

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук

На правах рукописи



КОЖЕВНИКОВ Александр Вячеславович

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ В УСЛОВИЯХ
НЕСТАЦИОНАРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Специальность 2.6.4 (05.16.05) – Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Череповец – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН).

Научный консультант: доктор технических наук, заведующий лабораторией пластической деформации металлических материалов ИМЕТ РАН

Юсупов Владимир Сабитович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Шаталов Роман Львович

доктор технических наук, главный технолог Центра по стандартизации авиационной промышленности, ФГУП «ВНИИ «Центр»

Роберов Илья Георгиевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка металлов давлением», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Бельский Сергей Михайлович

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «30» марта 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.078.02 (Д.002.060.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, БКЗ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также на официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru/> и на сайте ВАК РФ <https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр., д. 49, Диссертационный совет 24.1.078.02 (Д.002.060.02). Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: andreev.imet.dis@mail.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

Андреев В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современное прокатное производство развивается в двух основных направлениях:

- повышение производительности прокатных агрегатов за счет увеличения скоростей прокатки с минимальными издержками производства, включая энергетический аспект;
- эффективное проектирование технологий производства новых марок стали в соответствии с требованиями потребителей.

При реализации вышеуказанных стратегий возникает ряд существенных проблем:

1. Технологический процесс прокатки нестабилен и выражается в колебаниях основных технологических параметров: скоростей прокатки, натяжений полосы, толщины прокатываемых полос, усилий и моментов прокатки, токов главных приводов. В связи с этим, при освоении прокатки на высоких скоростях (порядка 20–30 м/с), усложняются процессы автоматического управления, регулирования и поддержания технологических параметров в допустимых пределах, обеспечивающих требуемые характеристики качества и свойства прокатной продукции.

Управление листовыми прокатными станами, включая моделирование, анализ и обработку информации, осуществляется в условиях нестационарности и динамичности изменения технологических параметров, а также стохастичности режимов нагружения в очаге деформации.

2. В алгоритмах АСУ ТП прокатных станов для настройки скоростного режима, определения параметров технологии и очага деформации используются формулы, полученные в середине XX века на основе детерминистского подхода.

Детерминистский подход до настоящего времени является фундаментом для создания математических моделей процессов прокатки. Подобного рода математические модели позволяют определять статичные значения параметров на основе фиксированных значений исходных данных. Что в современных условиях приводит к существенным ошибкам при выполнении технологических и конструкторских расчетов непрерывных листопркатных станов, и, как следствие, к неоправданным потерям энергии, повышенным эксплуатационным расходам, снижению качества проката.

Большинство существующих методов теоретических исследований, расчета геометрических параметров очага деформации и энергосиловых параметров процесса прокатки, выполненных отечественными и зарубежными специалистами, основаны на статических моделях, не учитывающих нестационарный и динамический характер процессов обработки металлов давлением, стохастичность ряда характеристик прокатываемой полосы в реальных производственных условиях.

3. При освоении проектных скоростей для повышения производительности, на многих отечественных и зарубежных непрерывных

прокатных станах стали возникать негативные динамические вибрационные явления, известные из англоязычной литературы, как явление «*chatter*».

Эти явления вызывают появление дефектов на поверхности полос («поперечная ребристость», «полосы нагартовки»), невидимых невооруженным глазом и проявляющихся, например, только при покраске автомобильных кузовов; препятствуют освоению проектных скоростей прокатки; приводят к обрывам полосы; негативно влияют на надежность оборудования.

В работах, относящихся к области решения указанной проблемы, предлагаются мероприятия по устранению последствий динамических явлений путем демпфирования возникающих колебаний. В работах не исследуются технологические причины возникновения вибрационных процессов, как основные; проблема не рассматривается с точки зрения изучения динамики ее протекания, в том числе, и в рамках проектирования технологий обработки давлением современных марок сталей.

4. В современных условиях развития мировой металлургической отрасли наблюдается конкуренция в области инноваций по разработке новых продуктов и технологий. В этом случае необходимы научно-технические решения, позволяющие в короткие сроки проектировать эффективные технологии производства новых марок сталей с возможностью динамического управления свойствами прокатываемых полос и характеристиками технологического процесса.

Для решения изложенных выше проблем требуется развитие теории листовой прокатки на основе исследований в части рассмотрения процесса прокатки в реальном режиме времени в виде комплексного взаимодействия режимов нагружения линии привода и очага деформации.

При этом необходимо реализовать открывающиеся возможности по повышению энергоэффективности и стабилизации процесса прокатки, увеличению производительности станов на основе использования современных методов моделирования, анализа и обработки данных.

Цели работы.

1. Развитие теоретических основ процесса холодной листовой прокатки в условиях нестационарного динамического нагружения и взаимодействия электромеханической линии привода и очага деформации.

2. Разработка технических и технологических решений по стабилизации и повышению энергоэффективности процессов листопрокатного производства.

Задачи работы.

1. Анализ работ в области исследования динамики и нестационарности процессов непрерывной листовой прокатки для развития теоретических положений и разработки технических решений по повышению эффективности процессов.

2. Разработка комплексной динамической модели процесса непрерывной холодной прокатки тонких стальных полос, включающей взаимосвязанные

подмодели очага деформации и электромеханических систем клетей, позволяющей наиболее точно исследовать процесс в условиях нестационарности его параметров.

3. Промышленная апробация и оценка адекватности динамической модели объекту исследования с использованием баз данных автоматизированной системы управления технологическим процессом прокатного стана.

4. Исследование влияния стохастичности характеристик прокатываемой полосы и нестационарных условий протекания процесса на геометрические и энергосиловые параметры очага деформации при холодной прокатке.

5. Исследование факторов и описание механизма возникновения негативных вибрационных процессов при холодной прокатке тонких широких стальных полос для разработки методов их идентификации и прогнозирования.

6. Разработка методологии и алгоритма проектирования энергоэффективной технологии холодной прокатки тонких стальных полос, позволяющих обоснованно разрабатывать технологические режимы и прогнозировать качественные характеристики прокатной продукции.

7. Разработка методов и способов управления скоростным режимом работы стана, компенсирующих динамику работы привода, снижающих потери электроэнергии и адаптивно учитывающих влияние опережения.

8. Разработка, испытания и внедрение технических и технологических решений по стабилизации и повышению энергоэффективности процесса тонколистовой прокатки на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна результатов работы.

1. Разработана комплексная динамическая модель процесса холодной прокатки, объединяющая подмодели электромеханической системы с математическим описанием элементов линии привода и валкового узла, очага деформации с описанием опережения и условий прокатки полосы с натяжением, позволяющая исследовать влияние изменения нагружения в линии привода на геометрические и энергосиловые параметры очага деформации при нестационарных и динамических режимах. Установлено, что в линии привода рабочей клетки прокатного стана постоянно действуют крутильные колебания с частотой, кратной 12,5 Гц, оказывающие влияние на валковый узел и характер изменения параметров очага деформации. Выявлено, что рассогласование окружных скоростей вращения рабочих валков, составляющее 0,15–0,3 м/с, приводит к отклонению нейтрального сечения от вертикали, характерной для стационарного процесса, в сторону выхода из очага деформации и возникновению проскальзывания верхнего валка относительно полосы.

2. Получены математические выражения для расчета опережения при горячей и холодной прокатке, учитывающие условия трения в очаге деформации и позволяющие оценивать изменение указанного параметра при

колебаниях межклетевых натяжений и толщины полосы. Установлено, что колебания натяжений на действующих прокатных станах в пределах 25–35 % могут изменять значения опережения в 1,6–2 раза, что приводит к необходимости корректировки скоростного режима.

3. Раскрыт механизм возникновения негативных вибрационных эффектов, ограничивающих скорость прокатки на 25–50 % от проектных значений, заключающийся в несоблюдении для рабочей клетки условий прокатки полосы с натяжением и ее чередованием во времени с прокаткой с подпором. Выявлено, что повышение уровня колебаний скоростей рабочих валков и относительных обжатий более, чем на 10–15 %, межклетевых натяжений более, чем на 20 % является причиной нарушения условий прокатки полосы с натяжением и ввода рабочей клетки в режим резонансных вибраций.

4. Разработана и реализована численная модель процесса холодной прокатки, сопровождающегося вибрациями рабочих валков, включающая математическое описание стальной упругопластической полосы и рабочих валков с вращательным движением и перемещением по вертикали в виде гармонических колебаний, позволяющая рассчитывать продольные напряжения в поверхностном слое металла, силу прокатки, продольную разнотолщинность полосы и прогнозировать профиль поверхности полосы после прокатки. Установлено, что вибрации рабочих валков не оказывают существенного влияния на продольную разнотолщинность полосы, но приводят к появлению поверхностного дефекта «ребристость» с чередующимися светлыми и темными полосами.

5. Разработаны методы идентификации опасной резонансной фазы вибрационных процессов в рабочих клетях станов холодной прокатки, позволяющие достоверно установить момент наступления указанной фазы и обеспечить время, необходимое для выработки управляющего воздействия на изменение технологических параметров.

Метод, основанный на статистическом анализе распределения значений разности переднего и заднего натяжений полосы и оценки девиации основных показателей распределений текущей и предшествующей выборок от допустимых значений. Установлены допустимые диапазоны изменения разности натяжений, изменение математического ожидания в пределах 6–10 кН, для средних квадратических отклонений – 1–3,5 кН. Прогнозирование вибраций осуществляется по отклонению средних значений разности межклетевых натяжений текущей и предшествующей выборок при превышении 10 кН, средних квадратических отклонений – 3,5 кН.

Метод прогнозирования развития вибраций в клетях прокатных станов на основе статистического анализа токовых нагрузок главных приводов. Установлены следующие критерии идентификации вибраций: рост медианного значения выборки тока нагрузки от значения $1 \cdot 10^{-5}$; рост дисперсии тока, превышающей 30 % от значений при переходных режимах и 100 % при постоянной скорости прокатки; рассогласование функций плотности распределения тока до и во время вибраций до 2,5 раз.

Применение указанных методов позволяет на скоростях прокатки 15–20 м/с идентифицировать вибрации за 5–10 секунд до их возникновения, что обеспечивает необходимое время для выработки управляющего воздействия на корректировку технологических режимов прокатного стана.

6. Разработана методология проектирования энергоэффективной технологии холодной прокатки тонких стальных полос, основанная на комплексе полученных в ходе диссертационного исследования теоретических принципов и аналитических алгоритмов, направленных на исключение воздействия негативных динамических эффектов на качество прокатной продукции и производительность станом, на обеспечение устойчивости процесса при его минимальной удельной энергоемкости. Аналитический алгоритм проектирования включает имитационное моделирование колебаний значений предела текучести и толщины по длине полосы, колебаний относительных обжатий и межклетевых натяжений в допустимых пределах по нормальному закону распределения, расчет кинематических и энергосиловых параметров, прогнозирование разнотолщинности и механических свойств готового проката, поиск оптимальных значений технологических параметров для выполнения комплекса перечисленных выше критериев эффективности процесса. Практическая реализация методологии позволила выполнить проектирование технологического режима со сниженной на 5–8 % удельной энергоемкостью.

7. Разработан интеллектуальный алгоритм работы с большими массивами технологических данных для поиска совокупности значений параметров режимов прокатки, обеспечивающей минимальную удельную энергоемкость процесса. Алгоритм основан на методе эволюционного моделирования, включающем статистическое исследование выборки фактических значений мощности прокатки для определения граничных условий, формирование стартовой выборки значений технологических параметров и расчет стартового значения мощности, комбинирование и изменение значений параметров режимов для итерационного подбора оптимального значения мощности. Применение алгоритма заменяет сложное аналитическое моделирование процесса прокатки и позволяет при объеме выборки технологических параметров и их значений 100^{25} за 15–25 итераций сформировать технологический режим с потребляемой мощностью на 5–8 % меньше ее среднего значения в выборке, что существенно упрощает и ускоряет инженерные расчеты. Данный подход для повышения энергоэффективности процессов производства прокатной продукции применяется впервые.

Практическая ценность результатов работы.

1. Разработан метод активного электромагнитного демпфирования нагрузочных и крутильных колебаний в линии главного привода и схема управления демпфированием, основанные на принципе активного гашения путем добавления в цепь управления демпфирующего сигнала в противофазе основным колебаниям. Метод позволяет существенно снизить амплитуду

колебаний значений скорости и негативный эффект от автоколебательных процессов в рабочих клетях прокатных станов.

2. Предложены технические решения, обеспечивающие эффективное гашение пульсаций тока якоря и повышающие энергоэффективность процесса прокатки.

3. Разработан способ идентификации вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки, основанный на статистической оценке в режиме «*online*» выборки межклетевых натяжений полосы и токовых нагрузок.

4. Разработана структурная схема автоматизированной подсистемы корректировки величины опережения и скорости рабочих валков с учетом текущих значений технологических параметров и характеристик полосы.

5. Разработаны практические рекомендации по корректировке технологических параметров процесса холодной прокатки, обеспечивающие эффективное воздействие на геометрию очага деформации и качество поверхности холоднокатаного проката, исключающие возможность возникновения резонансных вибраций и повышающие энергоэффективность процесса.

6. Разработаны программы для ЭВМ, позволяющие определять и оценивать изменения энергосиловых параметров процесса холодной тонколистовой прокатки, параметров очага деформации в условиях упругопластического деформирования и динамического протекания процесса с учетом разнотолщинности прокатываемого металла, крутильных колебаний в электромеханической системе привода, колебаний натяжений и механических свойств холоднокатаного проката.

Обоснованность и достоверность основных положений и результатов диссертации, подтверждена комплексом исследований и экспериментов на действующих прокатных станах, использованием современных методов исследования и корректных методов статистической обработки данных измерений и расчетов. Сформулированные научные положения отвечают современным представлениям о природе деформирования металлов, положениям теории пластичности и теории продольной прокатки, а также согласуются с известными работами по рассматриваемой проблеме.

Личный вклад соискателя. Личное участие автора выразилось в постановке задач исследований; в получении основных научных результатов; в разработке, исследованиях, испытаниях и внедрении технических решений, повышающих стабильность и эффективность технологий горячей и холодной прокатки тонких полос на широкополосных станах.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 17 международных и всероссийских научно-технических конференциях, 5 из которых проходили за рубежом (см. список опубликованных работ).

Результаты диссертационного исследования получены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проектной части государственного задания (проект № 11.3943.2017/4.6, руководитель

проекта), государственного задания № 075-00746-19-00 (участник проекта) и финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных научных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 16-38-60042 мол_а_дк (участник проекта).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 54 статьи, в том числе 29 в журналах, рекомендованных ВАК, 8 в зарубежных журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, 17 публикаций в сборниках трудов всероссийских и международных конференций; получено 4 патента на изобретения Российской Федерации, 1 патент на полезную модель и 4 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ; выпущена 1 монография.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 300 наименований. Объем диссертации составляет 346 страниц машинописного текста, включая 164 рисунка, 24 таблицы и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Особенности технологического процесса прокатки тонких полос на действующих непрерывных листопрокатных станах

Характерные направления развития черной металлургии связаны с ресурсо- и энергосбережением, внедрением новой техники и технологий, повышением требований к служебным характеристикам прокатной продукции, совершенствованием ее сортамента и конкурентоспособности. Научной основой для реализации этих направлений является теория прокатки, как часть фундаментальной науки – механики технологических процессов.

Положения теории прокатки основаны на аналитическом рассмотрении технологических процессов и процессов в очаге деформации в статике (без учета изменения параметров во времени) и до настоящего времени являются фундаментом для создания математических моделей процессов прокатки. Подобного рода математические модели позволяют определять статические значения параметров на основе фиксированных значений исходных данных, не учитывая динамичность процесса обработки и стохастичность ряда характеристик прокатываемой полосы. Что приводит в современных условиях к существенным ошибкам при выполнении технологических и конструкторских расчетов непрерывных широкополосных станов, и, как следствие, к неоправданным потерям энергии, повышенным эксплуатационным расходам, ухудшению качества проката.

Процесс непрерывной прокатки тонких широких стальных полос нестабилен, что выражается в колебаниях технологических и энергосиловых параметров. При этом проявляется противоречие между растущими требованиями к стабилизации и обеспечению точности поддержания основных контролируемых показателей качества проката (механических

свойств, отделки поверхности, толщины, профиля, планшетности) и возрастающей нестабильностью ряда существенных параметров технологии.

Одновременное регулирование толщины и натяжения приводит к изменению скорости прокатки, величины обжатий и, как следствие, к изменению энергосиловых параметров по клетям стана и непостоянству момента прокатки, условий трения между полосой и валками. Колебания исходного предела текучести полосы, разброс толщины полосы на входе в стан, изменение шероховатости валков, нестабильность подачи эмульсии нарушают стабильность процесса прокатки. Всё перечисленное приводит к снижению производительности, повышенному расходу валков, ухудшению показателей точности и плоскостности прокатываемых полос. Разработка технических решений по повышению стабильности процесса листовой прокатки возможна на основе развития теории упругопластического деформирования тонких полос в условиях нестационарного динамического нагружения и специальных исследований.

Таким образом, создание надежной математической основы для изучения нестационарного динамического протекания процессов упругопластического деформирования тонких стальных полос следует считать одной из наиболее актуальных задач листопрокатного производства.

Исследованием динамических процессов в металлургических машинах, в том числе в прокатных станах, начали заниматься в середине 50-х годов XX века в Институте черной металлургии НАН Украины (г. Днепропетровск), опираясь на классическую теорию колебаний А.Н.Крылова и Н.Е.Жуковского. Одним из важнейших результатов этой работы явилось создание научной школы динамики металлургических машин. Под руководством чл.-корр. АН Украины С.Н. Кожевникова были разработаны методические основы расчёта динамических нагрузок в нелинейных электромеханических системах привода металлургических машин, а также рекомендации по повышению эффективности их эксплуатации. С.Н. Кожевниковым была обозначена актуальность исследования нестационарных процессов в прокатном производстве, связанных с динамическими нагрузками в линии привода и в очаге деформации. Исследования динамики момента сопротивления во время захвата полосы валками проведены специалистом Института черной металлургии НАН Украины д.т.н., проф. В.И. Большаковым. К числу современных научных исследований, проведенных в последние 15 лет и направленных на изучение динамических нагрузок и диагностирование вибраций в листовом прокатном производстве, следует отнести работы д.т.н. В.В. Веренева, д.т.н. И.Ю. Приходько, П.В. Крота.

Результаты теоретических и прикладных исследований в области динамики процессов прокатки и металлургического оборудования достаточно широко и полно отражены в работах П.И. Полухина, И.Ф. Иванченко, В.П. Полухина, Р.Ш. Адамия, С.Л. Коцаря.

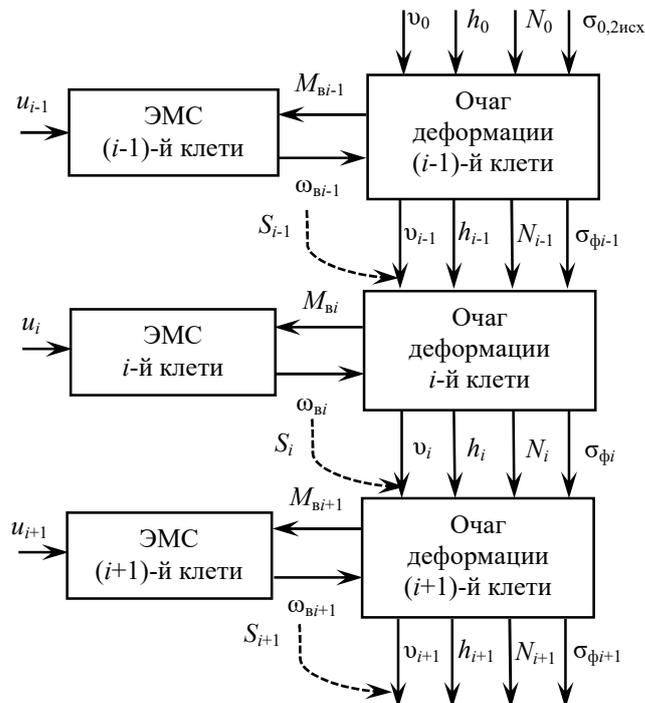
Несмотря на имеющиеся результаты научных работ вышеуказанных специалистов, отмечается отсутствие комплексных исследований,

интегрирующих данные и результаты анализа динамических процессов в линиях привода прокатных станов; работу и алгоритмы систем автоматического управления технологическим процессом прокатки, отвечающих за стабильность и качество технологического процесса; изменение технологических, энергосиловых параметров и параметров очага деформации в условиях нестационарного динамического нагружения с оценкой стационарности и энергоэффективности технологии непрерывной листовой прокатки.

2. Развитие теоретических основ процесса холодной листовой прокатки

Структура модели процесса холодной прокатки

При разработке математической модели процесса холодной прокатки рассматривались следующие элементы системы непрерывного прокатного стана: очаги пластической деформации с межклетевым промежутком, электромеханические системы клеток, включающие автоматизированные электроприводы, механические трансмиссии и непосредственно рабочие клетки (рис. 1).



$(i-1), i, (i+1)$ – номер рассматриваемой клетки; u_{i-1}, u_i, u_{i+1} – напряжение на якорной обмотке двигателя клетки; $\omega_{Bi-1}, \omega_{Bi}, \omega_{Bi+1}$ – угловая скорость вращения рабочего вала клетки; $M_{Bi-1}, M_{Bi}, M_{Bi+1}$ – момент, необходимый для обеспечения процесса прокатки в клетке; v_0 – скорость подката; h_0 – толщина подката; v_{i-1}, v_i, v_{i+1} – скорости полосы на выходе из соответствующих клеток; h_{i-1}, h_i, h_{i+1} – толщины полосы на выходе из соответствующих клеток; $N_0, N_{i-1}, N_i, N_{i+1}$ – силы натяжения полосы; $\sigma_{0,2исх}$ – исходный предел текучести материала полосы; $\sigma_{\phi i-1}, \sigma_{\phi i}, \sigma_{\phi i+1}$ – сопротивление деформации полосы в клетке; S_{i-1}, S_i, S_{i+1} – опережение в клетках.

Рисунок 1 – Схема математической модели процесса холодной прокатки

Модель электромеханической системы имеет две входные переменные: напряжения, подаваемые на якорные обмотки электродвигателей рабочих клеток, и момент необходимый для осуществления процесса прокатки, и одну выходную – угловую скорость вращения бочки рабочего вала.

Модель очага деформации содержит шесть входных переменных и столько же выходных, связывающих ее с соседними клетями через межклетевые промежутки, главным приводом через механическую трансмиссию. Воздействие на напряжение двигателя передается на вход очага деформации через скорость валков с обратной связью по моменту.

Указанные на рисунке 1 переменные задаются с учетом динамики процесса холодной прокатки и стохастичности его параметров. Характеристики прокатываемого металла такие, как предел текучести, показатели упрочнения представляют собой случайные величины, получить действительные значения которых экспериментальным путем весьма затруднительно, поэтому для расчета распределения исходного предела текучести по длине холоднокатаной полосы применен метод Монте-Карло.

Модель электромеханической системы прокатного стана

В практике исследования динамических нагрузок в машинах широко используется подход, основанный на переходе от реального объекта к эквивалентной расчетной схеме. На рисунке 2 приведена разработанная приведённая схема главного привода рабочих клеток стана холодной прокатки 1700.

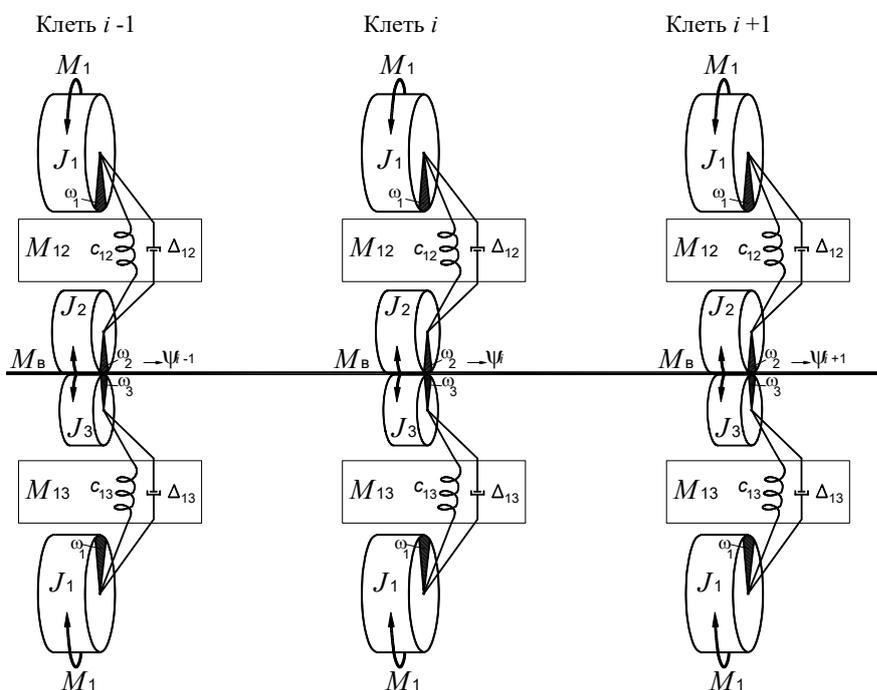


Рисунок 2 – Расчётная схема главного привода рабочих клеток

Движение масс, соответствующих приводу верхнего рабочего валка, описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M_1 - M_{12} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{\text{в}} = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

а соответствующих приводу нижнего рабочего валка:

$$\begin{cases} M_1 - M_{13} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{13} - M_{\text{в}} = J_3 \cdot \frac{d\omega_3}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где M_1 – момент электродвигателя; M_{12} , M_{13} – моменты упругого взаимодействия; J_1, J_2, J_3 , $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – моменты инерции и угловые скорости

первой, второй и третьей масс.

Упругие моменты M_{12} и M_{13} определяются углами поворотов соседних масс и величиной зазора:

$$M_{12} = \begin{cases} c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta_{12}/2) & \text{при } |\varphi_1 - \varphi_2| \geq \Delta_{12}/2; \\ 0 & \text{при } |\varphi_1 - \varphi_2| < \Delta_{12}/2, \end{cases} \quad (3)$$

$$M_{13} = \begin{cases} c_{13}(\varphi_1 - \varphi_3 - \Delta_{13}/2) & \text{при } |\varphi_1 - \varphi_3| \geq \Delta_{13}/2; \\ 0 & \text{при } |\varphi_1 - \varphi_3| < \Delta_{13}/2, \end{cases} \quad (4)$$

где c_{12} , c_{13} – приведённые жёсткости механических упругих связей; φ_1 , φ_2 , φ_3 – углы поворота первой, второй и третьей масс; Δ_{12} , Δ_{13} – зазоры в механических передачах.

Для учета влияния переходных процессов в электродвигателе на характер динамического нагружения в электромеханической системе клетки введено описание двигателя постоянного тока независимого возбуждения в дифференциальных и алгебраических уравнениях в абсолютных единицах:

$$u = e + R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}; \quad (5)$$

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot i; \quad (6)$$

$$e = C_\omega \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (7)$$

где e – электродвижущая сила (ЭДС) якоря; i – ток якоря; Φ – поток, создаваемый обмоткой возбуждения; R – активное сопротивление якорной цепи; L – индуктивность якорной цепи; C_ω – коэффициент связи между скоростью и ЭДС, C_M – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом.

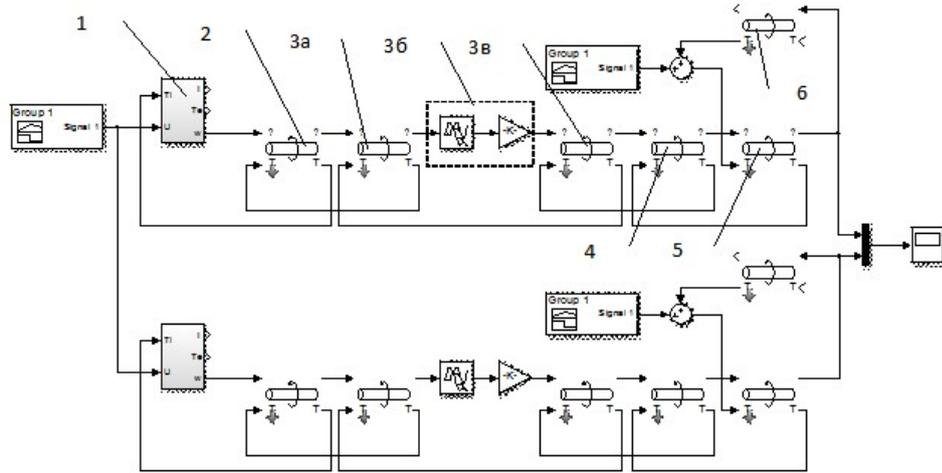
На рисунке 3 представлена обобщенная динамическая модель клетки прокатного стана, включающая модель двигателя, опорных и рабочих валков, а также учитывающая влияние механической части, реализованная в программной среде *MATLAB Simulink* (лицензия № 250111/6).

В качестве модели очага деформации использованы работы д.т.н. Э.А. Гарбера и д.т.н. И.А. Кожевниковой, в которых математическое описание очага деформации i -й рабочей клетки основано на упругопластической схеме, где полоса рассмотрена как тонкое упругопластическое тело, а валки – как массивные упругие тела.

Определение опережения

Развитие способов расчета величины опережения важно и для развития теории прокатки, и для повышения качества управления автоматизированными приводами прокатных станов (скоростными режимами стана).

Неправильный выбор скоростного режима может привести к обрывам стальных полос или к возникновению нестационарных режимов прокатки (и при стационарных и при переходных режимах работы электромеханических систем стана могут возникнуть колебания основных технологических параметров – скоростей, натяжений, моментов, токов двигателей).



1 – электродвигатель; 2 – промежуточный вал; 3а – входной вал редуктора; 3б – зубчатое соединение редуктора; 3в – выходной вал редуктора; 4 – шпиндель; 5 – рабочий валок; 6 – опорный валок

Рисунок 3 – *Simulink*-модель главного привода рабочей клетки

Для практических расчетов важно не только знать опережение S в каждой из прокатных клеток, но и возможную погрешность этой величины. Ввиду неизбежных отклонений всех расчетных параметров от их номинальных величин, величины опережений также могут изменяться в определенном диапазоне, и это необходимо учитывать при расчете режимов прокатки в непрерывных станах.

В работе для расчета величины опережения предложена формула:

$$S = \frac{0,25\varepsilon}{1-\varepsilon} (1 - A_1 + A_2)^2, \quad (8)$$

где ε – относительное обжатие в клетке; A_1 – безразмерный коэффициент, характеризующий условия прокатки без натяжений; A_2 – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние натяжений на опережение:

$$A_1 = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\mu}, \quad (9)$$

$$A_2 = \frac{[\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0] \sqrt[3]{1 - 1,4a[\exp(\mu t) - 1]}}{2(1 - 0,5\varepsilon)[\exp(\mu t) - 1](1 - 0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1)}, \quad (10)$$

где α – угол захвата; μ – коэффициент трения; φ_0 , φ_1 – коэффициенты заднего и переднего удельных натяжений; a – параметр, характеризующий упругую деформацию валков; t – отношение длины очага деформации к средней толщине полосы.

В результате исследования зависимости колебаний величины опережения при холодной прокатке от колебаний межклетевых натяжений выявлено, что опасными являются режимы прокатки с большими натяжениями при $\varphi_0 \rightarrow 1,0$, $\varphi_1 \rightarrow 1,0$, когда величины ΔA_2 и ΔS могут возрастать до недопустимых величин (рис. 4).

Для стабилизации процесса прокатки необходима автоматическая динамическая корректировка опережения и, следовательно, скорости рабочих валков с учетом текущих значений технологических параметров и характеристик полосы (толщины, исходного предела текучести, сопротивления деформации).

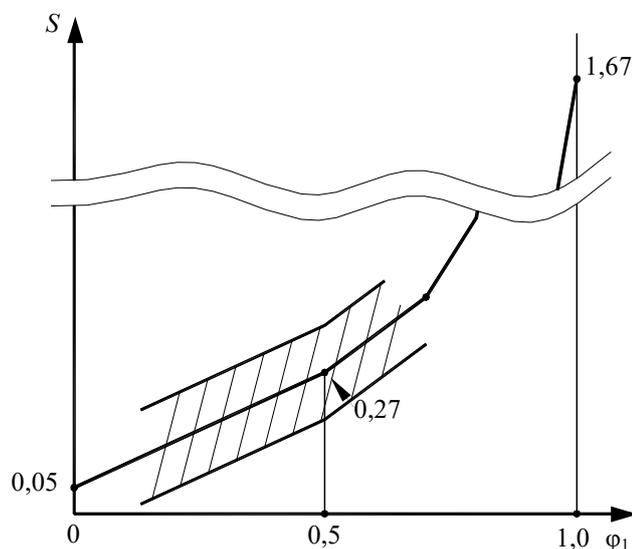


Рисунок 4 – Зависимость опережения от переднего натяжения при холодной прокатке

Оценка точности динамической модели процесса холодной прокатки

Точность комплексной динамической модели, ее адекватность исследуемому объекту проверяли путем сопоставления расчетных и измеренных значений параметров, характера их колебаний в процессе холодной прокатки на действующем непрерывном 5-клетевом стане ПАО «Северсталь» и статистического анализа погрешностей расчета – расхождений между рассчитанными и измеренными значениями. В общей сложности была сформирована база данных, содержащая информацию о 270-ти режимах прокатки различных марко- и профилеразмеров сортамента с контролем по силе прокатки и угловой скорости вращения вала электродвигателя главной линии привода рабочей клетки.

Анализ данных статистической оценки точности математической модели позволил сделать следующие выводы:

1. Максимальная погрешность расчета силы прокатки не превысила 15,5%. В 85,3 % случаев расхождения расчетных и измеренных значений не превысили 6 %; в 4,4 % случаев погрешность превысила 10 %.

2. Максимальная погрешность расчета угловой скорости вращения вала электродвигателя не превысила 6,6 %, среднее значение погрешности составило 3,5 %.

3. Модель обеспечивает высокую точность прогнозирования значений параметров прокатки и характера их изменения при переходных и установившихся процессах.

Исследование геометрических, кинематических и энергосиловых параметров технологического процесса

Разработанная динамическая модель использована для исследования влияния технологических факторов и характеристик подката на геометрические, кинематические и энергосиловые параметры очага деформации в условиях их нестационарного характера изменения.

Основное влияние на геометрию очага деформации, напряженное состояние полосы, энергозатраты при прокатке и стабильность процесса оказывает характер изменения скорости полосы в очаге деформации и окружной скорости рабочих валков. Исследования скоростных параметров процесса холодной прокатки позволили сделать следующие выводы:

1) Частота колебаний валкового узла, определяющая автоколебания окружной скорости валков равна 50 Гц. Результаты получены путем преобразования Фурье сигнала скорости рабочих валков без нагрузки (без стальной полосы).

Исследованиями установлено, что в главном приводе возникают автоколебания, зависящие только от скручивающих моментов и моментов инерции в валах. К подобным выводам приводят результаты анализа реальных данных и расчетов, представленных в работах д.т.н. В.В. Веренева.

Колебания с частотой кратной 12,5 Гц постоянно воздействуют на валковый узел при стационарной скорости прокатки, оказывая влияние на характер изменения контактных напряжений в очаге деформации.

2) Окружные скорости верхнего и нижнего рабочих валков из-за конструктивных особенностей привода, разных величин диаметров бочек и прочих особенностей не равны. Разность скоростей может достигать 0,15–0,2 м/с (рис. 5, а). Из-за разницы в крутильных колебаниях верхнего и нижнего рабочих валков была получена их средняя скорость вращения (рис. 5, б) которая, в свою очередь, определяет скорость прокатки полосы. Как видно из рисунка, в клети возникают колебания скорости различной частоты, которые оказывают влияние на качество прокатываемого металла.

3) Рассинхронизация скоростей рабочих валков приводит к отклонению нейтрального сечения от вертикали, характерной для стационарного процесса. Ее нарастание ведет к постепенному наклону нейтрального сечения в сторону выхода металла из валков, и при определенных условиях процесса прокатки может возникнуть отрицательное опережение и проскальзывание верхнего валка (пробуксовка).

4) Колебания коэффициента трения, скорости прокатки, положения нейтрального сечения в очаге деформации приводят к колебаниям напряжений трения. На рисунке 6 представлен объемный график изменения касательных напряжений по длине очага деформации в диапазоне изменения скорости прокатки 5–10 м/с, выделена зона, в которой касательные напряжения изменяют свое направление и величину с частотой 50 Гц.

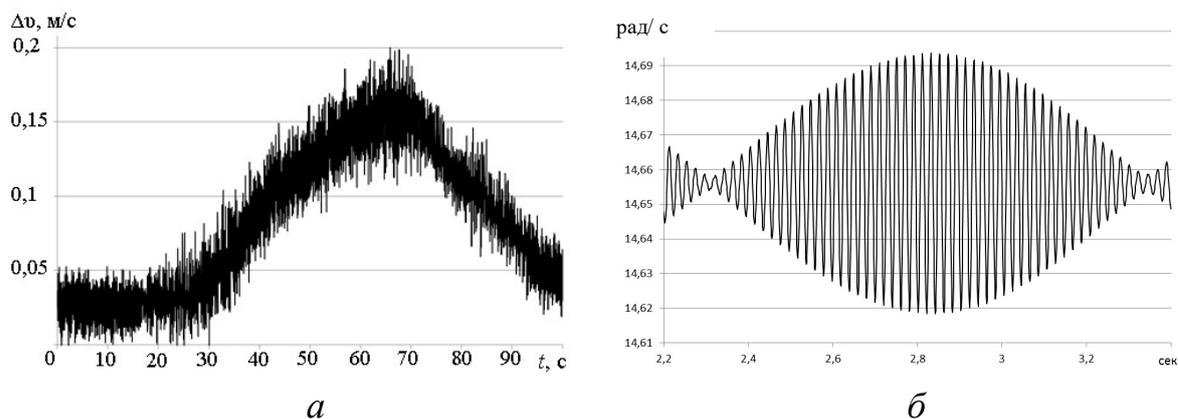


Рисунок 5 – Разность окружных скоростей верхнего и нижнего рабочих валков (а) и средняя скорость вращения рабочих валков (б)

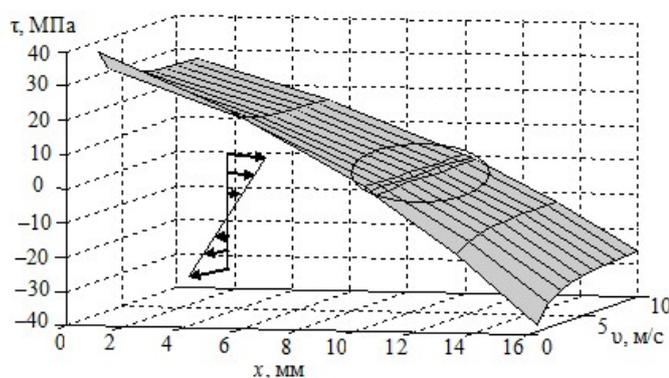


Рисунок 6 – Объемный график изменения касательных напряжений

5) Поскольку геометрические и энергосиловые параметры очага деформации являются функцией характеристик подката (толщины, механических свойств) и параметров режима прокатки (скорости, натяжений), то их изменения носят колебательный нестационарный характер, а фактические значения подчиняются нормальному закону распределения. Размах колебаний геометрических и силовых параметров составляет 5–15 %, размах колебаний энергетических характеристик процесса, определяющихся скоростными параметрами, достигает 20–40 %.

3. Исследование факторов и выявление причин возникновения негативных вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки

Анализ известных исследований негативных вибрационных эффектов при листовой прокатке.

В диссертации выполнен литературно-аналитический обзор работ, посвященных исследованию негативных динамических эффектов, возникающих при тонколистовой прокатке.

Показан определяющий вклад в изучение и устранение вибраций при непрерывной листовой прокатке, внесенный трудами разных поколений ученых и специалистов МИСиС, ВНИИМЕТМАШ, Липецкого политехнического института, Санкт-Петербургского политехнического университета, Днепропетровского металлургического института, Института черной металлургии (г. Днепропетровск), Череповецкого государственного

университета, Новолипецкого металлургического комбината, Магнитогорского металлургического комбината, Череповецкого металлургического комбината, Уралмашзавода.

В аналитическом обзоре особое внимание уделено исследованиям, которые наиболее близки к тематике данной диссертации. Это теоретические и экспериментальные исследования, позволившие принципиально оценить негативное влияние вибраций на качество поверхности полосы, на освоение проектных скоростей прокатки, и направленные на разработку технических средств диагностирования и демпфирования вибраций (работы В.А. Пименова, Г.Э. Аркулиса, Н.Г. Колбасникова, В.М. Синицкого, Э.А. Гарбера, И.Ю. Приходько, В.В. Веренева, П.В. Крота).

В целом аналитический обзор показал, что в настоящий момент отсутствует универсальная теория, убедительно объясняющая природу возникновения негативных вибрационных эффектов при непрерывной листовой прокатке и позволяющая разработать механизмы минимизации и/или устранения вибраций.

Исследование факторов и описание механизма возникновения вибраций на непрерывных прокатных станах

В рамках исследования данной научно-технической проблемы проведен анализ более чем 1000 технологических режимов 5-клетевого стана холодной прокатки 1700 ЧерМК ПАО «Северсталь». Были исследованы режимы с диапазоном проката толщиной 0,45–1,2 мм и шириной 900–1255 мм, проведен анализ технологии на предмет ее стабильности («устойчивости») и склонности к негативным колебательным и вибрационным процессам.

В результате проведенных исследований сформулирована гипотеза о «технологической природе» возникновения вибрационных процессов, включая их опасную резонансную фазу, в рабочих клетях прокатного стана.

Установлены две причины колебаний технологических параметров в процессе прокатки: во-первых, это колебания моментов в линии привода; во-вторых, это нестабильность или колебания секундных объемов полосы в межклетевых промежутках.

При прокатке на непрерывных широкополосных станах условие постоянства секундных объемов металла, проходящих через каждую рабочую клетку, не выполняется вследствие натяжения*. В этом случае секундные объемы полосы возрастают от предыдущей клетки к последующей:

$$V_1 < \dots < V_i < \dots < V_n, \quad (11)$$

где V_i – секундный объем полосы в i -й клетки ($i = 1 \div n$):

$$V_i = v_i \cdot F_i, \quad (12)$$

где F_i – площадь поперечного сечения полосы на выходе из валков i -й клетки.

В силу сложности регулирования процесса непрерывной прокатки условие (11) может нарушаться, и прокатка с натяжением чередуется с прокаткой с подпором (рис. 7, а), что оказывает влияние на качество проката, стабильность процесса и его энергоемкость (рис. 7, б).

*Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки [Текст] – М.: Металлургия, 1980. – стр. 56.

Из рисунка 7, б видно, что ведение процесса непрерывной прокатки стальной полосы в условиях подпора приводит к повышению его энергозатратности на 15–20 % по сравнению с прокаткой в условиях натяжения.

Установлено, что вибрационные процессы возникают в моменты колебаний разности секундных объемов, при которых изменяется их знак (рис. 8), при этом размах колебаний может достигать 250–500 % от среднего значения.

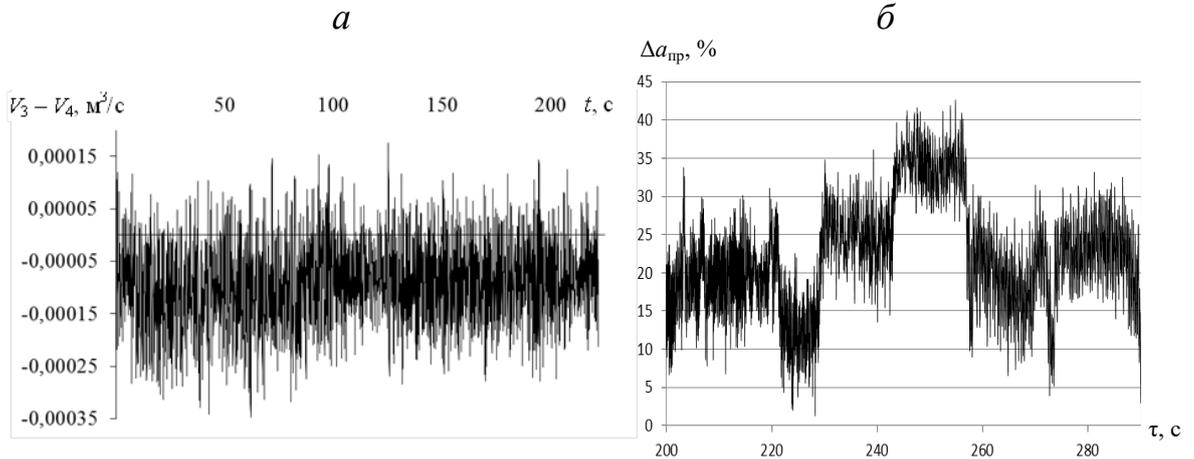


Рисунок 7 – Графики изменения разности объемов металла, прокатываемых в единицу времени в 3^й и 4^й клетях 5-клетевого стана, (а) и удельных работ прокатки в условиях подпора и натяжения (б)

Для исключения негативных вибрационных процессов в рабочих клетях необходимо, чтобы во всех режимах работы стана (режимы с постоянной скоростью, разгоны и торможения) разность секундных объемов сохраняла знак, как при отрицательном значении (режимы натяжения полосы), так и при положительном значении (подпор).

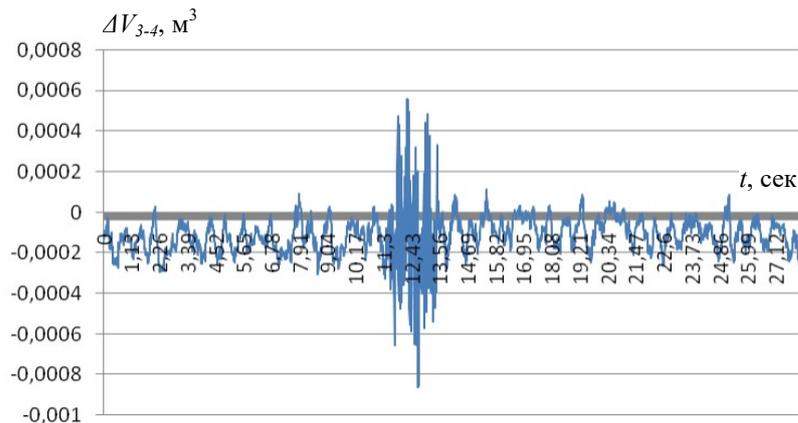


Рисунок 8 – Индикация вибраций в рабочей клетке № 4 по изменению разности межклетевых секундных объемов

Численное моделирование процесса холодной прокатки в условиях вибраций рабочих валков

Общая нестационарность технологии прокатки вызвана не только технологическими факторами, но и условиями работы прокатного

оборудования, в частности валковых систем. Для более детального изучения факторов данного процесса применены методы численного моделирования и конечно-элементного анализа.

Численное моделирование процесса холодной прокатки при вибрации рабочих валков выполнено в двухмерной постановке с использованием конечно-элементной программы DEFORM-2D (лицензия 7550). Моделирование выполнено на примере прокатки полосы из стали 08пс толщиной 0,455 мм шириной 915 мм.

Помимо вращательного движения рабочих валков задавалась их вибрация по вертикали в виде графика колебаний по гармоническому закону:

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_0), \quad (13)$$

где x – величина, характеризующая положение рабочего валка в момент времени t относительно положения равновесия; A – амплитуда колебаний – максимальное смещение тела из положения равновесия; $\omega = 2\pi/T$ – циклическая частота; T – период колебаний; φ_0 – начальная фаза.

Разработанная модель позволила оценить изменение силы прокатки при разной частоте вибраций. На рисунке 9 представлены графики изменения силы прокатки в клетях №№ 4 и 5 для варианта с частотой вибраций 100 Гц при скорости прокатки 15 м/с.

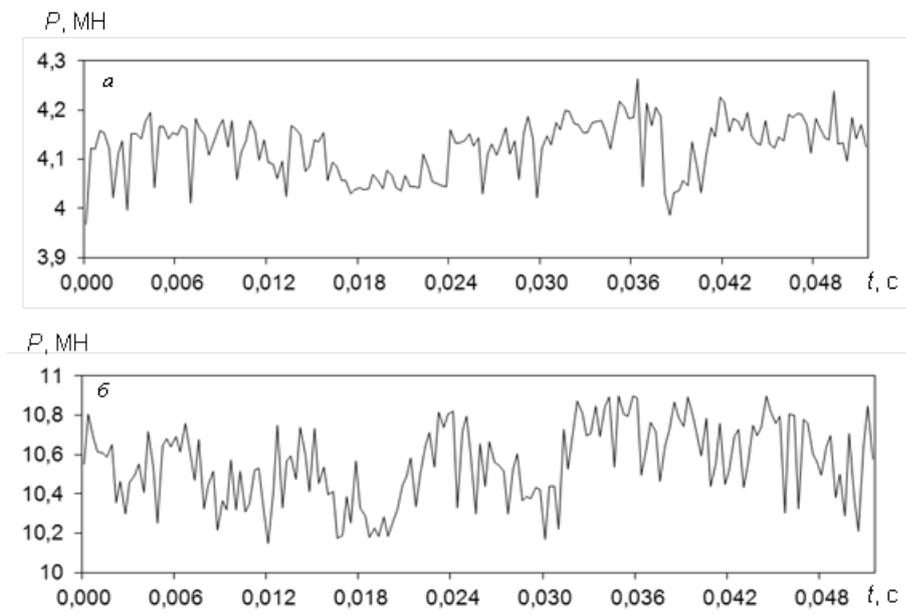


Рисунок 9 – Графики изменения силы прокатки для варианта с частотой вибраций 100 Гц, скорость прокатки 15 м/с: а – клеть № 4; б – клеть № 5

Из графиков видно, что среднее значение силы при частоте вибраций 100 Гц в клетях № 4 равно 4,12 МН (размах колебаний 0,297 МН), а в клетях № 5 – 10,56 МН (размах колебаний 0,75 МН). При частоте вибраций 200 Гц эти значения составили: в клетях № 4 – сила прокатки 4,07 МН (размах колебаний 0,421 МН), в клетях № 5 – 10,42 МН (размах колебаний 1,192 МН). При увеличении скорости прокатки с 15 м/с до 17 м/с размах колебаний силы прокатки увеличивается в среднем в 1,25 раза.

В результате установлено, что вибрации рабочих валков приводят к возрастанию размаха колебаний усилий в соседних клетях, а синхронные колебания сил прокатки в соседних клетях непрерывного стана от 0,4 МН и выше неизбежно приведут к опасному предаварийному состоянию стана.

При численном моделировании установлено, что вибраций рабочих валков не оказывают существенного влияния на продольную разнотолщинность полосы. Независимо от частоты вибраций рабочих валков, среднее значение толщины полосы после прокатки составило 0,46 мм. Размах колебаний толщины равен: без вибрации – 0,238 мкм, с вибрацией 100 Гц – 0,742 мкм, 200 Гц – 0,914 мкм, что обеспечивает точность прокатываемых полос в части продольной разнотолщинности.

Моделирование подтвердило тот факт, что при вибрации состояние поверхности холоднокатаной полосы ухудшается. На рисунке 10 показан профиль поверхности полосы после прокатки со скоростью 15 м/с, построенный на длине, равной 200 мм.

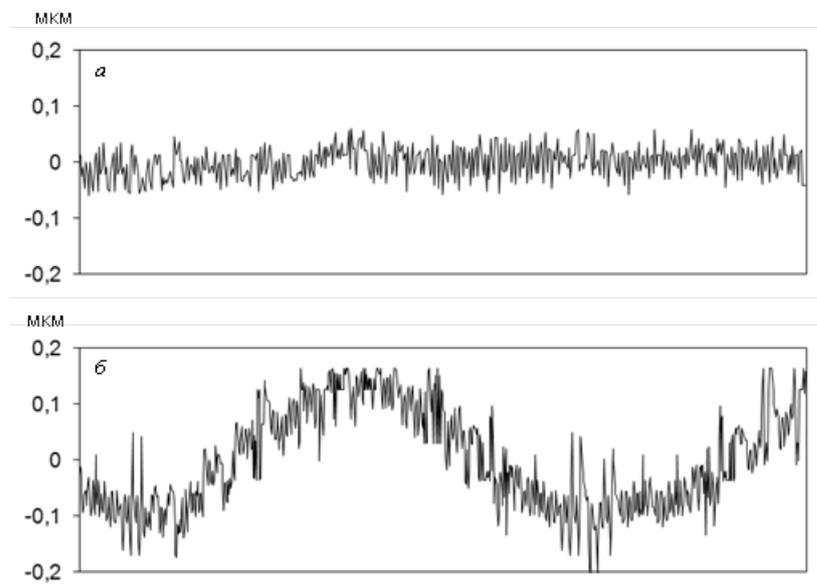


Рисунок 10 – Профиль поверхности полосы: *а* – без вибраций; *б* – частота вибраций 100 Гц

При вибрации такие отклонения, как на рисунке 10, *б*, можно рассматривать как поверхностный дефект «ребристость» с чередующимися светлыми и темными полосами на поверхности металла.

Идентификация вибраций на основе статистического анализа технологических параметров

Распознавание вибраций еще на стадии их зарождения с целью последующего корректирующего воздействия на систему управления технологическим процессом для предотвращения возникновения аварийных ситуаций является принципиально иным подходом среди всех известных методов снижения вероятности возникновения этого негативного явления.

В качестве анализируемых данных использована информация, поступающая с дополнительно установленных датчиков вибраций или с

одной из групп датчиков, уже имеющихся в оборудовании клетей, например, с датчиков натяжения полосы или тока якоря электродвигателей.

В результате исследований разработан ряд методов идентификации и прогнозирования негативных динамических эффектов, переходящих в опасную резонансную фазу.

1. *Идентификация автоколебаний в клетях прокатных станов на основе статистического анализа межклетевых натяжений.*

Установлено, что для решения задачи идентификации автоколебаний достаточно определить и проанализировать характер изменения двух показателей, характеризующих меру разброса и рассеивание значений выборки разности межклетевых натяжений (рис. 11).

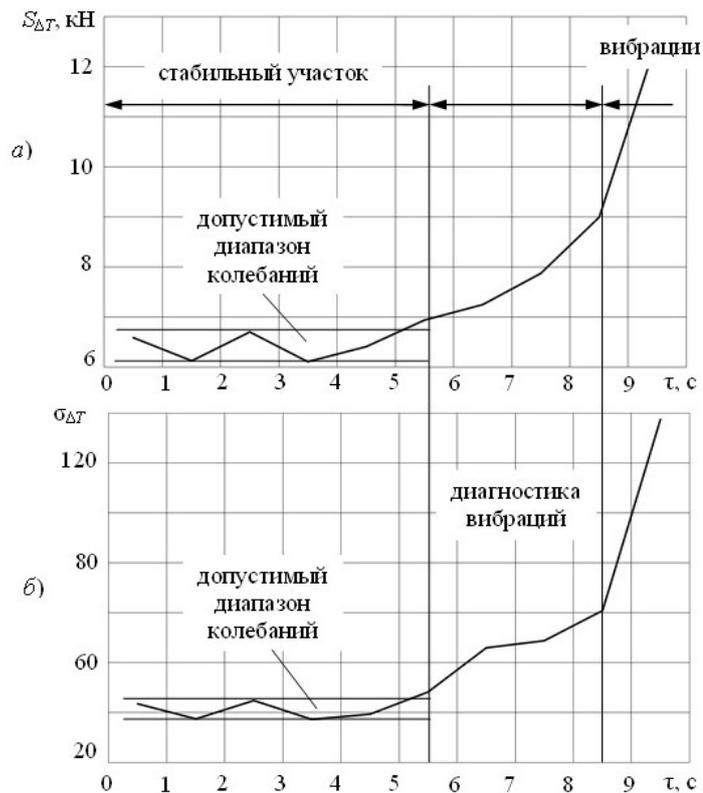


Рисунок 11 – Графики изменения среднеквадратического отклонения (а) и дисперсии (б) выборки значений разности межклетевых натяжений

Дисперсия $\sigma_{\Delta T}$ и среднеквадратическое отклонение $S_{\Delta T}$ разности межклетевых натяжений определяются в ходе промышленной апробации способа не реже, чем через 1 секунду по зависимостям:

$$\sigma_{\Delta T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \Delta T_{cp})^2 ; \quad (14)$$

$$S_{\Delta T} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \Delta T_{cp})^2} , \quad (15)$$

где ΔT_i – текущее значение разности межклетевых натяжений; ΔT_{cp} – текущее среднее значение разности межклетевых натяжений; n – число значений в выборке.

Размах колебаний параметров при статистическом мониторинге на стабильном участке прокатки полосы размерами 0,5×915 мм (рис. 11) составляет для среднеквадратического отклонения 6–6,5 кН, для дисперсии 36–44. При возникновении вибрационных процессов среднеквадратическое отклонение монотонно увеличивается в 1,5–1,6 раз, а дисперсия – в 1,8–2,5 раза.

Подтверждаемое расчетами время идентификации и прогнозирующей диагностики проявления вибрационных процессов составляет 5–10 с, что достаточно для оперативного устранения условий возникновения аварийных ситуаций на станах холодной прокатки, изменения режима работы стана в системах автоматического управления.

2. Метод прогнозирования развития вибраций в клетях прокатных станов на основе статистического анализа токовых нагрузок главных приводов.

Электрические приводы, находясь в связке с валковым узлом через механические передачи, воспринимают на себя нагрузки, возникающие не только в электромеханической системе, но и в очаге деформации. Величиной, пропорциональной моменту нагрузки в линии привода, является ток якоря электродвигателя, по его изменению можно оценить состояние технической системы и/или стабильность технологического процесса прокатки.

В результате было установлено, что наиболее чувствительным к возникновению внешних возмущающих факторов является 0,5-квантиль – медианное значение ряда токового сигнала:

$$M_e = I_0 + h \frac{\sum f - f'_{Me-1}}{f_{Me}}, \quad (16)$$

где M_e – непосредственно величина медианного значения выборки тока главного привода прокатного стана; I_0 – нижняя граница интервала, в котором находится медиана; h – размах рассматриваемого интервала тока двигателя; $\sum f$ – объем выборки (количество измеренных значений тока двигателя за рассматриваемый период времени); f'_{Me-1} – накопленная частота (количество измеренных значений тока двигателя) в интервале, предшествующем медианному; f_{Me} – частота (количество измеренных значений тока двигателя) в заданном медианном интервале.

Ориентируясь на медианное значение распределения тока главного привода рабочей клетки прокатного стана, можно идентифицировать момент зарождения вибраций.

В ходе исследований выявлено, что для прогнозирования и идентификации вибраций по току главного привода целесообразно рассматривать выборку и параметры статистического нормализованного распределения не непосредственно значений тока, а его производной, то есть скорости изменения данного параметра.

Для более наглядного восприятия результатов исследования на рисунке 12 представлено наложение графиков, характеризующих плотность распределения производных от токовых сигналов при стабильной работе прокатных клетей и в условиях вибраций.

Для аппаратной реализации данного технического решения программно на ЭВМ непрерывно рассчитывается медианное значение (второй квантиль)

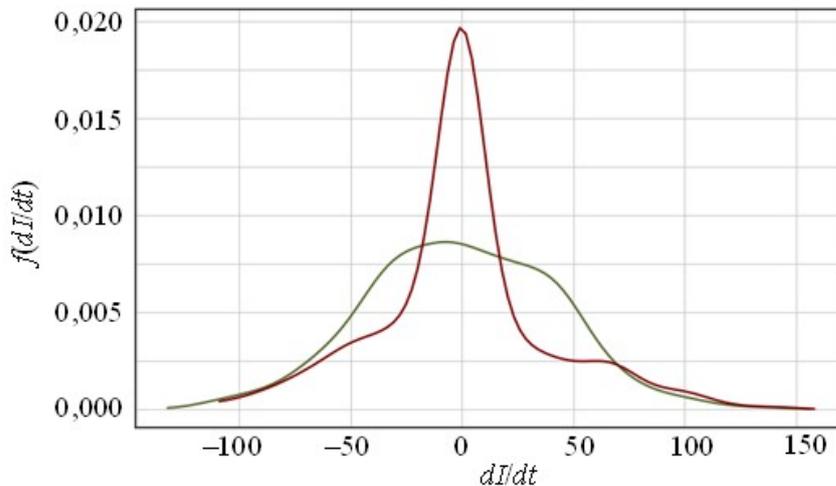


Рисунок 12 – Плотность распределения производных от токовых сигналов: сравнение режимов без вибрации и с вибрацией клетей

для каждой выборки тока двигателя или его производной и сопоставляется с эталонным, при этом получают некоторую ошибку рассогласования:

$$\varepsilon = I_{\text{фактMe}} - I_{\text{эмMe}}, \quad (17)$$

где ε – ошибка рассогласования фактического значения медианы выборки токовых значений с эталонным; $I_{\text{фактMe}}$ – медианное значение тока двигателя при фактической выборке; $I_{\text{эмMe}}$ – медианное значение тока двигателя при эталонной выборке.

На способ определения возникновения начальной стадии критической вибрации в рабочей клетке прокатного стана получен патент РФ № 2734360.

3. *Выявление критических вибраций на основе статистического анализа дисперсий сигналов нагружения системы.*

При постоянной скорости прокатки параметры нагрузочных процессов, происходящих в линии привода и в очаге деформации, равны.

Сущность подхода по анализу дисперсий сигналов заключается в непрерывном формировании выборки значений тока нагрузки главного привода рабочих клетей, склонных к возникновению вибраций, определении в реальном режиме времени значения дисперсии указанной выборки по формуле:

$$D = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n (I_i - m_I)^2, \quad (18)$$

где I_i – измеренное значение тока двигателя в единицу времени; m_I – математическое ожидание величины тока $\sum \frac{I_i}{N}$; N – объем выборки

(количество измеренных значений), далее происходит сравнение фактического значения дисперсии со значением дисперсии при постоянной скорости прокатки без вибраций путем расчета коэффициента пропорциональности k :

$$k = \frac{D_{max}}{D_{Vconst}}, \quad (19)$$

где D_{max} – максимальное значение дисперсии тока; D_{Vconst} – среднее значение дисперсии тока при постоянной скорости прокатки.

В качестве обобщающих рекомендаций для промышленной реализации на 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь» определены значения коэффициентов пропорциональности k по клетям 2–4 при различных режимах работы стана (табл. 1).

Таблица 1 – Диапазоны изменения коэффициента пропорциональности дисперсии тока привода клетки

Номер клетки	Значение коэффициента пропорциональности дисперсии тока		
	Постоянная скорость прокатки	Переходный режим (разгоны, торможения)	Режим вибраций
2	1–2,5	2–6	> 6
3	1–2,5	2–6	> 6
4	1–3,5	3,5–7,5	7–12 и более

Анализируя в реальном режиме времени изменение этого коэффициента можно выявить критический уровень вибраций и экспертно определить «виброопасный» режим работы.

4. На базе разработанной динамической модели проведены теоретические исследования *метода демпфирования колебаний* скорости рабочего вала при прокатке. Метод основан на принципе активного гашения посредством наложения одинаковых сигналов с противоположным знаком, позволяющем снизить негативный эффект от автоколебательных процессов в рабочих клетях прокатных станов.

4. Разработка методологии проектирования технологических режимов процесса прокатки

При разработке методологии проектирования режимов холодной прокатки был применен модульный подход (рис. 13). Каждым модулем реализуется определенная функция или несколько взаимосвязанных функций.

Модуль 1 включает описание исходных данных для прокатываемой полосы и позволяет задавать характеристики и профилируемые подката и готовой полосы, параметры оборудования стана, диапазоны таких технологических параметров, как межклетевые натяжения, обжатия, скорости прокатки, диапазоны параметров состояния полосы, а также энергосиловые значения и качественные показатели готовой продукции. При этом можно реализовать имеющийся опыт формализованных рекомендаций

по выбору начальных значений параметров, характеризующих режим прокатки.

В модуле 2 выполняется имитация состояния полосы, учитывающая неравномерность предела текучести, химического состава и структуры, толщины по длине полосы на основе использования процедуры генерации случайного числа по закону нормального распределения.

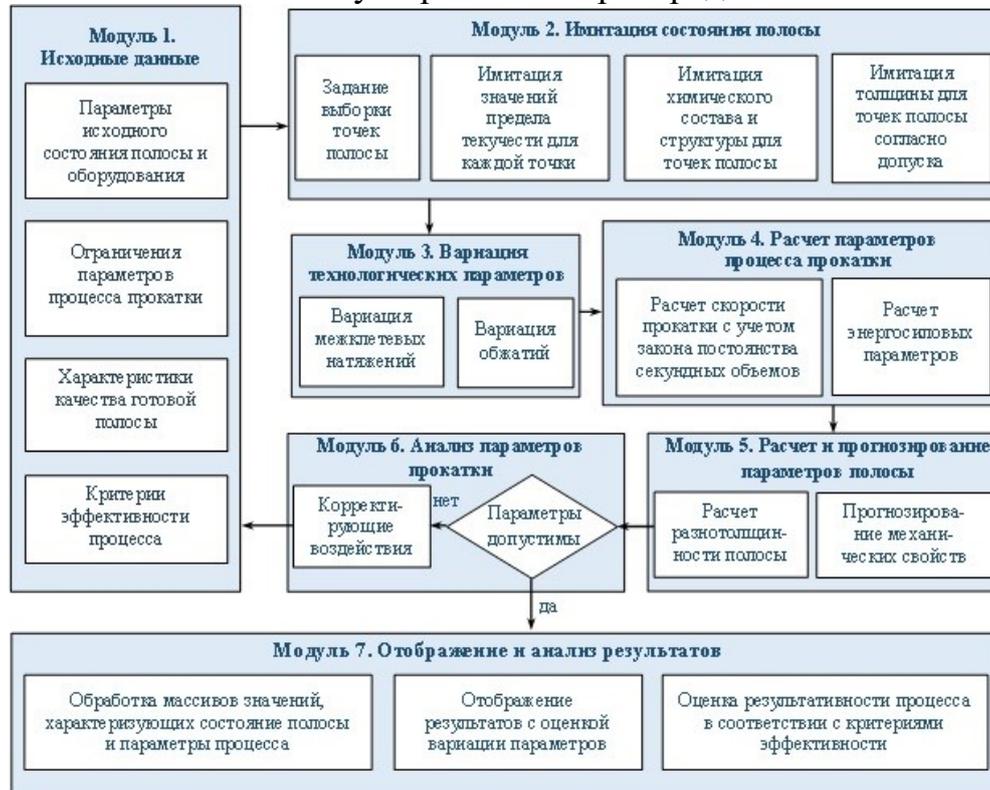


Рисунок 13 – Модули проектирования технологических режимов холодной прокатки с вариацией параметров процесса и полосы

В модуле 3 предусмотрена возможность перебора всех возможных вариантов распределений обжатий по клетям непрерывного стана и межклетевых натяжений согласно ограничениям, заданным в модуле 1.

В модулях 4 и 5 для каждой точки полосы осуществляется расчет параметров взаимодействия клетки и полосы с проверкой условия постоянства секундных объемов металла. В результате формируются массивы значений, являющиеся случайными числами в связи с имитацией возмущений, реализуемых в модулях 2 и 3.

После расчета параметров процесса и полосы в модуле 6 осуществляется проверка по энергосиловым и кинематическим характеристикам процесса прокатки, и оцениваются показатели качества готовой полосы.

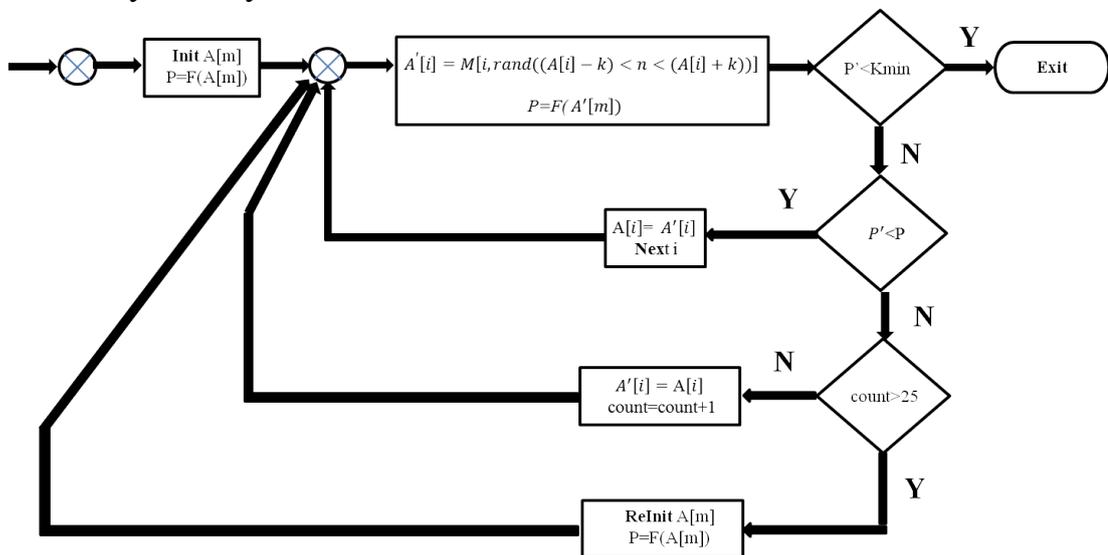
В случае положительной проверки, в модуле 7 выполняется обработка массивов значений, характеризующих состояние полосы и параметры процесса для выбора варианта технологического режима, отвечающего заданным в модуле 1 критериям эффективности. Если по какому-либо параметру наблюдается невыполнение установленных требований, то в соответствии с методологией проектирования принимаются соответствующие корректирующие меры в модуле 1, и расчет повторяется.

Интеллектуальный алгоритм проектирования энергоэффективной технологии

Имеется набор данных, представляющий собой выборку допусков режима прокатки по отдельным параметрам $M[m \times n]$. Всего $m=25$ входных параметров по $n=100$ значений в пределах естественных ограничений для каждого параметра. Также, имеется модель процесса прокатки, которая может получать входные параметры прокатки и производить расчет потребляемой мощности. Существует задача выбора оптимальной совокупности параметров прокатки для минимизации потребляемой мощности. Если попытаться решить эту задачу прямым перебором всех комбинаций с запуском расчета, то при 100^{25} и расчет займет продолжительное время, что крайне неэффективно.

В рамках данного исследования применен метод оптимизации с элементами эволюционного моделирования и итерационным подбором оптимума по мощности с отслеживанием градиента ее величины. Для анализа данных и разработки модели оптимизации использована программа расчета динамической модели процесса прокатки и статистические пакеты анализа данных из библиотек языка *Python*.

Работа алгоритма оптимизации, блок-схема которого представлена на рисунке 14, начинается со случайного отбора параметров в стартовую выборку входного вектора $M[m \times n] \rightarrow \text{rand}(A[m])$ для расчета мощности P . При стартовой инициализации значение расчетной мощности может оказаться любым, в соответствии с вероятностью распределения $f(P)$, подчиняющейся нормальному закону.



P – потребляемая мощность прокатных электродвигателей, $M[m \times n]$ – набор m входных данных из диапазона допусков в количестве n для каждого, $A[m]$ – выборка входных данных, которую требуется подобрать при оптимизации, k – диапазон допуска коррекции относительно текущего значения параметра выборки, K_{min} – критерий останова алгоритма оптимизации (задается вручную), $count$ – счетчик итераций без изменения результата (попадание в локальный минимум)

Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма оптимизации мощности прокатки по критерию минимума

После задания начальной выборки и расчета стартового значения мощности прокатки начинается процесс оптимизации. Алгоритм оптимизации в цикле перебирает параметры $A[m]$ и пробует смещать их значения на некоторое случайное количество шагов вдоль имеющегося набора данных $M[m \times n]$ для данного параметра m и производится соответствующий расчет мощности прокатки P на имеющейся модели. При этом ограничивается вероятность взятия ближайших параметров по мере удаления от текущего значения в сторону ближайшего большего или меньшего из набора $M[m \times n]$ на k значений. Метод подстановки аналитически представлен следующим образом $A'[i] = M[i, \text{rand}((A[i] - k) < n < (A[i] + k))]$.

После расчета производится сверка получившегося значения мощности P' со старым значением мощности P . Если получившееся значение мощности меньше предыдущего, то производится закрепление за выборкой $A[m]$ в текущем параметре $A[i]$ нового значения, которое оптимизировало значение потребляемой мощности прокатки P . Таким образом, осуществляется отслеживание градиента оптимизации в сторону минимизации мощности.

По результатам исследований разработаны и зарегистрированы программы для ЭВМ, позволяющие производить автоматизированное проектирование энергоэффективных режимов прокатки.

5. Разработка и внедрение решений для совершенствования технологий прокатного производства

Разработка и промышленная реализация технических решений, исключающих возникновение в рабочих клетях станов холодной прокатки резонансных вибраций

Учитывая, что объем полосы косвенно регулируется скоростью прокатки и величиной обжатия металла, в качестве основных параметров регулирования взяты обжатие в клетях (раствор валков) и скорости рабочих валков в клетях.

В результате исследования влияния регулирования межвалкового зазора на возникновение нестабильностей при прокатке выявлено, что на сортаменте полос толщиной 0,5–1,2 мм исключить вибрацию можно путем уменьшения раствора валков во второй клетке на 6 %, и в третьей клетке на 3 % без изменения скоростного режима стана.

При исследовании влияния изменения коэффициента соотношения скоростей привода стана во втором и третьем промежутке, определяемого по формуле:

$$k = \frac{v_i}{v_{i-1}}, \quad (20)$$

установлено, что увеличение данного коэффициента на 10–15 % обеспечивает стабильную прокатку с натяжением, что минимизирует риски вибраций даже без изменения межвалкового зазора (корректировок обжатий), однако применять данное решение нужно с учетом существующих

ограничений по уровню межклетевых натяжений полосы, избегая их повышенного уровня и риска обрывности полос.

В течение января–февраля 2020 г. на 5-клетевом стане 1700 производства плоского проката ПАО «Северсталь» была проведена серия опытных прокаток полос средней толщины 0,4-0,5 мм шириной 1250 мм (при выполнении исследования было обработано более 4000 режимов прокатки).

В ходе промышленных экспериментов прокатка осуществлялась по существующим базовым режимам и по режимам с корректировками, обеспечивающими необходимое распределение межклетевых объемов стальных полос за счет регулирования раствора валков, изменение распределения скоростей по клетям и регулирование натяжений.

На графиках (рис. 15) видно, что изначальная настройка стана по скорости прокатки по базовой технологии была произведена на значение 16,7 м/с. После прохождения шва и в начале прокатки следующего рулона была осуществлена перестройка стана на скорость 17,5 м/с, после чего произошла вибрация, и скорость прокатки была снижена до первоначального значения 16,7 м/с.

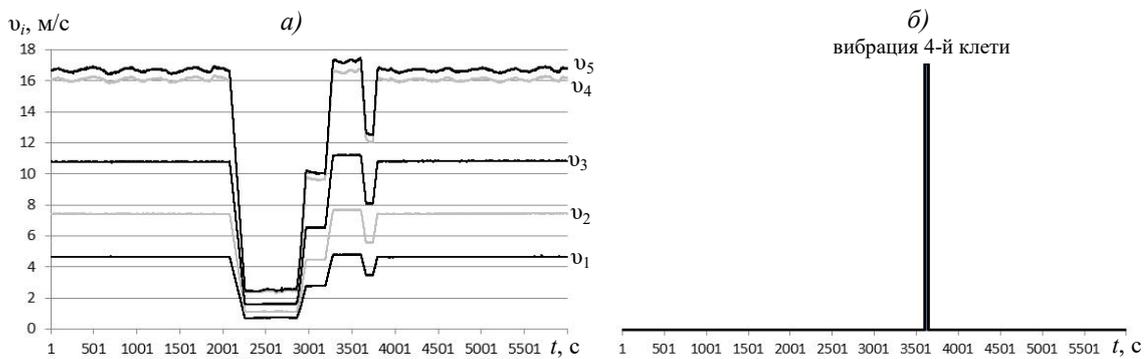


Рисунок 15 – Фактическая скорость рабочих валков при прокатке по базовой технологии (а) и момент вибраций, детектируемый системой предупреждения вибраций (б)

На графиках (рис. 16) видно, что изначальная настройка стана по скорости прокатки по опытному режиму была произведена на значение 17,8 м/с. Далее скорость была увеличена до 18 м/с, затем снижена до 5 м/с и вновь увеличена до 18,5 м/с, при этом вибрации стана не зарегистрированы.

При увлечении скорости прокатки до 19 м/с (третий пик на рис. 16) есть кратковременный провал до 18 м/с, что говорит о некоторой нестационарности прокатки на скорости 19 м/с.

Опытные режимы прокатки обеспечили стабильный технологический процесс без вибраций на скоростях выше более, чем на 10 % по сравнению с базовыми режимами, что эквивалентно получению экономического эффекта более 70 млн руб. в год.

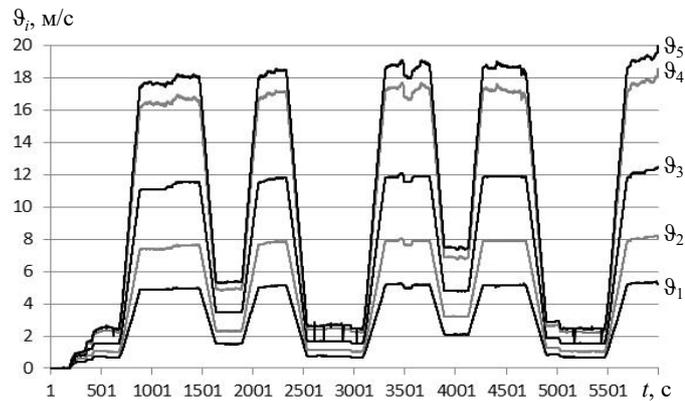


Рисунок 16 – Фактическая скорость рабочих валков при прокатке по опытному режиму

Проектирование параметров технологии для снижения затрат энергии в условиях нестационарности процесса прокатки

Реализация изложенной методологии проектирования технологических режимов, обеспечивающих экономию энергии двигателей главного привода стана, была выполнена на примере прокатки полос шириной 1250 мм и толщиной 0,5; 0,7 и 1 мм из стали CHES30 на 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь». Полученные результаты сравнивались и оценивались с режимами прокатки полос, зафиксированными на производстве. Имитация состояния полосы была выполнена со стандартным отклонением 10 % для предела текучести, 0,012 % для содержания углерода, 0,05 % для марганца, 0,001 мм для диаметра зерна и 2 % для толщины.

В таблице 2 приведены режимы обжатий и натяжений при прокатке полос разной толщины. Каждый режим представлен в двух вариантах: вариант 1 – фактические значения, взятые из автоматической системы измерения и контроля данных при прокатке; вариант 2 – рассчитанные значения в соответствии с изложенной методологией проектирования. Во всех случаях исходный предел текучести составлял 260 МПа, скорость прокатки – 21 м/с, удельные натяжения перед 1-й клетью – 28 МПа, за 5-ой клетью – 37 МПа. Толщина подката составляла 2,1 мм для полос толщиной 0,5; 0,7 мм и 2,7 мм для полос толщиной 1 мм.

Из таблицы 2 видно, что во втором варианте выполнено перераспределение обжатий между клетями с максимальной загрузкой первой клетки и разгрузкой второй и третьей клетей стана с последовательным увеличением удельных натяжений от первого межклетевого промежутка к четвертому. Сопоставление значений удельных затрат энергии по клетям стана показало, что разработанные режимы обеспечивают 5–8 % экономии электроэнергии.

Экспериментальное промышленное опробование разработанных режимов прокатки полос из стали CHES30 на 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь» показало, что:

– средняя фактическая экономия мощности при прокатке по спроектированным режимам составила 6,5 %;

– распределение толщины полосы характеризовалось средним значением $\bar{X} = 0,698$ мм и стандартным отклонением $S = 0,011$ мм, для распределения предела текучести указанные параметры составили $\bar{X} = 668$ МПа, $S = 2,17$ МПа, то есть параметры готовых полос удовлетворяют требованиям, предъявляемым к прокату для холодной штамповки.

Таблица 2 – Режимы обжатий и удельных межклетевых натяжений при прокатке полос из стали CHES30 шириной 1250 мм на 5-клетевом стане 1700

№ варианта	Относительные обжатия в клетях, %					Удельные натяжения в межклетевых промежутках, МПа			
	№1	№2	№3	№4	№5	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Режим 1. Толщина полосы $h=0,5$ мм									
1	30	30	30	30	5	145	160	150	165
2	37	26	26	32	2	132	148	186	201
Режим 2. Толщина полосы $h=0,7$ мм									
1	24	25	24	22	3	138	152	153	154
2	32	20	20	22	5	140	165	189	200
Режим 3. Толщина полосы $h=1$ мм									
1	22	23	22	21	4	136	144	155	169
2	28	19	19	21	4	150	164	190	200

Повышение энергоэффективности технологических процессов на широкополосных станах путем компенсации момента инерции двигателей главного привода

В настоящее время для автоматизированного управления двигателями приводов прокатных станов используется метод пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) управления, описываемый уравнением:

$$U(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d_e(t)}{dt}, \quad (21)$$

где u – выходная величина регулятора; e – сигнал рассогласования, получаемый как разность заданной и фактической величины регулируемого параметра; t – время; K – пропорциональный коэффициент (безразмерный); T_i – постоянная интегрирования (размерность времени); T_d – постоянная дифференцирования (размерность времени).

На практике постоянная дифференцирования чаще всего равна нулю, то есть используются только пропорциональная и интегральная составляющие регулятора в связи с тем, что дифференциатор усиливает высокочастотные помехи, короткие выбросы и шум.

Задача проектирования энергоэффективной технологии непрерывной прокатки включает в себя разработку оптимальных способов управления автоматизированными приводами листопрокатных станов, заключающихся в снижении отклонения от заданной скорости вращения двигателя.

На станах, где в процессе прокатки изменяется скорость и направление вращения вала двигателя, возникает динамический момент сил инерции. Для получения полного динамического момента клетки кварто необходимо учесть моменты инерции всех тел, входящих в привод.

В решении задач компенсации момента инерции при ускоренном (замедленном) движении рабочих валков необходимо так задать ток якоря привода, чтобы устранить или существенно сократить переходные процессы (броски и колебания тока), возникающие при обычном ПИД-регулировании.

В системе моделирования *Matlab/Simulink* была сконструирована модель привода на базе двухякорного двигателя 2МП 12600-50у4 6-й клетки чистой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь». Модель сконструирована по стандартной двухконтурной системе.

Значение тока компенсации момента инерции подается в виде добавки к заданию контура регулирования тока (рис. 17). То есть в системе подчиненного электропривода постоянного тока формируется определенный сигнал, зависящий от сигнала задания скорости вращения, усиливается с эмпирическим коэффициентом усиления и подается на вход сумматора контура тока.

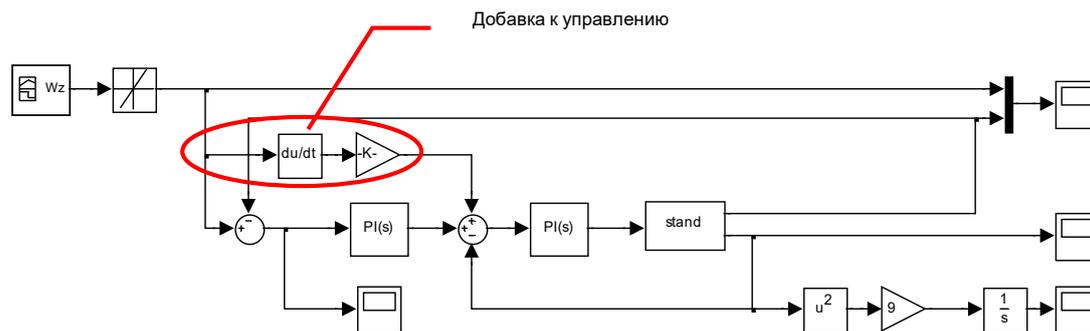


Рисунок 17 – Структурная схема системы управления двигателем прокатного стана в пакете *MATLAB*

Таким образом, выражение описывающее регулятор контура скорости принимает вид:

$$U(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{dg(t)}{dt}, \quad (22)$$

где g – сигнал задания; K_d – коэффициент усиления, расчет которого зависит от типа приводной машины и суммарного момента инерции всех звеньев привода.

В систему управления приводом на лабораторном стенде, а далее и на реальном промышленном оборудовании, была введена добавка к заданию тока, что обеспечило дополнительное ускорение системе для компенсации ее инерционности и позволило устранить негативные динамические эффекты (рывки и толчки валов) в моменты пуска, чреватые отклонениями от заданной скорости в управляемой системе.

Указанный метод был апробирован в реальных производственных условиях на клетях №№ 6 и 7 стана 2000 ПАО «Северсталь» путем разгона двигателя до заправочной 0,9 м/с и рабочей 2,6 м/с скоростей при штатном режиме настройки системы управления главными приводами и с учетом дополнительного коэффициента компенсации момента инерции. Результаты промышленных испытаний представлены на рисунке 18.

На рисунке 18 наглядно видно снижение бросков тока в процессе прокатки до 15 % при коррекции системы управления автоматизированных приводов, что снижает вероятность перегревов двигателей и повышает надежность оборудования (первые три заготовки прокатаны с компенсирующей добавкой к управлению главным приводом клетки). В результате промышленных испытаний выявлено улучшение соответствия заданной и истинной скорости клетки и уменьшение величины и времени перерегулирования, что позволяет снизить потери электроэнергии и нестационарность динамических нагрузок при прокатке.

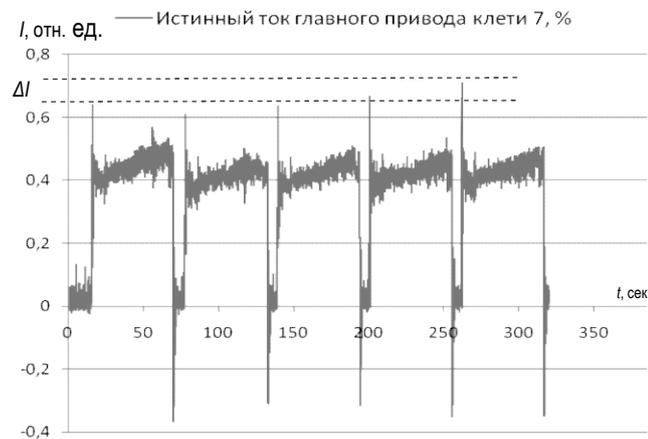


Рисунок 18 – Результаты промышленных испытаний энергоэффективных режимов работы автоматизированных приводов стана 2000

В течение апреля–мая 2013 г. рекомендованные режимы настройки главных приводов внедрены на все клетки чистовой группы стана 2000 ПАО «Северсталь».

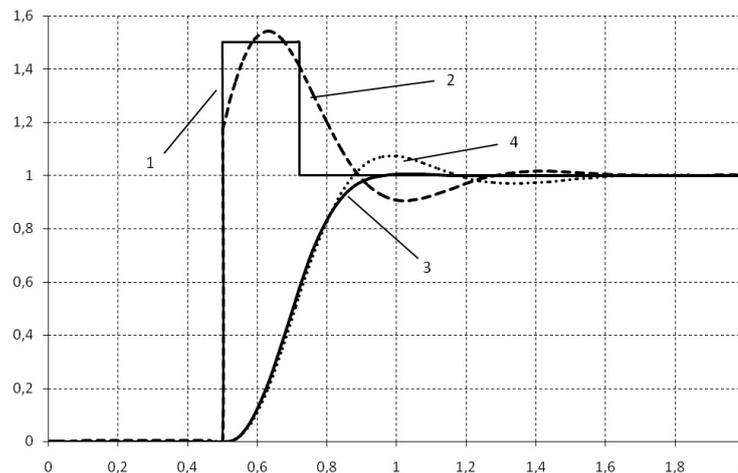
При годовой производительности стана в 6 млн т, удельном расходе электроэнергии – 46,6 кВт·час/т и стоимости электроэнергии для промышленных предприятий – 2,5 руб/кВт·час, достигается экономический эффект в пересчете на 1 т проката более 7 млн руб. в год. На описанное техническое решение получен патент РФ на изобретение № 2517324.

Данное решение по компенсации момента инерции также реализовано в декабре 2014 г. в системе петлерегулирования полунепрерывного комбинированного стана 2800/1700 ПАО «Северсталь», где существовала проблема вытяжек тонкого металла при динамической нагрузке на привод, это позволило получить эффект по снижению расхода металла в среднем на 0,15 кг/т.

Повышение энергоэффективности процесса листовой прокатки на основе модернизации систем управления скоростными режимами стана

Проблемы реализации оптимальных алгоритмов управления скоростными режимами работы стана усложняются тем, что в современных системах управления динамика часто неизвестна, регулируемые процессы нельзя считать независимыми, измерения сильно зашумлены, нагрузка непостоянна, технологические процессы непрерывны и нестационарны.

Задачей оптимального управления двигателем прокатного стана является обеспечение выхода на заданное значение скорости прокатки за минимальное время путем формирования прямоугольного управляющего импульса (рис. 19) в момент возникновения отклонения частоты вращения вала двигателя от заданной для максимально быстрого достижения выходным сигналом заданной величины (при ее достижении воздействие прекращается). Подобное отклонение возникает в момент изменения заданной частоты вращения из-за инерционности двигателя и всей системы привода прокатной клетки в целом, а так же, в момент изменения усилия прокатки.



1 и 2 – формы управляющего сигнала при традиционном ПИ- и импульсном регулировании, 3 и 4 – отклик объекта управления при ПИ- и импульсном управлении

Рисунок 19 – Формы сигналов при регулировании

При импульсном управлении реальная скорость вращения якоря более точно соответствует заданию и имеет меньшие пульсации.

В натурном лабораторном эксперименте (патент РФ на полезную модель № 125717), используя теорию подобия, производился запуск и дальнейшая работа электромеханической системы традиционным ПИ-регулированием и с помощью разработанного импульсного управления (рис. 20).

Реализуя управление двигателем с помощью управляющих импульсов можно не только существенно снизить потери электрической энергии при работе прокатного оборудования (до 15–20 %) за счет снижения уровня шумов, вызванных перерегулированием, но и достичь экономического эффекта за счет снижения потребления электроэнергии до 10–12 %.

На рассмотренное техническое решение получен патент РФ на изобретение № 2504447.

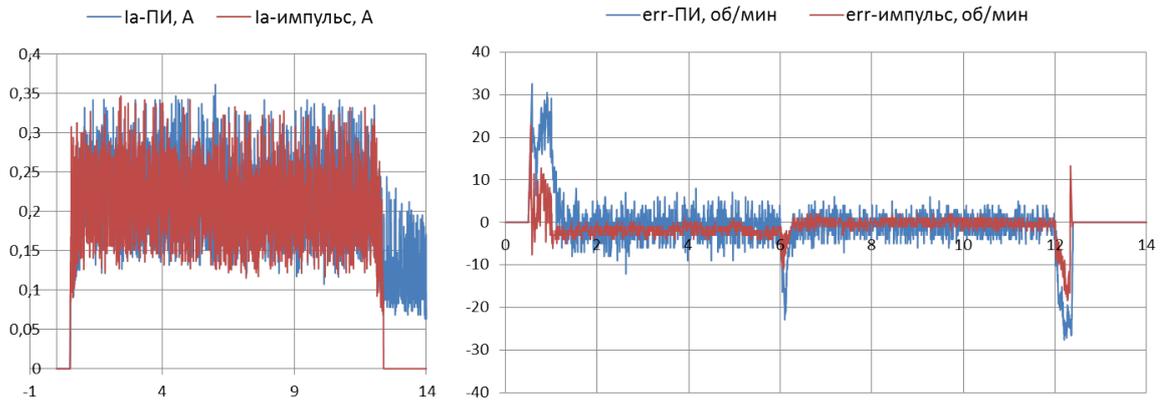


Рисунок 20 – Результаты лабораторных испытаний способа импульсного управления (слева диаграммы тока, справа диаграммы потерь)

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны научные положения и практически значимые решения, включающие модели, методы и алгоритмы для исследования и проектирования технологических режимов, для идентификации и прогнозирования негативных динамических эффектов, которые в совокупности представляют собой решение проблемы стабилизации и повышения энергоэффективности процессов тонколистовой прокатки в условиях нестационарного динамического нагружения, имеющей важное значение для предприятий металлургической отрасли. Разработанные технические и технологические решения защищены патентами на изобретения РФ.

2. Выполнен литературно-аналитический обзор работ в области исследования динамики и нестационарности процессов непрерывной листовой прокатки, в результате установлено, что в настоящее время отсутствуют комплексные исследования, интегрирующие данные и результаты анализа динамических процессов в линиях привода прокатных станов; работы и алгоритмов систем автоматического управления технологическим процессом, отвечающих за его стабильность; изменений геометрических параметров очага деформации, кинематических, технологических и энергосиловых параметров процесса в условиях нестационарного динамического нагружения с оценкой стационарности и энергоэффективности технологии непрерывной листовой прокатки.

3. Предложена комплексная динамическая модель процесса холодной прокатки, объединяющая подмодели электромеханической системы с математическим описанием элементов линии привода (двигатель постоянного тока, муфты, промежуточные валы, редуктор, шпиндели) и валкового узла (рабочие и опорные валки); очага деформации с описанием опережения и условий прокатки полосы с натяжением. На основе этой модели разработаны методы расчета технологических, кинематических и энергосиловых параметров процесса при нестационарном динамическом

нагружении. С использованием статистических методов доказано, что методы обеспечивают точность вычисления силы прокатки со средней погрешностью 5,6 %, угловой скорости вращения вала электродвигателя – 3,5 %.

4. С использованием разработанной модели исследованы геометрические и энергосиловые параметры процесса прокатки, установлено, что их изменения носят колебательный нестационарный характер, а фактические значения подчиняются нормальному закону распределения. Размах колебаний геометрических и силовых параметров составляет 5–15 %, размах колебаний энергетических характеристик процесса, определяющихся скоростными параметрами, достигает 20–40 %.

5. Раскрыт и описан механизм возникновения негативных вибрационных эффектов, заключающийся в несоблюдении при определенных режимах для рабочей клетки условий прокатки полосы с натяжением и ее чередованием во времени с прокаткой с подпором. Установлено, что причинами нарушения указанных условий является повышение уровня колебаний относительных обжатий, межклетевых натяжений, токовых нагрузок в линии привода до 15–25 % от заданных значений. В свою очередь, нарушение условий прокатки полосы с натяжением при одновременном снижении шероховатости бочек рабочих валков приводит к их пробуксовкам относительно полосы и повышению вероятности возникновения резонансных вибраций.

6. Разработана модель процесса холодной прокатки, сопровождающегося вибрациями рабочих валков, выполненная в программном комплексе DEFORM-2D, включающая стальную упругопластическую полосу с симметрией по толщине и рабочие валки с вращательным движением и перемещением по вертикали в виде графика колебаний по гармоническому закону. В результате моделирования установлено, что увеличение скорости прокатки сопровождается увеличением размаха колебаний усилий прокатки в соседних клетях более, чем на 0,4 МН и приводит к предаварийным ситуациям; вибрации рабочих валков не влияют на продольную разнотолщинность проката, однако приводят к появлению дефектов на его поверхности в виде чередующихся светлых и темных полос.

7. Разработаны методы идентификации и прогнозирования резонансной фазы вибрационных процессов в рабочих клетях, основанные на статистической оценке в режиме «online» основных показателей распределения выборок межклетевых натяжений полосы и токовых нагрузок электроприводов. Практическая реализация методов позволяет на скоростях прокатки 15–20 м/с идентифицировать вибрации за 5–10 секунд до их возникновения, что обеспечивает необходимое время для выработки управляющего воздействия на корректировку технологических режимов прокатного стана.

8. Разработана методология проектирования технологических режимов холодной прокатки, основанная на полученных в ходе диссертационного исследования теоретических принципах и аналитических алгоритмах,

направленных на комплексное решение проблемы, связанной с возникновением негативных динамических эффектов, повышением удельной энергоемкости процесса деформирования, снижением качества прокатной продукции в условиях нестационарного динамического нагружения.

Создан интеллектуальный алгоритм проектирования, основанный на методе оптимизации с элементами эволюционного моделирования и итерационным подбором оптимума по мощности, позволяющий автоматически определять количественные значения технологических параметров процесса прокатки с учетом заданных пользователем критериев, требований и ограничений. Данный подход для решения задач оптимизации достаточно широко известен, однако для повышения энергоэффективности процессов производства прокатной продукции применяется впервые.

Практическая реализация указанных подходов позволяет автоматизировать процесс проектирования технологии с учетом комплекса критериев, включая допустимый уровень колебаний технологических и кинематических параметров, условия исключения резонансных вибраций, условия обеспечения устойчивости режима прокатки без нарушения закона постоянства секундных объемов при динамических процессах, минимизацию энергоемкости процесса, без проведения достаточно затратных промышленных испытаний и апробаций.

9. Разработан метод активного электромагнитного демпфирования нагрузочных и крутильных колебаний в линии главного привода и схема управления демпфированием, основанные на принципе активного гашения посредством наложения одинаковых сигналов с противоположным знаком, позволяющие снизить негативный эффект от автоколебательных процессов в рабочих клетях прокатных станов. Использование данного метода позволяет снизить колебания скорости прокатки и токовых нагрузок на 10–20 %, что приводит к снижению уровня колебаний параметров очага деформации, стабилизации технологического процесса и снижению потерь электроэнергии при работе главных приводов прокатных станов.

10. Разработана структурная схема автоматизированной подсистемы корректировки величины опережения, действие которой основано на непрерывном формировании задания на угловую скорость вращения рабочих валков с учетом фактического изменения технологических параметров процесса прокатки (толщины полосы, обжатий, межклетевых натяжений) и параметров очага деформации. Внедрение данной системы, в отличие от существующих подходов к настройке скоростного режима с заданием статических значений величины опережения, позволит в реальном режиме времени корректировать скорость прокатки с учетом изменения параметров, отвечающих за формирование режимов натяжений полосы и секундных объемов металла.

11. Разработана, испытана и внедрена в производство проката на 5-клетевом стане 1700 энергоэффективная технология, исключая возможность возникновения резонансных вибраций и обеспечивающая повышение производительности агрегата без ухудшения качественных

показателей готовой продукции. Промышленная апробация показала фактическую экономию энергозатрат на процесс прокатки, составляющую в среднем 6,5 %; повышение скорости и производительности агрегата при прокатке полос толщиной менее 0,5 мм в среднем на 10 %; соответствие прочностных и пластических характеристик проката требованиям нормативно-технической документации.

12. Комплексная промышленная реализация разработанных технических и технологических решений по повышению энергоэффективности технологических режимов, устранению вибраций в рабочих клетях, аппаратной реализации предлагаемых способов оптимального управления скоростным режимом работы стана обеспечивает суммарный экономический эффект более 200 млн руб. в год.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах

Публикации в научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Гарбер Э.А., Наумченко В.П., Кожевников А.В., Самойлов В.И., Рыбаков Ю.В. Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов // Производство проката. – 2003. – № 1. – С. 10–13.

2. Гарбер Э.А., Наумченко В.П., Кожевников А.В., Павлов С.И. Устранение вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки путем коррекции их энергосиловых параметров // Сталь. – 2003. – № 9. – С. 79–83.

3. Гарбер Э.А., Кожевников А.В., Наумченко В.П., Шадрунова И.А., Павлов С.И. Исследование, моделирование и устранение вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки // Производство проката. – 2004. – № 6. – С. 34–41.

4. Харахнин К.А., Кожевников А.В., Маслов Е.А. Разработка алгоритма идентификации вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки // Сталь. – 2010. – № 10. – С. 38–41.

5. Харахнин К.А., Маслов Е.А., Кожевников А.В. Алгоритм обработки информации о натяжении полосы для идентификации вибраций на станах бесконечной прокатки на основе вейвлет-преобразования // Производство проката. – 2010. – № 10. – С. 36–40.

6. Кожевников А.В., Белкова С.В. Имитационная модель механической части двух смежных клеток непрерывного стана холодной прокатки // Сталь. – 2012. – № 5. – С. 55–60.

7. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Пути снижения потерь электроэнергии при работе автоматизированных приводов прокатных станов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2012. – № 4. – С. 79–85.

8. Кожевников А.В. Исследование возможных колебаний опережения при листовой прокатке // Производство проката. – 2013. – № 5. – С. 2–8.

9. Бровман М.Я., Полухин В.П., Кожевников А.В. Определение опережения при листовой прокатке // Сталь. – 2013. – № 7. – С. 37–42.

10. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Опыт внедрения энергоэффективных режимов работы главных приводов широкополосных станов горячей прокатки // *Металлург.* – 2013. – № 12. – С. 61–65.
11. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Метод расчета потерь электроэнергии от вынужденных колебаний тока якоря двигателя при работе приводов листовых прокатных станов // *Производство проката.* – 2014. – № 6. – С. 19–23.
12. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Адаптивное управление петледержателем широкополосного стана горячей прокатки // *Производство проката.* – 2015. – № 4. – С. 39–43.
13. Кожевникова И.А., Маркушевский Н.А., Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Моделирование и аналитическая диагностика вибраций в главных приводах станов холодной прокатки // *Производство проката.* – 2016. – № 7. – С. 19–23.
14. Кожевникова И.А., Кожевников А.В., Сорокин Г.А., Маркушевский Н.А. Демпфирование колебаний в главных приводах станов холодной прокатки // *Сталь.* – 2016. – № 10. – С. 31–33.
15. Кожевникова И.А., Сорокин Г.А., Кожевников А.В. Моделирование и исследование параметров очага деформации при холодной прокатке в условиях нестационарного динамического нагружения // *Производство проката.* – 2016. – № 12. – С. 13–16.
16. Кожевников А.В., Кожевникова И.А. Болобанова Н.Л. Моделирование процесса холодной прокатки в динамических условиях // *Металлург.* – 2017. – № 7. – С. 15–18.
17. Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л. Исследование параметров очага деформации при холодной прокатке в условиях их нестационарности и стохастичности // *Сталь.* – 2017. – № 8. – С. 24–29.
18. Кожевникова И.А., Кожевников А.В., Болобанова Н.Л. Исследование и раскрытие механизма возникновения вибраций в клетях непрерывного стана холодной прокатки // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* – 2017. – № 3. – С. 39–42.
19. Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л., Кожевников А.В. Численное моделирование процесса холодной прокатки при вибрации рабочих валков // *Сталь.* – 2017. – № 10. – С. 26–29.
20. Кожевникова И.А., Кожевников А.В., Волков В.Н. Динамическая корректировка опережения при холодной прокатке полос // *Производство проката.* – 2017. – № 10. – С. 32–34.
21. Кожевников А.В., Волков В.Н. Развитие математического аппарата для определения затрат энергии при непрерывной холодной прокатке // *Сталь.* – 2018. – № 4. – С. 33–36.
22. Кожевникова И.А., Волков В.Н., Кожевников А.В., Смирнов А.С. Идентификация возникновения вибраций в рабочих клетях прокатного стана по статистическим признакам // *Производство проката.* – 2018. – № 11. – С. 7–10.

23. Кожевников А.В., Шалаевский Д.Л., Смирнов А.С., Быкасова М.А. Развитие и применение методологии проектирования технологических режимов холодной прокатки // Производство проката. – 2019. – № 2. – С. 7–12.

24. Кожевников А.В. Влияние условий захвата и колебаний полосы на возникновение вибраций при холодной прокатке // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т. 76. № 1. – С. 54–58.

25. Шалаевский Д.Л., Кожевников А.В. Автоматизированное проектирование энергоэффективной технологии холодной прокатки // Сталь. – 2020. – № 1. – С. 13–17.

26. Кожевников А.В., Смирнов А.С., Кожевникова И.А., Антонов П.В., Жиленко С.В., Аралов А.И. Исследование автоколебаний и разработка метода стабилизации процесса на непрерывном стане холодной прокатки полос // Металлург. – 2020. – № 8. – С. 36–42.

27. Кожевников А.В., Смирнов А.С., Кожевникова И.А., Самойлов А.В., Анфиногенов Г.Е., Быков А.В. Проблемы настройки листовых прокатных станов в условиях возникновения вибраций // Технология металлов. – 2020. – № 9. – С. 38–46.

28. Кожевников А.В., Юсупов В.С. Методика проектирования технологии холодной прокатки, исключающей вибрации на станах // Сталь. – 2021. – № 5. – С. 21–25.

29. Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Юсупов В.С. Необходимость развития теории листовой прокатки, учитывающей нестационарность технологии и негативные динамические эффекты // Заготовительные производства в машиностроении. – 2021. – Том 19. № 11. – С. 510–513.

Монография

30. Кожевников А.В. Листовая прокатка в условиях нестационарного динамического нагружения. Эксплуатация и управление: Монография. – Череповец: ФГБОУ ВО ЧГУ, 2021. – 285 с.

Патенты на изобретения и свидетельства регистрации ПО для ЭВМ

31. Способ автоматического управления двигателями постоянного тока главных приводов прокатного стана. Патент на изобретение № 2504447, Россия, МПК В21В37/46 – 2011154361/02; Заявлено 29.12.2011, опубл. 20.01.2014. Бюл. № 2. Приоритет 29.12.2011 (Россия), авторы Кожевников А.В., Сорокин Г.А., регистрационный № 2011154361.

32. Стенд для исследования систем управления электроприводом. Патент на полезную модель № 125717, Россия, МПК G01R31/34 – 2012121648/07; Заявлено 25.05.2012 г., опубл. 10.03.2013. Бюл. № 7. Приоритет 25.05.2013 (Россия), авторы Сорокин Г.А., Кожевников А.В., регистрационный № 2012121648.

33. Способ регулирования электроприводов постоянного тока. Патент на изобретение № 2517324, Россия, МПК G05В 11/36 – 2012127659/08, Заявлено

02.07.2012 г., опубл. 27.05.2014. Бюл. № 15. Приоритет 02.07.2012 (Россия), авторы Сорокин Г.А., Кожевников А.В., регистрационный № 2012127659.

34. Программа для динамического расчета процесса прокатки тонких широких полос. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017616866, Заявлено 13.04.2017 г., заявка № 2017613381. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 19.06.2017 г., авторы Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л., Тимофеева М.А., Волков В.Н.

35. Программа по проектированию оптимальной технологии холодной прокатки по критерию минимум расхода энергии. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018615736, Заявлено 26.03.2018 г., заявка № 2018612877. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 15.05.2018 г., авторы Кожевников А.В., Волков В.Н., Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л., Шалаевский Д.Л.

36. Расчет оптимальных параметров технологии производства холоднокатаных полос на непрерывном стане холодной прокатки. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019617618, Заявлено 08.04.2019 г., заявка № 2019613768. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 18.06.2019 г., авторы Кожевников А.В., Шалаевский Д.Л., Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л.

37. Расчет структурных параметров очагов деформации и энергосиловых параметров при непрерывной холодной прокатке стальных широких полос. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019662633, Заявлено 02.08.2019 г., заявка № 2019619603. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 27.09.2019 г., авторы Кожевников А.В., Шалаевский Д.Л., Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л.

38. Способ определения возникновения начальной стадии критической вибрации в рабочей клетке прокатного стана. Патент на изобретение № 2734360, Россия, МПК В21В 38/00, Заявлено 21.12.2018 г., опубл. 15.10.2020. Бюл. № 29. Приоритет 25.05.2013 (Россия), авторы Антонов П.В., Адигамов Р.Р., Жиленко С.В., Кожевников А.В.

Публикации в зарубежных журналах

39. A. Kozhevnikov, I. Kozhevnikova N. Bolobanova Dynamic model of cold strip rolling // *Metalurgija (Metallurgy)*. – 2018. – Vol. 57. No. 1–2. – P. 99–102.

40. Kozhevnikov A., Kozhevnikova I., Bolobanova N. Development of the model of cold rolling process in dynamic conditions // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2018. – No. 2. – P. 11–17.

41. A. Kozhevnikov, I. Kozhevnikova, N. Bolobanova, N. Kochnev Evaluation of power losses during stochastic changes in the current of the main drives of cold rolling mills // *Metalurgija (Metallurgy)*. – 2018. – Vol. 57. No. 3. – P. 168–170.

42. A. Kozhevnikov, I. Kozhevnikova, N. Bolobanova, D. Shalaevskii Methodology of design of the thin steel strip cold rolling energy efficient technology // *Metalurgija (Metallurgy)*. – 2018. – Vol. 57. No. 4. – P. 337–340.

43. I.A. Kozhevnikova, N.L. Bolobanova, Y.S. Yusupov, A.V. Kozhevnikov, E.N. Kroitor Frictional-Stress Distribution in the Deformation Zone on Cold Rolling // *Steel in Translation*. – 2018. – Vol. 48. No. 7. – P. 454–457.

44. A. Kozhevnikov, I. Kozhevnikova, N. Bolobanova, A. Smirnov Chatter prevention in stands of continuous cold rolling mill // *Metalurgija (Metallurgy)*. – 2020/ – Vol. 59. No. 1. – P. 55–58.

45. A. Kozhevnikov, N. Bolobanova, I. Kozhevnikova, D. Shalaevskii The Study of influence of work rolls vibration during cold rolling on the quality of steel strip surface // *Metalurgija (Metallurgy)*. – 2020. – Vol. 59. No. 1. P. 74–76.

46. A.V. Kozhevnikov, D.L. Shalaevsky, A.S. Smirnov A calculation of the continuous cold rolling parameters taking into account the possibility of a vibration in the working stands // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2020. – Vol. 55. No. 4. P. 889–894.

Основные публикации в трудах научно-технических конференций

47. Кожевников А.В., Белкова С.В. Взаимодействие механической части электроприводов сложных технических систем на примере прокатного стана // *Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова; Томский политехнический университет*. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 160–164.

48. Кожевников А.В., Селиванов А.А., Белкова С.В. Исследование возникновения нестационарности работы привода и технологических параметров в процессе прокатки // *Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. труд. Часть II*. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012 – С. 53–59.

49. Кожевников А.В., Белкова С.В. Исследование энергоэффективности процесса холодной прокатки в условиях работы автоматизированных приводов прокатных станов // *Труды IX конгресса прокатчиков (Череповец, 16–18 апреля, 2013 г.)*. – Москва: ОАО «Чермет-информация», 2013. – С. 46–50.

50. Кожевников А.В., Сорокин Г.А., Волков В.Н. Развитие направлений повышения энергоэффективности и диагностики автоматизированных главных приводов листовых прокатных станов в условиях нестационарности технологического процесса // *Труды VII международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология»*. Сб. научн. тр. – Москва: Издательский дом МИСиС. НИТУ «МИСиС», 2014. – С. 248–253.

51. Кожевников А.В. Комплексные исследования и разработки эффективных систем управления и контроля главных приводов листовых прокатных станов // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 216–221.

52. Кожевников А.В. Комплексные исследования и разработки эффективных систем управления и контроля прокатного производства // Научно-технический прогресс в черной металлургии: Материалы II Международной научно-технической конференции (7–9 октября 2015 г.) / Отв. ред. А.Л. Кузьминов. – Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2015. – С. 252–255.

53. Кожевников А.В., Сорокин Г.А., Кожевникова И.А. Современные подходы к работе и настройке автоматизированных систем листовых прокатных станов с учетом стохастического характера параметров технологического процесса // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XIX Международной научно-практической конференции: В 2 ч. Ч. 2 / Сиб. гос. индустр. ун-т; под ред. Е.В. Протопопова. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. – С. 140–143.

54. Кожевникова И.А., Кожевников А.В. Исследование факторов возникновения негативных автоколебаний при обработке давлением тонких широких стальных полос // Металлургия: технологии, инновации, качество: Труды XX Международной научно-практической конференции. Ч.1. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – С. 176–180.

55. Kozhevnikov A.V., Volobanova N.L., Kozhevnikova I.A. The study of influence of technology factors and equipment design parameters on energy consumption taking into account stochasticity of the cold rolling process // 2017 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 287 012007. doi:10.1088/1757-899X/287/1/012007

56. Kozhevnikov A., Kozhevnikova I., Volobanova N. Dynamic model of cold strip rolling // 13th International Symposium of Croatian Metallurgical Society «Materials and Metallurgy»: Book of abstracts. – Croatia: Metalurgija, 2018. – Vol. 57. No. 3 – P. 202–207.

57. Кожевников А.В., Смирнов А.С., Платонов Ю.В. Исследование влияния условий захвата и колебаний полосы на возникновение вибраций при холодной прокатке // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXI Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 1 / под ред. Е.В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2019. – С. 184–188.

58. A.V. Kozhevnikov The Development and Application of Methodologies for the Design of Technological Modes of Cold Rolling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 718 (2020) 012007 doi:10.1088/1757-899X/718/1/0120072

59. Кожевников А.В., Смирнов А.С., Кожевникова И.А. Совершенствование процессов тонколистовой прокатки в условиях нестационарного динамического нагружения // Современная металлургия начала нового тысячелетия, посвящается 10-летию Металлургического института ЛГТУ: сб. науч. тр. III Всеросс. (с международным участием) науч.-практ. Конф., 21–23 октября 2020 г., г. Липецк. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2020. – С. 68–74.