

том числе аппаратное моделирование в контуре обратной связи (Hardware-In-the-Loop – HIL).

Автор называет основные причины сложившейся ситуации: это отсутствие единой методологии создания цифровых двойников агрегатов, находящихся в эксплуатации, и необходимость использования специализированных цифровых платформ, обеспечивающих разработку ЦД для вновь строящихся агрегатов. Если учесть, что отечественные платформы для создания ЦД не получили распространения, принятое в диссертации направление создания ЦД промышленных систем на базе доступного программного обеспечения является обоснованным и востребованным.

На основании вышесказанного можно утверждать, что тема диссертации Логинова Б.М. является актуальной, а поставленные задачи обоснованы как с теоретической, так и с практической точек зрения.

2. Полученные результаты и их научная значимость

Прежде всего, следует отметить, что до настоящего времени докторских диссертаций, посвященных разработке и применению цифровых двойников в электроприводе либо для электропривода, не было. В этом плане автор продемонстрировал определенную смелость, заявив о возможности разрешения данной научно-практической проблемы.

В диссертации Логинова Б.М. получены следующие новые научные результаты:

1. Обоснован и впервые применен объектно-ориентированный подход к созданию ЦД электротехнических комплексов, предусматривающий: разработку двойников-прототипов электромеханических систем; двойников-экземпляров, учитывающих конструктивные отличия и существенные взаимосвязи объекта с их объединением в агрегированный цифровой двойник.

2. Разработана методика создания промышленных ЦД на основе моделирования HIL, включающая создание замкнутого контура между тестируемым оборудованием и виртуальной моделью. Разработан комплекс виртуальных моделей в структурах ЦД электротехнических систем на основе модулей Simulink Real Time, Simscape Hydraulics и специально созданных моделей в Matlab Simulink.

3. Впервые выполнено исследование влияния несинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и «физической частью» на точность «двойникования». Выполнен анализ запаздывания сигналов при использовании

известных интерфейсов программируемых логических контроллеров (ПЛК) и промышленных компьютеров. Выполнена разработка ЦД на основе ПЛК с многоядерными процессорами.

4. Разработан двухканальный регулятор деления нагрузок (РДН) с нечеткой логикой (НЛ), отличающийся включением канала регулирования по производной разницы заданий моментов двигателей. Обоснована методика настройки РДН с НЛ по критерию минимального времени согласования моментов.

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

6. Обоснован и разработан комплекс наблюдателей координат электромеханической системы, в основу которого положена концепция объектно-ориентированных цифровых теней. Разработаны: наблюдатели углового зазора в шпиндельных соединениях, упругого момента на шпинделях и теплового состояния двигателя на основе четырехмассовой тепловой модели.

7. Обоснован способ, и разработана система форсированного останова толстолистного стана при превышении темпом нарастания момента на шпинделе предельного значения. Также разработана система двухэтапной тепловой защиты двигателей на основе четырехмассовой тепловой модели, включающая на первом этапе предупреждение персонала о перегреве, а на втором этапе – «рабочий» останов двигателя по завершении технологического цикла.

Разработанные технические решения защищены девятью патентами РФ на изобретения, что подтверждает их техническую и научную новизну.

3. Практическая значимость работы

Наибольшая часть диссертационной работы посвящена практическому применению разрабатываемых ЦД на конкретных агрегатах прокатного производства. Таковыми являются вновь вводимый в эксплуатацию двухклетевой стан холодной прокатки, моталки и клетки станов 2500 и 2000 горячей прокатки, ножницы агрегата поперечной резки листа и некоторые другие объекты. Это подчеркивает практическую направленность исследований.

Получены следующие практические результаты:

1. Комплекс виртуальных пуско-наладочных работ – применен при вводе в эксплуатацию реверсивного стана 1700 холодной прокатки. В результате обеспечено существенное сокращение времени и трудозатрат на ПНР.

2. На стане 5000 внедрены в промышленную эксплуатацию: адаптивный РДН с переключающейся структурой, обеспечивающий форсированное согласование скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки. Также внедрены наблюдатель упругого момента и способ ограничения момента при ударном приложении нагрузки, включающий алгоритм адаптивного торможения двигателей клетки после захвата.

3. Внедренный комплекс цифровых двойников позволил провести виртуальный ввод в эксплуатацию моталок широкополосного стана 2500 при реконструкции с заменой оборудования. Автор утверждает, что это обеспечило сокращение времени ПНР не менее чем в 5 раз и снижение материальных издержек за счет исключения нестандартных ситуаций.

Кроме того, разработаны алгоритмы управления, обеспечивающие повышение качества намотки полосы, устранение дефектов и расширение сортамента за счет производства полос толщиной до 30 мм со смоткой в рулон.

4. Разработанная в диссертации технология ПНР, предусматривающая размещение симулятора и отлаживаемого ПЛК на виртуальных машинах, применена при реконструкции летучих ножниц агрегата поперечной резки листа. В результате значительно сокращено время реконструкции агрегата.

5. На стане 1700 внедрены алгоритм и программа автоматизированного анализа тепловых режимов электроприводов, а также система двухэтапной защиты двигателей от перегрева.

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

4. Оценка обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждаются, прежде всего, их промышленной апробацией на всех этапах работы над диссертацией. На этапе постановки задач дано экспериментальное обоснование научных проблем и направлений их решения. Ряд задач обоснован благодаря накопленному автором опыту наладки и настройки промышленных электротехнических систем и анализу ранее выполненных разработок.

В ходе исследований выполнялись проверка адекватности разработанных моделей и результатов моделирования. Также на всех этапах проводилось сопоставление теоретических и экспериментальных данных, их сравнение с результатами, полученными другими авторами. Подтверждением обоснованности и достоверности результатов являются ввод в промышленную эксплуатацию электроприводов стана 1700, а также длительная эксплуатация внедренных алгоритмов и систем управления на станах 2000, 2500 и 5000.

5. Рекомендации по использованию результатов работы

Безусловно, как и любая инновационная работа, данная диссертация не может охватить весь перечень возникающих задач и вопросов. Но она раскрывает широкие возможности для дальнейших работ в данном направлении. По сути, она раскрывает направления исследований будущих диссертаций с масштабным внедрением на промышленных объектах. Выполненные разработки рекомендуются для внедрения на прокатных станах независимо от рода тока и типа электроприводов. Их преимуществом является высокая эффективность при отсутствии капитальных затрат.

Разработанная система тепловой защиты двигателей рекомендуется для внедрения в электроприводах ответственных объектов, где есть опасность недопустимого нагрева электрооборудования.

Представленные технические решения рекомендуются для внедрения в электромеханических системах прокатных станков, оснащенных современными ПЛК. В комплексе с разработанными способами ограничения упругого момента они обеспечат сокращение непроизводительных затрат предприятий за счет снижения аварийности оборудования. Внедрение результатов раскрывает возможности производства проката с новым перечнем свойств и импортозамещения за счет повышения конкурентоспособности продукции.

6. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, соответствуют паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по следующим пунктам:

п.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических ком-

плексов и систем, включая электромеханические преобразователи энергии, системы электропривода»;

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».

7. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата полностью отражает содержание диссертационной работы, включая все полученные научные результаты, сделанные выводы и рекомендации.

8. Публикации и апробация диссертационной работы

Основные положения диссертации опубликованы в 56 научных трудах, в том числе 19 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ (все публикации в журналах категорий К1 и К2), 24 публикации в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и WOS, из них 9 статей – в изданиях, входящих в I и во II кварталы (Q1, Q2). Получено 9 патентов РФ на изобретения, зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Результаты докладывались на 23 международных конференциях и заседаниях научных сообществ.

9. Вопросы и замечания

1. В диссертации и автореферате неоднократно упоминается, что благодаря применению ЦД и НПЛ, теряется актуальность строгого/точного 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 это может быть подтверждено? Как можно оценить эффект от снижения количества нештатных ситуаций при ПНР?

3. В пояснениях к рисунку 1.4 (стр.39) в тексте диссертации 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?

6. Как автор оценивает перспективы применения технологий РНЦ-«силовых цифровых двойников» в электроприводе?

5. На каких положениях основана идея построения «нечеткого» РДН с каналом по производной разницы моментов двигателей? Встречаются ли подобные разработки в литературе?

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

7. 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,а и 3.16,б показывает отличия. Особенно, если обратить внимание на провалы, отсутствующие в окне 5 на рис. 3.16,а и присутствующие на рис. 3.16,б.

Заключение

Ведущая организация считает, что диссертационная работа Логинова Бориса Михайловича «Совершенствование электротехнических комплексов прокатных станов на основе концепции объектно-ориентированных цифровых двойников» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную в настоящее время 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.

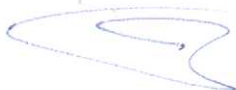
Все положения в диссертации научно обоснованы и связаны между собой. Выводы и рекомендации соответствуют поставленной цели и задачам. Основные материалы и результаты диссертации достаточно полно опубликованы и апробированы.

Замечания, сделанные в п. 9, носят частный характер и не снижают в целом положительной оценки диссертации.

Диссертация полностью отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства от 24 сентября 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.

Диссертационная работа и отзыв обсуждены и одобрены на заседании кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», протокол №2 от 19 февраля 2026 года.

Заведующий кафедрой
«Электропривод и автоматизация
промышленных установок»
УралЭНИН, ФГАОУ ВО «УрФУ»
к.т.н., доцент



Костылев
Алексей Васильевич

Кандидатская диссертация Костылева А.В. защищена по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Почтовый адрес: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Тел. 8-800-100-50-44

e-mail: contact@urfu.ru

Официальный сайт: <https://urfu.ru>