

На правах рукописи



ГАСИЯРОВА ОЛЬГА АНДРЕЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТИ  
ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТНОГО СТАНА ЗА СЧЕТ  
ОГРАНИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

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

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук  
ЛОГИНОВ Борис Михайлович

Официальные оппоненты:

ФЕОФИЛОВ Сергей Владимирович,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный  
университет», г. Тула, заместитель  
директора передовой инженерной  
школы «Тульская инженерная школа  
«Интеллектуальные оборонные  
системы»

СУХЕНКО Николай Александрович,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Южно-Российский госу-  
дарственный политехнический универ-  
ситет (НПИ) имени М.И. Платова»,  
г. Новочеркасск, доцент кафедры  
«Электроснабжение и электропривод»

Ведущая организация:

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

Защита состоится 11 апреля 2025 г. в 15<sup>00</sup> 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 \_\_\_\_ февраля 2025 г.

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



К.Э. Одинцов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Проблема повышения ресурса электроприводов прокатных станов за счет ограничения динамических нагрузок, несмотря на давность постановки, актуальна и в настоящее время. Особую значимость она имеет для электромеханических систем клетей толстолистовых станов, в том числе стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Аналогичные станы эксплуатируются в ОАО «ВМЗ» (г. Выкса), ОАО «Северсталь» (г. Колпино) и на зарубежных металлургических заводах. Прокатка раскатов на таких агрегатах выполняется в реверсивном режиме с ударным приложением нагрузки при входе раската в клеть. Высокие динамические нагрузки при захвате металла валками вызывают усталостные разрушения, ускоренный износ и поломки шпиндельных соединений и лопастей валков. Это приводит к снижению ресурса шпинделей и валков, авариям и простоям, которые приносят убытки предприятию.

Отличительной особенностью горизонтальных клетей станов данного класса является индивидуальный (безредукторный) электропривод, что обеспечивает возможность независимого задания скоростей валков. Механическое соединение двигателей и валков осуществляется с помощью шпинделей выдвигного типа. В этом случае электромеханическая система каждого валка может быть представлена как двухмассовая система с упругой связью и зазорами в механической передаче, обусловленными конструкцией шпиндельных соединений. Аналогичная концепция электромеханических систем применяется на черновых клетях широкополосных и сортовых прокатных станов. Анализ опыта их эксплуатации подтвердил актуальность ограничения ударных нагрузок средствами автоматизированного электропривода.

Исследованию причин высоких динамических нагрузок и разработке способов их ограничения посвящены работы многих отечественных и зарубежных исследователей. Вклад в развитие теории и практики многомассовых электромеханических систем с упругой связью внесли В.Н. Выдрин, В.И. Ключев, В.Н. Мещеряков, Г.Я. Пятибратов и др. Также следует отметить разработки зарубежных фирм SMS group (Германия), General Electric (США) и др. В числе разработок, выполненных в последние годы, следует назвать диссертации Б.М. Логинова и др., защищенные в Магнитогорском государственном техническом университете.

В качестве важных факторов, влияющих на динамические нагрузки, определены упругие свойства вала и угловые зазоры в шпиндельных соединениях. Разработаны системы управления электроприводами горизонтальной клетки стана 5000, обеспечивающие ограничение динамического момента. Однако опыт их эксплуатации показал несовершенство алгоритмов управления, а также отсутствие непрерывного контроля упругого момента. Кроме того, не выполнен анализ влияния нагрузок на ресурс шпиндельных соединений. Таким образом, проведенные исследования, направленные на совершенствование применяемых в настоящее время алгоритмов управления электроприводами, являются актуальными.

**Целью диссертационной работы** является разработка комплекса научно-обоснованных технических решений, обеспечивающих повышение ресурса электромеханических систем реверсивной клетки толстолистого прокатного стана за счет ограничения динамических нагрузок при входе раскатов в клеть.

**Для достижения цели поставлены следующие задачи:**

1. Теоретические и экспериментальные исследования динамических процессов в электромеханических системах горизонтальной клетки толстолистого прокатного стана при захвате металла валками. Анализ известных способов снижения ударных нагрузок за счет совершенствования алгоритмов управления электроприводами.

2. Совершенствование способа управления электроприводом, обеспечивающего компенсацию составляющей момента, обусловленной упругими свойствами шпинделя. Предлагаемым решением является кратковременное интенсивное торможение электропривода с регулируемым темпом после захвата с целью создания отрицательного динамического момента.

3. Разработка системы измерения упругого момента на валу электропривода по сигналам, поступающим в on-line режиме, разработка наблюдателя упругого момента, обеспечивающего его вычисление (восстановление) по координатам электропривода.

4. Разработка методики расчета ресурса шпинделей электроприводов, основанной на линейной гипотезе Пальмгрена-Майнера и подсчете количества превышений упругим моментом установленного предела.

5. Экспериментальные исследования и промышленное внедрение разработанного алгоритма управления электроприводом. Оценка технико-экономической эффективности.

**Методика проведения исследований.** Применены основные положения теории электропривода, теории автоматического регулирования, в том числе преобразование структурных схем, теории надежности технических систем. Теоретические исследования проводились с помощью модели, разработанной в графической среде Simulink пакета Matlab. На всех этапах проводились экспериментальные исследования на стане 5000, выполнялось сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими. При внедрении разработок использовался подход, основанный на создании виртуальных моделей объекта с последующим переносом отлаженного алгоритма в программное обеспечение управляющих контроллеров. Разрабатываемая методика оценки ресурса оборудования основана на гипотезе Пальмгрена-Майнера.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Способ управления электроприводом, обеспечивающий снижение амплитуды упругого момента на шпинделе за счет формирования тахограмм с положительным и отрицательным ускорениями соответственно до и после захвата раската валками. Отличием является задание интенсивности торможения пропорциональным скорости, измеренной в момент захвата.

2. Наблюдатель упругого момента на валу электропривода, обеспечивающий его восстановление в on-line режиме. Система вычисления ресурса шпинделя электропривода на основе наблюдателя и контроллера, осуществляющего

подсчет количества случаев превышения динамическим моментом заданного предельного значения.

3. Методика вычисления ресурса шпинделей электроприводов, основанная на линейной гипотезе накопления разрушений Пальмгрена-Майнера. Результаты расчета, подтвердившие различие выработанных ресурсов шпинделей верхнего и нижнего валков в процессе эксплуатации.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтвердившие повышение ресурса шпинделя не менее чем в 1,5 раза за счет снижения динамических нагрузок в режиме захвата раскатов валками.

**Обоснованность и достоверность научных положений** подтверждаются совпадением полученных результатов с ранее опубликованными результатами; применением характеристик действующего оборудования при разработке математических моделей; экспериментальными исследованиями, выполненными на стане 5000 на всех этапах работы; верификацией экспериментальных данных, полученных при различных нагрузочных и скоростных режимах электроприводов; соответствием результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных; положительной оценкой итогов длительной эксплуатации внедренных алгоритмов.

#### **Научная новизна.**

1. Разработан способ ограничения динамического момента двигателя и момента на шпинделе, согласно которому обеспечиваются замыкание зазора перед захватом путем предварительного разгона электропривода и торможение после захвата с темпом, пропорциональным значению скорости в момент захвата.

2. Обоснована методика и определены аналитические зависимости для расчета темпа ускорения электропривода в режиме предразгона, достаточного для замыкания угловых зазоров перед захватом при различных их величинах. Обоснованы аналитическая зависимость и алгоритм вычисления оптимального темпа замедления в функции скорости в момент захвата.

3. Разработана методика расчета износа шпинделей электроприводов, обусловленного ударными нагрузками, основанная на гипотезе линейного накопления усталостных разрушений Пальмгрена-Майнера. Получены аналитические выражения для расчета ресурса шпинделей и анализа зависимости выработанного ресурса от величины момента при многократных нагружениях.

#### **Практическая значимость и реализация работы.**

1. Разработанный алгоритм ограничения упругого момента за счет предварительного ускорения и торможения с регулируемым темпом после захвата внедрен в электроприводах клетки стана 5000 ПАО «ММК». В результате экспериментов доказано снижение амплитуды упругого момента в 1,5–2 раза.

2. Разработанный наблюдатель реализован в виде алгоритма в АСУ ТП стана 5000. Дано экспериментальное подтверждение восстановления упругого момента в динамических режимах с погрешностью, не превышающей 5%, что является приемлемым при разработке промышленных систем.

3. Результатом внедрения разработанных алгоритмов является увеличение нормативного срока эксплуатации оборудования главной линии клетки от 3-х до 8-и лет. Экономический эффект от сокращения затрат на аварийную замену шпинделя составляет 5,94 млн руб./год.

4. Разработанные наблюдатель упругого момента и способ управления электроприводом рекомендуются для внедрения на прокатных станах с индивидуальным электроприводом валков и на других промышленных агрегатах.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертационной работы полностью 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 и утилизацию их компонентов».

**Апробация работы.** Положения, выносимые на защиту, докладывались на 6-и международных конференциях, в том числе: International Ural Conference on Electrical Power Engineering, Магнитогорск 2020 г; 7th International Conference on Industrial Engineering, Сочи 2021 г; International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, Сочи 2022 г; 2022 International Russian Automation Conference, Сочи 2022 г; Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice, Магнитогорск 2023 г; International Russian Smart Industry Conference, Сочи 2024 г.

**Публикации.** По содержанию диссертационной работы опубликовано 17 научных трудов, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, 3 статьи и 6 докладов в изданиях, входящих в базы данных WOS и Scopus, зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 135 наименований. Изложена на 169 страницах, содержит 71 рисунок, 24 таблицы и приложение объемом 13 страниц.

В 2020–2022 гг. работа выполнялась в рамках договора с ПАО «ММК» №243136 от 14.05.2020 г. В 2020-2022 гг исследования выполнялись в рамках государственного задания (фундаментальное научное исследование), договор №FENU-2020-0020 (2020071ГЗ).

**Личный вклад автора.** Все результаты получены автором самостоятельно. Разработан способ управления электроприводом с предварительным разгоном и регулируемым темпом торможения после захвата раската валками. Проведены исследования методом компьютерного моделирования, подтвердившие снижение амплитуды упругого момента на шпинделе и равенство длин участков, прокатанных во время технологического ускорения. Разработаны система вычисления ресурса и наблюдатель упругого момента, обеспечивающий его восстановление путем дифференцирования сигнала скорости электропривода. Научно обоснована и разработана методика вычисления выработанного ресурса шпинделей, основанная на гипотезе Пальмгрена-Майнера. Получены аналити-

ческие выражения для расчета зависимости выработки ресурса от кратности моментов. Автор принимала непосредственное участие в проведении экспериментов на стане 5000. Самостоятельно провела обработку результатов, выполнила расчет ожидаемого экономического эффекта.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отмечена актуальность снижения динамических нагрузок двигателя и момента на шпинделе толстолистового стана. Обоснованы направления решения этой проблемы путем формирования специальных тахограмм электропривода. Отмечены недостатки известных систем, разработанных в ранее защищенных диссертациях. Обоснованы цель и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** дана характеристика объекта исследований – электромеханической системы горизонтальной клетки стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000). Исследованы особенности реверсивной прокатки заготовок и динамические режимы, возникающие при входе раскатов в клеть. Отмечены недопустимые увеличения моментов двигателей главных приводов верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП) и упругих моментов на шпинделях. Дана характеристика известных аналогов, отмечены их недостатки.

На рис. 1, а показан вход раската в горизонтальную клеть со стороны отводящего рольганга. Масса сляба составляет до 30 т, исходная толщина 300–350 мм. Абсолютные обжатия в первых проходах – до 30 мм, усилие прокатки до 12 т. Очевидно, что задание в клеть заготовки, обладающей большой инерцией, при указанных обжатиях приводит к значительным (часто недопустимым) динамическим нагрузкам. В связи с расширением сортамента за счет производства листов из труднодеформируемых марок стали динамические нагрузки увеличиваются. Упрощенная кинематическая схема клетки представлена на рис. 1, б. Привод каждого валка осуществляется синхронными двигателями мощностью 12 МВт с частотным регулированием скорости.

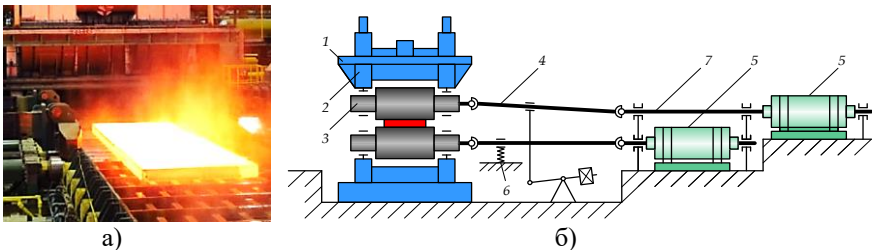


Рис. 1. Вход заготовки в клеть стана 5000 (а) и кинематическая схема электро-механических систем клетки (б): 1 – клеть; 2 – станины; 3 – рабочие валки; 4 – универсальные шпиндели; 5 – электродвигатели; 6 – устройство для уравнивания шпинделей; 7 – промежуточный вал

Передача вращения от двигателя валкам осуществляется с помощью шпинделей выдвигного типа, фотография приведена на рис. 2, а. Сочленение шпинделя с валком осуществляется с помощью специальных соединений (рис. 2, б.

В каждом шпиндельном соединении имеет место угловой зазор (люфт)  $\delta$ , необходимый для сочленения конструкции и перемещения вала в вертикальном направлении. Изначально он равен  $\sim 2^\circ$ , но по мере износа увеличивается до  $5^\circ$  (в процессе эксплуатации стана неоднократно фиксировался зазор до  $8^\circ$ ).



Рис. 2. Фотография шпинделя (а) и конструкция шпиндельного соединения (б)

В настоящее время на стане реализован алгоритм управления, обеспечивающий захват металла во время ускорения электропривода (предразгона) и формирующий замыкание угловых зазоров до входа раската в клеть. Упрощенная функциональная схема электроприводов, реализующая данный принцип, показана на рис. 3. Опыт эксплуатации этой системы подтвердил снижение амплитуды динамического момента в 1,3-1,5 раза. Тем не менее, практика показала, что такой положительный эффект обеспечивается не всегда. Связано это с тем, что причиной динамических нагрузок на шпинделях является не только динамический удар, вызываемый непосредственно замыканием зазора, но и затухающие колебания момента, амплитуда которых обусловлена упругими свойствами вала, а степень затухания – диссипативными силами.

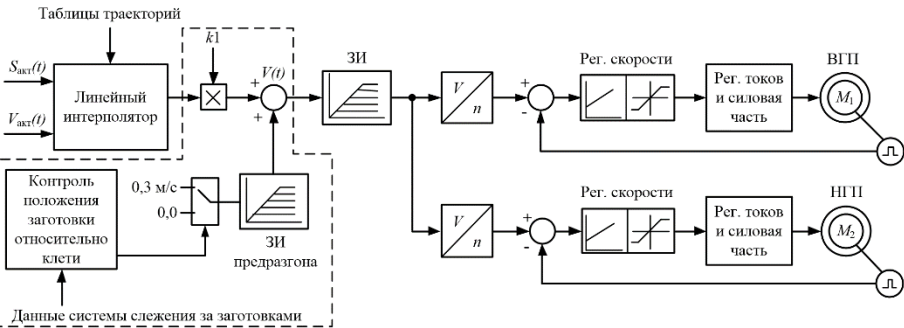


Рис. 3. Схема действующей системы управления электроприводами

Переходные процессы скоростей и моментов за один проход поясняют осциллограммы, представленные на рис. 4. Согласно существующей технологии вход раскатов в клеть осуществляется на заправочной скорости (в диапазоне от 2 до 3,5 м/с), на рис. 4 – при скорости 2,75 м/с. Далее после формирования изгиба переднего конца раската («лыжи») осуществляется разгон до установившейся скорости прокатки (технологическое ускорение). Амплитудные значения моментов шпинделя в 1,5 раза выше, чем момент двигателя. Колебания не демфируются, т.к.



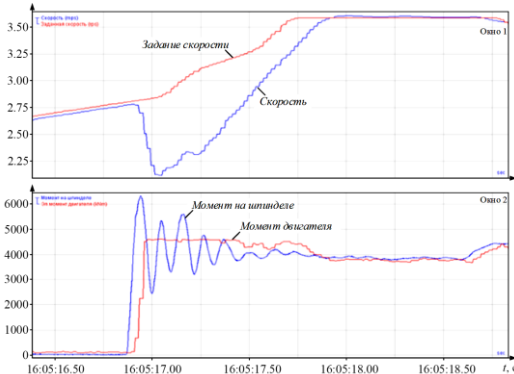


Рис. 4. Осциллограммы момента двигателя в режиме захвата с выходом на ограничение момента двигателя

недостаток обусловлен одинаковым темпом замедления двигателей независимо от их реальной скорости в момент захвата.

Указанное подтверждает актуальность разработки способов управления, реализующих ограничение моментов при захвате металла валками и в первую очередь за счет совершенствования алгоритмов управления электроприводами.

Выполнен анализ известных методик расчета ресурса электромеханических систем. Обоснована разработка методики расчета ресурса шпинделей на основе линейной гипотезы Пальмгрена-Майнера. В основу этой гипотезы положено правило накопления усталостных повреждений на основе подсчета количества циклов на каждом уровне напряжения, что вполне справедливо для расчета ресурса при ударных нагрузках.

Кроме того, поставлена задача разработки информационной системы on-line мониторинга упругого момента и наблюдателя с функцией расчета выработанного ресурса.

**Во второй главе** выполнен анализ влияния зазора на амплитуду момента на шпинделе и запаздывание передачи вращающего момента на валок. Сделан вывод, что амплитуда при реверсе наряду с величиной зазора определяется ускорением во время замыкания зазора. Подчеркнута важность полного замыкания зазора до приложения нагрузки, вызванного входом раската в клеть. Определены зависимости для вычисления оптимального ускорения перед захватом. Выполнено моделирование ударного приложения нагрузки.

Схема модели электромеханической системы валка в Matlab Simulink, представлена на рис. 5. За основу принята известная модель двухмассовой системы электропривода. Возможность такого представления подтверждает кинематическая схема, на рис. 1, б. Первой массой является ротор двигателя, второй – прокатный валок. Реализована двухконтурная система управления с внешним контуром скорости и внутренним контуром момента электропривода. Замкнутый контур регулирования момента представлен звеном первого порядка. Возможность такого упрощения подтверждена опубликованными исследованиями.

разомкнут регулятор скорости. Механическая часть представляется при этом двумя интеграторами, по сути, это колебательное звено. Перерегулирование момента и просадка скорости устраняются не полностью.

Еще один недостаток известного способа заключается в том, что возникает различие длин участков, прокатанных в режиме технологического ускорения после захвата. Это приводит к усилению силовой связи горизонтальной и вертикальной клетей через металл, в том числе к возникновению подпора. Такой

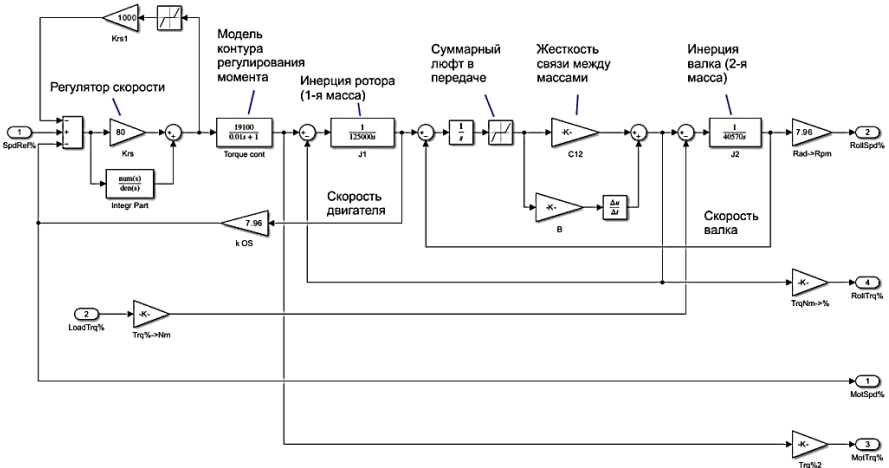


Рис. 5. Схема модели электромеханической системы

Выполнен анализ переходных процессов в электромеханической системе вала при замыкании угловых зазоров в режиме ускорения. Замыкание происходит в режиме реверса при предварительно разомкнутых зазорах. Расчетные временные зависимости представлены на рис. 6, а, они получены для значений угла  $\delta$ :  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  и  $8^\circ$ , им соответствуют индексы 1, 2, 3, 4. Из них следует, при увеличении зазора в 8 раз от  $1^\circ$  до  $8^\circ$  амплитуда момента двигателя возросла в 2,2 раза (от 317,4 до 690,8 кН·м). Аналогично, амплитуда момента шпинделя увеличилась в 2,6 раза от 221,8 кН·м до 578,9 кН·м.

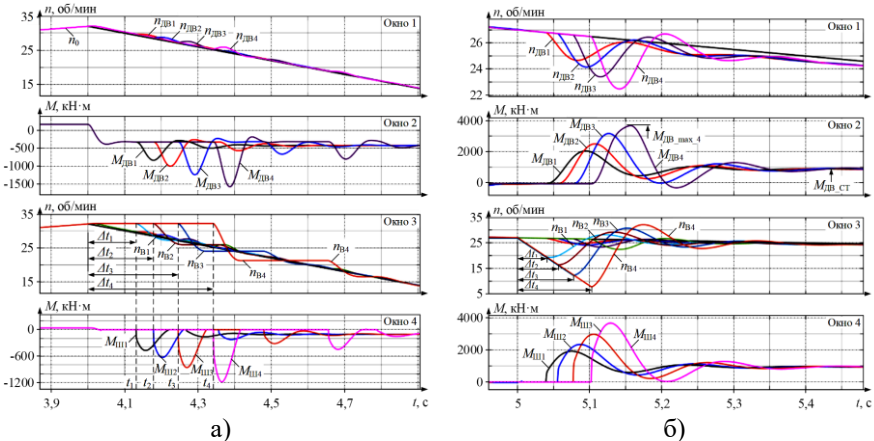


Рис. 6. Переходные процессы при замыкании угловых зазоров  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  и  $8^\circ$  в режиме реверса без нагрузки (а) и при ударном приложении нагрузки в момент захвата (б): окна 1, 3 – скорости двигателя  $n_{ДВi}$  и вала  $n_{Вi}$ , об/мин; окна 2, 4 – моменты двигателя  $M_{ДВi}$  и на шпинделе  $M_{Шi}$ , кН·м

Переходные процессы, рассчитанные для режима ударного приложения нагрузки при одновременном замыкании углового зазора, приведены на рис. 6, б. Прикладывалась нагрузка 50% номинального момента двигателя ( $0,5M_H$ ), равного 1910 кН·м, ей соответствуют установившееся значение момента  $M_{ДВ\_СТ}$  в окне 2. Видно, что замыкание и соответственно увеличение нагрузки происходят с запаздыванием  $\Delta t_i$ , зависящим от величины зазора. Из этих зависимостей следует, что амплитуда момента в данном режиме при  $\delta=1^\circ$  превышает установившийся момент прокатки  $M_{ДВ\_СТ}$  в 2 раза, при  $\delta=8^\circ$  – в 3,7 раза. Таким образом, при увеличении углового зазора в 8 раз максимальное значение момента двигателя возрастает в 1,8 раза. Аналогичное соотношение наблюдается для амплитуд моментов на шпинделе.

Предложены аналитические зависимости для вычисления ускорения в режиме предразгона, обеспечивающего замыкание зазоров различной величины. При неизменном зазоре это время может варьироваться регулированием темпа ускорения (замедления) двигателя. Расчет оптимального ускорения выполняется на примере осциллограмм, полученных на стане (рис. 7).

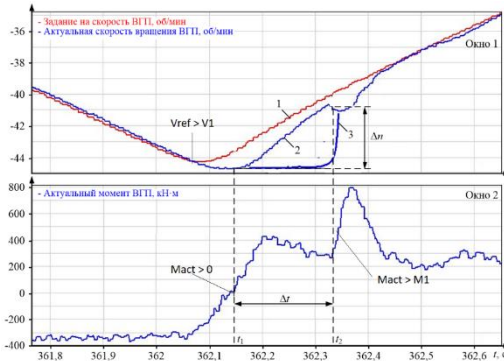


Рис. 7. Осциллограммы при замыкании зазора в режиме реверса: окно 1 – заданная (1) и фактическая (2) скорости двигателя и изменение скорости при раскрытом зазоре (3); окно 2 – фактический момент двигателя

угловой зазор составит  $\delta = 0,038$  рад или около  $2,2^\circ$ . Согласно выражению (1), операция интегрирования заменена умножением приращений скорости и времени. Это обосновано, т.к. скорость (кривая 1) изменяется по линейному закону.

Искомое ускорение  $a_{Ref}$  связано с заданием линейной скорости  $v_{Ref}$  зависимостью:

$$v_{Ref} = a_{Ref} \cdot t. \quad (2)$$

После преобразований ускорение, необходимое для замыкания зазора:

$$a_{Ref} = \frac{\delta \cdot 2R_W}{\Delta t^2}. \quad (3)$$

Раскрытие зазора происходит в момент времени  $t_1$ , когда момент двигателя меняет знак. К моменту времени  $t_2$  зазор закрывается, что подтверждает последующий рост момента двигателя от 300 до 800 кН·м. Исходя из предположения, что скорость шпинделя при раскрытом зазоре изменяется по кривой 3, величину угла можно рассчитать по зависимости:

$$\delta = \frac{1}{2} \Delta n \cdot \Delta t \cdot 0,1047, \quad (1)$$

где 0,1047 – коэффициент перевода об/мин в рад/с.

При  $\Delta n = 4$  об/мин,  $\Delta t = 0,18$  с

Проведены исследования, показавшие, что при увеличении зазора от  $1^\circ$  до  $8^\circ$  для замыкания зазора за 0,5 с необходимо увеличение темпа замедления электропривода после захвата в 4 раза. Это позволяет рекомендовать коррекцию темпа предразгона по мере увеличения износа шпиндельного соединения.

В результате моделирования подтвержден недостаток ранее внедренной системы (рис. 3), обусловленный постоянным темпом торможения двигателя независимо от его скорости в момент захвата. Это приводит к отклонению реальной тахограммы от заданной и обработке технологического ускорения после захвата за разное время. В результате возникает отклонение длины участка, прокатанного в режиме технологического ускорения. Для устранения этого недостатка необходимо совершенствование способа управления электроприводами за счет формирования тахограмм с регулируемым замедлением после захвата.

**Третья глава** посвящена разработке и исследованиям способа управления электроприводами с предразгоном и торможением двигателя после захвата с автоматическим заданием темпа замедления в функции скорости двигателя в момент захвата.

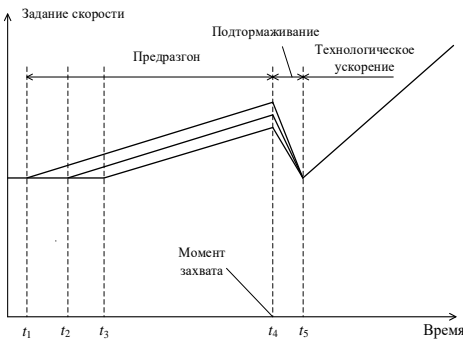


Рис. 8. Тахограмма электропривода, поясняющая разработанный способ

Предложенный способ поясняет тахограмма, представленная на рис. 8. Отличительным признаком является задание разных темпов торможения в интервале времени  $t_4-t_5$ . Благодаря этому скорости двигателя в момент времени  $t_5$  одинаковы. Это обеспечивает последующее технологическое ускорение с одинаковым темпом и соответственно равенство скоростей в каждый момент времени при  $t > t_5$ . Структурная схема управления электроприводами, реализующая способ, показана на рис. 9.

Система обеспечивает способ управления, согласно которому захват раската осуществляется в режиме предиктивного разгона электропривода. Отличительным признаком является торможение с заданным темпом, зависящим от фактической скорости двигателя в момент в момент  $t_4$  (рис. 8). Данный признак реализует ЗИ предразгона, который регулирует темп замедления электропривода. Благодаря этому обеспечивается равенство скоростей в начальный момент технологического ускорения (в момент времени  $t_5$ ).

Для определения оптимального темпа торможения разработаны модель для вычисления упругого момента и набор команд (скрипт) на языке Matlab, позволяющие выполнить расчет коэффициента динамичности в зависимости от углового зазора и темпа торможения при захвате на раскрытый зазор. Эта зависимость представлена на рис. 10, а.

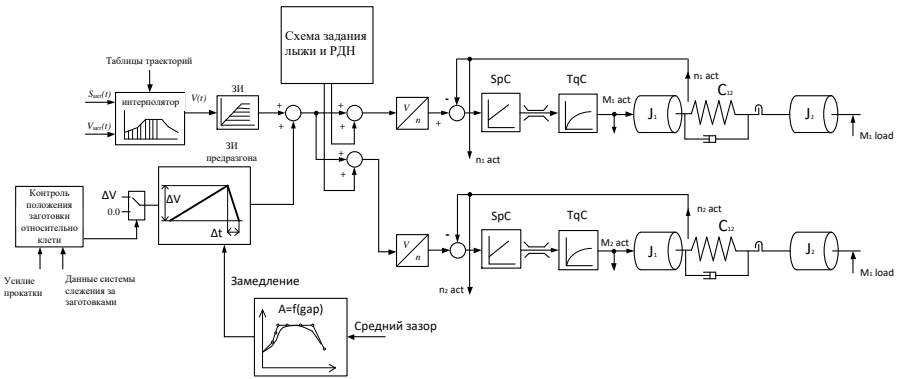
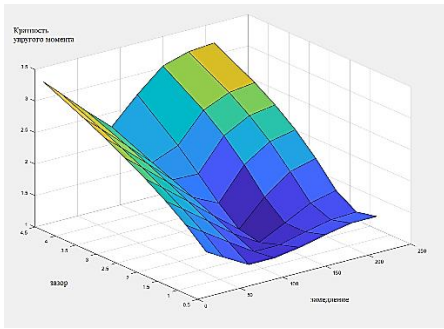
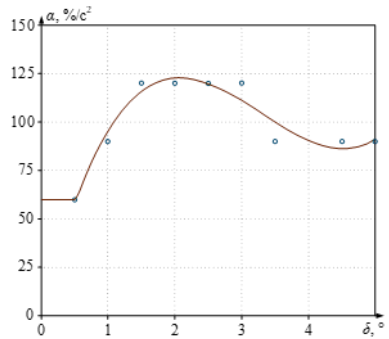


Рис. 9. Функциональная схема системы управления электроприводами



а)



б)

Рис. 10. Результат расчета кратности упругого момента

Зависимость имеет сложный характер с явно выраженными экстремумами. Это подтверждает, что для любых значений зазора существует оптимальный темп замедления, который обеспечит минимальный коэффициент динамичности и соответственно минимум амплитуды упругого момента. Зависимость оптимального темпа замедления  $\alpha$  [%/с²] от углового зазора представлена на рис. 10, б. Вычисленные данные задаются в систему управления в виде таблицы и используются в алгоритме управления скоростями.

Методом моделирования доказано, что торможение с оптимальным темпом обеспечивает уменьшение кратности динамического момента в 1,6 раза при угловом зазоре 1° и в 1,5 раза при угловом зазоре 5°. Таким образом, при внедрении алгоритма, реализующего разработанный способ, обеспечивается одинаковое снижение динамических нагрузок независимо от величины зазора в шпиндельных соединениях.

Выполнено моделирование технологического ускорения после захвата раската валками. Доказано, что задание темпов замедления в функции скорости двигателей в момент захвата обеспечивает равенство длин прокатанных участков. В результате устраняется опасность нарушения силовой взаимосвязи последовательно расположенных горизонтальной и вертикальной клетей стана.

**Четвертая глава** посвящена разработке и применению методики расчета усталостного износа и ресурса шпинделей на основе измерений амплитуд упругого момента. Решение задачи основано на анализе осциллограмм упругих моментов, расчеты выполняются с использованием массивов данных, записанных в процессе прокатки. Термин «ресурс» определяется как наработка механизма от начала его эксплуатации (или после ремонта) до достижения предельного состояния, определяемого нормативно-технической документацией.

Разработаны и реализованы с использованием пакета Matlab Simulink система измерения упругого момента и контроллер, обеспечивающий подсчет количества превышений упругим моментом заданного значения. Они могут быть применены как для вычислений по сигналам в on-line режиме, так путем обработки предварительно записанных массивов данных. Методика вычисления основана на подсчете количества превышений предела  $1,2M_H$ .

**Разработан наблюдатель упругого момента**, обеспечивающий его восстановление по координатам электропривода, измеряемым в on-line режиме (рис. 11). На практике для измерения доступны две координаты электропривода – момент двигателя и скорость первой массы. Момент нагрузки здесь представляет собой возмущающее воздействие. Дополнительной функцией наблюдателя является расчет ресурса шпинделя.

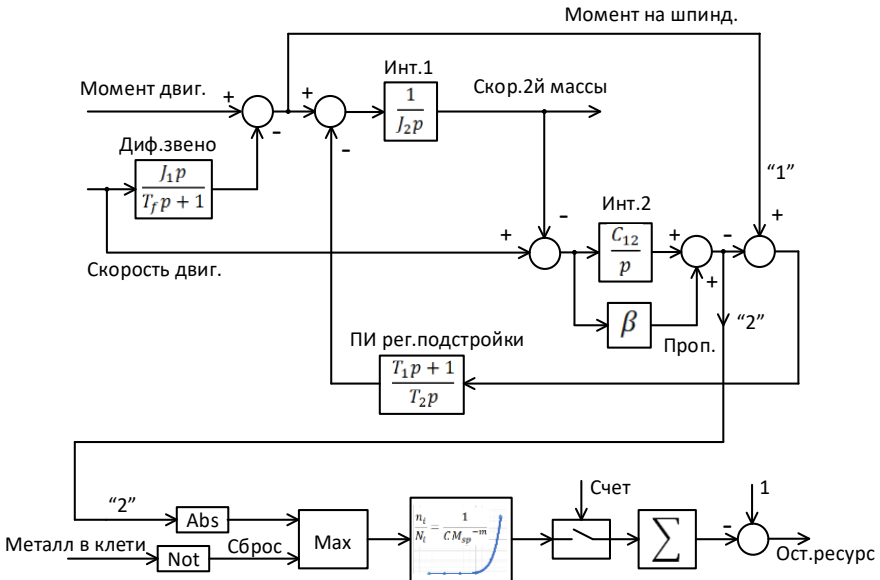


Рис. 11. Структурная схема разработанного наблюдателя

В схему наблюдателя из системы автоматического регулирования, реализованной в преобразователях частоты, вводятся сигналы скорости и момента двигателя, что по сути соответствует методике виртуальной настройки системы

управления. Данный подход позволяет выполнить настройку наблюдателя с учетом фактических динамических свойств системы.

Подтверждена адекватность упругих моментов, восстановленных наблюдателем. С этой целью проведено сравнение зависимостей восстановленных моментов и осциллограмм, полученных от физического датчика момента на шпинделе. Дано обобщение результатов, подтвердившее приемлемую точность определения упругого момента.

**Разработана методика вычисления ресурса**, приведены аналитические зависимости, поясняющие расчет. В основу этой методики положена гипотеза Пальмгрена-Майнера, согласно которой справедливо равенство

$$\sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (4)$$

где  $n_i$  – число циклов на  $i$ -ом уровне нагружения;  $N_i$  – число циклов до разрушения на том же уровне;  $K$  – количество уровней нагружения.

При этом принимается, что каждое нагружение, превышающее заданный порог, снижает ресурс на величину  $\Delta n_i$ .

Если в известном выражении для определения кривой усталости

$$N = C\sigma_a^{-m} \quad (5)$$

вместо амплитуды напряжений  $\sigma_a$  использовать кратность перегрузки по моменту на шпинделе  $M_{sp}$ , то при соответствующем пересчете коэффициентов  $C$  можно записать

$$N = CM_{sp}^{-m}, \quad (6)$$

где  $m$  – степенной параметр кривой усталости.

Тогда для каждого нагружения будет справедливым выражение:

$$\frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{CM_{sp}^{-m}}. \quad (7)$$

Для аппроксимации зависимости (6) предложен степенной полином

$$N = 1 * 10^9 M_{sp}^{-12.01}, \quad (8)$$

после подстановки которого в (7) получено выражение:

$$\frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{CM_{sp}^{-m}} = \frac{1}{1 * 10^9 M_{sp}^{-12.01}}. \quad (9)$$

На рис. 12 показана зависимость выработки ресурса от кратности момента за один проход, построенная с учетом принятых условий по выражению (9). Эта зависимость задается в виде таблицы в нелинейный блок наблюдателя (см. рис. 11). Ее анализ позволяет сделать следующие выводы:

- при однократном нагружении моментом, кратность амплитуды которого не превышает 4-х значений  $M_H$ , влияние динамических нагрузок на ресурсе шпинделя не сказывается;

- при одноразовом нагружении моментом амплитудой  $5,6M_H$  происходит поломка шпинделя, т.к. выработанный ресурс становится равным единице



Рис. 12. Зависимость выработки ресурса от кратности момента при захвате

**Промышленная апробация.** С использованием разработанной системы online мониторинга упругого момента и алгоритма расчета перегрузки и ресурса шпинделей, реализованного в Matlab Simulink, выполнен анализ амплитуд упругого момента при прокатке двух заготовок стали К-60. Результаты представлены на рис. 13. В окне 1 представлены амплитуды моментов по проходам на шпинделе верхнего валка; в окне 2 – графики снижения ресурса за каждый проход, рассчитанные по разработанной методике; в окне 3 – графики суммарной выработки ресурса.

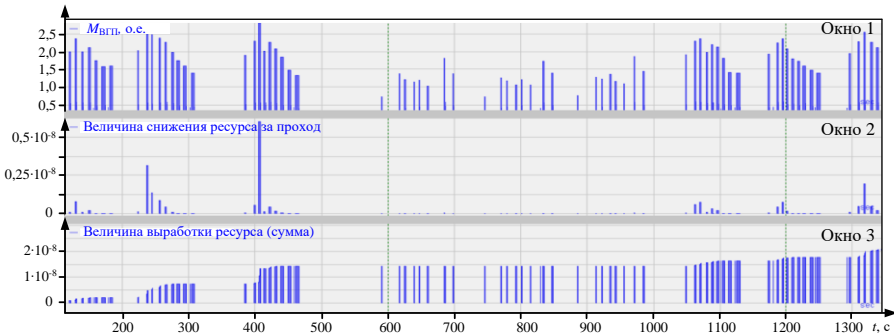


Рис. 13. Амплитуды моментов, выделенные разработанной системой, и результаты расчета ресурса при прокатке двух заготовок

Представлены результаты расчета ресурса в период одного месяца, которые были получены обработкой массива данных при прокатке реального сортамента. Построены зависимости, которые характеризуют различие ожидаемых сроков эксплуатации шпинделей ВГП и НГП за двухлетний период. При этом было принято предположение, что исследованный сортament будет прокатываться в течение каждого месяца. Путем экстраполяции показано, что полная выработка ресурса шпинделя ВГП произойдет примерно через 3,5 года, а шпинделя НГП – через 4,5 года. Это соответствует реальным срокам эксплуатации при нормативе 8 лет.

**Пятая глава** посвящена анализу результатов экспериментальных исследований разработанного алгоритма управления электроприводами, проведенных на стане 5000. Дано обобщение результатов, представлен расчет ожидаемого экономического эффекта.

Выполнен сравнительный анализ амплитуд упругого момента за 9 проходов при известном алгоритме с предразгоном, и при алгоритме, реализующем разработанный способ управления (рис. 14). Результаты показали среднее снижение ударного момента двигателя при захвате в 1,3–1,5 раза. Тем самым подтверждена техническая эффективность разработанного способа управления.



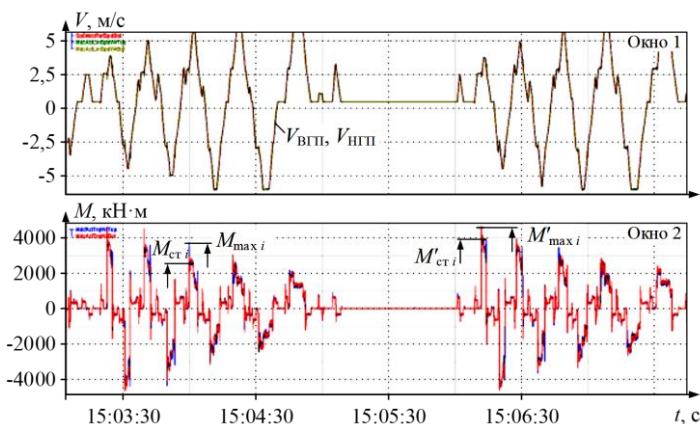


Рис. 14. Чистовая прокатка одинаковых заготовок при известном алгоритме (левая часть рисунка) и при разработанном алгоритме (правая часть)

Реализация разработанного алгоритма обеспечивает снижение динамических нагрузок двигателей ВГП и НГП. С целью обобщения результатов на рис. 15 представлены графики амплитуд моментов для шпинделя НГП при действующей системе (обозначение «без предразгона») и при разработанной системе управления электроприводами (обозначение «с предразгоном»). Аналогичные зависимости были построены для шпинделя ВГП. Они подтверждают снижение динамических нагрузок на большей части проходов. Максимальное снижение амплитуд составляет 22% (от 335 до 260 кН·м).

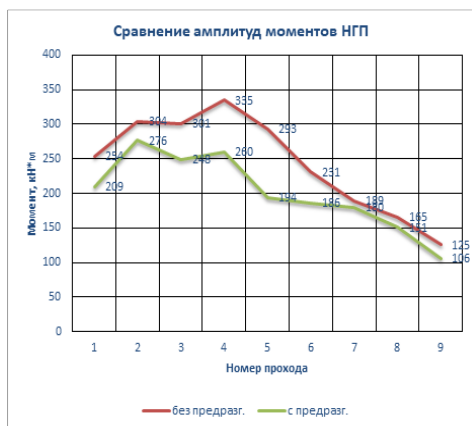


Рис. 15. Амплитуды моментов на шпинделях при внедренном алгоритме

Алгоритм управления электроприводами, реализующий разработанный способ ограничения динамического момента на шпинделях, внедрен и находится в эксплуатации на стане 5000 ПАО «ММК», что подтверждено соответствующим актом. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов составляет 5,94 млн руб./год, который достигается за счет уменьшения затрат на закуп и установку шпинделя как в аварийном, так и в регламентном режимах.

Разработанный способ управления рекомендуется для внедрения на прокатных станах с индивидуальным электроприводом валков, а также на других агрегатах, работающих с ударным изменением нагрузки. Предложенная методика расчета ресурса рекомендуется для использования при проектировании, реконструкции и замене оборудования различных производственных объектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. В результате литературного обзора и экспериментальных исследований показано, что на амплитуды моментов двигателей и моментов на шпинделях клетки толстолистового стана оказывают влияние упругие свойства вала и угловой зазор в шпиндельных соединениях. Амплитуда упругого момента в режиме захвата раскатов валками превышает установившийся момент прокатки в 2,5–3 раза. Вследствие этого продолжительность эксплуатации (ресурс) шпинделей верхнего и нижнего валков снижается до 3–4-х лет при нормативе 8 лет.

2. Разработан способ управления электроприводом, обеспечивающий снижение амплитуды упругого момента за счет предразгона и торможения после захвата, отличительным признаком которого является задание темпа торможения пропорциональным скорости двигателя в момент захвата.

3. Обоснованы аналитические зависимости для расчета темпа ускорения электропривода в режиме предразгона, обеспечивающего замыкание углового зазора до входа раската в клетку. Представлены модель для вычисления упругого момента и скрипт на языке Matlab, позволяющие выполнить расчет требуемого замедления в режиме торможения в зависимости от величины углового зазора.

4. Представлены система измерения упругого момента и схема контроллера, предназначенного для подсчета количества превышений допустимого значения ( $2M_H$ ). Разработан наблюдатель упругого момента, обеспечивающий его восстановление путем дифференцирования скорости электропривода, измеряемой в on-line режиме. Дополнительной функцией является расчет ресурса шпинделя.

5. Рассмотрена методика вычисления ресурса, основанная на гипотезе линейного накопления усталостных разрушений Пальмгрена-Майнера. Приведены аналитические зависимости, обеспечивающие расчет выработки ресурса при однократных нагружениях. Показано, что ожидаемая полная выработка ресурса шпинделя ВГП произойдет через 3,5 года, а шпинделя НГП – через 4,5 года, что соответствует реальным срокам их эксплуатации. Разница ресурсов обусловлена неодинаковыми нагрузками двигателей клетки во время прокатки.

6. Проведен комплекс экспериментальных исследований, подтвердивший эффективность торможения после захвата как средства ограничения динамического момента. Доказаны снижение амплитуд моментов двигателей и упругих моментов на шпинделях до 110–150% установившихся значений и среднее снижение коэффициента динамичности на 6,5% (от 1,22 до 1,14).

7. Сравнительный анализ амплитуд упругого момента при известном алгоритме с предразгоном и при алгоритме, реализующем разработанный способ управления, показал среднее снижение ударного момента двигателя при захвате в 1,3–1,5 раза. Тем самым подтверждена техническая эффективность разработанного способа управления.

8. Алгоритм управления электроприводами, реализующий разработанный способ ограничения динамического момента, внедрен в эксплуатацию на стане 5000 ПАО «ММК», что подтверждено соответствующим актом. В результате снижения нагрузок ресурс шпинделей увеличивается до 8 лет. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 5,94 млн руб./год. Он достигается за счет совершенствования алгоритмов управления без дополнительных затрат.

9. Разработанный наблюдатель упругого момента на шпинделях также внедрен в эксплуатацию в виде алгоритма АСУ ТП горизонтальной клетки. Проанализирована зависимость выработки ресурса от кратности момента при однократном и многократных нагружениях. Сделан вывод, что следствием различия нагружений шпинделей ВПП и НПП за цикл прокатки партии является отличие показателей выработки их ресурсов на 20%.

10. Разработанный способ управления рекомендуется для внедрения на прокатных станах с индивидуальным электроприводом валков и на других промышленных агрегатах, работающих с ударным изменением нагрузки. Предложенная методика расчета ресурса рекомендуется для использования при эксплуатации, обосновании замены и внедрении прогрессивных методов технического обслуживания и ремонтов электрического и механического оборудования.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

#### *Публикации в рецензируемых научных изданиях*

1. 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. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 137–147. DOI: 10.14529/power200314.
2. Карандаев, А.С. Экспериментальное определение параметров двух-массовой электромеханической 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. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-3-24-35.
3. Радионов, А.А. Разработка цифрового наблюдателя упругого момента электромеханической системы клетки прокатного стана / А.А. Радионов, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, Е.А. Гартлиб, **О.А. Гасиярова** // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 2(51). – С. 19-29. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29.
4. 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.
5. 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 (62). – С. 17-26. DOI: 10.18503/2311-8318-2024-2(63)-17-26.

#### *Статьи в журналах Scopus и WoS*

6. Gasiyarov, V.R. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use / V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin, S.S. Voronin, T.A. Lisovskaya, **O.A. Gasiyarova** // Machines. – 2019. – Vol. 7, no. 4. – 76. DOI: 10.3390/machines7040076.
7. 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, no. 1. – 41. DOI: 10.3390/jmmp7010041.
8. 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, no. 5. – 183. DOI: 10.3390/jmmp7050183.

*Труды конференций Scopus и WoS*

9. Karandaev, A.S. Calculating Simulation Model Parameters for Electromechanical System of Rolling Mill Stand / A.S. Karandaev, S.N. Baskov, **O.A. Gasiyarova**, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // Proceedings of the 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon-2020). – 2020. – P. 469-474. DOI: 10.1109/Ural-Con49858.2020.9216265.
10. Radionov, A.A. Angular Clearance Monitoring for Mechanical Transmissions of Rolling Mill Stands / A.A. Radionov, **O.A. Gasiyarova**, S.N. Baskov // Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2021). – 2022. – P. 679-689. DOI: 10.1007/978-3-030-85230-6\_80.
11. Radionov, A.A. Limitation of Dynamic Loads of the Mechatronic System of the Rolling Stand / A.A. Radionov, B.M. Loginov, K.E. Odintsov and **O.A. Gasiyarova** // Proceedings of the 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2022). – 2022. – P. 1157-1162. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787233.
12. 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). – 2023. – Vol. 986. – P. 239–249. DOI: 10.1007/978-3-031-22311-2\_24.
13. Loginov, B.M. Development of Digital Pressure Observer in Hydraulic Cylinders for Vertical Balancing of Rolling Stand Spindles / B.M. Loginov, **O.A. Gasiyarova**, V.R. Khramshin, S.S. Voronin // Proceedings of the 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI-2023). – 2023. – P. 177-182. DOI: 10.1109/PEAMI58441.2023.10299916.
14. **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 // Proceedings of the 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon-2024). – 2024. – P. 1011-1015. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515422.

*Свидетельства о гос. Регистрации программ*

15. Хравшин, В.Р. Программа расчета амплитуды упругого момента в валопроводах главных электроприводов прокатного стана / В.Р. Хравшин, Б.М. Логинов, Р.Р. Хравшин, **О.И. Гасиярова** // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022666803, 06.09.2022. Заявка № 2022666180 от 05.09.2022.
16. Хравшин, В.Р. Программа расчета скоростного режима электроприводов клетки прокатного стана по условию минимума амплитуды упругого момента в валопроводах / В.Р. Хравшин, Б.М. Логинов, Р.Р. Хравшин, **О.И. Гасиярова** // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022666907, 12.09.2022. Заявка № 2022666145 от 05.09.2022.

*Публикации в периодических изданиях*

17. 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.