

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Мещерякова Виктора Николаевича на диссертацию Логинова Бориса Михайловича «Совершенствование электротехнических комплексов прокатных станов на основе концепции объектно-ориентированных цифровых двойников», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Актуальность темы диссертационной работы

Цифровая трансформация промышленности является общепризнанной мировой тенденцией. Автор диссертации справедливо отмечает, что в настоящее время все металлургические предприятия заявляют о приверженности «цифровому» направлению развития. Актуальность данного направления обусловлена тем, что развитие металлургической отрасли во всем мире характеризуется как достигшие уровня насыщения. Для обеспечения прогресса необходима ее глубокая трансформация на основе внедрения цифровых технологий.

Основой разработки данного направления является цифровой двойник (ЦД). Данное аппаратно-программное устройство предназначено для применения на всех этапах жизненного цикла любого технического объекта, начиная от его разработки и проектирования, вплоть до утилизации. Также обозначается применение ЦД на этапах мониторинга состояния оборудования и обучения персонала. Автор диссертации справедливо утверждает, что «в настоящее время двойники все чаще рассматриваются как средство повышения производительности агрегатов за счет использования вычислительных методов, которые становятся возможными благодаря виртуальному аналогу». Важность цифрового двойника признается как в академических кругах, так и представителями промышленности.

В качестве основных направлений применения двойников для агрегатов прокатного производства названы виртуальный ввод в эксплуатацию, включающий пуско-наладочные работы, совершенствование автоматизированных электроприводов и систем управления и мониторинг состояния в режиме штатной эксплуатации. Для мониторинга состояния электротехнических систем в эксплуатации обосновано применение цифровых теней, которые в ряде случаев принимаются как частный случай цифровых двойников.

Однако следует отметить, что теоретические разработки в области цифровых систем намного опережают их промышленное внедрение. Автор пишет, что «желание представителей промышленных кругов использовать их на своих предприятиях сдерживается отсутствием понятной методологии разработки ЦД для практических задач». Названы недостатки цифровых продуктов известных фирм – разработчиков прокатного оборудования, это сложность и узкая направленность. Цифровые двойники разрабатываются на

основе специализированных цифровых платформ, в основном, используемых при проектировании и строительстве новых агрегатов. Поэтому они получили ограниченное применения на действующих металлургических заводах.

В связи с этим автором обоснована разработка относительно простых объектно-ориентированных ЦД. Они должны создаваться без применения цифровых платформ на базе известных программ, используемых на промышленных предприятиях и в научных организациях. Не менее важной является научно-практическая проблема создания алгоритмов и систем контроля состояния электротехнических систем на основе цифровых теней, применяемых в качестве наблюдателей состояния либо отдельных координат электроприводов.

В связи с изложенным, диссертационная работа Логинова Б.М., посвященная совершенствованию электротехнических систем прокатных станов на основе цифровых двойников, является актуальной и практически значимой.

Объем, структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 321 библиографическую ссылку, и семи приложений объемом 46 страниц. Работа изложена на 402 страницах основного текста, содержит 178 рисунков и 45 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассмотрены концептуальные направления создания цифровых двойников в промышленности, выполнен анализ возможности их применения на агрегатах прокатного производства. Отмечена неоднозначность термина «цифровой двойник», приведены его определения, известные из литературы. Охарактеризована взаимозависимость цифровых двойников, цифровых теней и цифровых моделей.

Впервые обоснован объектно-ориентированный подход к созданию цифровых двойников, определено применение категорий цифрового двойника при его реализации. Представлены объекты исследования – электротехнические комплексы прокатных агрегатов ПАО «ММК», на примере которых разрабатываются цифровые двойники и цифровые тени. К ним относятся электроприводы горизонтальной клетки толстолистового стана 5000, комплекс моталок широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 2500, взаимосвязанные электроприводы ШСГП 2000 и реверсивного стана 1700 холодной прокатки, также рассматривается электропривод летучих ножниц агрегата поперечной резки горячекатаной полосы. Обоснована задача повышения точности двойникования (отображения виртуального пространства) за счет учета времени задержки при обмене информацией в структуре

цифрового двойника. Рассмотрены основные проблемы, устранение которых должно осуществляться в рамках исследований.

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

В третьей главе рассматривается применение объектно-ориентированных ЦД для виртуального ввода в эксплуатацию электротехнических систем прокатных агрегатов. Выполнена разработка агрегированного ЦД моталок стана 2500. Рассмотрена структура ЦД, разработана виртуальная модель гидравлической системы формирующих роликов.

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

Рассмотрено применение НЛ при реконструкции летучих ножниц агрегата поперечной резки полосы. Выполнена разработка цифровой системы управления на контроллере REGUL с использованием ПО Astra.IDE без использования реального оборудования.

Исследован принципиально новый вопрос применения ПЛК с многоядерными процессорами для виртуальной наладки электротехнических систем. Предложены варианты конфигурации цифровых двойников на ПЛК с двухядерным процессором.

Четвертая глава посвящена совершенствованию алгоритмов управления взаимосвязанными электроприводами прокатных станов. Выполнены разработка и исследование системы управления электроприводами верхнего и нижнего валков прокатной клетки на базе регулятора деления нагрузок (РДН) с переключающейся структурой. Разработан РДН на основе алгоритмов нечеткой логики с использованием ресурса *Fuzzy Logic Toolbox for MatLab*. Разработаны способ управления гидравлическими НУ в режиме профилированной прокатки. Разработаны технические решения, направленные на ограничение силового взаимодействия валков универсальной клетки в режиме совместной прокатки.

Разработан способ автоматического управления электроприводами в черновой группе клетей непрерывного стана.

Все разработки защищены патентами Российской Федерации на изобретения. Всего в диссертации сделана ссылка на 9 авторских патентов.

Пятая глава посвящена разработке и применению цифровых теней – наблюдателей координат для контроля технического состояния электроприводов. Разработан наблюдатель состояния электромеханической системы клетки на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния. Рассмотрена схема его подключения в Matlab Simulink, выполнены проверка адекватности восстанавливаемого сигнала и исследования ударного приложения нагрузки при различных угловых зазорах. Разработан наблюдатель эквивалентного углового зазора, приведены структура измерительной системы и результаты его восстановления.

Разработана тепловая модель двигателя на базе доменов Simscape Thermal Models, содержащая 4 массы: обмотки статора и ротора, железо статора и ротора. Представлены результаты сравнения восстановленной температуры в фиксированные моменты времени с результатами физических измерений, выполненных пирометрами на двигателе стана 5000. Разработанный наблюдатель теплового состояния на базе четырехмассовой тепловой модели двигателя рекомендуется для внедрения на прокатных станах.

Шестая глава посвящена созданию системы ограничения динамических нагрузок электропривода прокатной клетки на основе наблюдателя упругого момента. Выполнен расчет параметров наблюдателя, с этой целью разработана методика синтеза регулятора автоподстройки. Экспериментально доказана адекватность восстановления упругого момента.

Разработан способ управления электроприводом, отличительным признаком которого является торможение после захвата с темпом, зависящим от величины нагрузки и скорости ее приложения. Разработана методика определения параметров торможения по критерию минимума амплитуды упругого момента. По результатам экспериментальных исследований, проведенных на стане 5000, данный способ рекомендован для внедрения в электроприводах прокатных клетей, работающих с ударной нагрузкой.

В седьмой главе представлены результаты экспериментальных исследований и промышленного внедрения разработанных алгоритмов управления электроприводами. Исследован адаптивный РДН, внедренный на стане 5000. Доказано, что благодаря его повышенному быстродействию осуществляется форсированное согласование моментов. Представлен анализ упругих моментов, возникающих на шпинделях в аварийных режимах, сопровождающихся поломками оборудования. Экспериментально подтверждено, что реализация алгоритмов предразгона с последующим торможением электроприводов после захвата обеспечивает снижение амплитуд упругих моментов при входе раскатов в клеть.

Выполнено исследование динамики в аварийных режимах, вызванных отключением одного из электроприводов во время прокатки. Наибольшее внимание уделено анализу аварийного режима нахлеста полосы на валок с последующим затягиванием между рабочим и опорным валками, вызвавшего наиболее тяжелые последствия. Рассмотрены структура системы аварийного останова и схема адаптивного задатчика интенсивности, обеспечивающего экстренное торможение. Представлены результаты испытания алгоритма для двух случаев аварийного останова. Они дали косвенное подтверждение работоспособности системы защиты.

Разработана и внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию на стане 1700 холодной прокатки система защиты двигателей от перегрева, разработанная на основе четырехмассовой тепловой модели. Система реализует новый вариант адаптивной двухступенной защиты, модифицированный для двигателей прокатного стана. Она рекомендуется для внедрения на ответственных установках, где есть опасность недопустимого нагрева электрооборудования.

В заключении соискатель приводит основные выводы по совокупности результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы.

В приложениях приведены технические характеристики оборудования исследуемых электромеханических систем, результаты оценки задержек в системе контроллер – симулятор электропривода клетки, результаты фаззификации регулятора деления нагрузки при различных функциях принадлежности.

Также рассмотрена реализация стационарного наблюдателя Калмана для определения упругого момента, в том числе схема фильтра Калмана в Matlab Simulink и результаты восстановления переходных процессов наблюдателем. Рассмотрено влияние темпа подтормаживания на динамические процессы при захвате. Также приведены акты внедрения и опытно-промышленных испытаний внедренных разработок.

Научная новизна и достоверность полученных результатов

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Впервые обоснована научная концепция объектно-ориентированных цифровых двойников и цифровых теней электротехнических комплексов с учетом их взаимосвязей, обусловленной технологией прокатки. Данные разработки предназначены для настройки, виртуального ввода в эксплуатацию и мониторинга технического состояния электротехнических систем.

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 для разработки систем автоматизации,

поддерживающих симуляцию и тестирование в реальном времени, включая быстрое прототипирование и аппаратное моделирование НЦ.

3. Разработана методика анализа влияния несинхронного обмена информацией между виртуальной моделью и физическим устройством на точность двойникования. Определены запаздывание сигналов и усиление колебательных свойств системы. Для снижения запаздывания рекомендовано размещение виртуальной модели и алгоритма управления в ресурсах ПЛК с многоядерными процессорами.

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

5. Научно обоснованы методы нечеткой логики в сочетании с аппаратным моделированием НЦ 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. Получили развитие положения теории автоматического управления многосвязными системами. Разработаны способы управления, обеспечивающие ограничение взаимодействия электроприводов последовательно расположенных клеток в режиме совместной прокатки.

8. Обоснована и разработана методика настройки алгоритма адаптивного торможения, обеспечивающего снижение амплитуды момента при захвате металла валками, реализуемого регулятором с переключающейся структурой. В результате получила развитие концепция ограничения динамических нагрузок прокатного оборудования средствами автоматизированного электропривода.

9. Разработана методика контроля температуры с использованием тепловых моделей, построенных на унифицированных модулях Simscape Thermal Models. Разработаны наблюдатель температуры двигателя на основе четырехмассовой модели и система двухэтапной тепловой защиты. Это способствует развитию теории нагрева электрических машин на основе цифровых алгоритмов мониторинга температуры.

Достоверность научных положений, выводов и результатов, изложенных в работе, подтверждена следующим:

– экспериментальным обоснованием научных проблем и направлений их решения;

– опытом наладки и настройки промышленных электротехнических систем;

- анализом ранее выполненных разработок и опыта эксплуатации прокатных агрегатов;
- верификацией разработанных моделей и валидацией результатов моделирования;
- 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.

Практическая значимость и ценность работы

В результате разработки комплекса цифровых двойников и наблюдателей координат электротехнического оборудования получены следующие практические результаты:

1. С использованием ЦД и новых алгоритмов управления на стане 5000 внедрены в промышленную эксплуатацию: адаптивный регулятор деления нагрузок 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. Произведен виртуальный ввод в эксплуатацию группы моталок широкополосного стана 2500 при реконструкции с заменой оборудования. Это обеспечило сокращение времени пуско-наладочных работ и снижение материальных издержек за счет исключения нештатных ситуаций.

3. Комплекс виртуальных ПНР электрооборудования обеспечил сокращение в несколько раз 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 агрегата поперечной резки полосы. В результате время реконструкции было сокращено.

5. На стане 2500 обеспечены: повышение качества намотки полосы и устранения дефектов на полосе за счет реализации усовершенствованных алгоритмов регулирования координат систем управления 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.

В целом, в результате внедрения систем управления и защиты созданы предпосылки для реализации концепции «интеллектуальный прокатный стан». Внедрение результатов диссертационных исследований обеспечивает возможности производства проката с новым перечнем свойств и создает условия для импортозамещения продукции предприятий металлургической отрасли.

Публикации по работе

Основные положения диссертации в достаточном объеме изложены в 56 научных трудах, в том числе:

- 19 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ;
- 24 статьи и доклада в изданиях, входящих в базы WOS и Scopus, из них 9 статей – в изданиях, входящих в I и во II квартиль (Q1, Q2);
- получено 9 патентов РФ на изобретения;
- зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

В представленных публикациях достаточно полно отражены все основные положения и выводы диссертационной работы.

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Автореферат в полной мере отражает основные положения, идеи и выводы диссертации. Материалы автореферата дают полное представление о научных результатах работы.

Замечания

1. В 1-й главе требует пояснений 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 подробных 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?

7. Поскольку направление диссертационного исследования, посвященное разработке и применению цифровых двойников в электроприводе, является новым (в определенной степени пионерским), автору следовало бы обозначить перспективы его развития и отметить задачи дальнейших исследований.

Заключение

Диссертационная работа Логинова Б.М. «Совершенствование электротехнических комплексов прокатных станов на основе концепции объектно-ориентированных цифровых двойников» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новое решение актуальной научно-технической задачи по развитию теории и практики цифровых электротехнических систем, разработанных на основе принципиально новой концепции объектно-ориентированных цифровых двойников и цифровых теней, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие народного хозяйства Российской Федерации.

Работа написана автором самостоятельно, структурирована и обладает внутренним единством, содержит научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку, в том числе в разработку методов, моделей и способов управления, развивающих теорию и практику электротехнических комплексов прокатных станов на основе концепции объектно-ориентированных цифровых двойников.

Диссертация Логинова Б.М. соответствует паспорту научной 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.2. «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов»; 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».

Представленная диссертационная работа «Совершенствование электротехнических комплексов прокатных станков на основе концепции объектно-ориентированных цифровых двойников» соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с пунктами 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановления Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года в редакции от 25.01.2024), а ее автор Логинов Борис Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент

Заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и робототехники ФГБОУ ВО «ЛГТУ»

д-р техн. наук, профессор

Мещеряков Виктор Николаевич

23.01.2026

(докторская диссертация Мещерякова В.Н. защищена по научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы)

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет»

Адрес: 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30

Тел./факс: +7 (4742) 328-000 / +7 (4742) 310-473

E-mail: mailbox@stu.lipetsk.ru

Сайт: <https://www.stu.lipetsk.ru>



Handwritten signature of the official opponent.