

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
РАДИОНОВ Андрей Александрович

Официальные оппоненты: МЕЩЕРЯКОВ Виктор Николаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный  
технический университет», г. Липецк,  
заведующий кафедрой автоматизированного  
электропривода и робототехники

ШЕВЫРЕВ Юрий Вадимович,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
г. Москва, профессор кафедры энергетики и  
энергоэффективности горной промышленности

МИКИТИНСКИЙ Александр Петрович,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Южно-Российский  
государственный политехнический университет  
(НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск,  
доцент кафедры электроснабжения и  
электропривода

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится 17 апреля 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного  
совета 24.2.324.05 на базе федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский  
государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000,  
Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и  
на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан            января 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент



К.Э. Одинцов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время все 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.

Одной из ключевых задач интеллектуального производства является внедрение цифровых технологий и цифровых двойников (ЦД) на агрегатах, находящихся в эксплуатации. Несмотря на неоднозначность определений, ЦД представляется состоящим из физического объекта, виртуального аналога при условии обмена данными между ними. Важность цифрового двойника признается как в академических кругах, так и представителями промышленности.

Внедрение цифровых технологий востребовано на металлургических заводах и может быть реализовано при реконструкции прокатных станов. Однако процедуры виртуального ввода в эксплуатацию и виртуальных пуско-наладочных работ (ПНР) применяются крайне редко. Основными причинами являются отсутствие разработанных ЦД электротехнических комплексов и методологии их создания без применения цифровых платформ. Также крайне редко используются технологии виртуальной настройки, в том числе аппаратное моделирование в цикле (Hardware-in-the-loop – HIL).

Данное направление разрабатывается ведущими компаниями-производителями промышленного оборудования. В их числе компании SMS group, Siemens AG (обе – Германия), GE Energy (США), ABB (Швеция и Швейцария) и др. Концептуальные направления развития ЦД прокатных станов обоснованы Primetals Technologies – совместное предприятие Mitsubishi Heavy Industries и партнеров (Япония). Утверждается, что с развитием цифровизации произошла революция в прокатном производстве.

Вместе с тем авторы ряда научных статей 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 применения цифровых технологий на действующих агрегатах низкая.

В связи с изложенным, представляется обоснованной разработка относительно простых объектно-ориентированных ЦД. Они должны создаваться на базе известных программ, используемых на промышленных предприятиях и в научных организациях. Повсеместно распространенным программным средством является Matlab (со своими приложениями), который является изученным и успешно применяется при разработке систем управления. На его основе предлагается новая научная концепция цифровизации прокатного производства, основой которой является цифровой двойник.

Для практических целей необходима разработка ЦД, предназначенных для применения на отдельных этапах жизненного цикла. В представленной диссертации они получили название «объектно-ориентированные цифровые двойники».

Поставлена задача их разработки для виртуального ввода в эксплуатацию, наладки и настройки в процессе модернизации электротехнического оборудования, а также для мониторинга технического состояния в режиме штатной эксплуатации.

Исследования выполняются для агрегатов ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»), являющегося лидером отечественной металлургии. Разработки выполняются для прокатных станов 5000, 2500, 2000, 1700, а также агрегата поперечной резки (АПР) горячекатаной полосы. Предметами изучения являются виртуальный ввод в эксплуатацию, мониторинг координат и технического состояния, совершенствование алгоритмов управления электроприводами с учетом их взаимосвязи через металл. Подобные задачи решались многими исследователями, однако добиться результатов без существенных упрощений в большинстве случаев не удавалось. В современных условиях, благодаря развитию цифровых технологий и ЦД, 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. Существенный вклад в их развитие внесли В.П. Бычков, В.И. Ключев, О.И. Осипов, В.Н. Мещеряков, Ю.С. Усынин, Г.Я. Пятибратов, А.Р. Колганов и другие. Также следует отметить вклад специалистов-прокатчиков, работы которых легли в основу большинства современных систем автоматизации.

**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 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 клетей с целью ограничения силовой взаимосвязи в режимах совместной прокатки. Применение НПЛ 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 задатчика 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.

**Методы 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; под-

ключение ПЛК, оснащенных разработанными алгоритмами, к физическому объекту, перевод в эксплуатацию; «перенос» цифрового двойника в ПК более высокого уровня с целью on-line мониторинга состояния оборудования.

### **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 промышленных ЦД на основе НЛ, 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 НЛ.

4. Методика анализа влияния несинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и «физической частью» на точность двойникового. 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 электропривода 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.

**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 двойникования 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 пакетов разработки систем автоматизации, поддерживающих симуляцию и тестирование в реальном времени, включая быстрое прототипирование и аппаратное моделирование HIL.

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 НЛ 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.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы: п.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические ... преобразователи энергии ..., системы электропривода, ...»; п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления»; п.5. «Разработка эффективного ... и безопасного полного жизненного цикла электротехнических комплексов, включающего создание, эксплуатацию ... их компонентов».

**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 (все публикации в журналах категорий K1 и K2), 24 публикации в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и WOS, 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.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 321 наименований. Работа изложена на 402 страницах основного текста, содержит 178 рисунков, 45 таблиц и приложение объемом 46 страниц.

**Личный вклад автора.** Все результаты получены лично автором либо под его руководством. Разработаны основополагающие научные положения по созданию ЦД и цифровых теней в электротехнических системах прокатных станков. Разработаны виртуальные модели электроприводов и гидравлических систем, взаимосвязанных через металл, выполнено компьютерное моделирование. Предложена конфигурация ЦД, дана оценка временных задержек при обмене информацией. Разработаны и практически применены ЦД на основе ПЛК с двухъядерными процессорами. Научно обоснованы и разработаны способы управления электроприводами, обеспечивающие снижение аварийности и повышение качества продукции. Соискателем лично выполнены наладка и ввод в эксплуатацию разработанных алгоритмов и систем управления. Проведены экспериментальные исследования, дана оценка технико-экономического эффекта.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрено состояние проблемы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи работы, обозначены направления исследований.

**Первая глава** посвящена обзору концептуальных направлений создания ЦД и анализу возможностей их применения на агрегатах прокатного производства. Даны определения цифровых двойников, выполнена их классификация в соответствии с уровнем интеграции данных. 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 и (или) его составными частями». Он представляется состоящим из физического объекта, виртуального аналога при условии обмена данными между ними (рис. 1, а).

Рассмотрена взаимозависимость цифровых двойников, цифровых теней и цифровых моделей. Основным различием является направление информационных потоков в их структурах (рис. 1, б). Цифровую модель обычно характеризуют как представление актива из физического мира в виртуальном мире, требующее ручного обновления изменений. Цифровая тень имеет односторонний поток данных от реального к цифровому объекту. Типичными задачами являются моделирование в реальном времени и мониторинг процесса.

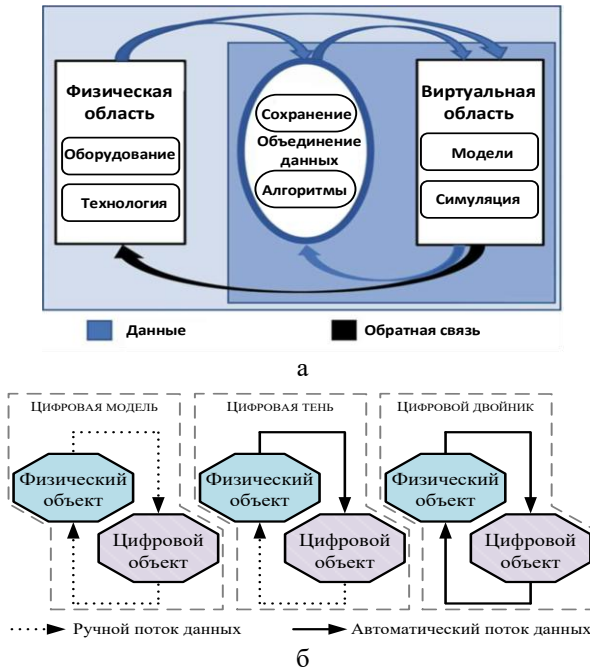


Рис. 1. Пояснение к ЦД электротехнического объекта (а) и схемы обмена информацией в структурах цифровой модели, цифровой тени и ЦД (б)

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, и другого доступного программного обеспечения.

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 в цикле (*Hardware-in-the-loop simulation – HIL*). HIL – это тип моделирования в реальном времени, которое используется для тестирования алгоритмов управления. Используются промышленные компьютеры (ПК) для виртуального представления модели, а также ПЛК, оснащенные операционными системами реального времени (в частности, QNX, RTLinux, ОС Linux с патчем реального времени).

Предложена методика виртуальной настройки электротехнических систем, включающая предварительное обоснование структуры системы управления и передаточной функции регулятора и дальнейшую настройку средствами HIL. При таком подходе смысл в строгом синтезе регуляторов теряется, что сокращает затраты и время ввода объектов в эксплуатацию.

Впервые обоснован объектно-ориентированный подход к созданию цифровых двойников, определено применение категорий цифрового двойника при его реализации. Рассмотрены следующие категории:

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

Дано обоснование разработки и внедрения объектно-ориентированных ЦД для промышленных электротехнических систем. Отмечены преимущества подхода: ориентация на конкретный объект (электротехническую систему) и разработка на базе доступного ПО без применения цифровых платформ.

Также в главе представлены объекты исследования – электротехнические комплексы агрегатов ПАО «ММК», на примере которых разрабатываются ЦД и цифровые тени (рис. 2). К ним относятся электроприводы горизонтальной клетки толстолистового стана 5000, комплекс моталок широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 2500, взаимосвязанные электроприводы реверсивного стана 1700 холодной прокатки, электропривод летучих ножниц агрегата поперечной резки горячекатаной полосы, электромеханические системы клеток черновых групп станов 2500 и 2000. Исследования выполнены в связи с вводом агрегатов в эксплуатацию либо обусловлены их реконструкцией с заменой оборудования.

Обоснована разработка цифровых теней электромеханического оборудования: наблюдателя состояния на основе фильтра Калмана, наблюдателя упругого момента с автоматической настройкой регулятора и наблюдателя температуры двигателей главных электроприводов верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП). По-

ставлены задачи разработки быстродействующей системы предотвращения аварий и системы тепловой защиты двигателей.



Реверсивная клеть  
стана 5000



Моталки стана 2500



Реверсивный стан 1700



Агрегат поперечной  
резки полосы



Черновая группа ШСГП  
2500



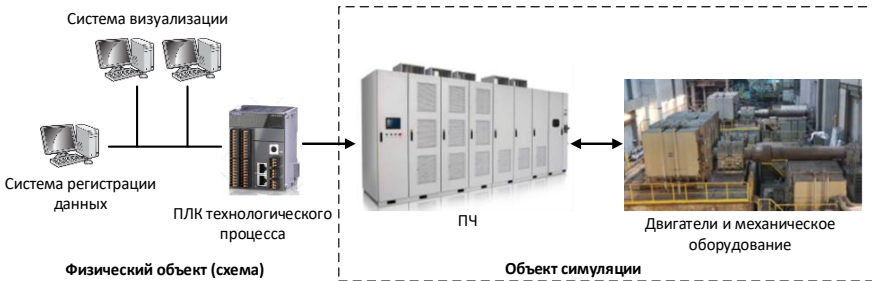
Непрерывная  
подгруппа ШСГП  
2000

Рис. 2. Объекты исследований и виртуального ввода в эксплуатацию

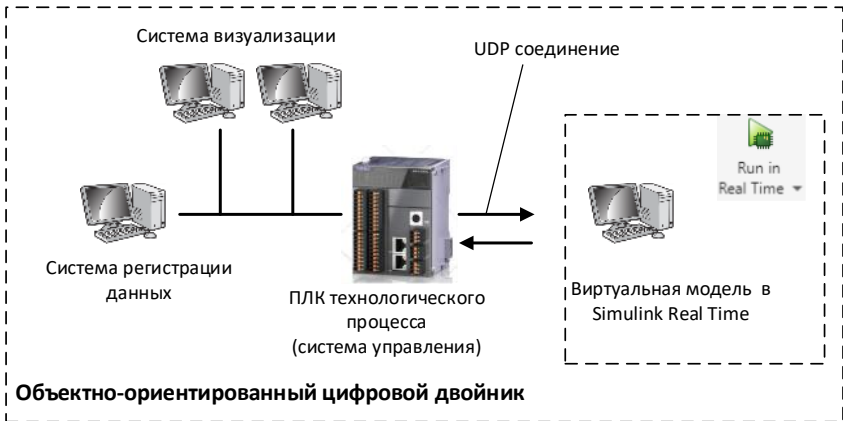
**Во второй главе** рассматриваются научные положения и методика создания цифровых двойников электротехнических систем прокатных агрегатов. Разработана методика, включающая следующую последовательность действий: 1) разработку цифровых моделей и алгоритмов систем управления в среде виртуального моделирования (применяются Simulink Real Time, Simscape Hydraulics и др.); 2) разработку цифрового двойника, для этого алгоритмы моделей реализуются на вычислительных мощностях ПЛК, либо на отдельных ПК; 3) «перенос» виртуальных моделей и алгоритмов управления в программу управляющего контроллера; 4) виртуальную настройку (моделирование HIL); 5) подключение ПЛК с разработанными алгоритмами управления, к физическому объекту; 6) перевод в эксплуатацию.

Рассмотрена конфигурация цифрового двойника в структурах ПК либо ПЛК. Предложены следующие варианты размещения виртуальной модели: 1) в отдельном вычислительном комплексе; 2) в том же ПЛК, где находится отлаживаемая программа; 3) на виртуальных машинах со встроенным программным обеспечением; 4) на ПЛК с многоядерным процессором. Рассмотрен принцип создания ЦД электромеханических систем клетки стана 5000 на базе доменов Simulink Real Time и модулей пакета Simscape. На рис. 3, а изображено схематичное представление по

первому варианту. При использовании симулятора процесса прокатки объект симуляции заменен на виртуальную модель, реализованную в Simulink Real Time (рис. следующего объекта, в состав которого входят ЦД-прототипы и ЦД-экземпляры.



а



б

Рис. 3. Блок-схемы электроприводной системы (а) и объектно-ориентированного DTA (б) электропривода клетки

Разработаны цифровые модели электропривода, гидравлического нажимного устройства (НУ), взаимосвязи НУ и валков через металл и системы автоматического регулирования (САР) толщины. В качестве примера, на рис. 4 приведен фрагмент модели электропривода.

Методом виртуального моделирования дана оценка времени задержки сигналов в цифровых двойниках электроприводных и гидравлических систем. Выполнен анализ реального запаздывания сигналов крутящего момента при их передаче от САР, выполненной в ПЧ, к программе регулирования в ПЛК. Сделан вы-

вод, что запаздывание сигнала момента составляет 6...10 мс, что соизмеримо с задержками в ЦД при замене реального интерфейса на связь между ПЛК и моделью по UDP протоколу.

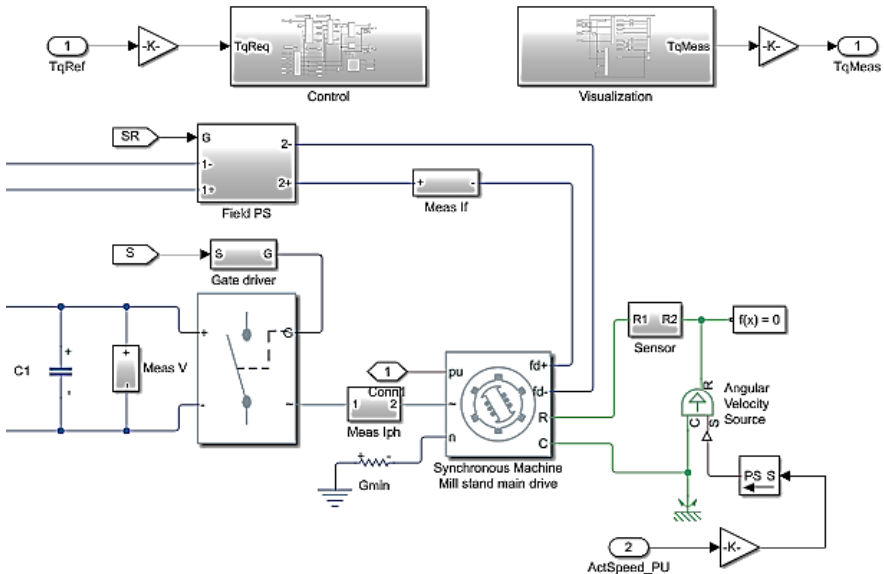


Рис. 4. Структура полного контура регулирования момента

Для ограничения величины запаздывания целесообразно совместное размещение виртуальной модели и структуры системы управления в ресурсах ПЛК на основе многоядерного процессора. 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.

**Третья глава** посвящена применению объектно-ориентированных ЦД для виртуального ввода в эксплуатацию электротехнических комплексов прокатных агрегатов.

### *Двухклетевой стан холодной прокатки 1700 «тандем»*

Представлена техническая реализация концепции объектно-ориентированных ЦД при вводе в эксплуатацию двухклетевого реверсивного стана. Рассмотрены модули ЦД-прототипов и ЦД-экземпляров, входящие в структуру агрегированного ЦД стана. Структурная схема агрегированного ЦД, поясняющая концепцию, представлена на рис. 5.

Согласно этой структуре, для любого прокатного стана должны разрабатываться следующие двойники и цифровые тени:

- ЦД-экземпляры (DTI) электроприводов клеток и моталок;
- ЦД-прототипы (DTP) гидравлических устройств, моделирующие очаг деформации, усилие прокатки и т.д.;
- ЦД-экземпляры, моделирующие взаимосвязь между клетями, а также между последней клетью и моталкой;
- цифровые тени (Digital Shadows – DS) для измерения толщины плоскостности (на рис. 5 не показаны).

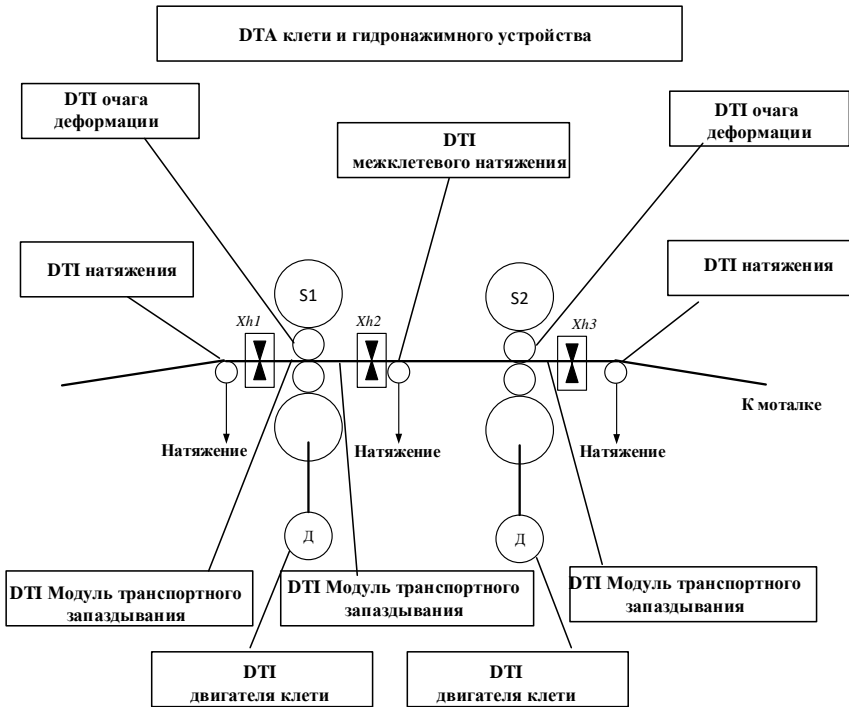


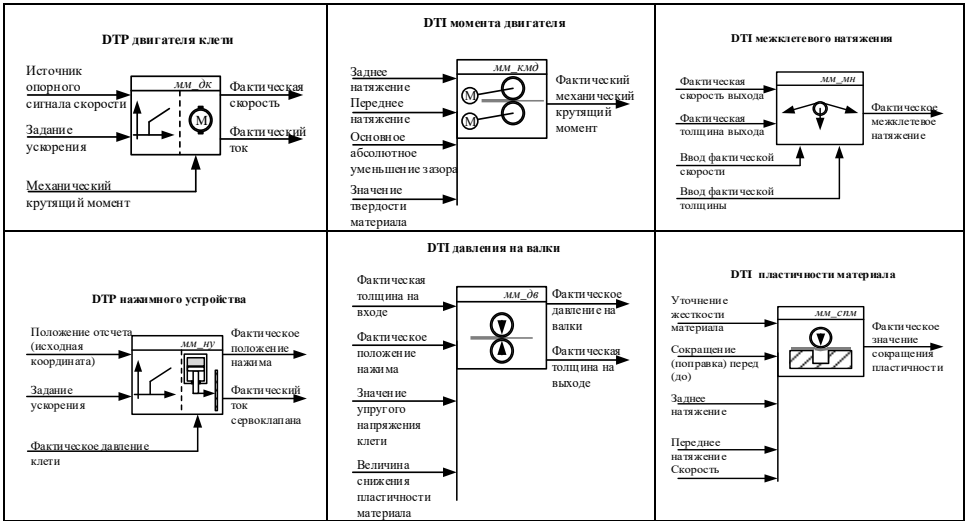
Рис. 5. Фрагмент структуры агрегированного ЦД двухклетевого стана

Условные обозначения разработанных ЦД-прототипов и ЦД-экземпляров приведены в табл. 1. При их разработке применены модули, входящие в библиотеки Simulink и Simscape.

Дана экспериментальная оценка результатов виртуального ввода в эксплуатацию. С целью оценки адекватности разработанных ЦД и физического объекта проведена серия экспериментов, в которых сравнивались параметры в переходных режимах, полученных на агрегированном ЦД и на реальном объекте. Получены осциллограммы, которые позволяют утверждать, что изменения всех координат идентичны. Это позволило сделать выводы об эффективности использования цифровых двойников для настройки электротехнических систем.



Таблица 1. Основные ЦД-прототипы и ЦД-экземпляры, входящие в структуру агрегированного двойника стана (DTA)



### Моталки широкополосного стана горячей прокатки

Выполнена разработка агрегированного ЦД моталок стана 2500 (рис. 6). Рассмотрена техническая реализация в процессе реконструкции с заменой оборудования. Дано подтверждение адекватности результатов НИЛ и физической настройки электротехнических систем.

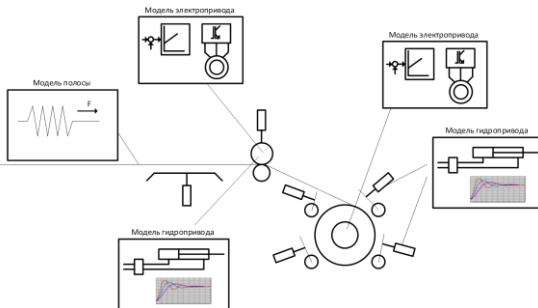


Рис. 6. Структура, поясняющая принцип построения ЦД моталки

Алгоритм системы управления и виртуальная модель размещены в контроллерах, управления станом. 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. Для передачи информации использовался стандартный протокол связи Profibus.

С целью подтверждения адекватности разработанного DTA физическому объекту проведены экспериментальные исследования, в ходе которых сравнивалось изменение параметров электро- и гидроприводов в переходных режимах.

### Летучие ножницы АПП

Рассмотрено применение НПЛ при реконструкции летучих кривошипных ножиц агрегата поперечной резки полосы. Это случай, когда виртуальная вычислительная машина поступает совместно с контроллером. Выполнена разработка цифровой системы управления на контроллере семейства REGUL с программным обеспечением Astra.IDE без использования реального оборудования. Разработан симулятор для проекта электропривода ножиц.

RegulRTS (рис. 7) 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.

Для реализации программы запускаются две виртуальные машины. Машину VM1 (рис. 7) предоставил разработчик ПЛК (в данном случае это Prosoft Systems – производитель контроллеров Regul 500). Она оснащена системой реального времени QNX и позволяет имитировать ПЛК Regul 500. Виртуальная машина VM2 содержит систему сбора и архивации данных. Таким образом создается виртуальный ПЛК, позволяющий выполнить настройку алгоритмов.

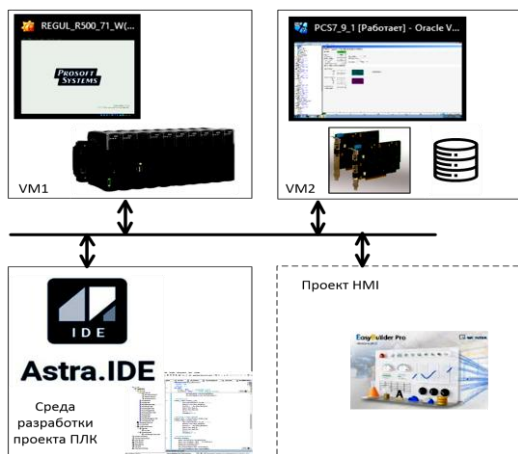


Рис. 7. Системное ПО RX RegulRTS

Тестируемая система управления вместе с моделью объекта находится в этом виртуальном ПЛК. Машина VM2 с операционной системой Win7 позволяет собирать и хранить нужные для отладки программы сигналы с дискретой, соизмеримой с циклом программы ПЛК. На компьютере размещается среда разработки Astra IDE, созданная на основе ПО Controller Development System (Codesys). Также возможен запуск системы визуализации технологического процесса (HMI).

На базе Astra.IDE разработан алгоритм управления ножницами, выполнены виртуальные пуско-наладочные работы. Анализировались осциллограммы координат, полученных от системы управления и от виртуальной модели при разных скоростях движения полосы. Подтверждена удовлетворительная точность.

В целом, подтверждена эффективность виртуального ввода в эксплуатацию сложного, многосвязного технологического агрегата за счет НПЛ. Доказано сокращение времени ввода в эксплуатацию от нескольких дней до нескольких часов. Предложенный объектно-ориентированный подход позволяет создавать много-

кратно используемые, адаптируемые виртуальные представления реальных промышленных систем. Благодаря НПЛ теряет остроту (и в какой-то степени актуальность) задача строго синтеза регуляторов систем автоматического регулирования технологических параметров и координат электроприводов.

В результате обосновано новое направление применения цифровых двойников – это совершенствование алгоритмов при настройке и адаптации систем управления. Такую адаптацию можно выполнять по мере развития технологии и/или изменения требований к производительности и качеству продукции. При этом нет необходимости совмещать эту процедуру с реконструкцией агрегата и заменой оборудования.

### ***ЦД на основе ПЛК с многоядерными процессорами***

Современной тенденцией развития систем технологической автоматизации является применение ПЛК на основе многоядерных процессоров. Это дает возможность разместить симулятор объекта на отдельном ядре ПЛК и исполнять операции в цикле до 1 мс. Также существуют процессорные модули с возможностью реализации времени цикла 200 мкс. Для таких ПЛК перспективным является применение упомянутого выше ПО Codesys. Названное сочетание аппаратных и программных средств позволяет реализовать распределение задач по ядрам с выделением ядра под симулятор объекта, что способствует повышению быстродействия и снижению стоимости комплекса.

Предложены конфигурации цифровых двойников на ПЛК с двухъядерным процессором («двухъядерном ПЛК»). Результаты исследований показывают, что быстродействие такого ПЛК в комплексе с Codesys в несколько раз превышает потребности, возникающие при решении технологических задач. Это открывает широкие перспективы внедрения и дальнейших исследований в данном направлении.

Для реализации симулятора объекта управления обоснованы три конфигурации (рис. 8):

**Вариант 1.** Размещение основной программы и программы симуляции на разных ядрах процессора, рис. 8, а.

**Вариант 2.** Использование дополнительного 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 (на рис. 8 не показан).

**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 (рис. 8, б).

С целью реализации симулятора для отладки ПО и виртуальных пуско-наладочных работ разработаны модели электроприводов в виде структур в среде Codesys. В качестве примера, на рис. 9 представлена модель 2-х массового электропривода. Она содержит две вложенные модели, одна из которых (DriveModel) разработана для электропривода с регулированием скорости, а другая содержит модель 2-х массово-инерционной системы (Model2MassMech). Время цикла программы симулятора 1 мс.

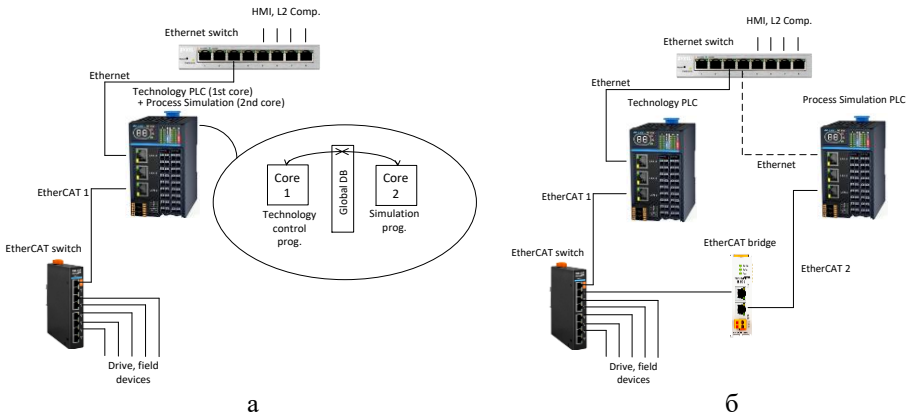


Рис. 8. Организация обмена информацией в двухъядерном ПЛК по вариантам 1 (а) и 3 (б)

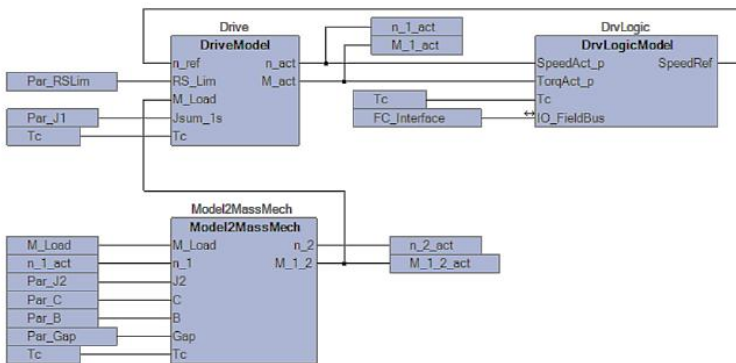


Рис. 9. Модель автоматизированного электропривода в среде Codesys 3.5

С помощью «двухъядерного» ПЛК и Codesys 3.5 выполнено тестирование программы для исследования переходных процессов взаимосвязанных электроприводов клетки с использованием симулятора объекта управления. Также исследовано несколько промышленных электроприводов, во всех случаях установлен кратный «запас» по быстродействию. В результате подтверждены перспективы применения рассмотренного аппаратно-программного комплекса для виртуальной наладки систем автоматизации металлургического производства.

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

**Четвертая глава** посвящена совершенствованию алгоритмов управления взаимосвязанными электроприводами прокатных станов (структурные схемы и описание всех разработанных систем управления не приводятся в связи с ограниченным объемом автореферата, они рассмотрены в диссертации и патентах на изобретения).

### ***Регулятор деления нагрузок с переключающейся структурой***

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 недопустим, поскольку приводит к потере управляемости электропривода и увеличению времени выравнивания нагрузок.

Структура электроприводов клетки стана 5000 представлена на рис. 10. С целью выравнивания нагрузок ВГП и НГП в нее включен регулятор деления нагрузок. Однако опыт эксплуатации показал, что он не обладает необходимым быстродействием. Поэтому процесс выравнивания затянут, а при прокатке коротких раскатов в первых проходах РДН вообще не включается в работу.

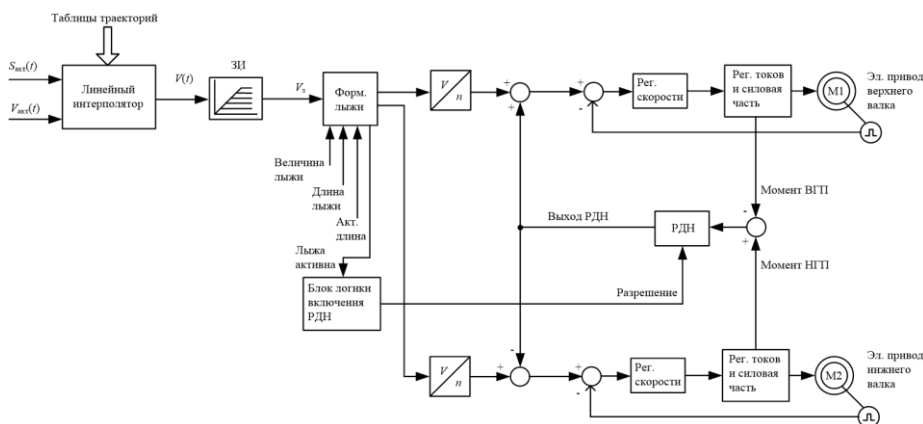


Рис. 10. Структурная схема системы управления электроприводами

Для устранения недостатка выполнена разработка системы управления ВГП и НГП на базе регулятора деления нагрузок с переключающейся структурой (патенты №2809888 и №2822900). Проведены исследования методом компьютерного моделирования и экспериментальные исследования на стане 5000. Получены осциллограммы, подтверждающие преимущество, заключающееся в сокращении времени согласования нагрузок ВГП и НГП по окончании формирования «лыжи». Однако результаты исследований показали, что быстродействия такого РДН по-прежнему недостаточно.

### Разработка РДН с нечеткой логикой

В связи с изложенным разработан принципиально новый РДН на основе алгоритмов нечеткой логики с использованием ресурса *Fuzzy Logic Toolbox for MatLab*. Техническим отличием, определяющим новизну, является включение двух каналов регулирования скоростей: по разнице моментов двигателей ВГП и НГП и по производной их разницы. К тому же нечеткий регулятор (НР) впервые разработан для управления двумя взаимосвязанными электроприводами прокатной клетки. Для его реализации введен дополнительный вход, на который подается отфильтрованная производная разницы моментов, а на выход (после дефаззификации) подключен блок в виде интегральной части  $K_I/p$ . Полученная структура РДН с НЛ приведена на рис. 11, а, типы сигналов в схеме показаны на рис. 11, б. Используются два входных сигнала: первый – разность моментов электроприводов ( $M_1-M_2$ ), второй – скорость изменения разницы моментов.

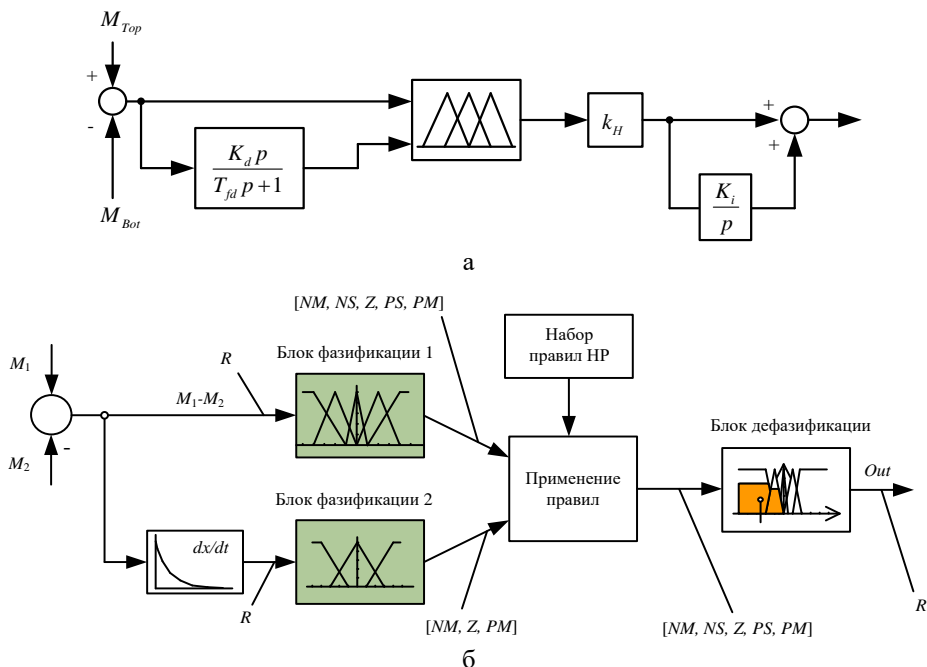
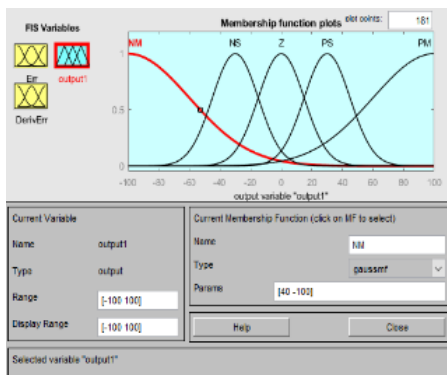


Рис. 11. Функциональная схема НР (а) и формирование сигналов в схеме (б)

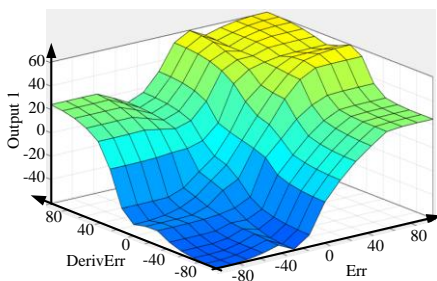
Рассмотрены операции, обеспечивающие нечеткий алгоритм управления: фаззификацию (задание лингвистической переменной функцией принадлежности), выполнение композиции правил регулятора и дефаззификацию, обеспечивающую переход от функции принадлежности к числовому значению. Приведен набор правил нечеткого регулирования производной ошибки.

На первом этапе функция выходного воздействия сделана более сглаженной как представлено на рис. 12, а. С этой целью принята функция Гаусса первого порядка. В результате моделирования установлено, что, благодаря принятому изменению, время согласования моментов уменьшилось от 0,8 с до 0,65 с.

В ходе изучения нечеткого регулятора сделан вывод, что необходимо создать зону нечувствительности для каждой из функций. В этой зоне при небольших изменениях разности моментов, их производной, а также выходного воздействия на регулятор не будут подаваться сигналы. Это поможет избежать рассогласования моментов в установившемся режиме. Для этого предложено использовать функцию Гаусса второго порядка. Зависимость выходного сигнала блока НЛ от входных сигналов ошибки и производной ошибки, построенная по этим правилам, представлена на рис. 12, б (размерности по осям – проценты). Данная поверхность представляет собой результат работы правил нечеткого вывода при выбранном методе дефазификации (алгоритм Мамдани).



а



б

Рис. 12. Фазификация выхода регулятора с помощью функции Гаусса – (а) и зависимость выхода блока НЛ (ось Output1) от входных сигналов: ошибки (Err) и производной ошибки (DerivErr) – (б)

Методом моделирования с использованием разработанной компьютерной модели подтверждено кратное сокращение времени согласования моментов электроприводов верхнего и нижнего валков. При реализации указанной функции принадлежности 5%-е согласование моментов происходит через десятые доли секунды после включения РДН. Это является косвенным подтверждением эффективности внедрения разработанного РДН с нечеткой логикой.

### ***Управление в режиме профилированной прокатки***

Разработаны способ управления гидравлическими НУ в режиме профилированной прокатки (патент №2786648). Отличием является автоматическое регулирования положения НУ на участках переменной толщины, а в квазиустановившемся режиме прокатки – автоматическое регулирования толщины раската.

По результатам моделирования и экспериментальных исследований сделан вывод, что двойной конический профиль «кость» в разработанной системе формируется с более высокой точностью, чем при реализации ранее разработанного алгоритма управления НУ с предупредлением. Это косвенно подтверждает достижение конечной цели, заключающейся в приближении формы листа в плане (вид сверху) к прямоугольной. В результате достигается снижение отходов с боковой и концевой обрезью.

### ***Согласование скоростей электроприводов взаимосвязанных клеток***

В соответствии с поставленными задачами разработаны технические решения, направленные на ограничение силового взаимодействия валков универсальной клетки в режиме совместной прокатки. Разработаны способы ограничения силового взаимодействия валков универсальной клетки (патенты №2620424 и №2687354). Также разработан способ автоматического управления электроприводами в черновой группе клеток непрерывного стана (патент №2787290). По результатам экспериментальных исследований даны рекомендации по его внедрению на стане 2500.

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

### ***Наблюдатель состояния на основе фильтра Калмана***

Основной проблемой, возникающей при разработке KF для электроприводов прокатных станов, являются сложность учета момента прокатки и высокая скорость заполнения очага деформации при входе раската в клеть. Кроме того, электромеханические системы обладают существенной нелинейностью, которая обусловлена наличием угловых зазоров в шпиндельных соединениях. Поэтому применение классического KF для двухмассовых систем с зазором и ударным приложением нагрузки вызывает затруднения.

В связи с этим ставится задача разработки наблюдателя упругого момента и момента второй массы двухмассовой системы клетки на основе KF с дополненным вектором состояния, получившего название дополненного фильтра Калмана (Augmented Kalman Filter – AKF). Отличием матричных уравнений АКФ является добавление в вектор состояния момента нагрузки 2-й массы двухмассовой системы. Процедура нахождения элементов матриц автоматизирована за счет использования библиотеки Control System Toolbox™.

Реализация АКФ выполнена для стационарного состояния, т.е. предполагается, что матрицы модели в пространстве состояний и ковариации шума инвариантны во времени. Матричное уравнение (1), составленное с учетом этого условия, поясняет восстановление сигнала. Отличием является добавление в вектор состояния момента  $M_C$  нагрузки 2-й массы двухмассовой системы. Это позволяет учесть величину момента прокатки и скорость заполнения очага деформации при захвате.



$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} M_1 \\ \omega_1 \\ M_{12} \\ \omega_2 \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & \frac{1}{J_1} & 0 & 0 \\ \beta & C_{12} & -\beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 * J_2} & -C_{12} & \beta \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & -\frac{1}{J_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} M_1 \\ \omega_1 \\ M_{12} \\ \omega_2 \\ M_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_m K_{OM}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * [M_{1ref}] \quad (1)$$

После выполненных изменений вектор состояния системы записывается следующим образом:  $[X]=[M_1, \omega_1, M_{12}, \omega_2, M_c]$ .

Наблюдатель представляет собой модель, работающую параллельно с реальным объектом, непрерывно получающую от объекта сигналы, доступные для измерения (рис. 13). Искомые неизмеряемые сигналы объекта восстанавливаются в наблюдателе. 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  $X'$ . Благодаря этому операция дифференцирования сигналов, применяемая в известных аналогах, заменена интегрированием, что обеспечивает известные преимущества. Вектор  $U$  должен содержать момент нагрузки  $M_c$ , который сложно вычислить аналитически.

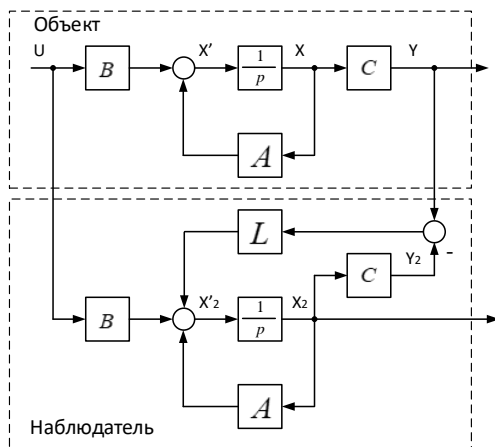


Рис. 13. Схема наблюдателя в матричной форме

Разработанный наблюдатель на основе АКФ реализован в электромеханических системах стана 5000. Путем виртуального моделирования с использованием реальных сигналов от электроприводов стана, доказана адекватность процессов, восстановленных наблюдателем, и реальных физических процессов. В подтверждение на рис. 14, а показаны осциллограммы скоростей и моментов ВГП, а на рис. 14, б – процессы, восстановленные наблюдателем. Анализировалась последовательность, включающая процесс разгона, захвата и аварии, 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.

Здесь момент нагрузки 2-й массы (окно 3) – это момент на валках (или момент прокатки). Этот фактический момент вычислен после экспорта сигналов из пре-

образователей частоты в Matlab и восстановления упругого момента наблюдателем. Данная процедура позволяет избежать вычисления момента нагрузки на каждом шаге по аналитическим зависимостям. За счет этого обеспечивается преимущество АКФ.

Восстановление упругого момента в сложном динамическом режиме происходит с удовлетворительной точностью. Это позволяет утверждать, что процессы будут адекватны во всех рабочих режимах.

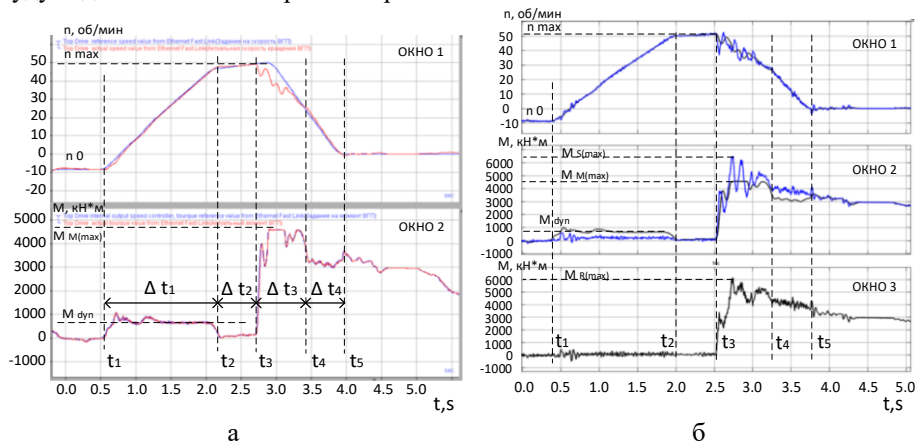


Рис. 14. Переходные процессы при аварийном отключении ВГП: осциллограммы, снятые на стане (а) и восстановленные наблюдателем (б)

### ***Наблюдатель углового зазора в шпиндельных соединениях***

Разработан наблюдатель углового зазора в шпиндельных соединениях системы «электропривод-клеть». Выполняется косвенное определение зазора путем интегрирования скорости во время его замыкания. Для этого осуществляется регулирование скорости по «треугольной» тахограмме без нагрузки.

Проведены исследования режимов электромеханической системы клетки методом компьютерного моделирования. Выполнена виртуальная настройка наблюдателя, для этого он реализован в Matlab Simulink с использованием доменов пакета Simscape. Подтверждена целесообразность его внедрения на стане 5000.

На основе наблюдателя разработаны информационная система мониторинга углового зазора и способ мониторинга износа шпиндельного соединения клетки толстолистового прокатного стана (патент №2838333). Поскольку процесс износа шпиндельного соединения длительный, предлагается проведение замеров после каждой замены рабочих валков (перевалки), осуществляемой с периодичностью один раз в несколько суток. Объем получаемой информации будет достаточным для диагностирования интенсивности развития дефекта. Система прошла промышленные испытания на стане 5000, в результате подтверждена эффективность разработанного алгоритма.

### ***Разработка наблюдателя температуры двигателя на основе четырехмассовой тепловой модели***

Разработана тепловая модель двигателя на базе доменов Simscape Thermal Models, содержащая 4 массы: обмотки статора и ротора, железо статора и ротора. Структура наблюдателя представлена на рис. 15. На входы виртуальной модели в пакете Matlab с фиксированным шагом подаются измеренные (либо заранее записанные), координаты электропривода, определяющие тепловое состояние объекта, – это токи статора и ротора. Тепловые массы представлены в виде следующих подсистем: передачи теплового потока (тепловыделения в обмотках и железе); выделение тепла в обмотке при протекании тока; выделение мощности в железе статора.

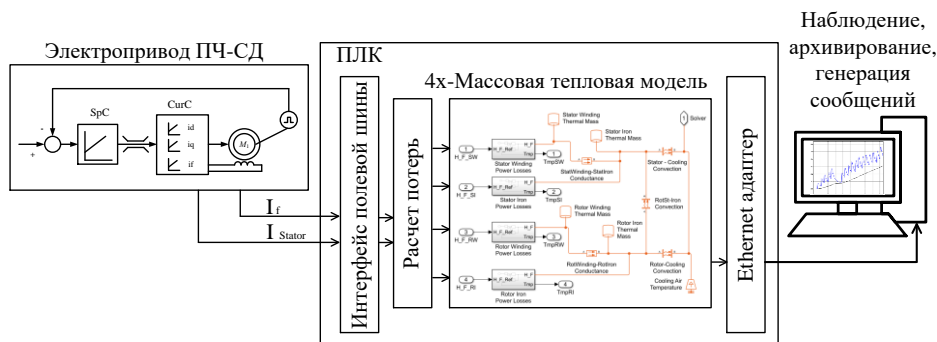


Рис. 15. Структура наблюдателя теплового состояния двигателя

С использованием разработанного наблюдателя выполнен анализ тепловых режимов двигателей по заранее сформированным массивам токов. Результаты приведены на рис. 16, а и 16, б для двигателей верхнего и нижнего валков, соответственно. На них построены графики температур отдельных масс 4-х массовой системы. Они соответствуют прокатке с большой заданной «лыжей», поэтому средние нагрузки во всех проходах отличаются. Соответственно различаются температуры двигателей за анализируемый (относительно короткий) интервал времени.

Далее выполнена валидация полученных результатов. Для этого проведено сравнение температур в фиксированные моменты времени, обозначенные на рис. 16, а, с результатами измерений в контрольных точках, выполненных пирометром непосредственно на двигателе. Доказано совпадение результатов с удовлетворительной точностью.

Разработанный наблюдатель температуры внедрен в эксплуатацию на стане 5000. Выполнена визуализация информации о тепловом состоянии двигателей. С целью обобщения результатов проведен анализ нагрева обмоток статоров и роторов двигателей ВГП и НГП за продолжительные интервалы времени. Подтверждены следующие преимущества наблюдателя:

– универсальность, поскольку может быть реализован в любом ПЛК управления клетью;

– отсутствие обслуживания, не подвержен износу поскольку является фрагментом программного обеспечения.

Он рекомендуется для расширенного внедрения на прокатных станах.

**Примечание.** Анализ нагрева отдельных масс двигателей прокатного стана по данным, сформированным в процессе прокатки, выполнен впервые.

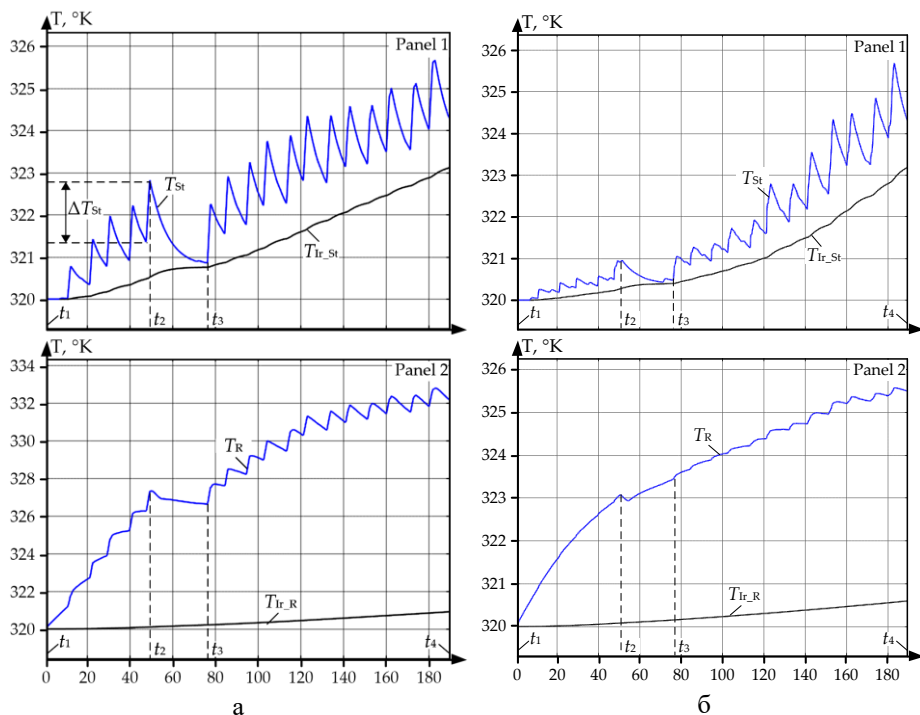


Рис. 16. Графики температур масс двигателей ВПП (а) и НПП (б), восстановленных наблюдателем: окна 1 – температура обмотки ( $T_{St}$ ) и железа статора ( $T_{Ir\_St}$ ); окна 2 – температура обмотки ( $T_R$ ) и железа ротора ( $T_{Ir\_R}$ ), ( $^{\circ}\text{K}$ )

**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 при захвате раскатов валкамикратно превышают установившийся момент при прокатке. Это приводит к перегрузкам электроприводов, накоплению усталостных разрушений и, как следствие, поломкам механического оборудования.

### ***Разработка наблюдателя упругого момента с упрощенным вычислительным алгоритмом***

В качестве альтернативы наблюдателю на основе фильтра Калмана разработан относительно простой наблюдатель упругого момента на шпинделе (рис. 17). Он представляет собой фрагмент ПО промышленного контроллера и осуществляет восстановление координат неуправляемой массы (валка) и момента шпинделя по параметрам управляемой массы: моменту и скорости двигателя. Для расчета момента используется регулятор автоподстройки, на вход которого поступают сигналы реально измеренной скорости 1-й массы и расчетной скорости 1-й массы. Данный регулятор «вычисляет» момент на шпинделях и стремится «привести в ноль» разницу между этими скоростями.

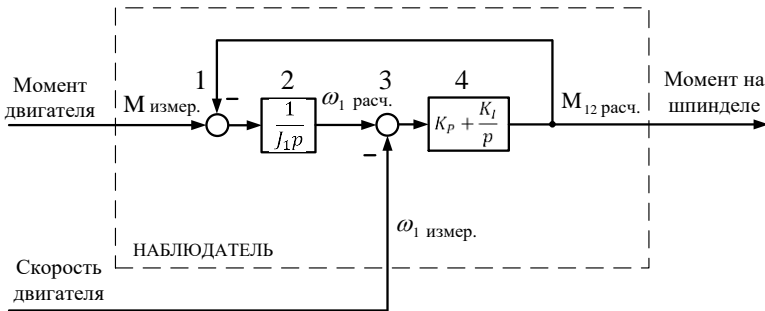


Рис. 17. Структурная схема наблюдателя

Разработана методика расчета параметров наблюдателя по методу ЛАЧХ по критериям полосы пропускания и желаемой частоты среза системы. Желаемая частота среза  $\omega_{cp,1} \leq \omega_{cp} \leq \omega_{cp,2}$  должна находиться в диапазоне:  $\omega_{cp,1} = \pi/T_1$  — нижняя граница;  $\omega_{cp,2} = \sqrt{1/\varepsilon \cdot T_1}$  — верхняя граница. Приведены зависимости для определения коэффициентов усиления, они определяются исходя из условия приближения ЛАЧХ разомкнутого контура к желаемой:

$K_P = J_1 \omega_{cp}$  — коэффициент усиления П-части;

$K_I = J_1 \omega_{cp}^2 / 10^{1.5}$  — коэффициент И-части,

Путем сравнения динамических процессов выполнена проверка адекватности. На рис. 18, а представлены осциллограммы последовательных ускорения и торможения электропривода, на рис. 18, б — аналогичные осциллограммы, зафиксированные в режиме захвата. Как видно, в обоих случаях кривая  $M_{ш(восст)}$  момента с наблюдателя полностью находится на фоне кривой  $M_{ш(измер)}$  момента, поступающего от физической измерительной системы.

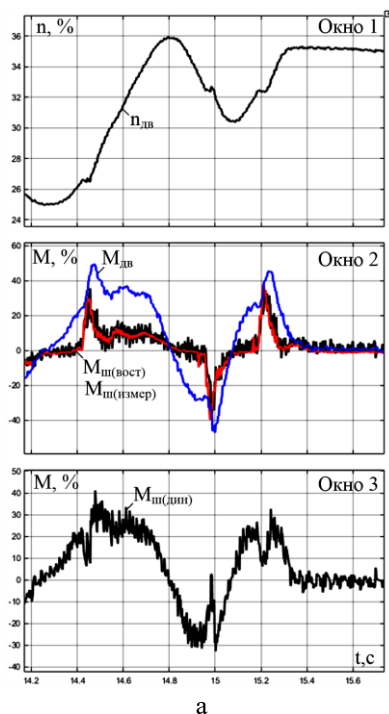
Представленные осциллограммы позволяют утверждать, что предложенный принцип обработки измеренных сигналов при правильной настройке ПИ-регулятора обеспечивает максимальное приближение восстановленных сигналов к физическим.

### Разработка способа ограничения динамических нагрузок

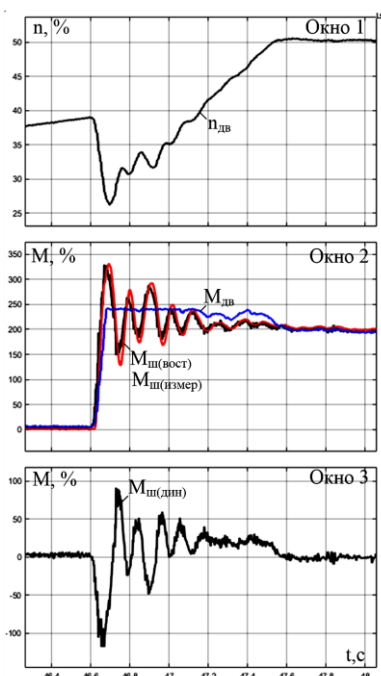
С целью обоснования способа выполнен анализ влияния скорости заполнения очага деформации при захвате раскатов валками на динамические показатели электромеханической системы прокатной клетки. В результате дано подтверждение, что при оценке динамики упругого момента темп нарастания нагрузки учитывать необходимо.

Разработан способ управления электроприводом клетки, отличительным признаком которого является адаптивное торможение после захвата с темпом, зависящим от величины нагрузки и скорости ее приложения. Для реализации способа разработана система электропривода, компенсирующая: нелинейные свойства двухмассовой системы, упругость вала и темп приложения нагрузки (скорость заполнения очага деформации), рис. 19. В ней использованы следующие принципы регулирования:

1. Предупреждение в виде адаптивного подтормаживания с учетом прогнозируемой нагрузки и времени ее нарастания.
2. Принцип регулирования по отклонению в виде воздействия обратной связи по упругому моменту, которая рассчитывается в наблюдателе.



а



б

Рис. 18. Осциллограммы ускорения и торможения (а) и захвата металла валками (б):  $n_{дв}$ ,  $M_{дв}$  – скорость и момент двигателя,  $M_{ш(измер)}$ ,  $M_{ш(восст)}$  моменты на шпинделе от датчика и от наблюдателя;  $M_{ш(дин)}$  – динамический момент от наблюдателя

Разработана методика определения параметров подтормаживания по критерию минимума амплитуды упругого момента (свидетельство №202266690). Обоснованы их оптимальные значения в зависимости от нагрузки. Максимальные значения упругого момента заносятся в 4-х мерный массив с координатами, соответствующими величине нагрузки, темпу ее приложения, темпу и величине замедления. На основании полученных данных заполняется таблица для интерполятора (рис. 19).

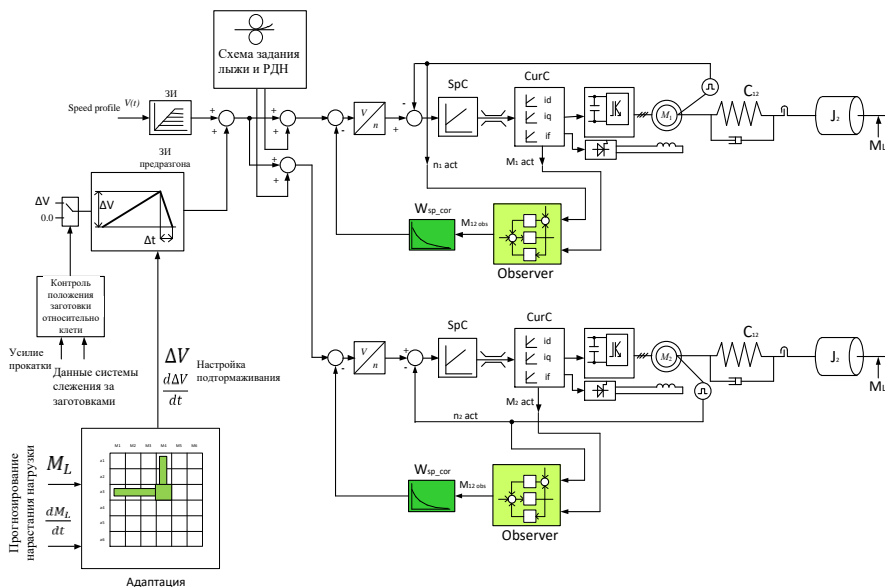


Рис. 19. Структурная схема системы, реализующей разработанный способ

Таким образом, разработана методика автоматизированного выбора параметров настройки системы управления: величины снижения скорости при подтормаживании  $\Delta V$  и темпа подтормаживания  $d\Delta V/dt$ . Она обеспечивает: 1) расчет темпов приложения нагрузки; 2) формирование четырехмерного массива данных для определения минимальной амплитуды упругого момента; 3) автоматический выбор и задание в интерполятор величины и темпа снижения скорости

Выполнены экспериментальные исследования алгоритма управления в электроприводах стана 5000. В результате анализа осциллограмм доказано, что отрицательный динамический момент, создаваемый при подтормаживании с оптимальным темпом, полностью компенсирует динамический момент, вызванный ударным приложением нагрузки.

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.

**В седьмой главе** представлены результаты экспериментальных исследований и промышленного внедрения алгоритмов управления электроприводами, рассмотренных в 4-й главе.

Упрощенная схема цифровых систем управления, внедренных на стане 5000, представлена на рис. 20. Получены следующие результаты:

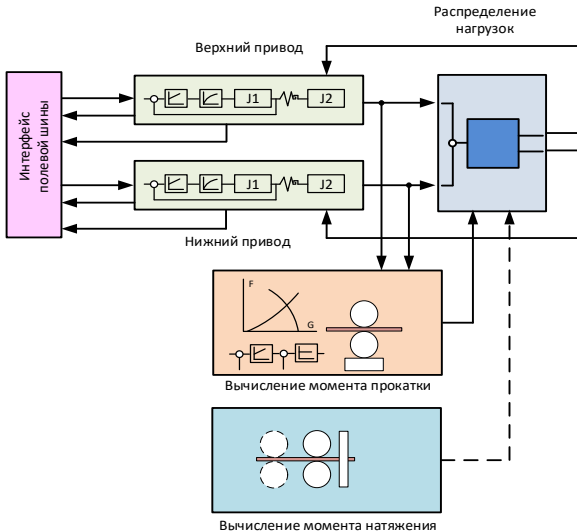


Рис. 20. Структура цифровых систем управления

тов. При одинаковом цикле прокатки продолжительность работы с одинаковыми моментами увеличивается в 1,8 раза.

3. Экспериментально подтверждено, что реализация алгоритмов предразгона с адаптивным торможением электроприводов после захвата, обеспечивает кратное снижение амплитуд упругих моментов при входе раскатов в клеть.

4. Представлены структура и схема реализации наблюдателя упругого момента на шпинделях, внедренного в электроприводах клетки стана 5000. Путем обработки массивов данных выполнены (впервые) экспериментальные исследования упругих моментов на шпинделях в аварийных режимах: 1) при отключении электроприводов во время прокатки; 2) при поломке вала и шпиндельного соединения; 3) в режиме нахлеста листа на валок.

5. Разработан способ предотвращения аварий, согласно которому предлагается выделять производную упругого момента на шпинделе и при высоком темпе нарастания момента (более 25000 кН·м/с) производить останов стана. Это предотвратит дальнейшее вращение шпинделя и аварийные последствия. Предложена структура системы управления, обеспечивающей экстренное торможение. Для ее реализации разработан адаптивный задатчик интенсивности торможения с переключающейся структурой.

1. Выполнено сравнение осциллограмм при проектном и предложенном алгоритмах САРТ в проходах с профилированной прокаткой. Подтверждены преимущества разработанного способа, заключающиеся в повышении точности регулирования толщины при перемещении нажимных устройств.

2. Исследован адаптивный РДН, внедренный на стане 5000. Экспериментально доказано, что, благодаря его повышенному быстродействию, осуществляется форсированное согласование момен-



6. Методом пассивного эксперимента получены осциллограммы для двух предаварийных режимов. В обоих случаях, благодаря действию внедренного алгоритма, в систему управления электроприводами поступил сигнал о недопустимом темпе увеличения упругого момента. В результате произведен экстренный останов электроприводов, время которого по сравнению с аналогичным показателем при проектной настройке сократилось в 2,4 раза.

7. Система защиты двигателей от перегрева, разработанная на основе четырех-массовой тепловой модели, внедрена в эксплуатацию на стане 1700. Согласно алгоритму на основании допустимых температур обмоток и железа формируются сигнал предупреждения либо задание на останов по окончании цикла прокатки. Система реализует новый вариант адаптивной двухступенной защиты (патент №2785005), модифицированный для двигателей прокатного стана.

8. В результате исследований методом «пассивного эксперимента» доказано, что предложенный алгоритм двухступенной защиты позволяет обеспечить безаварийный останов агрегата и не допустить превышения температурой предельных значений. Система также прошла апробацию на стане 5000. Даны рекомендации по ее внедрению на ответственных установках, где есть опасность недопустимого нагрева электрооборудования.

## 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 взаимосвязи объекта, и их объединение в агрегированный ЦД.

2. Обоснована методика создания промышленных ЦД на основе технологии HIL. Благодаря этому исключается задача строгого синтеза САР электроприводов методами имитационного моделирования. На примере стана 1700 доказано, что аппаратное моделирование HIL позволяет в несколько раз снизить трудозатраты на отладку и пуско-наладочные работы при вводе в эксплуатацию.

3. Концепция объектно-ориентированных ЦД электротехнических комплексов получила развитие в направлении реализации на основе доступного ПО (Simulink Real Time, Simscape Hydraulics и др.). Создан комплекс двойников-экземпляров электромеханических систем, цифровых симуляторов технологических взаимосвязей и агрегированных ЦД прокатных агрегатов.

4. На основе анализа вариантов размещения ЦД в структурах ПЛК и ПК впервые исследовано влияние несинхронного обмена информацией на точность воспроизведения физических процессов в структуре цифрового двойника. Для ограничения запаздываний рекомендовано размещение виртуальной модели и алгоритма системы управления в ресурсах ПЛК с многоядерными процессорами.

5. В плане развития концепции ЦД обосновано размещение симулятора и отлаживаемого ПЛК на виртуальных машинах с встроенным ПО. На примере электропривода летучих ножниц агрегата поперечной резки показано сокращение времени ввода в эксплуатацию от нескольких дней до нескольких часов.

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. Разработан комплекс цифровых алгоритмов управления электроприводами последовательно расположенных клеток, обеспечивающих выравнивание нагрузок. Разработан способ управления гидравлическими НУ клетки толстолистного стана в режиме профилированной прокатки, обеспечивающий повышение размерной точности прокатываемых листов.

9. Разработан наблюдатель состояния на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния, 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 динамических нагрузок средствами автоматизированного электропривода разработан способ ограничения упругого момента в двухмассовой электромеханической системе, компенсирующий влияние скорости заполнения очага деформации. Реализация способа осуществляется за счет адаптивного торможения после входа раската в клеть. Обоснована и апробирована методика его настройки, выполнены исследования, подтвердившие минимальные амплитуды момента при захвате.

12. Впервые выполнены экспериментальные исследования упругих моментов на шпинделях в аварийных режимах, вызвавших поломки оборудования клетки стана 5000. Разработан способ предотвращения аварий, согласно которому производится форсированный останов стана при превышении темпом нарастания момента на шпинделе предельного значения ( $25 \text{ МН} \cdot \text{м/с}$ ). Для реализации системы экстренного торможения разработан задатчик интенсивности с переключающейся структурой.

13. В развитие концепции объектно-ориентированных цифровых теней разработан наблюдатель теплового состояния двигателя на основе четырехмассовой тепловой модели. Разработана система двухступенной тепловой защиты двигателей, которая прошла апробацию в электроприводах стана 5000 и внедрена в электроприводах стана 1700.

14. Разработанные алгоритмы управления внедрены на станах 5000, 2500 и 2000 ПАО «ММК». Методика виртуальных ПНР применена при вводе в эксплуатацию стана 1700. Основные технические эффекты от внедрения:

- снижение непроизводительных затрат за счет сокращения брака и концевой обрезки;
- снижение аварийности производства, увеличение срока службы электрического и механического оборудования;
- расширение сортамента за счет производства полос толщиной до 30 мм со смоткой в рулон.

Суммарный экономический эффект от внедрения разработок составляет 19,5 млн. руб./год.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

##### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ***

1. 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.
2. Карандаев, А.С. Совершенствование алгоритмов регулирования толщины и профиля зазора валков реверсивной клетки толстолистового прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, С.С. Воронин, **Б.М. Логинов** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 53–64. DOI 10.17213/0136-3360-2019-4-53-64.
3. Гасияров, В.Р. Предиктивное регулирование асимметрии зазора валков реверсивной клетки толстолистового прокатного стана / В.Р. Гасияров, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, **Б.М. Логинов**, М.А. Зинченко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2020. – Т. 63, № 1. – С. 19–30.
4. Гасияров, В.Р. Разработка цифрового наблюдателя углового зазора в шпиндельных соединениях главной линии прокатной клетки / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, О.А. Гасиярова, **Б.М. Логинов** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 137–147. DOI 10.14529/power200314.
5. 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 // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 54–68.
6. Гасияров, В.Р. Разработка цифровых алгоритмов управления приводами мехатронной системы реверсивной клетки толстолистового прокатного стана / В.Р. Гасияров, **Б.М. Логинов**, С.С. Воронин, М.А. Зинченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 122–139.

7. Карандаев, А.С. Экспериментальное определение параметров двухмассовой электро-механической системы прокатного стана / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, **Б.М. Логинов**, О.А. Гасиярова, Е.А. Гартлиб, В.Р. Храмшин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 3. – С. 24–35.
8. Радионов, А.А. Разработка цифрового наблюдателя упругого момента электро-механической 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.
9. Радионов, А.А. Регулирование координат электро-механической системы прокатного стана на основе наблюдателя упругого момента / А.А. Радионов, В.Р. Гасияров, Е.А. Гартлиб, **Б.М. Логинов**, К.Э. Одинцов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 115–129.
10. Карандаев, А.С. Регулирование скоростей электроприводов клетки толстолистого прокатного стана в режиме формирования «лыжи» / А.С. Карандаев, **Б.М. Логинов**, М.А. Зинченко, В.Р. Храмшин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 26–41.
11. Храмшин, В.Р. 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.
12. Карандаев, А.С. Наблюдатель упругого момента двухмассовой электро-механической системы / А.С. Карандаев, **Б.М. Логинов**, Е.Г. Бодров, В.Р. Храмшин, М.Н. Самодурова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». Серия «Энергетика». – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 23–33.
13. Храмшин, В.Р. Способ управления электроприводами клетки толстолистого 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.
14. Бовшик, П.А. Совершенствование системы управления электроприводами машины холодной правки листа / П.А. Бовшик, **Б.М. Логинов**, А.Ю. Семитко, В.Р. Храмшин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 22–34.
15. **Логинов, Б.М.** Оценка временных задержек при обмене информацией в структурах цифровых двойников электро-механических 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
16. **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.
17. **Логинов, Б.М.** Методика создания цифровых двойников электро-механических систем на основе Simulink Real Time и моделирования HIL // Электротехнические системы и комплексы. – 2025. – № 2(67). – С. 35–44. DOI 10.18503/2311-8318-2025-2(67)-35-44.
18. **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.
19. 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.

*Статьи в журналах, индексируемых наукометрическими базами Scopus и WoS*

20. 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. <https://doi.org/10.3390/machines9030054>.
21. Gasiyarova, O.A. 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.
22. Gasiyarov, V.R. 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 // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2023. – Vol. 7. – Article number 41. DOI 10.3390/jmmp7010041.
23. Gasiyarov, V.R. 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.
24. Gasiyarov, V.R. 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.
25. Voronin, S.S. 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 // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8. – Article number 85. DOI 10.3390/jmmp8030085.
26. Voronin, S.S. 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.
27. Voronin, S.S. 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.
28. **Loginov, B.M.** 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.

*Публикации в трудах конференций, проиндексированные наукометрическими базами Scopus и WoS*

29. 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.
30. **Loginov, B.M.** 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), Sochi, Russia*. – Springer, 2023. – Vol. 986. – P. 239–249. DOI 10.1007/978-3-031-22311-2\_24.

31. Radionov, A. A. 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 (SmartIndustry-Con), Sochi, Russia. – IEEE, 2023. – P. 516–522. DOI 10.1109/SmartIndustry-Con57312.2023.10110770.
32. Gasiyarov, V.R. 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.
33. Voronin, S.S. Assessment of Signal Delay in Digital Twins for Electromechanical and Hydraulic Systems / S.S. Voronin, **B.M. Loginov**, V.R. Khramshin, 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/Ural-Con59258.2023.10291155.
34. Gasiyarova, O.A. 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/SmartIndustryCon61328.2024.10515422.
35. 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/SmartIndustry-Con61328.2024.10515325.
36. 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.
37. 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.
38. 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), Sochi, Russia. – Springer, 2025. – Vol. 1324. – P. 217–232. DOI 10.1007/978-3-031-82494-4\_20.
39. **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.
40. **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.
41. **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.

42. **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.
43. **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.

***Патенты РФ, свидетельства о гос. регистрации программ***

44. 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**.
45. 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.
46. 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**.
47. 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 толстолистового 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.
48. 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.
49. 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 клетей 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.
50. 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 толстолистового 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.
51. 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.
52. 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 толстолистового 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.

53. 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.
54. 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.

#### *Публикации в периодических изданиях*

55. Храмшин, В.Р. Способ снижения динамических нагрузок электроприводов клетки толстолистового 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.
56. Гасияров, В.Р. 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.