными условиями коммутации на коллекторе [310, 311].

Средствами системы мониторинга технологического процесса [312] выполнены экспериментальные исследования нагрузочных и скоростных режимов электроприводов клетей №4-№6 при прокатке полос расширенного сортамента. Выполнен анализ энергосиловых параметров при прокатке трубной заготовки из стали марок 22ГЮ, 09Г2Д, 09Г2С, 09ГСФ и 13Г1С-У. Проведены статистическая обработка и обобщение параметров прокатки около 2000 слябов (не менее 150 слябов каждой марки). Результаты загрузки двигателей по току приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Эквивалентные токи двигателей клетей стана 2000 при прокатке трубных марок стали

| Марка стали,<br>размер сляба | Эквивалентный ток двигателей по клетям, А |       |       |
|------------------------------|---|-------|-------|
|                              | №4  | №5    | №6    |
| 22ГЮ, 5900x1250x250          | 10624                                     | 9643  | 8564  |
| 09Г2Д, 5550x1250x250         | 11110                                     | 11231 | 12591 |
| 09Г2С, 9700x1650x250         | 17418                                     | 15777 | 16464 |
| 09ГСФ, 9300x1730x250         | 16676                                     | 14420 | 15617 |
| 13Г1С-У, 6000x1730x250       | 18356                                     | 16806 | 14947 |

На рисунке 7.6 эквивалентные нагрузки представлены в виде диаграмм в процентах номинальных значений [220]. Анализ результатов показал, что при прокатке трубных заготовок при существующих режимах обжаты двигатели загружены на 60–117%. Причем максимальная загрузка происходит при прокатке сталей марок 09Г2С, 09ГСФ и 13Г1С-У. Как правило, наиболее нагружены двигатели 4-й и 6-й клетей.

Данный факт предопределяет необходимость оптимизации режимов электроприводов клетей непрерывной подгруппы. В связи с этим возникла задача применения разработанной усовершенствованной методики расчета

нагрузочных режимов (программ) прокатки трубной заготовки. Соответственно возникает задача совершенствования алгоритмов расчета нагрузочных режимов по зависимостям, разработанным в главе 3. С этой целью разработана программа расчета нагрузочных режимов, в основу которой положен алгоритм, представленный в п. 3.3 на рисунке 3.5 [220, 313]. Ее краткое описание приводится ниже.

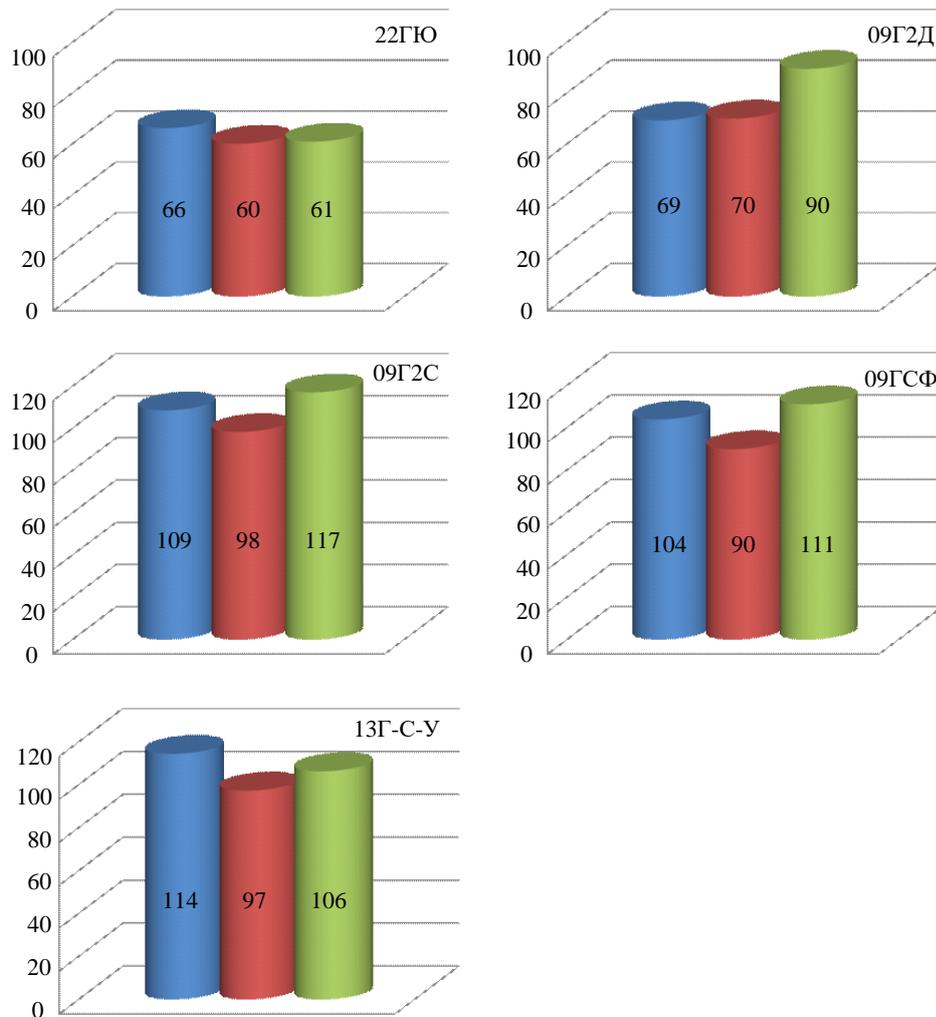


Рисунок 7.6 – Диаграммы загрузки двигателей 4-6-й клеток (слева направо) при прокатке трубных марок стали

### 7.3.2. Интерфейс программного обеспечения

Откомпилированная программа имеет один файл с именем “2000.exe”, который может быть запущен с любого места жесткого диска. При загрузке файла пользователь видит окно программы, представленное на рисунке 7.7. Оно разделено на четыре области.

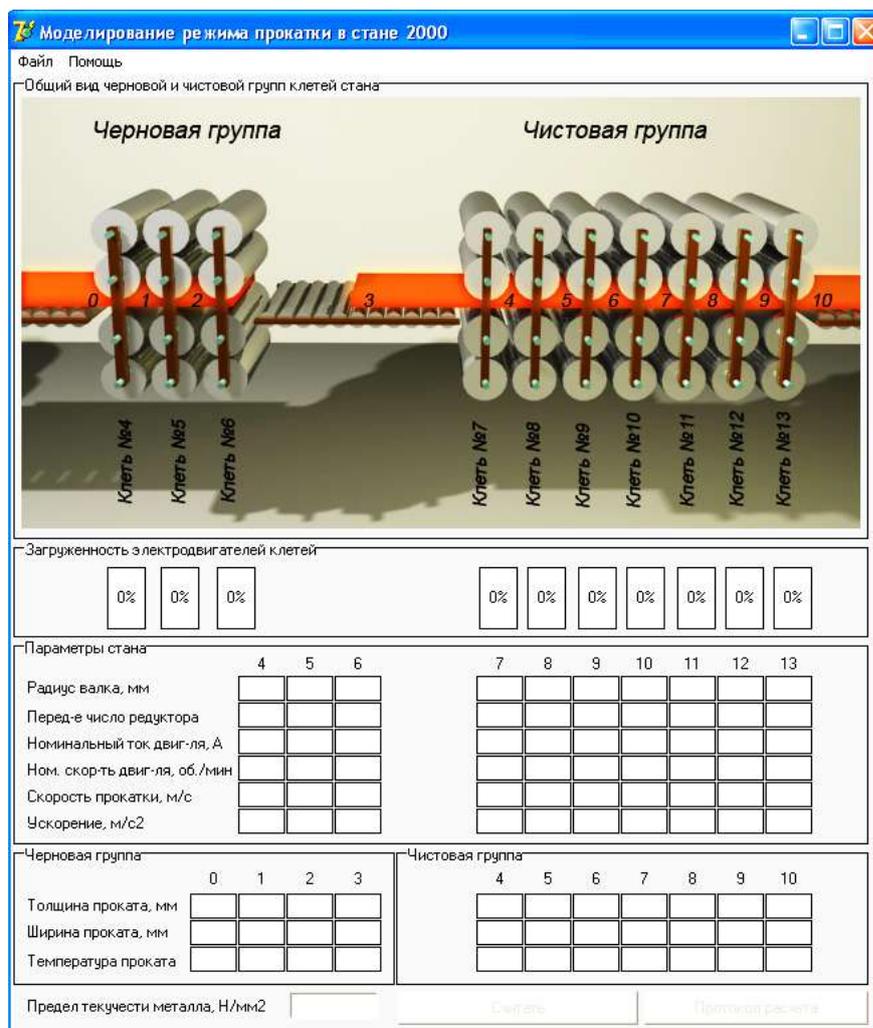


Рисунок 7.7 – Вид окна пользователя

В первой области приведен общий вид черновой и чистовой групп стана. Вторая область, расположенная под первой, содержит диаграммы, наглядно иллюстрирующие загрузку двигателей после осуществления расчета. Загрузка двигателей показана в этом окне в процентах номинального значения (без нагрузки – 0%). Кроме того, столбцы выделяются цветом в зависимости от нагрузки, а именно: зеленым цветом при загрузке двигателей в диапазоне 0–80%, желтым – при 80–90% и красным – при загрузке более 90%.

В третьей области приведены радиусы валков, передаточные числа редукторов клеток, номинальные токи и скорости двигателей, скорость и ускорение металла при прокатке. Четвертая область предназначена для ввода толщины, ширины и температуры полосы для каждого межклетевого промежутка.

Расчет выполняется по команде пользователя при нажатии на кнопку “Считать”. При нажатии на кнопку “Протокол расчета” исходные и полученные данные экспортируются в файл Excel.

Форма пользователя содержит два выпадающих меню: “Файл” и “Помощь”, показанные на рисунке 7.8. Меню “Файл” содержит кнопки “Открыть”, “Сохранить”, “Настройка печати”, “Печать” и “Выход”. Меню “Помощь” содержит кнопку “Справка”.



Рисунок 7.8 – Вид окна выпадающих меню Файл (а) и Помощь (б)

По команде “Файл – Открыть” программа предлагает загрузить файл \*.txt, сформированный ранее по команде пользователя для определенного режима прокатки. По умолчанию программа предлагает его загрузить с того места жесткого диска, откуда была запущена. По команде “Файл – Сохранить” программа предлагает сохранить имеющиеся в форме параметры стана и технологические параметры прокатки в виде файла \*.txt.

### 7.3.3. Проверка адекватности методики расчета.

#### Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности методики расчета нагрузочных режимов, реализованной в программе, проведен анализ нагрузок электроприводов 4–6-й клеток. Расчет проводился для условий прокатки трубных заготовок из перечисленных выше марок стали. Результаты представлены в таблице 7.4 [313].

Анализ показал, что при существующих режимах прокатки расхождение между экспериментальными и расчетными данными не превышает 8%. Это позволяет рекомендовать разработанный алгоритм и программное обеспечение для исследования технологических режимов прокатки полос расширенного сортамента.

Таблица 7.4 – Результаты расчета и экспериментальных исследований эквивалентных токов двигателей при прокатке трубных марок стали

| Марка стали, размер сляба | Эксперимент, расчет, ошибка | Эквивалентный ток двигателей по клетям, А |       |       |
|---------------------------|-----------------------------|---|-------|-------|
|                           |                             | №4  | №5    | №6    |
| 22ГЮ, 5900x1250x250       | эксперимент                 | 10624                                     | 9643  | 8564  |
|                           | расчет                      | 10581                                     | 8890  | 8264  |
|                           | ошибка, %                   | -0.4                                      | -7.8  | -3.5  |
| 09Г2Д, 5550x1250x250      | эксперимент                 | 11110                                     | 11231 | 12591 |
|                           | расчет                      | 11609                                     | 11579 | 13195 |
|                           | ошибка, %                   | 4.4                                       | 3     | 4.7   |
| 09Г2С, 9700x1650x250      | эксперимент                 | 17418                                     | 15777 | 16464 |
|                           | расчет                      | 17940                                     | 14577 | 15690 |
|                           | ошибка, %                   | 2.9                                       | -7.6  | -4.7  |
| 09ГСФ, 9300x1730x250      | эксперимент                 | 16676                                     | 14420 | 15617 |
|                           | расчет                      | 16125                                     | 14045 | 15773 |
|                           | ошибка, %                   | -3.3                                      | -2.6  | 0.9   |
| 13Г1С-У,<br>6000x1730x250 | эксперимент                 | 18356                                     | 16806 | 14947 |
|                           | расчет                      | 16125                                     | 14045 | 15773 |
|                           | ошибка, %                   | -0.7                                      | 0.2   | 3.9   |

В таблице 7.5 приведены результаты экспериментальных исследований прокатки сляба 300 и теоретических расчетов по традиционной и разработанной методикам. Из них следует вывод, что предложенная методика расчета энергосиловых параметров прокатки слябов повышенной толщины дает более точные результаты. Так, для рассмотренных сортментов ошибка относительно экспериментальных данных для разработанной методики находится в пределах от -7,5% до +7,1%, а для традиционной методики – от -15% до +14,6%.

Аналогичные расчеты и сравнительный анализ нагрузок для чистовой группы клетей стана представлены в публикации [314].

Разработанный алгоритм и программное обеспечение используются при разработке программ прокатки полос расширенного сортамента на стане 2000. Независимо от сортамента полос они рекомендуются для оптимизации скоростных и нагрузочных режимов с целью снижения энергозатрат при прокатке. Также они могут быть применены для анализа режимов электроприводов чистовой группы. Отличием является двухзонное регулирование скорости и прокатка с ускорением после заправки полосы в моталку.

Разработка оптимальных режимов прокатки обеспечивает более равномерное распределение нагрузок по клетям. В результате достигаются снижение энергетических затрат, увеличение производительности, повышение устойчивости технологического процесса. Выполненные разработки рекомендуются для расширенного использования специалистами металлургических предприятий и проектных организаций.

Таблица 7.5 – Результаты расчета и экспериментальных исследований прокатки сляба 300

| Марка стали, размер сляба | Метод получения данных | Эквивалентный ток двигателей по клетям, кА/(% к эксперименту) |                      |                      |
|---------------------------|------------------------|---|----------------------|----------------------|
|                           |                        | №4  | №5                   | №6                   |
| ст. 20,<br>8000x1750x300  | эксперимент            | 16,7  | 14,4                 | 15,6                 |
|                           | традиционная методика  | <u>13,4</u><br>+7,2%  | <u>12,1</u><br>-4,0% | <u>12,0</u><br>-6,3% |
|                           | предложенная методика  | <u>12,9</u><br>+3,2%  | <u>12,8</u><br>+1,5% | <u>13,0</u><br>+1,5% |
| 08 пс,<br>8000x1330x300   | эксперимент            | 15,6  | 15,3                 | 13,2                 |
|                           | традиционная методика  | <u>10,7</u><br>+8,0%  | <u>9,0</u><br>+7,1%  | <u>11,0</u><br>+7,8% |
|                           | предложенная методика  | <u>10,3</u><br>+4,0%  | <u>9,0</u><br>+7,1%  | <u>10,6</u><br>+3,9% |

#### **7.4. Промышленное внедрение способа регулирования межклетевых натяжений в черновой группе стана 2000**

Непрерывная прокатка представляет собой сложный процесс взаимодействия очагов деформации через металл. Физическая сущность силовой связи – натяжение либо подпор раската в межклетевом промежутке. Силовая взаимосвязь имеет место как в промежутках между универсальными клетями, так и в промежутках между вертикальными и горизонтальными валками одной клетки.

##### **7.4.1. Анализ режимов действующей САРНН**

При расширении сортамента ШСГП за счет производства толстой, труднодеформируемой полосы ужесточаются требования к автоматизированным

электроприводам и системам автоматического регулирования технологических параметров. Важными требованиями к электротехническим системам непрерывной подгруппы клеток являются [315]:

- обеспечение натяжения в межклетевых промежутках, близкого к нулевому. Так, для стана 2000 заданные натяжения в промежутках между клетями №4 и №5 должны составлять 5 т, между клетями №5 и №6 – 10 т;

- ограничение динамических нагрузок универсальных клеток, которые при прокатке толстых полос наиболее опасны для электрического и механического оборудования.

Вопросы регулирования межклетевых усилий (натяжения либо подпора) достаточно исследованы результаты опубликованы, например, в [316–318]. Разработаны и находятся в эксплуатации системы автоматического регулирования нулевого натяжения (САРНН) [319]. Так, в непрерывной подгруппе стана 2000 функционирует САРНН, представляющая собой управляющую программу, загруженную в контроллер АСУ ТП, который задает скоростные режимы работы электроприводов горизонтальных валков универсальных клеток [158]. Используется косвенный контроль межклетевых натяжений без создания в прокате силовой петли.

Теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых представлены в работах [320, 321], показали, что существующая САРНН стана 2000 не обеспечивает поддержания заданных натяжений (подтверждения этому даны ниже на рис. 7.10). Основной причиной, вызывающей отклонения натяжений, является рассогласование скоростей горизонтальных валков в режиме совместной прокатки. В существующей системе это связано с низкой точностью вычисления натяжения и несовершенством алгоритмов согласования скоростей. В условиях отсутствия петлеобразования в полосе возникают продольные усилия, в несколько раз превышающие допустимые. Это ставит процесс непрерывной прокатки под угрозу аварии.

В результате исследований, проведенных на стане, установлено, что для повышения точности согласования скоростей электроприводов клеток непрерывной подгруппы необходимо обеспечить [320]:

1. Ограничение влияния точности измерения давления металла на валки на точность регулирования натяжения при совместной прокатке.

2. Возможность косвенного регулирования натяжения при отсутствии сигнала давления, связанного с выходом из строя датчиков давления.

3. Независимое регулирование натяжений в межклетевых промежутках и исключение передачи возмущающего воздействия «через клеть».

Для выполнения перечисленных условий разработан способ автоматического регулирования натяжения в непрерывной подгруппе клеток, согласно которому цикл прокатки разделен на четыре временных интервала (этапа), подобно тому, как это предложено в [322]. Согласно способу осуществляется:

- автоматическая коррекция скоростей электроприводов первой и/или последней клеток подгруппы при прокатке в двух клетях;
- косвенное регулирование натяжения в функции разности статических токов (моментов) при совместной прокатке в трех клетях.

Функциональная схема системы, поясняющей реализацию способа, и подробное описание ее работы приведены в авторской публикации [320]. Ниже рассматривается вариант системы управления, внедренный на стане 2000.

#### **7.4.2. Функциональная схема системы, реализующей способ**

На рисунке 7.9 приведена схема системы, реализующей разработанный способ управления в трехклетевой группе, включающей клетки  $F_{x-1}$ ,  $F_x$  и  $F_{x+1}$ , где  $F_x$  – опорная клеть [323]. Система предусматривает исполнение алгоритма управления в цифровом виде.

Согласно разработанному алгоритму:

- до захвата полосы клетью  $F_x$  осуществляется поддержание скорости электропривода клетки  $F_{x-1}$  согласно заданной уставке;
- после захвата клетью  $F_x$  – осуществляется коррекция скорости электропривода предыдущей клетки  $F_{x-1}$  в функции разницы скоростей электропривода клетки  $F_x$  при отдельной и совместной прокатке;
- после захвата клетью  $F_{x+1}$  осуществляется автоматическое регулирование скоростей  $F_{x-1}$  и  $F_{x+1}$  по сигналу из системы задания скорости электропривода клетки  $F_x$ .

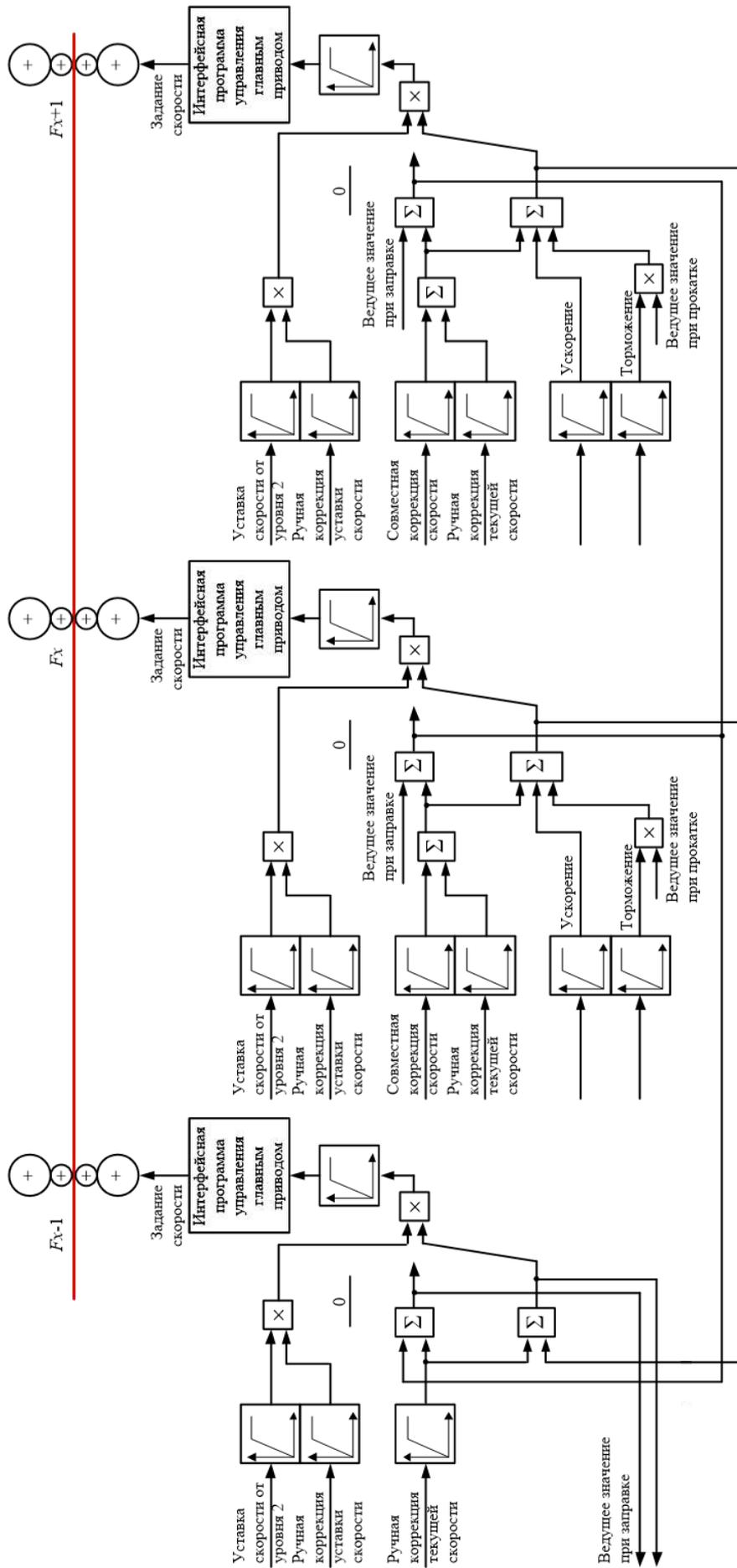


Рисунок 7.9 – Структурная схема системы задания и регулирования скоростей валков трехклетевой подгруппы

Исследовался вариант регулирования скоростей при совместной прокатке в функции разности скоростей до и после захвата, с пропорционально-интегральным регулятором скорости электропривода клетки  $F_x$ . Задание скоростей электроприводов всех клеток осуществляется сигналами «Уставка скорости от уровня 2», поступающими из АСУ. Также при этом может осуществляться ручная коррекция текущей скорости оператором. В режиме свободной прокатки до захвата металла следующей клетью осуществляется формирование дополнительного задания, обозначенного для клетки  $F_x$  как «Ведущее значение при заправке». Для предыдущей и последующей клеток этот сигнал поступает с выхода сумматора, который в данном режиме подключается на вход системы программного задания скорости. Также в этом режиме предусмотрена ручная коррекция текущих скоростей.

Согласование скоростей электроприводов обеспечивается в режиме совместной прокатки после захвата металла каждой последующей клетью. В этом случае сигнал коррекции скоростей подается с выхода сумматора системы задания скорости клетки  $F_x$ , на вход которого подается сигнал «Ведущее значение при прокатке». Также на вход этого сумматора подаются сигналы на ускорение и торможение опорной клетки и сигналы ручной индивидуальной либо совместной коррекции текущей скорости.

За счет подачи регулирующих сигналов из системы задания скорости электропривода опорной клетки в системы управления скоростями электроприводов предыдущей и последующей клеток осуществляется автоматическое согласование скоростей этих электроприводов. Так, при изменении (ручном либо автоматическом) скорости электропривода клетки  $F_x$  для обеспечения заданных натяжений полосы в смежных межклетевых промежутках осуществляется процентное воздействие на скорости электроприводов клеток  $F_{x-1}$  и  $F_{x+1}$ .

Можно утверждать, что рассмотренная система реализует один из вариантов каскадного регулирования скоростей электроприводов прокатного стана. Суть «классического» каскадного регулирования заключается в том, что

корректирующие значения скоростей для каждой клетки складываются и передаются в направлении по ходу либо против хода прокатки в зависимости от регулируемого параметра [324–326]. При этом скорости электроприводов всех предыдущих (либо последующих) клеток изменяются на одинаковую в процентном отношении величину.

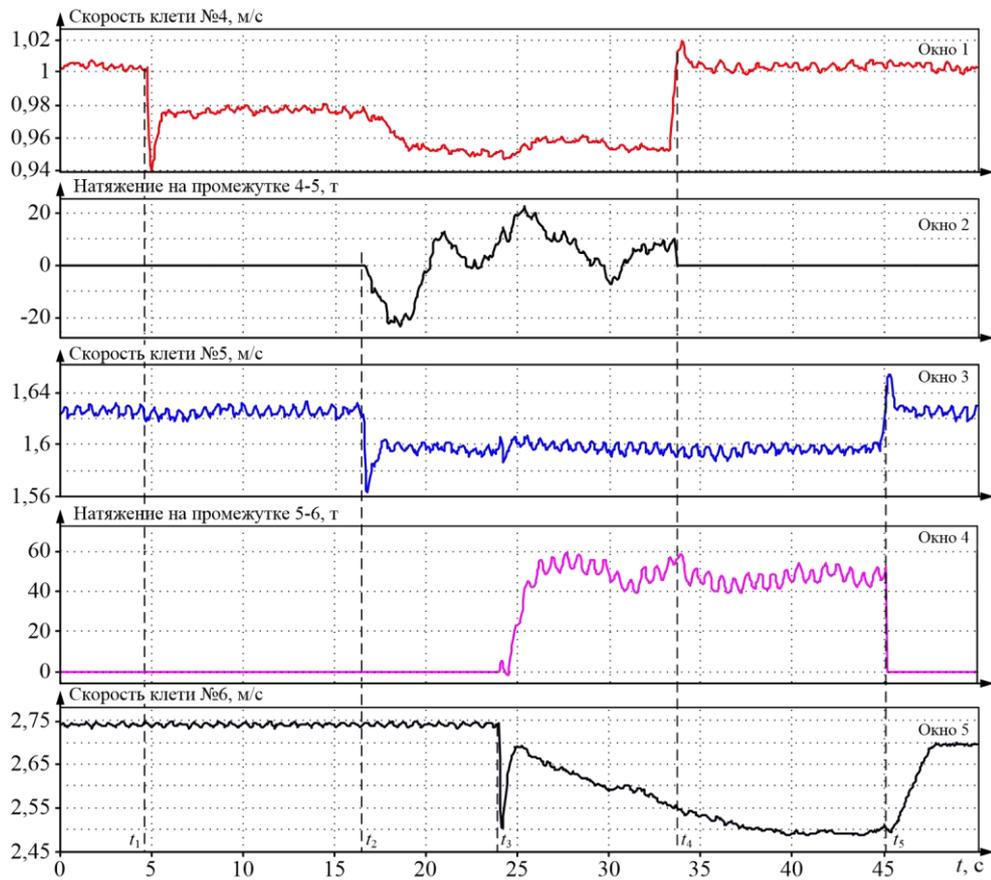
Отличиями предложенного варианта от «классического» регулирования являются:

- использование в качестве опорной («мастера») средней катающей клетки трехклетевой непрерывной подгруппы;
- автоматическое регулирование скоростей электроприводов предыдущей и последующей клеток;
- применение режима «Заправка полосы» при свободной прокатке в первых двух клетях.

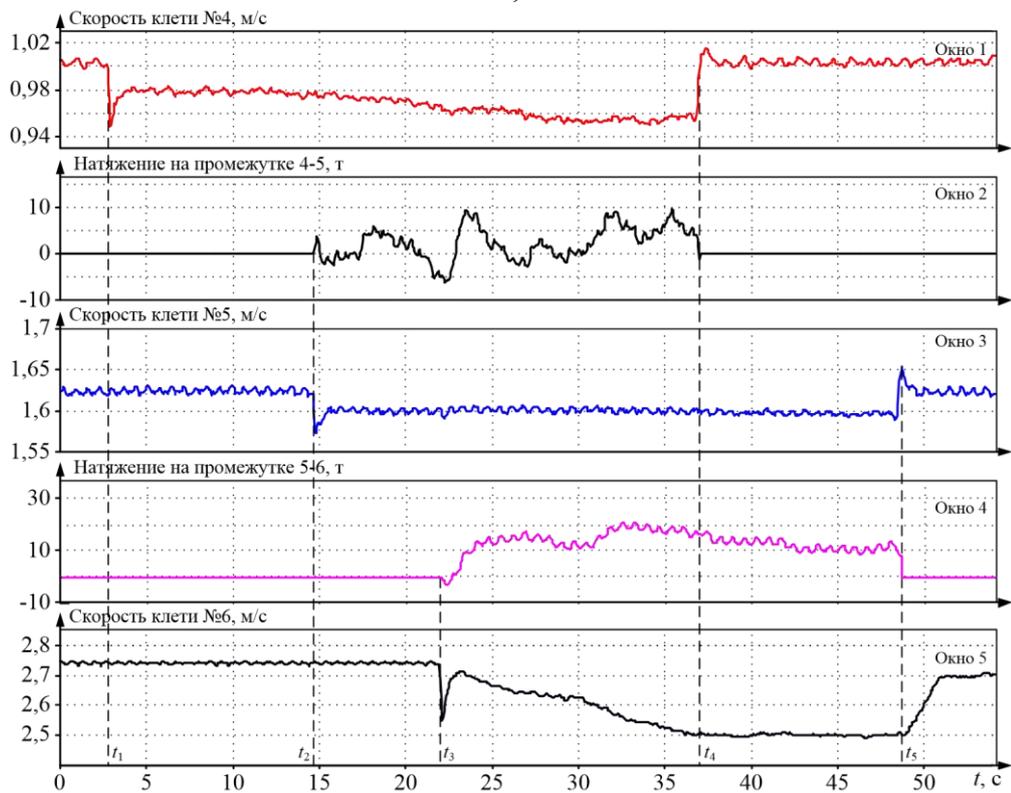
Такой принцип построения системы вызван требованиями к независимому регулированию скоростей в межклетевых промежутках. В этом случае ограничивается передача возмущающих и регулирующих воздействий «через клетку», что соответствует требованиям к усовершенствованной САРНН.

#### **7.4.3. Экспериментальные исследования натяжений при внедрении разработанного алгоритма**

Как отмечено выше, существующая САРНН не обеспечивает возросших требований к быстродействию и точности поддержания заданных натяжений. В результате прокатка ведется с натяжениями, в несколько раз превышающими диапазон принятых ограничений. В качестве подтверждения на рисунке 7.10, а приведены осциллограммы скоростей прокатки в 4-й–6-й клетях и натяжений в межклетевых промежутках [320]. Они получены при прокатке полос рядового сортамента (осциллограммы зафиксированы с помощью автоматической системы регистрации параметров, установленной на стане, и обработаны с помощью лицензионной компьютерной программы Iba Analyser).



а)



б)

Рисунок 7.10 – Осциллограммы линейных скоростей валков и натяжений при исходной настройке (а) и при регулировании согласно разработанному способу (б)

В результате анализа представленных осциллограмм сделаны выводы:

1. Натяжение в первом межклетевом промежутке при совместной прокатке изменяется в пределах  $(-20) - (+25)$  т при допустимом значении  $T_{4,5}=5$  т. Натяжение во втором промежутке превышает 50 т при допуске  $T_{5,6}=10$  т. Такие отклонения натяжений и режим подпора не могут считаться приемлемыми.

2. Возмущающее воздействие в виде изменения натяжения во втором промежутке оказывает влияние на натяжение в первом промежутке. Таким образом, возникает передача возмущений «через клеть», что подчеркивает несовершенство алгоритмов существующей САРНН.

Представленные осциллограммы подтверждают необходимость совершенствования алгоритмов вычисления и регулирования скоростей электроприводов горизонтальных валков непрерывной подгруппы.

На рисунке 7.10, б представлены осциллограммы, снятые при прокатке полос тех же профилей при исследовании внедряемого способа регулирования натяжения [320]. Результаты сравнения максимальных и минимальных натяжений, полученных при исходной системе и при реализации предложенных алгоритмов, приведены в таблице 7.6. Кроме того, в таблице приведены аналогичные результаты, полученные из осциллограмм на рисунке П.3.1, а и б, которые приведены в Приложении 3.

Таблица 7.6 – Натяжения полосы в межклетевых промежутках при существующей и разработанной системах согласования скоростей, т

| Объект             | Значение | Величина на осциллограммах |              |             |               |               |             |
|--------------------|----------|----------------------------|--------------|-------------|---------------|---------------|-------------|
|                    |          | рис. 7.10, а               | рис. 7.10, б | кратн., ед. | рис. П.3.1, а | рис. П.3.1, б | кратн., ед. |
| 1-й м/к промежуток | макс.    | 20                         | 10           | 2           | 25            | 10            | 2,5         |
|                    | мин.     | -20                        | -5,5         | 3           | -20           | -7            | 2,9         |
| 2-й м/к промежуток | макс.    | 58                         | 20           | 2,9         | 80            | 30            | 2,7         |
|                    | мин.     | 40                         | 10           | 4           | 40            | 8             | 5           |

Как следует из осциллограмм на рисунке 7.10, диапазон отклонений натяжений в первом межклетевом промежутке в интервале времени  $t_2-t_4$  снижается

более чем в 2,5 раза:  $\pm 20$  т на рис. 7.10, а и  $(+10) - (-5,5)$  т на рис. 7.10, б. Для второго межклетевого промежутка зафиксировано снижение максимальных отклонений натяжения от 58 т до 20 т.

Аналогичные выводы следуют из сопоставления осциллограмм на рис. П.3.1, а и б. Диапазон отклонений натяжения в первом промежутке снизился от  $(+25) - (-20)$  т на рис. П.3.1, а до  $(+10) - (-7)$  т на рис. П.3.1, б, т.е. в 2,6 раза. Для второго промежутка зафиксировано снижение отклонений натяжения в 2,7 раза, от 80 т до 30 т.

#### 7.4.4. Результаты опытно-промышленных испытаний

Разработанная система внедрена в промышленную эксплуатацию на стане 2000. Акты внедрения и опытно-промышленных испытаний представлены в Приложении 4.2.

С целью обобщения результатов выполнена обработка 120 осциллограмм, полученных при прокатке полос различного сортамента. Около половины из них зафиксированы при испытаниях разработанного способа согласования скоростей. Анализировались кратности отклонений натяжений в первом ( $K_{T4-5}$ ) и втором ( $K_{T5-6}$ ) межклетевых промежутках относительно нормативов 5 т и 10 т, соответственно. Усредненные результаты, полученные при работе действующей САРН и при внедрении предложенного алгоритма, представлены в виде диаграмм на рисунке 7.11, а и б.

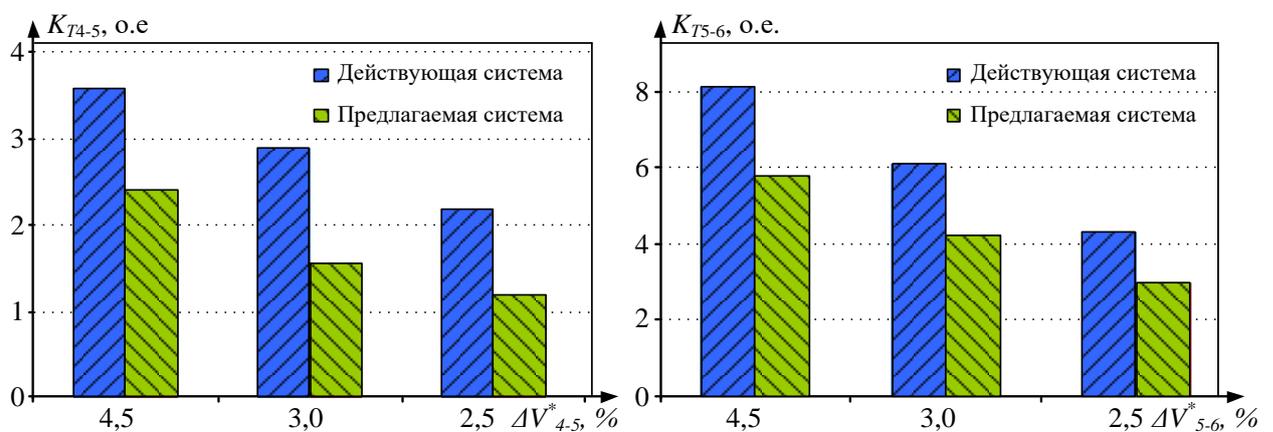


Рисунок 7.11 – Сравнение отклонений натяжений при действующей и предлагаемой системах для 1-го (а) и 2-го (б) межклетевых промежутков

Аргументы по горизонтальным осям – это усредненные относительные рассогласования линейных скоростей электроприводов 4-й и 5-й клетей  $\Delta v_{4-5}^*$  и 5-й и 6-й клетей  $\Delta v_{5-6}^*$  в процентах заданных значений. Данные величины вычислялись по измеренным угловым скоростям электроприводов в установившихся режимах после захвата полосы.

Анализ диаграмм показал, что в обоих межклетевых промежутках диапазон отклонений натяжений в предлагаемой системе в два и более раза ниже, чем в действующей, при этом отсутствует подпор во втором промежутке. Это подтверждает, что использование алгоритма управления в функции разницы моментов, измеренных при свободной прокатке и при совместной прокатке в двух смежных клетях, позволяет увеличить быстродействие и точность регулирования по сравнению с показателями в действующей системе.

***Внедрение предложенного алгоритма на стане обеспечивает:***

- расширение функциональных возможностей управления скоростными режимами по критерию минимальных натяжений;
- независимое регулирование натяжений в межклетевых промежутках и адаптацию регулирования с коррекцией на следующей заготовке.

Таким образом, экспериментальные исследования и опытно-промышленные испытания подтвердили совпадение ожидаемых и полученных результатов. Это позволяет сделать вывод о целесообразности внедрения разработанного усовершенствованного способа регулирования нулевого натяжения.

### **7.5. Внедрение способа согласования скоростей электроприводов вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки**

Способ согласования скоростей электроприводов валков вертикальной и горизонтальной клетей, обеспечивающий выравнивание их скоростей при совместной прокатке, прошел опытно-промышленные испытания и внедрен на стане 2000. Он представляет собой упрощенный вариант способа, рассмотренного в п. 2.6.2, поскольку в универсальных клетях непрерывной подгруппы

установлены электромеханические НУ. Их перемещение при наличии металла в валках не предусмотрено.

Внедрен способ автоматического регулирования скорости вертикальных валков пропорционально разности угловой скорости горизонтальных валков, измеренной до захвата полосы, и установившейся угловой скорости этих валков, измеряемой после захвата полосы. Он обеспечивает компенсацию статического отклонения скорости за счет увеличения скорости валков клетки на величину расчетной статической ошибки, возникающей после входа полосы в клетку [327].

Этот способ является развитием принципа управления электроприводами клеток чистовой группы ШСП с пропорциональным регулятором скорости, обоснованного в [328, 329]. В результате его реализации обеспечивается снижение скорости вертикальных валков на величину статической ошибки регулирования скорости горизонтальных валков. Поскольку при совместной прокатке валки жестко связаны, это обеспечивает снижение нагрузок вертикальных валков и исключение подпора при совместной прокатке.

Акты внедрения и опытно-промышленных испытаний способа представлены в Приложении 4.3. На рисунке 7.12 приведены осциллограммы координат электроприводов вертикальных и горизонтальных валков, полученные при его реализации [330].

Осциллограммы на рис. 7.12, а и 7.12, б сняты при прокатке полос различного профиля, поэтому они отличаются обжатиями в вертикальных валках и начальными значениями линейных скоростей валков. В связи с этим различаются токи нагрузки вертикальных валков (эджера) №4. Это связано с тем, что в условиях интенсивного производства проведение экспериментов на одной партии полос при различной настройке скоростей электроприводов вертикальных и горизонтальных валков трудно осуществимо.

На рис. 7.12, а линейная скорость эджера №4 после захвата полосы равна 0,625 м/с. Линейная скорость горизонтальных валков №4 до захвата полосы – 1,12 м/с. В пересчете на горизонтальную составляющую линейной скорости в точке захвата она составляет 0,618 м/с. Таким образом, скорости отличаются

на 1,1%. Аналогичное рассогласование скоростей на рис. 7.12, б составляет 1,3%. Эти значения, а также другие параметры для рис. 7.12, б, приведены в таблице 7.7. При этом в обоих случаях линейная скорость вертикальных валков выше линейной скорости горизонтальных валков в точке захвата.

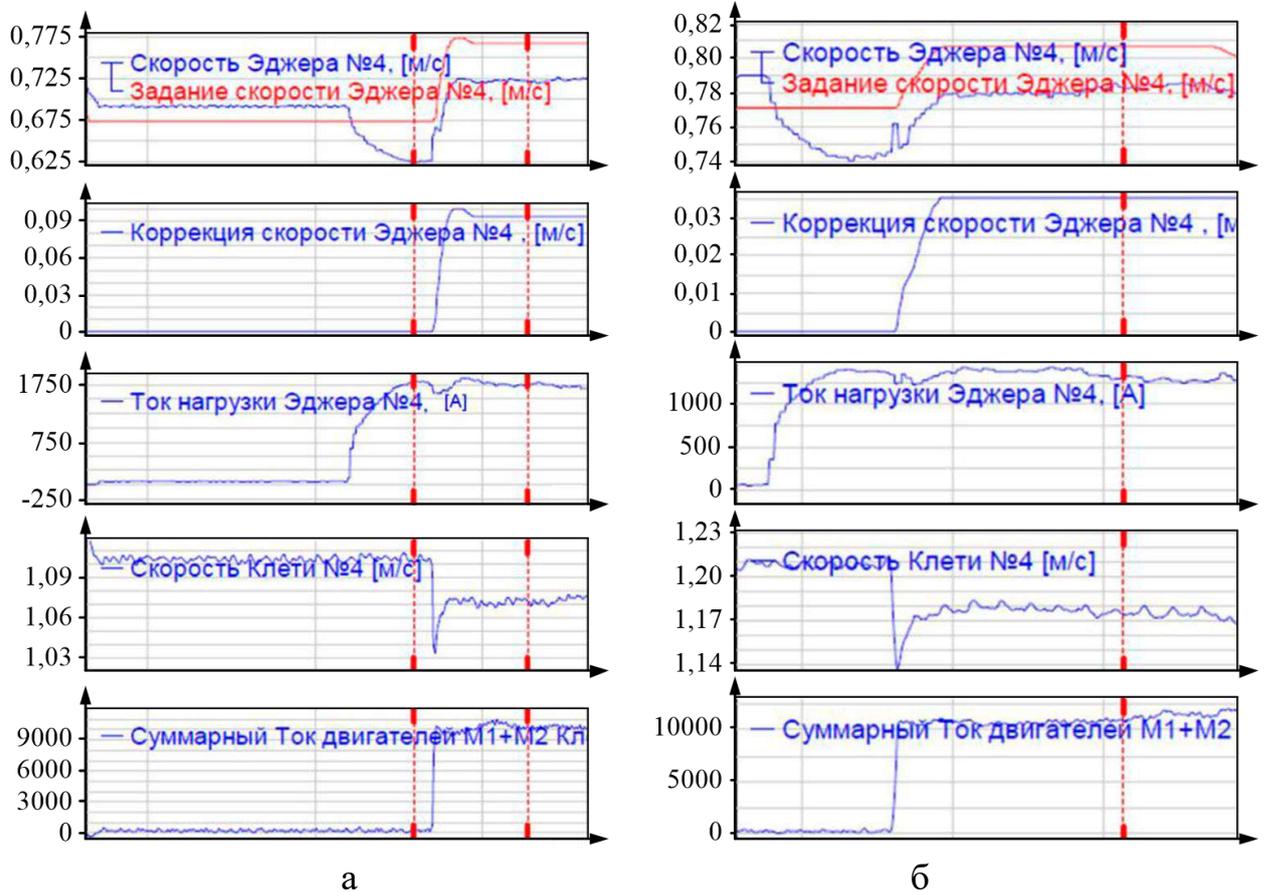


Рисунок 7.12. Переходные процессы электроприводов в системе с коррекцией скорости вертикальных валков

Таблица 7.7 – Результаты анализа осциллограмм при прокатке с коррекцией скорости вертикальных валков в момент захвата

| Измеряемый параметр                     | Условие измерения   | Ед. измер. | Величина на осциллограммах |              |
|---|---------------------|------------|----------------------------|--------------|
|   |                     |            | рис. 7.12, а               | рис. 7.12, б |
| Рассогласование при совместной прокатке | после захвата ГВ    | м/с        | 0,007                      | 0,009        |
|   |                     | %          | 1,1                        | 1,3          |
| Амплитуда тока ЭП вертикальных валков   | в момент захвата ГВ | %          | -11                        | -9           |

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Коррекция скорости вертикальных валков в обоих случаях отрабатывается практически без ошибки. В соответствии с сигналом коррекции, составляющим 0,092 м/с, скорость вертикальных валков (равная 0,625 м/с) после захвата горизонтальными валками повышается до 0,72 м/с. Аналогичные значения для рис. 7.14, б: 0,741 м/с, 0,035 м/с и 0,78 м/с.

2. Линейные скорости вертикальных и горизонтальных валков при совместной прокатке практически равны друг другу. Рассогласование составляет 1,3–1,5%, что объясняется погрешностью измерений и вычислений.

3. Регулирование скорости электропривода вертикальных валков в функции разности скоростей горизонтальных валков до и после захвата полосы обеспечивает устранение межклетевых усилий. Это подтверждается тем, что ток электропривода вертикальных валков после захвата полосы горизонтальными валками в обоих случаях практически не изменился. Соответственно можно сделать вывод об отсутствии натяжения либо подпора при совместной прокатке.

## **7.6. Оценка технико-экономической эффективности внедрения результатов диссертационных исследований**

Внедрение выполненных разработок выполнялось на станах 5000 и 2000 ПАО «ММК» по прямым договорам НИОКР в период от 2010 г. до 2017 г. Акты внедрения и опытно-промышленных испытаний приведены в Приложении 4. Информация о них представлена ниже.

В настоящее время выполняется научно-исследовательская работа на тему «Разработка и внедрение алгоритмов оптимизации нагрузочных и тепловых режимов электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 при прокатке слэбов расширенного сортамента» (научный руководитель проф. Радионов А.А., отв. исполнитель В.Р. Гасияров).

### **7.6.1. Оценка эффективности внедрения алгоритмов ограничения динамических нагрузок электроприводов стана 5000**

Основные технические эффекты, обеспечиваемые в результате внедрения разработанного способа ограничения динамических нагрузок, рассмотренного в п. 7.1:

- 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 раската валками;
- снижение расходного коэффициента в результате сокращения брака, связанного с аварийными застреваниями раскатов, и концевой обрезки.

**Расчет годового ожидаемого экономического эффекта** от внедрения усовершенствованных алгоритмов ограничения динамических моментов.

Экономическая эффективность достигается за счет изменения затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном и регламентном режимах. Расчет выполнен по «Методике расчета ожидаемого годового эффекта за счет сокращения простоев стана, связанных с поломками оборудования в линиях электроприводов реверсивной клетки стана 5000», утвержденной управлением экономики.

Исходные данные для расчета:

1. Расчет выполнен по информации о затратах при аварийном выходе из строя шпинделя горизонтальной клетки стана 5000 в 2012 году.
2. В расчет включена стоимость затрат на выполнение разработок и внедрение результатов.
3. Исходные данные и результаты расчета представлены в таблице 7.8. Из них следует, что ожидаемый срок службы шпинделя после внедрения новых

алгоритмов управления увеличивается от 3 до 8 лет. Таким образом, аварийность электромеханической системы горизонтального валка снижается в 2,7 раза.

Таблица 7.8 – Результаты расчета технико-экономической эффективности от снижения затрат на замену шпинделя горизонтальной клетки стана 5000

| № п/п | Наименование показателя   | Ед. изм.         | Условное обозначение   | До внедрения | После внедрения |
|-------|---|------------------|------------------------|--------------|-----------------|
| 1     | Стоимость шпинделя  | тыс. руб./шт.    | Ц                      | 53044        | 53044           |
| 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 затрат, включая НИОКР   | тыс. руб.        | С <sub>НИОКР</sub>     |              | 7200            |
| 8     | Стоимость НИОКР в год   | тыс. руб.        | С <sub>НИОКР ГОД</sub> |              | 3600            |
| 9     | Нормативный коэффициент эффективности   |                  | Е <sub>н</sub>         |              | 0,33            |
| 10    | Коэффициент долевого участия  |                  | К <sub>д</sub>         |              | 0,45            |

Годовой экономический эффект рассчитан при изменении затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном и регламентном режимах с учетом увеличения стойкости по формуле:

$$\text{Э}_{\text{ГОД}} = ((\text{Ц} + \text{С}_{\text{у}} + \text{С}_{\text{МТР2}} + \text{Г}) / \text{T}_2 - (\text{Ц} + \text{С}_{\text{у}} + \text{С}_{\text{МТР1}} + \text{Г}) / \text{T}_1 - \text{С}_{\text{НИОКР ГОД}} \times \text{Е}_{\text{н}}) \times \text{К}_{\text{д}};$$

$$\text{Э}_{\text{ГОД}} = ((53044 + 874,6 + 6665,3 + 744,5) / 3 - (53044 + 874,6 + 2652,7 + 744,5) / 8 - 5300 \times 0,33) \times 0,45 = 5764,6 \text{ тыс. руб.}$$

Следует учесть, что эффект достигается за счет совершенствования алгоритмов управления электроприводами без дополнительных вложений.

Указанный эффект приведен в акте внедрения НИОКР по теме «Разработка и внедрение способов снижения динамических нагрузок в валопроводах главных электроприводов горизонтальной клетки стана 5000», представленном в Приложении 4.1. Данная НИОКР выполнена в 2016–2017 г.г при непосредственном участии автора.

В Приложении 4.1 также представлен акт опытно-промышленных испытаний разработанных алгоритмов управления электроприводами. Как указано в документе, результаты испытаний подтверждают выводы об эффективности внедрения системы ограничения динамических нагрузок.

В связи со сходством технологий прокатки большинства толстолистовых станов выполненные разработки рекомендуются для расширенного внедрения на действующих толстолистовых станах. Прежде всего это относится к современным станам 5000, упомянутым во введении. После дополнительных исследований разработанные решения могут быть применены на широкополосных, сортовых и других станах, электромеханические системы которых работают с ударным приложением нагрузки во время захвата металла валками.

### **7.6.2. Оценка технико-экономической эффективности внедрения разработок на стане 2000**

*1. Внедрение системы регулирования межклетевых натяжений в непрерывной подгруппе (см. п.7.4)*

Основные технические эффекты (Приложение 4.2):

- повышение точности регулирования межклетевых натяжений;
- повышение надежности САРНН за счет исключения непосредственного измерения давления с помощью месдоз при совместной прокатке в трех клетях;
- уменьшение давления металла на валки и момента прокатных двигателей за счет ограничения натяжений и исключения подпора;
- повышение устойчивости технологического процесса за счет ограничения силового взаимодействия клеток через металл.

В результате внедрения разработанных алгоритмов снижаются нагрузки оборудования клетей в установившемся режиме совместной прокатки. Это обеспечивает повышение надежности и продление сроков его эксплуатации, а также снижение затрат на обслуживание и восстановление. В ходе длительной эксплуатации подтверждена техническая эффективность промышленного внедрения алгоритмов, реализующих разработанный способ.

1. Экономический эффект за счет снижения расходного коэффициента (по показателям на момент окончания НИОКР в 2012 году):

$$\mathcal{E}_1 = \Delta P \times C \times P \times K_1 = 0,000\ 185 \times 5\ 959,4 \times 5\ 635 \times 0,5 = 3\ 106,25 \text{ тыс. руб.},$$

где  $\Delta P$  – сокращение расходного коэффициента,  $\Delta P = 0,000185$  (0,185 кг/т);

$C$  – цена 1 тонны полуфабриката за вычетом отходов,  $C = 5\ 959,4$  руб.;

$P$  – годовое производство проката в 2011 году,  $P = 5\ 635\ 000$  т.

$K_1$  – коэффициент влияния на снижение расходного коэффициента,  $K_1 = 0,5$ .

Вместе с тем, подтвержденный экономический эффект, согласно акту внедрения от 2012 года, представленному в Приложении 4.2, составляет 1,75 млн. руб./год. Он определен после учета (вычитания) годовой стоимости НИОКР, в рамках которой выполнено внедрение. Очевидно, что данное значение справедливо только для первого года эксплуатации разработки, поскольку в последующие годы эффект достигается без затрат на выполнение НИОКР.

Следует принять во внимание, что указанный эффект, как и все показанные ниже, достигается за счет совершенствования алгоритмов управления электроприводами без дополнительных затрат.

В связи со сходством технологий прокатки в непрерывных подгруппах широкополосных и сортовых станов (толстая заготовка, жесткая взаимосвязь клетей через металл и др.), разработанные технические решения рекомендуются для расширенного промышленного внедрения на таких станах.

***2. Внедрение системы регулирования нагрузок за счет согласования скоростей валков универсальной клетки (см. п. 7.5)***

Основные технические эффекты (Приложение 4.3):

– повышение срока службы электрического и механического оборудования за счет снижения ударных нагрузок при захвате полосы;

- сокращение аварий и снижение внеплановых простоев по причине застревания полосы;
- снижение расходного коэффициента с концевой обрезью за счет сокращения времени восстановления скорости после захвата;
- улучшение условий коммутации двигателей за счет снижения динамических бросков тока и перенапряжений на коллекторе.

При расчете экономического эффекта учитывались: сокращение времени простоев стана, снижение расходного коэффициента в результате уменьшения обрезки и сокращения объема брака, снижение затрат на эксплуатацию главных электроприводов.

1. Экономический эффект за счет сокращения времени простоев стана, вызванных застреванием полосы в черновой группе:

$$\mathcal{E}_1 = P_{cp} \times \Delta t \times УПР \times K_1 = 778 \times 9 \times 244 \times 0,4 = 683,4 \text{ тыс.руб.},$$

где  $P_{cp}$  – средняя часовая производительность стана в год,  $P_{cp} = 778$  тыс./час;

$\Delta t$  – снижение времени простоя в год,  $\Delta t=9$  час;

$УПР = 244$  руб./т – условно-постоянные расходы по цеху.

$K_1$  – коэффициент влияния на сокращение времени простоев, принято  $K_1=0,4$ .

2. Экономический эффект за счет снижения расходного коэффициента:

$$\mathcal{E}_2 = P \times \Delta P \times C \times K_2 = 5876,1 \times 0,000189 \times 3889,94 \times 0,3 = 1296 \text{ тыс.руб.}$$

где  $P$  – годовое производство проката;  $P=5876,1$  т;

$\Delta P$  – сокращение расходного коэффициента по причине снижения обрезки,  $\Delta P=0,000189$  т/т (0,189 кг/т);

$C$  – цена одной тонны полуфабриката за вычетом отходов,  $C=3889,94$  руб.;

$K_2$  – коэффициент влияния на снижение расходного коэффициента,  $K_2=0,3$ .

1. Сокращение объема брака из-за отказов электроприводов клеток непрерывной подгруппы:

$$\mathcal{E}_3 = \Delta B \times C \times K_3 = 42 \times 3889,94 \times 0,3 = 49 \text{ тыс.руб.}$$

где  $\Delta B$  – сокращение объема брака из-за отказов главных электроприводов,  $\Delta B=42$  т;

$K_3$  – коэффициент влияния на сокращение объема брака  $K_3 = 0,3$ .

## 2. Сокращение затрат на эксплуатацию главных электроприводов:

$$\mathcal{E}_4 = УПР \times K_4 = 244 \times 0,3 = 73,2 \text{ тыс.руб.}$$

где  $K_4$  – коэффициент влияния на сокращение затрат на эксплуатацию главных электроприводов,  $K_4 = 0,3$ .

## 3. Суммарный экономический эффект:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = 683,4 + 1296 + 49 + 73,2 = 2101,6 \text{ тыс.руб.}$$

При этом экономический эффект достигается за счет совершенствования алгоритмов управления скоростными режимами черновой группы стана практически без капитальных затрат.

### ***3. Внедрение программного обеспечения***

Внедрение программного обеспечения, разработанного для расчета энергосиловых параметров прокатки при высоких очагах деформации, рассмотренного в главе 3, выполнено согласно акту, представленному в Приложении 4.4. Там же приведен расчет экономического эффекта от внедрения результатов НИР «Исследование нагрузочных и скоростных режимов электроприводов чистой группы стана 2000 при прокатке трубной заготовки с целью обеспечения устойчивости технологического процесса и повышения надежности электрооборудования» (научный руководитель А.А. Радионов, отв. исполнитель В.Р. Гасияров).

Целью научных исследований являлось обоснование внедрения технологии прокатки трубной заготовки толщиной 18 мм и более с оценкой ресурса действующих электроприводов черновой и чистой групп. Ожидаемые результаты:

- снижение внеплановых простоев за счет оптимизации нагрузочных режимов электроприводов при прокатке трубной заготовки;
- разработка рациональных скоростных режимов, обеспечивающих поддержание необходимой температуры конца прокатки;
- сокращение потерь электрической энергии за счет оптимальной загрузки электроприводов.

Расчет экономического эффекта выполнен по методике, примененной в настоящем параграфе для оценки эффективности внедрения системы регулирования межклетевых натяжений. Согласованный расчет представлен в Приложении 4.4.

Экономический эффект достигается за счет снижения расходного коэффициента и составляет 1,716 млн. руб./год.

### **7.6.3. Оценка суммарного эффекта от внедрения результатов диссертационных исследований**

Проведенные экспериментальные исследования и достигнутая технико-экономическая эффективность подтверждают, что промышленное внедрение разработанных автоматизированных электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров обеспечивает:

- ресурсосбережение за счет снижения материалоемкости продукции;
- повышение качества проката в результате повышения точности регулирования геометрических размеров;
- снижение затрат на техническое обслуживание оборудования и устранение последствий аварий;
- импортозамещение за счет расширения возможностей для производства листа и толстой полосы из труднодеформируемых марок стали.

Результаты оценки экономической эффективности внедрения разработанных систем и алгоритмов приведены в таблице 7.9. Суммарный годовой экономический эффект составляет 12,7 млн руб. Если учесть, что он посчитан по ценам, которые на момент расчетов были значительно ниже текущих, то эффект, достигаемый в настоящее время, будет значительно выше. Достаточно привести пример, что расчеты эффекта от внедрения системы снижения динамических нагрузок посчитаны по данным табл. 7.8, в которой указана стоимость шпинделя на 2012 год, составляющая 53 млн руб. В настоящее время эта стоимость составляет около 100 млн руб. Соответственно эффект от внедрения разработки увеличивается практически в 2 раза.

Разработанные системы и алгоритмы рекомендуются для внедрения на толстолистовых и широкополосных станах. Поскольку все решения реализуются программным путем в контроллерах первого и второго уровней, они могут быть применены как в электроприводах переменного тока с частотным регулированием скорости, так и в электроприводах постоянного тока. Экономический эффект достигается за счет совершенствования алгоритмов, т.е. практически без капитальных затрат.

Таблица 7.9 – Технико-экономическая эффективность внедрения выполненных разработок

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

В целом, внедрение выполненных разработок способствует инновационному развитию отечественной металлургической отрасли.

## ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты экспериментальных исследований переходных процессов электромеханических систем валков клетки стана 5000. Показано, что амплитуда ударного момента при захвате с разомкнутым зазором превышает установившийся момент прокатки в 1,9 раза (коэффициент кратности момента  $k_M=1,9$ ), а при замкнутом зазоре  $k_M=1,6$ . Это подтверждает вывод, что алгоритм ограничения динамических нагрузок за счет предварительного разгона электроприводов в недостаточной степени ограничивает электромагнитный момент двигателя и упругий момент шпинделя.

2. Разработанный способ ограничения динамического момента за счет предразгона и компенсации ошибки регулирования скорости при ударном

приложении нагрузки внедрен в АСУ ТП реверсивной клетки стана 5000. В результате анализа осциллограмм подтверждено снижение динамических моментов двигателя и шпинделя, коэффициент кратности  $k_m=1,1$ . Средние динамические моменты при захвате во всех проходах при прокатке «тяжелого» профиля не превышают 15% установившегося значения. Подтвержденный экономический эффект за счет снижения затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном и регламентном режимах составляет 5,76 млн руб./год.

3. Дана характеристика электроприводов горизонтальных клеток непрерывной подгруппы черновой группы широкополосного стана 2000 ПАО «ММК». В результате экспериментальных исследований подтверждено неудовлетворительное распределение нагрузок при прокатке полос расширенного сортамента: при существующих режимах обжаты двигатели загружены на 60–117%.

4. С целью оптимизации нагрузочных режимов разработана программа расчета энергосиловых параметров прокатки на основе уточненных аналитических зависимостей, представленных в главе 3. Программа обеспечивает расчет энергосиловых параметров черновой группы стана 2000 при прокатке трубной заготовки. Экономический эффект от использования составляет 1,716 млн руб./год.

5. Подтверждено, что предложенная методика расчета энергосиловых параметров прокатки слябов повышенной толщины обеспечивает более точные результаты, по сравнению с традиционной. Расхождение расчетных и экспериментальных данных для разработанной методики составляет от -7,5% до +7,1%, а для традиционной – от -15% до +14,6%. Это позволяет рекомендовать разработанное ПО для исследования технологических режимов прокатки полос расширенного сортамента на широкополосных и толстолистовых станах.

6. Рассмотрен способ автоматического регулирования нулевого натяжения, внедренный в непрерывной подгруппе черновой группы клеток стана 2000. Представлены осциллограммы, сравнительный анализ которых подтвердил двукратное повышение точности регулирования натяжения и исключение подпора в межклетевых промежутках. Экономический эффект, достигнутый за счет снижения расходного коэффициента, составил 3,1 млн руб./год.

7. Представлены способ и система согласования скоростей электроприводов вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки широкополосного стана. Разработанный алгоритм управления внедрен в АСУ ТП черновой группы клетей стана 2000.

8. В результате экспериментальных исследований подтверждено повышение точности согласования скоростей электроприводов вертикальных и горизонтальных валков, что обеспечивает снижение усилий в межклетевом промежутке универсальной клетки при совместной прокатке. Экономический эффект от внедрения составляет 2,1 млн. руб./год.

9. Основные технические эффекты от внедрения разработок на станах 5000 и 2000 ПАО «ММК»:

- ресурсосбережение за счет снижения материалоемкости продукции;
- повышение качества проката в результате повышения точности регулирования геометрических размеров;
- снижение затрат на техническое обслуживание оборудования и устранение последствий аварий;
- импортозамещение за счет расширения возможностей для производства листа и толстой полосы из труднодеформируемых марок стали.

10. В результате внедрения разработок, выполненных в диссертации, обеспечивается экономия металла в объеме более 4,7 тыс. т/год, увеличивается продолжительность эксплуатации механического и силового электрического оборудования, и достигается снижение затрат на техническое обслуживание и ремонты. Суммарный экономический эффект составляет 12,7 млн. руб./год.

11. Разработанные системы, алгоритмы и программное обеспечение рекомендуются для внедрения на толстолистовых и широкополосных станах горячей прокатки независимо от рода тока и типа электроприводов. Их преимуществом является высокая эффективность при относительной простоте реализации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

4. Получены уточненные аналитические зависимости расчета усилий прокатки при высоких очагах деформации, основанные на выражениях акад. А.И.

Целикова, отличающиеся учетом влияния толщины на вертикальное напряжение и инерции металла при ускорении, обеспечивающие повышение точности вычисления энергосиловых параметров прокатки толстых листов.

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

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

7. Обоснован принцип перераспределения регулирующих воздействий на исполнительные устройства, на основе которого разработан способ ограничения дефекта «серповидность» путем предиктивного регулирования наследственного перекаса зазора валков и быстродействующей компенсации текущей асимметрии профиля раската.

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

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

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

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

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

***Результаты исследований способствуют инновационному развитию отечественной металлургической отрасли.***

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014 – 2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014 – 2020 годы и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]: приказ М-ва промышленности и торговли Рос. Федерации от 5 мая 2014 г. № 839. – Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/>.
2. Гугис, Н.Н. Развитие прокатного производства Российской Федерации в 2015-2017 годах [Текст] / Н.Н. Гугис // Труды XI конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 2017. – С. 11-21. – 1 т.
3. Малышев, И.А. Российская трубная отрасль: развитие продолжается [Электронный ресурс] / И.А. Малышев // Бурение и нефть. – Май 2019. – Режим доступа: <https://burneft.ru/archive/issues/2019-05/3>.
4. Внутренний рынок будет приоритетным для ММК в 2020 году [Электронный ресурс] // Аргументы недели. – 18.02.2020. – Режим доступа: <https://finance.rambler.ru/markets/43705835-vnutrenniy-rynok-budet-prioritetnym-dlya-mmk-v-2020-godu/>.
5. Денисов, С.В. Инновационные достижения ПАО «ММК» в производстве современного металлопроката [Текст] / С.В. Денисов // Труды XI конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 2017. – С. 21-29. – 2 т.
6. Салганик, В.М. Современные технологии производства листового проката [Текст] / В.М. Салганик // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А.Ф. Головина». – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. – С. 353 - 358.
7. Металлургия и внешняя политика [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://vologodski.livejournal.com/214717.html>.
8. Повышение действенности системы управления качеством трубного листового проката на базе статистического прогнозирования свойств [Текст]: Монография / М.И. Румянцев, К.Е. Черкасов, Е.В. Якушев [и др.]. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 134 с.

9. Салганик, В.М. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос [Текст] / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 506 с.
10. Кнеппе, G. Hot strip rolling technology: Tasks for the new century [Текст] / G. Кнеппе, D. Rozentel // MPT International. – 1998. – 22, № 3. – P. 56-67 (англ).
11. Plate mill for ММК [Электронный ресурс] // Electric equipment and automation from single source. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/42247373-Tolstolistovoy-standlya-mmk-elektrooborudovanie-i-avtomatizaciya-iz-odnih-ruk.html>.
12. Kucsera, P. Hot Rolling Mill Hydraulic Gap Control (HGC) thickness control improvement [Текст] / P. Kucsera, Z. Beres // Acta Polytechnica Hungarica. – 2015. – Vol. 12, № 6. – P. 93-106 (англ).
13. Zhang, F. Thickness control strategies of plate rolling mill [Текст] / 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 (англ).
14. Zhang, F. Automatic Gauge Control of Plate Rolling Mill [Текст] / 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 (англ).
15. Xu, L. Simulation and Analyzing on Model Parameters Effect of BISRA-AGC [Текст] / L. Xu, C. Shu-zong, D. De-shun, C. Hua-xin, Z. Dian-hua // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 22. – P. 571-576 (англ).
16. Бычков, В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства [Текст] / В.П. Бычков. – М.: Высшая школа, 1977. – 391 с.
17. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода [Текст] / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.
18. Ключев, В.И. Теория электропривода [Текст]: Учеб. для вузов / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 760 с.
19. Целиков, А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Машины и агрегаты для производства проката [Текст] / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с. – 3 т.
20. Целиков, А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах [Текст] / А.И. Целиков. – М.: Металлургиздат, 1962. – 494 с.

21. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации [Текст] / Н.Н. Дружинин. – М.: Металлургия, 1975. – 336 с.
22. Дружинин, Н.Н. Управление скоростными режимами непрерывного широкополосного стана горячей прокатки [Текст] / Н.Н. Дружинин, А.П. Лихорадов, А.Н. Дружинин и др. // Сталь. – 1972. – № 8. – С. 729-732.
23. Филатов, А.С. Автоматические системы стабилизации толщины полосы при прокатке [Текст] / А.С. Филатов, А.П. Зайцев, А.А. Смирнов. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
24. Филатов, А.С. Системы автоматизации листовых станов горячей прокатки [Текст] / А.С. Филатов, В.П. Приведенцев, С.И. Алимов // Металлургическое оборудование. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш. – 1979. – №30. – 46 с.
25. Селиванов, И.А. Синтез систем регулирования непрерывных станов с многовалковыми калибрами [Текст] / И.А. Селиванов, О.И. Петухова, И.В. Суздаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2009. – № 15. – С. 60-63. – 11 т.
26. Селиванов, И.А. Синтез систем подчиненного регулирования параметров на непрерывных прокатных станах [Текст] / И.А. Селиванов, А.А. Радионов, О.И. Петухова, И.В. Суздаев // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – №1. – С. 21-24.
27. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов [Текст] / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.
28. Басков, С.Н. Энергосиловые параметры приводов и систем профилированной прокатки слябов стана 2800 [Текст] / С.Н. Басков, А.С. Карандаев, О.И. Осипов // Приводная техника. – 1998. – № 1/2. – С. 21-24.
29. Карандаев, А.С. Система автоматического регулирования натяжения и петли широкополосного стана горячей прокатки с улучшенными динамическими характеристиками [Текст] / А.С. Карандаев, О.И. Осипов, В.Р. Храмшин // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: МГТУ. – 2004. – № 3. – С. 76-82.
30. Мещеряков, В.Н. Оценка соотношения составляющих момента нагрузки при расчете вращающего момента электродвигателя [Текст] / В.Н. Мещеряков, Е.Е. Диденко // Электрика. – 2012. – № 10. – С. 31-33.
31. Мещеряков, В.Н. Математическое моделирование способа снижения динамических нагрузок электропривода черновой клетки прокатного стана

- [Текст] / В.Н. Мещеряков, Д.В. Мигунов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – № 3. – С. 21-26.
32. Мещеряков, В.Н. Математическое описание механической системы двух смежных клеток чистой группы непрерывного стана горячей прокатки [Текст] / В.Н. Мещеряков, Е.Е. Диденко // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – № 3. – С. 8-13.
33. Пятибратов, Г.Я. Влияние противо-ЭДС двигателя на колебания электро-механических систем [Текст] / Г.Я. Пятибратов, А.А. Даньшина, Н.А. Сухенко // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». – 2015. – № 2. – С. 57-66. – 15 т. DOI 10.1429/power150208.
34. Pyatibratov, G.Ya. Methods of efficient parameters multifactorial determination of industrial manipulators gears and electric drives [Текст] / G.Ya. Pyatibratov, A.A. Danshina, L.L. Altunyan // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1403-1409 (англ).
35. Pyatibratov, G.Ya. Multifactorial determination of the electric drive for the force compensating manipulator [Текст] / G.Ya. Pyatibratov, A.A. Danshina // IOP Conference Series: Materials Science 19 and Engineering. – 2017. – Vol. 177, № 1. DOI 10.1088/1757-899X/177/1/012138 (англ).
36. Пятибратов, Г.Я. Оптимальное управление усилиями в электромеханических силокомпенсирующих системах [Текст] / Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко, Н.А. Сухенко // IX Международная (XX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь: ПНИПУ – С. 200-204.
37. Колганов, А.Р. Электромеханотронные системы. Современные методы управления, реализации и применения [Текст]: учебное пособие / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 256 с.
38. Лебедев, С.К. Управление движением промышленных манипуляторов [Текст]: учебник / С.К. Лебедев, А.Р. Колганов. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2018. – 340 с.
39. Колганов, А.Р. Современные методы управления в электромеханотронных системах. Разработка, реализация, применение / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2012. – 256 с.

40. Колганов, А.Р. Математические основы теории автоматического управления [Текст]: учеб. для вузов / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, А.В. Ханаев. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2010. – 340 с.
41. Kravchenko, O.A. Synthesis of optimal control in Electromechanical systems with elastic couplings [Текст] / O.A. Kravchenko, G.Ya. Pyatibratov // Izv. vuzov. Electromekhanika [Proceedings of the Universities. Electromechanics]. – 1998. – № 4. – P. 58-63 (in Russ.).
42. Барыльник, Д.В. Реализация режима динамического торможения синхронного частотно-регулируемого электропривода при отключении питающего напряжения [Текст] / Д.В. Барыльник, О.А. Кравченко, А.Б. Бекин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2013. – № 6. – С. 79-82.
43. Кравченко, О.А. Принципы построения многокоординатных силокомпенсирующих систем [Текст] / О.А. Кравченко // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – № 3. – С. 43-47.
44. Лукьянов, С.И. Совершенствование системы управления электроприводами основных механизмов МНЛЗ [Электронное издание] / С.И. Лукьянов, Е.С. Суспицын, С.С. Красильников. – 2-е изд. – Магнитогорск, 2017.
45. Лукьянов, С.И. Система управления и диагностирования электропривода отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки: монография [Электронное издание] / С.И. Лукьянов, Н.В. Швидченко, Р.С. Пишнограев, Д.В. Швидченко. – Магнитогорск, 2017.
46. Лукьянов, С.И. Система управления электроприводом размоточного аппарата стана по производству высокопрочной арматуры [Электронное издание] / С.И. Лукьянов, И.Р. Сафин, Е.Э. Бодров. – Магнитогорск, 2017.
47. Кожевников, С.Н. Динамика машин с упругими звеньями [Текст] / С.Н. Кожевников. – Киев: Изд. АН УССР, 1961. – 312 с.
48. Кожевников, С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах [Текст] / С.Н. Кожевников. – Киев: Наук. думка, 1986. – 288 с.
49. Веренев, В.В. Диагностика и динамика прокатных станов [Текст]: монография / В.В. Веренев, В.И. Большаков, А.Ю. Путноки, А.А. Коринь, С.В. Мацко. – Д.: ИМА-пресс, 2007. – 144 с.
50. Веренев, В.В. Влияние скорости захвата полосы на динамические нагрузки в приводе прокатной клетки [Текст] / В.В. Веренев, В.И. Большаков, Н.И.

- Подобедов // Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2007. – Вып.14. – С. 260-266.
- 51.Веренев, В.В. Моделирование взаимодействия линии главного привода и упругой системы клетки [Текст] / В.В. Веренев, В.И. Большаков, Н.И. Подобедов // Сб. Захист. металургійних машин від поломок, Маріуполь. – 2000. – № 5. – С. 34-42.
- 52.Веренев, В.В. Инженерная методика выбора оптимальных конструктивных параметров линии привода прокатного стана [Текст] / В.В. Веренев // Сб. научн. тр. НГУ. – № 13. – 2002. – С. 9-12. – 3 т.
- 53.Крот, П.В. Исследования крутильных колебаний в редукторных линиях привода прокатных станов [Текст] / П.В. Крот // Междунар. IX конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». – СПб.: Институт проблем машиноведения (ИПМаш) РАН. – 25-27 окт. 2009. – С. 120-125.
- 54.Krot, P.V. Nonlinear Vibrations and Backlashes Diagnostics in the Rolling Mills Drive Trains [Текст] / P.V. Krot // Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2008), IPME RAS. – St. Petersburg. – June 30–July 4. – 2008. DOI 10.13140/2.1.3353.1840 (англ).
- 55.Артюх, В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок [Текст] / В.Г. Артюх. – Мариуполь: Издат. группа «Университет», 2015. – 288 с.
- 56.Артюх, В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах [Текст] / В.Г. Артюх. – Мариуполь: ПГТУ, 2008. – 246с.
- 57.Артюх, В.Г. Горизонтальные силы при прокатке [Текст] / В.Г. Артюх, Г.В. Артюх, В.О. Мазур // Мариуполь: Вестник Приазовского Государственного Технического Университета. – 2009. – Вып. №19. – С. 128-132.
- 58.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).
- 59.Mazur, V. Current views on the detailed design of heavily loaded components for roll-ing mills [Текст] / V. Mazur, V. Artyukh, G. Artyukh, M. Takadzhi // Engineering Designer. – 2012. – V. 37, № 1. – P. 26-29.

60. Артюх, В.Г. Возможность горячей прокатки стального листового проката большей массы [Текст] / В.Г. Артюх, В.О. Мазур // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2011. – Вып. 13 – С. 148-153.
61. Файнберг, Ю.М. Автоматизация непрерывных станов горячей прокатки [Текст]: монография / Ю.М. Файнберг. – М.: Металлургиздат, 1963. – 326 с.
62. Выдрин, В.Н. Динамика прокатных станов [Текст] / В.Н. Выдрин. – Свердловск: Металлургия, 1960. – 256 с.
63. Румянцев, М.И. Развитие методологии проектирования технологий листопркатного производства: теория и практика [Текст]: дис. ... докт. техн. наук / Румянцев Михаил Игоревич – Магнитогорск: МГТУ, 2018. – 422 с.
64. Трайно, А.И. Исследование и разработка ресурсосберегающих режимов производства листовой стали [Текст]: дис. ... докт. техн. наук / Трайно Александр Иванович. – М.: Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2009. – 251 с.
65. Денисов, С.В. Развитие научных основ, создание и реализация эффективных технологий прокатки низколегированных стальных полос и листов с повышенными потребительскими свойствами [Текст]: дис. ... докт. техн. наук / Денисов Сергей Владимирович. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – 368 с.
66. Филатов, А.А. Разработка теоретических основ проектирования и совершенствование трансмиссий высокомоментных главных приводов прокатных клеток [Текст]: дис. ... докт. техн. наук / Филатов Александр Андреевич. – М.: ВНИИМетмаш, 2004. – 333 с.
67. Шабалов, И.П. Разработка научных основ, создание и реализация ресурсосберегающих технологий производства толстолистового проката с повышенными потребительскими свойствами для металлических конструкций [Текст]: дис. ... докт. техн. наук / Шабалов Иван Павлович – М.: ФГУП «ЦНИИ черной металлургии им. И.П. Бардина», 2005. – 412 с.
68. Мунтин, А.В. Разработка технологии прокатки толстого листа с заданными свойствами из трубных марок стали на стане 5000 [Текст]: дис....канд. техн. наук / Мунтин Александр Вадимович. – М.: МГТУ им. Баумана, 2014. – 141 с.
69. Зинягин, А.Г. Совершенствование процессов прокатки и охлаждения листов из трубных марок сталей на стане 5000 [Текст]: дис....канд. техн. наук / Зинягин Алексей Геннадьевич. – М.: МГТУ им. Баумана, 2014. – 158 с.

70. Шишов, И.А. Разработка рекомендаций по повышению производительности толстолистого стана 5000 ОАО «Северсталь» на основе расчета энергосиловых параметров прокатки [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Шишов Иван Александрович. – СПб.: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 2013. – 190 с.
71. Цветков, Д.С. Повышение стабильности свойств и качества продукции стана 5000 ОАО «Северсталь» за счет улучшения структуры толстолистого штрипса из высокопрочных низколегированных сталей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Цветков Дмитрий Сергеевич. – СПб.: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 2012. – 161 с.
72. Наумов, А.А. Разработка технологий горячей прокатки листа из трубных и автомобильных сталей с использованием методов физического и математического моделирования [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Наумов Антон Алексеевич. – СПб.: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 2012. – 209 с.
73. Завтра вводится в эксплуатацию 3-ий стан 5000 в России. В Выксе [Электронный ресурс] // Neftegaz.RU. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/Oborudovanie/264735-zavtra-vvoditsya-v-ekspluatatsiyu-3-iy-stan-5000-v-rossii-v-vyксе/>.
74. Рынок стальных труб в России демонстрирует стабильный рост [Электронный ресурс] // Indexbox.ru. – Режим доступа: <http://www.indexbox.ru/news/rynok-stalnyh-trub-v-rossii-demonstriruet-stabilnyj-rost/>.
75. Геллер, А.Л. Ежегодная международная конференция металлургов в Дюссельдорфе (Германия) «СТАЛЬ 2010» [Текст] / А.Л. Геллер, В.Г. Горелик // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 1. – С. 140-153.
76. Карандаев, А.С. Совершенствование алгоритмов регулирования толщины и профиля зазора валков реверсивной клетки толстолистого прокатного стана [Текст] / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, С.С. Воронин, Б.М. Логинов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – № 4. – С. 53-64. – 62 т.

77. Производство плоского проката: мировые тенденции и стратегия развития [Электронный ресурс] // UGMK.INFO (Украина). – 21 сентября 2009. – Режим доступа: [https://advis.ru/php/print\\_news.php?id=4DD6A773-FBF8-A643-B5B5-F418ECFD01A0](https://advis.ru/php/print_news.php?id=4DD6A773-FBF8-A643-B5B5-F418ECFD01A0).
78. Ковалева, А.А. Специальные стали и сплавы [Текст]: учеб. пособие / А.А. Ковалева, В.С. Лопатина, В.И. Аникина, Т.Р. Гильманшина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – 232 с.
79. Диомидов, Б.Б. Технология прокатного производства [Текст] / Б.Б. Диомидов, Н.В. Литовченко. – М.: Metallurgia, 1979. – 485 с.
80. Авдеев, В.А. Основы проектирования металлургических заводов [Текст]: Справочник / В.А. Авдеев, В.М. Друян, Б.И. Кудрин. – М.: Интернет Инжиниринг, 2002. – 462 с.
81. Акулич, Н.В. Процессы производства черных и цветных металлов и их сплавов [Текст] / Н.В. Акулич. – Гомель, 2008. – 270 с.
82. Матросов, Ю.И. Сталь для магистральных трубопроводов [Текст] / Ю.И. Матросов, Д.А. Литвиненко, С.А. Голованенко. – М.: Metallurgia, 1989. – 288 с.
83. Настич, С.Ю. Освоение производства на стане 5000 ОАО «ММК» толстолистового проката из низколегированных сталей с повышенными характеристиками прочности и хладостойкости [Текст] / С.Ю. Настич, Ю.Д. Морозов, М.Ю. Матросов // Metallurg. – 2011. – №11. – С. 57-63.
84. Матросов, Ю.И. Разработка и технологический процесс производства трубных сталей в XXI веке [Текст] / Ю.И. Матросов, Ю.Д. Морозов, А.С. Болотов и др. // Сталь. – 2001. – №4. – С. 58-62.
85. Матросов, М.Ю. Использование ускоренного охлаждения для повышения механических и технологических свойств толстолистового проката для изготовления газопроводных труб большого диаметра [Текст] / М.Ю. Матросов, Л.И. Эфрон, В.И. Ильинский // Metallurg. – 2005. – № 6. – С. 49-54.
86. Колбасников, Н.Г. Анализ режимов прокатки толстого листа из высокопрочной трубной стали на стане 2000 [Текст] / Н.Г. Колбасников, Ю.А. Безобразов, А.А. Огольцов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – №4. – С. 210-217.
87. Шмидт, Д. Технологии охлаждения для высокопрочных листов [Текст] / Д. Шмидт, Р. Демель, Г. Хорн // Черные металлы. – 2009. – № 1. – С. 27-31.

88. Karandaev, A.S. Force limiting at roll axial shifting of plate mill [Текст] / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1780-1786. DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.713 (англ).
89. Karandaev, A.S. Setting Automated Roll Axial Shifting Control System of Plate Mill [Текст] / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1753-1750. DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.709 (англ).
90. Gasyarov, V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand [Текст] / 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)*. – Sydney, Australia. – 2017. – P. 269-273. DOI 10.1145/3057039.3057105 (англ).
91. Шубин, А.Г. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана [Текст] / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2018. – № 1(38). – С. 14-25. DOI 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25.
92. Шияев, П.В. Автоматизация процесса прокатки толстого листа на стане 5000 [Текст] / П.В. Шияев, Д.Ю. Усатый, А.А. Радионов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 15-18.
93. Гасияров, В.Р. Мехатронный технологический комплекс толстолиствого стана 5000 горячей прокатки [Текст] / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2013. – № 21. – С. 13-20.
94. Бровман, М.Я. Усовершенствование технологии прокатки толстых листов [Текст] / М.Я. Бровман, Б.Ю. Зеличенко, А.И. Герцев. – М.: *Металлургия*, 1969. – 256 с.
95. Тосаки, С. Прогресс в области регулирования формы в плане при прокатке толстых листов [Текст] / С. Тосаки (пер. с япон.) // *Нихон киндзоку гаккай кайхо*. – 1980. – № 2. – С. 79-84.
96. Hashimoto, T. Прокатка листа с формированием промежуточного профиля «собачья кость» [Текст] // *Adv. Mater. and Process*. – 1989. – № 2. – 386 с.
97. Kazuya, T. Development of the new plan view pattern control system in plate rolling [Текст] / T. Kazuya, K. Hiroyuki, B. Kazushi, I. Shigeru // *Int. Conf. Steel Roll*. – 1980. – P. 193-204 (англ).

98. Гасияров, В.Р. Согласование скоростей электроприводов и гидравлических нажимных устройств при автоматическом контроле профиля раската [Текст] // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 4(41). – С. 22-29. DOI 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-22-29.
99. Karandaev, A.S. Automatic Gauge Control System with Combined Control of the Screw-Down Arrangement Position [Текст] / A.S. Karandaev, A.A. Radionov, V.R. Khramshin, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). – Novosibirsk. – 2014. – Vol. 1. – P. 88-94. DOI 10.1109/APEIE.2014.7040794.
100. Karandaev, A.S. Improvement of Algorithms for Automatic Gauge Control System of the Hot-Rolling Mill [Текст] / A.S. Karandaev, V.R. Khramshin, I.Y. Andryushin, A.G. Shubin, B.M. Loginov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756. – P. 592-597. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.592.
101. Восканьянц, А.А. Автоматизированное управление процессами прокатки [Текст]: Учеб. пособие / А.А. Восканьянц. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 85 с.
102. Shubin, A.G. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand [Текст] / A.G. Shubin, B.M. Loginov, V.R. Khramshin, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2015. – P. 6. DOI 10.1109/MEACS.2015.7414858.
103. Руденко, Е.А. Исследование влияния локальных обжатий на горизонтальном прессе угловых участков торцов слябов на форму слябов в плане [Электронный ресурс] / Е.А. Руденко, А.З. Юрейко // Металлургия и обработка металлов. – Донецк. – 2007. – Режим доступа: <http://www.masters.donntu.org/2010/fmf/borzenkov/library/tez5.htm>.
104. Ткаченко, О.Ф. Расчёт параметров формы раскатов в плане по проходам на стадиях черновой прокатки толстых листов [Электронный ресурс] / О.Ф. Ткаченко, Е.А. Руденко // Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2016/fmf/tkachenko/library/article1.htm>.
105. Шабалов, И.П. Исследование формообразования раскатов на толстолистовом стане 2800 [Текст] / И.П. Шабалов // Производство проката. – 2004. – №8. – С. 2-8.

106. Khramshin, V.R Control methods and systems providing reduced consumption index at rolled product manufacture at plate mill [Текст] / V.R. Khramshin, E.A. Khramshina, A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov, S.S. Voronin // Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus). – 2017. – P. 1540–1544. DOI 10.1109/EIConRus.2017.7910865 (англ).
107. Fascinating heavy plate [Электронный ресурс] // SMS-group. – Режим доступа: <https://www.sms-group.com/sms-group/downloads/download-detail/17549> (англ).
108. Nomiyaama, Y. Latest Plate Production Technology of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation [Текст] / Y. Nomiyaama, T. Yazawa, H. Yasui // Nippon Steel & Sumitomo metal technical report. – September 2015. – № 110. – P. 8-16 (англ).
109. Development of new plane view control technique in plate rolling (NCC-DBR) [Текст] // Nippon Kokan Technical Report. – 1983. – № 39. – P. 21-30 (англ).
110. Oswald, W. Heary plates with special process design to meet extreme customer requirements [Текст] / W. Oswald, A. Streisselberger, R. Thul, M.J. Nehrenberg, J. Kirsch // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuons Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf. – Dusseldorf, June 20-22, 1994. – Proc. Vol. 2. – P. 42-51 (англ).
111. Aqrusti, K. New developments in improwing shape control, field and flexibility of heavy plate mills [Текст] / K. Aqrusti, A. De Vito, A.G. Liquory, M. Paolicchi // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuons Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf. – Dusseldorf, June 20-22, 1994. – Proc. Vol. 2. – P. 86-92 (англ).
112. Варшавский, Е.А. Система автоматического управления изгибом переднего конца раската в черновой клети с индивидуальным приводом валков [Текст] / Е.А. Варшавский, М.А. Храпов, В.М. Басуров // Труды XI Конгресса прокатчиков. – Магнитогорск. – 2017. – С. 57-62.
113. Kampmeijer, L. Strip tracking measurement and control in hot strip rolling [Текст] / L. Kampmeijer, C. Hol, J. de Roo, E. Spelbos // La Metallurgia Italiana. – № 3/2014. – P. 29-34 (англ).
114. Chikishev, D.N. Analysis of the causes of vertical bending of the strip front end at hot rolling on the basis of mathematical modeling [Текст] / D.N. Chiki-

- shev, E.B. Pozhidaeva // *Izvestia VUZov. Chernaya Metallurgia = Izvestia Ferrous Metallurgy*. – 2016. – Vol. 59. № 1. – P. 204–208. DOI 10.17073/0368-0797-2016-1-204-208 (англ).
115. Kiefer, T. An analytical approach for modelling asymmetrical hot rolling of heavy plate [Текст] / T. Kiefer, A. Kugi // *Math. Comp. Model Dyn.* – 2008. – № 14. – P. 249-267 (англ).
116. Minton, J.J. Asymptotic analysis of asymmetric thin sheet rolling [Текст] / J.J. Minton, C.J. Cawthorn, E.J. Brambley // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2016. – № 113. – P. 36-48. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2016.03.024 (англ).
117. Philipp, M. Front end bending in plate rolling influenced by circumferential speed mismatch and geometry [Текст] / M. Philipp, W. Schwenzfeier, F.D. Fischer, R. Wodlinger, C. Fischer // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – № 184. – P. 224-232. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.027 (англ).
118. Максимов, В.М. Экспериментальное исследование изгиба переднего конца раската при толстолистовой прокатке [Текст] / В.М. Максимов, О.С. Хлыбов, Е.В. Горелов, С.А. Верещако, Н.М. Казакбаев // *Труды XI Конгресса прокатчиков*. – Магнитогорск. – 2017. – С. 362-370.
119. Грудев, А.П. Теория прокатки: учебник для вузов [Текст] / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.
120. Салганик, В.М. Разработка режимов асимметричной толстолистовой прокатки низколегированных сталей с целью минимизации дефекта подгибки концов листа [Текст] / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов, С.В. Денисов, П.А. Стеканов // *Металлург*. – 2013. – №11. – С. 75-77.
121. Чикишев, Д.Н. Анализ причин вертикального изгиба переднего конца полосы при горячей прокатке на основе математического моделирования [Текст] / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2016. – 59 т. – №1. – С. 204-208.
122. Авторское свидетельство № 402402 СССР, В21В 37/00. Устройство для автоматического регулирования лыжеобразования при прокатке с индивидуальным электроприводом валков [Текст] / С.В. Колесник, В.С. Емельянов, В.И. Егоров. – Оpubл. 19.10.1973.
123. Авторское свидетельство №528974 СССР, В21В 37/00. Способ лыжеобразования слитка на реверсивном стане горячей прокатки с индивидуальным приводом валков [Текст] / М.Ю. Файнберг. – Оpubл. 25.09.1976.

124. Авторское свидетельство №766688 СССР, В21В 37/00. Способ лыжеобразования слитка на реверсивном стане горячей прокатки с индивидуальным приводом валков [Текст] / М.Ю. Файнберг. – Оpubл. 30.09.1980.
125. Авторское свидетельство №1741945 СССР, В21В 1/22. Способ лыжеобразования слитка на реверсивном стане горячей прокатки с индивидуальным приводом валков [Текст] / Р.Г. Мугалимов, Г.Н. Харченко. – Оpubл. 23.06.1992.
126. Авторское свидетельство №1212636 СССР, В21В 1/22. Способ асимметричной прокатки полос [Текст] / А.И. Трайно, А.Ф. Пименов, А.А. Кугушин и др. – Оpubл. 23.02.1986.
127. Патент №2661523 Российская Федерация, В21В 1/22. Способ асимметричной прокатки передних концов толстых полос в клетки с индивидуальным приводом валков [Текст] / Е.А. Варшавский, В.М. Басуров, М.А. Храпов. – Оpubл. 17.07.2018, Бюл. №20.
128. Патент №2486974 Российская Федерация, В21В 1/22. Способ ассиметричной прокатки передних концов толстых листов на реверсивных станах [Текст] / В.М. Салганик, С.В. Денисов, А.М. Песин [и др.]. – Оpubл. 10.07.2013, Бюл. №19.
129. Патент №2254943 Российская Федерация, В 21В 1/22. Устройство для асимметричной прокатки толстолистового металла [Текст] / А.М. Песин, В.М. Салганик, Э.М. Дригун, Д.Н. Чикишев. – Оpubл. 27.06.2005, Бюл. № 18.
130. Harrer, O. Numerical simulation of asymmetric effects in plate rolling [Текст] / O. Harrer, M. Philipp, I. Pokorný // Acta Metallurgica Slovaca. – January, 2003. – 9 (4). – P. 306-313 (англ).
131. Kyunghun, L. Prediction and control of front-end curvature in hot finish rolling process [Текст] / L. Kyunghun, H. Jinqyu, P. Joonhong, K. Byungmin, K. Daechchol // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 7(11). – P. 1-10. DOI 10.1177/1687814015615043 (англ).
132. Kawalek, A. Asymmetric rolling of trick sheets [Текст] / A. Kawalek // Metallurgy – Metallurgical Engineering News. – 6 (2006). – P. 266-270 (польск).
133. Anup, A.K. Finite element modeling of strip curvature during hot rolling [Текст] / A. Kuldivar Anup // 9th International LS-DYNA Users Conference in Metal Forming. – P. 17-31 (англ).

134. Метельков, В.П. Оценка ресурса изоляции обмотки статора асинхронного двигателя при работе в циклических режимах [Текст] / В.П. Метельков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2013. – 13 т. – № 2. – С. 96-100.
135. Zyuzev, A.M. Toward the Evaluation of the Thermal State of an Induction Motor in the Recursive Short\_Term Mode [Текст] / A.M. Zyuzev, V.P. Metelkov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85, № 9. – P. 554-558 (англ).
136. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст] / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 202 с.
137. Андриенко, В.М. Определение энергетических показателей асинхронных двигателей при питании от статических преобразователей частоты [Текст] / В.М. Андриенко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 3. – С. 5-7.
138. Camber and position measurement at the hot strip [Электронный ресурс] // EMG hotCAM. – 2015. – Режим доступа: [https://www.emg-automation.com/fileadmin/content/automation/qualitaetsichernde\\_systeme/dokumente/hotCAM\\_Brochure\\_EN\\_Rev02\\_04-2015.pdf](https://www.emg-automation.com/fileadmin/content/automation/qualitaetsichernde_systeme/dokumente/hotCAM_Brochure_EN_Rev02_04-2015.pdf) (англ).
139. Патент №2122474 Российская Федерация, МПК В21В 38/00. Способ контроля перекося валков клетки прокатного стана в горизонтальной плоскости [Текст] / Е.А. Варшавский, М.А. Бобров, В.А. Третьяков, А.Д. Тищенко, Н.Н. Стрельников. – Опубл. 27.11.1998.
140. Hardy, S.J. Three-dimensional hot rolling model for prediction of camber generation [Текст] / S.J. Hardy, D.L. Biggs, K.J. Brown // Ironmaking & Steelmaking. – 2002. – 29(4). – P. 245-252 (англ).
141. Wang, H. Study and application of the slab camber control model in rough rolling [Текст] / H. Wang, Q. Yang, X. Wang // Chinese Journal of Engineering. – February 2017. – Vol. 39, № 2. – P. 294-300. DOI10.13374/j.issn2095-9389.2017.02.018 (англ).
142. Dong, X. Research and application on slab camber control model in hot rolling [Текст] / X. Dong, L. Yang, W. Xiaochen, Y. Quan, D. Zhengyang, W. Xiaodong // Ironmaking & Steelmaking. – 2019. DOI 10.1080/03019233.2019.1609736 (англ).

143. Стоякин, А.О. Исследование формирования клиновидности и серповидности горячекатаных стальных полос для повышения устойчивости процесса прокатки [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Стоякин Александр Олегович. – Липецк: ФГБОУ ВО «ЛГТУ», 2018. – 141 с.
144. Патент №2615670 Российская Федерация, МПК В21В 37/40. Способ горячей прокатки полос [Текст] / Ю.А. Мухин, С.М. Бельский, К.В. Бахаев, А.О. Стоякин, В.В. Саурин. – Оpubл. 06.04.2017, Бюл. № 10.
145. United States Patent US 4570472, В21В 39/16; В21В 37/00. Method and apparatus for controlling lateral unstable movement and camber of strip being rolled [Текст] / Н. Kuwano (Japan). – Оpubл. 18.02.1986 (англ).
146. Jose Hol, C.W. Predictive Controller for Strip-Tracking during Tail-Out of the Finishing Mill [Текст] / C.W. Jose Hol, J.D. Roo, L. Kampmeijer, T. Dirkson, G. Schipper, M. La Maire, J. van der Lugt // 16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. –August 25-28, 2013. –San Diego, California, USA. – P. 397-402. DOI 10.3182/20130825-4-US-2038.00082 (англ).
147. Okada, M. VSS control of strip steering for hot rolling mills [Текст] / M. Okada, K. Murayama, Y. Anabuki, Y. Hayashi // 16th Triennial World Congress, Prague, Czech Republic. – Vol. 38, iss. 1. – 2005. – P. 19-24. DOI 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01682 (англ).
148. Schausberger, F. Feedback control of the contour shape in heavyplate hot rolling [Текст] / F. Schausberger, A. Steinboeck, A. Kugi // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – Vol. 26, iss. 3. – 2018. – P. 842-856. DOI 10.1109/TCST.2017.2695168 (англ).
149. Патент №2449846 Российская Федерация, МПК В21В 37/68. Способ прокатки металлической полосы с регулированием ее бокового положения и соответствующий прокатный стан [Текст] / М. Кристьян, Б. Реми, Ч. Патрик, Н. Нильс, Д. Ямал, И. Клод, К. Уве. – Оpubл. 20.07.2011, Бюл. № 20.
150. Kurz, M. Wedge and Camber Control [Электронный ресурс] / M. Kurz, R. Döll, A. Kainz, T. Pumhössel, K. Zeman // Conference: METEC and 2nd ESTAD 2015, At Düsseldorf, Germany. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/281968487\\_Wedge\\_and\\_Camber\\_Control](https://www.researchgate.net/publication/281968487_Wedge_and_Camber_Control) (англ).
151. Производительные станы горячей прокатки. Электрооборудование и автоматизация [Электронный ресурс] // SMS-group. – Режим доступа:

<https://docplayer.ru/48899237-Proizvoditelnye-stany-goryachey-prokatki-elektrooborudovanie-i-avtomatizaciya.html>.

152. Гасияров, В.Р. Разработка цифрового наблюдателя углового зазора в шпиндельных соединениях главной линии прокатной клетки / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, О.А. Гасиярова, Б.М. Логинов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 137–147. DOI:10.14529/power200314
153. Крот, П.В. Телеметрические системы мониторинга динамических нагрузок в линиях привода прокатных станов [Текст] / П.В. Крот // «Вибрация машин: измерение, снижение, защита». Научно-технический и производственный сборник статей. – Вып. 1. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – С. 46-53.
154. Гостев, А.Н. Ограничение динамических нагрузок электроприводов универсальных клеток непрерывной подгруппы широкополосного стана горячей прокатки [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Гостев Анатолий Николаевич. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015. – 158 с.
155. Радионов, А.А. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 2. Исследование динамических нагрузок в универсальных клетях [Текст] / 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.– № 2. – С. 67-76. – 15 т.
156. Храмшин, В.Р. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана [Текст] / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №1. – С. 12-21.
157. Храмшин, В.Р. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клеток стана горячей прокатки [Текст] / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, И.Ю. Андрюшин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №2. – С. 69-77.
158. Карандаев, А.С. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клеток черновой группы прокатного стана [Текст] / 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.
159. Gasiyarov, V.R. Automatic control system of speed of synchronous motor [Текст] / V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, S.S. Voronin, E.A. Maklakova // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 57-62. DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.008 (англ).
160. Radionov, A.A. Improving reliability of hot plate mill electromechanical system [Текст] / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, E.A. Maklakova // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – P. 417-421 (англ).
161. Слежановский, О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями [Текст] / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
162. Radionov, A.A. Research of electric drive at load impact on hot plate mill 5000 [Текст] / A.A. Radionov, A.S. Maklakov, V.R. Gasiyarov, E.A. Maklakova // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2015. – 4 p. DOI 10.1109/MEACS.2015.7414864 (англ).
163. Маклаков, А.С. Математическое моделирование синхронного электропривода реверсивной прокатной клетки [Текст] / А.С. Маклаков, Е.А. Маклакова, В.Р. Гасияров // В сборнике: Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока (ЭППТ)». УрФУ. – 2015. – С. 131-136.
164. Шрейнер, Р.Т. Двухзонная система регулирования скорости явнополусного синхронного электропривода [Электронный ресурс] / Р.Т. Шрейнер, В.Н. Поляков, А.В. Медведев. – Режим доступа: <http://izron.ru/articles/sovremennyy-vzglyad-na-problemy-tekhnicheskikh-nauk-sbornik-nauchnykh-trudov-po-itogam-mezhdunarodno-sektsiya-15-elektrotehnika-spetsialnost-05-09-00/dvukhzonnaya-sistema-regulirovaniya-skorosti-yavnopolyusnogo-sinkhronnogo-elektroprivoda/>.
165. Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод [Текст] / А.М. Вейнгер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
166. Шрейнер, Р.Т. Энергетическая эффективность регулируемого синхронного электропривода при переменном потоке [Текст] / Р.Т. Шрейнер,

- В.Н. Поляков, А.В. Медведев // Труды Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 263-268. – 1 т.
167. Гасияров, В.Р. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник [Текст] / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1(34). – С. 4-9.
168. Radionov, A.A. Reactive power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC VTB converters [Текст] / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2017. – Vol. 8, № 4 – P. 1455-1466 (англ).
169. Басков, С.Н. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолиствого прокатного стана [Текст] / С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – № 6. – С. 55-64. – 60 т.
170. Храмшин, В.Р. Способ снижения динамических нагрузок электроприводов клетки толстолиствого прокатного стана [Текст] / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Логинов Б.М. // В сборнике: Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП). – 2018. – С. 157-164.
171. Гасияров, В.Р. Математическое описание главного электропривода толстолиствого стана 5000 горячей прокатки [Текст] / В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // Russian Internet Journal of Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 2, № 3. – С. 62-66.
172. Логинов, Б.М. Ограничение динамических нагрузок электроприводов горизонтальной клетки толстолиствого прокатного стана [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Логинов Борис Михайлович. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», 2019. – 164 с.
173. Maklakova, E.A. Simulation modeling of the rolling mill stand 5000 OJSC ММК [Текст] / E.A. Maklakova, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, S.S. Voronin // Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIЕAM). – 2016. DOI 10.1109/ICI-EAM.2016.7911498 (англ).

174. Радионов, А.А. Автоматизированный электропривод для производства стальной проволоки [Текст] / А.А. Радионов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2007. – 311 с.
175. Радионов, А.А. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Ч.1. Разработка математической модели [Текст] / 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. – № 1. – С. 59-73. – 15 т.
176. Павлов, И.М. Теория прокатки [Текст] / И.М. Павлов. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 610 с.
177. Андрияшин, И.Ю. Разработка математической модели взаимосвязанных электромеханических систем черновой группы прокатного стана [Текст] / И.Ю. Андрияшин, А.Г. Шубин, А.Н. Гостев // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – №3. – С. 24-31.
178. Храмшин, В.Р. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 3. Исследование способа согласования линейных скоростей вертикальных и горизонтальных валков [Текст] / В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.Г. Шубин, Б.М. Логинов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – № 1. – С. 47-55. – 16 т.
179. Бодров, Е.Э. Многосвязная система управления электроприводами непрерывного прокатного стана [Текст]: монография / Е.Э. Бодров, В.Р. Гасияров, О.И. Петухова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – 158 с.
180. Карандаев, А.С. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки [Текст] / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.Ю. Андрияшин, В.В. Головин, П.В. Шильяев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 12-20.
181. Храмшин, В.Р. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана [Текст] / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №1. – С. 62-69.

182. Khramshin, V.R. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill [Текст] / V.R. Khramshin, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin, A.N. Gostev // Metallurgist. – July 2015. – Vol. 59, №3-4. – P. 315-323. DOI 10.1007/s11015-015-0103-8 (англ).
183. Зобнин, А.Д. Технологические основы проектирования прокатных комплексов. Основы теории продольной практики [Текст]: Учеб. пособие / А.Д. Зобнин, В.П. Полухин, Н.А. Чиченев. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2008. – 135 с.
184. Башарин, А.В. Управление электроприводами [Текст]: Учеб. пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
185. Andryushin, I.Yu. Automatic tension control in the continuous roughing train of a wide-strip hot-rolling mill [Текст] / I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin, A.N. Gostev, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin // Metallurgist. – 2017. – Vol. 61, iss. 5-6. – P. 366-374. DOI 10.1007/s11015-017-0502-0 (англ).
186. Огинский, И.К. Модель деформационно-кинематических состояний в очаге деформации при прокатке [Текст] / И.К. Огинский // Обработка металлов давлением. – 2010. – № 4. – С. 26-30.
187. Зильберг, Ю.В. Закон и модели пластического трения [Текст] / Ю.В. Зильберг // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 22-24.
188. Огинский, И.К. Смещенный объем при прокатке [Текст] / И.К. Огинский // Металл и литье Украины. – 2010. – № 11. С. 27–31.
189. Долженков, Ф.Е. Нерешенные вопросы современной теории прокатки [Текст] / Ф.Е. Долженков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 9. – С. 52-56.
190. Долженков, Ф.Е. Уширение, опережения и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки) [Текст] // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2003. – № 6. – С. 41-44.
191. Огинский, И.К. Спорные положения и противоречия современной теории прокатки [Электронный ресурс] / И.К. Огинский // Metal-forming.org. – Режим доступа: <http://metal-forming.org/index.php/zasedaniya/item/%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F>

-%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%87%D0%B8%D1%8F-%D1%81%D0%BE%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B9-%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%BA%D0%B8-3.

192. Вольфович, Г. В. Закон равенства секундных объемов при продольной периодической прокатке [Текст] / Г.В. Вольфович, В.В. Вольфович // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Днепропетровский металлургический институт: Металлургия, 1976. – № 59. – С. 33-37.
193. Сидельников, С.Б. Технология прокатки [Текст]: учебник / С.Б. Сидельников, И.Л. Константинов, Д.С. Ворошилов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – 180 с.
194. Кохан, Л.С. Усовершенствованная методика расчета уширения прокатываемых металлических полос [Текст] / Л.С. Кохан, А.В. Алдунин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 10, ч. 2. – С. 178-184.
195. Роде, В. Новые концепции экономического и гибкого производства высококачественных горячих штрипсов [Текст] / В. Роде // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке: Сб. трудов междунар. конф. – М.: Металлургия. – 1994. – С. 268-273. – 3 т.
196. Шубин, А.Г. Совершенствование системы согласования скоростей электроприводов непрерывной черновой группы клетей широкополосного прокатного стана [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Шубин Андрей Григорьевич. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», 2018. – 168 с.
197. Васильев, Я.Д. Теоретическое исследование особенностей изменения опережения при прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения [Текст] / Я.Д. Васильев // Металл и литье Украины. – 2018. – №1-2. – С. 11-15.
198. Долженков, Ф.Е. О некоторых противоречиях современной теории прокатки [Текст] / Ф.Е. Долженков // Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ: Системні технології. – 2002. – С. 121-124. – 5 т.
199. Зильберг, Ю.В. О некоторых противоречиях и допущениях теории прокатки [Текст] / Ю.В. Зильберг // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 11. – С. 24-26.

200. Мазур, В.Л. Нерешенные задачи теории и технологии прокатки [Текст] / В.Л. Мазур // Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ: Системні технології. – 2002. – С. 33-36. – 5 т.
201. Gasiyarov, V.R. Correcting Electric Motor Drive Speed of Plate Mill Stand in Profiled Sheet Rolling [Текст] / V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, A.A. Radionov, V.R. Khramshin, A.S. Maklakov // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). – 18-21 Dec. 2018. DOI 10.1109/PEDES.2018.8707442 (англ).
202. Radionov, A.A. Improving the mechatronic system for automatic control of the reversing stands of mill 5000 [Текст] / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 635 (2019) 012019 IOP Publishing. – 8 с. DOI 10.1088/1757-899X/635/1/012019 (англ).
203. Храмшин, В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос [Текст]: дис. ... докт. техн. наук / Храмшин Вадим Рифхатович. – Магнитогорск: МГТУ, 2013. – 393 с.
204. Патент на изобретение №2687354 Российская Федерация, МПК В21В 37/52. Способ согласования скоростей вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки прокатного стана [Текст] / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, С.Н. Басков, С.С. Воронин. – Оpubл. 13.05.2019.
205. Гасияров, В.Р. Ограничение динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана за счет регулирования зазора валков [Текст] / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, С.С. Воронин, К.Э. Одинцов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2018. – № 2 (2018). – С. 82-95. – 18 т. DOI 10.14529/power180210.
206. Gasiyarov, V.R. Mathematical modeling of an automatic control system for profiled rolling of slabs in reversing plate-mill stands [Текст] / V.R. Gasiyarov, S.N. Baskov, S.S. Voronin, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2019. – P. 505-510. DOI 10.1109/EIConRus.2019.8656797 (англ).
207. Целиков, А.И. Прокатные станы: учебник [Текст] / А.И. Целиков. – М.: Металлургиздат, 1946. – 560 с.

208. Гасияров, В.Р. Методика расчета момента прокатки на толстолистовом стане 5000 [Текст] / В.Р. Гасияров, Е.А. Пузанкова, А.А. Радионов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2009. – Вып. 16. – С. 100-109.
209. Королев, А.А. Новые исследования деформации металла при прокатке [Текст] / А.А. Королев. – М.: Манегиз, 1953. – 206 с.
210. Гасияров, В.Р. Экспериментальное определение положения равнодействующей давления металла на валки на толстолистовом стане 5000 [Текст] / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ. – 2010. – Вып. 18. – С. 3-6.
211. Гасияров, В.Р. Разработка уточненной методики расчета момента на валу двигателя клетки толстолистового стана горячей прокатки и проверка ее адекватности [Текст] / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 78-81.
212. Voronin, S.S. The determination of energy-power parameters of hot plate mill mechatronic system [Текст] / S.S. Voronin, E.A. Maklakova, A.S. Maklakov, V.R. Gasiyarov // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 51-56 (англ).
213. Gasiyarova, O.A. Experimental determination of resultant roll force at hot plate mill 5000 [Текст] / O.A. Gasiyarova, S.S. Voronin, E.A. Maklakova, V.R. Gasiyarov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1415-1418 (англ).
214. Куприн, В.И. Основы теории прокатки [Текст] / В.И. Куприн, М.С. Куприна. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
215. Weber, K.H. Die Ergebnisse des Warmtorsions-Versuchs als Richtschnur für die Schmiedetemperatur [Текст] / K.H. Weber, E. Pflaume // Neue Hütte. – 1965. – №10. – S. 295-302 (нем).
216. Целиков, А.И. Определение средних скоростей деформации при прокатке и волочении [Текст] / А.И. Целиков // Сб. статей «Прокатные станы и технологии прокатки», тр. МВТУ. – М.: Машгиз, 1955. – Кн. 62. – С. 7-13.
217. Гасияров, В.Р. Разработка системы автоматического регулирования толщины приводов клетки толстолистового стана горячей прокатки [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Гасияров Вадим Рашитович. – Магнитогорск: МГТУ, 2012. – 125 с.

218. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2011616618. Расчет энергосиловых параметров прокатки толстых полос и нагрузочных режимов электропривода клетки реверсивного толстолистого стана горячей прокатки [Текст] / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, О.С. Малахов, Д.Ю. Усатый. – Оpubл. 25.08.2011.
219. Галкин, В.В. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клетей прокатного стана при прокатке толстых полос [Текст] / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, О.А. Залогин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 3. – 2010. – Ч. 2. – С. 12-17.
220. Radionov, A.A. Methods of calculation of load modes of roughing stand electric drives of wide-strip hot rolling mill [Текст] / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.G. Shubin, R.R. Khramshin // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 13th International Scientific-Technical Conference on. 2016. – P. 160-164. DOI 10.1109/APEIE.2016.7807045 (англ).
221. Салганик, В.М. Разработка режимов асимметричной толстолистной прокатки низколегированных сталей с целью минимизации дефекта подгибки концов листа [Текст] / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов, С.В. Денисов, П.А. Стеканов // Металлург. – 2013. – №11. – С. 75-77.
222. Гасияров, В.Р. Способ повышения быстродействия системы управления электроприводами горизонтальной клетки прокатного стана в режиме лыжеобразования [Текст] / В.Р. Гасияров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – № 3. – С. 33-43. – 62 т.
223. Стеканов, П.А. Ассиметричная прокатка как способ коррекции формы раската при несоответствии линии прокатки и уровня рольганга на толстолистом стане 5000 [Текст] / П.А. Стеканов // Производство проката. – 2013. – №8. – С. 5-9.
224. Песин, А.М. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистной прокатки как метода интенсивной пластической деформации: монография [Текст] / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.К. Свердлик. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – 150 с.
225. Radionov, A.A. Controlling the Electric Drives of the Reversing Rolling Stand Rolls of a Rolling Mill to Form a Curvature at the Workpiece Front End

- [Текст] / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // IEEE 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). – 2019. – 7 p. – DOI 10.1109/PEDS44367.2019.8998801 (англ).
226. Гасияров, В.Р. Способ согласования нагрузок электроприводов горизонтальных валков клетки толстолистового прокатного стана [Текст] / В.Р. Гасияров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – Серия: Энергетика. – 2019. – № 2. – С. 107-117. – 19 т.
227. Gasiyarov, V.R. Method of limiting the dynamic loads on hot plate mill's mechatronics system [Текст] / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). – 2019. – P. 43-47 (англ).
228. Пустовойтов, Д.О. Моделирование сдвиговых деформации в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки [Текст] / Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, А.А. Перехожих, М.К. Свердлик // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – №1. – С. 65-68.
229. Чикишев, Д.Н. Математическое моделирование изменения прочностных характеристик микролегированных сталей в процессе термомодеформационной обработки [Текст] / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – № 4. – С. 664-668. – 16 т.
230. Anders, D. A dimensional analysis of front-end bending in plate rolling applications [Текст] / D. Anders, T. Münker, J. Artel, K. Weinberg // Journal of Materials Processing Technology. – June 2012. – Volume 212, iss. 6. – P. 1387-1398. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.005 (англ).
231. Richelsen, A.B. Numerical analysis of asymmetric rolling accounting for differences in friction [Текст] / A.B. Richelsen // Journal of Material Processing Technology. – 1994. – Vol.45. – P. 149-154 (англ).
232. Песин, А.М. Моделирование подгиба переднего конца раската при толстолистовой прокатке [Текст] / А.М. Песин, А.А. Перехожих, Д.О. Пустовойтов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – Магнитогорск: МГТУ, 2012. – С. 217–219.
233. Пименов, А.Ф. Асимметричные процессы прокатки – анализ, способы и перспективы применения [Текст] / А.Ф. Пименов, В.Н. Скороходов, А.И. Трайно и др. // Сталь. – 1982. – №3. – С. 53-56.

234. Горелик, В.С. Улучшение служебных свойств толстых листов путем освоения асимметричной прокатки [Текст] / В.С. Горелик, Г.И. Налча, А.Е. Руднев и др. // Сталь. – 1991. – №11. – С.41-44.
235. Нестеренко, Д.Л. Исследование влияния разницы в скоростях вращения валков одной клетки на процесс прокатки [Текст] / Д.Л. Нестеренко, Д.В. Шевченко, А.И. Боровков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2011. – №1. – С. 72-80.
236. Салганик, В.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения [Текст] / В.М. Салганик, А.М. Песин. – М.: МИСИС, 1997. – 192 с.
237. Kiefer, T. Modeling and control of front end bending in heavy plate mills [Текст] / T. Kiefer, A. Kugi // IFAC Proceedings Volumes. – Volume 40, iss. 11. – 2007. – P. 231-236. DOI 10.3182/20070821-3-CA-2919.00034 (англ).
238. Park, B.H. Analysis of front end bending in plate rolling by the finite element method [Текст] / B.H. Park, S.M. Hwang // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1997. – P. 314-323 (англ).
239. Pawelski, H. Comparison of methods for calculating the influence of asymmetry in strip and plate rolling [Текст] / H. Pawelski // Steel Res. – 2000. – № 71(12). – P. 490-496 (англ).
240. Авторское свидетельство №1759491 СССР, МПК В21В 37/00. Способ лыжеобразования слитка на реверсивном стане горячей прокатки с индивидуальным приводом валков и устройство для его осуществления [Текст] / В.Я. Шевчук, В.А. Беличенко, Н.Г. Орехов, Ю.И. Сиволов. – Оpubл. 07.09.1992, Бюл. №33.
241. Гасияров, В.Р. Повышение точности регулирования толщины раската в режиме профилированной прокатки средствами электро- и гидропривода [Текст] / 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.
242. Шохин, В.В. Исследование электромеханической системы прокатной клетки [Текст] / В.В. Шохин, О.В. Пермякова, Е.С. Кисель // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – №23. – С. 40-43.

243. Reifental, U. Beseitigung der Ebenheitsabweichungen im Walzgut bei Umkerwalymaschinen in Twindrive-Ausführung durch eine Winkelgleichlaufregelung der Antiebsstränge / U. Reifental, H.H. Nguzen, A. Bannack. – Magdeburg, 1996. – 44 с. (нем).
244. Jose Hol, C.W. Predictive Controller for Strip-Tracking during Tail-Out of the Finishing Mill [Текст] / C.W. Jose Hol, J. de Roo, L. Kampmeijer, T. Dirkson, G. Schipper, M. La Maire, J. van der Lugt // 16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, San Diego, California, USA. – August 25-28, 2013. – P. 397-402 (англ).
245. Гасияров, В.Р. Предиктивное регулирование асимметрии зазора валков реверсивной клетки толстолиствого прокатного стана [Текст] / В.Р. Гасияров, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, Б.М. Логинов, М.А. Зинченко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2020. – № 1. – С. 19-30. – 63 т.
246. Gasiyarov, V.R. Coordinating the Modes of the Axial Roll Shifting and Roll Bending Systems of a Roll Mill Stand [Текст] / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khramshin, A.S. Maklakov // IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2019. – Vol. 1. – P. 330-335. DOI 10.1109/IECON.2019.8927789 (англ).
247. Maklakova, E.A. The work roll bending control system of the hot plate rolling mill [Текст] / E.A. Maklakova, A.S. Maklakov, V.R. Gasiyarov, S.S. Voronin // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 37–41. DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.005 (англ).
248. Gasiyarov, V.R. Improving the Algorithm of Automated Gage Control during Shaped Feed Rolling on a Plate Mill [Текст] / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin, B.M. Loginov // IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), Cape town, South Africa. – 2020. – P. 135-141. DOI 10.1109/ICMIMT49010.2020.9041207 (англ).
249. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015618815В. Расчет параметров жесткости клетки «КВАРТО» для толстолистных станов горячей прокатки / С.С. Воронин, В.Р. Гасияров. – Оpubл. 19.08.2015.

250. Лазарева, Т.Я. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие [Текст] / Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 352 с.
251. 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 (англ).
252. Гельднер, К. Кибернетика и ее будущее [Текст] / К. Гельднер; пер. с нем. под ред. В.И. Мудрова. – М.: Радио и связь, 1983. – 96 с.
253. 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.urait.ru/bcode/383539>
254. Передаточная функция регулятора положения с FFW [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bsystem.ru/Portals/0/store/docs/f1055642-9184-4742-b677-e55c51ca15ce.pdf>
255. Терехов, В.М. Непрерывные и цифровые системы управления скоростью и положением электроприводов [Текст] / В.М. Терехов. – М.: Изд-во МЭИ, 1996. – 100 с.
256. Карандаев, А.С. Следящая система автоматического регулирования толщины полосы стана горячей прокатки [Текст] / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, С.А. Петряков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. – № 3. – С. 25-29.
257. Radionov, A.A. Designing automated control system for profiled slab rolling on plate mill [Текст] / A.A. Radionov, S.N. Baskov, V.R. Gasiyarov, O.I. Karandayeva, R.R. Khramshin // Proceedings of International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi. – 2018. – P. 1-5. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501803 (англ).
258. Фатеев, А.В. Расчет автоматических систем [Текст] / А.В. Фатеев, А.А. Вавилов, Л.П. Смольников и др. – М.: Высш. школа, 1973. – 336 с.
259. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Изд-во «Наука», 1975. – 768 с.
260. Меерович, И.М. Повышение точности листового проката [Текст] / И.М. Меерович, А.И. Герцев, В.С. Горелик, Э.Я. Классен. – М.: Металлургия, 1969. – 262 с.

261. Гасияров, В.Р. Разработка регулятора толщины мехатронной системы управления формой раската в плане при профилированной прокатке на толстолистовом стане [Текст] / В.Р. Гасияров // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 3. – С. 10–15. – 2 т.
262. Gasiyarov, V.R. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use [Текст] / V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin, S.S. Voronin, T.A. Lisovskaya, O.A. Gasiyarova // *Machines*. – 2019. – № 7(4), 76. DOI 10.3390/machines7040076 (англ).
263. Евдокимов, С.А. Контроль упругого момента в валопроводах клетки толстолистого прокатного стана [Текст] / С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов // *Проблемы автоматизации и управления*. – 2018. – №2 (35). – С. 157-165.
264. Radionov, A.A. Implementation of telemetric on-line monitoring system of elastic torque of rolling mill line of shafting [Текст] / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, M.M. Tverskoi, V.R. Khramshin, B.M. Loginov // *2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon)*. – 2017. – P. 450-455. DOI 10.1109/URALCON.2017.8120750 (англ).
265. Мещеряков, В.Н. Разработка способа снижения динамических нагрузок электропривода прокатной клетки стана холодной прокатки [Текст] / В.Н. Мещеряков, В.М. Толчеев // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2015. – №3. – С. 14-19.
266. Коренной, В.В. Инженерное решение уменьшения динамических нагрузок в главных линиях черновых клетей кварто [Текст] / В.В. Коренной, В.В. Веренев, А.М. Юнаков // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2012. – Вып. 26. – С. 181-186.
267. Патент № 727247 СССР, В21В 35/00. Тормозное устройство для выборки люфтов в линии привода прокатного стана [Текст] / В.Ф. Дудко, А.А. Кибирев. – Оpubл. 15.04.1980.
268. Патент № 745569 СССР, В 21 В 35/00. Способ выборки люфтов в приводе прокатной клетки кварто [Текст] / И.М. Меерович, Ю.В. Гесслер, М.Я. Ройзен и др. – Оpubл. 05.07.1980.
269. Патент №1148658 СССР, В21В 35/14. Способ горячей прокатки в нереверсивной универсальной клетки [Текст] / В.Н. Хлопонин, З.П. Каретный, С.Л. Коцарь и др. – Оpubл. 07.04.1985.

270. Хлопонин, В.Н. Снижение динамических нагрузок при захвате металла валками [Текст] / В.Н. Хлопонин, С.Л. Коцарь, В.А. Третьяков // Известия ВУЗов черной металлургии. – 1986. – №11. – С.153-154.
271. Патент №2148444 Российская Федерация, В21В 1/26. Способ горячей прокатки в нереверсивной универсальной клетки [Текст] / А.Д. Тищенко, В.Н. Евсюков, С.Ю. Бубнов и др. – Оpubл. 10.05.2000.
272. Коцарь, С.Л. Безударный захват полосы клетями чистовой группы стана [Текст] / С.Л. Коцарь, Б.А. Поляков, А.Н. Цупров и др. // Сталь. – 1980. – №3. – С. 213-215.
273. Авторское свидетельство № 718192 СССР, А21В 37/00. Способ управления скоростным режимом чистовой группы клетей непрерывного широкополосного стана [Текст] / С.Л. Коцарь, Б.А. Поляков, А.Н. Цупров и др. – Оpubл. 28.02.1980.
274. Авторское свидетельство № 771839 СССР, Н02Р 5/46. Способ выборки зазоров в кинематической цепи прокатной клетки [Текст] / П.С. Гринчук, Ю.Т. Калашников, В.И. Пономарев и др. – Оpubл. 15.10.1980.
275. Подобедов, Н.И. Условия эффективности использования ускорения привода прокатной клетки, как способа закрытия зазоров [Текст] / Н.И. Подобедов, А.М. Юнаков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. – Дніпропетровськ.: ІСМ НАН України, 2006. – Вип. 12. – С. 311-317.
276. Karandaev, A.S. Method limiting dynamic loads of electromechanical systems of plate mill stand [Текст] / A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov, E.A. Maklakova, B.M. Loginov, E.A. Khramshina // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia. – 2018. – P. 651-656. DOI 10.1109/EIConRus.2018.8317180 (англ).
277. Khramshin, V.R. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive [Текст] / 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 (англ).
278. Radionov, A.A. Dynamic Load Limitation in Electromechanical Systems of the Rolling Mill Stand during Biting [Текст] / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov,

- A.S. Karandaev, D.Yu. Usatyy, V.R. Khramshin // IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). – 2020. DOI 0.1109/ICMIMT49010.2020.9041192 (англ).
279. Гасияров, В.Р. Снижение динамического момента в главной линии прокатной клетки толстолистового стана [Текст] / 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.
280. Веренев, В.В. Мониторинг динамической нагруженности главных линий клетей широкополосного стана [Текст] / В.В. Веренев, Н.И. Подобедов, С.В. Белодеденко // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №7. – С. 110-113.
281. Гасияров, В.Р. Способ ограничения динамических нагрузок мехатронных систем клетки толстолистового прокатного стана [Текст] / В.Р. Гасияров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 5-18. – 19 т.
282. Radionov, A.A. Mathematical Modeling of Mechatronics System «Hydraulic Screwdown Mechanism – Electric Drive of Rolling Mill Stand» [Текст] / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, S.N. Baskov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Phuket, Thailand. – 27–29 January 2018. – Vol. 361. DOI 10.1088/1757-899X/361/1/012020 (англ).
283. Казанцев, В.П. Системы управления исполнительными механизмами [Электронный ресурс] / В.П. Казанцев. – Пермь: РИО ПГТУ. – 2010. – Режим доступа: [https://studopedia.ru/13\\_38492\\_ispolnitelnimi-mehanizmami.html](https://studopedia.ru/13_38492_ispolnitelnimi-mehanizmami.html).
284. Гасияров, В.Р. Способ компенсации динамических нагрузок электропривода прокатной клетки за счет опережающего увеличения скорости [Текст] / В.Р. Гасияров // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 3(44). – С. 39-46.
285. 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.

286. Hori, Yo. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system [Текст] / Yo. Hori, H. Sawada, Y. Chun // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 46, iss. 1. – Feb 1999. – P. 162-168. DOI 10.1109/41.744407 (англ).
287. Bouheraoua, M. Influence of Control Structures and Load Parameters on Performance of a Pseudo Direct Drive [Текст] / M. Bouheraoua, J. Wang, K. Atallah // Machines. – 2014. – № 2. – P. 158-175. DOI 10.3390/machines2030158 (англ).
288. Szabat, K. Adaptive Control of the Electrical Drives with the Elastic Coupling using Kalman Filter [Текст] / K. Szabat, T. Orłowska-Kowalska // Open access peer-reviewed chapter. – January, 1st 2009. DOI 10.5772/6507 (англ).
289. Orłowska-Kowalska, T. Implementation of a Sliding-Mode Controller With an Integral Function and Fuzzy Gain Value for the Electrical Drive With an Elastic Joint [Текст] / T. Orłowska-Kowalska, M. Kaminski, K. Szabat // Industrial Electronics IEEE Transactions on. – 2010. – Vol. 57, № 4. – P. 1309-1317. DOI 10.1109/TIE.2009.2030823 (англ).
290. Лебедев, С.К. Электромехатронные системы позиционирования с наблюдателями нагрузки [Текст]: монография. / С.К. Лебедев, А.Р. Колганов, Н.Е. Гнездов. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2016. – 340 с.
291. Лебедев, С.К. Выбор модели динамики для систем векторного управления электроприводами переменного тока [Текст] / С.К. Лебедев, А.Р. Колганов, Н.Е. Гнездов // Электроприводы переменного тока: Труды XVI междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – 2015. – С. 103-106.
292. Szabat, K. Performance Improvement of Industrial Drives With Mechanical Elasticity Using Nonlinear Adaptive Kalman Filter [Текст] / K. Szabat, T. Orłowska-Kowalska // Industrial Electronics IEEE Transactions on. – 2008. – Vol. 55, iss. 3. – P. 1075-1084. DOI 10.1109/TIE.2008.917081 (англ).
293. Cychowski, M. Constrained Model Predictive Control of the Drive System With Mechanical Elasticity [Текст] / M. Cychowski, K. Szabat, T. Orłowska-Kowalska // Industrial Electronics IEEE Transactions on. – 2009. – Vol. 56, iss. 6. – P. 1963-1973. DOI 10.1109/TIE.2009.2015753 (англ).

294. Orłowska-Kowalska, T. Adaptive Sliding-Mode Neuro-Fuzzy Control of the Two-Mass Induction Motor Drive Without Mechanical Sensors [Текст] / T. Orłowska-Kowalska, M. Dybkowski, K. Szabat // *Industrial Electronics IEEE Transactions on.* – 2010. – Vol. 57, iss. 2. – P. 553-564. DOI 10.1109/TIE.2009.2036023 (англ).
295. Thomsen, S. PI Control, PI-Based State Space Control and Model-Based Predictive Control for Drive Systems With Elastically Coupled Loads – A Comparative Study [Электронный ресурс] / S. Thomsen, N. Hoffmann, F. Wilhelm Fuchs // *Industrial Electronics IEEE Transactions on.* – 2011. – Vol. 58, iss. 8. – P. 3647-3657. DOI 10.1109/TIE.2010.2089950 (англ).
296. Radionov, A.A. Use of Automated Electric Drives for Limiting Dynamic Loads in Shaft Lines of Roll Mill Stands [Текст] / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin, A.S. Maklakov // *The Journal of Engineering. The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018).* – 2018. – 4 p. DOI 10.1049/joe.2018.8135 (англ).
297. Фомин, Г.Г. Механизация и автоматизация широкополосных станов горячей прокатки [Текст] / Г.Г. Фомин, А.В. Дубейковский, П.С. Гринчук. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
298. Кнеппе, Г. Технология горячей прокатки полосы: задачи на новое столетие [Текст] / Г. Кнеппе, Д. Розенталь // МРТ Металлургический завод и технология. – 1999. – С. 60-71.
299. Афанасьев, В.Д. Автоматизированный электропривод в прокатном производстве [Текст] / В.Д. Афанасьев. – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.
300. Путноки, А.Ю. Модель динамического взаимодействия смежных черновых клеток широкополосного стана при непрерывной прокатке [Текст] / А.Ю. Путноки, В.В. Веренев // *Металл и литье Украины.* – 2002. – № 12. – С. 26-30.
301. Юзов, О.В. Тенденция развития мирового рынка стали [Текст] / О.В. Юзов // *Сталь.* – 1998. – №12. – С. 55-64.
302. Ефименко, С.П. Некоторые проблемы прогнозирования развития металлургической технологии [Текст] / С.П. Ефименко, В.С. Юсупов // *Сталь.* – 1995. – №10. – С. 69-73.
303. Обеспечение высокого качества продукции и экономической эффективности производства на широкополосных станах горячей прокатки фирмы

- «Mannesmann Demag» [Текст] // Новости черной металлургии России и зарубежных стран. Ч. II: Новости черной металлургии за рубежом. – 1998. – №1. – С. 50-55.
304. Egawa N., Ishizuka H., Hirita T. Hot Rolling Technology for Producing High Quality Stainless steel at № 3 Hot Strip Mill in Chiba Works [Электронный ресурс] / N. Egawa, H. Ishizuka, T. Hirita // MPT International. – 1999. – № 23. – С. 82-87. – Режим доступа: [https://www.jfe-steel.co.jp/archives/en/ksc\\_giho/no.40/e40-016-022.pdf](https://www.jfe-steel.co.jp/archives/en/ksc_giho/no.40/e40-016-022.pdf) (англ).
305. Карандаев, А.С. Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана [Текст] / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрюшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ИГЭУ. – Иваново: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ». – 2013. – Вып. 1. – С. 98-103.
306. Гостев, А.Н. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки [Текст] / А.Н. Гостев, В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, И.Ю. Андрюшин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №2. – С. 69-77.
307. Прокатка полос на стане 2000 горячей прокатки ЛПЦ-10 ОАО «ММК» [Текст]: технологическая инструкция ТИ 101-ГЛ.10-374-90. – Магнитогорск, 1990. – 221 с.
308. Оборудование для производства горячекатаного листового проката (стан 2000) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studopedia.ru/15\\_108794\\_oborudovanie-dlya-proizvodstva-goryachekatanogo-listovogo-prokata-stand.html](https://studopedia.ru/15_108794_oborudovanie-dlya-proizvodstva-goryachekatanogo-listovogo-prokata-stand.html).
309. Khramshin, V.R. Ways to Compensate for Static Deviations in Speed in Electric Drives of Broad Strip Hot Rolling Mill Stands [Текст] / V.R. Khramshin // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, № 4. – P. 221-227. DOI 10.3103/S1068371213040032 (англ).
310. Khramshin, V.R. Improvements in the Security of the Inverting Mode Of a Thyristor-Controlled Electric Drive Used In Rolling Strips of Extended Range [Текст] / V.R. Khramshin // Russian Electrical Engineering. 2013. – Vol. 84, № 2. – P. 103–107. DOI 10.3103/S1068371213020065 (англ).
311. Karandaev, A.S. Improving electric power quality within the power supply system of wide-strip hot-rolling mill stand [Текст] / A.S. Karandaev,

- G.P. Kornilov, V.R. Khramshin, T.R. Khramshin // *Procedia Engineering*. – 2015. – № 129. – P. 2-8. DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.002 (англ).
312. Khramshin, V.R. Development and Industrial Introduction of Systems for Monitoring Technical State of The Rolling Mills' Electrical Equipment [Текст] / V.R. Khramshin, A.S. Evdokimov, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev // *Proceedings of the 2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*. – 2015. – P. 208-213. DOI 10.1109/EIconRusNW.2015.7102264 (англ).
313. Gasiyarov, V.R. Method of load calculation of electrical drives of rolling mills during heavy plate manufacturing [Текст] / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – 361. DOI 10.1088/1757-899X/361/1/012014 (англ).
314. Гасияров, В.Р. Нагрузочные режимы электроприводов клеток стана 2000 при прокатке трубной заготовки [Текст] / В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова, А.Г. Шубин // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2016. – № 2. – С. 32-39. – 3 т.
315. Andryushin, I.Yu. Automatic tension control in the continuous roughing train of a wide-strip hot-rolling mill [Текст] / I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin, A.N. Gostev, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin // *Metallurgist*. – 2017. – Vol. 61, iss. 5-6. – P. 366-374. DOI 10.1007/s11015-017-0502-0 (англ).
316. Khramshin, V.R. Algorithm of No-Pull Control in the Continuous Mill Train [Текст] / V.R. Khramshin, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin // *Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*. – Omsk: Omsk State Technical University. – May 21-23, 2015. DOI 10.1109/SIBCON.2015.7147263 (англ).
317. Карандаев, А.С. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клеток черновой группы стана горячей прокатки [Текст] / 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.
318. Khramshin, V.R. System for Speed Mode Control of the Electric Drives of the Continuous Train of the Hot-Rolling Mill [Текст] / V.R. Khramshin, A.S. Evdokimov, G.P. Kornilov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev // *Proceedings of the*

- 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON–2015). – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21-23, 2015. DOI 10.1109/SIBCON.2015.7147264 (англ).
319. Система автоматического управления нулевым натяжением непрерывной подгруппы клетей. АСУ ТП черновая группа стан 2000 горячей прокатки [Текст]: Инструкция №2. – Магнитогорск: ОАО «ММК ЛПЦ-10», 2002 – 12 с.
320. Андриюшин, И.Ю. Автоматическое регулирование нулевого натяжения в непрерывной группе черновых клетей широкополосового стана горячей прокатки [Текст] / И.Ю. Андриюшин, А.Г. Шубин, А.Н. Гостев, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, В.Р. Гасияров, В.Р. Храмшин // *Металлург.* – 2017. – № 5. – С. 28-36.
321. Шубин, А.Г. Исследование системы компенсации межклетевых усилий в черновой группе прокатного стана методом математического моделирования [Текст] / А.Г. Шубин, А.Н. Гостев, Р.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2015. – № 4. – С. 10-21.
322. Патент на изобретение № 2198753 Российская Федерация, МПК В21В37/52. Способ задания скоростного режима непрерывной группы прокатных клетей стана горячей прокатки металла с обеспечением минимального натяжения в межклетевых промежутках [Текст] / В.В. Бурьков, И.Б. Юнгер. – Оpubл. 20.02.2003, Бюл. № 3.
323. Voronin, S.S. Development of automatic control system of hot-strip mill process parameters [Текст] / S.S. Voronin, V.R. Gasiyarov, E.A. Maklakova, A.A. Radionov // *Вестник Южно-Уральского государственного университета.* Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2016. – № 1. – С. 121-136. – 16 т.
324. Каскадная система – регулирование [Электронный ресурс] // Большая энциклопедия нефти и газа. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id427845p1.html>.
325. Патент на изобретение № 259834 Российская Федерация, В21В 37/52. Способ управления непрерывным прокатным станом, устройство управления и/или регулирования для непрерывного прокатного стана, машиночитаемый программный код, носитель записи и непрерывный прокатный стан [Текст] / Х.-Й. Фелькль. – Оpubл. 20.09.16, Бюл. № 26.

326. Патент на изобретение № 2477661 Российская Федерация, МПК В21В 37/26. Способ регулирования толщины при выходе раската, который проходит через многоклетьевую линию прокатного стана, разомкнутое и/или замкнутое управляющее устройство и прокатный стан [Текст] / А. Грюсс, А. Зайлингер, Б. Линцер. – Оpubл. 20.03.13, Бюл. №8.
327. Патент РФ на изобретение 2446026, МПК7 В 21 В 37/48. Способ автоматического регулирования натяжения полосы в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки [Текст] / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, П.В. Шилаев, И.Ю. Андриюшин, В.В. Головин, П.Л. Пономарев // БИМП. – 2012. – №9. – С. 117.
328. Карандаев, А.С. Новые технические решения в электроприводах и системах регулирования технологических параметров станов горячей прокатки [Текст] / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андриюшин, В.В. Головин, П.В. Шилаев, 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.
329. Храмшин, В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клеток широкополосного стана горячей прокатки [Текст] / В.Р. Храмшин // Электротехника. – 2013. – №4 – С. 48-55.
330. Khramshin, V.R. Method of Reduction of an Edging and Horizontal Rolls Electromechanical Systems Interrelation in Universal Stand of a Rolling Mill [Текст] / V.R. Khramshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, A.G. Shubin // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1761-1767. DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.710 (англ).

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ  
РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ СТАНА 5000**

Таблица П.1.1

Характеристики вертикальной обжимной клетки

| Наименование технологического устройства | Наименование технической характеристики   | Значение           |
|--|---|--------------------|
| Вертикальная обжимная клетка             | 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              |

Таблица П.1.2

Технические параметры обмоток синхронного двигателя горизонтальных  
ВАЛКОВ

| Наименование  | Обозначение | Величина    |
|---|-------------|-------------|
| Сопротивление статора [при 20 °С]   | $R_s$ , Ом  | 0,00954     |
| Сопротивление ротора [при 20 °С]  | $R_r$ , Ом  | 0,185       |
| Синхронное реактивное сопротивление d-оси (ненасыщенной/насыщенной) машины            | $X_d$ , %   | 107/144     |
| Синхронное реактивное сопротивление в q-оси (ненасыщенной/насыщенной) машины          | $X_q$ , %   | 103,4/139,3 |
| Реактивное сопротивление перехода d-оси, (ненасыщенной/насыщенной) машины             | $X'_d$ , %  | 17,4/17,7   |
| Реактивное сопротивление переходного процесса d-оси, (ненасыщенной/насыщенной) машины | $X''_d$ , % | 12/13,5     |

|  |                 |         |
|--|-----------------|---------|
| Реактивное сопротивление переходного процесса q-оси, (ненасыщенной/насыщенной) машины  | $X''_q, \%$     | 11,5/12 |
| Реактивное сопротивление обратной последовательности, (ненасыщенной/насыщенной) машины | $X_2, \%$       | 10,8/11 |
| Реактивное сопротивление нулевой последовательности, (ненасыщенной/насыщенной) машины  | $X_0, \%$       | 3,5/3,6 |
| Соотношение короткого замыкания без нагрузки   | $K_c$           | 0,94    |
| Соотношение короткого замыкания с нагрузкой  | $I_{fN}/I_{fk}$ | 1,30    |

Таблица П.1.3

## Номинальные параметры преобразователя MV7308 SA AFE

| Тип                             | Увх.ном.,<br>В | Ином,<br>А | Рном,<br>МВт | Увых.<br>В | Охлаждение | Примечание                                 |
|---------------------------------|----------------|------------|--------------|------------|------------|--|
| Converteam<br>MV 7308<br>SA AFE | 3300           | 800        | 8,4          | 3300       | Водяное    | Три преобразователя подключены параллельно |

Таблица П.1.4

## 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.1.5

Технические данные трансформатора DONX 10kV/3,3kV 5700kVA  
(Zk = 16,5%  $\Delta(-20^\circ)/\Delta$ )

| $S_n, \text{kVA}$ | Номинальное напряжение |                    | Номинальный ток    |                    | $u_{k3}, \%$ | $\Delta P_{k3}, \text{kW}$ | $\Delta P_{xx}, \text{kW}$ | Группа соединения          |
|-------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                   | $U_{1n}, \text{B}$     | $U_{2n}, \text{B}$ | $I_{1n}, \text{A}$ | $I_{2n}, \text{A}$ |              |                            |                            |                            |
| 5700              | 10000                  | 3300               | 329,1              | 997,2              | 16,5         | 55                         | 4,9                        | $\Delta(-20^\circ)/\Delta$ |

Таблица П.6

Технические данные трансформатора DONX 10kV/3,3kV 5700kVA  
(Zk = 15%  $\Delta(0^\circ)/\Delta$ )

| $S_n, \text{kVA}$ | Номинальное напряжение |                    | Номинальный ток    |                    | $u_{k3}, \%$ | $\Delta P_{k3}, \text{kW}$ | $\Delta P_{xx}, \text{kW}$ | Группа соединения        |
|-------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
|                   | $U_{1n}, \text{B}$     | $U_{2n}, \text{B}$ | $I_{1n}, \text{A}$ | $I_{2n}, \text{A}$ |              |                            |                            |                          |
| 5700              | 10000                  | 3300               | 329,1              | 997,2              | 16,5         | 55                         | 4,9                        | $\Delta(0^\circ)/\Delta$ |

Таблица П.1.7

Технические данные трансформатора DONX 10kV/3,3kV 5700kVA  
(Zk = 15%  $\Delta(+20^\circ)/\Delta$ )

| $S_n, \text{kVA}$ | Номинальное напряжение |                    | Номинальный ток    |                    | $u_{кз}, \%$ | $\Delta P_{кз}, \text{kВт}$ | $\Delta P_{xx}, \text{kВт}$ | Группа соединения          |
|-------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|                   | $U_{1н}, \text{В}$     | $U_{2н}, \text{В}$ | $I_{1н}, \text{А}$ | $I_{2н}, \text{А}$ |              |                             |                             |                            |
| 5700              | 10000                  | 3300               | 329,1              | 997,2              | 16,5         | 55                          | 4,9                         | $\Delta(+20^\circ)/\Delta$ |

Таблица П.1.8

Технические данные трансформатора DTTHG 1100/10

| $S_n, \text{kVA}$ | Номинальное напряжение |                    | $u_{кз}, \%$ | $P_0, \text{kВт}$ | $\Delta P_{кз} \text{ при } 75^\circ \text{C}, \text{kВт}$ | Группа соединения |
|-------------------|------------------------|--------------------|--------------|-------------------|--|-------------------|
|                   | $U_{1н}, \text{В}$     | $U_{2н}, \text{В}$ |              |                   |  |                   |
| 1100              | 10000                  | 690                | 7            | 1,5               | 8,8  | $\Delta/Y-11$     |

Таблица П.1.9

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.1.10

## Технические параметры преобразователя MV7308 SA AFE

| Тип                             | Uвх.ном.,<br>В | Iном,<br>А | Pном,<br>МВт | Uвых.,<br>В | Охлаждение | Примечание  |
|---------------------------------|----------------|------------|--------------|-------------|------------|---|
| Converteam<br>MV 7308 SA<br>AFE | 3300           | 800        | 8,4          | 3300        | Водяное    | Активный выпрямитель AFE питает сразу два инвертора |

Таблица П.1.11

## Технические параметры инвертора MV7306

| Тип                   | Uвх.ном.,<br>В | Iном,<br>А | Pном,<br>МВт | Uвых.,<br>В | Охлаждение | Примечание |
|-----------------------|----------------|------------|--------------|-------------|------------|------------|
| Converteam MV<br>7306 | 3300           | 600        | 6            | 3300        | Водяное    | -          |

Таблица П.1.12

Технические данные трансформатора ДОНХ 10кV/3,3кV 3600кVA  
( $Z_k = 16,5\% \Delta/\Delta$ )

| $S_n, \text{kVA}$ | Номинальное напряжение |                    | Номинальный ток    |                    | $u_{k3}, \%$ | $\Delta P_{k3}, \text{kW}$ | $\Delta P_{xx}, \text{kW}$ | Группа соединения        |
|-------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
|                   | $U_{1n}, \text{B}$     | $U_{2n}, \text{B}$ | $I_{1n}, \text{A}$ | $I_{2n}, \text{A}$ |              |                            |                            |                          |
| 3600              | 10000                  | 3300               | 210                | 635,2              | 10,3         | 35                         | 3,6                        | $\Delta(0^\circ)/\Delta$ |

Таблица П.1.13

Технические данные трансформатора ДТТНГ 400/10

| $S_n, \text{kVA}$ | Номинальное напряжение |                    | $u_{k3}, \%$ | $P_0, \text{kW}$ | $\Delta P_{k3}, \text{kW}$ | Группа соединения     |
|-------------------|------------------------|--------------------|--------------|------------------|----------------------------|-----------------------|
|                   | $U_{1n}, \text{B}$     | $U_{2n}, \text{B}$ |              |                  |                            |                       |
| 300               | 10000                  | 500                | 7            | 0,5              | 1,2                        | $\Delta/(\Delta 6Y5)$ |

**Приложение 2****Результаты расчетов и экспериментальных исследований  
энергосиловых параметров прокатки на станах 5000 и 2000**

Таблица П.2.1

Результаты расчетов и экспериментальных исследований энергосиловых параметров процесса горячей прокатки на стане 5000 для стали X70

| № прохода | $h_0$            | $h_1$   | $b_0$ | $b_1$ | Экспе-<br>римент | Расчет | Ошибка |
|-----------|------------------|---------|-------|-------|------------------|--------|--------|
|           | м                | м       | м     | м     | кН·м             | кН·м   | %      |
| 1         | 0,3              | 0,25978 | 2,5   | 2,51  | 6343             | 4451   | 29,83  |
| 2+поворот | 0,25978          | 0,23285 | 1,58  | 1,851 | 3340             | 2183   | 34,64  |
| 3+поворот | 0,23285          | 0,20412 | 2,822 | 2,825 | 5690             | 3694   | 35,08  |
| 4         | 0,20412          | 0,17196 | 2,825 | 2,828 | 6023             | 4124   | 31,53  |
| 5         | 0,17196          | 0,14591 | 2,828 | 2,831 | 4998             | 3684   | 26,29  |
| 6         | 0,14591          | 0,12203 | 2,831 | 2,834 | 4654             | 3573   | 23,23  |
| 7         | Холостые проходы |         |       |       |                  |        |        |
| 8         |                  |         |       |       |                  |        |        |
| 9         | 0,12203          | 0,10572 | 2,834 | 2,821 | 4752             | 3647   | 23,25  |
| 10        | 0,10572          | 0,09291 | 2,821 | 2,823 | 5220             | 3833   | 26,57  |
| 11        | 0,09291          | 0,08081 | 2,823 | 2,825 | 5201             | 3934   | 24,36  |
| 12        | 0,08081          | 0,0693  | 2,825 | 2,827 | 5119             | 4019   | 21,49  |
| 13        | 0,0693           | 0,05841 | 2,827 | 2,829 | 5015             | 4329   | 13,68  |
| 14        | 0,05841          | 0,0485  | 2,829 | 2,831 | 4778             | 4308   | 9,84   |
| 15        | 0,0485           | 0,03985 | 2,831 | 2,833 | 4563             | 4390   | 3,79   |
| 16        | 0,03985          | 0,0328  | 2,833 | 2,834 | 3946             | 4111   | 4,18   |
| 17        | 0,0328           | 0,02712 | 2,834 | 2,836 | 3390             | 3588   | 5,84   |
| 18        | 0,02712          | 0,02259 | 2,836 | 2,838 | 2932             | 3122   | 6,48   |
| 19        | 0,02259          | 0,1912  | 2,838 | 2,84  | 2439             | 2561   | 5,00   |

Таблица П.2.2

Результаты расчетов и экспериментальных исследований энергосиловых параметров горячей прокатки на стане 5000 для стали 10Г2ФБЮ2

| № прохода | $h_0$           | $h_1$   | $b_0$ | $b_1$ | Эксперимент | Расчет | Ошибка |
|-----------|-----------------|---------|-------|-------|-------------|--------|--------|
|           | м               | м       | м     | м     |             |        |        |
| 1         | 0,3             | 0,28252 | 2,05  | 2,071 | 2010        | 1248   | 37,91  |
| 2+поворот | 0,28252         | 0,2573  | 3,262 | 3,227 | 5026        | 3185   | 36,63  |
| 3         | 0,2573          | 0,23335 | 3,227 | 3,228 | 4837        | 3155   | 34,77  |
| 4         | 0,23335         | 0,21085 | 3,228 | 3,23  | 4614        | 2977   | 35,48  |
| 5+поворот | 0,21085         | 0,18321 | 2,788 | 2,79  | 4739        | 3361   | 29,08  |
| 6         | Холостой проход |         |       |       |             |        |        |
| 7         | 0,18321         | 0,16281 | 2,79  | 2,775 | 7284        | 4984   | 31,58  |
| 8         | 0,16281         | 0,14173 | 2,775 | 2,777 | 6970        | 5301   | 23,95  |
| 9         | 0,14173         | 0,1255  | 2,777 | 2,779 | 6825        | 4796   | 29,73  |
| 10        | 0,1255          | 0,11045 | 2,779 | 2,781 | 6633        | 4766   | 28,15  |
| 11        | 0,11045         | 0,0963  | 2,781 | 2,783 | 6409        | 4757   | 25,78  |
| 12        | 0,0963          | 0,08271 | 2,783 | 2,785 | 6271        | 4891   | 22,01  |
| 13        | 0,08271         | 0,0698  | 2,785 | 2,787 | 6040        | 5176   | 14,30  |

Таблица П.2.3

Результаты расчетов и экспериментальных исследований энергосиловых параметров горячей прокатки на стане 2000 для стали 10Г2ФБЮ2

| № клетки | $h_0$  | $h_1$  | $b_0$ | $b_1$ | Эксперимент | Расчет | Ошибка |
|----------|--------|--------|-------|-------|-------------|--------|--------|
|          | м      | м      | м     | м     |             |        |        |
| 7        | 0,0431 | 0,0272 | 1699  | 1699  | 908         | 1015,2 | 11,8   |
| 8        | 0,0272 | 0,0237 | 1699  | 1699  | 732         | 703    | 4,0    |
| 9        | 0,0237 | 0,0205 | 1699  | 1699  | 513         | 535,1  | 4,3    |
| 10       | 0,0205 | 0,0184 | 1699  | 1699  | 386         | 367,8  | 4,7    |
| 11       | 0,0184 | 0,0176 | 1699  | 1699  | 233         | 220,3  | 5,5    |
| 12       | 0,0176 | 0,0172 | 1699  | 1699  | 222         | 210,4  | 5,2    |

Таблица П.2.4

Результаты расчетов и экспериментальных исследований энергосиловых параметров горячей прокатки на стане 2000 для стали 22ГЮ

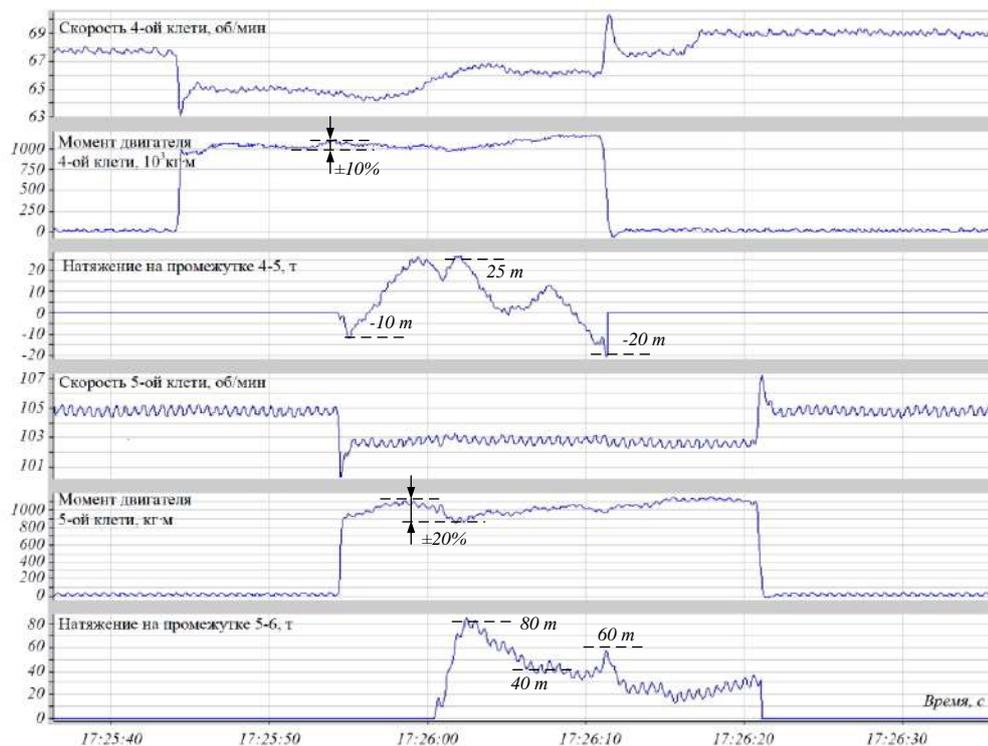
| № клетки | $h_0$   | $h_1$   | $b_0$ | $b_1$ | Экспе-<br>римент | Расчет | Ошибка |
|----------|---------|---------|-------|-------|------------------|--------|--------|
|          | м       | м       | м     | м     | кН·м             | кН·м   | %      |
| 7        | 0,0268  | 0,017   | 1,223 | 1,223 | 1133             | 975    | 13,9   |
| 8        | 0,0197  | 0,01044 | 1,223 | 1,223 | 980              | 1010,3 | 3,1    |
| 9        | 0,01044 | 0,00758 | 1,223 | 1,223 | 526              | 568,8  | 8,1    |
| 10       | 0,00758 | 0,00505 | 1,223 | 1,223 | 372              | 378,1  | 1,6    |
| 11       | 0,00505 | 0,0044  | 1,223 | 1,223 | 282              | 267,4  | 5,2    |
| 12       | 0,0044  | 0,00371 | 1,223 | 1,223 | 214              | 210    | 1,9    |

Таблица П.2.5

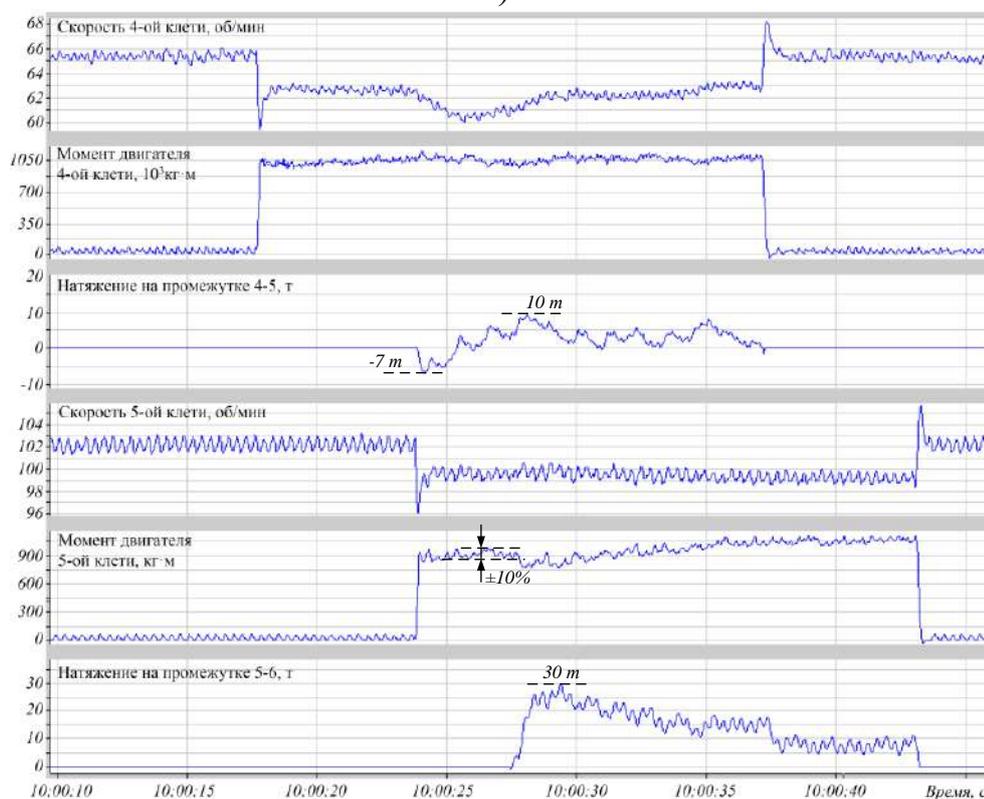
Результаты расчетов и экспериментальных исследований энергосиловых параметров горячей прокатки на стане 2000 для стали 09Г2Д

| № клетки | $h_0$   | $h_1$   | $b_0$ | $b_1$ | Экспе-<br>римент | Расчет | Ошибка |
|----------|---------|---------|-------|-------|------------------|--------|--------|
|          | м       | м       | м     | м     | кН·м             | кН·м   | %      |
| 7        | 0,0454  | 0,0286  | 1,55  | 1,55  | 1136             | 1310   | 15,3   |
| 8        | 0,0286  | 0,02118 | 1,55  | 1,55  | 1122             | 1220   | 8,7    |
| 9        | 0,02118 | 0,01704 | 1,55  | 1,55  | 795              | 825,2  | 3,8    |
| 10       | 0,01704 | 0,01414 | 1,55  | 1,55  | 453              | 485    | 7,1    |
| 11       | 0,01414 | 0,01292 | 1,55  | 1,55  | 295              | 302,8  | 2,6    |
| 12       | 0,01292 | 0,01192 | 1,55  | 1,55  | 271              | 275,9  | 1,8    |

## Экспериментальная оценка влияния натяжений на момент прокатки



а)



б)

Рисунок П.3.1 – Изменения скоростей, моментов и натяжений при существующих – а) и разработанных – б) алгоритмах управления

**АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

УТВЕРЖДАЮ:  
Начальник технического  
департамента ПАО «ММК»

А.А. Мухин

2017 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов НИОКР по договору № 22820... 05.2016 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 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 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»

Начальник ЦЭТЛ

И.о. начальника ПТЛ

И.о. инженера по техническому надзору (электрооборудования)

Научный руководитель НИОКР

Журавлев Ю.П.

Шубин А.Г.

Банщиков В.С.

Шапарь А.А.

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.

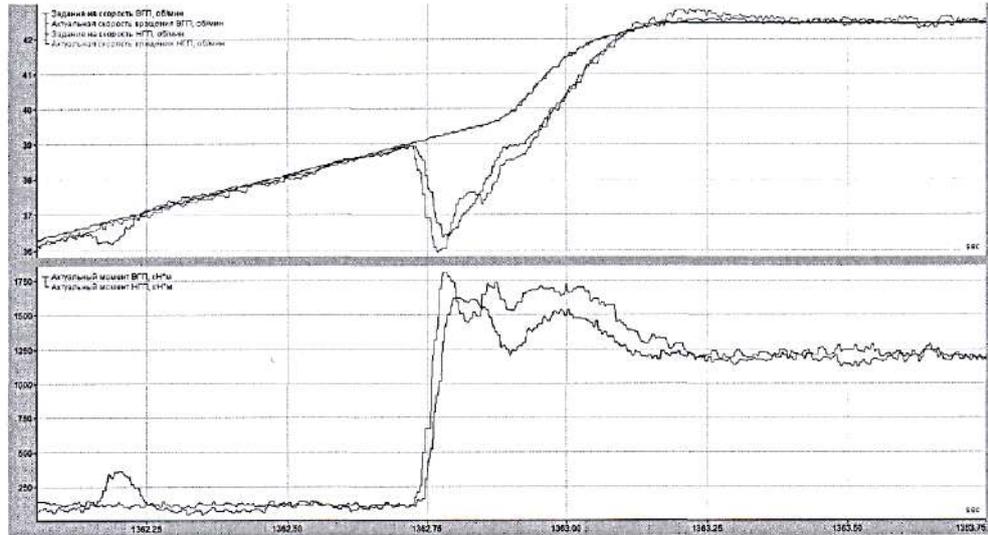


Рис. 1. Захват на участке ускорения с последующим разгоном

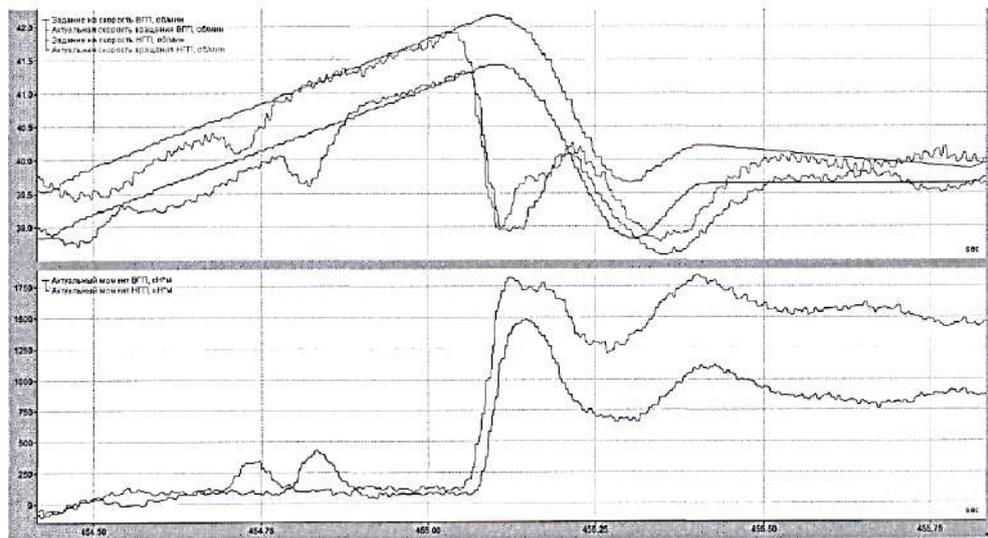


Рис. 2. Захват на участке ускорения с компенсацией динамического момента

2. При захвате проката на участке ускорения электропривода зазоры в шпindelных 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.

Банщиков В.С.

Шапарь А.А.

Радионон А.А.

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник НИЦ ОАО «ММК»

Б.А. Сарычев

2012 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
**результатов НИР по договору № 191546**  
**«Разработка способа согласования скоростных режимов электроприводов 4-6-й**  
**клетей стана 2000 с целью обеспечения минимального натяжения в межклетевых**  
**промежутках»**

Данная работа проводится в рамках пункта 29 в «Разработка технологии уменьшения энергетических затрат при транспортировке, распределении и потреблении тепла и электроэнергии» «Перечни научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 2 ст. 262 части второй НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 № 988.

**Краткое описание выполненной работы:**

Разработан и внедрен в эксплуатацию в непрерывной подгруппе черновой группы (4-6 клетки) стана 2000 ЛПЦ-10 ОАО «ММК» способ согласования скоростных режимов электроприводов, согласно которому:

- скорость электропривода каждой последующей клетки устанавливается по реальной линейной скорости валков предыдущей клетки после захвата металла (скорости выхода металла из предыдущей клетки); корректирующие воздействия на скорость передаются «по ходу прокатки»;
- корректирующие сигналы на регулирование натяжения формируются по разности между текущим током предыдущей клетки и усредненным током свободной прокатки и передаются «против хода прокатки»;
- сигналы на регулирование натяжения подаются непосредственно на входы регуляторов тока электроприводов 4-й и 6-й клеток.

**Основные технические эффекты:**

- снижение расходного коэффициента за счет повышения точности регулирования геометрических размеров на концах полосы;
- улучшение условий захвата полосы валками, снижение аварий, связанных с застреванием полосы;
- повышение точности регулирования межклетевых натяжений в непрерывной подгруппе черновой группы;
- повышение устойчивости технологического процесса за счет реализации усовершенствованных алгоритмов управления скоростными режимами клеток.

Технико-экономический эффект достигается за счет снижения расходного коэффициента на 0,000185 (0,185 кг/т). Расчетный экономический составляет 1 750 тыс. руб./год.

Дата фактического внедрения 1  
Срок полезного использования

Главный энергетик ОАО «ММК»

Журавлев Ю.П.

Начальник ЦЭТЛ

Головин В.В.

Начальник ЛПЦ-10

Казаков И.В.

Электрик ЛПЦ-10

Гостев А.Н.

Научный руководитель НИР

Карандаев А.С.

СОГЛАСОВАНО:

Главный энергетик ОАО «ММК»

Ю.П. Журавлев

2012 г.

АКТ

**опытно-промышленных**

системы согласования скоростных режимов электроприводов 4-й–6-й клетей  
 стана 2000 ЛПЦ-10 ОАО «ММК»  
 (по договору НИР № 191546 от 20.05.2011 г.)

Данная работа проводится в рамках пункта 29 в «Разработка технологии уменьшения энергетических затрат при транспортировке, распределении и потреблении тепла и электроэнергии» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 2 ст. 262 части второй НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 № 988.

### **Характеристика внедряемой системы**

В усовершенствованной системе автоматического регулирования нулевого натяжения реализован алгоритм согласования скоростных режимов электроприводов, согласно которому:

- после захвата полосы предыдущей клетью осуществляется автоматическая коррекция скоростей электропривода следующей по ходу прокатки клетки, в результате скорость электропривода каждой последующей клетки устанавливается согласно реальной скорости выхода полосы из предыдущей клетки;
- корректирующие сигналы для поддержания минимального натяжения при прокатке формируются по разности между текущим током предыдущей клетки и усредненным током свободной прокатки;
- корректирующие сигналы на изменение натяжения подаются непосредственно на входы регуляторов тока электроприводов 4-й и 5-й клетей.

Данная система прошла опытно-промышленные испытания в условиях ЛПЦ-10 ОАО «ММК».

### **Программа эксперимента**

Анализировались динамические режимы:

- захват полосы валками;
- установившийся режим прокатки;
- выпуск полосы.

Анализировались режимы электроприводов при различном сортаменте прокатываемых полос (пассивный эксперимент).

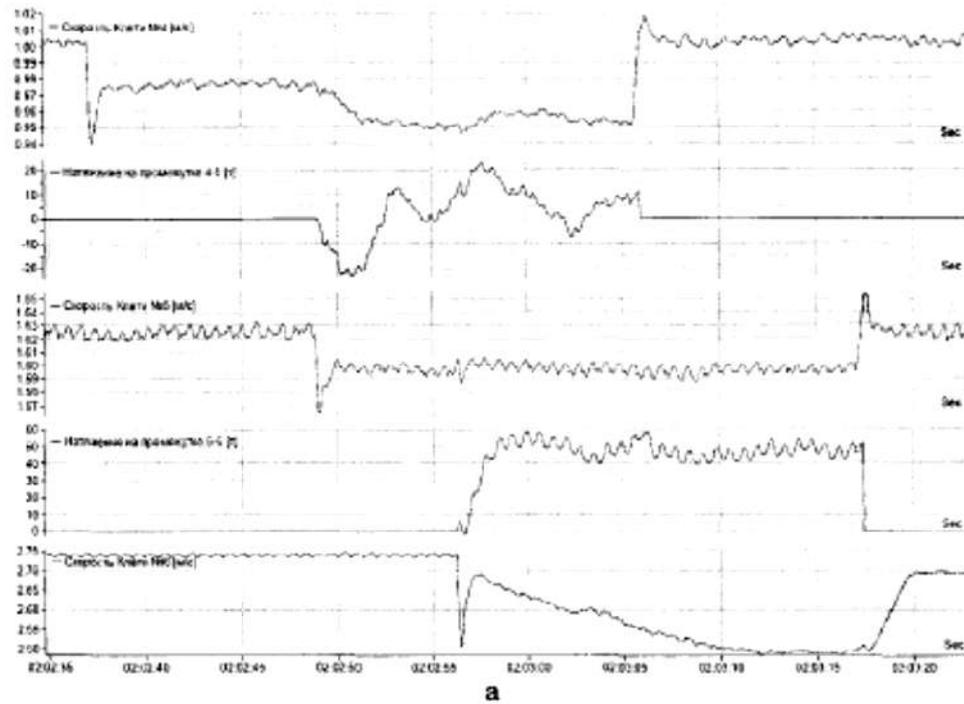
Осциллографировались координаты электроприводов: задания скоростей, текущие скорости и сигналы коррекции скоростей электроприводов горизонтальных и вертикальных клетей; токи нагрузки двигателей горизонтальных и вертикальных клетей; натяжения в промежутках между 4-5 и 5-6 клетями.

### **Результаты испытаний**

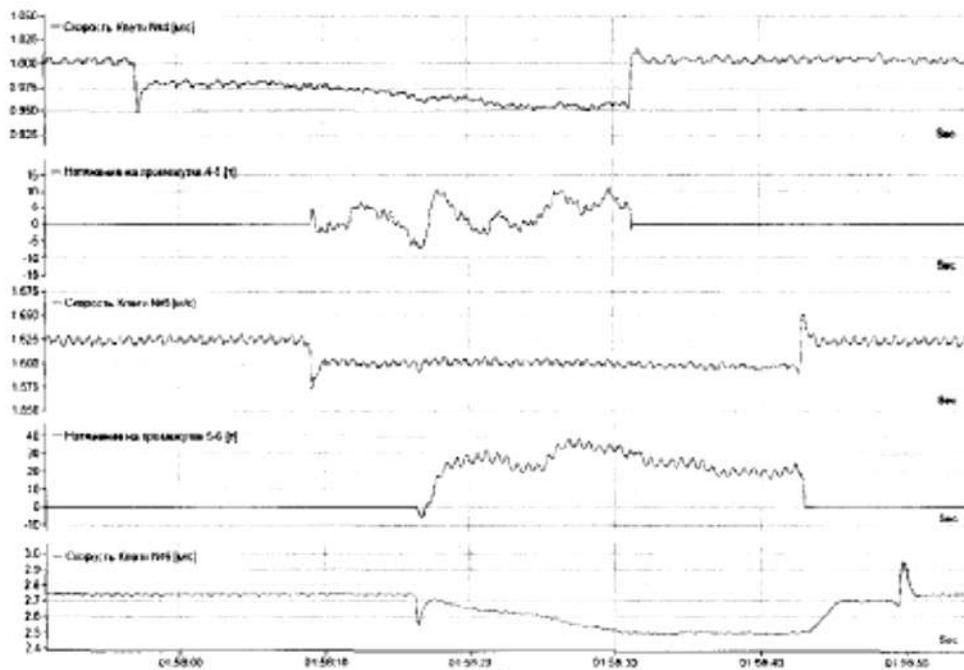
На рис. 1 показаны осциллограммы, полученные при прокатке в 4-6 клетях при работе существующей системы автоматического регулирования нулевого натяжения (САРНН) (рис. 1, а) и при работе предложенной САРНН с усовершенствованным алгоритмом коррекции натяжения (рис. 1, б).

Причины неудовлетворительного регулирования натяжения:

- несогласованность скоростей смежных клетей при захвате полосы последующей клетью;
- невозможность учета и коррекции статических просадок скорости в системе с пропорциональным регулятором скорости;



а



б

Рис. 1. Переходные процессы скоростей электроприводов и натяжений в межклетевых промежутках в существующей (а) и внедряемой (б) САРНН

- наличие неконтролируемых продольных усилий в раскате между смежными клетями;
  - низкое быстродействие системы коррекции скоростей;
  - недостаточная точность системы косвенного вычисления натяжения по давлению и параметрам электропривода;
  - низкая точность алгоритмов задания скоростного режима от АСУ верхнего уровня.
- Экспериментально установлено, что на качество регулирования натяжения и условия захвата полосы наибольшее влияние оказывает точность расчета плеча прокатки, для чего

в существующей системе используется сигнал давления на валки от месдоз, поэтому влияние точности измерения давления в существующей САРН является определяющим.

**Выводы**

Внедрение предложенного алгоритма САРН на стане 2000 обеспечивает:

- расширение функциональных возможностей управления скоростными режимами по критерию минимальных натяжений;
- минимизацию дополнительной модельной коррекции, связанной с изменением температурного профиля, а также исключение задания предварительной информации о марке прокатываемого металла;
- независимое регулирование натяжения в межклетевых промежутках и самоконтроль качества регулирования с коррекцией на следующей заготовке.

**Основные технические эффекты:**

- снижение расходного коэффициента на 0,185 кг/т за счет повышения точности регулирования геометрических размеров на концах рулона;
- улучшение условий захвата полосы валками, снижение аварий, связанных с застреванием полосы;
- повышение точности регулирования межклетевых натяжений в непрерывной подгруппе черновой группы;
- повышение устойчивости технологического процесса за счет реализации усовершенствованных алгоритмов управления скоростными режимами клеток.

**Рекомендации:**

1. Перейти от регулирования с использованием давления к предложенному алгоритму с использованием сигналов по статическому току (возможно по полному току, т.к. динамические изменения медленные за исключением режима захвата полосы). Предлагаемый алгоритм позволит исключить производную скорости и сигналы от месдоз.
2. Ввести алгоритм коррекции скорости «по ходу прокатки», т.е. после захвата полосы предыдущей клетью по ее реальной скорости устанавливать скорость электропривода последующей клетки.
3. Вычислять и запоминать средний ток свободной прокатки до захвата полосы последующей клетью.
4. Осуществлять коррекцию натяжения «против хода прокатки» по разности между текущим током предыдущей клетки и усредненным током свободной прокатки (возможно оставить 5-ю клетку как базовую и корректировать натяжения по токам 4-й и 6-й клеток).
5. Корректирующий сигнал по разности токов подавать непосредственно на регулятор контура тока, что позволяет повысить быстродействие САРН примерно в 2 раза.

При реконструкции электроприводов с переходом на цифровое управление и реконструкции АСУТП рекомендуется использовать разработанный более сложный алгоритм, с разделением прокатки на 4 участка.

Главный инженер УГЭ

Начальник ЦЭТЛ

Начальник ЛПЦ-10

Электрик ЛПЦ-10

Научный руководитель НИР

Андрюшин И.Ю.

Головин В.В.

Казаков И.В.

Гостев А.Н.

Карандаев А.С.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
**результатов НИОКР по договору № 211610 от 03.06.2013 г.**  
**«Разработка и внедрение способа снижения динамических нагрузок**  
**электроприводов непрерывной подгруппы клеток стана 2000»**

Данная работа проводится в рамках раздела VI. «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», пункта 4 «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», подпункта 15) «разработка технологий специальных силовых полупроводниковых приборов для энергетики, транспорта и мощных частотно-регулируемых электроприводов; разработка технологий силового управляемого электропривода, в том числе регулируемых преобразователей частоты» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с пунктом 7 статьи 262 части второй Налогового кодекса Российской Федерации 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. N 96).

**Краткое описание выполненной работы:**

Разработан и внедрен в эксплуатацию в непрерывной подгруппе черновой группы (4–6 клетки) стана 2000 ЛПЦ-10 ОАО «ММК» способ снижения динамических нагрузок, согласно которому обеспечивается:

- автоматическое согласование линейной скорости валков последующей (горизонтальной либо вертикальной) клетки и скорости выхода металла из предыдущей клетки;
- автоматическая компенсация статических и динамических просадок скорости при захвате полосы.

**Основные технические эффекты:**

- повышение срока службы электрического и механического оборудования за счет снижения ударных нагрузок при захвате полосы;
- сокращение аварий и снижение внеплановых простоев по причине застревания полосы;
- снижение расходного коэффициента с концевой обрезающей за счет сокращения времени восстановления скорости после захвата;
- улучшение условий коммутации двигателей за счет снижения динамических бросков тока и перенапряжений на коллекторе.

Дата фактического внедрения: 15 октября 2014 г.

Срок полезного использования: 2 года.

Главный энергетик ОАО «ММК»

Начальник ЦЭТЛ

Начальник ЛПЦ-10

Электрик ЛПЦ-10

Научный руководитель НИР

Журавлев Ю.П.

Шубин А.Г.

Антонюк В.В.

Гостев А.Н.

Карандаев А.С.



СОГЛАСОВАНО:

Главный энергетик ОАО «ММК»

Ю.П. Журавлев

11 2014 г.

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

способа и алгоритмов снижения динамических нагрузок электроприводов непрерывной подгруппы клеток стана 2000 ЛПЦ-10 ОАО «ММК»  
(по договору НИОКР № 211610 от 03.06.2013 г.)

Данная работа проводится в рамках раздела VI. «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», пункта 4 «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», подпункта 15) «разработка технологий специальных силовых полупроводниковых приборов для энергетики, транспорта и мощных частотно-регулируемых электроприводов; разработка технологий силового управляемого электропривода, в том числе регулируемых преобразователей частоты» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с пунктом 7 статьи 262 части второй Налогового кодекса Российской Федерации 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. N 96).

**Характеристика внедряемого способа снижения динамических нагрузок**

В системе управления скоростными режимами черновой группы внедрены алгоритмы снижения динамических нагрузок, обеспечивающие:

- снижение ударных нагрузок за счет автоматического согласования скорости выхода полосы из предыдущей вертикальной клетки и скорости захвата полосы последующей горизонтальной клетью;
- автоматическую коррекцию скорости вращения валков вертикальной клетки по разности токов электропривода при свободной и совместной прокатке;
- автоматическую компенсацию статических и динамических просадок скорости при захвате полосы.

Данные алгоритмы прошли опытно-промышленные испытания в условиях ЛПЦ-10 ОАО «ММК».

**Программа эксперимента**

Анализировались следующие динамические режимы:

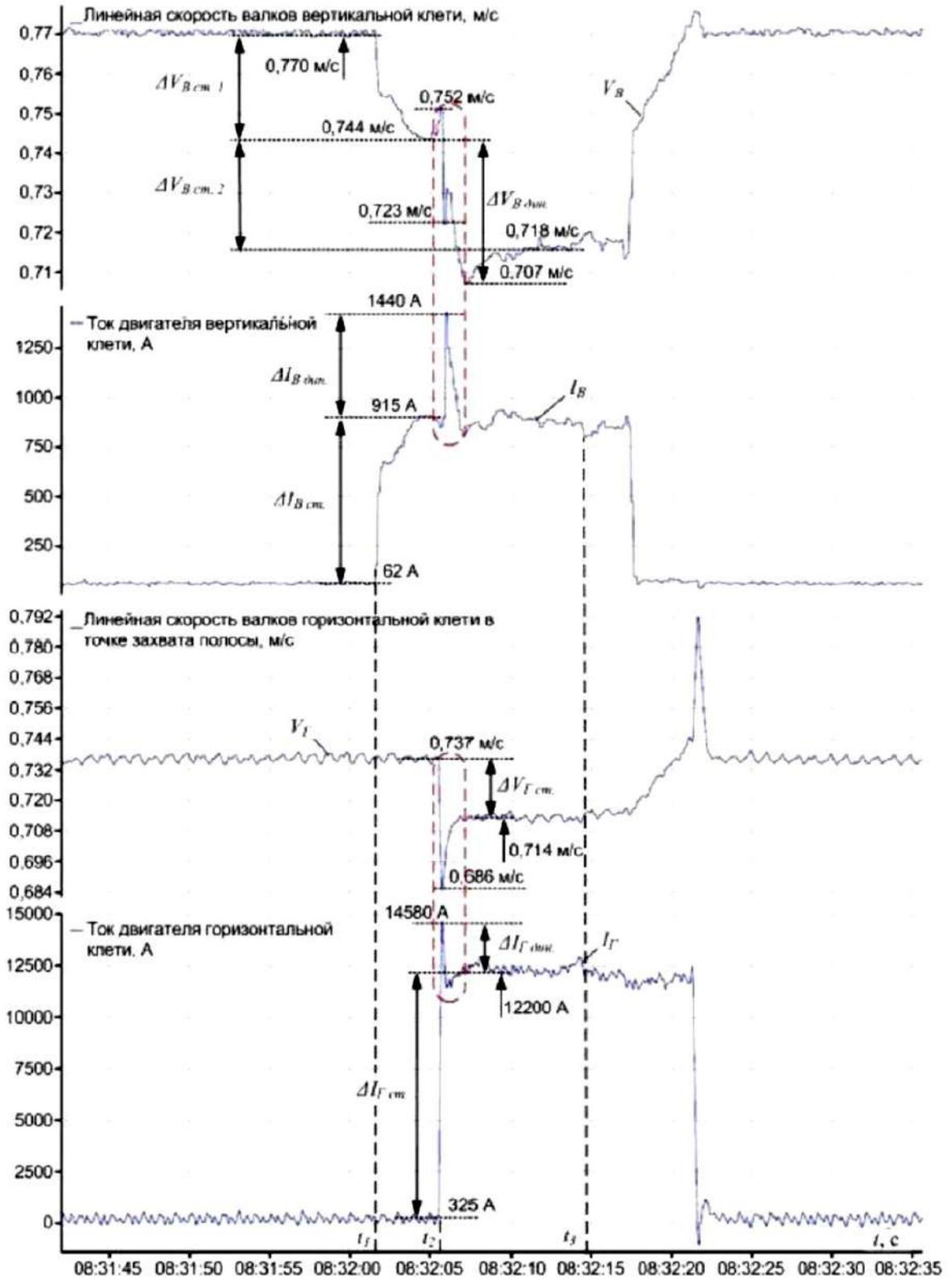
- захват полосы валками горизонтальной и вертикальной клетки;
- повторный динамический процесс в горизонтальной клетке при захвате полосы валками последующей вертикальной клетки;
- установившийся режим совместной прокатки в смежных вертикальной и горизонтальной клетях;
- выпуск полосы.

Анализировались режимы электроприводов при различном сортamente прокатываемых полос (пассивный эксперимент).

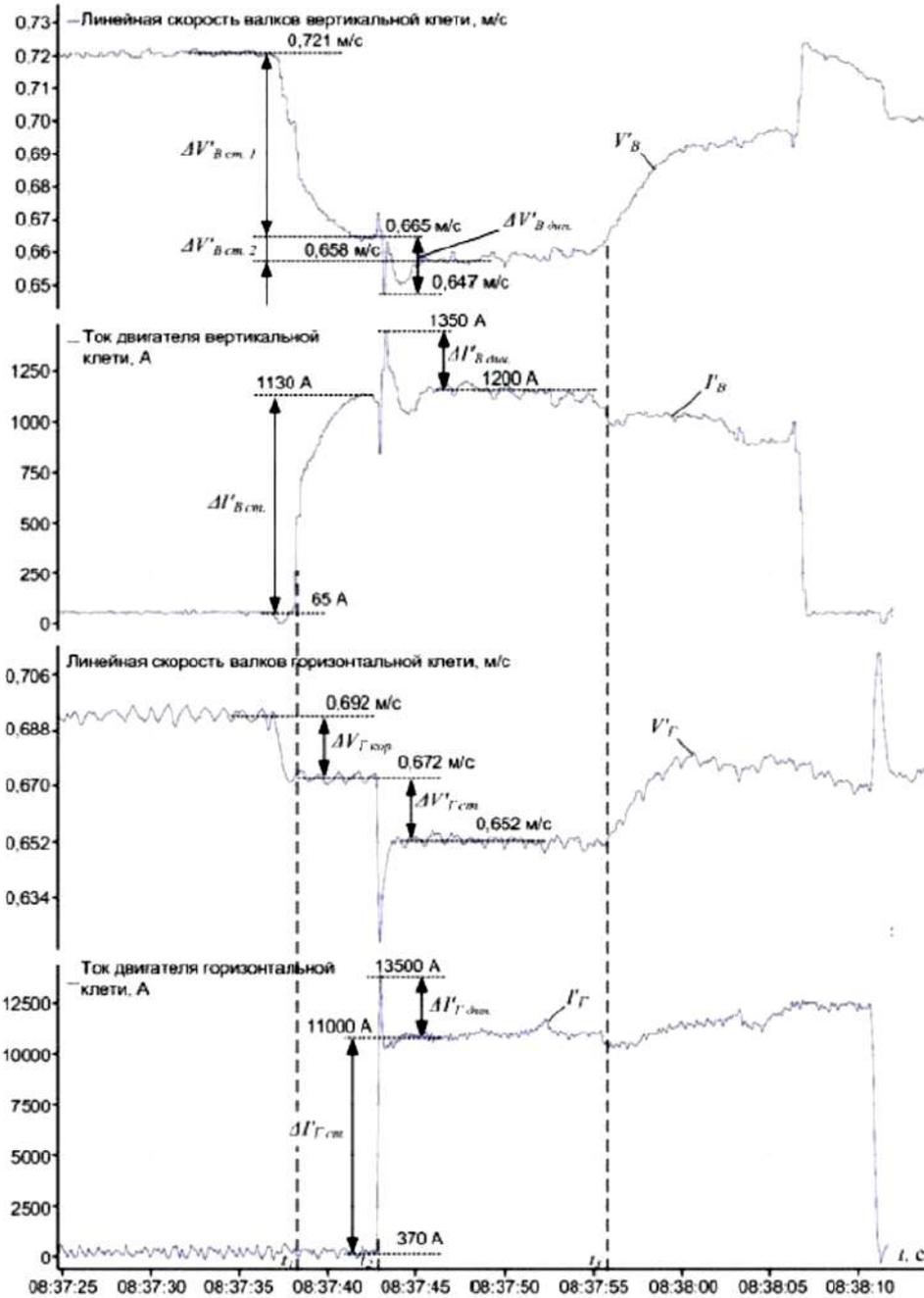
Осциллографировались координаты электроприводов: задания скоростей, текущие скорости и сигналы коррекции скоростей электроприводов горизонтальных и вертикальных клеток; токи нагрузки двигателей горизонтальных и вертикальных клеток; натяжения в промежутках между 4-5 и 5-6 клетями.

**Результаты испытаний**

На рис. 1 показаны осциллограммы, полученные при прокатке в 4-6 клетях при работе существующей системы задания скоростей (рис. 1, а) и при реализации разработанного способа согласования скоростей (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Переходные процессы линейных скоростей и токов электроприводов горизонтальных и вертикальных валков клетки №4 в существующей системе – а и при реализации разработанного способа согласования скоростей – б

Основные причины, вызывающие увеличение динамических нагрузок при захвате полосы валками 4-й – 6-й клеток:

1. Несогласованность линейных скоростей валков вертикальных и горизонтальных клеток. Вследствие этого линейная скорость вращения валков горизонтальной клетки не соответствует скорости выхода металла из вертикальной клетки.

2. Наличие неконтролируемой статической ошибки (просадки) скорости после захвата, связанной с пропорциональным регулированием скорости в однократно-интегрирующей системе.

3. Мгновенный подпор, формирующийся в полосе, и повторный динамический процесс в линии привода вертикальной клетки во время захвата горизонтальными валками.

Экспериментально установлено, что средние динамические броски токов двигателей вертикальных валков при разработанных алгоритмах в 2,5 раза ниже, чем в существующей системе:  $\Delta I_{B\text{дин.}} = 55\%$  и  $\Delta I'_{B\text{дин.}} = 22\%$ . Это подтверждает, что способ предварительного согласования скоростей вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки обеспечивает ограничение ударов при повторном переходном процессе.

#### **Выводы**

1. Разработанный способ согласования скоростей вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки обеспечивает установку наиболее точного соотношения этих скоростей в момент захвата полосы горизонтальной клетью.

2. Алгоритм автоматической коррекции скорости вертикальной клетки обеспечивает компенсацию статической ошибки регулирования скорости.

3. В результате согласования скоростей захвата полосы вертикальными и горизонтальными валками снижаются динамические нагрузки механического и электрического оборудования. Это обеспечивает повышение долговечности оборудования, а также снижение простоев из-за его поломок.

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

#### **Основные технические эффекты:**

– снижение расходного коэффициента с концевой обрезью на 0,189 кг/т за счет сокращения времени восстановления скорости после захвата;

– повышение срока службы электрического и механического оборудования за счет снижения ударных нагрузок при захвате полосы;

– сокращение аварий и снижение внеплановых простоев по причине застревания полосы;

– повышение точности регулирования геометрических размеров на концах рулона;

– улучшение условий коммутации двигателей за счет снижения динамических бросков тока и перенапряжений на коллекторе.

#### **Рекомендации:**

1. Обеспечить опытно-промышленную эксплуатацию усовершенствованной системы снижения динамических нагрузок.

2. Провести сбор и статистическую обработку информации о динамических режимах электроприводов горизонтальных и вертикальных клеток с целью более точной оценки результатов внедрения системы.

3. Выполнить разработку и внедрение системы непрерывного контроля упругого момента в валопроводах электроприводов 4-й и 5-й клеток.

Выполненные разработки могут быть рекомендованы для внедрения в черновой группе стана 2500 и после доработки – в универсальной клетке стана 5000.

Главный инженер УГЭ

Начальник ЦЭТЛ

Начальник ЛПЦ-10

Электрик ЛПЦ-10

Научный руководитель НИР

Андрюшин И.Ю.

Шубин А.Г.

Антонюк В.В.

Гостев А.Н.

Карандаев А.С.

УТВЕРЖДАЮ:  
 Начальник «ММК»  
 [подпись]  
 «16» [подпись]  
 2010 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов НИР по договору № 181050 от 02.04.2010 г.  
 по теме: «Исследование нагрузочных и скоростных режимов электроприводов  
 чистовой группы стана 2000 при прокатке трубной заготовки с целью  
 обеспечения устойчивости технологического процесса и  
 повышения надежности электрооборудования»

#### Краткое описание выполненной работы:

Разработано и внедрено в эксплуатацию специализированное программное обеспечение для расчета и анализа тепловых и скоростных режимов электроприводов чистовой группы клетей стана 2000.

Разработана и внедрена в опытную эксплуатацию в электроприводах клетей чистовой группы стана 2000 ЛПЦ-10 ОАО «ММК» система автоматической компенсации отклонений скорости в режиме захвата полосы валками.

#### Основные технические эффекты:

- возможность автоматизированного теоретического расчета нагрузочных режимов электроприводов чистовой группы клетей стана 2000 с максимальной ошибкой не более  $\pm 7\%$  при прокатке трубной заготовки из сляба толщиной 300 мм;
- улучшение условий захвата полосы валками за счет реализации алгоритмов разгона клетки во время заправки полосы, обеспечивающих компенсацию статических и динамических отклонений скорости электроприводов во время прокатки.

Дата фактического внедрения 20 октября 2010 г.

Срок полезного использования 5 лет.

Главный энергетик ОАО «ММК»

[подпись] Журавлев Ю.П.

Начальник ЦЭТЛ

Головин В.В.

Начальник ЛПЦ-10

Кзаков И.В.

Электрик ЛПЦ-10

[подпись] Бочковский Н.И.

Научный руководитель НИР

Радионов А.А.

Ответственный исполнитель

Храмшин В.Р.

## РАСЧЕТ

экономического эффекта

от внедрения результатов НИР «Исследование нагрузочных и скоростных режимов электроприводов чистой группы стана 2000 при прокатке трубной заготовки с целью обеспечения устойчивости технологического процесса и повышения надежности электрооборудования»

Внедрение технологии прокатки трубной заготовки толщиной 18 мм и более на традиционных широкополосных станах в мировой практике до настоящего времени не осуществлялось. Очевидно, что при такой прокатке на стане 2000 г.п. ОАО «ММК» возникает ряд технических и технологических проблем. Большинство из них связаны со спецификой прокатки трубной заготовки:

- низкие скорости прокатки (до 2-х раз ниже номинальной);
- высокие обжатия и неравномерность их распределений по клетям;
- сложность поддержания заданной температуры по длине полосы;
- ухудшение условий коммутации на коллекторах двигателей черновой и чистой группы;
- взаимное влияние групп тиристорного преобразователя через сеть;
- ухудшение качества напряжения сети за счет искажений, вносимых преобразователями при низких выпрямленных напряжениях;
- ухудшение условий захвата при прокатке толстой полосы на низких скоростях.

Решение этих вопросов представляет собой сложную научную и практическую задачу, требующую проведения всестороннего анализа существующих скоростных и нагрузочных режимов прокатки трубной заготовки, разработки оптимальных технологических режимов с точки зрения загрузки электроприводов и выполнения заданных технологических требований. Необходимы анализ ресурса электроприводов, оценка надежности и долговечности их работы в экстремальных режимах. Кроме того, необходимо решение «обратной» задачи: определения ограничений, накладываемых электроприводом на технологический процесс (обжатия по клетям и скорости прокатки).

**1. Цель проводимой договорной работы:** Снижение внеплановых простоев за счет оптимизации нагрузочных режимов электроприводов при прокатке трубной заготовки, разработка рациональных скоростных режимов, обеспечивающих поддержание необходимой температуры конца прокатки, сокращение потерь электрической энергии за счет оптимальной загрузки электроприводов. Обеспечение улучшения условий захвата при прокатке толстой полосы на низких скоростях.

**2. Экономический эффект:** достигается за счет снижения расходного коэффициента в результате улучшения условий захвата;

$$\mathcal{E}_1 = \Delta P \times C \times \Pi \times K_1 = 0,000385 \times 8481,8 \times 3850 \times 0,216 = 2716 \text{ тыс. руб.},$$

где  $\Delta P$  – сокращение расходного коэффициента,

$$\Delta P = 0,000385 \text{ (0,385 кг/т);}$$

$C$  – цена 1 тонны полуфабриката за вычетом отходов,  $C = 8480$  руб. (2012 г.);

$\Pi$  – планируемое годовое производство проката,  $\Pi = 3850000$  т.

$K_1$  – коэффициент влияния на снижение расходного коэффициента,  $K_1 = 0,216$ .

Экономический эффект от внедрения результатов НИР (при стоимости  $C_{\text{НИР}} = 2000$  тыс. руб. на два года, или в среднем 1000 тыс. руб./год):

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - C_{\text{НИР}} = 2716 - 1000 = 1716 \text{ тыс. руб.}$$

Срок окупаемости работы:

$$T_{\text{НИР}} = C_{\text{НИР}} / \mathcal{E} = 1000 / 1716 = 0,58 \text{ года.}$$

При этом экономический эффект достигается за счет совершенствования алгоритмов управления существующей СУРС и согласования режимов СУРС, САРНиП и САРТ стана практически без капитальных затрат (за исключением стоимости договорной НИР).

Научный руководитель НИР

А.С. Карандаев

Ответственный исполнитель

В.Р. Храмшин

**СОГЛАСОВАНО:**

Начальник ЛПЦ-10

И.В. Казаков

Начальник ЦЭТЛ

В.В. Головин

Электрик ЛПЦ-10

А.Н. Гостев