

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский политехнический университет»

На правах рукописи



ЛОГИНОВ БОРИС МИХАЙЛОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
ПРОКАТНЫХ СТАНОВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОБЪЕКТНО-
ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Радионых Андрей Александрович

Москва 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
Глава 1. ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АГРЕГАТОВ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	28
1.1. Концепция цифрового двойника	30
1.1.1. Определение цифровых двойников	30
1.1.2. ЦД на производстве	33
1.1.3. Функции цифрового двойника	35
1.2. Взаимозависимость цифровых двойников, цифровых теней и цифровых моделей	38
1.3. Характеристика цифровых платформ для разработки промышленных ЦД	40
1.4. Методология создания промышленных ЦД	43
1.4.1. Характеристика Simulink Real-Time	43
1.4.2. Аппаратно-программное моделирование HIL	44
1.5. Объектно-ориентированный подход к созданию цифровых двойников	46
1.6. Виртуальный ввод в эксплуатацию	50
1.7. Задача повышения точности двойникования	52
1.8. Характеристика объектов и задачи исследования	54
1.9. Задачи совершенствования электроприводов горизонтальной клетки стана 5000	57
1.9.1. Технология и электромеханические системы клетки	57
1.9.2. Анализ нагрузочных режимов двигателей ВГП и НГП	60
1.9.3. Проблема повышения точности формирования профиля переменной толщины по длине раската	63
1.9.4. Проблема согласования скоростей электроприводов горизонтальной и вертикальной клеток в режиме совместной прокатки	65

1.9.5. Проблема ограничения динамических нагрузок электроприводов клетки	67
1.10. Проблемы предотвращения аварий	70
1.10.1. Задачи разработки цифровых теней (наблюдателей состояния) механического и электрического оборудования клетки	70
1.10.2. Обоснование разработки системы защиты двигателей от перегрева	73
1.11. Выводы и обоснование направлений исследований	76
Глава 2. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА	80
2.1. Методика разработки цифровых двойников промышленных электротехнических систем	81
2.1.1. Позиции разрабатываемой методики	82
2.1.2. Конфигурация цифровых двойников	83
2.2. Создание цифровых двойников электромеханических систем клетки стана 5000 на основе Simulink Real Time	85
2.2.1. Электроприводы клетки	85
2.2.2. Принцип построения DTA	87
2.2.3. Цифровой двойник электромеханической системы валков	88
2.3. Виртуальная модель электропривода	91
2.3.1. Разработка модели	91
2.3.2. Результаты виртуальной настройки	94
2.4. Моделирование гидравлических НУ в системе САРТ	96
2.4.1. Концепция ROLL-GAP CONTROLL	96
2.4.2. Структуры моделей	98
2.5. Валидация результатов	102
2.5.1. Результаты тестовой настройки гидро-САРТ	102
2.5.2. Адекватность моделирования взаимосвязанных электроприводов валков	104
2.6. Обоснование учета задержек сигналов в структурах ЦД	107

2.6.1. Оценка быстродействия электро- и гидравлических систем	107
2.6.2. Экспериментальная оценка задержек сигналов в ЦД прокатной клетки	109
2.7. Методика определения задержки сигналов	113
2.7.1. Практический тест условной системы	113
2.7.2. Способ определения запаздывания сигнала в структуре ЦД	116
2.7.3. Оценка влияния дискретности программы ПЛК	118
ВЫВОДЫ	120
Глава 3. ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЦД ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОГО ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРОКАТНЫХ АГРЕГАТОВ	124
3.1. Разработка цифровых двойников моталок стана 2500	125
3.1.1. Характеристика моталок и процесса намотки полосы	125
3.1.2. Разработка виртуальной модели гидравлической системы формирующих роликов	132
3.2. Виртуальный ввод в эксплуатацию	137
3.2.1. Техническая реализация двойников на моталках	137
3.2.2. Оценка адекватности настройки мехатронных систем моталок с использованием разработанного агрегированного ЦД	140
3.2.3. Выводы по результатам экспериментов	143
3.3. Разработка и техническая реализация концепции объектно-ориентированных ЦД двухклетевого стана «тандем»	144
3.3.1. Характеристика стана	144
3.3.2. Экспериментальная оценка результатов виртуального ввода	148
3.4. Применение НЛ при реконструкции летучих ножниц агрегата поперечной резки полосы	150
3.4.1. Описание объекта исследований	150
3.4.2. Разработка системы управления	152
3.4.3. Разработка цифрового двойника на виртуальных машинах	155
3.4.4. Виртуальная настройка алгоритма летучих ножниц	154

3.5. Применение ПЛК с многоядерными процессорами для виртуальной наладки электротехнических систем	159
3.5.1. Обоснование применения	160
3.5.2. Конфигурация цифровых двойников на ПЛК с многоядерным процессором	161
3.5.3. Пример технической реализации	164
3.5.4. Выводы по результатам исследований	168
ВЫВОДЫ	169
Глава 4. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ	171
4.1. Анализ процессов при проектной настройке РДН	172
4.2. Разработка способа и системы управления на базе РДН с переключающейся структурой	175
4.3. Нечеткий регулятор деления нагрузок электроприводов прокатной клетки	181
4.3.1. Разработка нечеткого РДН в функции разницы моментов двигателей	183
4.3.2. Разработка нечеткого РДН с каналом по производной моментов двигателей	185
4.3.3. Исследования при различных функциях принадлежности	189
4.3.4. Обсуждение результатов	192
4.4. Разработка САРТ с переключающейся структурой	194
4.4.1. Структура системы управления	194
4.4.2. Исследование разработанного способа методом моделирования	197
4.5. Ограничение силового взаимодействия валков универсальной клетки в режиме совместной прокатки	200
4.6. Способ автоматического управления процессом прокатки в черновой группе клеток непрерывного прокатного стана	202
4.7. Экспериментальный анализ разработанных систем	208

4.7.1. Результаты апробации на стане 2500	208
4.7.2. Экспериментальное исследование РДН с переключающейся структурой	212
ВЫВОДЫ	214
Глава 5. ЦИФРОВЫЕ ТЕНИ В СИСТЕМАХ	
МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ	
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	217
5.1. Обоснование направлений исследований	217
5.2. Наблюдатель упругого момента на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния	220
5.2.1. Характеристика АКФ	220
5.2.2. Разработка наблюдателя состояния на основе АКФ	222
5.2.3. Реализация наблюдателя в Matlab Simulink	227
5.2.4. Оценка адекватности	231
5.2.5. Исследования при различных угловых зазорах	233
5.3. Наблюдатель эквивалентного углового зазора в шпиндельных соединениях	236
5.3.1. Принцип косвенного определения углового зазора	236
5.3.2. Структура измерительной системы	237
5.3.3. Результаты измерения углового зазора	240
5.3.4. Обсуждение результатов	242
5.4. Разработка наблюдателя теплового состояния двигателя на основе четырехмассовой тепловой модели	244
5.4.1. Методика определения температуры обмоток и железа статора и ротора	244
5.4.2. Разработка четырехмассовой тепловой модели	249
5.5. Валидация результатов	254
5.6. Промышленные исследования наблюдателя	257
5.6.1. Анализ температуры обмоток двигателей ВГП и НГП	257
5.6.2. Анализ температуры при прокатке двух партий заготовок	259
5.6.3. Результаты и перспективы внедрения	263
ВЫВОДЫ	264

Глава 6. СИСТЕМА ОГРАНИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ УПРУГОГО МОМЕНТА	267
6.1. Задачи исследований	267
6.2. Разработка наблюдателя упругого момента с автоматической настройкой	269
6.2.1. Требования к наблюдателю	269
6.2.2. Структура наблюдателя	270
6.2.3. Виртуальная настройка наблюдателя	273
6.2.4. Расчет параметров наблюдателя	275
6.3. Проверка адекватности восстановления упругого момента	278
6.4. Анализ динамических моментов в режиме захвата	283
6.5. Анализ влияния скорости захвата металла валками на динамические показатели электромеханической системы клетки	287
6.6. Разработка способа управления электроприводом с ограничением динамического момента	291
6.6.1. Декомпозиция упругого момента	292
6.6.2. Описание способа	293
6.7. Анализ амплитуды упругого момента в режиме адаптивного подтормаживания	296
6.7.1. Разработка программы	296
6.7.2. Исследование влияния темпов ускорения и замедления	298
6.8. Реализация и исследования разработанного способа	304
6.8.1. Реализация алгоритма управления	304
6.8.2. Исследования при вариации величины момента и темпа его увеличения при захвате	306
6.9. Методика определения параметров подтормаживания по критерию минимального значения амплитуды упругого момента	307
6.10. Промышленные испытания алгоритма управления	310
ВЫВОДЫ	312

Глава 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	315
7.1. Результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов	316
7.1.1. Структура цифровой системы управления	316
7.1.2. Осциллограммы САРТ в режиме профилированной прокатки	318
7.2. Промышленное внедрение разработанного РДН с переключающейся структурой	320
7.2.1. Реализация в ПО контроллеров клетки	320
7.2.2. Экспериментальные исследования алгоритма	322
7.3. Внедрение наблюдателя упругого момента на шпинделе	327
7.4. Исследование динамики электроприводов в аварийных режимах	329
7.4.1. Анализ отключений во время прокатки	330
7.4.2. Динамические нагрузки при поломке вала	332
7.5. Анализ режима нахлеста тонкого листа на валок	334
7.6. Разработка способа и системы аварийного останова электроприводов клетки	339
7.6.1. Отличительные признаки способа	339
7.6.2. Структура цифровой системы аварийного останова	340
7.6.3. Разработка адаптивного задатчика интенсивности	342
7.6.4. Испытание алгоритма	343
7.6.5. Обсуждение результатов	346
7.7. Система тепловой защиты двигателей	347
7.8. Внедрение на реверсивном стане 1700	350
7.9. Оценка технико-экономической эффективности внедрения разработок	354
ВЫВОДЫ	356
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	360
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	365
ПРИЛОЖЕНИЯ	403

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все крупные металлургические предприятия заявляют о приверженности «цифровому» направлению развития. Диджитализация – глубокая трансформация производства, подразумевающая использование цифровых технологий, позволяет компаниям снизить операционные риски, быстрее реагировать на изменения, работать эффективно за счет возможностей виртуального выполнения операций.

По заключению специалистов ведущих предприятий Nippon Steel и Sumitomo Metal Corporation (Япония) основа любого «умного» металлургического завода – инновации снизу. На таких предприятиях множество электронных систем измерения и мониторинга объединяется в единую сеть, в результате используется широкий спектр параметров технологического процесса и технического состояния оборудования. Это повышает производительность, гарантирует высокое качество продукции, облегчает планирование обслуживания и замены оборудования. Кроме того, применение новых технологий делает работу на сталелитейных заводах более безопасной.

Движущей силой парадигмы интеллектуального производства является цифровой двойник (ЦД), английское название Digital Twin – DT. В [1–3] рассматривается роль ЦД в реализации концепции «цифровых» металлургических предприятий. Зарубежные специалисты утверждают, что «определить, что такое цифровой двойник, – сложная задача» [4]. Еще в 2020 г было отмечено, что в Википедии есть девять определений цифровых двойников [5], в настоящее время в отдельных публикациях количество определений достигает двадцати (анализ некоторых из них приводится в разделе 1).

В настоящей работе принимается определение, данное в ГОСТ Р 57700.37–2021, согласно которому «цифровой двойник – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями». Иными словами, ЦД представляется состоящим из физического объекта, виртуального аналога при условии обмена данными между ними [6]. В свою очередь, цифровая модель – это «система математических и компьютерных моделей, а

также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла».

В настоящее время ЦД все чаще рассматриваются как средство повышения производительности агрегатов за счет использования вычислительных методов, которые становятся возможными благодаря виртуальному аналогу. Важность цифрового двойника признается как в академических кругах, так и представителями промышленности. Вместе с тем, все больше разработчиков придерживается мнения, что «получение единого цифрового двойника, похожего на всю систему, и использование этого двойника в качестве единственного источника истины является иллюзорным» [7]. Это объясняется тем, что «использование одной и той же модели для симуляций на протяжении всего процесса разработки от проектирования до проверки является идеальной целью, которую трудно достичь на практике». Тем более невозможно разработать ЦД, который отражал бы сущность объекта на всех этапах жизненного цикла от разработки до утилизации. Это требует создания более простых ЦД, предназначенных для конкретного объекта, учитывающих его специфику и обеспечивающих максимальную точность на отдельных этапах жизненного цикла. Они должны быть доступными для применения как в научных исследованиях, так и в условиях эксплуатации. В диссертации они получили название «объектно-ориентированные цифровые двойники», концепция их разработки и применения обоснована впервые и реализуется на примере электротехнических систем металлургических агрегатов.

Очевидно, что применение ЦД представляется перспективным при создании, эксплуатации и модернизации прокатных станов как наиболее сложных агрегатов металлургического производства. Наиболее эффективно они могут быть применены на следующих этапах жизненного цикла электротехнических систем [8, 9]:

- на этапе моделирования при разработке и проектировании оборудования и средств автоматизации;
- на этапе ввода в эксплуатацию путем создания виртуальных систем;

- в период эксплуатации в целях перенастройки и мониторинга технического состояния;

- в системах мониторинга для on-line контроля технического состояния.

«Соответственно для различных аспектов, таких как поведение системы или устройства, могут потребоваться различные инструменты моделирования и модели с разным уровнем детализации». Практика подсказывает, что это утверждение является обоснованным. Оно подтверждает, что для практических целей необходима разработка цифровых двойников, предназначенных для применения на отдельных наиболее важных этапах жизненного цикла. В диссертации поставлена задача их разработки для этапов виртуального ввода в эксплуатацию, наладки и настройки, которые (этапы) выполняются при модернизации технологического оборудования, а также для мониторинга технического состояния в режиме штатной эксплуатации.

Концептуальные направления развития ЦД прокатных агрегатов обоснованы специалистами Primetals Technologies (совместное предприятие Mitsubishi Heavy Industries (МНН) и партнеров) [10]. Утверждается, что с развитием цифровизации заводов произошла революция в прокатном производстве. Лидер производства прокатного оборудования – компания SMS group разработала стратегии по продвижению цифровизации в сталелитейной промышленности [11]. Согласно SMS group и SMS digital основными функциями ЦД являются мониторинг, моделирование, оптимизация, прогнозирование и образование [12]. Ниже в качестве самостоятельного направления выделяется виртуальный ввод в эксплуатацию, основанный на настройке промышленных систем с помощью индивидуальных цифровых моделей, который вышеназванными специалистами не отмечен.

Вместе с тем, авторы ряда научных статей справедливо отмечают, что в промышленности сложилась ситуация, когда теоретические исследования и разработки ЦД значительно опережают их промышленное внедрение. Анализ ситуаций на металлургических заводах подтверждает, что активность практического применения цифровых технологий на действующих агрегатах низкая. В [13] отмечается, что «Информация о применении ЦД на этапах жизненного цикла промышленного оборудования ограничена. Желание представителей

промышленных кругов использовать их на своих предприятиях сдерживается отсутствием понятной методологии разработки ЦД для практических задач». По мнению авторов недостатками цифровых продуктов известных фирм – разработчиков прокатного оборудования являются сложность и узкая направленность. Цифровые двойники разрабатываются на основе специализированных цифровых платформ, в основном используемых при проектировании и строительстве новых агрегатов «под ключ». Поэтому они не получили практического применения на действующих металлургических заводах.

В связи с изложенным, объектно-ориентированные ЦД должны создаваться без применения цифровых платформ на базе известных программ, используемых на промышленных предприятиях и в научных организациях. Повсеместно распространенным программным средством является Matlab (со своими приложениями), который хорошо изучен и успешно применяется при разработке систем управления. Это направление является перспективным как для действующих, так и для вводимых в эксплуатацию прокатных агрегатов, поэтому принято за основу. На базе приложений Matlab разрабатывается и реализуется новая научная концепция диджитализации прокатного производства, основой которой является цифровой двойник. Также в процессе изложения рассматриваются варианты применения другого доступного программного обеспечения.

Не менее важной является научно-практическая проблема создания алгоритмов и систем контроля состояния электротехнических систем на основе цифровых теней, применяемых в качестве наблюдателей состояния либо отдельных координат электроприводов. Определение цифровой тени приводится в п. 1.2, ее отличием от цифрового двойника является односторонняя передача данных от физического объекта к цифровому. При этом должны получить развитие как системы on-line мониторинга, так и системы оценки состояния по результатам периодических замеров. Они должны составить основу цифровых систем защиты электрооборудования в аварийных режимах.

Представленная диссертация посвящена разработке и применению цифровых двойников и цифровых теней для электротехнических систем прокат-

ных агрегатов, которые являются объектами исследования. Исследования выполняются для агрегатов ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»), являющегося лидером отечественной металлургии. Разработки выполняются на примере прокатных станов 5000, 2500 и 2000, стана 1700 холодной прокатки, а также агрегата поперечной резки горячекатаной полосы. Предметами изучения являются виртуальный ввод в эксплуатацию, управление взаимосвязанными электроприводами, мониторинг координат и технического состояния в процессе эксплуатации. Ставятся задачи разработки и совершенствования алгоритмов управления на цифровой основе. Данные задачи должны решаться с учетом взаимосвязи электротехнических систем через металл. Подобные задачи решались многими исследователями и научными организациями, однако добиться результатов без существенных упрощений в большинстве случаев не удавалось. В современных условиях, благодаря развитию цифровых технологий и цифровых двойников, открываются новые подходы к разработке алгоритмов управления.

Безусловно, исследования в диссертации основаны на достижениях отечественных и зарубежных ученых, занимавшихся созданием автоматизированных электроприводов и систем управления агрегатов прокатного производства. В числе ведущих ученых следует отметить В.П. Бычкова [14], В.И. Ключева [15, 16], О.И. Осипова [17, 18], В.Н. Мещерякова [19, 20], Г.Я. Пятибратова [21–23], О.А. Кравченко [24, 25], А.Р. Колганова [26–29], И.А. Селиванова [30, 31], А.С. Карандаева [32–34] и других. Также следует отметить вклад специалистов-прокатчиков, труды которых легли в основу большинства современных разработок автоматизированных электроприводов прокатных станов. Необходимо выделить ведущие зарубежные фирмы, работающие в данном направлении, – это упомянутые выше SMS group (Германия), Mitsubishi Heavy Industries (Япония). В дополнение к ним следует назвать Siemens AG, General Electric (США), VAI (Австрия), Ansaldo (Италия), а также отметить разработчиков цифровых двойников – фирмы ABB (Asea Brown Boveri Ltd.), Schneider Electric, ANSYS Inc.

Целью диссертационной работы является обоснование и разработка концепции и создание комплекса объектно-ориентированных цифровых двойников и цифровых теней взаимосвязанных электротехнических систем агрегатов прокатного производства, создающих базу для реализации алгоритмов управления и контроля технического состояния оборудования, направленных на сокращение непроизводительных затрат и снижение его аварийности.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Обоснование концепции объектно-ориентированных цифровых двойников, реализованных с использованием общедоступного программного обеспечения и аппаратного моделирования Hardware-in-the-loop (HIL), предназначенных для виртуального ввода в эксплуатацию, управления и мониторинга состояния электротехнических комплексов прокатных станов.

2. Разработка комплекса цифровых двойников-экземпляров электро- и гидроприводов, двойников-симуляторов технологических взаимосвязей и агрегированных ЦД прокатных агрегатов на основе программных сред Simulink Real Time, Simscape Hydraulics и др. Анализ влияния несинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и «физической частью» на точность двойникования (воспроизведения виртуального пространства).

3. Обоснование и практическое применение методики виртуальной настройки, включающей предварительное обоснование структуры САР и/или передаточной функции регулятора и настройку с использованием HIL. Техническая реализация концепции объектно-ориентированных ЦД при реконструкции электротехнических систем прокатных агрегатов. Совершенствование алгоритмов управления в процессе пуско-наладочных работ.

4. Обоснование применения ЦД с размещением алгоритмов симулятора и отлаживаемого программируемого логического контроллера (ПЛК) на виртуальных машинах с встроенным программным обеспечением (ПО). Анализ конфигурации и разработка ЦД и на основе ПЛК с многоядерными процессорами. Промышленная апробация в электротехнических системах прокатных станов.

5. Развитие методов нечеткой логики в системах управления взаимосвязанными электротехническими комплексами. Разработка способов согласования нагрузок двигателей верхнего и нижнего валков на основе адаптивного и

нечеткого регуляторов деления нагрузок. Совершенствование алгоритмов управления электроприводами последовательно расположенных клеток с целью ограничения силовой взаимосвязи в режимах совместной прокатки. Применение НЛ для настройки регуляторов.

6. Реализация концепции объектно-ориентированных цифровых теней – наблюдателей координат электроприводов прокатной клетки. Разработка наблюдателя состояния на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния и наблюдателя упругого момента с автоматической настройкой измеряемого сигнала.

7. Разработка системы автоматического управления, обеспечивающей снижение динамических нагрузок путем предварительного разгона и адаптивного торможения электропривода после захвата раската валками. Разработка способа предотвращения аварий и системы экстренного торможения на основе датчика интенсивности с переключающейся структурой.

8. Разработка и промышленное применение наблюдателя теплового состояния двигателя на основе четырехмассовой тепловой модели, а также двухэтапной системы тепловой защиты двигателей прокатного стана.

9. Промышленное внедрение разработанных систем и алгоритмов, экспериментальные исследования, оценка технико-экономической эффективности.

Результаты решения поставленных задач отражены в семи главах.

Первая глава посвящена обзору концептуальных направлений создания цифровых двойников в промышленности и анализу возможности их применения на агрегатах прокатного производства. Отмечена неоднозначность термина «цифровой двойник», приведены его определения, известные из литературы. Охарактеризована взаимозависимость цифровых двойников, цифровых теней и цифровых моделей. Дана характеристика цифровых платформ ведущих зарубежных фирм, отмечена сложность их применения для промышленных установок, находящихся в эксплуатации. Обоснована разработка ЦД на базе прикладных программ, входящих в Matlab, с использованием моделирования НЛ. Впервые обоснован объектно-ориентированный подход (ООП) к созданию цифровых двойников, определено применение категорий цифрового двойника при его реализации. Таковыми являются ЦД-прототип (DTP), ЦД-

экземпляр (ДТИ), и агрегированный цифровой двойник (ДТА). Отмечены преимущества ООП: ориентация на конкретный промышленный объект (либо электротехническую систему) и разработка на базе доступного ПО без применения цифровых платформ.

В этой же главе представлены объекты исследования – электротехнические комплексы прокатных агрегатов ПАО «ММК», на примере которых разрабатываются цифровые двойники и цифровые тени. К ним относятся электроприводы горизонтальной клетки толстолистового стана 5000, комплекс моталок широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 2500, взаимосвязанные электроприводы ШСГП 2000 и реверсивного стана 1700 холодной прокатки, электропривод летучих ножниц агрегата поперечной резки горячекатаной полосы. Обоснована задача повышения точности двойникования (отображения виртуального пространства) за счет учета времени задержки при обмене информацией в структуре цифрового двойника. Рассмотрены основные проблемы, устранение которых должно осуществляться в рамках исследований.

Во второй главе рассматриваются научные положения и методика создания цифровых двойников электротехнических систем прокатных агрегатов. Приведены структуры ЦД с реализацией виртуальной модели на промышленном компьютере и в ресурсе ПЛК. Рассмотрен принцип создания ЦД электро-механических систем клетки стана 5000 на базе доменов Simulink Real Time и модулей пакета Simscape. Представлены модели гидравлического нажимного устройства (НУ), взаимосвязи НУ и валков через металл и системы автоматического регулирования толщины, реализованные на элементах Simscape Hydraulics. Доказана адекватность моделирования взаимосвязанных электро- и гидроприводов клетки. Приведены примеры применения HIL для оценки задержек при передаче информационных сигналов в структурах двойников электро-механической и гидравлической систем. Предложен способ определения задержек путем формирования специального тестового сигнала в ПЛК.

Третья глава посвящена применению объектно-ориентированных ЦД для виртуального ввода в эксплуатацию электротехнических систем прокатных агрегатов. Выполнена разработка агрегированного ЦД моталок стана

2500. Рассмотрена структура ЦД, разработана виртуальная модель гидравлической системы формирующих роликов. Рассмотрена техническая реализация в процессе реконструкции с заменой оборудования. Дано подтверждение адекватности результатов НПЛ и физической настройки электротехнических систем моталок.

Представлена техническая реализация концепции объектно-ориентированных ЦД в процессе ввода в эксплуатацию двухклетевого стана «тандем». Рассмотрены основные модули ЦД-прототипов и ЦД-экземпляров, входящие в структуру агрегированного ЦД стана. Дана экспериментальная оценка результатов виртуального ввода в эксплуатацию.

Рассмотрено применение НПЛ при реконструкции летучих ножниц агрегата поперечной резки полосы, что относится к случаю, когда виртуальная вычислительная машина поступает совместно с контроллером. Выполнена разработка цифровой системы управления на контроллере семейства REGUL с использованием ПО Astra.IDE без использования реального оборудования.

Исследован принципиально новый вопрос применения ПЛК с многоядерными процессорами для виртуальной наладки электротехнических систем. Предложены варианты конфигурации цифровых двойников на ПЛК с двухъядерным процессором. Результаты исследований подтверждают, что быстродействие ПЛК с двухъядерным процессором и современным ПО Codesys 3.5 в несколько раз превышает потребности, возникающие при решении технологических задач. Это открывает широкие перспективы внедрения и дальнейших исследований.

Четвертая глава посвящена совершенствованию алгоритмов управления взаимосвязанными электроприводами прокатных станов. Выполнены разработка и исследование системы управления главными электроприводами верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП) прокатной клетки на базе регулятора деления нагрузок (РДН) с переключающейся структурой (патенты №2809888 и №2822900 [35, 36]). Проведены исследования методом компьютерного моделирования и экспериментальные исследования на стане 5000, подтвердившие ряд технических преимуществ. Разработан РДН на основе алгоритмов нечеткой логики (НЛ) с использованием ресурса *Fuzzy Logic Toolbox for*

MatLab. Техническими отличиями, определяющими новизну, являются: наличие двух каналов регулирования скоростей: по разнице моментов двигателей ВГП и НГП и по производной их разницы, а также разработка нечеткого регулятора для двух взаимосвязанных электроприводов.

Разработаны способ управления гидравлическими НУ в режиме профилированной прокатки (патент №2786648 [37]). Отличием является автоматическое регулирования положения НУ на участках переменной толщины, а в квазиустановившемся режиме прокатки – автоматическое регулирования толщины раската. Сделан вывод, что в разработанной системе двойной конечный профиль формируется с высокой точностью. Это подтверждает повышение качества проката и снижение отходов с боковой и концевой обрезью.

Разработаны технические решения, направленные на ограничение силового взаимодействия валков универсальной клетки в режиме совместной прокатки (патенты №2620424 и №2687354 [38, 39]). Разработан способ автоматического управления электроприводами черновой группы клеток непрерывного стана (патент №2787290 [40]). По результатам экспериментальных исследований даны рекомендации по его внедрению на стане 2500.

Пятая глава посвящена разработке и применению цифровых теней – наблюдателей координат для контроля технического состояния электроприводов. Предусмотрена разработка наблюдателей упругого момента на основе фильтра Калмана, угловых зазоров в шпиндельных соединениях и температуры двигателей на основе четырехмассовой тепловой модели.

Разработан наблюдатель состояния электромеханической системы клетки на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния (Augmented Kalman Filter – АКФ), рассмотрены суть и преимущества аугментации. Рассмотрена схема подключения КФ в Matlab Simulink, выполнены проверка адекватности восстанавливаемого сигнала и исследования ударного приложения нагрузки при различных угловых зазорах. Разработан наблюдатель эквивалентного углового зазора (патент №2838333 [41]), приведены структура измерительной системы и результаты его восстановления.

Разработана тепловая модель двигателя на базе доменов Simscape Thermal Models, содержащая 4 массы: обмотки статора и ротора, железо статора и ротора. Представлены результаты сравнения восстановленной температуры в фиксированные моменты времени с результатами физических измерений, выполненных пирометрами на двигателе стана 5000. Подтверждено взаимное соответствие результатов с приемлемой точностью. Выполнен анализ температуры обмоток двигателей ВГП и НГП за несколько проходов и в интервале более 1 часа. Результаты позволили сделать вывод об удовлетворительном тепловом состоянии двигателей. По итогам длительных наблюдений сделан вывод о возможности их эксплуатации без ограничений при любом сорimente прокатываемых листов. Разработанный наблюдатель теплового состояния на базе четырехмассовой тепловой модели двигателя рекомендуется для расширенного внедрения на прокатных станах.

Шестая глава посвящена созданию системы ограничения динамических нагрузок электропривода прокатной клетки на основе наблюдателя упругого момента. В результате экспериментальных исследований показано, что амплитуды момента на шпинделях клетки стана 5000 кратно превышают установившийся момент при прокатке. Выполнены разработка наблюдателя упругого момента с автоматической настройкой измеряемого сигнала (с регулятором автоподстройки, патент №2830788 [42]). Выполнены расчет параметров наблюдателя, с этой целью разработана методика синтез регулятора автоподстройки. Экспериментально доказана адекватность восстановления упругого момента.

С целью обоснования способа ограничения динамических моментов выполнен анализ влияния скорости заполнения очага деформации при захвате металла валками на динамические показатели электромеханической системы клетки. Разработан способ управления электроприводом, отличительным признаком которого является адаптивное торможение после захвата с темпом, зависящим от величины нагрузки и скорости ее приложения. Разработана программа расчета упругих моментов на шпинделях (свидетельство №2023680208). Выполнен анализ амплитуды упругого момента в условиях адаптивного подтормаживания. Разработана методика определения параметров подтормаживания по критерию минимума амплитуды упругого момента

(свидетельство №202266690). Обоснованы их оптимальные значения в зависимости от темпа приложения нагрузки. По результатам экспериментальных исследований, проведенных на стане 5000, данный способ рекомендуется для внедрения в электроприводах прокатных клетей, работающих с ударным приложением нагрузки.

В седьмой главе представлены результаты экспериментальных исследований и промышленного внедрения разработанных алгоритмов управления электроприводами. Исследован адаптивный РДН, внедренный на стане 5000. Доказано, что благодаря его повышенному быстродействию осуществляется форсированное согласование моментов. При одинаковом цикле прокатки продолжительность работы с одинаковыми моментами увеличивается в 1,8 раза.

Представлен анализ упругих моментов, возникающих на шпинделях в аварийных режимах, сопровождающихся поломками оборудования (подобные комплексные экспериментальные исследования выполнены впервые). Выполнено внедрение наблюдателя упругого момента с регулятором автоподстройки. Экспериментально подтверждено, что реализация алгоритмов предразгона с последующим торможением электроприводов после захвата обеспечивает кратное снижение амплитуд упругих моментов при входе раскатов в клеть. Путем сравнения осциллограмм подтверждена адекватность процессов в динамических режимах разгона, торможения и захвата металла валками.

С помощью наблюдателя выполнено исследование динамики в аварийных режимах, вызванных отключением одного из электроприводов во время прокатки. Дана оценка динамических моментов при поломке вала. Наибольшее внимание уделено анализу аварийного режима нахлеста полосы на валок (с последующим затягиванием между рабочим и опорным валками), вызвавшего наиболее тяжелые последствия. Определены диагностические признаки начала аварии, на их основе разработан способ аварийного останова электроприводов клетки. Рассмотрены структура системы аварийного останова и схема адаптивного задатчика интенсивности, обеспечивающего экстренное торможение. Представлены результаты испытания алгоритма (методом пассивного эксперимента) для двух случаев аварийного останова. Они дают косвенное подтверждение работоспособности системы защиты.

Разработана и внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию на стане 1700 холодной прокатки система защиты двигателей от перегрева, разработанная на основе четырехмассовой тепловой модели двигателя. Согласно алгоритму, значения температуры поступают от тепловой модели в блок сравнения, где на основании сравнения с допустимыми значениями температур обмоток и железа магнитопровода формируются сигналы оповещения либо на останов по окончании цикла прокатки. Система реализует новый вариант адаптивной двухступенной защиты, модифицированный для двигателей прокатного стана (патент №2785005 [43]). Она рекомендуется для реализации на ответственных установках, где есть опасность недопустимого нагрева электрооборудования.

В заключении сделаны выводы по работе.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем: на основе концепции объектно-ориентированных цифровых двойников получили развитие теоретические представления о регулировании координат взаимосвязанных электротехнических систем прокатных агрегатов, методах on-line настройки и виртуального ввода в эксплуатацию, мониторинге технического состояния электроприводов. Получены новые знания о принципах построения цифровых двойников и цифровых теней для промышленных электротехнических комплексов, о способах повышения точности двойникового и возможностях применения современных ПЛК с многоядерными процессорами.

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые обоснованы научные положения концепции объектно-ориентированных цифровых двойников и цифровых теней электротехнических комплексов с учетом их технологической взаимосвязи, предназначенных для настройки, виртуального ввода в эксплуатацию и мониторинга технического состояния, выполняемых с использованием доступного программного обеспечения без специализированных цифровых платформ.

2. Создан комплекс цифровых двойников-экземпляров электромеханических систем, цифровых симуляторов технологического процесса и цифровых теней – наблюдателей координат электрического оборудования на основе программных сред Simulink Real Time, Simscape Hydraulics и программных паке-

тов разработки систем автоматизации, поддерживающих симуляцию и тестирование в реальном времени, включая быстрое прототипирование и аппаратное моделирование НПЛ.

3. Разработана и апробирована методика анализа влияния несинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и «физической частью» ЦД на точность двойникования. Зафиксированы запаздывание сигналов в 6...10 мс и усиление колебательных свойств системы. Для снижения запаздывания рекомендовано совместное размещение виртуальной модели и алгоритма системы управления в ресурсах ПЛК с многоядерными процессорами.

4. Обоснованы варианты конфигурации цифровых двойников в структурах ПЛК с многоядерными процессорами. Теоретически и экспериментально подтверждена эффективность применения аппаратно-программного комплекса на основе двухъядерного процессора и ПО Codesys 3.5 для виртуальной наладки электротехнических систем.

5. Научно обоснованы методы нечеткой логики на основе моделирования НПЛ в системах управления взаимосвязанными электротехническими комплексами. Предложено совершенствование методик синтеза адаптивных и нечетких регуляторов.

6. Обоснована методика создания наблюдателей состояния по координатам электротехнических систем, измеряемым в on-line режиме. Впервые разработан наблюдатель на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния, обеспечивающий повышение точности восстановления параметров многомассовой системы.

7. Положения теории автоматического управления многосвязными системами получили развитие в направлении совершенствования способов управления, обеспечивающих ограничение взаимодействия электроприводов последовательно расположенных клеток в режиме совместной прокатки.

8. Концепция ограничения динамических нагрузок прокатного оборудования средствами автоматизированного электропривода обогащена методикой настройки алгоритма адаптивного торможения, обеспечивающего снижение амплитуды момента при захвате металла валками, реализуемого регулятором с переключающейся структурой.

9. Теория нагрева электрических машин обогащена методикой контроля температуры на основе тепловых моделей, выполняемых на унифицированных модулях Simscape Thermal Models. Разработаны наблюдатель температуры двигателя на основе четырехмассовой модели и система двухэтапной тепловой защиты.

Практическая ценность работы состоит в том, что в результате разработки комплекса цифровых двойников, наблюдателей координат электротехнического оборудования, систем управления и защиты созданы предпосылки для реализации концепции «интеллектуальный прокатный стан». Внедрение результатов исследований обеспечивает возможности производства проката с новым перечнем свойств и создает условия для импортозамещения продукции предприятий металлургической отрасли.

Получены следующие практические результаты:

1. С использованием ЦД и новых алгоритмов управления на стане 5000 внедрены в промышленную эксплуатацию: адаптивный РДН с переключающейся структурой, обеспечивающий форсированное согласование скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков; наблюдатель упругого момента и способ ограничения момента при ударном приложении нагрузки, включающий алгоритм адаптивного торможения двигателей клетки после захвата.

2. Комплекс цифровых двойников, внедренный в структуре агрегированного ЦД группы моталок широкополосного стана 2500, позволил произвести их виртуальный ввод в эксплуатацию при реконструкции с заменой оборудования. Это обеспечило сокращение времени ПНР не менее чем в 5 раз и снижение материальных издержек за счет исключения нештатных ситуаций.

3. Комплекс виртуальных ПНР электрооборудования обеспечил трехкратное сокращение времени и трудозатрат при вводе в эксплуатацию нового реверсивного стана 1700 холодной прокатки.

4. Технология ПНР, предусматривающая размещение симулятора и отлаживаемого ПЛК на виртуальных машинах, применена при реконструкции летучих ножниц АПР. В результате время реконструкции составило менее 10-ти часов при плановом показателе – 48 часов.

5. На стане 2500 обеспечены: повышение качества смотки полосы и устранения дефектов на полосе за счет реализации усовершенствованных алгоритмов регулирования координат электромеханических систем формирующих роликов; расширение сортамента за счет производства полос толщиной до 30 мм со смоткой в рулон.

6. На стане 1700 внедрены алгоритм и программа автоматизированного анализа тепловых режимов электроприводов, система двухступенной защиты двигателей от перегрева.

Суммарный экономический эффект от внедрения разработок составил 19,5 млн. руб./год, что подтверждено соответствующими актами.

Выполненные разработки рекомендуются для внедрения на прокатных станах независимо от рода тока и типа электроприводов. Их преимуществом является высокая эффективность при отсутствии капитальных затрат.

Методика проведения исследований.

Теоретические исследования основывались на положениях теории электропривода, теории автоматического управления, методах операционного исчисления. Решение отдельных задач выполнялось с использованием аппарата передаточных функций, ЛАЧХ, аппарата нечеткой логики, численных методов решения дифференциальных уравнений, методов преобразования структурных схем и структурного моделирования. Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях путем прямого осциллографирования координат электроприводов с последующей обработкой результатов.

Обоснована и применена методика разработки ЦД электротехнических систем при виртуальном вводе в эксплуатацию, включающая: разработку цифровых моделей и алгоритмов управления в доступной среде виртуального моделирования; разработку цифрового двойника, для этого алгоритмы моделей реализуются на установленных ПЛК либо промышленных компьютерах (ПК); виртуальный ввод в эксплуатацию, коррекцию алгоритмов управления и параметров настройки; подключение ПЛК, оснащенных разработанными алгоритмами, к физическому объекту, перевод в эксплуатацию; «перенос» цифрового двойника в ПК более высокого уровня с целью on-line мониторинга состояния.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Объектно-ориентированный подход к созданию ЦД электротехнических комплексов, предусматривающий: разработку двойников-прототипов электромеханических систем; двойников-экземпляров, учитывающих конструктивные отличия и существенные взаимосвязи объекта; их объединение в агрегированный цифровой двойник более высокого уровня.

2. Методика создания ЦД электротехнических комплексов на основе НПЛ, включающая полунатурное моделирование путем создания замкнутого контура между тестируемым оборудованием и виртуальной моделью. Благодаря такому подходу исключается необходимость строго синтеза регуляторов систем автоматического регулирования технологических параметров и координат электроприводов, сокращается продолжительность ПНР.

3. Комплекс виртуальных моделей в структурах ЦД электротехнических систем на основе типовых модулей и специально созданных моделей Matlab Simulink. Методика и результаты тестирования в реальном времени, включая управляемое быстрое прототипирование и моделирование НПЛ.

4. Методика анализа влияния несинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и «физической частью» на точность двойникования. Результаты анализа запаздываний при использовании известных интерфейсов ПЛК и ПК.

5. Технология и примеры создания ЦД на основе ПЛК с многоядерными процессорами.

6. Двухканальный регулятор деления нагрузок (РДН) с нечеткой логикой (НЛ), отличием которого является включение канала регулирования по производной разницы заданий моментов двигателей. Методика настройки РДН с НЛ по критерию минимального времени согласования моментов.

7. Комплекс научно обоснованных технических решений, обеспечивающих согласование нагрузок взаимосвязанных электроприводов последовательно расположенных клеток путем автоматической коррекции скоростей в динамических режимах.

8. Наблюдатель состояния электроприводов на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния, отличительным признаком которого является добавление в вектор состояния момента нагрузки 2-й массы двухмассовой системы. Это обеспечивает повышение точности восстановления координат электропривода без применения вычислительных алгоритмов.

9. Комплекс наблюдателей координат электромеханической системы, разработанный на основе концепции объектно-ориентированных цифровых теней, включающий наблюдатели углового зазора в шпиндельных соединениях, упругого момента на шпинделях и теплового состояния двигателя на основе четырехмассовой тепловой модели.

10. Способ и система предотвращения аварий путем форсированного останова при превышении темпом нарастания момента на шпинделе предельного значения с использованием наблюдателя упругого момента. Система двухэтапной тепловой защиты двигателей на основе четырехмассовой тепловой модели, включающая: на первом этапе предупреждение персонала о перегреве и на втором этапе «рабочий» останов двигателя по завершении технологического цикла.

11. Результаты исследований и промышленного внедрения разработанных ЦД и алгоритмов управления, подтвердившие сокращение непроизводительных затрат и снижение аварийности производства.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждаются корректным применением положений теории электропривода, теории автоматического управления, математических методов и методов компьютерного моделирования; экспериментальным обоснованием научных проблем и направлений их решения; накопленным опытом наладки и настройки промышленных электротехнических систем; анализом ранее выполненных разработок и опыта эксплуатации прокатных агрегатов; верификацией разработанных моделей и валидацией результатов моделирования; на всех этапах сопоставлением теоретических и экспериментальных данных, сравнением с результатами, полученными другими авторами; успешной настройкой и вводом в эксплуатацию электроприводов стана 1700, длительной эксплуатацией внедренных алгоритмов и систем на прокатных станах 2000, 2500 и 5000.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 23 международных конференциях и заседаниях научных сообществ, в том числе: XXXII Всероссийском научно-техническом семинаре «Актуальные вопросы электропривода – 95 лет кафедре АЭП МЭИ», Москва МЭИ, 2025 г; IX, X Международных конференциях по Автоматизированному Электроприводу (АЭП), Пермь 2016 г, Новочеркасск 2018 г; XXIII Всероссийской конференция АЭП 2022, Тула 2022 г; 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Челябинск, 2017 г; 2018, 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, 2018, 2019 гг; 2020-2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con), Челябинск 2020, 2021 гг, Магнитогорск 2022–2025 гг; 2020, 2021, 2023, 2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Сочи, 2020, 2021, 2023, 2025 гг; International Conference on Industrial Engineering (ICIE), Сочи 2021 г; 2022, 2024, 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Сочи, 2022, 2024, 2025 гг; IEEE International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Магнитогорск, Банное, 2024 г; Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Магнитогорск, Банное 2023 г.

В 2014–2022 гг. работа выполнялась в рамках 4-х прямых договоров с ПАО «ММК». В 2017-2019 гг и в 2020-2022 гг. исследования выполнялись в рамках Госзаданий №13.9656.2017/БЧ от 10.03.2017 г и №FENU-2020-0020 (2020071ГЗ).

Публикации. По содержанию диссертации опубликовано 56 научных трудов, в том числе 19 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 24 статьи и доклада в изданиях, входящих в базы WOS и Scopus, из них 9 статей – в изданиях, входящих в I и во II квартиль (Q1, Q2). Получено 9 патентов РФ на изобретения, зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Глава 1. ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АГРЕГАТОВ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для того чтобы разработать концепцию объектно-ориентированных цифровых двойников и цифровых теней необходимо, прежде всего, дать их определения. Данная задача не является простой, поскольку из литературных источников известно более двадцати таких определений, и это количество постоянно увеличивается. Поэтому необходимо провести краткий анализ известных названий и оценить, какое из них соответствует перечню задач, поставленных в диссертации. Необходимо показать различия и взаимосвязь ЦД и цифровой тени, а также их место в архитектуре цифровых систем.

Нужно определить функции ЦД и требования, предъявляемые при их разработке для промышленных агрегатов, дать направления применения для электротехнических систем прокатных станов. Следует обосновать методику виртуальной настройки электротехнических систем на основе цифровых двойников, показать отличия и преимущества виртуального ввода в эксплуатацию по сравнению с традиционными методами пуско-наладочных работ (ПНР).

Поскольку в диссертации поставлена задача создания ЦД на базе доступного программного обеспечения без применения цифровых платформ, целесообразно дать краткую характеристику платформ, принадлежащих ведущим промышленным фирмам и IT компаниям. Следует оценить возможность их применения для действующих прокатных станов.

Следует обосновать применение методологии НІЛ для виртуального ввода в эксплуатацию в процессе замены оборудования и совершенствования систем управления. Целью должна быть демонстрация виртуальных ПНР при реконструкции промышленных агрегатов. Несмотря на очевидность данного направления информация по данному вопросу в литературных источниках крайне ограничена.

Объектно-ориентированный подход (ООП), обозначенный в качестве концептуального при создании ЦД, известен и применяется при создании программного обеспечения. Однако для цифровых двойников применение данного подхода предложено впервые. В отличие от широко распространенного системного подхода он является менее известным. Поэтому следует дать определение, привести обоснование и показать целесообразность его использования при создании ЦД. Очевидным преимуществом ООП является модульная конструкция, что позволяет упростить моделирование и улучшить управление сложными системами. Для этого следует обосновать классификацию (выделить категории) ЦД по уровню сложности и их назначению.

Также в представленном разделе необходимо привести информацию об агрегатах, электротехнические системы которых являются объектами исследований. К ним относятся прокатные станы ПАО «ММК» и некоторые вспомогательные агрегаты. Как отмечено во введении, основными объектами являются толстолистовой стан 5000 и широкополосный стан горячей прокатки (ШСГП) 2500, масштабная реконструкция которого завершена в 2023 году. Следует привести перечень научно-практических проблем и цифровых систем автоматического управления электроприводами, создаваемых для их решения.

Не менее важной задачей является разработка объектно-ориентированных цифровых теней – наблюдателей состояния и координат электротехнического оборудования. Необходимо определить направления их применения для решения задач, поставленных в диссертации. Целесообразна разработка наблюдателя состояния на основе фильтра Калмана, наблюдателя упругого момента с автоматической настройкой и наблюдателя температуры двигателей ВГП и НГП на основе четырехмассовой тепловой модели. Следует обосновать функции систем защиты, разрабатываемых на их основе.

Рассмотрению перечисленных вопросов посвящена представленная глава.

1.1. Концепция цифрового двойника

1.1.1. Определение цифровых двойников

Происхождение термина принадлежит Майклу Гривсу, который представил концепцию ЦД в 2003 году на лекции по управлению жизненным циклом продукта [2]. Первоначальное описание определяет цифровой двойник как *«виртуальное представление физического продукта, содержащее информацию об указанном продукте, с его происхождением из области управления жизненным циклом»*. Конечно, такое определение является сложным для понимания и со временем трансформировалось. Как отмечено во введении, определить, что такое цифровой двойник, – сложная задача. Тот факт, что в Википедии есть более 10 определений цифровых двойников, а в научных публикациях – более 20, является наглядным индикатором этой проблемы. Для некоторых авторов ЦД – это *«имитационная модель, которая отражает физические системы и позволяет их моделировать»*; для других – *«это то, что может отражать состояние реального актива, позволяя его отслеживать, контролировать и изменять»* [44].

Авторы работы [45] представили обзор определений ЦД, доступных в литературных источниках. В таблице 1.1 он дополнен анализом в период 2012–2024 гг. Однако даже в последние годы определения ЦД все еще меняются в зависимости от точки зрения исследователей и их целей. Определения наиболее распространенных концепций цифрового двойника представлены в [46–49]. В частности, рассматриваются концепции ЦД как *«функциональной системы непрерывной оптимизации процесса, образованной взаимодействием физических и цифровых производственных линий»* [46], как *«моделирование с возможностью управления в реальном времени и оптимизации продуктов и производственных линий»* [47], как *«метод или инструмент, который можно использовать при имитации и моделировании поведения и состояния объектов»* [48] и другие. Авторы [49] разработали ЦД, который предполагает взаимодействие сотрудников и координацию задач с производственной системой. В этой и других работах в качестве структурной составляющей ЦД рассматривается человек с его знаниями и опытом.

Таблица 1.1 – Определения цифровых двойников

N.	Ссылка	год	Определение DT
1	[50]	2012	DT – это многомасштабное интегрированное моделирование физического оборудования или системы, которое в полной мере использует виртуальные модели, данные датчиков в реальном времени и исторические данные об оборудовании или системе для отображения всего жизненного цикла процесса.
7	[51]	2018	DT – это отображение в реальном времени физических, виртуальных и взаимодействующих данных на протяжении всего жизненного цикла физического объекта.
8	[52]	2018	DT – это всеобъемлющее цифровое представление продукта, которое моделирует свойства, условия и поведение реального физического объекта с помощью данных и моделей.
9	[53]	2019	DT – это динамическая виртуальная модель, которая в цифровом виде создает многомерные, многофизические объекты многовременного масштаба для отражения свойств и поведения реальной среды.
10	[54]	2019	DT – это процесс моделирования, который интегрирует несколько физических величин и масштабов на протяжении всего жизненного цикла физического оборудования, используя физические модели, данные датчиков в реальном времени, данные истории эксплуатации и т.д. для построения моделей в виртуальном пространстве для завершения отображения.
11	[55]	2023	Цифровые близнецы (DT) – это виртуальные представления физических объектов, которые полностью интегрированы и в которых автоматический обмен данными происходит двунаправленным образом.
12	[56]	2024	Цифровой двойник – это динамическая, целостная цифровая копия физической системы (например, электросети, генератора или ветряной электростанции), которая постоянно обновляется данными в реальном времени от датчиков, устройств Интернета вещей и других источников. Он выходит за рамки моделирования и анализа и включает мониторинг в реальном времени, предиктивную аналитику и принятие решений. Часто является частью более крупной экосистемы, которая объединяет ИИ, машинное обучение и аналитику больших данных. Его можно реализовать в облаке.
13	[57]	2023	Цифровой двойник – это виртуальная информационная конструкция физического продукта [58], сервисной системы [59], поведения системы [60], процесса или других существующих или планируемых элементов, которые содержат полное описание соответствующего объекта. Цифровой двойник характеризуется возможностью двунаправленного обмена данными между виртуальным и физическим миром [58].

Достаточно емкое определение дано в [61]: *«Цифровой двойник – это цифровое представление сущности или системы реального мира. Реализация цифрового двойника – это инкапсулированный программный объект или модель, которая отражает уникальный физический объект, процесс, организацию, человека или другую абстракцию. Данные из нескольких цифровых двойников могут быть объединены для составного представления по ряду сущностей реального мира, таких как электростанция или город, и их связанных процессов»*. В исследуемом случае «сущностью реального мира» является прокатный агрегат, его электропривод, гидравлический привод, механическое оборудование и др.

Различия в определениях, по-видимому, связаны с акцентом, который авторы уделяют концепции ЦД. Каждый автор адаптирует определение в соответствии с интересующим назначением. Определение, представленное в публикации Консорциума промышленного Интернета [62], представляется наиболее общим и учитывает различные определения, представленные ранее. Несмотря на различие в понимании концепций, *«ЦД могут действовать в течение всего жизненного цикла продукта для целей проектирования, производства, эксплуатации и обслуживания, собирая соответствующие данные для моделирования и прогнозирования на основе моделей»* [62]. Однако в ряде публикаций возможность и целесообразность разработки ЦД для всего жизненного цикла (от проектирования до утилизации) подвергаются сомнению.

Для задач, поставленных в диссертации, наиболее близко подходит определение [63, 64], согласно которому *«Цифровой близнец представляет собой виртуальную копию своего физического актива, созданную из структурных и поведенческих моделей, в основном для базового контроля, мониторинга и оценки его производительности»*. Его поясняет структура, представленная на рис. 1.1 [65]. Определение, согласно ГОСТ Р 57700.37–2021, упомянутое во введении, также соответствует данной архитектуре ЦД.

Для промышленных предприятий допустимо применение простого определения ЦД: *«Цифровые двойники – это копии физических производственных активов, предоставляющие средства для мониторинга и управления ими»* [5].

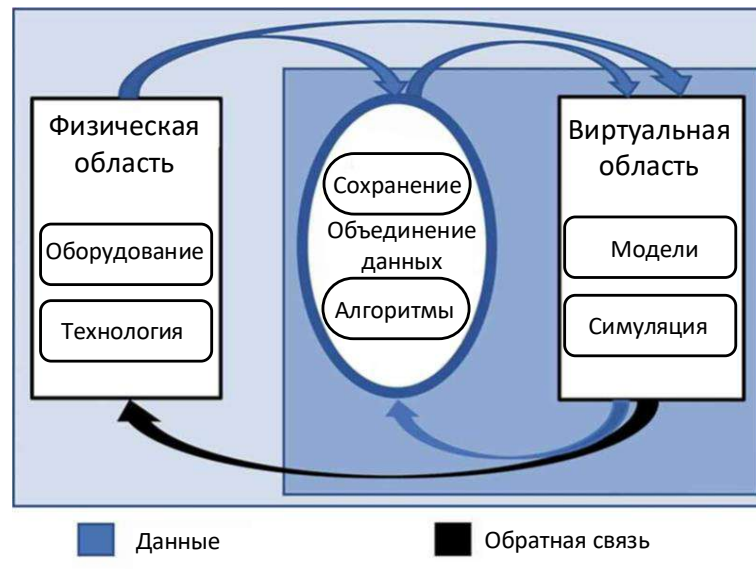


Рисунок 1.1 – Общая архитектура цифрового двойника

Неоднозначность понятий является своеобразным индикатором причин, почему цифровой двойник «не приживается» на производстве.

1.1.2. ЦД на производстве

Варианты использования цифровых двойников в жизненном цикле промышленного предприятия, обоснованные фирмой Siemens, приведены на рис. 1.2 [66]. Обзоры, обеспечивающие понимание направлений применения ЦД в промышленности, приводятся в [67–69]. Значительное количество публикаций посвящено разработке ЦД для металлургической отрасли. Так, в [70–72] рассматривается их роль в реализации концепции «цифровых» или интеллектуальных металлургических предприятий. Согласно этой концепции *«интеллектуальный сталелитейный завод оптимизирует свои производственные процессы от сырья до конечного продукта автоматически адаптирующимся способом»*. Очевидно, что применение цифровых двойников представляется перспективным при создании и совершенствовании прокатных станов как наиболее сложных агрегатов металлургического производства. При этом уделяется внимание созданию ЦД технологических линий и их разработке для решения проблем организации производства.

Несмотря на то, что были проведены подробные исследования ЦД и их приложений, большинство существующих подходов ориентированы на конкретные объекты. Поэтому основная идея применения ЦД на производстве:

динамическое виртуальное программное представление соответствующих физических активов и процессов. В данном контексте говорить о цифровом двойнике означает говорить о цифровой копии машины (либо ее отдельной компоненты), производственной линии или даже всего завода в процессе их развития или изменения состояния [8].

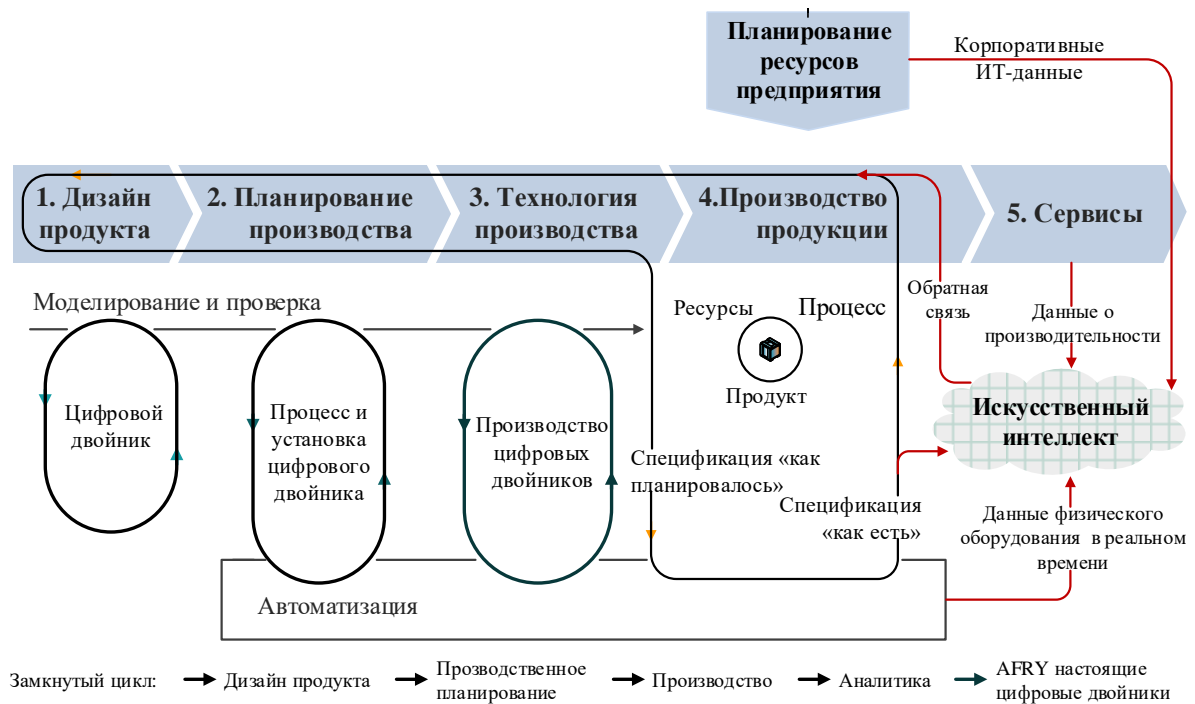


Рисунок 1.2 – Различные цифровые двойники в жизненном цикле предприятия

В качестве примера, на рис. 1.3 приведена структура цифрового двойника автоматизированного электропривода. Основными элементами являются физический объект (непосредственно электропривод) и цифровой объект (виртуальная модель). Однако в последующих главах будет показано, что в ряде случаев на начальной стадии разработки и пусконаладочных работ наличие физического объекта не обязательно. В таких случаях физический объект заменяется моделью, реализованной в отдельном ПЛК либо на отдельном ядре многоядерного процессора. При этом наладка электротехнической системы упрощается, а риски возникновения нештатных ситуаций в процессе ПНР полностью исключаются.

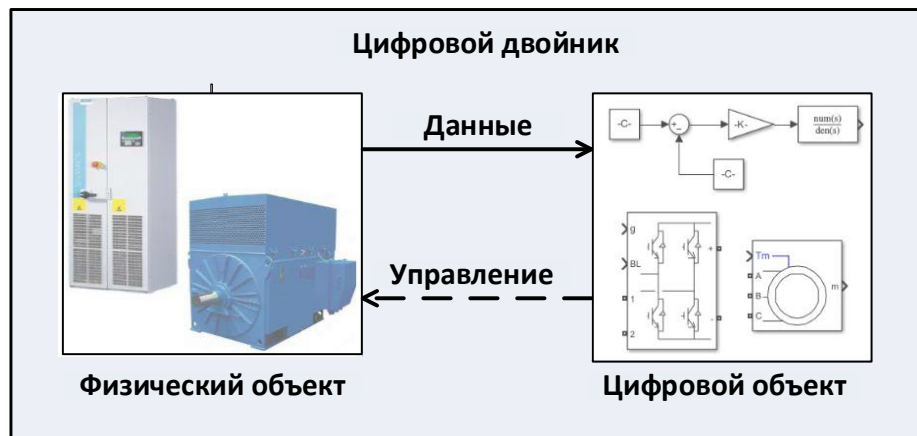


Рисунок 1.3 – Структура цифрового двойника автоматизированного электропривода

1.1.3. Функции цифрового двойника

В [73] утверждается, что *«существует множество приложений и вариантов использования цифрового двойника, и, поскольку это очень активная область исследований и инноваций, список постоянно растет»*. Общие направления применения ЦД включают:

- проверку моделей системы на реальных данных;
- обеспечение поддержки принятия решений и оповещений для пользователей;
- прогнозирование изменений в физических системах с течением времени;
- открытие новых возможностей приложений и перспектив развития.

Как отмечено во введении, согласно SMS group и SMS digital, основными функциями цифровых двойников являются [12]:

Мониторинг: вся необходимая информация визуализируется в доступной форме. Это позволяет отображать данные в реальном времени.

Моделирование: тестирование новой продукции или производственных процессов на цифровом двойнике.

Оптимизация: моделируя поведение объекта, можно заранее выделить узкие места в материальном обеспечении или логистике.

Прогнозирование: с помощью машинного обучения и искусственного интеллекта критические аспекты процессов могут быть предсказаны и адаптированы к текущим обстоятельствам.

Образование: идеальное воспроизведение реальных машин и процессов в виртуальном мире в сочетании с визуализацией позволяет персоналу быстро получить информацию для обучения.

Однако здесь не упомянута еще одна важная функция – это виртуальный ввод в эксплуатацию. В связи с этим ниже обосновано применение концепции цифровых двойников в процессе пуско-наладки и виртуального ввода электротехнических систем в эксплуатацию. **Новая функция** – это виртуальная настройка регуляторов автоматизированных электроприводов с использованием аппаратного моделирования *Hardware-in-the-loop simulation (HIL)*. HIL – это тип моделирования в реальном времени, которое используется для тестирования алгоритмов управления [74] (более подробно рассматривается в п. 1.4.2). Для его реализации в общем случае ***используется компьютер реального времени для виртуального представления модели, а также логический контроллер***. Для управления процессами часто применяется операционная система QNX.

С учетом таких возможностей ***смысл в строгом синтезе регуляторов сложными математическими методами теряется***. Предлагается следующая методика виртуальной настройки:

- предварительное «грубое» обоснование структуры системы управления и передаточной функции регулятора;
- настройка с помощью моделирования HIL.

Такой подход принят на ММК при вводе в эксплуатацию и модернизации прокатных станов. Забегая вперед, можно утверждать, что он обеспечивает следующие преимущества:

- позволяет выполнять пуско-наладку даже на стадии проектирования (хотя чаще – на стадии виртуального ввода в эксплуатацию);
- сокращает проектные ошибки до 35%;
- сокращает объем пуско-наладочных работ до 40% [9].

Как показано на рис. 1.2, цифровые двойники наиболее эффективно могут быть применены на следующих этапах жизненного цикла электротехнических систем:

- на этапе моделирования при разработке и проектировании оборудования и средств автоматизации;
- на этапе ввода в эксплуатацию путем создания виртуальных систем;
- в период эксплуатации с целью мониторинга технического состояния в on-line режиме.

Требования к создаваемым ЦД:

1. Должны обеспечивать имитацию режимов исследуемого агрегата либо отдельного технологического узла (прокатной клетки, моталки, нажимных устройств и др.).
2. Параметры и настройка локальных систем должны соответствовать заданным для исследуемого объекта.
3. Должны воспроизводиться все существенные взаимосвязи отдельных автоматизированных систем, электро- и гидроприводов технологического узла: клетки, моталки, петледержателя (при наличии) и др.
4. При разработке должны сохраняться единая концепция и элементная база систем автоматизации, принятые для данного агрегата.

Задачи, решаемые при создании ЦД:

1. Обоснование математических зависимостей и математического аппарата, минимально достаточных для достоверной симуляции объекта в аппаратно-программных ресурсах программируемых логических контроллеров либо промышленного компьютера.
2. Разработка алгоритмов и программ, обеспечивающих симуляцию объекта на языке ПЛК при исполнении симулятора в программе ПЛК либо разработка симулятора на специально выделенной вычислительной машине.
3. Изготовление цифровых двойников на серийно выпускаемых ПЛК (либо в комплексе ПЛК-ПК).
4. Практическое применение на действующих агрегатах.
5. Разработка (либо совершенствование) алгоритмов АСУ ТП, средств визуализации и интерфейсов промышленных цифровых систем. В частности, это необходимо при использовании разработанных ЦД для мониторинга состояния после перевода ПЛК в режим штатной эксплуатации.

1.2. Взаимозависимость цифровых двойников, цифровых теней и цифровых моделей

В связи с цифровым двойником часто упоминаются термины «цифровая тень» и «цифровая модель». Цифровую модель обычно характеризуют как представление актива из физического мира в виртуальном мире, требующее ручного обновления изменений [75, 76]. В свою очередь *«цифровая тень состоит из агрегированных следов данных и моделей»* [77]. Таким образом, *цифровые тени обычно описываются как виртуальное представление актива, которое позволяет автоматически отражать изменения из физического мира в виртуальном*. Однако правильная таксономия (классификация и систематизация) терминов «цифровая модель», «цифровая тень» и «цифровой двойник» все еще обсуждается» [78].

Основываясь на приведенных выше определениях можно отметить общее понимание цифровых двойников как виртуальных аналогов физических объектов. В рамках этих определений термины «цифровая модель», «цифровая тень» и «цифровой двойник» часто используются как синонимы. Вместе с тем эти определения отличаются уровнем интеграции данных между физическим и цифровым аналогами. Некоторые цифровые представления моделируются вручную и не связаны с какими-либо существующими физическими объектами (их можно отнести к цифровым моделям). В то же время другие полностью интегрированы с обменом данными в реальном времени. Поэтому авторы публикации [75] предложили классификацию цифровых двойников на три подкатегории в соответствии с направлениями обмена данными (таблица 1.2). Различия, отраженные в этих определениях, поясняет рисунок 1.4.

В [57] сделан оригинальный вывод: *«Только путем объединения цифровой модели, цифровой тени и расширения цифровой тени с передачей информации в физический мир можно создать полный цифровой двойник»*, как показано на рис. 1.5. Вероятно, это наиболее достоверная структура, поясняющая связь между двойником, тенью и цифровой моделью. На рисунке показано, что цифровая тень и модель могут быть представлены как составные части цифрового двойника. Во всех предыдущих структурах давалось пояснение только по односторонней (в цифровой тени) или двусторонней связи (в ЦД)

между моделью и объектом (либо об ее отсутствии, как в цифровой модели). Представленная структура дает более полное понимание их взаимозависимости.

Таблица 1.2. Определения цифровой модели, цифровой тени и цифрового двойника

Цифровая модель	Цифровая тень	Цифровой двойник
Представляет собой симуляцию физического процесса и характеризуется ручным обменом данными между реальными и цифровыми объектами.	Имеет односторонний автоматизированный поток данных от реального к цифровому объекту, который обычно определяется как эмуляция физического актива или процесса. Типичными задачами являются моделирование в реальном времени и мониторинг процесса.	Реализует автоматизированный двусторонний поток данных между физическими и цифровыми объектами. К характерным задачам следует отнести виртуальный ввод в эксплуатацию и управление производством.

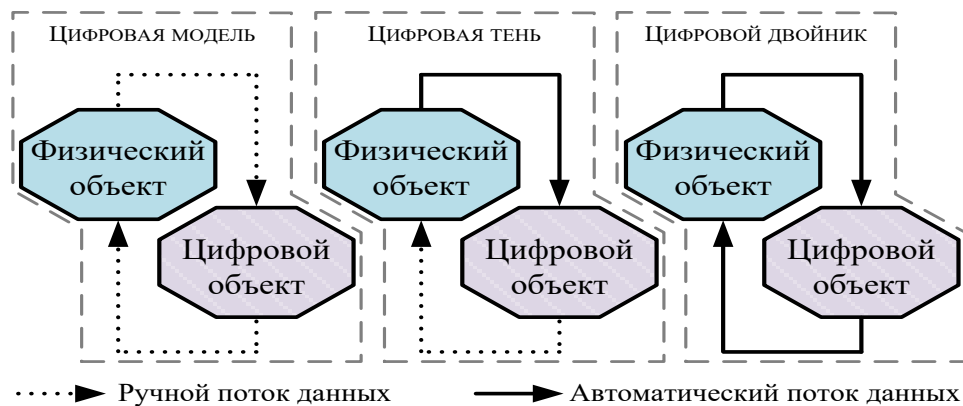


Рисунок 1.4 – Схемы обмена информацией в структурах цифровой модели, тени и ЦД

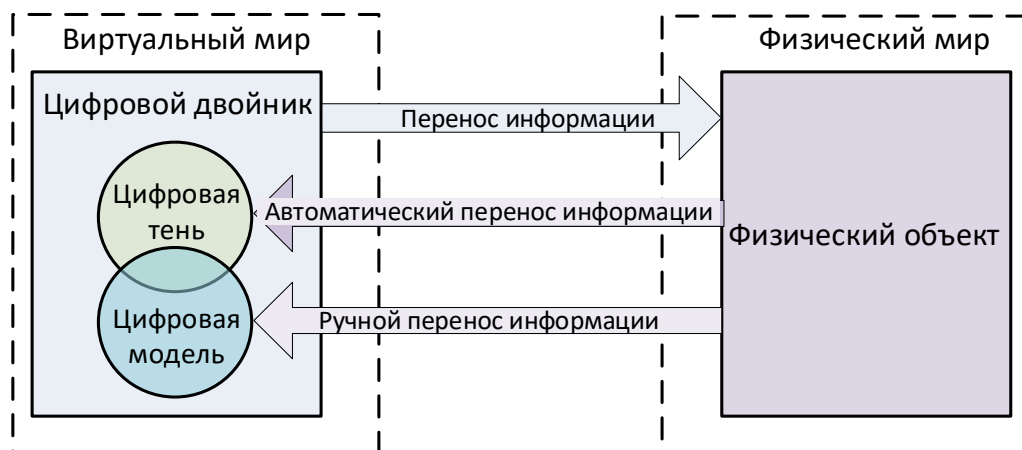


Рисунок 1.5 – Взаимодействие цифрового двойника с физическим миром

1.3. Характеристика цифровых платформ для разработки промышленных ЦД

Ниже приводится краткая информация о программных средствах и платформах на базе которых развивается выпуск ЦД ведущими компаниями-производителями оборудования промышленного назначения. Характеристики цифровых платформ кратко представлены в табл. 1.3. Информация взята из корпоративного издания [79] и других доступных источников.

Таблица 1.3 – Цифровые платформы ведущих фирм

Компания	Платформа	
	Название	Характеристика
Siemens AG	Продукты NX, Simcenter, Technomatix и Teamcenter и др., а также TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal)	– интегрированная среда разработки ПО систем автоматизации технологических процессов.
SMS group	стратегии по продвижению цифровизации в сталелитейной промышленности	В основу положен подход Plug&Work – аппаратное моделирование в цикле.
General Electric (GE)	Asset Performance Management/APM	– облачная IoT-платформа Predix; предлагает комплекс цифровых решений для управления эффективностью производственных активов.
ABB (Asea Brown Boveri Ltd.)	ABB Ability Advanced Process Control	– решение для металлургической отрасли.
Schneider Electric	AVEVA, RIB и IGE-XAO	– портфель программных продуктов для создания цифровых двойников на базе BIM-технологий.
Conwertim (входит в структуру GE Energy)	«Технологическая система регулирования – TER»	– разработана для станов холодной прокатки.
Инжиниринговый центр СПбПУ & группа компаний CompMechLab	CML-Bench	Ядро платформы составляет SPDRM-система (SPDRM – Simulation, Process, Data & Resources Management) собственной разработки.

Компания **Siemens AG** имеет разработки в основных областях, включая электротехнику, электронику, энергетическое оборудование. На уровне проектирования и подготовки производств она располагает широкой линейкой цифровых инструментов, включая продукты NX, Simcenter, Technomatix и

Teamcenter и др. [79]. При разработке цифровых моделей используется TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) – интегрированная среда разработки программного обеспечения систем автоматизации технологических процессов от уровня приводов и контроллеров до уровня человеко-машинного интерфейса. Также реализует концепцию комплексной автоматизации и развивает семейство систем автоматизации SIMATIC. Компания предлагает услуги для создания ЦД, в том числе человеко-машинный интерфейс [80] и портфель Digital Enterprise Suite [81]. Он включает ЦД для оборудования для транспортировки материалов.

General Electric (GE) – еще один лидер в области ЦД. В 2015 г General Electric создала обособленное подразделение для разработки программного обеспечения (GE Digital), которое развивает возможности применения цифровых решений в области промышленного интернета и технологии «Цифровой двойник» [79]. Эта технология обеспечивает создание интеллектуального производства на основе анализа больших данных (Big Data), а также физических и статистических моделей оборудования. Целями являются своевременное обнаружение неисправностей и прогнозирование технического состояния.

Однако, несмотря на широкий спектр направлений, информации о разработке ЦД для металлургических заводов нет.

ABB (Asea Brown Boveri Ltd.) – мировой лидер в области электротехники, энергетического машиностроения и информационных технологий. В июне 2020 г компания представила решение для металлургической отрасли – ABB Ability Advanced Process Control [82]. Разработка обеспечивает моделирование технологических процессов для достижения стабильности работы оборудования и систем, что влияет на качество продукции, позволяет повысить производительность и сократить затраты. Утверждается, что решение обеспечивает внедрение систем управления на основе прогнозирующих моделей, а также сбор аналитических данных, необходимых для высокого уровня автоматизации и оптимизации процессов.

Компания **Schneider Electric** развивает свой собственный портфель программных продуктов для создания цифровых двойников на базе BIM-технологий. Компания предлагает решения, охватывающие весь жизненный цикл от

проектирования и сборки, включая единую инженерную платформу AVEVA, RIB и IGE-XAO, до эксплуатации и обслуживания, включая производительность активов AVEVA's Asset Performance и Planning & Operations, а также EcoStruxure™ Advisors [79]. Утверждается, что эти возможности предоставляются как локально, так и в облаке в зависимости от технологии и предпочтений клиентов. Данные программные продукты востребованы в нефтегазовой отрасли и энергетике. Рекомендаций по их использованию в металлургической отрасли нет.

Авторы аналитического обзора [79] утверждают, что «Российский рынок ЦД находится на начальной стадии развития, и оценок его объема пока не существует». Однако в России существует ряд компаний, которые могут поставлять технологии, компоненты и отдельные продукты для построения ЦД.

Вместе с тем, ведущими компаниями проводятся отдельные разработки ЦД для прокатных станов. Так, компания **Conwertim** (входит в структуру GE Energy) разработала «Технологическую систему регулирования – TER», в которую включены все функции, имеющие прямое влияние на качество продукции станов холодной прокатки. Их краткий обзор приведен в [79].

Как отмечалось выше, лидер производства прокатного оборудования – компания **SMS group** разработала стратегии по продвижению цифровизации в сталелитейной промышленности. В ее основу положен подход Plug&Work – аппаратное моделирование в цикле [83]. Он позволяет выполнять функциональные испытания системы управления перед вводом в эксплуатацию на месте. Эта концепция реализована при создании цифровых двойников для станов прокатки алюминия. Недостатками являются узкая направленность и вытекающая из этого ограниченность применения. Для ее использования требуется наличие больших вычислительных мощностей, что также ограничивает применение на действующих агрегатах.

Таким образом, информация о цифровых двойниках, доступных для масштабного внедрения на прокатных станах, созданных на базе известных цифровых платформ, практически отсутствует. В связи с этим, с учетом современного уровня развития (отсутствия) отечественных цифровых платформ, пред-

ставляется обоснованной разработка ЦД на базе известных программ, повсеместно применяемых на промышленных предприятиях и в научных организациях. Такими программами являются Matlab и его приложения Simulink Real Time, Simscape и др., которые являются хорошо изученными и успешно используются при разработке систем управления [84–86].

Применение приложения Simscape для создания ЦД промышленного оборудования представляется наиболее перспективным. Согласно определению, Simscape — это семейство программных инструментов MathWorks для физического моделирования и имитационного моделирования, которое позволяет описывать и анализировать физические системы с помощью физических блоков и соединений, а не только математических уравнений. В отличие от Simulink, который предназначен для моделирования абстрактных сигналов, Simscape моделирует реальные физические объекты и компоненты, такие как двигатели, насосы, электрические цепи и механические системы. Дополнительные продукты Simscape предоставляют более сложные компоненты, такие как системы управления и инструменты анализа. Язык Simscape, основанный на Matlab, позволяет создавать текстовые компоненты, домены и библиотеки для физического моделирования [87].

Названные приложения будут использованы для разработки цифровых моделей и алгоритмов систем управления электро- и гидроприводами прокатных агрегатов. Они являются доступными (хотя требуют наличия лицензий) и не требуют специальной подготовки пользователей. Также будут исследованы варианты цифровых двойников на основе языка Astra.IDE, позволяющем работать в редакторах стандарта IEC 61131-3 ПЛК, и в среде Controller Development System (Codesys 3.5), применяемой для ПЛК, оснащенных многоядерными процессорами.

1.4. Методология создания промышленных ЦД

1.4.1. Характеристика Simulink Real-Time

Далее в диссертации будет осуществлена разработка объектно-ориентированных ЦД электротехнических прокатных агрегатов систем на базе упомянутого приложения Simulink Real Time с использованием блоков из пакета

Simscape. Как упоминалось выше, Simulink Real Time поддерживает симуляцию и тестирование в реальном времени, включая управляемое быстрое прототипирование и аппаратное моделирование HIL. В HIL используется компьютер реального времени в качестве средства виртуального представления тестируемой модели, а также реальный ПЛК. Аппаратное обеспечение разработки содержит интерфейс, с помощью которого осуществляется управление процессами. Принцип моделирования HIL рассмотрен в [88].

В структуру Simulink Real Time входит модуль Simulink Real-Time Simulation and Testing, который позволяет создавать приложения реального времени на основе моделей Simulink и запускать их на специализированном компьютерном оборудовании, подключенном к физической системе. Данный модуль позволяет использовать Simscape для быстрого создания моделей с физическим подходом к моделированию для реализации HIL. На его основе предложено разрабатывать двойники, предназначенные для использования при виртуальном вводе в эксплуатацию, контроле состояния и замене оборудования, а также при модернизации технологического процесса прокатных агрегатов. Следует заметить, что информация о применении Simulink Real-Time в сочетании с HIL для создания цифровых двойников производственных агрегатов в литературных источниках не встречается. Поэтому можно утверждать, что такое применение будет осуществлено впервые.

1.4.2. Аппаратно-программное моделирование HIL

Аппаратное моделирование в контуре (HIL) использует модель для имитации отклика реальной электромеханической системы и управляется реальным контроллером. Заменяв такую систему ее виртуальной версией, можно протестировать управляющее программное обеспечение на ранних этапах. Анализ литературных источников показал, что развитие моделирования HIL идет по двум взаимосвязанным направлениям. Таковыми являются:

1. **Hardware and software prototyping** – это метод, используемый для тестирования встроенных систем путем подключения контроллера к моделируемой среде, которая имитирует поведение физической системы. Это позволяет

проверять функциональность и надежность алгоритмов управления «контролируемым и повторяемым образом, часто даже до того, как физическая система появится на свет» [89]. В связи с прогрессом в области процессорных и программных технологий стало возможным использовать постепенный и полный подход к проектированию, интеграции и тестированию систем. Этот подход, который традиционно применялся к очень большим и сложным проектам, называется моделированием в реальном времени (RT).

2. Hardware-in-the-Loop, получившее в отдельных источниках название «Semi-naturalistic modeling» (полунатурное моделирование), – это реалистичное моделирование, которое достигается благодаря замкнутому контуру между тестируемым оборудованием (HUT) и моделированием в реальном времени [90]. Такой вид моделирования позволяет снизить затраты на отладку и общие трудозатраты при тестировании. Отмечено, что «известные цифровые платформы, такие как National Instruments, dSPACE, Typhoon HIL или набор инструментов MATLAB Simulink Real-Time предоставляют мощный инструмент для эффективных и успешных исследований в различных областях».

Реализация данных подходов рассматривается во многих научных публикациях. Так, авторы [91] предлагают метод реализации недорогой системы аппаратного обеспечения в контуре для проектирования, тестирования и анализа преобразователей мощности и микросетей. Этот подход использует цифровой сигнальный процессор (DSP) Texas Instruments в качестве ядра HIL. Все дифференциальные уравнения преобразователей мощности решаются в реальном времени средствами DSP и отображаются на цифро-аналоговых выходах. Экспериментальные результаты сопоставлены с откликом HIL. Утверждается, что предлагаемая технология может сократить время и стоимость тестирования. Однако коммерческие HIL-устройства, такие как Typhoon, dSPACE и RTDS, имеют значительную стоимость, что ограничивает их применение для промышленных задач. Тем не менее, данная разработка заслуживает внимания, поскольку доведена до практического использования. Она принята в качестве аналога при реализации подхода, предложенного в настоящей работе.

В [89] отмечается, что «благодаря развитию таких программных инструментов как Matlab Simulink с его приложениями Real Time Workshop (RTW) и

Real Time Windows Target (RTWT), симуляторы реального времени широко используются во многих областях, таких как промышленность, образование и научно-исследовательские институты». Это позволяет частично устранить указанный выше недостаток (ограниченную доступность). В [92] рассмотрены аппаратные платформы, распространенные при моделировании в реальном времени электрических машин.

В [93] отмечается, что HIL-моделирование все чаще используется для оценки характеристик электроприводов. Предлагаются три различных вида HIL-моделирования: на уровне сигнала, на уровне мощности и на механическом уровне. Также значительное внимание уделяется применению HIL для разработки и виртуальной настройки силовых преобразователей. В [94] отмечается, что «точные модели силовых электронных преобразователей могут значительно повысить точность аппаратно-программных HIL-симуляторов». Публикация [95] посвящена разработке и внедрению недорогой платформы управления в реальном времени для приложений силовой электроники, в [96] выполнено детальное моделирование в реальном времени силовых преобразователей и электрических машин.

Вместе с тем, информация о применении HIL-симуляторов при модернизации и реконструкции действующих промышленных агрегатов ограничена. Полунатурное моделирование и прототипирование HIL для отдельных установок в литературных источниках не встречается (за исключением авторских публикаций).

1.5. Объектно-ориентированный подход к созданию цифровых двойников

Известно, что при разработке электромеханических и мехатронных систем промышленных механизмов преимущественно применяется структурный подход (СП). Согласно определению, это метод анализа, который рассматривает объект как систему взаимосвязанных элементов, объединенных определенной структурой. Он предполагает изучение структуры объекта, выявление его составных частей и связей между ними, а также анализ функций этих элементов в рамках единого целого. В [97] отмечается, что к основным

преимуществам СП относятся упрощение отладки и тестирования, а также снижение вероятности возникновения ошибок. Недостатками являются сложность реализации логических структур, а также трудности при внесении изменений в уже существующую структуру. Безусловно, эти недостатки проявляются при разработке электротехнических комплексов прокатных станов методами СП.

Стремление избавиться от названных недостатков привело к развитию новых идей, основанных на объектной декомпозиции [98]. Такой принцип разработки аппаратно-программных систем получил название объектно-ориентированного подхода (ООП). В [9] предложена концепция создания относительно простых объектно-ориентированных цифровых двойников. Они должны создаваться без применения цифровых платформ на базе известных программ, используемых на промышленных предприятиях и в научных организациях. Концепция основана на известном разделении ЦД на следующие категории [58]:

- цифровой двойник-прототип (DTP) – виртуальный аналог реального физического объекта. Он содержит всю информацию об объекте, например, трехмерную модель, математическое описание физических процессов и др.;
- цифровой двойник-экземпляр (DTI) содержит данные, описывающие физический объект. Сюда относятся сведения о материалах и компонентах изделия, информация о рабочих процессах, например, о деформации металла или межклетевом натяжении, операционные данные от датчиков и др. Типичными DTIs технологических линий являются модели взаимосвязи ЦД через обрабатываемый материал (для прокатных станов это связь через полосу);
- агрегированный цифровой двойник (DTA) – система, которая объединяет все цифровые двойники и их реальные прототипы, позволяющая собирать данные и обмениваться ими в реальном времени.

Расшифровка аббревиатур и обобщенная информация об этих понятиях приведены в таблице 1.4. Указанные аббревиатуры будут использоваться далее при изложении материала.

Отличительными признаками объектно-ориентированных цифровых двойников являются:

1. Ориентация на конкретный объект, будь то электромеханическая система клетки или моталки, либо отдельный двигатель или преобразователь частоты.

2. Разработка на основе доступного программного обеспечения без применения цифровых платформ.

3. Предназначение для применения не на всех, а только на отдельных этапах жизненного цикла, для которых создается данный ЦД.

Таблица 1.4 – Категории цифрового двойника, определенные М. Гривсом

Название		Аббревиатура	Пояснение	Характеристика
Русское	Англ.			
Цифровой двойник – прототип	<u>Digital Twin Prototype</u>	DTP	виртуальный аналог реального физического объекта	состоит из проектов, анализа и процессов, необходимых для производства физического актива
Цифровой двойник – экземпляр	<u>Digital Twin Instance</u>	DTI	это DT каждого отдельного экземпляра актива после его изготовления	содержит данные, описывающие конкретный физический объект
Агрегированный цифровой двойник	<u>Digital Twin Aggregate</u>	DTA	система, которая объединяет все цифровые двойники и их реальные прототипы, позволяющая собирать данные и обмениваться ими в реальном времени	агглютинирует (объединяет) все DTI, а его агрегированные данные можно использовать для прогнозирования обслуживания DTI и для улучшения будущих проектов
Среда цифровых двойников	Digital Twin Environment	DTE	многодоменное приложение, используемое для управления цифровым двойником в различных целях	осуществляет: – прогнозирование будущего поведения и производительности физического продукта; – сбор информации.

Это определяет следующие преимущества ООП при создании ЦД (они же являются ключевыми признаками подхода) [99]:

1. Модульная конструкция. Отдельные компоненты (двигатели, механические передачи, гидравлические устройства и т.д.) рассматриваются как самостоятельные объекты, что упрощает проектирование, модификацию и повторное использование частей системы.

2. Инкапсуляция (ограничение доступа) – это процесс отделения друг от друга элементов объекта, определяющих его устройство и поведение. Назначением является то, что «никакая часть сложной системы не должна зависеть от внутреннего устройства какой-либо другой части. Каждый объект инкапсулирует свои данные (например, скорость двигателя, крутящий момент) и методы (управление скоростью, расчет крутящего момента), обеспечивая целостность данных и уменьшая непреднамеренные побочные эффекты.

Инкапсуляция предоставляет только интерфейс для взаимодействия с объектом. Данный принцип используется большинством производителей электрического и электронного оборудования. Как правило, алгоритмы управления и программные коды имеют ограниченный доступ (либо вообще недоступны) для пользователя. Это ограничивает вмешательство персонала в проектную настройку систем управления, что гарантирует надежную эксплуатацию, хотя часто вызывает нарекания со стороны персонала.

3. Наследование и полиморфизм. Сложные системы могут быть созданы путем наследования свойств базовых классов (например, класса электрических машин) и определения специализированного поведения для различных типов (синхронных, асинхронных двигателей и др.).

4. Моделирование и анализ. Объектно-ориентированные модели можно легко создавать с помощью таких инструментов, как Simulink, что позволяет анализировать процессы системы в различных условиях.

Объектно-ориентированный подход имеет важное значение для создания цифровых двойников электротехнических комплексов прокатных станов, обеспечивая виртуальный ввод в эксплуатацию, оптимизацию производительности и предиктивное обслуживание. Это позволяет реализовать модульную конструкцию, упростить моделирование и улучшить управление сложными многосвязными системами.

1.6. Виртуальный ввод в эксплуатацию

Преимущества и проблемы применения цифровых двойников для виртуального ввода в эксплуатацию (virtual commissioning – VC) промышленных физических активов рассмотрены в [100–104]. В [105] отмечается, что использование цифрового двойника позволяет сократить время ввода в эксплуатацию на 40%. Авторы [106] утверждают, что *«виртуальные модели, разработанные для VC, помогают разработчикам систем не только на этапе физического построения, но и на следующих этапах жизненного цикла, предоставляя общую виртуальную модель и цифрового двойника производственных процессов и продукта»*.

Виртуальный ввод в эксплуатацию производственных систем исследуется более 10 лет. *«Его цель состоит в том, чтобы протестировать производственные системы и связанные с ними программы управления с помощью моделирования, проводимого до того, как будут реализованы реальные системы»* [100]. В [107] отмечается, что *«VC – это практика использования технологий моделирования для проверки поведения системы с помощью виртуальной модели перед ее подключением к реальной системе»*. Согласно [108] переход к виртуальным решениям означает, что ввод в эксплуатацию может начаться на ранней стадии процесса разработки, поскольку для этого не требуются какие-либо физические активы. В результате ошибки выявляются на ранней стадии процесса, что значительно повышает темпы ввода в эксплуатацию и снижает затраты. Основная мотивация использования VC заключается в том, что системы управления можно интегрировать и тестировать до построения физической системы [109]. В дополнение к этому открывается возможность непрерывного тестирования при эксплуатации. Это обеспечивает повышение надежности и позволяет лучше справляться с изменениями [110].

Поскольку цифровые двойники являются точным представлением физических активов, их можно использовать для оптимизации этапа VC. Вместо ввода в эксплуатацию новой электротехнической системы как физического объекта используется виртуальный ввод в эксплуатацию. Он включает создание цифрового двойника с последующим тестированием и проверкой в смоделированной виртуальной среде. Это обеспечивает следующие возможности:

- тестирование и отладку алгоритмов в виртуальной среде;
- виртуальное исследование работы оборудования, выявление возможных проблем и быструю оценку альтернативных решений;
- быстрое изменение операционных процедур и алгоритмов управления;
- обучение операторов и персонала в защищенных (лабораторных) условиях, что важно для электроустановок и опасного металлургического производства;
- моделирование воздействия нового оборудования на существующее оборудование для определения «узких мест» с целью их устранения до установки.

В результате вместо физической наладки объекта *VC* включает создание цифрового двойника, а затем тестирование и проверку модели в смоделированной виртуальной среде. Такой подход в сочетании с объектно-ориентированным подходом обеспечивает следующие преимущества:

1. Сокращение времени разработки. Модульная конструкция и повторно используемые компоненты (благодаря ООП) могут значительно сократить циклы разработки.
2. Улучшенная ремонтпригодность. Изменения или обновления отдельных компонентов можно вносить, не затрагивая всю систему, благодаря принципу инкапсуляции в ООП.
3. Улучшенная производительность. Точные модели и симуляции могут привести к улучшению стратегий управления и повышению производительности системы.
4. Экономия средств за счет оптимизации процессов и сокращения времени простоя.

Перечисленные преимущества будут подтверждены по мере реализации разработок, представленных ниже. *Однако возможности внедрения ограничиваются отсутствием разработанных цифровых двойников и технологий VC, основанных на доступном программном обеспечении. Отсутствуют практические примеры виртуального ввода в эксплуатацию конкретного оборудования в процессе замены. Устранение этого недостатка является одной из задач диссертационной работы.*

1.7. Задача повышения точности двойникования

Эта проблема является важной, поскольку при моделировании НІІІ используется компьютер реального времени с соответствующей операционной системой (ОС), которая имеет задержки в передаче цифровых сигналов.

Как показывает опыт эксплуатации промышленного оборудования, к отдельным системам промышленных агрегатов предъявляются жесткие требования в отношении быстродействия при передаче сигналов. Так, время цикла регулирования положения гидравлических нажимных устройств (ГНУ) прокатных клеток составляет 1-3 мс. Аналогичные показатели для высокоточных систем регулирования толщины с воздействием на положение ГНУ и регулирования скоростей листовых станов горячей прокатки составляют 2-6 мс и 10-20 мс, соответственно. В подтверждение сказанному в табл. 1.5 приведены основные характеристики систем управления ГНУ, введенных в работу на прокатных станах ММК в последние 15 лет. Современные САР ГНУ реализованы на базе быстродействующих ПЛК, также указанных в таблице.

Очевидно, что при создании ЦД для целей виртуального ввода в эксплуатацию и наладки необходимо обеспечивать такое же или близкое время обмена сигналами между PLC и моделью как и на реальном объекте. Однако в известных отечественных и зарубежных разработках не учитываются задержки времени, которые возникают непосредственно в структуре ЦД (задача их исследования здесь сформулирована впервые). Эти задержки зависят от конфигурации ЦД, интерфейсов PLC и PC и соответственно от дополнительного времени, необходимого для поступления сигналов при обмене данными. Они оказывают влияние на процессы обмена информацией, поэтому оценка и учет реального быстродействия при обмене информацией необходимы при создании ЦД. Не менее важной задачей является оценка влияния асинхронного обмена информацией между конкретным ЦД и системами, которые для него являются внешними.

Как показала практика разработки и внедрения ЦД, учет асинхронных процессов более целесообразен при размещении виртуальной модели физического объекта в ПК, а алгоритма (программы) управления – в ПЛК, что будет

доказано в следующем разделе. Такая конфигурация является предпочтительной в случаях, когда необходимо применение более точной модели объекта, чем в случае размещения обеих частей ЦД в ПЛК, обладающем ограниченным вычислительным ресурсом. Это повышает точность воспроизведения динамических процессов.

Таблица 1.5 – Примеры построения современных САР для ГНУ прокатных станков и их основные характеристики

Характеристика	Объект внедрения		
	ГНУ ст. 5000 ГП	ГНУ ст. 2500 ГП (чистовая группа)	ГНУ ст. 1700 ХП (реверсивный стан)
Аппаратная платформа реализации системы регулирования	PLC VME Bus, процессор 7807 (Pentium mob. 1.8GHz) с ОС реального времени VxWorks	IPC (промышленный компьютер). Core I7. 3.9GHz с ОС реального времени VxWorks	Simatic TDC CPU555 (64bit CPU с поддержкой PROFINET IRT)
Время цикла задачи регуляторов	2 мс	2 мс	1 мс
Реализация ввода-вывода сигналов	Интерфейсные платы VME Bus в корзине контроллера (счетчики импульсов, AI, AO)	Удаленный ввод-вывод с использованием полевой шины EtherCat	Удаленный ввод-вывод с использованием полевой шины ProfiNet в режиме реального времени (RT)
Запаздывания, обусловленные временами АЦП, ЦАП, обработкой счетчиков и задержкой полевой шины	Не более 2 мс (по спецификации оборудования < 1 мс)		
Среда разработки программного обеспечения автоматике	LogiCad	LogiCad	Simatic Step7 с пакетами D7-Sys, CFC
Среднее время переходного процесса контура положения ГНУ (отработка скачка задания без выхода в насыщение)	35..45 мс	35..50 мс	35..45 мс
Максимальная скорость перемещения ГНУ при максимальном усилии прокатки	До 20 мм/с	До 10 мм/с	До 10 мм/с
Максимальное усилие прокатки клетки	120 МН	40 МН	25 МН

Следует заметить, что проблемам развития цифровых систем управления электроприводами посвящены труды отечественных и зарубежных ученых, в частности, [111–115]. Однако публикаций, посвященных названному вопросу, нет.

В связи с изложенным, *важной задачей, поставленной в диссертации, является разработка методики анализа влияния асинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и «физической частью» на точность двойникования*. Необходимы разработки, направленные на повышение точности за счет снижения запаздываний при передаче сигналов как внутри структуры ЦД, так и во внешние устройства.

1.8. Характеристика объектов и задачи исследования

В представленной работе исследуются 6 основных объектов, на примере которых рассматривается решение поставленных задач. Их перечень и фотографии приведены на рисунке 1.6. Выбор обусловлен тем, что в период работы над диссертацией эти агрегаты за исключением стана 1700, подлежали реконструкции (стан 1700 вводился в эксплуатацию заново).

Как неоднократно подчеркивалось выше, важным направлением применения ЦД, являются пуско-наладочные работы, выполняемые во время виртуального ввода в эксплуатацию. Такие работы на крупном металлургическом предприятии происходят практически постоянно, в диссертации они рассматриваются в связи с решением следующих задач:

1. Внедрение ЦД для виртуального ввода в эксплуатацию и ПНР в связи со строительством новых и реконструкцией действующих агрегатов.
2. Применение ЦД для разработки систем управления либо совершенствования САР электротехнических комплексов, находящихся в эксплуатации. Такие задачи обусловлены реконструкцией с заменой оборудования.
3. Внедрение с целью повышения устойчивости технологического процесса и качества продукции путем повышения точности регулирования технологических координат.



Реверсивная клеть стана 5000



Моталки стана 2500



Реверсивный стан 1700

Агрегат поперечной резки
ПОЛОСЫ

Черновая группа ШСГП 2500

Непрерывная подгруппа ШСГП
2000

Рисунок 1.6 – Объекты исследований и виртуального ввода в эксплуатацию

В таблице 1.6 перечислены научно-практические проблемы, решение которых представлено в диссертации.

Благодаря переходу на цифровые технологии и внедрению современных ПЛК разработка систем управления выполнялась на цифровой основе, а ПНР – с использованием цифровых двойников. В тесной связи с созданием ЦД находится разработка наблюдателей состояния или координат электроприводов (цифровых теней), предназначенных для повышения надежности электро-

технических систем (табл. 1.7). Поэтому часть цифровых двойников по окончании ПНР трансформировалась в цифровые тени и использована в системах мониторинга состояния оборудования.

Таблица 1.6 – Перечень проблем и направлений их решения

Поз.	Объект	Проблемы	Задачи
1	Клеть стана 5000	1.1. Реконструкция с заменой ПЧ и системы управления	Совершенствование алгоритмов управления
		1.2. Несогласованность нагрузок ВГП и НГП	Совершенствование РДН
		1.3 Улучшение формы листа в плане	Разработка САПР с переключающейся структурой
		1.4. Ограничение силовой взаимосвязи горизонтальной и вертикальной клетей	Разработка системы управления электроприводами
		1.5. Ограничение динамических нагрузок при захвате	Разработка системы управления с предразгоном и адаптивным подтормаживанием
		1.6. Снижение аварийности оборудования	Устранение поломок, тепловая защита двигателей
2	Моталки стана 2500	Реконструкция с заменой электрооборудования	Виртуальный ввод в эксплуатацию
3	Стан 1700	Строительство	Виртуальный ввод в эксплуатацию
4	Черновая группа стана 2500	4.1. Реконструкция с заменой оборудования	Виртуальные ПНР
		4.2. Ограничение силовой взаимосвязи валков универсальной клетки	Разработка системы управления электроприводами
5	Летучие ножницы АПР	Реконструкция системы управления	Виртуальные ПНР

Таблица 1.7 – Функции наблюдателей координат электромеханических систем стана 5000

Поз.	Наблюдатель	Функции
1	– состояния на основе фильтра Калмана	Мониторинг динамических нагрузок
2	– упругого момента на шпинделе	On-line мониторинг момента на шпинделях
3	– углового зазора в шпиндельных соединениях	Периодический контроль износа шпиндельных соединений
4	– температуры двигателей	Контроль теплового состояния

К этой же проблеме относится разработка систем on-line мониторинга либо периодического контроля технического состояния, а также совершенствование систем защиты оборудования (таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Разработка систем защиты электромеханических систем

Поз.	Название	Функции	Применяемый наблюдатель
1	Защита от динамических перегрузок	Предотвращение поломок мех. оборудования	Упругого момента на шпинделях. Углового зазора.
2	Тепловая защита	Предотвращение перегрева двигателей	Температуры двигателей

1.9. Задачи совершенствования электроприводов горизонтальной клетки стана 5000

1.9.1. Технология и электромеханические системы клетки

Основным агрегатом, на примере которого выполняются разработки ЦД и цифровых алгоритмов управления, является горизонтальная клеть толстолистового стана 5000. Фотография клетки со стороны отводящего рольганга представлена выше на рисунке 1.6. Прокатка ведется в реверсивном режиме в горизонтальной и вертикальной клетях, представляющих собой единый комплекс. После каждого прохода длина и толщина раската изменяются, ширина принимается постоянной. Согласно технологии термомеханической прокатки процесс подразделяется на две стадии: черновую, включающую 5-6 проходов, и чистовую – до 19 проходов. На черновой стадии прокатывается последовательно несколько раскатов с промежуточным охлаждением (подстуживанием) на рольганге [116–118]. На чистовой стадии каждый лист прокатывается до конечной толщины.

Сортамент стана и описание силового оборудования представлены в [119], характеристики оборудования приведены в табл. 1.9. Электроприводы верхнего и нижнего валков выполнены индивидуальными на основе синхронных двигателей с частотным регулированием скорости. Установлены двигатели мощностью 12 МВт, обеспечивающие номинальный момент 1,91 МН·м (горизонтальная клеть является самой мощной прокатной клетью в Европе).

Параметры двигателей и преобразователей частоты приведены в таблицах Приложения 1.

Таблица 1.9 – Параметры оборудования горизонтальной клетки стана 5000

Наименование компонента	Наименование характеристики	Значение или описание
Прокатные валки	Диаметр рабочих валков	1210-1110мм
	Длина рабочих валков	5300 мм
	Диаметр опорных валков	2300-2100 мм
	Длина опорных валков	4950 мм
	Скорость рабочих валков при макс. диаметре валка	(0-3,17)/7,30 м/с
	Максимально допустимое усилие прокатки	120 МН
Главный привод	Тип	спаренный
	Мощность главного привода	2×12 МВт
	Частота вращения вала двигателя	(0-60)/115 об/мин
	Номинальный крутящий момент	2×1,91 МНм
	Максимальный крутящий момент при прокатке	2×3,82 МН м (200% от номин.)
	Максимальный крутящий момент перегрузки двигателя	2×4,23 МН м (225% от номин.)
	Крутящий момент при отключении двигателя	2×5,25 МН м (275% от номин.)

Упрощенная кинематическая схема клетки представлена на рис. 1.7, а [16]. Электропривод валков выполнен индивидуальным, благодаря чему осуществляются раздельное задание и регулирование координат ВГП и НГП. Это обеспечивает возможность формирования изгиба переднего конца раската в форме «лыжи» (рис. 1.7, б), что необходимо для исключения его застревания при выходе из валков и транспортировке по рольгангу. Здесь под термином «раскат» понимается полупродукт между исходной заготовкой (слябом) и конечным продуктом – листом.

Термин «формирование лыжи» или «ski-эффект», является общепринятым в теории прокатки и в прокатном производстве. Он применен во многих публикациях, посвященных листовой прокатке, в частности, в авторских статьях [120–122]. Этот процесс реализуется за счет принудительного задания начальной разницы скоростей ВГП и НГП, при этом скорость двигателя нижнего валка выше скорости двигателя верхнего валка. Максимальное заданное

рассогласование скоростей («лыжа») может устанавливаться до 10%, его величина зависит от сортамента стали, обжатия, толщины раската (номера прохода) и др.

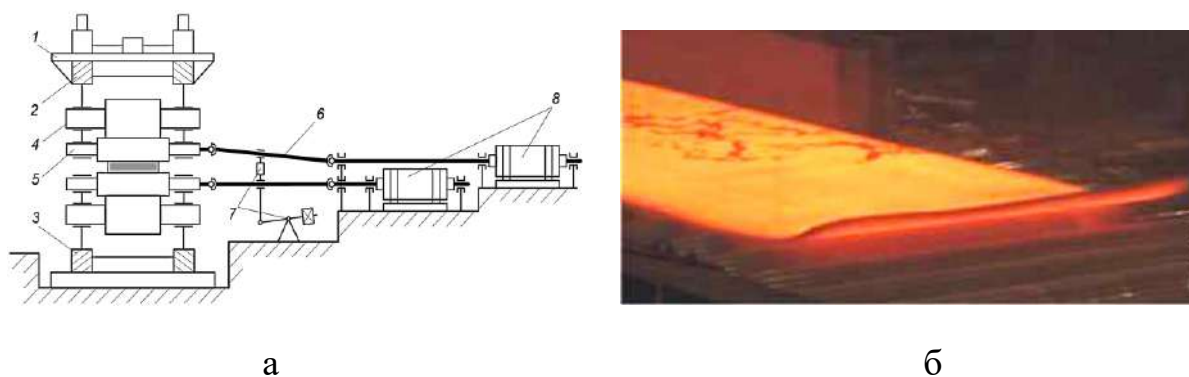


Рисунок 1.7 – Кинематическая схема горизонтальной клетки стана 5000 (а) и фотография раската на рольганге (б): 1 – станина; 2, 3 – электромеханическое и гидравлическое НУ; 4, 5 – опорные и рабочие валки; 6 – выдвижные шпиндели; 7 – уравнивающее устройство; 8 – двигатели

На фактическое рассогласование скоростей ВГП и НГП влияют технологические факторы, к ним относятся температурный градиент по толщине раската [123], коэффициент формы очага деформации (обжатие) [124], уровень прокатки, который определяет угол задания раската в клеть [125] и др. В связи с разными скоростями электроприводы валков в установившихся режимах прокатки работают с неодинаковыми нагрузками. При этом моменты двигателей ВГП и НГП могут различаться в несколько раз. Для устранения этого в квазиустановившемся режиме прокатки служит регулятор деления нагрузки (РДН). Структурная схема системы задания скоростей валков, реализующая алгоритмы лыжеобразования и выравнивания нагрузок, представлена на рис. 1.8 [126].

Траектория для каждого прохода формируется моделью 2-го уровня АСУ ТП по критериям производительности стана и получения нужного температурного режима прокатки. Задатчик интенсивности ЗИ служит для аварийного ограничения темпа задания скорости. К его выходу подключен блок формирования «лыжи», он регулирует задание скорости электропривода верхнего валка в соответствии с вычисленным темпом снижения рассогласования скоростей после захвата.

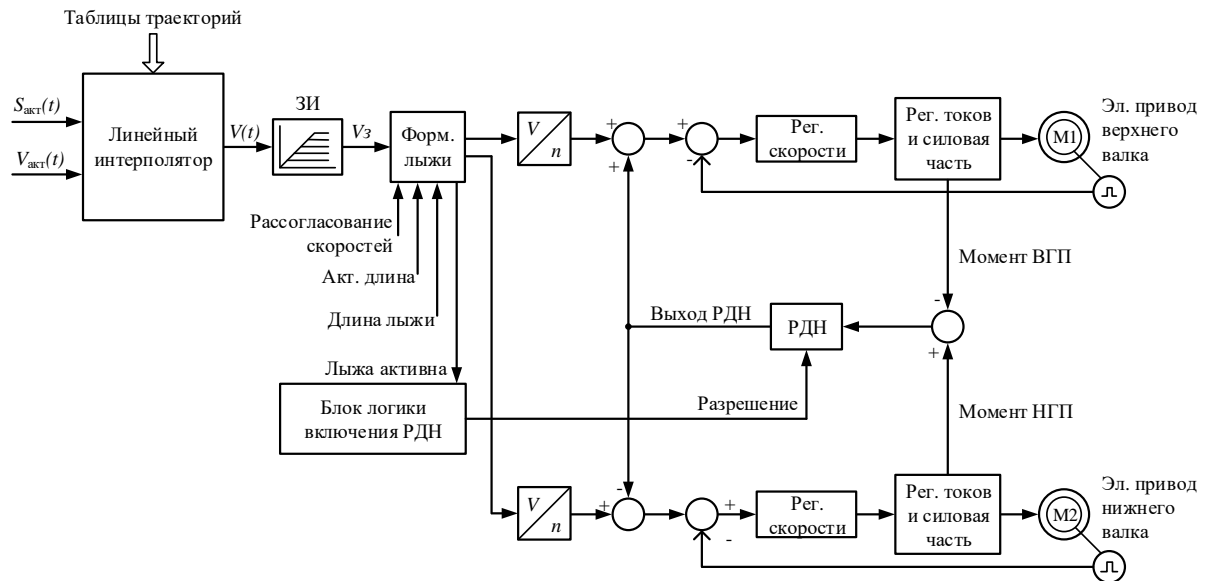


Рисунок 1.8. Структурная схема системы управления электроприводами с реализацией функций формирования «лыжи» и деления нагрузок (а) и; $S_{акт}(t)$ and $V_{акт}(t)$ – траектория движения и скорость, заданные в виде точек; $V(t)$ – задание скорости привода, генерируемое интерполятором

Для компенсации рассогласования моментов после окончания лыжеобразования предназначен РДН. В его функции входят устранение разницы скоростей после «лыжи», компенсация отклонений заданий диаметров валков, износа валков и других факторов. При возникновении разницы измеряемых сигналов «Момент ВГП» и «Момент НГП» на выходе РДН появляется управляющий сигнал «Выход РДН», который с разными знаками поступает на входы регуляторов скоростей двигателей.

Однако, как показала практика, проектный алгоритм управления электроприводами не обеспечивает необходимого быстрого действия в этом режиме [127]. В [120] показано, что рассогласование скоростей в большинстве проходов не устраняется. Это приводит к кратному различию моментов и токов двигателей с вытекающими нежелательными последствиями.

1.9.2. Анализ нагрузочных режимов двигателей ВГП и НГП

Подтверждение тому, что в большинстве проходов двигатели ВГП и НГП работают с разными нагрузками, дают осциллограммы, представленные на рис. 1.9. Осциллограммы на рис. 1.9, а получены при прокатке раскатов с большим начальным рассогласованием скоростей в каждом проходе (с заданием

«лыжи» 10%). Аналогичные осциллограммы на рис. 1.9, б зафиксированы при прокатке с одинаковыми начальными скоростями, т.е. без задания «лыжи». В окнах 1 приведены осциллограммы заданных и актуальных скоростей двигателей ВГП и НГП (об/мин), в окнах 2 – токи статоров I_{St_U} , I_{St_L} , в окнах 3 – осциллограммы токов возбуждения (токи роторов) I_{Ex_U} , I_{Ex_L} двигателей.

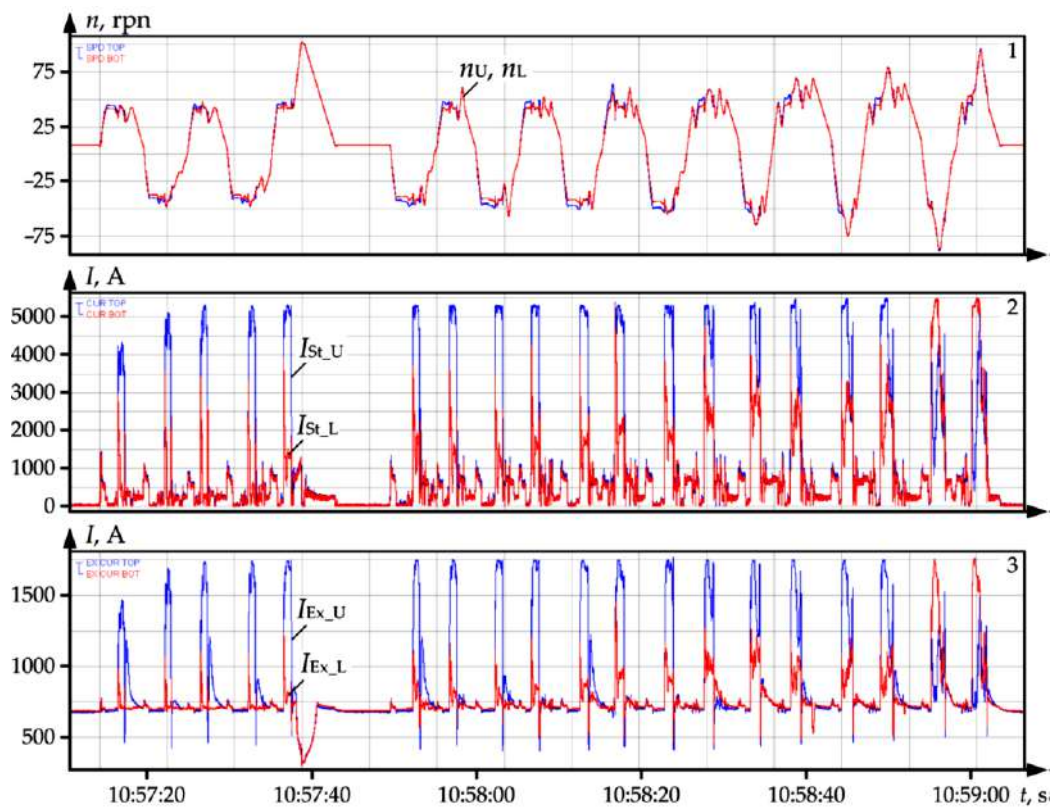
Осциллограммы на рис. 1.9, а подтверждают вывод о кратном отличии токов статора и соответственно моментов ВГП и НГП. При этом ток I_{St_U} двигателя верхнего вала превышает ток I_{St_L} . В последних проходах происходит смена соотношения нагрузок двигателей (I_{St_L} становится больше, чем I_{St_U}). Это обеспечивается действием регулятора деления нагрузок, т.к. при большой длине заготовки система лыжеобразования успевает отключиться, и этот регулятор вступает в работу [120]. Справедливость вывода о влиянии рассогласования скоростей электроприводов на токи и моменты двигателей подтверждают осциллограммы на рис. 1.9, б. Они получены при одинаковых заданиях скоростей двигателей, т.е. при прокатке без «лыжи». Поэтому их скорости во всех проходах равны между собой. Соответственно токи статоров (окно 2) и токи возбуждения (окно 3) также совпадают.

Из приведенного анализа следует предположение, что, вследствие разницы токов двигателей ВГП и НГП, их тепловые режимы также будут различными. При этом разную температуру будут иметь как обмотки статоров, так и обмотки роторов. Вследствие этого по-разному будут нагреваться железо статора и железо ротора. Отсюда следует важный вывод: необходим непрерывный мониторинг температур обмоток статора и ротора, а также железа статора и ротора. Более подробно эта задача обоснована в [128].

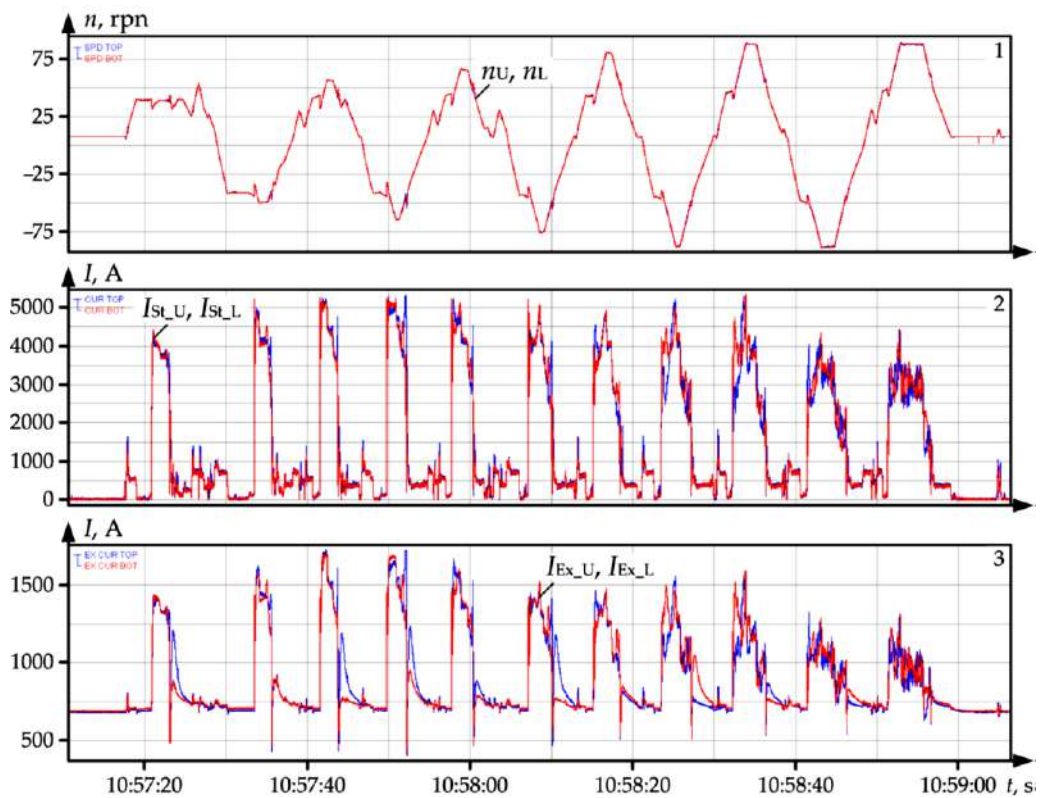
Таким образом, в результате анализа нагрузок ВГП и НГП возникают две задачи, решение которых предусмотрено в диссертации:

1. Совершенствование алгоритмов РДН, обеспечивающих сокращение времени согласования нагрузок ВГП и НГП после завершения режима формирования «лыжи».

2. Разработка системы мониторинга теплового состояния двигателя в процессе прокатки либо по ранее сохраненным данным на основе наблюдателя температуры.



a



б

Рисунок 1.9 – Осциллограммы скоростей и токов двигателей ВГП (индекс «U») и НГП (индекс «L») при прокатке с рассогласованием скоростей 10% (а) и при одинаковых заданиях скоростей (б)

1.9.3. Проблема повышения точности формирования профиля переменной толщины по длине раската

На рис. 1.10 представлена конструкция горизонтальной клетки стана 5000 [129]. Клеть оснащена двумя рабочими валками, передающими усилие прокатки и мощность привода на прокатываемый металл. Очаг деформации регулируется электромеханическими и гидравлическими нажимными устройствами. Для регулирования положения нижних рабочих валков под подушкой каждого нижнего опорного валка устанавливается гидроцилиндр AGC (Automatic Gap Control – регулирование толщины).

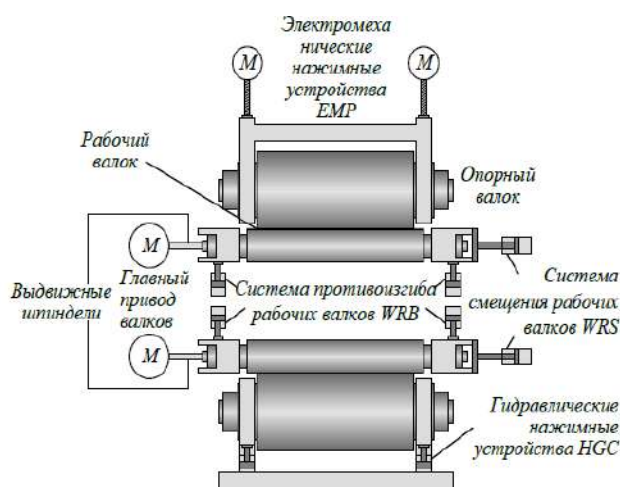


Рисунок 1.10 – Схема расположения оборудования горизонтальной клетки

Общая характеристика системы управления технологическим процессом, имеющей многоуровневую иерархическую структуру, представлена в [130]. С целью обеспечения высоких показателей геометрии листов клеть снабжена системой смещения рабочих валков WRS (Work Roll Shifting) [131, 132] и системой WRB [133], объединенных в единую систему управления профилем и планшетностью листа с названием CVCplus (Continuously Variable Crown) [134]. Данные системы здесь не рассматриваются, хотя в процессе работы над диссертацией выполнено их совершенствование с целью повышения точности регулирования и повышения надежности оборудования. Отдельные результаты представлены в [135].

Технологический процесс прокатки на толстолистовых станах включает следующие операции [136]: протяжку – прокатку сляба в продольном направ-

лении за один либо несколько проходов с небольшими обжатиями с целью регулирования формы боковых граней, разбивку ширины – прокатку в поперечном направлении с целью формирования необходимой ширины заготовки и регулирования формы торцов, продольную чистовую прокатку. Уменьшение поперечного сечения на первых двух стадиях прокатки вследствие относительно большой толщины раската сопровождается значительным увеличением ширины (уширением). Это связано с тем, что при высоком очаге деформации на этапах протяжки и разбивки ширины имеет место значительная деформация в поперечном относительно оси прокатки направлении.

Уширение проявляется более сильно на переднем и заднем концах, поэтому форма готового листа в плане (вид сверху) отличается от прямоугольной. При дальнейшей прокатке на концах раската и по боковым кромкам образуются участки неправильной формы, вызывающие потери в обрезь до 5–7% [137]. Для повышения точности геометрических размеров на стане применена технология ASC (Automation Size Control), аналогичная известным с названиями MAS-прокатка, EGO-прокатка и Plan View Control (управление геометрией) [138–140]. Согласно данной технологии для минимизации отходов при обрезке переднего и заднего концов при прокатке поперечной стороны в начале и в конце прохода настраивается большая толщина, чем для средней части (рис. 1.11).

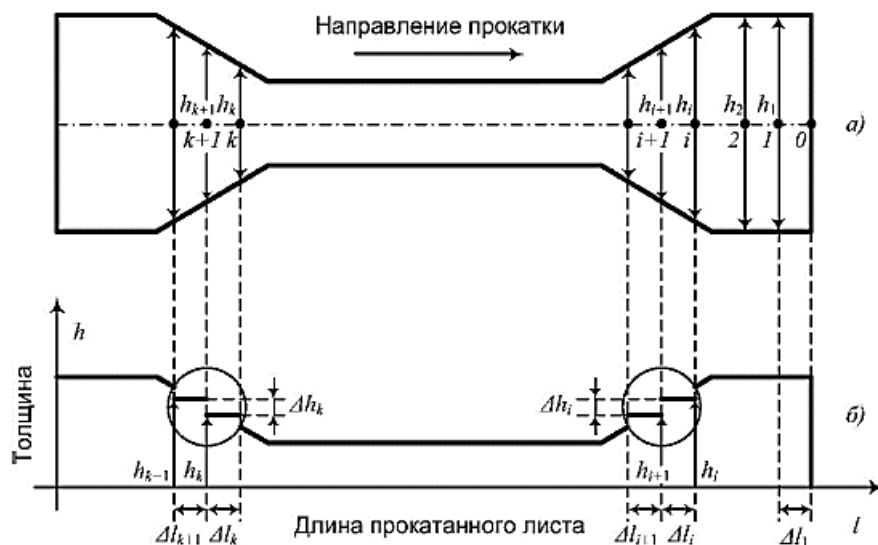


Рисунок 1.11 – Пояснение к многоточечной стратегии формировании профиля «кость»

Данный профиль получил название «собачья кость» [141]. Благодаря этому создается избыточный материал на кромках, в результате после поворота в последующих проходах лист раскатывается до практически прямоугольной формы. Длину и высоту этих положительных клиньев рассчитывает модель ASC в зависимости от материала и размеров. Этот вопрос подробно рассмотрен в публикациях [142, 143].

Для задания профиля переменной толщины в технологии ASC разработана многоточечная стратегия, которая поясняется графиками изменения толщины и давления в функции длины раската (рис. 1.11). Согласно этой стратегии рассчитывается ряд заданных точек, каждая из которых определяется с учетом удаленности от «головы» раската.

Технология ASC, реализованная на стане 5000, подробно рассмотрена в [129], аналогичная MAS-прокатка для толстолистого стана 2800 исследована в [144]. Основным недостатком настройки гидравлической системы автоматического регулирования толщины является неудовлетворительная точность профиля «кость». Наибольшие отклонения возникают на участках переменной толщины, что подтверждено результатами моделирования и осциллограммами [145, 146]. Для устранения этого недостатка разработан способ регулирования толщины с предупреждением, подробно исследованный в [129]. Однако результаты его опытно-промышленных испытаний на стане 5000 подтвердили недостаточно точное регулирование профиля: отклонения толщины от заданной составляют до 30%, что не является удовлетворительным. *Это предопределяет актуальность разработки способа управления нажимными устройствами (в комплексе с регулированием скорости электроприводов), направленного на повышение точности регулирования формы «кость», который разработан и рассматривается в разделе 4.*

1.9.4. Проблема согласования скоростей электроприводов

горизонтальной и вертикальной клетей в режиме совместной прокатки

Эта проблема характерна для универсальных клетей черновой группы широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК», а также для

двухклетевой черновой группы стана 2500 и (см. рисунок 1.6). В процессе совместной прокатки возникает жесткая и сложная взаимосвязь как горизонтальных и вертикальных валков одной клетки, так и связь горизонтальных валков последовательно расположенных клеток [147–149]. Это осложняет исследование динамических режимов и предопределяет актуальность разработки дополнительного способа управления.

Горизонтальные и вертикальные валки при совместной прокатке жестко связаны через металл, поэтому их линейные скорости одинаковы. При любом снижении скорости возникает подпор полосы – отрицательное натяжение, в промежутке между вертикальными и горизонтальными валками. Мгновенный подпор, формирующийся в полосе во время ее захвата горизонтальными валками, воспринимается вертикальными валками как дополнительное сопротивление. В результате в линии привода вертикальных валков возникает удар и повторный колебательный процесс, а максимальный упругий момент становится соизмеримым с пиковым моментом при входе раската в клеть [150].

Для устранения данного недостатка актуальна разработка способов управления электроприводами непрерывной группы клеток, обеспечивающего выравнивание натяжений (и соответственно ликвидацию подпора) как между горизонтальными и вертикальными валками каждой универсальной клетки, так и в пределах всей непрерывной подгруппы.

Вертикальная клеть толстолистого стана 5000 в отличие от вертикальных валков (эджеров) универсальных клеток широкополосных станов является отдельной клетью. Она осуществляет обжатие боковых граней раската в первых проходах. Целью является ликвидация уширения, возникающего при высоких очагах деформации и больших обжатиях. Актуальной проблемой является согласование скоростей валков горизонтальной и вертикальной клеток в установившихся и динамических режимах при совместной прокатке. Возмущающий динамический режим возникает при перемещении гидравлических НУ при наличии металла в валках. Это приводит к изменению длины раската в межклетевом промежутке, что вызывает возникновение подпора, который недопустим, т.к. вызывает опасность поломки оборудования.

Отклонение длины раската в межклетевом промежутке должно компенсироваться путем коррекции скоростей электроприводов вертикальных валков как наименее нагруженных. Подобная задача для черновых клетей стана 2000 решалась в диссертации [151] и рассмотрена в совместных публикациях [152–154]. Отличием ее решения для стана 5000 является режим прокатки с переменным обжатием переднего и заднего концов раската в первых проходах с целью придания профиля «кость».

В связи с изложенным *ставится задача разработки цифровых алгоритмов управления скоростями электроприводов вертикальной клетки при перемещении гидравлических НУ.*

1.9.5. Проблема ограничения динамических нагрузок электроприводов клетки

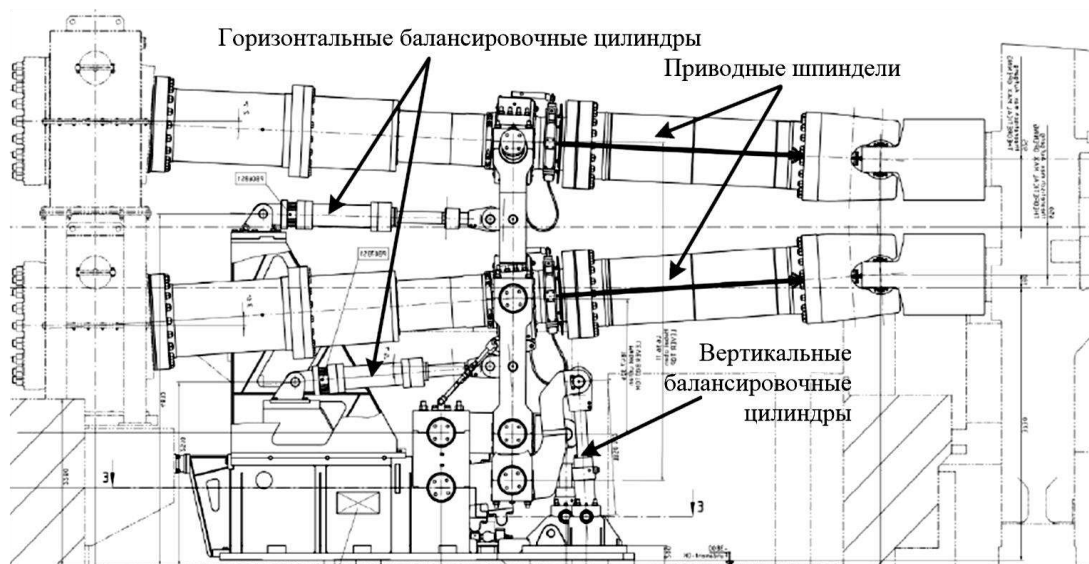
В [155] рассмотрены результаты моделирования и экспериментальных исследований переходных процессов, возникающих при входе раскатов в клеть. Этот режим, также получивший название «захват металла валками», сопровождается ударным увеличением нагрузки электрического и механического оборудования, динамическими перегрузками с вытекающими нежелательными последствиями.

Конструкция шпинделя

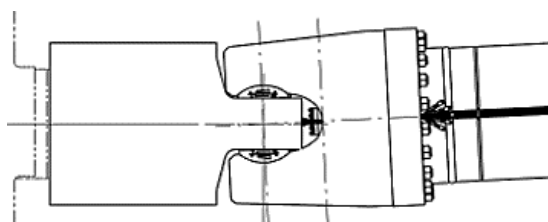
На горизонтальной клетке стана 5000 установлены шпиндели выдвижного (слипперного) типа (рис. 1.12, а) [119]. Непосредственно сочленение валка со шпинделем осуществляется с помощью головки (рис. 1.12, б), которая крепится к рабочему валу.

На вновь устанавливаемом механизме зазор в соединении составляет 1–2°. Он необходим для сочленения двух вращающихся устройств – непосредственно шпинделя и валка (либо промежуточного вала со стороны двигателя) и для обеспечения свободного движения при вертикальном перемещении валков [156]. Если угловой зазор в шпиндельном соединении разомкнут, то при захвате раската валками происходит его замыкание, сопровождающееся механическим ударом и колебаниями упругого момента. Величина зазора зависит

от износа соединительных элементов, которые подвержены усталостным разрушениям. Их поломки наиболее часто возникают со стороны клетки. Это обусловлено большой инерцией вращения валков, упругими ударами при захвате раската, воздействием охлаждающей жидкости и т.д.



а



б

Рисунок 1.12 – Конструкция главной линии горизонтальной клетки (а) и общий вид шпиндельного соединения (б)

Сложность конструкции, ударные нагрузки, тяжелые режимы эксплуатации подтверждают актуальность разработки мероприятий по предотвращению поломок шпиндельных соединений. Наименее затратным и эффективным способом решения этой задачи является своевременный мониторинг их состояния и, в первую очередь, контроль угловых зазоров. На действующих станах такой контроль проводится путем замеров персоналом в «ручном» режиме во время плановых остановок. Он является неэффективным, т.к. не имеет четкого регламента и требует временных затрат. К тому же замеры приходится проводить далеко не в «комфортных» условиях, поэтому на достоверность результатов оказывает влияние «человеческий фактор».

В связи с изложенным, поставлена задача разработки наблюдателя углового зазора, принцип которого основан на моделировании (восстановлении) измеряемой координаты на основе обработки физических параметров, измеряемых непрерывно либо с заданной периодичностью. На таком принципе основана работа большинства известных наблюдателей физических параметров, например, упругих моментов в валопроводах [113, 157, 158] либо натяжений прокатываемой полосы [159, 160]. При восстановлении зазора контролируемые параметрами являются легкодоступные для измерения координаты – электромагнитный момент и скорость двигателя.

Актуальность разработки наблюдателя упругого момента

Одной из важнейших координат, которые подлежат непрерывному контролю в электромеханических системах клетей прокатных станов, является упругий момент на шпинделях, испытывающих ударные нагрузки при входе раскатов в клеть. Несмотря на внешнюю простоту шпиндели являются дорогостоящим оборудованием, нормативный срок их эксплуатации 8 лет, реальный срок – в 2 раза меньше. Задание в клеть тяжелой заготовки (до 30 т) в определенных ситуациях может приводить к кратным перегрузкам. Это вызывает усталостные разрушения и поломки шпиндельных соединений и валков. Они приводят к длительным простоям стана и росту непроизводительных затрат (данный вопрос подробно исследован в диссертации [161]).

Чтобы бороться с перегрузками, необходимо, прежде всего, их «видеть». Для контроля упругого момента в валопроводах электромеханических систем применяются физические системы мониторинга упругого момента на основе тензодатчиков. В 2011 году на шпинделях горизонтальной клетки стана 5000 была установлена система фирмы MANNER. Позже при участии автора была разработана и смонтирована система, аппаратный состав и подробное описание которой приведены в [162, 163]. Общий принцип построения таких систем, а также измерения и передачи сигналов рассмотрены в [164]. Однако опыт эксплуатации этих систем продемонстрировал их относительную недолговечность. Причинами выхода из строя являются тяжелые условия эксплуатации, ударное приложение нагрузки и «человеческий фактор». Последняя причина

обусловлена тем, что требуется прецизионная установка датчиков и токосъемного оборудования после каждой замены шпинделя, что требует высокой культуры обслуживания.

Для исключения данного фактора, а также с целью повышения точности мониторинга и долговечности измерительной системы разрабатываются наблюдатели упругого момента на шпинделях. По существу, они представляют собой системы непрерывного восстановления момента двухмассовой электромеханической системы. Примеры таких разработок приведены в [165, 166]. Однако информации об их внедрении и длительной эксплуатации в литературных источниках нет (за исключением публикаций автора). К тому же большинство из них предусматривает вычисление динамического момента путем дифференцирования скорости, что вытекает из основного уравнения электропривода. В результате снижаются помехозащищенность и точность восстановления сигнала. *Это предопределяет актуальность совершенствования ранее разработанных наблюдателей с целью увеличения точности, надежности и долговечности.*

Кроме того, сигнал момента на шпинделе является важным информативным параметром для разработки систем защиты двигателей от динамических перегрузок. Целью таких систем является предотвращение аварий с тяжелыми последствиями, вызванных поломкой шпиндельных соединений (головок шпинделей и лопастей валков, рис. 1.12, б). Внедрение такой системы актуально для электроприводов клетки стана 5000. Техническая возможность будет реализована после разработки упомянутого выше наблюдателя упругого момента на шпинделях. Ниже данная задача обоснована более подробно.

1.10. Проблемы предотвращения аварий

1.10.1. Задачи разработки цифровых теней (наблюдателей состояния) механического и электрического оборудования клетки

В [155] теоретически и экспериментально доказано, что первой причиной неудовлетворительной динамики момента двигателя и упругих моментов на шпинделе является наличие угловых зазоров в шпиндельных соединениях. Это делает электромеханические системы валков существенно нелинейными.

Второй причиной являются упругие свойства протяженного вала. Исследования показали, что амплитудные значения упругого момента при входе раската в клеть могут превышать установившийся момент прокатки в 3–3,5 раза [167, 168]. С учетом того, что момент при прокатке заготовок «тяжелого» сортамента составляет до 200% номинального момента двигателя (см. табл. 1.9), указанное превышение составляет 600–700%. Это приводит к разрушениям головок шпинделей и шеек валков [169]. Подтверждение значительных динамических перегрузок, возникающих на толстолистовых станах, даны в [170], где выполнен анализ процессов при прокатке различных марок стали на стане компании Rolled Products Inc. (США). В результате сделан вывод, что амплитуды динамического момента могут достигать 1200% номинального момента двигателя.

С целью сокращения количества поломок на стане 5000 установлены пороговые значения аварийной системы: 6500 кН·м – для предупреждения оператора и 8000 кН·м – для торможения быстрым остановом [171]. Эти параметры превышают проектные значения, приведенные в табл. 1.9. Однако непосредственно динамические удары, возникающие при захвате, редко приводят к поломкам и аварийным остановам стана. Наиболее вероятными причинами поломок являются накопленные циклы перегрузок по крутильному моменту, которые приводят к усталостным разрушениям механических соединений. При этом наиболее частыми авариями являются поломка головки шпинделя (рис. 1.13, а) и поломка валка (рис. 1.13, б) [161]. Устранение их последствий связано с длительными простоями стана и значительными материальными затратами.

В обычной ситуации колебания накладываются на ударный процесс замыкания зазоров, что приводит к увеличению амплитуды момента. Осциллограммы, полученные на стане, показывают, что в предаварийной ситуации электроприводы валков переходят в режим ограничения по моменту, в этом случае кратно возрастают динамические моменты на шпинделях. Кроме того, динамическим режимам, как правило, предшествуют колебания упругих моментов с нарастающей амплитудой [172]. Однако дать им оценку представляется возможным только при наличии системы мониторинга упругого момента.



а



б

Рисунок 1.13 – Поломки шпинделя (а) и валка (б) клетки стана 5000

Подобные выводы также сделаны авторами [173–175]. На основании исследований в [174] утверждается, что максимальный крутящий момент при ударном приложении нагрузки составляет 260% номинального момента двигателя, при этом расчетный усталостный ресурс является критическим, так как близок к фактическому сроку службы шпинделя. В [176] обоснованы аналогичные выводы в отношении рабочих валков стана горячей прокатки тонкой полосы. Сделано заключение, что анализ фактических условий эксплуатации необходим для понимания механизма разрушения валков, повышения их износостойкости и продления срока службы.

Динамические моменты при поломке головной шпинделей и лопастей валков приведены в [177, 178], также они рассматриваются в п. 7.4. Помимо приведенных аварий в разделе 7 рассматривается сложная авария, вызвавшая поломку оборудования главной линии клетки. Она обусловлена «нахлестом» листа на рабочий валок при выходе из клетки. Эти аварии и перегрузки по моменту, приводящие к снижению усталостной прочности и поломкам оборудования, требуют организации быстродействующей защиты, которая должна реагировать на диагностические признаки аварии независимо от причины ее возникновения. Это является важной задачей, поставленной в диссертации. Ее решение стало возможным благодаря разработке наблюдателя упругого момента на шпинделе.

1.10.2. Обоснование разработки системы защиты двигателей от перегрева

Показатели эффективности производства зависят от эксплуатационного ресурса силового электрооборудования, в том числе двигателей прокатных клетей. Это связано с высокой стоимостью двигателей и длительным простоем агрегата в случаях их ремонта либо замены. Как отмечено выше, для предотвращения аварий служат системы мониторинга технического состояния [179, 180]. С этой же целью совершенствуются устройства защиты, а функции мониторинга и защиты часто объединяются. В таком случае информационный комплекс решает задачи оповещения персонала и предупреждения аварии, иногда к ним добавляются функции оценки и прогнозирования ресурса [181, 182]. Объединение функциональных возможностей является эффективным для электроприводов прокатных станов.

В [183] утверждается, что превышение температуры изоляции электрической машины на 10°C относительно предельно допустимого значения вдвое сокращает срок ее службы. Обоснованы нормативы по ограничению нагрева изоляции различных классов. Согласно требованиям ГОСТ ИЕС-60034-11–2014 действие защиты должно происходить при значениях температуры обмотки статора, приведенных в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Предельные значения температуры изоляции различных классов

Тепловой режим	Значение температуры обмотки статора для систем изоляции классов нагревостойкости В, F, H, °C		
	В	F	H
Установившийся (предельно допустимое среднее значение)	120	140	165
Медленное нагревание (срабатывание защиты)	145	170	195
Быстрое нагревание (срабатывание защиты)	200	225	250

При разработке систем защиты двигателей прокатных клетей важными являются задачи достоверного диагностирования превышения температурой значений, указанных в таблице, и оценки интенсивности развития процесса

нагрева. В условиях цифровизации перспективно исполнение тепловой защиты на основе виртуальных моделей либо наблюдателей температуры [184]. Сигнал с выхода наблюдателя температуры используется как для предупреждения персонала, так и для настройки (активации) защиты двигателей от перегрева. Это позволяет минимизировать убытки, связанные с аварийной остановкой стана.

Примером подобной разработки является *«интеллектуальная система мониторинга и защиты двигателя от перегрева»* [185]. В ней для сбора диагностических параметров (тока и температуры) используется микропроцессорная система. Для этого использована тепловая модель двигателя, которая *«решила проблему защиты от перегрева двигателя низкого напряжения и упростила конструкцию оборудования»*. Авторы утверждают, что *«система работает стабильно и надежно, проста в эксплуатации и функционирует в соответствии с заданным алгоритмом»*. Анализ этой (и других подобных систем) позволил сделать следующие выводы:

1. Фактический отказ двигателя является функцией времени, температуры окружающей среды и электрического тока.
2. Системы предупреждения аварий, как и системы on-line мониторинга теплового состояния двигателей, целесообразно выполнять на основе тепловых моделей или в виде их комбинации с системой прямого измерения температуры, когда это возможно.

Эти выводы приняты за основу при разработке системы тепловой защиты двигателей двухклетевого стана 1700 (см. рис. 1.6). Кроме того, в [186] и других публикациях подчеркнута важность контроля температуры электрических машин с воздушно-водяной системой охлаждения, каковыми являются двигатели данного стана. Согласно пунктам правил устройства электроустановок *«на электродвигателях, имеющих принудительную вентиляцию, следует устанавливать защиту, осуществляющую воздействие на предупредительный сигнал и/или отключение при повышении температуры или прекращении действия системы охлаждения»*.

Для решения этой проблемы в [187] разработана система мониторинга эквивалентных нагрузок и температуры, которая принята за прототип при проведении разработки. Она выполнена на основе двухмассовой тепловой модели двигателя, составленной по уравнениям теплопроводности. Однако она выполняет только функции оповещения о перегреве, задействование в системе защиты двигателя не предусмотрено. К тому же контроля температуры только двух масс (обмотки и железа статора) во многих случаях недостаточно. Необходимо создание относительно простой системы на основе многомассовой тепловой модели. Предварительные исследования показали, что целесообразна разработка четырехмассовой модели на базе доменов библиотеки Simscape Thermal Models, входящей в состав пакета Matlab Simulink.

В [188] справедливо утверждается, что на температуру двигателя влияют тепловое состояние каждой детали и условия окружающей среды. На основании исследований в [189] сделан вывод, что «температура статоров и роторов больших машин важна как для кратковременной защиты, так и для долгосрочного мониторинга их состояния». Наряду с повышением температуры обмоток основными причинами перегрева электрических машин являются потери в стали. Обычно они доминируют, когда машина работает на высокой частоте вращения. Согласно ГОСТ 5616-89 [190] для электрических машин большой мощности в соответствии с классом изоляции устанавливаются предельные значения температуры основных компонентов: обмоток и железа (табл. 1.11).

Таблица 1.11 – Предельные значения температуры компонентов электрической машины

Наименование компонента	Температура, °C
Обмотка статора	120°C
Железо статора	110°C
Обмотка ротора	100°C

На основании изложенного сформулирована цель исследований: *разработка и промышленная апробация системы контроля теплового состояния и защиты от перегрева синхронных двигателей клеток и моталок*

прокатного стана на основе четырехмассовой тепловой модели. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- разработка функциональной схемы системы тепловой защиты;
- виртуальная настройка алгоритма срабатывания с использованием моделирования НПЛ;
- апробация алгоритма в электроприводах прокатного стана, рекомендации по промышленному внедрению.

1.11. Выводы и обоснование направлений исследований

1. В результате литературного обзора показана неоднозначность трактовки термина «цифровой двойник». Проанализированы известные названия, обосновано использование определения, данного в ГОСТ Р 57700.37–2021. Приведены структура ЦД и концептуальная схема, поясняющая обмен информацией между его элементами.

2. Даны определения цифровой модели, цифровой тени и цифрового двойника. Показано, что их различие зависит от принципов обмена информацией: однонаправленный – в тенях, двунаправленный обмен – в ЦД и его отсутствие (ручной обмен) для моделей. Сделан вывод, что цифровая модель и цифровая тень могут быть представлены как составные части ЦД, что дает более четкое представление об архитектуре цифровых систем.

3. Перечислены функции цифрового двойника в промышленных системах. Основными являются: мониторинг, моделирование, оптимизация, прогнозирование, образование. Обоснована новая функция – виртуальная настройка регуляторов автоматизированных электроприводов с использованием аппаратного моделирования НПЛ. Для ее обеспечения используются компьютер реального времени и ПЛК, оснащенные операционными системами реального времени (в частности, QNX).

4. Предложена методика виртуальной настройки электротехнических систем, включающая предварительное обоснование структуры системы управления и передаточной функции регулятора и дальнейшую настройку сред-

ствами ННЛ. При таком подходе смысл в строгом синтезе регуляторов (в традиционном понимании) теряется, что сокращает затраты и время ввода объектов в эксплуатацию.

5. Обосновано применение цифровых двойников электротехнических систем прокатных станов на этапах жизненного цикла:

- на этапе моделирования, выполняемого при разработке и проектировании электрооборудования и средств автоматизации;
- на этапе ввода в эксплуатацию путем создания виртуальных систем;
- в период эксплуатации с целью мониторинга технического состояния в on-line режиме.

Сформулированы требования к промышленным ЦД и задачи, решаемые при их создании.

6. Дана характеристика известных цифровых платформ, предназначенных для разработки ЦД. Сделан вывод, что информация о создании ЦД, доступных для масштабного внедрения на прокатных станах, отсутствует. В связи с этим обоснована разработка ЦД на базе программ, применяемых на промышленных предприятиях, таковыми являются Matlab (и его приложения Simulink Real Time, Simscape) и др. Направление создания ЦД на базе общедоступного ПО без применения цифровых платформ положено в основу объектно-ориентированного подхода при решении задач, поставленных в диссертации.

7. Обоснована методология создания промышленных ЦД на основе технологии ННЛ, включающая:

- метод Hardware and software prototyping, используемый для тестирования встроенных систем путем подключения контроллера к моделируемой среде, которая имитирует поведение физической системы;
- метод Hardware-in-the-Loop (или «Semi-naturalistic modeling») – полунатурное моделирование, которое достигается благодаря замкнутому контуру между тестируемым оборудованием и моделированием в реальном времени. Такой вид моделирования позволяет снизить затраты на отладку и общие трудозатраты при тестировании.

8. Обоснован объектно-ориентированный подход к созданию ЦД электро-технических систем как альтернатива структурному подходу. Рассмотрены ключевые аспекты ООП: модульная конструкция, инкапсуляция (ограничение доступа), наследование и полиморфизм. На основании литературного обзора сделаны выводы, что ООП позволяет упростить моделирование и улучшить управление сложными системами. Это имеет основополагающее значение для создания цифровых двойников комплексов прокатных станов, в том числе, обеспечивая их виртуальный ввод в эксплуатацию.

9. Рассмотрены категории цифрового двойника, определенные концепцией ЦД:

- цифровой двойник прототип (DTP), – это виртуальный аналог реального физического объекта;
- цифровой двойник экземпляр (DTI), – это ЦД каждого отдельного экземпляра актива после его изготовления;
- агрегированный цифровой двойник (DTA), – это система, которая объединяет все цифровые двойники и их реальные прототипы.

Данные категории будут применены при реализации ООП для электро-технических систем.

10. Названы агрегаты ПАО «ММК», электротехнические системы которых являются объектами диссертационного исследования. Это реверсивная клеть стана 5000, моталки и черновые клетки стана 2500, реверсивный стан 1700, летучие ножницы агрегата поперечной резки горячекатаной полосы, непрерывная подгруппа ШСГП 2000. Представлен перечень рассматриваемых научно-практических проблем и цифровых систем автоматического управления электроприводами, создаваемых для их решения. Перечислены функции наблюдателей координат электроприводов стана 5000 и системы защиты, разрабатываемые на их основе. Эти вопросы должны быть рассмотрены в рамках диссертационной работы.

11. Дана характеристика технологии прокатки и электромеханических систем горизонтальной клетки стана 5000. Рассмотрена структурная схема системы управления электроприводами с реализацией функций формирования

«лыжи» и деления нагрузок. Показано кратное различие нагрузок, обусловленное различием скоростей ВГП и НГП, необходимым для формирования лыжи. Отмечено неудовлетворительное быстродействие регулятора деления нагрузок, обоснована актуальность совершенствования его структуры.

12. С целью повышения быстродействия целесообразна разработка РДН с переключающейся структурой и РДН на основе алгоритмов нечеткой логики. Последнее решение обусловлено сложностью математического описания взаимосвязи ВГП и НГП через металл. Следует заметить, что для многодвигательного электропривода прокатной клетки такая задача сформулирована впервые.

13. В плане совершенствования алгоритмов управления обоснована актуальность решения следующих задач:

- повышения точности формирования профиля переменной толщины по длине раската «собачья кость» в режиме профилированной прокатки, реализованной на стане 5000;

- выравнивания скоростей электроприводов горизонтальной и вертикальной клеток при совместной прокатке, а также согласования скоростей валков последовательно расположенных клеток непрерывной подгруппы ШСГП;

- разработки системы ограничения динамических нагрузок электроприводов при входе раската в клетку. Данная система должна обеспечивать компенсацию горизонтальной составляющей момента, обусловленной различием скорости заготовки и горизонтальной составляющей окружной скорости валков.

14. Необходима разработка цифровых теней электромеханического оборудования клетки: наблюдателя упругого момента с автоматической настройкой и наблюдателя температуры двигателей ВГП и НГП на основе четырехмассовой тепловой модели. На их основе должны быть решены задачи разработки быстродействующей системы предотвращения аварий и тепловой защиты двигателей.

Глава 2. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

В предыдущем разделе обоснована концепция относительно простых объектно-ориентированных цифровых двойников, предназначенных, в частности, для пуско-наладки и виртуального ввода в эксплуатацию электротехнических систем прокатных станов. Их полезными отличиями являются ориентация на конкретный промышленный объект (либо электротехническую систему) и разработка на базе доступного ПО без применения цифровых платформ. В плане реализации этой концепции в настоящем разделе приводятся примеры разработки объектно-ориентированных ЦД электромеханических и гидравлических систем клетки прокатного стана. Гидравлические системы исследуются не как самостоятельные технические комплексы, а как объекты, создающие нагрузку электромеханических систем в динамических режимах, например, при перемещении гидравлических нажимных устройств прокатной клетки.

Разработка выполняется на базе программного средства Simulink Real Time, входящего в Matlab Simulink, с использованием модулей Simscape. Как отмечалось выше, Simulink Real Time поддерживает симуляцию и тестирование в реальном времени, включая управляемое быстрое прототипирование и аппаратное моделирование HIL. Критерием выбора данных программ являются относительная простота и доступность. Данные программные среды имеют обширную базу библиотек для решения прикладных задач и библиотеки для работы с большими данными. С учетом отсутствия доступных отечественных цифровых платформ для создания ЦД промышленных объектов такой подход является целесообразным и эффективным.

В моделировании HIL в качестве средства виртуального представления тестируемой модели используется компьютер реального времени, а для создания и отладки алгоритмов управления – реальный либо виртуальный ПЛК. Аппаратное обеспечение содержит интерфейс, с помощью которого осуществляется управление виртуальным вводом.

Преимущество такого подхода заключается в том, что задачи синтеза регуляторов, расчет передаточных функций контуров регулирования, моделирование и непосредственно наладка (в «классическом» понимании этого термина) сводятся к минимуму. Их место занимают виртуальная настройка непосредственно на объекте с использованием виртуальных моделей и моделирования НПЛ.

Объектно-ориентированные ЦД технологических агрегатов применяются на этапах проектирования, виртуального ввода в эксплуатацию, наладки и настройки алгоритмов управления, модернизации оборудования. При их применении для решения названных задач необходимо учитывать реальное быстродействие создаваемых систем, которое может отличаться от быстродействия ПЛК, заявленного изготовителем. Такая же задача возникает при применении цифровых теней для мониторинга технического состояния в режиме штатной эксплуатации (в данном разделе не рассматривается). От этого параметра (быстродействия) и задержек при передаче сигналов зависят скорость обмена данными и соответственно точность двойникования (воспроизведения виртуального пространства) оборудования и процессов.

Поэтому в представленном разделе демонстрируются примеры использования моделирования НПЛ для оценки задержки при передаче сигналов в структурах двойников электромеханической и гидравлической систем прокатной клетки. В обоих случаях алгоритм управления реализован в ПЛК технологического процесса, осуществляющем управление этими системами. Виртуальная настройка и оценка быстродействия при обмене информацией с преобразователями частоты (ПЧ) осуществляется по сети ProfiBus.

2.1. Методика разработки цифровых двойников промышленных электротехнических систем

Ниже представлена методика создания ЦД, предназначенных для пусконаладочных работ и виртуального ввода в эксплуатацию электротехнических систем. Она рассматривается на примере прокатных агрегатов, но может быть применена на других промышленных объектах.

2.1.1. Позиции разрабатываемой методики

Методика включает следующую последовательность действий:

1. После окончания этапа проектирования – разработку цифровых моделей и алгоритмов систем управления. Для электротехнических систем прокатных станов оптимальной является разработка моделей в средах виртуального моделирования Simulink Real Time, Simscape Hydraulics и др. (в следующем разделе диссертации будут показаны возможности использования других программных средств).

2. Разработку цифрового двойника. Для этого алгоритмы моделей реализуются на вычислительных мощностях контроллеров, предназначенных для управления технологическим процессом либо на отдельных промышленных компьютерах. Структуры виртуальных моделей физических объектов и предварительно разработанные алгоритмы управления «переносятся» из пакета, в котором осуществлялось моделирование, в программу логического контроллера, управляющего электротехническим комплексом. Далее выполняется аппаратное моделирование HIL.

3. Виртуальный ввод в эксплуатацию. На этом этапе выполняется коррекция алгоритмов управления, уточняются параметры настройки.

4. Подключение ПЛК, оснащенных разработанными алгоритмами управления, к физическому объекту. Экспериментальные исследования, перевод в опытно-промышленную эксплуатацию.

5. «Перенос» цифрового двойника объекта в программное обеспечение компьютеров более высокого уровня с целью использования для мониторинга процессов и технического состояния оборудования в on-line режиме.

Следует заметить, что наиболее полные модели электрических и гидравлических систем, содержащиеся в библиотеке Simscape, вполне работоспособны в Simulink Real Time.

В авторских публикациях [8, 9] обоснован концептуальный подход к созданию ЦД промышленных электротехнических комплексов на основе градации двойников, представленной выше в табл. 1.4. Данный подход предусматривает:

- разработку объектно-ориентированных двойников-прототипов (DTP) электромеханических и гидравлических систем;
- разработку цифровых двойников-экземпляров (DTI), отображающих все существенные взаимосвязи объекта, в рассматриваемом случае к ним относится взаимосвязь электромеханических систем через металл;
- объединение в агрегированный цифровой двойник (DTA) электротехнического комплекса либо технологического устройства более высокого уровня.

2.1.2. Конфигурация цифровых двойников

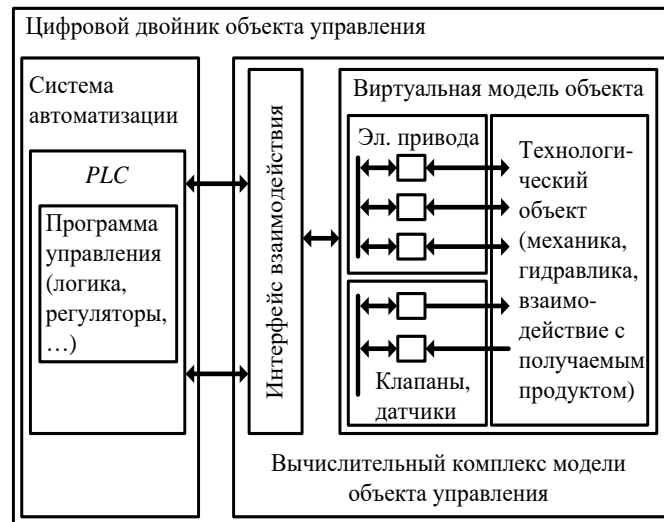
В [8, 9] рассмотрены принципы размещения цифрового двойника в структурах персонального компьютера либо ПЛК. Предложены следующие варианты размещения виртуальной модели (симулятора):

- в том же ПЛК, где находится отлаживаемая программа;
- в отдельном вычислительном комплексе;
- размещение симулятора и отлаживаемого ПЛК на виртуальных машинах.

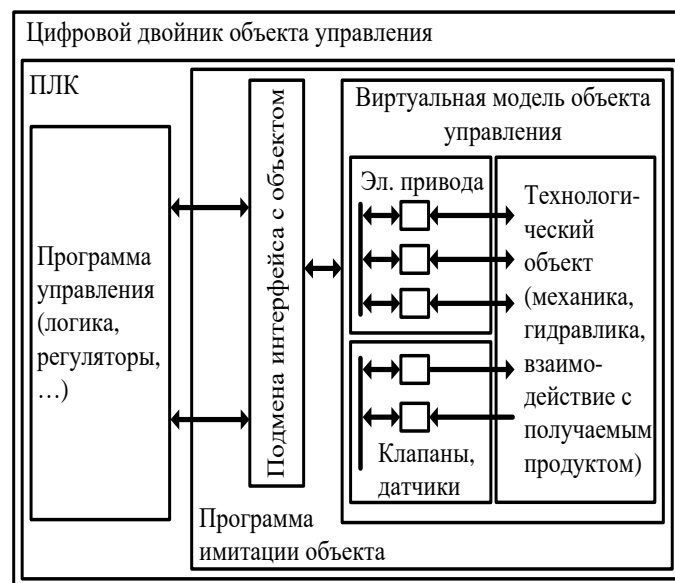
Схематичное размещение по первым двум вариантам показано на рис. 2.1, а и рис. 2.1, б, соответственно. Они обладают как достоинствами, так и недостатками. Так, размещение модели на отдельной машине дает возможность применять более сложные и точные модели. Однако это требует наличия отдельной машины, к тому же возникают задержки в обмене информацией. Размещение в одном ПЛК свободно от этих недостатков. Однако ресурс контроллера ограничен, что требует применения более простых моделей. Таким образом, выбор конкретного варианта размещения ЦД обусловлен двумя факторами: сложностью виртуальной модели и программным ресурсом ПЛК.

Временные задержки, которые возникают при on-line обмене информацией в структуре ЦД, зависят от способа размещения виртуальной модели физического объекта и алгоритма системы управления объектом. Такая задержка наиболее значима при их расположении на разных вычислительных устройствах – ПЛК и/или ПК. Задержка увеличивается при разных интерфейсах совмещаемых вычислительных устройств. Поэтому ее оценка при двусторонней

передаче сигналов в системе «алгоритм управления – виртуальная модель» является актуальной. Публикаций, посвященных этому вопросу, в доступных источниках не обнаружено, представленные исследования направлены на устранение данного пробела. При рассмотрении материала виртуальная модель условного объекта реализована в приложении Simulink Desktop Real Time. Такое решение часто используется при разработке ЦД без применения цифровых платформ, концепция и пример такого подхода обоснованы в [9].



а



б

Рис. 2.1. Структуры цифровых двойников электротехнических систем с реализацией виртуальной модели на промышленном компьютере (а) и в ресурсе ПЛК (б)

2.2. Создание цифровых двойников электромеханических систем клетки стана 5000 на основе Simulink Real Time

Согласно определению, Simulink Real-Time Simulation and Testing – это модуль, который позволяет создавать приложения реального времени на основе моделей Simulink и запускать их на специализированном компьютерном оборудовании, подключенном к физической системе. Данный модуль позволяет использовать Simscape для быстрого создания моделей с физическим подходом к моделированию для реализации HIL. На его основе предложено разрабатывать цифровые двойники, предназначенные для использования при виртуальном вводе в эксплуатацию, замене оборудования, а также при модернизации технологического процесса прокатных агрегатов. Следует заметить, что информация о применении Simulink Real-Time для создания цифровых двойников производственных агрегатов в литературных источниках не встречается (за исключением авторской публикации [191]).

2.2.1. Электроприводы клетки

Разработки выполняются на примере электромеханических систем горизонтальной клетки стана 5000. Актуальность исследований обусловлена заменой преобразователей частоты, а также изменением алгоритмов управления электроприводами для реализации новых функций, например, точного формирования изгиба переднего конца раската («лыжи») [192, 193], деления (выравнивания) нагрузок между валками и соответственно двигателями [191, 192] и др. Поэтому проводимые исследования, наряду с научной значимостью, имеют конкретную практическую направленность.

На рисунке 2.2 приведена фотография двигателей горизонтальной клетки. Их номинальные параметры приведены в табл. П.1.1 Приложения 1. Как следует из данной таблицы они обладают большой мощностью (12 МВт каждый) и являются тихоходными (скорость вращения (0-60) об/мин и до 115 об/мин при ослаблении поля). Как было показано на кинематической схеме, рис. 1.7, а, электроприводы выполнены индивидуальными без редукторов.

Схема системы управления ВГП и НГП представлена в разделе 1 на рис. 1.8. Индивидуальный электропривод дает возможность независимого регулирования скоростей валков, что обеспечивает формирование изгиба переднего конца раската на выходе из клетки в форме «лыжи», показанной на рис. 1.7, б.

Для этого служат блок задания «лыжи» и РДН. Подробное описание этого режима и назначение данного блока рассмотрены в [8, 9].

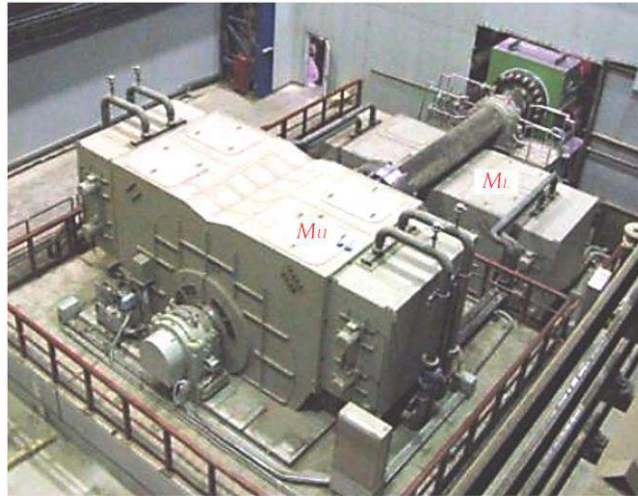


Рисунок 2.2 – Двигатели верхнего и нижнего валков клетки стана 5000

На рисунке 2.3 представлена схема модели автоматизированных электроприводов клетки. Электропривод каждого валка представлен как двухмассовая система с упругой связью между первой массой (ротором двигателя) и второй массой (валком). В механической передаче присутствует зазор в шпиндельных соединениях, что делает систему электропривода нелинейной. Справедливость такого представления, подробное описание и параметры электромеханической системы клетки приведены в [194, 195].

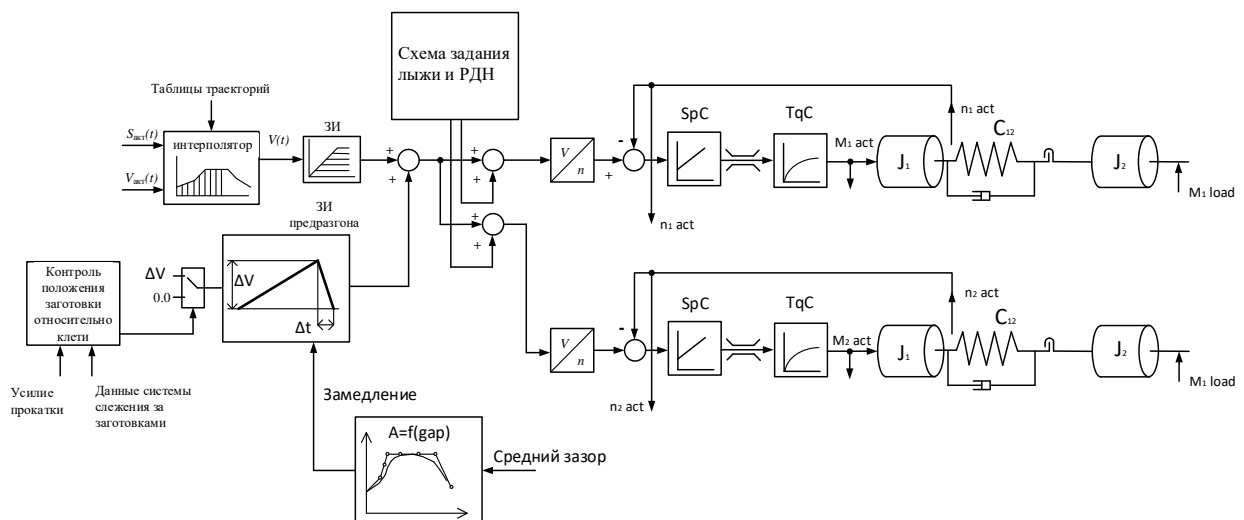
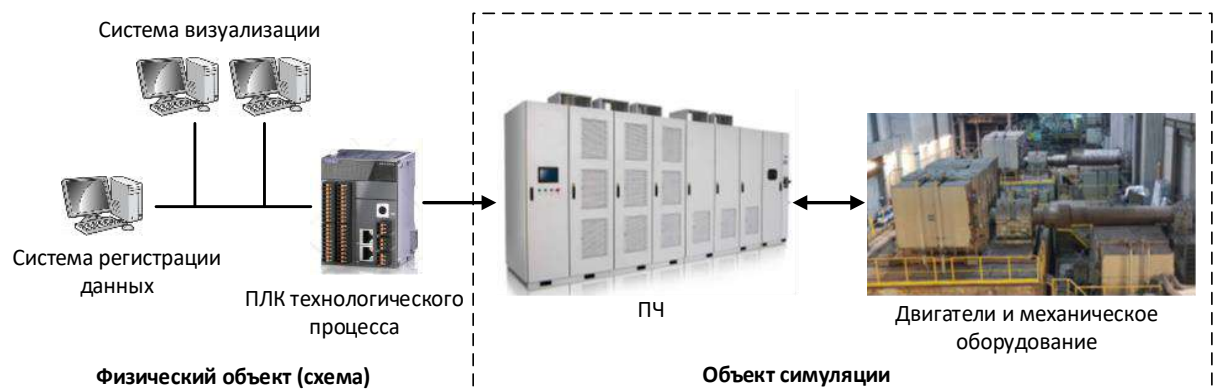


Рисунок 2.3 – Структурная схема системы управления электроприводами верхнего и нижнего валков стана 5000

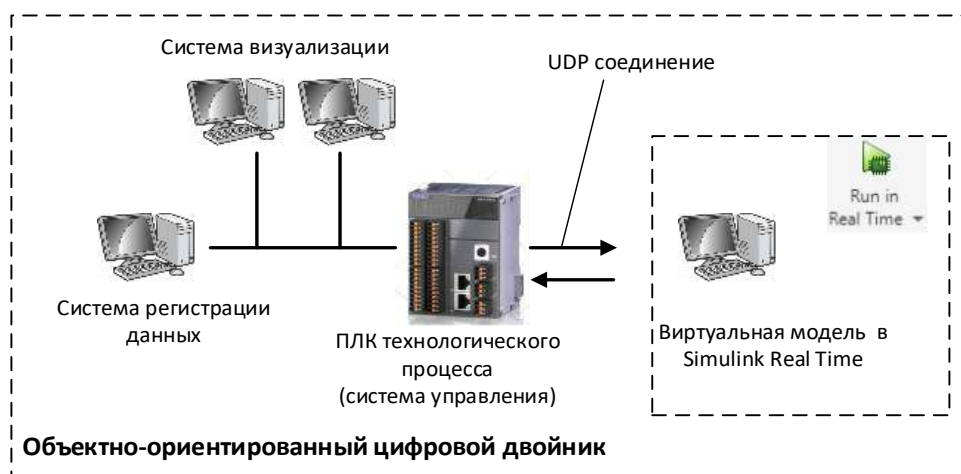
Система регулирования скорости выполнена двухконтурной с внутренним контуром регулирования момента, состоящем из двух параллельных контуров регулирования токов (на схеме не показаны). За счет этого реализован принцип векторного управления моментом. Более подробное описание электроприводов приведено в [147, 194].

2.2.2. Принцип построения DTA

На рисунке 2.4, а показано схематичное представление оборудования электромеханической системы клетки. Объект симуляции заменен на виртуальную модель, реализованную в Simulink Real Time (рисунок 2.4, б). В комплексе эта структура представляет собой агрегированный двойник исследуемого объекта, в состав которого входят ЦД-экземпляры.



а



б

Рисунок 2.4 – Блок-схемы электромеханической системы (а) и объектно-ориентированного DTA (б) горизонтальной клетки

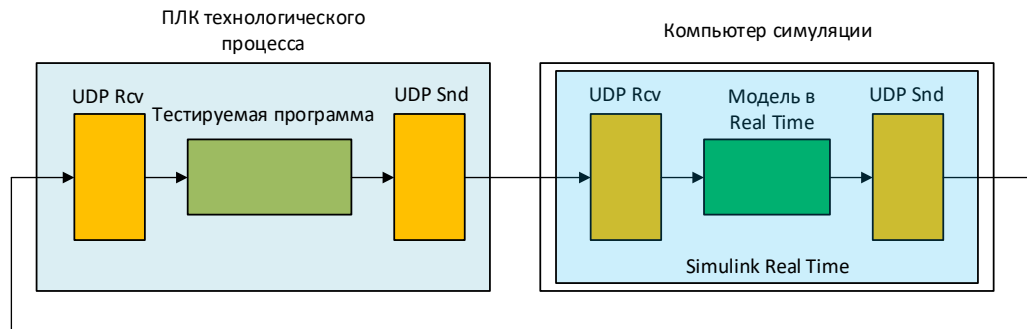
В части симуляции на компьютере располагается виртуальная модель двигателей и преобразователей частоты с системами управления, реализованная в Simulink Real Time. Модели механической части электропривода, гидравлической системы нажимных устройств и модель взаимосвязи валков через металл в этой модели не представлены, они рассматриваются ниже. На этапе исследований применен интерфейс между ПЛК и моделью в виде коммуникаций по UDP протоколу. В дальнейшем при реализации на объекте система может быть модернизирована с применением сетей Ethercat. Данные для анализа процесса считывались из ПЛК клетки системой Process data aquisition (ibaPDA) [196, 197], также велась регистрация осциллографами в Simulink.

2.2.3. Цифровой двойник электромеханической системы валков

Принцип технического исполнения двойника в Matlab Simulink поясняется структурой, представленной на рис. 2.5, а. Отладка алгоритмов управления выполнялась на стенде в лабораторных условиях (рис. 2.5, б). Он содержит промышленный контроллер, имеющий такие же характеристики (быстродействие и др.), что и технологический контроллер клетки. Также ПЛК снабжен аналогичным программным обеспечением и интерфейсом, осуществляющим связь с промышленным компьютером симуляции.

В качестве тестового контроллера использован ПЛК Xinje XA310 на базе процессора Celeron 1.5 GHz, снабженный средой разработки Codesys 3.5, широко применяемой для современных ПЛК (рассматривается в разделе 3). При реализации модели объекта в среде Simulink Real Time входные и выходные каналы ПЛК заменяются сигналами симуляции, показанными стрелками. Характеристики системы: время цикла задачи ПЛК: 3 мс, шаг времени симулятора в Simulink Real Time: 100 мкс, среднее время опроса IBA PDA через интерфейс Codesys - Xplorer составляет 7–12 мс.

Принцип обмена информацией на лабораторной установке поясняют фрагменты программы ПЛК, представленные на рис. 2.6, а. Размещение задач обмена данными, ПЛК-симулятор и системы регулирования показаны на рис. 2.6, б. Для взаимодействия контроллера и симулятора использован UDP интерфейс.

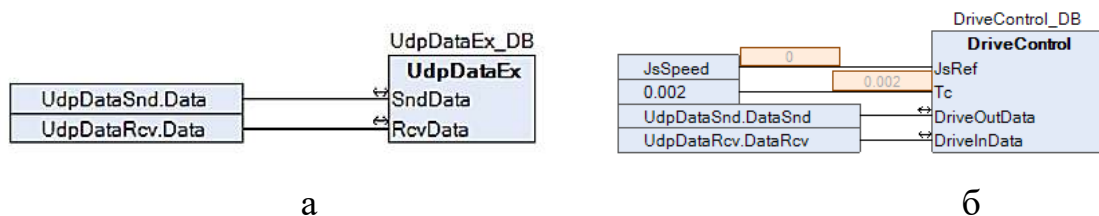


а



б

Рисунок 2.5 – Реализация цифрового двойника в Matlab Simulink Desktop Real Time (а) и в лабораторных условиях (б)



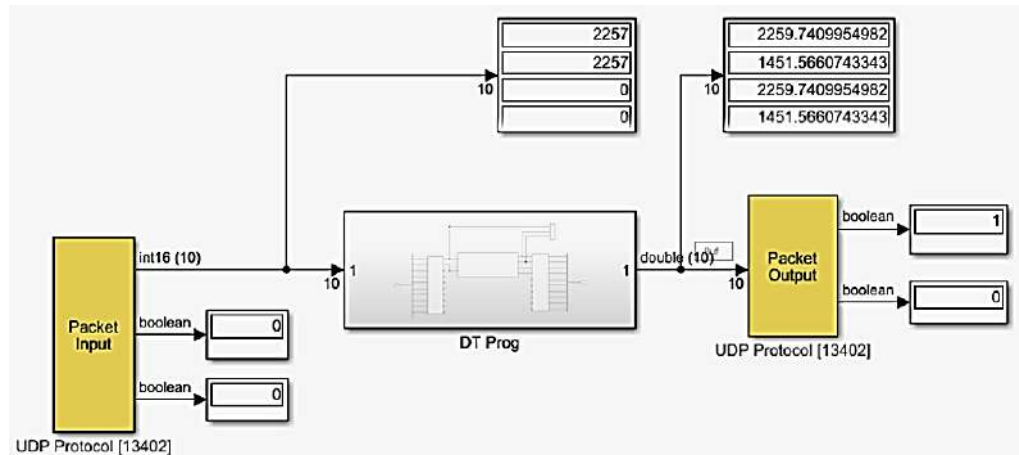
а

б

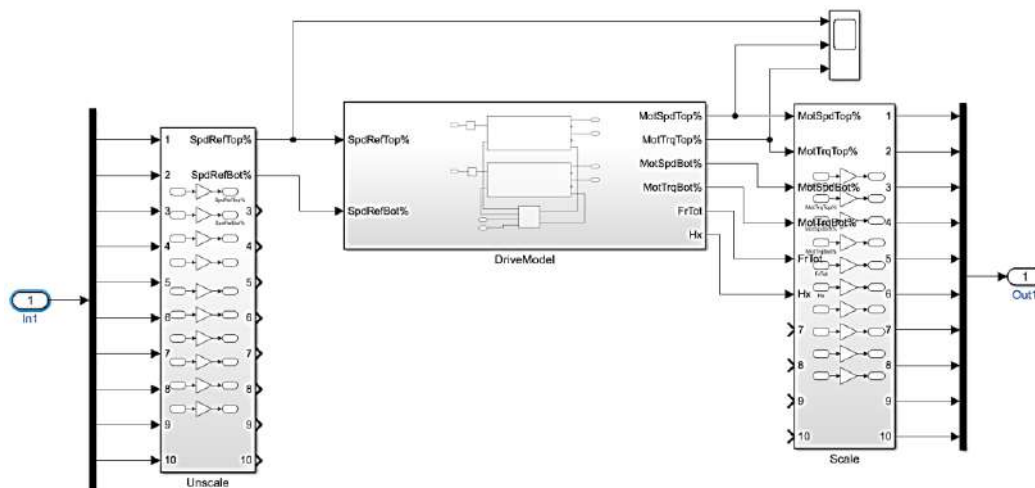
Рисунок 2.6 – Структура блока обмена по UDP (а) и блок, реализующий управление электроприводом (б)

Внешний вид программы симуляции в среде Simulink Desktop Real Time показан на рис. 2.7, а. Представлены блоки приема и передачи данных по UDP протоколу (Packet Input и Packet Output, соответственно) и программа двойника объекта (DT Prog). Структура блока DT Prog показана на рис. 2.7, б. В его состав входит модель электропривода клетки, включающая модели электромеханических систем валков. Также она включает модели системы регулирова-

ния зазора гидравлическими НУ, регулятора толщины, заполнения очага деформации и распределения нагрузок между верхним и нижним валками. Эти модели в данном подразделе не рассматриваются.



а



б

Рисунок 2.7 – Симулятор в Simulink Real Time (а) и структура блока DT Prog (б)

Структура блока DriveModel, входящего в DT Prog, показана на рис. 2.8. Он содержит блоки DriveTop, DriveBot, моделирующие электроприводы верхнего и нижнего валков, соответственно. На входы моделей подаются сигналы заданий скоростей SpdRefTop и SpdRefBot, формируемые программой симуляции в реальном PLC клетки. Блок LoadModel представляет собой математическое описание взаимодействия раската с валками с учетом реакции системы автоматического регулирования толщины при входе раската в клеть и распределении нагрузок по валкам [146].

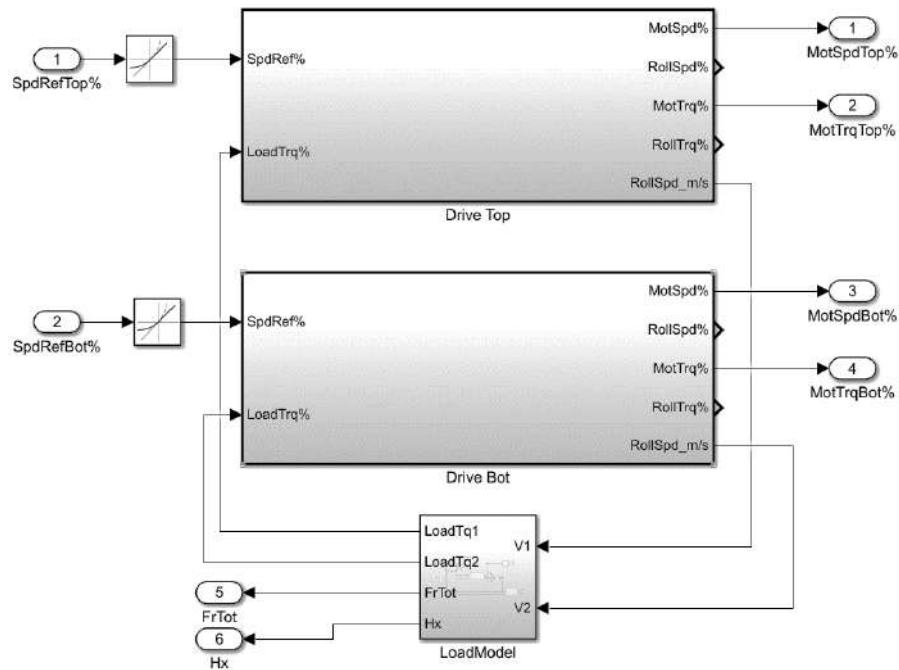


Рисунок 2.8 – Подключение блоков DriveModel верхнего и нижнего валков

2.3. Виртуальная модель электропривода

2.3.1. Разработка модели

Как было отмечено выше, в программной среде Simulink Real Time могут быть применены модели, разработанные в Matlab Simulink и Simscape. Так, в блоках Drive Top и Drive Bot реализована модель двухмассовой системы электропривода с двухконтурной системой регулирования скорости (рис. 2.9), разработанная в Simulink. Параметры модели, рассчитанные по координатам реального электропривода, и ее подробное описание приведены в [194, 195].

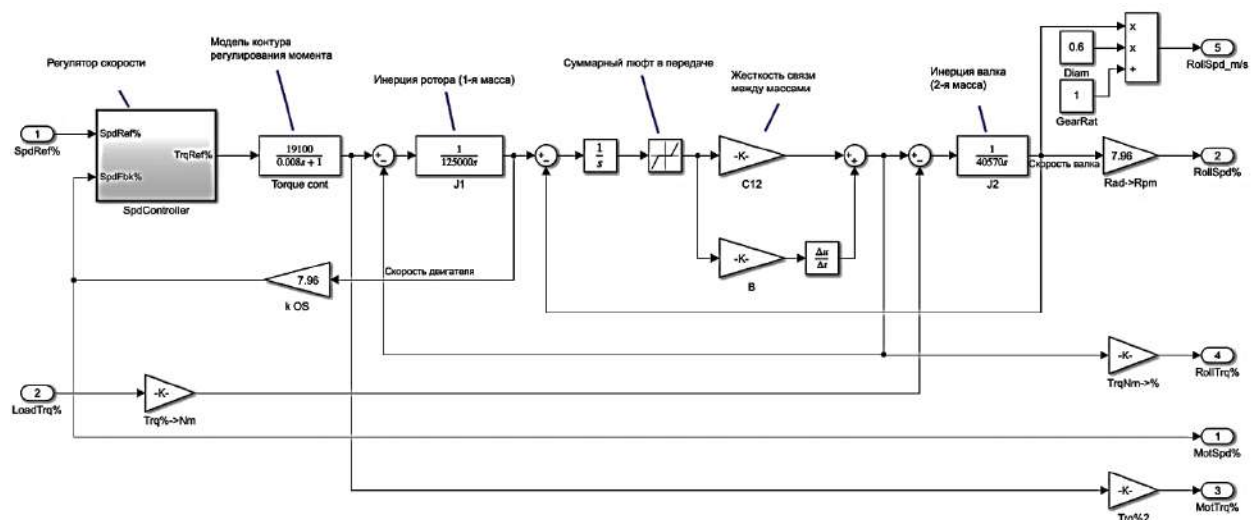


Рисунок 2.9 – Структура модели электропривода валка

Здесь показана система с полной моделью контура момента, содержащей силовую часть и систему управления. При моделировании упрощенной системы модель контура момента заменяется на инерционное звено с передаточной функцией:

$$W_{CT} = \frac{U_T}{U_{RefT}} = \frac{1}{T_{CT}S + 1},$$

где U_T – изображение сигнала момента;

U_{RefT} – изображение задания на момент;

T_{CT} – постоянная времени эквивалентного контура момента при его представлении в виде инерционного звена;

S – оператор Лапласа.

Синхронная машина описывается блоком из пакета Simscape. Подробное описание блоков библиотеки Simscape и примеры моделей систем управления для Matlab представлены в [198, 199].

Математическое описание двигателя основано на уравнениях обобщенной электрической машины, теоретические положения представлены в [200], подробное описание модели приведено в справке по Matlab. В модели используются блоки транзисторного моста ПЧ для питания статора, управляемый возбудитель и модель системы регулирования, которая выдает импульсы управления транзисторным мостом и силовой частью возбудителя. В ней также присутствует блок «Модель контура регулирования момента», он может быть представлен как сложная система частотно управляемого синхронного привода с векторным управлением (рис. 2.10). Напряжение DC звене для моделирования принято постоянным (конденсаторе C1 подключен к источнику постоянного напряжения). Работа AFE выпрямителя не рассматривается.

Структура модели силовой части и системы регулирования токов, реализованная в Simscape, приведена на рис. 2.11. Система регулирования содержит координатные преобразователи, регуляторы тока по осям d , q и тока возбуждения. Задания токов формируется на основе заданного момента двигателя и условий минимизации тока статора. Таким образом, система стремится поддерживать единичный коэффициент мощности двигателя для минимизации тока статора при заданном моменте.

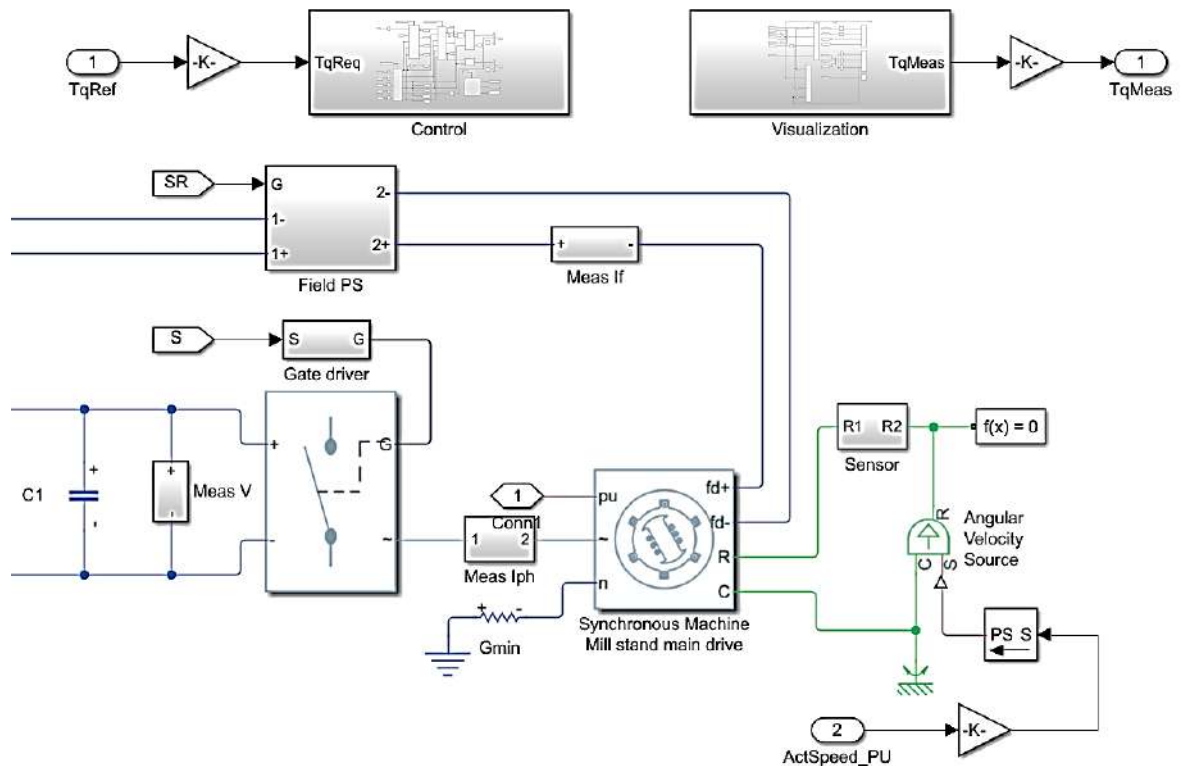


Рисунок 2.10 – Структура полного контура регулирования момента

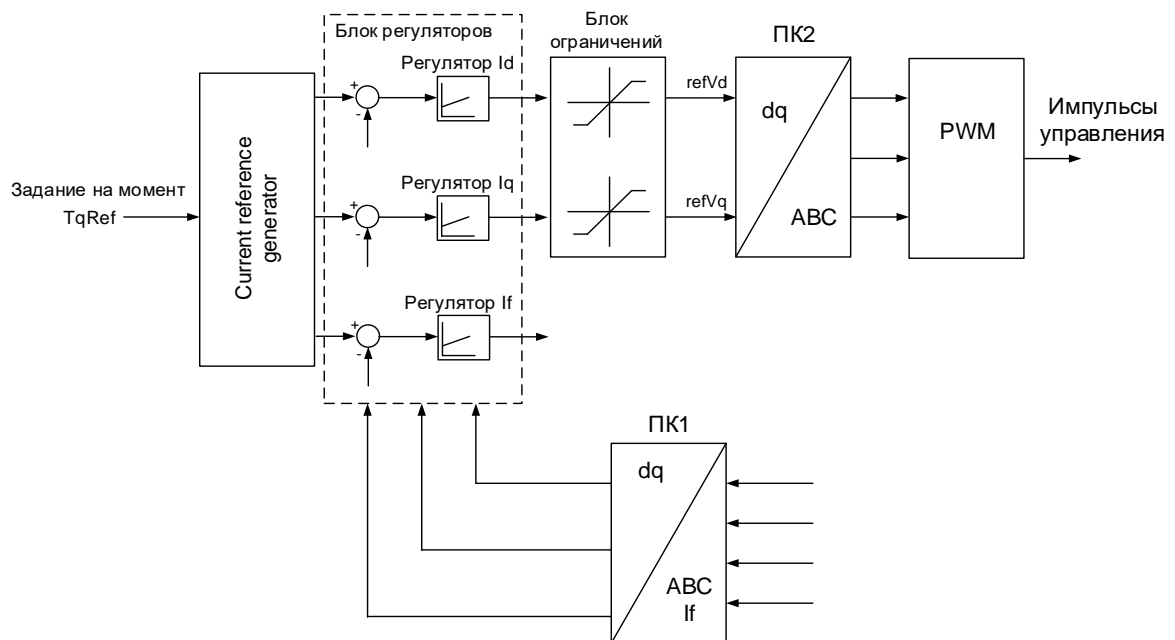


Рисунок 2.11 – Структура модели силовой части электропривода

Заданием для системы управления является задание момента от регулятора скорости, а выходом блока – актуальный момент двигателя. Для вычислений уравнений синхронной машины необходима скорость ротора, которая заводится из модели механической части привода. Подключение полной модели контура момента в модель 2-х массовой системы показано на рис. 2.9.

Структура системы регулирования момента представлена на рис. 2.12. Она содержит блок задания токов в функции заданного момента (блок «Ouler loop control» – внешний контур управления), блок «Current control» регуляторов токов по осям d, q и тока возбуждения, блок формирования импульсов (PWM generator). Математическое описание регуляторов рассмотрено в документации по Matlab, ссылки на которую указаны выше.

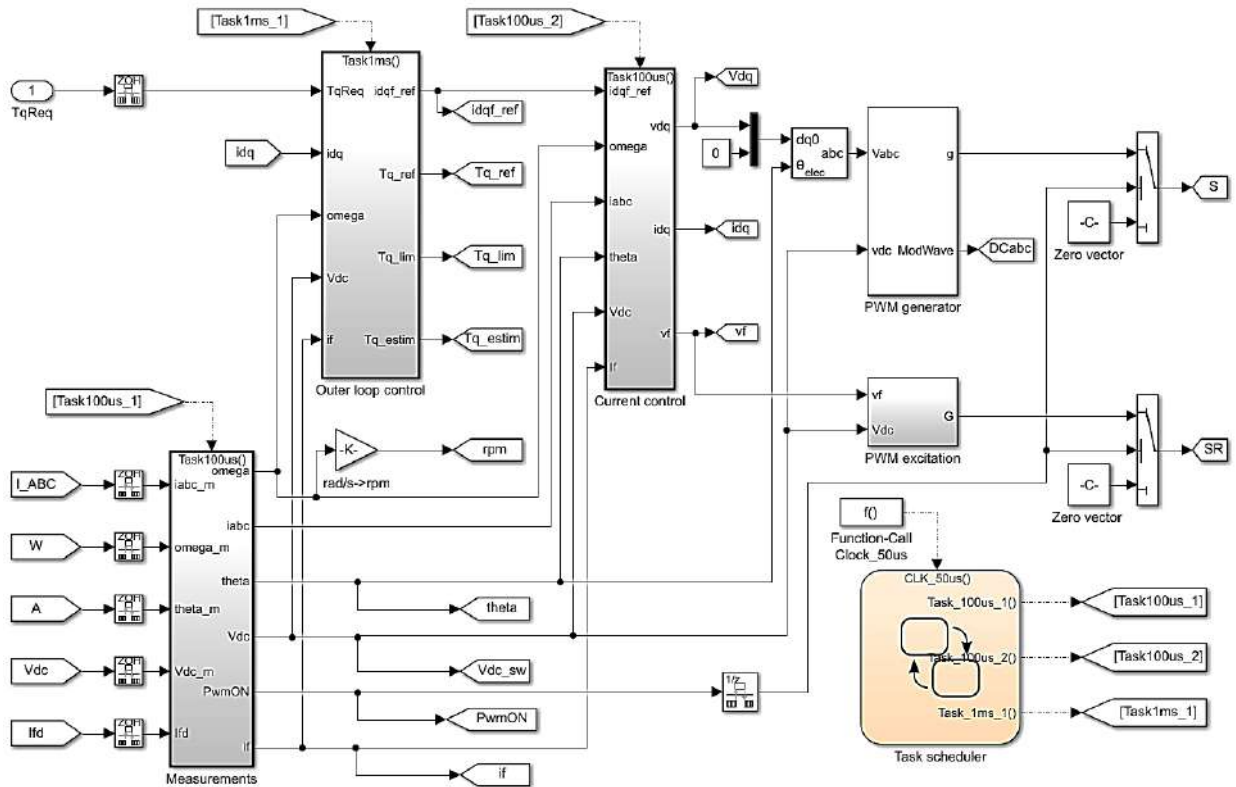
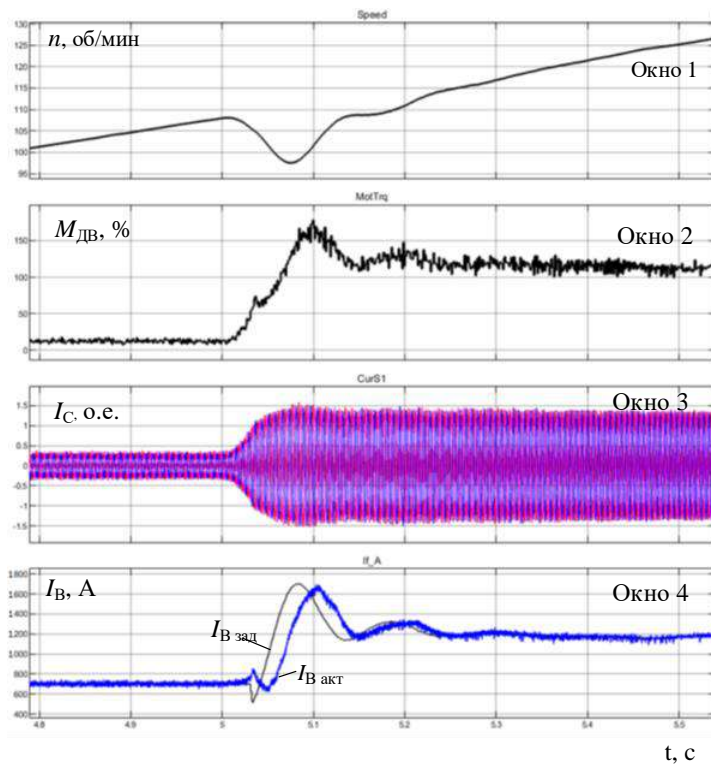


Рисунок 2.12 – Структура замкнутой системы регулирования момента в Matlab Simulink

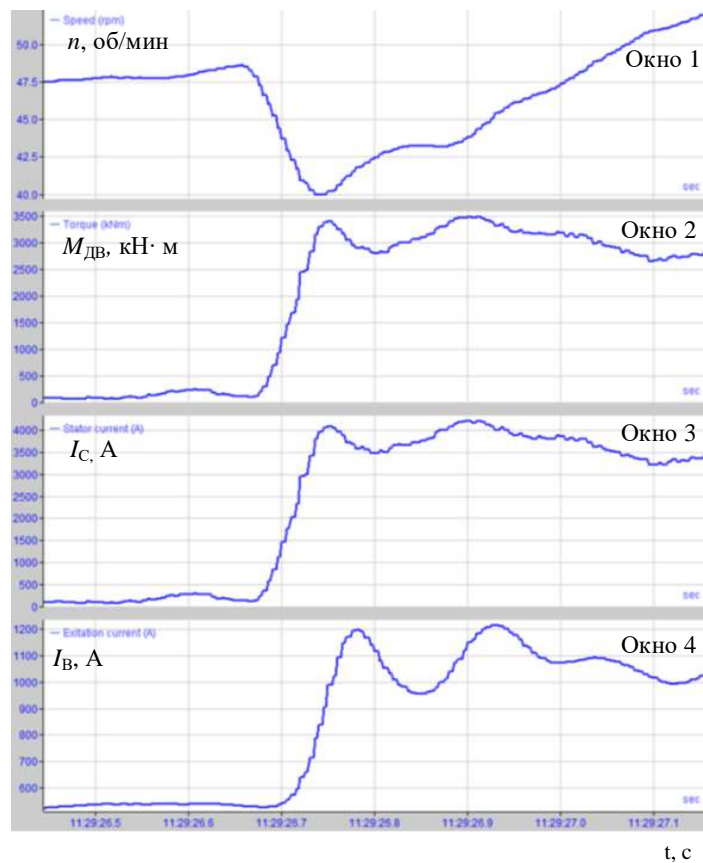
С помощью разработанной модели выполнены исследования динамических режимов электропривода, отдельные результаты рассматриваются ниже.

2.3.2. Результаты виртуальной настройки

Целью является проверка адекватности процессов, полученных с использованием цифрового двойника (рис. 2.13, а), и осциллограмм, зафиксированных на стане 5000 (рис. 2.13, б). Расчетные осциллограммы на рис. 2.13, а получены при классическом построении ЦД, когда виртуальная модель размещена в программируемом компьютере, а система управления – в PLC клетки.



а



б

Рисунок 2.13 – Переходные процессы, полученные при виртуальной настройке (а) и реальная осциллограмма при захвате (б): окна 1 – скорости двигателя $n_{дв}$, об/мин; окна 2 – моменты двигателя $M_{дв}$, (рис. а – % номинального, рис. б – кН·м); окна 3 – токи статора I_c , А; окна 4 – токи возбуждения I_b , А

Характер сигналов в модели (в данном случае токов) соответствует реальной осциллограмме от электропривода. Хотя очевидно, что добиться абсолютной идентичности процессов, полученных при виртуальной настройке и в режиме штатной эксплуатации невозможно. Тем не менее, результаты сопоставления переходных процессов позволяют сделать вывод об их взаимной адекватности и об удовлетворительной настройке системы регулирования скорости средствами цифрового двойника.

2.4. Моделирование гидравлических НУ в системе CAPT

2.4.1. Концепция ROLL-GAP CONTROLL

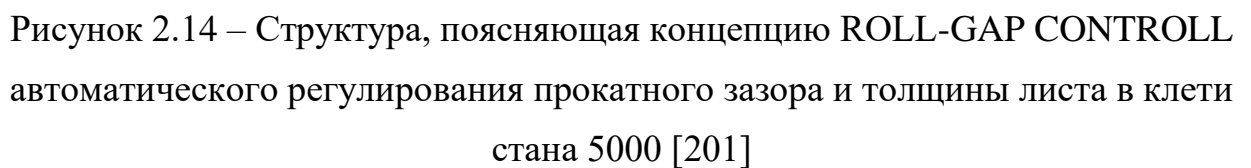
Принцип регулирования толщины и раствора валков поясняет функциональная схема, представленная на рис. 2.14 [201]. Она реализует концепцию ROLL-GAP CONTROLL регулирования толщины листа средствами гидравлических нажимных устройств, разработанную компанией SMS-Demag (в настоящее время – SMS group), реализованную на стане 5000 [202–205]. Она состоит из следующих систем (модулей):

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

Контур HGC обеспечивает выполнение следующих функций:

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

Автоматическое регулирование толщины (AGC) предназначено для поддержания постоянного раствора валков путем воздействия на гидравлические



Также в структуре предусмотрен регулятор направления прокатки Roll Alignment Control (RAC регулятор). В отечественных публикациях он получил

название «регулятор перекося зазора валков». Его функцией является поддержание постоянства межвалкового зазора по ширине раската, т.е. обеспечение параллельности валков при нарушениях условий прокатки. Подобные регуляторы также применяются в чистовых группах клетей широкополосных станов. Варианты их разработки представлены в публикациях [206–209]. Также решению этой проблемы посвящены разработки [210, 211].

2.4.2. Структуры моделей

Как отмечалось выше, наиболее полные модели гидравлических систем, содержащиеся в библиотеке Simscape, работоспособны в Simulink Real Time. Для моделирования в реальном времени гидравлической системы нажимных устройств использована библиотека Simscape Hydraulics. Структура блока, описывающего поведение гидроцилиндра НУ, показана на рис. 2.15. Блок включает в себя модели сервоклапана с динамической моделью его золотника, модель гидроцилиндра, датчики давления в полостях, модель трения в гидроцилиндре, модель регулятора положения НУ с адаптацией к изменениям давления в гидроцилиндре как это и выполнено в реальной системе.

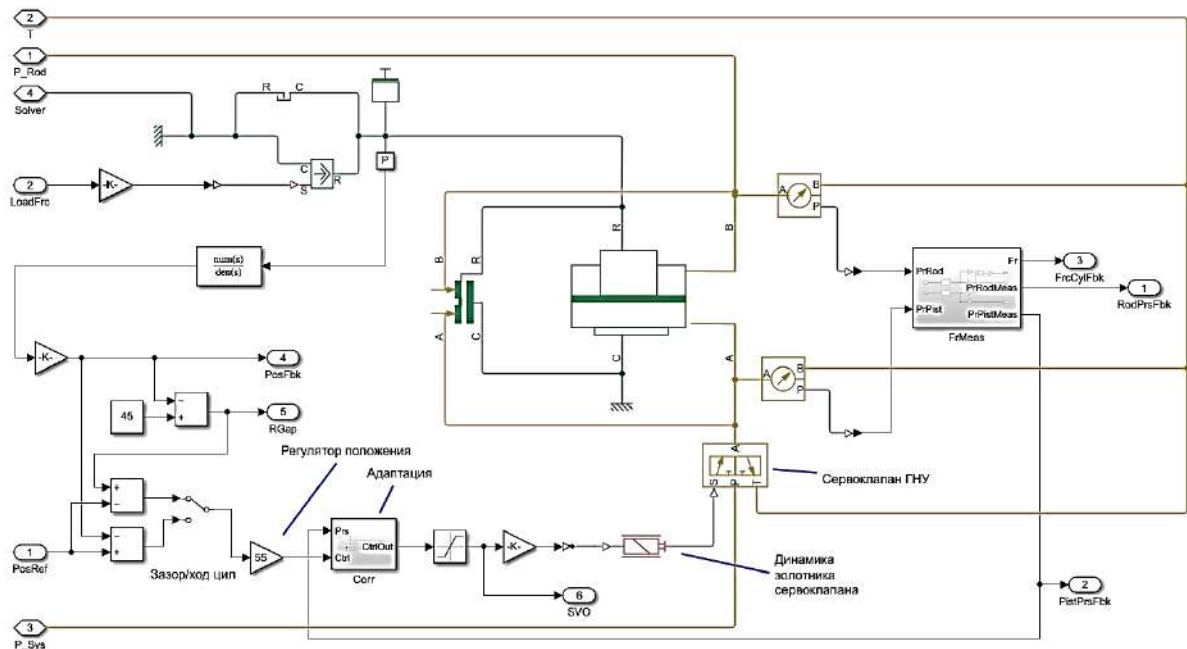


Рисунок 2.15 – Структура модели гидравлического НУ, реализованная на элементах Simscape Hydraulics

Данный модуль при обработке управляющих сигналов от PLC и обратной связи с объектом представляет собой цифровой двойник-прототип реального

устройства. Однако его виртуальная модель должна содержать модуль, описывающий связь гидравлического устройства и электромеханической системы через металл.

Для выполнения этого условия на рис. 2.16 представлена структура в Matlab Simulink, моделирующая зависимость толщины полосы на выходе из клетки, и усилия, возникающего при прокатке. По существу, это цифровой симулятор, описывающий в реальном времени зависимость толщины от величины зазора между валками с учетом жесткости металла и клетки. Она реализует известный принцип Симса-Головина, на котором построено большинство современных систем автоматического регулирования толщины (САРТ). Зависимости Симса-Головина и описание САРТ стана 5000 приведены в [135, 201]. Такие модели строятся для каждого гидравлического НУ (на стане 5000 установлены два гидроцилиндра слева и справа под опорными валками). Модель, показанная на рис. 2.15, справедлива для каждого гидроцилиндра, это позволяет исследовать дефект серповидности полосы про прокатке, возникающий из-за перекоса зазора валков относительно оси прокатки [212, 213]. При значительной серповидности этот процесс относится к аварийным, он подробно исследован в [119] и здесь не рассматривается.

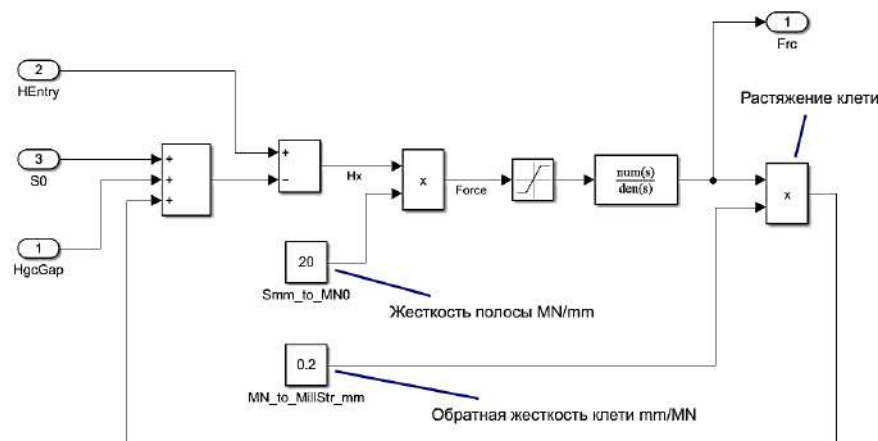
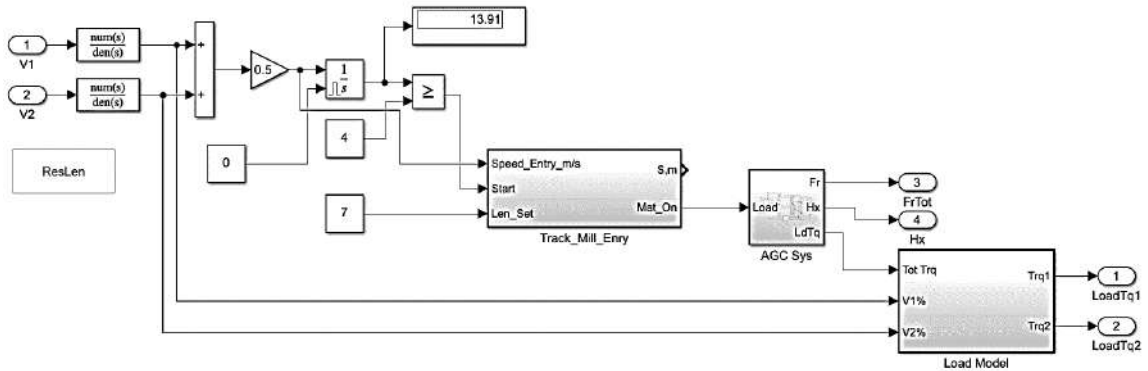


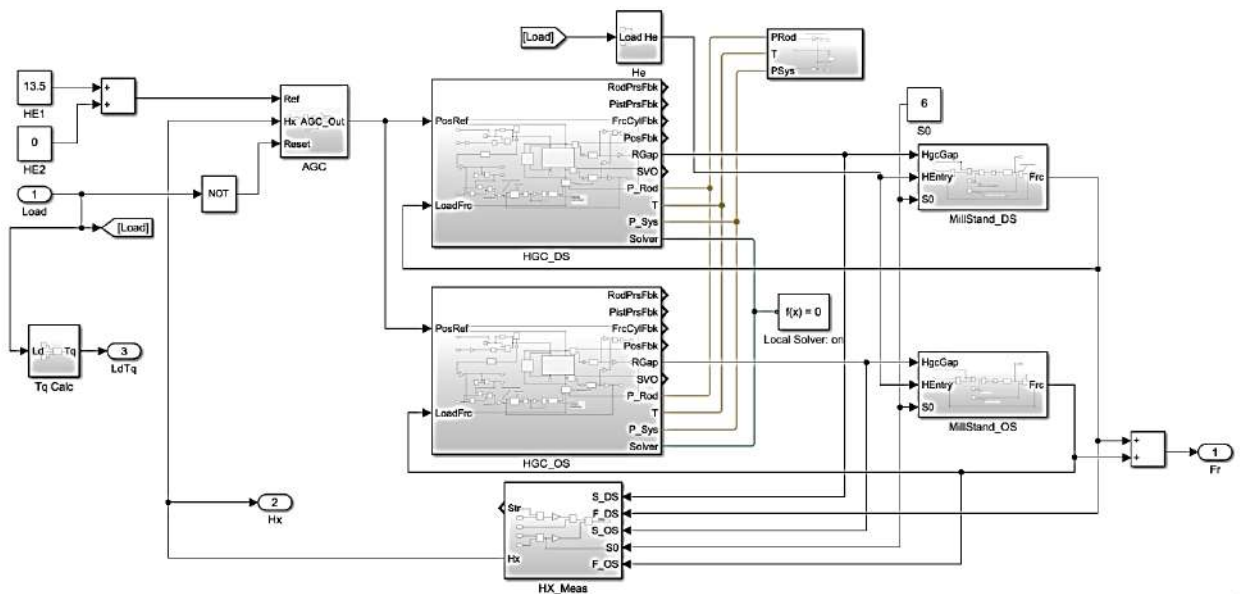
Рисунок 2.16 – Структура модели, реализующей зависимость Симса-Головина для одного НУ

В завершение описания цифровых моделей, использованных для построения ЦД клетки, на рис. 2.16, а представлена структура модели нагрузки электроприводов, возникающей при перемещении НУ. Она содержит модель гидравлических НУ, контуры регулирования толщины и положения НУ (блок

AGC Sys), реализованные в Simscare. Также в структуру входят модель момента прокатки и распределения моментов в зависимости от рассогласования скоростей верхнего и нижнего валков (блок Load Model). По существу, это симулятор взаимосвязи гидравлических устройств и электромеханических систем валков клетки через металл.



a



б

Рисунок 2.16 – Структуры модели взаимосвязи НУ и валков через металл (а) и системы автоматического регулирования толщины (б)

На рис. 2.16, б представлена структура модели регулирования толщины, также реализованная на элементной базе Simscare. Она содержит модели двух гидроцилиндров (HGC_DS и HGC_OS) и модель процесса прокатки, учитывающая жесткость клетки и жесткость полосы по двум сторонам (приводная и неприводная стороны, блоки MillStand_DS и MillStand_OS). На выходах блоков

HGC_DS и HGC_OS формируются сигналы положений НУ, величины давлений в полостях гидроцилиндров, которые используются для расчета усилия прокатки аналогично тому, как это происходит в реальной системе.

Разработанные модели электроприводов валков, рассмотренные в п. 2.3, и представленные модели гидравлических НУ в структуре САПТ объединены в общую структуру, использованную в качестве виртуальной модели электромеханических и гидравлических систем клетки в составе агрегированного цифрового двойника, представленную на рис. 2.17. Она разработана с учетом взаимосвязи электро- и гидроприводов через металл.

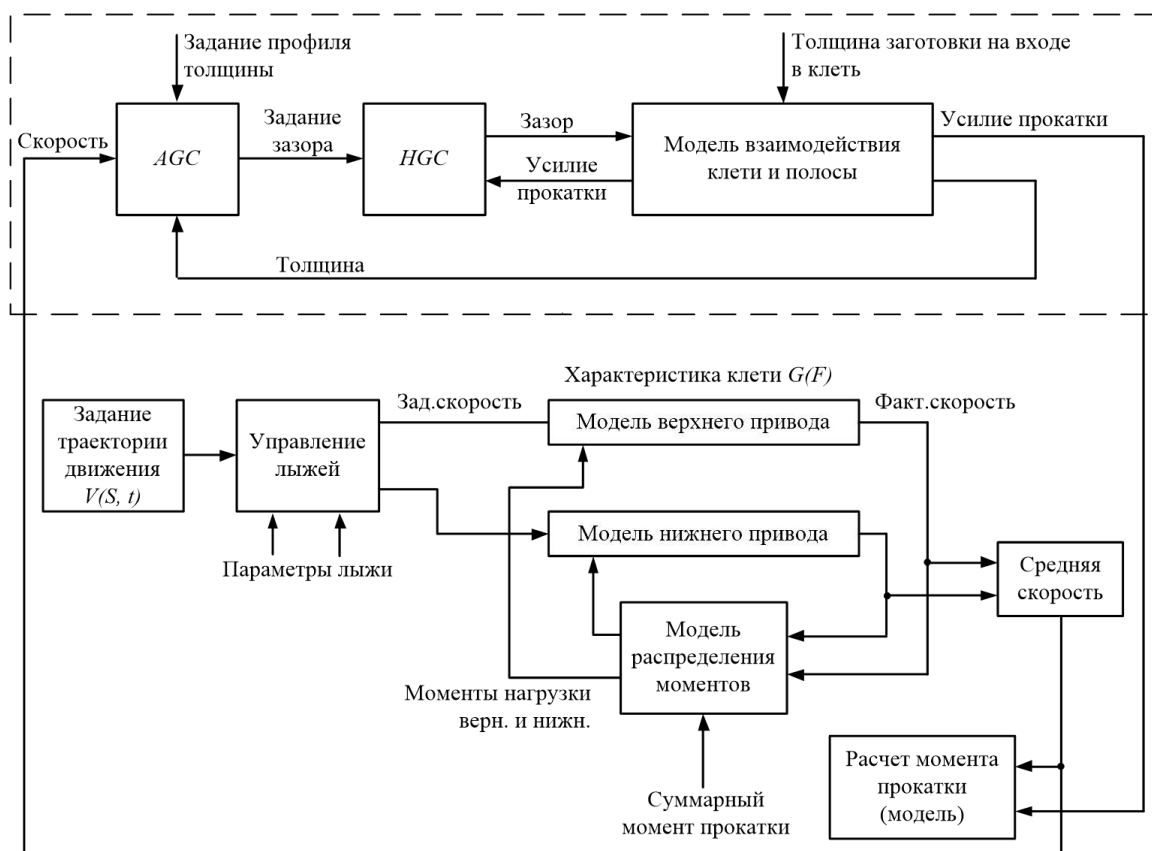


Рисунок 2.17 – Блок-схема виртуальной модели взаимосвязанных электромеханических и гидравлических систем клетки [129]

В верхней части схемы приведена условная модель САПТ, подробно рассмотренная в [129]. Там же представлены структурные схемы систем регулирования толщины и управления положением гидравлических НУ клетки стана 5000. Кроме рассмотренных выше блоков в состав виртуальной модели входят модели распределения нагрузок ВГП и НГП, регулятора скорости, также рассмотренные в [129].

2.5. Валидация результатов

С использованием разработанного цифрового двойника выполнена настройка регуляторов электромеханических систем валков клетки стана 5000, исследованы режимы их работы с учетом взаимосвязи через металл. В результате осуществлена их виртуальная настройка с использованием разработанных ЦД. Обеспечены оптимальные переходные процессы электроприводов в режимах, возникающих за цикл прокатки. Далее разработанный алгоритм управления, отлаженный на виртуальном стенде, был «перенесен» в ПО промышленного контроллера клетки. Выполнена проверка адекватности процессов, полученных с помощью разработанного ЦД и аналогичных процессов, зафиксированных на стане.

2.5.1. Результаты тестовой настройки гидро-САРТ

От быстродействия контура регулирования раствора валков (положения гидравлических НУ – HGC) зависит точность регулирования толщины [214]. Динамические характеристики контура можно оценить по реакции системы на скачок задания. Такой тест проводится автоматически при каждой калибровке зазора (настройке после замены валков). Переходный процесс при отработке скачка задания показан на рис. 2.18. Из осциллограммы видно, что контур HGC можно аппроксимировать фильтром 1-го порядка с постоянной времени, приближенно равной 10–15 мс.

На рис. 2.19 представлены аналогичные переходные процессы при виртуальной настройке САРТ. Показана отработка контуром регулирования положения скачка задания по зазору с раскрытием на 50 мкм под суммарной нагрузкой 20 МН и последующим закрытием на 50 мкм.

Сравнение переходных процессов всех координат на рисунках 2.18 и 2.19 позволяет сделать вывод об их адекватности. Также выполнено сопоставление относительных величин в характерных точках в фиксированные моменты времени (здесь не приводятся). Доказано, что при виртуальной настройке получены процессы, которые соответствуют аналогичным процессам при тестовой проверке объекта.

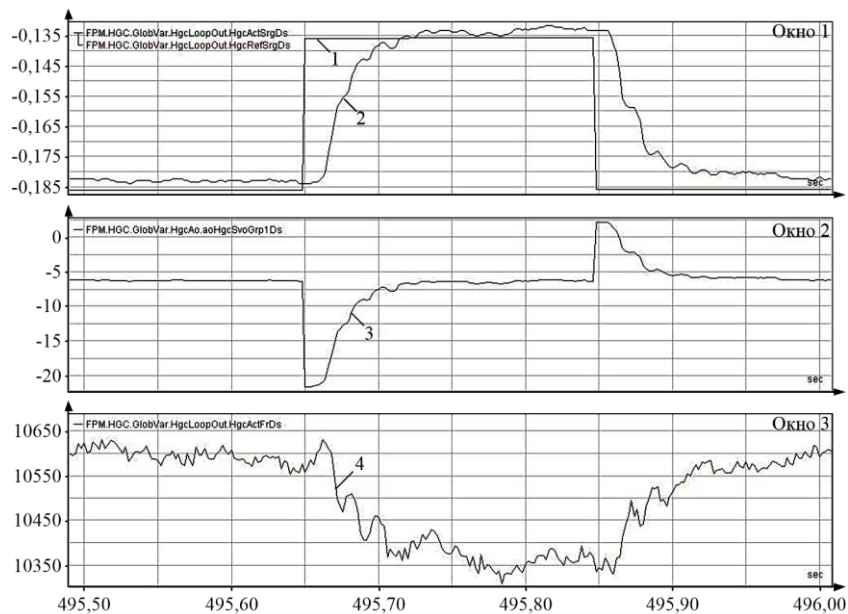


Рисунок 2.18 – Реакция контура регулирования положения НГС на скачок задания: 1, 2 – заданное и фактическое положения НУ (заданный и фактический зазор); 2 – задание на сервоклапан; 3 – усилие в гидроцилиндре

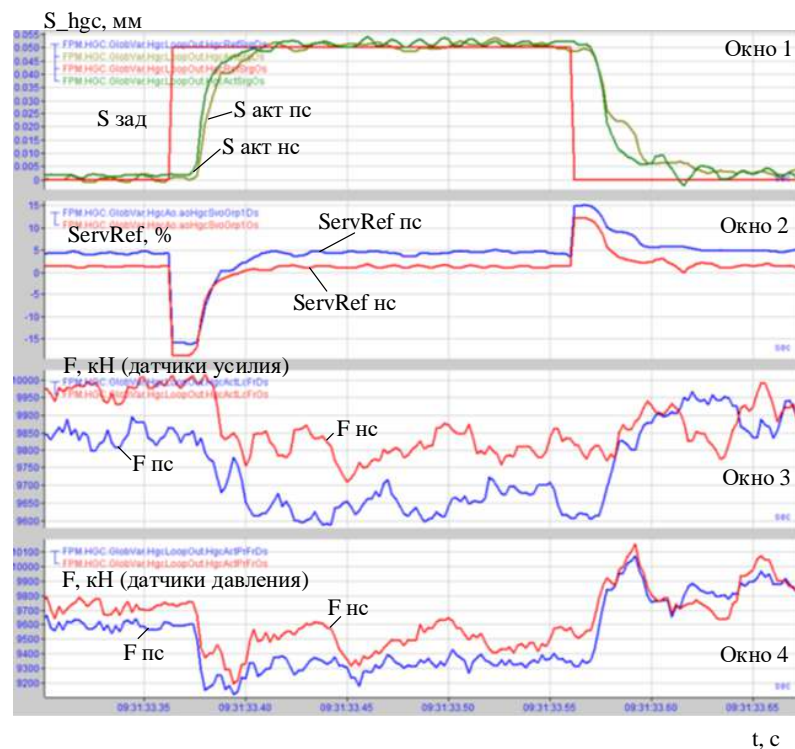


Рисунок 2.19 – Отработка контуром положения скачка задания по зазору при виртуальной настройке: окно 1 – задание на зазор $S_{\text{зад}}$, и фактический зазор с приводной $S_{\text{акт пс}}$, и неприводной $S_{\text{акт нс}}$ сторон, мм; окно 2 – задания на сервоклапан с приводной ServRef пс и неприводной ServRef нс сторон, %; окна 3, 4 – усилия по сторонам клетки, измеренные месдозами и датчиками давления масла в гидроцилиндре, кН

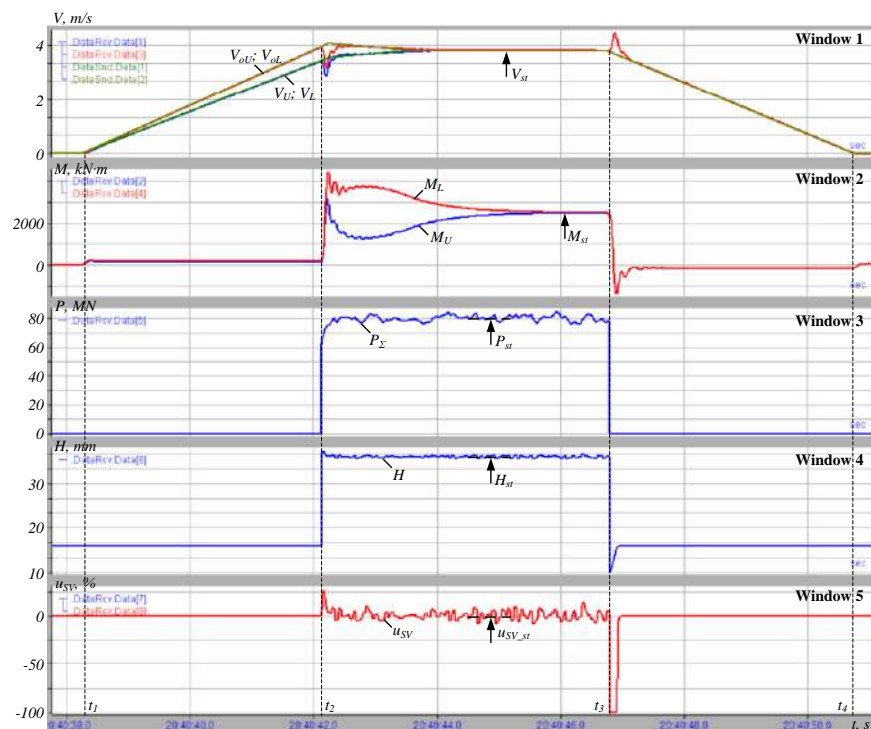
2.5.2. Адекватность моделирования взаимосвязанных электроприводов валков

На рис. 2.20 представлены осциллограммы переходных процессов координат электромеханических систем ВГП и НГП за один проход реверсивной прокатки [215]. Процессы на рис. 2.20, а получены при виртуальной настройке с помощью разработанного ЦД, на рис. 2.20, б показаны аналогичные процессы, зафиксированные системой PDA на стане. В интервале времени t_1 – t_2 происходит разгон электроприводов, в момент t_2 – захват раската валками клетки, далее до момента t_3 осуществляется прокатка на установившейся скорости, а в интервале t_3 – t_4 – замедление до исходной скорости без металла в валках. Начальная и конечная скорости на модели (окно 1 на рис. 2.20, а) приняты равными нулю, реальная скорость при отсутствии металла в клетке (окно 1 на рис. 2.20, б) составляет 1,5 м/с.

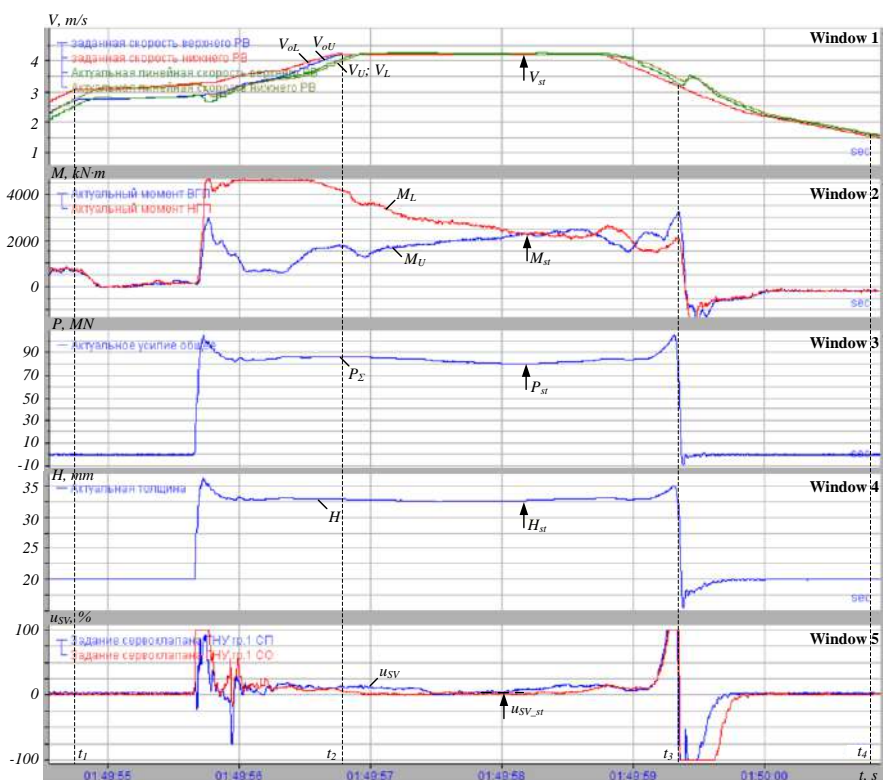
Качественный анализ представленных процессов подтверждает их идентичность, хотя установившиеся значения координат отличаются. Значения координат в квазиустановившемся режиме прокатки, показанные на рисунках, приведены в таблице 2.1. Скорость прокатки на рис. 2.20, а составляет 3,8 м/с, а на рис. 2.20, б – 3,3 м/с. Наиболее существенно различаются усилия (80 МН и 85 МН), различие толщин раската на выходе из клетки составляет 6,2%. Это объясняется тем, что при виртуальной настройке моделировались процессы, соответствующие прокатке листа другого сортамента, чем зафиксированные на стане. Поэтому для сопоставления данных, полученных при виртуальной настройке, с реальными необходимо их перевести в относительные единицы. Хотя с точки зрения исследования режимов прокатки единицы измерения координат не имеют значения.

Таблица 2.1 – Значения координат в квазиустановившемся режиме

Параметр	Единица измерения	Значение		Погрешность, %
		на виртуальной модели, рис. 2.20, а	на объекте рис. 2.20, б	
v_{ST}	м/с	3,8	3,3	13
M_{ST}	кН·м	2,4	2,5	4,1
P_{ST}	МН	80	85	6,2
H_{ST}	мм	36,7	32,5	11,4
u_{SV_ST}	% открытия	0	0	0



a



б

Рисунок 2.20 – Переходные процессы за цикл прокатки, полученные при виртуальной настройке (а) и при прокатке на стане (б): окно 1 – заданные v_{0U} , v_{0L} и фактические v_U , v_L скорости ВГП и НГП; окно 2 – моменты M_U , M_L двигателей; окно 3 – суммарное усилие прокатки P_Σ ; окно 4 – толщина раската H после выхода из клетки; окно 5 – сигналы задания u_{SV} на сервоклапаны НУ

Результаты сопоставления позволили сделать следующие выводы:

1. Контролируемые координаты, зафиксированные на обоих рисунках, совпадают с погрешностью, не превышающей 13%.
2. Максимальные динамические величины, зафиксированные при захвате металла в момент времени t_2 и при выходе из валков (момент t_4) различаются. Это объясняется тем, что при разработке виртуальных моделей, входящих в структуру ЦД, невозможно учесть все множество факторов, влияющих на переходные процессы.

Последний вывод подтверждают авторы [88]. Они считают, что «с точки зрения проектирования алгоритмов управления модель должна быть полной, чтобы идеально отражать динамику системы, и оставаться достаточно простой, чтобы обеспечить основу для разработки управления на основе модели». На основании этого делается утверждение, что «неизбежный уровень упрощения означает, что существуют некоторые отклонения между реальным поведением системы и ее виртуальной моделью». С учетом данного вывода следует принять, что полученные результаты являются адекватными. Это значит, что разработанный цифровой двойник можно использовать для исследования всех режимов, возникающих за цикл прокатки.

Выводы по результатам исследований

Выполненная процедура валидации результатов подразумевает использование оборудования прокатного стана (либо другого агрегата) для тестирования алгоритма контроллера в реальных ситуациях. В моделировании НІЛ использование реального оборудования физической системы может быть необязательным. Это обеспечивается при разработке алгоритма управления на отдельном ПЛК либо, как будет показано в следующем разделе, на отдельном ядре многоядерного процессора. Также нет необходимости создания натуралистической испытательной установки (для клетки прокатного стана это практически невозможно ввиду ее сложности). Такие преимущества обеспечиваются благодаря использованию разработанной виртуальной модели во взаимосвязи с сигналами, поступающими от контроллера объекта. За счет этого моделирование НІЛ обеспечивает преимущества в стоимости и времени пуско-наладочных работ.

Моделирование HIL, как правило, менее затратно при изменениях в проекте. Это продемонстрировано на приведенном примере замены преобразователей частоты электроприводов прокатной клетки. Более того, моделирование HIL может быть выполнено раньше, чем проверка в рабочем процессе. Это позволяет выявить и устранить проблемы на ранних этапах проекта до ввода объекта в эксплуатацию. Таким образом, HIL-симуляция требует меньших затрат времени и ресурсов (в том числе людских), поэтому более эффективна, чем традиционная настройка. Кроме того, она может быть использована для тестирования реакции цифрового двойника на экстремальные, в том числе, аварийные события.

2.6. Обоснование учета задержек сигналов в структурах ЦД

2.6.1. Оценка быстродействия электро- и гидравлических систем

В таблице 2.2 указаны типовые времена циклов элементов систем автоматики металлургического оборудования при их реализации в ПЛК. Приведенные значения получены в результате анализа программного обеспечения контроллеров производителей технологических комплексов SMS-GROOP, DANIELI, Siemens. Указанные значения у разных производителей могут различаться, но обычно они близки к указанным диапазонам. В эти значения входит время цикла программы регуляторов при условии, что сигналы обратных связей измеряются, принимаются в программу ПЛК, а выходные воздействия программы поступают в исполнительные механизмы в пределах времени, не большего чем время цикла программы.

Из таблицы следует, что к отдельным системам предъявляются жесткие требования в отношении быстродействия при передаче сигналов. Пример построения системы управления чистовой группой стана горячей прокатки приведен в [24–26], аналогичный пример для системы управления ГНУ в структуре SAPT (HGC и AGC) рассмотрен в [27, 28]. В подобных системах ввод «быстрых» сигналов обратных связей в технологический контроллер осуществляется либо непосредственно через модули ввода вывода, установленные в «корзине» ПЛК, либо от станций удаленного ввода-вывода. Подключе-

ние этих станций к процессору ПЛК осуществляется по информационным сетям. В современных решениях распространены интерфейсы ProfiBus DP, Mod-Bus TCP, Profinet, EtherCat. Последние два обеспечивают цикл шины в 1 мс, кроме того, EtherCat по спецификации может работать с циклом 0.2 мс, что является перспективной технологией на ближайшее будущее.

Таблица 2.2 – Времена циклов регулирования электрических и гидравлических приводов прокатных станов и их технологических узлов

Задача	Время цикла
Регулирование положения гидравлических нажимных устройств (ГНУ)	1...3 мс
Регулирование толщины с воздействием на положение ГНУ	2...6 мс
Регулирование усилия системы противоизгиба валков	5...10 мс
Система управления режимами скоростей (СУРС) листовых станов горячей прокатки	10...20 мс
СУРС станов холодной прокатки	10...20 мс
СУРС сортовых станов	20 мс
Регулирование положения либо усилия петледержателей станов горячей прокатки	5...10 мс
Регулирование положения – усилия формирующих роликов моталок	2...5 мс
Регулирование положения (зазоров) тянущих роликов, манипуляторов	10...40 мс
СУРС непрерывных технологических линий	20...40 мс
Летучие ножницы (контур регулирования положения)	5 мс
Летучие ножницы с повышенной точностью реза	от 0.5 мс

В качестве интерфейсов датчиков, как правило, используются:

- аналоговые сигналы 4...20 мА для датчиков давления с последующим преобразованием в цифровой код;
- непосредственное подключение к информационной сети (например, Profibus, Profinet) или интерфейсы, подобные SSI, для сигналов положения;
- аппаратные интерфейсы инкрементальных энкодеров для сигналов скорости и положения механизмов с подключением к аппаратным счетным модулям.

Интерфейс с управляемыми электро- и гидроприводами, как правило, осуществляется через информационную сеть (полевую шину – Field bus). Очевидно, что при создании ЦД для целей виртуального ввода в эксплуатацию и

наладки систем автоматики необходимо обеспечивать такое же или близкое время обмена сигналами между ПЛК и моделью как на реальном объекте. Однако в приведенных рассуждениях не учитываются задержки времени, которые возникают в ЦД. Эти задержки зависят от конфигурации ЦД и соответственно от дополнительного времени, необходимого для поступления сигналов при обмене данными. Такая вынужденная задержка, как правило, не учитывается, но оказывает влияние на процессы обмена информацией между физическим объектом и виртуальной моделью. Поэтому оценка и учет данной задержки необходимы при создании и внедрении ЦД.

Ниже решаются следующие задачи:

- дается экспериментальное подтверждение актуальности учета задержек при передаче сигналов в структурах ЦД при различных вариантах размещения виртуальных моделей в компьютере и ПЛК;
- дается оценка запаздывания при обмене данными;
- предлагается схема моделирования сигналов с запаздыванием, выполняется анализ переходных процессов при введении дополнительных звеньев задержки.

2.6.2. Экспериментальная оценка задержек сигналов в ЦД прокатной клетки

С использованием рассмотренного способа виртуального моделирования выполнена экспериментальная оценка времени задержки сигналов в цифровых двойниках электромеханических и гидравлических систем. Ниже, в качестве примера, приведена оценка запаздываний сигналов в системе управления электроприводом клетки стана 5000. Структура, поясняющая обмен информацией, представлена на рис. 2.21 [215]. Эта система включает ПЛК технологического процесса, в котором исполняется программа управления приводами (формирование заданий в соответствии с траекторией движения листа, деление нагрузки между приводами верхнего и нижнего валков, лыжеобразование и пр.). Также в нее входят контроллеры преобразователей частоты (ПЧ), подключенных по сети ProfiBus к ПЛК. Такое размещение устройств удобно для виртуальной

наладки электроприводов, которая применяется при их модернизации с заменой оборудования. Именно для случая перевода электропривода на новые ПЧ был разработан рассматриваемый двойник.

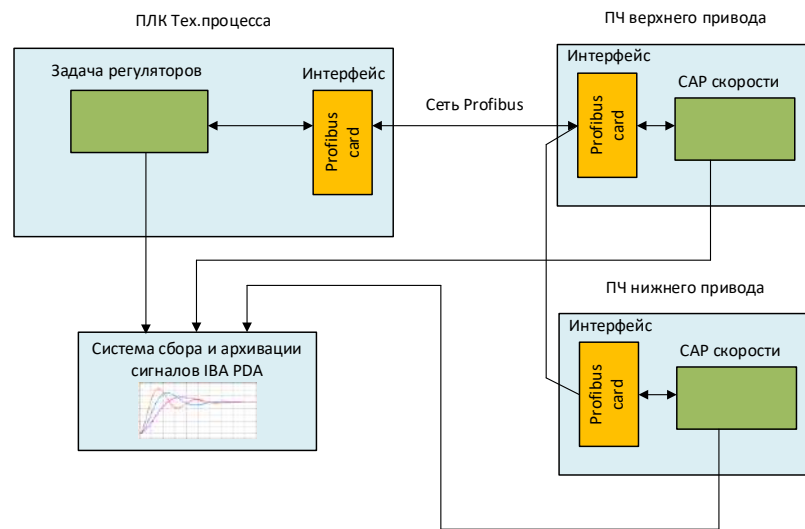


Рисунок 2.21 – Схема связи для обмена информацией между ПЛК технологического процесса и преобразователями частоты

Программа управления электроприводом реализована в ПЛК и выполняется с фиксированным циклом 5 мс. Скорость обмена по Profibus – 12 Mbit/s. При этом обмен по сети осуществляется операционной системой контроллера независимо от программы регуляторов. С целью регистрации данных ПЛК и ПЧ подключены к системе ibaPDA через оптический интерфейс. Время цикла сбора данных системой PDA установлено равным 1 мс.

Задержку в передаче сигналов от системы автоматического регулирования, выполненной в ПЧ, к программе регулирования в ПЛК можно наблюдать на осциллограммах крутящего момента двигателя (рис. 2.22, а), который вычисляется в ПЧ и передается ПЛК по сети (рис. 2.21). Запаздывание сигнала момента реальной системы составляет 6...10 мс, что вполне соизмеримо с задержками в ЦД при использовании замены реального интерфейса на связь между ПЛК и моделью по UDP протоколу.

Из рисунка 2.22, б следует, что время задержки, выделенное маркерами, составляет около 7 мс. Это время соизмеримо с временами цикла электрических приводов и систем управления, указанными в таблице 2.2, и даже превышает время цикла ряда механизмов. Данный факт подтверждает необходимость учета запаздываний в интерфейсах цифровых систем. Соответственно

подтверждаются актуальность исследования данного вопроса и важность полученных результатов.

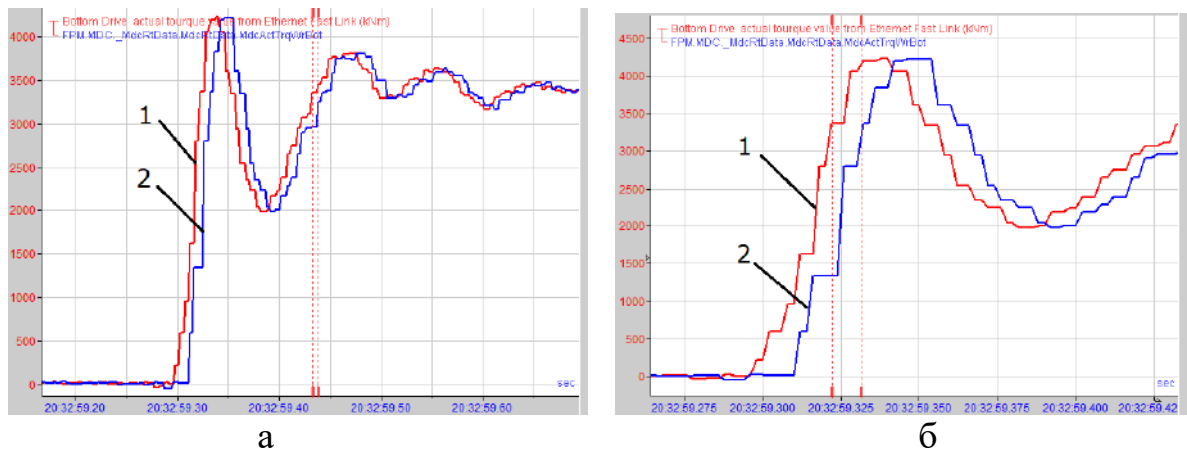


Рисунок 2.22 – Иллюстрация реального запаздывания сигналов крутящего момента в разных масштабах времени (а) и (б): 1 – момент непосредственно в ПЧ; 2 – сигнал из ПЛК, поступающий от ПЧ по сети

Также был проведен анализ запаздываний сигналов в гидравлической системе нажимных устройств клетки. С этой целью была исследована модель гидроцилиндра с сервоуправлением, представленная на рис. 2.23. Она разработана в ресурсах пакета Simscape Hydraulics [216, 217], реализована в Simulink Real Time на отдельном ПК, поэтому задержки в передаче сигналов должны быть заметными. По существу, она является детализированным фрагментом модели, представленной выше на рис. 2.15. Из ПЛК в модель задается уставка положения сервоклапана, обратные связи по положению (PosFbk), давлению в полостях ГЦ (PistPrsFbk, RodPrsFbk) отправляются из компьютера симуляции обратно в ПЛК, где используются для работы отлаживаемого ПО САР положения. Таким образом осуществляется аппаратное моделирование в цикле НПЛ.

На рис. 2.24 приведен пример переходных процессов при отработке линейного задания на регулятор положения в ПЛК. Как и в предыдущем примере графики получены на стороне ПЛК (рис. 2.21). Они демонстрируют наличие запаздывания Δt между сигналами задания (кривая 1) и фактического положения (кривая 2) в режиме обмена данными. Эта задержка составляет около 0.2 с, что значительно превышает циклы опроса гидроприводов, указанные в таблице 2.2. Данный вывод подтверждает необходимость учета запаздываний при создании цифровых двойников гидравлических систем.

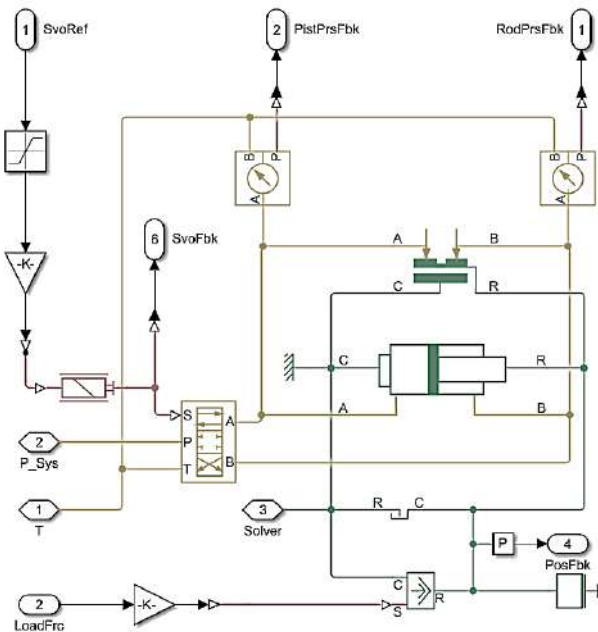


Рисунок 2.23 – Модель гидроцилиндра с сервоуправлением при использовании Simscape Hydraulics и реализации модели в Simulink Real Time

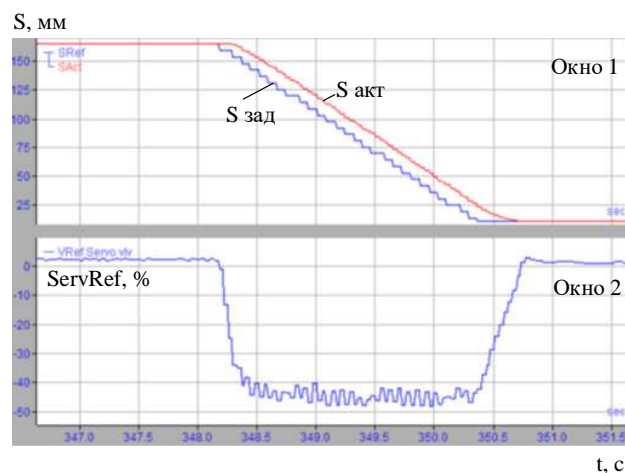


Рисунок 2.24 – Результаты теста регулятора положения в ПЛК с использованием модели ГЦ в Real Time: окно 1 – задание и атуальное положение гидроцилиндра; окно 2 – задание на сервоклапан

В приведенных примерах используется т.н. «физический» подход к реализации моделей ЦД. Разработанная модель подходит для исследования процессов в реальном времени при некоторых допущениях, они касаются сжимаемости жидкости, жесткости гидроцилиндра и массы гидравлической жидкости в трубопроводах. За счет этого обеспечиваются упрощение модели и малая нагрузка на вычислительные ресурсы машины реального времени. Разработанная модель рекомендуется для использования при исследовании процессов

и разработке ЦД позиционных механизмов. В частности, она применена при создании цифрового двойника комплекса моталок прокатного стана, исследования которого приведены в следующем разделе.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что запаздывания сигналов при обмене информацией в структуре ЦД следует исследовать более подробно. Ниже такой анализ выполняется с использованием виртуальной тестовой модели.

2.7. Методика определения задержки сигналов

2.7.1. Практический тест условной системы

Ниже рассмотрен и протестирован вариант связи между ПЛК и виртуальной моделью, размещенной на отдельном ПК, с использованием обмена через UDP протокол (рис. 2.25). Исследуется схема (тестовая модель), состоящая из объекта регулирования, представляющего собой последовательное соединение инерционного и интегрирующего звеньев, исполненного в Matlab Simulink Desktop Real Time, и пропорционального регулятора, размещенного в ПЛК. В качестве контроллера использован модуль OWEN PLC 210 [218] со средой CodeSys 3.5.

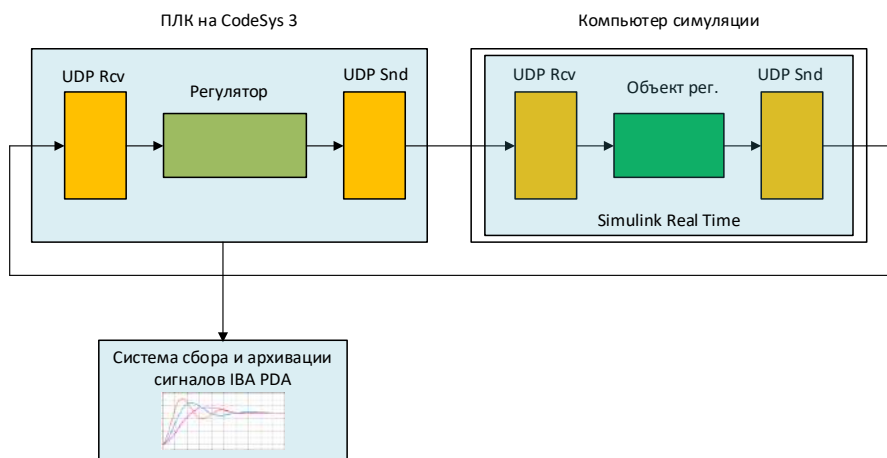


Рисунок 2.25 – Реализация ЦД в среде Matlab Simulink Desktop Real Time

Регистрация процессов выполнялась системой сбора данных ibaPDA через интерфейс CodeSys- Xplorer [196]. Цикл задачи регулятора и блоков обмена данными в контроллере был установлен равным 2 мс, что достижимо этим процессорным модулем для небольших задач. Связь между ПЛК и ПК организо-

вана по интерфейсу UDP. Приняты следующие настройки модели: фиксированный шаг интегрирования, равный 0.00005 с, метод решения уравнений – ode4 (Runge-Kutta). Между контроллером и ПК передавалось по 20 сигналов в обоих направлениях в формате 16-и разрядных чисел. В качестве примера выполнено моделирование условного объекта, схема которого представлена на рисунке 2.26 [219].

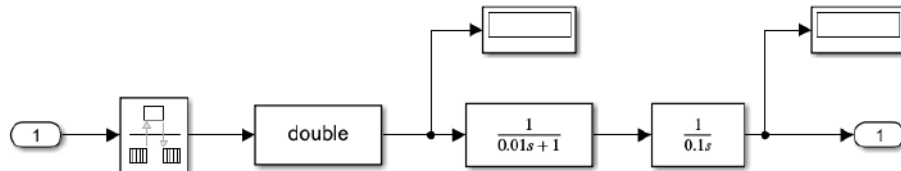


Рисунок 2.26 – Схема объекта

Передаточная функция объекта

$$W_O = \frac{1}{T_0 s + 1} \frac{1}{T_2 s}$$

Приняты постоянные времени $T_0 = 0.01$ с и $T_2 = 0.1$ с, соответственно регулятор имеет передаточную функцию

$$W_R = \frac{T_2 s}{2 T_0 s} = K_p = \frac{0.1}{2 * 0.01} = 5$$

Исходя из этого в контроллере принят П-регулятор, представленный в виде фрагмента программы:

```
LimReg(
    X_in:= Kp * (Ref - INT_TO_REAL(DriveInData.Data[9])*K_Rcv),
    UpLim:= 100.0,
    DnLim:= -100.0,
    Y_out=> ,
    AtUpLim=> ,
    AtDnLim=> );
DriveOutData.Data[9] := REAL_TO_INT(LimReg.Y_out*K_Snd);
```

Результаты моделирования системы в Matlab Simulink Desktop Real Time приведены на рис. 2.27. Показаны реакции на скачок задания при разных коэффициентах K_p регулятора. В верхних окнах показаны сигналы $u_{\text{ПЛК}}$, генерируемые системой управления (в нашем случае регулятором), выполненной в ПЛК, в нижних – выходные сигналы $u_{\text{ПК}}$ виртуальной модели, размещенной в ПК как показано на рис. 2.25 [219]. Время задержки сигналов Δt_0 на всех рисунках одинаково и составляет 0,02 с. Продолжительность переходных процессов $\Delta t_{\text{ПП}}$ изменяется от 0,2 с на рис. 2.27, а до 0,3 с на рис. 2.27, г. Амплитуда

$u_{ПК_m}$ увеличивается в 1,5 раза от 200 у.е. (установившееся значение) до 300 у.е., амплитуда $u_{ПЛК_m}$ – в 4 раза от 250 до 1000 у.е., что определяется величиной K_p .

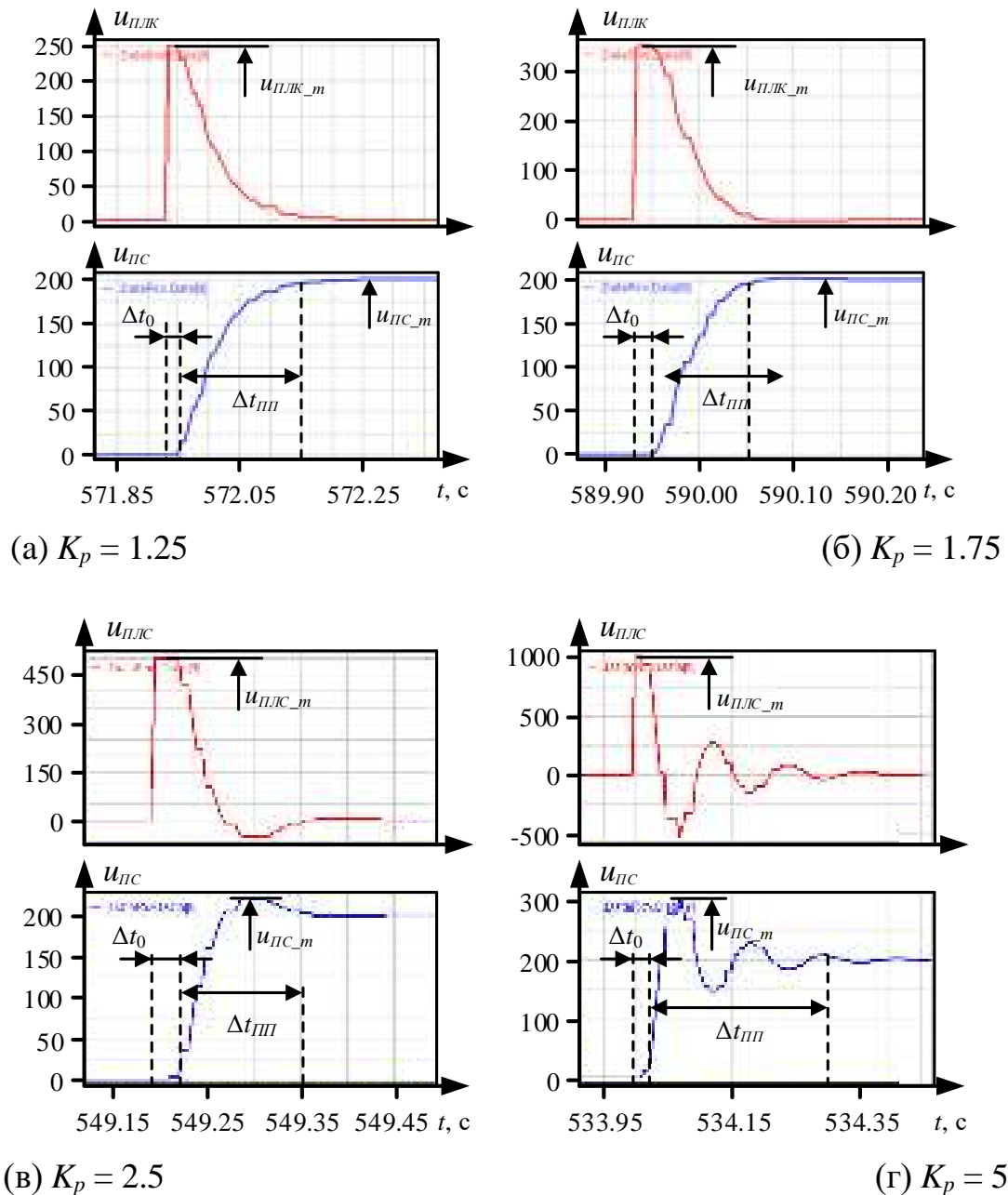


Рисунок 2.27 – Реакция тестируемой системы на скачок задания при различных коэффициентах регулятора

Из рисунков следует, что с ростом K_p усиливаются колебательные свойства системы «регулятор – объект». Согласно приведенному выше расчету коэффициент регулятора $K_p = 5$ должен соответствовать оптимальной настройке

системы с перерегулированием в 4.3%. Однако в представленном эксперименте при $K_p=5$ (рис. 2.27, г) система имеет явную колебательность с перерегулированием 50% ($u_{ПК_m}=300$ у.е. при установившемся значении 200 у.е.). Как будет подтверждено ниже, это обусловлено наличием транспортного запаздывания при прямой и обратной передаче данных между ПЛК и ПК.

2.7.2. Способ определения запаздывания сигнала в структуре ЦД

Для моделирования времени запаздывания при передаче сигнала необходимо, прежде всего, это время определить. С этой целью выполнены следующие операции: сформирован пилообразный тестовый сигнал в ПЛК, далее он был передан через интерфейс UDP в программу виртуальной модели в Simulink на ПК и «возвращен обратно» в ПЛК. Оба сигнала со стороны ПЛК зафиксированы системой iBaPDA (рис. 2.25), результат приведен на рис. 2.28 [219]. Как видно из графиков, запаздывание при передаче по маршруту «ПЛК–ПК–ПЛК» составляет 10...15 мс.

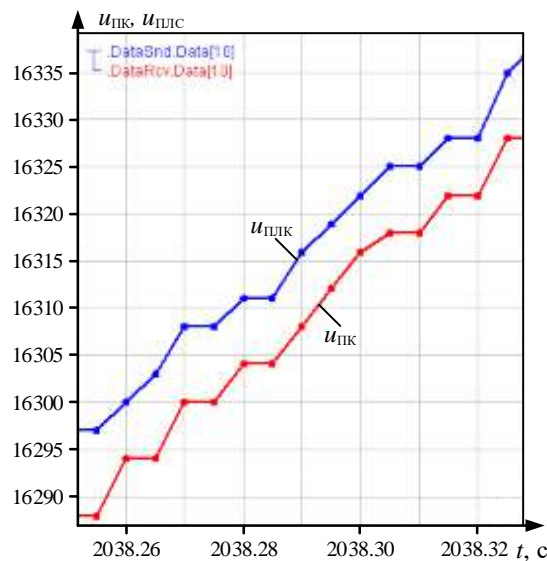


Рисунок 2.28 – К определению реального запаздывания

К аналогичным задержкам приводит введение в структуру звена запаздывания, показанного на рис. 2.29, а. Для подтверждения этого исследованы процессы на модели, выполненной в Matlab Simulink (рис. 2.29, б), полученной путем включения в исходную структуру (рис. 2.26) двух блоков транспортного запаздывания по 5 мс.

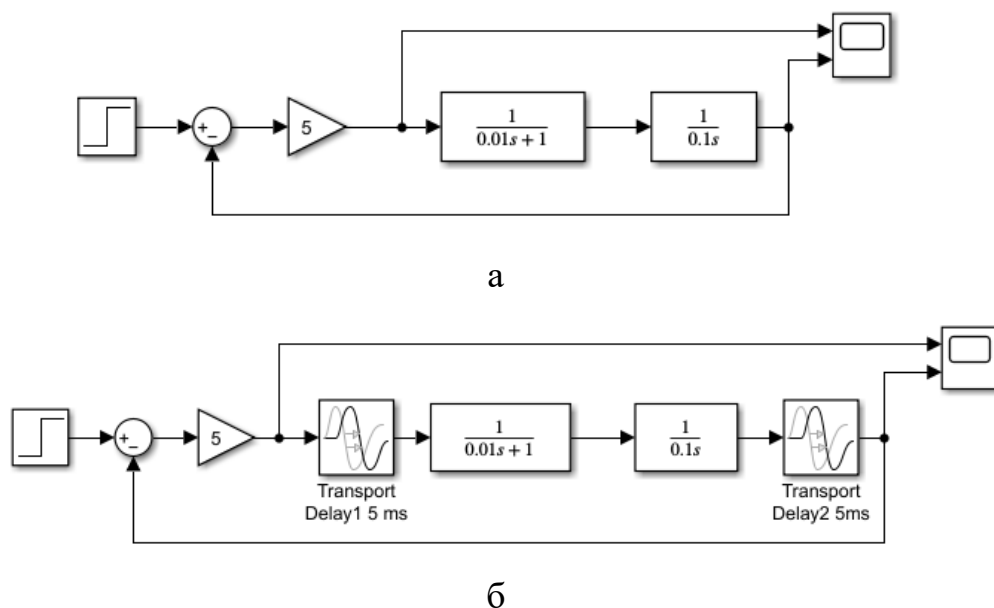


Рисунок 2.29 – Схема звена с запаздыванием (а) и исследуемая схема с дополнительными звеньями запаздывания (б)

Выполнен анализ переходных процессов, представленных на рис. 2.30, а и рис. 2.30, б. Зависимости построены в относительных единицах, используемых при передаче сигнала между ПЛК и ПК, они качественно соответствуют процессам, показанным на рис. 2.27, а и рис. 2.27, г. Отличия в параметрах процессов обусловлены тем, что на рис. 2.27 не приведены сигналы при нулевой задержке. Таким образом, предложенное моделирование задержки позволяет получить процессы, качественно соответствующие процессам, полученным при исследовании исходной структуры. Это позволяет сформулировать способ учета задержек, возникающих при передаче сигналов, путем включения в моделируемую структуру дополнительных блоков, параметры которых определены экспериментальным путем (рис. 2.28).

Анализ представленных зависимостей подтвердил вывод, что введение временной задержки усиливает колебательность системы. В результате время $t_{\text{пн}}$ переходного процесса увеличивается от 0,15 с на рис. 2.30, а до 0,25 с на рис. 2.30, б. Таким образом, при моделировании системы с заданной задержкой получен результат, аналогичный результату в реальной системе «ПЛК–ПК». Очевидно, что задержка при передаче сигналов оказывает влияние на процессы в более сложных структурах ЦД. Это должно учитываться при разработке ЦД и выборе интерфейса взаимодействия между ПЛК и ПК.

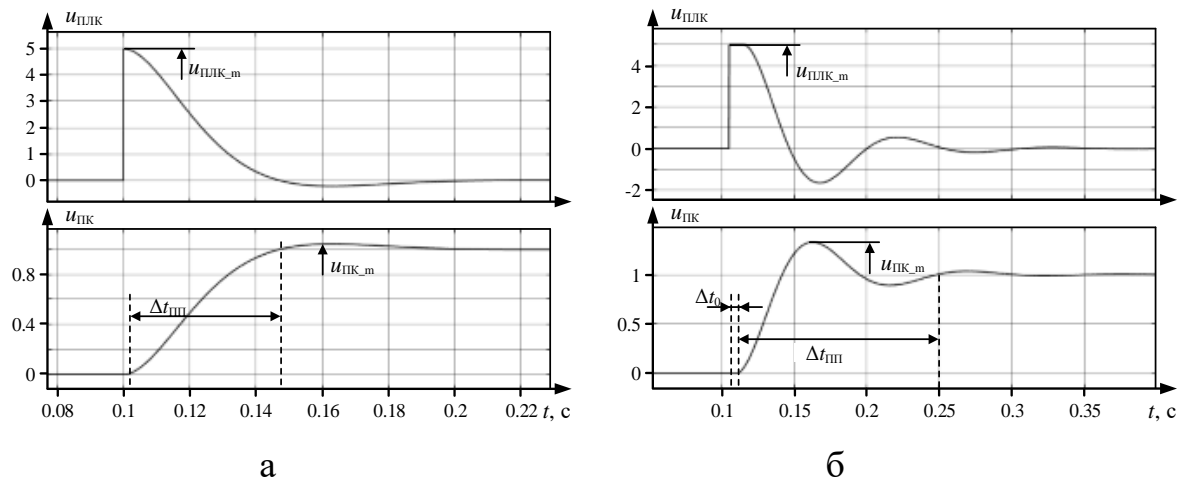


Рисунок 2.30 – Переходные процессы при $K_p=5$ без учета (а) и с учетом (б) запаздывания

Пример применения предложенного способа для виртуальной оценки задержки сигналов в интерфейсе ЦД электропривода стана 5000 приведен в Приложении 2 (п. П.2.1). Он дал подтверждение, что задержка передачи дискретных сигналов в структуре «контроллер-симулятор» при генерации пилообразного сигнала составляет 15 мс. Исходя из этого сделан вывод, что предложенный способ может быть использован для имитации взаимодействия ПЛК с приводами и гидросистемами механизмов металлургического оборудования.

2.7.3. Оценка влияния дискретности программы ПЛК

В схемах, представленных на рис. 2.29, можно также учесть влияние дискретного характера программы контроллера. Это объясняется тем, что в рассматриваемом примере цикл программы ПЛК составляет 2 мс, что соизмеримо с временами циклов опроса электро- и гидроприводов, приведенных в табл. 2.2. Для учета дискретных свойств в схему на рис. 2.29, б дополнительно введены звенья Zero-Order Hold_1 и Zero-Order Hold_2. Полученная структура представлена на рис. 2.31, исходный вариант показан в верхней части рисунка. Дополнения внесены в нижней части: звено Zero-Order Hold_1 включено на вход регулятора, звено Zero-Order Hold_2 – в цепь обратной связи. На контрольно-измерительном устройстве (справа) производится сравнение сигналов исходной и преобразованной схем.

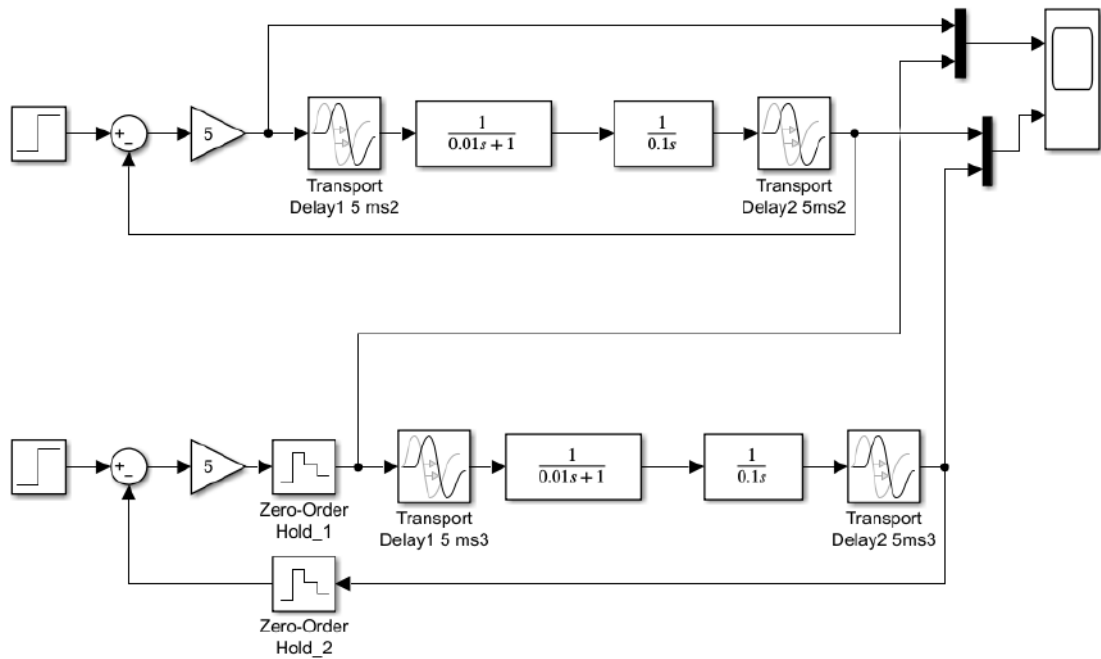


Рисунок 2.31 – Схема исследуемого объекта с дополнительными блоками, имитирующими дискретность ПЛК

Расчетные зависимости, представленные на рис. 2.32, позволяют выполнить оценку влияния дискретности. Они аналогичны приведенным на рис. 2.27. На рисунке обозначены: 1 – зависимости в контуре со звеном Order Hold_1; 2 – те же зависимости в исходной системе. Как видно, ошибка из-за неучета дискретного характера регулятора невелика, т.к. запаздывание в разы больше дискреты (шага программы) регулятора.

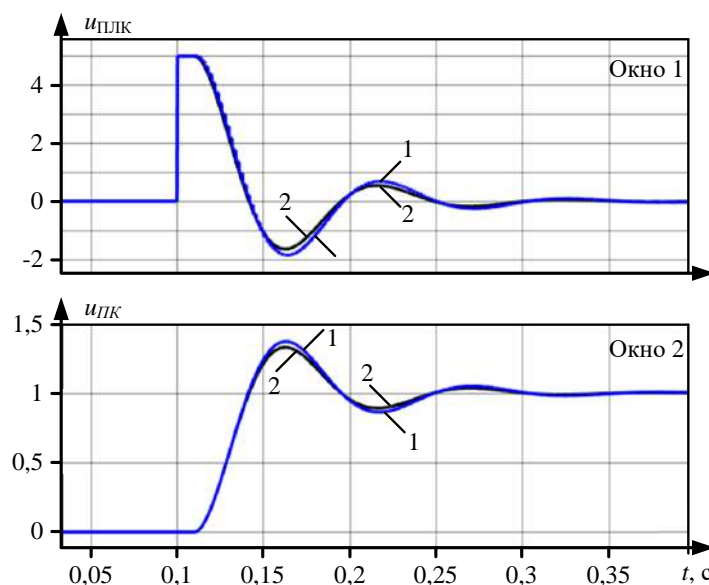


Рисунок 2.32 – Результаты сравнения переходных процессов: выходные сигналы регулятора (окно 1) и реакция объекта регулирования (окно 2)

Рассмотренный пример оценки запаздываний является не единственным. Как было показано выше, аналогичные результаты получены для реального электропривода клетки, гидравлических нажимных устройств в структуре САР толщины стана 5000. Также с использованием предложенного способа проведен анализ временных запаздываний в электротехнических системах прокатной клетки и моталки широкополосного стана горячей прокатки. Преимуществом предложенного способа является то, что сравниваются сигналы непосредственно в структуре САР и на ее выходе (т.е. с учетом задержек, вносимых интерфейсом). Это позволяет оценивать запаздывания в любых электромеханических и гидравлических системах независимо от их сложности. Поэтому разработанный способ рекомендуется для применения при виртуальной наладке и вводе в эксплуатацию электротехнических комплексов не только прокатных станов, но и других промышленных объектов.

В целом представленные результаты являются подтверждением необходимости учета задержек при передаче сигналов в структурах цифровых двойников приводов прокатного стана и актуальности выполненных исследований.

ВЫВОДЫ

1. Обоснован концептуальный подход к созданию цифровых двойников промышленных электротехнических комплексов на основе градации, представленной в п. 1.2. Данный подход предусматривает: 1) разработку объектно-ориентированных (DTP) электромеханических и гидравлических систем; 2) разработку DTI, учитывающих конструктивные отличия и существенные взаимосвязи объекта. В рассматриваемом случае к ним относится взаимосвязь электромеханических систем через металл; 3) объединение DTPs и DTIs в агрегированный цифровой двойник (DTA) электротехнического комплекса либо технологического устройства более высокого уровня.

2. Разработана методика создания ЦД, предназначенных для пуско-наладочных работ и виртуального ввода в эксплуатацию электротехнических систем. Методика включает следующую последовательность действий:

2.1. После окончания этапа проектирования – разработку цифровых моделей и алгоритмов систем управления в среде виртуального моделирования: Simulink Real Time, Simscape Hydraulics и др.

2.2. Разработку цифрового двойника. Для этого алгоритмы моделей реализуются на вычислительных мощностях ПЛК, либо на отдельных ПК. Структуры виртуальных моделей и предварительно разработанные алгоритмы управления «переносятся» из пакета Simulink Real Time (или Simscape) в программу контроллера, управляющего электротехническим комплексом. Далее выполняется аппаратное моделирование HIL.

2.3. Виртуальный ввод в эксплуатацию. На этом этапе выполняется коррекция алгоритмов управления, уточняются параметры настройки.

2.4. Подключение ПЛК, оснащенных разработанными алгоритмами управления, к физическому объекту. Экспериментальные исследования, перевод в опытно-промышленную эксплуатацию.

2.5. «Перенос» цифрового двойника объекта в программное обеспечение компьютеров более высокого уровня с целью использования для мониторинга процессов и технического состояния оборудования в on-line режиме.

3. Представлены принципы размещения цифрового двойника в структурах ПК либо ПЛК. Предложены следующие варианты размещения виртуальной модели (симулятора):

- в том же ПЛК, где находится отлаживаемая программа;
- в отдельном вычислительном комплексе;
- размещение симулятора и отлаживаемого ПЛК на виртуальных машинах.

Рассмотрены преимущества и недостатки каждого варианта.

4. Рассмотрен принцип построения цифрового двойника электромеханических систем клетки стана 5000. Представлены структура виртуальной системы на базе Simulink Real Time и схема подключения симулятора. Разработана цифровая модель электропривода валка, включающая модели силовой части и полного контура регулирования момента.

5. Разработана виртуальная модель взаимосвязанных электромеханических и гидравлических систем клетки. Представлены модель НУ, реализованная на элементах Simscape Hydraulics, модель, реализующая зависимость Симса-Головина в Matlab Simulink, а также модели взаимосвязи НУ и валков через металл и САРТ, выполненные на элементной базе Simscape. Выполненная процедура валидации результатов, доказана адекватность моделирования.

6. С использованием рассмотренного способа виртуального моделирования выполнена экспериментальная оценка времени задержки сигналов в цифровых двойниках электромеханических и гидравлических систем. Дана оценка запаздывания сигналов крутящего момента при передаче от САР, выполненной в ПЧ, к программе регулирования в ПЛК. Сделан вывод, что запаздывание сигнала момента реальной системы составляет 6...10 мс, что соизмеримо с задержками в ЦД при замене реального интерфейса на связь между ПЛК и моделью по UDP протоколу.

7. На базе Simscape Hydraulics разработана модель гидроцилиндра с сервоуправлением, технически реализованная на отдельном ПК в Simulink Real Time. Приведен пример исследования переходных процессов при отработке линейного задания на регулятор положения в ПЛК. Подтверждено запаздывание между сигналами задания и фактического положения НУ в режиме обмена информацией, равного 0.2 с, что подтверждает необходимость учета запаздываний при создании ЦД гидравлических систем.

8. Представлена реализация ЦД в Matlab Simulink Desktop Real Time. С использованием виртуальной тестовой модели протестирована передача сигналов между ПЛК и виртуальной моделью, размещенной на отдельном ПК, с использованием обмена по UDP протоколу. Выполнен анализ быстродействия и колебательных свойств системы «регулятор – объект». Сделан вывод, что система имеет колебательность с перерегулированием 50%, что обусловлено наличием транспортного запаздывания при прямой и обратной передаче данных между ПЛК и ПК.

9. Предложен способ определения задержек, возникающих при обмене данными в структуре цифрового двойника. Он включает следующие операции:

- формирование тестового сигнала в ПЛК (в рассмотренном случае – пилообразного сигнала);
- передачу тестового сигнала через интерфейс UDP в программу виртуальной модели на ПК и «возвращение обратно» в ПЛК;
- фиксацию обоих сигналов на выходе ПЛК системой ibaPDA, вычисление временной задержки путем сопоставления осциллограмм.

10. Для снижения величины запаздывания целесообразно совместное размещение виртуальной модели и структуры системы управления в ресурсах ПЛК. Это исключает использование промежуточного интерфейса и тем самым снижает задержку при обмене информацией. Однако в каждом случае следует давать оценку погрешностям, обусловленным применением упрощенных моделей, что вызвано ограниченным ресурсом ПЛК.

11. Разработанный способ определения запаздываний, вносимых интерфейсом системы обмена информацией, рекомендуется для использования при настройке и виртуальном вводе в эксплуатацию ЦД электромеханических и гидравлических систем независимо от их сложности.

Глава 3. ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЦД ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОГО ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРОКАТНЫХ АГРЕГАТОВ

Как было отмечено во введении, одной из ключевых задач интеллектуального производства является внедрение цифровых технологий и цифровых двойников на промышленных агрегатах, находящихся в эксплуатации. Однако желание представителей промышленных кругов использовать ЦД на своих предприятиях сдерживается отсутствием понятной методологии их разработки и применения для практических задач. Решение этой задачи может быть реализовано при реконструкции прокатных станов. Вместе с тем процедуры виртуального ввода в эксплуатацию (virtual commissioning – VC) при замене оборудования практически не используются. Основными причинами являются отсутствие разработанных ЦД электротехнических комплексов и относительно простых технологий виртуальной настройки.

С целью устранения данной проблемы обоснован концептуальный подход к виртуальной настройке промышленных электротехнических комплексов на основе объектно-ориентированных цифровых двойников, объединенных симуляторами взаимосвязи. Они разрабатываются на базе распространенного программного обеспечения. Ниже рассматривается применение модулей Matlab Simulink, программного обеспечения Astra.IDE и структур на языке Codesys (последние – для ПЛК с многоядерными процессорами).

Представлена реализация концепции на примере электротехнических и гидравлических систем реверсивного стана холодной прокатки, моталок непрерывного широкополосного стана горячей прокатки и летучих кривошипных ножниц агрегата поперечной резки горячекатаной полосы. Обоснована разработка цифровых симуляторов, отображающих существенные взаимосвязи электротехнических комплексов. Демонстрируется применение ЦД с различными вариантами расположения управляющей программы и виртуальной модели, рассмотренными в п. 2.1. Рассматриваются следующие варианты:

1. Размещение симулятора в отдельном вычислительном комплексе, эта конфигурация будет применена для двухклетевого стана холодной прокатки 1700. Структура ЦД при таком расположении показана на рис. 2.1, а.

2. Размещение симулятора в том же ПЛК, где находится отлаживаемая программа (рис. 2.1, б), рассматривается для моталок ШСГП 2500.

3. Размещение симулятора и отлаживаемого ПЛК на двух виртуальных машинах. Применено для виртуального ввода летучих ножниц АПР горячекатаной полосы.

4. В завершение будет рассмотрено размещение цифрового двойника в ресурсе ПЛК, выполненного на основе многоядерного процессора. Будут предложены варианты применения двухъядерного ПЛК с различной организацией обмена информацией между системой управления и моделью объекта.

3.1. Разработка цифровых двойников моталок стана 2500

3.1.1. Характеристика моталок и процесса намотки полосы

Далее рассматривается виртуальный ввод в эксплуатацию электромеханических и гидравлических систем моталок, показанных на схеме технологической линии современного ШСГП (рис. 3.1) [220]. Задача виртуального ввода рассматривается для комплекса «формирующие ролики – барабан моталки» стана 2500 (см. рис. 1.6). Такая инициатива обусловлена реконструкцией данного агрегата с заменой технологического оборудования.

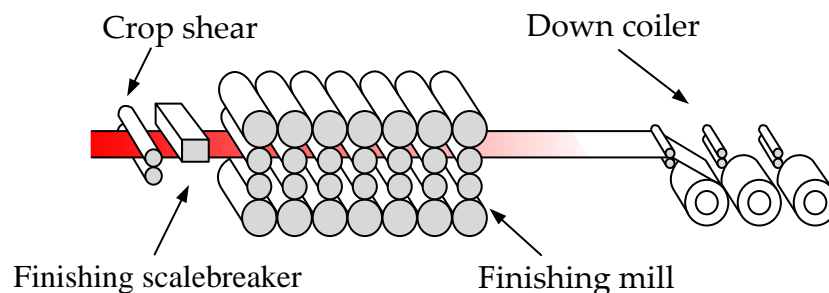


Рисунок 3.1 – Фрагмент схемы технологической линии непрерывного стана горячей прокатки (разработка SMS group [49]): Run out table – отводящий рольганг; Crop shear – ножницы; Finishing mill – чистовая группа; Down coiler – моталка подпольного типа

Согласно проекту, после реконструкции должна быть предусмотрена прокатка полос толщиной до 30 мм со смоткой в рулоны. Это потребовало установки группы из трех моталок, оснащенных мощными гидравлическими формирующими роликами (ФР). Информация о моталках подобного типа изложена в [32, 221]. Они выполняют намотку рулонов массой до 40 т, диаметром до 2,1 м (рис. 3.2, а). Фотография моталки, разработанной Новокраматорским машиностроительным заводом, представлена на рис. 3.2, б. Параметры каждой из трех моталок, а также характеристики сматываемой полосы приведены в таблице 3.1.



а



б

Рисунок 3.2 – Фотографии рулона (а) и моталки с разведенными формирующими роликами во время намотки (б)

Упрощенная кинематическая схема моталки показана на рис. 3.3, а. Механизм сведения-разведения ФР состоит из роликoderжателей с системой рычагов, привод которых осуществляется от гидроцилиндров ГЦ1–ГЦ4. Для регулирования положения используются датчики положения BS с интерфейсом SSI, встроенные в гидроцилиндры. Усилие рассчитывается по сигналам от датчиков давления, подключенных к штоковым и поршневым полостям ГЦ. Управление расходом масла в ГЦ осуществляется сервоклапанами. Каждый ФР выполнен приводным, кинематическая схема электропривода приведена на рис. 3.3, б.

Таблица 3.1 – Характеристики моталки и сматываемой полосы

Параметр		Единица измерения	Значение
Толщина сматываемой полосы		мм	1,5 - 25
Ширина сматываемой полосы		мм	1000 - 2350
Масса рулона		т	до 45
Диаметр рулона наибольший		м	2,1
Предел текучести при температуре смотки		кгс/мм ²	37
Температура сматываемой полосы		°С	500 - 800
Натяжение полосы (наибольшее)		кН	60
Скорость	задачи полосы в моталку	м/с	до 12.5
	смотки полосы	м/с	до 17
Расстояние	от последней чистовой клетки до оси моталки	м	184,55
	от тянущих роликов до моталки	м	3,45
	между смежными моталками	м	9,6
Диаметр барабана	разжатый	м	0,85
	сжатый		0,82
	сжатый в промежуточном положении		0,84
Цикл прокатки		с	60 - 150
Масса вращающихся частей		кг	25000
Передаточное число редуктора		о.е.	2.425/5.318

Рекомендуемые начальные зазоры между ФР и барабаном представлены в таблице 3.2. Они образуют «улитку зазора», под которой подразумевается уменьшение расстояния от поверхности барабана каждого последующего ролика по сравнению с предыдущим.

Таблица 3.2 – Пояснение к формированию «улитки зазора»

№ формирующего ролика	Величина зазора, мм
1	2,0–2,7 толщины полосы
2	1,8–2,5 толщины полосы
3	1,2–1,9 толщины полосы
4	1,1–1,2 толщины полосы

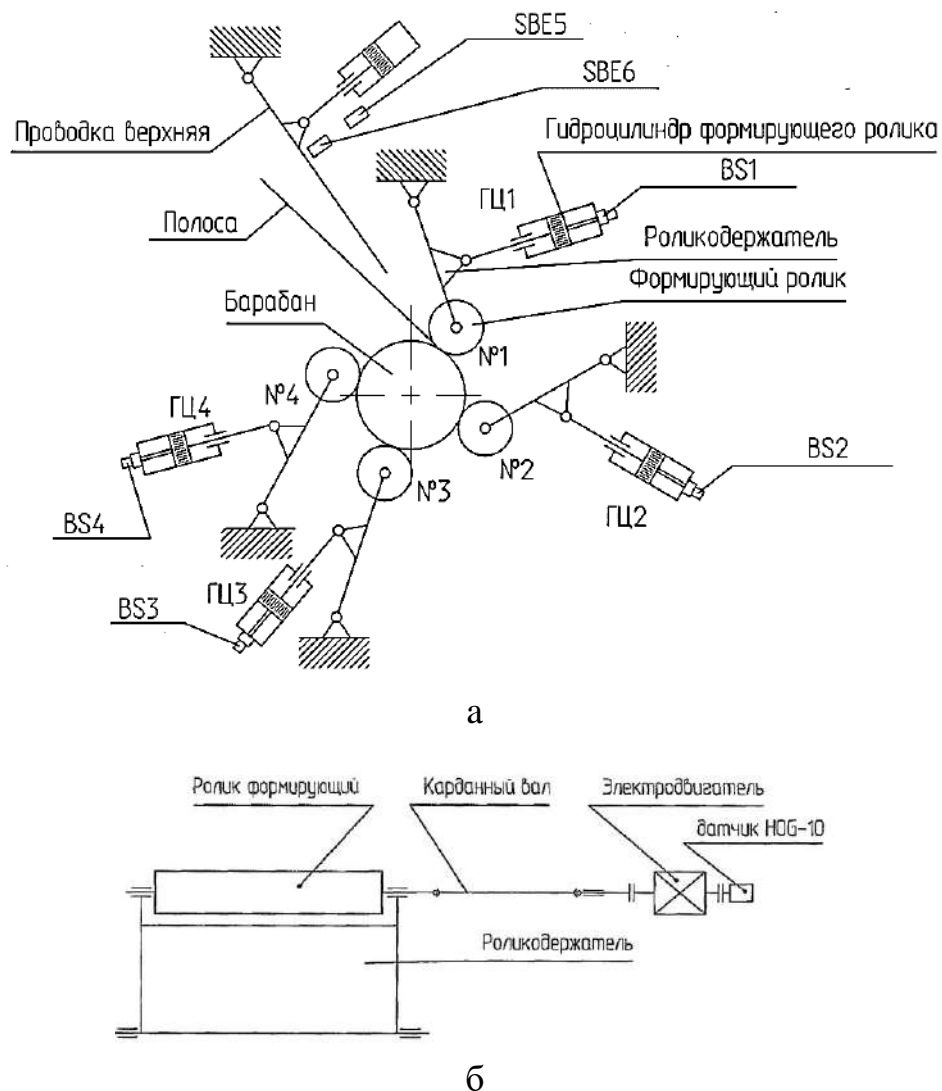


Рисунок 3.3 – Кинематические схемы моталки (а) и электромеханической системы ФР (б)

Работа моталки предусматривает сведение и разведение ФР в процессе намотки полосы. На рис. 3.4 показана схема их перемещения для моталки с четырьмя ФР [220, 222]. Они имеют два режима работы: контроль усилия прижима на первом витке (рис. 3.4, а) и пошаговое управление при формировании следующих витков (рис. 3.4, б). В режиме управления усилием, когда наматывается первый слой (рис. 3.4, а), звено ФР вместе с рулоном прижимается к полосе с заданной минимальной силой. Затем полоса при каждом витке подталкивает ролик вверх на величину своей толщины (рис. 3.4, б). Сложность состоит в том, чтобы определить силу, с которой рулон должен прижиматься к полосе. С одной стороны, она должна быть достаточной для достижения хо-

рошего качества намотки, а с другой – не должна вызывать повреждений полосы, например, в случае особо тонких и «мягких» материалов. Эта сила должна быть меньше силы отталкивания (F_{opp}), создаваемой полосой после каждого витка ($F_{opp} > F_{press}$). Перевод обозначений на рисунке представлен в таблице 3.3.

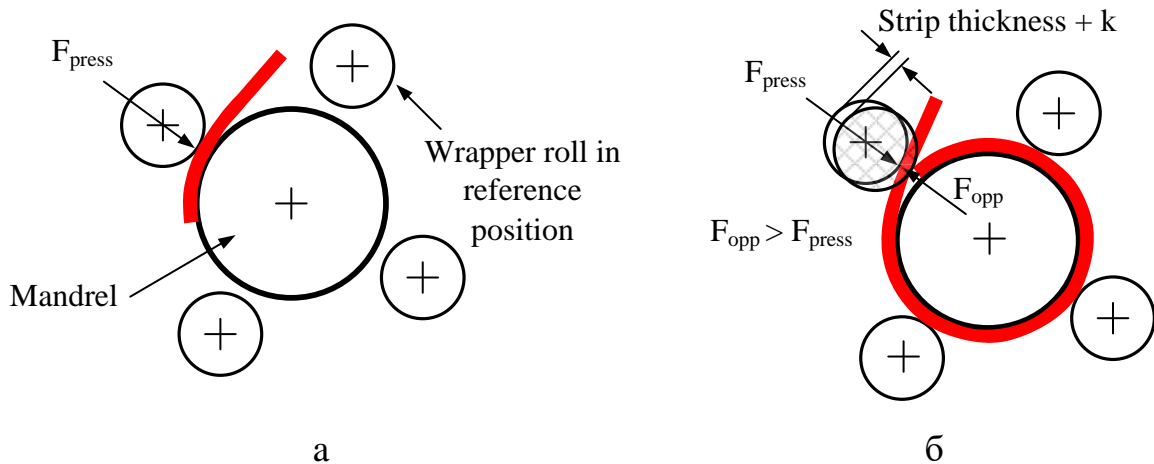


Рисунок 3.4 – Принцип управления усилием ФР в начале намотки (а) и после первого оборота (б): Wrapper roll in reference position – рулон в исходном положении; Mandrel – оправка; Strip thickness – толщина полосы

Структурная схема, поясняющая построение агрегированного цифрового двойника электротехнических систем моталки, представлена на рис. 3.5. На ней показаны ЦД-прототипы электро- и гидроприводов и ЦД-экземпляры полосы, подлежащие разработке, отражены взаимосвязи технологических узлов через полосу.

При разработке ЦД решаются задачи, обоснованные в п. 1.1.3. В основу агрегированного ЦД данного электротехнического комплекса положены математические модели электропривода моталки, тянущих роликов с учетом связи через сматываемую полосу [223, 224]. Одномассовые и двухмассовые модели электроприводов подробно рассмотрены в [168, 225, 227], взаимосвязь электромеханических систем через полосу – в [228, 229]. Модель гидропривода ФР включает цифровые модели гидроцилиндра и сервоклапана [230, 231]. При моделировании гидравлической системы за основу приняты теоретические положения и математические зависимости, рассмотренные в [232, 233]. Основные

принципы моделирования гидравлических систем изложены в [234, 235]. В качестве среды программирования при создании ЦД принят Simulink 7.0. С его помощью проведены разработка и отладка моделей и алгоритмов.

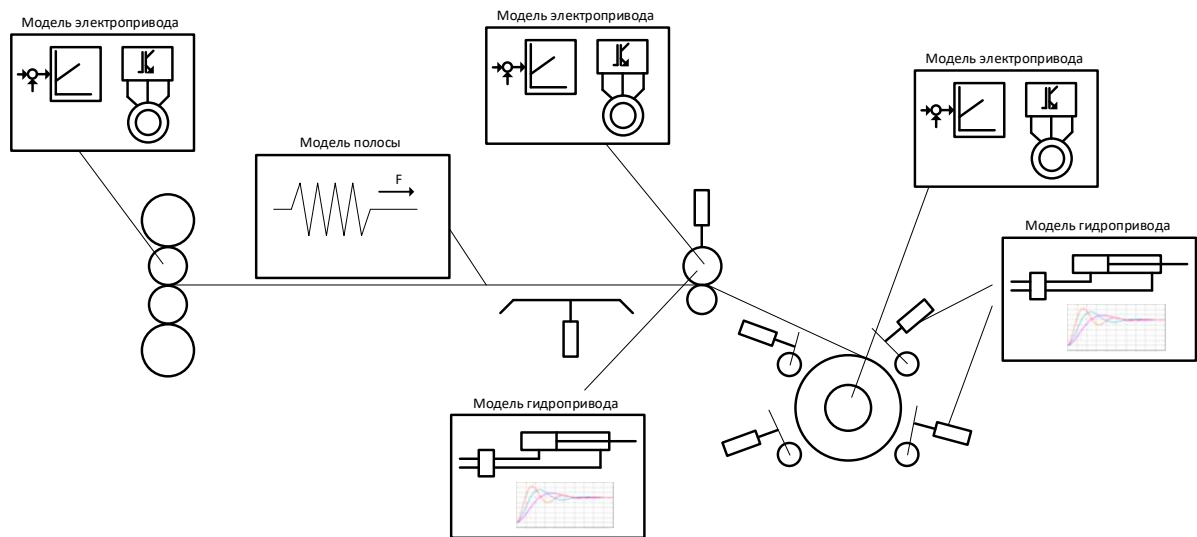


Рисунок 3.5 – Структура, поясняющая принцип построения ЦД взаимосвязанных электромеханических и гидравлических систем моталки

3.1.2. Разработка виртуальной модели гидравлической системы формирующих роликов

Общий вид модели с гидроцилиндром и сервоклапаном показан выше на рисунке 2.15. Модель 2-х контурной САР показана на рисунке 3.6, она содержит внешний регулятор положения, выход которого ограничен и является заданием для подчиненного регулятора усилия. Задание на сервоклапан в такой структуре САР подается с выхода регулятора усилия.

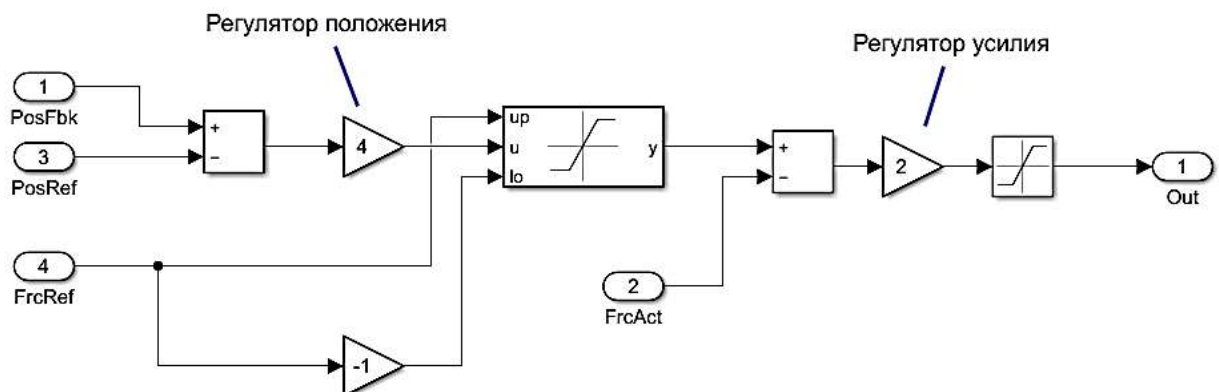


Рисунок 3.6 – Модель 2-х контурной САР с подчиненным контуром усилия

Упругие свойства траверсы, удерживающей ролик, описываются уравнением упругости траверсы:

$$F_S = k_S(Gp - \Delta R), \text{ если } Gp - \Delta R > 0;$$

$$F_S = 0, \text{ если } Gp - \Delta R \leq 0,$$

где Gp – зазор между роликом и барабаном моталки;

ΔR – высота намотанной полосы относительно барабана моталки;

k_S – модуль упругости траверсы.

Основные параметры модели приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры модели

Параметр	Значение	Ед.измерения
Ход цилиндра	1	м
Площадь поршневой полости	0.125	м
Площадь штоковой полости	0.05	м
Упругость траверсы	10	кН/мм
Вес ролика и траверсы	2000	кг
Давление гидросистемы	200	Бар
Кинематич. вязкость масла	$18 \cdot 10^{-6}$	$\text{м}^2/\text{с}$
Пост.времени контура пол. золотника	0.006	с
Макс. площадь откр. сервоклапана	0.00025	м^2

Структурная схема модели электроприводов барабана моталки и тянущих роликов, установленных на ее входе, связанных через металл, приведена на рис. 3.7. В каждом электроприводе реализовано векторное управление асинхронным двигателем. Контур момента в программе симулятора описывается аperiодическим звеном первого порядка с постоянной 0 мс:

$$\frac{M_{eact}}{M_{ref}} = \frac{1/K_{oM}}{T_M p + 1}$$

где M_{eact} – электромагнитный момент двигателя;

M_{ref} – заданный момент (выходной сигнал регулятора скорости после ограничения).

Для упрощения расчетов симулятора принята одномассовая схема механической части (при необходимости ее можно усложнить до 2-х массовой):

$$M_{eact} - M_T - M_{add} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где M_T – составляющая от момента натяжения;

M_{add} – дополнительные составляющие момента, учитываемые в модели (трение, изгиб полосы)

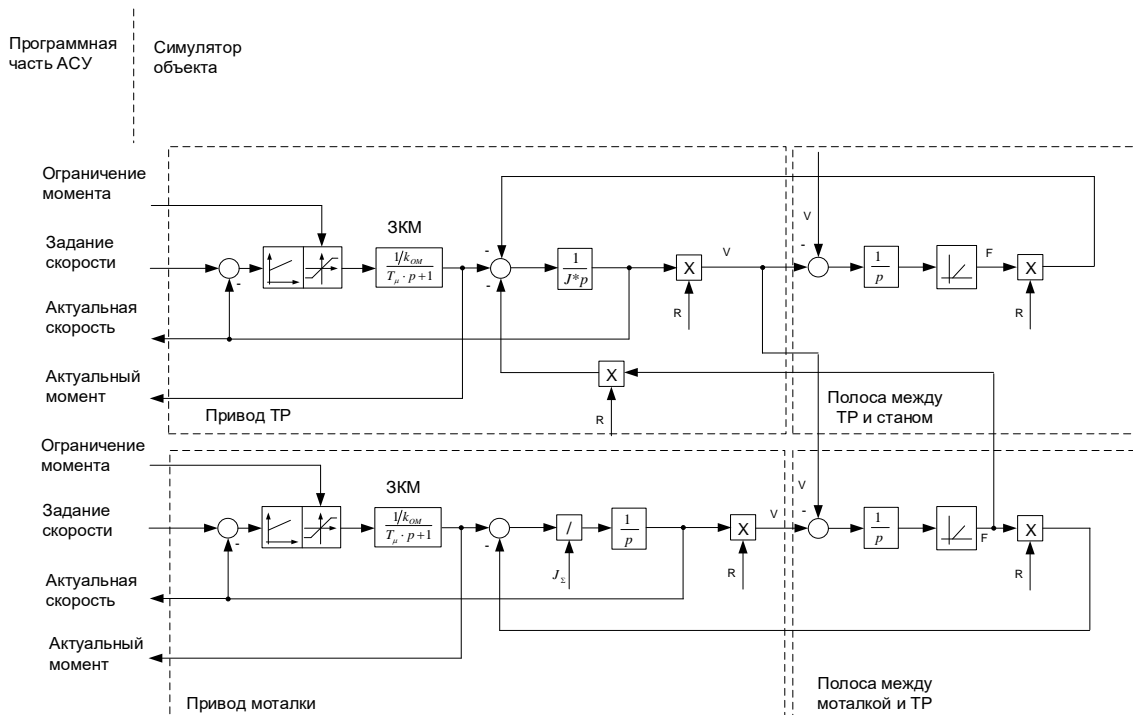


Рисунок 3.7 – Структура виртуальной модели электроприводов тянущих роликов и моталки, взаимосвязанных через полосу

Натяжение полосы определяется путем интегрирования разности скоростей с учетом коэффициента упругости полосы согласно зависимости

$$F_T = K_y \int (V_1 - V_2) dt,$$

где K_y – коэффициент, описывающий упругие свойства полосы.

При этом нужно принимать во внимание знак интеграла, т.к. при отрицательном натяжении будет создаваться петля. В итоге блок имитации натяжения представляется структурной схемой, приведенной на рис. 3.8. Эта структура является упрощенной, т.к. для реализации более сложной зависимости, представленной, например, в [223], потребуются значительный ресурс ПЛК и длительное время обработки сигналов.

Основные гидравлические схемы сложных машин и их рабочего оборудования рассмотрены в [236]. В [237] дается описание гидравлических схем машин. Особенности работы гидравлических систем, которые должны учитываться при моделировании, подробно рассмотрены в [238, 239].

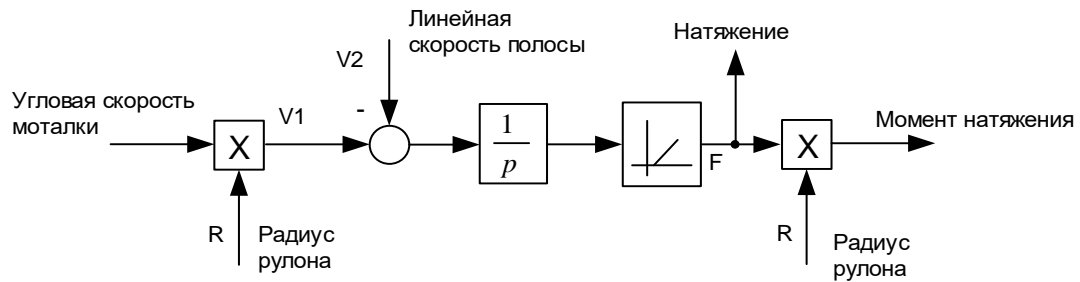


Рисунок 3.8 – Структура ЦД, имитирующего натяжение полосы

На рис. 3.9, а показана схема цилиндра двустороннего действия с двухсторонним штоком, который использовался для моделирования. Такие цилиндры характеризуются двусторонним рабочим ходом, а площади поршней одинаковы в обоих направлениях движения [236]. На рис. 3.9, б показан 4-ходовой 3-позиционный сервоклапан, регулирующий поток гидравлической жидкости от источника к гидроцилиндру. Он обеспечивает перемещение золотника пропорционально электрическому сигналу, который подается от системы управления скоростью потока.

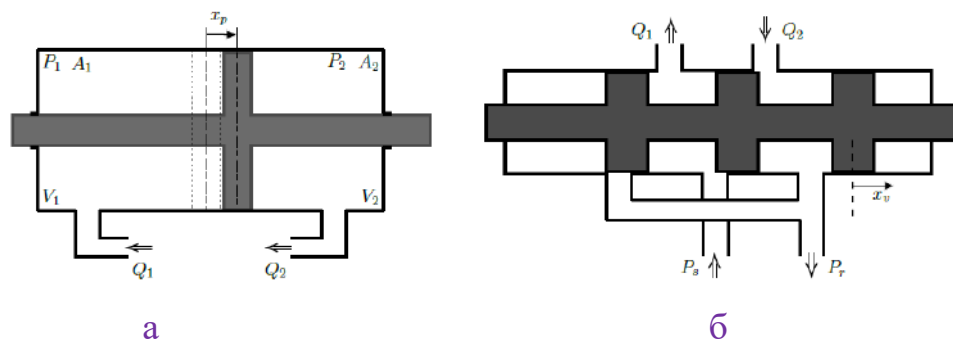


Рисунок 3.9 – Принципиальные схемы гидроцилиндра двойного действия (а) и сервоклапана (б)

В цифровой двойник-прототип данного сложного объекта из АСУ ТП поступают сигналы задания на сервоклапаны виртуальной модели гидравлической системы. В «противоположном» направлении (от модели в структуру системы управления) поступают данные о положениях штоков гидроцилиндров и показания датчиков давления (или непосредственно усилие в ГЦ). Этими виртуальными координатами заменяются сигналы реальных датчиков физической мехатронной системы.

Также симулятор формирующих роликов использует внутренние сигналы из моделей объектов: радиус намотанного рулона, положение «головы»

полосы на барабанах, угловую скорость и радиус барабана. Таким образом осуществляется обмен информацией между управляющей программой и виртуальной моделью объекта. Как было показано выше, управляющая программа и модель реализованы в ресурсе ПЛК.

Структура разработанного ЦД гидроцилиндра без сервоклапана представлена на рис. 3.10. Она составлена на основании следующих зависимостей [237]:

$$m_{\text{шт}} \frac{dV_1}{dt} - V_1 * k_{\text{тр}} - F_y = p_1 * A_1 - p_2 * A_2;$$

$$Q_1 = \frac{1}{E_1} \frac{dp_1}{dt} + A_1 * V_1;$$

$$Q_2 = \frac{1}{E_2} \frac{dp_2}{dt} + A_2 * V_1;$$

$$F_y = C_{12} \int (V_1 - V_2) dt + \beta * (V_1 - V_2);$$

$$m_2 \frac{dV_2}{dt} - F_s = F_y;$$

$$\frac{ds_1}{dt} = V_1;$$

$$\frac{ds_2}{dt} = V_2;$$

где Q_1 – расход жидкости от сервоклапана в полость 1;

Q_2 – расход жидкости от сервоклапана в полость 2;

V_1 – скорость 1-массы (штока);

V_2 – скорость 2-массы;

C_{12} – упругость связи (траверсы);

$k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения в ГЦ;

$Пл_1, Пл_2$ – площади цилиндра и штока.

Уравнения динамики сервоклапана приведены в [240]. Расход жидкости через сервоклапан:

$$q = kq_0 \sqrt{\frac{p_1}{p_0}},$$

где q_0 – степень открытия сервоклапана (положение золотника);

p_0, p_1 – давления после сервоклапана и перед ним.

Динамические свойства сервоклапана (перемещение золотника) описываются передаточной функцией 2-го порядка

$$\frac{q_0}{q_{ref}} = \frac{K_{sv}}{T_{sv}^2 p^2 + 2\xi T_{sv} p + 1},$$

где T_{sv} и ξ упрощенно описывают динамические свойства клапана.

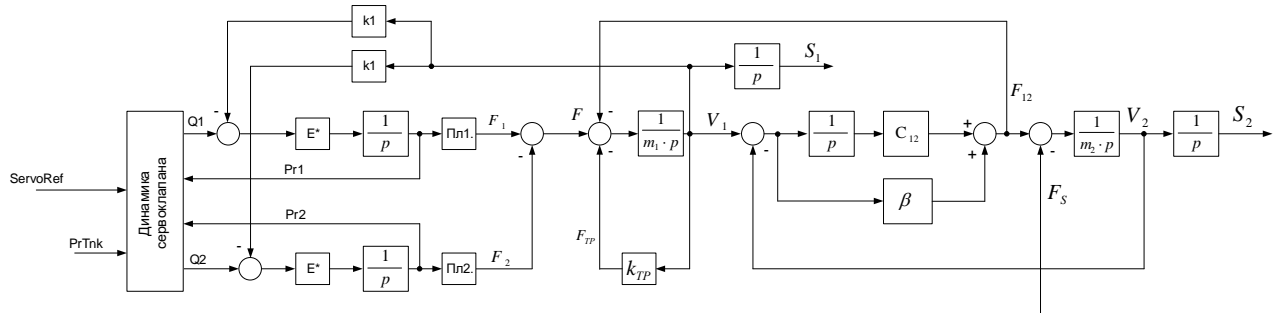


Рисунок 3.10 – Структура цифрового двойника-прототипа цилиндра гидравлической системы

В упрощенной схеме ход штока определяется как интеграл его скорости: $S = \int V dt$. Динамические свойства цилиндра (упругость, инерция) определяются передаточной функцией

$$\frac{V}{q} = \frac{K_{cyl}}{T_{cyl}^2 p^2 + 2\xi T_{cyl} p + 1}.$$

Для снижения порядка уравнения при ограниченных вычислительных возможностях следует использовать передаточную функцию 1-го порядка.

Структурная схема имитационной модели объекта (гидроцилиндра с сервоклапаном), составленной по этим уравнениям для одного ФР, представлена на рис. 3.11, а. Однако в представленном виде она избыточна и занимает значительные вычислительные ресурсы ПЛК. Поэтому разработана упрощенная модель (рис. 3.11, б). В этой структуре сервоклапан и гидроцилиндр представлены звеньями второго порядка.

Усилие прижима ролика к рулону определяется величиной упругой деформации траверсы держателя ролика. Зависимости зазора от перемещения штока ГЦ и жесткость траверсы представлены нелинейными звеньями. Изменение диаметра рулона в процессе намотки моделируется блоком симуляции намотки полосы. Методика расчета параметров такой модели представлена в [241]. Исходные данные, использованные при расчете, приведены в таблице 3.4.

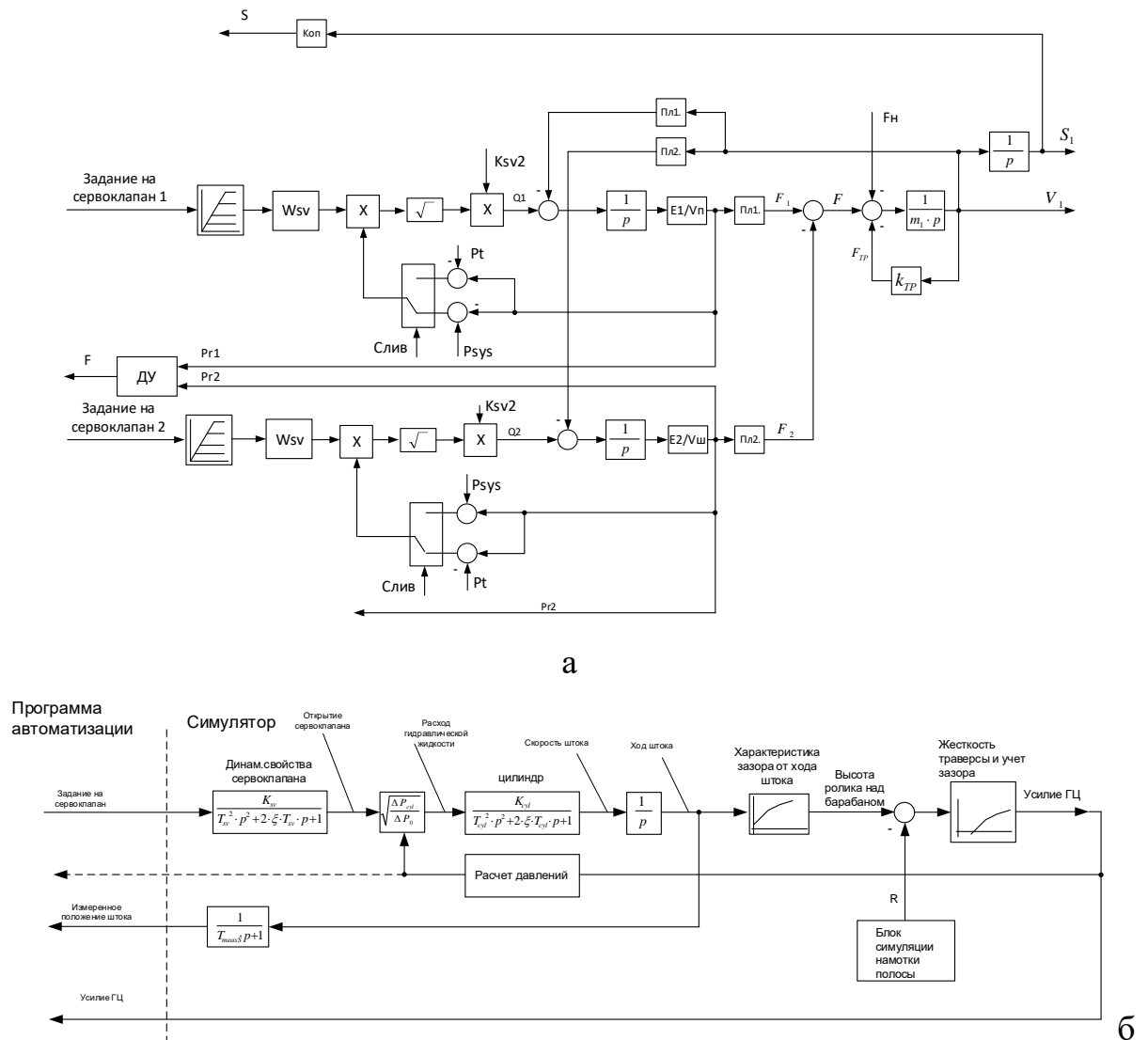


Рисунок 3.11 – Подробная (а) и упрощенная (б) структуры виртуальной модели гидравлической системы

При реализации цифрового двойника алгоритмы моделей были исполнены на свободных вычислительных мощностях контроллеров.

Таблица 3.4 – Параметры модели гидравлической системы

Параметр	Значение	Ед. измерения
Ход цилиндра	1	м
Площадь поршневой полости	0.125	м
Площадь штоковой полости	0.05	м
Упругость траверсы	10	кН/мм
Вес ролика и траверсы	2000	кг
Давление гидросистемы	200	бар
Кинематическая вязкость масла	$18 \cdot 10^{-6}$	$\text{м}^2/\text{с}$
Постоянная времени контура положения золотника	0.006	с
Максимальная площадь открытия сервоклапана	0.00025	м^2

3.2. Виртуальный ввод в эксплуатацию

3.2.1. Техническая реализация двойников на моталках

Разработанные технические решения реализованы в ПЛК, входящих в структуру АСУ ТП группы моталок, которая представлена на рис. 3.12. Как большинство современных многоуровневых систем автоматизации прокатных станов, она построена на базе компьютеров (уровни 3, 2, 1), программируемых контроллеров (для уровня 1), цифровых приводов, датчиков, клапанов исполнительных механизмов (уровень 0) [242].

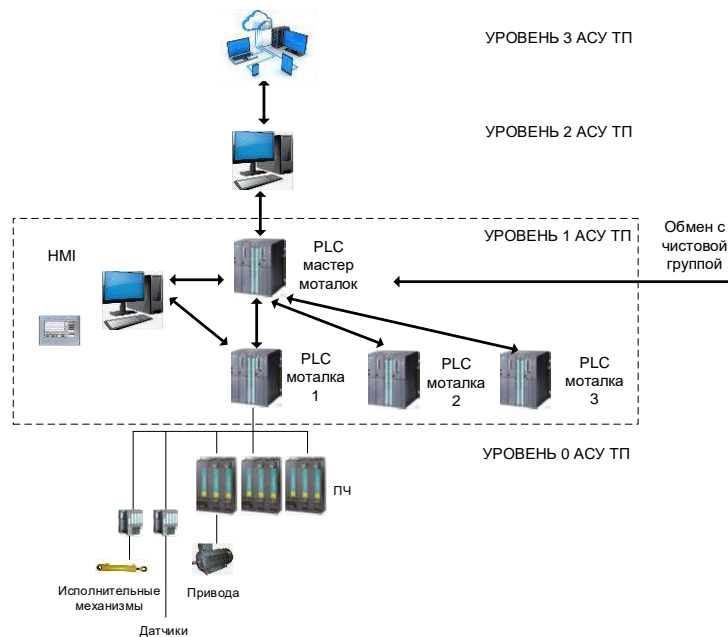


Рисунок 3.12 – Трехуровневая структура АСУ ТП группы моталок

К уровню 1 относятся контроллеры моталок, контроллер мастера моталок, система визуализации. Контроллеры 1-го уровня являются системами реального времени. На них реализованы технологические регуляторы (например, натяжения) и системы позиционирования исполнительных механизмов. Также реализована логика взаимодействия механизмов, включая автоматические последовательности, локальные системы слежения за продукцией в реальном времени. Контроллер мастера моталок связан с мастер-контроллером чистовой группы клеток и системой 2-го уровня автоматизации. Уровень 2 отвечает за слежение на уровне цеха, расчет уставок для производства продукции, он также содержит модели (например, прокатки, нагрева в печах и т.п.) для расчета заданий для уровня 1.

Структура системы автоматизации представлена на рис. 3.13 [9]. Для каждой моталки используется контроллер S7-400 фирмы Siemens. Он содержит основной процессор (CPU), процессор быстрых вычислений (FM) и коммуникационный процессор (CP). Основной процессор используется для задач общей логики, реализации регуляторов, управления приводами моталки и вспомогательными механизмами. Программа регуляторов формирующих роликов размещается в процессоре быстрых вычислений FM-458. Через коммуникационный процессор происходит связь с системой визуализации и другими контроллерами.

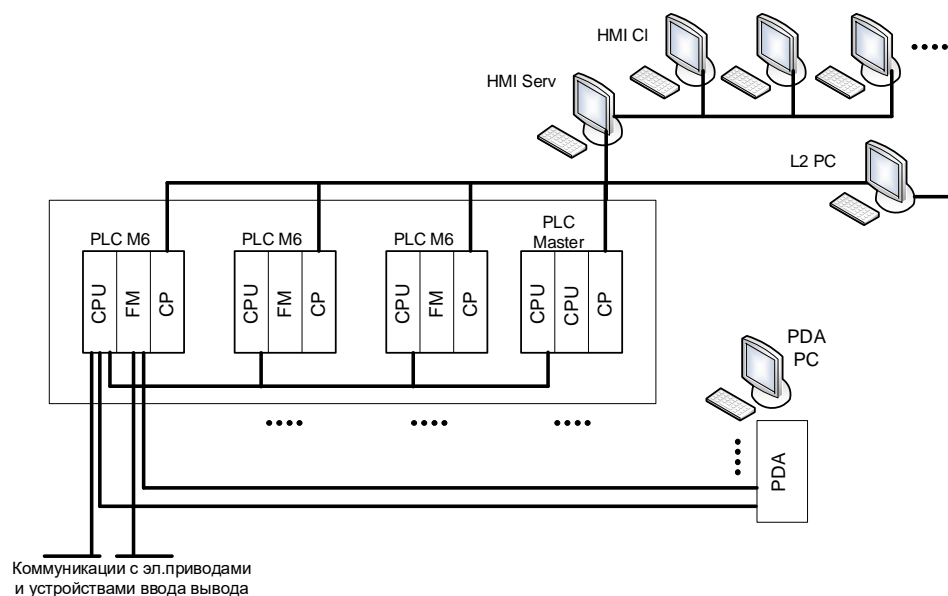


Рисунок 3.13 – Структура системы автоматизации участка моталок

В процессоре CPU-416 реализованы программы управления электроприводами барабана, тянущих роликов, гидравлическими приводами формирующих роликов и других механизмов. Основными функциями являются: формирование заданий на задатчики интенсивности скоростей; расчет диаметра рулона; расчет моментов натяжения, изгиба, момента инерции; функция динамической компенсации; формирование точного останова рулона; связь с преобразователями частоты и некоторые другие. Время цикла вычислений от 10 до 20 мс. Кроме трех таких контроллеров в структуру входит контроллер мастера моталок (ПЛК Master, рис. 3.14), а также устройства человеко-машинного интерфейса (HMI).

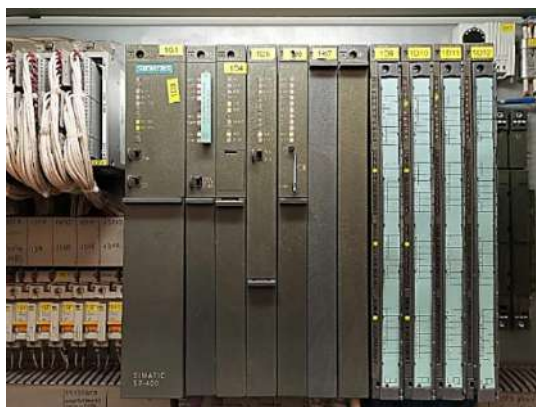
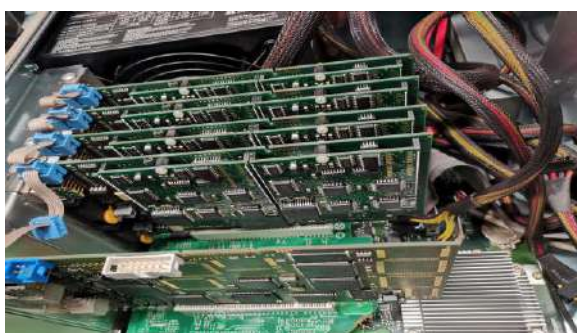


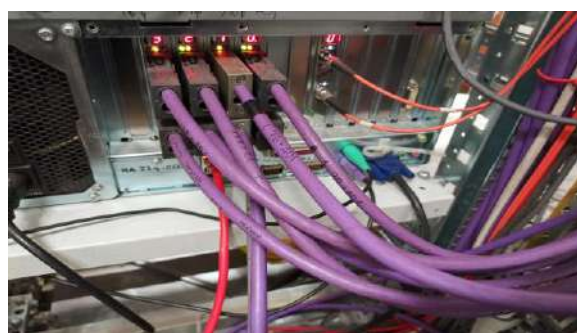
Рисунок 3.14 – Корзина контроллера ПЛК Master

На этапе ввода в эксплуатацию использовался агрегированный ЦД группы моталок, размещенный на вычислительных мощностях контроллеров, показанных на рис. 3.12. Тем самым структуры моделей и алгоритмы управления были перенесены из среды Simulink в программу ПЛК. Для работы комплекса был организован полигон с контроллерами, системой визуализации и частью пультов оператора.

Для контроля динамических процессов использовалась система сбора данных ibaPDA, позволяющая фиксировать данные методом опроса и хранить несколько тысяч сигналов с минимальным временем выборки 2 мс. Соответственно частота дискретизации сбора данных фиксирована и равна 500 Гц. Для передачи информации использовался стандартный протокол связи Profibus. Подключение системы PDA к ПЛК показано на рисунке 3.15.



а



б

Рисунок 3.15 – Корзина системы PDA (а) и ее соединение с разъемами ПЛК (б)

С целью оценки адекватности разработанного ЦД физическому объекту проведена серия экспериментов, в ходе которых сравнивалось изменение параметров электро- и гидроприводов в переходных режимах.

3.2.2. Оценка адекватности настройки мехатронных систем моталок с использованием разработанного агрегированного ЦД

Выполнена проверка адекватности реальных и виртуальных процессов. Ниже представлены результаты контроля режима «виртуальной смотки» с имитацией взаимосвязи механизмов через металл. Сравнивались два варианта:

1 – мягкий ввод в эксплуатацию: комбинация аппаратного ПЛК и моделируемой системы (аппаратное обеспечение в цикле HIL);

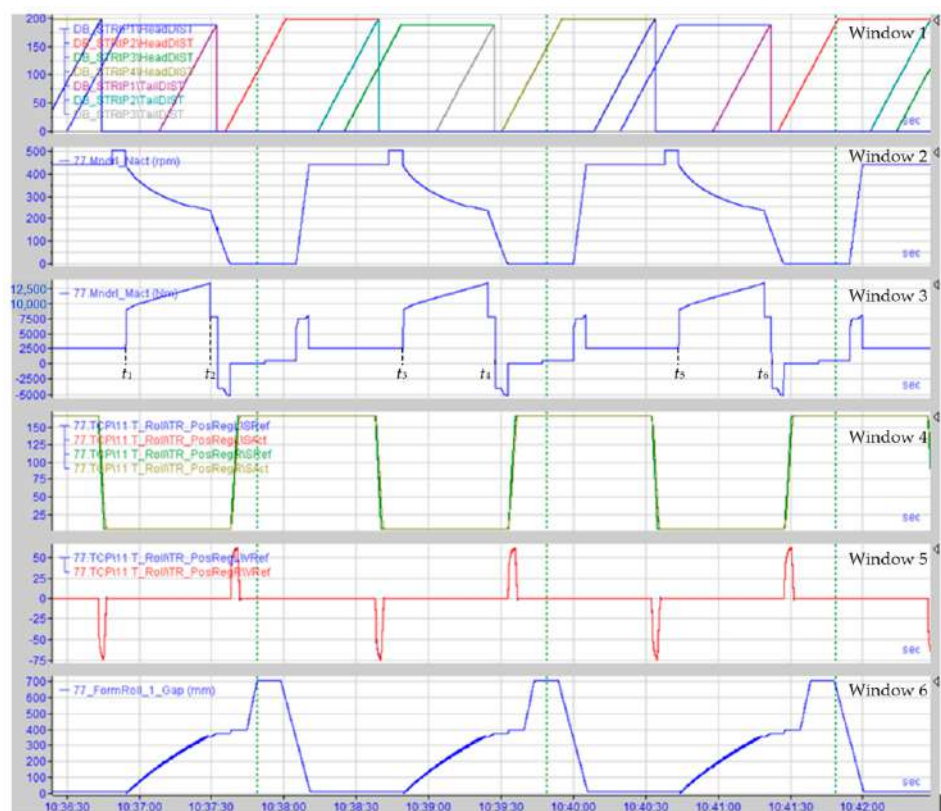
2 – результаты, полученные на моталке (либо группе моталок) после «физического» ввода в эксплуатацию с системой управления, настроенной в режиме HIL.

Следует заметить, что такой сравнительный анализ виртуальных и физических процессов в литературных источниках не встречается.

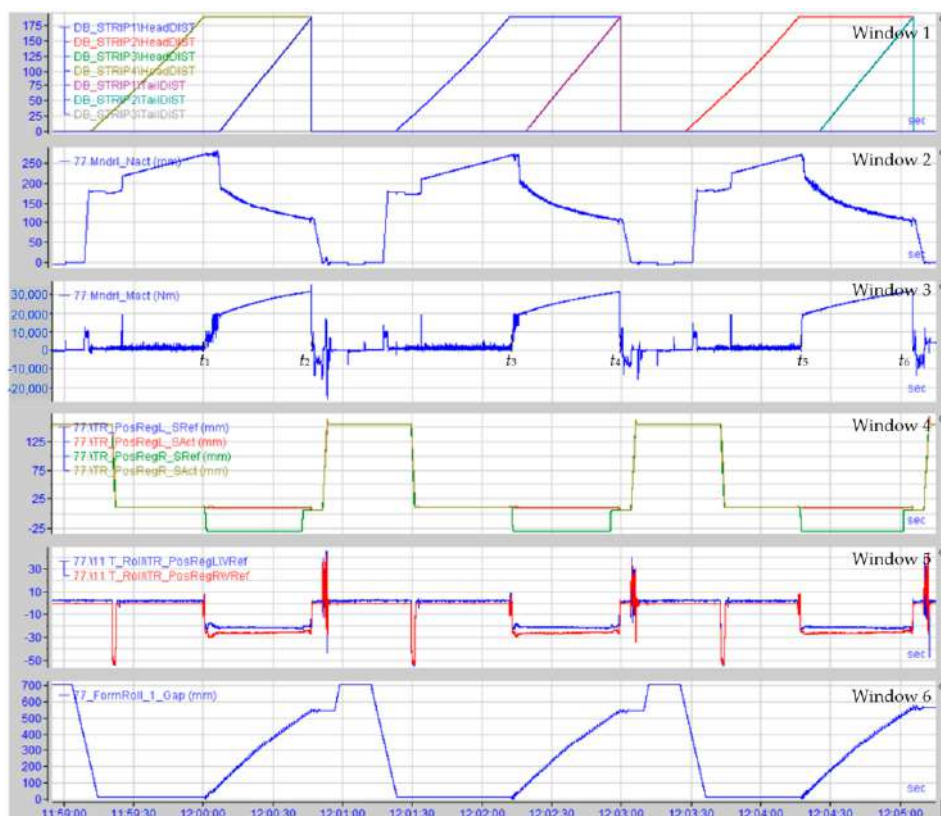
На рисунках 3.16 и 3.17 показана последовательная смотка трех рулонов в интервалах времени (t_1-t_2) , (t_3-t_4) , (t_5-t_6) , соответственно. На горизонтальных осях указано время в формате суток (hh:mm:ss), т.к. запись велась непрерывно. Масштаб времени выбран из условия наглядного отображения процессов на графике за период t_1-t_6 . Этот период составляет около 5 мин на рис. 3.16 и около 2,5 мин на рис. 3.17.

Эксперимент №1. С использованием разработанных виртуальной модели исследуемой системы и алгоритмов управления имитируется намотка нескольких полос, прокатываемых последовательно. Формирующие ролики работают в режиме «без разведения», т.е. постоянно прижаты к рулону. Такой режим применяется при намотке толстых полос (от 7 до 25 мм).

На рис. 3.16, а представлены результаты имитации, полученные при использовании симулятора (результаты HIL), на рис. 3.16, б приведены осциллограммы, полученные непосредственно на моталке. Такой анализ предназначен для проверки работоспособности комплекса во всех режимах за цикл намотки. Представлены зависимости: окно 1 – положения «головы» и «хвоста» полосы на отводящем рольганге; окно 2 – скорость двигателя моталки; окно 3 – момент двигателя моталки; окно 4 – положение тянущего ролика; окно 5 – задание на сервоклапан тянущего ролика; окно 6 – положение формирующего ролика №1.



a



б

Рисунок 3.16 – Осциллограммы при виртуальной настройке НИЛ (а) и полученные при работе электротехнического комплекса (б)

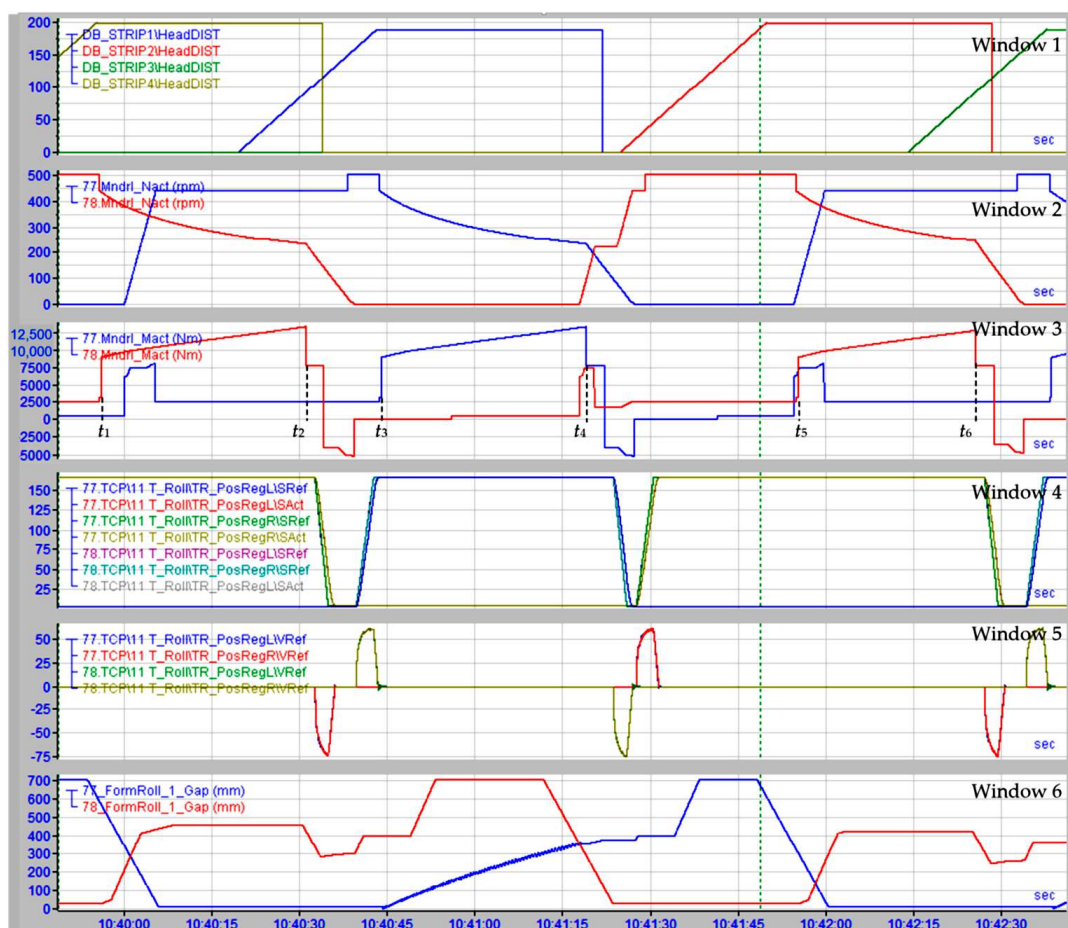


Рисунок 3.17 – Сигналы, полученные при виртуальной настройке НПЛ
электротехнических систем моталок №2 и №3

Приведенные осциллограммы не предназначены для анализа процессов в исследуемых устройствах (эта задача в диссертации не ставилась). Не вдаваясь в их описание, можно утверждать, что изменения всех координат на рисунках 3.16, а и 3.16, б идентичны.

Эксперимент №2. На рис. 3.17 представлены осциллограммы, полученные при симуляции режима намотки полос поочередно на две моталки. Показаны следующие сигналы от виртуальной модели в режиме НПЛ: окно 1 – положения «головы» полосы на отводящем рольганге; окно 2 – скорости двигателей моталок №2 и №3; окно 3 – моменты двигателей моталок; окно 4 – положения тянущих роликов №2 и №3; окно 5 – задания на сервоклапаны тянущих роликов; окно 6 – положения формирующего ролика №1 моталок №2 и №3. Как и в предыдущем эксперименте выполнено сравнение приведенных зависимостей с осциллограммами, полученными на физическом объекте (здесь не приводятся). Сделан вывод, справедливый для обоих экспериментов:

временные интервалы срабатывания механизмов и переходные процессы при отработке заданий совпадают. Это подтверждает качественное взаимное соответствие результатов и возможность использования цифрового двойника для настройки электротехнических и гидравлических систем комплекса моталок.

3.2.3. Выводы по результатам экспериментов

1. Результаты НПЛ на рис. 3.16, а и физической настройки на рис. 3.16, б идентичны. Это означает, что виртуальный контроллер работает аналогично спроектированному, а виртуальная модель адекватна исследуемому объекту. Это подтверждает адекватность цифрового двойника реальной электротехнической системе.

2. Анализ рисунков 3.16 и 3.17 подтверждает, что разработанный агрегированный ЦД достоверно отражает процессы как для одной моталки, так и для группы моталок. Следовательно, он пригоден для виртуальной наладки сложного технологического комплекса. Также он может находиться в эксплуатации на других этапах жизненного цикла агрегата (за исключением утилизации).

Безусловно, осциллограммы, представленные на рис. 3.16, 3.17, являются не единственным подтверждением адекватности разработок и достоверности сделанных выводов. В процессе виртуального ввода в эксплуатацию получены осциллограммы для всех режимов, возникающих за цикл намотки полос различных марок с различными геометрическими размерами и натяжениями. Сравнительный анализ процессов, исследованных с учетом реальных взаимосвязей узлов системы, полученных на виртуальной модели и на объекте, подтвердил их адекватность.

Разработанная виртуальная модель и подход НПЛ также применены для совершенствования алгоритмов управления электро- и гидроприводами моталок. Разработаны:

- система позиционирования формирующих роликов;
- алгоритм управления формирующими роликами на основе цифрового двойника.

Эти системы управления прошли испытания на стане 2500 и в настоящее время находятся в эксплуатации. Их рассмотрение не входит в перечень задач,

поставленных в диссертации. Всестороннее изучение данного вопроса может составить предмет отдельной диссертационной работы.

3.3. Разработка и техническая реализация концепции объектно-ориентированных ЦД двухклетевого стана «тандем»

3.3.1. Характеристика стана

Схема технологической линии стана 1700 представлена на рис. 3.18 [243]. Основным оборудованием являются прокатные клетки, реверсивные моталки №1 и №2 и размотчик. Последний служит для размотки рулона, поступившего от стана горячей прокатки, и далее в технологическом процессе не участвует.

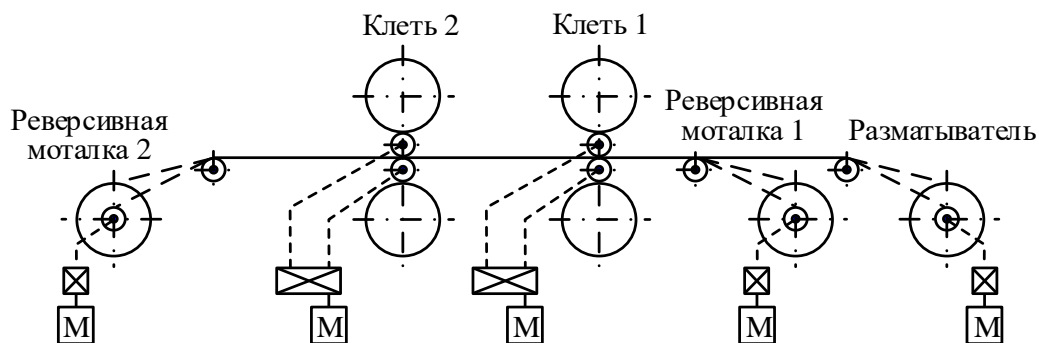


Рисунок 3.18. Схема технологической линии реверсивного стана 1700

Общий вид стана приведен в разделе 1 на рисунке 1.6, фотографии двигателей моталки (на переднем плане) и клетки – на рис. 3.19. Параметры электро-механических систем технологической линии, а также скорость и момент прокатки представлены в таблице 3.5 [243]. Там же приведены геометрические размеры прокатываемой полосы.

Установлены синхронные двигатели с электромагнитным возбуждением, имеющие следующие характеристики: мощность 6000 кВт; частота вращения 252/625 мин⁻¹; частота напряжения питания 8,4/20,83 Гц; напряжение 1400 В; допустимые пиковые нагрузки в течение 10 с для различных режимов нагрузки: 2915 А – для S1; 2526 А – для S9 при 5148 А/10 с. Параметры ротора: 206 В, 450 А (S1); 172 В, 406 А (S9); 313 В, 738А (пик).



Рисунок 3.19. Фотографии двигателей электроприводов клетки и моталки

Таблица 3.5 – Параметры электроприводов и энергосиловые параметры прокатки

Параметр	Ед. измерения	Реверсивная моталка (№1, №2)	Валок клетки (№1, №2)		Разматыватель
Диаметр рулона (валка)	мм	2200/687	опорный 1250/1150	рабочий 440/400	2200/680
Мощность привода	кВт	0-3550/3350	0-6000/6000		0-1040/1040
Частота вращения двигателя	об/мин	0-205/658	0-252/625		0-440/1425
Вращающий момент двигателя	кН·м	165/51,5	227,1/91,7		22,6/7
Передаточное число редуктора	-	1:1	0,582:1		4,679:1
Частота вращения барабана моталки (рабочих валков)	об/мин	0-205/658	0-434/1074		0-94/304
Скорость прокатки	м/мин	0-1420/1420	0-600/1350		0-650/650
Момент прокатки	кН·м	-	0-132,1/53,3		-

Узлы агрегата, показанные на рис. 3.18, представляют собой электротехнические комплексы, взаимосвязанные через полосу. Их целесообразно представить в виде объектно-ориентированных ЦД-экземпляров, связь между которыми осуществляется посредством симуляторов, описывающих свойства полосы, изменяющиеся в процессе обработки. Структурная схема агрегированного ЦД, поясняющая концепцию построения, представлена на рис. 3.20. С целью увеличения масштаба разматыватель и моталки не показаны.

Согласно рекомендациям [8] для любого прокатного стана должны разрабатываться следующие двойники и цифровые тени:

- ЦД-прототипы электроприводов клеток и моталок;
 - ЦД-прототипы гидравлических устройств, моделирующие очаг деформации, усилие прокатки;
 - ЦД-экземпляры полосы между клетями (взаимосвязь клеток через полосу);
 - ЦД-экземпляры, моделирующие взаимосвязь между последней клетью и моталкой;
 - устройства измерения толщины (Digital Shadows – DS);
 - устройства измерения плоскостности (DS)
- и другие ЦД, не показанные на рис. 3.20.

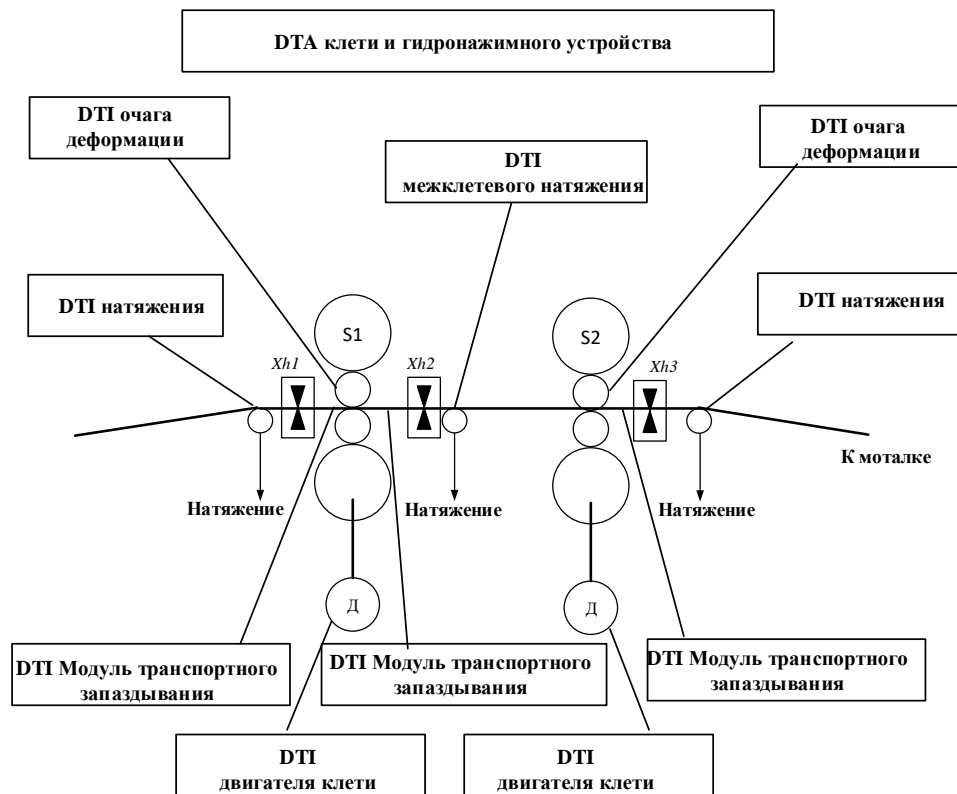


Рисунок 3.20 – Упрощенная структура агрегированного ЦД двухклетевого стана¹

Для имитации технологического процесса должны быть разработаны ЦД систем автоматического регулирования следующих параметров: толщины, натяжения, планшетности, скорости прокатки, зазора валков, усилия прокатки. При разработке виртуальных моделей в структурах агрегированного ЦД должны быть реализованы цифровые модели следующих объектов:

¹ Аналог системы технологической регулировки TER фирмы Converteam

- модель клетки, учитывающая ее упругие свойства и деформацию;
- модель усилия прокатки, учитывающая изменения коэффициента трения и предусматривающая корректировки модели коэффициента трения;
- модель течения металла, учитывающая его зависимость от относительного обжатия и температуры, а также задание кривой текучести;
- модель очага деформации, учитывающая предварительно установленную планшетность, изгиб, температуру прокатки, зазор валков и т.д.

Принципы создания цифровых моделей взаимосвязанных узлов прокатных станов рассмотрены в [228, 229]. Условные обозначения разработанных ЦД-прототипов и ЦД-экземпляров приведены в табл. 3.6. Математическое описание данных модулей приведено в авторской публикации [229].

Таблица 3.6 – Основные ЦД-прототипы и ЦД-экземпляры, входящие в структуру агрегированного двойника стана

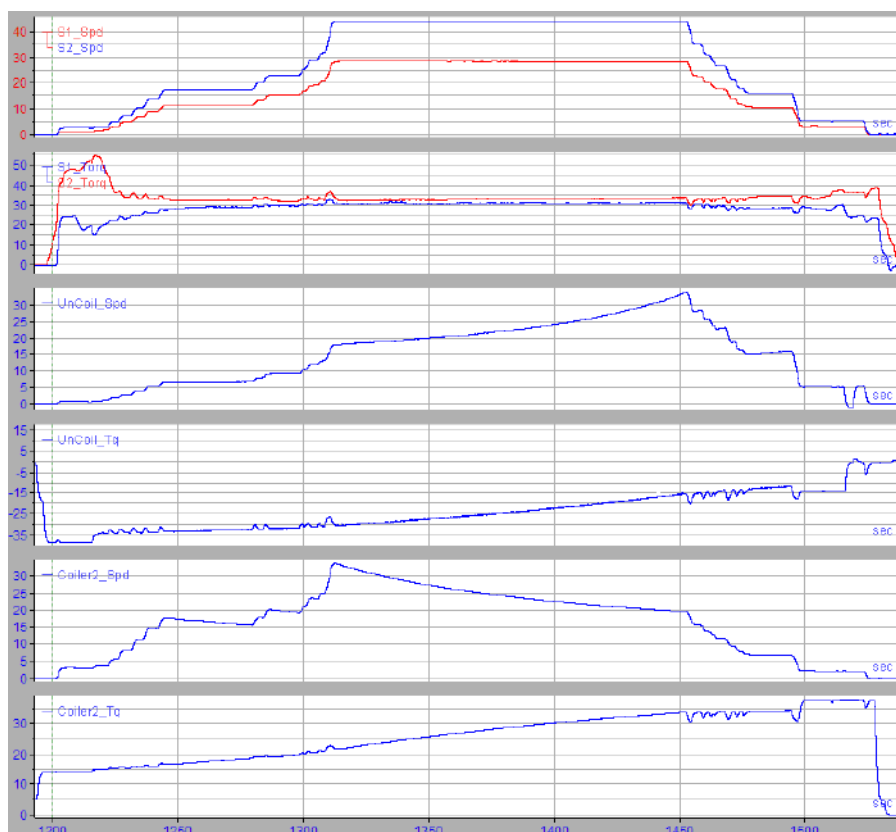
<p>ДТР двигателя клетки</p>	<p>ДТИ момента двигателя</p>	<p>ДТИ межклетевого натяжения</p>
<p>ДТР нажимного устройства</p>	<p>ДТИ давления на валки</p>	<p>ДТИ пластичности материала</p>

В качестве объектно-ориентированных ЦД применяются модули, входящие в библиотеки Simulink и Simscape [84, 85]. Также на базе Simulink разрабатываются объектно-ориентированные ЦД-экземпляры. Устройства измерения и наблюдатели координат – это цифровые тени, в них осуществляются считывание и передача информации от физического объекта к виртуальной модели. Виртуальные модели электромеханических и гидравлических систем, общие для всех ЦД, представленных в настоящей главе, рассмотрены в пп. 2.3,

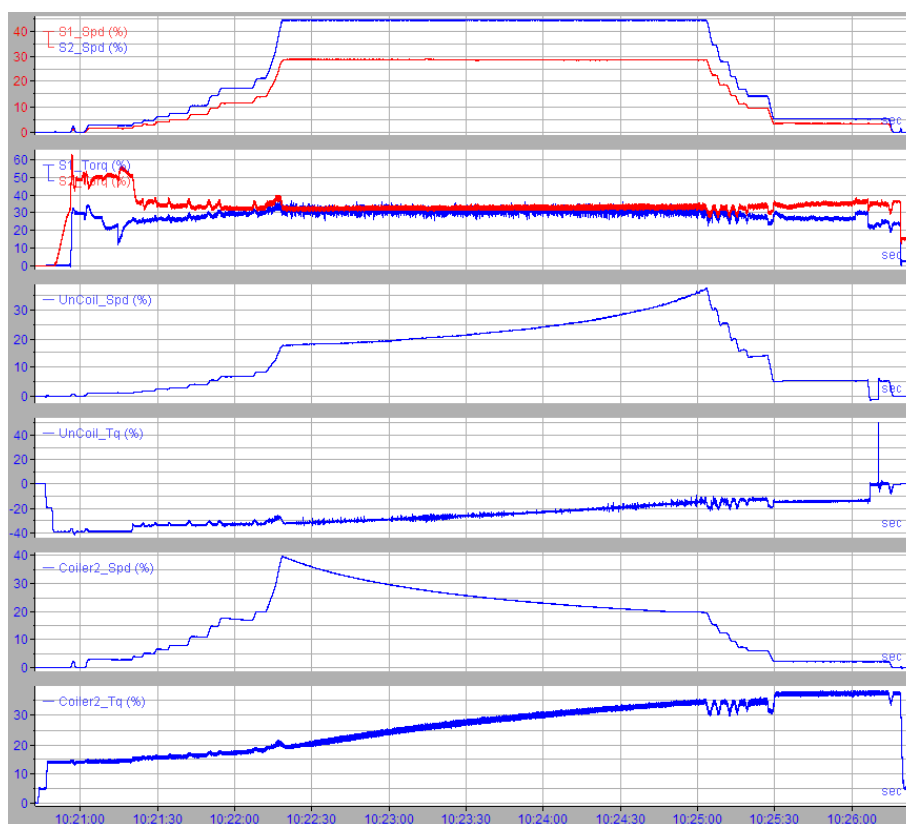
2.4, 3.1.2. Как показано в п. 2.1, эффективным способом является размещение виртуальной модели непосредственно в ПЛК (рис. 2.1, б) при наличии вычислительных ресурсов). В этом случае двойник реализуется в виде отдельных фрагментов программы, предназначенных для симуляции объекта. По сравнению с размещением в РС (рис. 2.1, а) этот способ менее затратный в плане аппаратной части, но сложен в программной реализации. Как отмечалось выше, недостатком является то, что ПЛК имеет ограниченный ресурс, поэтому требуется разработка упрощенных и соответственно менее точных математических моделей. По этой же причине ограничены возможности применения созданных ЦД для контроля реальных физических процессов и состояния оборудования. Выходом из этой ситуации является перевод отложенных алгоритмов ЦД на более высокий уровень АСУ ТП [9].

3.3.2. Экспериментальная оценка результатов виртуального ввода

С целью оценки адекватности разработанных ЦД и физического объекта проведена серия экспериментов, в ходе которых сравнивались параметры в переходных режимах, полученных на ЦД и на реальном объекте. Задание входных сигналов и параметров прокатки осуществлялось программой, поэтому совпадение результатов должно быть близким к идеальному. В подтверждение этому на рис. 3.21, а представлены результаты контроля процессов в режиме виртуальной прокатки с имитацией взаимосвязи технологических узлов через металл. Этот режим предназначен для проверки работоспособности комплекса с использованием агрегированного ЦД. На рис. 3.21, б приведены осциллограммы, полученные на стане после ввода в эксплуатацию. Анализируются следующие временные зависимости: окно 1, окно 2 – скорости вращения $S1_Spd$, $S2_Spd$ и моменты $S1_Torq$, $S2_Torq$ двигателей 1-й и 2-й клетей; окно 3, окно 4 – скорость и момент двигателя разматывателя; окно 5, окно 6 – скорость и момент двигателя моталки №2. Масштабы по осям ординат для всех параметров указаны в % номинальных значений.



а



б

Рисунок 3.21 – Результаты виртуальной настройки – (а) и осциллографирования (б) координат прокатного стана

Представленные осциллограммы позволяют утверждать, что изменения всех координат на рисунках 3.21, а и 3.21, б идентичны. Процессы за один проход реверсивной прокатки с размоткой и намоткой полосы полностью совпадают. Это позволяет сделать выводы о взаимном соответствии результатов и об эффективности использования цифровых двойников для настройки электротехнических систем.

3.4. Применение НЦ при реконструкции летучих ножниц агрегата поперечной резки полосы

3.4.1. Описание объекта исследований

Разработка цифрового двойника с размещением симулятора и отлаживаемого ПЛК на виртуальных машинах применена при настройке электропривода летучих ножниц агрегата поперечной резки (АПР) горячекатаной полосы [244]. Фотография АПР представлена выше на рис. 1.6.

Актуальность разработки ЦД обусловлена реконструкцией с заменой двигателей и системы управления. В [245] отмечено, что *«летучие ножницы имеют решающее значение для повышения производительности и обеспечения качества продукции в линиях поперечной резки стального плоского проката»*. Задача ножниц – резать постоянно движущийся материал на участки заданной длины.

Схема технологической линии АПР представлена на рис. 3.22. Агрегат включает в себя разматыватель UC, две пары тянущих роликов PR1, PR2, две правильные машины STR1, STR2, ролик измерения скорости полосы, летучие ножницы SHR, отводящие конвейеры Conv. и устройства Pack сбора листов в пачки. Система управления ножницами получает сигналы с энкодера мерительного ролика, энкодера положения ножниц и генерирует задание скорости на электропривод.

Характерная тахограмма электропривода приведена на рис. 3.23. Ножницы, находясь в позиции ожидания точки реза на полосе, начинают разгон в момент времени t_1 . Далее, разогнавшись до скорости полосы в момент времени t_2 , некоторое время продолжают движение синхронно со скоростью полосы. В

момент времени t_3 начинается проникновение лезвий в полосу, рез продолжается до момента времени t_4 . Затем ножницы ускоряются, чтобы ножи могли уйти от возникшего края полосы, не повредив его. В интервале времени t_5 - t_6 ножницы замедляются, осуществляется позиционирование в исходном положении, где ожидается подход следующей точки реза. Далее цикл повторяется. Отводящие конвейеры (рис. 3.22) двигаются со скоростью, несколько выше скорости полосы на агрегате, обеспечивая зазор между порезанными листами.

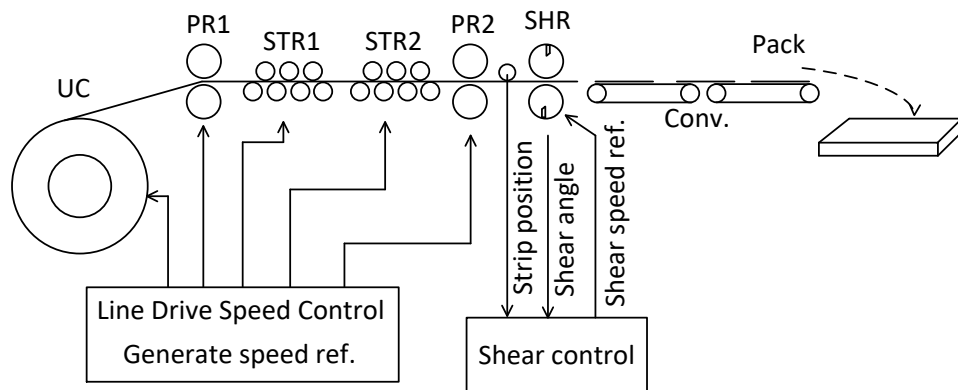


Рисунок 3.22 – Схема технологической линии АПР

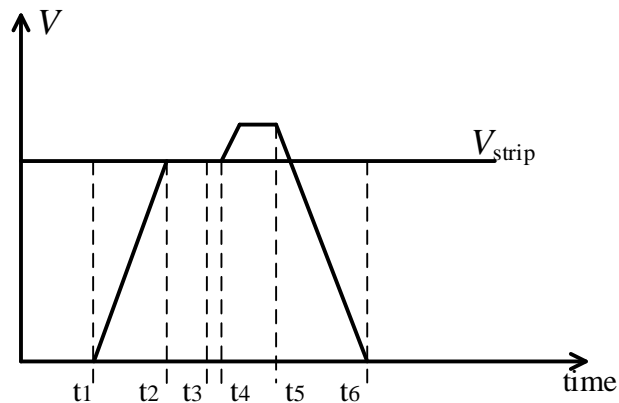


Рисунок 3.23. Тахограмма электропривода ножниц

В связи со сложной траекторией перемещения на величину момента двигателя оказывает влияние момент инерции механизма, в том числе момент инерции двигателя. Время поворота барабана на 180° имеет жесткие ограничения, зависящие от толщины и скорости перемещения полосы. Поэтому алгоритм управления электроприводом с учетом вращательного и поступательного движения кривошипного механизма является достаточно сложным. Разработка такого алгоритма являлось одной из целей реконструкции агрегата с заменой электрооборудования и системы управления.

3.4.2. Разработка системы управления

Как отмечалось выше, информация о применении НПЛ-симуляторов при модернизации и реконструкции действующих промышленных агрегатов ограничена. Полунатурное моделирование и прототипирование НПЛ, упомянутые в п. 1.4.2, в литературных источниках для технологических установок не встречаются (за исключением авторских публикаций). Поэтому можно утверждать, что результаты виртуальной настройки системы управления электроприводом (на примере ножниц АПР) здесь представлены впервые.

В процессе реконструкции выполнялся виртуальный ввод в эксплуатацию. Для вариантов пуско-наладочных работ, рассмотренных в предыдущих параграфах, использовались библиотеки и ресурсы ПО Matlab. Это обеспечило такие преимущества как доступность – не нужно специализированных платформ и дополнительного обучения персонала. Однако Matlab является не единственным ПО, которое следует применять для промышленных установок. Как показывает практика, в ряде случаев эффективным является применение специализированного объектно-ориентированного ПО, которое поставляется совместно с ПЛК. Одним из таких ресурсов является ПО Astra.IDE, позволяющее осуществлять аппаратное конфигурирование контроллеров серии REGUL (R500, R500S, R400). На рассматриваемом АПР это ПО и контроллер указанной серии приняты за основу при разработке и виртуальной настройке системы управления ножницами.

Требования к системе управления

Летучие ножницы (барабанные либо кривошипные) предполагают резку движущейся полосы на листы заданной длины без ее остановки либо замедления. Движение ножей должно синхронизироваться по главной и ведомой осям кривошипа в течение определенного периода времени, а затем возвращаться в исходное положение как можно быстрее для подготовки к следующему резу. В противном случае рез может произойти в неправильном месте или быть неполным, что приведет к браку материала и простою [246]. Поэтому скорость ножа должна соответствовать скорости металла во время реза, что делает траекторию ножа сложной, включающей одновременно поступательное движение и вращение.

На основании анализа технологии реза в [247] сформулированы следующие требования к системе управления.

1. Для точной порезки важно, чтобы режущий узел был синхронизирован с движением материала.

2. Для формирования участков заданной длины:

– во время резки электропривод ножа должен иметь график движения, обеспечивающий перемещение ножа синхронно с полосой;

– за пределами диапазона резки следует задавать темпы замедления или ускорения, прежде чем скорость снова синхронизируется с полосой для следующего реза.

Для рассматриваемого агрегата синхронизация ножей с материалом осуществляется с помощью измерительного ролика.

Структура системы

Для реализации перечисленных требований разработана система управления, показанная на рис. 3.24 [244]. Система выполнена в ПЛК Regul, программа управления резом ShrPosCtrl_Prog размещена в циклической задаче, исполняемой каждые 2 мс. Основные элементы системы реализованы программно и вызываются в блоке FB_FlyShrControl (на схеме не показан). Задание на отрезаемую длину L_{Ref} (на схеме) поступает в ПЛК ножниц от контроллера линии, выполненного на ПЛК S7-400, связанного с ПЛК через DP/DP Coupler.

Электропривод барабанов выполнен на основе асинхронного двигателя с частотным регулированием скорости. Применяется векторная система управления с регулированием намагничивающей составляющей и составляющих тока статора. Задание на ток поступает от регулятора скорости с ограничением выходного сигнала. Регулятор скорости (SpC) и контуры регулирования токов (CurC) размещены в преобразователе частоты электропривода.

Система автоматического регулирования содержит два регулятора положения RP1 и RP2. Регулятор RP1 используется при синхронизации ножей и точки реза на полосе, RP2 – регулятор исходного положения ножей. Выходом RP1 является задание на линейную скорость ножей. С целью улучшения динамических характеристик САР и исключения запаздывания старта ножниц к

выходу RP1 добавляется сигнал измеренной скорости полосы, он выполняет функции предупреждения. По ним формируется задание скорости электропривода. Более подробное описание приведенной схемы представлено в [244].

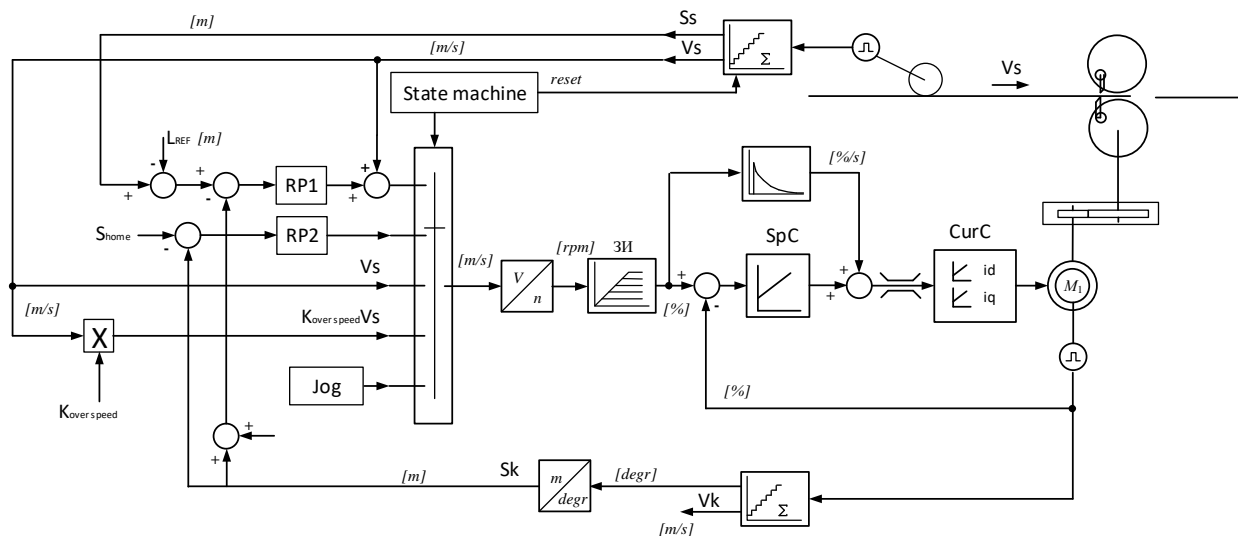


Рисунок 3.24 – Функциональная схема системы управления летучими ножницами

Реализация алгоритма в ПО Astra.IDE

Поскольку в рассматриваемом случае используется виртуальный ПЛК, весь процесс наладки ПО системы управления производится на компьютере без реального оборудования. Объект управления может быть представлен как моделью в том же виртуальном ПЛК, так и в виде модели на отдельной машине. Это является вариантом аппаратно-программного прототипирования, упомянутого в 1.4.2.

Программное обеспечение Astra.IDE позволяет осуществлять аппаратное конфигурирование контроллеров семейства REGUL. Основные функциональные возможности Astra.IDE [248]:

- встроенный редактор визуализации;
- настройка основных параметров системы;
- создание и редактирование прикладного программного обеспечения;
- пошаговая отладка прикладной программы;
- мониторинг работы контроллера.

Astra.IDE позволяет работать в редакторах стандарта IEC 61131-3:

FBD – функциональные блочные диаграммы;

LD – релейно-контактная логика;

ST – структурированный текст;

SFC – последовательные функциональные диаграммы;

CFC (Continuous Flow Chart).

3.4.3. Разработка цифрового двойника на виртуальных машинах

На основе алгоритмов рассмотренной системы управления разработан симулятор для проекта летучих ножниц. Он использовался для отладки ПО ПЛК при реконструкции системы управления. RegulRTS (рис. 3.25) является встроенным системным программным обеспечением, одновременно и операционной системой, и средой исполнения. Это ПО начального уровня, обеспечивающее взаимодействие с периферийным аппаратным оборудованием, планирование заданий, распределение памяти и интерфейс пользователя по умолчанию, когда не запущено ни одной прикладной программы [248].

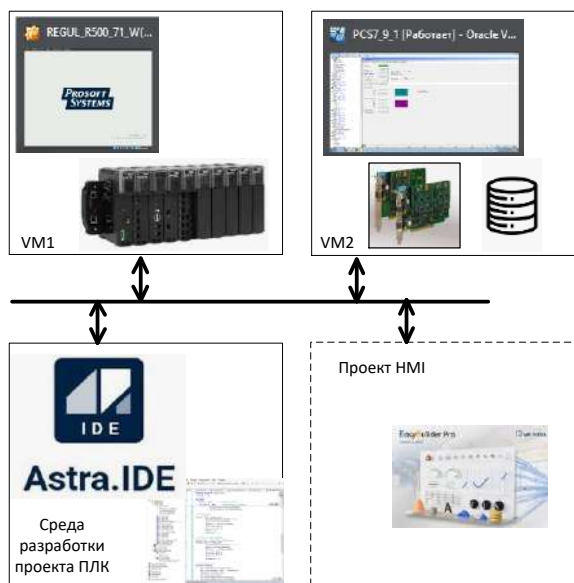


Рисунок. 3.25 – Системное ПО RX REGULRTS

REGULRTS обеспечивает:

- прием данных и их трансформацию при взаимодействии с периферийным аппаратным обеспечением во время конфигурации контроллера, включая набор модулей, шину данных, настройку портов ввода/вывода и протоколов передачи данных, метрологические характеристики и т.д.;
- выполнение технологических алгоритмов в режиме реального времени;

- сбор и передачу диагностических данных о программной и аппаратной частях ПЛК во время работы;
- прием и передачу данных при взаимодействии с внешними устройствами во время работы ПЛК.

Для реализации программы запускается две виртуальные машины. Машину VM1 (рис. 3.25) предоставил разработчик ПЛК (в данном случае это Prosoft Systems – производитель контроллеров Regul 500). Вторая – виртуальная машина VM2 с системой реального времени QNX позволяет имитировать ПЛК Regul 500. *Таким образом создается виртуальный ПЛК, позволяющий выполнить настройку алгоритмов.* Тестируемая система управления летучих ножниц вместе с моделью объекта находится в этом виртуальном ПЛК. На машине VM2 с операционной системой Win7 организована система сбора и архивирования данных iBaPDA. Она позволяет собирать и хранить нужные для отладки программы сигналы с дискретой, соизмеримой с циклом программы ПЛК. На компьютере размещается среда разработки Astra IDE, созданная разработчиком ПЛК на основе среды CoDeSys. Также возможен запуск системы визуализации технологического процесса (HMI).

Для моделирования электропривода с размещением модели в ПЛК используется структура, показанная на рис. 3.26, а. Она содержит вложенную модель привода (DriveModel) и блок, имитирующий интерфейс полевой шины (DriveLogicModel). На рис. 3.26, б показана структура программного блока в ПЛК, реализующая модели регулятора скорости, эквивалентного контура регулирования момента и механической инерции. Время цикла программы 2 мс. Возможна реализация и более сложной многомассовой модели привода с учетом упругости и детализации контуров регулирования токов.

3.4.4. Виртуальная настройка алгоритма летучих ножниц

Рассмотренный алгоритм, реализованный средствами Astra.IDE, внедрен в ПЛК летучих ножниц рассматриваемого АПР. Выполнены виртуальные пуско-наладочные работы. С целью валидации результатов анализировались осциллограммы координат, полученных от системы управления и от виртуаль-

ной модели при разных скоростях движения полосы. Для этого на вход виртуальной модели подавались сигналы от системы управления, реализованной в ПЛК. На рис. 3.27, а представлены осциллограммы, полученные на модели, на рис. 3.27, б – реальные осциллограммы, полученные от системы управления. Обозначения координат соответствуют приведенным на схеме, рис. 3.24.

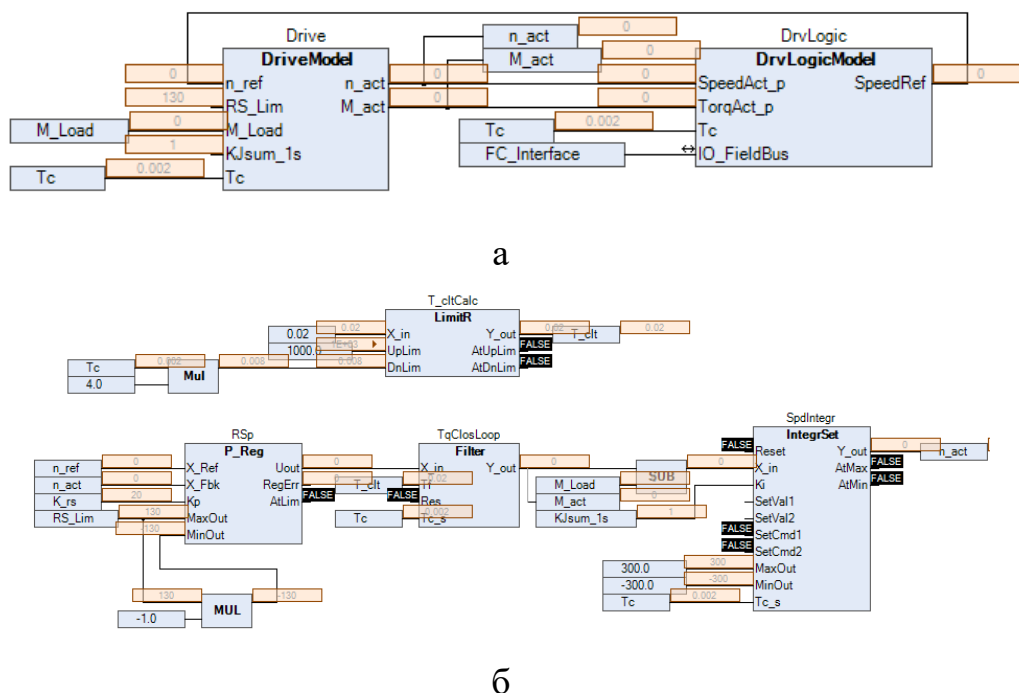


Рисунок 3.26 – Фрагменты программы ПЛК с симулятором регулируемого электропривода (а) и программы ПЛК (б)

Сравнение представленных осциллограмм подтверждает их качественное сходство. На них показаны временные интервалы, поясняющие алгоритм, реализованный в системе управления. Добиться идеального соответствия осциллограмм не представляется возможным, поскольку на исследуемые процессы оказывают влияние не только настройка регуляторов системы управления, но и свойства полосы. Достигнута идентичность результатов, и, как показала практика, необходимости в поиске более точного соответствия процессов нет.

Этот вывод подтверждают осциллограммы, представленные на рис. 3.28, снятые в нормальном режиме работы после виртуальной настройки. Из них следует, что все процессы в системе управления соответствуют проектным. При этом следует учесть главное преимущество: виртуальный ввод в эксплуатацию за счет применения технологии НПЛ произведен за несколько часов. При

обычной технологии пуско-наладочных работ, согласно нормативам, он занял бы несколько дней.

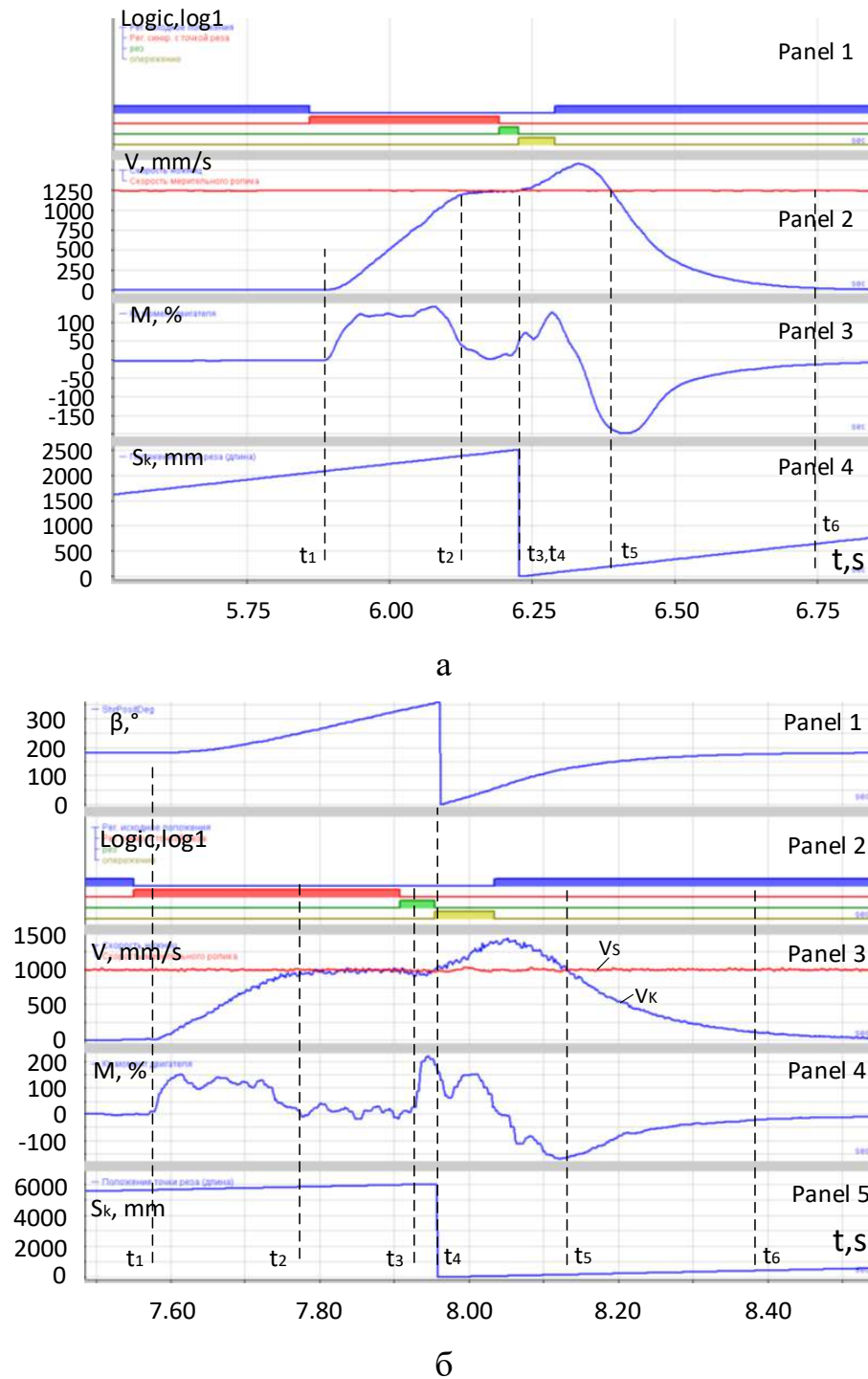


Рисунок 3.27 – Осциллограммы, полученные на виртуальной модели (а) и от внедренного ПЛК летучих ножниц (б): β – угол поворота ножей, $^\circ$ (на рис. (а) не показан); n – сигналы последовательности реза, log 1 (1/0); V_k, V_s – скорости ножей и полосы, мм/с; M_k – крутящий момент двигателя, % номинального; S_k – положение точки реза полосы (длина), мм

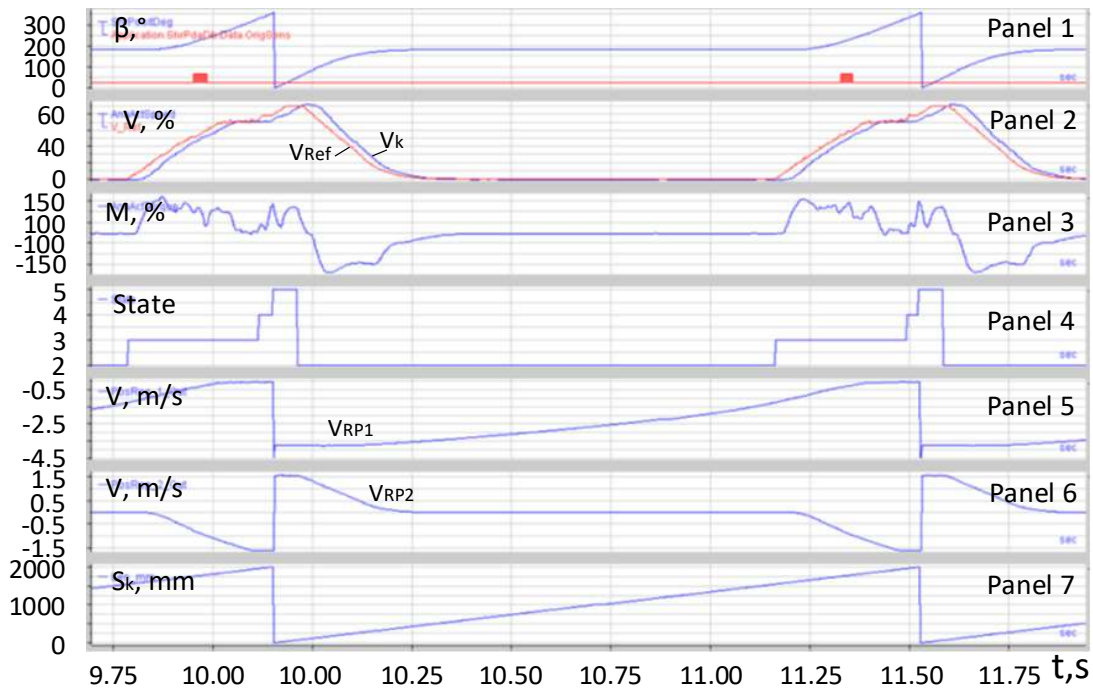


Рисунок 3.28 – Работа ножниц на скорости реза, близкой к максимальной: окно 1 – угол поворота ножниц β , ° и сигнал коррекции угла; окно 2 – задание на скорость V_{ref} и фактическая скорость ножниц V_k , %; окно 3 – момент двигателя M_k , %; окно 4 – шаг последовательности State; окно 5 – выходной сигнал регулятора положения реза (RP1) V_{RP1} , м/с; окно 6 – выходной сигнал регулятора исходного положения (RP2) V_{RP2} , м/с; окно 7 – длина полосы (позиция точки реза на полосе) S_k , мм

3.5. Применение ПЛК с многоядерными процессорами для виртуальной наладки электротехнических систем

Известно, что современной тенденцией развития систем технологической автоматизации является применение программируемых логических контроллеров на основе многоядерных процессоров. Это дает возможность разместить симулятор объекта на отдельном ядре ПЛК и исполнять операции в цикле до 1 мс. Для таких ПЛК перспективным является применение современного программного обеспечения Controller Development System (Codesys). Названное сочетание аппаратных и программных средств позволяет реализовать возможность распределения задач по ядрам с выделением ядра под симулятор объекта, что способствует повышению быстродействия и снижению стоимости аппаратно-программного комплекса цифрового двойника.

3.5.1. Обоснование применения

Современные ПЛК обладают мощными аппаратными ресурсами и широкими возможностями программирования. Наиболее популярными инструментальными средствами программирования ПЛК и РС-совместимых контроллеров являются:

- универсальные программные средства, работающие с несколькими типами контроллеров, это Codesys, ISaGRAF и им подобные, а также системы программного обеспечения для ПЛК на их основе;
- специализированные среды программирования, разработанные ведущими производителями: Siemens, Omron, B&R и другими.

На сегодняшний день одним из самых популярных аппаратно-независимых комплексов для прикладного программирования ПЛК и встраиваемых контроллеров является Codesys [249]. Основным его компонентом является среда программирования на языках стандарта IEC 61131-3. В обычном варианте комплекс работает на компьютере, программы компилируются в код, исполняемый на ПЛК, и загружаются в контроллер. Разработчики утверждают, что в Codesys можно реализовать любую задачу, которая имеет решение в виде программы. Данное ПО успешно применяется во всех областях промышленности, в том числе в металлургии для литейных и прокатных агрегатов. Также сборочные автоматы имеют в своем составе один или группу встроенных контроллеров с Codesys.

Рассматриваемые ПЛК содержат несколько процессорных ядер. Это дает возможность разместить симулятор объекта на отдельном ядре. Такая реализация, с одной стороны, не требует использования какого-либо дополнительного программного обеспечения (например, системы Matlab). С другой, – цикл вычислений в 1 мс, дает возможность построения более детализированных моделей, по сравнению со способом размещения симулятора и основной программы в ПЛК с одним вычислительным ядром. Кроме того, стоимость современных многоядерных ПЛК соизмерима со стоимостью персонального компьютера, который может использоваться для симуляции. Если разработать соответствующую библиотеку объектов симуляции в программной среде Codesys для ПЛК, то можно при довольно низких затратах и отказе от использования

таких систем как Simulink Real Time использовать двух- и многоядерные ПЛК в качестве аппаратного обеспечения симуляторов объектов – вычислительных машин реального времени. Также следует принять во внимание, что возможности контроллеров сильно возросли [250], при этом они имеют цену, сравнимую со стоимостью компьютера, применяемого для построения симулятора.

Вероятно, что рассмотренные выше ЦД, разработанные на основе Simulink, с меньшими затратами могут быть реализованы на современных ПЛК, работающих под Codesys. В частности, рассмотренную выше систему управления группой моталок прокатного стана, выполненную с использованием агрегированного цифрового двойника, можно реализовать в реальном времени в симуляторе отдельного ПЛК. В этом случае будет обеспечено решение задач с более высоким быстродействием и меньшими затратами на обновление компьютерной базы (аппаратных средств) и приобретение программного обеспечения. Поэтому перспективными направлениями являются:

- применение более сложных ПЛК на базе многоядерных процессоров;
- использование современного ПО, предназначенного для работы с такими контроллерами.

При реализации данного подхода естественным образом возникает третья задача – разработка моделей на языке нового ПЛК (либо перенос ранее разработанных моделей).

3.5.2. Конфигурация цифровых двойников на ПЛК с многоядерным процессором

Для реализации симулятора объекта управления на современных контроллерах применяются три основных конфигурации системы [251]:

Вариант 1. Размещение основной программы и программы симуляции на одном ПЛК, но на разных ядрах многоядерного процессора (с полевой шиной EtherCAT, рис. 3.29, а).

Вариант 2. Используется дополнительный ПЛК (Process Simulation PLC) в качестве вычислительного устройства для программы симуляции. Обмен данными между основной программой и симулятором осуществляется через сеть Ethernet, например, по UDP протоколу (рис. 3.29, б).

Вариант 3. Так же как и в варианте 2 используется дополнительный ПЛК. Обмен данными между основной программой и симулятором осуществляется через полевую шину с применением специального устройства EtherCAT bridge, позволяющего организовать обмен данными в двух разных сетях EtherCAT (рис. 3.29, в).

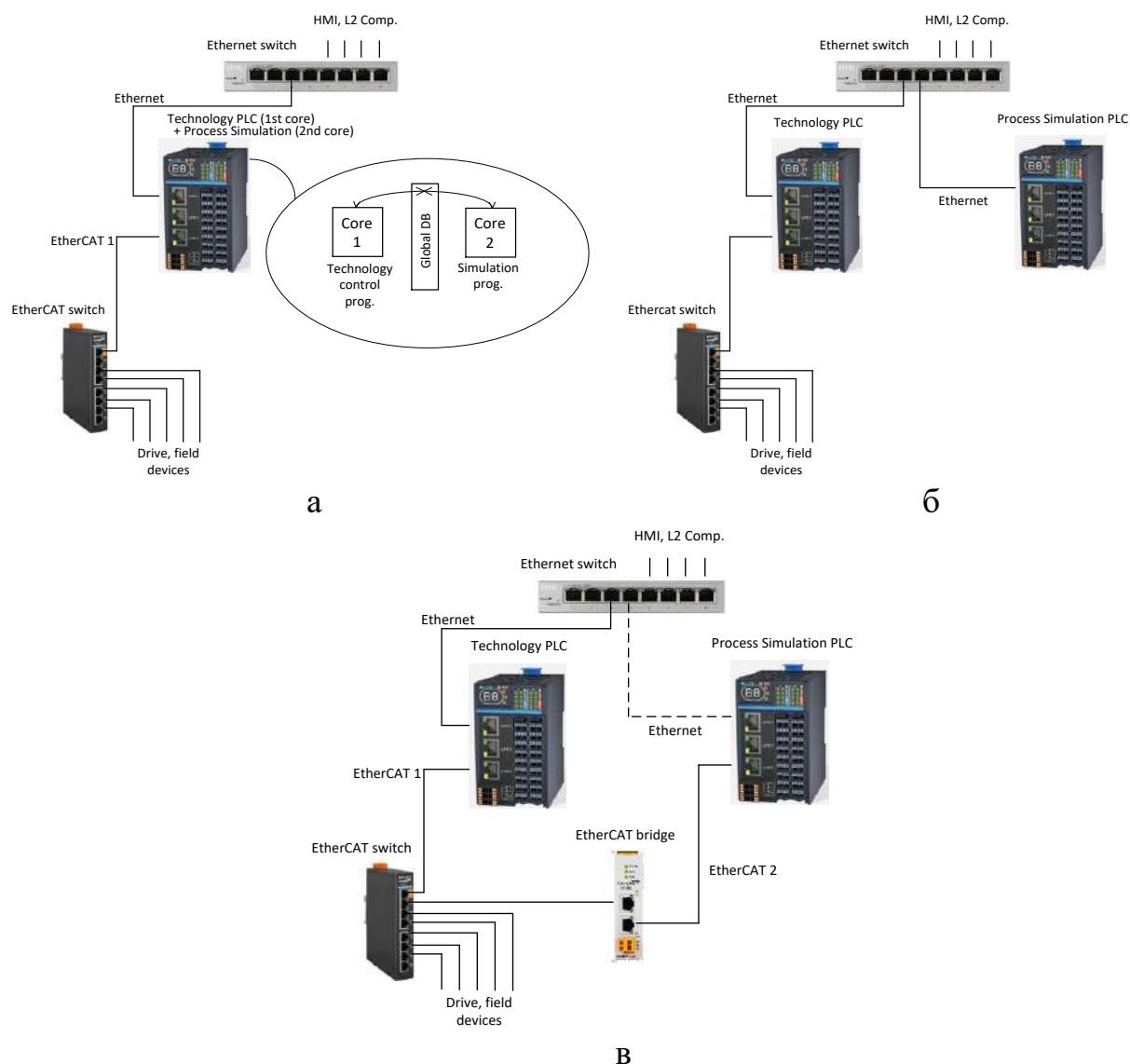


Рисунок 3.29 – Организация обмена информацией по вариантам 1 – а, 2 – б и 3 – в

Следует отметить что ПЛК-симулятор, реализованный на базе много-ядерного процессора, может обмениваться данными с реальным ПЛК с высокой скоростью, используя шину EtherCAT. Это происходит в режиме реального времени, аналогично тому как реальный ПЛК обменивается данными с электроприводами и датчиками через полевую шину.

Применяемая среда программирования – это та часть, с которой имеет дело пользователь (чаще всего – в виде экранных форм). Она функционирует на ПК и является основным компонентом комплекса. Для Codesys она включает редакторы для пяти языков программирования ПЛК, в том числе для стандартных языков IEC 61131-3. Пользователь может выбрать один из них и программировать простыми средствами либо задействовать современные инструменты Codesys. На выходе Codesys выдает быстрый машинный код, при этом поддерживаются все распространенные конфигурации микропроцессоров от 16- до 64-разрядных. Codesys включает конфигураторы ввода/вывода с поддержкой полевых сетей Modbus, PROFIBUS, PROFINET, DeviceNet, CANopen, J1939, EtherCAT, SERCOS III, Ethernet IP и большое число сервисных модулей.

В Codesys 3 впервые реализована сквозная платформа автоматизации (Automation Platform), в которой система исполнения и среда программирования собираются из компонентов с фиксированными интерфейсами. Automation Platform позволяет разобрать Codesys на отдельные компоненты и собрать требуемым образом, добавив новые компоненты. Это позволяет разработчикам прозрачно интегрировать собственные программные инструменты и технологию Codesys.

Типовые области применения Codesys Automation Platform при создании систем автоматизации:

- расширение функциональности Codesys: возможность добавления в среду программирования нового редактора программ, инструмента конфигурирования специализированной полевой сети, автоматизация некоторых типовых операций;
- замена составных компонентов (plug-in) Codesys; если штатный компонент среды программирования не удовлетворяет требованиям пользователей, то возможно изменить форму отображения программ, вид окон и др.;
- создание собственного программного комплекса на базе Codesys. Известными примерами могут служить системы SoMachine от Schneider Electric и TwinCAT 3 от Beckhoff.

3.5.3. Пример технической реализации

В среде Codesys были протестированы программы управления 45-ю частотно-регулируемыми электроприводами с регуляторами позиционирования для решения разных задач в цикле 1 мс. При этом ПЛК программировались в среде Codesys 3.5. При цикле ~ 1 мс время исполнения программ симулятора составляло около 200 мкс, таким образом, остается резерв неиспользованного времени ~ 800 мкс. Это подтверждает, что быстродействие ПЛК с двухъядерным процессором и современным программным обеспечением в несколько раз превышает потребности, возникающие при решении технологических задач. В настоящее время, благодаря этому и другим указанным выше преимуществам, Codesys получает все большее применение для промышленной автоматизации как альтернатива ПО Siemens и Matlab. Достоинствами также являются удобство и высокая производительность труда программиста при составлении программ.

Ниже рассматривается модель индивидуальных электроприводов верхнего и нижнего валков клетки толстолистного прокатного стана при их представлении в виде двухмассовых систем (рис. 3.30). Обозначения координат электроприводов и расшифровка символов внутри блоков приведены в разделе 2 и в [194, 252].

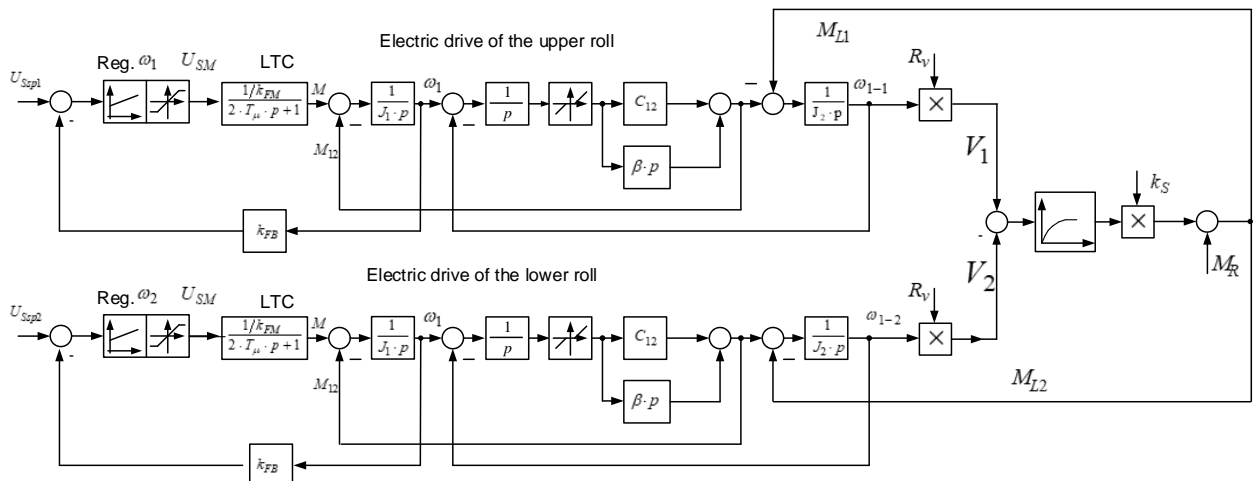


Рисунок 3.30 – Компьютерная модель электроприводов клетки, взаимосвязанных через металл

По данным литературных источников распределение нагрузок (моментов двигателей) при заданной разнице окружных скоростей валков пропорционально рассогласованию скоростей (прямо пропорционально или же нелинейно) с некоторой инерцией. При этом суммарный момент прокатки остается постоянным (либо снижается) относительно момента, который был бы при симметричной прокатке. Модель взаимосвязи электроприводов валков через металл рассматривалась в [229, 253, 254].

Ниже рассматривается реализация части симулятора для отладки ПО и виртуальных пуско-наладочных работ. С этой целью разработаны модели электроприводов в виде структур на языке Codesys. На рис. 3.31, а представлена модель 2-х массового электропривода. Она содержит две вложенные модели, показанные на рисунках 3.31, б и 3.31, в. Модель на рис. 3.31, б разработана для управляемого электропривода с регулированием скорости, она содержит регулятор скорости и внутренний замкнутый контур момента. Также показана модель 1-й массы в виде инерции ротора. На рис. 3.31, в показана «остальная часть» модели 2-х массового электропривода, включающая инерцию 2-й массы (валка) и модель механической передачи с зазором и упругостью [251]. Время цикла программы симулятора 1 мс.

По результатам расчетов на модели, представленной на рис. 3.30, выполнен анализ динамических режимов за цикл прокатки. Расчетные зависимости координат электроприводов верхнего и нижнего валков приведены на рис. 3.32, а. Они обозначены индексами «U» и «L», соответственно.

В момент t_1 происходит ударное приложение нагрузки при входе раската в клеть. Далее в интервале t_1-t_3 происходят технологическое ускорение и формирование «лыжи» за счет выравнивания скоростей n_U и n_L . После этого электроприводы выходят на установившийся режим работы под нагрузкой. В момент времени t_4 включается регулятор деления нагрузки (на схеме не показан, его действие будет рассмотрено в следующем разделе). Он обеспечивает выравнивание скоростей и моментов двигателей в интервале Δt_{4-5} . Зависимости подтверждают вывод, что разница моментов пропорциональна разнице скоростей валков. Представленные результаты моделирования сравнивались с ос-

циллограммами, полученными при виртуальной настройке, выполненной с использованием двухъядерного ПЛК. На рис. 3.32, б приведены осциллограммы, аналогичные зависимостям на рис. 3.32, а. На них последовательно происходят захват, формирование «лыжи» и согласование нагрузок за счет действия регулятора деления нагрузок.

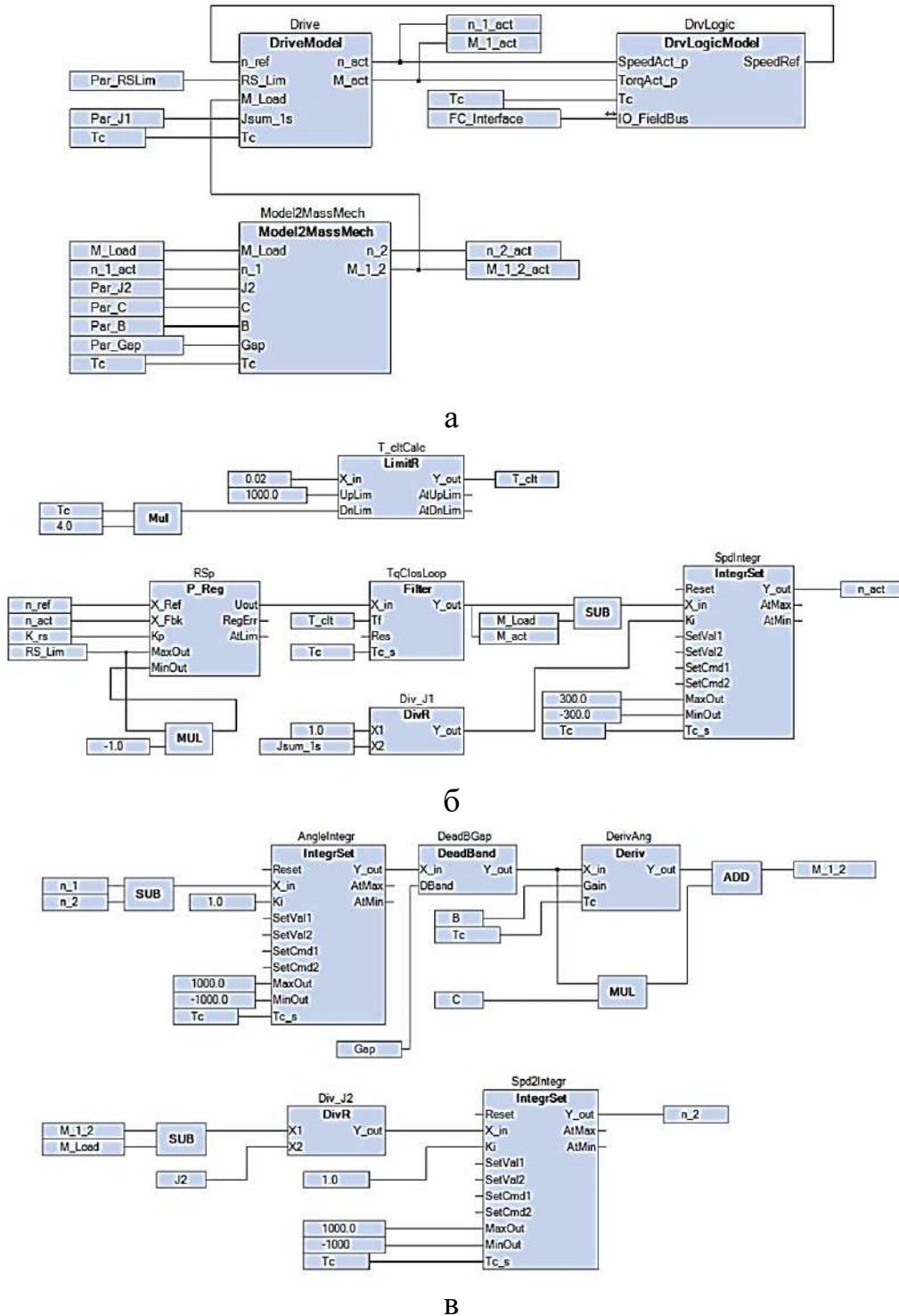
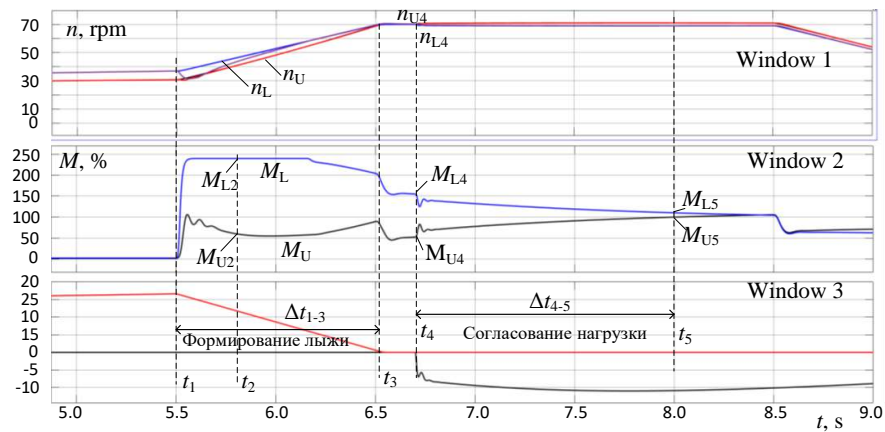
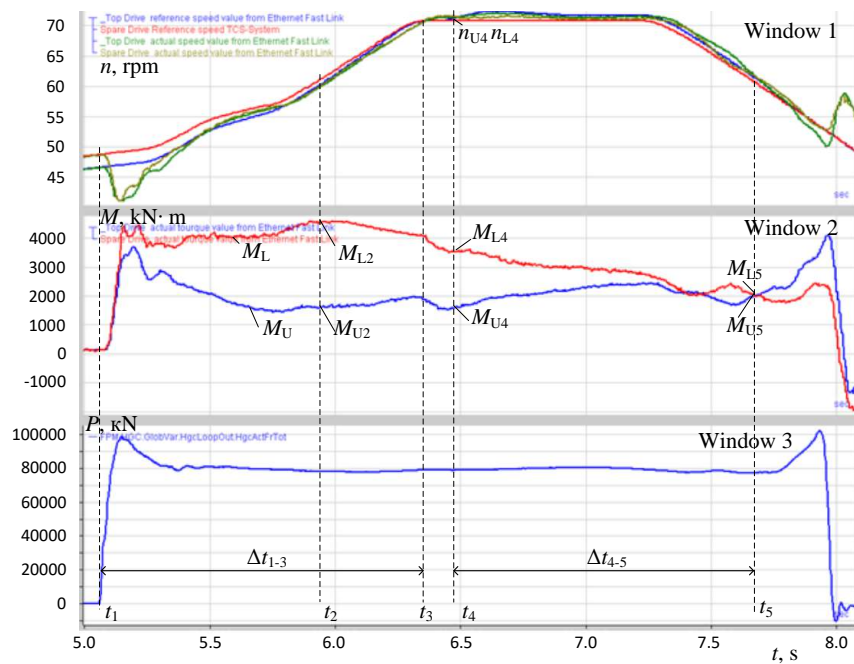


Рисунок 3.31 – Модель двухмассовой системы электропривода (а), модели 1-й массы (б) и 2-й массы (в)



а



б

Рисунок 3.32 – Переходные процессы при моделировании (а) и виртуальной настройке (б) взаимосвязанных электроприводов; на рисунке (б) обозначены:

окно 1 – задания скоростей и фактические скорости ВГП и НГП, об/мин;

окно 2 – моменты двигателей, кН·м; окно 3 – усилие прокатки кН

На осциллограммах видно отличие реальной системы от предложенной модели: реальная система обладает инерционностью, выражающейся в том, что при выравнивании скоростей рассогласование моментов полностью не устраняется, хотя и постепенно снижается. Потому в модель взаимосвязи электроприводов на рис. 3.30 включен фильтр, показанный блоком с нелинейной характеристикой. Анализ зависимостей, представленных на рисунках, подтверждает их визуальное сходство. Результаты сравнения координат в фиксированные моменты времени приведены в таблице 3.7. Относительная разница

этих величин, показанная в последнем столбце, позволяет сделать вывод о соответствии процессов.

Таблица 3.7 – Сравнение экспериментальных значений и результатов моделирования в фиксированные моменты времени

Момент (интервал) времени	Координата электропривода	Ед. измер.	Моделирование (рис. 3.32, а)		Эксперимент (рис. 3.32, б)	Разница абс. значений
			% ном.	Абсолют. значение	Абсолют. значение	%
t_2	M_{L2}	кН·м	240	4584	4400	4,2
	M_{U2}		75	1433	1800	20,3
$t_1 - t_3$	Δt_{1-3}	с	-	1,1	1,2	8,3%
t_4	n_{H4}	об/мин	-	70	70	0
	n_{B4}		-	70	70	0
	M_{L4}	кН·м	200	3820	4000	4,5
	M_{U4}		85	1620	2000	18,8
$t_4 - t_5$	Δt_{4-5}	с	-	1,3	1,2	8,3%
t_5	M_{L5}	кН·м	110	2100	2000	5
	M_{U5}		100	1910	2000	4,5

3.5.4. Выводы по результатам исследований

В последние годы все большее применение на производстве получают ПЛК на основе многоядерных процессоров. В таких ПЛК реализуется возможность распределения задач по ядрам. С использованием такого контроллера и ПО Codesys 3.5 выполнено тестирование программы симулятора для изучения переходных процессов взаимосвязанных электроприводов прокатного стана. Кроме того, было исследовано много реальных промышленных электроприводов, в результате подтвержден кратный «запас» по быстродействию.

Сделан вывод, что модели, разработанные в Simulink для исследования и виртуальных пуско-наладочных работ, можно «перенести» на новые симуляторы для создания цифровых двойников. Аналогичный вывод можно сделать в отношении разработанных цифровых теней. Для этого необходимо программы всех модулей «переписать» на языке ПЛК. Безусловно, это потребует усилий и временных затрат, что является недостатком. Однако в результате будет получен быстродействующий, относительно дешевый симулятор, работающий в реальном времени, являющийся альтернативой Matlab Simulink. Данный подход расширяет возможности моделирования процессов в реальном

времени и открывает перспективы исследований сложных многосвязных систем.

Однако это не значит, что Simulink плохой либо устаревший программный продукт. Он, безусловно, обладает рядом преимуществ, главным из которых является огромная библиотека готовых и протестированных решений, большой опыт использования специалистами в академических и инженерных кругах. Оба варианта ПО получают развитие и будут применяться долгое время. Возникающая возможность выбора для решения конкретных научно-производственных задач будет способствовать скорейшей цифровизации промышленности и внедрению технологий ПоТ.

ВЫВОДЫ

1. На примере группы моталок широкополосного стана горячей прокатки обоснована методика разработки объектно-ориентированных ЦД. Рассмотрено применение таких ЦД для виртуального ввода в эксплуатацию электро-технических комплексов и систем управления технологическим процессом. Благодаря реализации НПЛ минимизировано количество аварий и снижены потери металла в процессе виртуального ввода при реконструкции моталок. Разработанная методика ВС и предложенные ЦД рекомендуются для промышленного внедрения на промышленных агрегатах различного назначения.

3. На примере реверсивного стана «тандем» подтверждена эффективность виртуального ввода в эксплуатацию сложного, многосвязного технологического агрегата методом полунатурного моделирования. Предложенный объектно-ориентированный подход обеспечивает структурированный и гибкий ввод в эксплуатацию, позволяя создавать многократно используемые, адаптируемые виртуальные представления реальных промышленных систем. Благодаря НПЛ теряет актуальность задача строго синтеза регуляторов систем автоматического регулирования технологических параметров и координат электроприводов.

3. В результате проведенных исследований обосновано новое направление применения цифровых двойников – это адаптация алгоритмов при настройке и совершенствовании систем управления. Такую адаптацию можно

выполнять по мере развития технологии и изменения требований к производительности и качеству продукции. При этом нет необходимости совмещать эту процедуру с реконструкцией агрегата и заменой оборудования.

4. Предлагаемый подход с использованием ПЛК, поставляемого с виртуальной машиной со встроенным программным обеспечением, является эффективным. На примере электропривода летучих ножниц АПР горячекатаной полосы показано сокращение времени ввода в эксплуатацию от нескольких дней до нескольких часов. Он рекомендуется для пуско-наладочных работ на промышленных агрегатах, находящихся в эксплуатации.

5. Приведены варианты конфигурации двухъядерных ПЛК, дана характеристика ПО Codesys при применении в системах автоматизации. С помощью такого контроллера и Codesys 3.5 выполнено тестирование программы для исследования переходных процессов взаимосвязанных электроприводов клетки прокатного стана с использованием симулятора объекта управления. Исследовано несколько промышленных электроприводов, подтвержден кратный «запас» по быстродействию. Вклад разработки заключается в том, что на основании анализа реальных процессов теоретически и экспериментально подтверждены возможность и перспективы применения рассмотренного аппаратно-программного комплекса для виртуальной наладки систем автоматизации металлургического производства.

6. При оценке полученных результатов сделан вывод, что виртуальная настройка позволила значительно сократить время ввода в эксплуатацию электротехнических систем при реконструкции. Также виртуальный ввод снижает вероятность возникновения нештатных ситуаций в процессе пуско-наладочных работ и аварийность оборудования. Таким образом, благодаря виртуальным пуско-наладочным работам сокращаются время ввода в эксплуатацию и затраты на реконструкцию.

В целом, в представленном разделе продемонстрирована практическая реализация нового концептуального направления: применения объектно-ориентированных цифровых двойников производственных электротехнических комплексов для виртуального ввода в эксплуатацию и пуско-наладочных работ в процессе реконструкции.

Глава 4. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

В предыдущих разделах рассмотрены вопросы, связанные с разработкой цифровых двойников и их применением для виртуального ввода в эксплуатацию электротехнических комплексов. Согласно поставленным задачам в настоящем разделе выполняется разработка способов и систем управления взаимосвязанными электроприводами прокатных станов. Целью является ограничение нагрузок и повышение точности регулирования технологических параметров на толстолистовых и широкополосных станах горячей прокатки. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- согласование (выравнивание) нагрузок двигателей верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки, связанных через металл (см. п. 1.9.2);
- разработка системы управления взаимосвязанными электроприводами и гидравлическими нажимными устройствами с целью повышения точности формирования профиля переменной толщины по длине раската – «собачья кость», в режиме профилированной прокатки (см. п. 1.9.3, рис. 1.11);
- ограничение силовой взаимосвязи (натяжения либо подпора) последовательно расположенных горизонтальных и вертикальных клеток толстолистостанового стана, либо горизонтальных и вертикальных валков универсальных клеток непрерывной группы широкополосного стана в режиме совместной прокатки (см. п. 1.9.4).

Ниже представлены результаты исследований по двум направлениям, связанным с согласованием нагрузок двигателей ВГП и НГП:

- разработка регулятора деления нагрузок с переключающейся структурой, имеющего повышенное быстродействие за счет временного отключения интегральной части и усиления коэффициента П-части;
- совершенствование алгоритма РДН за счет применения аппарата нечеткой логики (разработка РДН с НЛ).

Для повышения точности формирования профиля «кость» ставится задача разработки САРТ с переключающейся структурой, обеспечивающей повышение точности путем регулирования усилия прокатки на концевых участках переменной толщины и регулирование толщины раската в установившемся режиме прокатки.

В плане ограничения силовой связи между последовательно расположенными клетями предлагается комплекс разработок, включающий:

- способ согласования скоростей горизонтальных и вертикальных валков универсальной клетки при совместной прокатке за счет коррекции скорости электроприводов вертикальных валков;
- способ согласования скоростей валков вертикальной и горизонтальной клеток толстолистого стана при изменении межвалкового зазора в процессе профилированной прокатки;
- способ автоматического управления процессом прокатки, обеспечивающий повышение надежности за счет снижения динамических нагрузок, возникающих при захвате полосы валками вертикальных клеток непрерывной подгруппы черновой группы широкополосного стана горячей прокатки.

Рассмотрению перечисленных вопросов посвящена настоящая глава.

4.1. Анализ процессов при проектной настройке РДН

Структурная схема системы задания скоростей стана 5000, реализующая алгоритмы лыжеобразования и выравнивания нагрузок в установившемся режиме прокатки, представлена на рис. 1.8 в п. 1.9.1. Там же определено назначение и дано описание регуляторов. Схема модели электроприводов верхнего и нижнего валков, включающая математическое описание их взаимосвязи через металл (модель нагрузки) приведена на рис. 4.1. Ниже она используется для исследования процессов согласования нагрузок двигателей ВГП и НГП при различных структурах РДН. Методика и результаты расчета параметров модели каждого электропривода представлены в [194].

В результате исследований, проведенных на стане 5000, показано, что при прокатке листов «тяжелого» сортамента в значительной части прохода имеет

место кратное различие моментов двигателей. Это подтверждено осциллограммами на рис. 1.9 в п. 1.9.2, а также на рис. 3.32 в предыдущем разделе. При нагрузках выше номинальной более загруженный электропривод может выйти на ограничение по моменту, что приводит к нарушению управляемости (размыканию контура регулирования скорости), повышению вероятности аварий и увеличению потерь электрической энергии за счет снижения КПД [82, 255].

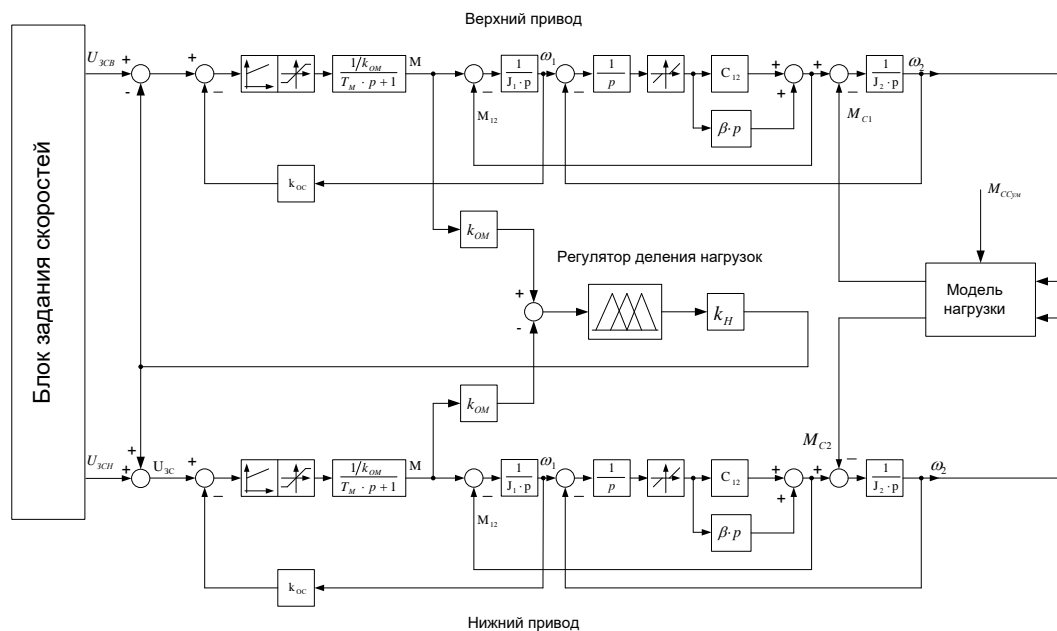


Рисунок 4.1 – Схема модели взаимосвязанных электроприводов верхнего и нижнего валков клети стана 5000 для разработки РДН

В рамках предварительных исследований проведен анализ технологических причин рассогласования нагрузок двигателей ВГП и НГП в разных проходах. Выполнен анализ распределения нагрузок по проходам на стадиях черновой и чистовой прокатки. Также выполнена разработка системы коррекции скоростей в режиме изгиба переднего конца раската вверх при выходе из клети (в режиме формирования лыжи) [35]. Согласно данному изобретению разработано устройство, обеспечивающее формирование лыжи, имеющей заданную кривизну во всех проходах. Это позволяет снизить вероятность повреждения компонентов валковой системы клети вследствие нахлеста полосы (либо тонкого листа) на верхний валок, вызванного ее экстремальным изгибом вверх (этот вопрос исследован в разделе 7). Также формирование заданной лыжи позволяет уменьшить вероятность застревания полосы в роликах рольганга в случае ее изгиба вниз.

Опыт эксплуатации показал, что недостатком проектного алгоритма системы управления электроприводами является недостаточная точность его работы в условиях переменной нагрузки. Анализ известных разработок, обзор которых представлен в [126], позволил сделать вывод, что время выравнивания нагрузок двигателей верхнего и нижнего валков не исследовалось, хотя этот вопрос является важным при реализации регуляторов на действующих прокатных станах. Это подтверждает актуальность разработки РДН, обеспечивающего выравнивание нагрузок двигателей ВГП и НГП за меньшее время с удовлетворительной точностью.

В большинстве случаев РДН представляет собой классический пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, на вход которого подается сигнал разницы моментов двигателей, а на выходе формируется сигнал управления, который подается на входы регуляторов скоростей ВГП и НГП как это показано на рис. 1.8. В [187] отмечены недостатки такого регулятора при проектной настройке. Основным недостатком является низкое быстродействие в режиме выравнивания нагрузок, которое возникает вследствие его настройки по критерию отсутствия колебательности. Это приводит к тому, что в первых проходах РДН «не успевает» включиться в работу, в результате выравнивания нагрузок не происходит в течение всего прохода.

Сказанное поясняют осциллограммы, представленные на рис. 3.32. Для понимания того как происходит процесс регулирования с помощью ПИ-РДН на рис. 3.32, а приведены расчетные зависимости координат электроприводов в момент захвата и в последующем режиме прокатки. В режиме формирования «лыжи» (в интервале t_1-t_3) электропривод НГП выходит в режим ограничения по моменту (достигает 240% номинального момента), что приводит к потере управляемости двигателя. При реализации функции «лыжи» и последующем включении ПИ-РДН процесс выравнивания моментов электроприводов может затягиваться. Это приводит к тому, что в течение большей части прохода согласования скоростей не обеспечивается (рис. 3.32, б). В связи с этим крайне желательно минимизировать время выравнивания моментов. Это целесообразно осуществить за счет формирования более сложной структуры РДН.

Ниже рассматривается разработка двух вариантов РДН, направленных на устранение данного недостатка.

4.2. Разработка способа и системы управления на базе РДН с переключающейся структурой

Для устранения указанных недостатков разработан способ управления двигателями клетки с индивидуальным электроприводом валков, включающий регулятор деления нагрузок с переключающейся структурой [256]. Назначением данной разработки является сокращение времени согласования нагрузок ВГП и НГП в установившемся режиме прокатки после окончания формирования «лыжи». Данный результат достигается тем, что выполняют разведение во времени работы пропорционального и интегрального каналов ПИ-РДН. Увеличение коэффициента усиления пропорционального канала осуществляют в течение паузы после завершения формирования «лыжи», после чего этот канал включают в работу и блокируют изменение И части. При снижении разницы моментов двигателей до 10% расчетного значения восстанавливают первоначальное значение коэффициента усиления П-канала и одновременно включают в работу интегральный канал РДН. Ниже будет показано, что за счет этого достигается сокращение времени выравнивания нагрузок ВГП и НГП, что обеспечивает повышение надежности и срока их эксплуатации. Перечень блоков, входящих в эти устройства приведен в описании патента [36], ниже приводится краткое описание их работы.

Структура системы управления

Данное изобретение поясняется схемой на рис. 4.2, а, на рис. 4.2, б показана схема РДН с переключающейся структурой. На схемах приняты следующие обозначения: 1 – горизонтальная клеть; 2, 3 – двигатели нижнего и верхнего валков; 4, 5 – измерители скоростей вращения НГП и ВГП; 6, 7 – преобразователи частоты; 8, 9 регуляторы скоростей НГП и ВГП; 10, 11, 13, 18 – блоки вычитания; 12, 22 – блоки суммирования; 14 – блок задания скорости вращения валков; 15 – система управления режимами электроприводов; 16 – информационная шина; 17 – система визуализации и контроля; 19 – РДН; 20, 21 – пропорциональный и интегральный регуляторы,

создающие соответственно пропорциональный и интегральный каналы РДН; 23 – блок хранения коэффициентов усиления пропорционального регулятора.

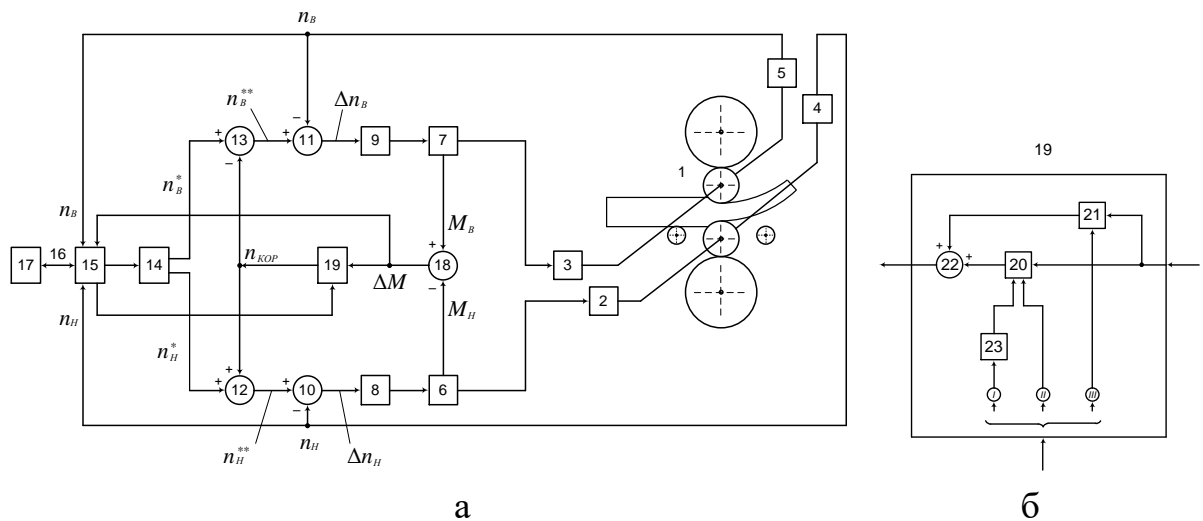


Рисунок 4.2 – Схемы системы управления, реализующей разработанный способ (а), и РДН с переключающейся структурой (б) [36]

Система автоматического управления станом и система визуализации и контроля 17 решают следующие задачи: ввод и корректировку программы прокатки; управление технологическими агрегатами; контроль технологических параметров процесса; индикацию готовности и состояния систем стана; диагностику оборудования, сбор и архивирование производственной информации и др. Система управления режимом электроприводов 15 выполняет следующие функции: контролирует текущие значения скорости вращения нижнего и верхнего валков; в соответствии с программой прокатки задает режим блока задания скоростей нижнего и верхнего валков; контролирует текущую асимметрию скоростей валков; выдает команды на РДН; контролирует разницу моментов двигателей; в соответствии с программой прокатки в заданные моменты времени осуществляет изменение алгоритма работы пропорционального и интегрального регуляторов и другие функции.

Блок суммирования 12 при наличии на его втором входе корректирующего сигнала $n_{кор}$ увеличивает значение задания скорости вращения нижнего рабочего валка n_H^* до скорректированного значения: $n_H^{**} = n_H^* + n_{кор}$. В

дальнейшем это позволит быстрее согласовать скоростные и нагрузочные режимы в предлагаемом способе управления. Блок вычитания 10 вычисляет отклонение $\Delta n_n = n_n^{**} - n_n$ между скорректированным заданным значением скорости вращения нижнего рабочего вала n_n^{**} и его текущим значением n_n . Текущее значение скорости вращения нижнего вала n_n подается с выхода измерителя скорости вращения нижнего рабочего вала 4. Вычисленное отклонение скорости этого вала Δn_n подается на вход регулятора скорости 8, который формирует управляющий сигнал для преобразователя частоты НГП 6. Указанный ПЧ, управляя работой двигателя нижнего вала 2, поддерживает скорость его вращения в соответствии с заданным значением n_n^{**} и регулирует составляющие токов двигателя с целью поддержания заданного момента и обеспечения оптимальной загрузки двигателя.

Аналогично с помощью блоков 7, 11, 13 осуществляется коррекция скорости верхнего вала. Отличием является то, что блок вычитания 11 вычисляет разность между скорректированным заданием скорости верхнего вала и его текущим значением $\Delta n_v = n_v^{**} - n_v$.

Подробное описание работы системы приведено в [36].

Структура РДН

На рис. 4.3, а представлена структурная схема проектного РДН, которая поясняет принцип регулирования скоростей ВГП и НГП по разнице измеряемых моментов двигателей, вычисляемых, на основе измерений в преобразователе частоты. На рис. 4.3, б представлена схема РДН с переключающейся структурой, реализующего разработанный способ. В обоих случаях при условно положительной разнице моментов, когда $M_{ВГП} > M_{НГП}$, выходной сигнал РДН воздействует на скорость ВГП в сторону ее уменьшения, а на скорость НГП – в сторону увеличения. При противоположном соотношении моментов воздействие на скорости двигателей обратное. Блок нелинейности с зоной нечувствительности предназначен для того чтобы при малых рассогласованиях моментов ВГП и НГП коррекции скоростей не производилось. Это обеспечивает повышение стабильности процесса регулирования. В режимах, когда регулирования деления нагрузок не происходит, выходной сигнал РДН

должен быть нулевым, для этого подается сигнал на запрещение (и последующее разрешение) работы пропорционального канала.

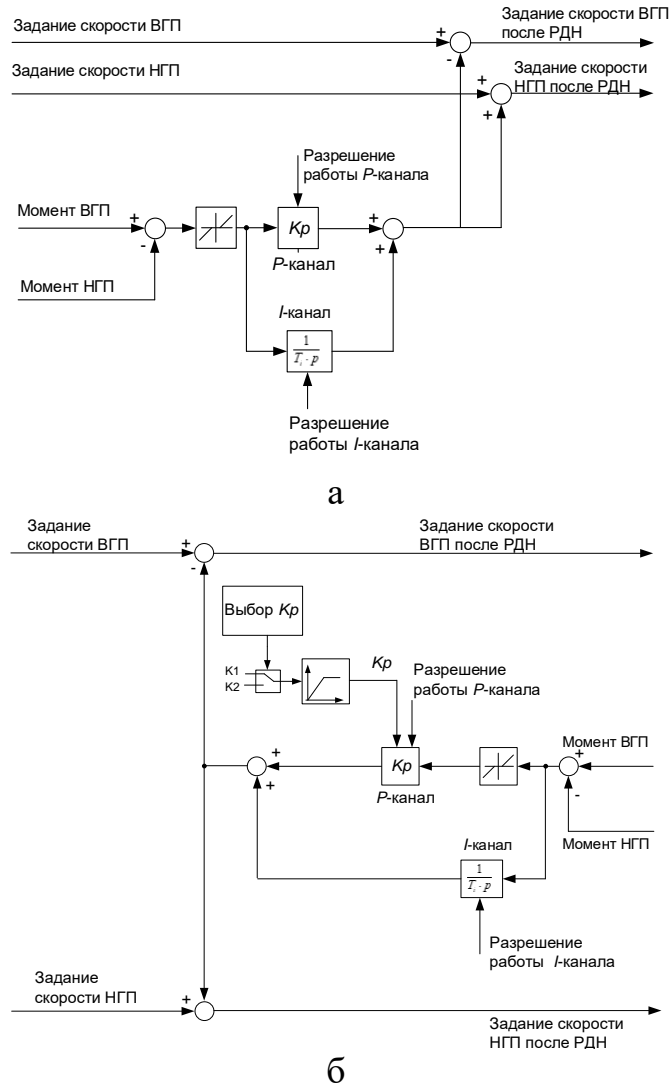


Рисунок 4.3 – Схемы проектного (а) и разработанного (б) РДН

На обеих схемах регулятор представлен в виде пропорционального (P) и интегрального (I) каналов, отличием предложенного варианта является то, что они вступают в работу не одновременно. Также отличительным признаком разработанного РДН является переключение коэффициента усиления пропорционального канала. При отсутствии металла в валках на селекторе K_p выбора коэффициентов усиления устанавливается значение коэффициента K_1 , которое больше, чем расчетный коэффициент при проектной настройке. Это обеспечивает форсированный режим согласования скоростей ВГП и НГП, в результате чего время выравнивания нагрузок сокращается в 2 и более раза.

При снижении разницы моментов двигателей до 10% расчетного значения осуществляется переключение структуры, в результате устанавливается меньшее значение коэффициента усиления K_2 . Одновременно подается сигнал «Разрешение работы интегральной части», которая (часть) обеспечивает астатическое регулирования разницы моментов в квазиустановившемся режиме прокатки. Таким образом, в разработанном РДН осуществляется регулирование сигналов по P и I каналам, разведенное во времени. Форсированное пропорциональное регулирование обеспечивает увеличение быстродействия, в то время как интегральный канал с большой постоянной времени обеспечивает нулевую ошибку регулирования в установившемся режиме.

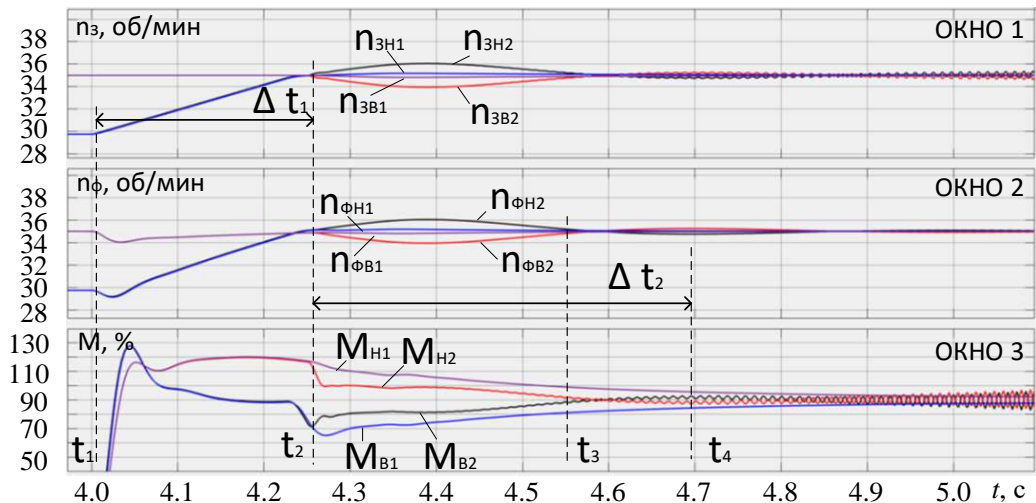
Исследование методом моделирования

Далее с помощью разработанной модели (рис. 4.1) исследованы режимы согласования нагрузок ВГП и НГП с проектным и разработанным РДН. Теоретически можно предположить, что простое увеличение коэффициента усиления пропорциональной части проектного ПИ-РДН может привести к тем же результатам, что и форсировка процессов за счет изменения структуры. Цель моделирования – подтвердить либо опровергнуть это предположение.

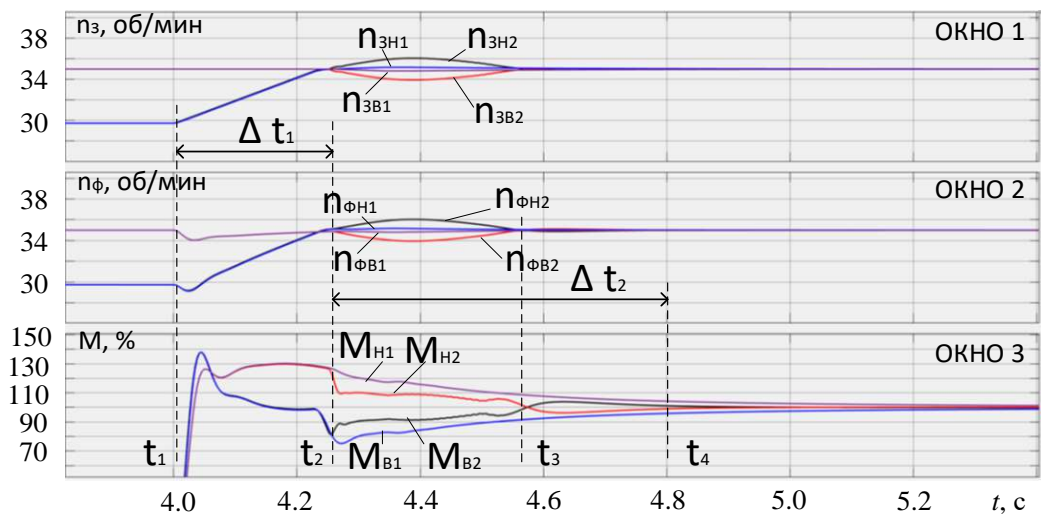
Выполнено исследование режимов согласования нагрузок ВГП и НГП после окончания формирования «лыжи». На рис. 4.4 представлены процессы, полученные с проектным (рисунок 4.4, а) и разработанным (рис. 4.4, б) РДН. На обоих рисунках индекс «1» у переменных соответствует системе с исходной настройкой. На рис. 4.4, а индекс «2» соответствует системе с высокими коэффициентами, но без переключения коэффициентов после вхождения в зоны рассогласований моментов $\pm 10\%$, а на рис. 4.4, б – системе с переключением коэффициентов РДН. Это позволяет показать на одних графиках изменения процессов в исходной и разработанной системах.

В режиме формирования лыжи в интервалах t_1 – t_2 осуществляется регулирование скорости только двигателя верхнего вала, скорость двигателя нижнего вала принята за базовую, поэтому не регулируется. По окончании формирования лыжи в момент t_2 включается в работу РДН, за счет этого фактическая скорость $n_{\text{ФН2}}$ «нижнего» двигателя увеличивается, а скорость $n_{\text{ФВ2}}$ «верхнего» двигателя снижается. Это происходит вследствие коррекции заданий

скоростей n_{3H2} , n_{3B2} , от РДН. При этом момент M_{H2} снижается (практически скачком), а M_{B2} возрастает. Далее происходит выравнивание моментов, при этом в исходной структуре процесс согласования моментов M_{H1} и M_{B1} более длительный, чем время согласования при изменении структуры (моменты с индексом «2»). В момент времени t_3 на рис. 4.4, б при входе скоростей в 10%-ю зону отклонений происходит обратное переключение структуры РДН, форсировка согласования скоростей отменяется.



а



б

Рисунок 4.4 – Исследование процессов: а – с исходной настройкой (индекс «1») и с увеличенным коэффициентом усиления без переключения структуры (индекс «2»); б – при действии РДН с исходной настройкой (индекс «1») и с переключающейся структурой (индекс «2»); окна 1 – заданные скорости; окна 2 – фактические скорости; окна 3 – моменты двигателей

Анализ этих зависимостей показывает, что увеличение коэффициента усиления РДН без изменения его структуры позволяет достичь даже меньшего времени выравнивания моментов, чем переключение структуры РДН. Время согласования моментов Δt_2 на рис. 4.4, а меньше времени Δt_2 на рис. 4.4, б примерно на 0,1 с. Однако при исходной настройке усиливаются колебательные свойства системы, что недопустимо. При действии разработанного РДН такого явления не возникает.

Представленные зависимости иллюстрируют то, что одного только увеличения коэффициентов регуляторов недостаточно для качественной работы РДН. Таким образом, результаты моделирования подтверждают преимущества РДН с переключающейся структурой.

Для оценки достоверности данного вывода проведены экспериментальные исследования на стане, их результаты приведены ниже в п. 4.7.2.

4.3. Нечеткий регулятор деления нагрузок электроприводов прокатной клетки

Как известно, нечеткая логика (НЛ) является математическим аппаратом, обеспечивающим повышение точности регулирования координат при изменении параметров объекта, а также применяемым для реализации регуляторов при неизвестном или сложном описании объекта управления. В исследуемом случае таким объектом является взаимосвязь верхнего и нижнего валков через металл. Разработка РДН с НЛ, прежде всего, потребует его синтеза, что в условиях двух электроприводов с разными нагрузками и нелинейной связью является нетривиальной задачей. Как показано в разделе 2, облегчить ее решение возможно при применении ресурса НЛ. Согласно данной технологии необходимы предварительные исследования методом компьютерного моделирования, виртуальная настройка и эксперименты непосредственно на объекте.

Поставлена задача разработки РДН на основе алгоритмов нечеткой логики для электроприводов клетки стана 5000 на основе *Fuzzy Logic Toolbox for MatLab*. В качестве управляющего сигнала, как и в предыдущих случаях, используется разница моментов двигателей ВГП и НГП. Также предусмотрено

совершенствование разрабатываемого РДН за счет введения канала регулирования по производной разницы указанных моментов.

Для достижения цели предполагается решение следующих задач [126]:

1. Разработка структуры РДН с НЛ, формирование набора правил нечеткого регулятора.
2. Исследования электропривода с нечетким РДН в функции разницы моментов двигателей и дополнительным входом по отфильтрованной производной разницы моментов. Формирование набора сигналов принадлежности входной переменной блока к лингвистическим переменным.
3. Фаззификация, формирование правил нечеткого регулятора с учетом канала производной рассогласования моментов при включении регулятора с различными функциями принадлежности.
4. Исследование процессов ВГП и НГП методом математического моделирования при различных функциях принадлежности.

Решение поставленных задач, по существу, позволит обосновать методику разработки принципиально нового нелинейного РДН с НЛ с двумя каналами регулирования, которая представляется вполне адекватной для взаимосвязанных электроприводов прокатной клетки. Задачи экспериментальных исследований и промышленного внедрения регулятора на стане в диссертационной работе не ставятся в связи со сложностью интеграции *Fuzzy Logic Toolbox* в промышленные электроприводы.

Работу любого регулятора с НЛ можно представить в виде трех последовательных действий [17]:

1. Фаззификация (введение нечеткости), т.е. задание значения лингвистической переменной функцией принадлежности. Как известно, это установка соответствия между численным значением входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма лингвистической переменной.
2. Выполнение композиции правил регулятора. В результате композиции всех правил получаем некое нечеткое множество. Это и есть решение, которое

принял нечеткий регулятор на основании введенных правил и текущих входных сигналов.

3. Дефаззификация, получение воздействия регулятора. Под этим термином понимается процесс перехода от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к ее четкому (числовому) значению.

Иными словами, фаззификация – это процесс преобразования четких (конкретных) входных данных в нечеткие (лингвистические) значения с использованием функции принадлежности. Дефаззификация – обратный процесс, когда результаты нечеткого вывода, преобразуются в четкое (конкретное) значение.

4.3.1. Разработка нечеткого РДН в функции разницы моментов двигателей

На первом этапе был исследован простой нечеткий регулятор, который отрабатывает разность воздействия моментов двигателей верхнего и нижнего валков как показано на рис. 4.1. Для построения регулятора с НЛ произведена градация величины разницы моментов, и для каждой величины прописано свое правило воздействия. Заданы правила такого НР получены результаты моделирования. Изначально задаются правила для такого «простейшего» нечеткого регулятора, показанные в окне *Fuzzy Logic Toolbox* (рис. 4.5), пояснения даны в таблице 4.1.

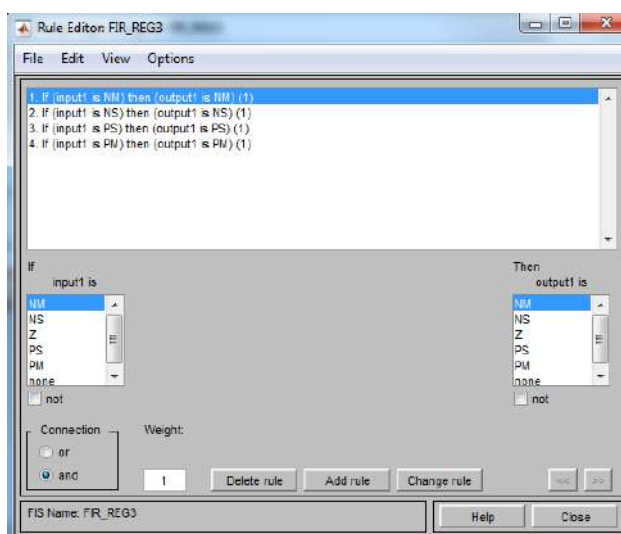


Рисунок 4.5 – Набор правил нечеткого регулятора

Таблица 4.1 – Правила нечеткого регулятора (пояснения к рис. 4.5)

Вход (окно слева)	Выходное воздействие (окно справа)
Отрицательное максимальное, NM	Отрицательное максимальное, NM
Отрицательное малое, NS	Отрицательное малое, NS
Нулевое, Z	Нулевое, Z
Положительное малое, PS	Положительное малое, PS
Положительное большое, PM	Положительное большое, PM

Фаззификация разницы моментов в редакторе для нечеткой логики пакета *MatLab* показана на рис. 4.6. На рисунках обозначены: NM – отрицательное максимальное, NS – отрицательное малое, Z – нулевое, PS – положительное малое, PM – положительное большое. То есть, если мы получаем разность моментов большой положительной, то в канал задания отправляем большую положительную ошибку и т.д.

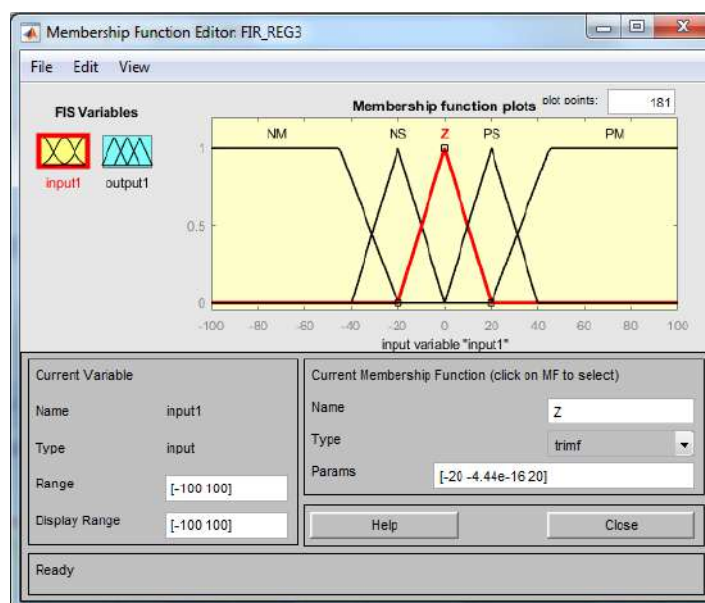


Рисунок 4.6 – Фаззификация разности моментов

При использовании данных из табл. 4.1 получены результаты моделирования, представленные на рис. 4.7. Подключение регулятора происходит после окончания лыжеобразования (данная функция – основной возмущающий фактор). Как видно из графиков регулятор с НЛ обеспечивает удовлетворительное выполнение функций регулирования, т.е. система является работоспособной.

Но данная система не решает поставленную задачу минимизации времени выравнивания нагрузок и качества регулирования. Быстродействие РДН не увеличилось. Процесс согласования моментов «верхнего» и «нижнего» двигателей затянут во времени, их равенства не достигается до конца прохода.

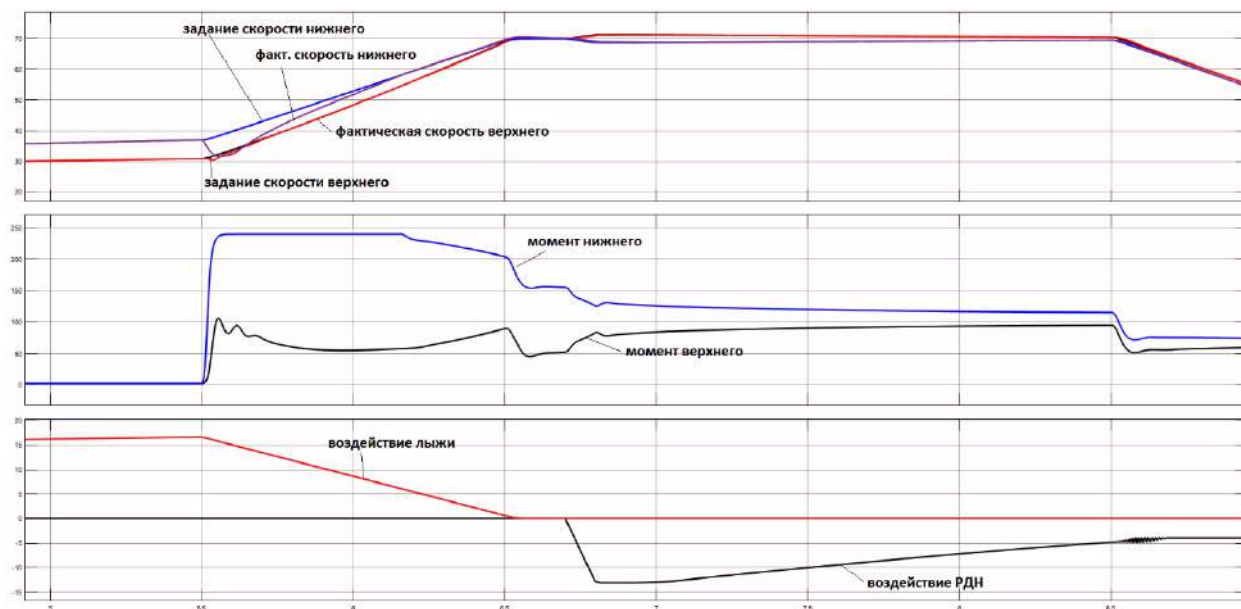


Рисунок 4.7 – Осциллограммы при использовании одноканального нечеткого РДН

Указанный недостаток потребовал совершенствования алгоритма РДН с НЛ, этот вопрос рассматривается ниже.

4.3.2. Разработка нечеткого РДН с каналом по производной моментов двигателей

С целью улучшения показателей регулирования моментов разработан принципиально новый двухканальный РДН с НЛ [126]. Отличием является дополнительный вход, на который подается отфильтрованная производная разницы моментов, а на выход (после дефаззификации) подключен дополнительный блок в виде интегральной части K_i/p . Полученная структура НР приведена на рис. 4.8, а, типы сигналов в схеме показаны на рис. 4.8, б.

Используются два входных сигнала: первый – разница моментов электроприводов ($M1-M2$), второй – скорость изменения разницы моментов. Для фаззификации разницы моментов используются лингвистические переменные,

показанные в табл. 4.1. На схеме обозначены: R – «обычный» сигнал, его выборка в периоды дискретизации системы, например, действительное число, типа REAL при программной реализации НР в ПЛК.

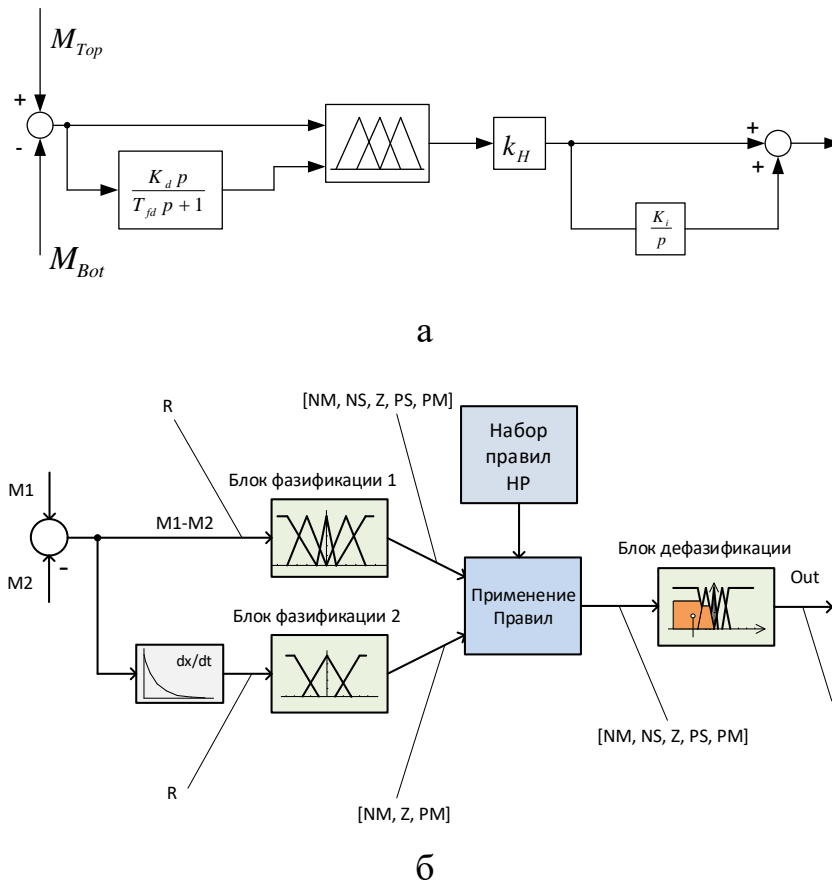
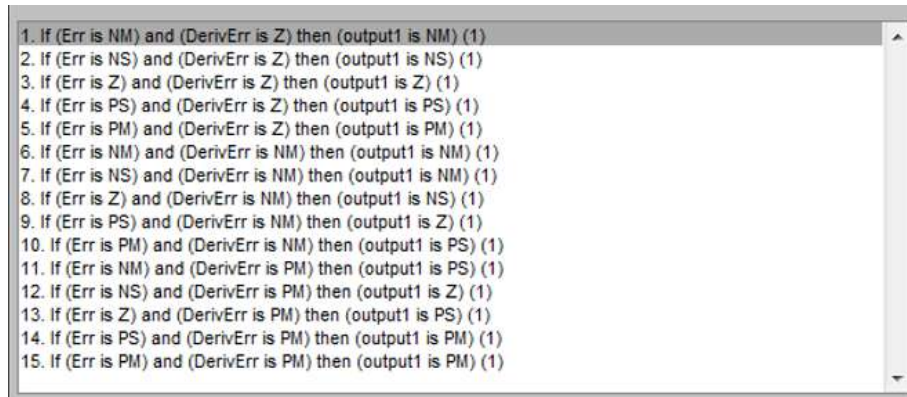


Рисунок 4.8 – Функциональная схема нелинейного регулятора (а) и формирование сигналов в схеме (б)

Правила для нового нечеткого регулятора представлены на рис. 4.9, а в виде экранной формы, на рис 4.9, б в наглядном виде. Обозначены: NM – отрицательное максимальное, NS – отрицательное малое, Z – нулевое, PS – положительное малое, PM – положительное большое, Err – ошибка регулирования, DerivErr – производная ошибки регулирования.

При программной реализации НР в ПЛК блоки фазификации 1 и 2 выдают набор сигналов принадлежности входной переменной блока к лингвистическим переменным. Для первого блока этот набор представляет собой векторы типа $[NM, NS, Z, PS, PM]$ и $[NM, Z, PM]$. Каждый элемент набора, например, NM, также представляет собой действительное число, показывающее степень принадлежности нечеткому множеству. Логической операции И в НЛ в

данной реализации соответствует нахождение минимума степеней принадлежности, а операции ИЛИ – нахождение максимума степеней принадлежности нечетких величин.



а

	Производная ошибки регулирования		
	Отрицательное	Нулевое	Положительное
Отрицательное максимальное	Отрицательное максимальное	Отрицательное максимальное	Положительное малое
Отрицательное малое	Отрицательное максимальное	Отрицательное малое	Нулевое
Нулевое	Отрицательное малое	Нулевое	Положительное малое
Положительное малое	Нулевое	Положительное малое	Положительное большое
Положительное большое	Положительное малое	Положительное большое	Положительное большое

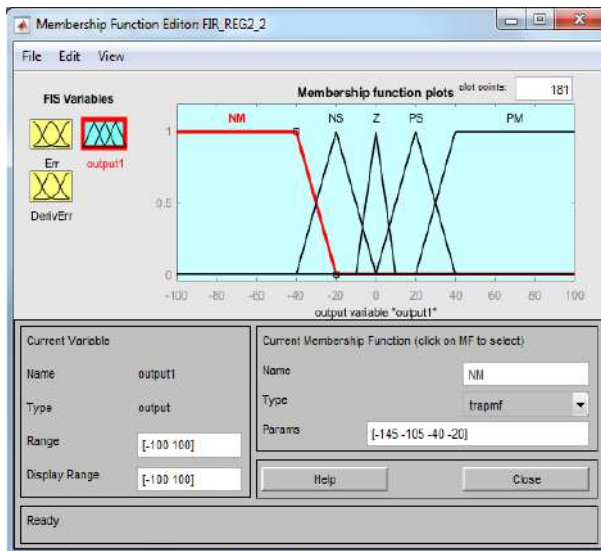
Ошибка регулирования

б

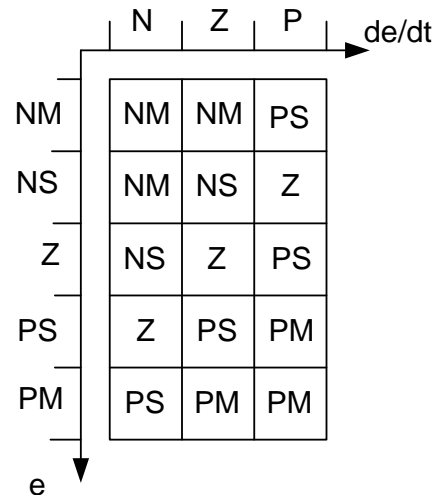
Рисунок 4.9 – Новый набор правил нечеткого регулятора: экранная форма (а) и в виде структуры (б)

После применения правил НР к входным множествам [NM, NS, Z, PS, PM] и [NM, Z, PM] получен нечеткий результат, который представляет собой вектор [NM, NS, Z, PS, PM], показанный во втором столбце табл. 4.1. Этот вектор следует преобразовать в действительное число на выходе регулятора, которое и будет воздействовать на объект управления. В нашем случае это будет «добавка» к заданию скоростей ВПП и НПП. Переход от нечеткости к четкому сигналу производится блоком дефазификации, работа которого рассматривается ниже.

Правила НР с учетом введенного сигнала производной (ошибки регулирования разницы моментов) показаны в окне *Fuzzy Logic Toolbox* на рис. 4.10, а. Наглядно набор правил нечеткого регулятора производной показан на рис. 4.10, б. Из него следует, что, если получена разность моментов большой положительной, то в канал задания отправляется большая положительная ошибка и т.д. Также при формировании набора правил введены обозначения Err – ошибка регулирования, DerivErr – производная ошибки регулирования, они используются ниже при построении выходного сигнала блока НЛ. Аналогичная фаззификация выполнена для разности моментов, также сформирован набор правил, аналогичный представленным на рис. 4.10, б (здесь не приводится).



а



б

Рисунок 4.10 – Фазификация выхода регулятора (а) и набор правил нечеткого регулятора ошибки разницы моментов (б)

Для рассмотренных правил выполнено моделирование электроприводов, расчетные осциллограммы представлены на рис. 4.11. Подключение регулятора происходит после окончания формирования «лыжи» через заданный интервал времени $t_3 - t_4$. Из приведенных зависимостей следует, что при использовании предложенного регулятора с НЛ время согласования нагрузок за счет «Воздействия РДН», по сравнению с рис. 4.7, сократилось в 1.4 раза (от 3 с до 2.2 с). Этот результат демонстрирует улучшение процесса согласования нагрузок, однако не может быть признан полностью удовлетворительным. С целью

подтверждения (либо опровержения) данного вывода проведены исследования процессов при различной настройке нечеткого РДН, т.е. при различных кривых принадлежности.

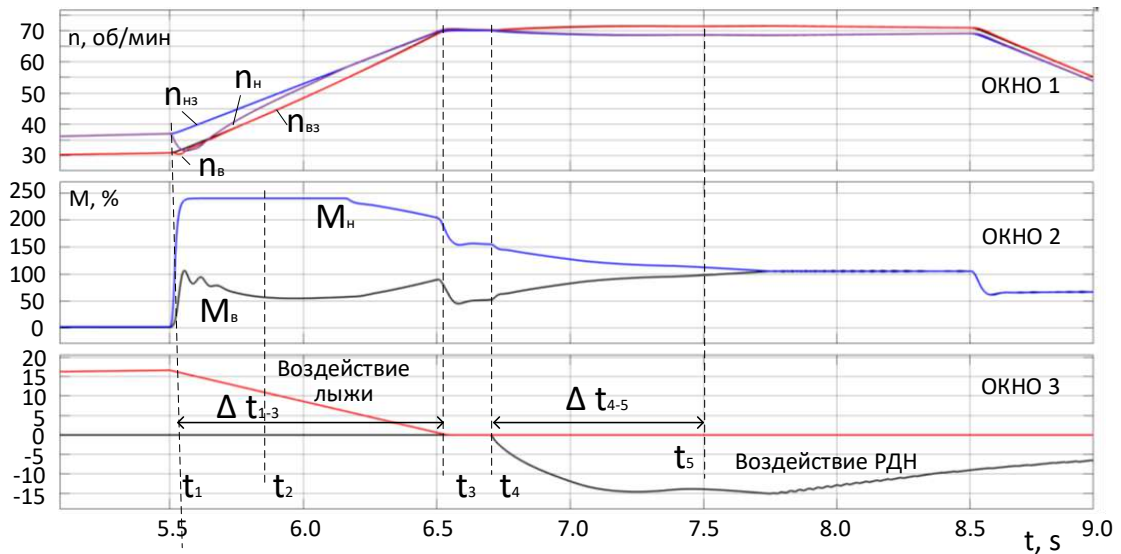


Рисунок 4.11 – Осциллограммы согласования нагрузок при использовании предложенного регулятора с функциями принадлежности на рис. 4.10

При этом появилась небольшая колебательность моментов двигателей, хотя, в целом, процесс улучшился.

4.3.3. Исследования при различных функциях принадлежности

Далее рассмотрены различные варианты кривых принадлежности лингвистических переменных нечеткому множеству. Кривые, поясняющие фаззификацию, и осциллограммы захвата приводятся для каждого варианта (в тексте либо в Приложении 3).

Вариант 1. На первом этапе была изменена **функция выходного воздействия** (сделана более сглаженной) как представлено на рис. 4.12. С этой целью вместо линейной функции (рис. 4.10, а) принята функция Гаусса, которая описывается выражением [257]:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}.$$

Ее параметры геометрически интерпретируются следующим образом:

b – координата максимума функции принадлежности;

c – коэффициент концентрации функции принадлежности.

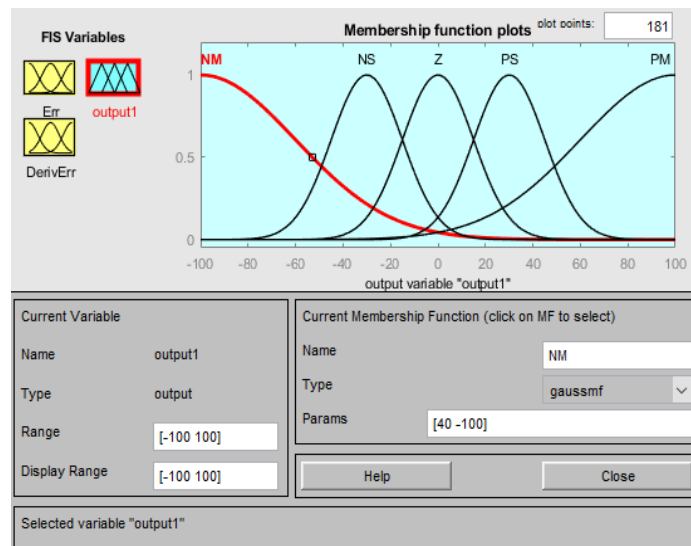


Рисунок 4.12 – Фазификация выхода регулятора с помощью функции Гаусса

На следующем этапе были изменены функции принадлежности **входных воздействий**. Как показано на рисунках П.3.1 и П.3.2 в Приложении 3, они сделаны более «плавными». Там же приведены зависимость выходного сигнала блока нечеткой логики от входных сигналов ошибки и производной ошибки и результаты захвата при использовании полного регулятора с НЛ для данного варианта (рис. П.3.3). В результате моделирования установлено, что, благодаря принятому изменению, время согласования моментов уменьшилось от 2.2 с (рис. 4.11) до 1.75 с (рис. П.3.4).

Вариант 2. В ходе изучения нечеткого регулятора сделан вывод, что необходимо создать зону для каждой из функций, в которой при небольших изменениях разности моментов, их производной, а также выходного воздействия на регулятор не будут оказываться воздействия. Это поможет избежать рассогласования моментов в установившемся режиме. Для этого предложено использовать функцию Гаусса второго порядка, которая описывается системами уравнений [257]:

если $c_1 < c_2$,

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp\left((x - c_1)^2 / (-2a_1^2)\right), & x < c_1 \\ 1, & c_1 \leq x \leq c_2 \\ \exp\left((x - c_2)^2 / (-2a_2^2)\right), & x > c_2 \end{cases} ;$$

если $c_1 > c_2$,

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp\left((x-c_1)^2 / (-2a_1^2)\right), & x < c_{21} \\ \exp\left((x-c_1)^2 / (-2a_1^2)\right) \cdot \exp\left((x-c_2)^2 / (-2a_2^2)\right), & c_{21} \leq x \leq c_1 \\ \exp\left((x-c_2)^2 / (-2a_2^2)\right), & x > c_1 \end{cases};$$

Если $c_1 < c_2$, то параметры функции принадлежности геометрически интерпретируются следующим образом: c_1 (c_2) – минимальное (максимальное) значение ядра нечеткого множества; a_1 (a_2) – коэффициент концентрации левой (правой) части функции принадлежности. Когда $c_1 > c_2$ нечеткое множество получается субнормальным.

Получившиеся функции фазификации представлены на рисунках П.3.5, П.3.6, П.3.7 в Приложении 3. Там же на рис. П.3.8 приведены зависимость выхода блока НЛ от входных сигналов, аналогичная рисунку П.3.3, и расчетные переходные процессы, полученные в результате вычислительного эксперимента (рис. П.3.9).

В результате сравнения этих зависимостей с предыдущим вариантом сделан вывод, что в установившемся режиме рассогласование моментов устранено. В результате получен еще более качественный переходный процесс, однако при этом время переходного процесса увеличилось от 1,75 с до 1,85 с.

Вариант 3. В ходе изучения функции нечеткого регулятора сделан вывод, что необходимо уменьшить перманентную зону для функции фазификации разности моментов, а функцию фазификации производной разности моментов, которая изменяется в малых пределах, описать функцией Гаусса. Получившиеся функции фазификации представлены на рисунках П.3.10 и П.3.11. Зависимость выхода блока НЛ от входных сигналов, аналогичная рисункам П.3.3 и П.3.8, представлена на рис. 4.13.

В ходе эксперимента получены осциллограммы переходных процессов, представленные на рис. 4.14. Из них следует, что в установившемся режиме рассогласование моментов сведено к нулю. Тем самым удалось получить достаточно быстрый процесс выравнивания нагрузок. Примерно через 0,2 с после включения РДН разница моментов ВГП и НГП входит в 5%-ю зону отклонения.

Как видно, время переходного процесса составило 1,75 с, что в 1,7 раза меньше чем при исходном регуляторе. Устранены колебания в РДН, при этом

динамический момент после формирования лыжи t_1 до включения РДН t_2 уменьшился для двигателя нижнего валка в 1,25 раза (от 150% до 120%), а для двигателя верхнего валка от 50% до 40% (также в 1,25 раза).

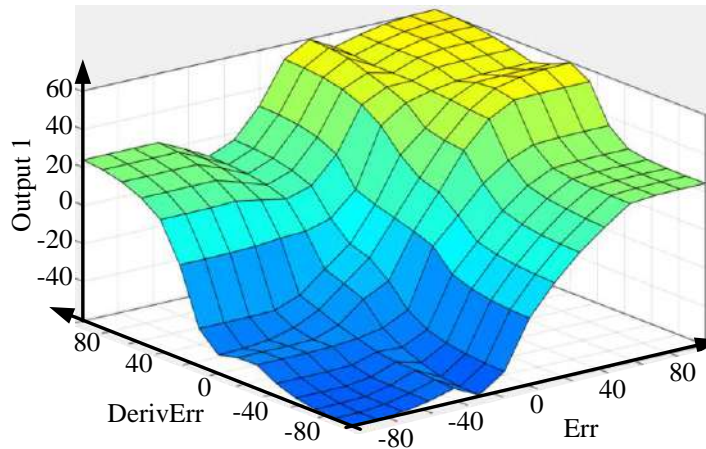


Рисунок 4.13 – Зависимость выхода блока НЛ (ось Z) от входных сигналов ошибки (Err) и производной ошибки (DerivErr) по Варианту 3

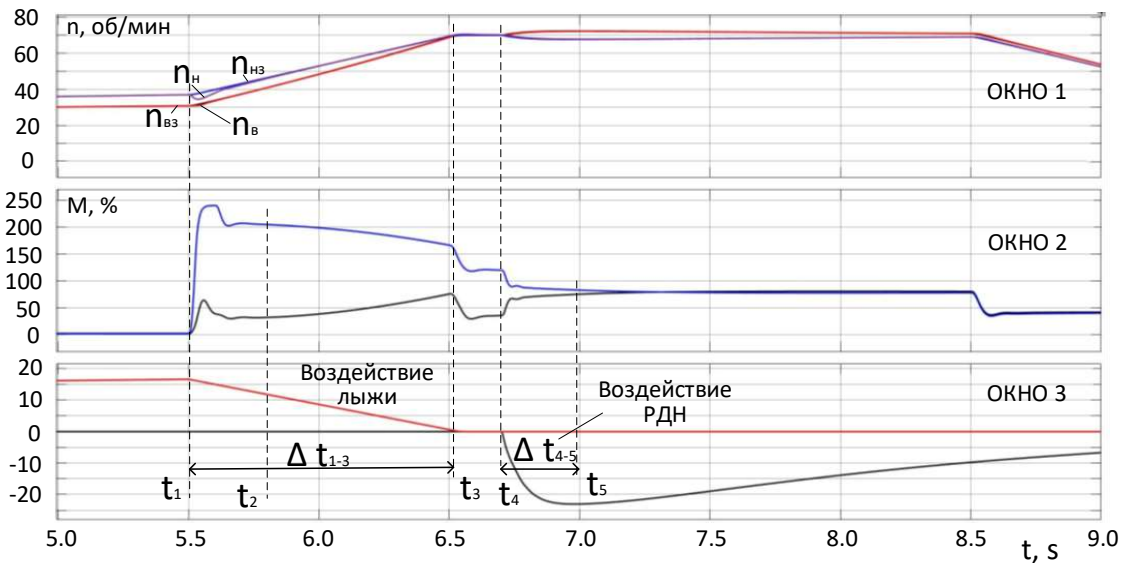


Рисунок 4.14 – Итоговые осциллограммы захвата при использовании полного регулятора с НЛ

4.3.4. Обсуждение результатов

Выполнено сравнение интервалов времени, в течение которых происходит выравнивание моментов двигателей ВГП и НГП при условиях, показанных на рис. 3.32, а, 4.11 и 4.14 (зависимости на рис. 4.7 в анализе не участвуют, поскольку выравнивания моментов на них не происходит). Результаты, приведенные в табл. 4.2, показывают, что нечеткий РДН с линейной функцией

обеспечивает снижение этого интервала на 23% по сравнению с «классическим» ПИ регулятором (от 1,3 с до 1 с). При использовании функции Гаусса второго порядка это время сокращается более чем в 2 раза (от 1,3 с до 0,6 с). Таким образом последний вариант настройки РДН с НЛ является предпочтительным.

Таблица 4.2 – Интервалы времени согласования моментов ВГП и НГП при разных настройках РДН с НЛ

Интервал времени, с	ПИ регулятор (рис. 3.32)	Нечеткая функция РДН	
		Линейная функция (рис. 4.11)	Функция Гаусса (рис. 4.14)
Δt_{4-5}	1,3	1 с	0,6 с

В целом по результатам моделирования сделан вывод, что по мере усложнения функций принадлежности показатели регулирования улучшаются. Сокращается время выравнивания скоростей и нагрузок, снижается колебательность моментов после выхода на установившуюся скорость. Обобщенные результаты сравнения показателей при работе различных регуляторов приведены в табл. 4.3. Из них следует, что принятая функция Гаусса является предпочтительной.

Таблица 4.3 – Результаты сравнения времени согласования нагрузок после включения РДН

Способ	Время переходного процесса, с	Отсутствие колебаний
Обычный ПИ РДН	3	+
Простейший РДН с НЛ	-	+
НЛ регулятор с входными и выходными линейными функциями	2.2	-
НЛ регулятор с входными линейными и выходными Гауссовыми функциями	1.75	-
НЛ регулятора с входными и выходными функциями Гаусса	1.75	+
НЛ регулятора с входными и выходными функциями Гаусса второго порядка	1.85	+
Итоговый НЛ регулятор	1.75	+

Обоснованность применения функции принадлежности Гаусса также связана с естественным использованием нормального закона распределения данных относительно максимума функции принадлежности при выборе термов «низкий», «средний», «высокий». Эта функция является гладкой и принимает ненулевые значения на всей области определения. Для выходной переменной также важна непрерывная оценка, поэтому имеет смысл для выходных лингвистических переменных использовать эту же функцию принадлежности.

Поскольку данный вариант управления должен реализовать сложную функцию, графически представленную на рис. 4.13, для ее реализации в электроприводах действующего прокатного стана необходима разработка специальных алгоритмов, которые следует выполнить в программе ПЛК. Их необходимо разработать, поскольку применение *Fuzzy Logic Toolbox* непосредственно на промышленном объекте затруднительно. Функционал, реализованный в *Fuzzy Logic Toolbox*, следует перенести в программу ПЛК. Данная задача является сложной и трудоемкой, по этой причине на данном этапе (до реализации аппарата НЛ в ПО ПЛК) не представляются возможными проведение экспериментов и промышленное внедрение разработанного РДН.

Соответственно исследование предложенного РДН с НЛ на стане 5000 поставлено в качестве перспективной задачи, ее целесообразно выполнить на платформе НПЛ. Подобные исследования для динамических нечетких моделей двигателей постоянного тока рассмотрены в [258], их результаты могут быть прототипом для решения этой задачи. Как отмечалось выше, на текущем этапе выполнены экспериментальные исследования и внедрение РДН с переключающейся структурой, рассмотренного в п. 4.2. Информация о результатах приведена в п. 4.7.2 и в разделе 7.

4.4. Разработка САРТ с переключающейся структурой

4.4.1. Структура системы управления

В соответствии с поставленными задачами далее рассматриваются результаты совершенствования системы автоматического регулирования толщины го-

ризонгальной клети стана 5000, направленного на повышение точности формирования профиля «кость» в режимах профилированной прокатки слябовой заготовки. Функциональная схема САРТ с переключением контуров регулирования толщины и положения нажимных устройств представлена на рисунке 4.15.

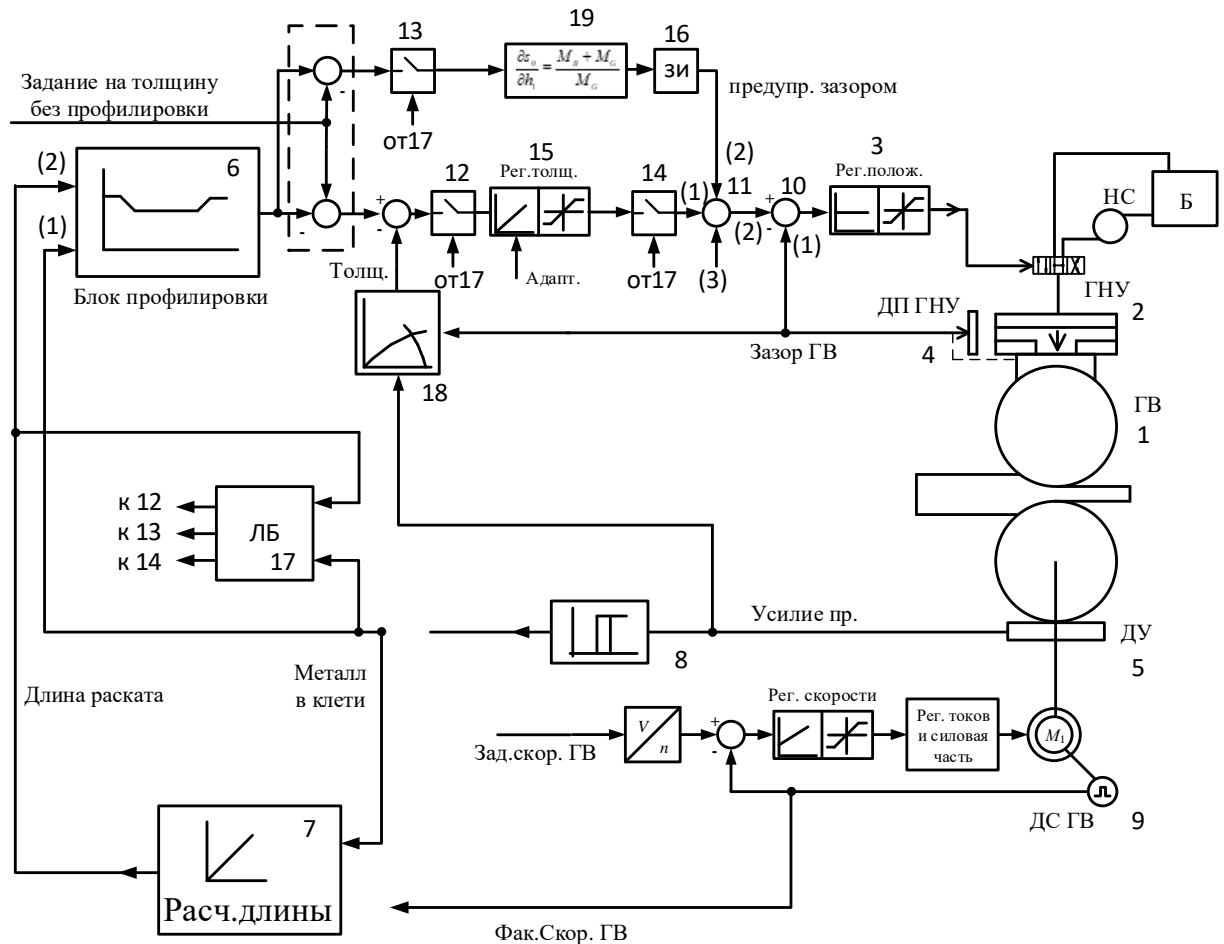


Рисунок 4.15 – Система управления НУ в режиме профилированной прокатки с переключающейся структурой (патент №2786648 [37]):

1 – прокатная клеть; 2 – гидравлическое НУ; 3, 4 – регулятор и датчик положения НУ; 5 – датчик давления металла на валки; 6 – блок вычисления задания на толщину проката; 7 – блок вычисления длины проката; 8 – датчик наличия металла в клети; 9 – датчик импульсов; 10, 11 – суммирующие элементы; 12, 13, 14 – управляемые ключи; 15 – регулятор толщины; 16 – задатчик интенсивности перемещения НУ; 17 – логический блок; 18 – датчик выходной толщины проката; 19 – блок задания толщины заготовки

Данное устройство реализует разработанный способ управления гидравлическими НУ в режиме профилированной прокатки, согласно которому на

участках переменной толщины, формируемых за счет профилирования широких граней горизонтальными валками, осуществляют автоматическое регулирования положения НУ, а на участках постоянной толщины (в квазиустановившемся режиме прокатки) обеспечивают автоматическое регулирование толщины раската.

На рисунке 4.16 схематично представлены участки переменной толщины по длине заготовки при профилированной прокатке, они соответствуют рисунку 1.11, поясняющему многоточечную стратегию задания профиля переменной толщины. Обозначены: l_{01}, l_{02} – длины участков на переднем и заднем концах заготовки, прокатываемых с постоянным обжатием; l_{n1}, l_{n2} – длины профилируемых участков; l_c – длина среднего участка, прокатываемого с постоянным обжатием; h_0 – толщина концевых участков профилированного проката; h_n – толщина среднего участка.

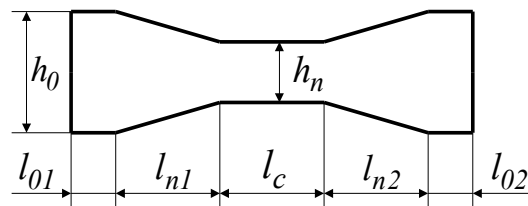


Рисунок 4.16 – Участки раската при формировании профиля «кость»

Прокатка участков l_{01}, l_{02} на переднем и заднем концах проката и среднего участка длиной l_c осуществляется с постоянной заданной толщиной в режиме автоматического регулирования толщины раската. Работа устройства в этом режиме не отличается от работы двухконтурной САПТ, реализующей концепцию ROLL-GAP CONTROL (рис. 2.14). Осуществляется замкнутое регулирование толщины, при этом гидравлическое нажимное устройство работает в режиме малых перемещений, как правило, менее 1 мм.

Отличием предложенного решения является прокатка профилированных участков l_{n1}, l_{n2} в режиме автоматического регулирования положения гидравлического НУ при переменном обжатии. Это обеспечивает повышение точности регулирования положения НУ и достигается за счет включения управляемых ключей 12, 13, управляющие входы которых соединены с выходами

логического блока. Следует заметить, что использование замкнутого регулирования положения гидравлических НУ для формирования профиля переменной толщины по длине проката в известных технических решениях не встречается.

В соответствии с заданной логикой переключений при прокатке участков l_{01} , l_{02} и l_c с постоянной заданной толщиной устройство работает в режиме автоматического регулирования толщины, как в проходах при обычной прокатке без профилирования. По окончании прокатки участка длиной l_{01} устройство переходит в режим управления положением гидравлического нажимного устройства 2. При прокатке участка l_{n1} (рис. 4.16) с его выхода через первый замкнутый управляемый ключ 12 на вход задатчика интенсивности 15 подается сигнал на линейное уменьшение толщины. В результате обеспечивается замкнутое управление его перемещением и за счет этого – формирование участка l_{n1} с линейно уменьшающейся толщиной. При прокатке участка длиной l_{n2} с увеличивающейся толщиной работа устройства аналогична рассмотренной. Отличием является формирование на выходе блока 6 сигнала на линейное увеличение толщины.

В результате обеспечивается замкнутое регулирование заданного параметра: толщины – на участках l_{01} , l_{02} , l_c и положения НУ на участках l_{n1} , l_{n2} . Это обеспечивает повышение точности регулирования и снижение продольной разнотолщинности. Кроме того, разделение режима больших перемещений при управлении положением гидравлического НУ и режима автоматического регулирования толщины в режиме малых перемещений исключает возникновение недопустимых усилий в гидроцилиндрах, снижает риск возникновения аварий и повышает надежность работы устройства.

Более подробное описание работы устройства (рис. 4.15), реализующего разработанный способ, представлено в [37].

4.4.2. Исследование разработанного способа методом моделирования

Целью моделирования является сравнительный анализ процессов профилированной прокатки при реализации систем автоматического регулирования толщины известным способом с предупредлением [129] и с рассмотренным

переключением координаты, регулируемой по каналу гидравлических НУ. Структурные схемы, поясняющие имитационные модели для анализируемых вариантов представлены на рисунке 4.17. На рис. 4.17, а показана упрощенная структура двухконтурной САРТ с блоком задания профиля толщины «кость» на входе. На рисунках 4.17, б и в приведены схемы регуляторов толщины для исследуемых вариантов.

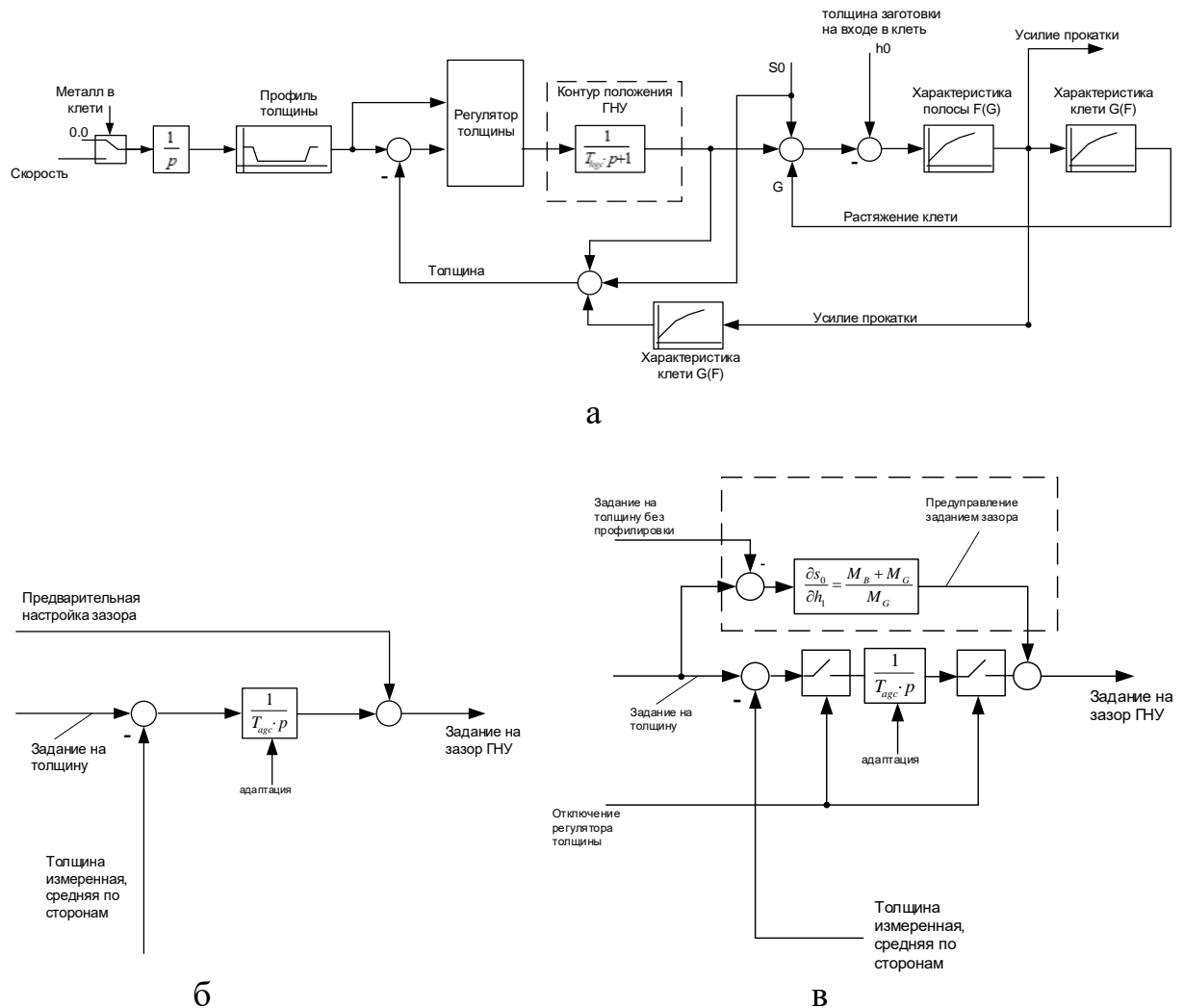


Рисунок 4.17 – Упрощенная структура модели системы управления гидравлическими НУ (а) при известной структуре регулятора толщины (б) и при настройке с переключением регулируемой координаты (в)

Более подробная схема модели для исследования разработанного способа представлена на рисунке 4.18. Отличием является переключение контуров регулирования положения НУ либо толщины, реализованное в блоке с двумя

управляемыми ключами, включенном на вход регулятора зазора НУ. Коммутация ключей в этом блоке происходит по сигналу «Отключение регулятора толщины». Это происходит при переходе от прокатки профилированных участков на прокатку участков постоянной толщины (и обратно). При захвате и до конца продавливания «кости» (пока не САРТ не выйдет на установившийся режим) ключи, показанные на схеме, разомкнуты. Два ключа используются для того, чтобы во время работы в режиме контроля положения НУ не происходило накопления сигнала на выходе интегрального регулятора толщины. Поэтому его вход отключается от задающего сигнала.

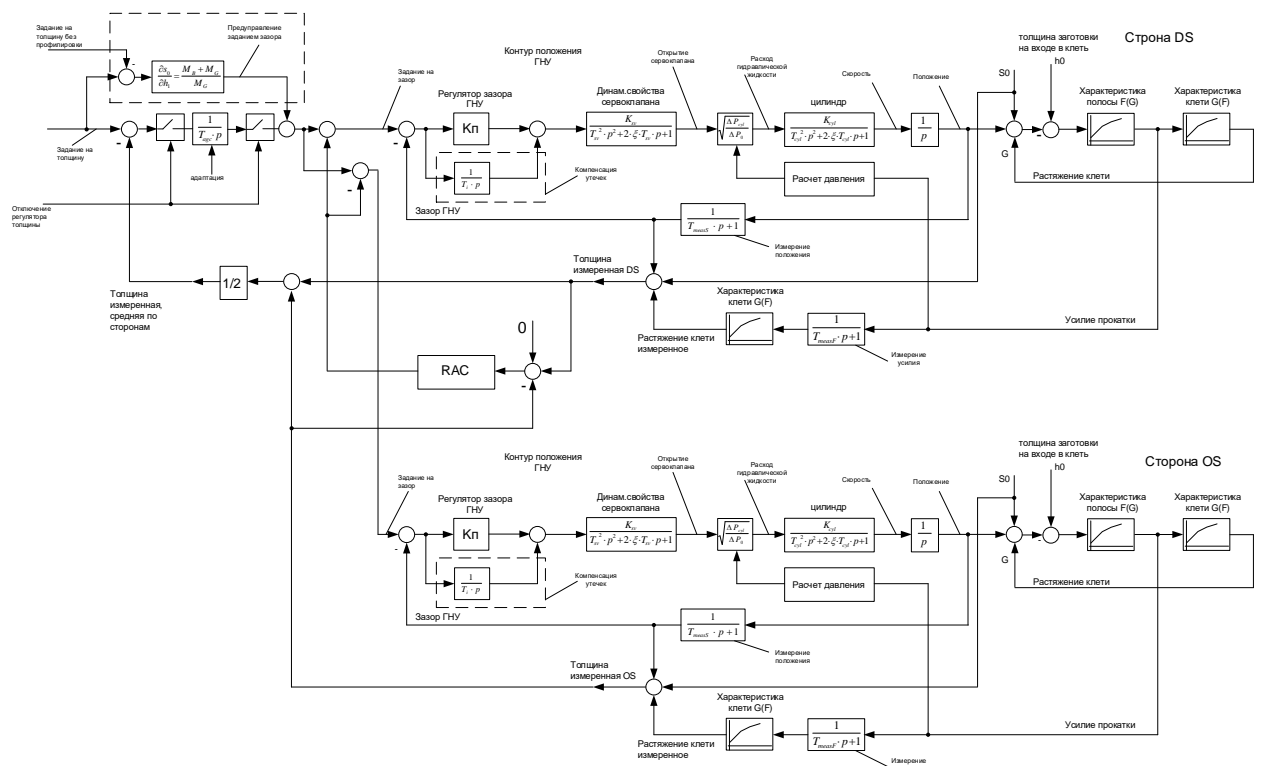


Рисунок 4.18 – Схема модели системы с переключающейся структурой

Регулятор толщины принят интегральным с переключением постоянной времени по сигналу «адаптация». Регулятор зазора ГНУ принят пропорциональным с имитацией утечек за счет включения интегрального блока с постоянной T_i . Обоснование подобной структуры приведено в работе [129]. Модель приведена для двух нажимных устройств (со стороны DS и со стороны OS). Она может быть использована как в структуре взаимосвязанных электроприводов ВГП и НГП, показанной на рисунке 2.17 в п. 2.4.2, так и для одного электропривода в случае одинаковых усредненных нагрузок.

Результаты моделирования координат гидравлических НУ и толщины за один проход профилированной прокатки представлены в [129]. Они позволяют сделать вывод, что двойной конический профиль «кость» для регулятора, приведенного на рис. 4.17, в, формируется с большей точностью, чем при выполнении предыдущего варианта системы управления НУ (с регулятором, рис. 4.17, б). Это подтверждает достижение цели рассмотренного технического предложения – снижения отклонений формы листа в плане от прямоугольной.

Результаты проведенных исследований подтверждают повышение точности регулирования профиля раската в проходах с профилированием. Это позволяет дать обоснованные рекомендации по внедрению системы на стане 5000. Очевидно, что окончательное решение по данному вопросу может быть дано только после экспериментальных исследований на стане. Результаты таких исследований представлены в разделе 7.

4.5. Ограничение силового взаимодействия валков универсальной клетки в режиме совместной прокатки

Как показано в [259–261], при непрерывной прокатке после входа раската в следующую клетку создается силовая связь между валками предыдущей и последующей клеток. В клетках толстолистовых станов и непрерывных группах черновых клеток ШСГП такая связь наиболее сильно проявляется между горизонтальными (ГВ) и вертикальными (ВВ) валками. В разделе 1 отмечено, что наиболее опасен подпор вертикальной клетки валками более мощной горизонтальной клетки при прокатке толстой заготовки. Он нарушает режим прокатки с нулевым натяжением, что может привести к поломке оборудования. В группах клеток без петледержателей допускается величина отклонений натяжений либо подпора до 5%, в источниках [262–264] утверждается, что подпор недопустим. Наиболее подробно этот вопрос исследован в [265].

Физической причиной возникновения подпора является несогласованность линейных скоростей валков, точнее, горизонтальных составляющих этих скоростей. Это приводит к дополнительному растяжению либо сжатию раската в межклетевом промежутке. При правильно заданном соотношении

линейных скоростей причинами неконтролируемого изменения силовой взаимосвязи являются:

Причина 1. Статическая ошибка скорости электропривода последующей клетки, возникающая при работе под нагрузкой.

Причина 2. Перемещение гидравлических НУ при наличии металла в валках, что может быть вызвано работой САРТ в режиме профилированной прокатки.

Во втором случае для ликвидации дополнительного приращения длины, возникающего при изменении толщины раската, необходимо согласование скоростей вертикальных и горизонтальных валков, как правило, путем регулирования (коррекции) скорости электропривода вертикальных валков. С этой целью разработаны технические решения, рассматриваемые ниже.

Первый способ предназначен для прокатки раскатов с минимальным натяжением или подпором в универсальных клетях широкополосных станов и горизонтальных и вертикальных клетях толстолистовых станов. Направлен на компенсацию влияния рассогласования скоростей после захвата металла горизонтальными валками, т.е. на ликвидацию первой причины подпора.

Суть способа поясняет рисунок 4.19 [38]. После захвата полосы (подката) 3 горизонтальными валками 2 измеряют установившуюся угловую скорость электропривода горизонтальных валков при совместной прокатке. Затем рассчитывают сигнал коррекции скорости электропривода вертикальных валков 2 и обеспечивают ее снижение пропорционально этому сигналу. Здесь под термином «подкат» понимается полупродукт, получаемый из сляба при прокатке в черновой группе, далее поступающий в чистовую группу клетей для окончательной (финишной) прокатки.

Предварительно в режиме свободной прокатки подката в вертикальных валках до захвата горизонтальными валками устанавливают угловую скорость электропривода этих валков согласно зависимости:

$$\omega_{\Gamma} = \omega_B \frac{D_B}{D_{\Gamma}} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_{\Gamma}}, \quad (4.1)$$

где ω_{Γ} , ω_B – угловые скорости горизонтальных и вертикальных валков, рад/с; D_{Γ} , D_B – диаметры горизонтальных и вертикальных валков, мм; α_{Γ} – угол захвата металла горизонтальными валками, рад.

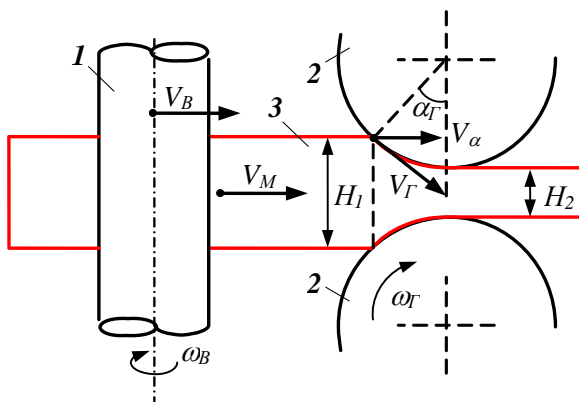


Рисунок 4.19 – Пояснения к способу согласования нагрузок электроприводов ВВ и ГВ по патенту №2620424 [38]

После этого осуществляют коррекцию уставок угловых скоростей электроприводов ГВ и ВВ по сохраненным средним значениям угловых скоростей после выхода предыдущей заготовки. Далее после захвата подката горизонтальными валками определяют корректирующий сигнал для угловой скорости электропривода вертикальных валков согласно зависимости:

$$\Delta\omega_B = K(\omega_{\Gamma.XX} - \omega_{\Gamma.НАГР.}), \quad (4.2)$$

где $\omega_{\Gamma.XX}$ – угловая скорость ГВ, измеренная до захвата металла валками, рад/с; $\omega_{\Gamma.НАГР.}$ – та же скорость, измеренная после захвата, рад/с; K – коэффициент пропорциональности.

После этого осуществляют регулирование угловой скорости электропривода ВВ в сторону ее уменьшения на величину полученного корректирующего сигнала. Схема устройства, поясняющая реализацию способа приведена в [38], там же приведено подробное описание данного технического решения. Это решение прошло промышленную апробацию на черновых клетях стана 2000.

4.6. Способ автоматического управления процессом прокатки в черновой группе клетей непрерывного прокатного стана

Проведенные промышленные испытания показали, что рассмотренные технические решения не обеспечивают исключения подпора в динамических

режимах при более сложной взаимосвязи нескольких горизонтальных и вертикальных клетей непрерывной подгруппы ШСГП, схематично показанной на рис. 4.20 (фотографии клетей станов 2500 и 2000 приведены на рис. 1.6). На рис. 4.20 присутствуют валки 1, 2 предыдущей $(i-1)$ -й и i -й горизонтальных клетей, а также валки 3 вертикальной клетки, связанные через подкат 4.

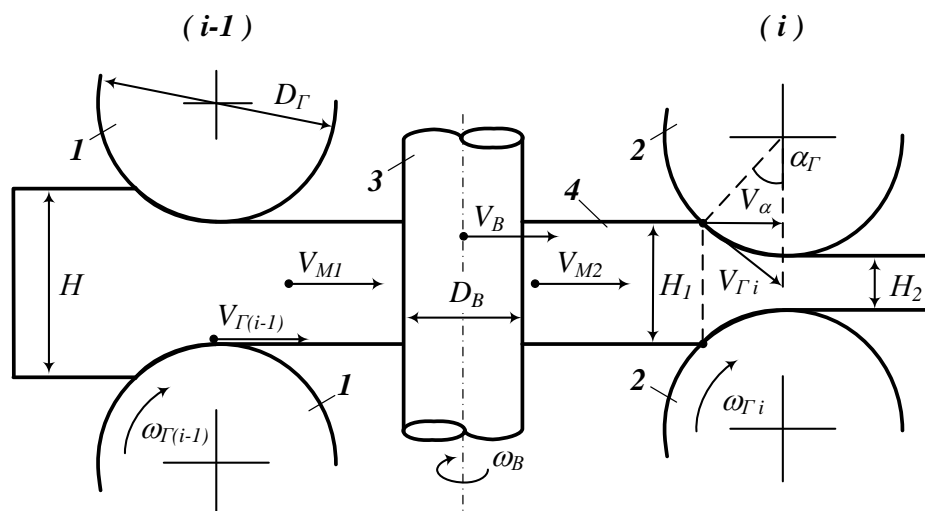


Рисунок 4.20 – Схема совместной прокатки полосы в валках горизонтальных и вертикальной клетей (патент №2787290 [40])

Данный вывод обусловлен тем, что при захвате подката валками последующей i -й горизонтальной клетки появляется рассогласование линейных скоростей горизонтальных и вертикальных валков. В таких условиях захват сопровождается ударом подката о валки горизонтальной клетки, что приводит к возникновению динамических нагрузок, разрушающих механическое и электрическое оборудование. Также возникают динамические удары при входе подката в вертикальную клеть вследствие различия скорости ее валков и скорости выхода подката из предыдущей горизонтальной клетки. Это потребовало разработки способа управления электроприводами всех клетей черновой группы.

Для ограничения силовой взаимосвязи, возникающей после захвата подката (полосы) валками горизонтальных и вертикальных клетей, разработан способ автоматического управления процессом прокатки в черновой группе непрерывного прокатного стана [40]. Отличительным признаком является регулирование скорости электропривода валков вертикальной клетки до захвата подката в функции скорости электропривода предыдущей горизонтальной

клетей и отношения диаметров ГВ и ВВ. Реализация способа поясняется схемой, представленной на рис. 4.21, которая может быть выполнена программным способом в структуре управляющих контроллеров электроприводов черновой группы.

После захвата металла 4 валками 1 предыдущей горизонтальной клетки до его захвата валками 3 вертикальной клетки измеряют окружную скорость $\omega_{\Gamma(i-1)}$ валков предыдущей клетки в режиме свободной прокатки. В промежутке времени до захвата металла валками 3 вертикальной клетки с выхода вычислительного устройства 9 на вход блока управления 19 поступает сигнал управления u_{KB} окружной скоростью ω_B валков 2 вертикальной клетки, обеспечивающий ее регулирование согласно выражению (4.1). В момент захвата металла 4 валками 3 вертикальной клетки вычислительное устройство 9 вычисляет величину косинуса угла захвата по зависимости:

$$\cos \alpha_{\Gamma} = 1 - \frac{H_1 - H_2}{D_{\Gamma}},$$

где H_1, H_2 – значения толщин полосы на входе и выходе валков 2 последующей горизонтальной клетки.

При свободной прокатке подката 4 в валках 1 до захвата валками 3 осуществляют следующие операции: измеряют окружную скорость $\omega_{\Gamma(i-1)}$ валков 1, устанавливают окружную скорость ω_B валков 3 согласно зависимости

$$\omega_B = \omega_{\Gamma(i-1)} \frac{D_{\Gamma}}{D_B}. \quad (4.3)$$

Это выражение получено из условия равенства линейных скоростей валков вертикальной v_B и предыдущей горизонтальной $v_{\Gamma(i-1)}$ клеток:

$$v_B = v_{\Gamma(i-1)}; \quad v_B = \omega_B \frac{D_B}{2}; \quad v_{\Gamma(i-1)} = \omega_{\Gamma(i-1)} \frac{D_{\Gamma}}{2}.$$

Условие получено при пренебрежении обжатием в вертикальной клетке. Согласно технологии прокатки в черновой группе обжатие вертикальной клетью осуществляется только для снятия уширения (увеличения ширины), возникающего после обжатия в предыдущей горизонтальной клетке. Деформации полосы по ширине не происходит, поэтому принятое допущение обосновано.

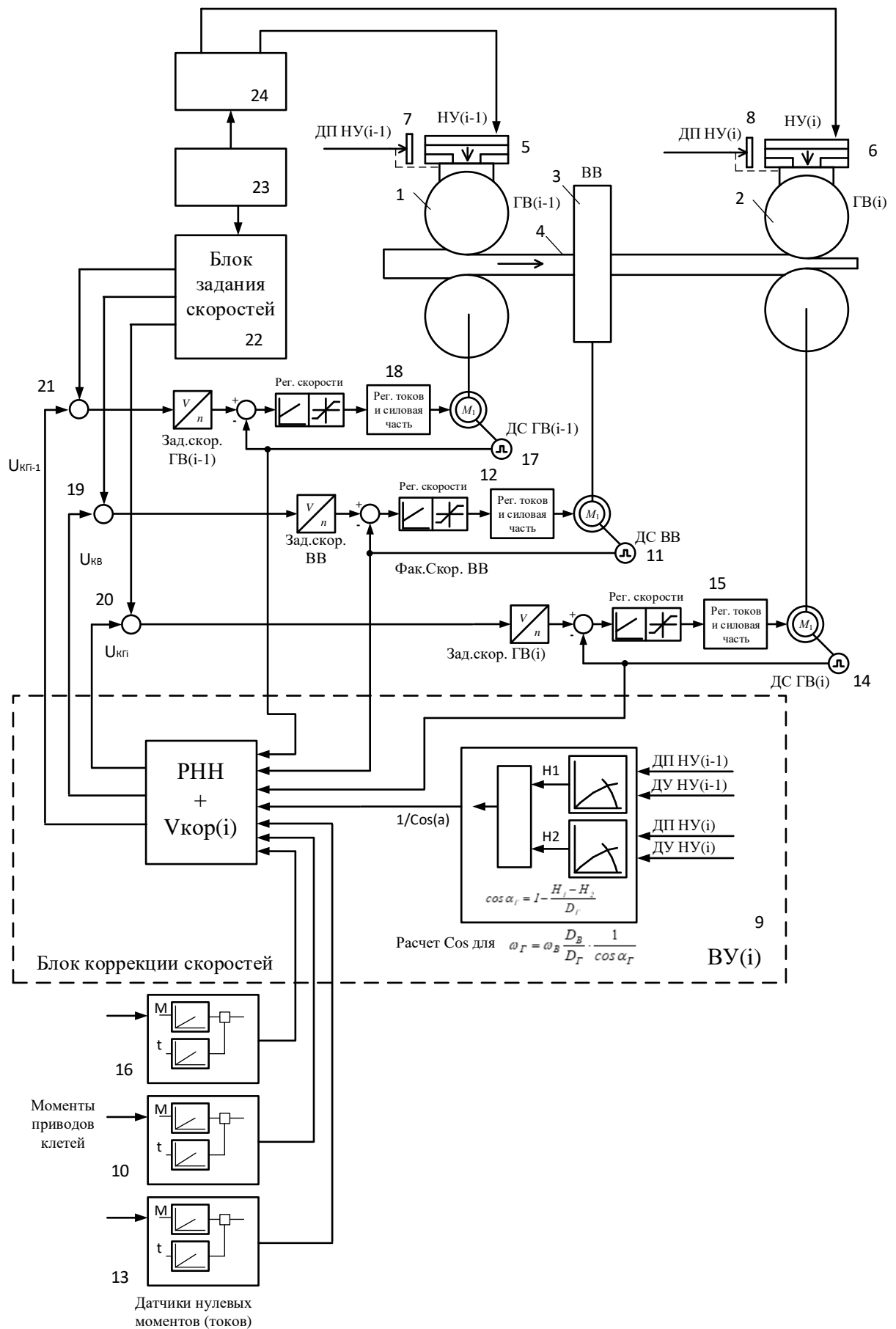


Рисунок 4.21 – Структура устройства, поясняющего разработанный способ:

1, 2 – валки предыдущей $(i-1)$ -й и последующей i -й горизонтальных клеток; 3 – валки вертикальной клетки; 4 – полоса; 5, 6 – нажимные устройства; 7, 8 – датчики зазора валков; 9 – вычислительное устройство; 10, 13, 16 и 11, 14, 17 – датчики статического тока и скорости; 12, 15, 18 – электроприводы валков вертикальной, i -й и $(i-1)$ -й горизонтальных клеток; 19, 20, 21 – блоки управления; 22 – блок задания скорости электроприводов; 23 – блок управления станом; 24 – блок задания величины зазоров горизонтальных валков клеток.

При раздельной прокатке полосы в валках 3 вертикальной клетки и валках 2 последующей горизонтальной клетки регулируют окружную скорость $\omega_{\Gamma(i)}$ горизонтальных валков согласно функции (4.1), полученной из условия совместной прокатки без натяжения:

$$v_{\alpha} = v_B = v_{\Gamma(i)} \cdot \cos \alpha_{\Gamma};$$

где α_{Γ} – угол захвата металла валками горизонтальной клетки;

v_{α} – горизонтальная составляющая линейной скорости $v_{\Gamma(i)}$ валков 2 последующей горизонтальной клетки в точке захвата металла;

v_B – линейная скорость валков 3 вертикальной клетки.

При этом к моменту захвата полосы 4 валками 2 последующей горизонтальной клетки линейная скорость v_{M2} и горизонтальная составляющая v_{α} линейной скорости $v_{\Gamma(i)}$ валков 2 выравниваются (принимают $v_{M2} = v_B$). Это обеспечивает захват с минимальными динамическими нагрузками.

При входе полосы 4 в валки 2 рассчитывают и запоминают среднее значение $I_{B_{св.сред.}}$ статического тока свободной прокатки электропривода ВВ до ее входа в ГВ:

$$I_{B_{св.сред.}} = \frac{\sum I_B}{N} \quad (4.4)$$

и переходят от регулирования окружной скорости $\omega_{\Gamma(i)}$ валков на регулирование статического тока I_B электропривода 12 вертикальной клетки. Здесь N – ко-

личество замеров тока во время свободной прокатки. При совместной прокатке полосы 4 в вертикальных 3 и горизонтальных 2 валках регулируют статический ток I_B электропривода 12 вертикальной клетки, при этом величину корректирующего сигнала u_{KB} (рис. 4.21) рассчитывают по формуле

$$u_{KB} = \frac{1}{T_{II}P} (I_{Bсовм.} - I_{Bсв.сред.}). \quad (4.5)$$

При захвате полосы 4 валками 2 последующей горизонтальной клетки, переходят от регулирования окружной скорости $\omega_{\Gamma(i-1)}$ на регулирование статического тока $I_{\Gamma(i-1)}$ электропривода 18 валков 1 предыдущей горизонтальной клетки. При совместной прокатке полосы 4 в валках 1 и 2 горизонтальных клеток регулируют статический ток $I_{\Gamma(i-1)}$ электропривода 18 валков 1 горизонтальной клетки. Для этого вычислительное устройство 9 производит расчет и запоминание среднего значения $I_{Bсв.сред.}$ статического тока I_B по зависимости (3) и отключает с входа блока управления 20 сигнал $u_{K\Gamma(i)}$ коррекции окружной скорости $\omega_{\Gamma(i)}$ валков 2 последующей горизонтальной клетки. Одновременно со второго и третьего выходов вычислительного устройства 9 подаются корректирующие сигналы u_{KB} , $u_{K\Gamma(i-1)}$ на входы блоков управления 19 и 21 электроприводов 12, 18 вертикальной и предыдущей горизонтальной клеток, соответственно.

Корректирующий сигнал u_{KB} вычисляется согласно зависимости (4.5).

Величину корректирующего сигнала $u_{K\Gamma(i-1)}$ рассчитывают по зависимости:

$$u_{K\Gamma(i-1)} = \frac{1}{T_{II}P} (I_{\Gamma(i-1)совм.} - I_{\Gamma(i-1)св.сред.}),$$

где $I_{\Gamma(i-1)св.сред.}$ — среднее значение тока электропривода валков 1 предыдущей горизонтальной клетки до захвата полосы валками 2 последующей горизонтальной клетки;

$I_{\Gamma(i-1)совм.}$ — текущее значение статического тока электропривода валков 1 при совместной прокатке.

В результате исключаются удары при захвате полосы валками вертикальной клетки, снижаются динамические нагрузки механического и электрического оборудования. Это обеспечивает повышение надежности и долговечности оборудования.

Алгоритм, реализующий рассмотренный способ, прошел промышленную апробацию в черновой группе стана 2500 (рис. 1.6). Группа состоит из двух универсальных клеток, включающих горизонтальные и вертикальные валки. Ниже представлены осциллограммы, поясняющие полученные результаты.

4.7. Экспериментальный анализ разработанных систем

4.7.1. Результаты апробации на стане 2500

Фрагмент цифровой системы управления электроприводами последовательно расположенных клеток черновой группы прокатного стана представлен на рис. 4.22. В ней реализованы рассмотренные выше алгоритмы регулирования нулевого натяжения между клетями. Для решения последней задачи служит регулятор соотношения скоростей (нулевого натяжения РНН) электроприводов последовательно расположенных клеток. Эта функция служит для ограничения подпора и реализуется воздействием на задания скоростей электроприводов предыдущей ($N-1$ -й) и/или последующей (N -й) клеток.

Наличие жесткой взаимосвязи клеток непрерывной черновой группы стана 2500 подтверждают осциллограммы, представленные на рис. 4.23. Они получены при реверсивной прокатке подката в двух клетях, фотография которых приведена на рис. 1.6. Зафиксированы 3 прохода: нечетный-четный-нечетный (вперед-назад-вперед). На поле осциллограмм обозначены: R1 – первая клеть, R2 – вторая клеть, ТМ – привод верхнего вала, ВМ – привод нижнего вала, E1, E2 – первая и вторая вертикальные клетки (эджеры), DS – приводная сторона, NS – противоположная неприводная сторона. Усилия показаны по каждой стороне клетки, эджер расположен перед горизонтальными валками первой клетки.

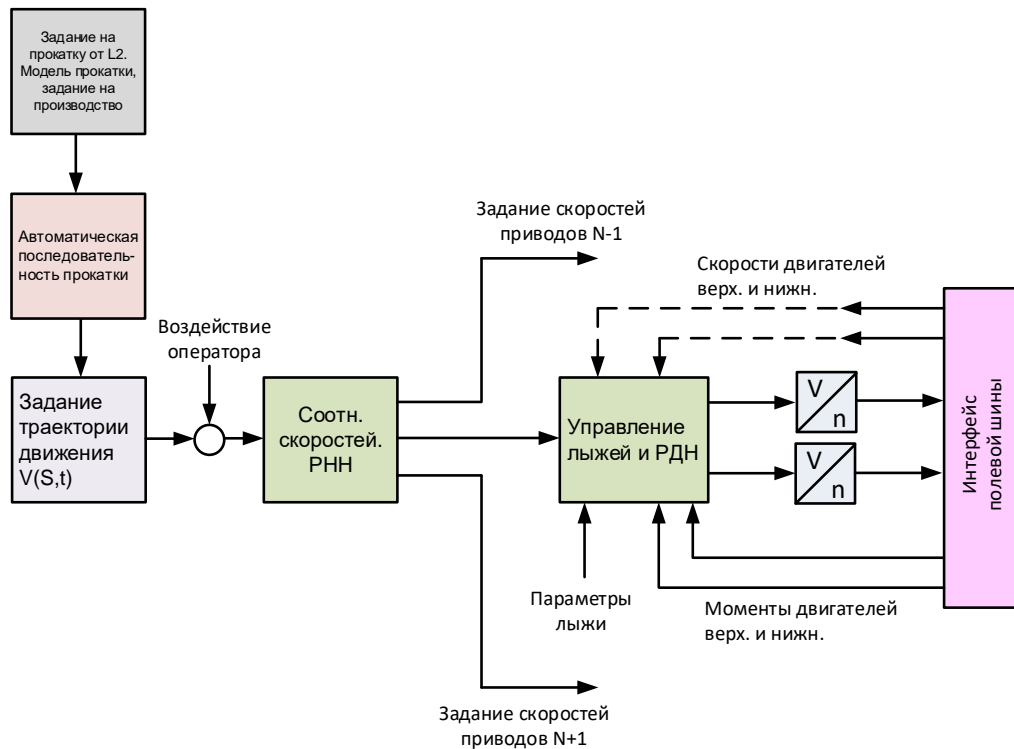
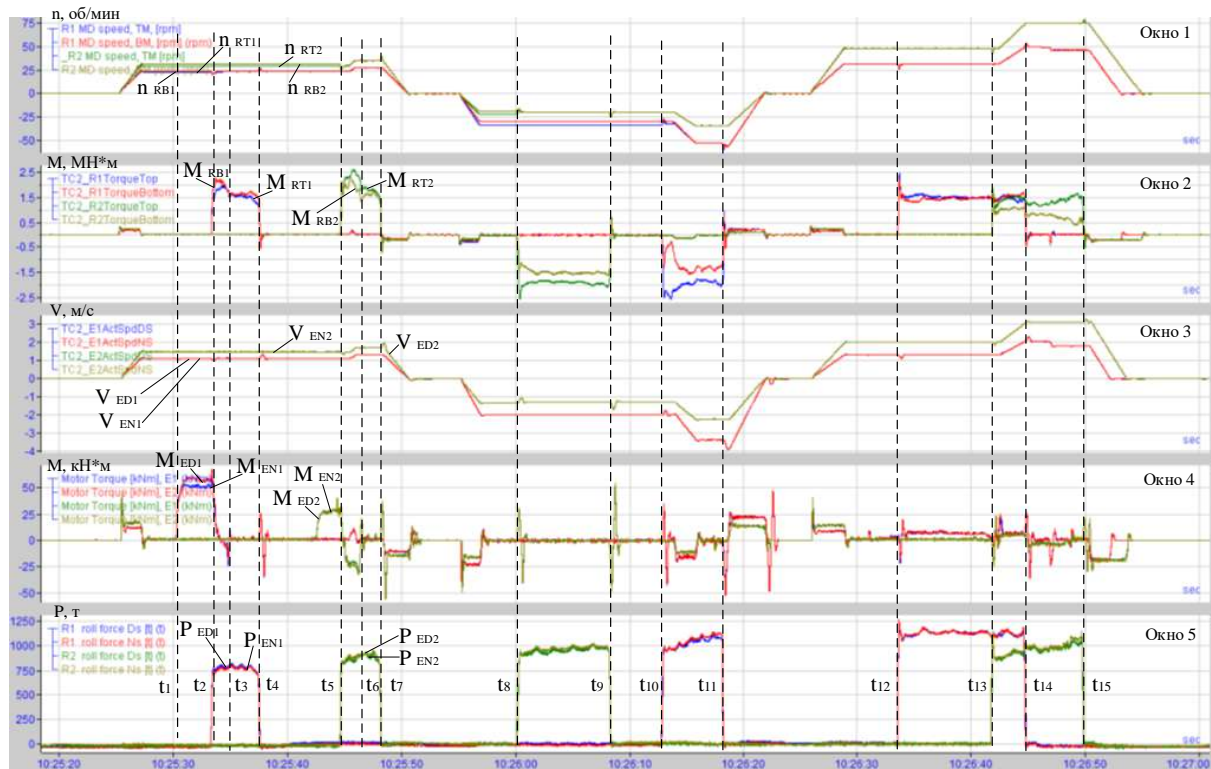


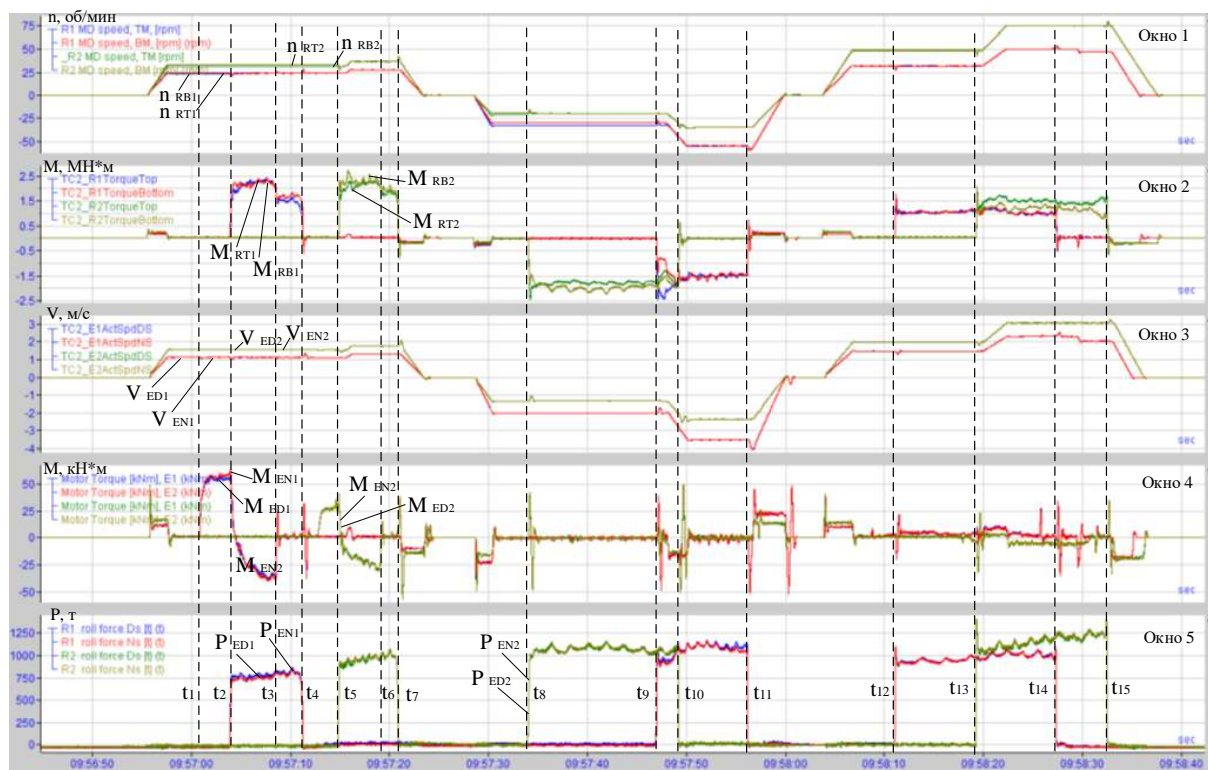
Рисунок 4.22 – Цифровые схемы системы управления электроприводами непрерывной группы клетей

В момента времени t_1 подкат входит в вертикальную клеть. Рассматриваются следующие интервалы времени (на примере 1-го прохода): $\Delta t_{Г1}=(t_2...t_3)$, $\Delta t_{Г2}=(t_5...t_6)$ – свободная прокатка в 1-й и 2-й горизонтальных клетях, соответственно; $\Delta t_{В1}=(t_3...t_4)$, $\Delta t_{В2}=(t_6...t_7)$ – совместная прокатка в горизонтальной и вертикальной клетях; $\Delta t_1=(t_2...t_4)$, $\Delta t_2=(t_5...t_7)$ – время первого прохода в первой и второй горизонтальных клетях. Для остальных проходов интервалы аналогичны. Отличием является то, что на рис. 4.23, а в интервалах $(t_9...t_{10})$ и $(t_{13}...t_{14})$ осуществляется совместная прокатка в обеих горизонтальных клетях.

Из осциллограмм на рис. 4.23, а видно явное силовое взаимодействие вертикальной и горизонтальной клетей при совместной прокатке в первом проходе в интервалах времени $\Delta t_{В1}$, $\Delta t_{В2}$. После захвата подката валками 1-й и 2-й горизонтальных клетей в моменты времени t_2 и t_5 двигатели вертикальной клетки переходят в генераторный режим. Моменты двигателя 1-й клетки M_{ED1} , M_{EN1} и двигателя 2-й клетки M_{ED2} , M_{EN2} в этих интервалах переходят в область отрицательных значений. Это свидетельствует о возникновении подпора, что недопустимо.



а



б

Рисунок 4.23 – Осциллограммы координат электроприводов черновых клетей стана 2500 за три прохода реверсивной прокатки без системы согласования скоростей валков (а) и с разработанной системой (б):

окно 1 – скорости двигателей горизонтальных валков 1-й клетки: верхнего n_{RT1} и нижнего n_{RB1} и 2-й клетки: n_{RT2} , n_{RB2} (об/мин); окно 2 – моменты двигателей горизонтальных валков 1-й клетки: верхнего M_{RT1} и нижнего M_{RB1} и 2-й клетки: M_{RT2} , M_{RB2} (МН·м); окно 3 – линейные скорости двигателей вертикальных валков 1-й и 2-й клеток: с приводной v_{ED1} , v_{ED2} и не приводной v_{EN1} , v_{EN2} сторон (м/с); окно 4 – моменты двигателей вертикальных валков 1-й клетки: M_{ED1} и M_{EN1} и 2-й клетки: M_{ED2} и M_{EN2} (кН·м); окно 5 – усилия прокатки в тех же клетях с приводной P_{ED1} , P_{ED2} и не приводной P_{EN1} , P_{EN2} сторон, (т). Обозначения латинскими буквами приняты в соответствии с надписями на поле рисунка.

Таким образом, осциллограммы на данном рисунке подтверждают актуальность согласования скоростей валков вертикальной и горизонтальной клеток. Кроме того, из осциллограмм моментов двигателей вертикальных клеток в окне 3 следует, что вход раската в горизонтальные валки 1-й клетки в моменты времени t_8 , t_{12} , а также в горизонтальные валки 2-й клетки в моменты времени t_9 , t_{13} сопровождается бросками моментов двигателей вертикальных валков.

Устранение указанных недостатков обеспечивает внедрение алгоритма разработанной системы согласования скоростей. Подтверждение дают осциллограммы на рис. 4.23, б. Из них следует, что в указанных интервалах времени $\Delta t_{B1}=(t_3...t_4)$ и $\Delta t_{B2}=(t_6...t_7)$ генераторного режима двигателей вертикальных валков не возникает. Таким образом, подпор вертикальных валков горизонтальными валками первой клетки устранен, что является целью разработанного способа. Поэтому способ рекомендован к внедрению в системе управления электроприводами черновой группы клеток.

Кроме того, анализ моментов двигателей горизонтальных валков в окне 2 на рис. 4.23, б показал, что в установившемся режиме совместной прокатки в интервале $(t_8...t_9)$ возникает рассогласование моментов двигателей M_{RT1} и M_{RB1} верхнего и нижнего валков 1-й горизонтальной клетки (окно 2). В интервале $(t_{10}...t_{11})$ возникает аналогичное рассогласование моментов двигателей 2-й клетки. Значения моментов M_{RT1} и M_{RB1} в интервале $(t_8...t_9)$ отличаются по модулю в 1,3 раза (2,0 МН·м и 1,5 МН·м). Примерно в такое же количество раз отличаются моменты M_{RT2} и M_{RB2} двигателей верхнего и нижнего валков 2-й клетки в интервале $(t_{10}...t_{11})$.

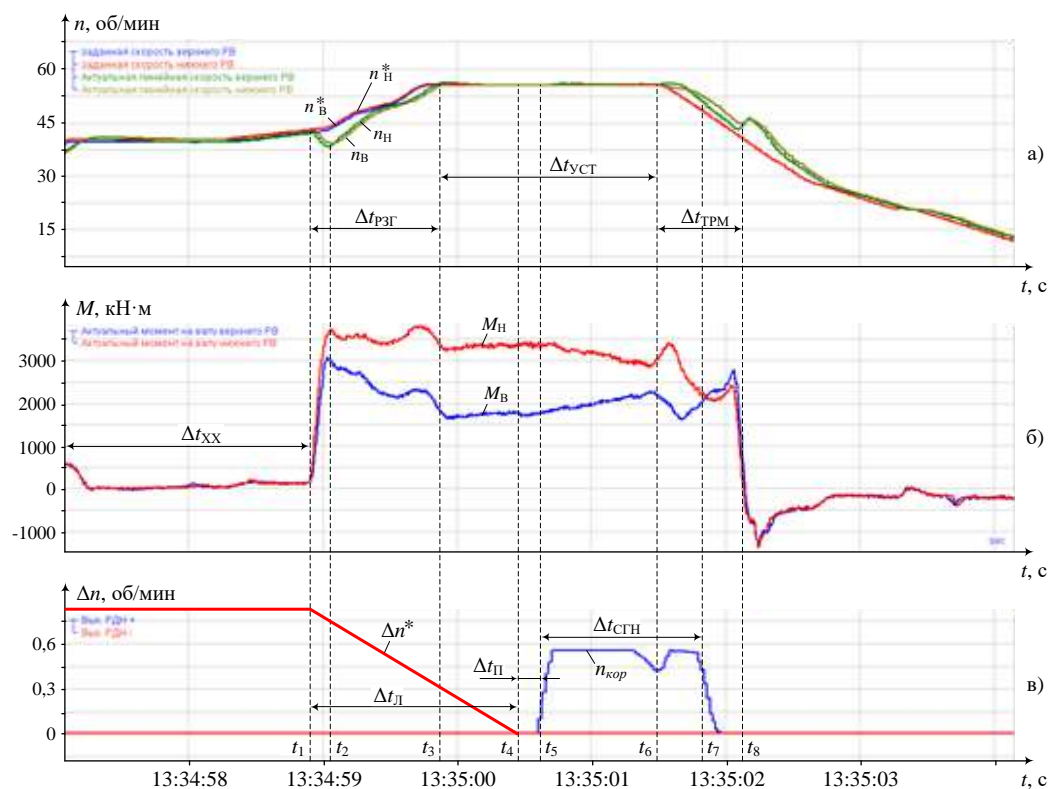
Отсюда следует вывод о целесообразности внедрения системы выравнивания нагрузок ВГП и НГП на базе РДН с переключающейся структурой, рассмотренной в п. 4.2 (рис. 4.2). Разработка регуляторов деления нагрузок в черновых клетях может быть принята в качестве перспективной задачи.

4.7.2. Экспериментальное исследование РДН с переключающейся структурой

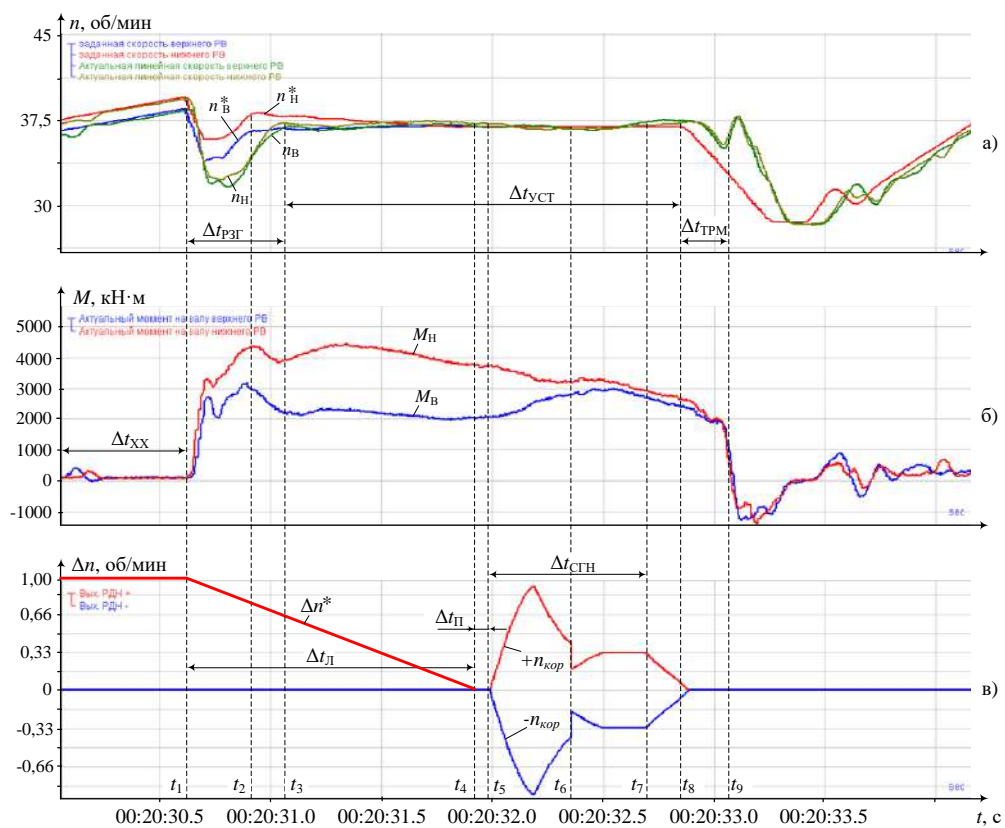
Алгоритм разработанного РДН реализован в технологическом контроллере клетки стана 5000, фрагмент структуры которого приведен на рис. 4.22. Выполнены виртуальная настройка алгоритмов и экспериментальные исследования. На рис. 4.24, а представлены осциллограммы заданных n_n^* , n_v^* и актуальных n_n , n_v скоростей (окно 1), а также моментов M_v , M_n (окно 2). Они получены при прокатке заготовки в третьем проходе черновой стадии при проектной настройке РДН. На рис. 4.24, б представлены осциллограммы, зафиксированные при прокатке аналогичной заготовки, но при включении нового РДН.

Проведено сравнение результатов для исследуемых способов управления. На обоих рисунках захват металла валками происходит в момент t_1 , прокатка осуществляется в интервалах времени t_1-t_8 на рис. 4.24, а и t_1-t_9 на рис. 4.24, б продолжительностью около 3 с (масштабы по оси времени различны). В окнах 3 показаны положительный ($+n_{кор}$) и отрицательный ($-n_{кор}$) сигналы на выходе РДН, которые в интервалах t_5-t_8 на рис. 4.24, б оказывают воздействие на скорости двигателей ВГП и НГП, соответственно.

При проектной настройке РДН на рис. 4.24, а выравнивание моментов происходит только в конце прокатки в момент времени t_7 по истечении времени согласования нагрузки $\Delta t_{сгн}=1,5$ с после включения РДН, которое происходит по истечении заданного времени паузы $\Delta t_{п}$. Аналогичное выравнивание моментов на рис. 4.24, б (также в момент t_7) происходит через 0,5 с после включения РДН. Это обеспечивается благодаря форсированному изменению регулирующего воздействия в интервале t_5-t_6 , что подтверждает сравнение осциллограмм в окнах 3. Таким образом, осциллограммы, представленные на рисунках, подтверждают сокращение времени согласования моментов в 3 раза.



а



б

Рисунок 4.24 – Осциллограммы скоростей и моментов ВГП и НГП клетки стана 5000 при проектной настройке (а) и при адаптивном РДН (б)

Более подробные пояснения к представленным осциллограммам приведены в [36]. Алгоритм разработанного РДН внедрен в опытно-промышленную эксплуатацию на стане 5000, результаты внедрения рассмотрены в разделе 7. В процессе эксплуатации подтверждены следующие преимущества:

- во всех проходах осуществляется форсированное выравнивание нагрузок, в то время как при проектном алгоритме в черновых проходах РДН не включается в работу;

- внедрение алгоритма обеспечивает сокращение времени выравнивания нагрузок двигателей в 1,5-3 раза за счет повышения быстродействия.

Таким образом, в результате проведенных испытаний подтверждены преимущества, заключающиеся в сокращении времени выравнивания нагрузок ВГП и НГП по окончании формирования «лыжи».

ВЫВОДЫ

1. Исследования показали, что основной причиной рассогласования скоростей и соответственно моментов двигателей ВГП и НГП является технологический режим формирования изгиба переднего конца раската в форме «лыжи». Величина рассогласования скоростей задается перед каждым проходом и может составлять до 10% установившейся скорости прокатки. Это приводит к кратному различию моментов двигателей и выходу наиболее загруженного электропривода на ограничение по моменту. Последний режим не является допустимым, поскольку приводит к потере управляемости электропривода и увеличению времени выравнивания нагрузок.

2. С целью решения проблемы разработана система управления электроприводами ВГП и НГП на базе РДН с переключающейся структурой. Сделана ссылка на исследования методом компьютерного моделирования, подтверждено сокращение времени выравнивания нагрузок двигателей. Вместе с тем, добиться решения поставленной задачи в полной мере не удастся. Это потребовало разработки более сложного РДН на основе алгоритмов нечеткой логики.

3. Разработан РДН с НЛ, включающий два канала регулирования (впервые). Первый воздействует на регуляторы скоростей ВГП и НГП пропорционально разнице скоростей двигателей, а второй осуществляет регулирование в функции производной разницы скоростей (ошибки). Рассмотрены функциональная схема РДН с НЛ, формирование сигналов управления в *Fuzzy Logic Toolbox* и лингвистические переменные при программной реализации нечеткого регулятора. Приведен набор правил нечеткого регулирования производной ошибки.

4. Представлены результаты моделирования процессов захвата раската валками и согласования нагрузок ВГП и НГП при включении разработанного РДН с НЛ. С целью поиска оптимальной настройки изменялись функции принадлежности входных воздействий и функция выходного воздействия. Обосновано применение функции Гаусса второго порядка, приведены зависимости для ее описания. Подтверждено кратное сокращение времени согласования моментов электроприводов. Это является косвенным подтверждением эффективности внедрения разработанного РДН с нечеткой логикой.

5. Разработаны способ управления гидравлическими НУ в режиме профилированной прокатки. Согласно способу на участках переменной толщины, формируемых за счет профилирования горизонтальными валками, осуществляют автоматическое регулирования положения НУ, а в квазиустановившемся режиме прокатки обеспечивают автоматическое регулирования толщины раската.

6. Приведены структура системы управления и описание имитационной модели системы управления гидравлическими НУ с переключением регулируемой координаты. Отличием от известной структуры с предуправлением является использование блока коммутации, осуществляющего переключение контуров регулирования положения НУ либо толщины.

7. По результатам моделирования сделан вывод, что двойной конический профиль «кость» в разработанной системе формируется с более высокой точностью, чем при реализации алгоритма управления НУ с предуправлением. Это косвенно подтверждает достижение конечной цели, заключающейся в приближении формы листа в плане к прямоугольной.

8. В соответствии с поставленными задачами разработаны технические решения, направленные на ограничение силового взаимодействия валков универсальной клетки в режиме совместной прокатки. Разработан способ автоматического управления процессом прокатки в черновой группе клеток непрерывного прокатного стана. На основе сравнительного анализа осциллограмм, полученных в проектном варианте системы управления и при реализации данного способа, даны рекомендации по его внедрению в электроприводах стана 2500.

9. В результате проведенных экспериментальных исследований подтверждены преимущества применения РДН с переключающейся структурой. Приведены осциллограммы, анализ которых доказал сокращение времени выравнивания нагрузок ВГП и НГП по окончании формирования «лыжи».

Глава 5. ЦИФРОВЫЕ ТЕНИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

5.1. Обоснование направлений исследований

Далее в соответствии с поставленными задачами рассмотрено применение цифровых теней – наблюдателей координат для контроля технического состояния электромеханических систем стана 5000. Предусмотрена разработка следующих наблюдателей:

- упругого момента на основе фильтра Калмана;
- угловых зазоров (люфтов) в передачах;
- температуры двигателей на основе четырехмассовой тепловой модели.

В следующих разделах их основе разрабатываются системы on-line мониторинга технического состояния, а также системы ограничения динамических нагрузок на шпинделях [266–268].

Сигнал упругого момента на шпинделе также можно использовать в целях исследования и управления сложной электромеханической системой. Задача разработки замкнутой системы регулирования координат с обратной связью по состоянию здесь не ставится, такие системы, разработанные при участии автора, рассмотрены в [168, 269]. Ставится задача разработки наблюдателя упругого момента двухмассовой системы электропривода по координатам, доступным для измерения в on-line режиме. Для частотно-регулируемых электроприводов прокатной клетки такими параметрами являются скорость двигателя и его момент, который вычисляется на основе измерений токов и напряжений. Такие вычисления в современных преобразователях частоты выполняются с достаточной точностью (по спецификации производителей ПЧ погрешность 0.5% и меньше).

Наблюдатель на основе фильтра Калмана

Согласно определению, данному в [270], наблюдатель состояния – это модель, подключенная параллельно объекту управления и получающая непрерывную информацию об изменениях регулирующего воздействия и регулируемой координаты.

В [271–274] показано, что значительные перспективы имеет разработка наблюдателей состояния электромеханических систем прокатных клетей на основе фильтров Калмана (Kalman filter – KF). Однако до настоящего времени они не получили применения в металлургическом производстве. Основной проблемой, возникающей при разработке KF для электроприводов прокатных станов, является сложность учета скорости заполнения очага деформации при входе раската в клеть (этот вопрос исследован в следующем разделе). Кроме того, электромеханические системы обладают существенной нелинейностью, которая обусловлена наличием угловых зазоров в шпиндельных соединениях. Поэтому применение классического KF, предназначенного для линейных систем, для двухмассовых систем с зазором и ударным приложением нагрузки вызывает затруднения. Недостатком модифицированных KF, в том числе расширенных фильтров Калмана (ЕКФ) и их разновидностей (UKF и др.) является сложность алгоритмов, что затрудняет их промышленное применение. В связи с этим ставится задача разработки наблюдателя упругого момента и момента второй массы (валка) двухмассовой системы клетки на основе KF с дополненным вектором состояния, получившего название дополненного фильтра Калмана (Augmented Kalman Filter – АКФ). Следует заметить, что такое решение здесь предлагается впервые.

Отличием матричных уравнений такого АКФ является добавление в вектор состояния момента нагрузки 2-й массы двухмассовой системы, что позволяет учесть фактическую скорость заполнения очага деформации при захвате. Процедура нахождения элементов матриц автоматизирована за счет использования библиотеки Control System Toolbox™. Помимо непосредственно разработки наблюдателя ставятся задачи:

- экспериментальной проверки адекватности путем сравнения процессов, полученных в сложном динамическом режиме;
- анализа переходных процессов при различных угловых зазорах в механической передаче;
- испытаний в электромеханических системах стана 5000.

Мониторинг зазора в шпиндельных соединениях

Не менее важной задачей является периодический контроль износа шпиндельных соединений электромеханических систем реверсивных клетей толстолистовых станов, в том числе стана 5000. Необходимы исследования, направленные на совершенствование ранее разработанного цифрового наблюдателя углового зазора в шпиндельных соединениях [226]. Для этого предложено использование цифрового двойника на базе программного обеспечения Simulink Real Time с использованием моделирования HIL. Как показано в разделе 2, виртуальную модель электромеханической системы следует разработать с использованием доменов Simscape и модулей Matlab Simulink. Это обеспечит расширение возможностей и универсальность модели. Аппаратно-программное моделирование HIL обеспечивает управление виртуальными процессами по сигналам, поступающим от PLC клетки. Это облегчает настройку наблюдателя и повышает точность косвенного определения (восстановления) углового зазора.

Мониторинг температуры двигателей

Тепловой контроль двигателей прокатных станов приобретает актуальность в связи с увеличением производства проката из труднодеформируемых марок стали. Современные требования, предъявляемые к обеспечению надежности, определяют непрерывный контроль температуры обмоток и железа статора и ротора. Вклад исследований заключается в том, что впервые обоснована методика расчета тепловых нагрузок на основе массивов данных, сформированных во время прокатки. Поставлены следующие задачи:

- разработка наблюдателя теплового состояния на базе четырехмассовой модели нагрева двигателя, построенной с использованием доменов библиотеки Simscape Thermal Models, входящей в состав Matlab Simulink;
- виртуальная настройка наблюдателя и тепловой модели с применением HIL;
- валидация результатов путем сравнения значений, восстановленных наблюдателем, с реальными температурами, измеренными в контрольных точках;
- исследования нагрева отдельных масс за цикл прокатки и анализ температуры обмоток статоров и роторов в интервалах разной длительности.

В целом разработка перечисленных цифровых наблюдателей координат будет способствовать развитию концепция объектно-ориентированных цифровых теней электрооборудования промышленных агрегатов. Внедрение разработок, повышающих надежность электрических приводов прокатных станов, создаст дополнительные предпосылки для инновационного развития металлургической отрасли. Ниже представлено подробное описание разработок по каждой из поставленных задач.

5.2. Наблюдатель упругого момента на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния

5.2.1. Характеристика АКФ

Как известно, фильтр Калмана – это математический алгоритм, который позволяет оценивать состояние системы на основе неполной, зашумленной информации. В общем случае КФ используется для оценки вектора состояния во временной области *«путем вычисления минимальной дисперсии несмещенной оценки прогнозируемого значения и измеренного значения»*. Утверждается, что он позволяет получать более точную оценку состояния системы, чем простое считывание данных с датчиков. Разработаны различные варианты КФ, в том числе расширенные фильтры Калмана (ЕКФ) [275]. По своей сути ЕКФ – *«это итерационный процесс оценки состояния, позволяющий выяснить скрытое внутреннее состояние системы (например, положение, скорость или ориентацию на основе серии потенциально неточных измерений во времени»*. В [276] создание ЕКФ обозначено как *«шаг к моделированию цифровых двойников»*. Считается, что ЕКФ линеаризует нелинейные уравнения состояния, аппроксимируя их линейными уравнениями, что позволяет использовать стандартный алгоритм фильтра Калмана [277].

Как отмечено выше, с целью повышения точности оценки при наличии неопределенностей модели и неизвестных входных данных фильтр Калмана может быть дополнен вектором состояния нелинейной электромеханической системы. Это подразумевает включение неизвестных параметров или смещений в вектор состояния, эффективно расширяя возможности их оценки. В развитие этого направления наряду ЕКФ с получили распространение фильтры Калмана с дополненным вектором состояния (Augmented Kalman Filter – АКФ).

Этот термин во многих литературных источниках переводится аналогично ЕKF, однако принципы построения устройств различаются (пояснения к этому приводятся ниже). Данный фильтр принят как основа при разработке наблюдателя упругого момента электропривода прокатного стана (следует заметить, что постановка подобной задачи в литературных источниках не встречается).

Фильтр Калмана с дополненным вектором состояния расширяет стандартный KF, включая неизвестные входные данные или параметры в вектор состояния, что позволяет производить их оценку наряду с переменными состояния системы. Этот подход особенно актуален при работе с системами, где входные данные невозможно измерить напрямую, или когда необходимо учитывать ошибки моделирования. В рамках этой структуры вектор состояния системы дополняется путем включения неизвестных входных переменных [278]. Так осуществляется аугментация (от латинского «*augmentation*» – увеличение, усиление) – это процесс, который подразумевает увеличение или наращивание чего-либо.

Суть аугментации в АКФ:

1. Увеличение вектора состояния. Основная идея заключается в создании дополненного вектора состояния, который включает исходные переменные состояния и неизвестные входные данные или параметры. Если исходный вектор состояния представляет положение и скорость системы, то дополненный вектор может также включать неизвестную силу, действующую на систему (в исследуемом случае это будет момент статической нагрузки электропривода).

2. Моделирование неизвестных входных данных. Распространенный подход заключается в моделировании неизвестных входных координат, когда их значение изменяется случайным образом с течением времени (в исследуемом случае вычисляется момент второй массы двухмассовой системы по координатам электропривода). Это позволяет фильтру Калмана оценивать значение входных данных на основе их прошлого поведения и реакции системы в *on-line* режиме.

3. Преимущества аугментации:

- улучшенная оценка состояния: оценивая неизвестные входные данные, АКФ может обеспечить более точные оценки состояния системы, особенно когда входные данные существенно влияют на ее поведение;

– компенсация погрешности моделирования: включение неизвестных входных данных может неявно учитывать ошибки моделирования в динамике, поскольку АКФ может «списывать» отклонения между прогнозируемыми и измеренными состояниями на неточности входных данных, а не на недостатки модели системы.

4. Оценка параметров. Дополненный вектор состояния также можно использовать для оценки неизвестных параметров модели системы, таких как коэффициенты трения или неточность установки датчиков.

5. Пример применения. В системе управления электроприводом АКФ может использоваться для оценки скорости двигателя, положения, а также неизвестного крутящего момента нагрузки. За счет включения этих неизвестных параметров в вектор состояния фильтр может обеспечить более точную оценку состояния электропривода даже в условиях изменяющейся нагрузки.

По сути, дополнение фильтра Калмана вектором состояния электромеханической системы позволяет обрабатывать нелинейности, неопределенности параметров и неизвестные входные данные, что приводит к более точной и надежной оценке состояния для широкого спектра приложений. Также АКФ можно использовать для объединения данных от нескольких датчиков, в том числе с неизвестными смещениями или ошибками.

5.2.2. Разработка наблюдателя состояния на основе АКФ

Кинематическая схема прокатной клетки, приведенная на рис. 1.7, а (п. 1.9.1), показывает, что система «двигатель–валок» может быть представлена как двухмассовая электромеханическая система с упругой связью и зазором в механической передаче (рис. 5.1, а) [279]. Двигатели и валки, обладают большой инерцией и при наличии длинного вала создают упругую систему. В неустановившихся рабочих режимах скорости первой и второй масс различаются, и вал испытывает значительный крутящий момент.

Структурная схема (упрощенная имитационная модель) электропривода с двухконтурной системой регулирования скорости, приведена на рис. 5.1, б. Такое представление главной линии прокатной клетки обосновано в [194], там же рассмотрена методика экспериментального определения параметров модели.

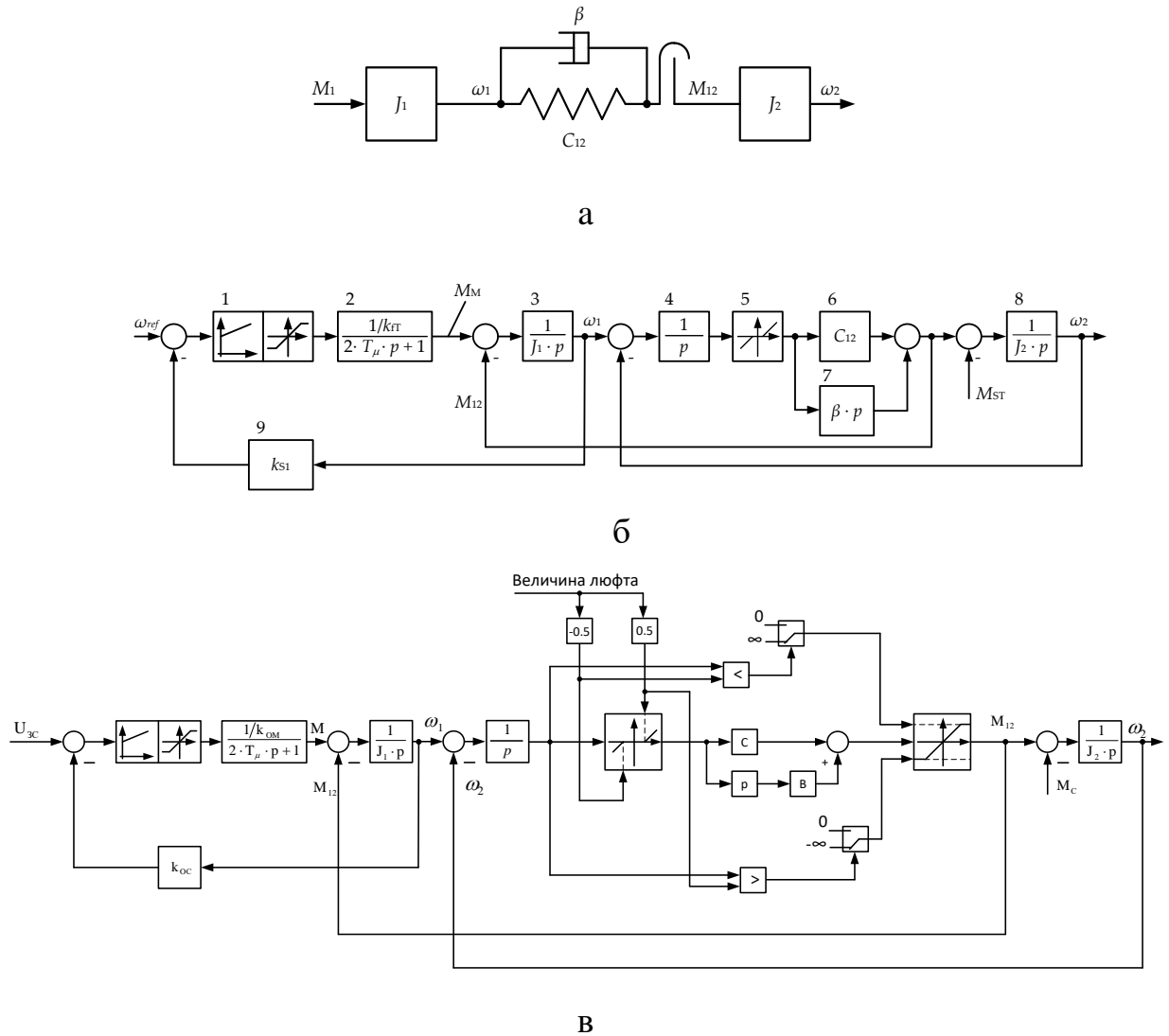


Рисунок 5.1 – Структура двухмассовой электромеханической системы (а), схема модели электропривода валка (б) и схема модели электропривода валка с уточненным представлением зазора (в)

На схеме обозначены: T_μ – некомпенсируемая постоянная времени; J_1, J_2 – моменты инерции 1-й и 2-й масс; C_{12} – коэффициент упругости механической передачи; β – коэффициент, отвечающий за естественное демпфирование (типа вязкого трения); M_{act} – измеренный (определенный в САР привода по сигналам напряжений, токов и положения ротора) момент двигателя; M_{12} – упругий момент шпинделя; ω_1, ω_2 – скорости вращения двигателя и валка (1-й и 2-й масс, соответственно); k_{s1}, k_{FT} – коэффициенты обратной связи по скорости первой массы и по крутящему моменту двигателя. Параметры модели приведены в табл. 5.1, они рассчитаны по методике, рассмотренной в [194]. Блоки 3, 5–7 являются типовыми блоками модели двухмассовой системы [16].

Они определяют характер переходных процессов в механической части, в том числе естественное затухание колебаний (блок 7). Блок 5 моделирует зазоры в передачах. Обратная связь по скорости моделируется блоком 9 с коэффициентом k_{FS} . Замкнутый контур регулирования момента представлен звеном 2.

Таблица 5.1 – Параметры модели двухмассовой системы стана 5000

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Момент инерции первой движущейся массы (двигателя)	J_1	кг·м ²	125000
Момент инерции второй движущейся массы (валка)	J_2	кг·м ²	114571
Жесткость упругой связи	c_{12}	Н·м/рад.	5934842
Собственная частота упругих колебаний	ω_{12}	рад/с	9,96
Ускорение электропривода	ε_0	рад/с ²	1 – 3
Зазор в передаче	δ	рад	0,017 – 0,051 (1° – 3°)
Средний упругий момент	M_{12}	МН·м	1,9
Коэффициент демпфирования	β	-	2,817
Декремент затухания	ξ	-	0,172
Коэффициент усиления регулятора скорости	k_{pc}	-	19,5
Постоянная времени регулятора скорости	T_{pc}	с	0,0041

В п. 4.1 на рис. 4.1 показаны модели взаимосвязанных электроприводов верхнего и нижнего валков. Между ними имеет место сложная связь через металл, моделируемая в блоке «Модель нагрузки». Наличие этой связи усложняет переходные процессы момента второй массы и упругих моментов в электромеханических системах клетки. Кроме того, процесс приложения статического момента M_C не является мгновенным (приложение нагрузки можно назвать ударным чисто условно). Соответственно при исследовании переходных процессов упругого момента необходимо учитывать скорость нарастания нагрузки при входе раската в клеть. При этом точное математическое описание момента нагрузки в данном режиме не представляется возможным. Поэтому целесообразно выполнить разработку АКФ с дополненным вектором состояния за счет включения в него момента нагрузки M_C .

Для двухмассовой системы (рис. 5.1, б) справедливы уравнения (5.1), описывающие упрощенный замкнутый контур момента и механическую часть. Система описывается как линейная без учета люфтов.

Наблюдатель представляет собой модель, работающую параллельно с реальным объектом, непрерывно получающую от объекта сигналы, доступные для измерения [270]. Искомые неизмеряемые сигналы объекта вычисляются (восстанавливаются) в наблюдателе. Схема наблюдателя для матричной формы описания объекта показана на рис. 5.2. Здесь сигналы U , X , Y и производная X' представляют собой векторы соответствующей размерности, а блоки A , B , C являются матрицами. Вектор X получается из его производной X' интегрированием по времени каждого элемента вектора X' . Вектор U должен содержать момент нагрузки M_C , который затруднительно вычислить аналитически (объяснение причин этого дано выше).

$$\begin{aligned}
 \frac{dM_1}{dt} &= -\frac{1}{2T_\mu} M_1 + \frac{1}{2T_\mu K_{om}} M_{1ref} \\
 \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{1}{J_1} M_1 - \frac{1}{J_1} M_{12} \\
 \frac{dM_{12}}{dt} &= C_{12}\omega_1 - C_{12}\omega_2 + \frac{\beta}{J_1} M_1 - \beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 * J_2} M_{12} + \frac{\beta}{J_2} M_c \\
 \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{1}{J_2} M_{12} - \frac{1}{J_2} M_c
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

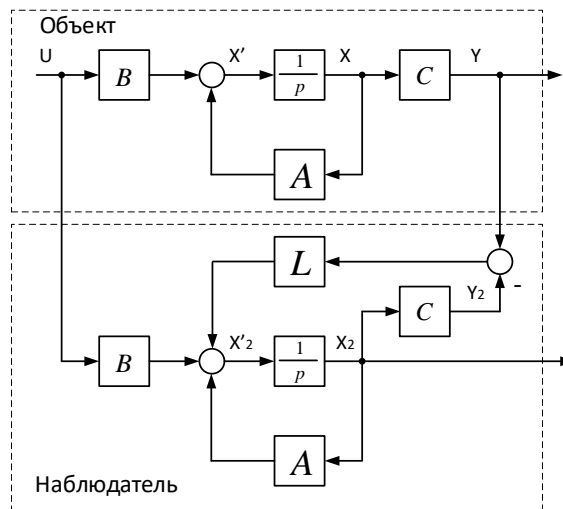


Рисунок 5.2 – Наблюдатель упругого момента в электромеханической системе

Недостатком такой модели электроприводов прокатных станов является отсутствие учета динамики, возникающей при приложении нагрузки во время захвата металла валками. Этот динамический режим сопровождается ростом момента нагрузки двигателя. Величина и темп приложения наряду с упругими

свойствами вала и зазором определяют амплитуду упругого момента на шпинделе. Поэтому влияние скорости нарастания момента нагрузки при захвате необходимо учитывать при разработке наблюдателя на основе фильтра Калмана.

Скорость приложения зависит от скорости заполнения очага деформации и обычно находится в пределах от 150 до 250 номинальных значений момента двигателя (M_H) в секунду. Возможно, с некоторой ошибкой, определять момент нагрузки реальной системы по величине актуального усилия прокатки с использованием информации о диаметрах валков и обжатии.

Для синтеза наблюдателя необходимо вычислить матрицу L коэффициентов усиления фильтра Калмана. Коэффициенты матрицы L могут быть найдены методами аналитического конструирования по общеизвестным зависимостям. В пакете Matlab процедура нахождения элементов L автоматизирована за счет использования библиотеки Control System Toolbox™. Коэффициенты матрицы L вычисляются исходя из описания объекта, т.е. по матрицам A , B , C , D . Использование стационарной версии наблюдателя обеспечивает снижение вычислительных затрат, необходимых для выполнения алгоритмов АКФ.

Реализация АКФ выполнена в стационарном состоянии, т.е. предполагается, что матрицы модели в пространстве состояний и ковариации шума инвариантны во времени. Ниже приведено матричное уравнение (5.2), поясняющее восстановление сигнала, составленное с учетом этого условия. Отличием является добавление в вектор состояния момента M_c нагрузки 2-й массы двухмассовой системы, что позволяет учесть величину момента прокатки и скорость заполнения очага деформации при захвате.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} M_1 \\ \omega_1 \\ M_{12} \\ \omega_2 \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & \frac{1}{J_1} & 0 & 0 \\ \frac{\beta}{J_1} & C_{12} & -\beta \frac{J_1+J_2}{J_1*J_2} & -C_{12} & \frac{\beta}{J_2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & -\frac{1}{J_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} M_1 \\ \omega_1 \\ M_{12} \\ \omega_2 \\ M_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_m K_{OM}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * [M_{1ref}] \quad (5.2)$$

После выполненных изменений вектор состояния системы выглядит следующим образом:

$$[X] = [M_1, \omega_1, M_{12}, \omega_2, M_c].$$

Вектор U , имеющий вид $\begin{bmatrix} M_{1ref} \\ M_c \end{bmatrix}$, содержит сигнал момента нагрузки M_c , который технически сложно подать на вход наблюдателя. Поэтому целесообразно вычислять момент нагрузки (прокатки) в наблюдателе. Для этого выполнено дополнение матриц АКФ следующим образом:

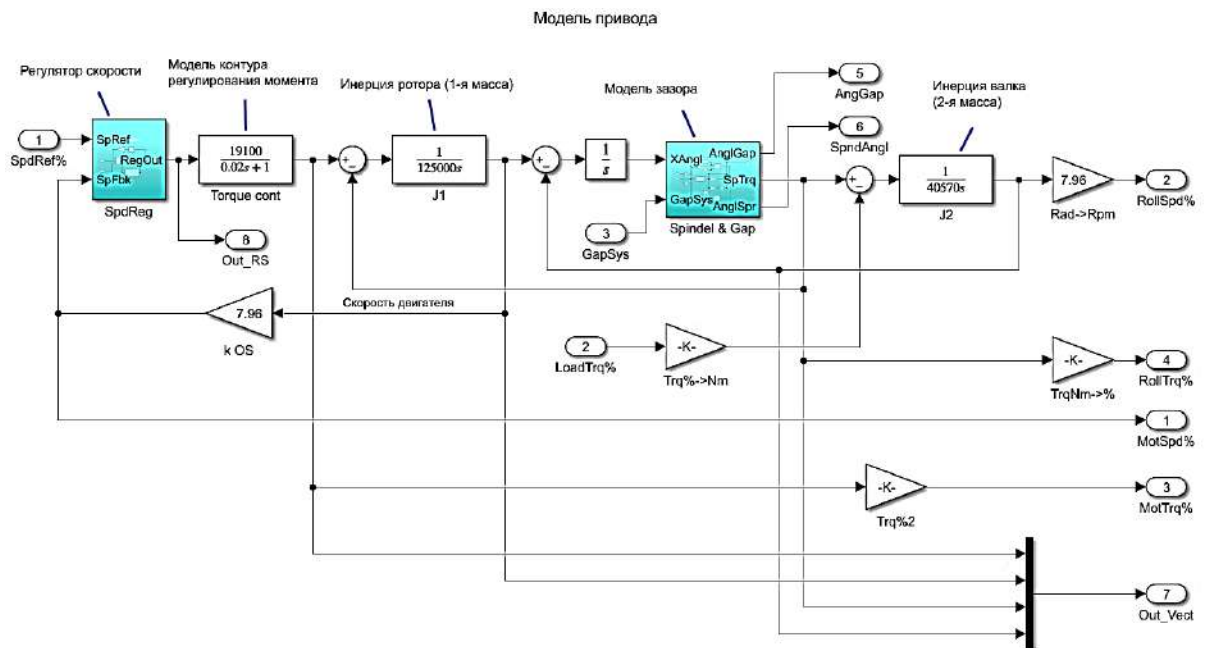
$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & \frac{1}{J_1} & 0 & 0 \\ \frac{\beta}{J_1} & C_{12} & -\beta \frac{J_1+J_2}{J_1*J_2} & -C_{12} & \frac{\beta}{J_2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & -\frac{1}{J_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_m K_{oM}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

Матрица C со всеми единицами в диагонали соответствует случаю, когда измеряются все составляющие вектора X . В нашем случае элементами матрицы, доступными для измерения, являются скорость и момент двигателя, поэтому для реализации АКФ матрицу C следует задать в виде (5.3). Из нее следует, что величины M_{12} и ω_2 недоступны для измерения и подлежат восстановлению наблюдателем. Также возможна замена измеренного момента двигателя на сигнал с выхода регулятора скорости, пропущенный через фильтр 1-го порядка с постоянной времени, эквивалентной постоянной контура регулирования момента в векторной системе управления электроприводом [194]. В нашем случае дополнительная координата – это момент нагрузки M_c , которая вычисляется на каждом шаге и поэтому может условно считаться известной. Тот факт, что дополнительная координата включена в вектор состояния, является дополнением или «увеличением» вектора состояния, соответственно КФ превращается в АКФ.

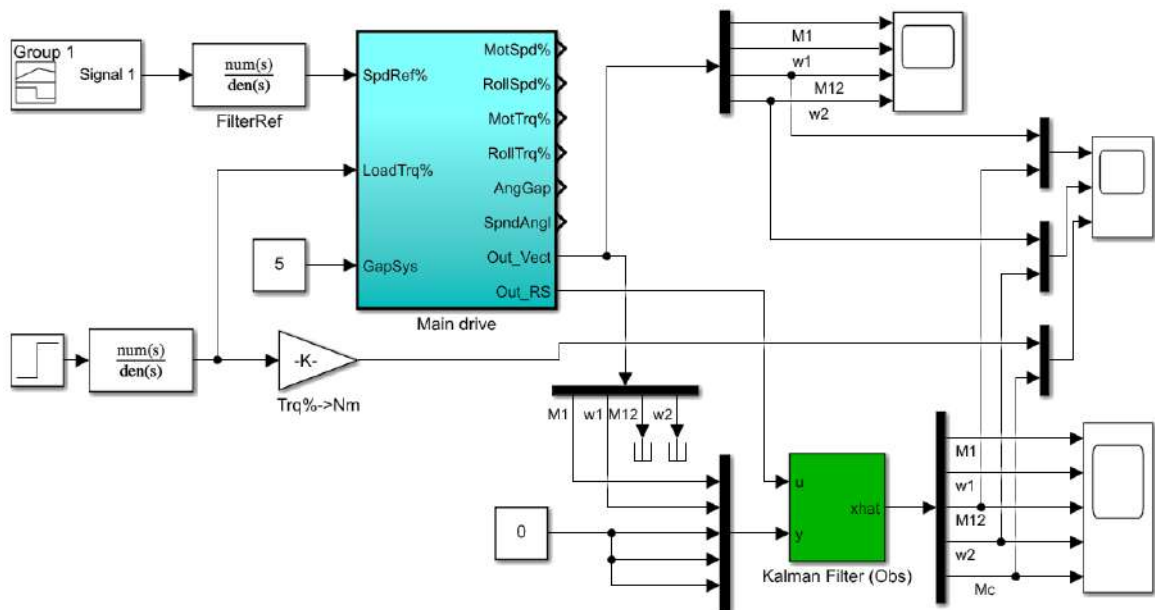
5.2.3. Реализация наблюдателя в Matlab Simulink

Выполнена виртуальная настройка наблюдателя по методике, обоснованной в [9]. Ее применение для наблюдателей координат электромеханических систем прокатных станов рассмотрено в [229, 280]. С этой целью в модель электропривода валков в Simulink (рис. 5.3, а) подключен разработанный

наблюдатель, как показано на рис. 5.3, б. Это удобно для сравнения сигналов упругих моментов: полученного из модели и восстановленного наблюдателем.



а



б

Рисунок 5.3 – Модель электропривода клети (а) и схема подключения KF (б), реализованные в Matlab Simulink

Наблюдатель на основе KF представлен блоком Kalman Filter (Obs) из библиотеки Simulink. Модель привода клети Main Drive (рис. 5.3, б) выдает вектор сигналов $[M_1, \omega_1, M_{12}, \omega_2]$. По сигналам M_1, ω_1 формируется вектор $[y]$ размерностью 5 элементов, являющийся входом блока Kalman Filter. При

этом недостающие элементы вектора $[y]$ заполняются нулевыми значениями, т.к. величины M_{12}, ω_2, M_c не измеряются в реальной системе. Таким образом, вход фильтра Калмана y , представляет собой вектор $y=[M_1, \omega_1, 0, 0, 0]$, соразмерный вектору состояний. Как видно, сигналы M_{12}, ω_2, M_c на входе наблюдателя заменены нулями, т.е. они не измеряются и не подаются в наблюдатель. Блок наблюдателя имеет вход u , состоящий из одного сигнала – выхода регулятора скорости Out_RS, выдаваемого моделью привода.

Настройка блока Kalman Filter осуществляется заданием матриц системы A, B, C, D наблюдаемого объекта и ковариационных матриц Q, R – шумов объекта и шумов измерения. Настройка наблюдателя, в частности, его быстроты реакции на изменения момента нагрузки второй массы определяется коэффициентами матрицы Q , которые в конечном итоге определяют расчетные коэффициенты усиления матрицы L . Численные значения матриц определены по параметрам модели электромеханической системы стана, приведенным в табл. 5.1. Заполнение матриц в Simulink показано в окне на рис. 5.4.

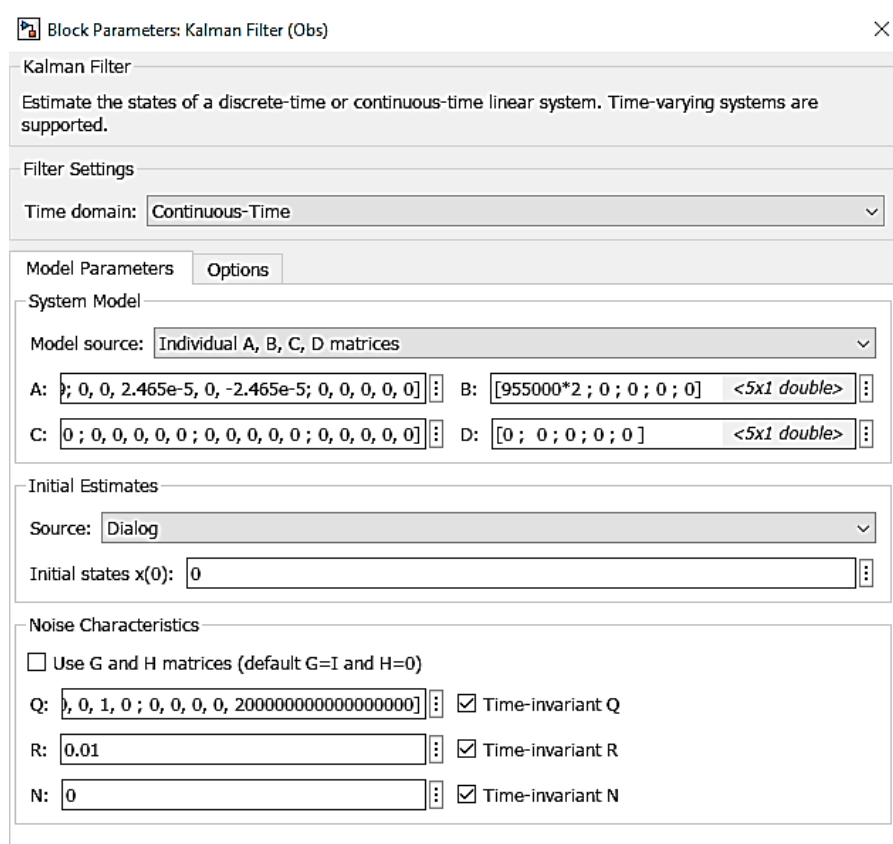


Рисунок 5.4 – Экранная форма в Control System Toolbox™ для настройки блока Kalman Filter

Последний элемент матрицы Q имеет большую величину, что связано с неопределенностью момента прокатки. При меньших значениях получаются худшие результаты при восстановлении M_c .

Для реализации в ПЛК разработаны блоки, согласно структурам, приведенным далее. Так, например, перемножение вектора X на матрицу C

$$Y = CX = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix} [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5]^T$$

или

$$Y = \begin{bmatrix} C_{11}X_1 + C_{12}X_2 + C_{13}X_3 + C_{14}X_4 + C_{15}X_5 \\ C_{21}X_1 + C_{22}X_2 + C_{23}X_3 + C_{24}X_4 + C_{25}X_5 \\ C_{31}X_1 + C_{32}X_2 + C_{33}X_3 + C_{34}X_4 + C_{35}X_5 \\ C_{41}X_1 + C_{42}X_2 + C_{43}X_3 + C_{44}X_4 + C_{45}X_5 \\ C_{51}X_1 + C_{52}X_2 + C_{53}X_3 + C_{54}X_4 + C_{55}X_5 \end{bmatrix}$$

реализуется программным блоком со структурой, показанной на рис. 5.5.

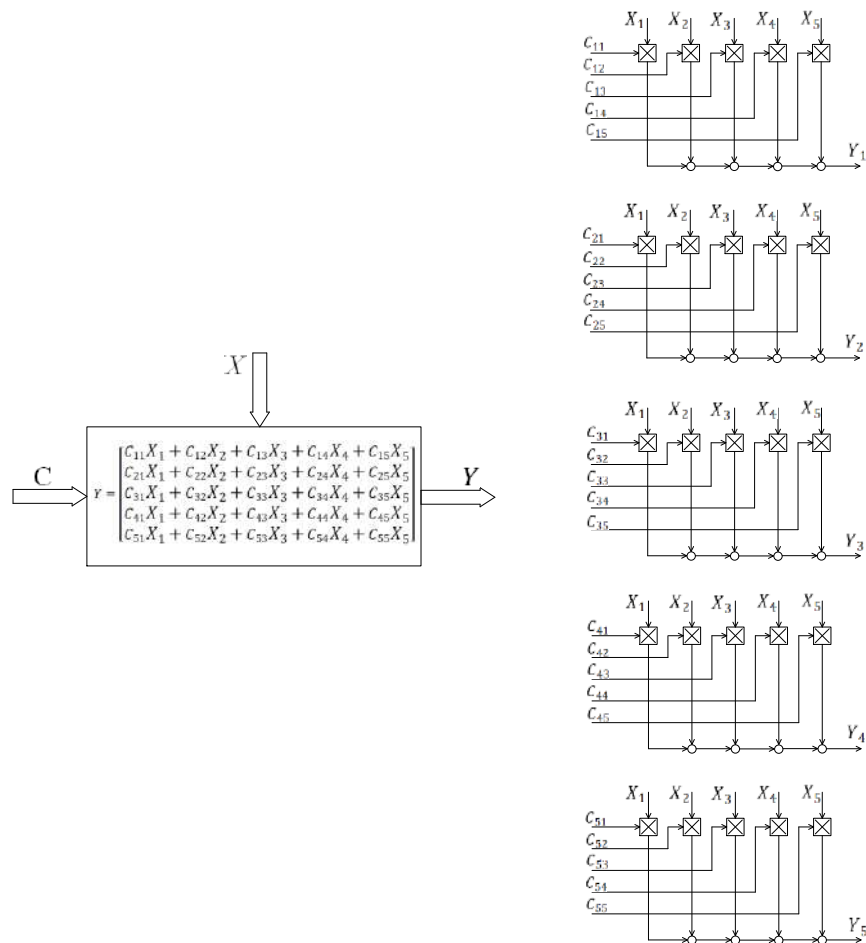


Рисунок 5.5 – Схема умножителя вектора на матрицу при реализации в программе ПЛК

Разработаны и выполнены в ПЛК блоки суммирования векторов и интеграторы (показаны в Приложении 4). Интегрирование осуществляется методом трапеций, время цикла программы 1 мс. Схема, показанная на рисунке 5.2, при программной реализации в ПЛК представлена на рисунке 5.6.

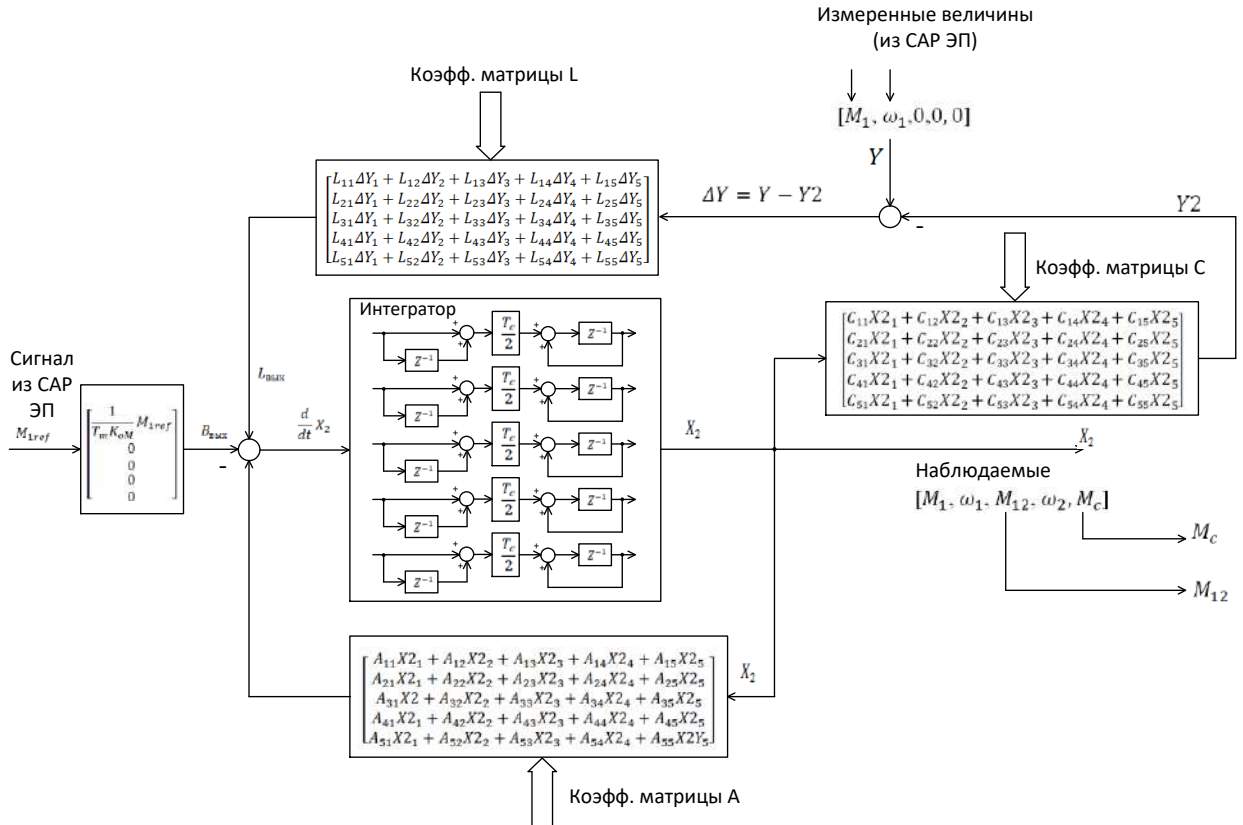


Рисунок 5.6 – Схема наблюдателя при реализации в программе ПЛК

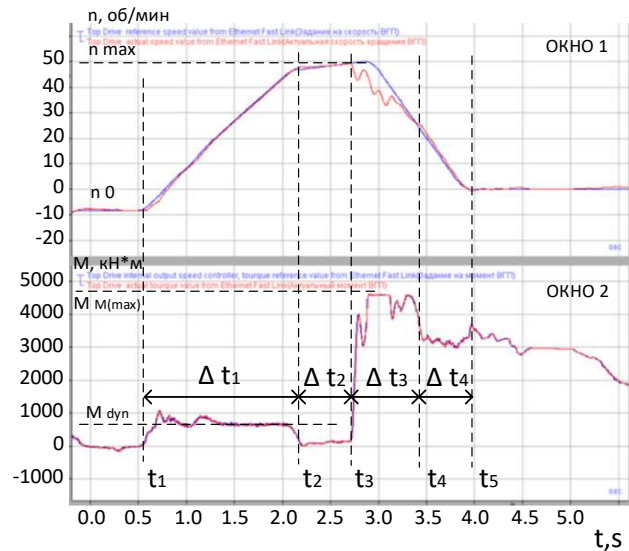
Более подробная реализация стационарного наблюдателя Калмана для задачи определения упругого момента приведена в Приложении 4.

5.2.4. Оценка адекватности

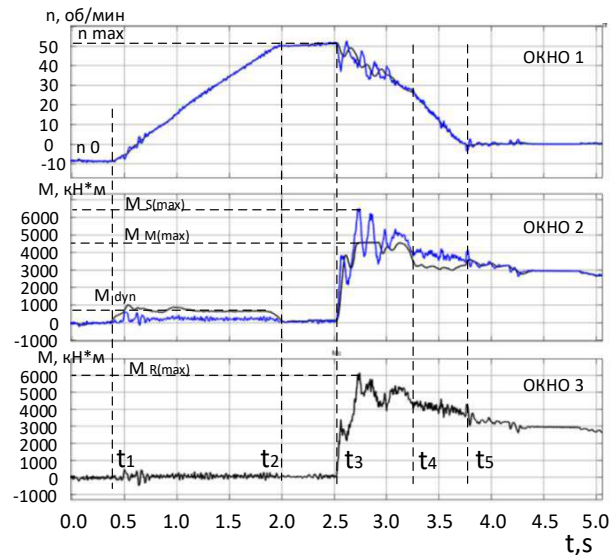
Далее выполнена проверка адекватности зависимостей, восстановленных наблюдателем, и экспериментально снятых осциллограмм с использованием системы прямого измерения момента. Анализировалась последовательность, включающая процесс разгона, захвата и аварийной ситуации, когда отключился двигатель ВГП, а двигатель НГП перешел в режим ограничения момента из-за высокой нагрузки. Это случай, в котором явно проявляется различие между моментом двигателя и упругим моментом на шпинделе.

На рис. 5.7, а показаны осциллограммы скоростей и моментов ВГП, а на рис. 5.7, б – процессы, восстановленные наблюдателем. Здесь момент нагрузки

2-й массы (окно 3) – это момент на валках (или момент прокатки). Этот фактический момент вычислен после экспорта сигналов из преобразователей частоты в Matlab и восстановления упругого момента наблюдателем. Как отмечалось выше, данная процедура позволяет избежать вычисления момента нагрузки на каждом шаге по аналитическим зависимостям, что крайне сложно. Таким образом обеспечивается преимущество АКФ по сравнению с КФ.



а



б

Рисунок 5.7 – Переходные процессы при аварийном отключении ВГП: осциллограммы, снятые на стане (а), и зависимости, восстановленные наблюдателем (б); окно 1 – скорости 1-й и 2-й масс, об/мин; окно 2 – момент двигателя и момент на шпинделе, кН·м; окно 3 – восстановленный момент нагрузки 2-й массы, кН·м

На обоих рисунках момент двигателя выходит на ограничение, установленное равным ~ 4500 кН·м или 240% номинального момента двигателя, равного 1910 кН·м. Следует заметить, что на рис. 5.7, а отсутствует сигнал упругого момента на шпинделе. Этот сигнал является искомым, он получен с помощью наблюдателя и показан в окне 2 на рис. 5.7, б. В окне 3 показан искомый сигнал момента второй массы.

Характер измеренных и восстановленных процессов в данном сложном динамическом режиме позволяет сделать вывод об их адекватности. Для подтверждения в табл. 5.2 приведены координаты, зафиксированные в моменты времени, показанные на рисунках. Из их сопоставления следует, что максимальное различие координат составляет 6,25%, что допустимо для промышленных объектов. Это подтверждает взаимное соответствие координат, восстановленных наблюдателем, и значений, полученных экспериментальным путем на стане.

Таблица 5.2 – Значения средних моментов за проход

Параметр	Ед. изм.	Условия (№ рисунка)		Разница	
		Эксперимент (рис. 5.7, а)	Наблюдатель (рис. 5.7, б)	Абсолютная	%
Δt_1	с	1,6	1,5	0,1	6,25
Δt_2		0,5	0,5	0	0
Δt_3		0,8	0,75	0,05	6,25
Δt_4		0,4	0,4	0	0
n_0	об/мин	-9,95	-10 об/мин	0,05	0,5
n_{\max}		50	50	0	0
M_{dyn}	кН·м	850	870	20	2,4
$M_{M(\max)}$		4400	4400	0	0
$M_{S(\max)}$		-	6200	-	-
$M_{R(\max)}$		-	6050	-	-

5.2.5. Исследования при различных угловых зазорах

Далее выполнена оценка влияния угловых зазоров на амплитуду упругого момента. Это исследование необходимо, поскольку система уравнений (5.1), на основании которой разработан АКФ, записана как линейная, без учета люфтов. Поскольку экспериментально изменить угловой зазор в шпиндельных соединениях непосредственно на стане невозможно, сравнивались переходные

процессы скорости и моментов, полученные на модели (рис. 5.3, а) и восстановленные наблюдателем (рис. 5.3, б). Характерные осциллограммы представлены на рис. 5.8. На рис. 5.8, а зависимости получены при эквивалентном угловом зазоре 1° , что соответствует хорошему состоянию шпиндельных соединений, на рис. 5.8, б зазор составляет 4° , что говорит о существенном износе последних.

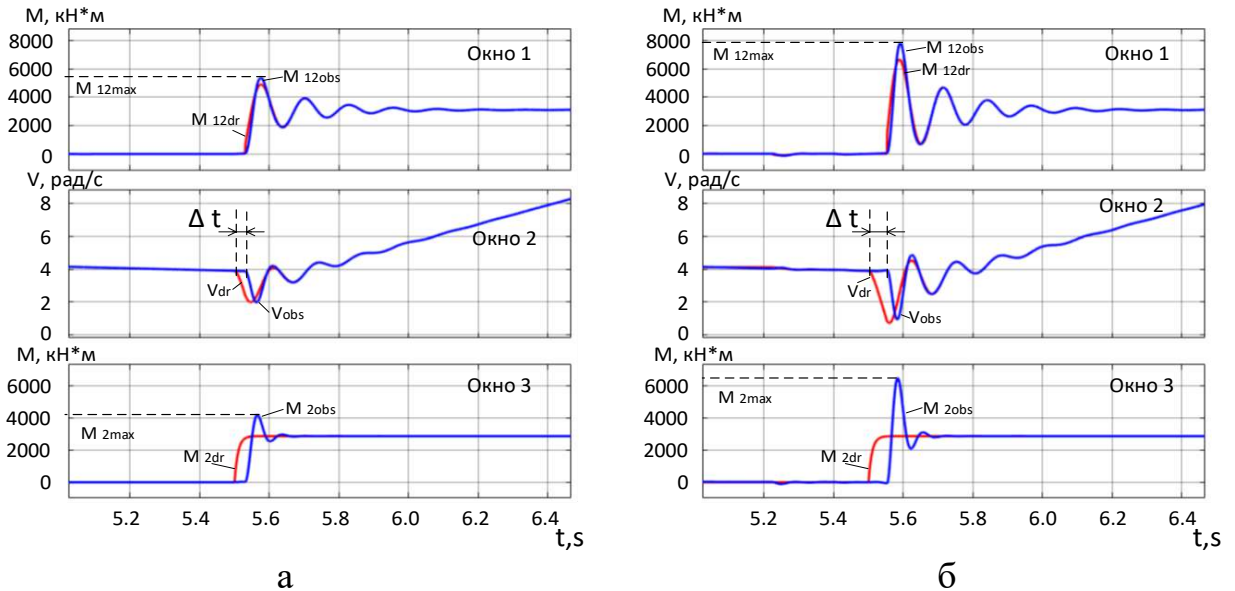


Рисунок 5.8 – Динамические процессы при захвате раската валками с угловыми зазорами 1° (а) и 4° (б): окно 1 – упругий момент; окно 2 – скорость второй массы (валка); окно 3 – момент нагрузки (прокатки)

При зазоре 1° зависимости, восстановленные наблюдателем (индекс «obs»), практически совпадают с сигналами, поступающими от модели электропривода (индекс «dr»). Запаздывание, обусловленное замыканием такого зазора, на переходных процессах практически не сказывается. При зазоре 4° возникает запаздывание Δt (около 0,5 с) восстановленного момента нагрузки второй массы M_{2_Obs} (рис. 5.8, б, окно 3) относительно «настоящего» момента нагрузки электропривода M_{2_dr} , полученного от модели. Замыкание зазора моделируется в структуре на рис. 5.3, а и передается на вход наблюдателя Kalman Filter (Obs) на рис. 5.3, б. Восстановленная скорость валка v_{obs} также «отстает» от аналогичной скорости v_{dr} , полученной от модели, хотя характер этих зависимостей идентичен. При этом восстановленный упругий момент M_{12obs} достаточно точно повторяет «реальный» упругий момент M_{12dr} , рассчитанный в модели электропривода (окно 1 на рис. 5.8, б).

Результаты обработки и обобщения измеренных и восстановленных координат представлены в табл. 5.3. Коэффициент динамичности k_d рассчитывается как отношение амплитуд момента к установившемуся моменту двигателя, равному 2400 кН·м (это значение моментов в окнах 1 и 3 по окончании переходного процесса).

Таблица 5.3 – Амплитуды момента двигателя и упругого момента при разных угловых зазорах

Координата	Угловой зазор		k_d , о.е.
	1° (рис. 5.8, а)	4° (рис. 5.8, б)	
$M_{2\max}$, кН·м (окно 3)	4100	6200	1,5
$M_{12\max}$, кН·м (окно 1)	4600	8000	1,7

Анализ рисунков и данных табл. 5.3 позволил сделать следующие выводы:

1. Восстановление упругого момента происходит с удовлетворительной точностью.
2. Амплитуды зависимостей, полученных посредством наблюдателя и в «реальных» переходных процессах в окнах 1 на рис. 5.8, а и б, отличаются, что объясняется различием зазоров. То же можно сказать о переходных процессах скорости второй массы (окна 2).
3. Влияние величины углового зазора на амплитуды упругого момента (окна 1) и момента нагрузки (окна 3) существенно. Как следует из табл. 5.3, при изменении зазора от 1° до 4° кратности амплитуд увеличиваются в 1,5 и 1,7 раз соответственно.

Сделанные выводы подтверждают целесообразность исследований и разработок систем управления электроприводами, обеспечивающих снижение упругого момента при захвате раскатов валками. Литературный обзор показал, что перспективным направлением является реализация принципа регулирования по отклонению в виде обратной связи по упругому моменту, который рассчитывается в наблюдателе состояния [168, 269].

5.3. Наблюдатель эквивалентного углового зазора в шпиндельных соединениях

5.3.1. Принцип косвенного определения углового зазора

Как было показано на рис. 1.12, сочленение шпинделя с валком осуществляется с помощью специальных шпиндельных соединений. В таком соединении имеет место угловой зазор (он же люфт). На рис. 5.9 представлены рисунки, поясняющие замыкание углового зазора при вращении вала в разных направлениях. Исходный зазор (рис. 5.9, б) составляет $1,5\text{--}2^\circ$, по мере износа он может увеличиваться до 5° . Большой зазор недопустим, хотя были зафиксированы увеличения до 8° .

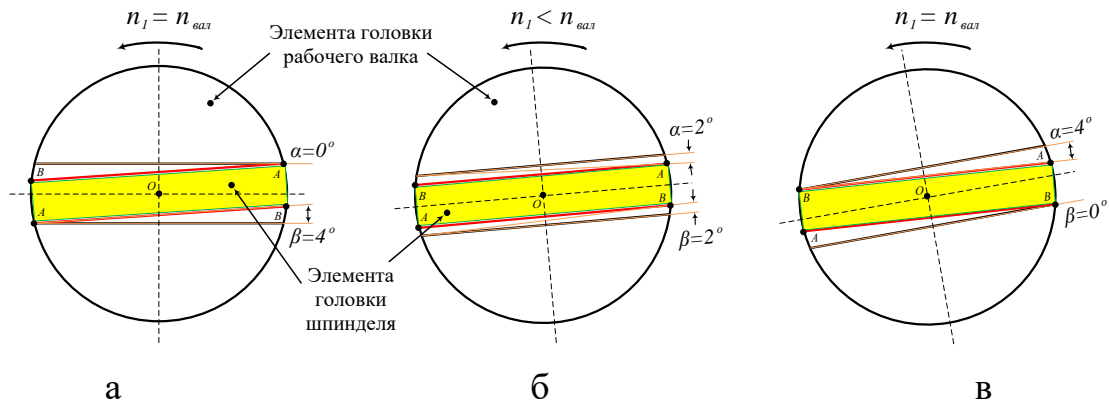


Рисунок 5.9 – Замыкание зазора при вращении [41]

Замыкание зазора (рис. 5.9, а либо 5.9, в) происходит при повороте в любую сторону и приводит к усилению ударов при захвате.

Предложен алгоритм мониторинга износа шпиндельного соединения, включающий следующие действия:

- косвенное определение углового зазора путем интегрирования скорости в интервале вращения с разомкнутым зазором;
- для оценки границ интервала фиксации смены направления вращения (знака ускорения) и момента активного замыкания зазора при отсутствии металла в клети.

Алгоритм поясняют осциллограммы скоростей и моментов, представленные на рис. 5.10. Они получены при реверсе электропривода верхнего вала с равноускоренными торможением и разгоном (при «треугольной» тахограмме).

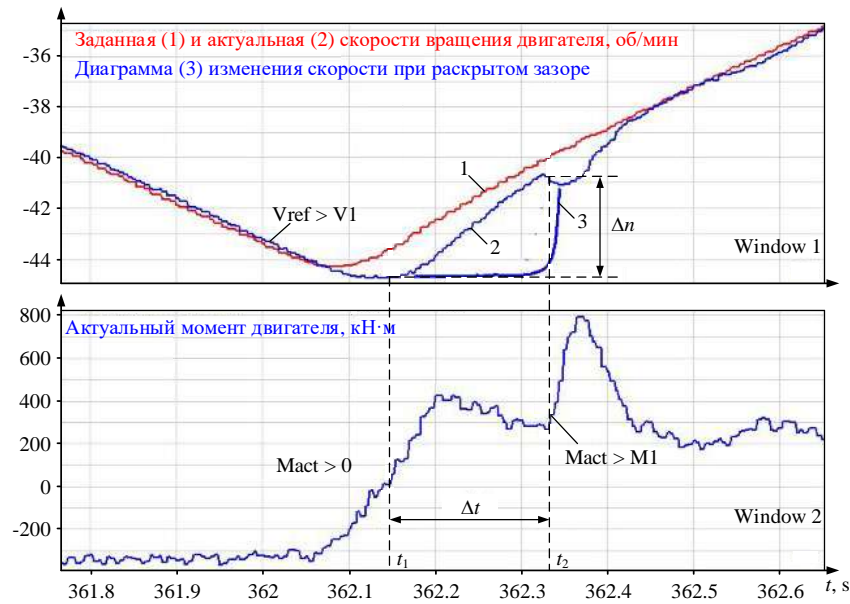


Рисунок 5.10 – Осциллограммы замыкания углового зазора в режиме реверса: окно 1 – заданная (1) и фактическая (2) скорости вращения двигателя, об/мин и диаграмма (3) изменения скорости при раскрытом зазоре; окно 2 – фактический момент двигателя

В момент времени t_1 , когда момент двигателя изменяет знак, происходит раскрытие зазора в передаче. К моменту t_2 зазор закрывается, это подтверждает последующий рост момента двигателя от 300 до 800 кН·м. Предполагая, что скорость шпинделя при раскрытом зазоре постоянна (изменяется по кривой 3), величину угла можно рассчитать по зависимости:

$$\delta = \frac{1}{2} \Delta n \cdot \Delta t \cdot 0,1047, \quad (5.4)$$

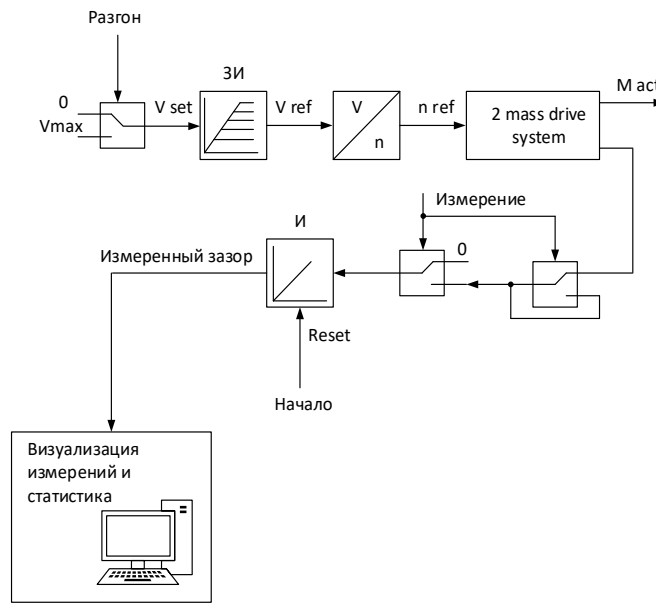
где 0,1047 – коэффициент перевода [об/мин] в [рад/с].

В данном случае $\Delta n = 4$ об/мин, интервал времени $\Delta t = 0,18$ с, соответственно угловой зазор $\delta = 0,038$ рад или около $2,2^\circ$. Согласно этой зависимости, операция интегрирования заменена перемножением приращений скорости и времени. Такое упрощение обосновано, т.к. скорость (кривая 1) изменяется по линейному закону.

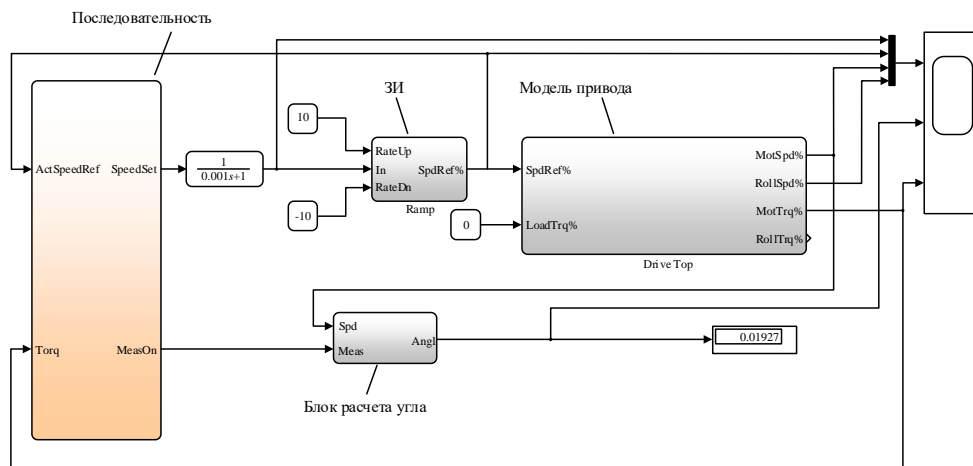
5.3.2. Структура измерительной системы

Как отмечалось выше, преимуществом моделирования HIL является возможность применения доменов, входящих в библиотеки Simulink и Simscape.

Кроме того, возможно применение компьютерных моделей и подпрограмм, разработанных пользователем. На рис. 5.11, а представлена структурная схема разработанной системы, реализующей принцип восстановления углового зазора. Прототипирование алгоритма проведено в Matlab Simulink, схема показана на рис. 5.11, б. Она реализована в Simulink с использованием доменов пакета Simscape.



а



б

Рисунок 5.11 – Структура, поясняющая принцип восстановления углового зазора (а) и модель электропривода на основе блоков Simscape (б)

Данная модель является симулятором, предназначенным для настройки наблюдателя. Подход, основанный на создании виртуальных моделей объекта

с последующим переносом отлаженного алгоритма в программное обеспечение управляющих контроллеров, применяется при проектировании электротехнических комплексов промышленных агрегатов. Этот принцип также используется при виртуальном вводе в эксплуатацию [281, 282], диагностировании и прогнозировании технического состояния оборудования [283]. Схема модели, представленная на рис. 5.11, б, поясняет способ измерения углового зазора. В ней формируется тестовый сигнал задания на скорость, и определяется люфт в электромеханической системе. Вне связи со структурой, представленной на рис. 5.11, а, она предназначена для предварительной отладки цифрового алгоритма. Блок формирования последовательности включает шаги разгона, торможения и измерения (алгоритм отладки здесь не рассматривается). Модель также содержит вложенную модель двухмассового электропривода (блок Drive Top), показанную на рис. 5.3, а.

Схема модуля «Блок расчета угла», реализованная в модели на рис. 5.11, б, представлена на рис. 5.12. Она является примером моделей, разработанных автором в Matlab Simulink. Данная функциональная структура обеспечивает логику переключений, необходимых для реализации вычислительных функций, предусмотренных методикой, рассмотренной ниже. Блок обеспечивает выполнение следующих операций:

- запоминает текущую скорость при смене знака ускорения;
- осуществляет контроль момента в процессе ускорения ВГП (окно 2 на рис. 5.10, интервал t_1-t_2);

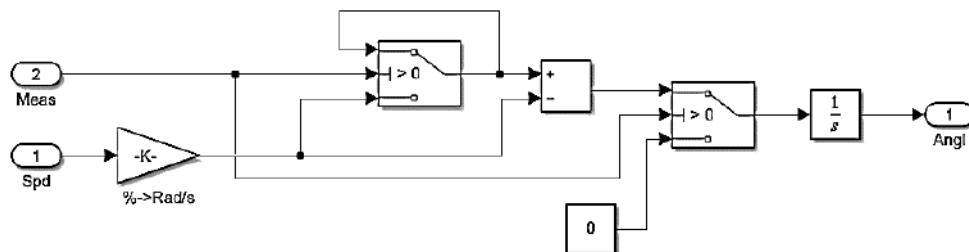


Рисунок 5.12 – Схема восстановления углового зазора

- интегрирует разницу между запомненной и актуальной скоростями двигателя до тех пор, пока не произойдет увеличение момента, вызванное замыканием зазора в момент t_2 .

Выходным сигналом блока является восстановленный угловой зазор. Для оценки точности вычислений была выполнена проверка алгоритма, реализованного на модели. Для этого в модель задавался определенный «люфт», который впоследствии вычислял блок, представленный на рис. 5.12. В результате была подтверждена погрешность восстановления углового зазора, не превышающая 1,5%. Безусловно, «вычисление» сигнала, который был подан на вход модели, обеспечивает лишь верификацию вычислительного алгоритма. Для валидации алгоритмов двойника необходимо проведение экспериментов на стане. Сравнение расчетных данных и результатов замеров приводится в [284].

Более подробно разработанный наблюдатель углового зазора рассмотрен в [226, 285]. На его основе разработан способ мониторинга износа шпиндельного соединения клетки толстолистного прокатного стана, защищенный патентом на изобретение [41].

5.3.3. Результаты измерения углового зазора

При треугольной тахограмме скорость электропривода в процессе выбора зазора (в интервале Δt на рис. 5.10) изменяется по линейному закону. Поэтому операция интегрирования может быть заменена вычислением по формуле:

$$\varphi = \varepsilon \cdot \Delta t^2 = \frac{a}{R} \cdot \Delta t^2, \quad (5.5)$$

где: φ – угловой зазор, вычисленный наблюдателем; ε – угловое ускорение (по модулю) при торможении электропривода; a – линейное ускорение; R – радиус вала.

Время выбора зазора определяется по длительности сигнала логической единицы на выходе логического блока на рис. 5.12. В [226] было показано, что угловые зазоры в шпиндельных соединениях ВГП и НГП практически всегда различаются. Это обусловлено следующими причинами:

- погрешностями изготовления шпиндельных соединений;
- разным износом шеек (лопастей) валков и головок шпинделей, обусловленным различием нагрузок ВГП и НГП;
- разным наклоном шпинделей к горизонтальной оси.

Данный вывод подтверждают осциллограммы скоростей и моментов двигателей ВГП и НГП, представленные на рис. 5.13. В результате вычислений, выполненных с помощью разработанного наблюдателя, получены следующие результаты:

$$\varphi_T = \frac{\Delta n \cdot \Delta t_T \cdot 180}{9.55 \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{4.75 \cdot 0.17 \cdot 180}{9.55 \cdot 2 \cdot \pi} = 2.42^\circ \text{ — для шпинделя верхнего валка;}$$

$$\varphi_B = \frac{\Delta n \cdot \Delta t_B \cdot 180}{9.55 \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{4.5 \cdot 0.15 \cdot 180}{9.55 \cdot 2 \cdot \pi} = 2.03^\circ \text{ — для шпинделя нижнего валка.}$$

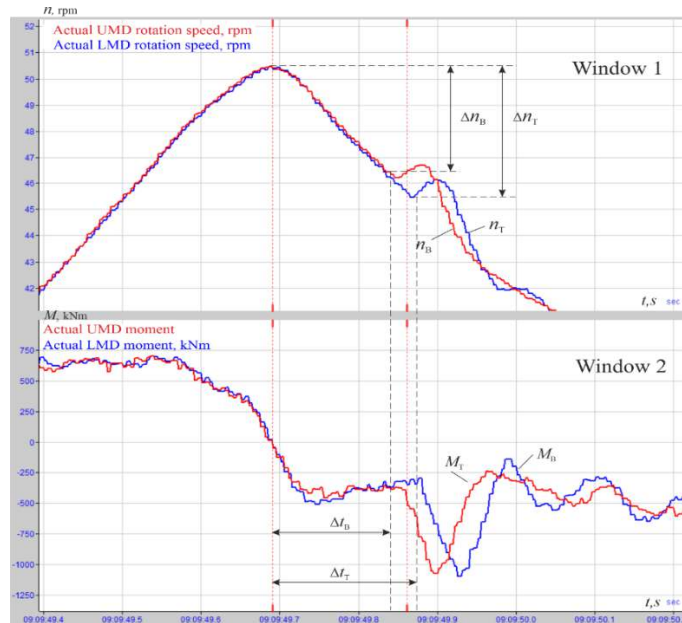


Рисунок 5.13 – Осциллограммы динамических режимов при управлении от ПЛК

Здесь коэффициент 9,55 – это величина обратная 0,1047 для перевода размерности из об/мин в рад/с; отношение $180/\pi$ обеспечивает перевод измеренного угла из радиан в градусы.

Таким образом, угловые зазоры отличаются на $0,39^\circ$ или на 16,1%. В [226] получены аналогичные результаты, и сделаны следующие выводы:

- при одинаковых угловых зазорах амплитуды моментов для верхнего и нижнего шпинделей совпадают;
- при различии углов на $0,5^\circ$ разница амплитуд составляет 27%.

Это подтверждает вывод о существенном влиянии величин зазора на переходные процессы моментов двигателя и упругих моментов на шпинделе. Так как электропривод в режиме ударного приложения нагрузки отличается повышенной колебательностью (перерегулирование момента при стандартной

настройке составляет 65%), дополнительное увеличение момента при выборе зазоров нежелательно. Это подтверждает необходимость создания алгоритмов управления, при которых зазоры в передачах перед ударным приложением нагрузки будут полностью закрыты.

5.3.4. Обсуждение результатов

Осциллограммы, представленные на рис. 5.10, получены при тестовом воздействии – при подаче на вход виртуальной модели «треугольного» сигнала задания скорости. Проверка адекватности выполнялась путем вычислений углового зазора по длине дуги, измеренной при повороте вала непосредственно на стане. Для этого были поставлены метки на головке шпинделя и трефе вала в позиции вала относительно шпинделя, показанной на рис. 5.9, б. В этом случае метки совпадают и угловой зазор равен нулю. Далее выполнялся плавный поворот шпинделя против часовой стрелки до упора (рис. 5.9, в) либо в противоположном направлении (рис. 5.9, а). После этого наносились новые метки; по разнице между метками на поверхности головки шпинделя вычислялись длина окружности L и по ней угловой зазор (в радианах) согласно формуле:

$$\varphi = \frac{L}{R}.$$

После перевода в градусы:

$$\varphi = \frac{L \cdot 180}{R \cdot \pi}$$

При реальном радиусе $R=0,65$ м углу в 1° соответствует дуга $L=11,34$ мм, что достаточно точно измеряется гибкой лентой. Результаты замеров при поворотах на разные углы (при разном износе шпиндельных соединений) показали погрешность в пределах 5–7%. Это объясняется сложностью замеров в «далеко не комфортных» условиях (вблизи клетки), но подтверждает приемлемую точность результатов.

С использованием разработанного наблюдателя был проведен длительный эксперимент по оценке влияния величины углового зазора на динамические моменты двигателя и упругого момента на шпинделях. Анализировались

результаты в течение более 1,5 лет эксплуатации в ходе которой была осуществлена замена шпинделей ВГП и НГП. Осредненные результаты представлены на рис. 5.14. Из них следует, что аппроксимирующие зависимости имеют одинаковые углы наклона, коэффициент наклона равен 4 %/градус или 20 кН·м /градус.

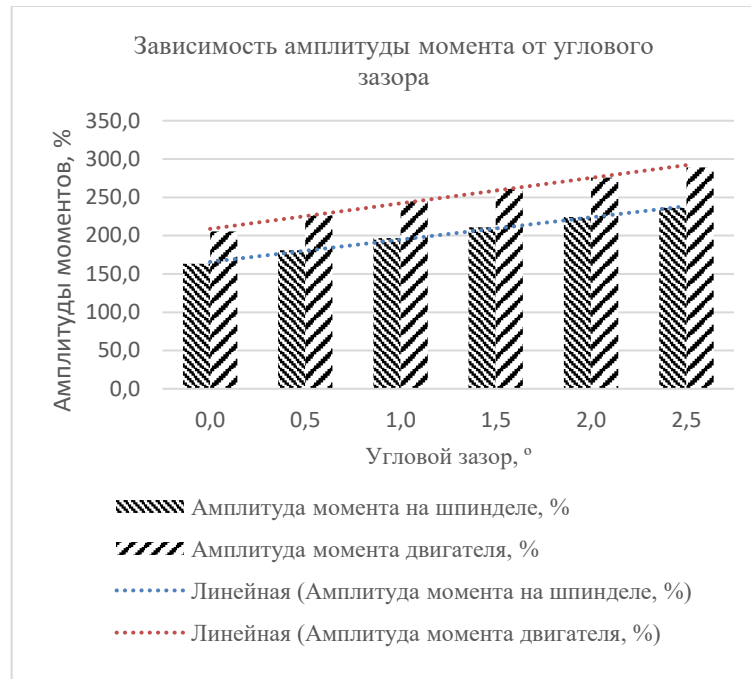


Рисунок 5.14 – Осредненные амплитудные значения момента двигателя и упругого момента на шпинделе в режиме захвата раскатов валками

В результате восстановления угловых зазоров сделан вывод, что их средние значения совпадают с фактическими. Погрешность не превышает 7%, что является допустимым для промышленных электромеханических систем. Поэтому точность результатов измерения, обеспечиваемая разработанной системой на основе наблюдателя, является приемлемой. Соответственно эта система может быть применена для измерения зазора и упругого момента при любом сортаменте прокатываемых листов.

Вместе с тем, диаграммы, представленные на рис. 5.14, подтверждают большие амплитуды моментов. При угловом зазоре 2,5° они достигают практически 300% установившегося значения, что не является допустимым. Разработанный цифровой двойник рекомендуется для использования при настройке алгоритмов управления, обеспечивающих снижение динамических нагрузок

ВГП и НГП при ударном приложении нагрузки. С этой целью разработаны следующие технические решения:

1. Алгоритмы, обеспечивающие захват металла валками при замкнутых угловых зазорах. Это достигается за счет захвата металла в режиме ускорения электропривода [286, 287].

2. Алгоритм управления с предварительным разгоном и замедлением двигателей ВГП и НГП после входа раската в клеть [167, 168]. Это обеспечивает ограничение составляющей момента, обусловленной упругими свойствами вала шпинделя, исследованной в [227].

Результаты промышленного внедрения этих алгоритмов подтвердили эффективное снижение динамических нагрузок. Определены направления их совершенствования, для реализации которых необходим мониторинг угловых зазоров. Это является одним из направлений применения разработанного цифрового наблюдателя.

5.4. Разработка наблюдателя теплового состояния двигателя на основе четырехмассовой тепловой модели

5.4.1. Методика определения температуры обмоток и железа статора и ротора

При разработке наблюдателя теплового состояния двигателя применена методика виртуального ввода в эксплуатацию, обоснованная в [9] и рассмотренная в предыдущем разделе. Суть методики заключается в симуляции процессов на модели с последующей виртуальной настройкой на объекте с использованием аппаратного моделирования в цикле HiL. Методика предусматривает разработку имитационной модели в программах Matlab Simulink либо Simscape с последующим переносом в программное обеспечение PLC. Для обмена информацией с объектом осуществляется экспорт данных из системы архивации сигналов, входящей в информационно-измерительную систему iBaPDA, установленную на стане [288]. Далее на этапе виртуального ввода в эксплуатацию наблюдателя выполняется подключение ПЛК к физическому

объекту. Осуществляется коррекция вычислительных алгоритмов, уточняются параметры настройки.

Ниже представлена методика определения температур обмоток и железа статора и ротора явнополюсного синхронного двигателя с водяным охлаждением. Она применима как для восстановления температур в on-line режиме, так и для обработки заранее сформированных массивов электрических параметров двигателя, влияющих на его температуру.

Методика включает следующие позиции:

1. Считывание данных, характеризующих тепловое состояние двигателя, полученных в результате прямых измерений и сохраняемых в архиве системы iBaPDA. При необходимости, сглаживание и осреднение данных с использованием алгоритмов статистической обработки.

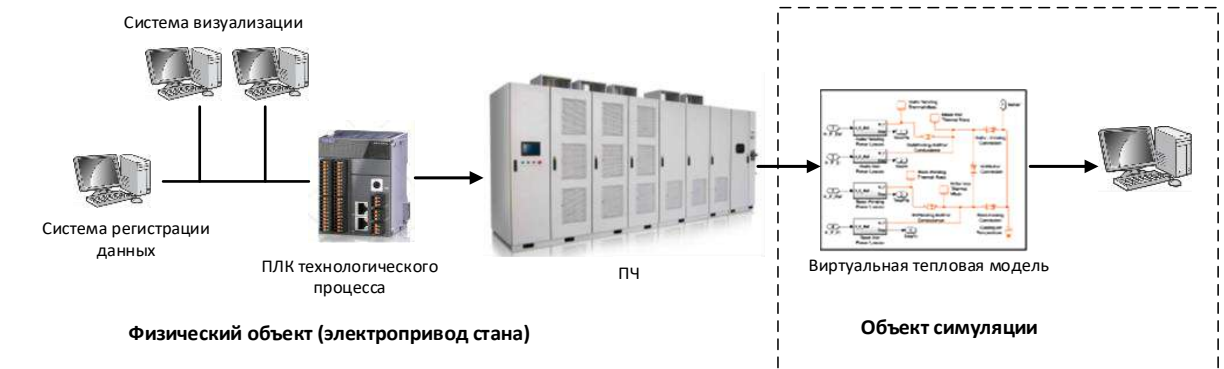
2. Экспорт данных из системы в файл программы Matlab. Настройку и тестирование алгоритмов восстановления температур отдельных масс четырехмассовой модели с использованием моделирования НПЛ.

3. Восстановление тепловых параметров для заданного интервала времени. Поскольку нагрев двигателя представляет собой длительный процесс, рекомендуются следующие интервалы: все проходы черновой либо чистовой прокатки, полный цикл, несколько циклов.

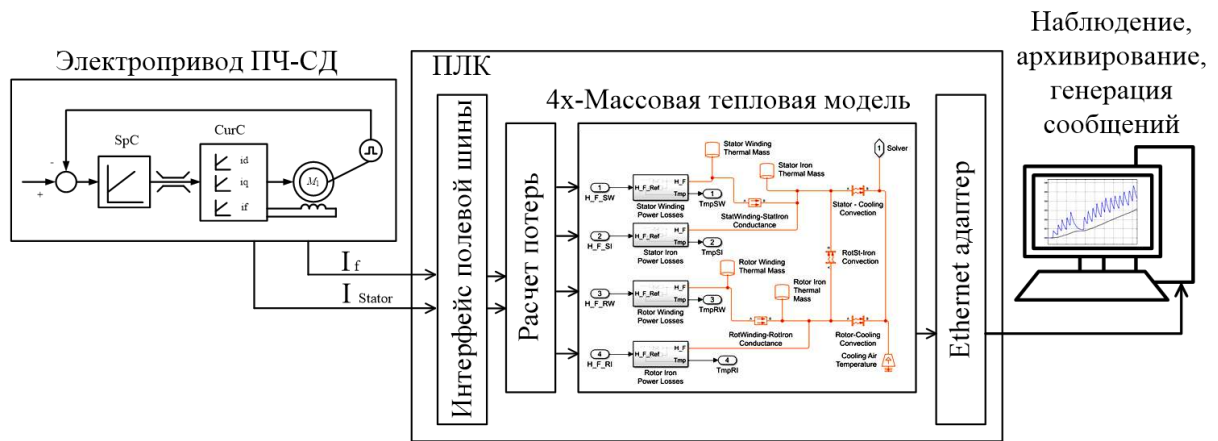
4. Валидация результатов путем сравнения с данными, полученными путем прямых измерений температуры отдельных масс непосредственно на двигателе. Осреднение результатов и сравнение с допустимыми значениями в соответствии с классом изоляции обмоток.

Для тестирования и верификации алгоритма модели применено моделирование НПЛ [289]. Его поясняет рис. 5.15, а, где показано размещение объекта симуляции на отдельном вычислительном устройстве [128]. Это удобно для настройки вычислительного алгоритма при применении сложных виртуальных моделей, обеспечивающих высокую точность симуляции процессов. Структура наблюдателя теплового состояния представлена на рис. 5.15, б. Он разработан на основе четырехмассовой модели нагрева, рассматриваемой

ниже. На входы виртуальной модели в Matlab подаются с фиксированным шагом измеренные (либо заранее записанные), координаты электропривода, определяющие его тепловое состояние, – это токи статора и ротора.



а



б

Рисунок 5.15 – Структура, поясняющая подход НПЛ для настройки наблюдателя (а), и структура наблюдателя теплового состояния двигателя (б)

Далее настроенная тепловая модель переносится в структуру ПЛК клетки, и осуществляется экспорт данных из системы *ibaPDA* в файл, который импортируется в *Matlab* (рис. 5.16). После этого разработанный наблюдатель используется для контроля теплового состояния двигателя непосредственно в процессе прокатки. Аналогичный подход использован в предыдущем разделе при виртуальном вводе в эксплуатацию нескольких технологических узлов. Также он применен при отладке наблюдателей упругого момента на валах шпинделей [168, 286] и наблюдателя углового зазора в шпиндельных соединениях клетки стана 5000 [285].

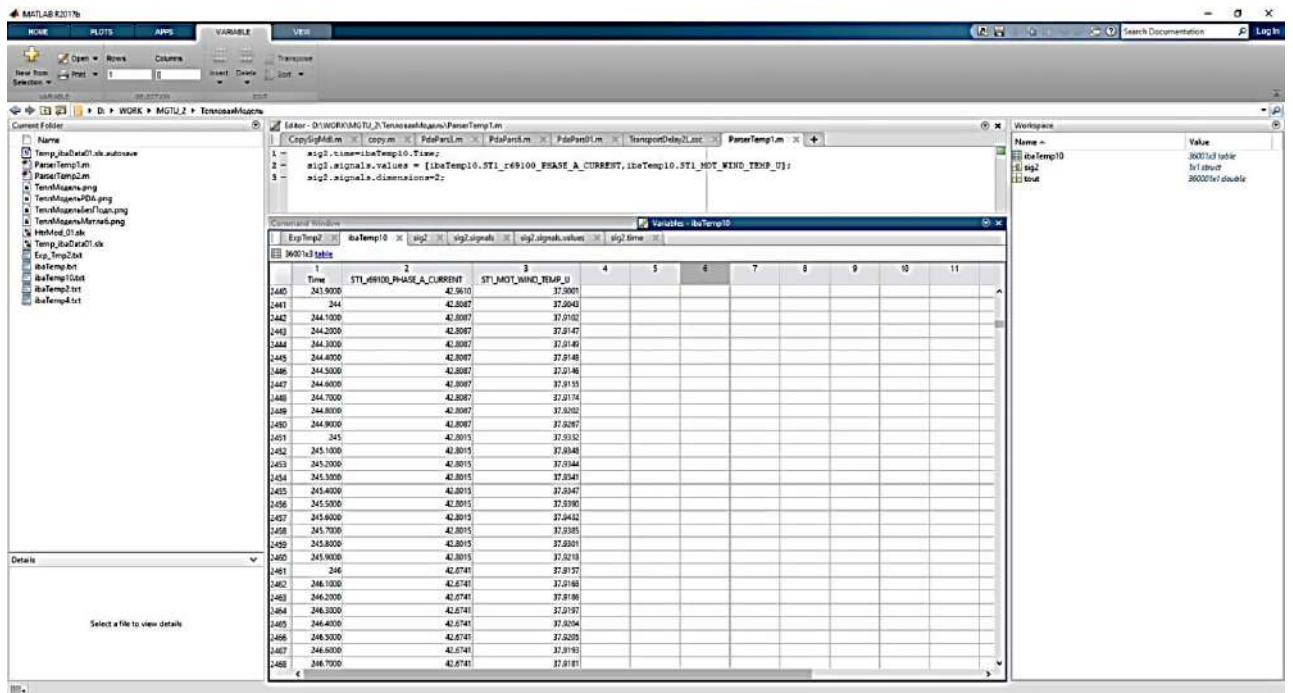


Рисунок 5.16 – Экран, демонстрирующий экспорт данных из системы IbaPDA в Matlab

В структурах, представленных на рис. 5.15, схематично показана универсальная тепловая модель, разработанная на основе доменов Simscape Thermal Models. Аналогичные тепловые модели рассматриваются в [290], где приведены базовые термоблоки и методы моделирования. Доменные объекты классифицированы по категориям:

- термические элементы – это тепловые «строительные блоки», такие как тепловая масса, различные блоки теплопередачи;
- тепловые датчики, к ним относятся блоки датчиков температуры и расхода тепла;
- тепловые источники – блоки источников температуры и скорости теплового потока;
- тепловые системы – модульные структуры, являющиеся примерами тепловых систем.

Тепловые библиотеки содержат блоки для теплового домена, организованные в элементы, источники и датчики. Сочетание этих блоков позволяет получить необходимую тепловую модель и исследовать физические процессы.

Также рекомендовано использование этих блоков совместно с блоками из других библиотек Foundation для моделирования многодоменных физических систем.

На основе упомянутых блоков с использованием вычислительных функций строятся многомассовые тепловые модели. В документации Simscape Thermal Models упоминаются семимассовая и девятимассовая модели. В [291] рассмотрена семимассовая тепловая цепь двигателя с сосредоточенными параметрами, представлены структура, описание модели и результаты моделирования. В ней реализованы модули нагрева обмотки и железа ротора и статора, подшипников, фланца и кожуха машины. Для этой модели тепловая цепь двигателя состоит из теплопроводностей, тепловых масс и блоков конвективного теплообмена, которые воспроизводят тепловые пути в частях двигателя. Двигатель обменивается теплом с атмосферой через контакты корпус-атмосфера, фланец-атмосфера и задняя пластина-атмосфера. В этом же источнике упоминается, что при необходимости можно перейти к девятимассовой модели, выделив отдельно вал двигателя и станину.

Однако использование семимассовой и девятимассовой моделей затруднено сложностью определения их параметров: масс перечисленных компонентов, теплоемкостей материала каждой массы и других координат, входящих в модели. К тому же информация, выдаваемая такими моделями, для двигателей, находящихся в эксплуатации, является избыточной. Расчет температуры фланца, подшипниковых пластин и т.д. важен при разработке и проектировании электрических машин, но для оценки текущего состояния двигателя в производственных условиях неактуален. Также представляет сложности валидация сложных тепловых моделей, поскольку потребует контроля температуры в точках конструкции, доступ к которым ограничен. Вследствие указанных недостатков целесообразна разработка 4-х массовой модели, которая принята к исполнению и рассматривается ниже.

5.4.2. Разработка четырехмассовой тепловой модели

Разработка тепловой модели (виртуального датчика температуры) на базе доменов Simscape Thermal Models обусловлена следующими преимуществами:

- простотой и наглядностью составляемой модели;
- удобством ее привязки к разработанным моделям процесса прокатки и к актуальным значениям координат, измеряемых на реальном объекте (токов, напряжений, скоростей).

Структура модели показана на рис. 5.17 информация об отдельных термальных массах, использованных в ней, приведена в таблице 5.4 [128].

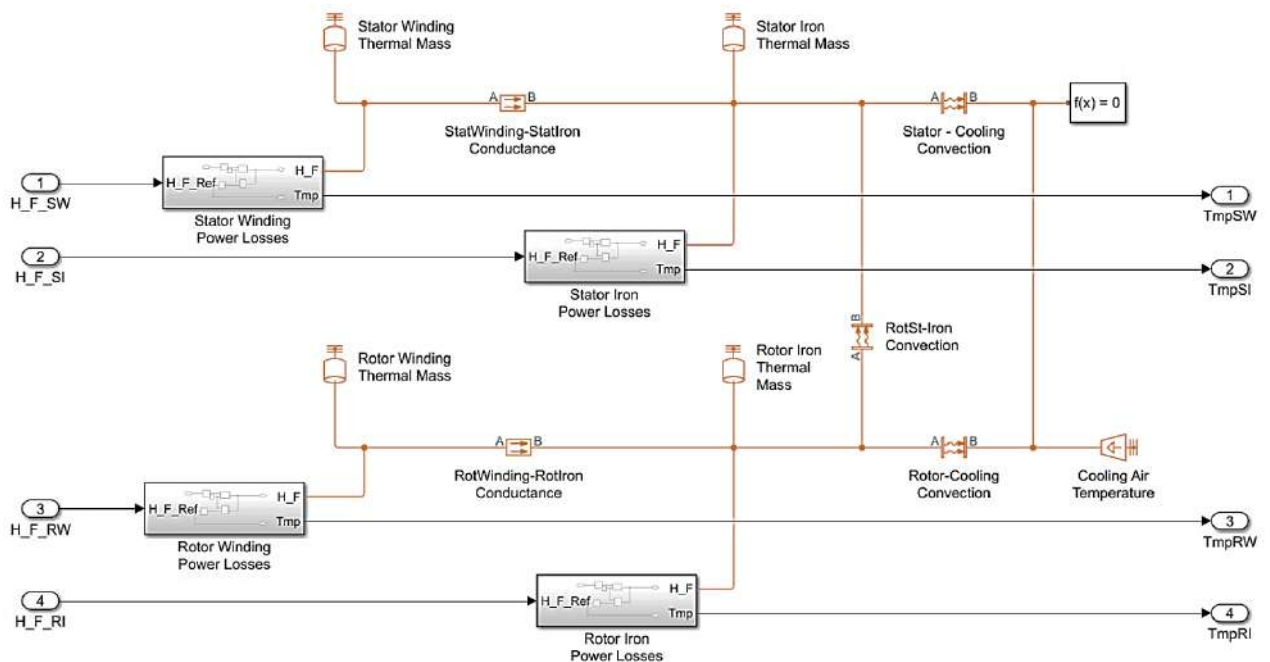



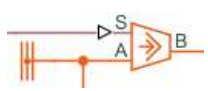




Рисунок 5.17 – Схема четырехмассовой тепловой модели двигателя

Модель содержит 4 массы: обмотки статора и ротора, железо статора и ротора, представленные в виде следующих подсистем:

1. Система передачи теплового потока (тепловыделения в обмотках и железе) (рис. 5.18, а). Каждый блок представляет собой структуру, показанную на рис. 5.18, б.

Таблица 5.4 – Термальные массы пакета Simscape Thermal Models, использованные при разработке модели

Наименование	Обозначение	Зависимость	Примечание
Термальная масса (обмотки статора, ротора и железа статора и ротора) Thermal Mass		$Q = c \cdot m \frac{dT}{dt},$	где Q – тепловой поток; c – удельная теплоемкость материала массы; m – масса; T – температура; t – время.
Блок описания теплопроводности		$Q = k_1 \frac{A}{D} (T_A - T_B)$	где Q – тепловой поток в Вт; k_1 – тепловая проводимость материала между массами (изоляции), Вт/(м·°K); A – площадь, через которую осуществляется теплопередача; D – толщина слоя, через который осуществляется теплопередача; T_A – температура слоя A (массы 1), °K; T_B – температура слоя B (массы 2), °K.
Блок описания конвекции		$Q = k_2 A (T_A - T_B)$	где k_2 – коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м·°K).
Блок задания управляемой извне мощности, подводимой к массе		–	Например, нагрев от теплового действия тока в обмотке или выделение мощности в железе.
Тепловое сопротивление Thermal resistance		$R \cdot Q = \Delta T;$ $R = \frac{D}{k \cdot A} = \frac{1}{h \cdot A} =$ $= \frac{1}{r \cdot A (T_A^2 + T_B^2) (T_A + T_B)}$	где R – тепловое сопротивление; Q – скорость теплового потока; ΔT – разность температур между слоями; D – толщина материала, то есть расстояние между слоями; A – площадь, нормальная направлению теплового потока; k – теплопроводность материала; h – коэффициент конвективной теплопередачи; r – коэффициент излучения; T_A и T_B – температуры в портах A и B соответственно.
Блок определения температуры массы Thermal Sensors		–	T – измерение температуры, физический сигнал, °K; A – вход датчика тепловой; B – тепловой выход датчика. Измеренная температура $T = T_A - T_B.$

2. Выделение тепла в обмотке при протекании тока обеспечивается путем вычислений по выражению:

$$P = I^2 R_0 (1 + \alpha (T_a - T_0)), \quad (5.6)$$

где P – мощность, выделяемая в обмотке;

R_0 – сопротивление при температуре T_0 окружающей среды;

T_a – актуальная температура обмотки;

α – температурный коэффициент сопротивления материала обмотки, Вт/(м·°K);

I – ток, протекающий через обмотку.

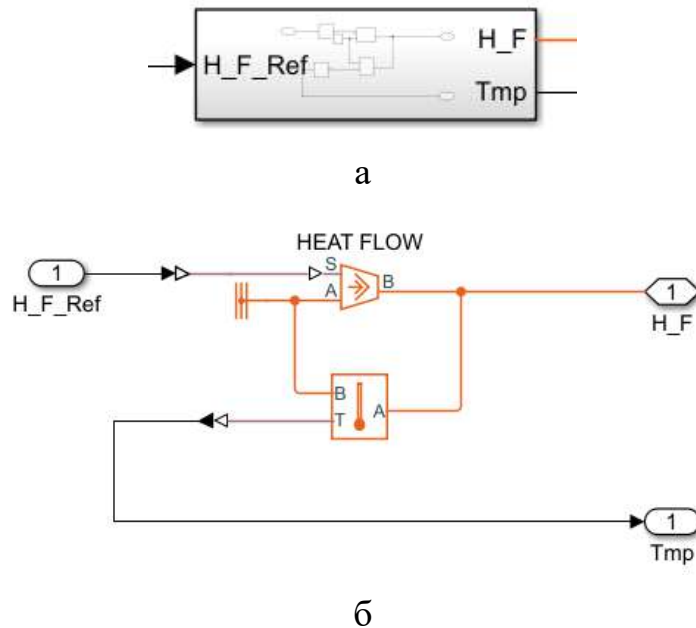


Рисунок 5.18 – Блок (а) и структура (б) модели передачи теплового потока

3. Выделение мощности в железе статора. Потери в стали статора синхронного двигателя при переменных частоте и потоке определяются по формуле [292]:

$$\Delta P_{st1} = \Delta P_{st1Nom} \left(\frac{F}{F_{Nom}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1Nom}} \right)^m, \quad (5.7)$$

где ΔP_{st1Nom} – номинальное значение потерь в стали статора;

F_{Nom} , F – номинальный и фактический потоки;

f_{1Nom} – номинальная частота тока статора;

f_1 – актуальная частота тока статора;

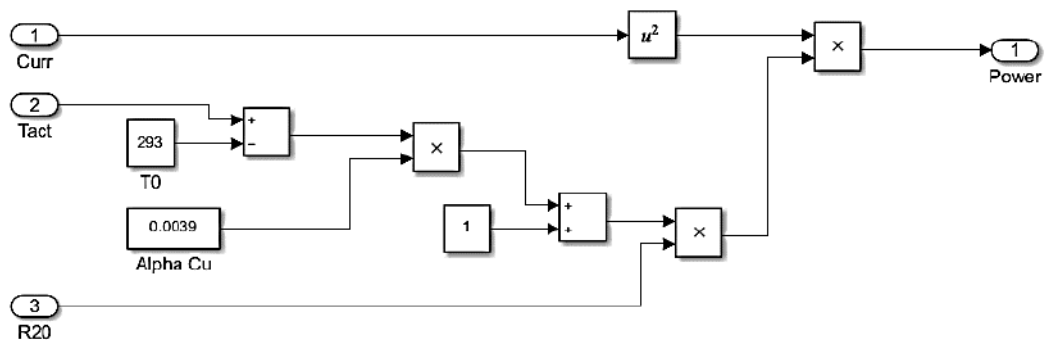
m – показатель степени, принимающий значение 1.3–1.5 в зависимости от сортамента стали.

Выражение (5.6) реализуется в модели (рис. 5.19, а). Общая структура тепловой модели двигателя представлена на рис. 5.19, б, ее параметры приведены в табл. 5.5.

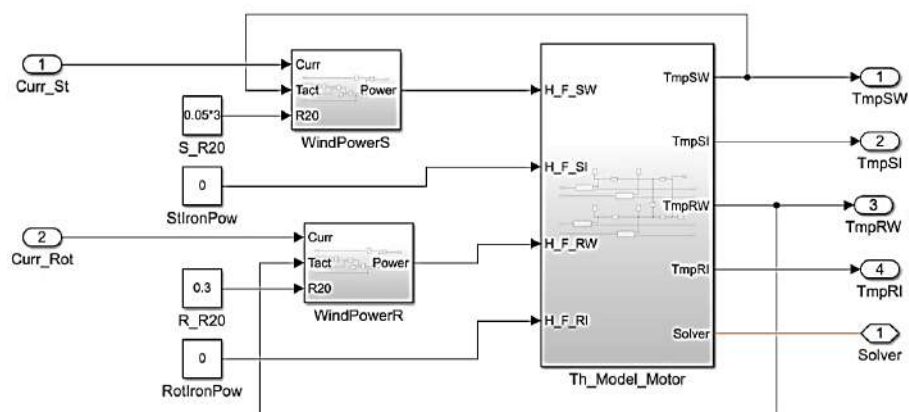
Таблица 5.5 – Параметры тепловой модели

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. измерения
Масса железа статора	m_2	70000	кг
Масса железа ротора	m_4	90000	кг
Масса обмотки статора	m_1	5000	кг
Масса обмотки ротора	m_3	2000	кг
Теплоемкость обмотки статора	C_1	385	Дж/(кг·°K)
Теплоемкость обмотки ротора	C_3	385	Дж/(кг·°K)
Теплоемкость железа статора	C_2	447	Дж/(кг·°K)
Теплоемкость железа ротора	C_4	447	Дж/(кг·°K)
Площадь контакта обмотки и железа статора	A_{11}	3	м ²
Площадь контакта обмотки и железа ротора	A_{12}	1	м ²
Коэффициент теплопередачи обмотки статора – железа статора	K_{11}	200	Вт/(м·°K)
Коэффициент теплопередачи обмотки ротора – железа ротора	K_{12}	600	Вт/(м·°K)
Площадь охлаждения статора	A_{21}	10	м ²
Площадь охлаждения ротора	A_{22}	4	м ²
Коэффициент теплосъема со статора	K_{21}	1500	Вт/(м·°K)
Коэффициент теплосъема с ротора	K_{22}	1500	Вт/(м·°K)
Электр. сопротивление обмотки статора	R_0 статор	0.07	Ом
Электр. сопротивление обмотки ротора	R_0 ротор	0.3	Ом
Темп. коэф. сопротивления обмоток	α	0.0043	1/°K

С использованием рассмотренных структур и тепловых параметров разработана модель нагрева двух двигателей в пакете Simulink, приведенная на рис. 5.20. В ней тепловые модели представлены блоками Н_М1 и Н_М2, остальные элементы являются общепринятыми для программ Matlab Simulink.



a



6

Рисунок 5.19. Структуры модели нагрева обмотки (а) и четырехмассовой тепловой модели двигателя (б)

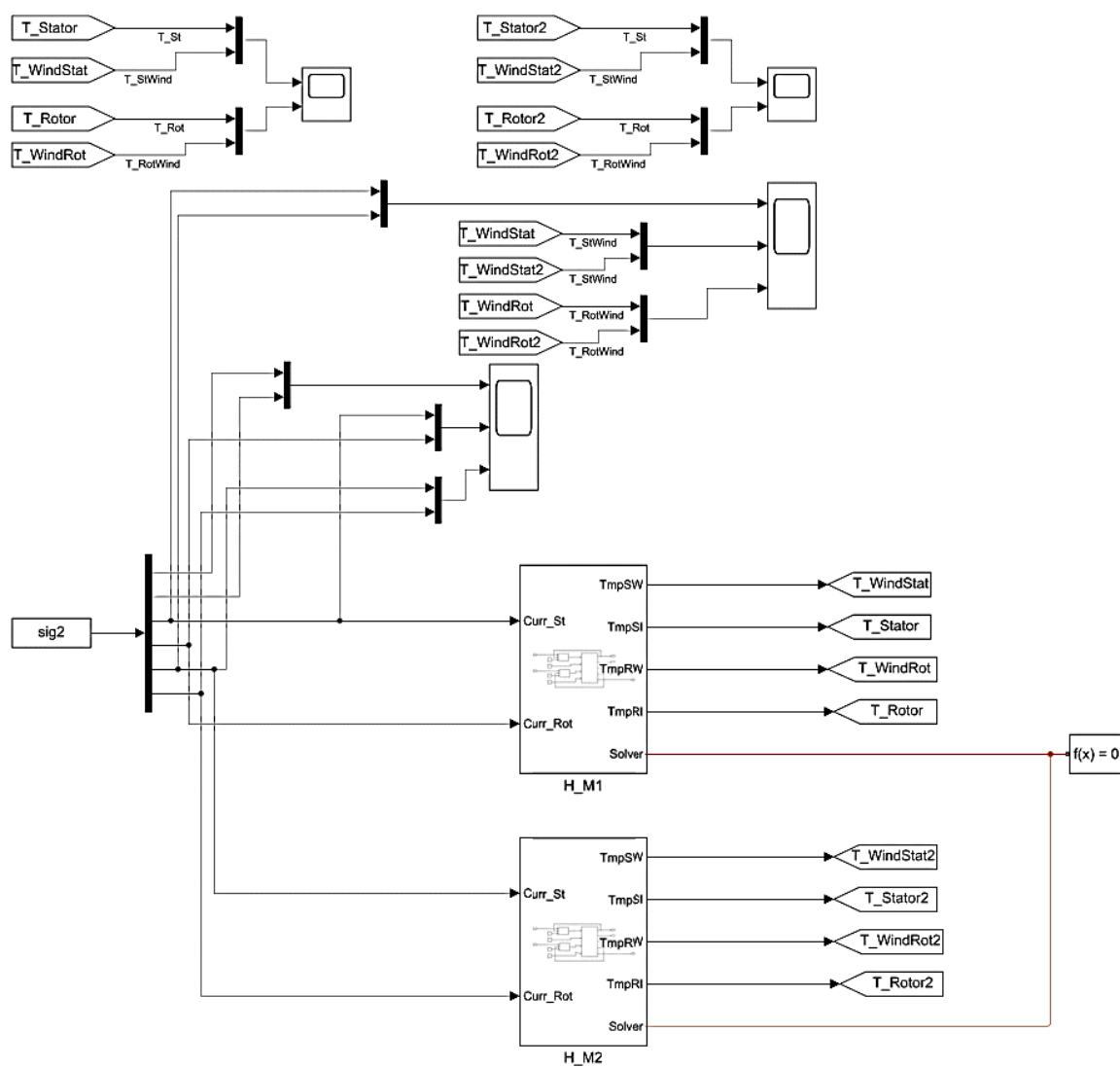


Рисунок 5.20 – Структура тепловой модели двух двигателей прокатной клетки в Matlab Simulink

В соответствии с поставленными задачами на следующем этапе выполняются анализ нагрева отдельных масс и проверка адекватности результатов восстановления их температур.

5.5. Валидация результатов

С использованием разработанного наблюдателя выполнен анализ тепловых режимов двигателей по массивам, соответствующим осциллограммам, представленным на рис. 1.9, а. Результаты приведены на рис. 5.21, а и 5.21, б для двигателей верхнего и нижнего валков, соответственно. На них построены графики температур отдельных масс 4-х массовой системы. В п. 1.9.2 было сказано, что они соответствуют прокатке с большой заданной «лыжей», поэтому средние нагрузки в проходах отличаются. Соответственно различаются температуры за анализируемый (относительно короткий) интервал времени.

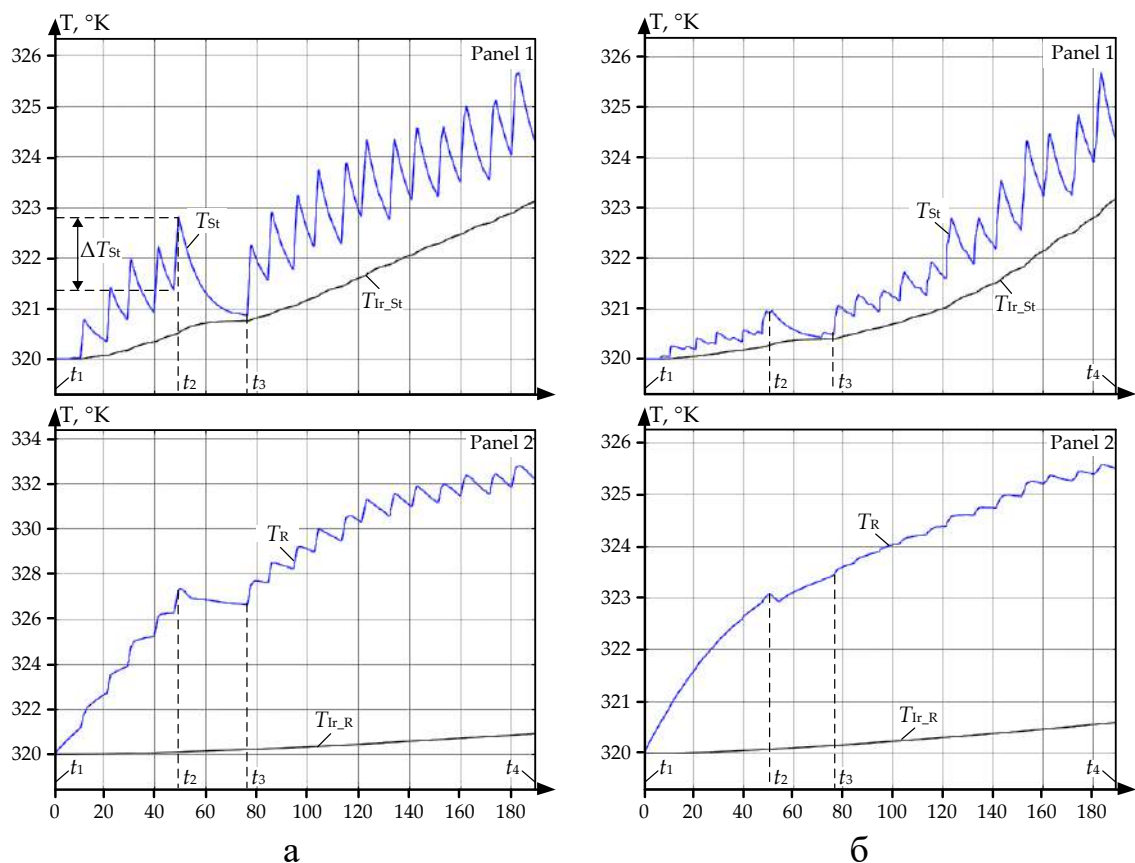


Рисунок 5.21 – Графики температур масс двигателей UMD (а) и LMD (б), восстановленных наблюдателем: окна 1 – температура обмотки статора (T_{St}) и температура железа статора (T_{Ir_St}); окна 2 – температура обмотки ротора (T_R) и температура железа ротора (T_{Ir_R}), ($^\circ\text{K}$)

На рис. 5.22 приведены фотографии исследуемого двигателя со снятым кожухом. Представлены общий вид статора и ротора (рис. 5.22, а) и точки за- меров температуры пирометром (рис. 5.22, б). В позициях Т1, Т3, Т4 измеря- ются температуры обмотки статора, обмотки ротора и железа ротора. Точка замера температуры железа статора на фотографии не указана, поскольку же- леза статора просто не видно.

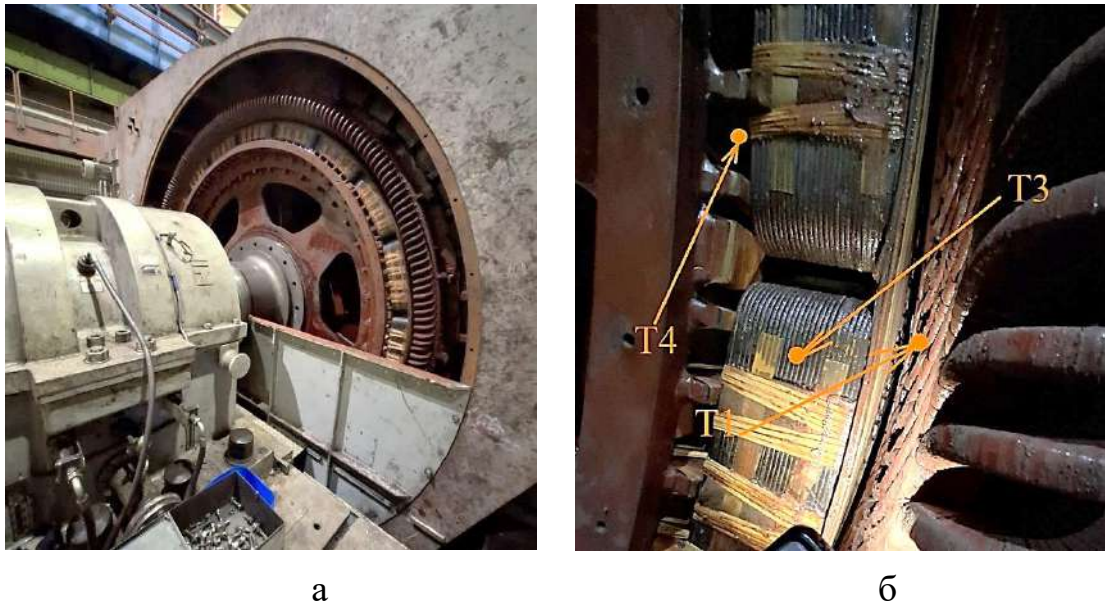


Рисунок 5.22 – Фотографии двигателя VEM DMMYZ 3867-20V со снятым кожухом (а) и обмоток (б) с указанием позиций контроля температуры

Далее проведено сравнение температур в фиксированные моменты вре- мени, обозначенные на рис. 5.21, а, с результатами измерений в контрольных точках, показанных на рис. 5.22, б. Значения температуры, зафиксированные во время паузы в момент t_3 , приведены в первой строке табл. 5.5. Результаты прямых замеров температуры, выполненных лазерным пирометром в указан- ных точках, приведены в строке 2. Точка Т2, в которой измерялась темпера- тура железа статора, в ракурсе фотографии не видна, однако замеры темпера- туры в ней выполнялись, и результат приведен в соответствующей графе таб- лицы. В строке 3 приведены значения относительной разницы (погрешности) результатов вычислений температур наблюдателем. Максимальное отличие восстановленных и измеренных значений температур составляет 8,4%. По- грешность можно объяснить следующими причинами:

– замеры значений в строке 2 и фиксация температур на осциллограммах производились хотя и в одинаковых условиях, но в разное время, поэтому следует учитывать погрешность, вызванную естественным изменением температуры двигателя;

– выполнить замеры с абсолютной точностью с помощью пирометра затруднительно в связи со сложным доступом к контрольным точкам. Это обусловлено сложной конструкцией двигателя и обеспечением безопасности при выполнении работ.

Таблица 5.5 – Значения температуры в контрольных точках, зафиксированные с помощью наблюдателя в момент времени t_3 , и измеренные пирометром, °C

Средство измерения	Объект измерения			
	Обмотка статора (T1)	Железо статора (T2)	Обмотка ротора (T3)	Железо ротора (T4)
Наблюдатель	47,5	47,5	53,5	47,1
Пирометр	45,0	44,5	49,0	45,5
Погрешность, %	5,2	6,3	8,4	3,6

С учетом сказанного можно утверждать, что результаты восстановления температуры отдельных масс двигателя являются адекватными результатам физических замеров. Сравнение с допустимыми значениями температур, представленными в табл. 1.10, показывает, что при прокатке анализируемого сортамента за исследуемый интервал времени температура значительно ниже предельных значений.

Кроме того, из анализа графиков на рис. 5.22, а следуют выводы:

1. График T_{St} температуры обмотки статора является результатом наложения двух составляющих: относительно медленного нагрева, происходящего во всем интервале времени (по сути, его отслеживает график T_{Ir_St} температуры железа статора), и быстрых изменений (колебаний температуры) по проходам. Во время прокатки (например, в интервале $t_1 - t_2$) происходит нагрев двигателя, а во время паузы (в интервале $t_3 - t_3$) – его охлаждение.

2. Температура железа статора T_{Ir_St} и ротора T_{Ir_R} в момент t_3 ниже температуры соответствующих обмоток на 1–6°C и находится в пределах 317–321°C (44–48°C). Тепловое состояние двигателя характеризует температура статора,

которая примерно в 3 раза ниже значения, допустимого для изоляции класса F (155°C в табл. 1).

3. Приведенные графики дают косвенное подтверждение, что температура зависит не только от нагрузки, но и от скорости [88, 89]. Однако для установленных тихоходных двигателей при больших нагрузках влияние изменений скорости мало по сравнению с влиянием токов нагрузки.

4. Максимальный диапазон ΔT_{st} колебаний температуры статора на графике в окне 1 составляет около $1,5^{\circ}\text{C}$. Колебания температуры соответствуют графику проходов (рис. 1.9, а). Это подтверждает вывод, сделанный в [57]: изменение диапазона колебаний момента двигателя оказывает большее влияние на температуру статора (рис. 5.22, а), но меньшее влияние на температуру ротора (рис. 5.22, б). При этом изменения тока и скорости вызывают изменения потерь в статоре и роторе.

Представленные результаты являются важными для оценки теплового состояния двигателя, поскольку разработанная ранее двухмассовая тепловая модель не позволяла получить подобную информацию. Литературный обзор показал, что исследования нагрева отдельных частей двигателя по параметрам, измеренным в on-line режиме, в ранее опубликованных источниках не встречаются.

5.6. Промышленные исследования

5.6.1. Анализ температуры обмоток двигателей ВГП и НГП

На рис. 5.23, а приведены осциллограммы температур обмоток двигателей за цикл прокатки, также восстановленные по массивам данных, соответствующих осциллограммам на рис. 1.9, а [128]. Черным цветом выделены графики для ВГП (обозначения с индексом «U»), синим – для НГП (индекс «L»). Как было отмечено, они получены при прокатке с большой заданной «лыжей», поэтому осциллограммы токов статоров I_{st_U} и I_{st_L} этих двигателей в окне 1 на рис. 5.23, а отличаются. На рис. 5.23, б приведены аналогичные зависимости, построенные по массивам, соответствующим рис. 1.9, б., т.е. прокатке без «лыжи». Для этого случая осциллограммы токов I_{st_U} и I_{st_L} совпадают.

Значения температуры в фиксированные моменты времени, показанные на рис. 5.23, а, представлены в таблице 5.6.

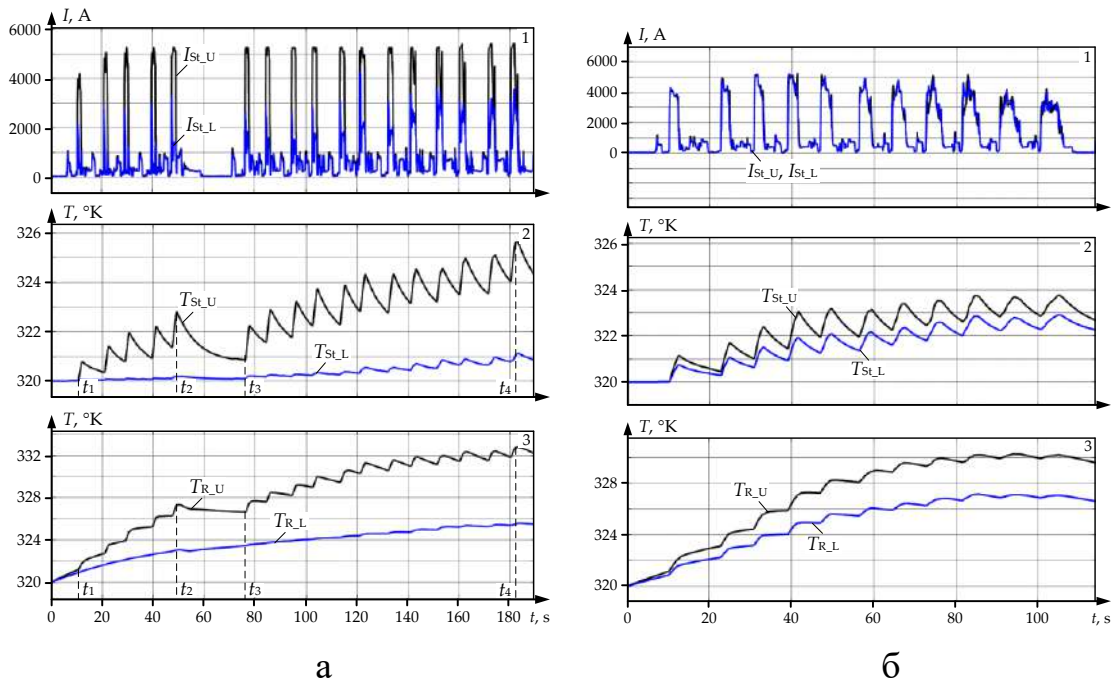


Рисунок 5.23 – Осциллограммы токов статоров I_{St_U} и I_{St_L} (окна 1), температуры обмоток статоров T_{St_U} и T_{St_L} (окна 2) и роторов T_{R_U} и T_{R_L} (окна 3) двигателей ВГП и НГП при прокатке с «лыжей» 10% (а) и без «лыжи» (б)

Таблица 5.6 – Температура статоров в фиксированные моменты времени для графиков на рисунке 5.23, а

Момент времени	Температура							
	двигатель ВГП				двигатель НГП			
	T_{St_U}		T_{R_U}		T_{St_L}		T_{R_L}	
Размерность температуры	°K	°C	°K	°C	°K	°C	°K	°C
t_1	320	47	321	48	320	47	321	48
t_2	322,8	49,8	321,2	54,2	320	47	323,1	50,1
t_3	320,9	47,9	326,8	53,8	320	47	323,6	50,6
t_4	325,7	52,7	332,8	59,8	321	48	325,5	52,5

Анализ осциллограмм и данных таблицы позволил сделать следующие выводы:

1. Обмотки ротора в течение всего цикла прокатки более подвержены нагреву по сравнению с обмотками статора. На обоих рисунках в течение всего

периода времени $T_{R_U} > T_{St_U}$ и $T_{R_L} > T_{St_L}$. При этом различие температур невелико и составляет 1–7°C. Это подтверждает справедливость вывода, сделанного в [293]: *«температурное соотношение между статором и ротором остается относительно постоянным, что подчеркивает фундаментальную природу их теплового взаимодействия»*.

2. Предположения о влиянии токов нагрузки на нагрев двигателей, сделанные по результатам анализа осциллограмм на рис. 1.9, подтверждаются приведенными графиками температуры. При разных нагрузках двигателей ВГП и НГП (рис. 5.23, а) температура обмотки статора T_{St_U} двигателя ВГП в конце цикла прокатки (в момент t_4) выше температуры T_{St_L} двигателя НГП примерно на 5° (325,7°K и 321°K). При одинаковых нагрузках (рис. 5.23, б) температуры статоров отличаются примерно на 0,5°C (в табл. 5.6 не показаны). Значения температур роторов различаются на 2,3° (326,5 и 328,8°K).

3. Фактические значения температуры статора и ротора изменяются в диапазоне 320–333°K (47–60°C), что близко к температуре окружающей среды. Они в 2 раза ниже пределов, указанных в табл. 1.10. Это вполне объяснимо, т.к. время прокатки невелико – около 3 минут. Ниже будет показано, что при более длительном интервале времени возникает значительное увеличение температуры, что подтверждает актуальность ее контроля.

Разработанный наблюдатель температуры внедрен в эксплуатацию на стане 5000. Выполнена визуализация информации о тепловом состоянии двигателей. Для предупреждения о недопустимом нагреве предусмотрено выпадающее окно на мониторе оператора (рис. 5.24). Данное окно появляется при приближении температуры двигателей к установленным предельным значениям, кроме того, оно может быть вызвано по команде оператора.

5.6.2. Анализ температуры при прокатке двух партий заготовок

С целью обобщения результатов исследований ниже приводится анализ нагрева обмоток статоров и роторов двигателей ВГП и НГП за продолжительный интервал времени. На рис. 5.25 представлены осциллограммы токов и температур двигателей при прокатке двух партий по 5 заготовок каждая. Прокатано 10 слэбов, продолжительность эксперимента составила 1 час 10 минут.

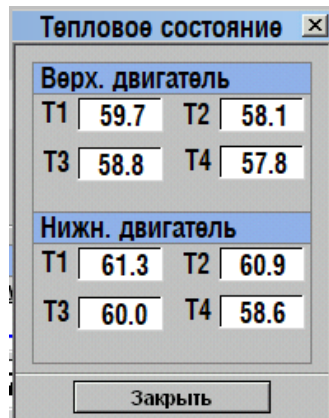


Рисунок 5.24 – Выпадающее окно на мониторе оператора стана 5000 с информацией о температуре двигателей

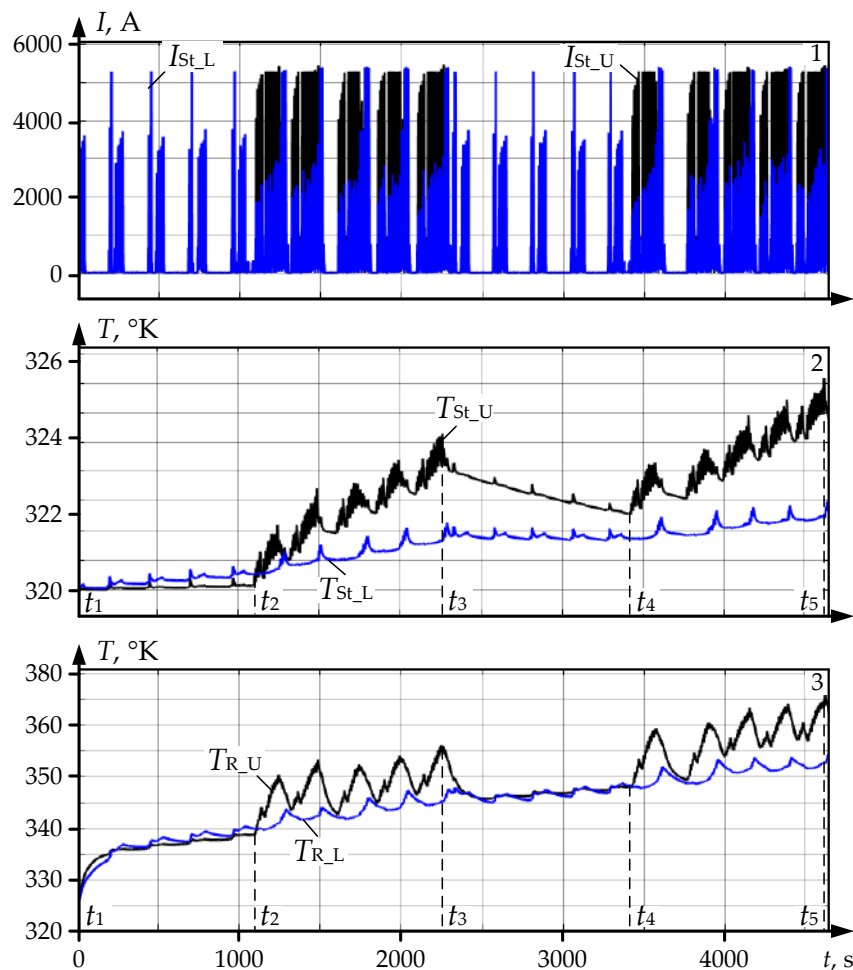


Рисунок 5.25 – Осциллограммы токов и температур обмоток двигателей ВГП и НГП при прокатке 10-и заготовок, обозначения соответствуют представленным на рис. 5.23, а: окно 1 – токи статоров I_{st_U} , I_{st_L} ; окно 2 – температуры обмоток статоров T_{st_U} и T_{st_L} ; окно 3 – температуры обмоток роторов T_{R_U} и T_{R_L}

В интервалах времени t_1-t_2 и t_3-t_4 осуществлялась последовательная прокатка первой и второй партий в черновой фазе за 7 проходов каждая. Далее в чистовой фазе в интервалах t_2-t_3 и t_4-t_5 выполнялась индивидуальная прокатка каждой заготовки за 19 проходов. Прокатка осуществлялась с большой заданной «лыжей», поэтому токи двигателей ВГП, выделенные в окне 1 черным цветом, в каждом проходе значительно превышают токи двигателя НГП, выделенные синим цветом. Значения температур обмоток статоров и роторов в фиксированные моменты времени приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Значения температуры в фиксированные моменты времени для двигателей ВГП и НГП

Момент времени	Температура, °C							
	обмоток статора				обмоток ротора			
	T_{St_U}		T_{St_L}		T_{R_U}		T_{R_L}	
Размерность температуры	°K	°C	°K	°C	°K	°C	°K	°C
t_1	330	57	330	57	325	52	325	52
t_2	330	57	333	60	338	65	340	67
t_3	351	87	339	66	356	83	345	72
t_4	343	70	339	66	348	75	348	75
t_5	372	99	340	67	371	98	355	82

Для представленных осциллограмм справедливы следующие рассуждения:

1. На стадиях черновой прокатки двигатели нагреваются не сильно. Так, в интервале t_1-t_2 температуры обмоток статора T_{St_U} и T_{St_L} (окно 2) практически постоянны и близки к 330°K (57°C). Температуры обмоток ротора T_{R_U} и T_{R_L} (окно 3) изменяются в пределах от 335°K до 340°K. В аналогичном интервале t_3-t_4 температура T_{St_L} обмотки статора НГП находится в пределах 340°K, а температура T_{St_U} обмотки статора даже снижается от 351°K до 343°K. Незначительное изменение температуры в этих интервалах времени объясняется длительными паузами, обусловленными подстуживанием раскатов на рольганге, как это сказано в п. 1.9.1.

2. В интервалах t_2-t_3 и t_4-t_5 чистовой прокатки средние значения температуры обмоток статоров ВГП и НГП возрастают существенно. В каждом проходе происходят нагрев и последующее охлаждение, при этом процессы

близки к экспоненциальным. В интервале t_2-t_3 средняя температура T_{st_U} двигателя ВГП (окно 2) увеличивается на 21° (от 330°K до 351°K), в интервале t_4-t_5 возрастает на 29° от 343°K до 372°K .

3. Аналогичные процессы нагрева происходят в обмотках роторов (окно 3). Значения температуры роторов во всем временном интервале изменяются в пределах $325-371^\circ\text{K}$ ($52-98^\circ\text{C}$) для ВГП и $325-355^\circ\text{K}$ ($52-82^\circ\text{C}$) для НГП.

4. Представленные осциллограммы подтверждают, что температуры обмоток статора и ротора ниже предельно допустимых значений, приведенных в табл. 1.10. Однако максимальная температура обмотки ротора двигателя ВГП равна 98°C , что близко к предельному значению (100°C , табл. 1.11). Максимальная температура обмотки статора равна 99°C и также приближается к зоне риска (предельное значение равно 120°C). Это подтверждает справедливость выводов:

4.1. Непрерывный контроль температуры двигателей и предупреждение о перегреве являются необходимыми.

4.2. В фиксированные моменты времени температуры обмоток статора и ротора близки по величине. Также близки величины температур железа статора и ротора. Поэтому требование непрерывного контроля температуры 4-х масс двигателя является обоснованным.

4.3. Поскольку прокатываемый сортамент относится к «тяжелым», проведенный анализ позволяет сделать вывод о возможности эксплуатации двигателей без ограничений по сортаменту. При этом должен выполняться on-line мониторинг температуры всех четырех масс каждого двигателя.

Применение разработанной четырехмассовой модели нагрева является обязательным при контроле теплового состояния двигателей с воздушно-водяным охлаждением. Это связано с тем, что при возникновении неисправностей этой системы (снижении давления жидкости либо полном отключении) железо статора и ротора может нагреваться сильнее обмотки статора. Это подтверждает необходимость on-line контроля температуры всех четырех масс электродвигателя, что обеспечивает разработанный наблюдатель.

Разработанный наблюдатель температуры имеет следующие преимущества:

- универсальность, поскольку использованы унифицированные блоки библиотеки Simscape Thermal Models;
- высокая помехоустойчивость, благодаря цифровой передаче данных наблюдатель работает даже в условиях высоких электромагнитных помех;
- отсутствие обслуживания, не подвержен износу поскольку является фрагментом программного обеспечения.

5.6.3. Результаты и перспективы внедрения

Благодаря внедрению разработанного наблюдателя температуры на стане 5000 обеспечены следующие возможности:

1. Вывод отчета о температуре отдельных масс двигателя в режиме реального времени. Они могут быть использованы для решения следующих задач:
 - для активного управления системой охлаждения;
 - при совершенствовании системы тепловой защиты;
 - для статистического анализа тенденций изменения теплового состояния двигателей.
2. Снижение затрат на техническое обслуживание и ремонты двигателей за счет своевременного предупреждения аварий. Организация оптимальных графиков профилактического обслуживания и ремонтов.
3. Возможность расширения сортамента и увеличения производительности стана за счет увеличения обжатий и скоростей прокатки при надежном тепловом контроле.

Разработанный наблюдатель теплового состояния на базе четырехмассовой тепловой модели двигателя рекомендуется для внедрения на прокатных станах различного назначения. Помимо снижения опасности перегрева и предотвращения аварийного отключения двигателей его применение обеспечит технико-экономический эффект в следующих случаях:

- при освоении новых видов сортамента прокатываемых листов либо полос;
- при оптимизации режимов прокатки существующего сортамента;
- для предупреждения аварий, вызванных ухудшением тепловых режимов;

– в составе цифровых двойников и цифровых теней при создании систем мониторинга технического состояния электромеханических систем прокатных станов.

Рекомендуется применение разработанных технических решений в электроприводах общепромышленного назначения. Достоинствами наблюдателя и четырехмассовой модели на основе блоков Simscape Thermal Models являются простота, доступность программного обеспечения, отсутствие необходимости обучения персонала. Также преимуществом является экспериментальное определение минимального количества параметров модели, в отличие от большинства известных моделей, подтвержденное в [294].

ВЫВОДЫ

1. Проведенный литературный обзор показал, что в известных наблюдателях, разработанных на основе фильтра Калмана, при восстановлении упругого момента не учитывается темп приложения нагрузки. Вместе с тем, этот фактор оказывает влияние на амплитуды момента двигателя и упругого момента на шпинделе в режиме захвата раскатов валками.

2. Разработан наблюдатель на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния (АКФ), отличительным признаком которого является добавление в вектор состояния момента нагрузки 2-й массы двухмассовой системы. Это позволяет учесть величину момента прокатки и скорость заполнения очага деформации при захвате без применения сложных вычислительных алгоритмов, реализуемых в расширенных фильтрах Калмана (ЕКФ). В результате повышается точность восстановления упругого момента.

3. Разработанный наблюдатель на основе АКФ реализован в электромеханических системах стана 5000. Входными сигналами являются скорости двигателей ВГП и НГП и моменты двигателей, которые вычисляются на основе измерений токов и напряжений двигателя.

4. Путем виртуального моделирования с использованием реальных сигналов, полученных от электроприводов стана, доказана адекватность процессов, восстановленных наблюдателем, и реальных физических процессов. В результате сравнения сигналов для сложного режима, вызванного разгоном, захватом металла и аварийным отключением двигателя, сделан вывод, что эти

сложные процессы адекватны. Это позволяет утверждать, что они будут адекватны во всех рабочих режимах.

5. В результате сравнения переходных процессов скоростей и моментов при двух значениях угловых зазоров подтверждено восстановление упругого момента с удовлетворительной точностью. Сделан вывод о существенном влиянии зазоров на амплитуду упругого момента. Коэффициент кратности при зазоре 4° превышает 1.5, что является нежелательным.

6. Разработан наблюдатель углового зазора в шпиндельных соединениях электромеханической системы «электропривод-клеть» прокатного стана. Принцип вычисления углового зазора основан на математической обработке физических параметров (скорости и электромагнитного момента) двигателя, измеряемых с заданной периодичностью. Выполняется косвенное определение зазора путем интегрирования скорости во время его замыкания. Для этого осуществляется регулирование скорости по «треугольной» тахограмме без нагрузки.

7. Проведены исследования режимов электромеханической системы клетки методом компьютерного моделирования. Подтверждена целесообразность практического использования наблюдателя. Обоснована разработка информационной системы мониторинга углового зазора на его основе. Система прошла промышленные испытания на стане 5000, в результате подтверждена эффективность предложенного алгоритма.

8. Разработан наблюдатель теплового состояния, обеспечивающий контроль температуры обмоток и железа статора и ротора. Разработана четырех-массовая модель нагрева двигателя на основе доменов библиотеки Simscape Thermal Models. С использованием моделирования HIL выполнена настройка алгоритма наблюдателя и проведено уточнение параметров модели. Реализация наблюдателя не требует сложных математических методов и вычислительных алгоритмов, что является важным при внедрении на промышленных объектах.

9. На примере двигателя реверсивной клетки стана 5000 выполнена проверка адекватности результатов восстановления температуры отдельных масс. Для этого проведено сравнение с результатами замеров в контрольных точках,

выполненных с помощью лазерного пирометра. Погрешность восстановленных значений не превышает 8,4% и является удовлетворительной. Проведенный эксперимент дает подтверждение, что модель обеспечивает достоверные результаты и позволяет восстановить температуру по данным, измеренным непосредственно в процессе прокатки.

Примечание. Анализ нагрева отдельных тепловых масс двигателей прокатного стана по данным, сформированным в процессе прокатки, выполнен впервые.

10. Дана сравнительная оценка температуры обмоток двигателей верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки за цикл прокатки при различных начальных условиях: при заданном рассогласовании скоростей 10%, необходимом для формирования «лыжи», и при одинаковых заданиях скоростей (при прокатке без «лыжи»). Сделаны следующие выводы:

- разные нагрузки двигателей за один проход и за цикл прокатки вызывают различие температур двигателей ВГП и НГП в пределах нескольких градусов;

- для обеспечения одинаковых тепловых режимов целесообразно согласование скоростей и нагрузок двигателей.

11. В результате анализа температуры обмоток за продолжительный интервал непрерывной прокатки (1 час 10 минут) подтверждено, что тепловой режим двигателя соответствует норме. Однако температура обмотки ротора двигателя ВГП приближается предельному значению (100°C). Максимальная температура обмотки статора также близка к 100°C и находится зоне риска.

12. Разработанный наблюдатель рекомендуется для внедрения на действующих прокатных станах и может быть применен в электроприводах общепромышленного назначения. Он может быть использован при совершенствовании алгоритмов управления системой воздушно-водяного охлаждения, а также при разработке системы двухступенчатой защиты двигателя. Технико-экономический эффект будет обеспечен за счет снижения аварийности производства при минимальных затратах на внедрение.

Глава 6. СИСТЕМА ОГРАНИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ УПРУГОГО МОМЕНТА

6.1. Задачи исследований

Как было отмечено в предыдущем разделе, одной из задач, для решения которой предназначены наблюдатели координат, является создание систем управления, обеспечивающих улучшение динамических показателей электроприводов. Было показано, что амплитуды момента на шпинделях клетки стана 5000 при входе раската в клетку кратно превышают установившийся момент прокатки. При больших нагрузках двигатели выходят в режим ограничения по моменту, что приводит к потере управляемости. Это приводит к снижению показателей надежности электромеханического оборудования, в частности, к поломкам головок шпинделей и лопастей валков. При нормативном сроке эксплуатации шпинделя 8 лет реальная продолжительность составляет 3–4 года. Это обуславливает актуальность разработки способов управления, обеспечивающих снижение ударных моментов в механических передачах средствами автоматизированного электропривода.

Названная проблема исследовалась многими авторами, в частности, ей посвящены известные монографии и учебные пособия Ю.М. Файнберга [295], В.Н. Выдрина [296], В.В. Веренева [297], С.Н. Кожевникова [298, 299], В.Г. Артюх [300, 301] и др. В последние годы ее решению на станах ПАО «ММК» посвящены диссертации [155, 161, 302], а также достаточно много научных публикаций, в том числе авторские публикации, ссылки на которые сделаны выше. Подробный обзор разработок представлен в [119, 155], однако эту проблему нельзя считать окончательно решенной. Для ее решения применительно к электроприводам клетки стана 5000 предложен способ управления с предварительным разгоном электропривода перед захватом раската валками и кратковременным интенсивным торможением (подтормаживанием) после захвата [155]. В дальнейшем он получил развитие в работах [119, 161].

Данный способ внедрен в электроприводах стана 5000. Технический эффект от его внедрения заключается в снижении ударов за счет предварительного замыкания угловых зазоров в шпиндельных соединениях и компенсации динамического момента при захвате за счет отрицательного момента, создаваемого при подтормаживании. Однако в процессе эксплуатации был обнаружен существенный недостаток, заключающийся в том, что уровень, до которого снижается скорость, и темп торможения устанавливаются без учета прикладываемой нагрузки и темпа ее нарастания при захвате. Это приводит к неполной компенсации динамического момента, кроме того, может вызвать нарушение скоростного режима за счет несвоевременного начала торможения [161].

Для устранения названного противоречия в ходе предварительных исследований обосновано применение адаптивного подтормаживания после захвата. Для его реализации величина, на которую снижается скорость, и темп ее снижения должны вычисляться в функции момента нагрузки и темпа его нарастания. Разработка такого способа является целью настоящего раздела. Для ее достижения поставлены следующие задачи:

1. Разработка наблюдателя упругого момента на шпинделе на основе относительного простого способа восстановления динамического момента без дифференцирования скорости и применения сложных вычислительных алгоритмов. Разрабатывается наблюдатель упругого момента на шпинделях на основе ПИ-регулятора с автоматической подстройкой.

2. Разработка способа управления электроприводом с ограничением динамического момента на основе декомпозиции упругого момента при захвате раската валками.

3. Анализ амплитуды упругого момента в режиме адаптивного подтормаживания.

4. Практическая реализация и исследования разработанного способа.

5. Разработка и апробация методики определения параметров подтормаживания (конечной скорости и темпа торможения) по критерию обеспечения минимальной амплитуды упругого момента.

6. Технические испытания на стане 5000.

Решению перечисленных задач посвящена настоящая глава.

6.2. Разработка наблюдателя упругого момента с автоматической настройкой

В качестве альтернативы наблюдателю на основе фильтра Калмана, рассмотренному в предыдущем разделе, здесь предлагается относительно простой наблюдатель упругого момента, представляющий собой фрагмент программного обеспечения промышленного контроллера. Поставлена задача разработки наблюдателя координат неуправляемой массы (валка) и момента шпинделя по параметрам управляемой массы: моменту и скорости двигателя. Необходим анализ переходных процессов восстановленных координат двух-массовой системы при отработке захвата раската валками. Следует дать сравнение с осциллограммами, полученными на стане.

6.2.1. Требования к наблюдателю

Задача разработки наблюдателей упругого момента изначально решалась именно для электромеханических систем прокатных станов [63–65]. 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 стане 5000.

По результатам анализа известных разработок обоснованы требования к наблюдателю координат электромеханической системы прокатного стана:

1. Динамические процессы должны восстанавливаться на основе непрерывно измеряемых физических параметров при минимуме вычислительных операций.
2. Координатами, доступными для контроля, являются скорость и момент двигателя, а также прикладываемый момент нагрузки. Выходными координатами являются упругий момент шпинделя и, при необходимости, скорость валка.
3. Разрабатываемые решения не должны требовать применения сложного математического аппарата для обработки сигналов в on-line режиме и должны быть реализуемыми на контроллерах АСУ ТП стана.

Такой наблюдатель обеспечит высокое быстродействие, необходимое для исследования динамических процессов, происходящих в двухмассовой системе при ударной нагрузке, прикладываемой ко второй массе.

6.2.2. Структура наблюдателя

Идею восстановления упругого момента поясняет схема, представленная на рис. 6.1. При разработке учитывается, что момент, обусловленный трением, незначителен, соответственно блок 7 может быть исключен из схемы. Моментом нагрузки 1-й массы (валка) является упругий момент на шпинделе. Соответственно можно реализовать наблюдатель упругого момента на основе наблюдателя нагрузки одномассовой системы. Для этого может быть применена схема без вычисления производных скорости.

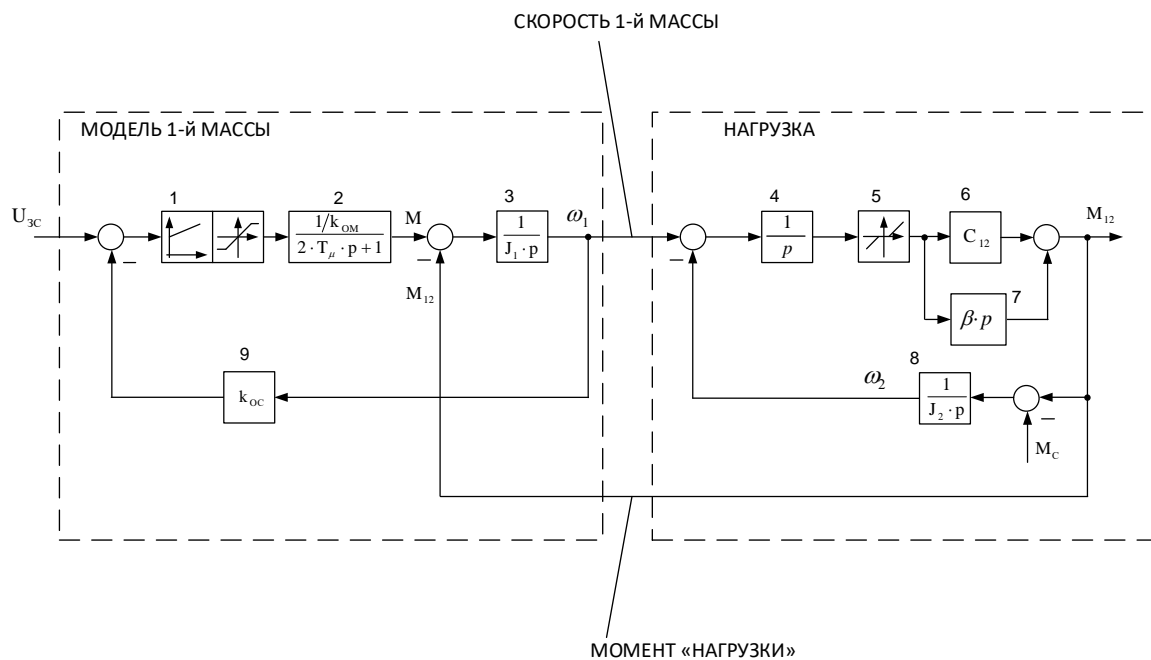
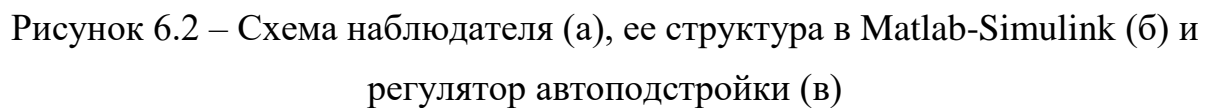


Рисунок 6.1 – Структура модели, поясняющая разработку наблюдателя

Структура разработанного наблюдателя представлена на рис. 6.2, а. Для расчета момента нагрузки используется специальный регулятор автоподстройки, на вход которого поступают сигналы реально измеренной скорости 1-й массы и расчетной скорости 1-й массы. Регулятор автоподстройки «вычисляет» момент нагрузки 1-й массы и стремится «привести в ноль» разницу между измеренной и расчетной скоростями. Динамический момент в модели



Структура наблюдателя в Matlab-Simulink приведена на рис. 6.2, б. Регулятор автоподстройки – это обычный ПИ регулятор (рис. 6.2, в), он должен обладать достаточным быстродействием для минимизации ошибок расчета. В схеме отсутствует вычисление производных, что повышает помехозащищенность сигнала. Это является преимуществом по сравнению с известными техническими решениями. Вторым преимуществом является простота настройки. Недостатком является то, что не выделяется сигнал скорости второй массы. Такой сигнал может быть необходим при разработке замкнутой системы регулирования упругого момента. Однако такая задача в диссертации не ставится.

Выделение сигнала скорости может быть выполнено при дальнейших исследованиях.

Для двухмассовой системы справедлива система дифференциальных уравнений (5.1) [168]. Нагрузкой 1-й массы является упругий момент на шпинделе. Соответственно можно реализовать наблюдатель упругого момента на основе измерения нагрузки одномассовой системы. Схема, поясняющая предложенный принцип восстановления упругого момента, приведена на рис. 6.2, а (сохранены обозначения согласно английской терминологии для сохранения единства с [55]).

Для восстановления момента M_{12Calc} на шпинделе используется регулятор *PI-con*. На его вход поступает разница сигналов расчетной и измеренной скоростей 1-й массы (двигателя). Регулятор «вычисляет» момент нагрузки 1-й массы и стремится свести эту разницу к нулю. Динамический момент в модели рассчитывается как разница между полным моментом двигателя M_{1act} , полученным из системы PDA, и моментом нагрузки M_{12Calc} , вычисленным наблюдателем. Затем динамический момент интегрируется с коэффициентом $(1/J_1)$, в результате вычисляется скорость 1-й массы.

Таким образом, наблюдатель реализует уравнение в операторной форме (p – оператор Лапласа):

$$M_{12Calc} = \left(\frac{1}{J_1 p} (M_{1act} - M_{12Calc}) - \omega_{1act} \right) W_{reg} \quad (6.1)$$

Здесь W_{reg} – передаточная функция регулятора автонастройки (методика синтеза регулятора рассматривается в п. 6.2.4). Благодаря операции интегрирования (деления на p), он формирует вычисленный момент M_{12Calc} такой величины, чтобы уменьшаемое $\frac{1}{J_1 p} (M_{1act} - M_{12Calc})$ было равно вычитаемому ω_{1act} . В этом случае будет обеспечено равенство вычисленного момента M_{12Calc} фактическому упругому моменту M_{1act} в каждый момент времени.

Тем самым будет обеспечена точность восстановления упругого момента. Величина $\frac{1}{J_{1p}}(M_{1act} - M_{12Calc})$ представляет собой расчетную скорость первой массы. Значения M_{1act} считываются из системы PDA с интервалом времени 1 мс. Параметры этого регулятора следует выбирать так, чтобы обеспечивалось астатическое регулирование выходного сигнала – упругого момента M_{12Calc} .

6.2.3. Виртуальная настройка наблюдателя

При разработке наблюдателя применен подход, обоснованный в [228]. Его суть заключается в симуляции процессов на модели с последующей коррекцией на объекте. При работе с моделью на вход симулятора подаются сигналы непосредственно от электропривода. Они могут измеряться в режиме on-line либо могут быть сохранены заранее в архиве системы PDA.

Для определения коэффициента усиления и постоянной времени регулятора с передаточной функцией W_{reg} применен метод виртуальной настройки, который включает следующие операции:

1. Предварительный расчет коэффициента усиления и постоянной времени регулятора (параметров П и И частей) согласно методике расчета координат систем подчиненного регулирования [16].
2. Разработку имитационной модели в программах Matlab-Simulink либо Simscape с ее последующим переносом в ПО ПЛК. Для обмена информацией с объектом осуществляется экспорт данных из системы архивации сигналов, входящей в систему PDA.
3. Непосредственно виртуальный ввод в эксплуатацию. На этом этапе выполняется подключение ПЛК, оснащенного разработанными вычислительными алгоритмами, к физическому объекту. Осуществляется коррекция алгоритмов управления, уточняются параметры настройки.

Фрагменты разработанной виртуальной модели представлены на рис. 6.3. Сигналы скоростей и моментов двигателей, импортированные из PDA, под-

ключены к виртуальным наблюдателям упругих моментов шпинделей верхнего и нижнего валков (LoadObs1 и LoadObs2 на рис. 6.3, а). На рис. 6.3, б приведена схема дискретной (цифровой) модели наблюдателя в Matlab-Simulink. Она составлена по системе дифференциальных уравнений (5.1). В этой программе оператор p преобразования Лапласа обозначается символом s .

Выполнена настройка ПИ-регулятора (рис. 6.3, в) по методу логарифмических амплитудно-частотных характеристик [228, 303]. Ниже представлены методика расчета параметров наблюдателя упругого момента и пояснения к синтезу регулятора.

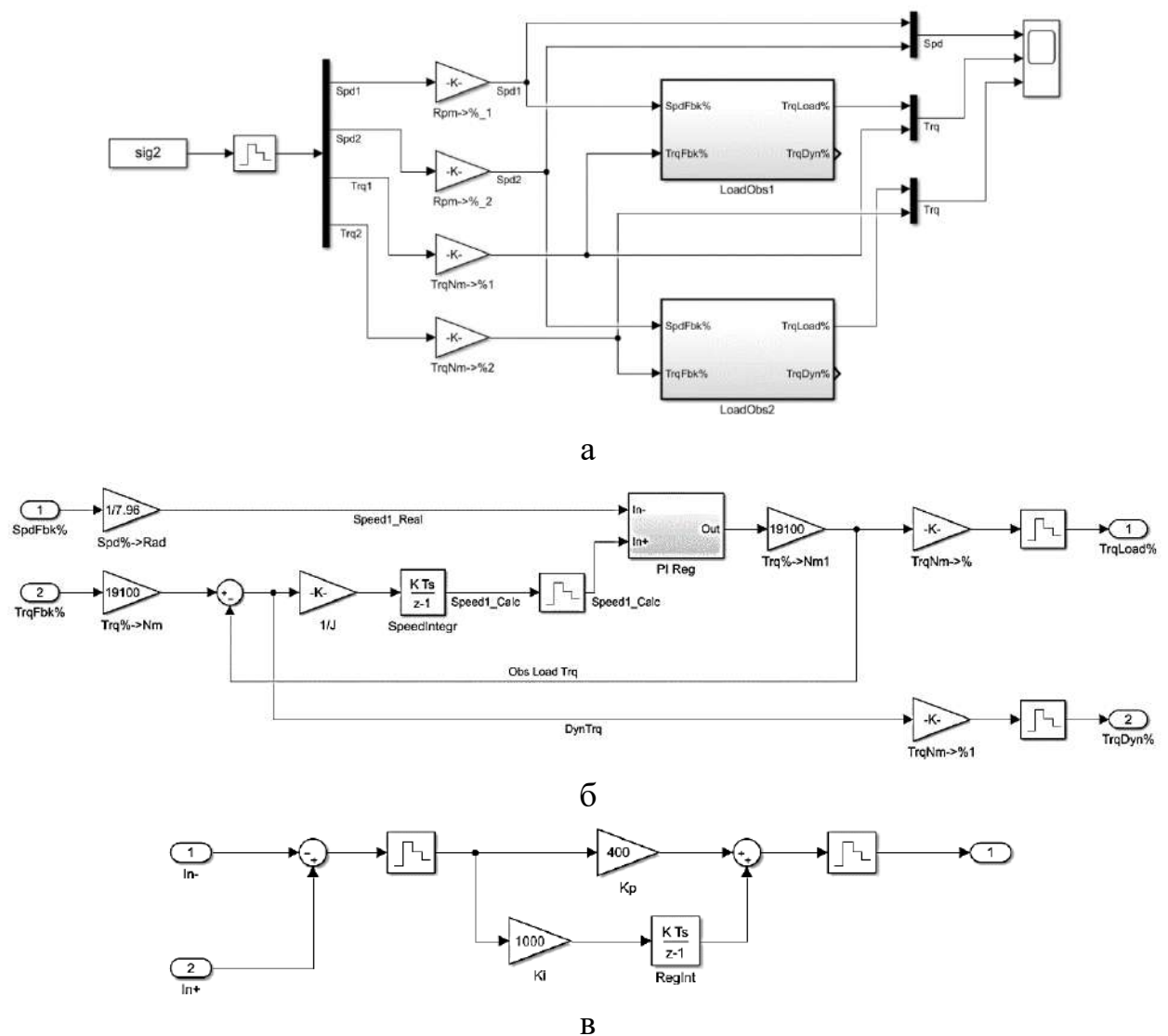


Рисунок 6.3 – Схема подключения наблюдателей упругих моментов (а), модель наблюдателя в Matlab-Simulink (б) и дискретная модель ПИ регулятора (в)

6.2.4. Расчет параметров наблюдателя

Наблюдатель состоит из следующих звеньев:

– интегратора с передаточной функцией

$$W_{spd} = \frac{1}{J_1 p}, \quad (6.2)$$

– регулятора с передаточной функцией

$$W_{reg} = \left(K_P + \frac{K_I}{p} \right) = K_P \left(1 + \frac{K_I}{K_P p} \right) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I p} \right) = K_P \left(\frac{T_I p + 1}{T_I p} \right), \quad (6.3)$$

где $T_I = \frac{K_P}{K_I}$ – постоянная времени регулятора;

K_I, K_P – коэффициенты усиления П-части и И-части.

Передаточная функция контура, разомкнутого по связи M_{12} (рис. 6.3, а)

$$W_{obj} = W_{spd} * W_{reg} = \frac{1}{J_1 p} * \left(K_P + \frac{K_I}{p} \right). \quad (6.4)$$

Рассматриваемый наблюдатель выполняет только информационные функции и не влияет на процессы в системе. Поэтому высоких требований настройке ПИ-регулятора с точки зрения обеспечения устойчивости замкнутого контура не предъявляется. В связи с этим при расчете параметров достаточно определить частоту среза, которая определяет постоянную времени И-части и коэффициент усиления П-части регулятора. Ниже рассматривается решение этих задач.

1. В процессе настройки следует определить полосу пропускания и желаемую частоту среза системы. Настройка должна обеспечить:

– заданную полосу пропускания контура (нижнюю и верхнюю границы допустимого частотного диапазона);

– наклон логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) разомкнутого контура, равный -20 дБ/дек в диапазоне \mp одна декада от частоты среза. После этого следует задаться частотой среза системы (как правило, она должна находиться в середине полосы пропускания).

Нижняя граница $\omega_{ср.1}$ диапазона определяется по темпу нарастания сигнала упругого момента в режиме приложения нагрузки. Время нарастания определяется по осциллограмме сигнала от датчика прямого измерения упру-

того момента. На рис. 6.4, а приведена такая осциллограмма для приложении момента, в 2.5 раза превышающего номинальный момент двигателя (при отсутствии сигнала это время можно определить методом моделирования).

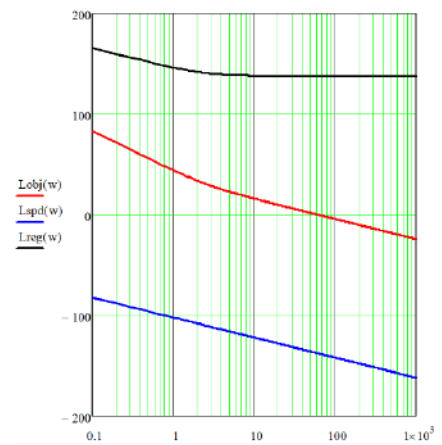
Время T_1 нарастания сигнала упругого момента от нуля до максимального значения обратно пропорционально частоте среза разомкнутой системы. Можно считать, что

$$T_1 \cong \frac{\pi}{\omega_{\text{ср.1}}}. \quad (6.5)$$

Это время рассчитывается по рис. 6.4, а, где происходит изменение сигнала 4480 кН·м за 0.05 секунды.



а



б

Рисунок 6.4 – Осциллограмма упругого момента при захвате (а) и ЛАЧХ, использованные при настройке (б)

Соответственно частота среза разомкнутой системы

$$\omega_{\text{ср.1}} = \frac{\pi}{T_1}. \quad (6.6)$$

Верхняя граница диапазона определяется по наклону ЛАЧХ разомкнутого контура на частоте среза (рис. 6.4, б) при условии, что в диапазоне \mp одну декаду от частоты среза наклон должен быть -20 дБ/дек. Коэффициент усиления по интегральной части определяется исходя из условия смещения частоты сопряжения влево от частоты среза на 1–2 декады. Если принять среднее значение смещения, равным 1.5 декады, то

$$\omega_{\text{ср.2}} = \frac{\omega_1}{10^{1.5}} \quad (6.7)$$

2. Коэффициент усиления регулятора определяется исходя из условия приближения ЛАЧХ разомкнутого контура к желаемой ЛАЧХ (рис. 6.4, б). Обозначены: L_{obj} – желаемая ЛАЧХ разомкнутого объекта (наблюдателя с разомкнутой обратной связью); L_{spd} – ЛАЧХ интегратора с моментом инерции J_1 ; L_{reg} – ЛАЧХ регулятора. Они построены по зависимостям:

– ЛАЧХ звена spd :

$$L_{spd} = 20 \log \left| \frac{1}{J_1 i \omega} \right| = 20 \log \frac{1}{J_1 \omega}, \quad (6.8)$$

или

$$L_{spd} = -20 \log(J_1) - 20 \log(\omega), \quad (6.9)$$

где $i = \sqrt{-1}$;

– ЛАЧХ звена reg :

$$L_{reg} = 20 \log \left| K_p \left(\frac{T_I \omega i + 1}{T_I \omega i} \right) \right| \quad (6.10)$$

или

$$L_{reg} = 20 \log(K_p) - 20 \log(T_I \omega) + 20 \log \left(\sqrt{1 + \omega^2 T_I^2} \right); \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} L_{obj} = L_{spd} + L_{reg} = & 20 \log \left(\frac{1}{J_1 \omega} \right) + 20 \log(K_p) - 20 \log(T_I \omega) + \\ & + 20 \log \left(\sqrt{1 + \omega^2 T_I^2} \right) \end{aligned} \quad (6.12)$$

Регулятор «поднимает» L_{spd} вверх, что обеспечивает L_{obj} с желаемой частотой среза. Отсюда

$$\begin{aligned} 20 \log(K_p) &= -20 \log \left(\frac{1}{J_1 \omega_{cp.1}} \right), \\ K_p &= 10^{-\log(J_1 \omega_{cp.1})} = J_1 \omega_{cp.1}. \end{aligned} \quad (6.13)$$

С целью обобщения, в таблице 6.1 представлены зависимости для расчета координат ПИ-регулятора по предложенной методике. Здесь же приведены полученные численные значения и номинальные параметры двигателя, использованные при расчетах. При найденных параметрах настройки гарантирована устойчивость замкнутого контура наблюдателя в частотном диапазоне реальных сигналов.

Таблица 6.1 – Параметры наблюдателя упругого момента

Параметр		Формулы для определения	Единица измерения	Значение
Номинальная угловая частота вращения		—	с ⁻¹	7,96
Номинальный момент		—	Н·м	1910000
Момент инерции J_1 первой массы		—	Н·м ²	1250000
Время T_1 нарастания сигнала		—	с	0,05
Желаемая частота среза	диапазон	$\omega_{cp.1} \leq \omega_{cp} \leq \omega_{cp.2}$	Hz	
	нижняя граница	$\omega_{cp.1} = \pi/T_1$	Hz	62,8
	верхняя граница	$\omega_{cp.2} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon \cdot T_1}}$	Hz	1,986
Коэффициент усиления П-части		$K_P = J_1 \omega_{cp}$	—	7 850 000
Коэффициент усиления И-части		$K_I = \frac{J_1 \omega_{cp}^2}{10^{1.5}}$	—	15 575 397

6.3. Проверка адекватности восстановления упругого момента

Настройка модели

При оценке адекватности восстанавливаемых величин, поступающих от наблюдателя, предложен подход, согласно которому осуществляется импорт в модель наблюдателя (рис. 6.2, б) сигналов скорости и момента двигателя. Они могут быть измерены заранее и сохранены в виде массивов либо подаваться на входы наблюдателя в on-line режиме. Здесь, а также во всех случаях, исследуемых ниже, используются предварительно измеренные сигналы, импортированные в Matlab из ibaPDA. Поскольку эти сигналы записаны с заданным шагом, непрерывные интеграторы в модели были заменены на дискретные. Схема модели для ввода дискретных сигналов, версия этой модели в Matlab Simulink, а также модель дискретного регулятора автоподстройки представлены на рис. 6.3. Влияние «дискретности» на устойчивость процессов рассматривается в данном подразделе ниже.

В меню «Свойства решателя» программы Matlab (рис. 6.5) выбран метод – Эйлера 1-го порядка и фиксированное время выборки 2 мс, что реализуемо в современных системах управления «с запасом».

Simulation time

Start time: 0.0 Stop time: 20

Solver options

Type: Fixed-step Solver: ode1 (Euler)

Additional parameters

Fixed-step size (fundamental sample time): 0.002

Tasking and sample time options

☒ Allow tasks to execute concurrently on target

☒ Automatically handle rate transition for data transfer

Configure Tasks...

Рисунок 6.5 – Окно меню для выбора параметров симуляции

Таким образом, выполнена настройка разработанного наблюдателя упруго момента. После отработки в Matlab Simulink его алгоритм был импортирован в программное обеспечение ПЛК. В результате осуществлен виртуальный ввод разработанного наблюдателя в работу.

Проверка адекватности проводится путем сравнительного анализа переходных процессов. Предлагается методика, согласно которой выполняются следующие действия [177]:

1. Данные, сохраненные в виде массивов, импортируются в пакет Matlab, где подаются на вход дискретной модели, представленной на рис. 6.3, а.
2. Выполняется моделирование процессов, зафиксированных на осциллограммах.
3. Выполняется сопоставление осциллограмм методом их совмещения либо методом сравнения координат в характерных точках.
4. Для оценки достоверности могут быть применены методы статистической обработки результатов (здесь не применяются).

Разгон и торможение электропривода

Этот режим является наиболее информативным с точки зрения оценки адекватности наблюдателя, т.к. проявляются нелинейные свойства объекта, обусловленные наличием зазоров в шпиндельных соединениях. На рис. 6.6, а представлены осциллограммы последовательных ускорения и торможения электропривода. В режиме разгона происходит гарантированное замыкание зазора, в режиме торможения – его размыкание. На рис. 6.6, б представлены эти же процессы в обратной последовательности.

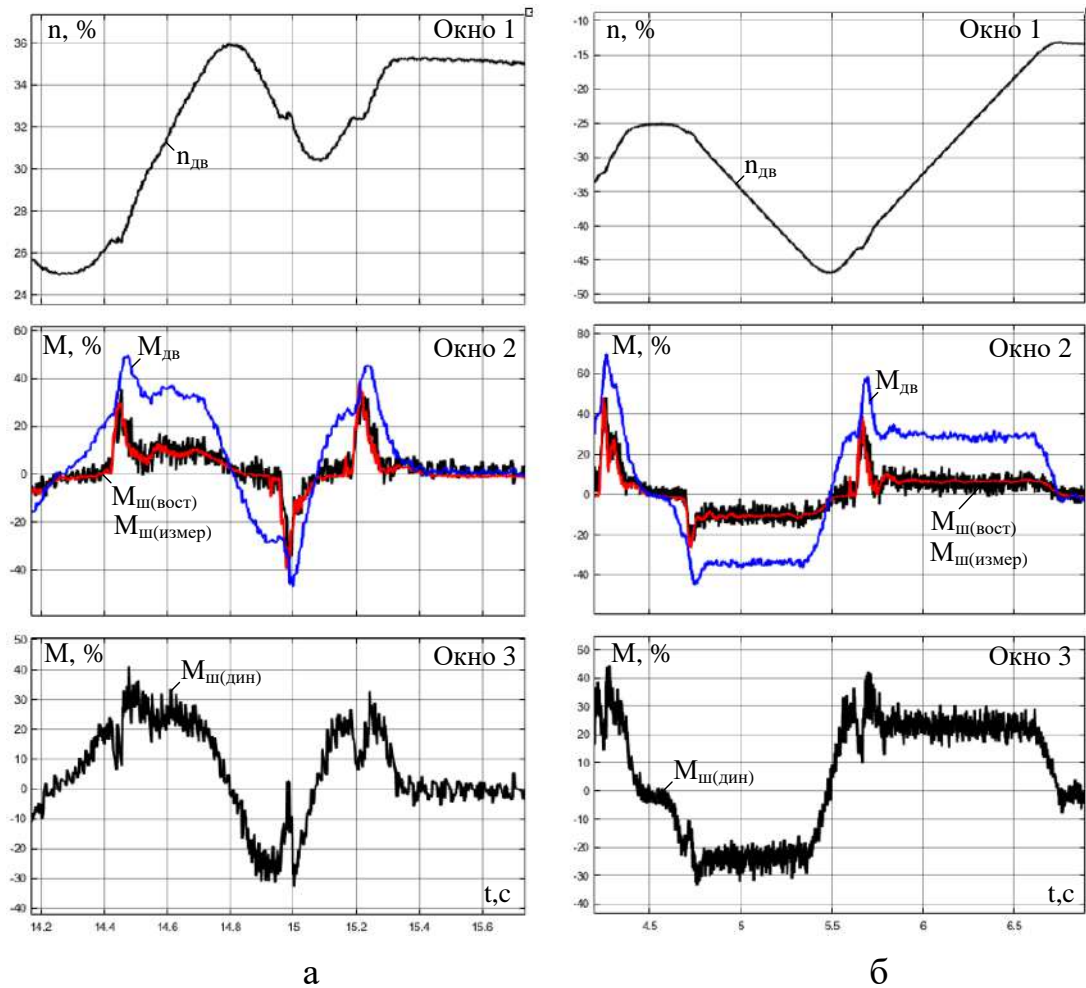


Рисунок 6.6 – Осциллограммы последовательного ускорения и торможения (а) и торможения и ускорения (б) электропривода: $n_{дв}$ – скорость двигателя, %; $M_{дв}$ – момент двигателя, $M_{ш(измер)}$ – момент на шпинделе от датчика, $M_{ш(восст)}$ – момент с наблюдателя; $M_{ш(дин)}$ – динамический момент с наблюдателя

Как видно, в обоих случаях кривые 2 и 3 переходных процессов упругого момента на шпинделе совпадают. Кривая 3 момента с наблюдателя полностью находится на фоне кривой 2 момента, поступающего от физической измерительной системы, поэтому в черно-белой печати становится незаметной.

Представленные осциллограммы являются далеко не единственным подтверждением точности сигналов, восстановленных наблюдателем. В ходе анализа исследовано большое количество аналогичных осциллограмм. Результаты позволяют сделать вывод, что, несмотря на влияние нелинейности, обусловленной зазором, восстановление сигнала наблюдателем обеспечивается с высокой точностью (близкой к абсолютной, как показано на рис. 6.6).

Захват с выходом на ограничение по моменту двигателя

На рис. 6.7, а представлены аналогичные осциллограммы, зафиксированные в режиме захвата, а на рис. 6.7, б – полученные за один проход. Обозначения окон и кривых соответствуют принятым на рис. 6.6. Момент двигателя (зависимость 1) сразу после захвата достигает уровня ограничения (240% номинального значения). Зависимости 2 и 3 на обоих рисунках полностью совпадают.

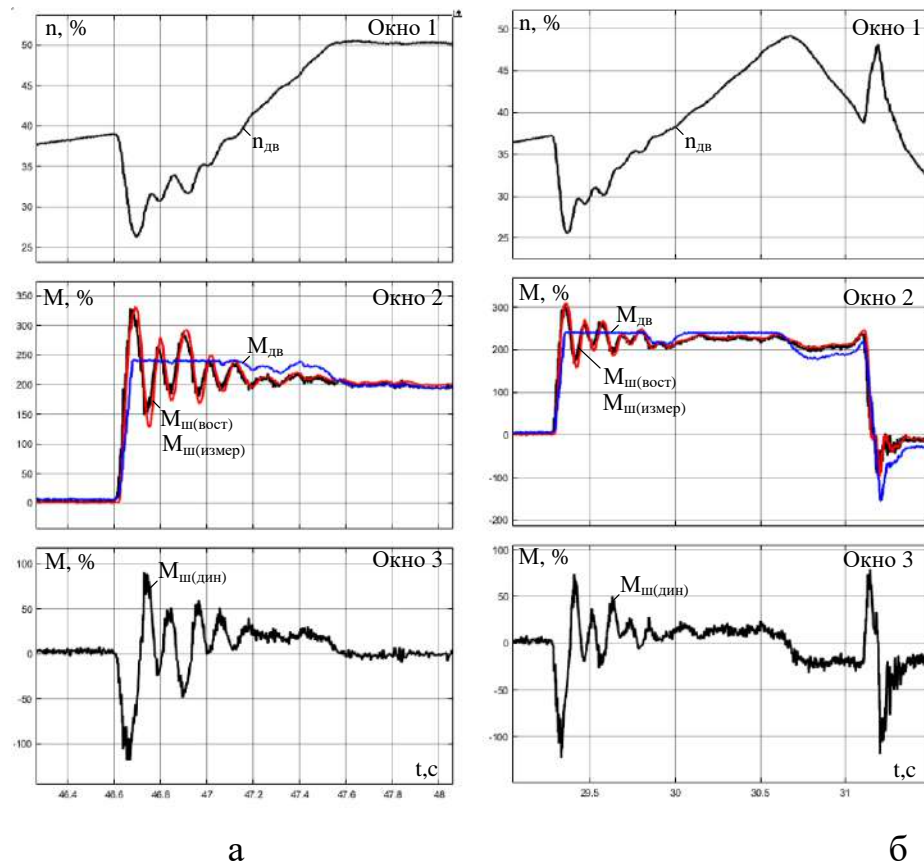


Рисунок 6.7 – Осциллограммы захвата металла валками (а) и за один проход (б), обозначения соответствуют приведенным на рисунке 6.6

По данным рисункам можно полностью повторить выводы, записанные при анализе осциллограмм на рисунке 6.6.

Оценка влияния времени дискретизации наблюдателя

Оценка влияния времени цикла программы наблюдателя на результат восстановления сигнала упругого момента показана на рисунке 6.8 для времен цикла программы в 4, 8 и 16 мс (кривые и обозначения соответствуют приведенным на рис. 6.7). Наблюдатель выполнен по схеме в дискретной форме,

приведенной на рисунке 6.3. Сравниваются сигнал с датчика прямого измерения момента и сигнал с наблюдателя упругого момента. Рассматривается захват раската с выходом привода на ограничение регулятора скорости.

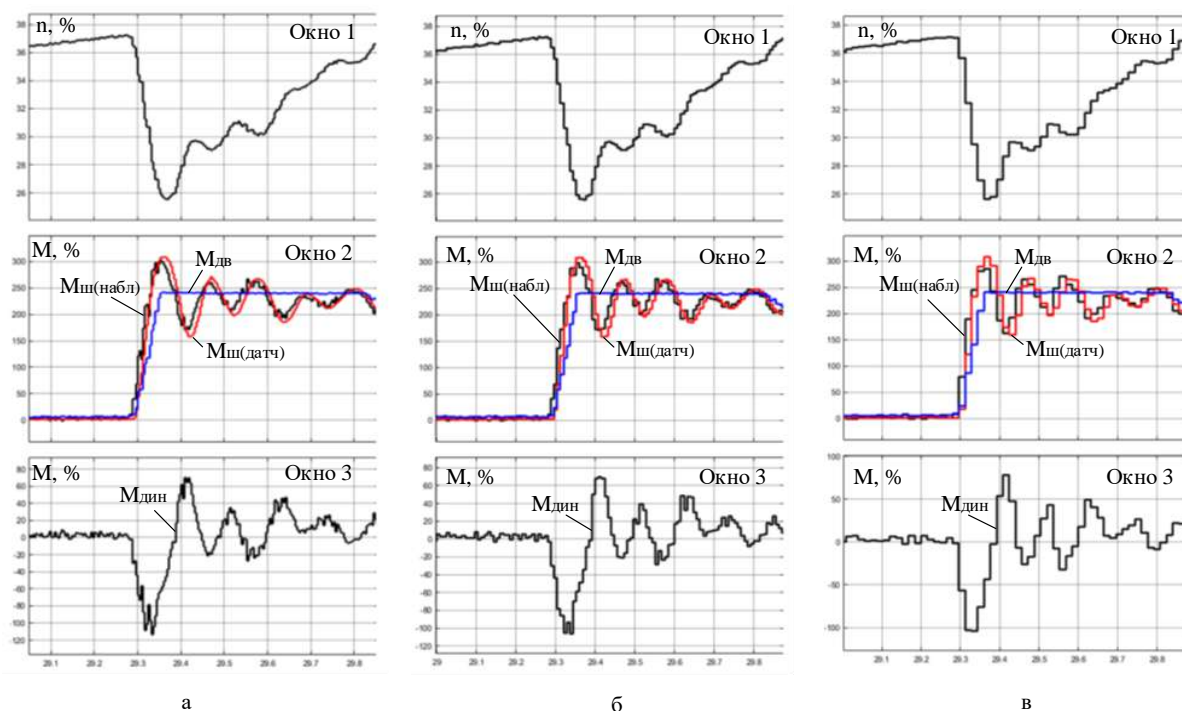


Рисунок 6.8 – Оценка влияния времени цикла программы наблюдателя: а – 4 мс; б – 8 мс; в – 16 мс

Подобные режимы приводят к повышенным динамическим нагрузкам и относительно длительным затуханиям упругого момента, что и наблюдается на осциллограммах. Как видно, даже при времени цикла в 16 мс (что очень много для исследуемого электропривода) наблюдатель работает устойчиво, а форма сигнала с его выхода повторяет сигнал, поступающий от датчика.

Выводы по результатам проверки

Нелинейные свойства электромеханической системы с зазором не могут быть описаны аналитически. Однако представленные осциллограммы позволяют утверждать, что предложенный принцип обработки измеренных сигналов при правильной настройке регулятора с автоподстройкой позволяет максимально приблизить вычисленные сигналы к физическим. При этом обеспечивается компенсация с высокой точностью нелинейных свойств объекта. Необходимости в проведении сравнительного анализа процессов с использо-

ванием математических методов нет, т.к. кривые переходных процессов совпадают. Данный вывод будет подтвержден ниже при исследовании аварийных режимов электроприводов клетки.

6.4. Анализ динамических моментов в режиме захвата

Во время эксплуатации наблюдателя моментов было получено много осциллограмм, подтверждающих значительные динамические нагрузки. Примеры таких осциллограмм при различных условиях захвата приведены на рис. 6.9 [279], из них видно, что момент шпинделя может превышать момент двигателя в 2 и более раза (рис. 6.9, а), при этом ограничение момента двигателя не ограничивает упругий момент в передаче (рис. 6.9, б).

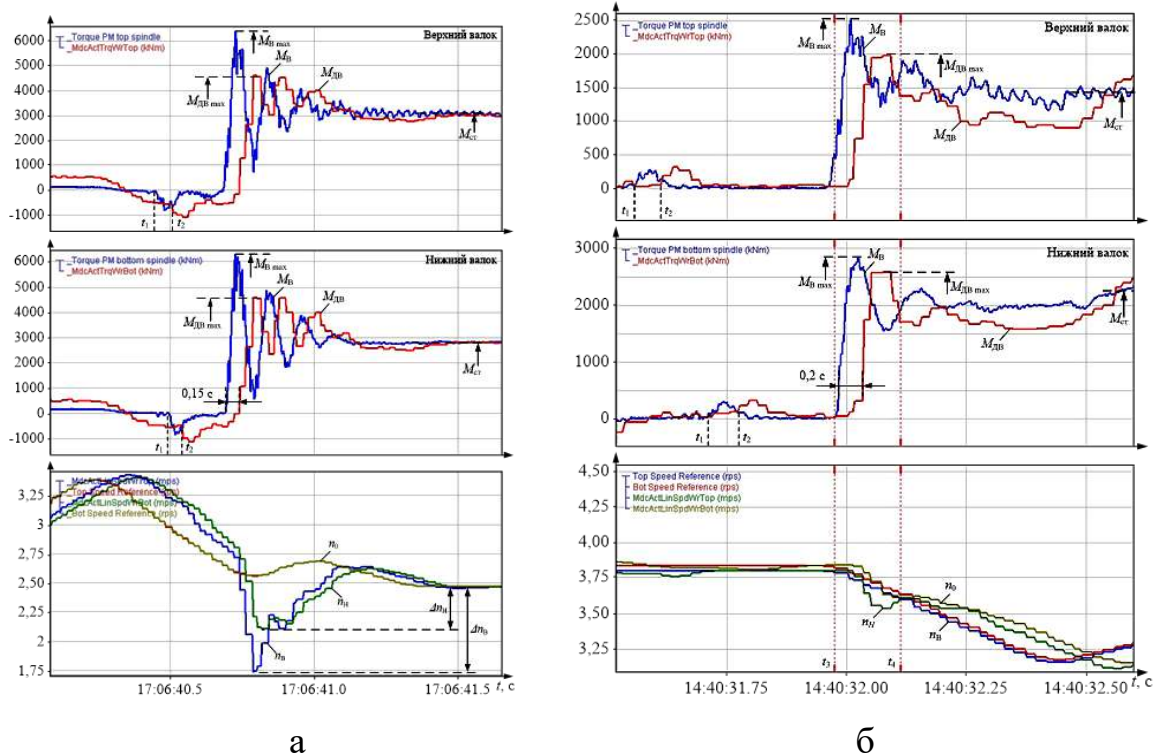


Рисунок 6.9 – Осциллограммы моментов и скоростей в режиме захвата раскатов валками клетки стана 5000 при открытых (а) и закрытых (б) угловых зазорах в шпиндельных соединениях

Исследования, результаты которых приведены в [284, 304], показали, что в анализируемом режиме влияние упругих свойств валопровода является существенным. В отдельных проходах перерегулирование момента превышает его установившееся значение в несколько раз. Абсолютное и относительное

значения амплитуд упругого момента для 9 проходов чистовой прокатки представлены в таблице 6.2 [161]. Видно, что в последних проходах перегрузки снижаются, что происходит вследствие уменьшения обжатий и соответственно снижения статических нагрузок. Это подтверждает важный вывод, согласно которому величина обжатий является фактором, влияющим на динамические нагрузки [305]. Поэтому одним из способов ограничения перегрузок является оптимизация обжатий за счет совершенствования программ прокатки. К другим существенным факторам, определяющим амплитуду упругого момента, относятся коэффициент упругости вала двухмассовой системы и угловой зазор в шпиндельных соединениях. Их влияние рассмотрено в [226, 227].

Таблица 6.2 – Сравнение моментов на шпинделе ВГП в установившихся и динамических режимах [161]

Номер прохода	Момент на шпинделе ВГП, кН·м			Перегрузка
	в установившемся режиме прокатки	максимальный	кратность	кН·м
1	2	3	4	5
1	182	263	1,45	81
2	206	278	1,35	72
3	199	267	1,34	68
4	197	296	1,5	99
5	174	257	1,47	83
6	156	261	1,67	105
7	119	194	1,63	76
8	106	165	1,57	59
9	95	126	1,33	31

Подробный анализ причин, вызывающих недопустимые амплитуды динамических моментов двигателя и на шпинделе приведен в [300]. Для этого выполнено разделение момента, возникающего при входе заготовки в клеть, на составляющие (1, 2, 3), показанные на рис. 6.10. Здесь же показаны характерные переходные процессы, обусловленные этими составляющими. Исследования выполнены на примере черновой клетки ШСГП 1700. На рис. 6.10, а отмечены технологический момент $M_{\text{тех}}$ и максимальный крутящий момент M_{max} .

Первая составляющая – это нагружение крутящим моментом. Часть этого момента совершает полезную работу – это так называемый технологический

момент, а часть представляет собой паразитный момент, снижающий надежность электромеханической системы. Характер данного нагружения стабилен в течение всего пропуска. Исключение составляет процесс захвата, когда момент превышает установившееся значение в 2–4 раза. По сути, это есть превышение максимальной нагрузки над полезной технологической нагрузкой. Максимальная нагрузка представляет собой сумму технологической нагрузки при захвате и паразитной инерционной нагрузки, связанной с разгоном раската при захвате.

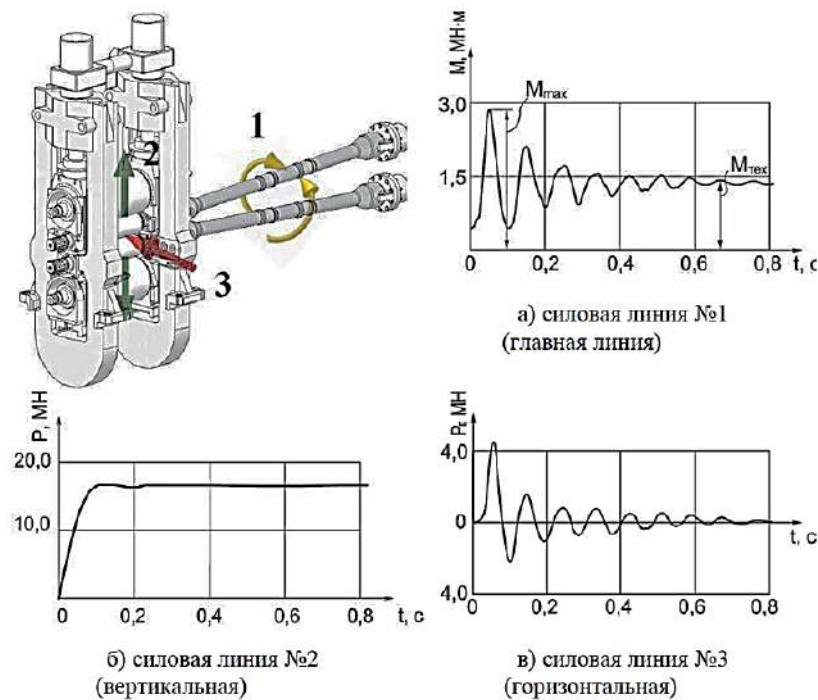


Рисунок 6.10 – Переходные процессы (а, б, в), обусловленные силовыми воздействиями (линиями 1, 2, 3) на клеть при захвате [300]

Вторая составляющая обусловлена усилием прокатки, характерный процесс показан на рис. 6.10, б. В течение всего прохода в этой линии отсутствуют паразитные нагрузки, поэтому действующая нагрузка практически совпадает с полезной (технологической). После захвата эта сила остается неизменной.

Третья составляющая момента обусловлена горизонтальными силами, возникающими при захвате. Такие силы бесполезны для технологической операции, поэтому являются паразитными.

Направления решения задачи

С целью ограничения амплитуд динамических моментов разработано несколько способов управления электроприводами валков (при участии автора). Таковыми являются:

1. Способ ограничения момента за счет замыкания угловых зазоров в шпиндельных соединениях путем разгона электропривода перед входом раската в клеть (предразгона). Исследован в [155].

2. Способ предразгона с дополнительным кратковременным торможением электропривода после захвата. При оптимальном темпе торможения обеспечивает частичную компенсацию динамического момента, возникающего вследствие упругих свойств передающего вала (шпинделя). Исследован в [119].

3. Способ компенсации постоянной времени контура скорости электропривода [155].

4. Способ предварительного разведения валков перед захватом. Обеспечивает снижение удара заготовки о валки путем ограничения горизонтальной составляющей момента [129].

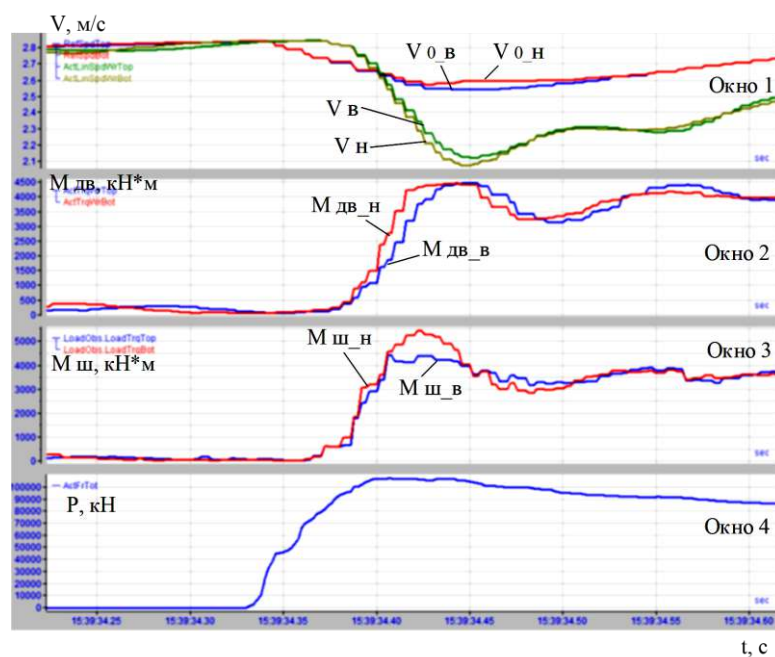
Перечисленные разработки обеспечивают принцип ограничения динамических нагрузок средствами электропривода, обоснованный в [155], и обеспечивают их снижение. Однако все они (за исключением последнего) ограничивают только первую составляющую момента, которая передается от двигателя. За счет этого снижается упругая составляющая момента, а ограничения третьей (горизонтальной) составляющей не происходит. На ее величину в наибольшей степени влияет скорость заполнения очага деформации. Она зависит от соотношения скоростей заготовки и линейной скорости валка, а также соотношения величины зазора и толщины раската. Регулирование зазора перед захватом обеспечивает четвертый из названных способов. Однако его внедрение ограничено в связи с увеличением толщины «головы» раската, что негативно сказывается на качестве конечной продукции – разнотолщинности по длине листа.

Как утверждается в [300], силы, обусловленные третьей составляющей, наносят наибольший ущерб оборудованию. Удары при входе заготовки в клеть разбивают подшипники рабочих валков, разрушают валки, подушки, станины и другое оборудование. *«Действия этих ненужных сил приносят большой экономический ущерб, поэтому указанные силы должны быть ликвидированы или ограничены безопасным уровнем ...».*

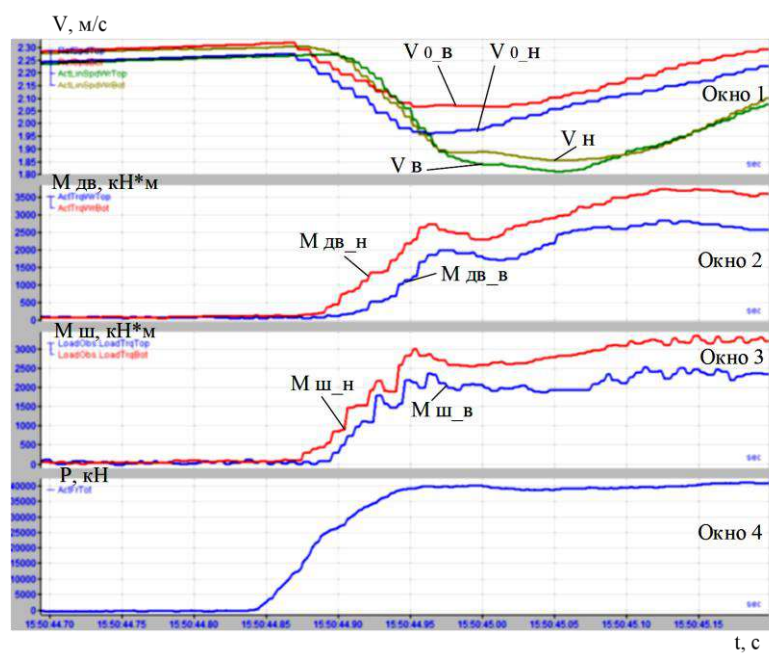
В связи с изложенным, ниже решается задача обеспечения ограничения третьей составляющей момента средствами электропривода без воздействия на заданные технологические параметры. Предварительные исследования показали, что это может быть осуществлено за счет комбинированного способа управления электроприводом с предразгоном до захвата и подтормаживанием с регулируемым темпом (адаптивным подтормаживанием) после захвата.

6.5. Анализ влияния скорости захвата металла валками на динамические показатели электромеханической системы клетки

Особенностью станов горячей прокатки, в том числе толстолистовых станов, является относительно резкое приложение момента нагрузки (момента прокатки) ко второй массе при входе раската в клеть. Темп приложения нагрузки зависит от скорости заполнения очага деформации и, как отмечалось выше, находится в пределах 150–250 номинальных значений момента двигателя в секунду. Время переходного процесса зависит от скорости прокатки, обжатия, настройки САР скорости и ряда технологических факторов, в частности реологических свойств стали, которые определяются ее маркой. Возможно, с некоторой ошибкой, определять момент нагрузки по величине актуального усилия прокатки с использованием информации о диаметрах валков и обжатии. Результаты экспериментальных исследований подтверждают известный вывод, что приложение нагрузки при входе раската в клеть происходит не скачком, как принимается во многих исследованиях, а за конкретное время нарастания. Это следует из осциллограмм, представленных на рис. 6.11, где показаны процессы при различных темпах приложения нагрузки.



а



б

Рисунок 6.11 – Осциллограммы захвата раската валками с темпом приложения нагрузки $1,4 \cdot 10^3$ МН/с (а) и $0,4 \cdot 10^3$ МН/с (б): окно 1 – линейные скорости; окно 2 – моменты двигателей; окно 3 – моменты на шпинделе; окно 4 – усилия прокатки

Результаты сравнения динамических показателей скоростей и моментов ВГП и НГП для этих случаев представлены в таблице 6.3. Они подтверждают

значительно меньшую динамическую ошибку регулирования скорости и полное исключение перерегулирования момента при низком темпе приложения нагрузки (рис. 6.11, б) по сравнению со случаем, показанным на рис. 6.11, а.

Таблица 6.3 – Моменты на шпинделях ВГП и НГП для случаев захвата, представленных на рис. 6.11

Значение	Электропривод ВГП		Электропривод НГП	
	рис. 6.11, а	рис. 6.11, б	рис. 6.11, а	рис. 6.11, б
Установившееся, кН·м	3500	2500	3500	2500
Максимальное, кН·м	3000	2500	4000	2500
Перерегулирование, %	-	0	60	0
Темп увеличения, МН/с	$1,4 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^3$

На рис. 6.11, а моменты двигателей в квазиустановившемся режиме прокатки равны 2500 кН·м для ВГП и 3500 кН·м для НГП, что составляет 1,3 и 1,8 номинального момента двигателя (1910 кН·м). Поскольку при прокатке допускается двукратное увеличение момента, это говорит о том, что прокатывается не самый «тяжелый» сортамент. На рис. 6.11, а моменты обоих двигателей выходят на уровень ограничения, установленный равным 4400 кН·м, что нежелательно с точки зрения управляемости электропривода. Вместе с тем, представленные осциллограммы подтверждают существенное различие темпов нарастания усилий при захвате: на рис. 6.11, б усилие возрастает в диапазоне 0...40 МН за 100 мс, на рис. 6.11, а – в диапазоне 0...100 МН за 70 мс. Соответственно темпы приложения составляют $0,4 \cdot 10^3$ МН/с и $1,4 \cdot 10^3$ МН/с, т.е. отличаются в 3,6 раза.

Из теории прокатки известны аналитические выражения, по которым можно вычислить влияние усилия прокатки на момент в зависимости от темпа его нарастания. Усилие прокатки P (давление на валки) рассчитывается по зависимости [306].

$$P = p_{\text{ср}} F_{\text{к}}, \quad (6.14)$$

где $F_{\text{к}} = b_{\text{ср}} l_d$ – площадь контакта раската с одним из валков (подразумевается ее проекция на плоскость, нормальную равнодействующей давления металла на валки);

$p_{\text{ср}}$ – среднее контактное давление без учета натяжения:

$$p_{\text{ср}} = \beta \cdot \sigma_{\text{T}} \cdot n_{\sigma};$$

σ_{T} – средняя величина напряжения текучести;

$\beta = 1,0-1,15$ – коэффициент Лоде;

n_{σ} – коэффициент напряженного состояния.

Величина F_k в большинстве случаев находится относительно просто, так как зависит от геометрических размеров валков и прокатываемой полосы перед входом в валки и после выхода из них. Крутящий момент определяется как произведение усилия прокатки P на плечо вертикальной силы a (рис. 6.12): $M_{\text{пр}} = P \cdot a$. Как правило, в расчетах используют не абсолютное значение плеча a , а его относительную величину, которая называется коэффициентом плеча усилия прокатки ψ . Коэффициент плеча равен $\psi = a/l_d$, откуда $a = \psi \cdot l_d$, где $l_d = \sqrt{R\Delta h}$ – длина очага деформации (дуги захвата). Его величина находится в пределах $\psi = 0,3-0,7$.

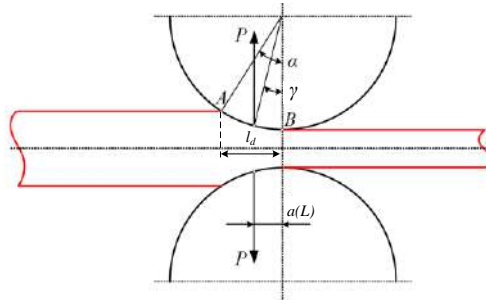


Рисунок 6.12 – Пояснение к расчету момента прокатки: α – угол захвата; γ – критический угол

Момент прокатки в двух валках:

$$M_{\text{пр}} = 2P\psi\sqrt{R\Delta h}. \quad (6.15)$$

Время заполнения очага деформации можно выразить как функцию изменения толщины Δh , радиуса валка R и скорости захвата V

$$t_1 = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{V}. \quad (6.16)$$

Соответственно при варьировании этих параметров темп приложения нагрузки к электроприводу будет разным. Некоторые результаты расчета времени приложения нагрузки при различной толщине раската приведены в таблице 6.4 Они получены при исходных значениях $V=2.0$ м/с и $R=630$ мм.

Таблица 6.4 – Расчетные значения времени приложения нагрузки при различной толщине раската

Δh , мм	t_1 , мс
50	88
30	68
10	39
5	28
2	17

Также темп приложения нагрузки [$\text{Н}\cdot\text{м}/\text{с}$] зависит и от величины статического момента. В качестве подтверждения, на рис. 6.13, а приведены зависимости темпа нарастания нагрузки (вертикальная ось, $\%/с$) от скорости захвата (шкала 1...4, м/с) и обжатия (шкала 0...40 мм). Они построены для момента 100%. На рис. 6.13, б приведены аналогичные зависимости темпа нарастания нагрузки для различных величин статического момента 50, 100, 200%.

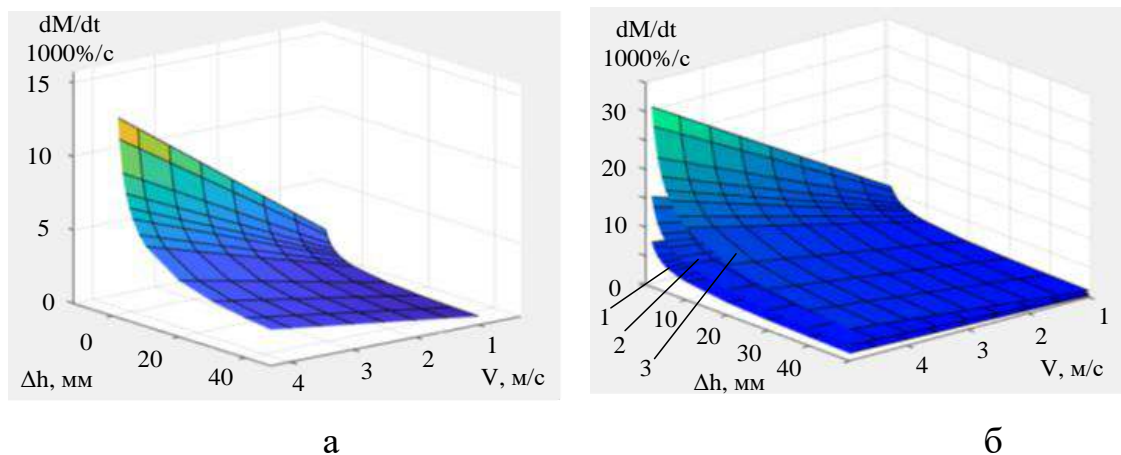


Рисунок 6.13 – Зависимости темпа нарастания нагрузки от скорости захвата (шкала 1...4, м/с) и обжатия (шкала 0...40 мм) при величинах прикладываемого момента 100% (а) и 50, 100, 200% (б)

Проведенный краткий анализ подтверждает, что при оценке динамики упругого момента темп нарастания нагрузки учитывать необходимо.

6.6. Разработка способа управления электроприводом с ограничением динамического момента

За основу принят подход, обоснованный и примененный в [155], основанный на декомпозиции (разделении на составляющие) упругого момента.

Далее выполнены преобразования:

$$\begin{aligned}
 M_{12} &= \left(\left(\frac{W_{RS}W_{CT}W_1\omega_{Ref} + W_{RS}W_{CT}W_1W_1K_{SFb}M_{12}}{1 + W_{RS}W_{CT}W_1K_{SFb}} - M_{12}W_1 \right) - (M_{12} - M_L)W_2 \right) W_S \\
 M_{12} &= \left(\frac{W_{RS}W_{CT}W_1\omega_{Ref} + W_{RS}W_{CT}W_1W_1K_{SFb}M_{12}}{1 + W_{RS}W_{CT}W_1K_{SFb}} - M_{12}W_1 - (M_{12} - M_L)W_2 \right) W_S \\
 M_{12} &= \frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1 \omega_{Ref} + W_S W_{RS} W_{CT} W_1 W_1 K_{SFb} M_{12}}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}} - M_{12} W_1 W_S - M_{12} W_2 W_S + M_L W_2 W_S \\
 M_{12} + M_{12} W_1 W_S + M_{12} W_2 W_S &= \frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1 \omega_{Ref} + W_S W_{RS} W_{CT} W_1 W_1 K_{SFb} M_{12}}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}} + M_L W_2 W_S \\
 M_{12} (1 + W_1 W_S + W_2 W_S) &= \frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1 \omega_{Ref} + W_S W_{RS} W_{CT} W_1 W_1 K_{SFb} M_{12}}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}} + M_L W_2 W_S \\
 M_{12} \left(1 + W_1 W_S + W_2 W_S - \frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1 W_1 K_{SFb}}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}} \right) &= \frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1 \omega_{Ref}}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}} + M_L W_2 W_S \\
 M_{12} &= \frac{\frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}} \omega_{Ref} + W_2 W_S M_L}{1 + W_1 W_S + W_2 W_S - \frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1 W_1 K_{SFb}}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}}}
 \end{aligned}$$

Можно сделать вывод, что упругий момент в шпинделе зависит от двух факторов: задания на скорость

$$M_{12(Ref)} = \frac{\frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}} \omega_{Ref}}{1 + W_1 W_S + W_2 W_S - \frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1 W_1 K_{SFb}}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}}}$$

и нагрузки на валу

$$M_{12(CT)} = \frac{W_S M_L}{1 + W_1 W_S + W_2 W_S - \frac{W_S W_{RS} W_{CT} W_1 W_1 K_{SFb}}{1 + W_{RS} W_{CT} W_1 K_{SFb}}}$$

6.6.2. Описание способа

Такая декомпозиция позволила обосновать комбинированный способ ограничения упругого момента за счет предразгона, компенсирующего 1-ю составляющую (задание на скорость), и адаптивного торможения для компенсации темпа роста нагрузки на валу. Разработан способ управления электропри-

водом клетки прокатного стана, согласно которому захват раската валками осуществляют в режиме ускорения электропривода (предразгона), после захвата осуществляют торможение электропривода, при этом скорость после торможения и темп торможения устанавливают в функции величины нагрузки и темпа ее приложения. Методика расчета этих параметров рассматривается ниже в пп. 6.7 и 6.9.

Способ обеспечивает:

- предварительное замыкание углового зазора в шпиндельных соединениях за счет обеспечения захвата во время разгона электропривода;
- компенсацию упругих свойств вала путем адаптивного торможения после захвата;
- компенсацию влияния скорости заполнения очага деформации за счет дополнительной обратной связи по упругому моменту, подаваемой с выхода наблюдателя упругого момента на вход регулятора скорости.

Для реализации способа разработана система электропривода с улучшенными динамическими показателями, компенсирующая нелинейные свойства двухмассовой системы, упругость вала и темп приложения нагрузки, рисунок 6.15.

Отличительные признаки способа в этой системе реализованы следующим образом:

1. Захват в режиме ускорения электропривода обеспечивается включением дополнительного задатчика интенсивности (ЗИ предразгона). На его входе формируется сигнал управления как функция усилия прокатки и положения заготовки относительно клетки. Подробное описание способа прокатки с предварительным ускорением рассмотрено в [155].

2. Торможение с регулируемым темпом (адаптивное подтормаживание) обеспечивается блоком «Прогнозирование нарастания нагрузки». Согласно разработанному способу темп подтормаживания определяется и устанавливается автоматически как функция темпа приложения нагрузки. Поэтому данный способ регулирования назван адаптивным.

3. Дополнительная обратная связь по упругому моменту обеспечивается путем формирования сигнала упругого момента (M_{12_OBS}). Для этого сигнал,

полученный в наблюдателе (блоки Observer), через специальное корректирующее звено W_{SP_COR} подается как добавка на вход задания скорости перед регулятором скорости. Это обеспечивает снижение упругого момента и более быстрое затухание колебаний.

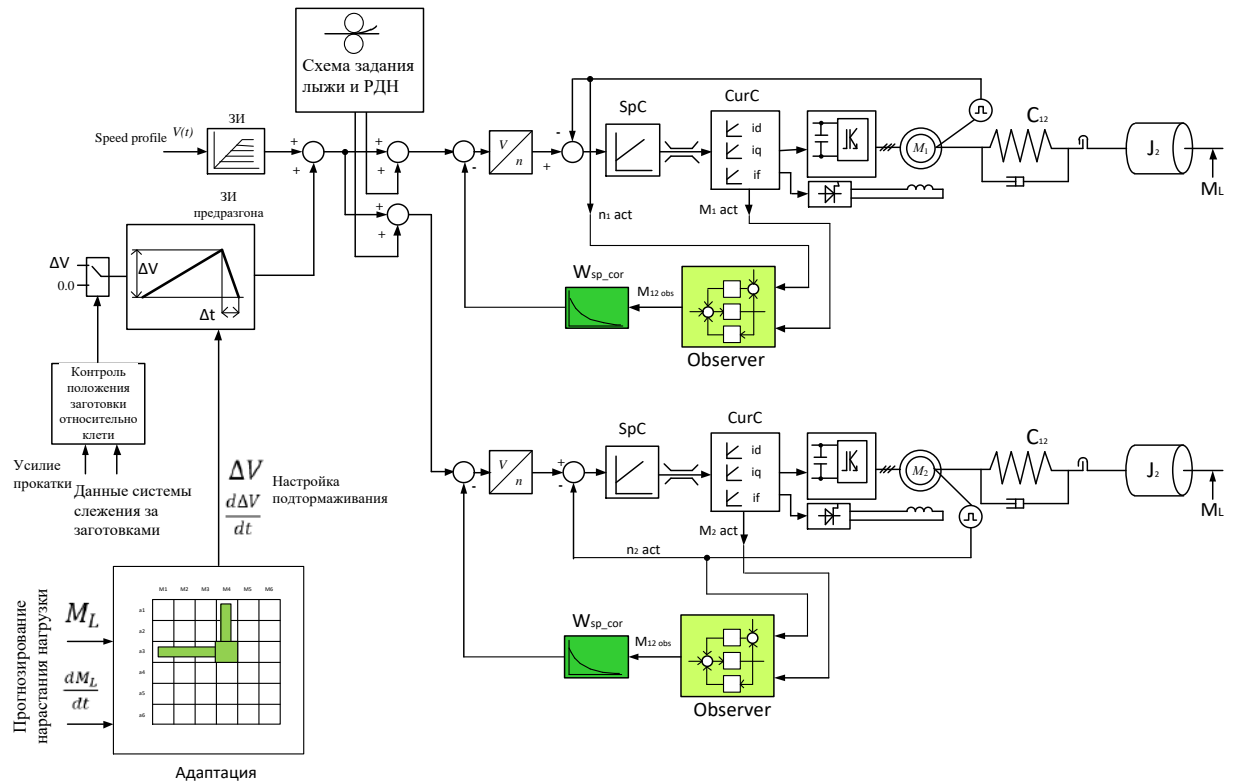


Рисунок 6.15 – Функциональная схема системы, реализующей разработанный способ управления электроприводами

В предлагаемой системе использованы следующие принципы регулирования:

1. Предупреждение в виде адаптивного подтормаживания с учетом прогнозируемой нагрузки и времени ее нарастания в зависимости от скорости выполнения очага деформации.
2. Регулирование по отклонению в виде воздействия обратной связи по упругому моменту, которая рассчитывается в наблюдателе.

Они обеспечивают компенсацию составляющих, полученных после декомпозиции передаточной функции упругого момента. Ниже выполняется исследование разработанного способа методом компьютерного моделирования.

6.7. Анализ амплитуды упругого момента в режиме адаптивного подтормаживания

6.7.1. Разработка программы

Для исследования режима адаптивного подтормаживания разработана программа расчета амплитуды упругого момента в валопроводах главных электроприводов прокатного стана, ее алгоритм представлен на рис. 6.16 [307]. Она предназначена для последовательного многократного имитационного моделирования двухмассовой системы главного привода клетки прокатного стана с вариацией обжатий и скоростей захвата в рабочем диапазоне нагрузок.

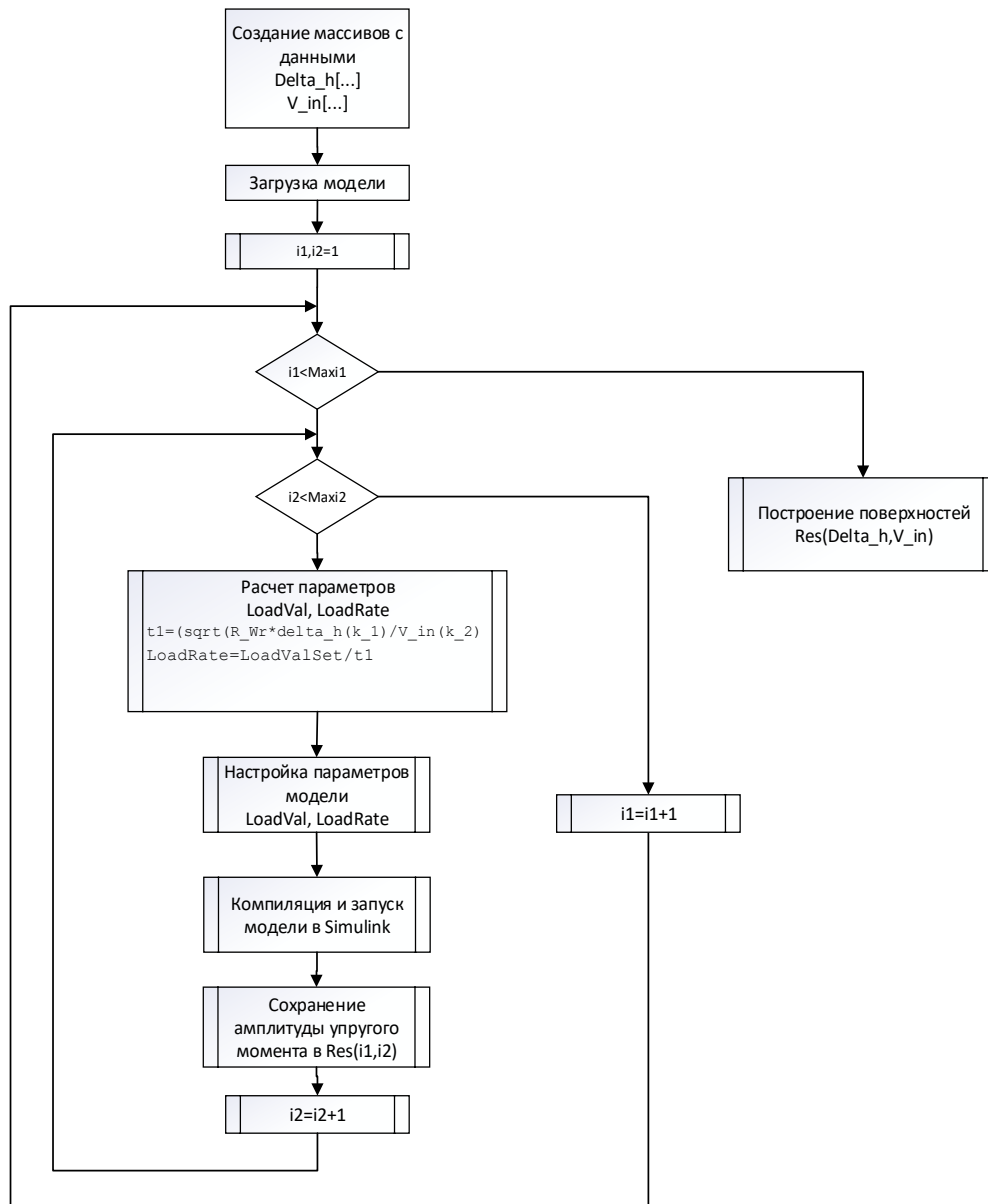


Рисунок 6.16 – Алгоритм программы расчета амплитуды упругого момента

С ее помощью моделируется процесс захвата заготовки в различных технологических условиях. Результатом расчета является амплитуда упругого момента в валопроводе главного привода при заданных переменных параметрах: обжатии раската, скорости захвата и постоянных параметрах: коэффициентах регулятора скорости, параметрах двигателя и величинах, описывающих механическую передачу. По результатам моделирования строятся зависимости скорости захвата от обжатия, при которых обеспечивается постоянство амплитуды упругого момента. Полученные зависимости могут быть использованы в системе задания скоростей электроприводов клетки с целью ограничения упругого момента в валопроводах, в результате чего снижается аварийность (случаи поломки шпинделей) и продлевается срок службы.

Выполнен анализ зависимости амплитуды момента, от скорости захвата (в диапазоне 1..4, м/с) и обжатия (в диапазоне 0..40 мм) для величины момента 100% номинального. Моделирование выполнено без подтормаживания, целью является определение оптимальной скорости захвата для разных проходов, т.е. при разной толщине раската. Это необходимо, чтобы не допустить поломки шпиндельного соединения. Результат в виде трехмерного графика представлен на рисунок 6.17. По нему может быть сделан вывод о существенной зависимости амплитуды момента от исследуемых факторов и подтверждена актуальность исследования их влияния на амплитуду момента в обычном режиме и при реализации разработанного способа.

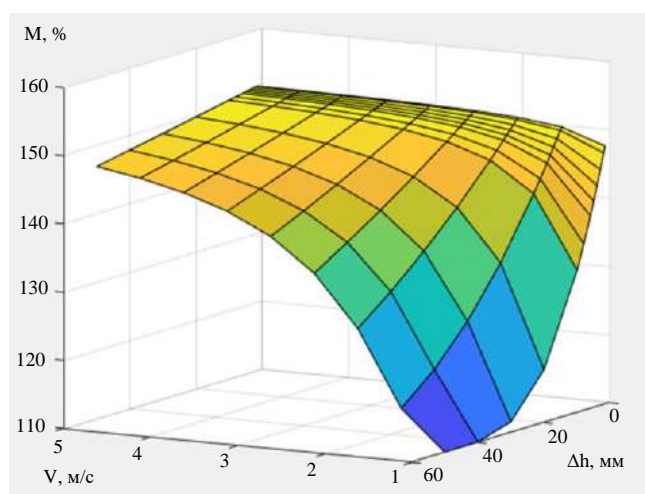
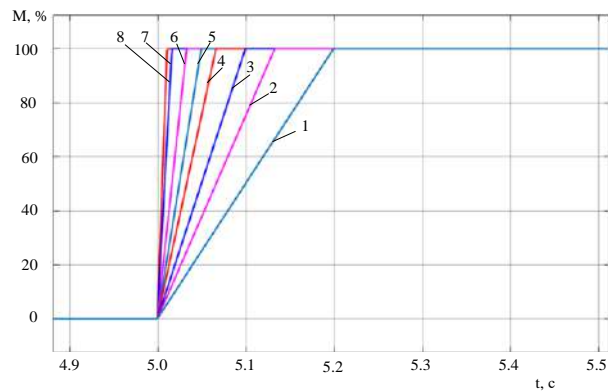


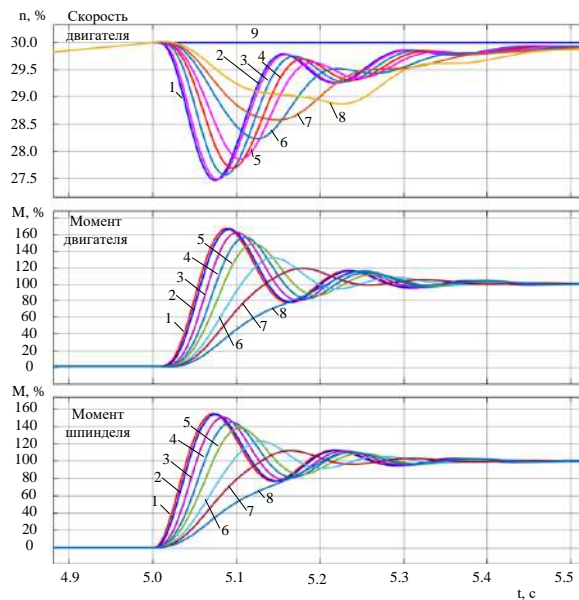
Рисунок 6.17 – Зависимость амплитуды упругого момента от скорости захвата и обжатия при нагрузке 100% без подтормаживания

6.7.2. Исследование влияния темпов ускорения и замедления

На первом этапе выполнено исследование зависимости амплитуды упругого момента от темпа приложения нагрузки без подтормаживания, но с замкнутым угловым зазором. Моделировалось приложение момента нагрузки, равного 100% номинала со следующими темпами (рис. 6.18, а): 9000, 6000, 3000, 2000, 1500, 1000, 750, 500 %/с (зависимости 1–8, соответственно). Условия моделирования: величина нагрузки 100%, скорость заготовки 30% номинальной, ПИ – регулятор скорости. Полученное семейство кривых переходного процесса показано на рис. 6.18, б. Обработанные результаты моделирования приведены в таблице 6.5.



а



б

Рисунок 6.18 – Темп приложения момента нагрузки (а) и реакция на приложение нагрузки (б): окно 1 – скорость двигателя; окно 2 – момент двигателя; окно 3 – момент на шпинделе

Таблица 6.5 – Значения амплитуды упругого момента при разных темпах приложения нагрузки

Номер кривой переходного процесса	Темп приложения нагрузки, %/с	Амплитуда упругого момента, %
1	9000	155
2	6000	154
3	3000	150
4	2000	145
5	1500	138
6	1000	123
7	750	112
8	500	110

Графическое представление этой зависимости приведено на рис. 6.19, кривая 1. Из него следует, что при относительно небольших темпах приложения нагрузки (от 400 %/с до 2500 %/с) амплитуда момента на шпинделе увеличивается от 110% до 150%, т.е. в 1,36 раза. При дальнейшем росте темпа увеличение момента не так существенно. Зависимость 2 получена для тех же условий захвата, но с последующим адаптивным подтормаживанием. Как видно, этот случай обеспечивает минимальные и практически постоянные амплитуды момента на шпинделе.

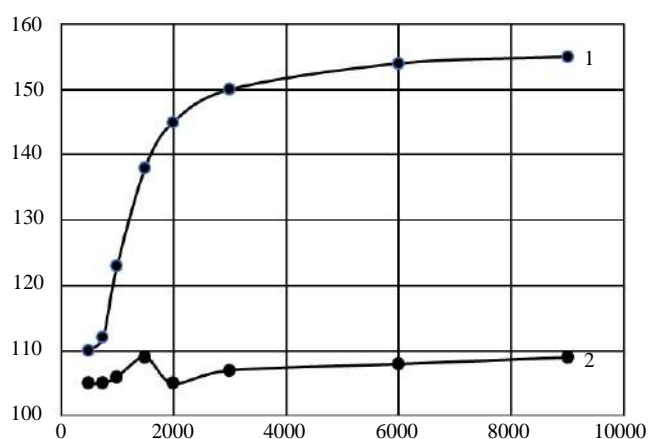


Рисунок 6.19 – Графики зависимости амплитуды упругого момента от темпа приложения нагрузки: 1 – без подтормаживания; 2 – с адаптивным подтормаживанием

Для подтверждения актуальности адаптации темпа подтормаживания исследованы процессы при различных заданиях темпа торможения после захвата для двух вариантов систем управления. На рис. 6.20 приведены зависимости

при приложении номинальной нагрузки (100%) без подтормаживания и в работанной системе с темпами 1000, 1500 и 3000 %/с.

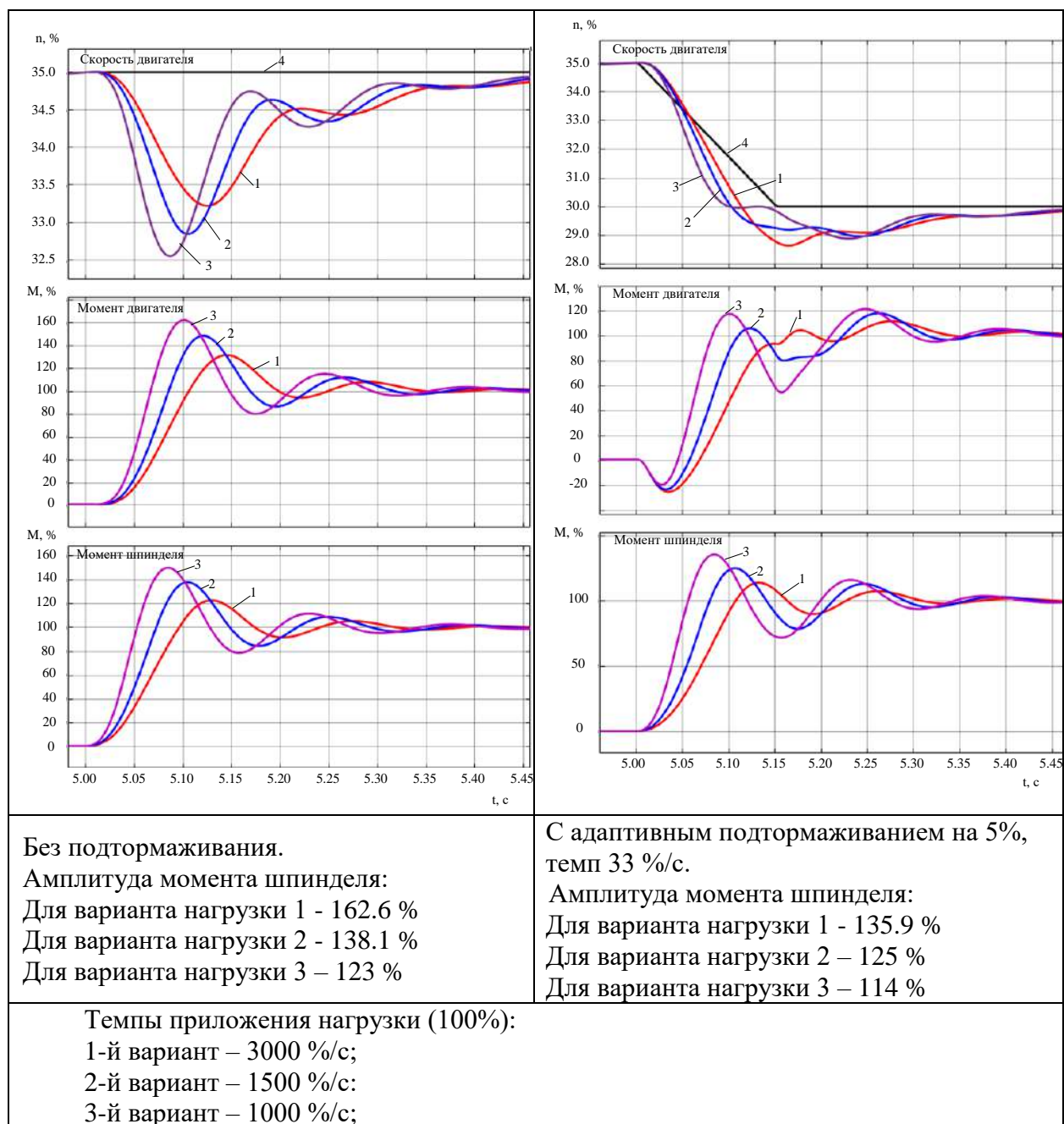
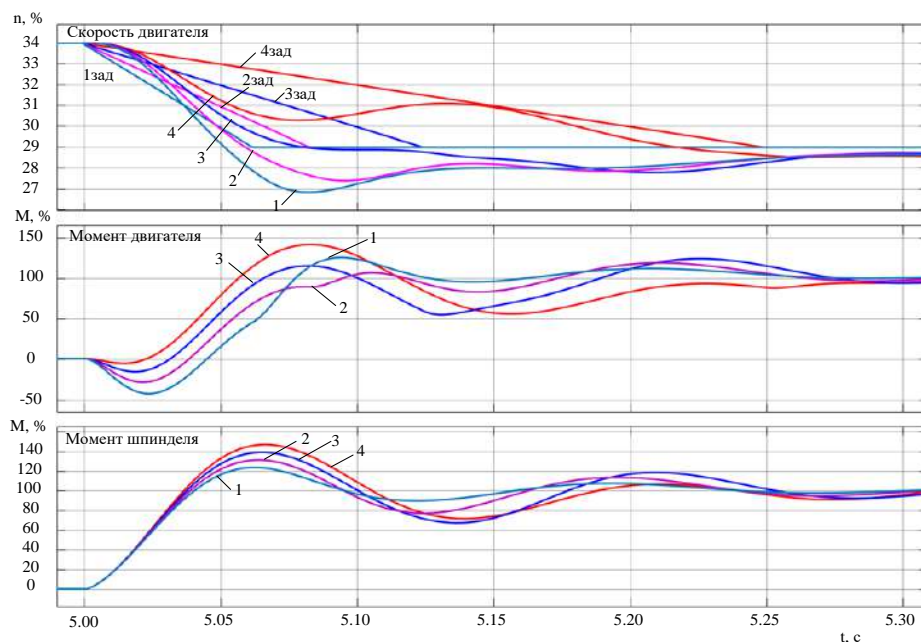


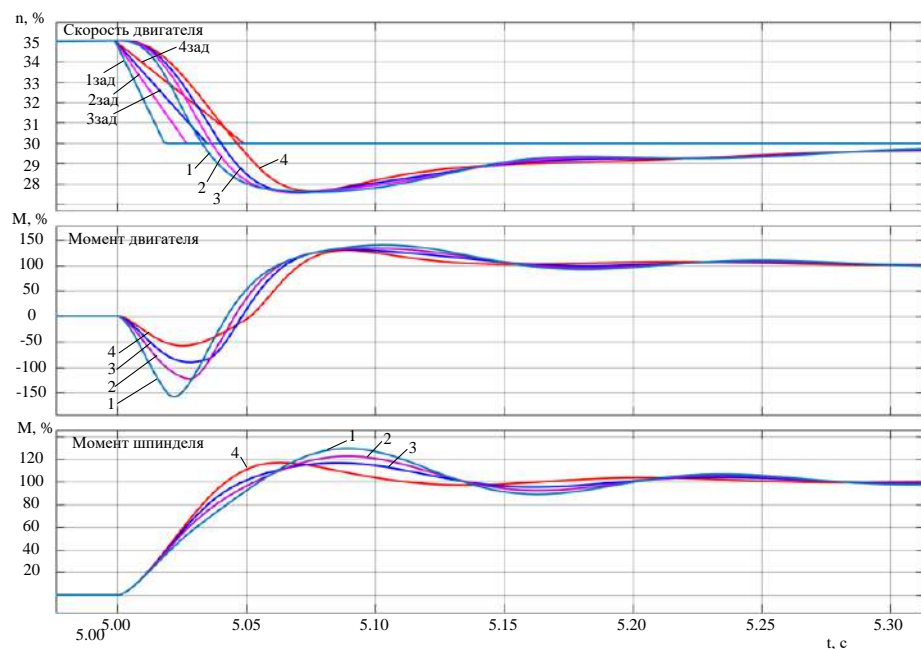
Рисунок 6.20 – Графики координат и значения амплитуд упругого момента при различных нагрузках: окна 1 – задание скорости и актуальная скорость; окна 2 – моменты двигателя; окна 3 – моменты на шпинделе

Также были выполнены исследования для различных установившихся скоростей после замедления (величин замедления в %) и темпов замедления

после захвата. Характерные зависимости приведены на рис. 6.21. Они получены при условии, что нагрузка 100 % прикладывается скачком. На рис. 6.21, а темп замедления составляет 20, 40, 60, 80 %/с (зависимости 1–4, соответственно). На рис. 6.21, б темп равен 100, 140, 180, 260 %/с.



а



б

Рисунок 6.21 – Переходные процессы скорости (окна 1), момента двигателя (окна 2) и момента на шпинделе (окна 3) при торможении после захвата с темпами 20, 40, 60, 80 %/с (а) и с темпами 100, 140, 180, 260 %/сек (б)

Из графиков на рис. 6.21, а следует вывод, что с ростом замедления амплитуда упругого момента сначала снижается, а затем растет. Это подтверждают значения, приведенные в таблице 6.6: при темпах замедления от 20 до 100 %/с наблюдается снижение амплитуд, при темпах от 100 до 260 %/с – их увеличение.

Таблица 6.6 – Амплитуды моментов при различных темпах замедления после захвата

Нагрузка, %	Темп приложения нагрузки, %/с	Величина замедления, %	№ кривой	Замедление зад. скорости, %/с	Амплитуда момента, %
100	∞ (бесконечность)	5	1	20	147
			2	40	139
			3	60	132
			4	80	124
			5	100	117
			6	140	117
			7	180	123
			8	260	130

Обобщенные данные об амплитудах упругого момента при варьировании двух исследуемых параметров приведены в табл. 6.7. В графическом виде при четырех значениях темпа приложения нагрузки они представлены на рис. 6.22.

Таблица 6.7 – Амплитуды моментов при разных вариантах нагрузки

Величина замедления (%)	Темп замедления (%/с)	Амплитуда упругого момента, %		
		Вар. нагрузки 1	Вар. нагрузки 2	Вар. нагрузки 3
5	33	203	175	162
6	53	194	170	162
5	50	196	177	176
8	80	183	176	182

По ним определены оптимальные (желаемые) значения темпа приложения нагрузки и замедления после захвата, при которых достигаются минимальные амплитуды упругого момента. Эти значения приведены в таблице 6.8, на рис. 6.23 они построены в виде графической зависимости.

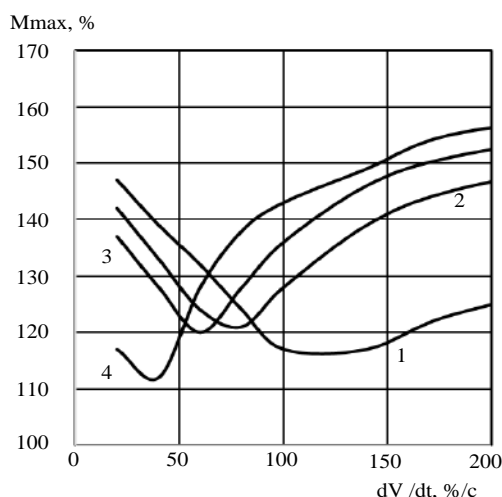


Рисунок 6.22 – Зависимости амплитуды упругого момента от темпа замедления при подтормаживании для темпов приложения: 1 – бесконечность (скачком); 2 – для 3000 %/с; 3 – для 2000 %/с; 4 – для 1000 %/с

Таблица 6.8 – Значения желаемого замедления для минимальной амплитуды упругого момента при разных темпах приложения нагрузки

Темп приложения нагрузки, %/с	Желаемый темп замедления, %/с
∞	120
3000	80
2000	60
1000	40

По этому графику следует корректировать (подстраивать) темп замедления в зависимости от темпа нарастания нагрузки, который определяется по зависимостям (6.15), (6.16) как функция обжатия, радиуса вала и прогнозируемого момента прокатки. Следует заметить, что все приведенные выше выкладки получены на основе модели электропривода стана 5000. Поэтому они справедливы только для исследуемых электромеханических систем ВГП и НГП с их параметрами жесткости, соотношениями масс, настройками регулятора скорости и т.д. Вместе с тем, проведенные исследования представляют собой методику определения влияния темпов ускорения и замедления для получения минимального упругого момента на шпинделе при захвате раскатов валами.

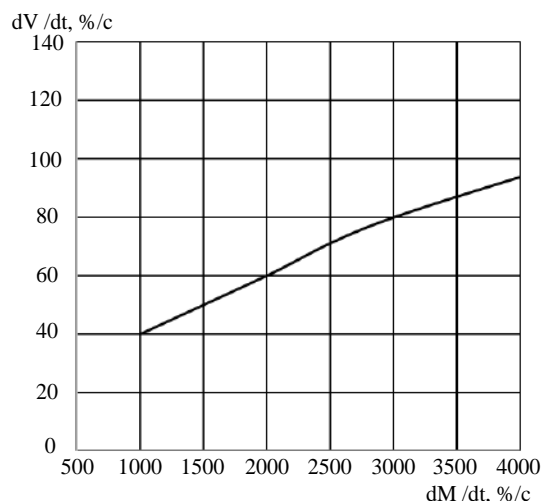


Рисунок 6.23 – Зависимость желаемого замедления от темпа приложения нагрузки для обеспечения минимума упругого момента

6.8. Реализация и исследования разработанного способа

6.8.1. Реализация алгоритма управления

Для практической реализации рассмотренного способа в алгоритмах системы управления, реализованных в ПЛК клетки, предложена следующая идея. Нужно по результатам моделирования сформировать таблицу зависимости пары значений (темпа замедления и величины снижения скорости после захвата) от момента нагрузки и темпа ее нарастания при входе раската в клеть. В результате темп замедления и величина замедления будут являться настроечными параметрами для системы подтормаживания. Данный алгоритм поясняет структура на рисунке 6.24. Технически она является дополнением к схеме системы, реализующей разработанный способ, представленной на рисунке 6.15.

В блоке «Расчет времени нарастания момента» проводятся вычисления темпа роста момента

$$\frac{dM_L}{dt} = \frac{M_L}{t_1}$$

где величина t_1 рассчитывается по выражению (6.16).

Для формирования таблицы проведены расчеты на модели с вариациями величины момента нагрузки M_L и $\frac{dM_L}{dt}$. Для каждой выборки $\left(M_L, \frac{dM_L}{dt}\right)$ необхо-

димом найти оптимальную пару искомых величин: замедления ΔV и темпа замедления $\frac{d\Delta V}{dt}$, которой соответствует минимальное значение амплитуды упругого момента. По этим значениям формируется таблица вида 6.9.

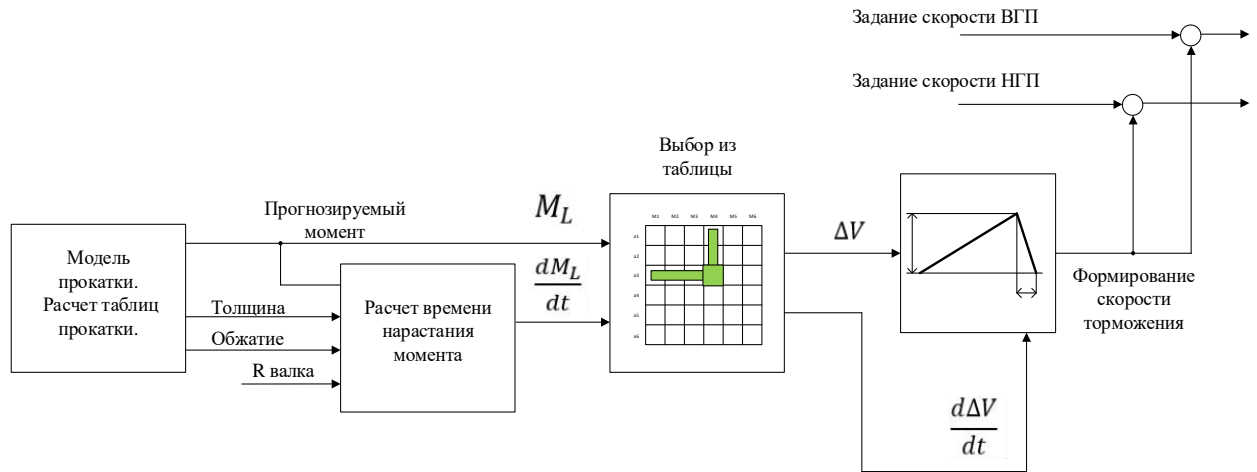


Рисунок 6.24 – Структура, поясняющая реализацию разработанного способа управления

Таблица 6.9 – Расчетные значения замедления и темпа замедления для настройки алгоритма управления

	M_L [1]	M_L [2]	M_L [3]	M_L [4]
$\frac{dM_L}{dt}$ [1]	ΔV [1,1]	ΔV [2,1]	ΔV [3,1]	ΔV [4,1]
	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [1,1]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [2,1]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [3,1]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [4,1]
$\frac{dM_L}{dt}$ [2]	ΔV [1,2]	ΔV [2,2]	ΔV [3,2]	ΔV [4,2]
	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [1,2]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [2,2]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [3,2]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [4,2]
$\frac{dM_L}{dt}$ [3]	ΔV [1,3]	ΔV [2,3]	ΔV [3,3]	ΔV [4,3]
	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [1,3]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [2,3]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [3,3]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [4,3]
$\frac{dM_L}{dt}$ [4]	ΔV [1,4]	ΔV [2,4]	ΔV [3,4]	ΔV [4,4]
	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [1,4]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [2,4]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [3,4]	$\frac{d\Delta V}{dt}$ [4,4]

Эта таблица будет обрабатываться интерполятором, который будет выдавать настроечные значения в блок управления замедлением.

6.8.2. Исследования при вариации величины момента и темпа его увеличения при захвате

Для реализации алгоритма управления методом моделирования определены оптимальные значения темпа торможения и величины снижения скорости. Каждая из них зависит от нагрузки и темпа ее приложения. В качестве примера, в таблице 6.10 приведены результаты расчета минимальных моментов на шпинделе при разных значениях темпа торможения, при принудительном снижении скорости после захвата на 5% и прикладываемой нагрузке 150%. Эти результаты в виде графиков построены на рисунке 6.25.

Таблица 6.10 – Результаты расчета амплитуды упругого момента при снижении скорости на 5% и нагрузке 150%

Условия вычислительного эксперимента				
Нагрузка 150 %		Снижение заданной скорости – 5%		
Темп торможения, %/с	Максимум упругого момента при темпе приложения нагрузки [%/с]:			
	∞	3000	2000	1000
20	225	209	195	161
40	217	201	188	171
60	209	193	188	176
80	201	196	200	174
100	195	205	209	171
140	192	215	217	169
180	195	221	220	172
260	201	227	224	173

Аналогичные таблицы и графики амплитуд момента для значений снижения скорости 9%, 14% и 18% приведены в Приложении 5 в таблицах П.5.1–П.5.3 и на рисунках П.5.1–П.5.3, соответственно. Они позволяют определять оптимальные значения темпа замедления при разных темпах приложения нагрузки.

Представленные результаты моделирования, по сути, позволяют «вручную» выполнить адаптацию темпа замедления как функции темпа приложения нагрузки. Данный материал является наглядной иллюстрацией разработанного способа, однако не является эффективным при практической настройке

алгоритмов управления электроприводом. Поэтому необходима «автоматизация» представленных вычислений.

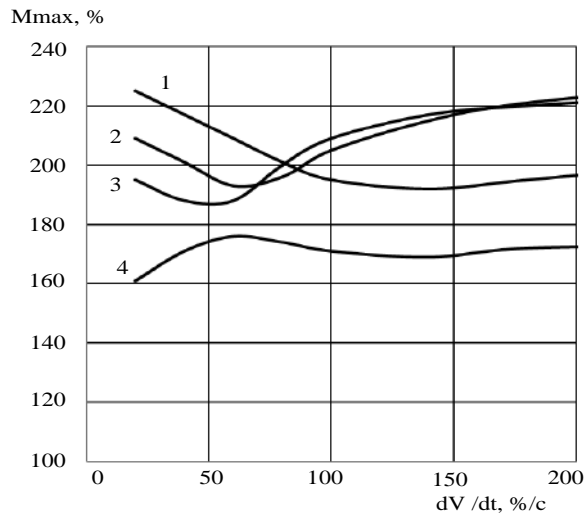


Рисунок 6.25 – Зависимости минимальных значений амплитуды упругого момента от темпа замедления при подтормаживании на 5%, аналогичные рис. 6.22, для темпов приложения нагрузки: 1 – бесконечность (скачком); 2 – для 3000 %/с; 3 – для 2000 %/с; 4 – для 1000 %/с

6.9. Методика определения параметров подтормаживания по критерию минимального значения амплитуды упругого момента

Поиск ведется при помощи программы, написанной на языке Matlab. Целью является определение оптимальных значений на основе функционала оптимальности. Предварительно нужно определиться, какие параметры следует учитывать и с каким весом. С этой целью разработаны модель в пакете Matlab Simulink и набор команд (скрипт) на языке Matlab, позволяющие выполнить вычисление упругого момента в зависимости от расчетного темпа приложения нагрузки и величины снижения скорости после захвата. Схема модели представлена на рис. 6.26, текст программы – в Приложении 5 [308]. Блок Drive4 на рисунке представляет собой модель двухмассового электропривода.

Программа выбирает пару значений из величин момента нагрузки и темпа его приложения, которые заранее заданы набором следующих параметров: величины нагрузки 50, 100, 150, 200 % и темпы нагрузки 500, 750, 1000, 2000, 3000, 6000 %/с. Для каждой вариации скриптом автоматически настраиваются параметры модели в Simulink и производится многократное моделирование с

перебором параметров. В рассматриваемом случае ведется выбор из величин снижения скорости после захвата в 4, 8, 12, 16, 20 % и темпов подтормаживания 40, 60, 80, 100, 150, 200 %/с. В примере происходит запуск 720 вариантов модели, показанной на рисунке 6.26.

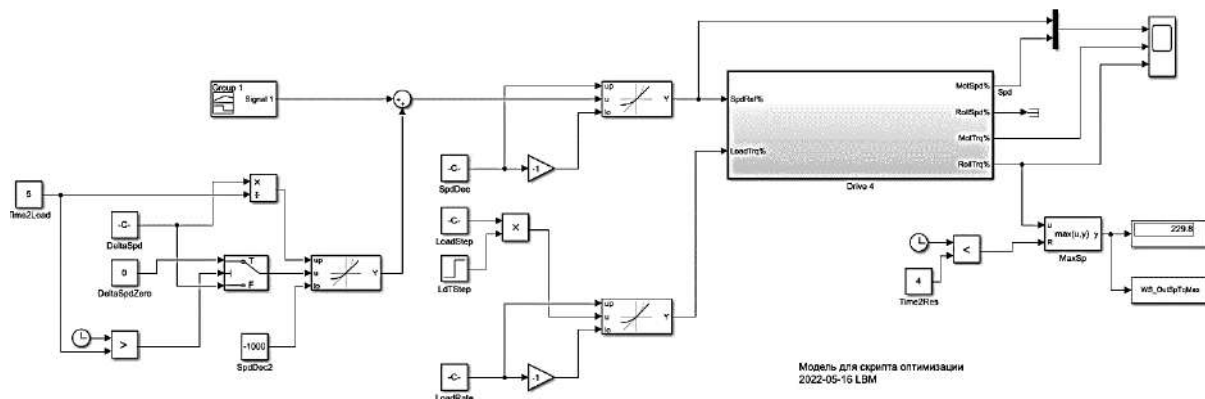


Рисунок 6.26 – Модель для расчета оптимальных параметров управления

Значения упругого момента выделяются в процессе расчета на модели и складываются в 4-х мерный массив, с координатами, соответствующими величине нагрузки, темпу приложения нагрузки, темпу замедления и величине замедления. Затем этот 4-х мерный массив разделяется на набор 2-х мерных таблиц, каждая из которых соответствует выборке величины нагрузки и темпа ее приложения. В каждой таблице определяются минимальное значение и настройки (величины темпа замедления и установившееся значение скорости после замедления), при которых получены эти минимальные значения. Эти значения помещаются в таблицы с набором оптимальных значений при заданных параметрах нагрузки, что и является результатом работы программы.

Для исследуемого случая получены параметры, представленные в таблицах 6.11 и 6.12. По координатам, указанным в них, построены трехмерные графики на рисунках 6.27, а и б. На них по осям x , y отложены индексы массива, а не значения координат. Это сделано для удобства считывания и задания параметров управления интерполятором.

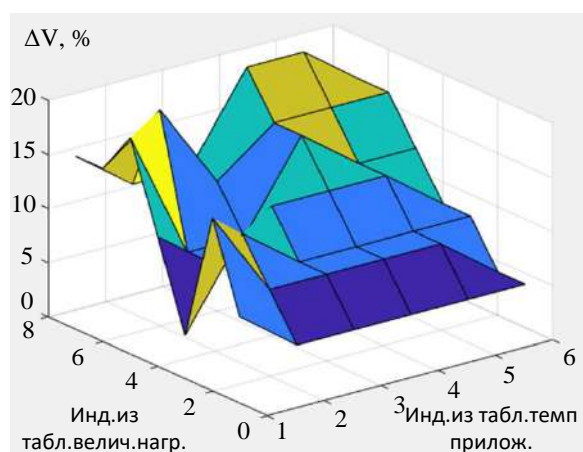
На основании полученных данных заполняется таблица 6.9 для интерполятора. Пример применения представленной методики для расчета оптимальных параметров настройки системы приведен в Приложении 5 (Пример П.5.1).

Таблица 6.11 – Оптимальные значения величины снижения скорости при подтормаживании в зависимости от параметров нагрузки

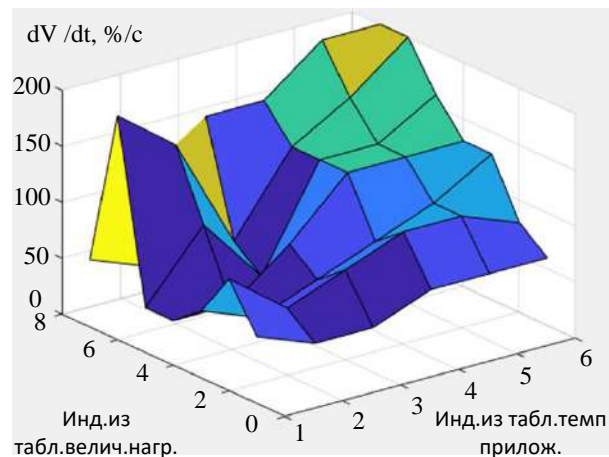
Параметры нагрузки		Темпы приложения нагрузки					
		500	750	1000	2000	3000	6000
Величины нагрузки	50	8	4	4	4	4	4
	75	16	8	8	8	8	4
	100	4	12	8	8	8	8
	125	12	8	12	12	12	8
	150	20	8	8	16	12	12
	175	16	20	12	16	16	16
	200	16	12	12	20	20	16

Таблица 6.12 – Оптимальные значения темпа торможения в зависимости от параметров нагрузки

Параметры нагрузки		Темпы приложения нагрузки					
		500	750	1000	2000	3000	6000
Величины нагрузки	50	60	40	40	60	60	60
	75	100	60	80	100	100	80
	100	60	40	60	80	100	130
	125	40	40	80	130	130	130
	150	40	100	40	130	130	160
	175	200	160	60	130	160	200
	200	60	40	160	160	200	200



а



б

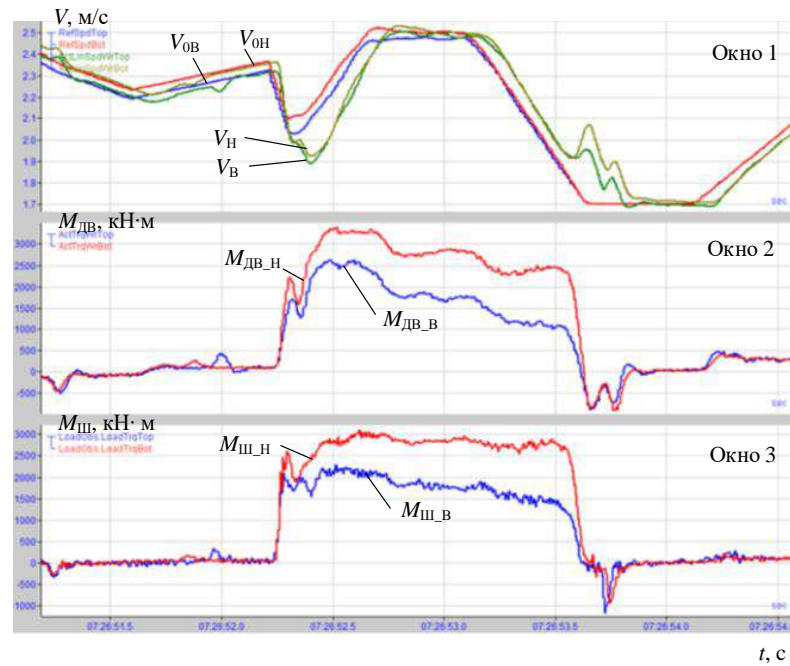
Рисунок 6.27 – Графики оптимальных значений снижения скорости ΔV (а) и темпов подтормаживания $\frac{d\Delta V}{dt}$ (б)

Таким образом, разработана методика автоматизированного выбора параметров настройки системы управления: величины снижения скорости при подтормаживании ΔV и темпа подтормаживания $\frac{d\Delta V}{dt}$. Она содержит следующие позиции:

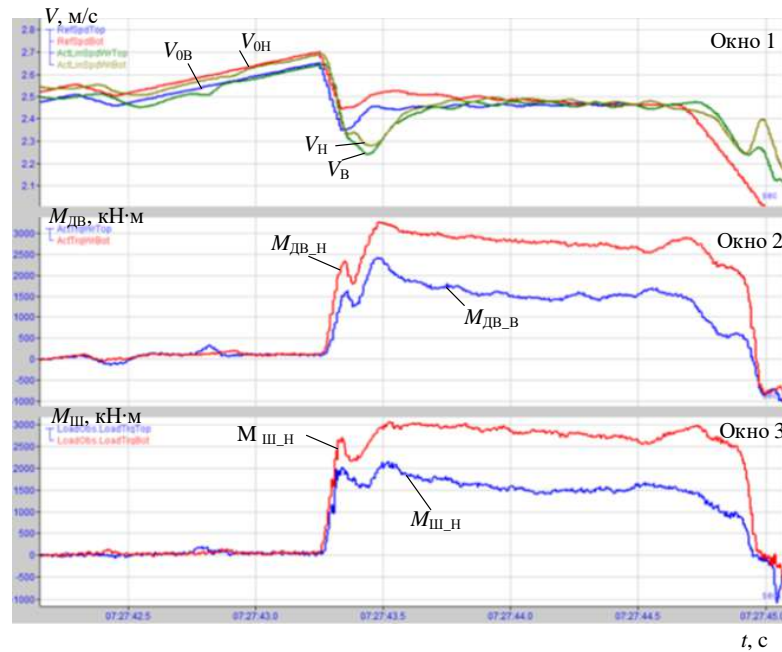
1. Предварительное определение ожидаемых моментов прокатки для каждого прохода. Задание моментов по проходам в четырехмерный массив данных для управления прокаткой.
2. С помощью разработанной модели расчет темпов приложения нагрузки (зависит от настройки электропривода, поэтому выполняется один раз).
3. С помощью модели и скрипта для вычисления кратности упругого момента формирование четырехмерного массива данных для определения минимальной амплитуды упругого момента. При необходимости формирование таблиц, аналогичных таблицам 6.11 и 6.13 и построение графиков, аналогичных представленным на рисунке 6.27.
4. Автоматический выбор и задание в интерполятор оптимальных параметров настройки (величины и темпа снижения скорости).
5. Апробация настройки на объекте.

6.10. Промышленные испытания алгоритма управления

На завершающем этапе разработки системы ограничения динамических нагрузок на основе наблюдателя упругого момента выполнена промышленная апробация алгоритма управления в электроприводах стана 5000. В автоматизированном режиме задавались параметры подтормаживания (величина и темп снижения скорости) при известных значениях момента прикладываемой нагрузки. Предварительно на модели (рис. 6.26) определялся темп нарастания момента, зависящий от настройки контуров САР электропривода. На рис. 6.28, а и б приведены два варианта «идеальных» осциллограмм, полученных при темпах замедления, близких к оптимальным при разных величинах прикладываемой нагрузки. Они определены по представленной методике в автоматизированном режиме. Аналогичные осциллограммы приведены на рис. 4.24 в п. 4.7.2 для режима захвата с последующей профилированной прокаткой.



а



б

Рисунок 6.28 – Осциллограммы координат электроприводов стана 5000 при последовательной прокатке двух заготовок (а) и (б) при оптимальных параметрах подтормаживания

В окнах 1 показаны осциллограммы заданий скоростей двигателей ВГП и НГП V_{0B} и V_{0H} , а также фактические (актуальные) скорости V_B и V_H , об/мин. В окнах 2 показаны моменты ВГП и НГП $M_{дв_B}$ и $M_{дв_H}$, кН·м, а в окнах 3 – аналогичные осциллограммы моментов на шпинделях, восстанавливаемых с помощью наблюдателя, рассмотренного в п. 6.2.

На всех четырех рисунках (рис. 4.24, а, б и рис. 6.28, а, б) динамические моменты двигателей ВГП и НГП, а также динамические моменты на шпинделях не достигают значений в установившемся режиме прокатки. Это происходит потому, что отрицательный динамический момент, создаваемый при подтормаживании, частично или полностью компенсирует динамический момент, вызванный ударным приложением нагрузки.

С учетом того, что ограничение упругого момента является целью разработки способа, следует утверждать, что поставленная цель достигнута. Разработанный комбинированный способ управления с предразгоном и адаптивным торможением после захвата раската валками рекомендуется для внедрения в электроприводах клеток прокатных станов, работающих с ударным приложением нагрузки. Результаты его внедрения на стане 5000 (в комплексе с другими техническими решениями) рассматриваются в разделе 7.

ВЫВОДЫ

1. Разработан цифровой наблюдатель упругого момента на шпинделях верхнего и нижнего валков, представляющий собой фрагмент программы промышленного контроллера. Основным компонентом наблюдателя является ПИ регулятор автонастройки, благодаря чему операция дифференцирования заменена интегрированием. Это является преимуществом по сравнению с известными техническими решениями. Вторым преимуществом является простота настройки.

2. Выполнена виртуальная настройка наблюдателя, при которой после отработки в Matlab-Simulink вычислительный алгоритм экспортирован в программное обеспечение ПЛК. Приведены выражения для расчета параметров регулятора автонастройки. Представлены осциллограммы, подтверждающие, что предложенный алгоритм при правильной настройке ПИ регулятора позволяет добиться абсолютного совпадения восстановленных и измеренных сигналов в динамических режимах, возникающих за цикл прокатки.

3. Путем анализа осциллограмм, полученных на стане 5000, и зависимостей, построенных путем моделирования, доказано влияние скорости захвата металла валками на динамические показатели электромеханической системы прокатной клетки. На основе декомпозиции (представления передаточной

функции в виде двух составляющих) обоснован комбинированный способ ограничения динамического момента в двухмассовой электромеханической системе, компенсирующий влияние нелинейных свойств, упругости вала и темпа приложения нагрузки (скорости заполнения очага деформации).

4. Представлена структура системы управления электроприводами, обеспечивающая реализацию способа за счет предразгона и адаптивного торможения для компенсации влияния темпа приложения нагрузки. Отличительные признаки способа реализованы следующим образом:

- захват в режиме ускорения электропривода обеспечивается включением дополнительного задатчика интенсивности;
- сигнал управления формируется как функция усилия прокатки и положения заготовки относительно клетки;
- темп торможения после захвата определяется автоматически как функция темпа приложения нагрузки (поэтому данный способ регулирования назван адаптивным).

5. Разработана программа расчета амплитуды упругого момента на валах при различных технологических условиях. Представлены зависимости, предназначенные для определения оптимальной скорости захвата в разных проходах. Сделан вывод о существенной зависимости амплитуды от исследуемых факторов. Подтверждена актуальность анализа их влияния на амплитуду как в обычном режиме (без предразгона и торможения), так и при реализации разработанного способа.

6. Выполнен комплекс исследований методом компьютерного моделирования. В результате анализа зависимости амплитуды упругого момента от темпа приложения нагрузки подтверждено, что адаптивное подтормаживание обеспечивает минимальные и практически постоянные амплитуды момента на шпинделе. Данный вывод подтвержден результатами сравнения зависимостей без подтормаживания и в разработанной системе при приложении номинальной нагрузки с различными темпами.

7. Выполнены исследования для различных установившихся скоростей после замедления и темпов замедления после захвата. Сделан вывод, что при темпах замедления от 20 до 100 %/с наблюдается снижение амплитуд, а при

темпах от 100 до 260 %/с – их увеличение. Графическое представление зависимостей амплитуды упругого момента от темпа замедления при подтормаживании позволило определить оптимальные соотношения темпов приложения нагрузки и замедления после захвата, при которых достигаются минимальные амплитуды упругого момента.

8. Представлена структура, поясняющая реализацию разработанного способа управления. По результатам моделирования сформирована таблица зависимости значений (темпа замедления и уровня снижения скорости после захвата) от величины момента нагрузки и темпа его нарастания при входе раската в клеть. Данные обрабатываются интерполятором и задаются в систему управления. В результате темп замедления и величина замедления становятся настроечными параметрами для системы подтормаживания.

9. На основании проведенных исследований обоснована методика автоматизированного выбора параметров настройки системы управления. Она обеспечивает:

- расчет темпов приложения нагрузки;
- формирование четырехмерного массива данных для определения минимальной амплитуды упругого момента;
- автоматический выбор и задание в интерполятор величины и темпа снижения скорости при подтормаживании.

10. Выполнены экспериментальные исследования алгоритма управления в электроприводах стана 5000. Для этого в автоматизированном режиме задавались параметры подтормаживания при известных расчетных значениях момента прикладываемой нагрузки. В результате анализа осциллограмм доказано, что отрицательный динамический момент, создаваемый при подтормаживании с оптимальным темпом, полностью компенсирует динамический момент, вызванный ударным приложением нагрузки.

11. Разработанный комбинированный способ управления с предразгоном и адаптивным торможением после захвата раската валками рекомендуется для внедрения в электроприводах клеток прокатных станов, работающих с ударным приложением нагрузки.

Глава 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Практическая реализация способов управления электроприводами, рассмотренных в главе 4, становится реальной благодаря внедрению цифровых технологий и развитию ресурсов ПЛК. Внедрение разработок возможно в программном обеспечении ПЛК, управляющих электро- и гидроприводами прокатных клетей. Ниже приводится структура цифровой системы управления, реализующей рассмотренные выше алгоритмы в ПЛК клетки стана 5000.

Оценку результатов и технической эффективности разработок целесообразно выполнить методом сравнительного анализа осциллограмм, полученных при проектных и внедренных алгоритмах управления. Для исключения влияния случайных факторов следует выполнить обобщение результатов. Однако в рамках диссертации это не всегда возможно, поскольку требует накопления и статистической обработки информации. Вместе с тем, как показывает практика, сравнение процессов в режимах «как было» – «как стало», как правило, позволяет выполнить достоверную оценку процессов. При этом должны анализироваться характерные осциллограммы, позволяющие дать количественную оценку результатов.

Отличием поставленных задач является исследование не только рабочих, но и аварийных режимов, возникающих в процессе эксплуатации электроприводов. Такие исследования должны выполняться путем анализа сигналов от наблюдателей координат, рассмотренных в разделах 5 и 6. В представленном разделе рассматриваются аварии, вызвавшие поломку элементов шпиндельного соединения, а также наиболее тяжелая авария, обусловленная затягиванием листа в промежуток между нижним валком и оправкой (нахлест листа на валок). Для борьбы с подобными авариями поставлена задача разработки системы защиты, обеспечивающей экстренный останов электропривода в предаварийной ситуации. Для этого необходимы обоснование и достоверная оценка диагностических признаков и разработка адаптивного задатчика интенсивности торможения.

Также ставится задача разработки цифровой системы защиты двигателей от перегрева. Актуальна разработка двухуровневой тепловой защиты, осуществляющей информирование персонала о превышении температурой первого заданного уровня, а при превышении второго (предельно допустимого) уровня – формирование сигнала на останов по окончании цикла прокатки. Экстренный останов по типу «застывание раската в валках» не рассматривается. Наличие двух уровней позволит избежать аварии без потери металла, что возникло бы в случае экстренного останова, традиционно применяемого на станах. В качестве диагностического критерия используется сигнал о температуре, поступающий от наблюдателя, рассмотренного в разделе 5.

Перечисленные системы строятся в цифровом виде на промышленных логических контроллерах на основе сигналов, поступающих от цифровых теней, каковыми являются разработанные наблюдатели координат. При пуско-наладочных работах и вводе в эксплуатацию актуальна технология НІІ. Поэтому рассмотрение этих систем в диссертации вполне обосновано и выполняется в рамках поставленных задач.

Решению перечисленных задач посвящен представленный раздел. В начале раздела рассматриваются результаты отдельных экспериментов, на следующих этапах – результаты опытно-промышленной эксплуатации внедренных систем. На основании проведенных исследований и промышленной эксплуатации должна быть выполнена оценка технико-экономической эффективности внедрения.

7.1. Результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов

7.1.1. Структура цифровой системы управления

Упрощенная схема цифровой системы управления электро- и гидроприводами клетки толстолистного стана представлена на рис. 7.1. По своему виду она аналогична структуре, приведенной в п. 4.7 на рис. 4.22 для группы клеток ШСП. В ней схематично показаны согласование нагрузок двигателей верхнего и нижнего валков за счет РДН с переключающейся структурой, управление ВПП и НПП в режимах формирования лыжи, управление гидравлическими

НУ в режиме профилированной прокатки и регулирование натяжения в промежутке между горизонтальной и вертикальной клетями. Все эти разработки рассмотрены в разделе 4. Для ее реализации и моделирования НПЛ при вводе в эксплуатацию должна быть применена виртуальная модель взаимосвязанных электро- и гидроприводов, рассмотренная в п. 2.3.

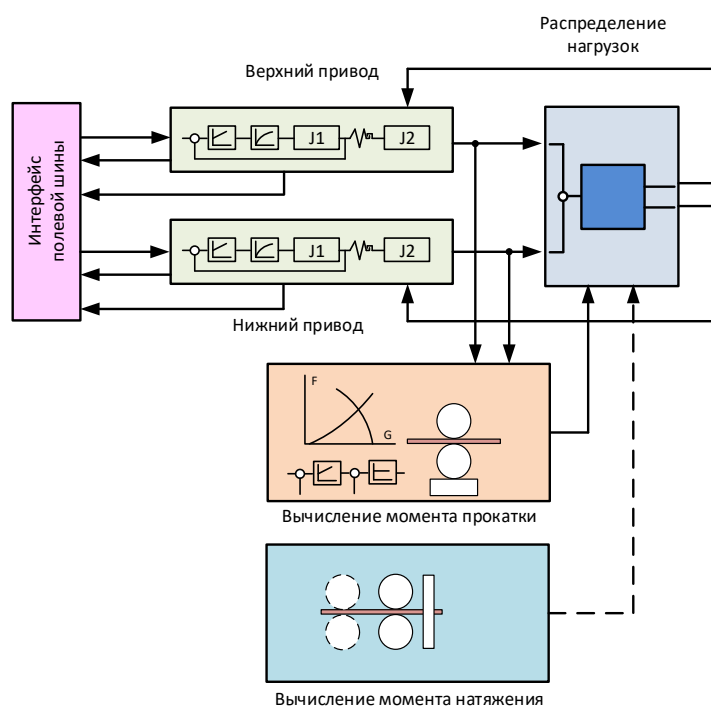


Рисунок 7.1 – Схема цифровой системы управления электроприводами клетки толстолистого стана

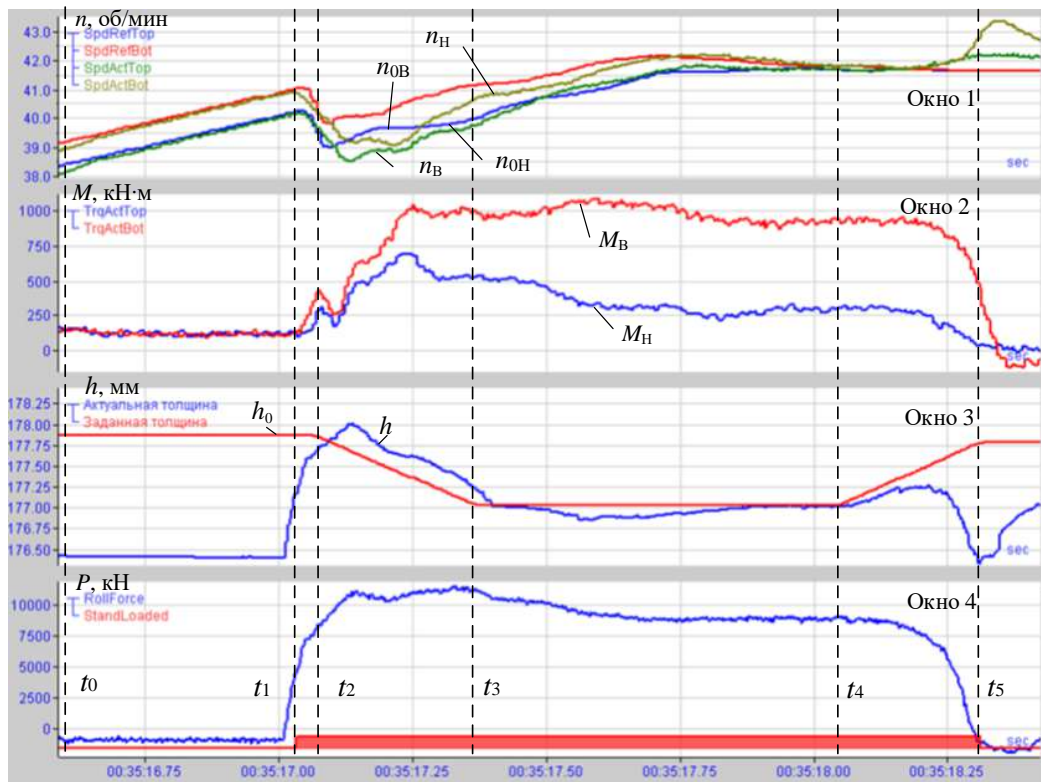
Данная структура включает фрагмент виртуальной модели объекта, реализованной в цифровом двойнике, показанной на рис. 2.17 в п. 2.4. Модуль «Распределение нагрузок» с внешними связями описывает взаимосвязь ВГП и НГП через металл. Модуль «Вычисление момента прокатки» выполняет функции косвенного вычисления (восстановления) толщины полосы, необходимого для совершенствования САРТ. Аналогично блок «Вычисление момента натяжения» предназначен для восстановления сигнала, определяющего взаимодействия между клетями. По существу, эти два блока представляют собой цифровые тени, являющиеся наблюдателями соответствующих технологических координат. Математическое описание взаимосвязи валков рассмотрено в [309, 310], силовая связь между клетями клеток исследована в [311, 312].

7.1.2. Осциллограммы САРТ в режиме профилированной прокатки

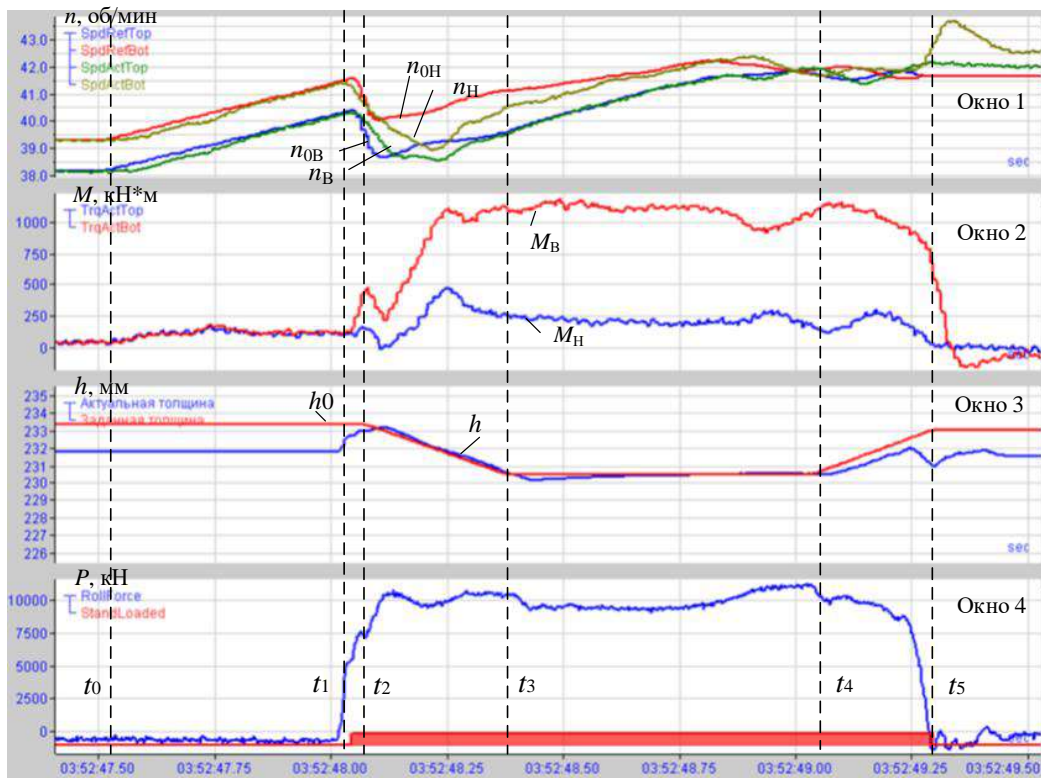
Для подтверждения достоверности выводов, сделанных в п. 4.4, на рис. 7.2 представлены результаты экспериментов, выполненных на стане 5000. На рис. 7.2, а приведены осциллограммы, полученные при проектной настройке САРТ, на рис. 7.2, б – при реализации разработанного алгоритма переключения структуры. В окнах 1 присутствуют осциллограммы заданий окружных скоростей двигателей $n_{0В}$ и $n_{0Н}$ и фактические (актуальные) скорости $n_{В}$ и $n_{Н}$, об/мин. В окнах 3 показаны моменты двигателей ВГП и НГП $M_{В}$ и $M_{Н}$, кН·м, в окнах 4 – заданная h_0 и актуальная h толщина, мм, в окнах 5 – усилие прокатки P , кН и сигнал логической 1 о наличии металла в валках.

В момент времени t_1 происходит захват металла валками, в момент t_6 – выход из клетки. Сигналы на формирование профилей переменной толщины подаются в интервалах t_1-t_2 и t_3-t_4 . Захват происходит в режиме ускорения электроприводов в интервале предразгона t_0-t_1 , предназначенного для замыкания угловых зазоров в шпиндельных соединениях. Сразу после захвата в интервале t_1-t_3 осуществляется принудительное торможение, обеспечивающее снижение упругой составляющей момента на шпинделе. Эти режимы, рассмотренные в разделе 6, внедрены в ходе предыдущих разработок и обеспечивают снижение динамических нагрузок в электромеханических системах. Формирование профилей переменной толщины на головном участке осуществляется в интервале t_1-t_3 , на конце раската – в интервале t_4-t_5 .

На рис. 7.2, а в течение всей продолжительности прокатки осуществляется регулирование толщины раската, на рис. 7.2, б в интервалах t_1-t_2 и t_3-t_4 осуществляется регулирование положение нажимных устройств, а в период t_2-t_3 и – регулирование толщины (сигналы коррекции положения НУ и толщины на рисунках не показаны). Это является отличительным признаком разработанных способа и САРТ. Сравнение сигналов актуальной толщины в окнах 4 показывает, что на рис. 7.2, б обеспечивается более точное соответствие фактической толщины h заданной толщине h_0 на всей длине раската.



а



б

Рисунок 7.2 – Осциллограммы, полученные при проектном (а) и предложенном (б) алгоритмах регулирования толщины

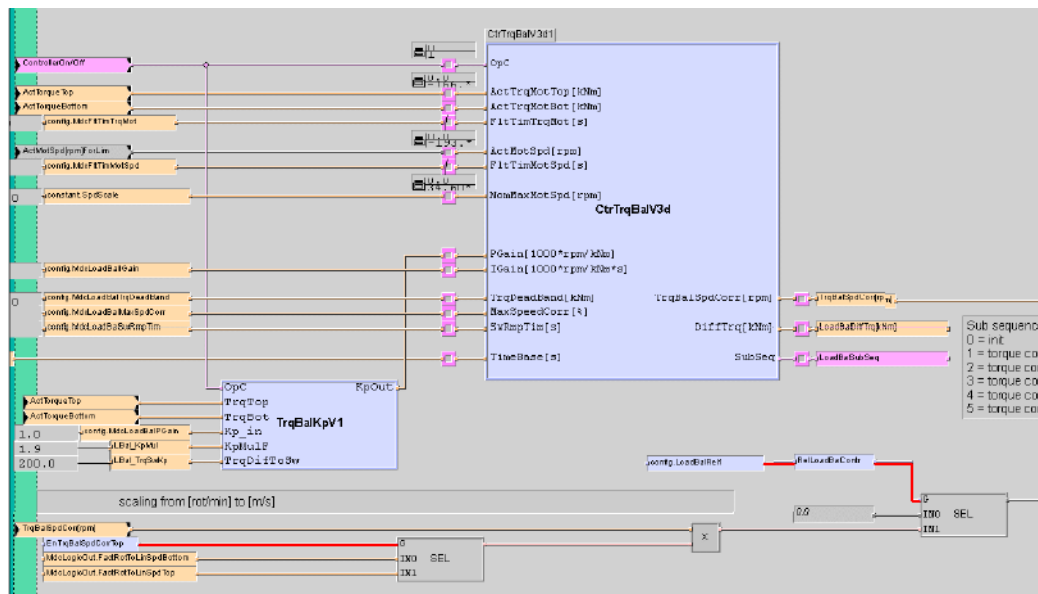
Исследование данных процессов примечательно тем, что происходит наложение двух регулирующих воздействий: торможения после захвата и регулирование толщины (профилирования) за счет гидравлических НУ. Оба они влияют скорости двигателей и на нагрузку. Результаты моделирования таких процессов приведены в [129]. Сделан вывод, что характерным итогом суммарного воздействия является увеличение толщины в виде «бугра», возникающего в начальный момент при перемещении НУ. Этот вывод подтверждают осциллограммы в окне 4 на рис. 7.2, а. Данное отклонение толщины нежелательно, т.к. в конечном счете влияет на качество проката. Следует заметить, что за счет переключения на регулировании положения нажимных устройств, реализованного в новом алгоритме САРТ, данная разнотолщинность устранена.

Этот пример является подтверждением справедливости подхода, обоснованного в диссертации, согласно которому исследования электротехнических (электромеханических и гидравлических) систем прокатного стана необходимо выполнять с учетом их взаимосвязи в технологическом процессе. Также следует разрабатывать комбинированные алгоритмы управления, обеспечивающие компенсацию взаимосвязанных управляющих и/или возмущающих воздействий, возникающих в динамических режимах.

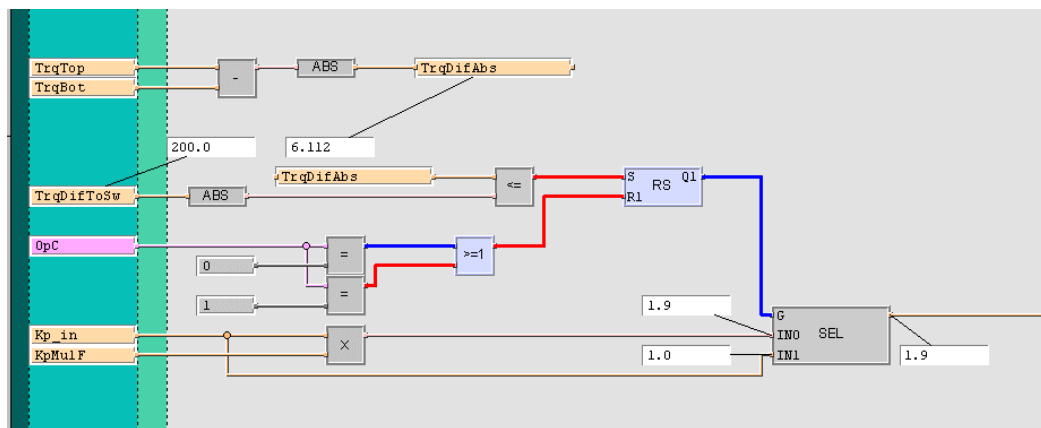
7.2. Промышленное внедрение разработанного РДН с переключающейся структурой

7.2.1. Реализация в ПО контроллеров клетки

На завершающем этапе диссертационных исследований разработанные способы внедрены в программное обеспечение контроллеров управления электроприводами клетки стана 5000. На рис. 7.3 показана реализация новых блоков, осуществляющих выравнивание нагрузок с нелинейным РДН. Также в ПО контроллеров реализован алгоритм, обеспечивающий предразгон электроприводов перед захватом и адаптивное торможение после захвата, рассмотренные в предыдущем разделе.



a



б

Рисунок 7.3 – Экранные формы, поясняющие реализацию адаптивного согласования нагрузок ВГП и НГП: алгоритм нелинейного РДН (а) и блок TrqBalKpV1 автоматического изменения коэффициента регулятора (б)

Кроме этого выполнены следующие усовершенствования:

1. Изменены алгоритмы задатчика интенсивности и настройка электроприводов.
2. В два раза сокращена пауза между окончанием формирования «лыжи» и подключением в работу РДН.
3. Использован более «быстрый» сигнал о наличии металла в клети, формируемый по давлению масла в гидроцилиндрах нажимных устройств. Он используется в качестве команды на торможение после захвата, что обеспечивает улучшение показателей переходных процессов.

Также изменена по сравнению с оригинальной программой ресурса SPC последовательность вызова программных блоков канала задания скорости. Это обеспечивает более эффективное подтормаживание после захвата за счет снижения запаздывания.

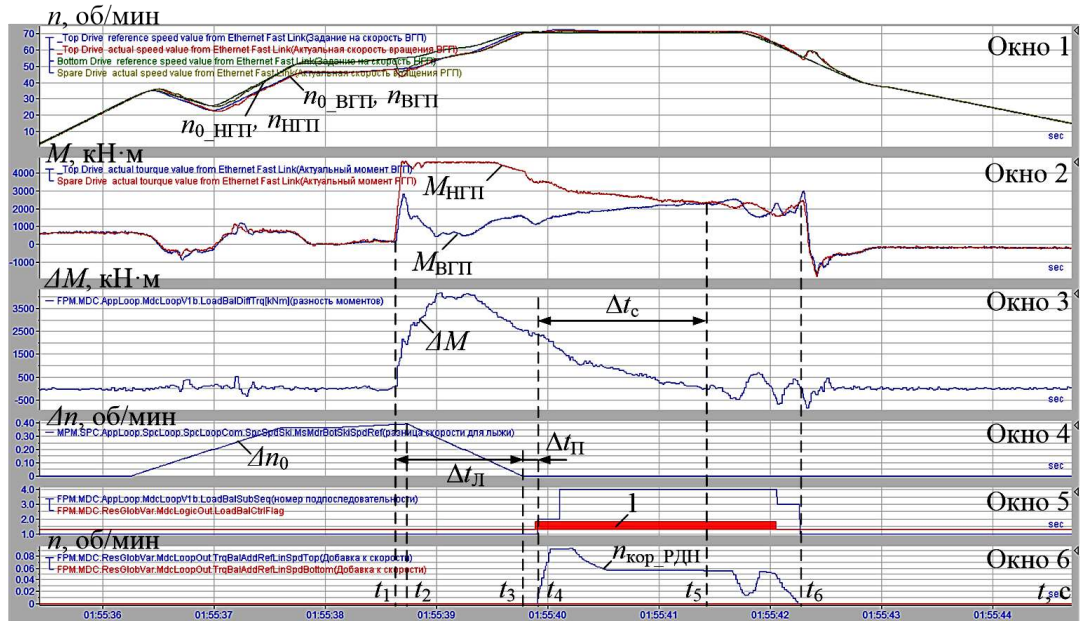
Представленные экранные формы соответствуют структурным схемам разработанных систем управления. Они не несут дополнительной информации, поэтому их описание не приводится.

7.2.2. Экспериментальные исследования алгоритма

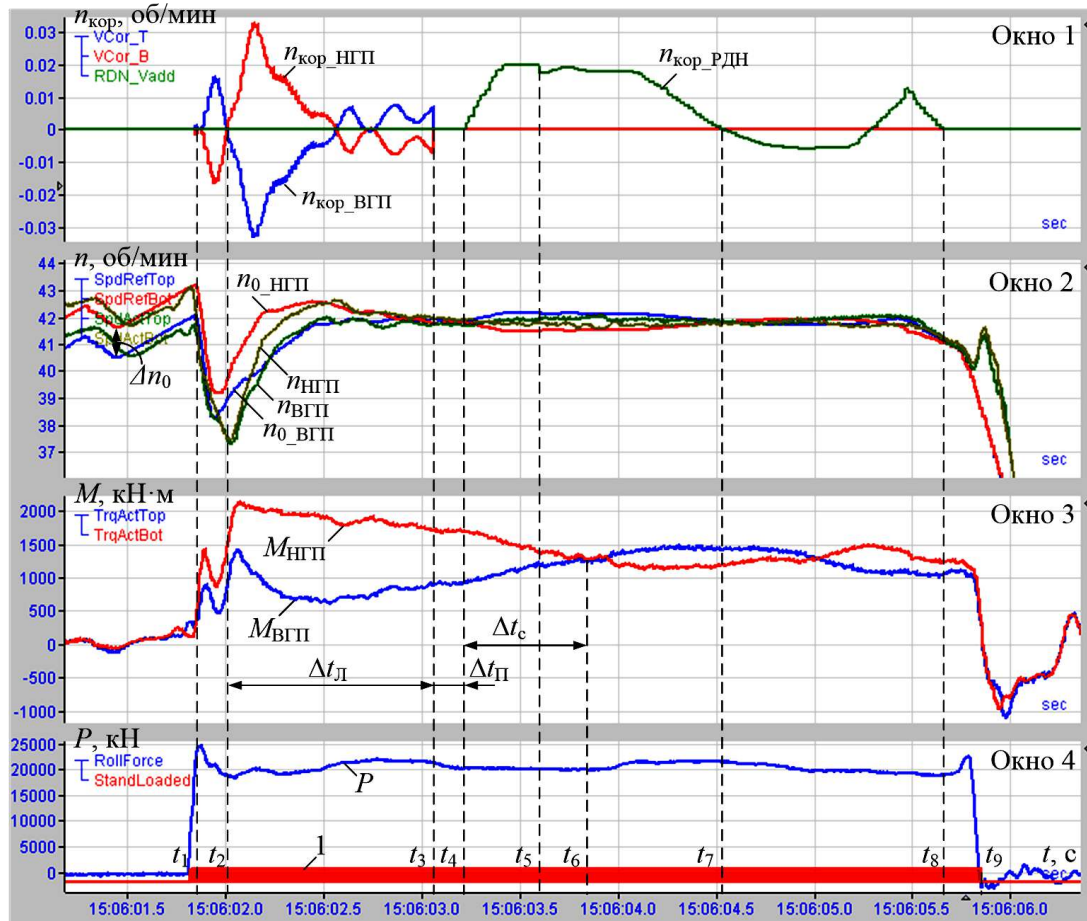
Осциллограммы за один проход

Алгоритм РДН с переключающейся структурой, рассмотренного в п. 4.2, внедрен в промышленную эксплуатацию. Проведены экспериментальные исследования, ниже представлены характерные осциллограммы, и дается их анализ. На рис. 7.4, а приведены осциллограммы, снятые при исходной настройке соотношения скоростей. Аналогичные осциллограммы при внедрении адаптивного РДН представлены на рис. 7.4, б. В интервалах времени t_1 – t_3 на обоих рисунках происходят процессы ударного приложения нагрузки и формирования «лыжи», рассмотренные в предыдущих разделах. Захват происходит в момент t_1 , в интервале t_2 – t_3 происходит формирование «лыжи». В обоих случаях РДН включается после паузы $\Delta t_{\text{П}}$ в момент t_4 , в момент t_5 на рис. 7.4, б происходит переключение его структуры с пропорционального на астатическое регулирование. В интервалах $\Delta t_{\text{Л}}$ идет формирование «лыжи».

В интервале t_4 – t_6 на рис. 7.4, а происходит согласование нагрузок ВГП и НГП за счет действия РДН. Их полное выравнивание происходит к моменту t_5 и поддерживается до момента t_6 начала торможения в связи с завершением прохода. Аналогичные процессы согласования моментов на рис. 7.4, б происходят в промежутке t_4 – t_8 ; на рис. 7.4, а полное совпадение моментов происходит в момент t_6 . Аналогичные осциллограммы, полученные при работе внедренного РДН, приведены на рис. П.6, а и б в Приложении 6. Временные интервалы в течение которых происходит регулирование нагрузок, для всех рисунков приведены в таблице 7.1.



а



б

Рисунок 7.4 – Осциллограммы скоростей и моментов двигателей при существующей настройке (а) и при внедрении адаптивного регулятора (б)

Таблица 7.1 – Интервалы лыжеобразования и согласования нагрузок

№ рисунка	Параметр		Интервалы времени							
	Время про- катки, $t_{\text{Пр}}$	Δn_0	$\Delta t_{\text{Л}}$	$\Delta t_{\text{П}}$	$\Delta t_{\text{с}}$		Δt_{Σ}		$\Delta t_{\text{согл}}$	
ед. изм.	с	%	с	с	с	%	с	%	с	%
7.7, а	4,2	2,5	1,2	0,2	1,7	40	3,1	74	1,1	26
7.7, б	3,8		1,2	0,1	0,6	15,8	1,9	50	1,9	50
П.6, а	3,7		1,1	0,1	0,7	18,9	1,9	51	1,8	48,6
П.6, б	4		1,1	0,1	0,7	15,5	1,9	47,5	2,1	52,5

Интервалы $\Delta t_{\text{Л}}$ формирования «лыжи» в обоих случаях примерно одинаковы и составляет $\sim 1,2$ с. Время паузы $\Delta t_{\text{П}}$ от окончания формирования «лыжи» t_3 до включения РДН t_4 сокращено в 2 раза от 0,2 на рис. 7.4, а до 0,1 с на рис. 7.4, б. С точки зрения оценки быстродействия РДН эти факторы не имеют значения. Интервал Δt_{Σ} рассчитывается как сумма продолжительности промежутков, в течение которых моменты двигателей ВГП и НГП не равны друг другу: $\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_{\text{Л}} + \Delta t_{\text{П}} + \Delta t_{\text{с}}$. Соответственно время работы при согласованных нагрузках, когда их различия находятся в 5%-й зоне, $\Delta t_{\text{согл}} = t_{\text{Пр}} - \Delta t_{\Sigma}$. Размерность в % рассчитывается относительно времени прокатки ($t_{\text{Пр}}$): на рис. 7.4, а это $t_1 - t_6$, на остальных рисунках – $(t_1 - t_9)$.

Согласование нагрузок при проектной настройке происходит в течение $\Delta t_{\text{с}} = 1,7$ с после включения РДН в интервале $t_4 - t_5$. На рис. 7.4, б это происходит примерно в 3 раза быстрее $\Delta t_{\text{с}} = 0,6$. Время прокатки $t_1 - t_6$ на рисунке (а) составляет 4,2 с, на рисунке (б) интервал $t_1 - t_9$ имеет продолжительность 3,8 с. Анализ показывает, что в первом случае прокатка с (квази) постоянной нагрузкой происходит в интервале $t_5 - t_6$, равном 1 с, что составляет 26% времени прокатки. На рисунке (б) интервал $t_6 - t_8$ прокатки с постоянными нагрузками двигателей составляет 1,8 с, что соответствует 47% времени прокатки.

Таким образом, благодаря повышенному быстродействию внедренного РДН с переключающейся структурой, осуществляется форсированное согласование моментов. При одинаковой продолжительности прокатки время работы с одинаковыми моментами увеличивается в 1,8 раза. Этот вывод также подтверждают результаты анализа осциллограмм, приведенных в Приложении 6. Они представлены в соответствующих строках таблицы 7.1. Продолжительность времени выравнивания нагрузок (интервалы $t_1 - t_5$ на рис. 7.4, а и $t_1 - t_6$ на рис. 7.4, б) сокращается, в среднем, в 1,5 раза.

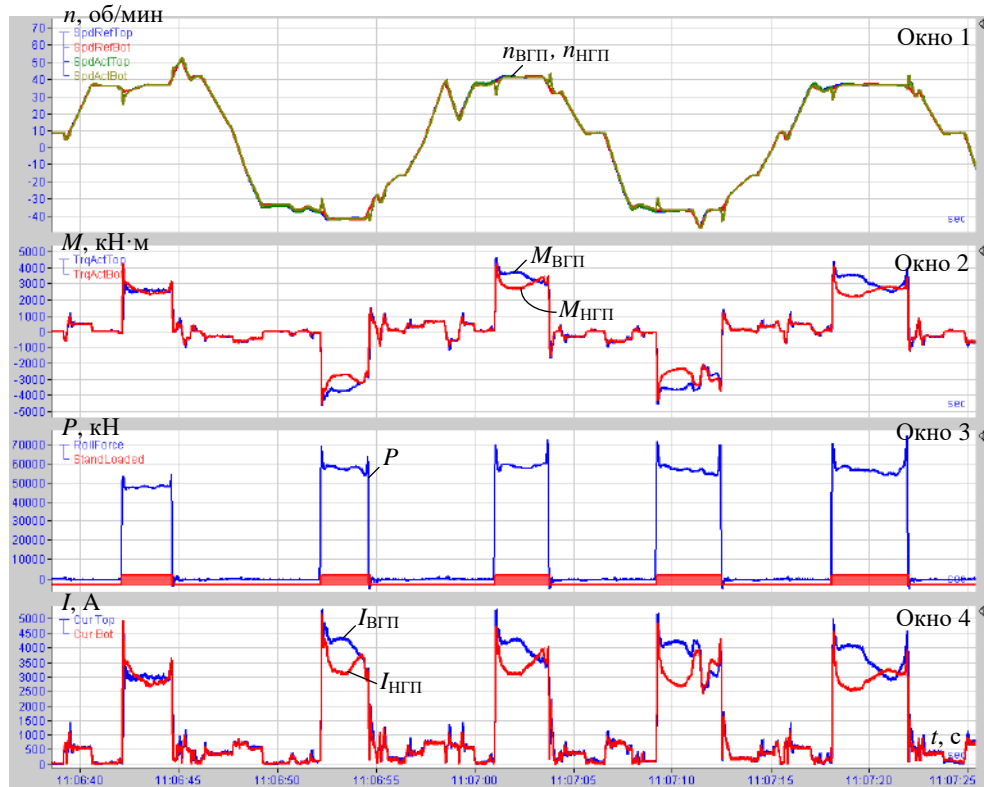
Анализ нагрузок в чистовых проходах

На рис. 7.5, а приведены осциллограммы, снятые за 5 проходов чистовой прокатки при существующих алгоритмах формирования «лыжи» и деления нагрузок. Аналогичные осциллограммы при работе внедренных алгоритмов представлены на рис. 7.5, б. Прокатка ведется в одних и тех же проходах, при одинаковых обжатиях, что подтверждается одинаковыми усилиями прокатки в окнах 3. В первом случае задана величина «лыжи» 10%. На осциллограммах задания скоростей ВГП и НГП (окно 1) – это задание, как и разница скоростей, не просматриваются, в связи с большим масштабом по оси.

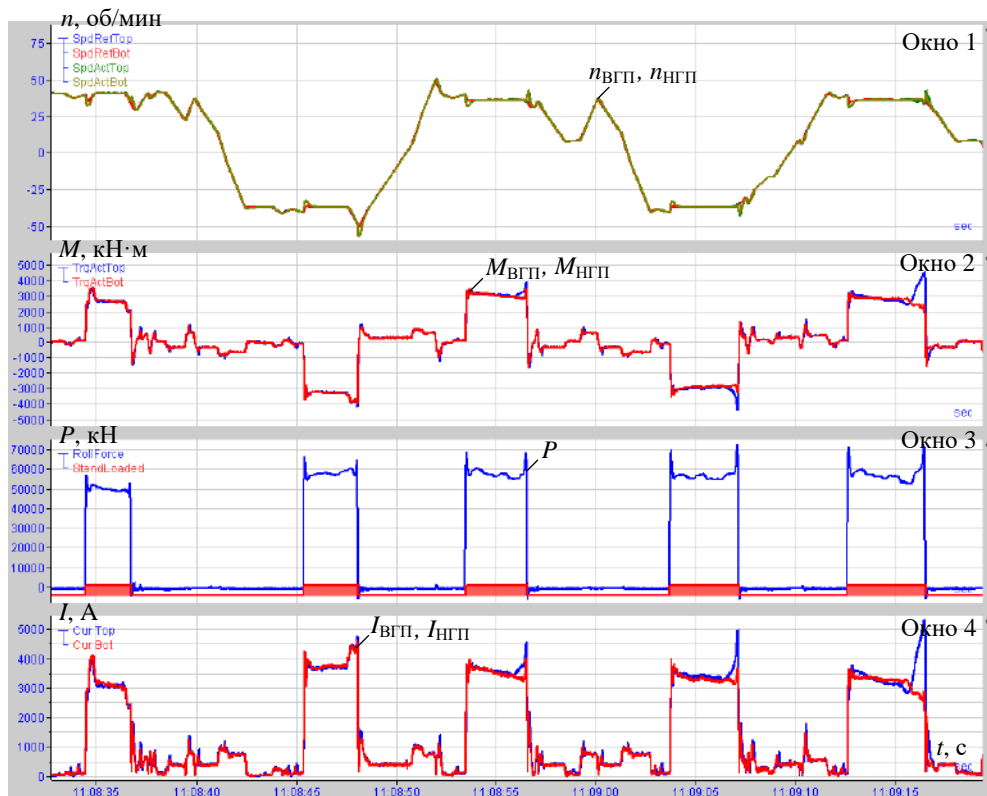
Во всех проходах кроме первого возникают рассогласования моментов и соответственного токов (окно 4). Разница токов во время прокатки до включения РДН находится в пределах от 1000 А в первом проходе до 1500 А в четвертом и пятом проходах. В последних проходах РДН включается примерно на половине интервала прокатки, поэтому ближе к ее окончанию токи ВГП и НГП выравниваются.

При внедрении разработанных алгоритмов для обеспечения заданной кривизны переднего конца раската нет необходимости задавать «лыжу» в 10%. Задано рассогласование скоростей в пределах 3,5% (на осциллограммах это также не прослеживается). Визуальные наблюдения показали, что формируется изгиб достаточной кривизны (дать подтверждение этому в виде фотографий не представляется возможным). Меньшее задание «лыжи», а также высокое быстродействие адаптивного РДН обеспечивают выравнивание токов ВГП и НГП в течение каждого прохода. Рассогласования токов практически не прослеживаются, за исключением бросков, возникающих при выходе раскатов из клетки.

Представленные осциллограммы подтверждают эффективность действия адаптивного РДН. Кроме того, благодаря реализации алгоритмов предразгона с последующим адаптивным торможением электроприводов после захвата, существенно снижаются динамические моменты двигателей при входе раскатов в клеть. Сравнительный анализ режимов захвата при действующем и внедренном алгоритмах приводится ниже.



а

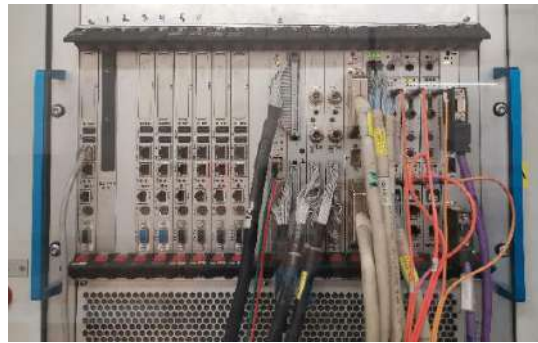


б

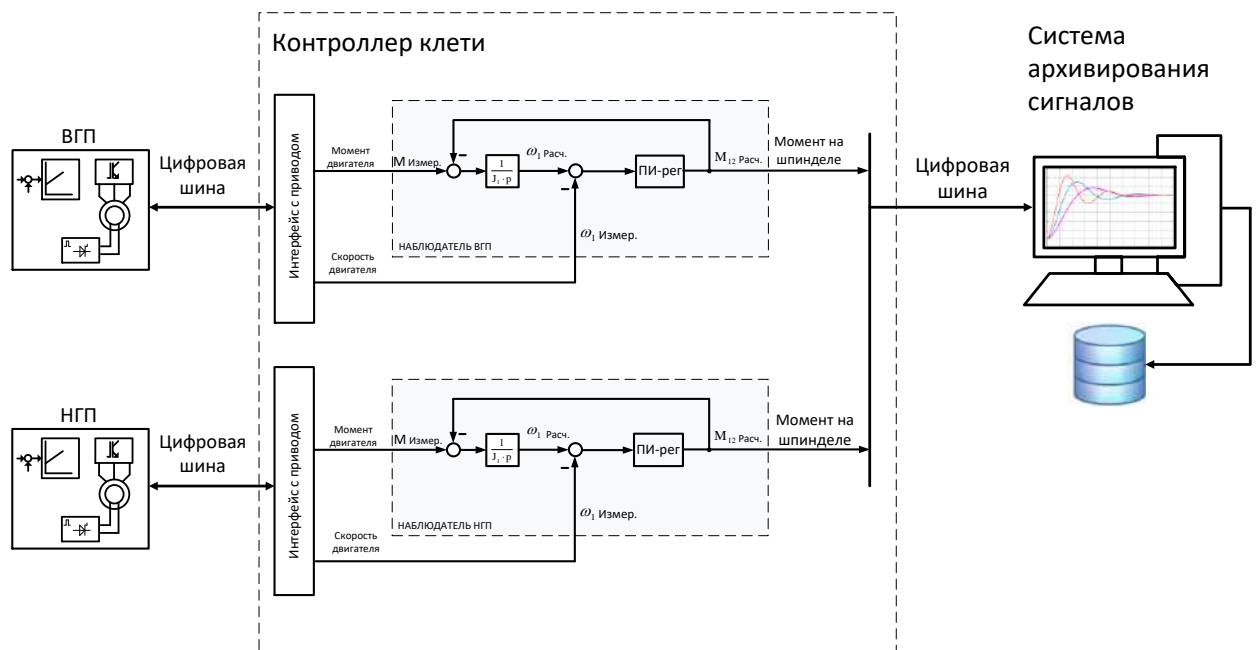
Рисунок 7.5 – Осциллограммы за пять проходов чистовой прокатки при существующих (а) и внедренных (б) алгоритмах формирования «лыжи» и деления нагрузок

7.3. Внедрение наблюдателя упругого момента на шпинделе

Алгоритм наблюдателя упругого момента на шпинделе с автоматической настройкой измеряемого сигнала, разработанный в разделе 6, внедрен в промышленную эксплуатацию на стане 5000. Виртуальная настройка выполнена в контроллере клетки (рис. 7.6, а), структура реализованного алгоритма для ВНГ и НГП показана на рис. 7.6, б.



а



б

Рисунок 7.6 – Фотография ПЛК управления клетью (а) и структура реализованного наблюдателя (б)

На рис. 7.7 показаны схемы, выполняющие вычисления в наблюдателях ВГП и НГП, они соответствуют показанной структурной схеме [177]. Программная структура наблюдателя для каждого шпинделя включает в себя последовательно соединенные блоки: вычитания, интегратора расчетной скорости (CtrlFull), вычитания сигнала расчетной скорости из сигнала измеренной

скорости и ПИ регулятора (CtrCTPi). В нижней части показана структура (бит) ограничения нагрузки по моментам для аварийных случаев. Установлены пороговые значения: 6500 кН·м – для предупреждения и 8000 кН·м – для торможения быстрым остановом. Окно настройки для экспорта данных из системы iBaPDA в Simulink представлено на рисунке 7.8.

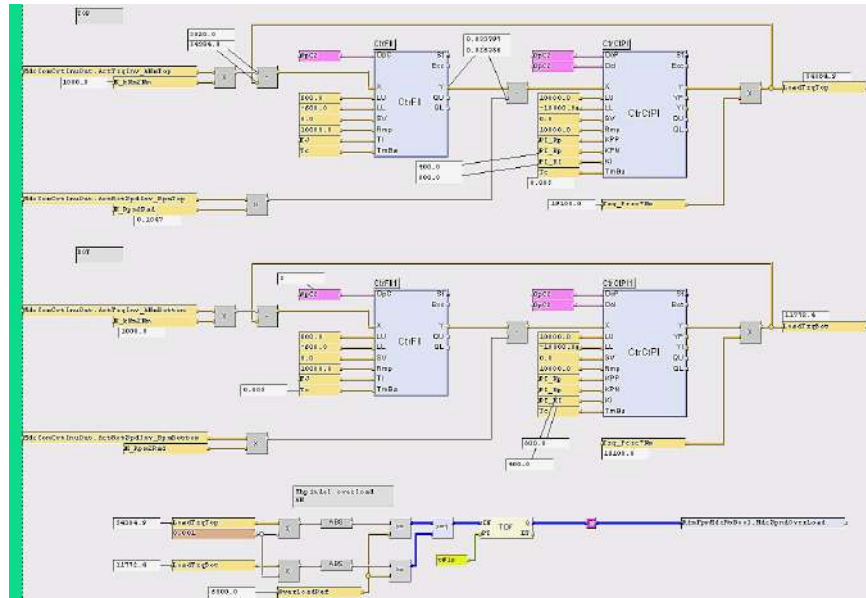


Рисунок 7.7 – Экранные формы ПО контроллера управления, реализующие алгоритмы наблюдателя и ограничения нагрузки в аварийных режимах

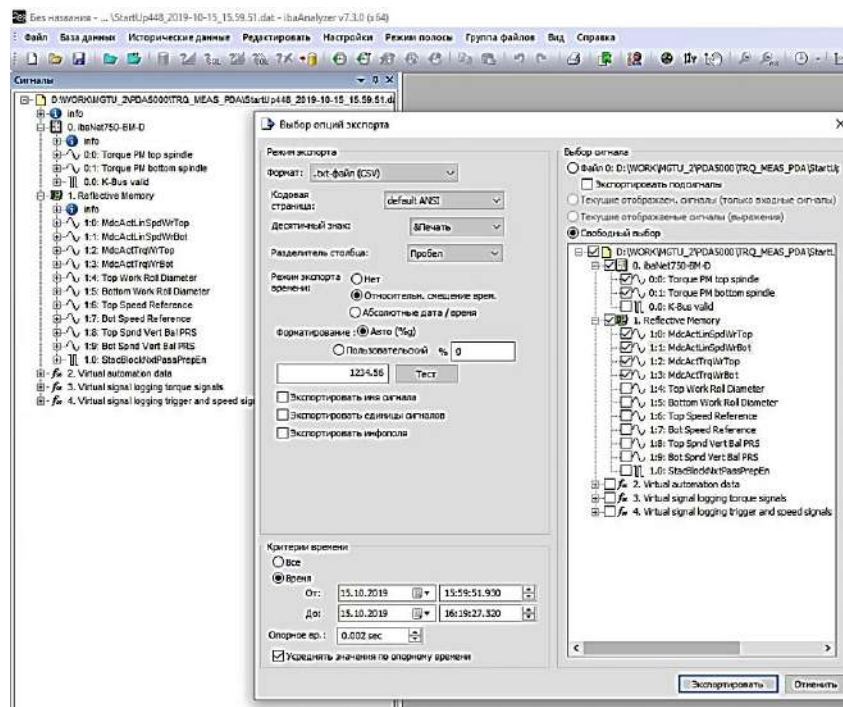


Рисунок 7.8 – Окно настройки программы в Matlab Simulink

Как видно, алгоритм восстановления упругого момента и односторонней передачи информации (как и положено для цифровой тени) относительно легко реализуются в ПЛК управления станом. При этом он обеспечивает вполне приемлемую точность. С целью подтверждения данного вывода выполнены следующие исследования:

1. Проверка адекватности процессов, восстановленных наблюдателем, и осциллограмм, полученных от физической системы, установленной на стане.
2. Сравнение сигналов, восстанавливаемых с помощью наблюдателя на основе фильтра Калмана, и данного упрощенного варианта, для этого также выполняется анализ осциллограмм.

В настоящее время разработанный наблюдатель внедрен и находится в эксплуатации. Полученные сигналы упругих моментов на шпинделях не предназначены для использования в системах регулирования электроприводов. Они предназначены для получения информации об амплитудах упругого момента в динамических режимах при захвате раскатов валками. Также наблюдатель обеспечивает контроль предаварийных ситуаций, а в случае их возникновения – анализ причин и последствий.

Ниже представлен анализ динамических моментов, возникающих на шпинделях в аварийных режимах, сопровождающихся поломками оборудования. Следует отметить, что подобные исследования в литературных источниках не встречаются, поэтому полученные осциллограммы можно считать уникальными.

7.4. Исследование динамики электроприводов в аварийных режимах

Как было отмечено в п. 1.10.1, непосредственно динамические удары, возникающие при захвате, редко приводят к поломкам и аварийным остановам стана. Их вероятными причинами являются разовые либо накопленные циклы перегрузок по крутильному моменту. Наиболее частыми авариями являются поломка головки шпинделя и поломка валка, показанные на рис. 1.13. Устранение их последствий связано с длительными простоями и материальными затратами. Данный вопрос подробно исследован в [161], где разработана методика расчета ресурса электромеханической системы валков клетки стана 5000

на основе аналитических зависимостей Пальмгрена-Майнера. Однако в этой работе не исследованы амплитуды динамических моментов на шпинделе в предаварийных режимах. Разработанный наблюдатель позволяет сделать это с высокой точностью, результаты приводятся ниже.

7.4.1. Анализ отключений во время прокатки

Рассматривается случай аварийного отключения электроприводов во время прокатки, вызвавшего останов клетки с металлом в валках. В этом конкретном случае не произошло поломок валков либо элементов шпиндельных соединений, поэтому анализ динамических нагрузок носит информативный характер. Информация может быть использована при настройке системы аварийного торможения двигателей. Осциллограммы для данного режима представлены на рис. 7.9 [177]. В результате аварии скорости $n_{НГП}$, $n_{ВГП}$ (окно 1) и моменты $M_{НГП}$, $M_{ВГП}$ (окно 2) двигателей снизились до нулевых значений с небольшой разницей во времени.

Поставлена задача оценки упругого момента на шпинделях для данного режима. С этой целью предварительно записанные сигналы в виде цифровых массивов импортированы в модель наблюдателя (рис. 6.3, б). Осциллограммы, полученные при обработке массивов, представлены на рис. 7.10. Видно, что этот режим является аварийным с точки зрения динамических нагрузок на шпинделях (окна 2, 3). Амплитудные значения моментов, восстановленных с помощью наблюдателя $M_{ШВ\max}$, $M_{ШН\max}$, на обоих шпинделях превышают установившийся момент прокатки ($M_{СТ}=200\%$) более чем в 3,7 раза и достигают 750% номинального момента двигателя, равного 1,91 МН·м.

Главными проблемами, возникающими при предотвращении аварийных ситуаций, являются своевременная фиксация начала аварии и формирование сигнала на быстрый останов электроприводов. Также необходимо экстренное информирование оператора, что обеспечит его своевременную реакцию на развитие аварии. В таком случае, вероятно, произойдет потеря заготовки, однако это позволит избежать поломок оборудования (также с потерей заготовки).

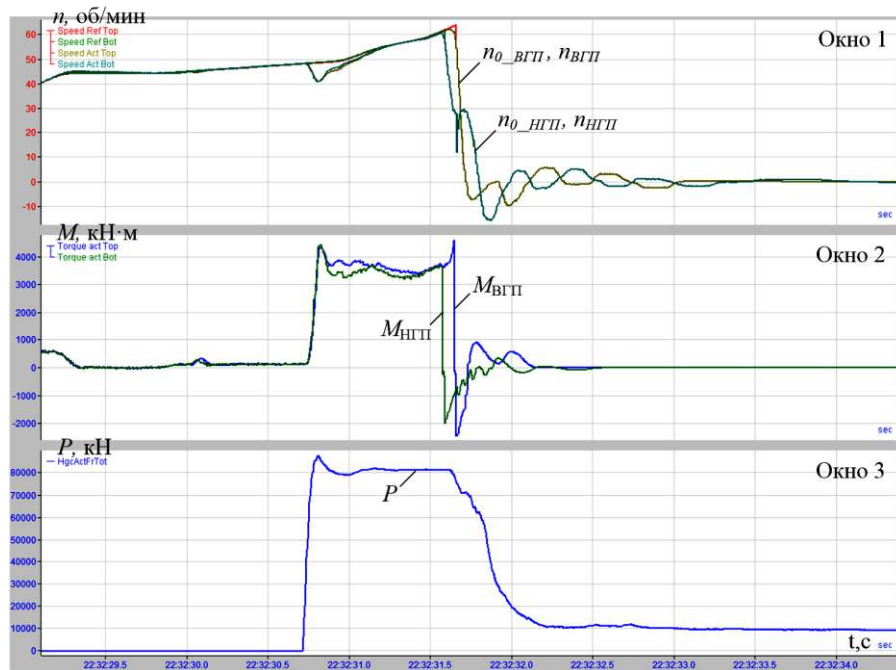


Рисунок 7.9 – Осциллограммы при аварийном отключении электроприводов во время прокатки: окно 1 – заданные и фактические скорости ВГП и НГП; окно 2 – моменты двигателей; окно 3 – усилие прокатки

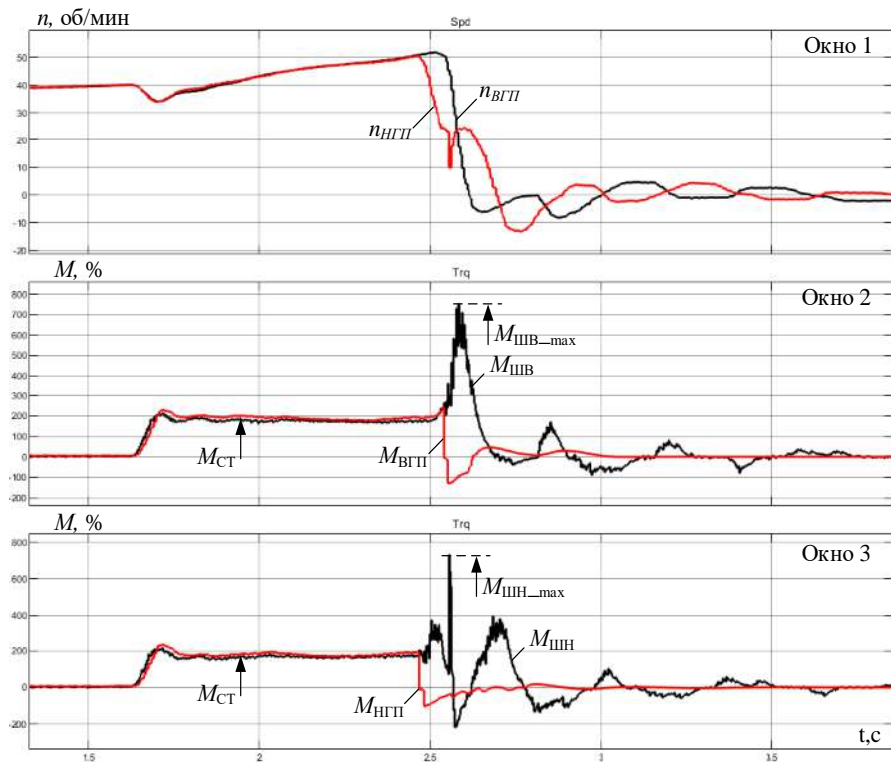


Рисунок 7.10 – Временные зависимости координат, полученных по массивам данных: окно 1 – фактические скорости двигателей ВГП и НГП, об/мин; окно 2 – моменты двигателя и шпинделя ВГП, %; окно 3 – моменты двигателя и шпинделя НГП, %

7.4.2. Динамические нагрузки при поломке валка

Процесс также анализируется путем обработки массивов сохраненных данных. Осциллограммы скоростей и моментов двигателей, записанные системой PDA во время аварии, приведены на рисунке 7.11.

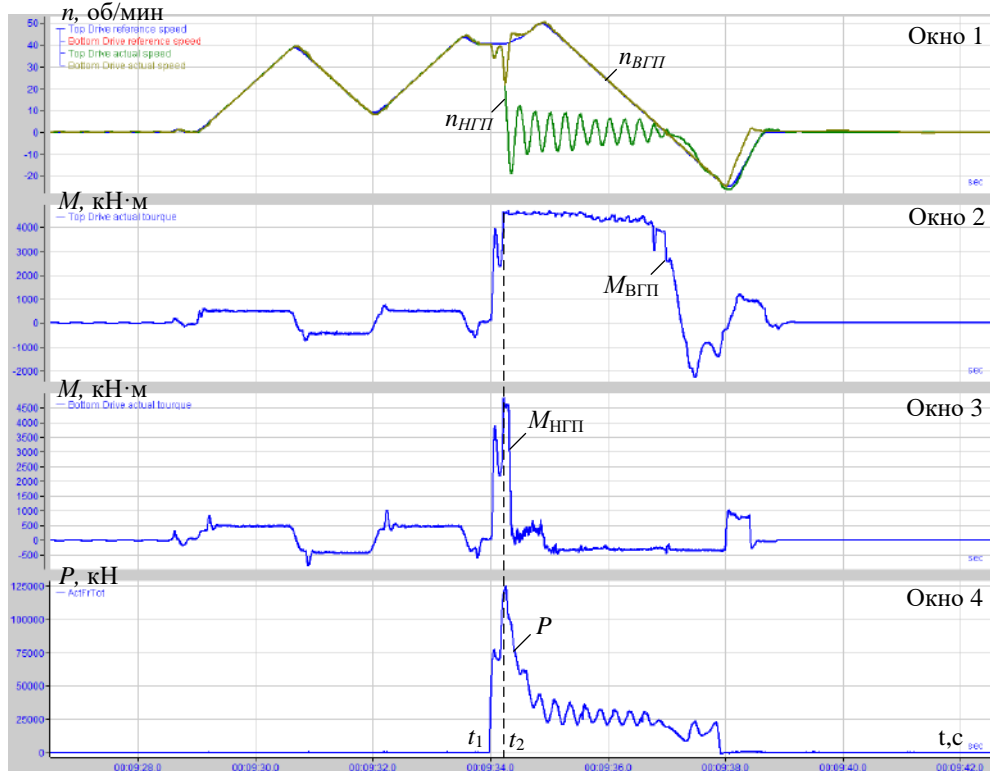


Рисунок 7.11 – Осциллограммы скоростей и моментов при поломке нижнего валка: окно 1 – заданные и фактические скорости двигателей, об/мин; окно 2, окно 3 – моменты ВГП и НГП, кН·м; окно 4 – усилие прокатки, кН

Захват металла валками произошел в момент времени t_1 , поломка нижнего валка – в момент t_2 . При этом в интервале t_2 – t_3 к верхнему шпинделю прикладывается удвоенная нагрузка (окно 2), т.к. сломанный шпиндель (окно 3) не нагружается. После поломки возникают затухающие колебания скорости $n_{\text{НГП}}$ (окно 1) относительно нулевого значения. Момент $M_{\text{НГП}}$ (окно 3) снижается до нуля, однако в течение еще трех секунд происходит вращение двигателя (окно 1) до аварийной остановки оператором. Как отмечалось выше, эта ситуация крайне опасна, т.к. после поломки валка неконтролируемое вращение незакрепленного шпинделя может вызвать разрушительные последствия.

Для оценки упругого момента выполнен экспорт сигналов, записанных во время аварии из PDA в Matlab, где они обработаны в модели, реализующей

наблюдатель (рис. 8.4). Восстановленные осциллограммы скоростей и моментов представлены на рис. 7.12 [178]. Видно, что верхний шпиндель, валок которого не сломался (окно 2), испытывает шестикратную перегрузку относительно номинального момента двигателя. Амплитуда $M_{ШВ\max}=600\%$ при рабочей нагрузке двигателя $M_{СТ}=240\%$, т.е. превышает момент нагрузки в 2,5 раза. Амплитуда упругого момента на нижнем шпинделе (окно 3) превышает номинальную нагрузку в 5 раз, а рабочую – в 2 раза ($M_{ШН\max}$ достигает $\sim 500\%$).

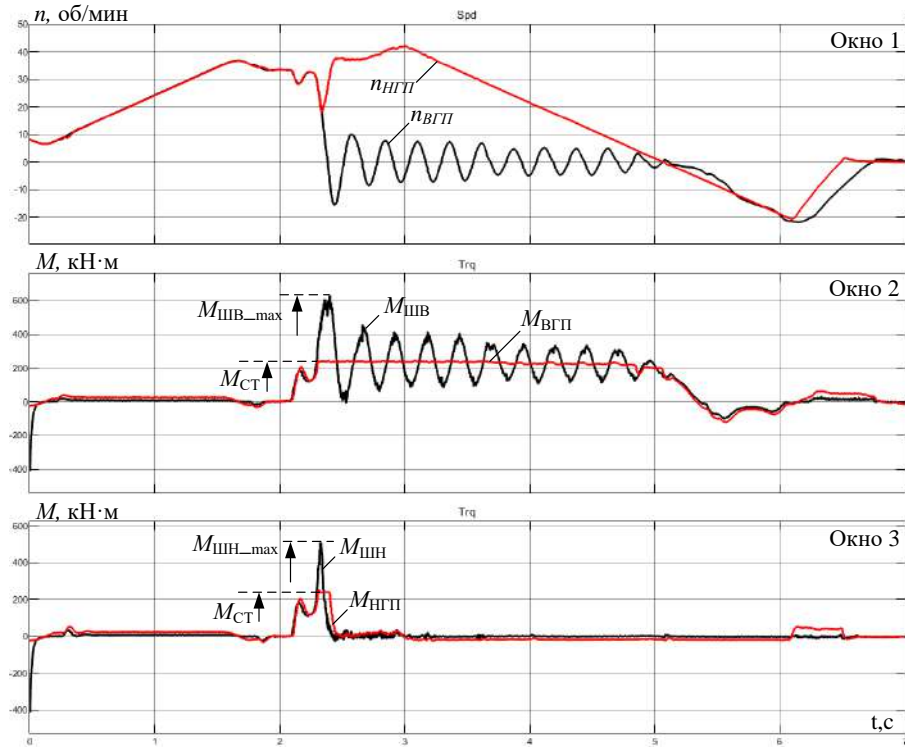


Рисунок 7.12 – Осциллограммы скоростей и моментов при поломке вала, аналогичные представленным на рис. 7.10: окно 1 – фактические скорости ВГП, и НГП, об/мин; окно 2 – момент двигателя $M_{ВГП}$, момент на шпинделе $M_{ШВ}$ верхнего вала, и момент $M_{СТ}$ приложенной статической нагрузки, кН·м; окно 3 – те же зависимости для НГП

Причиной поломки являются последовательные повторения динамических перегрузок в предыдущих проходах. Это подтвердил анализ аналогичных осциллограмм (здесь не приводится).

Обобщение. По предложенной методике был выполнен анализ других аварийных режимов. Для этого был осуществлен импорт массивов данных, зафиксированных системой PDA, и исследованы осциллограммы, аналогичные

представленным на рис. 7.12. Сделаны выводы, что во всех случаях амплитуда упругого момента на аварийном шпинделе превышает номинальную нагрузку в 4,5–5 раз ($M_{\text{шнmax}}$ достигает ~500%), а рабочую нагрузку – в 2–2,5 раза. Также наблюдается колебательный характер упругого момента.

Ниже приводится анализ аварии – «нахлест полосы на валок», повлекшей наиболее тяжелые последствия.

7.5. Анализ режима нахлеста тонкого листа на валок

В аварийных ситуациях при поломке валка или головки шпинделя важно как можно быстрее прекратить вращение шпинделя для уменьшения аварийных последствий. Характерными последствиями вращения шпинделя, закрепленного только со стороны двигателя, являются поломка вилки балансировки шпинделя, повреждение гидроцилиндров балансировки и другие разрушения. Это приводит к длительным простоям и большим затратам на восстановление и замену оборудования. Время вращения двигателя после аварии зависит от реакции оператора и, как правило, составляет несколько секунд. При идентификации поломки средствами автоматики появляется возможность осуществить более активный останов клетки, что снизит объем повреждений.

Последствия аварии

В феврале 2022 года произошла авария с серьезными последствиями. Она возникла вследствие нахлеста (окольцевания валка) полосой нижнего рабочего валка и попадания ее между рабочим и опорным валками (рис. 7.13, а) [171]. Причиной является расслоение головной части полосы, которое не может быть проконтролировано ни перед началом, ни в ходе прокатки. Это привело к поломке валка, разрушению вилки горизонтальной/вертикальной балансировки шпинделя (рис. 7.13, б) и другим последствиям.

Для оценки причины аварии выполнен анализ параметров электропривода, зафиксированных системой PDA, и сигнала упругого момента на шпинделе, полученного от внедренного наблюдателя. Осциллограммы представлены на рис. 7.14, расшифровка обозначений, принятых на этом и последующих рисунках, приведена в таблице 7.2.



Рисунок 7.13 – Нахлест полосы на валок (а) и разрушение вилки балансировки шпинделя (б)

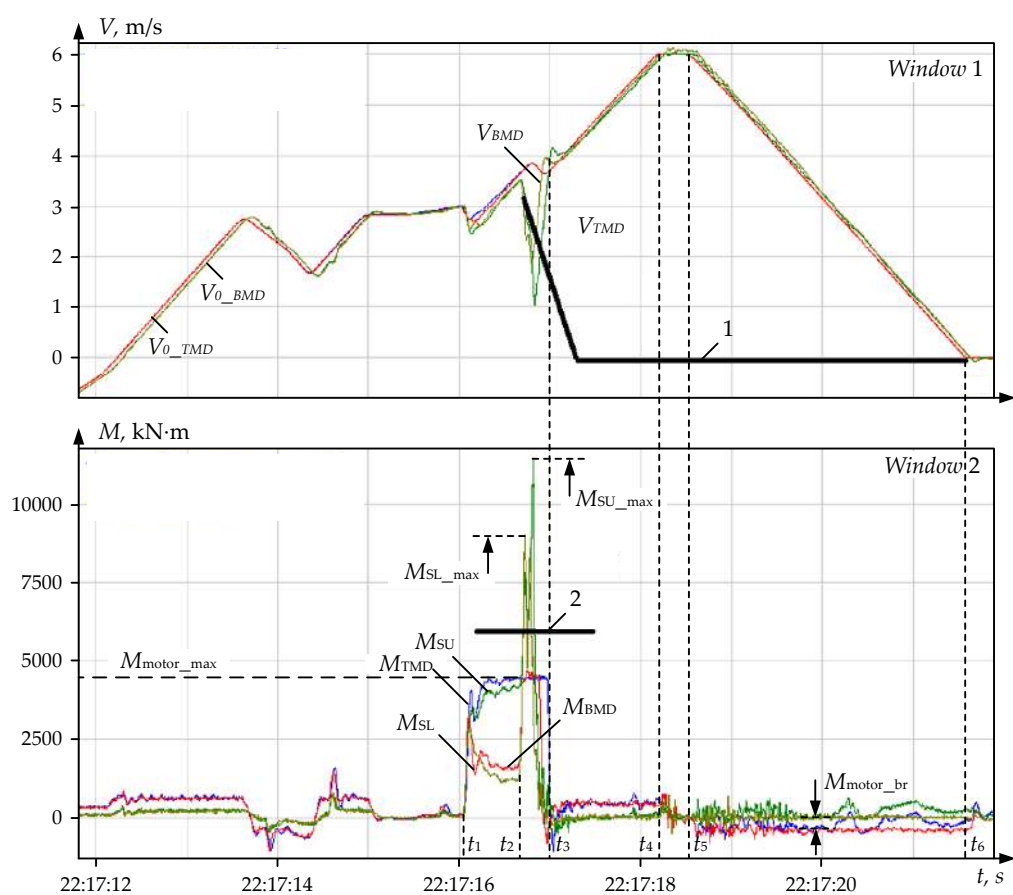


Рисунок 7.14 – Осциллограммы скоростей (окно 1) и моментов (окно 2) при аварии

Таблица 7.2 – Расшифровка обозначений на рисунках 7.14, 7.15, 7.19, 7.20

Параметр	Ед. изм.	Расшифровка обозначения
$v_{0_ВГП}$	м/с	Задание линейной скорости двигателя ВГП
$v_{0_НГП}$		Задание линейной скорости двигателя НГП
$v_{ВГП}$		Линейная скорость двигателя ВГП
$v_{НГП}$		Линейная скорость двигателя НГП
$M_{ВГП}$	кН·м	Момент двигателя ВГП
$M_{НГП}$		Момент двигателя НГП
$M_{ШВ}$		Момент на шпинделе верхнего валка
$M_{ШН}$		Момент на шпинделе нижнего валка
$M_{ШВmax}$		Максимальный момент на верхнем шпинделе
$M_{ШНmax}$		Максимальный момент на нижнем шпинделе
$M_{ДВmax}$		Ограничение моментов двигателей (240% номинального)
$n_{0_ВГП}$	об/мин	Задание окружной скорости ВГП
$n_{0_НГП}$		Задание окружной скорости НГП
$n_{ВГП}$		Окружная скорость ВГП
$n_{НГП}$		Окружная скорость НГП

Захват металла валками происходит в момент t_1 . После поломки в момент t_2 происходит выход момента двигателя $M_{ВГП}$ на уровень ограничения $M_{ДВ_max}=240\%$. Упругий момент на шпинделях $M_{ШВ_max}$ не ограничен, поэтому превышает 12000 кН·м или 600% номинального момента двигателя. Это привело к выламыванию вилки балансировки шпинделя (рис. 7.13, б) и поломке головки шпинделя. Тяжелые последствия аварии обусловлены тем, что после ее возникновения оба электропривода вращались еще в течение 4,5 с (окно 1, интервал t_3-t_5). В интервале t_3-t_4 происходило ускорение двигателей, в интервале t_5-t_6 – их аварийное замедление до остановки.

Главными проблемами, возникающими при предотвращении аварийных ситуаций, являются своевременная фиксация начала аварии и формирование сигнала на быстрый останов электроприводов. На рис. 7.12 интенсивность торможения в интервале t_5-t_6 установлена равной 2 м/с^2 , моменты двигателей $M_{ДВ_т}$ в режиме торможения незначительны (в пределах 500 кН·м). Это говорит

о возможности повышения темпа замедления путем сокращения времени аварийного останова.

Диагностические признаки начала аварии

Для предотвращения разрушений предлагается при превышении моментом на шпинделе заданного ограничения, например, равного 300% номинального момента двигателя (5700 кН·м), выполнять экстренную остановку электроприводов. Ограничение показано на рис. 7.14 линией 2, задание интенсивного торможения – линией 1. Как было отмечено, актуальной проблемой при реализации этого алгоритма является четкая фиксация начала аварии – момента t_2 .

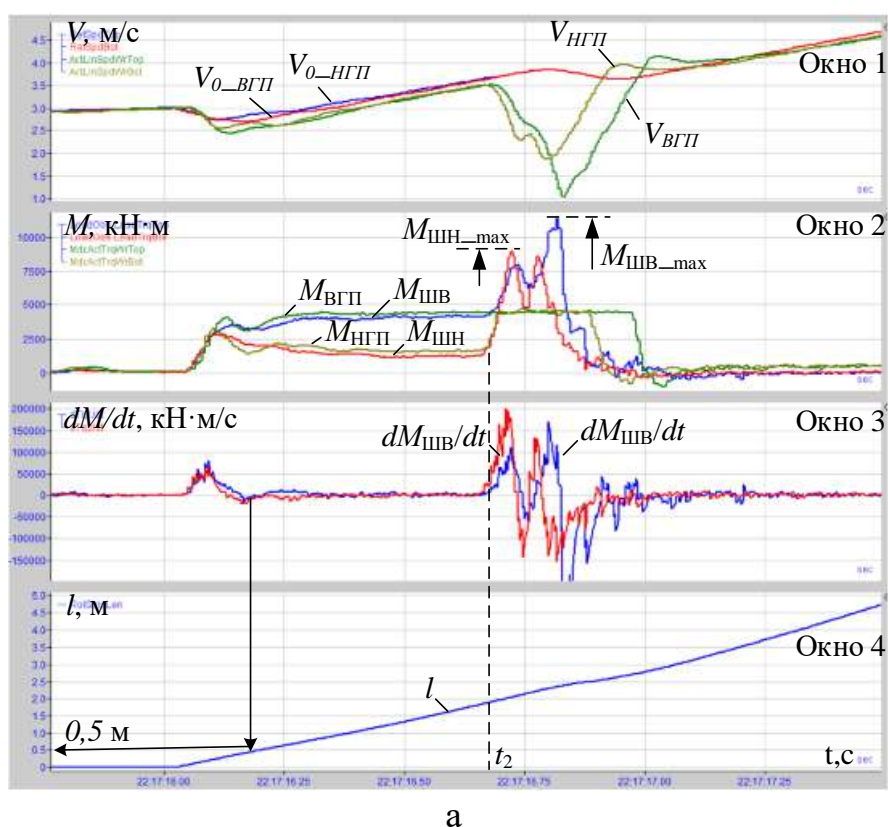
Один из возможных способов – отслеживать темп нарастания момента на шпинделе. Это поясняют осциллограммы на рис. 7.15, а (осциллограммы в окнах 1, 2 отличаются от представленных на рис. 7.14 только масштабами по осям). Захват происходит в момент времени t_1 , в окнах 3 и 4 показаны производная момента на шпинделе и длина прокатанного участка. На рис. 7.14, б показаны аналогичные осциллограммы, зафиксированные в режиме захвата при обычной прокатке. Показан проход «назад» (после реверса), поэтому кривые моментов находятся в области отрицательных значений.

Численные значения установившихся и максимальных значений контролируемых координат представлены в таблице 7.3. Здесь же приведены коэффициенты кратности k_B и k_H амплитуд моментов на верхнем и нижнем шпинделях.

Таблица 7.3 – Значения моментов на шпинделях ВГП и НГП

Параметр	Ед. изм.	Режим (№ рисунка)	
		Нахлест полосы (рис. 7.15, а)	Рабочий захват (рис. 7.15, б*)
$M_{ШВст}$	кН·м	4600	3000
$M_{ШВmax}$		12000	5100
k_B	-	2,6	1,7
$M_{ШНст}$	кН·м	2000	3000
$M_{ШНmax}$		8500	7500
k_H	-	4,25	2,5
$dM_{ШВ}/dt$	кН·м/с	20000	24000
$dM_{ШН}/dt$	кН·м/с	17000	11000

*Величины моментов приняты по модулю



а



б

Рисунок 7.15 – Осциллограммы аварийного режима, аналогичные рис. 7.14 (а), и рабочего режима при захвате (б): окно 1 – задания линейных скоростей $V_{0_ВГП}$, $V_{0_НГП}$ и линейные скорости $V_{ВГП}$, $V_{НГП}$, м/с; окно 2 – моменты двигателей и шпинделей, кН·м; окно 3 – производные моментов на шпинделях кН·м/с; окно 4 – длина прокатанной части раската, м

Как видно, для случаев аварии и рабочего захвата эти коэффициенты отличаются: для верхнего шпинделя k_B – в 1,5 раза (2,6 и 1,7), для нижнего k_H – в 1,7 раза (4,25 и 2,5). Производные моментов $dM_{ШВ}/dt$ также имеют различия (20000 кН·м/с и 24000 кН·м/с, соответственно). На такую же величину отличаются $dM_{ШН}/dt$. Это означает, что данные параметры могут быть приняты в качестве диагностических признаков аварийной ситуации.

7.6. Разработка способа и системы аварийного останова электроприводов клетки

7.6.1. Отличительные признаки способа

Разработан способ предотвращения аварий, в частности, при нахлесте полосы, согласно которому предлагается производить форсированный останов стана при превышении темпом увеличения упругого момента заданного предельного значения. Предлагается выполнять следующие действия (они же являются отличительными признаками способа) [171]:

1. Вычислять производную упругого момента на шпинделе с целью диагностирования предаварийной ситуации. При высоком темпе нарастания момента (например, более 25000 кН·м/с) подавать сигнал на экстренное торможение.

2. Для исключения ложных срабатываний, вызванных колебаниями момента, возникающими при захвате, предлагается контролировать длину участка, прокатанного после входа раската в клеть. Для этого предлагается отслеживать темп нарастания момента при длине раската в диапазоне (0–2) м, что соответствует половине длины окружности вала. После нахлеста раскат перемещается по окружности вместе с валом и попадает в зазор между рабочим и опорным валами. Это происходит при длине прокатанного участка, равной половине длины окружности

$$L = \pi R_{WR},$$

где R_{WR} – радиус рабочего вала.

При фактическом радиусе $R_{WR}=0,64$ м эта длина $L=2$ м. При этом, как следует из рис. 7.15, а, переходный процесс захвата полностью затухает при длине 0,5 м.

3. Сигнал на аварийный останов следует подавать при выполнении названных условий. Это снизит вероятность ложных срабатываний системы экстренного торможения.

Возможность реализации второго условия подтверждает рис. 7.15, б. Как видно, переходный процесс упругого момента завершается при длине $l \approx 0,6$ м, при дальнейшей прокатке изменений координат не наблюдается. Таким образом, при колебательном характере упругого момента с большими амплитудами колебания заканчиваются при прокатке головного участка длиной 0,5–0,6 м. Поэтому диапазон (0–2) м, в котором следует контролировать темп нарастания момента, принят «с запасом».

7.6.2. Структура цифровой системы аварийного останова

Для реализации способа разработана система управления электроприводами валков, схема которой представлена на рис. 7.16. Она содержит каналы управления ВГП и НГП, в каждый из которых включен разработанный наблюдатель. Подключение остальных блоков (расчета длины, логических блоков и др.) выполнено в соответствии с функциями системы, описание которых приведено выше.

Предложенный алгоритм «быстрого останова» поясняет структурная схема системы управления, представленная на рис. 7.17 [171]. Алгоритм реализован в ПЛК клетки с помощью специальной программы задания скорости. На рисунке обозначены: А1 – блок распределения заданий с учетом обжатия (для электроприводов рольгангов перед клетью, двигателей клетки, рольгангов за клетью); ЗИ₁, ЗИ₂ – задатчики интенсивности скоростей от ПЛК и оператора; ЗИ₃ – задатчик интенсивности быстрого останова. Прерывистой линией выделен контур задания темпа ЗИ₃, реализующий разработанный алгоритм управления.

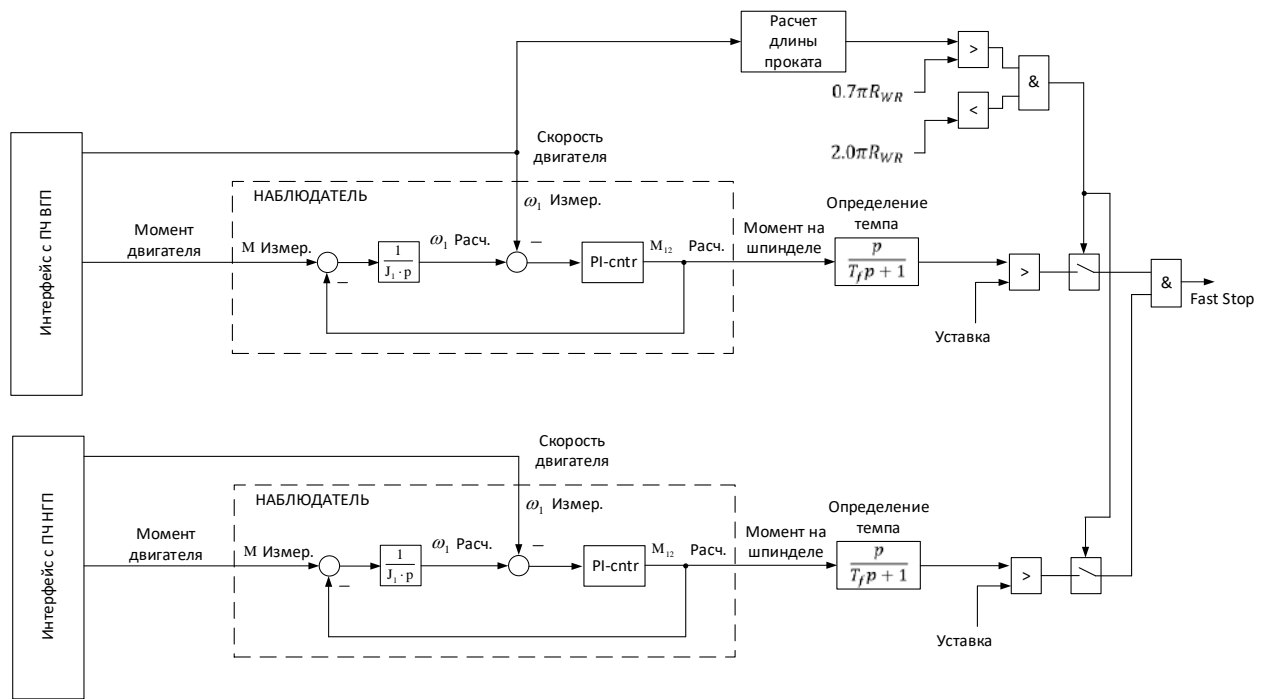


Рисунок 7.16 – Структура системы управления, обеспечивающей экстренное торможение электропривода

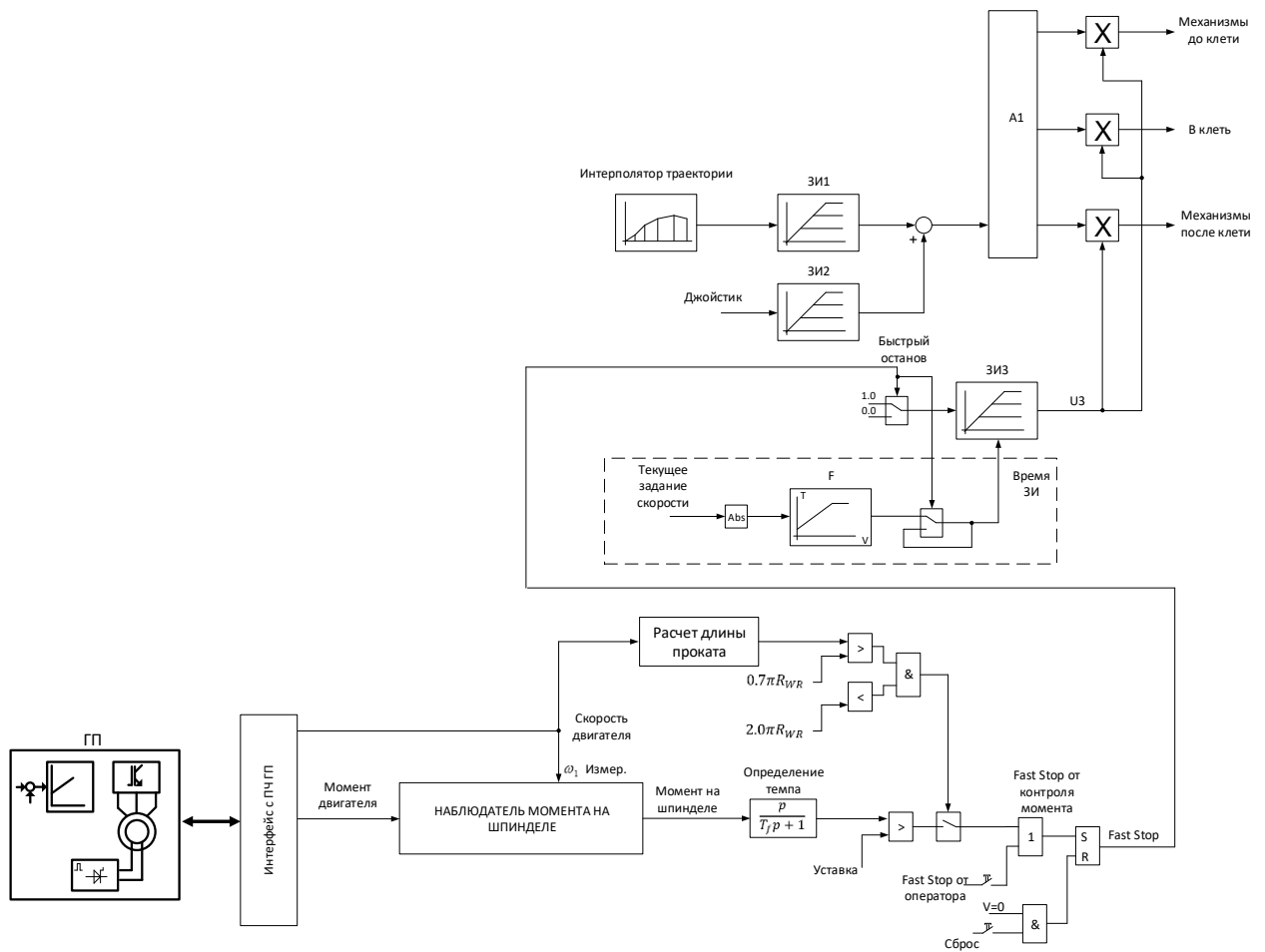


Рисунок 7.17 – Схема задания скорости с адаптивным ЗИ торможения

Временные диаграммы, поясняющие принцип его действия, показаны на рисунке 7.18, б. Приняты обозначения: V_1 , V_2 , V_3 – задания скоростей для механизмов, расположенных после клетки, для двигателей клетки, и механизмов, расположенных перед клетью, соответственно; U_3 – сигнал выхода ЗИ₃. При обычной настройке системы останова выходной сигнал U_3 снижается от 1 до 0 (в о.е.) за 2,5 с. Суммарное задание скорости электропривода умножается на этот сигнал, в результате время остановки составляет 2,5 с независимо от текущей скорости (V_1 , V_2 , V_3). Электропривод отрабатывает задание, поступающее от контроллера клетки, в итоге время торможения при скоростях меньших V_1 необоснованно затянуто. Таким образом, постоянный темп торможения является недостатком действующего алгоритма.

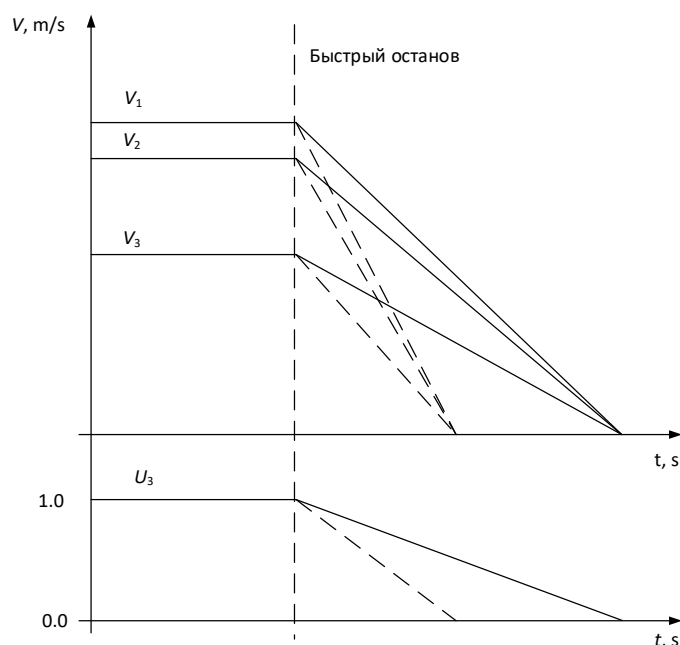


Рисунок 7.18 – Выходные сигналы адаптивного ЗИ: V_1 , V_2 , V_3 задания скоростей для механизмов, расположенных после клетки, для двигателей клетки, и механизмов, расположенных перед клетью, соответственно; U_3 – сигнал выхода ЗИ₃

7.6.3. Разработка адаптивного задатчика интенсивности

Обеспечить экстренный останов предлагается при помощи адаптивного задатчика интенсивности, наклон характеристик которого формируется в зависимости от скорости электропривода. Выходные сигналы такого ЗИ показаны на рис. 7.18. прерывистыми линиями. Его разработка требует обоснования темпов замедления в зависимости от скорости прокатки (по существу, от

номера прохода). Когда происходит недопустимое увеличение упругого момента либо другое предаварийное событие, выходной сигнал U_3 снижается от 1 до 0 с темпом

$$a_3 = \frac{1}{T_3}.$$

Для этого следует задавать варьируемый темп ЗИ: $T_3 = f(V_{ref})$. Фрагмент схемы, выделенный на рис. 7.17 контуром, образует специальный модуль выбора темпа быстрого останова. Блок F реализует эту зависимость и обеспечивает синхронный останов всех механизмов с вычисленным темпом. В сочетании с системой экстренного торможения, представленной на рис. 7.16, адаптивный ЗИ обеспечит предупреждение развития аварии. В рассмотренном случае будет предотвращена наиболее опасная авария, вызванная нахлестом полюсы.

Несмотря на простоту представленная разработка является новой. Информация о подобных алгоритмах и структурах адаптивного ЗИ торможения в литературных источниках не встречается (за исключением адаптивного торможения электромобилей и гибридных автомобилей [313, 314]). Предложенный способ является эффективным для предотвращения не только рассмотренной, но и других аварий. Ниже демонстрируется срабатывание системы для остановки электроприводов при недопустимой перегрузке во время входа заготовки в клеть.

7.6.4. Испытание алгоритма

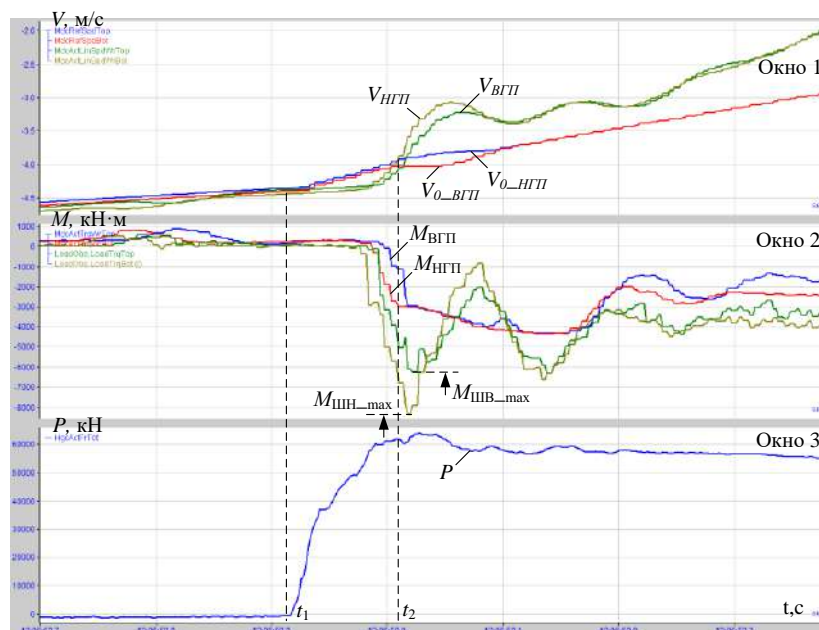
Алгоритм аварийного останова был проверен на стане методом «пассивного эксперимента». Это произошло при кратной перегрузке шпинделей по моменту в режимах захвата металла валками. Ниже приводится анализ двух случаев подключения алгоритма.

Случай 1. Осциллограммы предаварийного режима представлены на рис. 7.19, а (на рис. 7.19, б они показаны в увеличенном масштабе времени). Для восстановления упругих моментов выполнялись экспорт массивов данных, записанных во время аварии, и дальнейшее восстановление сигналов с помощью наблюдателя. Процессы происходят в режиме прокатки «назад», поэтому осциллограммы скоростей и моментов расположены в области отрицательных

значений. Далее численные значения приняты по модулю, знак “-” перед ними не ставится.



а



б

Рисунок 7.19 – Осциллограммы захвата с аварийным остановом для случая 1 в различных масштабах времени (а) и (б): окно 1 – заданные и актуальные линейные скорости ВГП и НГП, м/с; окно 2 – моменты двигателей и на шпинделях от наблюдателей, кН·м; окно 3 – усилие прокатки, кН

Захват произошел в момент t_1 (рис. 7.19, б) на скорости 4,4 м/с в режиме торможения, когда люфты в шпиндельных соединениях раскрыты [226]. Указанная скорость почти в два раза превышает скорость рабочего захвата (2,5

м/с). Это привело к динамическому удару, при котором амплитуда момента $M_{\text{ШН_max}}$ шпинделя НГП превысила 8000 кН·м. Перегрузка по моменту составила 430% номинального момента двигателя. Максимальное значение момента $M_{\text{ШВ_max}}$ на верхнем шпинделе превысило 4200 кН·м, что соответствует 220% номинального момента.

Благодаря действию разработанной системы (рис. 7.16) сформирован сигнал на экстренное торможение электроприводов. Он подан в момент времени t_2 (рис. 7.19, б) после того как момент на шпинделе превысил установленное значение 7000 кН·м. Время торможения Δt двигателя НГП (рис. 7.19, а) составляет 0,7 с, что примерно в 2 раза меньше времени задания аварийного торможения Δt_0 при обычной настройке. Такой быстрый останов является преимуществом, т.к. вращение двигателя (и шпинделя) будет прекращено в 2 раза быстрее.

Случай 2. Осциллограммы аварийного режима, аналогичного предыдущему, представлены на рис. 7.20. Непосредственно после захвата в момент времени t_3 произошло увеличение упругого момента $M_{\text{ШН}}$ на шпинделе нижнего валка до $M_{\text{ШНmax}}=7000$ кН·м. При этом момент на шпинделе верхнего валка увеличился до $M_{\text{ШВmax}}=5200$ кН·м. Как и в предыдущей ситуации одной из причин является захват раската в режиме торможения двигателя при разомкнутых зазорах. Это подтверждают небольшие отрицательные «всплески» моментов двигателей $M_{\text{ВГП}}$, $M_{\text{НГП}}$ в моменты t_1 , t_2 , предшествующие захвату.

Благодаря действию внедренного алгоритма в систему управления скоростями поступил сигнал о недопустимом увеличении упругого момента. В результате произошел экстренный останов электроприводов в интервале t_4-t_5 в течение 0,25 с. Для предотвращения дальнейших поломок такая задержка не критична, однако для снижения перегрузок желательно ее уменьшение. При проектной настройке системы торможение происходило бы в интервале t_4-t_6 , время останова составило бы 0,6 с. Таким образом, благодаря действию внедренного алгоритма, время аварийного останова электроприводов сократилось в 2,4 раза.

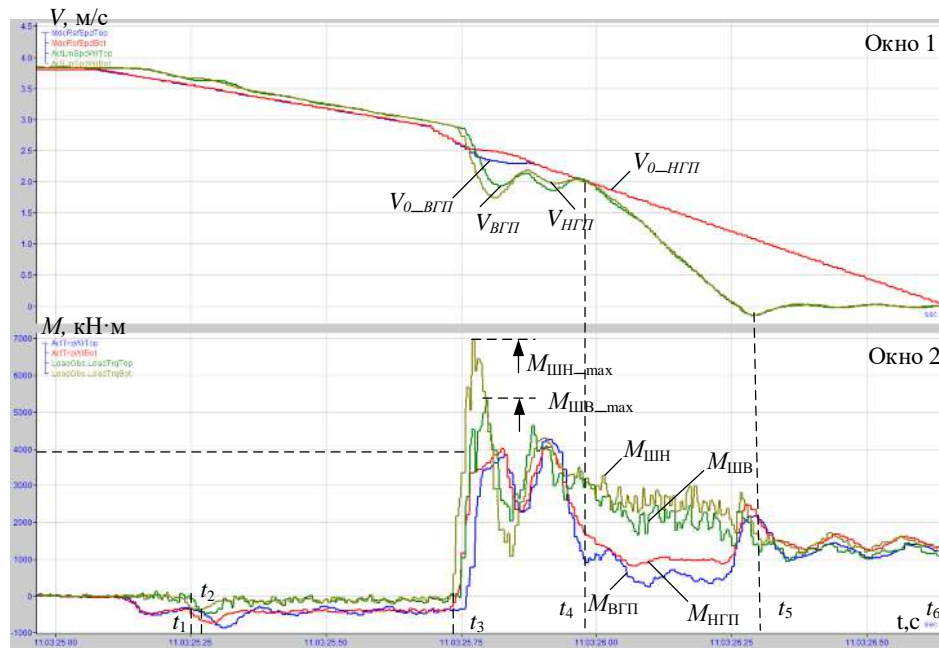


Рисунок 7.20 – Осциллограммы при аварийной остановке стана действием разработанной системы для 2-го случая

Рассмотренные аварийные режимы подтверждают целесообразность использования наблюдателя для адаптивной экстренной остановки электроприводов при динамической перегрузке шпинделей. Они дают подтверждение эффективности разработанной системы аварийного останова.

7.6.5. Обсуждение результатов

Проведенные исследования подтверждают, что во всех режимах момент двигателя ограничен системой управления на уровне 240% номинального значения. При этом амплитуды упругих моментов на шпинделях в экстремальных режимах превышают номинальный момент в 3,5–5 раз. Вследствие этого возникают усталостные разрушения, что приводит к поломкам механического оборудования. Это является подтверждением целесообразности постоянного мониторинга упругих моментов на шпинделях с использованием разработанного наблюдателя.

По сравнению с «контактными» измерительными системами разработанный наблюдатель обладает следующими преимуществами:

- простотой и высокой надежностью;
- отсутствием необходимости какого-либо обслуживания;

– практически не имеет стоимости, т.к. является фрагментом программного обеспечения.

Информацию о динамических моментах на шпинделе следует сохранять в специальной информационной базе, при этом амплитудные значения, превышающие заданный порог, следует выводить на монитор оператора. Это позволит избежать последовательного повторения динамических ударов, приводящих к повышенным усталостным разрушениям.

Решение перечисленных задач позволит трансформировать разработанный наблюдатель в систему on-line мониторинга технического состояния шпинделей. На ее основе будет внедрен комплекс решений, направленных на предупреждение аварий и минимизацию их последствий.

7.7. Система тепловой защиты двигателей

Как было отмечено выше, актуальна разработка способа останова стана при перегреве двигателей без ущерба для технологического процесса. Это предопределяет создание двухступенной защиты, осуществляющей следующие операции:

- предупреждение персонала при приближении температуры к заранее заданному значению, определяемому классом изоляции;
- останов стана в рабочем режиме по окончании этапа технологического процесса, например, по окончании цикла прокатки.

Разработка выполняется для электроприводов двухклетевого реверсивного стана «тандем» холодной прокатки (см. рис. 1.6). Также даются рекомендации по расширенному внедрению системы защиты.

В [315] отмечено, что *«основой защиты от недопустимого перегрева является контроль теплового состояния обмоток электрических машин»*. Также *«тепловая защита позволяет продлить ресурс изоляции и предотвратить активное старение и повреждения изоляции при тепловой перегрузке, ограничить перегрев двигателя при протекании сверхтоков»* [316]. Важный вывод: на объектах с персоналом защита выполняется двумя ступенями с действием на сигнализацию и на отключение. На объектах без персонала защиту рекомендуется выполнять одной ступенью с действием на отключение.

Согласно пунктам правил устройства электроустановок на электродвигателях, имеющих принудительную вентиляцию, следует устанавливать защиту, осуществляющую воздействие на предупредительный сигнал и/или отключение электродвигателя при повышении температуры или прекращении действия системы охлаждения [317]. Электродвигатели с водяным охлаждением обмоток и активной стали статора, а также с встроенными воздухоохладителями, охлаждаемыми водой, должны иметь защиту, действующую на сигнал при уменьшении потока воды ниже заданного значения и на отключение электродвигателя при его прекращении [318].

Таким образом, сигнал от наблюдателя позволяет настраивать защиту двигателя в двух аварийных режимах:

- при отказе системы принудительного водяного охлаждения, потребуется отключение двигателя после прокатки заготовки;
- при обрыве фазы, который ведет к перегреву, но не требует экстренного отключения двигателя, допускается работа до окончания прокатки всей партии.

Безусловно, в обоих случаях потребуется on-line контроль температуры.

Функциональная схема, поясняющая принцип действия разработанной системы защиты, представлена на рис. 7.21 [319]. Ее основу составляют 4-х массовые тепловые модели, представленные в одноименных блоках и конвертированные в код программы ПЛК. Такая модель подробно рассмотрена в разделе 5. Информация о токах статора и токах возбуждения, используемая при восстановлении температуры, поступает из систем электропривода (от преобразователей частоты) в ПЛК управления клетью. В этих же контроллерах реализованы в виде программ заранее разработанные тепловые модели. Связь ПЛК с преобразователями частоты осуществляется по полевой информационной шине. Для снижения требования к скорости передачи и обработки информации в ПЛК передаются действующие значения токов. По ним рассчитываются потери энергии в обмотках. Потери в стали, зависящие от частоты и напряжения, вычисляются по напряжениям, пропорциональным скорости вращения двигателя. Также возможно использование сигнала действующего напряжения, получаемого от преобразователя частоты.

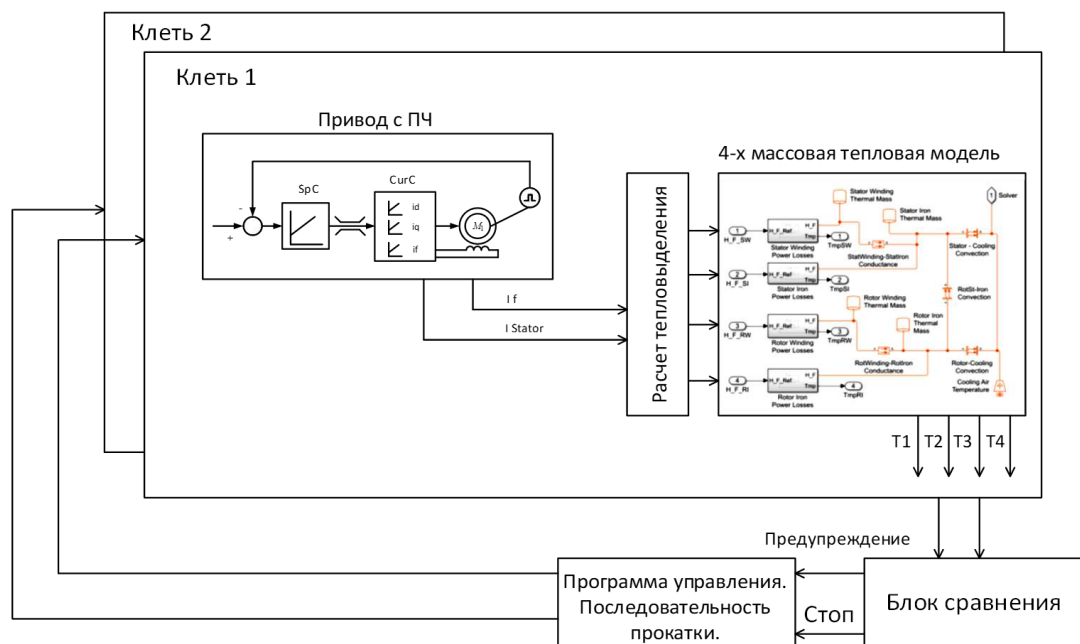


Рисунок 7.21 – Функциональная схема разработанной системы защиты двигателей прокатной клетки от перегрева

Рассчитанные значения температуры поступают от тепловой модели в блок сравнения, где на основании допустимых температур обмоток и железа магнитопровода формируются сигналы на останов с задержкой или на немедленный останов. Эти сигналы поступают в программный блок, управляющий скоростями электроприводов. Сигнал задержанного останова вызывает прекращение прокатки нового рулона. Сигнал немедленного останова прекращает прокатку после завершения текущего прохода. В этом случае осуществляется выпуск полосы из клеток после намотки на моталку. Указанная последовательность действий представлена на рисунке 7.22 в виде алгоритма.

Зависимости для вычисления температур отдельных масс реализованы в блоках «Обсчет тепловой модели M1» и «Обсчет тепловой модели M2». Непосредственно защита осуществляется блоками «Переход на торможение и останов стана» и «Выдача сообщения M1– высокая температура». Они осуществляют переключение логики управления на останов по окончании текущего прохода либо по окончании прокатки рулона. Первый вариант срабатывания защиты происходит при недопустимом перегреве, требующем максимально быстрой остановки. Второй вариант является менее критичным и позволяет докатать рулон за заданное число проходов. При этом формируются сигналы

предупреждения персонала и оператора, и подается сигнал запрещения на подачу следующего рулона (на схеме эти сигналы не показаны). В обоих случаях останов осуществляется в рабочем режиме и не является аварийным. Данную последовательность операций следует декларировать как новый способ защиты двигателей прокатного стана от перегрева.

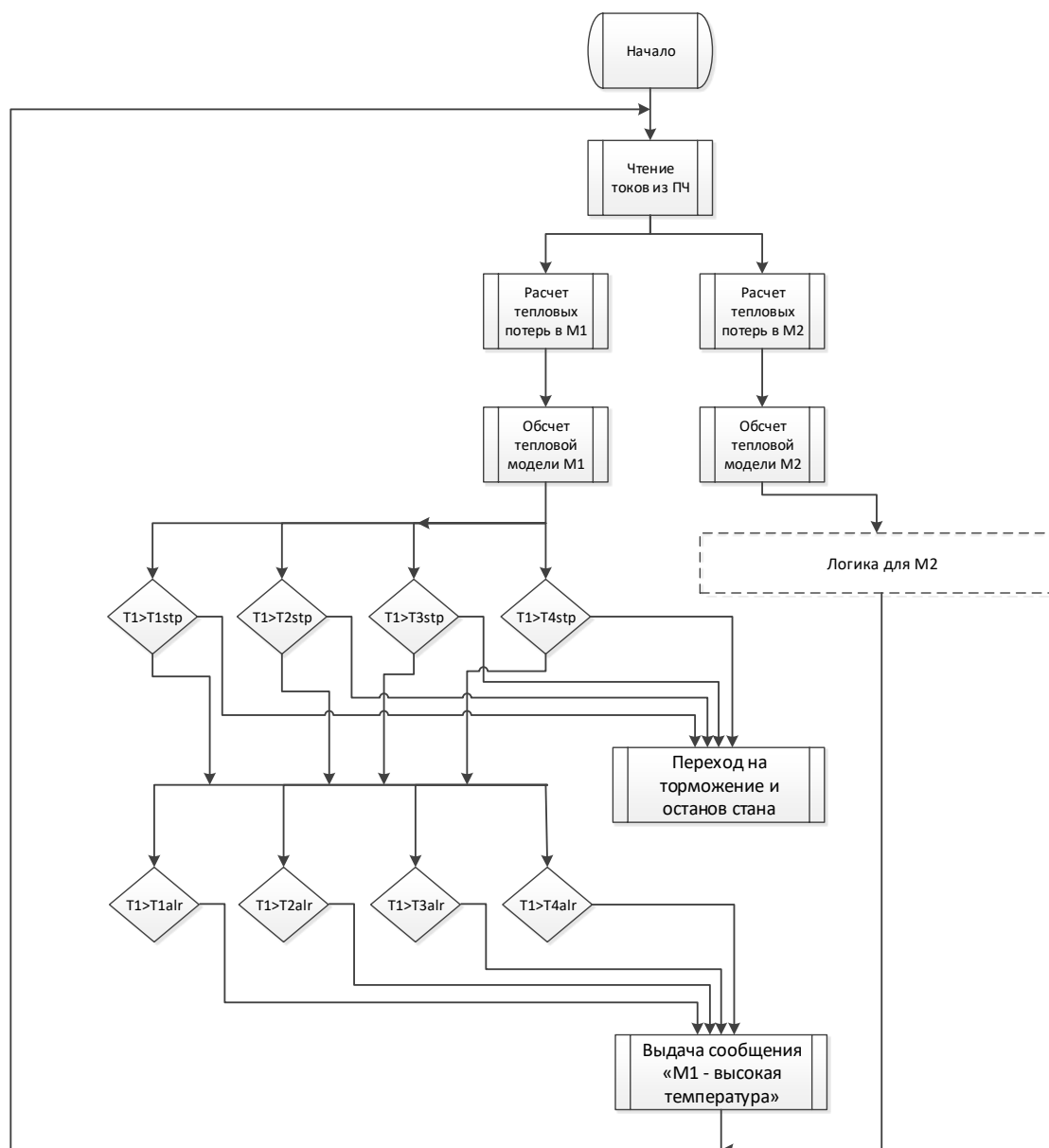
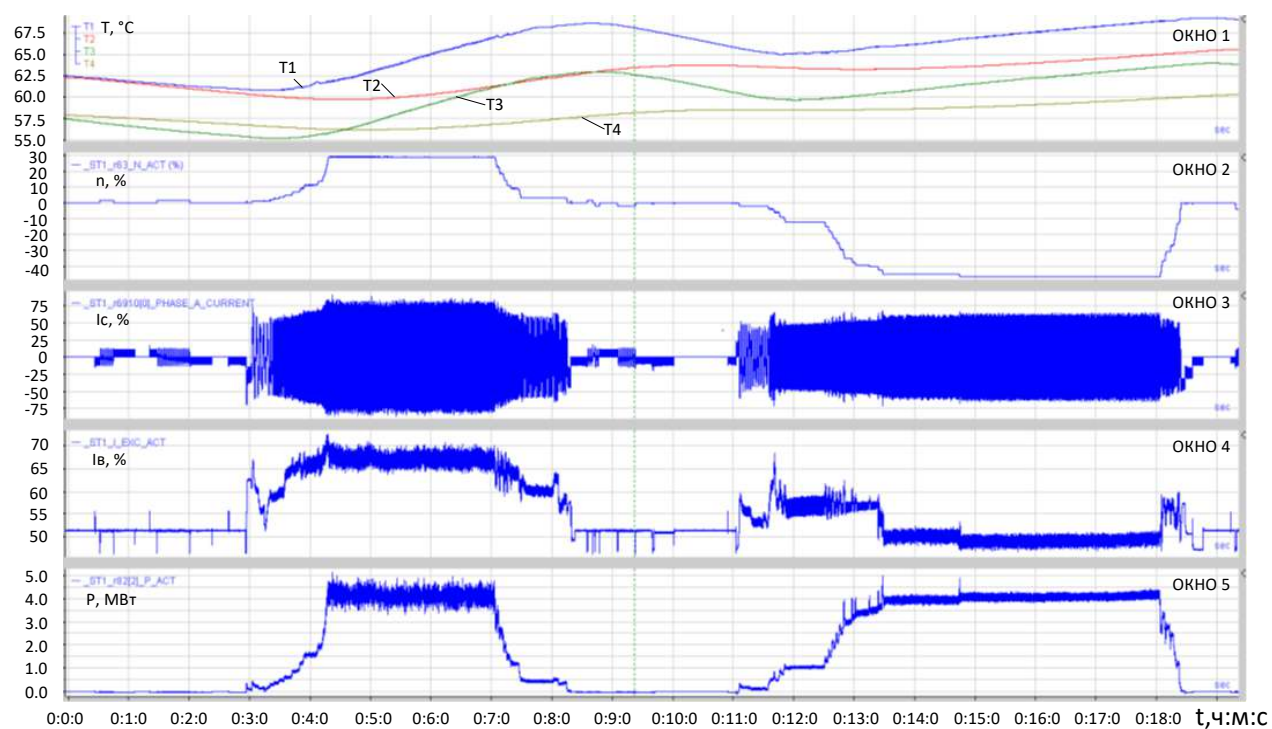


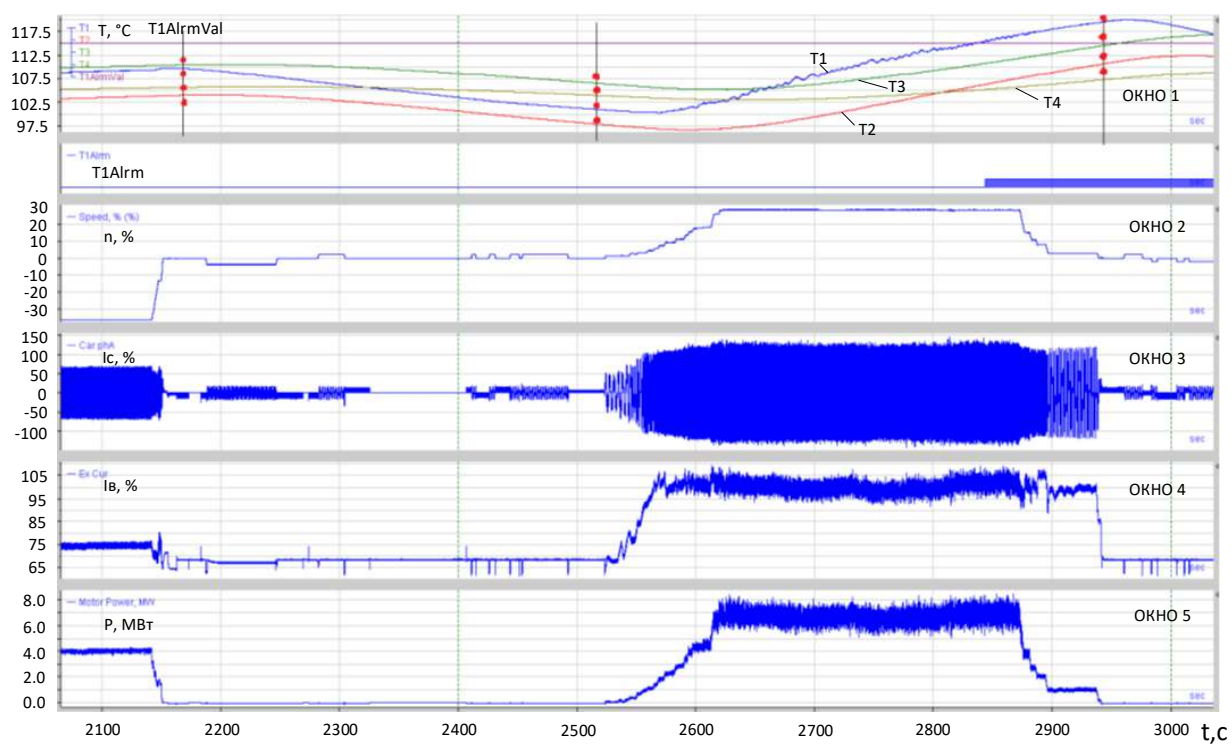
Рисунок 7.22 – Структура алгоритма, поясняющего действие защиты

7.8. Внедрение на реверсивном стане 1700

Выполнена виртуальная настройка наблюдателя и тепловой модели. На рис. 7.23 представлены осциллограммы температур 4-х масс двигателя (T1...T4), восстановленные наблюдателем в процессе прокатки.



а



б

Рисунок 7.23 – Осциллограммы температур, восстановленных в 4-х массовой модели при работе двигателя в допустимом диапазоне (а) и при превышении значения $T1AlrmVal=115^\circ\text{C}$ (б)

На рис. 7.23, а показан режим прокатки без перегрева двигателя [320]. В этом случае температура всех 4-х масс изменяется в диапазоне от 40°C до 70°C, что значительно ниже пределов, указанных в табл. 1.10. На рис. 7.23, б зафиксировано превышение температурой обмотки статора значения “Alarm”, установленного равным 115°C. Уровень этого ограничения показан в окне 1 горизонтальной прямой T1AlrmVal. В момент времени t_1 температура статора (осциллограмма T1) превысила это значение. Вследствие этого на рис. 7.23, б появился сигнал T1Alrm предупреждения о превышении температурой заданного предела.

Показаны следующие сигналы: окно 1 – осциллограммы температуры масс T1, T2, T3, T4, °C; индексы соответствуют: 1, 2, 3, 4 – обмотка статора, железо статора, обмотка ротора, железо ротора, соответственно; в этом же окне на рис. 7.23, б показан сигнал срабатывания предупреждения (уставка 115°C) по превышению заданной температуры обмотки статора (T1) в момент t_1 ; окно 2 – скорость двигателя n , % номинальной; окно 3 – ток статора I_C , % номинального; окно 4 – ток возбуждения I_B , % номинального; окно 5 – мощность P , потребляемая двигателем, МВт.

Возникший сигнал T1Alrm является предупреждением для персонала о необходимости срочно обратить внимание на ситуацию. Защита настроена так, что ее дальнейшее действие произойдет при увеличении температуры до 140°C, которая является предельно допустимой для изоляции класса F (см. табл. 1.10). Разработанный наблюдатель реагирует только на температуру, и его действие не зависит от причин возникновения опасного нагрева. Поэтому такая система обеспечит защиту двигателя как в режимах с медленным повышением температуры, например, при перегрузке, так и в режимах с быстрым нагреванием, например, при застревании, вызванном деформацией прокатываемой полосы (хотя в последнем случае, вероятнее всего, сработает токовая защита). Это является преимуществом представленного алгоритма.

В реальных условиях при реализации тепловой модели в ПЛК управления станом 1700 произведены подстройка параметров тепловой модели и валидация результатов путем измерения реальных температур двигателя в доступных

для измерения точках при частично вскрытых двигателях. Производились измерения при помощи бесконтактных пирометров температур обмотки возбуждения, железа ротора (полюсных наконечников), доступной части железа статора и обмоток статора. Измеренные величины показаны на графике температуры (рис. 7.23, б) в виде точек в окне 1. Измерения производились до и после окончания прокатки, а также после остановки стана. По итогам проведенного эксперимента можно сделать вывод, что обеспечивается удовлетворительное соответствие расчетных и реальных значений температуры.

Перспективы расширенного внедрения

Представленный алгоритм реализует новый вариант адаптивной двухступенной защиты, модифицированный для двигателей прокатного стана. Система, аналогичная разработанной, прошла техническую апробацию в электроприводах клетки стана 5000. Проведены успешные испытания, подготовлено внедрение на других технологических комплексах. После не принципиальных изменений этот алгоритм может быть применен для двигателей непрерывных станов горячей прокатки. Поскольку процессы нагрева двигателей достаточно медленные, указанные этапы срабатывания обеспечат надежную тепловую защиту без последствий, связанных с экстренными остановками стана. Благодаря этому удастся избежать застревания полосы (либо раската) в валках и других опасных последствий, которые могут произойти при срабатывании быстродействующей защиты. Также разработанный способ может быть рекомендован для защиты других промышленных электроприводов, работающих в циклическом режиме.

Обоснованный принцип двухступенной защиты и разработанный алгоритм рекомендуются для реализации на ответственных установках, где есть опасность недопустимого нагрева электрооборудования [321]. Одна из модификаций системы, основанная на данном подходе, применена для защиты трансформатора дуговой сталеплавильной печи от неполнофазного включения [43].

7.9. Оценка технико-экономической эффективности внедрения разработок

Внедрение результатов, представленных в диссертации, выполнено в порядке инициативных разработок при непосредственном участии автора. Акты внедрения результатов на станах 5000, 2500 и 2000 ПАО «ММК» представлены в Приложении 7. Там же приведены акты опытно-промышленных испытаний, подтверждающие техническую эффективность, достигнутую при внедрении. Ниже представлены результаты расчета экономических эффектов, полученных при внедрении.

1. На стане 5000 ПАО «ММК».

1.1. Эффект от внедрения результатов НИОКР ««Разработка и внедрение алгоритмов оптимизации нагрузочных и тепловых режимов электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 при прокатке слэбов расширенного сортамента»» (дата фактического внедрения 1 сентября 2022 г).

Достигнуты:

- снижение неравномерности загрузки двигателей по моменту: обеспечено рассогласование моментов не более 15% на 80% длины заготовки;
- увеличение срока службы оборудования горизонтальной клетки за счет уменьшения количества перегрузок электрического и механического оборудования – в 1,2 раза;
- сокращение количества внеплановых или аварийных замен шпинделя в 1,5 раза;
- сокращение времени аварийных простоев стана, обусловленных поломками оборудования линий главных приводов, – в 1,5 раза.

Экономический эффект составляет 5937,9 млн руб. /год. Он достигается за счет изменения затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном и регламентном режимах.

1.2. Эффект от внедрения результатов НИОКР «Разработка и внедрение способов снижения динамических нагрузок в валопроводах главных электроприводов горизонтальной клетки стана 5000» (дата фактического внедрения 10 ноября 2017 г).

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, обеспечиваемые в результате внедрения разработанного способа ограничения динамических нагрузок:

- 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.

Экономический эффект от внедрения 5764,6 тыс. руб.

Таким образом, суммарный экономический эффект на стане 5000 составляет 11,7 млн. руб./год.

2. В результате внедрения цифровой системы управления формирующими роликами моталок на стане 2500 обеспечены:

- снижение расходного коэффициента за счет повышения точности регулирования толщины на концах рулона;

- повышение качества проката в результате улучшения показателя разнотолщинности по длине полосы за счет реализации усовершенствованных алгоритмов регулирования положения формирующих роликов;

- расширение сортамента за счет производства полос толщиной до 30 мм (в перспективе, и выше) со смоткой в рулон.

В результате исследований и длительной эксплуатации подтверждены следующие показатели технико-экономической эффективности внедренных разработок: экономия металла в объеме 4,13 тыс. т/год, экономия электрической энергии – 4,77 млн. кВт·ч/год, суммарный экономический эффект – 5675,5 млн. руб./год.

3. На стане 2000 выполнено внедрение результатов НИОКР «Разработка и внедрение способа снижения динамических нагрузок электроприводов непрерывной подгруппы клеток стана 2000» (дата фактического внедрения 10 декабря 2015 г)

При расчете экономического эффекта учитывались: сокращение времени простоев стана, снижения расходного коэффициента в результате уменьшения обреза, сокращение объема брака, снижение затрат на эксплуатацию главных электроприводов.

Экономическая эффективность достигается за счет сокращения затрат на закуп и установку шпинделя в аварийном и регламентном режимах. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 2101,6 млн руб./год.

Таким образом, суммарный экономический эффект от внедрения результатов диссертации на станах ПАО ММК» составляет около 19,5 млн. руб./год ($5937,9 + 5764,6 + 5675,5 + 2101,6 = 19479,6$ млн. руб./год).

Выполненные разработки рекомендуются для внедрения на прокатных станах независимо от рода тока и типа электроприводов. Их преимуществом является высокая эффективность при отсутствии капитальных затрат.

ВЫВОДЫ

1. Представлена упрощенная структура, поясняющая цифровое исполнение усовершенствованных систем управления электро- и гидроприводами прокатной клетки. Приведены осциллограммы, полученные при проектном и предложенном алгоритмах САРТ в проходах с профилированной прокаткой в клетки стана 5000. Подтверждены преимущества разработанного алгоритма, заключающиеся в повышении точности регулирования толщины при перемещении нажимных устройств.

2. Рассмотрена реализация разработанного РДН с переключающейся структурой. Выполнено сравнение осциллограмм, полученных при проектном способе управления и при внедрении нового способа согласования нагрузок. Доказано преимущество разработанного алгоритма, заключающееся в кратном сокращении времени достижения равенства моментов двигателей ВГП и НГП. Анализ осциллограмм за пять проходов чистовой прокатки подтвердил, что высокое быстродействие представленного РДН обеспечивает эффективное выравнивание токов ВГП и НГП в течение каждого прохода.

3. Представлены структура и схемы реализации в ПЛК разработанного адаптивного наблюдателя упругого момента на шпинделях, внедренного в электроприводах клетки стана 5000. Путем обработки массивов данных выполнен анализ упругих моментов на шпинделях в следующих аварийных режимах:

- при отключении электроприводов во время прокатки;
- при поломке валка и шпиндельного соединения;
- в режиме нахлеста полосы на валок.

Следует заметить, что исследование упругих моментов на шпинделях прокатного стана в аварийных режимах выполнено впервые. Главными задачами при предотвращении этих режимов является своевременная фиксация начала аварии и формирование сигнала на экстренный останов электропривода.

4. Рассмотрены причины и последствия аварии, связанной с нахлестом прокатываемого листа на рабочий валок. Приведены осциллограммы, полученные с помощью разработанного наблюдателя, по которым обоснованы диагностические признаки предаварийной ситуации. Таковыми являются величина и темп нарастания момента на шпинделе, который (темп) определяется как производная упругого момента, восстанавливаемого в on-line режиме. При этом должно быть обеспечено исключение влияния динамических процессов при захвате.

5. Разработан способ предотвращения аварий, согласно которому предлагается выделять производную упругого момента на шпинделе и при наличии высокого темпа нарастания момента (более 25 МН·м/с) производить форсированный останов стана. Это предотвратит дальнейшее вращение шпинделя и

аварийные последствия. Предложена структура системы управления, обеспечивающей экстренное торможение. Для ее реализации разработан адаптивный датчик интенсивности торможения с переключающейся структурой.

6. Методом пассивного эксперимента получены осциллограммы для двух аварийных режимов, не вызвавших поломку оборудования. В обоих случаях, благодаря действию внедренного алгоритма, в систему управления электроприводами поступил сигнал о недопустимом увеличении упругого момента. В результате произошел экстренный останов электроприводов, время которого по сравнению с аналогичным показателем при проектной настройке сократилось в 2,4 раза (от 0,6 с до 0,25 с).

7. В настоящее время разработанный наблюдатель находится в промышленной эксплуатации. Полученные сигналы упругих моментов на шпинделях не предназначены для использования в системах регулирования электроприводов. Их основное назначение – информация об амплитудах упругого момента в динамических режимах при захвате раската валками. Также наблюдатель позволяет осуществлять контроль предаварийных ситуаций с целью предотвращения аварий либо выяснения причин в случае их возникновения.

8. Разработаны алгоритм и структура системы двухступенной тепловой защиты, выполняющей предупреждение персонала об ухудшении теплового состояния двигателя на первом этапе и безаварийный останов агрегата по окончании цикла прокатки в случае дальнейшего увеличения температуры. Представлены функциональная схема системы защиты и структура алгоритма, поясняющего ее действие. Методом пассивного эксперимента подтверждена работоспособность системы: при превышении температурой заданного значения формируется предупредительный сигнал для персонала.

9. В результате исследований методом «пассивного эксперимента» доказано, что предложенный алгоритм адаптивной двухступенной защиты позволяет обеспечить безаварийный останов агрегата и не допустить превышения температурой предельных значений. Система внедрена в электроприводах стана холодной прокатки и прошла промышленную апробацию на стане 5000. Даны рекомендации по ее внедрению на ответственных установках, где есть опасность недопустимого нагрева электрооборудования.

10. Основные технические эффекты от внедрения разработок на станах 5000, 2500 и 2000 ПАО «ММК»:

- увеличение срока службы оборудования горизонтальной клетки за счет уменьшения количества перегрузок электрического и механического оборудования;
- сокращение количества внеплановых или аварийных замен шпинделя;
- сокращение времени аварийных простоев стана, обусловленных поломками оборудования линий главных приводов;
- снижение расходного коэффициента в результате сокращения брака, связанного с аварийными застреваниями раскатов, и концевой обрезки.
- расширение сортамента за счет производства полос толщиной до 30 мм (и выше) со смоткой в рулон;
- импортозамещение за счет расширения возможностей для производства листа и толстой полосы из труднодеформируемых марок стали.

Суммарный экономический эффект от внедрения разработок, выполненных в диссертации, составляет 19,5 млн. руб./год.

11. Представленные технические решения рекомендуются для внедрения в электромеханических системах прокатных станов, оснащенных цифровыми системами управления на базе современных ПЛК. В комплексе с разработанными способами ограничения упругого момента они обеспечат сокращение непроизводительных затрат предприятий за счет снижения аварийности основного оборудования. Это является практическим вкладом в диджитализацию прокатного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснован концептуальный подход к созданию объектно-ориентированных цифровых двойников промышленных электротехнических комплексов предусматривающий:

- разработку ЦД-прототипов электромеханических и гидравлических систем;
- разработку ЦД-экземпляров, учитывающих конструктивные отличия и существенные взаимосвязи объекта;
- их объединение в агрегированный цифровой двойник электротехнического комплекса либо технологического устройства более высокого уровня.

2. Обоснована методология создания промышленных ЦД, на основе технологии Hardware-in-the-loop (HIL), включающая полунатурное моделирование, которое достигается путем создания замкнутого контура между тестируемым оборудованием и моделированием в реальном времени. Благодаря HIL теряет актуальность задача строго синтеза регуляторов систем автоматического регулирования технологических параметров и координат электроприводов. На примере ввода в эксплуатацию стана холодной прокатки 1700 доказано, что такой вид моделирования позволяет снизить затраты на отладку и общие трудозатраты на пуско-наладочные работы.

3. Концепция объектно-ориентированных цифровых двойников электротехнических комплексов прокатных станов получила развитие в направлении реализации на основе доступных программных сред (Simulink Real Time, Simscape Hydraulics и др.) и моделирования HIL. Создан комплекс двойников-экземпляров электромеханических и гидравлических систем, цифровых симуляторов технологических взаимосвязей и агрегированных ЦД прокатных агрегатов.

4. На основе анализа вариантов размещения цифрового двойника в структурах ПЛК и ПК впервые исследовано влияние асинхронного обмена информацией и временных задержек на точность воспроизведения физических процессов в структуре ЦД. Дана оценка задержек в быстродействующих электромеханических и гидравлических системах. Сделан вывод, что запаздывание

сигнала момента реальной системы составляет 6...10 мс, что приводит к ошибкам в передаче данных в on-line режиме. Для ограничения запаздываний рекомендовано размещение виртуальной модели и структуры системы управления в ресурсах ПЛК с многоядерными процессорами.

5. В плане развития концепции ЦД обосновано размещение симулятора и отлаживаемого ПЛК на двух виртуальных машинах. Предложен подход с использованием ПЛК с встроенным программным обеспечением. На примере электропривода летучих ножниц АПР горячекатаной полосы показано сокращение времени ввода в эксплуатацию от нескольких дней до нескольких часов. Данная конфигурация ЦД рекомендуется при реконструкции агрегатов, находящихся в эксплуатации.

6. Предложены конфигурации ЦД в ПЛК на базе двухъядерных процессоров. С использованием виртуального симулятора и ПО Codesys 3.5 выполнены исследования переходных процессов более 40 промышленных электроприводов. Во всех случаях подтвержден кратный «запас» по быстродействию. Тем самым показаны перспективы применения разработанного аппаратно-программного комплекса в системах автоматизации металлургического производства.

7. Получили развитие научные положения теории автоматического управления в направлении разработки адаптивных и нечетких регуляторов взаимосвязанных электротехнических систем. Впервые разработаны РДН с переключающейся структурой и двухканальный нечеткий РДН, содержащий канал регулирования по производной ошибки заданий моментов двигателей. Обоснована методика настройки РДН с НЛ по критерию минимального времени согласования моментов.

8. На основе теоретического и экспериментального анализа технологических взаимосвязей в режиме непрерывной прокатки разработан комплекс цифровых алгоритмов управления электроприводами последовательно расположенных клеток, обеспечивающий выравнивание нагрузок. Разработан способ управления гидравлическими нажимными устройствами клетки толстолистого стана в режиме профилированной прокатки, обеспечивающий повышение размерной точности прокатываемых листов.

9. Разработан наблюдатель состояния на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния (Augmented Kalman Filter – AKF), отличительным признаком которого является введение в вектор состояния момента нагрузки 2-й массы двухмассовой системы. Это позволяет учесть скорость заполнения очага деформации при входе раскатов в клеть без применения вычислительных алгоритмов. В результате повышается точность восстановления координат электропривода.

10. Обоснована и технически реализована концепция объектно-ориентированных цифровых теней – наблюдателей координат электромеханической системы прокатной клетки. Разработан наблюдатель углового зазора в шпиндельных соединениях путем интегрирования скорости во время замыкания зазора. Разработан наблюдатель упругого момента на шпинделях, основным компонентом которого является ПИ регулятор подстройки процесса модели к реальному процессу. Это обеспечивает сокращение вычислительных операций, что является преимуществом при внедрении в промышленных электроприводах.

11. В развитие концепции ограничения ударных нагрузок средствами автоматизированного электропривода разработан способ ограничения упругого момента в двухмассовой электромеханической системе, компенсирующий влияние скорости заполнения очага деформации. Реализация способа осуществляется за счет предразгона и адаптивного торможения после входа раската в клеть. Обоснована и апробирована методика настройки регуляторов, выполнен комплекс исследований, подтвердивший, что предложенный алгоритм обеспечивает минимальные амплитуды момента при захвате.

12. Средствами разработанного адаптивного наблюдателя упругого момента впервые выполнен анализ упругих моментов на шпинделях в аварийных режимах, вызвавших поломки оборудования клетки стана 5000. На его основе разработан способ предотвращения аварий, согласно которому производится форсированный останов стана при превышении темпом нарастания момента на шпинделе предельного значения (25000 кН·м/с). Представлена структура системы экстренного торможения, для ее реализации разработан задатчик интенсивности торможения с переключающейся структурой.

13. В развитие концепции объектно-ориентированных цифровых теней разработан наблюдатель теплового состояния двигателя на основе четырех-массовой тепловой модели. Путем физических замеров температуры двигателя клетки стана 5000 подтверждена адекватность ее восстановления наблюдателем. На его основе разработана система двухступенной тепловой защиты двигателей, которая прошла апробацию в электроприводах стана 5000 и внедрена в электроприводах стана 1700.

14. Разработанные цифровые двойники и алгоритмы управления внедрены на станах 5000, 2500 и 2000 ПАО «ММК». Методика виртуальных ПНР применена при вводе в промышленную эксплуатацию стана 1700. Основные технические эффекты от внедрения:

- сокращение непроизводительных затрат за счет снижения расходного коэффициента в результате сокращения брака и концевой обрезки;
- снижение аварийности производства за счет увеличения срока службы электрического и механического оборудования, сокращения количества внеплановых замен шпинделей;
- расширение сортамента за счет производства полос толщиной до 30 мм (и выше) со смоткой в рулон.

Это позволяет утверждать, что цели, поставленные в диссертации, достигнуты. Суммарный экономический эффект от внедрения разработок составляет 19,5 млн. руб./год.

Перспективы исследований

В результате решения поставленных задач получены новые знания о взаимосвязанном регулировании координат электромеханических систем и технологических параметров непрерывных технологических линий. В дальнейшем они позволят обосновать новые принципы и алгоритмы управления, раскроют возможности и резервы энерго- и ресурсосбережения.

На перспективу ставится задача создания комплексных цифровых систем управления взаимосвязанными электроприводами клетки либо группы клеток толстолиствого стана и/или ШСП. В связи со сложностью реализуемых алгоритмов наиболее эффективным является применение ПЛК с многоядерными процессорами. Усовершенствованные системы разрабатываются на цифровой

основе, для их наладки в промышленных условиях предусмотрено применение виртуальных моделей и технологии НЦ.

Необходимо дать научное обоснование концепции «интеллектуальный прокатный стан» на основе агрегированных цифровых двойников технологических узлов, созданных на базе разработанных цифровых симуляторов и двойников-экземпляров взаимосвязанных электромеханических и гидравлических систем.

Представленные технические решения рекомендуются для внедрения в электромеханических системах прокатных станов, оснащенных современными ПЛК.

В целом, выполненная диссертационная работа способствует инновационному развитию металлургической отрасли Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57700.37– 2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 16.09.2021 № 979-ст. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с.
2. Grieves, M. Digital Twin: manufacturing excellence through virtual factory replication / M. Grieves // 3ds.com: сайт. – 2014. – URL: <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf> (дата обращения: 12.06.2025).
3. Pronost, G. Digital Twins along the product lifecycle: a systematic literature review of applications in manufacturing: [version 2; peer review: 2 approved, 2 approved with reservations] / G. Pronost, F. Mayer, M. Camargo, L. Dupont // Digital Twin. – 2024. – Vol. 1. – Article number 3. DOI 10.12688/digital-twin.17807.2.
4. Guide to Industrial Control Systems (ICS) security / K. Stouffer, S. Lightman, V. Pillitteri, M. Abrams, A. Hahn // csrc.nist.gov: сайт. – 2015. – URL: <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/82/r2/final> (дата обращения: 05.04. 2024).
5. A new concept of Digital Twin supporting optimization and resilience of factories of the future / A. Bécue, E. Maia, L. Feeken, P. Borchers, I. Praça // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10(13). – Article number 4482. DOI 10.3390/app10134482.
6. Кравченко, А.А. Природа, сущность и классификация цифровых двойников / А.А. Кравченко // Экономика и управление. – 2025. – Т. 31, № 1. С. 125–134. DOI 10.35854/1998-1627-2025-1-125-134.
7. Allmeling, J. Model continuity: from offline simulation to real-time testing / J. Allmeling // powerelectronicsnews.com: сайт. – 2019. – URL: <https://www.powerelectronicsnews.com/model-continuity-from-offline-simulation-to-real-time-testing/> (дата обращения: 17.02. 2025).
8. Радионов, А.А. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова // Изв. вузов.

Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 54–68. DOI 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68.

9. Substantiating and implementing concept of Digital Twins for virtual commissioning of industrial mechatronic complexes exemplified by rolling mill coilers / V.R. Gasiyarov, P.A. Bovshik, B.M. Loginov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin, A.A. Radionov // Machines. – 2023. – Vol. 11. – Article number 276. DOI 10.3390/machines11020276.

10. Riches, P. Rolling into the future, long rolling control system utilizing the changing trends in technology and digitalization / P. Riches // Proceedings of the Technical contribution to the 21 Seminário de Automação e TI, part of the ABM Week, São Paulo, SP, Brazil. – 2017. – Vol. 21, № 21. – P. 255–267. DOI 10.5151/2237-0234-30728.

11. Digitalization in the steel industry // SMS group#magazine. Düsseldorf. – 2017. – URL: <https://www.sms-group.com/sms-group-magazine/overview/digitalization-in-the-steel-industry/> (дата обращения: 14.03.2025).

12. The Digital Twin – More than a virtual representation of the real world // SMS group#magazine. Düsseldorf. – 2020. – URL: <https://www.sms-group.com/jp/sms-group-magazine/overview/the-digital-twin-more-than-a-virtual-representation-of-the-real-world/> (дата обращения: 14.03.2025).

13. Lim, K.Y.H. A state-of-the-art survey of digital twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives / K.Y.H. Lim, P. Zheng, C.-H. Chen // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2020. – Vol. 31. – P. 1313–1337. DOI 10.1007/s10845-019-01512-w.

14. Бычков, В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства / В.П. Бычков. – Москва: Высшая школа, 1977. – 391 с.

15. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В.И. Ключев. – Москва: Энергия, 1971. – 320 с.

16. Ключев, В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В.И. Ключев. – Москва: Энергоатомиздат, 2001. – 760 с.

17. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – Москва: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.

18. Басков, С.Н. Энергосиловые параметры приводов и систем профилированной прокатки слябов стана 2800 / С.Н. Басков, А.С. Карандаев, О.И. Осипов // Приводная техника. – 1998. – № 1/2. – С. 21–24.

19. Мещеряков, В.Н. Оценка соотношения составляющих момента нагрузки при расчете вращающего момента электродвигателя / В.Н. Мещеряков, Е.Е. Диденко // *Электрика*. – 2012. – № 10. – С. 31–33.
20. Мещеряков, В.Н. Математическое моделирование способа снижения динамических нагрузок электропривода черновой клетки прокатного стана / В.Н. Мещеряков, Д.В. Мигунов // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2011. – № 3. – С. 21–26.
21. Пятибратов, Г.Я. Влияние противо-ЭДС двигателя на колебания электромеханических систем / Г.Я. Пятибратов, А.А. Даньшина, Н.А. Сухенко // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 57–66. – DOI 10.14529/power150208.
22. Pyatibratov, G.Ya. Methods of efficient parameters multifactorial determination of industrial manipulators gears and electric drives / G.Ya. Pyatibratov, A.A. Danshina, L.L. Altunyan // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 1403–1409.
23. Pyatibratov, G.Ya. Multifactorial determination of the electric drive for the force compensating manipulator / G.Ya. Pyatibratov, A.A. Danshina // *IOP Conference Series: Materials Science 19 and Engineering*. – 2017. – Vol. 177, № 1. – Article number 012138. DOI 10.1088/1757-899X/177/1/012138.
24. Kravchenko, O.A. Synthesis of optimal control in electromechanical systems with elastic couplings / O.A. Kravchenko, G.Ya. Pyatibratov // *Izv. vuzov. Electromekhanika [Proceedings of the Universities. Electromechanics]*. – 1998. – № 4. – P. 58–63.
25. Кравченко, О.А. Принципы построения многокоординатных силокомпенсирующих систем / О.А. Кравченко // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2008. – № 3. – С. 43–47.
26. Колганов, А.Р. Электромеханотронные системы. Современные методы управления, реализации и применения: учебное пособие / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 256 с.
27. Лебедев, С.К. Управление движением промышленных манипуляторов: учебник / С.К. Лебедев, А.Р. Колганов. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2018. – 340 с.

28. Колганов, А.Р. Современные методы управления в электромехатронных 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.
29. Колганов, А.Р. Математические основы теории автоматического управления: 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.
30. Селиванов, И.А. Синтез систем регулирования непрерывных станов с многовалковыми калибрами / И.А. Селиванов, О.И. Петухова, И.В. Суздалев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2009. – Т. 11, № 15. – С. 60–63.
31. Селиванов, И.А. Синтез систем подчиненного регулирования параметров на непрерывных прокатных станах / И.А. Селиванов, А.А. Радионов, О.И. Петухова, И.В. Суздалев // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – №1. – С. 21–24.
32. Салганик, В.М. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 506 с.
33. Карандаев, А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства // Машиностроение: Сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 1. – С. 3–15.
34. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a wide-strip hot-rolling mill / P.V. Shilyaev, I.Yu. Andryushin, V.V. Golovin, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, № 10. – P. 533–541.
35. Патент №2809888 С1 Российская Федерация, МПК В21В 37/72 (2006.01), В21В 37/00 (2006.01), В21В 37/52 (2006.01), В21В 37/46 (2006.01). Устройство для управления приводными двигателями валков горизонтальных клеток толстолистовых и широкополосных станов горячей прокатки : №2023116780 : заявл. 27.06.2023 : опубл. 19.12.2023 / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев Р.Р. Храмшин, Б.М. Логинов, М.А. Зинченко.

36. Патент №2822900 С1 Российская Федерация, МПК В21В 37/72 (2006.01), В21В 37/52 (2006.01), В21В 37/46 (2006.01). Способ управления приводными двигателями клетки толстолистого прокатного стана с индивидуальным электроприводом валков : №2024101781 : заявл. 25.01.2024 : опубл. 16.07.2024 / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, Б.М. Логинов, М.А. Зинченко.

37. Патент №2786648 С1 Российская Федерация, МПК В21В 37/24 (2006.01), В21В 37/62 (2006.01). Устройство для управления профилированной прокаткой заготовки в прокатной клетке толстолистого стана с гидравлическим нажимным устройством : № 2022116923 : заявл. 23.06.2022 : опубл. 23.12.2022 / А.А. Радионов, Р.Р. Храмшин, Б.М. Логинов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин.

38. Патент №2620424 С2 Российская Федерация, МПК В21В 37/52 (2006.01). Способ автоматического регулирования скорости горизонтальных и вертикальных валков универсальной клетки стана горячей прокатки : № 2015145272 : заявл. 21.10.2015 : опубл. 03.05.2017 / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, С.А. Евдокимов, А.Г. Шубин, Б.М. Логинов.

39. Патент №2687354 С1 Российская Федерация, МПК В21В 37/52 (2006.01). Способ согласования скоростей вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки прокатного стана : № 2018120393 : заявл. 01.06.2018 : опубл. 13.05.2019 / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, С.Н. Басков, С.С. Воронин.

40. Патент №2787290 С1 Российская Федерация, МПК В21В 37/52 (2006.01), В21В 37/46 (2006.01), В21В 1/24 (2006.01). Способ автоматического управления процессом прокатки в черновой группе клеток непрерывного прокатного стана : № 2022116924 : заявл. 23.06.2022 : опубл. 09.01.2023 / А.А. Радионов, Р.Р. Храмшин, Б.М. Логинов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин.

41. Патент №2838333 С1 Российская Федерация, МПК В21В 37/00 (2006.01), В21В 28/00 (2006.01), В21В 35/00 (2006.01), В21В 38/00 (2006.01). Способ мониторинга износа шпиндельного соединения клетки толстолистого прокатного стана : №2024128916 : заявл. 30.09.2024 : опубл. 14.04.2025 / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова.

42. Патент №2830788 С1 Российская Федерация, МПК В21В 37/46 (2006.01), В21В 35/10 (2006.01). Способ диагностического мониторинга упругого момента шпинделя толстолистового прокатного стана : №2024112867 : заявл. 14.05.2024 : опубл. 26.11.2024 / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, Б.М. Логинов, Р.Р. Храмшин.
43. Патент №2785005 С1 Российская Федерация, МПК Н02Н 7/09 (2006.01). Устройство для защиты трехфазной электроустановки от неполнофазного режима : № 2022120727 : заявл. 28.07.2022 : опубл. 01.12.2022 / А.С. Карандаев, А.А. Сарлыбаев, И.В. Любимов, Н.Н. Дружинин, Б.М. Логинов.
44. Slevin, B. How do you create a Digital Twin? / B. Slevin // opentext.com: сайт. – 2018. URL: <https://blogs.opentext.com/how-do-you-create-a-digital-twin/> (дата обращения: 28.04.2020).
45. Yao, J.-F. Systematic review of digital twin technology and applications / J.-F. Yao, Y. Yang, X.-Ch. Wang, X.-P. Zhang // Visual computing for industry, biomedicine, and art. – 2023. – Vol. 6. – Article number 10. DOI 10.1186/s42492-023-00137-4.
46. The Digital Twin of an industrial production line within the Industry 4.0 concept / J. Vachálek, L. Bartalský, O. Rovný, D. Šišmišová, M. Morháč, M. Lokšík // 2017 21st International Conference on Process Control (PC), Strbske Pleso, Slovakia. – IEEE, June 2017. – P. 258–262. DOI 10.1109/PC.2017.7976223.
47. A Digital Twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line / H. Zhang, Q. Liu, X. Chen, D. Zhang, J. Leng // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 26901–26911. DOI 10.1109/ACCESS.2017.2766453.
48. Bao, J. The modelling and operations for the Digital Twin in the context of manufacturing / J. Bao, D. Guo, J. Li, J. Zhang // Enterprise Information Systems. – 2018. – Vol. 13. – P. 534–556. DOI 10.1080/17517575.2018.1526324.
49. Graessler, I. Integration of a Digital Twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system / I. Graessler, A. Poehler // 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore. – IEEE, 2017. – P. 289–293, DOI 10.1109/IEEM.2017.8289898.
50. Glaessgen, E. The Digital Twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles / E. Glaessgen, D. Stargel // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC

Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA, Honolulu. –2012. DOI 10.2514/6.2012-1818.

51. Digital Twin-driven product design, manufacturing and service with Big Data / F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, F. Sui // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 94. – P. 3563–3576. DOI 10.1007/s00170-017-0233-1.

52. Haag, S. Digital Twin – proof of concept / S. Haag, R. Anderl // Manufacturing Letters. – 2018. – Vol. 15. – P. 64–66. DOI 10.1016/j.mfglet.2018.02.006.

53. Adnan, M.F. Contextual knowledge in three-dimensional computer aided design (3D CAD) modeling: A literature review and conceptual framework / M.F. Adnan, M F. Daud, M.S. Saud // 2014 International Conference on Teaching and Learning in Computing and Engineering, Kuching, Malaysia. – IEEE, 2014. – P. 176–181. DOI 10.1109/LaTiCE.2014.41.

54. Nzetchou, S. Review of CAD visualization standards in PLM / S. Nzetchou, A. Durupt, S. Remy, B. Eynard // Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era. 16th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2019. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Moscow, Russia. – Springer, 2019. – Vol. 565. – P. 34–43. DOI 10.1007/978-3-030-42250-9_4.

55. Correia, J.B. Data management in Digital Twins: a systematic literature review / J.B. Correia, M. Abel, K. Becker // Knowledge and Information Systems. – 2023. – Vol. 65. – P. 3165–3196. DOI 10.1007/s10115-023-01870-1.

56. Li, Y. Digital Twin for industrial internet / Y. Li, Y. Zhang // Fundamental Research. – 2024. – Vol. 4, №. 1. – P. 21–24. DOI 10.1016/j.fmre.2023.01.005.

57. Development of a workflow for the aggregation and usage of data in Digital Twins of adaptable assembly systems / S. Zimmer, J. Molter, L. Margies, M. Karkowski, R. Müller // Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2023. MHI 2023. – Springer, 2025. – P. 63–74. DOI 10.1007/978-3-031-74010-7_6.

58. Grieves, M. Digital Twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Springer, 2017. – P. 85–113. DOI 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

59. Stark, R. WiGeP-Positionspapier: “Digitaler Zwilling” / R. Stark, R. Anderl, K.-D. Thoben, S. Wartack // ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. – 2020. – Vol. 115. – P. 47–50. DOI 10.3139/104.112311.
60. Schäfer, S.F. Elemente der „Fabrik der Zukunft“. Teil 2: Smart Plant – der Digitale Zwilling des Fabrikgesamtsystems / S.F. Schäfer, N.T. Gorke, C. Cevirgen, Y.-B. Park // ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. – 2022. – Vol. 117, № 3. – P. 151–156. DOI 10.1515/zwf-2022-1029.
61. A review of the technology standards for enabling Digital Twin [version 2; peer review: 2 approved] / K. Wang, Y. Wang, Y. Li, X. Fan, S. Xiao, L. Hu // Digital Twin. – 2022. – Vol. 1. – Article number 4. DOI 10.12688/digital-twin.17549.2.
62. Digital Twins for industrial applications. Definition, business values, design aspects, standards and use cases / S. Malakuti, P. van Schalkwyk, B. Boss, C.R. Sastry, V. Runkana, S.-W. Lin, S. Rix, G. Green, K. Beachle, S.V. Nath // iiconsortium.org: сайт. – 2020. – URL: https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf (дата обращения: 27.04.2021).
63. Cai, Y. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing / Y. Cai, B. Starly, P. Cohen, Y.-S. Lee // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 10. – P. 1031–1042. DOI 10.1016/J.PROMFG.2017.07.094.
64. Martinez, G.S. Automatic generation of a simulation-based Digital Twin of an industrial process plant / G.S. Martinez, S. Sierla, T. Karhela, V. Vyatkin // IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, USA. – IEEE, 2018. – P. 3084–3089. DOI 10.1109/IECON.2018.8591464.
65. Lattanzi, L. Digital Twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation / L. Lattanzi, R. Raffaeli, M. Peruzzini, M. Pellicciari // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2021. – Vol. 34, № 6. – P. 567–597. DOI 10.1080/0951192X.2021.1911003.
66. Value creation with plant modelling and simulation. AFRY and Siemens showcase real Digital Twins // afry.com: сайт. – 2020. – URL: https://afry.com/sites/default/files/2020-11/siemens_afry_-_value_creation_with_plant_modelling_and_simulation.pdf (дата обращения: 24.08.2024).

67. Oztemel, E. Literature review of Industry 4.0 and related technologies / E. Oztemel, S. Gursev // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2020. – Vol. 31. – P. 127–182. DOI 10.1007/s10845-018-1433-8.
68. Цифровые двойники в промышленности: истоки, концепции, современный уровень развития и примеры внедрения // *Моделирование и цифровые двойники: сайт*. – 2023. – URL: <https://digitaltwin.ru/articles/digital-twins-in-industry/> (дата обращения: 19.03.2024).
69. Kunath, M. Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process / M. Kunath, H. Winkler // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 72. – P. 225–231. DOI 10.1016/j.procir.2018.03.192.
70. Park, Ch.Y. Prediction for manufacturing factors in a steel plate rolling smart factory using data clustering-based machine learning / Ch.Y. Park, J.W. Kim, B. Kim, J. Lee // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 60890–60905. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2983188.
71. Qu, Y.J. Smart manufacturing systems: state of the art and future trends / Y.J. Qu, X.G. Ming, Z.W. Liu // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 103. – P. 3751–3768. DOI 10.1007/s00170-019-03754-7.
72. Zhang, F. Research and application of computer control system for aluminium single-stand 4-high cold rolling mill / F. Zhang, X. Wang, S. Zong, X. Xiang // *Journal of Engineering*. – 2016. – Vol. 2016, № 11. – P. 415–422. DOI 10.1049/joe.2016.0182.
73. Digital Twins and virtual commissioning in the manufacturing industry (updated for 2023) // *visualcomponents.com: сайт*. – 2022. – URL: <https://www.visualcomponents.com/blog/digital-twins-and-virtual-commissioning-in-industry-4-0/> (дата обращения: 10.09.2024).
74. MathWorks Simulink real-time simulation and testing // *windows-soft.ru: сайт*. – URL: <https://www.windows-soft.ru/catalog/product/kupit-mathworks-simulink-real-time-simulation-and-testing-po-dostupnoy-tsene> (дата обращения: 18.12.2024).

75. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, iss. 11. – P. 1016–1022. DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
76. Zeballos Racz, J.P. Digital models, digital shadows, and Digital Twins help transform and optimize industrial and business operations / J.P. Zeballos Racz // InTech. – 2022. – Vol. 69, iss. 4. – P. 20–22.
77. Brecher, C. Control from the cloud: edge computing, services and digital shadow for automation technologies / C. Brecher, M. Buchsbaum, S. Storms // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Montreal, QC, Canada. – IEEE, 2019. – P. 9327–9333. DOI 10.1109/ICRA.2019.8793488.
78. Grieves, M. Digital model, digital shadow, Digital Twin / M. Grieves // researchgate.net: сайт. – 2023. – URL: https://www.researchgate.net/publication/369830792_Digital_Model_Digital_Shadow_Digital_Twin (дата обращения: 06.12.2023).
79. Прохоров, А.Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А.Н. Прохоров, М.Н. Лысачев, А.И. Боровков (науч. ред.). – Москва: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
80. Patent US10416614B2 United States. Human programming interfaces for machine-human interfaces : publ: 2019-09-17 / L. Wang, A.M. Canedo. – URL: <https://patents.google.com/patent/US10416614B2/en> (дата обращения: 12.08.2023).
81. The comprehensive digital twin for intralogistics // Siemens.com: сайт. – 2020. – URL: <https://press.siemens.com/global/en/feature/intralogistics> (дата обращения: 11.05.2023).
82. ABB ability advanced process control // connect-wit.ru: сайт. – 2020. – URL: <https://www.connect-wit.ru/abb-ability-advanced-process-control.html> (дата обращения: 11.05.2023).
83. Digital commissioning of automation systems with X-Pact Plug & work integration test // sms-group.com: сайт. – URL: <https://www.sms-group.com/insights/all-insights/digital-commissioning-of-automation-systems-with-x-pactr-plug-work-integration-test> (дата обращения: 18.02.2024).

84. Digital Twins with MATLAB and Simulink // mathworks.com: сайт. – URL: <https://nl.mathworks.com/discovery/digital-twin.html#digital-twins-with-matlab-and-simulink> (дата обращения: 18.12.2023).
85. Lerche, J. Virtual Commissioning with Simulink. Desktop Real-Time Run Simulink models in real time on your computer / J. Lerche // mathworks.com: сайт. – URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink-desktop-real-time.html> (дата обращения: 18.12.2023).
86. Desktop Real-Time Run Simulink models in real time on your computer // mathworks.com: сайт. – URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink-desktop-real-time.html> (дата обращения: 18.02.2024).
87. Simscape // exponenta.ru: сайт. – URL: <https://exponenta.ru/simscape> (дата обращения: 18.02.2024).
88. Soltani, A. A Hardware-in-the-loop facility for integrated vehicle dynamics control system design and validation / A. Soltani, F. Assadian // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, iss. 21. – P. 32–38. DOI 10.1016/j.ifacol.2016.10.507.
89. Menghal, P.M. Real time control of electrical machine drives: a review / P. M. Menghal, A. J. Laxmi // 2010 International Conference on Power, Control and Embedded Systems, Allahabad, India. – IEEE, 2010. – P. 1–6. DOI 10.1109/ICPCES.2010.5698697.
90. Mihalič, F. Hardware-in-the-loop simulations: a historical overview of engineering challenges / F. Mihalič, M. Truntič, A. Hren // Electronics. – 2022. – Vol. 11. – Article number 2462. DOI 10.3390/electronics11152462.
91. Model, design and implementation of a low-cost HIL for power converter and microgrid emulation using DSP / R.F. Bastos, G.H. Fuzato, C.R. Aguiar, R.V.A. Neves, R.Q. Machado // IET Power Electronics. – 2019. – Vol. 12, iss. 14. – P. 3833–3841. DOI 10.1049/iet-pel.2019.0302.
92. Mojlish, S. Review of hardware platforms for real-time simulation of electric machines / S. Mojlish, N. Erdogan, D. Levine, A. Davoudi // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2017. – Vol. 3, № 1. – P. 130–146. DOI 10.1109/tte.2017.2656141.
93. Bouscayrol, A. Different types of hardware-in-the-loop simulation for electric drives / A. Bouscayrol // 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, UK. – IEEE, 2008. – P. 2146–2151. DOI 10.1109/isie.2008.4677304.

94. Baghdadi, M. FPGA-based Hardware-in-the-Loop (HIL) emulation of power electronics circuit using device-level behavioral modeling / M. Baghdadi, E. Elwarraki, I. Ait Ayad // *Designs*. – 2023. – Vol. 7. – Article number 115. DOI 10.3390/designs7050115.
95. Design and implementation of a low-cost real-time control platform for power electronics applications / J. Aravena, D. Carrasco, M. Diaz, M. Uriarte, F. Rojas, R. Cardenas, J.C. Travieso // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – Article number 1527. DOI 10.3390/en13061527.
96. Herrera, L. FPGA-based detailed real-time simulation of power converters and electric machines for EV HIL applications / L. Herrera, C. Li, X. Yao, J. Wang // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 1702–1712. DOI 10.1109/TIA.2014.2350074.
97. Назаров, М.М. Массовая коммуникация в современном мире: методология анализа и практика исследований / М. М. Назаров. – Москва: УРСС Едиториал УРСС, 2002. – 239 с.
98. Морозова, В.И. Методические указания к выполнению лабораторных работ по разработке информационных систем с использованием CASE-средств BPwin и ERwin по дисциплине «Проектирование информационных систем» для студентов направления: «Экономика», специальностей: «Прикладная информатика в экономике» и «Психология, социология и государственное муниципальное управление». – Москва, 2010. – 77 с.
99. Проектирование информационных систем: курс лекций. В 2 ч. Ч. 1. Структурный подход / В.В. Анисимов. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. – 112 с.
100. Hoffmann, P. Virtual commissioning of manufacturing systems a review and new approaches for simplification / P. Hoffmann, T.M.A. Maksoud, R. Schumann, G.C. Premier // *24th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2010)*, Kuala Lumpur, Malaysia. – 2010. – P. 175–181. DOI 10.7148/2010-0175-0181.
101. Cimino, C. Review of Digital Twin applications in manufacturing / C. Cimino, E. Negri, L. Fumagalli // *Computers in Industry*. – 2019. – Vol. 113. – Article number 103130. DOI 10.1016/j.compind.2019.103130.

102. Noga, M. Hybrid virtual commissioning of a robotic manipulator with machine vision using a single controller / M. Noga, M. Juhás, M. Gulán // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – Article number 1621. DOI 10.3390/s22041621.
103. Segovia, M. Design, Modeling and implementation of Digital Twins / M. Segovia, J. Garcia-Alfaro // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – Article number 5396. DOI 10.3390/s22145396.
104. Digital Twin technology challenges and applications: a comprehensive review / D.M. Botín-Sanabria, A.-S. Mihaita, R.E. Peimbert-García, M.A. Ramírez-Moreno, R.A. Ramírez-Mendoza, J.d.J. Lozoya-Santos // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14, iss. 6. – Article number 1335. DOI 10.3390/rs14061335.
105. Ding, B. Reducing commissioning time by 40% with a Digital Twin. Featured viewpoints / B. Ding, C. Flanagan, M. A. Gamboa // *kalypso.com*: сайт. – URL: <https://kalypso.com/viewpoints/entry/reducing-commissioning-time-by-40-with-a-digital-twin> (дата обращения: 06.10.2024).
106. Virtual engineering and commissioning to support the lifecycle of a manufacturing assembly system / S. Konstantinov, F. Assad, B. Ahmad, D.A. Vera, R. Harrison // *Machines*. – 2022. – Vol. 10. – Article number 939. DOI 10.3390/machines10100939.
107. Melesse, T.Y. Digital Twin models in industrial operations: state-of-the-art and future research directions / T.Y. Melesse, V. Di Pasquale, S. Riemma // *IET Collab. Intell. Manuf.*. – 2021. – Vol. 3, iss. 1. – P. 37–47. DOI 10.1049/cim2.12010.
108. Dumitraşcu, A. Virtual commissioning as a final step in digital validation of the robotic manufacturing systems / A. Dumitraşcu, L. Nae, N. Predinca // *Proceedings in Manufacturing Systems*. – 2014. – Vol. 9(4). – P. 215–220.
109. Engineering method and tool for the complete virtual commissioning of robotic cells / R. Raffaeli, P. Bilancia, F. Neri, M. Peruzzini, M. Pellicciari // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – Article number 3164. DOI 10.3390/app12063164.
110. Integrated virtual preparation and commissioning: supporting formal methods during automation systems development / M. Dahl, K. Bengtsson, P. Bergagård, M. Fabian, P. Falkman // *IFAC-PapersOnLine*. – Vol. 49, iss. 12. – P. 1939–1944. DOI 10.1016/j.ifacol.2016.07.914.

111. Бычков, М.Г. Реализация коррекции управляющих воздействий многокоординатного сервопривода на базе программируемого логического контроллера / М.Г. Бычков, В.Н. Кузнецова // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – № 1(22). – С. 7–13.
112. Ишматов, З.Ш. Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами, полиномиальные методы: монография / З.Ш. Ишматов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 278 с.
113. Лебедев, С.К. Электромехатронные системы позиционирования с наблюдателями нагрузки: монография. / С.К. Лебедев, А.Р. Колганов, Н.Е. Гнездов. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2016. – 340 с.
114. Vukosavić, S.N. Digital control of electrical drives / S.N. Vukosavić. – NY: Springer New York, 2007. DOI 10.1007/978-0-387-48598-0.
115. Nevaranta, N. Review on oversampling approaches for control and estimation in electrical drives / N. Nevaranta // 2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Palma de Mallorca, Spain. – IEEE, 2021. – P. 1–8. DOI 10.1109/INDIN45523.2021.9557456.
116. Производство плоского проката: мировые тенденции и стратегия развития (UGMK.INFO (Украина)) // advis.ru: сайт. – 21 сентября 2009. – URL: https://advis.ru/php/print_news.php?id=4DD6A773-FBF8-A643-B5B5-F418ECFD01A0 (дата обращения: 09.02.2023).
117. Ковалева, А.А. Специальные стали и сплавы: учеб. пособие / А.А. Ковалева, В.С. Лопатина, В.И. Аникина, Т.Р. Гильманшина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – 232 с.
118. Диомидов, Б.Б. Технология прокатного производства / Б.Б. Диомидов, Н.В. Литовченко. – М.: Металлургия, 1979. – 485 с.
119. Гасияров, В.Р. Совершенствование электротехнических систем реверсивной клетки толстолиствого прокатного стана: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: дис. ... докт. техн. наук: / Гасияров Вадим Рашитович. – Челябинск: ЮУрГУ, 2021. – 358 с.
120. Gasiyarov, V.R. Improving the load balancing system of the rolling mill stand drives / V.R. Gasiyarov, B.M. Loginov, M. A. Zinchenko, A.Yu. Semitko // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian

Federation. – IEEE, 2021. – P. 1067–1073. DOI 10.1109/RusAuto-Con52004.2021.9537462.

121. Controlling the electric drives of the reversing rolling stand rolls of a rolling mill to form a curvature at the workpiece front end / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // 2019 IEEE 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Toulouse, France. – IEEE, 2019. – P. 1–7. DOI 10.1109/PEDS44367.2019.8998801.

122. Improving efficiency of rolling mill stand electric drives through load alignment / S.S. Voronin, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, R.A. Lisovsky, B.M. Loginov, M.A. Zinchenko, V.R. Khramshin, I.N. Erdakov // *Energies*. – 2025. – Vol. 18. – Article number 3175. DOI 10.3390/en18123175.

123. Wang, Y. Research on numerical simulation and process parameters of three-roll bending based on thickness characteristics of extra-thick plate / Y. Wang, L. Zhao, X. Cui, X. Zhu // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 11(4). DOI 10.1177/1687814019847861.

124. Technological causes of vertical workpiece asymmetry in plate rolling mills / A.S. Karandaev, M.A. Zinchenko, A.Y. Semitko, S.A. Evdokimov, O.I. Petukhova // *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, eds. – Springer, Cham, 2023. – P. 759–768. DOI 10.1007/978-3-031-14125-6_74.

125. Loginov, B.M. Rolling level impact on roll bending at stand output / B.M. Loginov, V.R. Khramshin, M.A. Zinchenko, A.A. Radionov // 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russian Federation. – IEEE, 2023. – P. 171–176. DOI 10.1109/PEAMI58441.2023.10299904.

126. Логинов, Б.М. Нечеткий регулятор деления нагрузок электроприводов прокатной клетки / Б.М. Логинов // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2025. – №3(68). – С. 4–14. DOI 10.18503/2311-8318-2025-3(68)-4-14.

127. A review on multimotor synchronous control methods / F. Niu, K. Sun, S. Huang, Y. Hu, D. Liang, Y. Fang // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2023. – Vol. 9, no. 1. – P. 22–33. DOI 10.1109/TTE.2022.3168647.

128. Motor temperature observer for four-mass thermal model based rolling mills / B.M. Loginov, S.S. Voronin, R.A. Lisovskiy, V.R. Khramshin, L.V. Radionova // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25. – Article number 4458. DOI 10.3390/s25144458.

129. Воронин, С.С. Совершенствование электротехнических систем клетки толстолистого прокатного стана в режиме регулируемого изменения формы раската: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: дис. ... канд. техн. наук / Воронин Станислав Сергеевич. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», 2021. – 150 с.

130. Шиляев, П.В. Автоматизация процесса прокатки толстого листа на стане 5000 / П.В. Шиляев, Д.Ю. Усатый, А.А. Радионов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 15–18.

131. Karandaev, A.S. Setting automated roll axial shifting control system of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1753–1750. DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.709.

132. Improvement of work roll bending control system installed at plate mill stand / V.R. Gasyarov, A.A. Radionov, B.M. Loginov, S.S. Voronin, V.R. Khramshin // 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (IC-CAE 2017), Sydney, Australia. – IEEE, 2017. – P. 269–273. DOI 10.1145/3057039.3057105.

133. Karandaev, A.S. Force limiting at roll axial shifting of plate mill / 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.

134. Радионов, А.А. Совершенствование автоматизированных систем регулирования профиля проката на станах горячей прокатки / А.А. Радионов, О.А. Гасиярова, С.С. Воронин, Б.М. Логинов // *Труды VII всероссийской научно-технической конференции “Пром-Инжиниринг”*. – Челябинск, 2021. – С. 282–290.

135. System of automated control of hydraulic screw-down mechanisms of plate mill stand / A.G. Shubin, B.M. Loginov, V.R. Khramshin, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, Russia. – IEEE, 2015. – P. 1–6. DOI 10.1109/MEACS.2015.7414858.

136. Control methods and systems providing reduced consumption index at rolled product manufacture at plate mill / V.R. Khramshin, E.A. Khramshina, A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov, S.S. Voronin // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia. – IEEE, 2017. – P. 1540–1544. DOI 10.1109/EIConRus.2017.7910865.

137. Гуркалов, П.И. Перспективы внедрения технологического режима профилированной прокатки слябов на стане 2800 ОАО “НОСТА” (ОХМК) / П.И. Гуркалов, Е.К. Шафигин, С.Н. Басков // Сталь. – 1999. – № 4. – С. 17–22.

138. Тосаки, С. Прогресс в области регулирования формы в плане при прокатке толстых листов / С. Тосаки // Нихон киндзоку гаккай кайхо. – 1980. – № 2. – С. 79–84 (пер. с япон.).

139. Коновалов, Ю.В. Разработка и опробование нового способа улучшения формы раскатов в плане на листовых станах / Ю.В. Коновалов, Ю.В. Фурман, Н.Н. Шкурко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1985. – №4. – С. 23–24.

140. Kazuya, T. Development of the new plan view pattern control system in plate rolling / T. Kazuya, K. Hiroyuki, B. Kazushi, I. Shigeru // Int. Conf. Steel Roll. – 1980. – P. 193–204.

141. Hashimoto, T. Прокатка листа с формированием промежуточного профиля “собачья кость” / T. Hashimoto // Adv. Mater. and Process. – 1989. – № 2. – P. 386.

142. Коновалов, Ю.В. Алгоритм расчета параметров прокатки с профилированием широких граней раскатов горизонтальными валками / Ю.В. Коновалов, Ю.В. Фурман, Н.Н. Шкурко и др. // Теория и технология производства толстого листа: Темат. отрасл. сб. – Москва: Металлургия, 1986. – С. 10–13.

143. Руденко, Е.А. Эффективность нового металлосберегающего способа прокатки толстых листов / Е.А. Руденко, Л.А. Курдюкова, А.Е. Голованова // Обработка материалов давлением [Электронный ресурс]: сб. науч. тр. Донбас. гос. машиностр. акад.; редкол.: И.С. Алиев (пред.) и др. – Краматорск: ДГМА, 2012. – №2(31). – С. 201–205.

144. Басков, С.Н. Разработка и исследование автоматизированных электроприводов черновой клетки толстолистового стана в режимах регулируемого формоизменения прокатываемого металла: специальность 05.09.03

«Электротехнические комплексы и системы»: дис. ... канд. техн. наук / Басков Сергей Николаевич. – Москва: МЭИ, 1999. – 162 с.

145. Гасияров, В.Р. Повышение точности регулирования толщины раската в режиме профилированной прокатки средствами электро- и гидропривода / В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, С.С. Воронин // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 2(43). – С. 43–53. DOI 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-43-53.

146. Совершенствование алгоритмов регулирования толщины и профиля зазора валков реверсивной клетки толстолистого прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, С.С. Воронин, Б.М. Логинов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 53–64. DOI 10.17213/0136-3360-2019-4-53-64.

147. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолистого прокатного стана / С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 55–64.

148. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана / 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. – Т. 16, № 1. – С. 47–55.

149. Study of automated no-pull control system in the continuous mill train / V.R. Khrumshin, A.G. Shubin, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, S.S. Voronin // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia. – IEEE, 2018. – P. 672–677. DOI 10.1109/EIConRus.2018.8317184.

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

151. Шубин, А.Г. Совершенствование системы согласования скоростей электроприводов непрерывной черновой группы клеток широкополосного прокатного стана: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и

системы»: дис. ... канд. техн. наук / Шубин Андрей Григорьевич. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2018. – 168 с.

152. Храмшин, В.Р. Способ автоматического регулирования скоростей электроприводов стана горячей прокатки при захвате полосы валками / В.Р. Храмшин, А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, С.Н. Басков // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2017. – №4(44). – С. 272–280.

153. Шубин, А.Г. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1(38). – С. 14–25. DOI 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25.

154. Karandaev, A.S. Improvement of algorithms for automatic gauge control system of the hot-rolling mill / A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin, 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.

155. Логинов, Б.М. Ограничение динамических нагрузок электроприводов горизонтальной клетки толстолистного прокатного стана: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: дис. ... канд. техн. наук / Логинов Борис Михайлович. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», 2019. – 164 с.

156. 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 ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 137–147. DOI 10.14529/power200314.

157. Hori, Yo. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system / Yo. Hori, H. Sawada, Y. Chun // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 46, iss. 1. – 1999. – P. 162–168. DOI 10.1109/41.744407.

158. Bouheraoua, M. Influence of control structures and load parameters on performance of a pseudo direct drive / M. Bouheraoua, J. Wang, K. Atallah // Machines. – 2014. – № 2. – P. 158–175. DOI 10.3390/machines2030158.

159. Zhou, W. An active disturbance rejection approach to tension and velocity regulations in web processing lines / W. Zhou, Zh. Gao // 16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control, Singapore. – IEEE, 2007. – P. 842–848. DOI 10.1109/CCA.2007.4389338.
160. Kuhm, D. New design of robust industrial accumulators for elastic webs / D. Kuhm, D. Knittel // IFAC Proceedings Volumes. – 2011. – Vol. 44, iss. 1. – P. 8645–8650. DOI 10.3182/20110828-6-IT-1002.02458.
161. Гасиярова, О.А. Повышение ресурса электроприводов клетки толстолистового прокатного стана за счет ограничения динамических нагрузок: специальность 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»: дис. ... канд. техн. наук / Гасиярова Ольга Андреевна. – Москва: ФГАОУ ВО «МПУ», 2025. – 170 с.
162. Telemetry system to monitor elastic torque on rolling stand spindles / S.S. Voronin, B.M. Loginov, O.A. Gasiyarova, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // J. Manuf. Mater. Process. – 2024. – Vol. 8. – Article number 85. DOI 10.3390/jmmp8030085.
163. Implementation of telemetric on-line monitoring system of elastic torque of rolling mill line of shafting / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, M.M. Tverskoi, V.R. Khramshin, B.M. Loginov // 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Chelyabinsk, Russia. – IEEE, 2017. – P. 450–455. DOI 10.1109/URALCON.2017.8120750.
164. Обоснование разработки телеметрической системы мониторинга упругого момента главной линии клетки прокатного стана / В.Р. Храмшин, С.А. Евдокимов, О.А. Гасиярова, А.С. Карандаев, Б.М. Логинов // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 3(56). – С. 70–79. DOI 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-70-79.
165. Абдуллин, А.А. Система регулирования скорости двухмассового механизма с использованием наблюдателя / А.А. Абдуллин, В.А. Толмачев // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 5. – С. 66–71.
166. Krot, P. Model based monitoring of dynamic loads and remaining useful life prediction in rolling mills and heavy machinery / P. Krot, I. Prykhodko, V. Raznosilin, R. Zimroz // Advances in Asset Management and Condition Monitoring.

Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 166. A. Ball, L. Gelman, B. Rao, eds. – Springer, Cham, 2020. – P. 399–416. DOI 10.1007/978-3-030-57745-2_34.

167. Radionov, A.A. Limitation of dynamic loads of the mechatronic system of the rolling stand / A.A. Radionov, B.M. Loginov, K.E. Odintsov, O.A. Gasiyarova // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. – IEEE, 2022. – P. 1157–1162. DOI 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787233.

168. Development of an automatic elastic torque control system based on a two-mass electric drive coordinate observer / A. A. Radionov, A. S. Karandaev, V. R. Gasiyarov, B. M. Loginov, E. A. Gartlib // Machines. – 2021. – № 9. – Article number 305. – DOI 10.3390/machines9120305.

169. Setiawan, R. Failure analysis of ICDP work roll of hot strip mill: Case study of shell-core interface spalling / R. Setiawan, E. Siradj, F. Iman // Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan. – 2022. – № 5(1). – P. 28–34. – DOI 10.24036/jptk.v5i1.27023.

170. Report on torque measurements and process - ACIDA. Musterbericht - ACIDA torque measurement services by ACIDA GmbH report on torque measurements and process analyses at the heavy // ACIDA GmbH: сайт. – 2004. – URL: <https://vdocuments.site/report-on-torque-measurements-and-process-acidamusterbericht-acida-torque.html?page=1> (дата обращения: 06 февраля 2022).

171. Development and practical implementation of digital observer for elastic torque of rolling mill electromechanical system / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, B.M. Loginov, A.S. Karandaev, O.A. Gasiyarova, V.R. Khramshin // J. Manuf. Mater. Process. – 2023. – Vol. 7. – Article number 41. DOI 10.3390/jmmp7010041.

172. Loginov, B.M. Development of digital pressure observer in hydraulic cylinders for vertical balancing of rolling stand spindles / B.M. Loginov, O.A. Gasiyarova, V.R. Khramshin, S.S. Voronin // 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russian Federation. – IEEE, 2023. – P. 177–182. DOI 10.1109/PEAMI58441.2023.10299916.

173. Domazet, Ž. Failure analysis of rolling mill stand coupling / Ž. Domazet, F. Lukša, M. Šušnjar // Engineering Failure Analysis. – 2014. – Vol. 46. – P. 208–218. DOI 10.1016/j.engfailanal.2014.09.

174. Kubo, T. Failure analysis and countermeasure of a cracked spindle gear used in the main reducer of a hot strip mill / T. Kubo, K. Uesugi // *Iron & Steel Technology*. – 2018. – Vol. 15, iss. 11. – P. 50–55.

175. Palit, P. Analysis of a progressive failure of a work roll in hot strip mill / P. Palit, S. N. Patel, J. Mathur, S. Shenoy // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2019. – Vol. 19, iss. 5. – P. 1297–1303. DOI 10.1007/s11668-019-00688-w.

176. Failure analysis of work rolls of a thin hot strip mill / P. Palit, H.R. Jugade, A.K. Jha, S. Das, G. Mukhopadhyay // *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. – 2015. – Vol. 3. – P. 39–45. DOI 10.1016/j.csefa.2015.01.001.

177. Наблюдатель упругого момента двухмассовой электромеханической системы / А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, Е.Г. Бодров, В.Р. Храмшин, М.Н. Самодурова // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 23–33. DOI 10.14529/power220403.

178. Digital observer of elastic torque of rolling stand two-mass system / B.M. Loginov, V.R. Khramshin, O.A. Gasiyarova, A.Y. Semitko, V.R. Gasiyarov // *Lecture Notes in Electrical Engineering: Advances in Automation IV. Proceedings of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon-2022)*, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, eds, Sochi, Russia. – Springer, 2023. – Vol. 986. – P. 239–249. DOI 10.1007/978-3-031-22311-2_24.

179. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.Р. Храмшин // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2014. – № 1. – С. 129–136.

180. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов [и др.] // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2009. – № 1. – С. 5–11.

181. Method for forecasting the remaining useful life of a furnace transformer based on online monitoring data / A.A. Radionov, I.V. Liubimov, I.M. Yachikov, I.R. Abdulveleev, E.A. Khramshina, A.S. Karandaev // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – Article number 4630. DOI 10.3390/en16124630.

182. Metodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems / A.S. Karandaev, V.R. Khramshin, S.A. Evdokimov, Yu.N. Kondrashova, O.I. Karandaeva // 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, Russia. – IEEE, 2014. – P. 1–6. DOI 10.1109/MEACS.2014.6986866.

183. Formulations, solving algorithms, existing problems and future challenges of pre-programmed PWM techniques for high-power AFE converters: a comprehensive review / T. Jing, A. Maklakov, A. Radionov, V. Gasiyarov, Y. Liang // Energies. – 2022. – Vol. 15. – Article number 1696. DOI 10.3390/en15051696.

184. Radionov, A.A. Digital temperature observer for rolling mill motors / A.A. Radionov, B.M. Loginov, A.B. Loginov // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. – IEEE, 2024. – P. 1232–1237. DOI 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553666.

185. Liao, G. Intelligent monitoring and overheating protection system for motor / G. Liao, J. Xi // 2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, Wuhan, China. – IEEE, 2010. – P. 308–311. DOI 10.1109/ccie.2010.85.

186. Тепловые режимы работы электродвигателей и системы охлаждения // inner.su: сайт. – URL: <https://inner.su/articles/teplovye-rezhimy-raboty-elektrodvigatelay-i-sistemy-okhlazhdeniya/> (дата обращения: 17 июня 2025).

187. Justifying and implementing concept of object-oriented observers of thermal state of rolling mill motors / S.S. Voronin, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, I.N. Erdakov, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // Energies. – 2024. – Vol. 17. – Article number 3878. DOI 10.3390/en17163878.

188. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник для вузов / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2005. – 479 с.

189. Beguenane, R. Induction motors thermal monitoring by means of rotor resistance identification / R. Beguenane, M.E.H. Benbouzid // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1999. – Vol. 14, № 3. – P. 566–570. DOI 10.1109/60.790915.

190. ГОСТ 5616-89. Генераторы и генераторы-двигатели электрические гидротурбинные. Общие технические условия // cntd.ru: сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012394> (дата обращения: 12.06.2023).

191. Radionov, A.A. Developing Digital Twin for electromechanical system of rolling stand in Simulink real time / A.A. Radionov, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russia. – IEEE, 2024. – P. 225–230. DOI 10.1109/UralCon62137.2024.10718993.

192. Храмшин, В.Р. Способ управления электроприводами клетки толстолистового стана в режиме асимметричной прокатки головной части раската / В.Р. Храмшин, М.А. Зинченко, Б.М. Логинов, А.С. Карандаев // Электричество. – 2023. – № 4. – С. 61–72. DOI 10.24160/0013-5380-2023-4-61-72.

193. Карандаев, А.С. Регулирование скоростей электроприводов клетки толстолистового прокатного стана в режиме формирования «лыжи» / А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, М.А. Зинченко, В.Р. Храмшин // Известия вузов. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 26–41. DOI 10.17213/0136-3360-2022-3-26-41.

194. Method for defining parameters of electromechanical system model as part of Digital Twin of rolling mill / V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, B.M. Loginov, M.A. Zinchenko, O.A. Gasiyarova, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7, № 5. – Article number 183. DOI 10.3390/jmmp7050183.

195. Экспериментальное определение параметров двухмассовой электромеханической системы прокатного стана / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова, Е.А. Гартлиб, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 3. – С. 24–35. DOI 10.17213/0136-3360-2021-3-24-35.

196. IbaPDA Масштабируемое базовое ПО для сбора измеренных данных // iba-ag.com: сайт. – URL: <https://www.iba-ag.com/ru/ibapda> (дата обращения 07.10.2023).

197. IbaPDA проект для Simatic S7 // wordpress.com: сайт. – URL: <https://simaticby.wordpress.com/2011/08/24/ibapda-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82-%D0%B4%D0%BB%D1%8F-simatic-s7/> (дата обращения 07.10.2023).

198. HESM Torque Control // mathworks.com: сайт. – URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/hesm-torque-control.html> (дата обращения 20.12.2023).

199. SM Current Controller // mathworks.com: сайт. – URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/smccurrentcontroller.html> (дата обращения 20.12.2023).
200. Уайт, Д.С. Электромеханическое преобразование энергии / Д.С. Уайт, Г.Х. Вудсон; Пер. с англ. Н.Ф. Ильинского [и др.]; Под ред. проф. С.В. Страхова. – Москва, Ленинград: Энергия, 1964. – 528 с.
201. Гасияров, В.Р. Разработка цифровых алгоритмов управления приводами мехатронной системы реверсивной клетки толстолиствого прокатного стана / В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, С.С. Воронин, М.А. Зинченко // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 122–139. DOI 10.14529/power210113.
202. Yu, Y. Optimization strategy of rolling mill hydraulic roll gap control system based on improved particle swarm PID algorithm / Y. Yu; R. Zeng; Y. Xue; X. Zhao // Biomimetics. – 2023. – Vol. 8. – Article number 143. DOI 10.3390/biomimetics8020143.
203. Kucsera, P. Hot rolling mill Hydraulic Gap Control (HGC) thickness control improvement / P. Kucsera, Z. Beres // Acta Polytechnica Hungarica. – 2015. – Vol. 12, № 6. – P. 93–106.
204. Zhang, F. Thickness control strategies of plate rolling mill / F. Zhang, Y. Zhang, J. Hou, B. Wang // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2015. – Vol. 11, № 4. – P. 1227–1237.
205. Zhang, F. Automatic gauge control of plate rolling mill / F. Zhang, Y. Zhang, H. Chen // International Journal of Control and Automation. – 2016. – Vol. 9, № 2. – P. 143–156. DOI 10.14257/ijca.2016.9.2.14.
206. Predictive controller for strip-tracking during tail-out of the finishing mill / C.W. Jose Hol, J.D. Roo, L. Kampmeijer, T. Dirkson, G. Schipper, M. La Maire, J. van der Lugt // IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – Vol. 46, iss. 16. – P. 397–402. DOI 10.3182/20130825-4-US-2038.00082.
207. Okada, M. VSS control of strip steering for hot rolling mills / M. Okada, K. Murayama, Y. Anabuki, Y. Hayashi // 16th Triennial World Congress, Prague, Czech Republic. – 2005. – Vol. 38, iss. 1. – P. 19–24. DOI 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01682.

208. Schausberger, F. Feedback control of the contour shape in heavyplate hot rolling / 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.

209. Патент №2449846 C2 Российская Федерация, МПК B21B 37/68 (2006.01). Способ прокатки металлической полосы с регулированием ее бокового положения и соответствующий прокатный стан : № 2009149180/02 : заявл. 27.05.2008 : опубл. 20.07.2011 / М. Кристьян, Б. Реми, Ч. Патрик [и др.]; патентообладатель: Арселормитталь Франс (FR).

210. Патент №2615670 C1 Российская Федерация, МПК B21B 37/40 (2006.01). Способ горячей прокатки полос : №2015142324 : заявл. 05.10.2015 : опубл. 06.04.2017 / Ю.А. Мухин, С.М. Бельский, К.В. Бахаев [и др.]; патентообладатель: ФГБОУ ВПО "Липецкий государственный технический университет".

211. Patent US 4570472 United States, B21B 39/16; B21B 37/00. Method and apparatus for controlling lateral unstable movement and camber of strip being rolled : publ. 18.02.1986 / H. Kuwano. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7f/c4/5e/a40960d170976d/US4570472.pdf> (дата обращения: 04.09.2023).

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

213. Advancement of roll-gap control to curb the camber in heavy-plate rolling mills / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // *Appl. Sci.* – 2021. – Vol. 11. – Article number 8865. DOI 10.3390/app11198865.

214. Identification and optimization for hydraulic roll gap control in strip rolling mill / J. Sun, S.-z. Chen, H.-h. Han, X.-h. Chen, Q.-j. Chen, D.-h. Zhang // *J. Cent. South Univ.* – 2015. – Vol. 22. – P. 2183–2191. DOI 10.1007/s11771-015-2742-0.

215. Логинов, Б.М. Методика создания цифровых двойников электро-механических систем на основе Simulink Real Time и моделирования HIL /

Б.М. Логинов // Электротехнические системы и комплексы. – 2025. – № 2(67). – С. 35–44. DOI 10.18503/2311-8318-2025-2(67)-35-44.

216. Hydraulics example to Simulink and Simscape model // nomagic.com: сайт. – URL: <https://docs.nomagic.com/spaces/SYS-MLP2022xR1/pages/106628684/Hydraulics+example+to+Simulink+and+Simscape+model> (дата обращения: 03.02.2024).

217. Гидравлические системы // exponenta.ru: сайт. – URL: <https://docs.exponenta.ru/physmod/simscape/hydraulic-systems.html> (дата обращения: 19.03.2024).

218. Assessment of signal delay in digital twins for electromechanical and hydraulic systems / S.S. Voronin, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin, P.A. Bovshik, A.S. Karandaev, A.A. Filimonova // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon-2023), Magnitogorsk, Russia. – IEEE, 2023. – P. 796–800. DOI 10.1109/UralCon59258.2023.10291155.

219. Логинов, Б.М. Оценка временных задержек при обмене информацией в структурах цифровых двойников электромеханических и гидравлических систем / Б.М. Логинов // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. – №4(61). – С. 67–75. DOI 10.18503/2311-8318-2023-4(61)-67-75.

220. The experimental/numerical investigation of variations in strip speed, water shower pattern and water temperature on high-temperature strip cooling rate in hot strip mill / J. Karimi Kerdabadi, M. Haghanimanesh, A. Karimipour, D. Toghraie, I. Tlili // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2020. – Vol. 143, № 1. – P. 293–308. DOI 10.1007/s10973-019-09052-4.

221. Razinkov, Ju. Innovations for coiling of modern hot rolled flat materials / Ju. Razinkov, R. Minichmayer, F.X. Schmoller, A. Seilinger // Metallurgical and Mining Industry. – 2011. – Vol. 3, № 7. – P. 32–38.

222. Choi, YJ. A downcoiler simulator for high performance coiling in hot strip mill lines / Y.J. Choi, M.C. Lee // Int. J. Precis. Eng. Manuf. – 2009. – Vol. 10. – P. 53–61. DOI 10.1007/s12541-009-0027-y.

223. Радионов, А.А. Электропривод моталок и разматывателей агрегатов прокатного производства / А.А. Радионов, А.С. Карандаев. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – 134 с.

224. Радионов, А.А. Система управления электроприводом двухкатушечного намоточного аппарата / А.А. Радионов // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 32–37.
225. Зюзев, А.М. Математические модели механической части электроприводов: учебное пособие / А.М. Зюзев; М-во науки и высшего образования РФ. – 2-е изд., испр. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2024. – 156 с.
226. Developing digital observer of angular gaps in rolling stand mechatronic system / O.A. Gasiyarova, A.S. Karandaev, I.N. Erdakov, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // Machines. – 2022. – Vol. 10. – Article number 141. DOI 10.3390/machines10020141.
227. Dynamic torque limitation principle in the main line of a mill stand: explanation and rationale for use / V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin, S.S. Voronin, T.A. Lisovskaya, O.A. Gasiyarova // Machines. – 2019. – Vol. 7(4). – Article number 76. DOI 10.3390/machines7040076.
228. Developing an automated system to control the rolled product section for a wire rod mill with multi-roll passes / A.A. Radionov, O.I. Petukhova, I.N. Erdakov, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // J. Manuf. Mater. Process. – 2022. – Vol. 6. – Article number 88. DOI 10.3390/jmmp6040088.
229. Karandaev, A.S. Development of digital models of interconnected electrical profiles for rolling–drawing wire mills / A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov, A.A. Radionov, B.M. Loginov // Machines. – 2021. – Vol. 9. – Article number 54. DOI 10.3390/machines9030054.
230. Рустамов, К.Ж. Математическое моделирование гидравлического привода дорожно-строительных машин / К.Ж. Рустамов // Механика и технология. – 2024. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-gidravlicheskogo-privoda-dorozhno-stroitelnyh-mashin> (дата обращения: 16.11.2025).
231. Моделирование гидравлической системы // engee.com: сайт. – URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/interactive-scripts/base_simulation/single_hydraulic_cylinder_simulation.html (дата обращения: 23.04.2025).
232. Гидропривод. Основы и компоненты: учебный курс по гидравлике, том 1 / Х. Экснер, Р. Фрейтаг, Р. Гайс [и др]: пер. с нем. Д.В. Горобец. – Изд. 2 на русском языке. – Bosch Rexroth, 2003. – 323 с.

233. Шольц, Д. Пропорциональная гидравлика: основной курс ТР 701: учебник / Д. Шольц. – Киев: Фесто Дидактик, 2002. – 123 с.
234. Chapple, P. Principles of hydraulic systems design / P. Chapple. – 2nd ed. – New York: Momentum Press, LLC, 2015. – 314 p. DOI 10.5643/9781606504536.
235. Björsell, N. Finite horizon degradation control of complex interconnected systems / N. Björsell, A.H. Dadash // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54, iss. 1. – P. 319–324. DOI 10.1016/j.ifacol.2021.08.036.
236. Данилов, Ю.А. Аппаратура объемных гидроприводов. Рабочие процессы и характеристики / Ю.А. Данилов, Ю.Л. Кирилловский, Ю.Г. Колпаков. – Москва: Машиностроение, 1990. – 272 с.
237. Галдин, Н.С. Гидравлические схемы мобильных машин: учеб. пособие / Н.С. Галдин, И.А. Семенова. – Омск: СиБАДИ, 2009. – 203 с.
238. Глубокий, В.И. Типовые схемы гидравлических приводов: учебно-методическое пособие к лабораторным занятиям для студентов технических специальностей высших учебных заведений / В. И. Глубокий, А. М. Якимович, И. В. Макаревич. – Минск: БНТУ, 2015. – 83 с.
239. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.
240. Jelali, M. Hydraulic servo-systems. Advances in Industrial Control / M. Jelali, A. Kroll. – London: Springer, 2002. DOI 10.1007/978-1-4471-0099-7.
241. Park, C.J. Dynamic analysis of hydraulic drive systems in down coiler process of hot rolling mills / C.J. Park // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. – 2019. – Vol. 25, iss. 4. – P. 277–284. DOI 10.5302/J.ICROS.2019.19.0003.
242. Восканьянц, А.А. Автоматизированное управление процессами прокатки: учеб. пособие / А.А. Восканьянц. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 85 с.
243. Construction principle for object-oriented Digital Twins of mechatronic complexes of rolling mills / A.A. Radionov, P.A. Bovshik, B.M. Loginov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // 2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russia. – IEEE, 2023. – P. 516–522. DOI 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110770.

244. Loginov, B.M. Using HIL to repair flying shear of strip cross-cutting unit / B.M. Loginov // 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russia. – IEEE, 2025. – P. 834–839. DOI 10.1109/UralCon67204.2025.11206714.
245. Flying Shear Application // servotronix.com: сайт. – URL: http://softmc.servotronix.com/wiki/Flying_Shear_Application (дата обращения: 27.05.2023).
246. Collins, D. What is a flying shear application in motion control? / D. Collins // motioncontroltips.com: сайт. – 2020. – URL: <https://www.motioncontroltips.com/what-is-flying-shear-application-motion-control/> (дата обращения: 09.11.2024).
247. SINAMICS S120: Cross-cutter application with DCB extension // siemens.com: сайт. – 2023 – URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109477746/sinamics-s120-cross-cutter-application-with-dcb-extension?dti=0&lc=en-WW> (дата обращения: 28.01.2024).
248. Программное обеспечение Astra.IDE // reglab.ru: сайт. – URL: <https://reglab.ru/software/astraide> (дата обращения: 09.11.2024).
249. Петров, И.В. CoDeSys – повседневный инструмент программиста ПЛК / И.В. Петров // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 8. – С. 3–8.
250. PLC-catalog // xinje.ru: сайт. – 2023 – URL: <https://xinje.ru/wp-content/uploads/2023/06/2023-PLC-catalog.pdf> (дата обращения: 09.11.2024).
251. Loginov, B.M. Application of PLC with multi-core processors and codesys environment for virtual adjustment of technical systems / B.M. Loginov // 2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia. – IEEE, 2025. – P. 1141–1146. DOI 10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177350.
252. Voronin, S.S. The simple hydraulic drive model of the typical industrial mechatronic system / S.S. Voronin, E.A. Maklakova, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia. – IEEE, 2016. – P. 1–5. DOI 10.1109/ICIEAM.2016.7910961.
253. Correcting electric motor drive speed of plate mill stand in profiled sheet rolling / V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, A.A. Radionov, V.R. Khramshin, A.S. Maklakov // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives

and Energy Systems (PEDES), Chennai, India. – IEEE, 2018. – P. 1–4. DOI 10.1109/PEDES.2018.8707442.

254. Matrix model of continuous rolling mill as automatic control object / S.S. Voronin, O.A. Kravchenko, O.I. Petukhova, A.S. Karandaev, A.S. Kulmukhametova // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation. – IEEE, 2023. – P. 1127–1132. DOI 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272817.

255. Voronin, S.S. Digital equivalent load monitor for rolling mill motors / S.S. Voronin, B.M. Loginov, M.A. Zinchenko // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russia. – IEEE, 2024. – P. 978–983. DOI 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515325.

256. Adaptive load division controller for electric drives of roll stand / V.R. Gasiyarov, G.P. Kornilov, B.M. Loginov, M.A. Zinchenko, R.R. Khramshin, K.E. Odintsov // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. – IEEE, 2023. – P. 1135–1140. DOI 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139300.

257. Веселов, О.В. Нечеткая логика и нейронные сети в системах управления и диагностике: учеб. пособие / О.В. Веселов; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2023. – 288 с.

258. Perdukova, D. DC motor fuzzy model based optimal controller / D. Perdukova, P. Fedor, M. Lacko // MM Science Journal. – 2021. – Vol. 4. – P. 4879–4885. DOI 10.17973/MMSJ.2021_10_2021033.

259. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолиствого прокатного стана / С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 55–64.

260. Согласование скоростных режимов электроприводов клеток непрерывной группы прокатного стана / 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.

261. Карандаев, А.С. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клеток черновой группы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ЮУрГУ.

Серия «Энергетика». – Вып. 16. – Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 2011. – № 34(251). – С. 35–41.

262. Технологические схемы управления электроприводами чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин, В.В. Головин, П.В. Шиляев // Труды VII конгресса прокатчиков. (Москва 15-18 октября 2007 г.). – Москва, 2007. – Т.1. – С. 71–75.

263. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. – Иваново: ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет», 2012. – С. 652–657.

264. Algorithm of no-pull control in the continuous mill train / V.R. Khramshin, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russia. – IEEE, 2015. – P. 1–5. DOI 10.1109/SIBCON.2015.7147263.

265. Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства: учеб. пособие / А.И. Рудской, В.А. Лунев. – СПб: Наука, 2008. – 527 с.

266. Разработка цифрового наблюдателя упругого момента электромеханической системы клетки прокатного стана / А.А. Радионов, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, Е.А. Гартлиб, О.А. Гасиярова // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 2(51). – С. 19–29. DOI 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29.

267. Constraining the dynamic torque of a rolling mill stand drive / V.R. Khramshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 101–111. DOI 10.14529/power180109.

268. Бовшик, П.А. Совершенствование системы управления электроприводами машины холодной правки листа / П.А. Бовшик, Б.М. Логинов, А.Ю. Семитко, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 22–34.

269. Регулирование координат электромеханической системы прокатного стана на основе наблюдателя упругого момента / А.А. Радионов, В.Р. Гасияров, Е.А. Гартлиб, Б.М. Логинов, К.Э. Одинцов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 115–129.

270. Loginov, B.M. Developing observer of electric drive state for rolling mill stand based on augmented Kalman filter / B.M. Loginov // 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russia. – IEEE, 2025. – P. 840–845. DOI 10.1109/UralCon67204.2025.11206629.

271. Пахомов, А.Н. Наблюдатели состояния асинхронного электропривода на основе фильтра Калмана / А.Н. Пахомов, А.А. Федоренко, К.С. Федий // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2023. – № 16(5). – С. 575–583.

272. Колганов, А.Р. Наблюдатели состояния и нагрузок современных электромеханотронных систем / А.Р. Колганов, С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов // Труды Тульского государственного университета. – Тула, 2010. – Т. 3. – Ч. 2. – С. 18–23.

273. Ji, J.K. Kalman filter and LQ based speed controller for torsional vibration suppression in a 2-mass motor drive system / J.-K. Ji, S.-K. Sul // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1995. – Vol. 42, no. 6. – P. 564–571. DOI 10.1109/41.475496.

274. Szabat, K. Adaptive control of the electrical drives with the elastic coupling using Kalman filter / K. Szabat, T. Orłowska-Kowalska // in Adaptive Control, K. You, eds. – 2009. DOI 10.5772/6507.

275. Jiang, J. Real-time identification of dynamic loads using inverse solution and Kalman filter / J. Jiang, S. Luo, M.S. Mohamed, Z. Liang // Appl. Sci. – 2020. – Vol. 10. – Article number 6767. DOI 10.3390/app10196767.

276. Branlard, E. Augmented Kalman filter with a reduced mechanical model to estimate tower loads on a land-based wind turbine: a step towards digital-twin simulations / E. Branlard, D. Giardina, C. Brown // Wind Energy Science. – 2020. – Vol. 5, iss. 3. – P. 1155–1167. DOI 10.5194/wes-5-1155-2020.

277. Wang, L. The Kalman filter / L. Wang, R.P. Guan // in State Feedback Control and Kalman Filtering with MATLAB/Simulink Tutorials. – IEEE, 2023. – P. 309–375. DOI 10.1002/9781119694625.ch7.

278. Cumbo, R. Kalman-based load identification and full-field estimation analysis on industrial test case / R. Cumbo, T. Tamarozzi, K. Janssens, W. Desmet // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – Vol. 117. – P. 771–785. DOI 10.1016/j.ymssp.2018.08.045.

279. Снижение динамического момента в главной линии прокатной клетки толстолистового стана / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, О.А. Гасиярова, Б.М. Логинов, Д.Ю. Усатый // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 22–32. DOI 10.14529/engin190303.

280. Khramshin, V.R. Development and industrial introduction of systems for monitoring technical state of the rolling mills' electrical equipment / V.R. Khramshin, A.S. Evdokimov, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev // *2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*, St. Petersburg, Russia. – IEEE, 2015. – P. 208–213. DOI 10.1109/EIconRusNW.2015.7102264.

281. A virtual commissioning based methodology to integrate Digital Twins into manufacturing systems / G. Barbieri, A. Bertuzzi, A. Capriotti, et al. // *Prod. Eng. Res. Devel.* – 2021. – Vol. 15. – P. 397–412. DOI 10.1007/s11740-021-01037-3.

282. Rauch, L. Digital Twins as a modern approach to design of industrial processes / L. Rauch, M. Pietrzyk // *Journal of Machine Engineering*. – 2019. – Vol. 19, № 1. – P. 86–97. DOI 10.5604/01.3001.0013.0456.

283. Radionov, A.A. Conceptual directions of creating Digital Twins for electrotechnical systems of rolling mill facilities / A.A. Radionov, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, O.A. Gasiyarova // *Russian Electromechanics*. – 2021. – Vol. 1(64). – P. 54–68. DOI 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68.

284. Validation of moment monitoring results in rolling mill stand spindles / O.A. Gasiyarova, B.M. Loginov, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin // *2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*, Sochi, Russia. – IEEE, 2024. – P. 1011–1015. DOI 10.1109/SmartIndustry-Con61328.2024.10515422.

285. Radionov, A.A. Using Digital Twin to calculate angular play in spindle connections of rolling mill stand / A.A. Radionov, O.A. Gasiyarova, B.M. Loginov // *Lecture Notes in Electrical Engineering. Advances in Automation VI. Proceedings*

of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon), A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, eds, Sochi, Russia. – Springer, 2025. – Vol. 1324. – P. 217–232. DOI 10.1007/978-3-031-82494-4_20.

286. Method limiting dynamic loads of electromechanical systems of plate mill stand / A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov, E.A. Maklakova, B.M. Loginov, E.A. Khramshina // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia. – IEEE, 2018. – P. 651–656. DOI 10.1109/EIConRus.2018.8317180.

287. Limiting dynamic loads in the main line of a rolling mill through an automated drive / V.R. Khramshin, A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov, M.A. Zinchenko, B.M. Loginov // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia. – IEEE, 2020. – P. 1122–1126. DOI 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208087.

288. Production Data Collection (PDA): definition, characteristics, goals // forcem.com: сайт. – 2020. – URL: <https://forcem.com/en/operational-data-acquisition-de-definition-characteristics-goals/#pda> (дата обращения: 12.06.2025).

289. Basics of hardware-in-the-loop simulation // mathworks.com: сайт. – URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html> (дата обращения: 12.06.2025).

290. Thermal Models // mathworks.com: сайт. – URL: https://www.mathworks.com/help/simscape/thermal-models.html?s_tid=CRUX_lftnav (дата обращения: 12.06.2025).

291. Motor Thermal Circuit // mathworks.com: сайт. – URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/motor-thermal-circuit.html> (дата обращения: 12.06.2025).

292. Фираго, Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: Издательство Техноперспектива, 2007. – 586 с.

293. Stator and rotor overheating problems during motor operation // lamnow.com: сайт. – 2024. – URL: <https://lamnow.com/motor-stator-and-rotor-overheating-problems/> (дата обращения: 06.08.2024).

294. Loginov, B.M. Observer of equivalent loads in electrical motors of the stand of plate rolling mills / B.M. Loginov, R.A. Lisovsky, R.R. Khramshin // 2025

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. – IEEE, 2025. – P. 1090–1095. DOI 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028282.

295. Файнберг, Ю.М. Автоматизация непрерывных станов горячей прокатки: монография / Ю.М. Файнберг. – Москва: Metallurgizdat, 1963. – 326 с.

296. Выдрин, В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н. Выдрин. – Свердловск: Metallurgiya, 1960. – 256 с.

297. Диагностика и динамика прокатных станов: монография / В.В. Веренев, В.И. Большаков, А.Ю. Путноки, А.А. Коринь, С.В. Мацко. – Д.: ИМА-пресс, 2007. – 144 с.

298. Кожевников, С.Н. Динамика машин с упругими звеньями / С.Н. Кожевников. – Киев: Изд. АН УССР, 1961. – 312 с.

299. Кожевников, С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С.Н. Кожевников. – Киев: Наук. думка, 1986. – 288 с.

300. Артюх, В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок / В.Г. Артюх. – Мариуполь: Издат. группа «Университет», 2015. – 288 с.

301. Артюх, В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах / В.Г. Артюх. – Мариуполь: ПГТУ, 2008. – 246с.

302. Гостев, А.Н. Ограничение динамических нагрузок электроприводов универсальных клетей непрерывной подгруппы широкополосного стана горячей прокатки: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: дис. ... канд. техн. наук / Гостев Анатолий Николаевич. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015. – 158 с.

303. Active Control of Drive Chain Torsional Vibration for DFIG-Based Wind Turbine / Z. Li, S. Tian, Y. Zhang, H. Li, M. Lu // Energies. – 2019. – Vol. 12. – Article number 1744. DOI 10.3390/en12091744.

304. Логинов, Б.М. Методика расчета ресурса шпинделей клетки прокатного стана на основе on-line измерений упругого момента / Б.М. Логинов, О.И. Гасиярова, А.А. Радионов, К.Э. Одинцов // Электротехнические системы и комплексы. – 2024. – №2(63). – С. 17–26. DOI 10.18503/2311-8318-2024-2(63)-17-26.

305. Torque model in plate rolling process with biting impact considered / Z. Jiao, C. He, L. Wang, Yu. Cai, X. Wang, X. Sun // ISIJ International. – 2021. – Vol. 61, iss. 1. – P. 239–247. DOI 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-230.
306. Куприн, В.И. Основы теории прокатки / В.И. Куприн, М.С. Куприна. – Москва: Металлургия, 1978. – 184 с.
307. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023680208. Программа расчета упругих моментов на шпинделях клетки прокатного стана : №2023669661 : заявл. 27.09.2023 : опубл. 27.09.2023 / В.Р. Храмшин, Б.М. Логинов, Р.Р. Храмшин, М.А. Зинченко.
308. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2022666907. Программа расчета скоростного режима электропривода прокатного стана по условию минимума амплитуды упругого момента в валопроводах : №2022666145 : заявл. 05.09.2022 : опубл. 12.09.2022 / В.Р. Храмшин, Б.М. Логинов, Р.Р. Храмшин, О.А. Гасиярова.
309. Шохин, В.В. Исследование электромеханической системы прокатной клетки / В.В. Шохин, О.В. Пермякова, Е.С. Кисель // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – № 23. – С. 40–43.
310. Reifental, U. Beseitigung der Ebenheitsabweichungen im Walzgut bei Umkerwalymaschinen in Twindrive-Ausführung durch eine Winkelgleichlaufregelung der Antriebsstränge / U. Reifental, H.H. Nguzen, A. Bannack. – Magdeburg, 1996. – 44 с.
311. Артюх, В.Г. Горизонтальные силы при прокатке / В.Г. Артюх, Г.В. Артюх, В.О. Мазур // Мариуполь: Вестник Приазовского Государственного Технического Университета. – 2009. – Вып. 19. – С. 128–132.
312. Храмшин, В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: дис. ... докт. техн. наук / Храмшин Вадим Рифхатович. – Магнитогорск: МГТУ, 2013. – 393 с.
313. Chu, L. Research on cooperative braking control algorithm based on nonlinear model prediction / L. Chu, C. Chang, D. Zhao, Y. Xu // World Electr. Veh. J. – 2021. – Vol. 12. – Article number 173. DOI 10.3390/wevj12040173.
314. Research on braking efficiency of master-slave electro-hydraulic hybrid electric vehicle / J. Wang, T. Zhang, H. Zhang, J. Yang, Z. Zhang, Z. Meng //

Electronics. – 2022. – Vol. 11. – Article number 1918. DOI 10.3390/electronics11121918.

315. Developing new thermal protection method for AC electric motors / I.V. Bochkarev, I.V. Bryakin, V.R. Khramshin, A.R. Sandybaeva, K.V. Litsin // Machines. – 2021. – Vol. 9. – Article number 51. DOI 10.3390/machines9030051.

316. Toliyat, H.A. Handbook of electric motors / H.A. Toliyat, G.B. Kliman. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. – 832 p.

317. Герасимук, А.В. Исследование нагрева мощного высоковольтного синхронного электродвигателя при внезапном отключении системы охлаждения / А.В. Герасимук, М.В. Кипервассер, Е.Н. Топильская // Вестник СибГИУ. – 2016. – № 2(16). – С. 32–34.

318. Loginov, B.M. Digital overheating protection system for rolling mill stand motors / B.M. Loginov // 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. – IEEE, 2025. – P. 1096–1101. DOI 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028518.

319. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Раздел 3. Защита и автоматика: утверждены приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 8 июля 2002 года № 204 // consultant.ru: сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_98464/952c93d3f990be26350f46ab6aeaa4a9ad2036ed/ (дата обращения: 05.06.2024).

320. Логинов, Б.М. Разработка тепловой защиты двигателей прокатного стана / Б.М. Логинов // Электричество. – 2025. – № 10. – С. 64–75. DOI 10.24160/0013-5380-2025-10-64-75.

321. ГОСТ 12.2.007.9.1-95 (МЭК 519-3-88). Безопасность электротермического оборудования. Ч. 3. Частные требования к электротермическим устройствам индукционного и прямого нагрева сопротивлением и индукционным электропечам: национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 12 марта 1996 г. № 164 // cntd.ru: сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200013251> (дата обращения: 05.06.2024).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ
РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ СТАНА 5000**

Таблица П.1.1

Характеристики вертикальной обжимной клетки

Наименование технологического устройства	Наименование технической характеристики	Значение
Вертикальная обжимная клеть	Диаметр роликов: 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	2х1,25 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.1.4

Технические характеристики преобразователя частоты двигателя горизонтальных валков

<u>Выходные данные</u>	
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
<u>Входные данные</u>	
Входное напряжение	3,3 кВ
Частота сети	50/60 Гц $\pm 5\%$
Выпрямитель сетевого тока	AFE (активный выпрямитель)
Входной коэффициент мощности	1
<u>Общие данные</u>	
Охлаждение	Теплообменник сырая вода деионизированная вода
Уровень шума	<75 dB на расстоянии 1м от шкафа
Температура окружающей среды при эксплуатации	5 ⁰ C – 45 ⁰ 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
<u>Характеристики системы регулирования</u>	
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
<u>Опции</u>	
Входной фильтр AFE, выходной du/dt – фильтр при 3,3 кВ, чоппер, обогрев при простое, входной и выходной разъединитель, кинетическая поддержка	

Таблица П.1.9

Технические данные приводного двигателя эджерных валков

Тип	Синхронный двигатель 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 ²
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	U _{вх.ном.} , В	I _{ном.} , А	P _{ном.} , МВт	U _{вых.} , В	Охла- ждение	Примечание
Converteam MV 7308 SA AFE	3300	800	8,4	3300	Водя- ное	Активный выпрями- тель AFE питает сразу два инвертора

Таблица П.1.11

Технические параметры инвертора MV7306

Тип	U _{вх.ном.} , В	I _{ном.} , А	P _{ном.} , МВт	U _{вых.} , В	Охлажде- ние	Примеча- ние
Converteam MV 7306	3300	600	6	3300	Водяное	-

Таблица П.1.12

Технические данные трансформатора DONX 10kV/3,3kV 3600kVA

(Zk = 16,5% Δ/Δ)

S_n, kVA	Номинальное напряжение		Номинальный ток		$u_{k3}, \%$	$\Delta P_{k3}, \text{kW}$	$\Delta P_{xx}, \text{kW}$	Группа со- единения
	$U_{1n}, \text{В}$	$U_{2n}, \text{В}$	$I_{1n}, \text{А}$	$I_{2n}, \text{А}$				
3600	10000	3300	210	635,2	10,3	35	3,6	Δ(0°)/ Δ

Таблица П.1.13

Технические данные трансформатора DTTHG 400/10

S_n, kVA	Номинальное напря- жение		$u_{k3}, \%$	P_0, kW	$\Delta P_{k3}, \text{kW}$	Группа со- единения
	$U_{1n}, \text{В}$	$U_{2n}, \text{В}$				
300	10000	500	7	0,5	1,2	Δ/(Δ6Y5)

П.2.1 Оценка задержек в системе контроллер – симулятор электропривода клетки

Для оценки возможных задержек в ЦД электропривода стана 5000 была выполнена схема, представленная на рис. П.2.1. Фрагмент программы, соответствующей этой схеме, реализованный на языке ПЛК, представлен на рис. П.2.2.

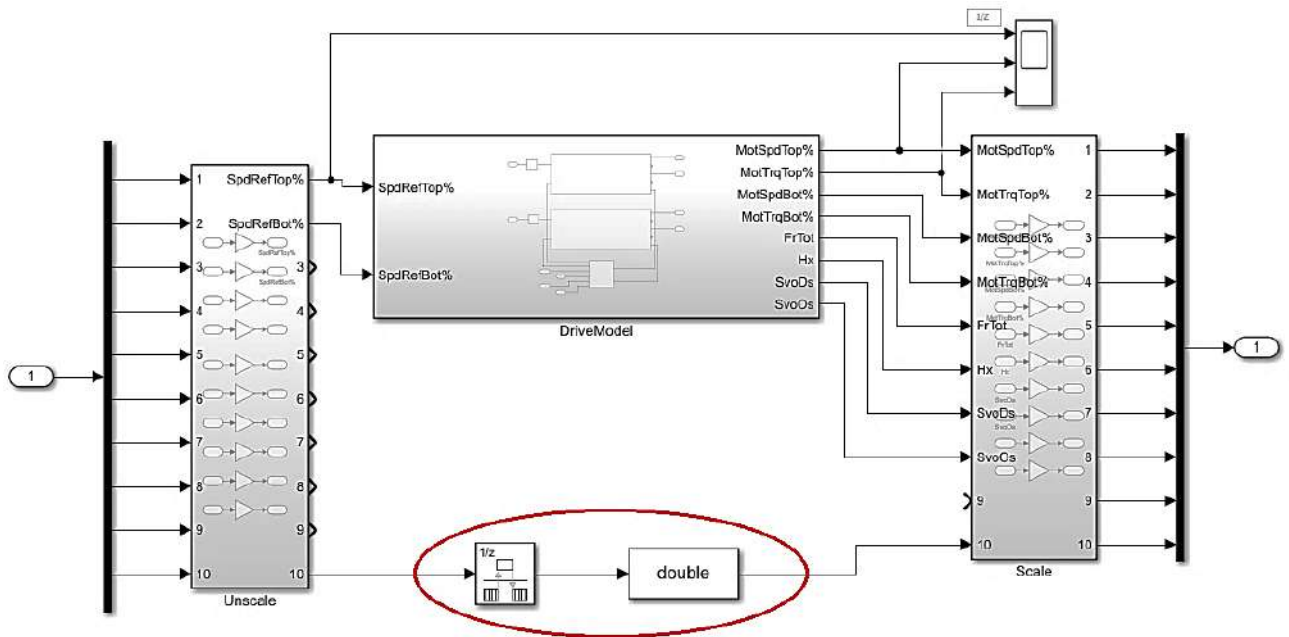


Рис. П.2.1. Тестовая схема электропривода в Simulink (а) и на языке ПЛК (б)

Согласно этим разработкам программа ПЛК генерировала пилообразный сигнал путем увеличения на единицу переменной типа INT за каждый скан программы, который составлял 3 мс. Переменная ПЛК передавалась в симулятор на Simulink Real Time и затем возвращалась обратно в ПЛК. К ПЛК была подключена система регистрации IBA PDA по интерфейсу Codesys – Xplorer с заданным временем опроса 5 мс. Система IBA PDA исполнялась на виртуальной машине, размещенной на том же компьютере, на котором производилась симуляция. Характеристики компьютера Intel(R) Core(TM) i5-9400F CPU 2.90GHz, в режиме работы симулятора 3.9 GHz, память ОЗУ 16,0 ГБ, SSD 256 ГБ, ОС Win-10 64 разр. Контроллер в эксперименте OWEN PLC 210, Процессор ARM® Cortex-A8 с частотой 800 МГц, программируется в среде CodeSys 3.5.17.30.

```

ReqSend:=NOT ReqSend;
ReqRcv:=NOT ReqSend;
UDP_Send(
    xExecute:= ReqSend,
    udiTimeOut:= ,
    xDone=> ,
    xBusy=> ,
    xError=> ,
    hPeer:= UDP_Peer.hPeer,
    ipAddr:= ipAddr,
    uiPort:= uiPort,
    szSize:= SIZEOF(SndData),
    pData:= ADR(SndData),
    eError=> );
UDP_Receive(
    xEnable:= ReqRcv,
    xDone=> ,
    xBusy=> ,
    xError=> ,
    hPeer:= UDP_Peer.hPeer,
    szSize:= SIZEOF(RcvData),
    pData:= ADR(RcvData),
    eError=> ,
    xReady=> ,
    ipFrom=> ,
    uiPortFrom=> ,
    szCount=> );
SndData.Data[10]:= SndData.Data[10] + 1;
IF SndData.Data[10] > 32000 THEN
    SndData.Data[10]:=0;
END_IF

```

Рис. П.2.2. Тестовая программа на языке ПЛК

Отправка данных происходит блоком UDP_Send по переднему фронту сигнала ReqSend, что происходит через цикл программы.

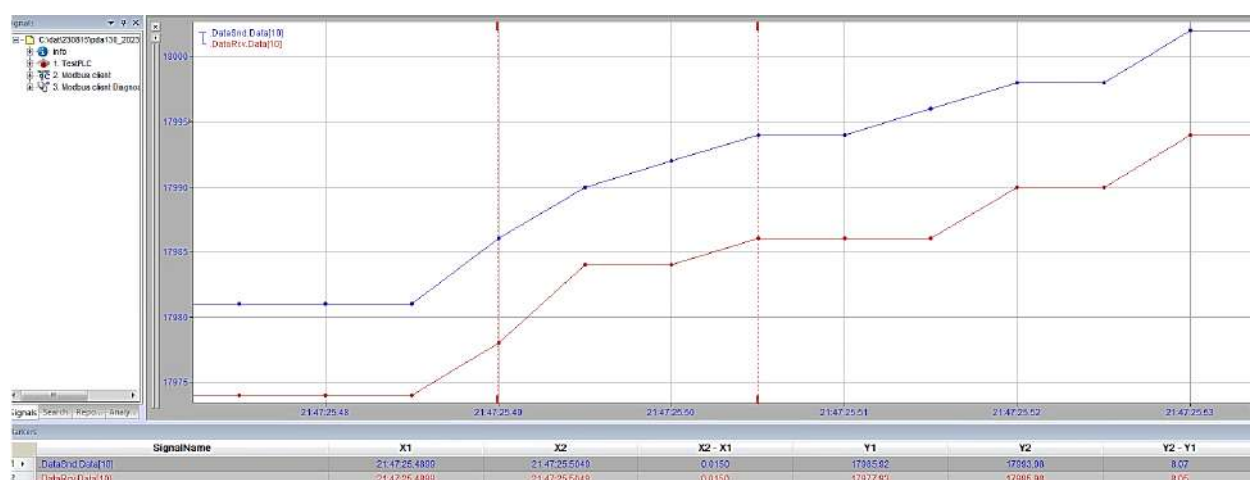
Цикл программы ПЛК установлен в 3 мс, как показано в таблице:

Мониторинг	Использование переменной	Системные события	Свойства			
Задача	Статус	Счётчик МЭК-...	Счётчик ц...	Заданное время цикла	Посл. (µs)	Сред. время цикла (µs)
⌚ MainTask	Valid	2580469	2580469	3 ms	776	696
⌚ OwenClo...	Valid	154828	154828	50 ms	135	250

Это подтверждается графиком на рис. П.2.3, а: пилообразный сигнал изменяется от 0 до 32000, тогда $T_c = \frac{95.78}{32000} = 0.00299$ с. На рис. П.2.3, б показан фрагмент, который обведен кружком, в увеличенном масштабе времени.



а



б

Рис. П. 2.3. Тестовый сигнал задания (а) и увеличенный фрагмент (б)

Время исполнения в данном примере 0.776 мс. Следует считаться, что программа простая, содержит генератор задания скорости для 2х приводов имитируемого стана, систему управления «лыжей», РДН, блоки масштабирования сигнала и блоки обмена данными с моделью по UDP протоколу.

Как показано маркерами, задержка времени прохождения сигнала от контроллера с Simulink и обратно, с учетом возможных задержек в PDA составляет 15 мс. Исходя из этого предложенный способ может быть использован для имитации взаимодействия ПЛК с приводами и гидросистемами механизмов металлургического оборудования.

Экспериментальная оценка влияния натяжений на момент прокатки**Вариант 1.**

Для сглаживания функции было принято решение уйти от линейной функции и выбрать функцию Гаусса.

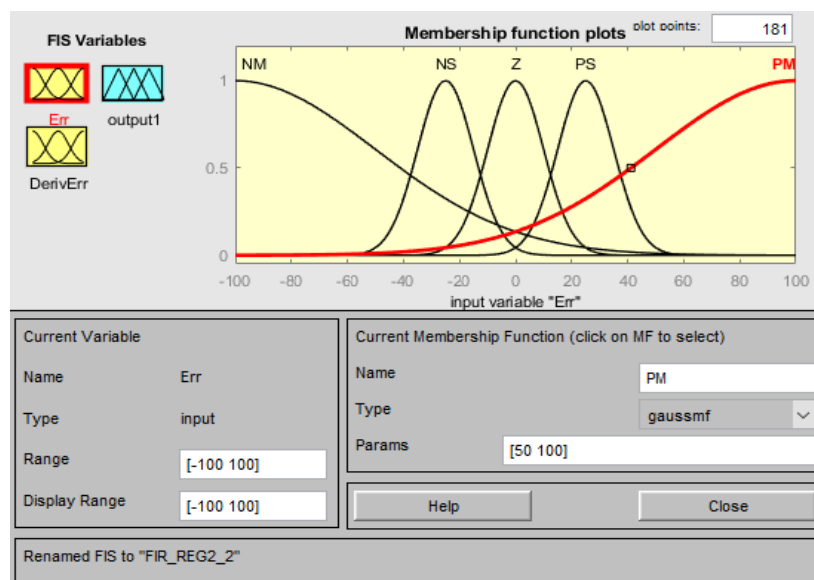


Рисунок П.3.1 – Фазификация разности моментов, функция Гаусса

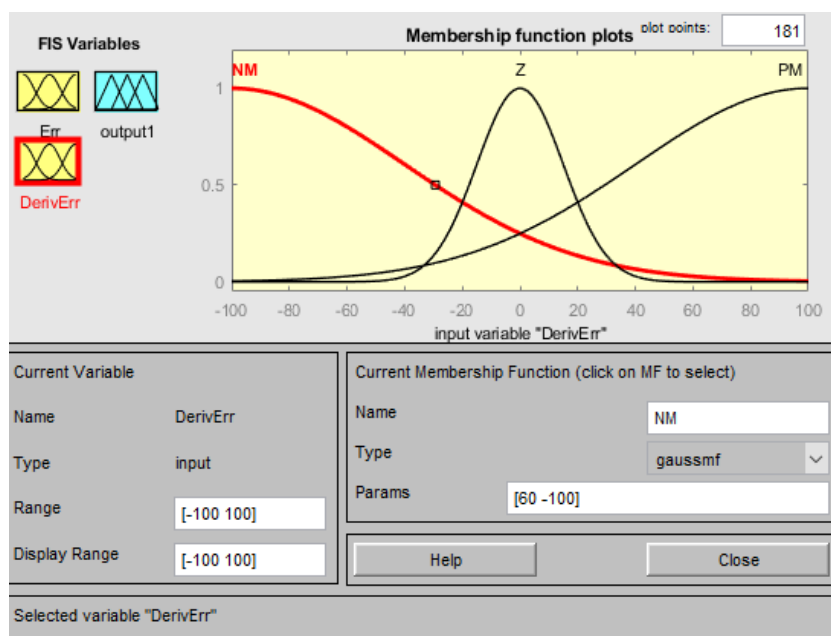


Рисунок П.3.2 – Фазификация производной разности моментов, функция Гаусса

Зависимость выходного сигнала блока нечеткой логики от входных сигналов ошибки и производной ошибки, построенная по этим правилам, представлена на рис. П.3.3 (размерности по осям – проценты). Данная поверхность представляет собой результат работы правил нечеткого вывода для оценки уровня опасности эксплуатации при выбранном методе дефаззификации (алгоритм Мамдани).

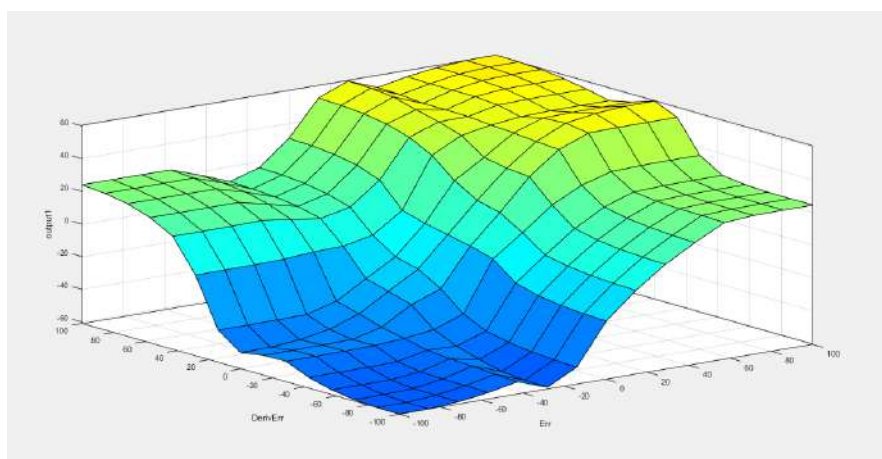


Рисунок П.3.3 – Зависимость выхода блока НЛ (ось Z) от входных сигналов ошибки (Err) и производной ошибки (DerivErr) по варианту 1

В ходе моделирования были получены расчетные осциллограммы переходных процессов, представленные на рисунке П.3.4. Из них следует, что колебания воздействия РНД в динамическом режиме устранены, однако сохранилось затягивание переходного процесса.

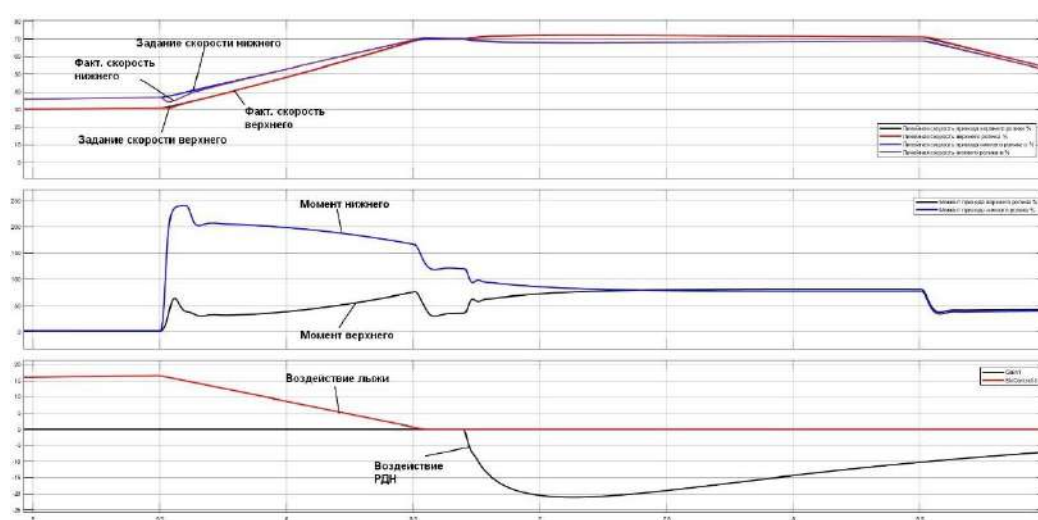


Рисунок П.3.4. Осциллограммы захвата при использовании полного регулятора с НЛ при применении функции Гаусса для выходного и входных воздействий

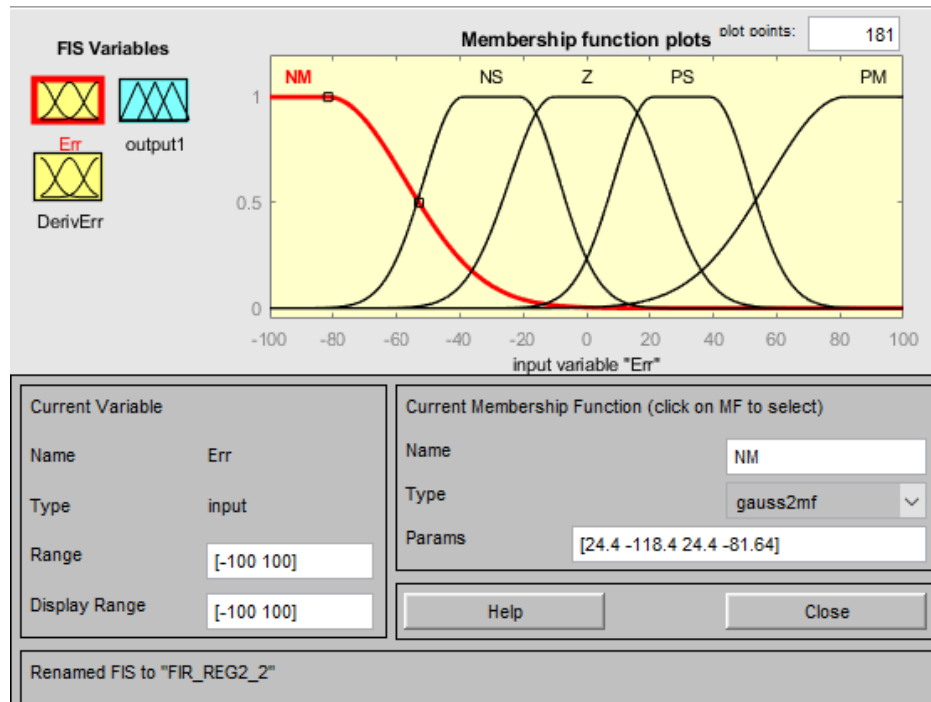
Вариант 2.

Рисунок П.3.5 – Фазификация разности моментов, функция Гаусса второго порядка, вариант 2

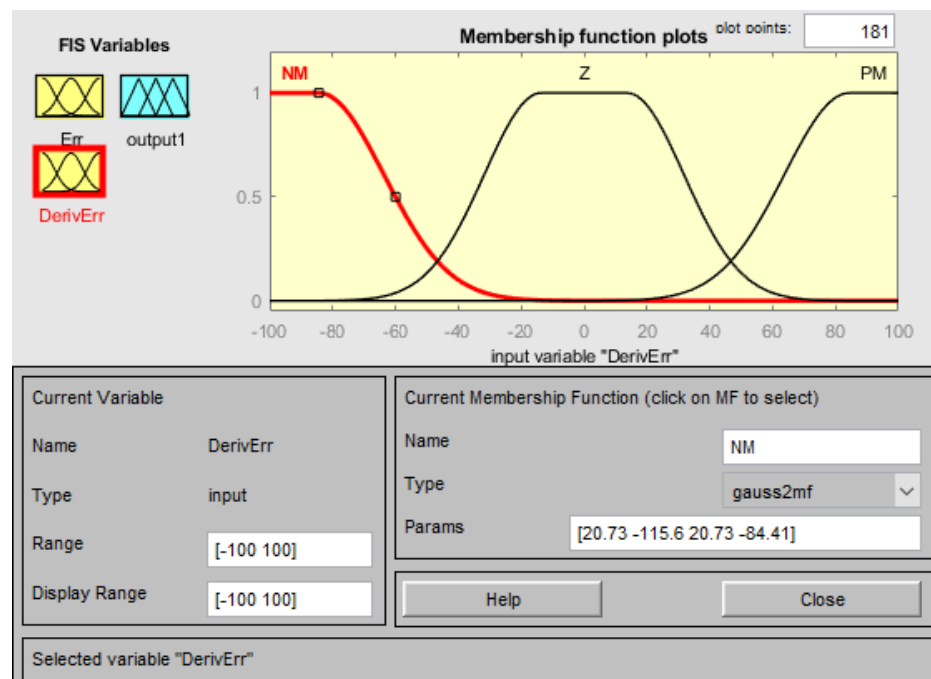


Рисунок П.3.6 – Фазификация производной разности моментов, функция Гаусса второго порядка, вариант 2

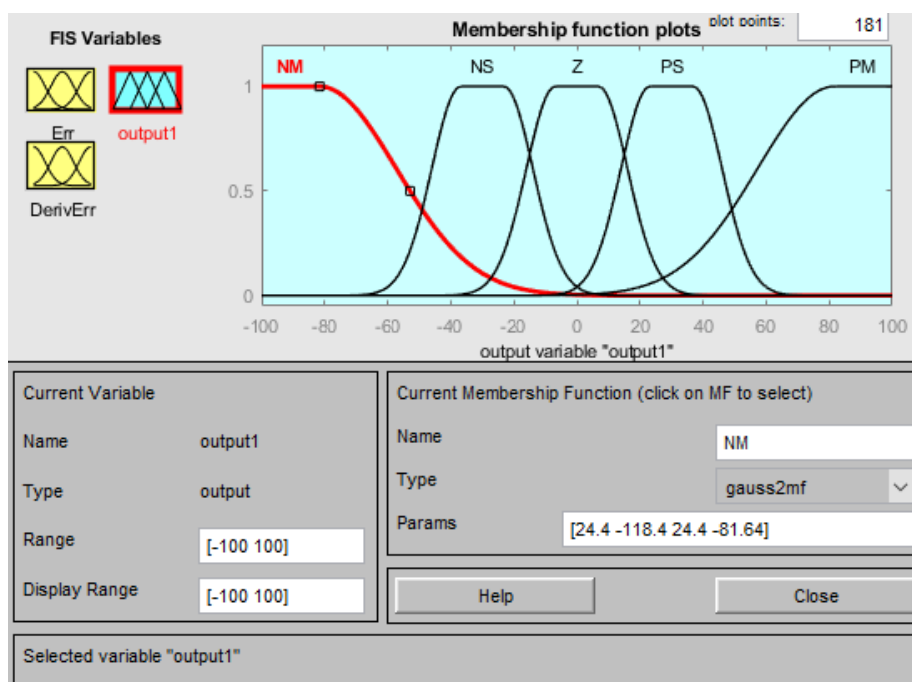


Рисунок П.3.7 – Фазификация выхода регулятора, функция Гаусса второго порядка, вариант 2

Зависимость выхода блока НЛ от входных сигналов, аналогичная рисунку П.3.3, представлена на рис. П.3.8.

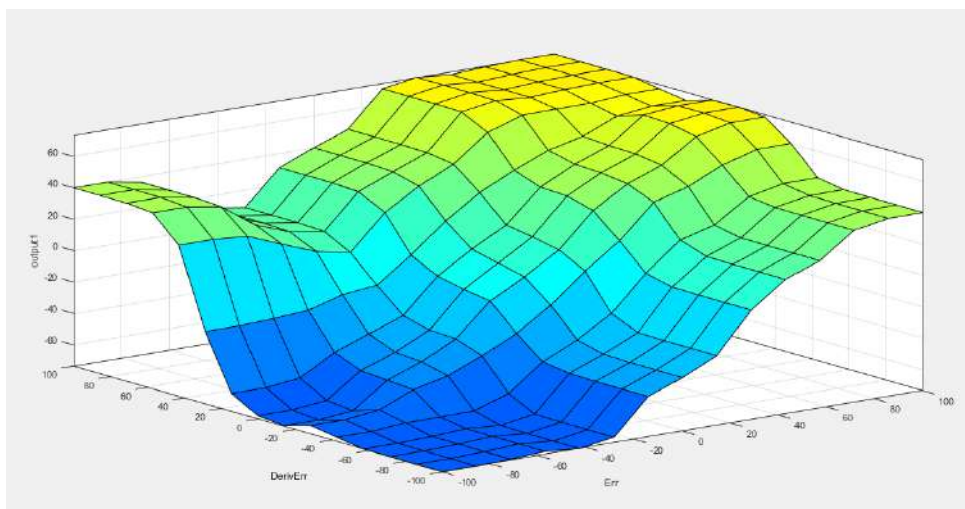


Рисунок П.3.8 – Зависимость выхода блока НЛ (ось Z) от входных сигналов ошибки (Err) и производной ошибки (DerivErr) по варианту 2

В результате вычислительного эксперимента были получены расчетные осциллограммы переходных процессов, представленные на рисунке 3.9.

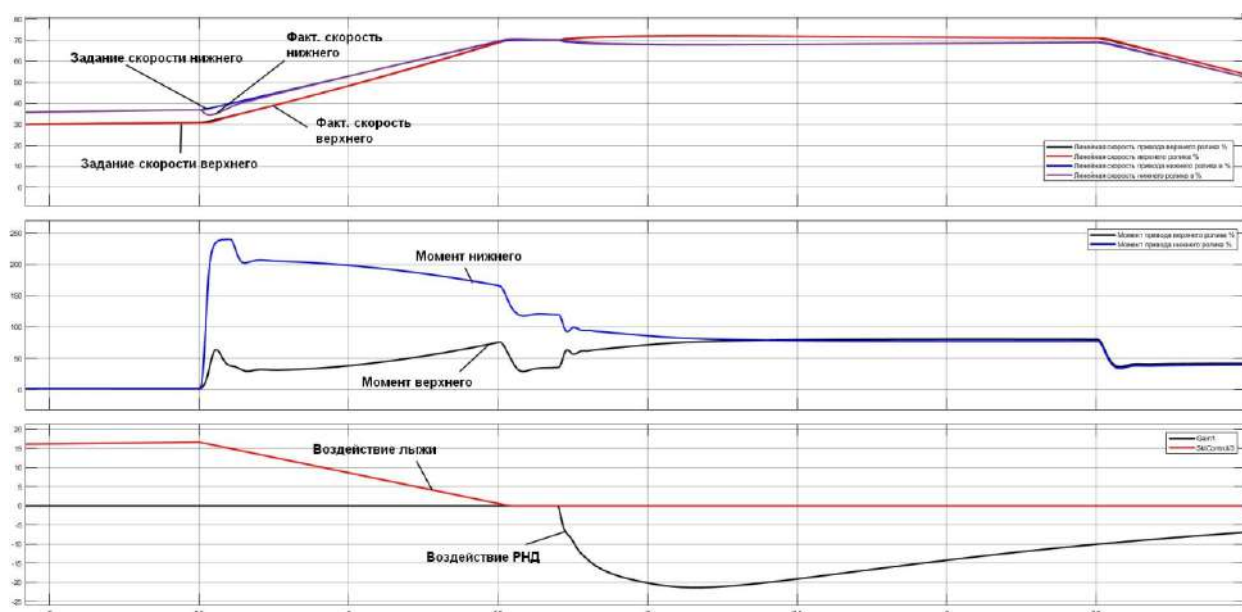


Рисунок П.3.9 – Осциллограммы захвата при использовании полного регулятора с НЛ при замене функции выходного и входных воздействий на функцию Гаусса второго порядка

Вариант 3.

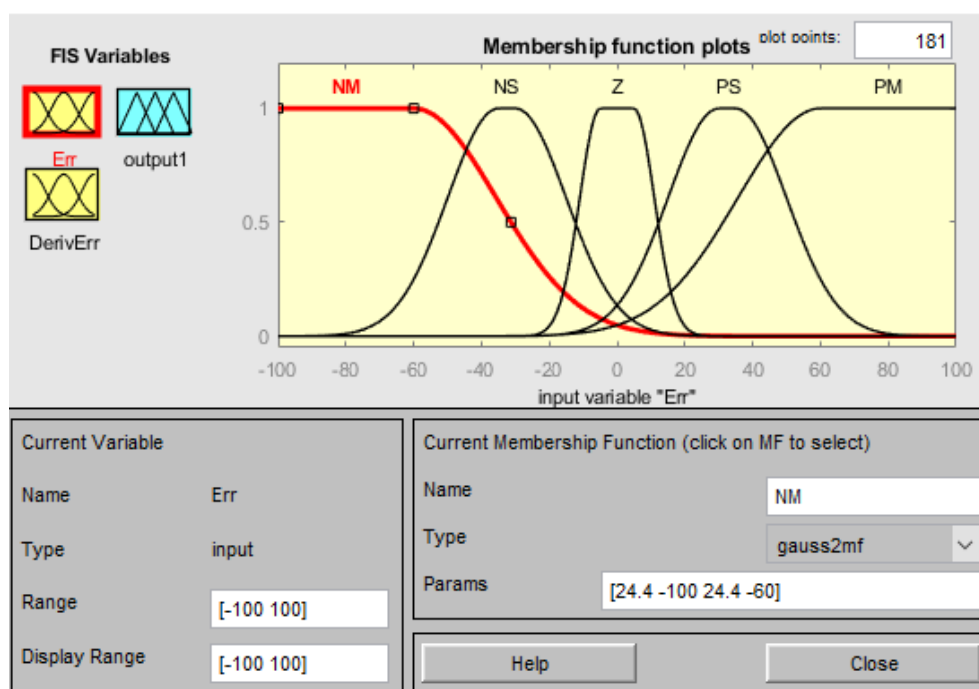


Рисунок П.3.10 – Фазификация разности моментов, функция Гаусса второго порядка, вариант 3

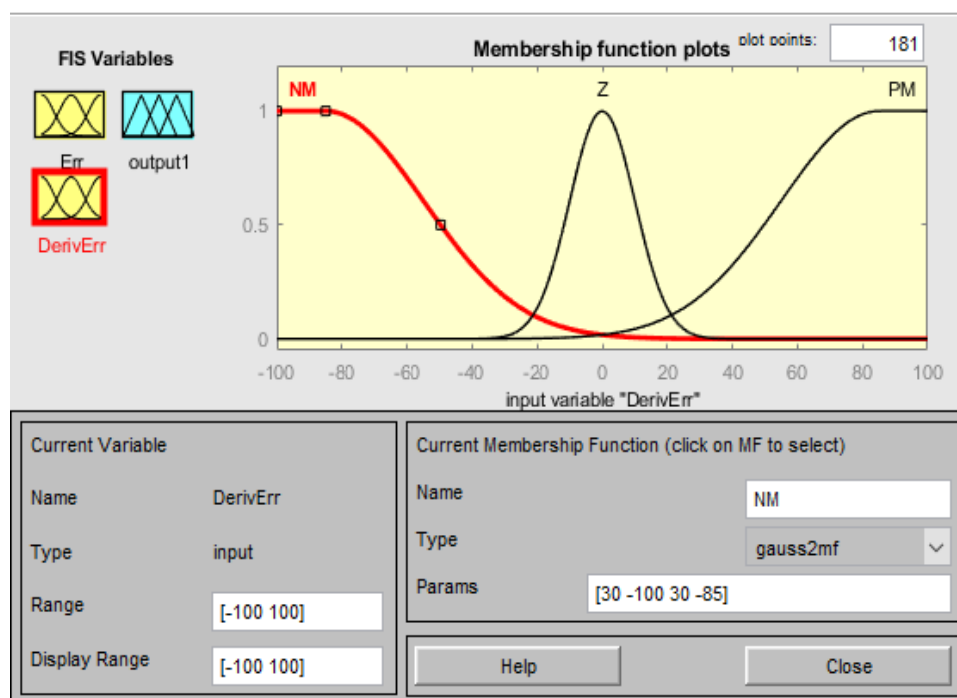


Рисунок П.3.11 – Фазификация производной разности моментов, функция Гаусса, вариант 3

Реализация стационарного наблюдателя Калмана для определения упругого момента

Схема в среде Simulink для сравнения работы библиотечного блока наблюдателя Калмана и разработанного блока (рис. П.4.1).

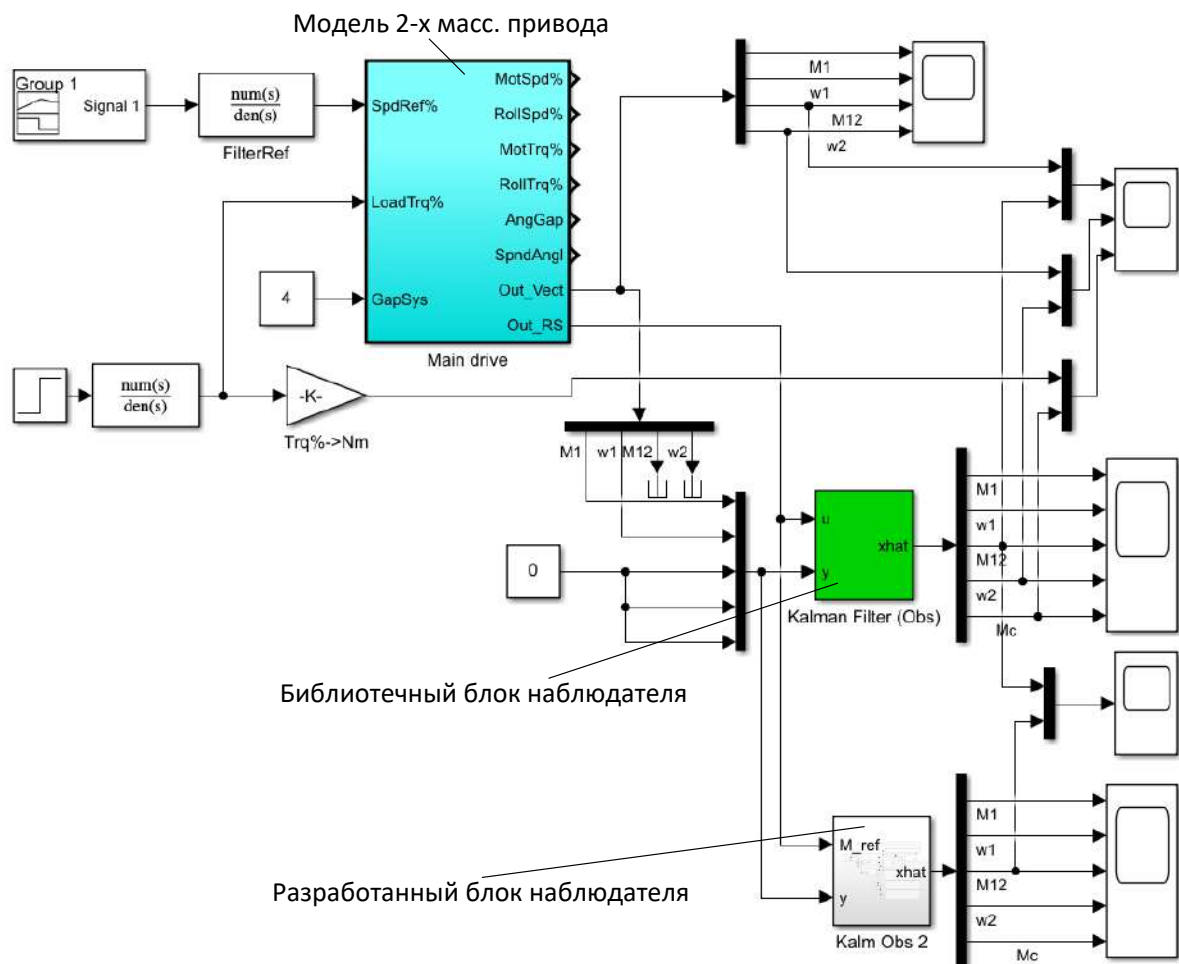


Рисунок П.4.1 – Схема разработанного фильтра Калмана в Matlab Simulink

Проверялась работа разработанного наблюдателя в виде структуры, состоящей из простых блоков, готовой к преобразованию в программу ПЛК, в том числе и напрямую из среды Matlab. Какие-либо закрытые блоки отсутствуют. Схема разработанного наблюдателя в среде Simulink и значения актуальных коэффициентов матриц A , C , L показаны на рисунке П.4.2.

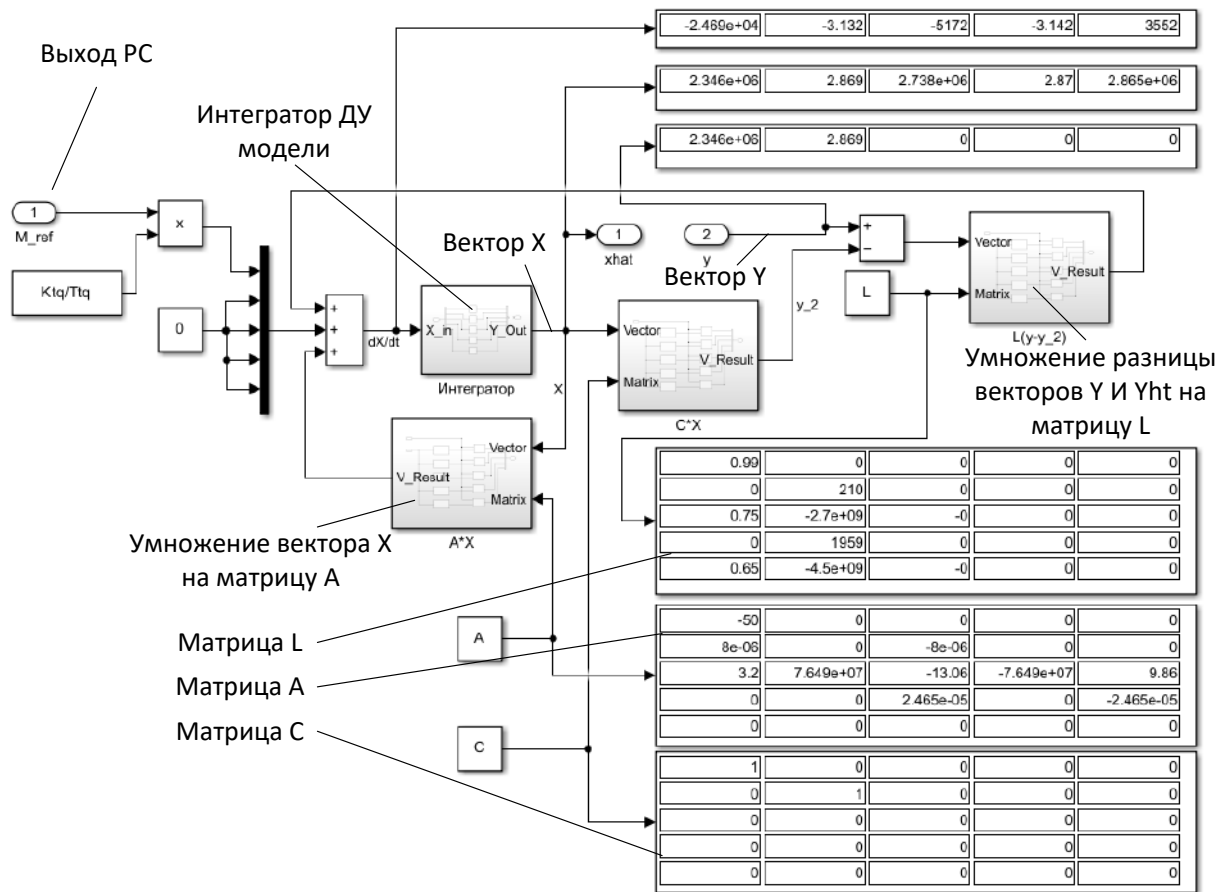


Рисунок П.4.2 – Схема наблюдателя в Simulink

Умножение вектора на матрицу реализовано в виде на рисунке П. 4.3.



Рисунок П.4.3 – Структура блока умножения матриц

Сумма произведений вектора на строку матрицы коэффициентов реализована в виде схемы на рис. П.4.4.

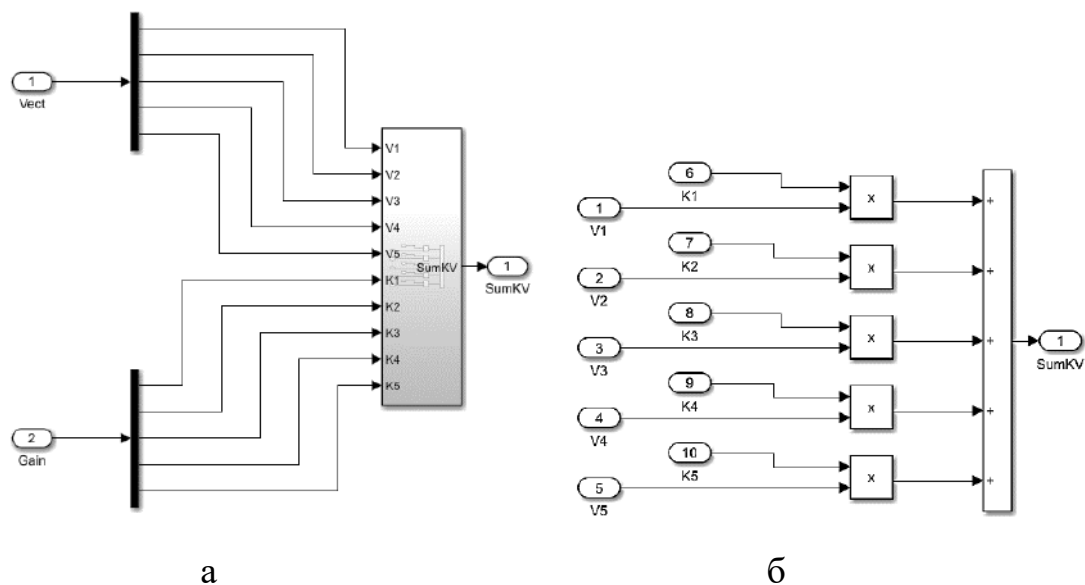


Рисунок П.4.4 – Структуры, поясняющие вычисление суммы произведений в Simulink

Блок интегрирования производной вектора X выполнен в виде дискретных интеграторов как показано на рисунке П.4.5.

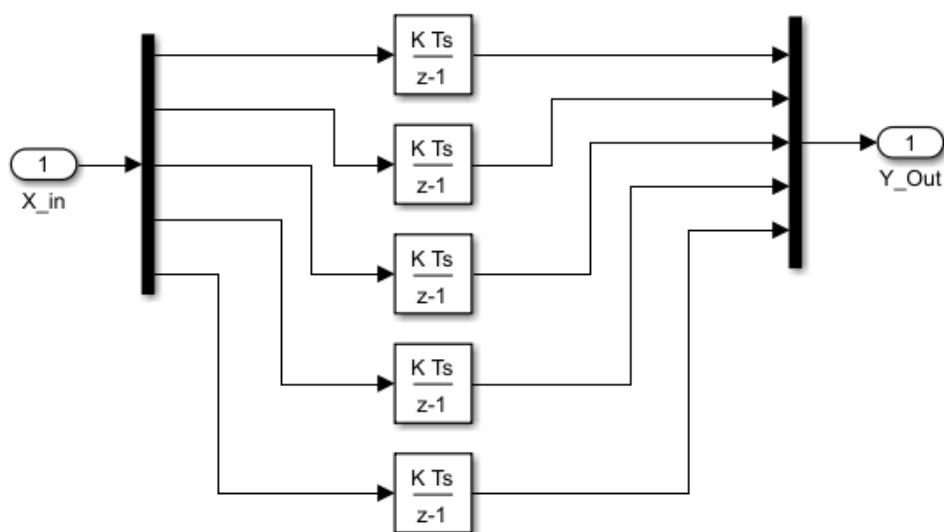


Рисунок П.4.5 – Блок интегрирования производной вектора X

Время цикла программы интегратора 1 мс. При проверке с текущими коэффициентами система сохраняет работоспособность до времени цикла в 4 мс. Для повышения точности и вычислительной устойчивости алгоритма можно использовать интеграторы более высокого порядка.

Результаты работы (расчета в Simulink) для разработанного наблюдателя приведены на графиках, рис. 4.6. Рассматривался процесс разгона электропривода и наброса нагрузки (момента прокатки) с выходом регулятора скорости на ограничение.

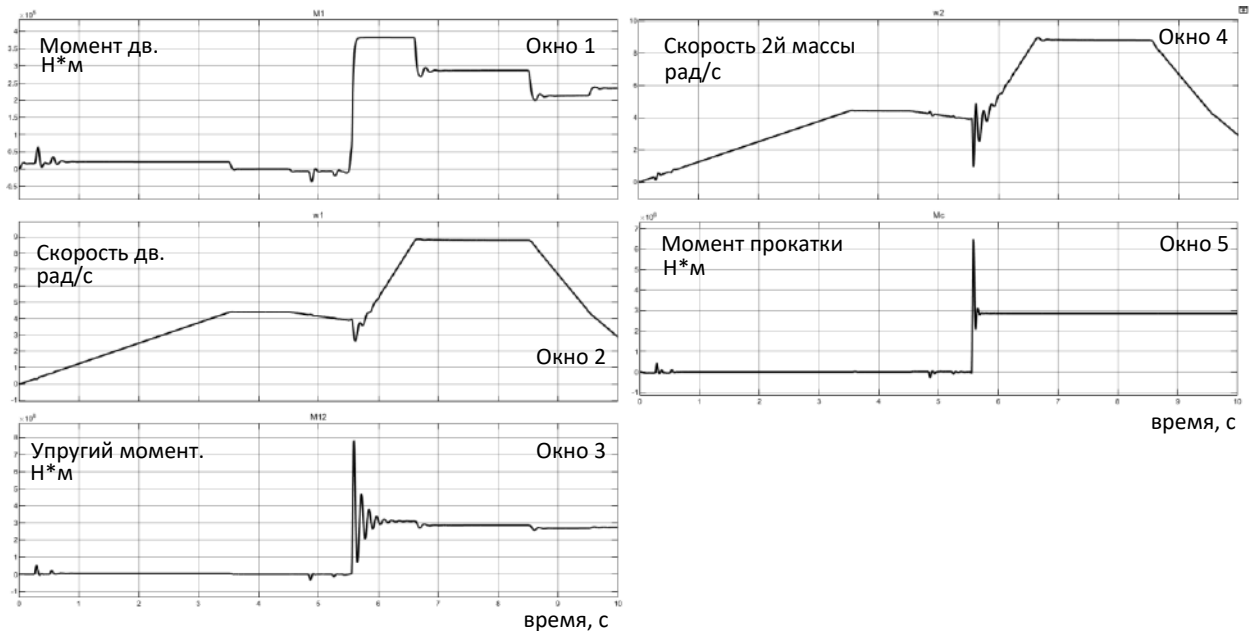


Рисунок П.4.6 – Результаты восстановления переходных процессов наблюдателем

Сравнение работы рассматриваемого наблюдателя с библиотечным блоком из Simulink представлено на рисунке П.4.7. Показан процесс при захвате заготовки валками. Видно практически полное совпадение сигналов упругого момента от разработанного наблюдателя и от наблюдателя, выполненного в виде библиотечного блока.

Элементы матрицы L могут быть найдены по известным зависимостям, в данном же примере применен автоматизированный расчет элементов L с использованием ресурса библиотеки элементов Simulink. Найденные элементы матриц A и L приведены в таблицах П.4.1 и П.4.2, соответственно.

Таблица П.4.1 – Элементы матрицы A

-50,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000008	0,000000	-0,000008	0,000000	0,000000
3,200000	76489587,00	-13,059502	-76489587,00	9,859502
0,000000	0,000000	0,000025	0,000000	-0,000025
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Упругий момент.

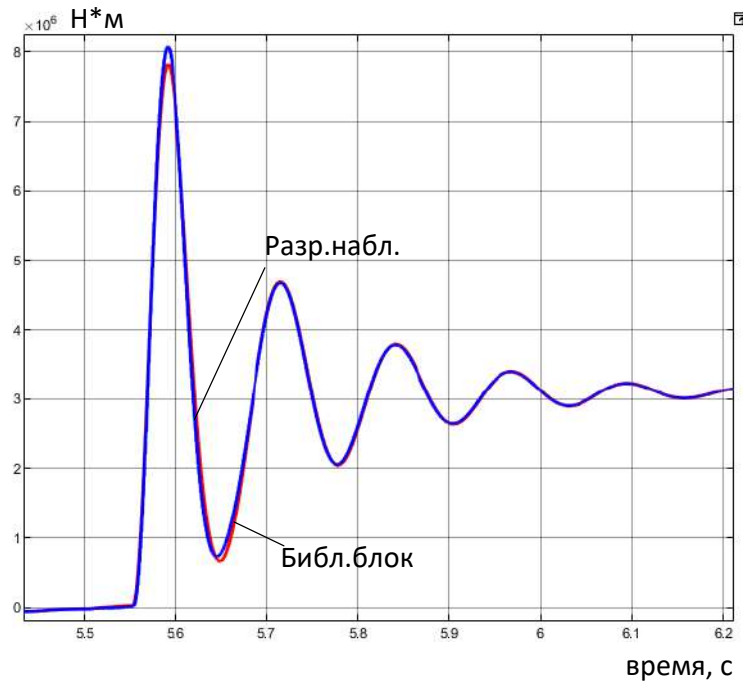


Рисунок П.4.7 – Переходный процесс при приложении нагрузки в момент захвата

Таблица П.4.1 – Элементы матрицы L

0,99	0	0	0	0
0	210	0	0	0
0,75	-27000000000	0	0	0
0	1959	0	0	0
0,65	-45000000000	0	0	0

Влияние темпа подтормаживания на динамические процессы при захвате

1. Результаты расчета моментов на шпинделе при разных темпах торможения после захвата.

Таблица П.5.1 – Результаты расчета амплитуды упругого момента при снижении скорости на 9% и нагрузке 150%

Условия вычислительного эксперимента				
Нагрузка 150 %		Снижение заданной скорости – 9%		
Темп торможения, %/с	Максимум упругого момента при темпе приложения нагрузки [%/с]:			
	∞	3000	2000	1000
20	225	209	194	161
40	217	200	187	160
60	209	192	180	164
80	201	184	174	180
100	193	175	178	186
140	178	188	205	190
180	164	206	220	198
260	173	224	235	196

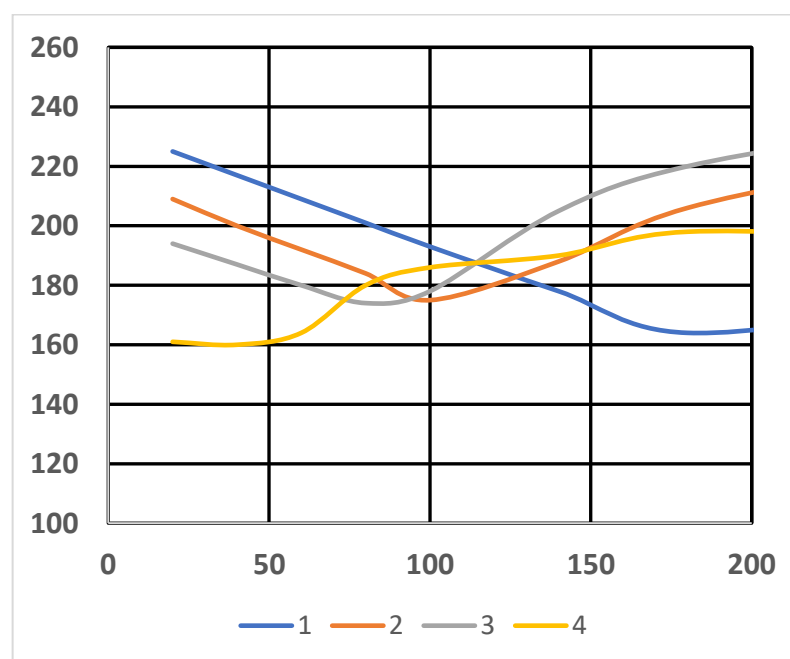


Рисунок П.5.1 – Зависимости минимальных амплитуд упругого момента от темпа замедления при подтормаживании на 9%

Таблица П.5.2 – Результаты расчета амплитуды упругого момента при снижении скорости на 9% и нагрузке 150%

Условия вычислительного эксперимента				
Нагрузка 150 %		Снижение заданной скорости – 14%		
Темп торможения, %/с	Максимум упругого момента при темпе приложения нагрузки [%/с]:			
	∞	3000	2000	1000
20	224	209	194	161
40	216	200	187	157
60	209	192	181	165
80	201	183	175	159
100	193	177	170	172
140	185	161	165	195
180	179	172	198	215
260	173	211	235	219

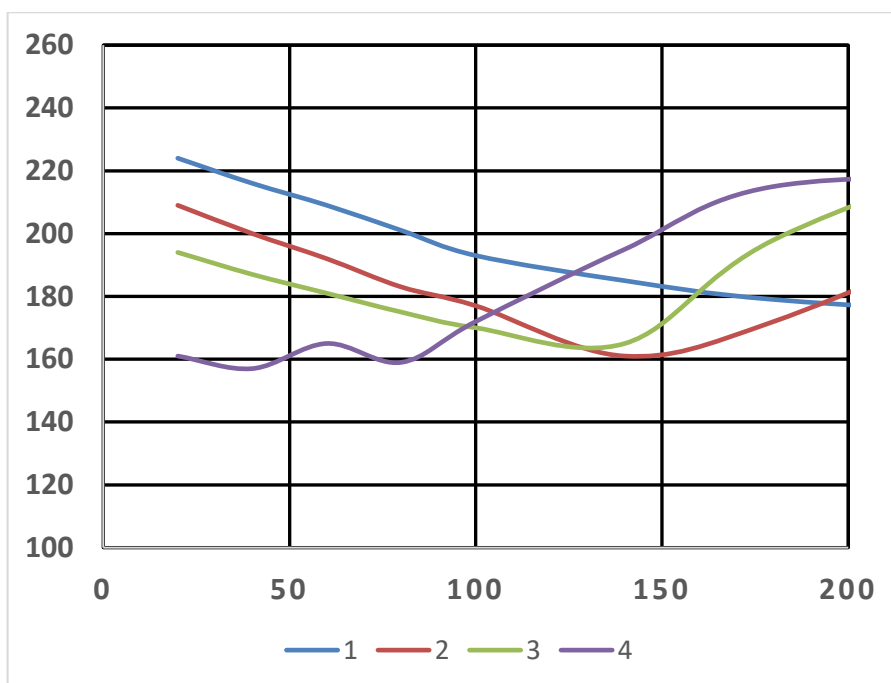


Рисунок П.5.2 – Зависимости минимальных амплитуд упругого момента от темпа замедления при подтормаживании на 14%

Таблица П.5.3 – Результаты расчета амплитуды упругого момента при снижении скорости на 18% и нагрузке 150%

Условия вычислительного эксперимента				
Нагрузка 150 %		Снижение заданной скорости – 18%		
Темп торможения, %/с	Максимум упругого момента при темпе приложения нагрузки [%/с]:			
	∞	3000	2000	1000
20	224	209	194	161
40	216	200	187	157
60	209	192	181	160
80	201	183	174	168
100	193	177	178	163
140	190	178	168	182
180	192	166	171	213
260	187	196	225	229

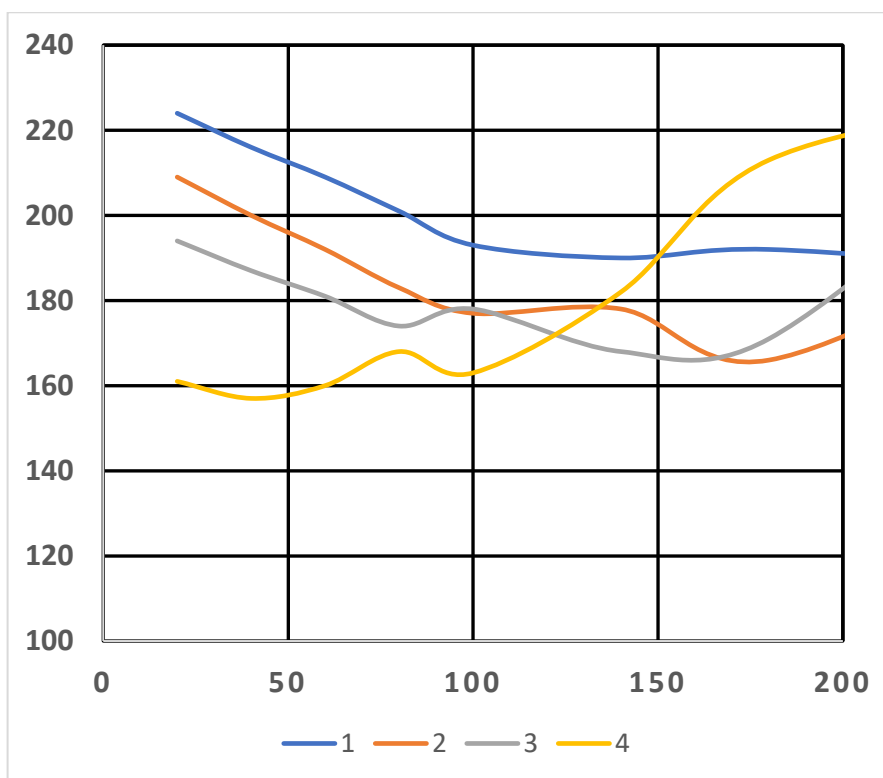


Рисунок П.5.3 – Зависимости минимальных амплитуд упругого момента от темпа замедления при подтормаживании на 18%

На представленных рисунках графики 1, 2, 3, 4 соответствуют темпам приложения нагрузки ∞ , 3000, 2000 и 1000 %/с.

2. Скрипт в пакете Matlab для вычисления кратности упругого момента с помощью модели на рис. 6.26.

```
% Поиск оптимальных значений на основе моделирования
% поиск величин темпа и величины замедления для нагрузки с параметрами
% M и dM/dt
% 2022-05-16 LBM
% вариации величины нагрузки
LoadValSet = [50,100,150,200];
% вариации темпа приложения нагрузки
LoadRateSet = [500, 750, 1000, 2000, 3000, 6000];
% массив темпов замедлений для оптимизации
SpdDecSet = [40, 60, 80, 100, 150, 200];
% массив величин замедлений для оптимизации
SpdDeltaSet = [4, 8, 12, 16, 20];
% массив для сохранения амплитуды макс.значений момента шпинд.
% 4-х мерный массив для всех вариаций
ResMaxTqSp=zeros(length(LoadValSet), length(LoadRateSet), length(SpdDecSet),
length(SpdDeltaSet));
%матрица оптимальных значений темп.замедлений dV/dt для M и dM/dt
OptDecMatrix=zeros(length(LoadValSet), length(LoadRateSet));
%матрица оптимальных значений замедлений deltaV для M и dM/dt
OptDeltaMatrix=zeros(length(LoadValSet), length(LoadRateSet));
% Открытие модели в симулинке
open('AdaptModel10.slx'); % название модели 2х-масс.привода
%прогон вариантов для поиска оптимальных значений
for i1 = 1:length(LoadValSet)%перебор величин нагрузки
    % задание величины нагрузки
    set_param('AdaptModel10/LoadStep','Value','LoadValSet(i1)');
    for i2 = 1:length(LoadRateSet)%перебор темпов приложения нагрузки
        % задание темпа нагрузки
        set_param('AdaptModel10/LoadRate','Value','LoadRateSet(i2)');
        %далее перебор вариантов для поиска оптимального значения для
        %данной нагрузки
        for i3 = 1:length(SpdDecSet)%вариации темпа замедления
            % задание темпа замедления
            set_param('AdaptModel10/SpdDec','Value','SpdDecSet(i3)');
            for i4 = 1:length(SpdDeltaSet)%вариации величины замедления
                % задание величины замедления
                set_param('AdaptModel10/DeltaSpd','Value','SpdDeltaSet(i4)');
                sim('AdaptModel10'); % запуск моделирования
                %сохранение результата моделирования – амплитуды момента
                ResMaxTqSp(i1,i2,i3,i4)=WS_OutSpTqMax.Data(1);
            end
        end
    end
end
end
%поиск минимальных значений момента и заполнение таблиц с параметрами,
%которые обеспечивают минимальные значения
for i1 = 1:length(LoadValSet)%перебор величин нагрузки
    for i2 = 1:length(LoadRateSet)%перебор темпов приложения нагрузки
        MinTqSp= 100000;%начальное значение мин.момента
        SpDecAtMin=0;
        SpDeltaAtMin=0;
        %здесь для пары M и dM/dt ищем минимум упр.момента
        for i3 = 1:length(SpdDecSet)
            for i4 = 1:length(SpdDeltaSet)
                if ResMaxTqSp(i1,i2,i3,i4) < MinTqSp
                    MinTqSp=ResMaxTqSp(i1,i2,i3,i4);
                    SpDecAtMin=SpdDecSet(i3);
                    SpDeltaAtMin=SpdDeltaSet(i4);
                end
            end
        end
    end
end
```

```

end
OptDecMatrix(i1,i2)=SpDecAtMin;
OptDeltaMatrix(i1,i2)=SpDeltaAtMin;
end

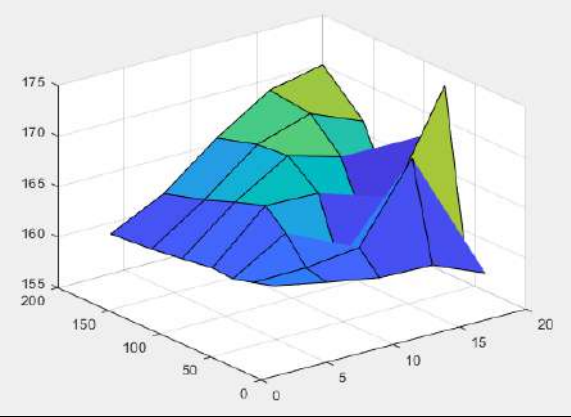
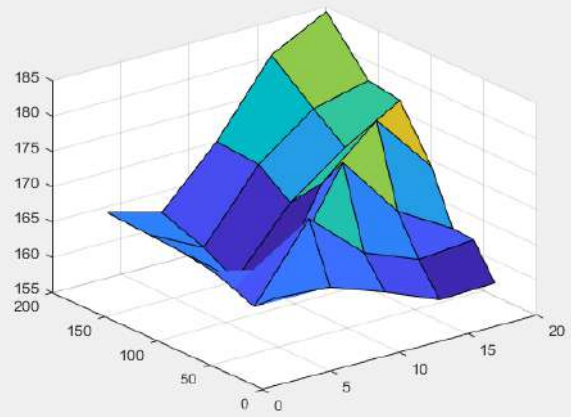
end
end

```

Пример П.5.1. Реализация предложенной методики определения параметров настройки

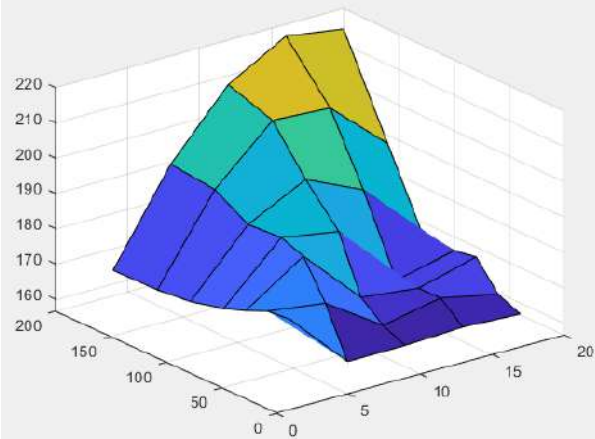
В таблице П.5.4 представлены зависимости амплитуды (ось Z) от снижения скорости ΔV после захвата (ось X, пределы 0..20%) и темпа этого снижения $\frac{d\Delta V}{dt}$ (ось Y, пределы 0..200%/с). Таким образом выполнена визуализация зависимости амплитуды упругого момента от настроечных параметров. Все графики построены для прикладываемой нагрузки 150%, значения $\frac{dM_L}{dt}$ приведены в первом столбце.

Таблица П.5.4 – Зависимости амплитуды упругого момента при разных темпах замедления после захвата

Вариант нагрузки	Зависимость амплитуд от ΔV и $\frac{d\Delta V}{dt}$
$M_L=150\%$, $\frac{dM_L}{dt}=500\%/с$	
$M_L=150\%$, $\frac{dM_L}{dt}=750\%/с$	

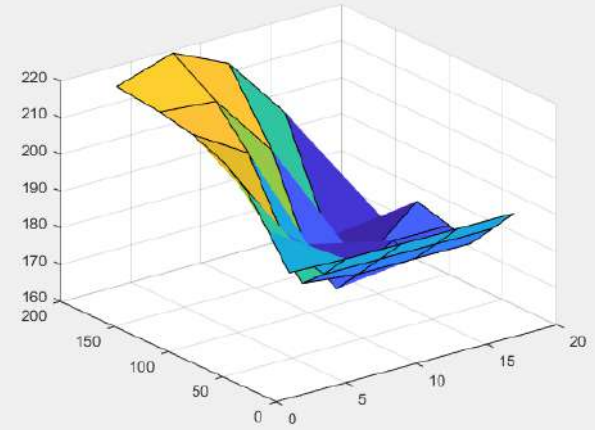
$$M_L = 150 \%,$$

$$\frac{dM_L}{dt} = 1000\%/c$$



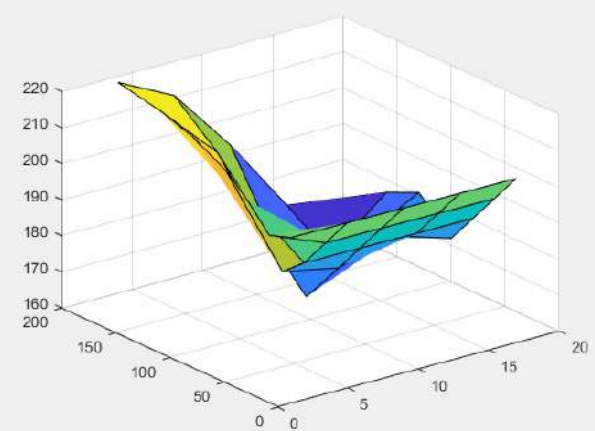
$$M_L = 150 \%,$$

$$\frac{dM_L}{dt} = 2000\%/c$$



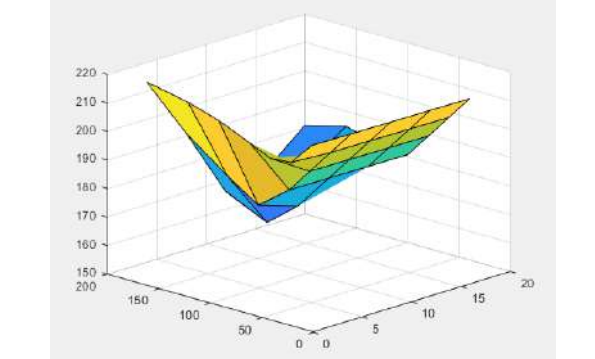
$$M_L = 150 \%,$$

$$\frac{dM_L}{dt} = 3000\%/c$$



$$M_L = 150\%,$$

$$\frac{dM_L}{dt} = 6000\%/c$$



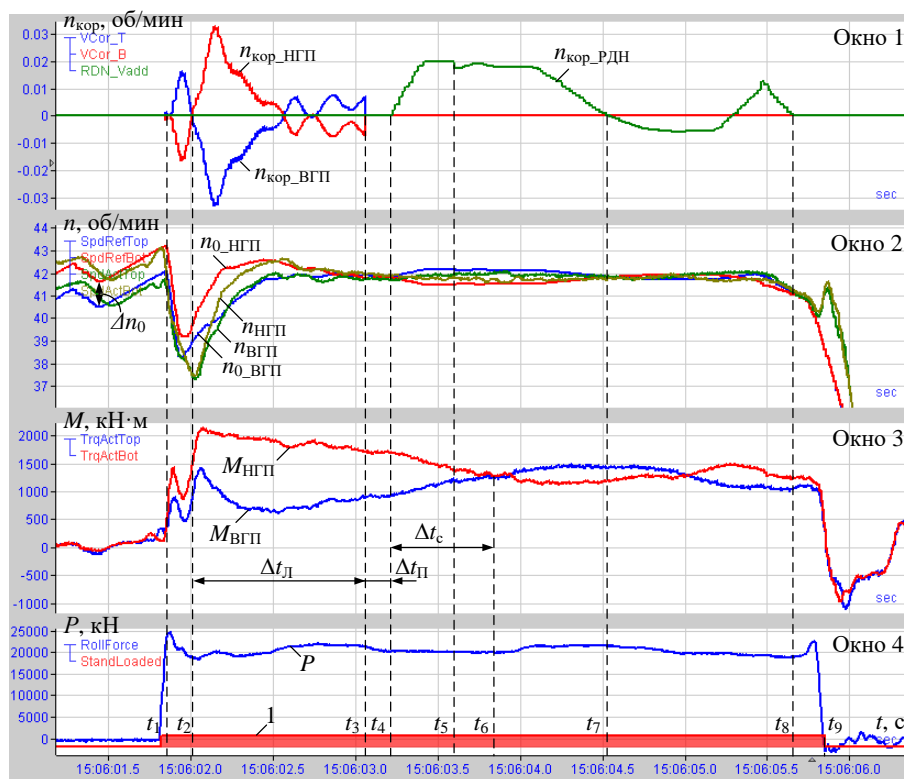
В таблице П.5.5 приведены значения темпов приложения нагрузки $\frac{dM_L}{dt}$, обеспечивающих минимальные амплитуды упругого момента для прикладываемой нагрузки $M_L = 100\%$. Из этих графиков следует, что при каждом значении нагрузки имеет место минимум амплитуды. Для его определения в автоматизированном режиме с помощью разработанной модели, рис. 6.26, и скрипта определяются параметры от ΔV и $\frac{d\Delta V}{dt}$, которые обеспечивают этот минимум. Далее они задаются в таблицу для данного значения нагрузки, которая служит заданием для интерполятора.

Таблица П.5.5 – Минимальные значения амплитуд упругого момента при $M_L=100\%$

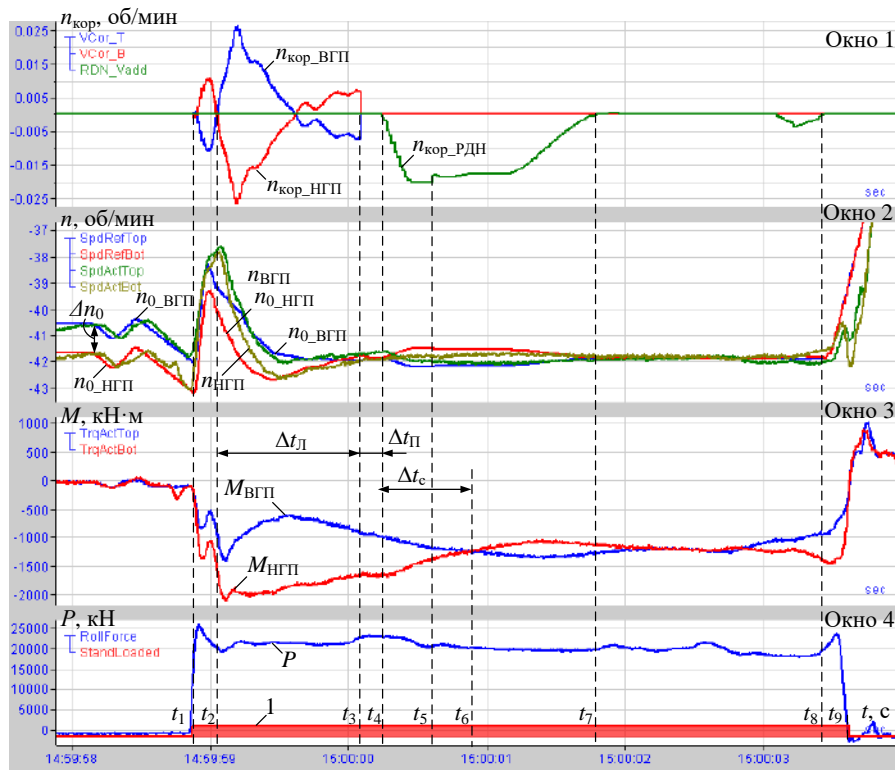
$\frac{dM_L}{dt}$	500	750	1000	2000	3000	6000
Мин. амплитуды	106	106	107	109	105	107

Аналогичные таблицы могут быть построены для всех значений момента 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200%. Полученные массивы данных позволяют автоматически выбирать и задавать в интерполятор оптимальные параметры управления, обеспечивающие минимальные значения амплитуд упругого момента для всех исходных параметров нагрузки.

Осциллограммы при внедрении адаптивного РДН



а



б

Рисунок П.6.1. Координаты электроприводов для двух проходов при внедрении адаптивного РДН

УТВЕРЖДАЮ:
 Главный специалист группы по
 развитию НТИ ПАО «ММК»
 —  И.В. Денисов
 « 17 » 06 2022 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов НИОКР по договору № 243136 от 14.05.2020 г
«Разработка и внедрение алгоритмов оптимизации нагрузочных и тепловых
режимов электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 при прокатке слэбов
расширенного сортамента»

Работа проводится в рамках «раздела VI Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика, п.4. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии, пп.21 разработка технологий диагностики остаточного ресурса силового электрооборудования» «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 №968 (в редакции от 18.05.2019)

Краткое описание выполненных работ:

Выполнены сбор и обработка данных по существующим режимам работы механизмов клетки в привязке к технологии производства. Выполнен анализ работы систем лыжеобразования и распределения нагрузок в процессе прокатки слэбов с учетом существующей технологии прокатки. Выполнено исследование распределения нагрузок главных приводов верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП) при существующих настройках системы лыжеобразования и регулятора деления нагрузок (РДН).

Разработан способ согласования скоростей двигателей ВГП и НГП в режиме формирования «лыжи» за счет их коррекции в функции разности сигналов заданий на входах регуляторов скоростей.

Разработан адаптивный РДН с переключающейся структурой, обеспечивающий форсированное согласование скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков за счет отключения интегральной части РДН и увеличения коэффициента усиления пропорциональной части.

Разработан способ ограничения динамического момента при ударном приложении нагрузки, согласно которому предлагается осуществлять индивидуальную компенсацию составляющих динамического момента, обусловленных ударом при замыкании углового зазора и упругими свойствами механической передачи.

Разработаны алгоритм и программа автоматизированного анализа нагрузочных и тепловых режимов электроприводов. Выполнен анализ режимов двигателей при прокатке слэбов различного сортамента при внедрении разработанных алгоритмов.

Выполнены исследования экстремальных динамических нагрузок на шпинделях в аварийных режимах (окольцевание валка полосой, поломка валка и головки шпинделя при захвате, аварийное отключение во время прокатки). Определены мероприятия по ограничению динамических нагрузок и предотвращению аварийных ситуаций.

Полученный результат:

На АРМ поста управления №2 стана 5000 установлено ПО управляющего контроллера клетки стана 5000: системы управления главным приводом – программа MDC и система управления скоростными режимами, позволяющие внедрить в промышленную эксплуатацию следующие инструменты управления:

- способ согласования скоростей двигателей ВГП и НГП в режиме формирования «лыжи»;
- алгоритм разработанного адаптивного РДН с переключающейся структурой;
- способ ограничения динамического момента при ударном приложении нагрузки;
- алгоритм автоматизированного анализа скоростных и нагрузочных режимов электроприводов.

Внедрение разработанных алгоритмов оптимизации нагрузочных и тепловых режимов электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 позволяет обеспечивать достижение следующих показателей:

- снижение неравномерности загрузки двигателей по моменту (рассогласование моментов не более 15% на 80% длины заготовки);
- увеличение срока службы оборудования горизонтальной клетки за счет уменьшения количества перегрузок электрического и механического оборудования – в 1,2 раза;
- сокращение количества внеплановых или аварийных замен шпинделя в 1,5 раза;

- сокращение времени аварийных простоев стана, обусловленных поломками оборудования линий главных приводов - в 1,5 раза.

За счет применения интегрированных алгоритмов оптимизации нагрузочных режимов обеспечена возможность внедрения практических мероприятий по снижению аварийности и продлению сроков эксплуатации технологического оборудования стана.

Способность к правовой охране полученного результата: подготовлены материалы для подачи заявки на регистрацию программы для ЭВМ.

Дата фактического внедрения 1 сентября 2022 г.

Срок полезного использования 2 года.

Отв. исполнитель НИОКР

Согласовано:

Начальник ПТЛ

Начальник ЦЭТЛ

Ответственный по НИОКР от ПТЛ

Ответственный по НИОКР от ЦЭТЛ

Куратор договора (от НТЦ)

А.С. Карандаев

Е.В. Брайчев

А.Г. Шубин

А.М. Овсов

Б.М. Логинов

Л.П. Добрынина

09.09.2022

УТВЕРЖДАЮ:
Начальник ПТЛ ПАО «ММК»

Е.В. Брайчев

_____ 2022 г.

АКТ
опытно-промышленных испытаний
результатов НИОКР по договору № 243136 от 14.05.2020 г
«Разработка и внедрение алгоритмов оптимизации нагрузочных и тепловых режимов
электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 при прокатке слэбов
расширенного сортамента»

Работа проводится в рамках «раздела VI Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика, п.4. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии, пп.21 разработка технологий диагностики остаточного ресурса силового электрооборудования» «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 от 18.05.2019)

Характеристика внедренных разработок

В соответствии с Техническим заданием в системе автоматического управления скоростными режимами электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 внедрены:

1. Алгоритм согласования скоростей главных приводов верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП) в режиме формирования «лыжи». Осуществляется коррекция в функции разности сигналов заданий на входах регуляторов скоростей. За счет этого обеспечивается регулирование по заданию, на которое не влияют динамические просадки скорости.

Экранные формы внедренного программного обеспечения (ПО), реализующего алгоритм регулятора коррекции «лыжи», представлены на рис. 1.

2. Адаптивный регулятор деления нагрузок (РДН) с переключающейся структурой. В результате осуществляется форсированное согласование скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков за счет отключения интегральной части РДН и увеличения коэффициента усиления пропорциональной части.

Экранные формы ПО алгоритма адаптивного РДН приведены на рис. 2.

3. Способ ограничения динамического момента при ударном приложении нагрузки путем формирования тахограмм с предразгоном до захвата и замедлением после захвата. Это обеспечивает предварительное замыкание углового зазора и компенсацию упругого момента шпинделя.

4. Алгоритм и программа автоматизированного анализа нагрузочных и тепловых режимов электроприводов в on-line режиме при прокатке слэбов различного сортамента. Выполнены исследования нагрузок при обычной прокатке и при внедрении разработанных алгоритмов.

Все алгоритмы прошли опытно-промышленные испытания. Выполнен комплекс экспериментов, позволяющих дать оценку технической эффективности внедрения результатов НИОКР. Эксперименты проводились в течение 2022 года в разное время в процессе внедрения систем.

Эксперимент №1. Исследование формирования «лыжи»

Программа эксперимента:

Анализировались следующие динамические режимы:

- разгон электропривода с металлом в валках;
- захват металла валками на установившейся скорости и на участке ускорения;
- выход металла из валков.

Фиксировались осциллограммы:

- скоростей двигателей электроприводов верхнего и нижнего валков;
- моментов двигателей верхнего и нижнего валков.

Результаты испытаний:

Характерные осциллограммы скоростей и моментов двигателей ВГП и НГП представлены на рис. 3. В результате сделаны следующие выводы:

1. Внедрение алгоритма, реализующего разработанный способ, обеспечивает рассогласование скоростей ВГП и НГП в динамическом режиме захвата. Это обеспечивает повышение точности формирования заданной «лыжи».

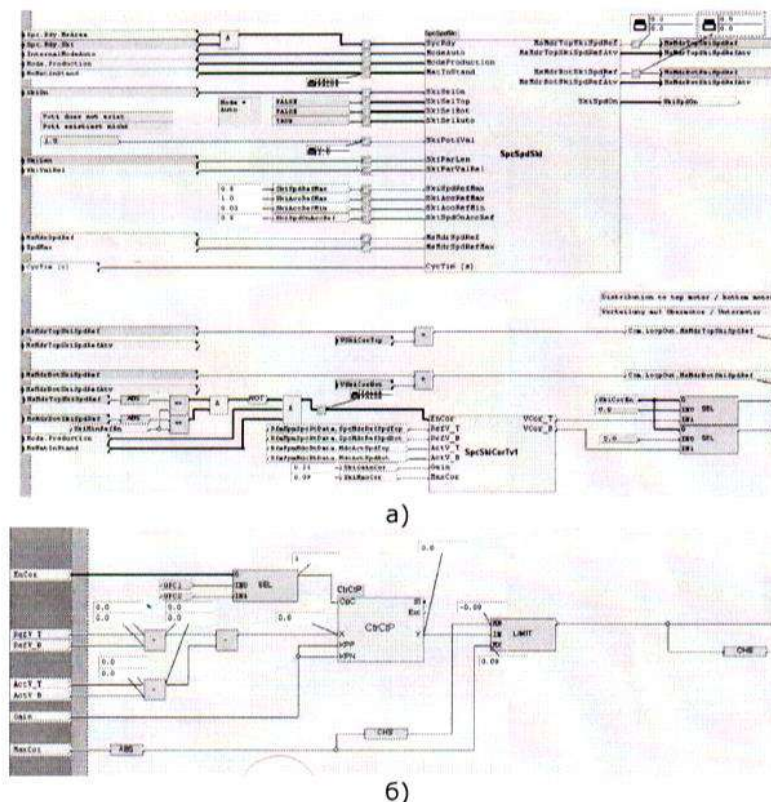


Рис. 1. Экранные формы ПО контроллера управления скоростями электроприводов: реализация алгоритма коррекции «лыжи» - подключение нового блока SpcSkiCorTv1 (а) и регулятор коррекции «лыжи» - блок SpcSkiCorTv1 (б)

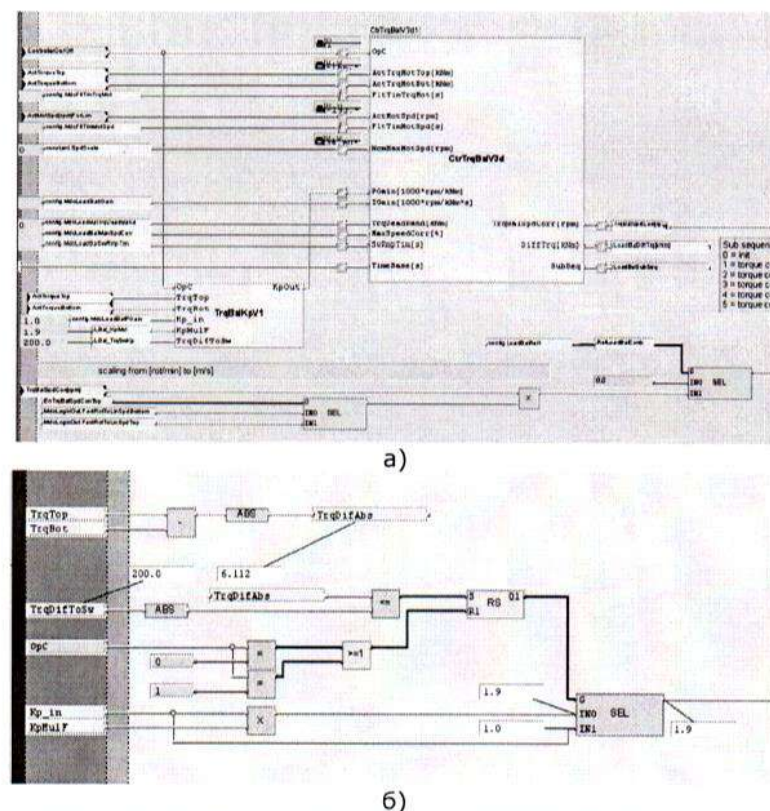
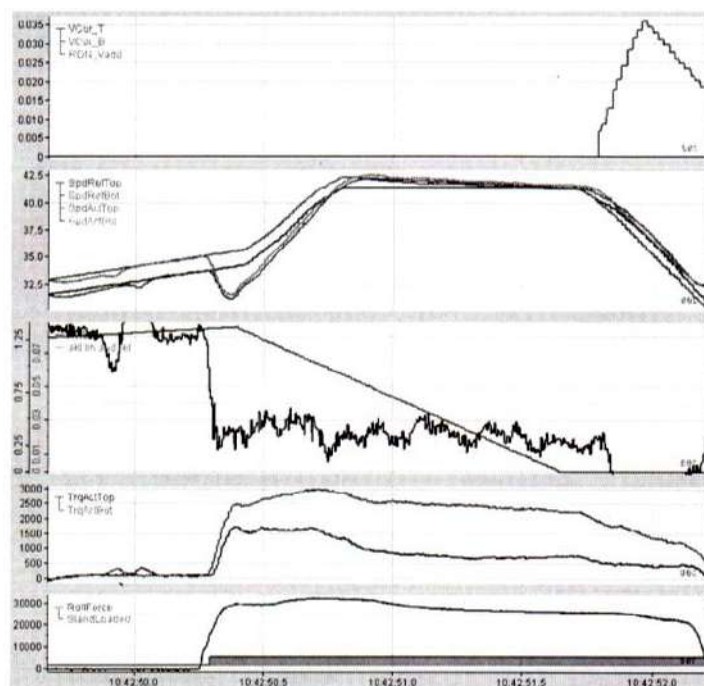


Рис. 2. Экранные формы, поясняющие реализацию адаптивного согласования нагрузок ВГП и НГП: алгоритм нелинейного РДН (а) и блок TrqBalKpV1 автоматического изменения коэффициента регулятора (б)



a)



б)

Рис. 3. Осциллограммы при проектной настройке (а) и при реализации разработанного алгоритма формирования «лыжи» (б)

2. Благодаря этому преимуществу формирование необходимого изгиба осуществляется при меньшем задании рассогласования скоростей. Задавать «лыжу» в пределах 10-15% не требуется.

Эксперимент №2. Исследование адаптивного РДН

Программа эксперимента:

Анализировались соотношения скоростей и моментов ВГП и НГП в квазиустановившемся режиме прокатки для двух случаев:

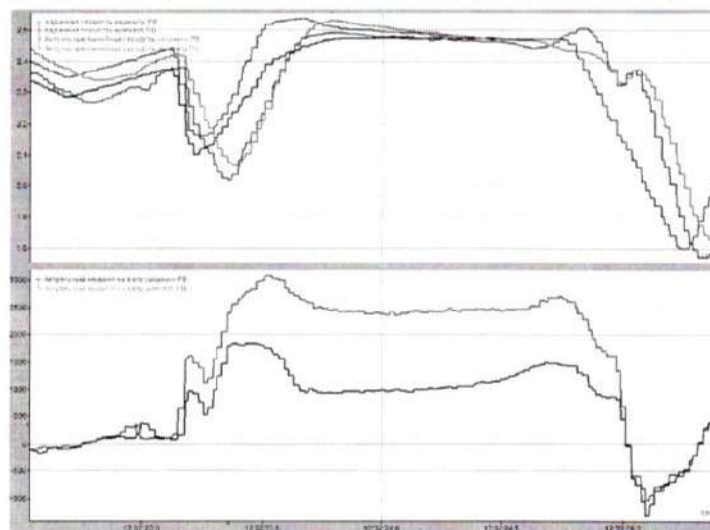
- прокатка с ускорением при проектной настройке РДН;
- тот же режим с разработанным адаптивным РДН.

Фиксировались осциллограммы:

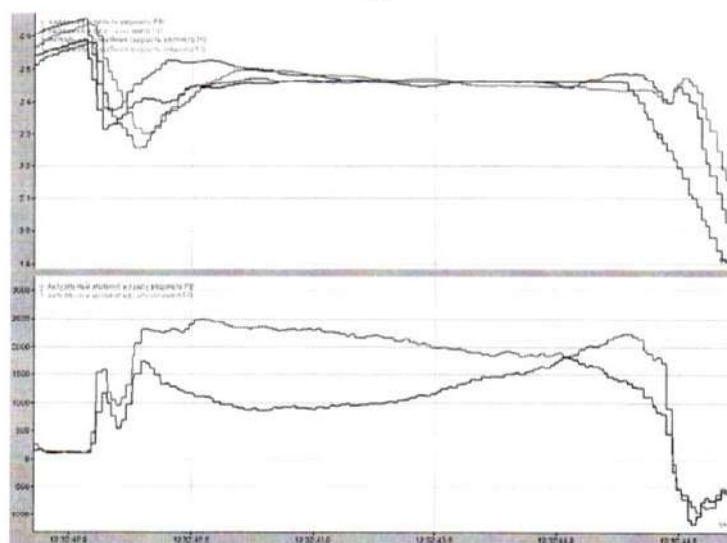
- скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков;
- моментов двигателей.

Результаты испытаний:

Характерные осциллограммы приведены на рис. 4: при исходной настройке РДН (рис. 4, а) и при адаптивном РДН (рис. 4, б). Осциллограммы сняты при прокатке в черновом проходе.



а)



б)

Рис. 4. Осциллограммы скоростей и моментов двигателей при существующей настройке (а) и при внедрении адаптивного регулятора (б)

Выводы:

1. В первом случае РДН не включается в работу в течение всего прохода. В установившемся режиме момент двигателя нижнего валка превышает момент верхнего валка в 2,5 раза (1000 кН·м – для ВГП и 2500 кН·м – для НГП).

2. Во втором случае происходит регулирование соотношения моментов в сторону их выравнивания. Однако полного равенства добиться не удастся.

3. Необходимо повышение быстродействия РДН (с проверкой колебательности электроприводов) и сокращение паузы на включение РДН после лыжи.

В целом, внедрение алгоритма обеспечивает сокращение времени выравнивания моментов двигателей.

Эксперимент №3. Исследование ограничения момента при захвате

Проведены эксперименты, в ходе которых сравнивались осциллограммы моментов ВГП и НГП при прокатке заготовок в первых проходах черновой стадии. Анализировались процессы последовательно идущих заготовок из одной партии при подключенной и отключенной системе подтормаживания.

Программа эксперимента:

Анализировались следующие динамические режимы:

- захват металла валками на установившейся скорости и на участке разгона электропривода;
- захват металла валками на участке разгона электропривода с последующим торможением.

Фиксировались осциллограммы:

- скоростей двигателей электроприводов верхнего и нижнего валков;
- моментов двигателей верхнего и нижнего валков.

Результаты испытаний

Характерные осциллограммы представлены на рис. 5, они получены для случаев прокатки с предразгоном в существующей системе (рис. 5, а) и при разработанном алгоритме (рис. 5, б).

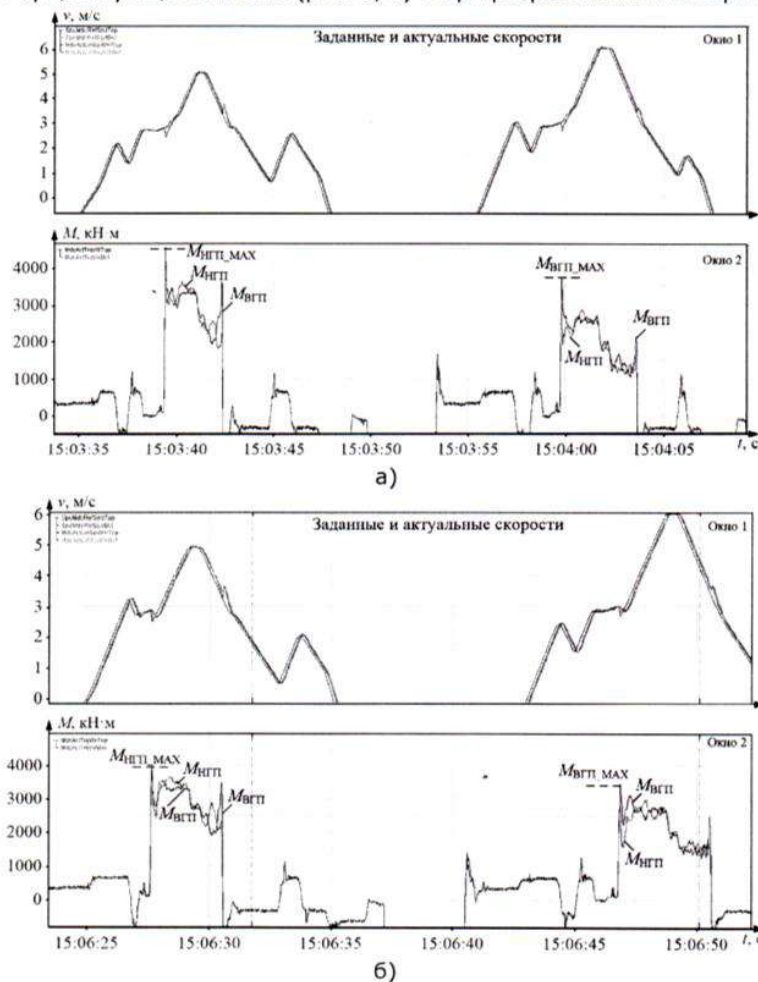


Рис. 5. Осциллограммы моментов и скоростей с предразгоном (а) и в разработанной системе (б)

Выводы:

1. При существующих алгоритмах управления амплитуды моментов двигателей превышают установившиеся значения в 1,5-2 раза. При этом максимальные значения упругих моментов превышают номинальный момент двигателей в 3-3,5 раза.

2. При захвате раската на участке ускорения зазоры в шпиндельных соединениях полностью закрыты. Амплитуда ударного момента составляет 40% установившегося значения (рис. 5, а).

3. Торможение после захвата создает дополнительный отрицательный момент, частично компенсирующий динамический момент, вызванный ударным приложением нагрузки (рис. 5, б). Величина этого момента может регулироваться путем изменения темпа снижения скорости. Это обеспечивает дополнительное ограничение амплитуды момента при захвате.

Эксперимент №4. Исследование нагрузочных и тепловых режимовПрограмма эксперимента:

Анализировались результаты расчетов эквивалентных токов и температуры двигателей при различной заданной лыже (в %). Вычисления проводятся для прокатки двух заготовок по цифровым массивам токов двигателей ВГП и НГП.

Результаты испытаний:

На рис. 6 представлены результаты вычислений для двух вариантов:

- заданная лыжа (10%) и обычное выравнивание нагрузок (рис. 6, а);
- задание лыжи (1,5%) и эффективная работа разработанного РДН (рис. 6, б).

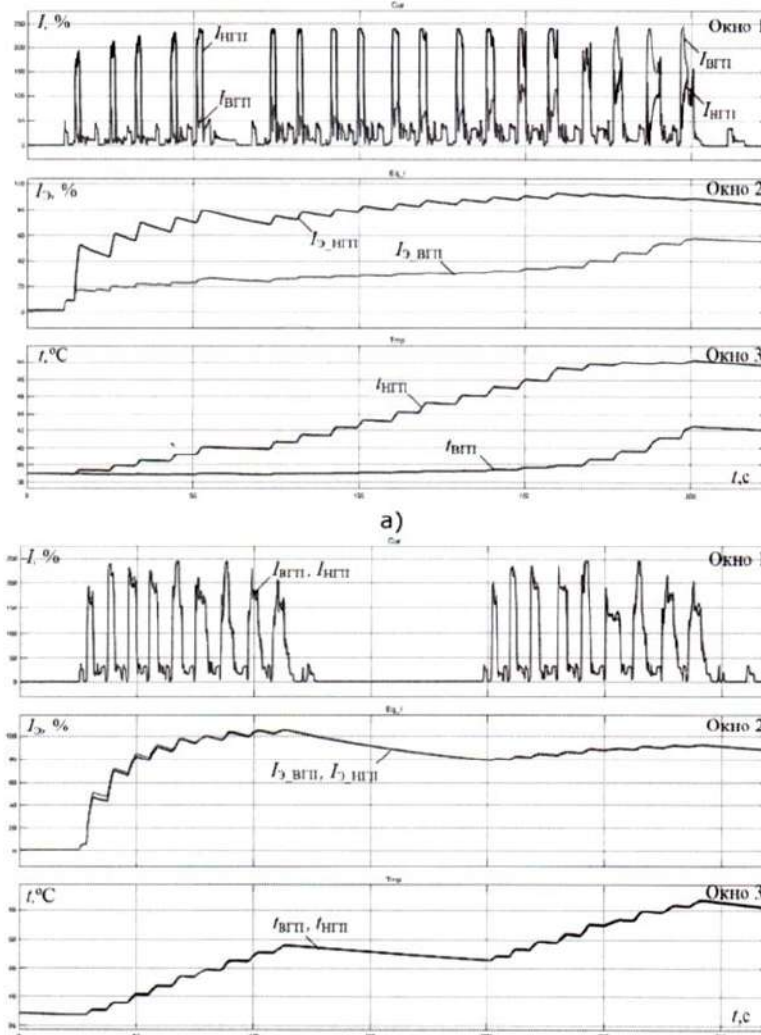


Рис. 6. Эквивалентные токи и графики температуры для чистовой прокатки двух заготовок

Выводы.

1. При большой заданной «лыже» (рис. 6, а) во всех проходах, ток НГП (окно 1) превышает ток ВГП. К конце прокатки эквивалентный ток $I_{э_н\text{гп}}$ составляет 85%, ток $I_{э_н\text{гп}}$ – 55% номинального. Аналогичные токи при лыже 1,5% на рис. 6, б в конце прокатки одинаковы и составляют 55%. Суммарный ток двигателей в первом случае составляет 140%, во втором – 110%, это объясняется тем, что в первом варианте затрачивается больше энергии на изгиб раската, чем во втором.

2. Выравнивание эквивалентных токов подтверждает, что температурный режим двигателя НГП улучшается. Так как эквивалентные токи двигателей значительно ниже номинального значения (ниже 100%), можно утверждать, что в обоих случаях перегрева не происходит. Это подтверждают графики температуры в окнах 3.

3. Зависимости в окнах 3 показывают, что за время чистовой прокатки температура выходит на установившиеся значения. При этом разница установившихся значений на рис. 6, а составляет 50°C или 16% (50° для НГП и 42° для ВГП). Установившаяся температура на рис. 6, б для обоих двигателей составляет 42°.

Общее заключение

1. Экспериментально подтверждены преимущества адаптивного РДН:

- во всех проходах осуществляется форсированное выравнивание нагрузок, в то время как при проектном алгоритме в черновых проходах РДН не включался в работу;

– внедрение алгоритма обеспечивает сокращение времени выравнивания моментов двигателей за счет повышения быстродействия РДН.

2. Время переходных процессов в режиме лыжеобразования сокращается в 1,5 раза. Соответственно в 1,5 раза снижается время выхода электроприводов на установившийся режим. Формирование необходимого изгиба может быть обеспечено при меньшем рассогласовании скоростей; задавать «лыжу» в пределах 10-15% не требуется.

3. Промышленное внедрение алгоритма регулирования скоростей с предразгоном и торможением после захвата обеспечивает:

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

4. Анализ графиков температуры на рис. 6 позволяет утверждать, что тепловые режимы двигателей удовлетворительные в обоих случаях. Температура значительно ниже допустимой, поэтому при существующем сортаменте необходимости в непрерывном контроле температуры нет. Основное внимание следует уделять не контролю нагрева двигателей, а максимальным нагрузкам двигателей и скорости их изменения.

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

Рекомендации

С целью и снижения аварийности механического оборудования клетки целесообразно разработать и внедрить на стане:

1. Систему мониторинга перегрузок шпинделей, обеспечивающую фиксацию и подсчет перегрузок, превышающих заданные пороговые значения.

2. Методику расчета ресурса шпинделей на основе подсчета перегрузок шпинделей и оценки их амплитуд.

3. Способы ограничения динамических нагрузок. В дополнение к внедренной системе с предразгоном и торможением после захвата должны быть выполнены:

3.1. Обоснование оптимальной скорости захвата в зависимости от толщины заготовки и абсолютного обжатия (номера прохода). Это обусловлено тем, что при различных обжатиях различаются скорости заполнения очага деформации. Основными факторами, оказывающими влияние, являются скорость заготовки в момент захвата и абсолютные обжатия. Скорость захвата по проходам изменяется от 2 до 5 м/с. Абсолютные обжатия изменяются от 30 мм в первых проходах до 2 мм – в последних. Эти факторы влияют на условия захвата и амплитуду динамического момента. Поэтому данная задача является актуальной.

3.2. Разработка способа ограничения динамических нагрузок за счет адаптивного подтормаживания. Отличие от внедренного способа заключается в том, что темп подтормаживается рассчитывается путем адаптивной настройки на модели и далее автоматически устанавливается для каждого прохода индивидуально.

Начальник ЦЭТЛ

Ответственный по НИОКР от ПТЛ

Ответственный по НИОКР от ЦЭТЛ

Отв. исполнитель НИОКР

А.Г. Шубин

А.М. Овсов

Б.М. Логинов

А.С. Карандаев

УТВЕРЖДАЮ:
Начальник технического
департамент ПАО «ММК»

А.А. Мухин

2017 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов НИОКР по договору № 228203 от 23.05.2016 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.



СОГЛАСОВАНО:

Главный энергетик ПАО «ММК»

Ю.П. Журавлев

2017 г.

АКТ**опытно-промышленных испытаний**

алгоритмов снижения динамических нагрузок в валопроводах главных электроприводов
горизонтальной клетки стана 5000

(по договору НИОКР № 228203 от 23.05.2016 г.)

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

Характеристика внедряемых способов и алгоритмов

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

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

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

Программа эксперимента

Анализировались следующие динамические режимы за цикл прокатки:

- разгон электропривода с металлом в валках;
- захват металла валками на установившейся скорости и на участке разгона электропривода;
- выход металла из валков.

Фиксировались осциллограммы:

- скоростей двигателей электроприводов верхнего и нижнего валков;
- токов электроприводов;
- моментов двигателей верхнего и нижнего валков.

Результаты испытаний

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

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

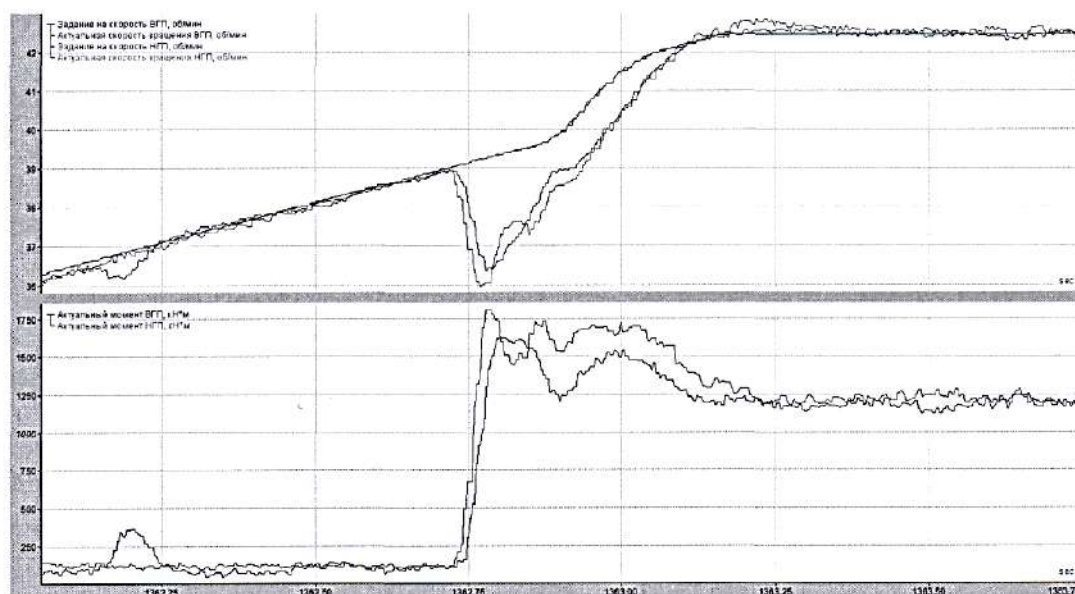


Рис. 1. Захват на участке ускорения с последующим разгоном

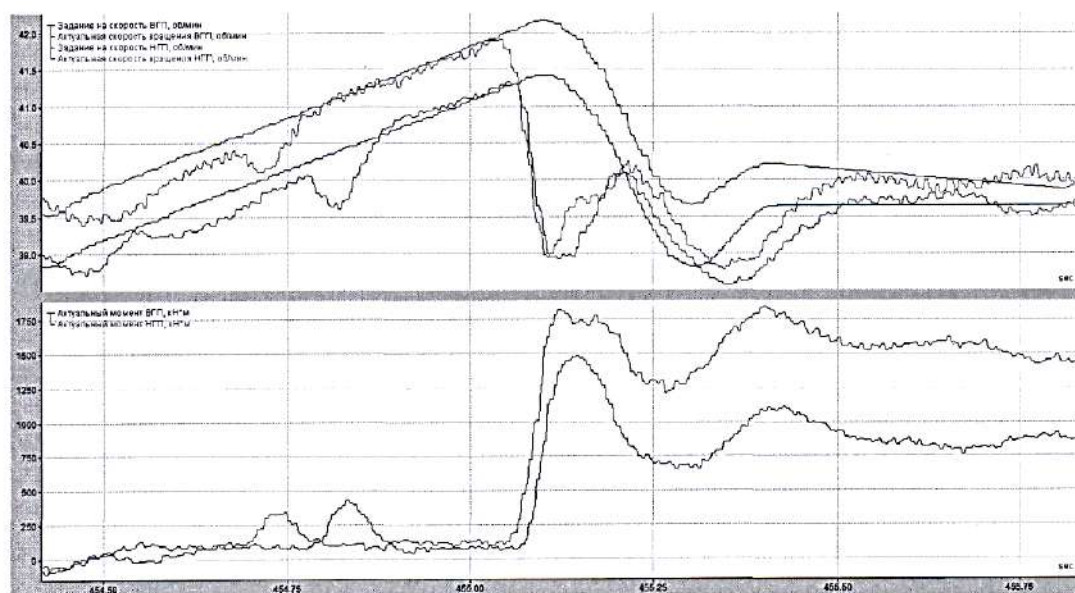


Рис. 2. Захват на участке ускорения с компенсацией динамического момента

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

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

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

Выводы

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

– снижение динамических нагрузок электрического и механического оборудования горизонтальной клетки;

– снижение внеплановых простоев за счет сокращения аварий по причине поломки электрического и механического оборудования.

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

Рекомендации:

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

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

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

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

Начальник ЦЭТЛ

И.о. начальника ПТЛ

И.о. инженера по техническому надзору (электрооборудования)

Научный руководитель НИОКР

Шубин А.Г.

Банщиков В.С.

Шапарь А.А.

Радионов А.А.

УТВЕРЖДАЮ:
 И.о. Начальника ЦЭТЛ ОАО «ММК»
 Д.В. Куряев
 Б.А. Сарычев
 2014 г.

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

2014 г.

АКТ**опытно-промышленных испытаний**

способа и алгоритмов снижения динамических нагрузок электроприводов непрерывной подгруппы клетей 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:

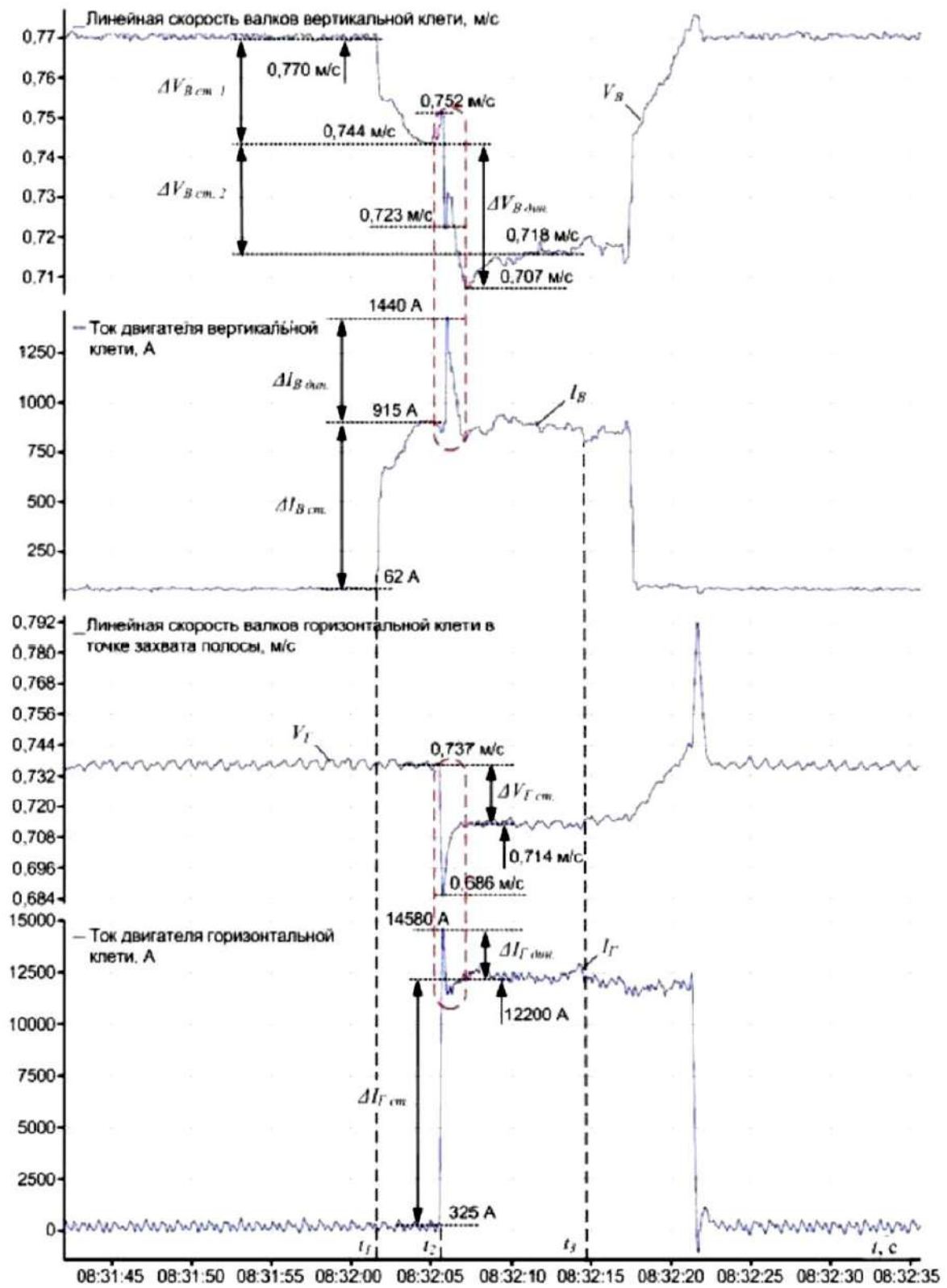
- захват полосы валками горизонтальной и вертикальной клетки;
- повторный динамический процесс в горизонтальной клетке при захвате полосы валками последующей вертикальной клетки;
- установившийся режим совместной прокатки в смежных вертикальной и горизонтальной клетях;
- выпуск полосы.

Анализировались режимы электроприводов при различном сорimente 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 задания скоростей (рис. 1, а) и при реализации разработанного способа согласования скоростей (рис. 1, б).



а

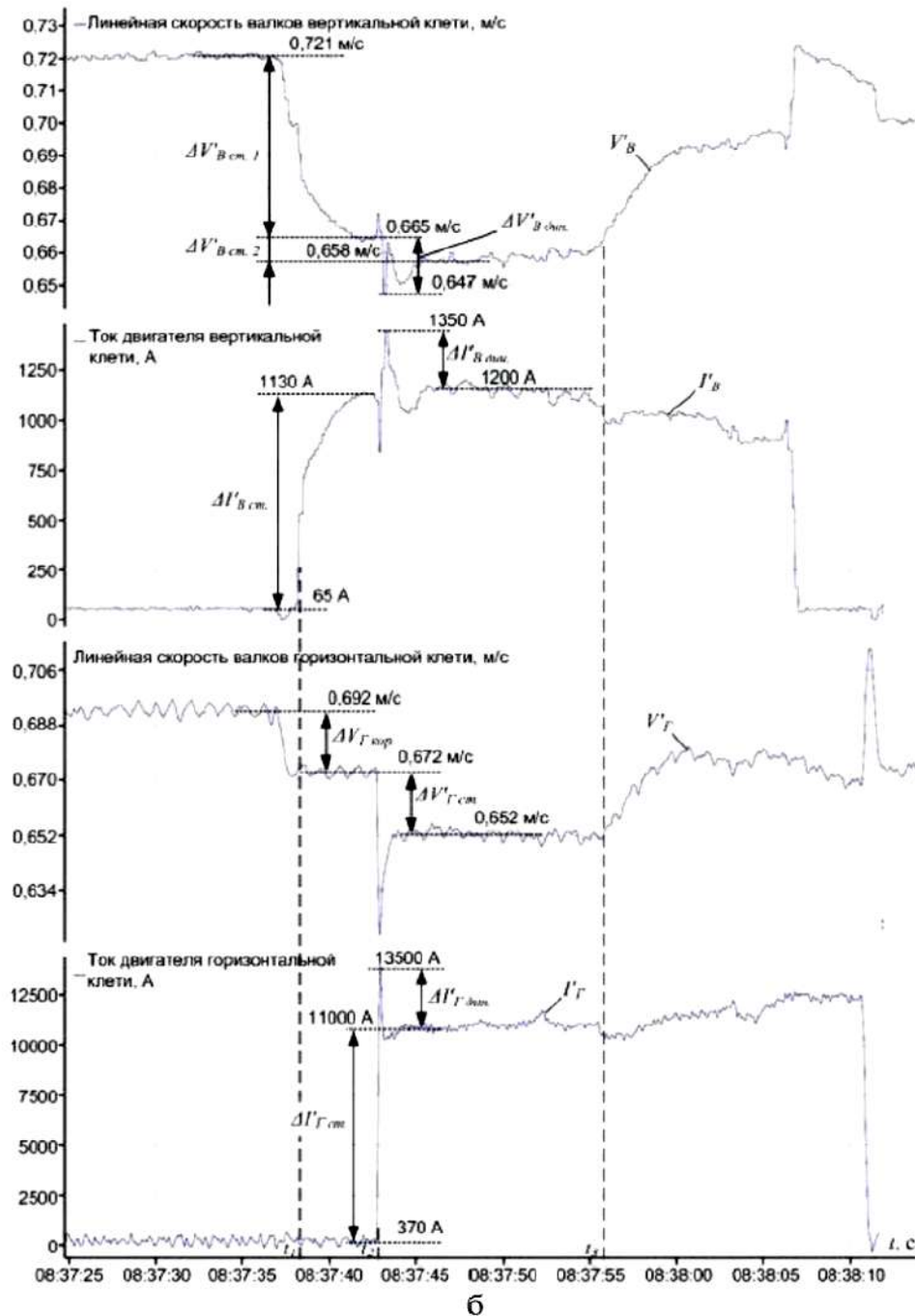


Рис. 1. Переходные процессы линейных скоростей и токов электроприводов горизонтальных и вертикальных валков клетки №4 в существующей системе – а и при реализации разработанного способа согласования скоростей – б

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 обрезаю 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.

РАСЧЕТ

**годового экономического эффекта от внедрения результатов НИОКР
«Разработка и внедрение способа снижения динамических нагрузок электроприводов
непрерывной подгруппы клетей стана 2000»**

При расчете экономического эффекта учитывались: сокращение времени простоев стана, снижения расходного коэффициента в результате уменьшения обрезки, сокращение 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, $P_{cp} = 778$ т/час;

Δt – 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;

ΔP – 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, $K_2 = 0,3$.

3. Сокращение объема брака из-за отказов главных электроприводов клетей непрерывной подгруппы:

$$\mathcal{E}_3 = \Delta B \times C \times K_3 = 42 \times 3889,94 \times 0,3 = 49 \text{ тыс. руб.}$$

где ΔB – сокращение объема брака из-за отказов главных электроприводов, $\Delta B = 42$ т;

K_3 – коэффициент влияния на сокращение объема брака $K_3 = 0,3$.

4. 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 объема брака, $K_4 = 0,3$.

5. Суммарный экономический эффект:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4 = 683,4 + 1296 + 49 + 73,2 = 2101,6 \text{ тыс. руб.}$$

Начальник управления экономики

Начальник ЛПЦ-10

Электрик цеха

А.А. Еремин

И.В. Казаков

А.Н. Гостев

11.02.2015