

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.05,
созданного на базе федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 17.04.2026 г. № 2

О присуждении Логинову Борису Михайловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Совершенствование электротехнических комплексов прокатных станов на основе концепции объектно-ориентированных цифровых двойников» по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы принята к защите 29 декабря 2025 г. (протокол № 19) диссертационным советом 24.2.324.05, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 508/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Логинов Борис Михайлович, 31.07.1975 года рождения. Диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук «Ограничение динамических нагрузок электроприводов горизонтальной клетки толстолиствого прокатного стана» защитил в 2019 году в диссертационном совете созданном на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Работает в должности ведущего инженера Центральной электротехнической лаборатории ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», по совместительству работает в должности старшего научного сотрудника кафедры «Автоматика и управление» ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет».

Диссертация выполнена на кафедре «Автоматика и управление» ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Министерство науки и высше-

го образования РФ.

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор Радионов Андрей Александрович, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», кафедра «Автоматика и управление», заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

1. Мещеряков Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», кафедра «Автоматизированный электропривод и робототехника», заведующий кафедрой;

2. Шевырёв Юрий Вадимович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», профессор;

3. Микитинский Александр Петрович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Электроснабжение и электропривод», доцент

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург), в своём положительном отзыве, подписанном Костылевым Алексеем Васильевичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» указала, что диссертация Логинова Б.М. «Совершенствование электротехнических комплексов прокатных станов на основе концепции объектно-ориентированных цифровых двойников» является самостоятельной научно-квалификационной работой, выполненную на актуальную тему. В ней решена важная научно-техническая проблема по развитию теории и практики электротехнических систем на основе цифровых двойников и цифровых алгоритмов управления. Решение научных задач, поставленных в диссертации, вносит значительный вклад в развитие металлургической промышленности Российской Федерации. Диссертация полностью отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (от 24.09.2013 г. №842

(с дополнениями), а соискатель Логинов Борис Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью, большим количеством публикаций в рецензируемых научных изданиях, выполненных и внедрённых научных исследований в области разработки, моделирования, анализа и оптимизации режимов работы электроприводов и систем управления электротехническими комплексами металлургического производства, систем электропривода с упругими связями.

Профессор, д-р техн. наук В.Н. Мещеряков является признанным специалистом в области электропривода. Подготовил 28 кандидатов технических наук по специальности электротехнические комплексы и системы. Является действительным членом Российской Академии естествознания, действительным членом Российской Академии проблем качества.

Профессор, доктор технических наук Шевырев Юрий Вадимович – известный специалист в области автоматизированного электропривода, имеет 144 научных публикаций, состоит в редколлегии нескольких научных изданий. Областью научных исследований Шевырева Ю.В. является исследование эффективности электроприводов, разработка методов повышения их энергетических характеристик.

Доцент, доктор технических наук Микитинский Александр Петрович известен своими работами в области электромеханических систем с упругими связями, синтезом систем автоматического регулирования электроприводами. Микитинский А.П. является признанным специалистом в области систем управления сложными электромеханическими системами.

Соискатель имеет 104 опубликованные работы, из них 56 научных трудов по теме диссертации, в том числе 19 статей в журналах, относящихся к категориям K1, K2 из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК; 24 публикации в изданиях, входящих в базы WoS и Scopus, из них 9 статей в изданиях, входящих в I и во II квартиль. По теме диссертации получены 9 патентов на изобретения, зарегистрированы 2 программы для ЭВМ. Общий объём публи-

каций по теме диссертации составляет 52,3 печатных листа. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Авторский вклад соискателя в опубликованных работах заключается: в постановке задачи исследования; обоснование 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; разработки цифровых двойников с размещением симулятора и отлаживаемого алгоритма на виртуальных и, а также на основе контроллеров с многоядерными процессорами; развитии методов нечеткой логики в системах управления взаимосвязанными электроприводами прокатной клетки; разработке системы управления, обеспечивающей снижение динамических нагрузок электроприводов прокатного стана; разработки наблюдателей координат электромеханических систем.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. 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. – DOI 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68. – EDN LCGJNZ.
2. Логинов, Б. М. Методика создания цифровых двойников электромеханических систем на основе Simulink Real Time и моделирования HIL / Б. М. Логинов // Электротехнические системы и комплексы. – 2025. – № 2(67). – С. 35-44. – DOI 10.18503/2311-8318-2025-2(67)-35-44. – EDN LCCUMC.
3. Digital Observer of Elastic Torque of Rolling Stand Two-Mass System / B. M. Loginov, V. R. Khramshin, O. A. Gasiyarova [et al.] // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2023. – P. 239-249. – DOI 10.1007/978-3-031-22311-2_24.
4. Substantiating and Implementing Concept of Digital Twins for Virtual Commissioning of Industrial Mechatronic Complexes Exemplified by Rolling Mill Coilers / V. R. Gasiyarov, P. V. Bovshik, B. M. Loginov [et al.] // Machines. – 2023. – Vol. 11, No. 2. – P. 276. – DOI 10.3390/machines11020276. – EDN QGLJEA.

5. Limitation of Dynamic Loads of the Mechatronic System of the Rolling Stand / A. Radionov, B. M. Loginov, O. A. Gasiyarova, K. E. Odintsov // Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, Sochi, 16–20 мая 2022 года. – Sochi, 2022. – P. 1157-1162. – DOI 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787233. – EDN IVBCEG.
6. Логинов, Б. М. Наблюдатель упругого момента электропривода клетки прокатного стана на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния / Б. М. Логинов, В. Р. Храмшин, С. С. Воронин // Электротехнические системы и комплексы. – 2025. – № 4(69). – С. 4-14. – DOI 10.18503/2311-8318-2025-4(69)-4-14. – EDN BGAWJS

Сведения об опубликованных работах достоверны.

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов, все положительные:

- 1. Отзыв ФГАОУ ВО «Томский политехнический университет»** (д.т.н., доц. Однокопылов Г.И., к.т.н., доцент Кладиев С.Н.): 1) В тексте автореферата на стр. 8 в п. 8 научной новизны автор системно не выделил: в чём отличие предлагаемого авторского подхода к решению указанной научной проблемы от широко известных гибких автоматизированных производств с адаптивно перестраиваемыми системами автоматического управления и его применимость и место для решения технологических проблем прокатного производства с учётом объективного анализа их достоинств и недостатков? 2) В тексте автореферата часто упоминается термин «методика». Возможно ли обобщить приведённые методики до методологического уровня защищаемой диссертации?
- 2. Отзыв ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»** (д.т.н., доц. Феофилов С.В.): 1) Считаю, что годовой экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы, занижен. При сокращении времени ввода в эксплуатацию ответственных агрегатов, выпускающих дорогостоящую продукцию, он должен быть выше, как минимум, в несколько раз. 2) Следовало бы дать конкретные рекомендации по внедрению выполненных автором разработок в электроприводах прокатных станов других металлургических заводов. 3) Следовало бы выполнить анализ уровня разработок по сравнению с аналогами ведущих зарубежных фирм-производителей прокатного оборудования и промышленных компьютерных систем.

3. Отзыв ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (д.т.н., проф. Соловьев В.А.): 1) В пункте 14 Заключения в качестве одного из достигнутых преимуществ названо расширение сортамента за счет производства полос толщиной до 30 мм со смоткой в рулон. Это утверждение не подкреплено фактическими результатами. 2) Утверждается, что время реконструкции летучих ножниц АПР при применении новой технологии пуско-наладочных работ составило несколько часов при нормативе - несколько суток. За счет чего такое сокращение было достигнуто? Как обоснованы эти показатели? 3) Текст автореферата не свободен от грамматических и стилистических неточностей, например, не все переменные обозначенные на рисунках имеют расшифровку в текстовой части.

4. Отзыв «Национальная академия наук Кыргызской Республики» (д.т.н., проф. Брякин И.В.): 1) В диссертации наблюдатель углового зазора на основе фильтра Калмана и наблюдатель с упрощенным вычислительным алгоритмом рассматриваются в 5-й и 6-й главах. Аналогично разнесена информация о тепловой модели и системе тепловой защиты на ее основе: наблюдатель рассмотрен в 5-й главе, а система защиты - в 7-й. При прочтении автореферата это вызвало затруднения. 2) Считаю, что термин «наблюдатель упругого момента с упрощенным вычислительным алгоритмом» является неинформативным? 3) Какие выводы сделаны по результатам оценки теплового состояния двигателей клетки стана 5000 по результатам восстановления температуры с помощью наблюдателя на основе четырехмассовой модели?

5. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (д.т.н., доц. Саттаров Р.Р.): 1) В РФ принят ГОСТ Р 57700.37-202, в котором определены основные термины в области цифровых двойников. В работе не всегда используются термины, закрепленные в стандарте, в частности, не вполне ясен смысл введения термина «двойникование». 2) В работе разработана концепция «объектно-ориентированных» ЦД. Однако из автореферата не ясна оригинальность этой концепции, так как результатом является использование двойников-прототипов и двойников-экземпляров, что является типовой и общепринятой методикой. В чем заключается новизна предложенного

объектно-ориентированного подхода, какие основные преимущества обеспечивает концепция объектно-ориентированных ЦД для электротехнических систем прокатных станков. Какие есть недостатки у такого подхода? 3) На рис. 9 показана структура контура регулирования скорости в среде Codesys 3.5, которая напоминает известную структуру в Matlab Simulink. Какие преимущества обеспечивает и какие недостатки имеет ПО Codesys по сравнению с Simulink Real Time? Почему в работе не используется одна универсальная программная платформа, например, Matlab/Simulink? 4) На рис. 4 приведен пример модели электропривода, при этом нагрузка двигателя представлена идеальным источником скорости. Каким образом определяется скорость этого источника, имеется ли и насколько полной является модель нагрузки электропривода? Учитывается ли в них отклонения параметров оборудования в зависимости от загрузки, внешних условий и т.п.?

6. Отзыв ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (д.т.н., доц. Шпрехер Д.М.): 1) Одним из теоретических положений, выносимых на защиту, является методика анализа влияния несинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и «физической частью» на точность двойникования. Это вопрос актуальный, однако информация об этой методике в автореферате отсутствует. 2) Насколько перспективным является применение программируемых логических контроллеров на базе многоядерных процессоров. Как обстоят дела с появлением отечественных разработок в этом направлении?

7. Отзыв ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (д.т.н., проф. Брованов С.В.): 1) Потребовались ли дополнительные капитальные затраты при внедрении цифровых двойников и цифровых систем управления на агрегатах металлургического комбината? Учитывались ли они при расчете экономического эффекта? 2) Во второй главе диссертации автор отмечает, что для ограничения величины запаздывания целесообразно совместное размещение виртуальной модели и структуры системы управления в ресурсах программируемого логического контроллера (ПЛК) на основе многоядерного процессора. При этом следует давать оценку погрешностям, обусловленным применением упрощенных моделей, что вызвано ограниченным ресурсом ПЛК.

Однако автор не дает рекомендаций по допустимым величинам погрешностей. 3) В качестве практической ценности работы (стр.8) автор отмечает, что внедрение результатов исследований обеспечивает возможности производства проката с новым перечнем свойств и создает условия для импортозамещения продукции предприятий металлургической отрасли. Что подразумевается под новым перечнем свойств или это лишь улучшение свойств проката?

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

получили развитие положения теории регулирования координат взаимосвязанных электротехнических систем прокатных агрегатов, методы настройки и виртуального ввода в эксплуатацию, мониторинга технического состояния и защиты электроприводов; получены новые знания о принципах построения цифровых двойников (ЦД) и цифровых теней для промышленных электротехнических комплексов, о способах повышения точности двойникования (виртуального воспроизведения пространства) и возможностях применения современных программируемых логических контроллеров (ПЛК) с многоядерными процессорами;

разработаны: научная концепция объектно-ориентированных цифровых двойников и цифровых теней, предназначенных для применения на этапах настройки, виртуального ввода в эксплуатацию и мониторинга технического состояния электротехнических комплексов; методика создания промышленных ЦД на основе аппаратного моделирования в цикле (HIL), включающая создание замкнутого контура между тестируемым оборудованием и виртуальной моделью; комплекс цифровых двойников-экземпляров электромеханических систем, цифровых симуляторов технологического процесса и цифровых теней – наблюдателей координат электрического оборудования, поддерживающих симуляцию и тестирование в реальном времени, включая быстрое прототипирование и аппаратное моделирование HIL; методика анализа влияния несинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и «физической частью» на точность двойникования; комплекс наблюдателей координат, включающий наблюдатели углового зазора в шпиндельных соединениях электромеханической системы, уп-

ругого момента на шпинделях и теплового состояния двигателя на основе четырехмассовой тепловой модели;

предложены: комплекс научно обоснованных технических решений, обеспечивающих согласование нагрузок электроприводов последовательно расположенных клеток путем автоматической коррекции скоростей в динамических режимах; наблюдатель состояния взаимосвязанных электроприводов клетки на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния, отличительным признаком которого является добавление в вектор состояния момента нагрузки 2-й массы двухмассовой системы, что обеспечивает повышение точности восстановления координат электропривода без применения вычислительных алгоритмов; двухканальный регулятор деления нагрузок (РДН) с нечеткой логикой, отличительной особенностью которого является наличие канала регулирования по производной разницы заданий моментов двигателей; система автоматического управления, обеспечивающая снижение динамических нагрузок электропривода путем предварительного разгона и адаптивного торможения после захвата раската валками; способ и система предотвращения аварий путем форсированного останова при превышении темпа нарастания момента на шпинделе предельного значения; система двухэтапной тепловой защиты двигателей на основе четырехмассовой тепловой модели; варианты конфигурации цифровых двойников в структурах ПЛК с многоядерными процессорами;

доказана принципиальная возможность обеспечения средствами разработанных ЦД автоматизированных электроприводов и систем управления: сокращения времени пуско-наладочных работ при вводе в эксплуатацию и реконструкции прокатных агрегатов; расширения сортамента и повышения качества продукции широкополосных станов горячей прокатки; снижения аварийности за счет внедрения цифровых систем мониторинга состояния и защиты электрооборудования;

введены новые термины: объектно-ориентированный цифровой двойник и объектно-ориентированная цифровая тень, выполняемые с использованием программных сред Simulink Real Time, Simscape Hydraulics, Codesys 3.5, предназначенные для применения на этапах настройки, виртуального ввода в эксплуата-

цию и мониторинга технического состояния электротехнических комплексов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны научные положения концепции объектно-ориентированных цифровых двойников и цифровых теней, основанной на использовании прямого сбора данных и виртуального моделирования электротехнических комплексов, вносящие вклад в развитие теории многосвязных систем, заключающийся в совершенствовании способов управления, обеспечивающих ограничение взаимодействия электроприводов прокатных клетей, в расширение границ применимости методики контроля температуры электрических машин за счет создания тепловых моделей на базе унифицированных модулей Simscape Thermal Models;

применительно к проблематике диссертации эффективно использован комплекс теоретических исследований, выполненных с использованием методов программирования и компьютерного моделирования, и экспериментальных исследований, выполненных на действующих прокатных станах методом прямого осциллографирования с последующей обработкой результатов; обоснована и применена методика виртуального ввода в эксплуатацию, включающая: разработку цифровых моделей и алгоритмов управления в среде компьютерного моделирования; разработку цифрового двойника, коррекцию алгоритмов управления и параметров настройки; «перенос» ЦД в промышленный компьютер более высокого уровня с целью on-line мониторинга состояния оборудования;

изложена идея совершенствования алгоритмов управления взаимосвязанными электротехническими системами и контроля их технического состояния, направленных на сокращение непроизводительных затрат и снижение аварийности агрегатов прокатного производства за счет обоснования и практической реализации концепции объектно-ориентированных цифровых двойников;

установлены закономерности, уточняющие и корректирующие представления: о взаимном влиянии технологических параметров прокатки толстых листов, на основе которых разработаны способы согласования нагрузок взаимосвязанных электроприводов с адаптивным и нечетким РДН и алгоритмы управления электроприводами, обеспечивающие ограничение силовой взаимосвязи клетей в режимах совместной прокатки; о принципах обмена информацией и причинах

задержек передачи данных в цифровых системах управления электроприводов, на основе которых предложены варианты конфигурации цифровых двойников в структурах ПЛК с многоядерными процессорами;

изучено влияние асинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и «физической частью» ЦД на точность двойникового, в результате чего **раскрыты** причины и последствия задержек передачи данных в цифровых системах управления электроприводов и предложены варианты организации обмена данными в двухъядерном ПЛК;

проведена модернизация существующих математических моделей и цифровых алгоритмов управления электроприводами, создающих базу для реализации систем управления и контроля технического состояния, направленных на сокращение непроизводительных затрат и снижение аварийности оборудования прокатных станов;

научно обоснован способ ограничения динамических нагрузок прокатного оборудования средствами автоматизированного электропривода за счет адаптивного торможения, обеспечивающего снижение амплитуды момента при захвате металла валками, реализуемого регулятором с переключающейся структурой;

доказано, что комплексное применение разработанных технических решений обеспечивает: сокращение времени виртуального ввода в эксплуатацию и пуско-наладочных работ при реконструкции агрегатов прокатного производства; сокращение непроизводительных затрат и снижение аварийности оборудования за счет ограничения динамических нагрузок в режиме захвата металла валками, форсированного останова стана при превышении темпом нарастания упругого момента предельного значения и контроля температуры двигателей; повышение ресурса электромеханических систем за счет согласования нагрузок двигателей верхнего и нижнего валков клетки толстолиствого стана и электроприводов последовательно расположенных клетей непрерывных прокатных станов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что их внедрение в прокатное производство способствует повышению конкурентоспособности продукции отечественных металлургических предприятий;

внедрены и находятся в эксплуатации на станах ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

– на стане 5000: адаптивный РДН с переключающейся структурой, обеспечивающий форсированное согласование скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков; наблюдатель упругого момента и система ограничения момента при ударном приложении нагрузки;

– на стане 1700: алгоритм и программа автоматизированного анализа тепловых режимов, система защиты двигателей от перегрева;

– на стане 2500: комплекс цифровых двойников в структуре агрегированного ЦД группы моталок, позволивший произвести их виртуальный ввод в эксплуатацию во время реконструкции с заменой оборудования.

Определены основные технические эффекты от внедрения разработок:

– сокращение времени пуско-наладочных работ группы моталок стана 2500 не менее чем в 5 раз;

– повышение качества намотки полосы и устранение дефектов на полосе;

– расширение сортамента за счет производства полос толщиной до 30 мм сомоткой в рулон;

– сокращение времени и трудозатрат при вводе в эксплуатацию реверсивного стана 1700 холодной прокатки;

– снижение затрат за счет сокращения брака и обрезки листового проката, а также сокращения потерь металла при авариях;

– снижение аварийности производства, увеличение срока службы электрического и механического оборудования.

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

Представлены рекомендации по расширенному внедрению разработанных способов и алгоритмов управления в электроприводах прокатных станов, оснащенных цифровыми системами управления на базе современных ПЛК; в комплексе с разработанными способами ограничения упругого момента они обеспечивают сокращение непроизводительных затрат предприятий; система тепловой защиты рекомендуется для внедрения на ответственных установках, где есть опас-

ность недопустимого нагрева электродвигателей. В целом, выполненные разработки являются вкладом в решение научно-практической проблемы цифровизации металлургической отрасли.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: теоретические исследования выполнены с использованием технических характеристик действующего оборудования при правомерных исходных положениях и обоснованных допущениях; адекватность подтверждена верификацией разработанных моделей и валидацией результатов моделирования, сопоставлением теоретических и экспериментальных данных на всех этапах исследований; воспроизводимость результатов исследований разработанных алгоритмов при прокатке листов и полос различного сортамента; успешную настройку и ввод в эксплуатацию электроприводов прокатных станов 1700 и 2500; длительную эксплуатацию внедренных алгоритмов и систем на станах 1700, 2000, 2500 и 5000;

теория базируется на известных положениях автоматизированного электропривода и автоматического управления, математических методах и методах компьютерного моделирования; теоретические исследования проводились с использованием аппарата передаточных функций, методов преобразования структурных схем, логарифмических амплитудно-частотных характеристик; выводы и рекомендации подтверждены результатами промышленного внедрения;

идея базируется на анализе теории и практике создания и эксплуатации цифровых электроприводов и систем управления, способов и алгоритмов мониторинга состояния и защиты электрооборудования, на обобщении передового опыта пуско-наладочных работ и виртуального ввода в эксплуатацию промышленных агрегатов, оснащенных взаимосвязанными электротехническими системами;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике;

результаты получены на действующих прокатных станах, оснащенных сертифицированными контрольно-измерительными приборами и системами;

использованы методы прямого осциллографирования, цифровой обработки

сигналов, статистической обработки экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя состоит в: непосредственном участии, руководстве и организации научных исследований на всех этапах; обосновании направления, идеи, цели и задач исследований; обосновании новых научных положений; организации промышленного внедрения; обработке экспериментальных данных; подготовке публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

В отзыве ведущей организации:

1. В работе неоднократно упоминается, что благодаря применению ЦД и НПЛ, теряется актуальность строго синтеза регуляторов систем автоматического регулирования технологических параметров и координат электроприводов, сокращается продолжительность ПНР. Необходимо дать пояснение по данным выводам.
2. Насколько достоверными являются утверждения о сокращении времени пуско-наладочных работ при внедрении моталок на стане 2500 не менее, чем в 5 раз. Как можно оценить эффект от снижения количества нештатных ситуаций при ПНР?
3. На рисунке 1.4 (стр.39) не указаны требования к быстродействию «цифрового объекта». Каковы требования по быстродействию для цифровой модели, цифровой тени и цифрового двойника? Есть ли различия?
4. Какие рекомендации по созданию/применению отечественного ПО для построения цифровых двойников электроприводов технологических комплексов может сформулировать автор?
5. На каких положениях основана идея построения «нечеткого» РДН с каналом по производной разницы моментов двигателей? Встречаются ли подобные разработки в литературе?
6. Как автор оценивает перспективы применения технологий РНПЛ- «силовых цифровых двойников» в электроприводе?
7. В разделе 6 разработан наблюдатель упругого момента на шпинделе с автоматической настройкой. Однако в предыдущем разделе был разработан наблюдатель упругого момента на основе фильтра Калмана, который продемонстриро-

вал высокую сходимость результатов. Для чего был разработан второй вариант наблюдателя?

8. На стр. 142 присутствует фраза: «...можно утверждать, что изменения всех координат на рисунках 3.16, а и 3.16, б идентичны». Однако, сравнение окон 2 и окон 5 на рис. 3.16 показывает отличия.

На вопросы ведущей организации Логиновым Б.М. предоставлены следующие ответы:

1. В предлагаемом подходе остаются только разработка структуры САР и предварительное задание параметров настройки. Далее, благодаря моделированию ПИД, настройка алгоритмов управления происходит с использованием реальных сигналов от технологического контроллера.

2. Эти показатели можно оценить по опыту пуско-наладочных работ, выполненных ранее. Время, затрачиваемое на ПНР на аналогичных объектах известно. Опыт показал, что время ПНР сокращается не менее чем в 5 раз.

3. Для цифровой модели нет требования работать в реальном времени. Двойник и тень при цифровой реализации должны иметь времена цикла не более, чем указанные в таблице.

4. На сегодняшний день прямым и активно развиваемым российским аналогом MATLAB и Simulink является среда Engae. Это инженерная платформа для технических расчетов и моделирования динамических систем. Она позиционируется как замена MATLAB/Simulink, имеет русский интерфейс и подробную документацию. Она оптимизирована для модельно-ориентированного проектирования, что является важным при создании цифровых двойников.

5. Разработка нечетких регуляторов в литературе рассматривается. Отличия разработанного РДН с нечеткой логикой следующие: 1) Такой регулятор используется для управления двумя электроприводами, взаимосвязанными в технологическом процессе. 2) В моей разработке сигнал производной разницы моментов фильтруется. 3) При экспериментах было обнаружено некоторая инерция (до нескольких секунд) изменения разности моментов относительно рассогласования скоростей. Это ставит вопрос об отсутствии четкого математического описания процесса. Это тот случай, когда целесообразно применять нечеткую логику.

6. Технология PHIL (Power Hardware-in-the-Loop) - это метод тестирования энергетической системы в реальном времени. Применяется для тестирования солнечных инверторов или ветрогенераторов перед их подключением к реальной энергосети. Так же как и в рассматриваемом случае реальное силовое оборудование (Hardware) физически подключается к цифровой модели. В работе задача тестирования связи с энергосистемой не ставилась, поскольку исследовались процессы, связанные с технологией работы комплекса оборудования. Перспективным является применения технологии PHIL в электроприводе при детальном исследовании процессов влияния приводов на сеть (и обратный процесс).

7. Наблюдатель на основе фильтра Калмана реализован на тестовом ПЛК и в системе Симулинк. Работоспособность наблюдателя в ПЛК подтверждена подачей сигналов от модели привода, исполняемой на этом же тестовом ПЛК. Цикл программы наблюдателя выбран 2 мс. Работоспособность с таким циклом обеспечивается. На стане 5000 наблюдатель Калмана до настоящего времени не внедрен по причине громоздкости вычислений, специфики среды разработки ПЛК и необходимости получения разрешения на изменение ПО. Поэтому был разработан и внедрен более простой наблюдатель с подстройкой искомого сигнала ПИ регулятором.

8. В любой математической модели сложного технологического объекта учесть влияние всех факторов невозможно. Поэтому отличия при верификации моделей возникают всегда. Например, практически невозможно учесть реологические (деформационные) свойства полосы при смотке или влияние водяного охлаждения. В данном случае такие различия не влияют на решение поставленных задач. В первую очередь ЦД, примененный для проекта моталок использовался для отладки ПО ПЛК моталок и мастера моталок. Задача, решаемая с помощью ЦД, выполнена. Заметно некоторое различие в сигнале, полученном на реальном объекте и сигнале с ЦД для управления сервоклапаном механизма управления зазором тянущих роликов. Впоследствии модель была уточнена, однако в том виде, который представлен на рисунке, она выполнила свою задачу.

В отзыве официального оппонента Мещерякова В.Н.:

1. В 1-й главе требует пояснения концепция объектно-ориентированных цифровых двойников. В чем ее отличие от структурного моделирования, применяемого для синтеза систем управления?

2. Во 2-й главе выполнена разработка виртуальных моделей цифровых двойников на базе программного средства Simulink Real Time, входящего в Matlab Simulink. Далее в разделе 4 продемонстрировано применение программы Codesys для многоядерных процессоров. Однако в последние годы в качестве альтернативы Matlab часто называется отечественное ПО Engee. В диссертации следовало бы дать оценку возможности применения данного ПО при разработке цифровых двойников.

3. Третья глава диссертации посвящена виртуальному вводу в эксплуатацию различных исполнительных механизмов прокатных агрегатов. Также рассмотрено применение ПЛК с многоядерными процессорами для электроприводов прокатной клетки. Не ясно для чего нужно было исследовать несколько исполнительных механизмов. Возможно, стоило сконцентрироваться на одном или двух с более подробным их рассмотрением?

4. По итогам исследований в 3-й главе дана позитивная оценка перспектив применения контроллеров на базе многоядерных процессоров. Насколько они распространены в промышленных условиях, и каковы перспективы их широкого внедрения?

5. В 4-й главе даны рекомендации по внедрению системы согласования скоростей горизонтальных и вертикальных валков универсальной клетки стана 2500. Аналогичные рекомендации даны в отношении внедрения системы выравнивания нагрузок электроприводов валков горизонтальной клетки. Однако дальнейшая «судьба» этих разработок не раскрыта. Они доведены до внедрения?

6. Из экспериментальных графиков температуры масс двигателя, полученных в 5-й главе (рис. 5.21), следует, что степень нагрева железа статора и ротора существенно ниже нагрева обмоток статора и ротора. Полагаю, что при разработке системы тепловой защиты двигателя (глава 7) целесообразным было бы применение более простой 2-х массовой модели?

На вопросы Мещерякова В.Н. Логиновым Б.М. предоставлены следующие ответы:

1. При структурном моделировании каждый объект каждый раз моделируется заново. Разрабатываются модели, рассчитываются их параметры, моделируются

взаимосвязи. Однако это неудобно при разработке цифровых двойников. Поэтому предлагается объектно-ориентированный подход, когда предлагается использовать отдельные модули, домены и т.д. Отличиями метода являются: 1) Модульная конструкция. 2) Инкапсуляция– это процесс отделения элементов объекта друг от друга. 3) Наследование и полиморфизм. Сложные системы могут быть созданы путем наследования свойств базовых классов. Такой подход применен в диссертации. Использовались домены Simulink Real Time, Simscape и др. Моделировалась связь через обрабатываемый материал. Благодаря такому подходу может быть создана библиотека агрегированных двойников электротехнических систем и технологических узлов прокатных станов.

2. Применение отечественного программного обеспечения, в том числе Engee, безусловно, возможно. Работа по диссертации была начата, когда отечественные системы только начинали развитие. Система Matlab была доступной. Переход на новую систему в процессе работы потребовал бы затрат времени, к тому же есть вероятность ошибок при использовании нового ПО.

3. Несколько исполнительных механизмов в диссертации исследовались для демонстрации отдельных подходов при создании цифровых двойников. Эти вопросы связаны с разработкой различных конфигураций цифровых двойников и их применением для виртуального ввода в эксплуатацию конкретных электротехнических систем.

4. В настоящее время происходит широкое внедрение таких ПЛК. Доступны 4-х ядерные процессоры на ядрах Cortex A53. Реализуемо время цикла в 500 мкс (для оценки исследовалась работа 200 объектов, каждый из которых состоял из ЗИ, ПИ регулятора, нескольких инерционных звеньев и интегратора, время исполнения всех 200 объектов составляло 260..290 мкс).

5. Система согласования скоростей горизонтальных и вертикальных валков универсальной клетки прошла промышленные испытания на стане 2500. Осциллограммы приведены в 4-й главе диссертации. Система выравнивания нагрузок валков горизонтальной клетки внедрена и успешно эксплуатируется на стане 5000. Это подтверждено актом внедрения.

6. При разработке системы тепловой защиты новых двигателей электроприво-

дов стана 1700 могла бы быть применена двухмассовая тепловая модель. Но существуют электроприводы, в которых происходит существенный нагрев железа статора и ротора. Например, нагрев от вихревых токов увеличивается при износе и капитальных ремонтах двигателей. Поэтому была поставлена задача разработки системы защиты, учитывающей температуру железа. Четырехмассовая модель является более информативной, а разработанная система защиты – универсальной. Она прошла апробацию на станах 5000 и 1700. Кроме того, четырехмассовая система является более наглядной физически, есть возможность проверить температуры отдельных масс. Также есть возможность ввести измерения температуры некоторых частей модели для коррекции.

В отзыве официального оппонента Шевырева Ю.В.:

1. В диссертации утверждается, что повсеместно распространенным программным средством является Matlab. Поэтому делается вывод, что это направление является перспективным как для действующих, так и для вводимых в эксплуатацию прокатных агрегатов, поэтому оно принято за основу. Однако в настоящее время широкое применение находят также отечественные программные продукты, например, SimInTech, REPEAT. Однако в диссертации отсутствует их рассмотрение.
2. В диссертации большое внимание уделяется определению цифрового двойника. Приводятся существующие определения цифрового двойника (таблица 1.1). В работе надо было дать более подробный анализ этих определений и на основе этого анализа уточнить определение цифрового двойника, что представляло бы несомненный теоретический интерес.
3. В работе обосновывается объектно-ориентированный подход к созданию ЦД электротехнических систем как альтернатива структурному подходу (стр. 78). Считаю, что эти подходы не являются альтернативными. Наоборот, они дополняют друг друга.
4. Не понятно, что из себя представляют пуско-наладочные работы, выполняемые во время виртуального ввода в эксплуатацию (стр. 54).
5. Применение цифровых двойников позволяет осуществить виртуальный ввод в эксплуатацию производственных систем. В этом случае физический объект за-

меняется его моделью, которая должна адекватно описывать процессы на реальном объекте. Поэтому в работе необходимо было дать не только качественный, но и количественный анализ точности предлагаемых моделей при виртуальном вводе в эксплуатацию.

6. Не понятна связь между рисунком 2.9 и рисунками 2.10, 2.11, 2.12.

7. В разделе 2.3.1 необходимо было дать структуру формирования сигналов задания токов статора по продольной и поперечной осям и тока возбуждения от сигнала задания на момент (рис. 2.11).

На вопросы Шевырева Ю.В. Логиновым Б.М. предоставлены ответы:

1. Применение отечественных программных продуктов, в частности SimInTech, REPEAT является актуальной, важной задачей. Но в диссертации она не ставилась. Это направление принимается как перспективное.

2. Более подробный анализ определений цифрового двойника электротехнических систем, будет приведен в обзорной статье, которая готовится к публикации.

3. С замечанием согласен, не считаю их альтернативными.

4. ПНР, выполняемые во время виртуального ввода в эксплуатацию, представляют собой работы, направленные на отладку программ, совершенствование алгоритмов управления. Возможно исправление ошибок и поиск некорректной работы алгоритмов управления в ПЛК. Виртуальный ввод позволяет устранить ошибки в ПО до работы реального оборудования и значительно сократить риск его повреждения.

5. Количественный анализ точности предлагаемых моделей действительно необходим. Он выполнялся, например, для моталок и для анализа взаимосвязей клеток через металл. В диссертации эти вопросы не представлены. Они не отражают ни новизну, ни практическую значимость, но увеличивают объем. То, что модели адекватны, подтверждает практика. Внедренные системы эксплуатируются несколько лет.

6. Для виртуальных моделей использовались структуры как с подробным описанием контура момента в виде нескольких контуров токов, так и упрощенная модель, при представлении контура тока инерционным звеном. Так на рисунке 2.9. представлена модель с упрощенным контуром момента. От нее легко можно

перейти к использованию модели с подробным описанием силовой части и САР токов, как показано на рисунках 2.10..2.12. Однако в большинстве случаев, которые рассмотрены в диссертации, подробное представление контура момента избыточно.

7. Структуры с формирования сигналов задания токов статора по d, q осям и I_f не приведены, т.к. они известны и рассмотрены в разных источниках. Есть ссылки, например, на [119, 198, 199, 200], где есть описание подобных систем.

В отзыве официального оппонента Микитинского А.П.:

1. Автором не раскрыты возможности применения цифровых двойников на стадиях проектирования и обучения персонала.

2. Насколько универсальными являются цифровые двойники-прототипы и экземпляры, разработанные для двухклетевого стана, представленные в табл. 3.6? Какие дополнительные исследования должны быть проведены при их применении на других объектах?

3. В параграфе 3.2.3 утверждается, что разработанная виртуальная модель и подход НЛ применены для совершенствования алгоритмов управления электро- и гидроприводами моталок. Однако информация по этим важным разработкам в диссертации отсутствует.

4. Регулятор деления нагрузок с нечеткой логикой обеспечивает максимальное быстродействие при согласовании нагрузок двигателей клетки стана 5000. Насколько перспективно его промышленное внедрение с учетом сложности технической реализации? Насколько перспективно применение разработанного нечеткого регулятора для других электроприводов?

5. Насколько правомерно использовать упрощенную модель контура регулирования момента в виде инерционного звена взамен сложной многомерной системы регулирования токов синхронного привода (рис. 3.30, стр. 164 и рис. 4.1, стр. 173)?

6. Автором перечислены несколько разработок, направленных на снижение амплитуд упругих моментов, вызванных замыканием зазора при ударной нагрузке. Этот вопрос не выглядит законченным, почему эти разработки не рассмотрены в диссертации?

На вопросы Микитинского А.П. Логиновым Б.М. даны ответы:

1. На данный момент ЦД комплекса моталок использовались в том числе и для обучения операторов на этапе ввода в эксплуатацию. Затем, на базе симулятора реального времени был реализован режим виртуальной смотки, который используется для проверки оборудования после ремонтов. При пуске стана 2500 операторы обучались управлять моталками с помощью двойника.
2. Разработанные двойники-экземпляры рекомендуются для применения при виртуальном вводе в эксплуатацию и ПНР электротехнических систем прокатных станов. Для этих агрегатов их можно назвать универсальными.
3. Информация о разработанных алгоритмах управления электро- и гидроприводами моталок опубликована в нескольких статьях. В диссертации она не приведена по причинам: 1) Исследования могут быть представлены в виде отдельной диссертационной работы. 2) Слишком много гидравлического оборудования формирующих роликов.
4. При проведении работ на реальном оборудовании из-за ограничения по времени работы с физическим оборудованием алгоритм РДН с нечеткой логикой не был внедрен. Внедрен адаптивный РДН с переключающейся структурой, защищенный патентом на изобретение. Реализовать фаззификацию, композицию правил регулятора, дефаззификацию в ресурсах ПЛК возможно. Уже после работ на стане программная реализация алгоритма была успешно проверена на ПЛК- симуляторе с использованием моделей реального времени.
5. Упрощенную модель контура регулирования момента использовать правомерно. Это доказано в диссертации В.Р. Гасиярова, результаты исследований опубликованы в нескольких совместных статьях, ссылки в диссертации имеются. Поэтому такая замена сложной системы является правомерной.
6. Разработки, направленные на снижение амплитуд упругих моментов, вызванных замыканием зазора при ударной нагрузке, рассмотрены в нескольких диссертациях (Гасияров В.Р. и др.). Ссылки приведены в работе. Мною разработан более сложный алгоритм управления электроприводом клетки с адаптивным подтормаживанием после захвата раската валками. Он подробно рассмотрен в шестой главе и выносится на защиту.

В ходе заседания диссертационного совета

1. Что позволило сократить время, затрачиваемое на ПНР электротехнических комплексов прокатных станов?
2. В каком случае использовались виртуальные машины с ПЛК для отладки ПО автоматизированных систем управления комплексами электроприводов?
3. В чем заключается функция совершенствования систем управления электроприводов с использованием ЦД?
4. Как система 2-х ступенчатой защиты двигателя на базе тепловой модели может сократить потери производства?
5. Использовались ли подробные модели силовой части электропривода для создания ЦД, которые применялись в работе?
6. Какое время цикла вычислений считать реальным временем в задачах, рассматриваемых в диссертации?
7. По каким причинам был разработан наблюдатель упругого момента, названный в диссертации упрощенным? Каким требованиям не удовлетворял наблюдатель на основе фильтра Калмана?
8. Как осуществлялась проверка правильности восстановления наблюдателем сигнала упругого момента в валопроводе клетки?

Соискатель Логинов Б.М. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привёл собственную аргументацию:

1. ПНР в классическом виде производятся в следующей последовательности: монтаж оборудования, затем опробование и отладка программного обеспечения систем автоматики электроприводов и других систем, с исправлением ошибок и некорректных алгоритмов. В предлагаемом способе ПО тестируется с использованием ЦД заранее, и к моменту запуска реального оборудования основные ошибки в ПО и алгоритмах уже исправлены. Большинство нештатных ситуаций отлажено с использованием виртуальной модели.
2. Если изготовитель ПЛК предоставляет виртуальный ПЛК, работающий в реальном времени, то тестирование ПО можно производить на нем. Т.е. реальное оборудование в таком случае не нужно. Это удешевляет и ускоряет процесс разработки.

3. Изначально разработанные алгоритмы могут быть улучшены (например, по критериям производительности оборудования, улучшения качества продукции, повышения ресурса оборудования, снижения потребления электроэнергии) уже после ввода объекта в эксплуатацию. При этом данные алгоритмы тестируются на ЦД, без риска повреждения реального оборудования.
4. Важно не допустить аварийного отключения электропривода, что приведет к потери обрабатываемого материала. В моей разработке, при достижении первой ступени (предварительной, когда нет критического значения температуры) будет производиться докатка полосы или контролируемый останов агрегата.
5. Подробные модели силовой части создают высокую нагрузку на вычислительно устройство, на котором работает модель в реальном времени. После проведения исследования была доказана правомерность замены подробной модели силовой части на упрощенную для решения задач, описанных в диссертации. В дальнейшем использовались более простые модели.
6. Время цикла расчета моделей, рассмотренных в диссертации, составляло 0.5..2 мс (и до 5 мс в отдельных случаях) при размещении задач в ПЛК, и 50..100 мкс при использовании Simulink real time.
7. Из-за специфики языка ПЛК, применяемого для автоматизации рассмотренного прокатного стана реализация наблюдателя на основе фильтра Калмана представлялась громоздкой с точки зрения программирования. По этим причинам первым был разработан упрощенный наблюдатель (наблюдатель с подстройкой искомого сигнала регулятором). Фильтр Калмана был реализован в ПЛК позднее. Он работает. Качество восстановленного сигнала удовлетворительное.
8. Были установлены, и некоторое время сохраняли работоспособность датчики прямого измерения моментов на шпинделях главного привода. Проверка работы наблюдателя производилась сравнением сигнала с датчика и с наблюдателя. Так же алгоритм наблюдателя тестировался на модели привода в Simulink - сравнивались сигналы с наблюдателя и с модели 2-х массового электропривода с упругостью и люфтом.

Диссертационный совет установил, что представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании вы-

