

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БАЙКОВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК (ИМЕТ РАН)**

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

**Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Череповец – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
Глава 1. Современное состояние вопросов теоретического обоснования и повышения эффективности процесса тонколистовой прокатки	23
1.1 Проблемы теоретического обоснования процесса тонколистовой прокатки	23
1.2 Анализ известных технических и технологических решений по устранению вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки	27
1.2.1 Обзор публикаций, посвященных проблеме вибраций на листовых прокатных станах	29
1.2.2 Анализ существующих путей решения проблемы вибраций в листовых прокатных станах	32
1.3 Особенности задания скоростных режимов работы прокатного оборудования при непрерывной прокатке	58
1.4 Перспективы повышения эффективности производства тонких широких полос	60
1.4.1 Развитие методов разработки режимов прокатки	60
1.4.2 Вопросы прогнозирования затрат энергии при непрерывной прокатке	63
1.4.3 Вопросы повышения качества широких стальных полос	66
Выводы по главе 1	68
Глава 2. Развитие теории процесса тонколистовой прокатки	71
2.1 Структура модели процесса упругопластического деформирования в условиях нестационарного динамического нагружения	71
2.1.1 Структура физико-математической модели процесса холодной прокатки	71
2.2 Модель электромеханической системы прокатного стана	73
2.2.1 Математическое описание взаимосвязей электромеханических	

систем в процессе непрерывной прокатки	82
2.2.2 Комплексная модель электромеханической системы привода непрерывного прокатного стана	92
2.3 Модель очага деформации и метод расчета его основных параметров	95
2.3.1 Метод расчета параметров холодной прокатки	96
2.4 Модель опережения при тонколистовой прокатке	98
2.4.1 Аналитическое моделирование колебания опережений при холодной листовой прокатке	111
2.5 Промышленная апробация и оценка точности разработанных моделей и методов	126
2.5.1 Оценка точности и адекватности модели электродвигателя и электромеханической системы привода	126
2.5.2 Оценка точности разработанной комплексной динамической модели взаимодействия электромеханической системы непрерывного стана холодной прокатки и очага деформации	131
2.6 Исследование геометрических, кинематических и энергосиловых параметров технологического процесса в условиях нестационарного динамического нагружения	136
2.7 Статистический анализ параметров процесса холодной прокатки и механических характеристик полосы	146
Выводы по главе 2	152
Глава 3. Исследование факторов и выявление причин возникновения негативных автоколебаний в рабочих клетях станов холодной прокатки	155
3.1 Исследование вибрационных процессов, возникающих в рабочих клетях непрерывных широкополосных станов холодной прокатки	155
3.2 Исследование факторов и описание механизма возникновения резонансных вибраций	162
3.2.1 Исследование влияния характера режима натяжений полосы при непрерывной холодной прокатке на величину энергозатрат	170

3.2.2	Исследование захвата полосы валками в условиях нестационарности технологического процесса	175
3.2.3	Исследование колебаний прокатываемой полосы при непрерывной прокатке	178
3.2.4	Регулирование объемов металла за счет натяжений полосы	182
3.2.5	Причины возникновения негативных вибрационных эффектов, сопровождающихся повышенным акустическим шумом	185
3.3	Численное моделирование процесса холодной прокатки в условиях вибраций рабочих валков	187
3.4	Исследование влияния вибраций рабочих валков на возникновение дефектов поверхности полос с применением численных методов	194
3.5	Идентификация вибраций на основе статистического анализа технологических параметров	200
3.5.1	Метод идентификации автоколебаний в клетях прокатных станов на основе статистического анализа межклетевых натяжений	201
3.5.2	Метод прогнозирования развития вибраций в клетях прокатных станов на основе статистического анализа токовых нагрузок главных приводов	205
3.5.3	Выявление критических вибраций путем статистического анализа дисперсий сигналов нагружения системы	212
3.6	Демпфирование колебаний в главных приводах прокатных станов ..	217
	Выводы по главе 3	220
	Глава 4. Разработка методологии проектирования технологических режимов процесса прокатки	224
4.1	Методология проектирования технологии холодной прокатки стальных полос	224
4.2	Алгоритмическое обеспечение методологии проектирования энергоэффективной технологии	227
4.2.1	Интеллектуальный алгоритм работы с большими данными, основанный на методе эволюционного моделирования	229

4.2.2 Алгоритм подбора технологических параметров, обеспечивающих минимальный уровень требуемой мощности	233
4.3 Апробация разработанного инструментария для проектирования энергоэффективной технологии	239
4.3.1 Практическое использование интеллектуального алгоритма оптимизации	239
4.3.2 Применение алгоритма подбора технологических параметров	241
Выводы по главе 4	248
Глава 5. Разработка и внедрение решений для совершенствования технологий прокатного производства	251
5.1 Разработка и промышленная реализация технических решений, исключающих возникновение в рабочих клетях станов холодной прокатки резонансных вибраций	251
5.1.1 Подходы к проектированию технологии, исключающей (минимизирующей) возникновение негативных вибрационных эффектов	251
5.1.2 Результаты промышленной апробации технологических режимов, обеспечивающих стабильное протекание процесса листовой прокатки без возникновения вибраций	259
5.2 Разработка и промышленная реализация энергоэффективных режимов работы широкополосных станов холодной прокатки	269
5.2.1 Проектирование параметров технологии для снижения затрат энергии в условиях нестационарности процесса прокатки	269
5.2.2 Стабилизация и повышение энергоэффективности процесса прокатки путем модернизации алгоритмов систем управления скоростными режимами работы станов	273
5.2.3 Применение интеллектуальных алгоритмов в системе управления скоростью прокатки для снижения энергозатрат	283
5.3 Разработка и промышленная реализация эффективных режимов работы широкополосных станов горячей прокатки	287

5.3.1 Разработка и внедрение способа управления электроприводами на основе компенсации момента инерции двигателя	287
5.3.2 Повышение качества проката за счет снижения колебаний в системе петлерегулирования	296
Выводы по главе 5	303
Заключение (общие выводы по диссертации)	306
Литература	311
Приложения	345

ВВЕДЕНИЕ

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, отметим наиболее существенные из них.

1. Технологический процесс прокатки нестабилен и выражается в колебаниях основных технологических параметров: скоростей прокатки, натяжений полосы, толщины прокатываемых листов и 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, не учитывающего нестационарность и динамичность процесса обработки, стохастичность исходных параметров подката.

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 листопрокатных станов, и, как следствие, к неоправданным потерям энергии, повышенным эксплуатационным расходам, снижению качества проката.

Большинство существующих методов теоретических исследований и расчета геометрических параметров очага деформации и энергосиловых параметров процесса прокатки, выполненных отечественными [1–8] и зарубежными специалистами [9–14], 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 [15–21], в том числе, и в рамках проектирования технологий обработки давлением современных марок сталей.

4. Моделирование динамических процессов, возникающих при непрерывной прокатке, является весьма сложной задачей, решать которую необходимо на междисциплинарном уровне с интеграцией знаний в области теории прокатки и теории электропривода, поэтому в технической литературе освещаются только ее отдельные аспекты.

Динамические модели, описанные работах [22–24], являются моделями управления процессом, предназначенными для проектирования контроллеров, без прогнозирования напряжений, деформаций и нагрузок в прокатных клетях. В работах [25, 26] затронут вопрос математического описания электромеханической системы (ЭМС) клетки стана холодной прокатки для исследования динамических нагрузок электропривода без учета влияния контактного взаимодействия между полосой и валками.

Вследствие многофакторности процесса, сложного взаимодействия очагов деформации, в которых формируются основные процессы нагружения, и электромеханических систем прокатных клетей непрерывного стана, обеспечивающих требуемый крутящий момент рабочих валков с учетом инерционности всей системы и нестационарного характера нагрузки, дальнейшее развитие технологии тонколистовой прокатки невозможно без разработки комплексной динамической модели процесса холодной прокатки.

5. Известно, что скорость выхода полосы из очага деформации превышает окружную скорость прокатных валков, это явление называется опережением.

В реальных производственных условиях, зная заданную скорость прокатки, режимы обжатий в клетях, диаметры валков, требуется определить скорости вращения рабочих валков стана с учетом величины опережения. Неправильный выбор скоростного режима может привести к обрывам стальных полос, к возникновению резонансных вибраций, увеличению потерь электрической энергии.

Вопросы расчета и экспериментального определения величины опережения были неоднократно рассмотрены в литературе [27–29]. Описанные в указанных работах методики определения опережения являются детерминистскими и до настоящего времени используются при настройке скоростных режимов действующих прокатных станов, что в условиях нестационарного динамического нагружения приводит к некорректному определению скоростей вращения рабочих валков и возникновению негативных явлений, указанных выше.

Развитие методов расчета опережения важно не только для развития теории прокатки, но и для развития теории управления, в том числе, и для повышения эффективности работы автоматизированных систем управления прокатными станами.

6. 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 клеток, 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.

Все исследования и разработки по теме диссертации проводились по трем основным направлениям.

1. Теоретические исследования:

– разработка комплексной динамической модели процесса холодной прокатки, объединяющей подмодели электромеханической системы с математическим описанием элементов линии привода и валкового узла, очага деформации с описанием опережения и условий прокатки полосы с натяжением;

– исследование влияния изменения нагружения в линии привода на геометрические и энергосиловые параметры очага деформации при нестационарных и динамических режимах;

– исследование изменения величины опережения при колебаниях технологических параметров;

– исследование факторов и описание механизма возникновения нестационарного процесса прокатки и негативных автоколебательных эффектов в рабочих клетях прокатных станов, сопровождающихся повышенным акустическим шумом;

– исследование влияния условий деформации и параметров настройки главных приводов прокатного стана на величину энергозатрат;

– исследование влияния вибраций валкового узла на качество поверхности прокатываемых полос с применением численных методов;

- разработка методов идентификации резонансных вибраций в клетях прокатных станов на основе статистического анализа технологических параметров;

- разработка методологии и алгоритмов проектирования технологических режимов холодной прокатки с минимальной энергоемкостью;

- разработка предложений по демпфированию колебаний окружных скоростей приводных рабочих валков.

2. Работы по совершенствованию технологических процессов:

- разработка технических и технологических решений, направленных на исключение вероятности возникновения негативных вибрационных процессов в рабочих клетях станов холодной прокатки;

- разработка энергоэффективных режимов прокатки на широкополосных станах холодной прокатки;

- модернизация алгоритмов систем управления скоростными режимами работы прокатных станов;

- разработка способов управления и регулирования электроприводов прокатного стана для снижения динамических нагрузок и энергозатрат при прокатке;

- разработка режимов работы системы петлерегулирования широкополосных станов горячей прокатки для повышения качества продукции.

3. Экспериментальные исследования:

- проведение промышленных исследований на действующих непрерывных широкополосных станах с целью получения экспериментальных данных о фактических параметрах режимов прокатки;

- оценка точности разработанных моделей и методов на основе статистической обработки данных о расхождениях между измеренными и расчетными значениями параметров;

– промышленные экспериментальные исследования повышенных вибрационных процессов, возникающих на 5-клетевом стане «1700» ПАО «Северсталь»;

– опытно-промышленные испытания метода прогнозирования вибраций, основанного на статистическом анализе изменений технологических параметров во время прокатки;

– промышленная апробация режимов холодной прокатки исключаящих (минимизирующих) негативные вибрации;

– разработка и внедрение на непрерывном широкополосном стане способа управления электроприводами рабочих клеток на основе компенсации момента инерции двигателя;

– промышленные исследования влияния снижения колебаний в системе петлерегулирования полосы на ее качество;

– лабораторные испытания способа управления скоростными режимами работы электропривода на основе формирования управляющего импульса.

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 вала 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 станов, 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.

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 (см. Приложение 1).

Аннотация диссертационной работы по главам.

В *первой главе* отражены особенности технологического процесса прокатки тонких полос на действующих непрерывных широкополосных станах, связанные с его нестационарностью и наличием негативных динамических составляющих. Представлены результаты литературно-аналитического обзора работ в области исследования динамики и нестационарности процессов прокатки. Установлено, что в настоящее время отсутствуют комплексные исследования, интегрирующие анализ динамических процессов в линиях привода прокатных станов, алгоритмы работы систем автоматического управления технологическим процессом, изменения геометрических параметров очага деформации, кинематических, технологических и энергосиловых параметров процесса при нестационарных и динамических режимах нагружения с оценкой его стабильности и энергоэффективности.

Во *второй главе* представлена комплексная динамическая модель процесса холодной прокатки, объединяющая подмодели электромеханической системы и очага деформации. Представлены аналитические выражения для определения величины опережения и диапазонов его возможных колебаний при горячей и холодной прокатке. Выполнено исследование геометрических, кинематических и энергосиловых параметров технологического процесса в условиях нестационарного динамического нагружения. Установлено, что их изменения носят колебательный нестационарный характер, а фактические значения подчиняются нормальному закону распределения.

Третья глава посвящена исследованию факторов, описанию механизма и причин возникновения негативных автоколебаний в рабочих клетях станов холодной прокатки. Выполнено численное моделирование процесса прокатки в условиях вибраций рабочих валков и исследование их влияния на возникновение дефектов поверхности полос. Предложены методы идентификации резонансных вибраций, основанные на статистическом анализе распределений технологических параметров. Предложен способ электромагнитного демпфирования нагрузочных и крутильных колебаний в линии главного привода, основанный на принципе активного гашения колебаний посредством наложения одинаковых сигналов с противоположным знаком.

Четвертая глава содержит описание разработанной методологии и инструментов проектирования технологических режимов холодной прокатки, обеспечивающих стабильное протекание процесса и его минимальную энергоемкость.

В *пятой главе* представлены результаты апробации в промышленных и лабораторных условиях предложенных в диссертации практически значимых решений, направленных на стабилизацию процессов прокатки, на повышение их энергоэффективности и улучшение качества продукции.

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.

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.

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.

Работа выполнялась в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении

науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) в период с 2010 г. по 2021 г.

Экспериментальные исследования проводились на Череповецком металлургическом комбинате ПАО «Северсталь» (г. Череповец, Россия).

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.

Глава 1. Современное состояние вопросов теоретического обоснования и повышения эффективности процесса тонколистовой прокатки

1.1 Проблемы теоретического обоснования процесса тонколистовой прокатки

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 твердого деформируемого тела.

Положения теории прокатки основаны на детерминистском подходе и до настоящего времени являются фундаментом для создания математических моделей процессов прокатки [30–44]. 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 новых условиях к существенным ошибкам при выполнении технологических и конструкторских расчетов непрерывных широкополосных станов, и, как следствие, к неоправданным потерям энергии, повышенным эксплуатационным расходам, снижению 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. Все перечисленное приводит к снижению производительности, повышенному расходу валков, ухудшению показателей точности и плоскостности прокатываемых полос. Разработка технических решений по повышению стабильности процесса холодной прокатки возможна на основе развития теории упругопластического деформирования тонких полос в условиях нестационарного динамического нагружения и проведения 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 проблем листопрокатного производства.

Моделирование нестационарных динамических процессов, возникающих при непрерывной холодной прокатке, является весьма сложной задачей, поэтому в технической литературе освещаются только ее отдельные аспекты.

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 [45]. 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 [46–55]. Исследования динамики машин опирались на классическую теорию колебаний, развитую в трудах А.Н. Крылова и Н.Е. Жуковского [56, 57].

С.Н. Кожевниковым была обозначена актуальность исследования нестационарных процессов в прокатном производстве, связанная с тем, что:

- динамические нагрузки в приводах прокатных станов оказывают существенное влияние на их надёжность и долговечность;

- в ряде случаев величины динамических нагрузок в 5–8 раз превышают необходимые для реализации технологической операции статические нагрузки и ограничивают возможности интенсификации режимов прокатки.

Оценку величин нагрузок можно выполнить путем проведения натурных экспериментов на действующем оборудовании, что чаще всего приводит к увеличению трудоемкости исследований и риску возникновения аварий. Однако значительную часть исследований можно выполнять с применением адекватных математических моделей электромеханических систем приводов, построенных с учетом фактических исходных параметров (внешних нагрузок и характера их приложения, типа электродвигателя, реакции двигателя на возмущение, системы автоматического управления электроприводом).

Например, информацию о величине и характере нарастания момента сил технологического сопротивления, действующего на прокатные валки, можно получить экспериментальным или расчетным путем с учетом начальных условий (температура металла, сопротивление деформации, форма передней кромки прокатываемой полосы и ее расположение относительно валков в момент захвата, скорость подхода металла к валкам). В случаях, когда не удастся достоверно определить зависимость изменения момента сил технологического сопротивления при захвате от угла поворота валков указанными способами, исследования выполняют на модели, в результате

получают данные о степени влияния этого параметра на динамику линии привода и формируют наиболее приемлемые зависимости.

Таким способом специалистами Института черной металлургии НАН Украины д.т.н., проф. В.И. Большаковым и др. было обнаружено, описано и экспериментально подтверждено увеличение момента сил сопротивления во время захвата валками тонких холодных полос, связанное со значительной деформацией прокатной клетки и увеличением, вследствие этого, плеча момента при захвате [55].

Величина динамических нагрузок существенно зависит от характера нагружения системы. Главная линия прокатного стана нагружается моментом прокатки и электромагнитным моментом двигателя. Поэтому при теоретическом определении нагрузок целесообразно рассматривать электромеханическую систему [53]. В некоторых случаях необходимо учитывать влияние системы автоматического управления электроприводом.

К числу современных научных исследований, проведенных в последние 15 лет и направленных на изучение динамических нагрузок и диагностирование вибраций в листопрокатном производстве, следует отнести работы д.т.н. В.В. Веренева [58–61]. Автором проделан огромный объем работы по сбору и анализу нестационарных режимов работы прокатных станов на всем пространстве бывшего Советского Союза. Автор отмечает, что в наиболее тяжелых динамических условиях работает система главного привода прокатной клетки, моменты инерции и жесткости которой, а также характер нагрузки, могут существенно влиять на стабильность технологического процесса.

Вопросам изучения электромеханической системы главных приводов прокатных станов была посвящена работа В.В. Смирнова и Р.А. Яковлева [62]. Авторами на примере клетки дуо 160 исследована механика изменения зазоров в приводных линиях прокатных станов, рассмотрен процесс прокатки с учетом упругости звеньев привода, разработаны мероприятия по снижению

динамических нагрузок путем применения дополнительных упругих и демпфирующих элементов.

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 [63], Р.Ш. Адамия [64, 65], С.Л. Коцаря [66] и др.

Значительная часть работ в области исследования динамических явлений связана с проектированием систем управления процессом листовой прокатки и разработкой моделей управления приводом прокатного стана [67–102], не позволяющих прогнозировать напряжения, деформации и нагрузки в прокатных клетях, исследовать энергоэффективность и потери электроэнергии. В работах [103–107] затронуты вопросы математического описания электромеханической системы клетки прокатного стана для исследования динамических нагрузок электропривода без учета влияния контактного взаимодействия между полосой и валками.

Вследствие многофакторности процесса, сложной взаимозависимости электромеханических систем клеток непрерывного стана холодной прокатки, дальнейшее комплексное развитие технологии тонколистовой прокатки невозможно без разработки модели процесса холодной прокатки, учитывающей его динамичность и нестационарность.

1.2 Анализ известных технических и технологических решений по устранению вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки

Технологический процесс прокатки в виду его нестационарности и неустойчивости не является детерминированным, последующее состояние параметров процесса прокатки может быть описано и/или предсказано величинами, носящими случайный характер. В связи с этим технологический процесс прокатки и работа его систем, электромеханических,

автоматизированных и автоматических носит стохастический (случайный) характер.

Из анализа рисунков 1.1.–1.3 видно, что колебания рассматриваемых динамических систем при постоянной скорости носят незатухающий характер, имеют определенную амплитуду, и соответственно определяются свойствами самой системы. Данное поведение системы соответствует понятиям «автоколебательная система и автоколебания», введенных академиком А.А. Андроновым и А.А. Витте [108–110], являющихся основоположниками теории нелинейных колебаний в 30–50-е годы XX века под руководством профессора Л.И Мандельштама.

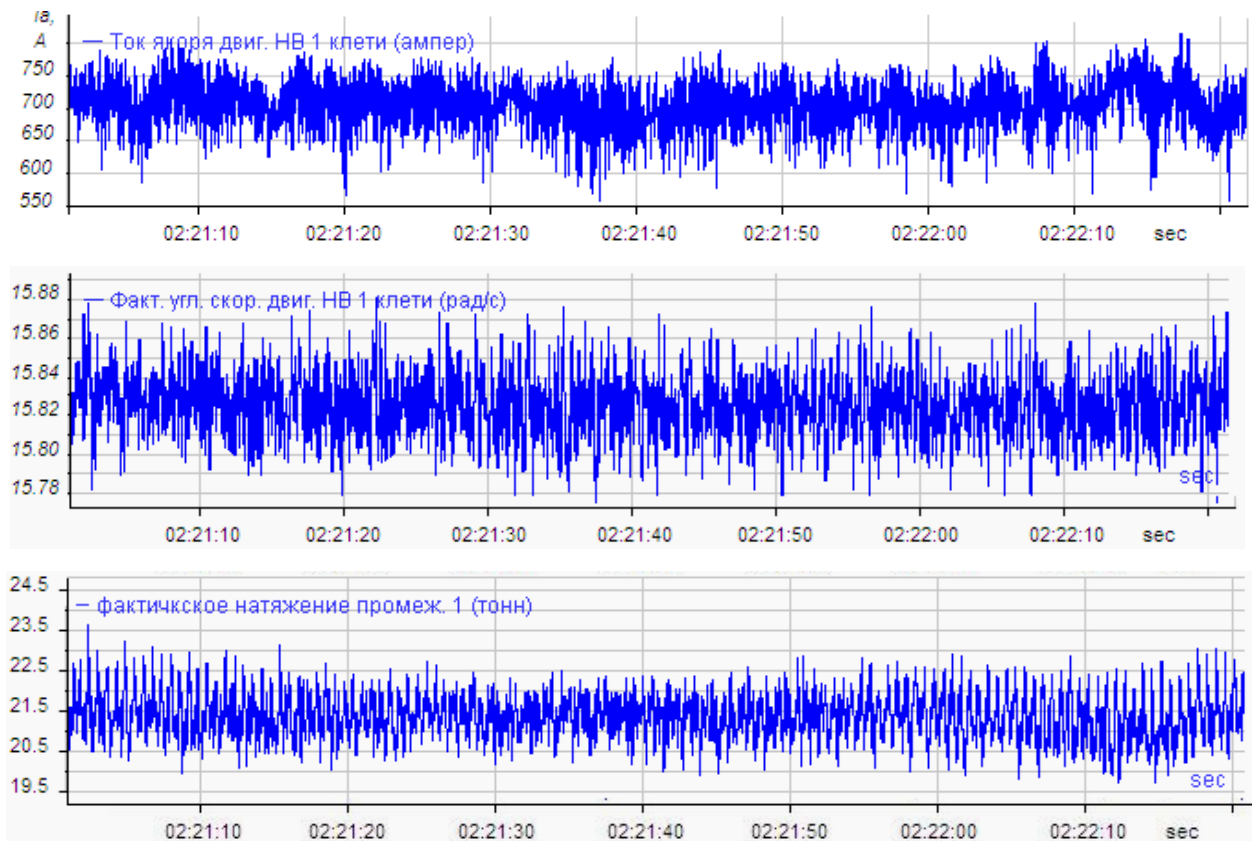


Рисунок 1.1 – Диаграммы значений токов якоря, угловой скорости двигателя и натяжения полосы

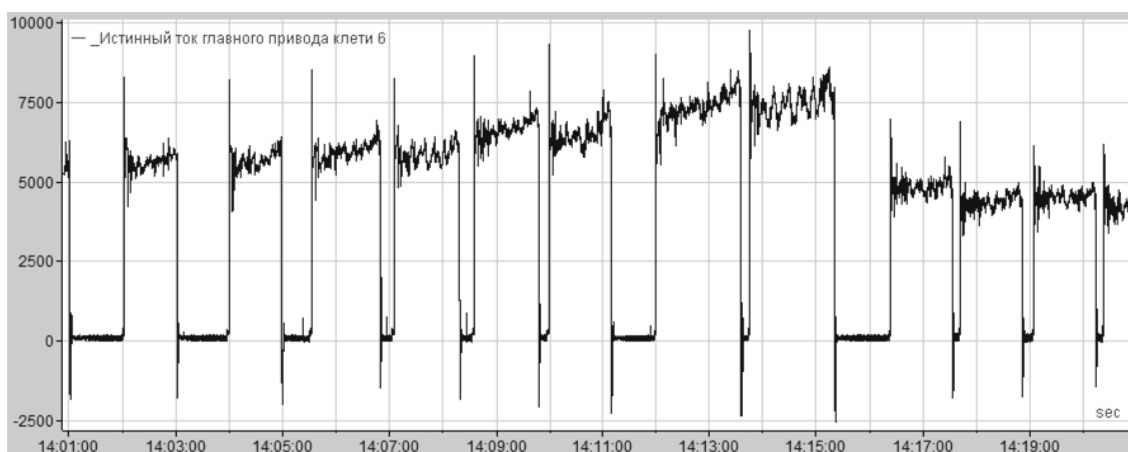


Рисунок 1.2 – Диаграммы колебаний тока якоря двигателя главного привода рабочей клетки непрерывного широкополосного стана

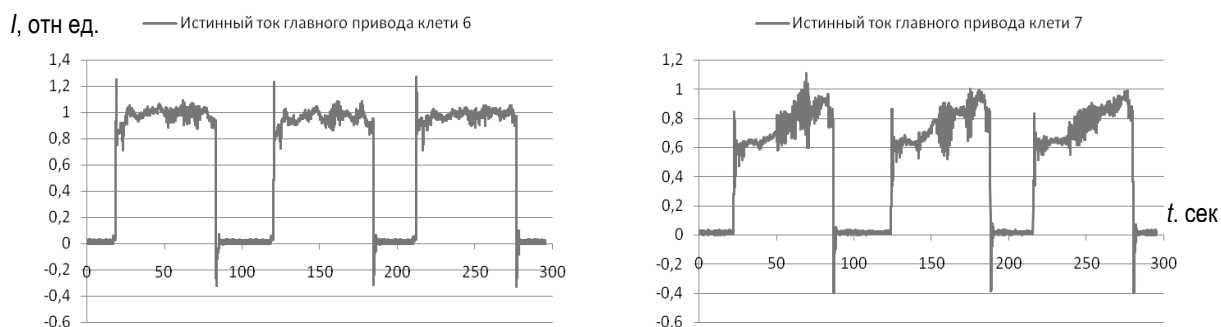


Рисунок 1.3 – Изменения токов якоря 6-й и 7-й клеток чистовой группы стана 2000 ЧерМК ПАО «Северсталь» при постоянной скорости прокатки и при динамических режимах работы

1.2.1 Обзор публикаций, посвященных проблеме вибраций на листовых прокатных станах

Стохастический характер технологического процесса и наличие автоколебаний негативно влияют на работу технологического оборудования, в узлах рабочих валков клеток прокатного стана возникают вибрации, нередко переходящие в опасную резонансную фазу, по сути, переводя стан в аварийный режим работы. Возникают вибрации, как правило, в динамическом режиме при переходе на повышенную скорость прокатки,

снижая тем самым не только производительность, но и приводя к ухудшению качества поверхности металла [111–127].

Данная проблема актуальна не только для отечественных, но и для зарубежных станов холодной прокатки, вибрации в которых получили название «*chatter*» – «дребезжание, гудение» [111, 112, 114, 116, 120–125]. Явлением «*chatter*» занимаются специалисты в области прокатного производства уже более 30 лет, однако до настоящего времени проблема устранения резонансных вибраций не только не решена, но и отсутствует теория, объективно объясняющая причину их возникновения.

Проектные скорости на современных станах холодной прокатки, выпускающих автомобильный лист, составляют 25–30 м/с. Фактически эти станы работают на существенно меньших скоростях, что приводит к снижению их производительности.

Возникновение колебательных процессов, приводящих к вибрациям, отмечено на крупных отечественных и зарубежных станах холодной прокатки и дрессировки. Иранскими специалистами металлургической компании *Mobarakeh Steel Company* вибрационные процессы отмечены на 2-клетевом реверсивном стане холодной прокатки. Их возникновение авторы связывают с нарушением условий трения и смазки в очаге деформации, решение проблемы планируется выполнить на основе моделирования процесса прокатки с использованием численных методов [120–123]. На 5-клетевом стане 2500 Магнитогорского металлургического комбината резонансные вибрации возникали в клетке № 4 при прокатке жести толщиной 0,22–0,32 мм на скоростях 7,5–11,5 м/с [128, 129]. На 5-клетевом стане 2030 Новолипецкого металлургического комбината при производстве тонких (менее 1,0 мм) полос на скоростях свыше 15–18 м/с, возникали нарушения устойчивости процесса прокатки, сопровождаемые возбуждением нарастающих вибраций различных элементов стана [130, 131]. На 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь» вибрации возникали при прокатке холоднокатаных полос толщиной 0,3–0,5 мм при скоростях прокатки 10–15

м/с [132]. На 5-клетевом стане холодной прокатки (штат Онтарио, Канада) [20] вибрации появлялись при скорости 12,7 м/с. Первоначально они возникали на полосе в межклетевом промежутке, особенно при прокатке тонких полос, распространялись и усиливались от входной к выходной стороне стана. Это сдерживало освоение максимальной скорости прокатки (25,4 м/с). На 2-клетевом прокатно-дрессировочном стане 1700 КарМК отмечены повышенные вибрационные процессы и возникновение поверхностных дефектов полосы на скоростях свыше 25 м/с [133].

В работе [20] американским специалистом М. Марквортом приведены следующие причины возникновения вибраций в рабочей клети:

- самовозбуждение колебаний, когда их частота совпадает с собственной частотой колебаний узлов оборудования;
- внешние источники вибраций: колебания натяжения, толщины и механических свойств полосы, дефекты поверхности валков, их эксцентриситет, дефекты и зазоры в подшипниках валков, изменение коэффициента трения за счет температурной нестабильности смазки и другие.

Опыт эксплуатации полосовых станов и результаты исследований показывают, что вибрационные процессы возникают не только на станах холодной, но и на листовых горячей прокатки, как в переходных режимах работы (разгон, торможение), так и при постоянной скорости прокатки [119]. Кроме того, чем тоньше полоса и выше скорость прокатки, тем чаще они возникают; нестабильная работа систем смазки, также увеличивает склонность к вибрациям.

Для борьбы с вибрациями применяют методы конструктивного характера, например, изменение динамических свойств клети путем введения демпфирующих устройств или активных элементов, и организационно-технологического направления – регламентация режимов прокатки, подача дополнительной технологической смазки.

Однако аргументированная теория, убедительно объясняющая причины возникновения колебательных процессов и позволяющая разработать эффективные рекомендации по их устранению, в литературе отсутствует.

1.2.2 Анализ существующих путей решения проблемы вибраций в листовых прокатных станах

Рассмотрим ряд теорий, описывающих природу зарождения и пути устранения колебательных процессов при прокатке.

Теория температурной неустойчивости смазки. На 5-клетевом стане 2030 НЛМК при прокатке энергоемких типоразмеров полос на скоростях свыше 15 м/с в клети № 4 (в редких случаях в клетях №№ 2, 3) возникают повышенные вибрационные процессы. По этой проблеме опубликован ряд материалов [113, 130, 131], в которых предложены теория зарождения и развития колебаний и меры по их устранению.

Сущность теории [113].

Процесс возникновения и развития колебаний возрастающей амплитуды в рабочей клети имеет спонтанный характер и происходит медленно под действием переменного усилия прокатки. Причины изменения усилия состоят в следующем. При прокатке по мере разогрева валков контактная температура в одной из клеток достигает критического (175–200 °С) уровня. При этом условия трения ухудшаются из-за термического разложения органических компонентов смазки, усилие прокатки скачкообразно возрастает, вызывая дополнительный прирост температуры и перемещение валков. В ходе изменения межвалкового зазора и обжатия температура быстро снижается, причем вновь достигает критического уровня прежде, чем валки займут новое положение равновесия. В этот момент изменение усилия от трения, вызвавшее перемещение валков, скачкообразно исчезает и через некоторое время валки начинают обратное движение к исходному положению. Однако в момент, когда исходное положение достигается, валки

обладают некоторой скоростью; таким образом, имеет место приток энергии в колебательную систему, то есть формируется механизм автоколебаний.

Согласно этой теории была разработана математическая модель автоколебаний, включающая в себя четыре компонента.

1. Модель движения валков под действием переменного усилия прокатки:

$$m_B \frac{d^2 S}{d\tau^2} + C_D \frac{dS}{d\tau} + M_K S = \delta P(\Delta H_1, \Delta \mu), \quad (1.1)$$

где m_B – масса узла «валки с подушками»; C_D – коэффициент, учитывающий демпфирующие свойства очага деформации; M_K – модуль жесткости клетки; S – смещение валков относительно исходного положения; τ – время; $\delta P(\Delta H_1, \Delta \mu) = (P - P^*)$ – отклонение усилия прокатки P от исходного P^* в функции отклонения выходной толщины ΔH_1 и коэффициента трения $\Delta \mu$.

2. Модель зависимости усилия прокатки от положения валков и условий трения:

$$\delta P(\Delta H_1, \Delta \mu) = \Delta H_1 \frac{dP}{dH_1} + \Delta \mu \frac{dP}{d\mu}, \quad (1.2)$$

где dP/dH_1 и $dP/d\mu$ – частные производные от усилия по входной толщине и коэффициенту трения.

3. Тепловая модель процесса прокатки, описывающая зависимость контактной температуры T_K от обжатия и условий трения:

$$T_K = T_K^* + \Delta H_1 \frac{dT_K}{dH_1} + \Delta \mu \frac{dT_K}{d\mu}, \quad (1.3)$$

где T_K^* – температура в критическом сечении при исходном положении валков.

4. Модель зависимости условий трения от контактной температуры:

$$\Delta \mu = \begin{cases} 0, & \text{при } T_K < [T_K]; \\ \Delta \mu^*, & \text{при } T_K \geq [T_K], \end{cases} \quad (1.4)$$

где $[T_K]$ – критическая температура, при повышении которой коэффициент трения возрастает на величину $\Delta\mu^*$.

С помощью моделей и выражений (1.1)–(1.4) анализировались реальные технологические ситуации, наблюдаемые на стане 2030 при вибрациях. В результате сделан вывод о том, что в широком диапазоне условий, существующих на непрерывных станах при высоких скоростях прокатки, условия возбуждения автоколебаний выполняются практически всегда.

На стане были проведены экспериментальные исследования [130, 131]. С помощью виброметра ВМ-1 и пьезоэлектрических виброизмерительных преобразователей ДН-3 измеряли механические колебания в средней части станин клетей (со стороны обслуживания). Основной пик в спектре вибраций при «гудении» клетки находится на частоте 118–119 Гц. Внешне вибрации напоминали «биения», возникающие при наложении двух колебаний с близкими частотами.

При теоретической оценке собственных частот станины в сборе с валковым узлом получены следующие результаты: вертикальным колебаниям растяжения-сжатия стоек станины с валковым узлом и перекладиной соответствует частота 105–130 Гц, а изгибным колебаниям валкового узла 560–600 Гц.

На основе экспериментальных исследований и результатов моделирования процесса была разработана автоматическая система диагностирования вибраций и управления скоростным режимом прокатки. Функциями системы являлись: непрерывный контроль процесса прокатки; анализ амплитудно-частотного состава действующих возмущений; выявление предаварийных ситуаций; уменьшение скорости прокатки до безопасного уровня, гарантирующего устойчивость процесса и высокое качество полосы.

Рассмотренная теория обладает рядом недостатков.

1. Авторы указывают, что процесс возникновения и развития вибраций имеет спонтанный характер и происходит медленно.

Однако из практики известно, что вибрации развиваются моментально при нарушении устойчивости процесса прокатки и имеют, как и все колебательные процессы, источник возбуждения, который можно определить.

2. В процессе прокатки любых типоразмеров полос усилие постоянно изменяется во всех клетях, уровень колебаний его значений достигает 10 %. Согласно рассмотренной теории, причина возникновения повышенных вибраций – переменное усилие прокатки, однако в работах отсутствуют данные об опасном диапазоне изменения этого параметра, следовательно, любой процесс прокатки должен сопровождаться этим негативным явлением.

3. В процессе прокатки происходит износ поверхности бочек рабочих валков, их шероховатость снижается до 0,01 мкм, что приводит к существенному снижению коэффициента трения в очаге деформации. Авторами этот факт никак не проанализирован и не учтен при разработке модели.

4. Говоря о возникновении вибраций, как о возможном совпадении колебаний двух близких частот, авторы не приводят ни теоретических предположений, ни экспериментальных данных о возможных резонирующих узлах рабочей клетки.

Собственные частоты определены теоретически и только у станины в сборе с валковым узлом.

5. Авторами указано, что прогнозировать поведение стана в каждой конкретной ситуации (при различных режимах прокатки) весьма трудно.

6. Для осуществления контроля за развитием вибраций необходимо постоянно осуществлять контроль рабочей жидкости (эмульсии) в рабочей клетки, что в реальных условиях сделать невозможно.

7. Представленная теория не позволяет предупреждать возникновение вибраций, например, путем оптимизации технологических режимов, и устранять их без потери производительности, в данном случае использован

традиционный метод – снижение скорости прокатки, что неприемлемо в современных условиях производства.

В рамках развития данного направления исследований авторами работы [135] высказана гипотеза, что причиной возникновения вибраций клетей станов холодной прокатки является кавитация и разрушение смазочно-охлаждающей жидкости, однако у данной гипотезы отсутствуют промышленно подтвержденные результаты.

Создание модели колебания полосы. Авторы работы [136] берут за источник возникновения вибраций саму полосу (ее колебания) и объясняют это следующим образом.

Если в первых межклетевых промежутках станов холодной прокатки обеспечивается высокий уровень растягивающих напряжений, приближающихся к пределу текучести, что совместно с давлением валков обеспечивает требуемую вытяжку, то в последнем межклетевом промежутке с учетом нагартовки полосы ее напряженное состояние весьма близко к упругому. В этом случае растянутая полоса уподобляется стержню, в котором могут протекать волновые процессы в виде продольных колебаний.

Механизм возникновения колебаний полосы заложен в непостоянстве силы трения между валками и полосой, что провоцирует периодический «захват» полосы валками и «срыв» тянущей силы. Причина такого поведения может быть обусловлена многими факторами. Прежде всего, это вибрация валковой системы, вызываемая «естественной» работой подшипников качения, особенно в тот период времени, когда они имеют некоторый износ. При возможных осевых (поперечных) перемещениях валков приводит к снижению коэффициента трения в продольном направлении, то есть к изменению силы, тянущей полосу. Свой вклад могут вносить колебательные процессы в гидронажимной системе и системе регулирования натяжения полосы.

Наблюдается широкий диапазон частот колебаний, который воздействует на полосу. Определенные частоты колебаний могут совпасть с

собственными частотами продольных колебаний полосы, заключенной в межклетевом промежутке, то есть привести к явлению резонанса.

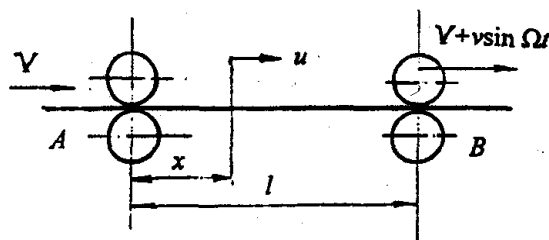
В этом случае его проявлением служит возбуждение поперечных колебаний полосы, приводящее к ее ударам по проводкам. Однако самое существенное заключается в возникновении периодического «проскальзывания» полосы в валках, которое проявляется в виде «полосчатости» внешней поверхности листового холоднокатаного проката, так называемой «ребристости» [137–141].

Для математического анализа этих явлений рассмотрены продольные колебания стержня, один конец которого закреплен, а второй – имеет колебательное движение (рис. 1.4).

Дифференциальное уравнение волновых колебаний полосы:

$$\frac{d^2u}{dx^2} - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{d^2u}{dt^2} = 0, \quad (1.5)$$

где u – смещение элемента полосы, расположенного на расстоянии x от начала координат; a – скорость распространения ударной волны в материале полосы.



v – средняя скорость прокатки; l – расстояние между клетями

Рисунок 1.4 – Расчетная схема

Граничные условия: $a = \frac{du}{dt} = 0$ при $x=0$, $\frac{du}{dt} = v \cdot \sin \Omega \cdot t$ при $x=l$,

где v – амплитуда относительной скорости колебательного движения; Ω – частота колебаний.

Начальные условия при $t=0$ принимаются нулевыми.

Решение уравнения (1.5) выглядит следующим образом:

$$u = \frac{vx}{\Omega l} - \frac{v}{\Omega} \frac{\sin \frac{\Omega x}{a} \cos \Omega t}{\sin \frac{\Omega l}{a}} + \frac{2v}{\Omega} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin \frac{\pi n x}{l} \cos \frac{\pi a n t}{l}}{\pi n \left(1 - \frac{\pi^2 a^2 n^2}{\Omega^2 l^2} \right)}.$$

Напряжения в полосе $\sigma = E \frac{du}{dx}$, где E – модуль упругости.

$$\text{Тогда } \sigma = E \left[\frac{v}{\Omega l} - \frac{v}{a} \frac{\cos \frac{\Omega x}{a} \cos \Omega t}{\sin \frac{\Omega l}{a}} + \frac{2v}{\Omega l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cos \frac{\pi n x}{l} \cos \frac{\pi a n t}{l}}{1 - \frac{\pi^2 a^2 n^2}{\Omega^2 l^2}} \right].$$

В случае, когда $\pi a n / \Omega l = 1$, возникают резонансные колебания.

Теоретически определено, что основная частота колебаний полосы составляет 3000 Гц.

Предложен ряд способов по устранению «проскальзывания»:

- повысить силу прокатки в последней клетке или в предыдущей;
- увеличить натяжение, создаваемое моталкой;
- принять меры по уменьшению осевого биения валков, влияющего на изменение коэффициента трения при прокатке.

Основной недостаток теории – отсутствие информации о ее практическом применении или алгоритме реализации, исследовании колебаний полосы на станах.

Кроме этого, не совсем понятно, как связана расчетная частота колебаний полосы 3000 Гц с частотой резонансной вибрации, составляющей, согласно различным источникам, 100–150 Гц.

Непонятна связь «срыва» тянущих сил (колебания натяжений), действующих в горизонтальном направлении, с возникновением осевого биения валков.

Модели, описывающие крутильные колебания линии привода. Авторы статьи [142] одной из причин возникновения резонансных вибраций называют колебания, возникающие в приводе клетки стана.

Известно, что регулирование скорости и приводного момента вращения каждого электродвигателя с целью их синхронизации производится

электрическими схемами. Из-за запаздывания отработки системой управления сигнала о нарушении синхронности вращения, отклонений в каждый момент времени переднего и заднего натяжений полосы, изменений в величине сил трения в очаге деформации для верхнего и нижнего валка в упругих элементах линии привода могут возникать крутильные колебания.

Крутильные колебания в линии привода, включающей шпиндели и муфты, вызывают некоторые малые взаимные повороты рабочих валков относительно друг друга, а также относительно массивных опорных.

Эти периодические малые повороты становятся причиной линейных смещений, приводящих к силовым воздействиям через опорные подшипники и подушки на станины клетей. Таким образом, создается вибрационная картина, наблюдаемая при некоторых режимах на станах холодной прокатки.

Ниже представлен предложенный авторами данной теории приближенный метод определения частот колебаний системы привода.

Расчетная модель динамики привода показана на рисунке 1.5.

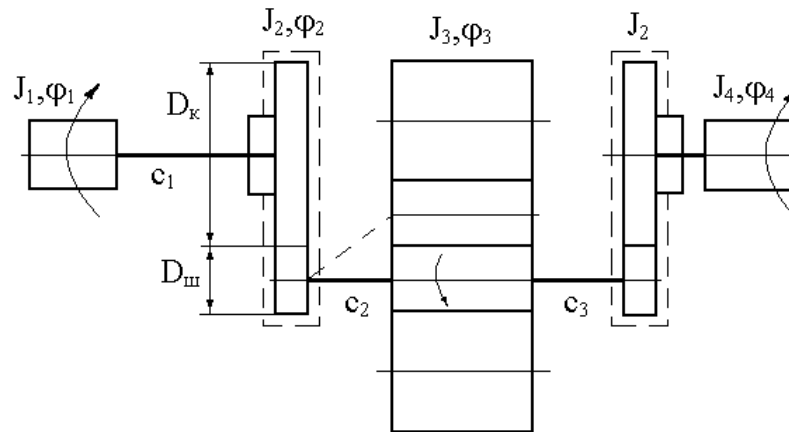


Рисунок 1.5 – Расчетная модель механической части привода

При одинаковых конструктивных размерах жесткости на кручение у шпинделей $c_2 = c_3$.

$c_i = \frac{G_0 J_0}{l}$; где c_i – жесткость шпинделя на кручение; G_0 – модуль сдвига;

J_0 – геометрический момент сечения шпинделя $J_0 \approx 0,1 \cdot d^4$; где d – диаметр шпинделя, м; l – длина шпинделя, м.

$J_1=J_4$ – моменты инерции роторов электродвигателей; J_2 – приведенный момент инерции ведущего колеса шестерни редуктора и муфты предельного момента; J_3 – приведенный момент инерции валковой системы с шпиндельными муфтами; $\varphi_1 \dots \varphi_4$ – углы поворота соответствующих инерционных масс. Считаются положительными повороты по часовой стрелке.

$D_k, D_{ш}$ – диаметры делительных окружностей колеса и шестерни редуктора; c_1 – жесткость на кручение провала; $c_2=c_3$ – жесткость на кручение шпинделей.

При отсутствии проскальзывания между рабочими и опорными валками

$$J_3 = 2 \left(J_{вр} + J_{во} \frac{D_p^2}{D_o^2} \right);$$

где $J_{вр}$ – момент инерции рабочего валка, $J_{во}$ – момент инерции опорного валка, D_p, D_o – диаметры рабочего и опорного валка соответственно, м.

Поскольку скорости вращения масс роторов двигателей J_1 и J_4 и непосредственно соединенных с ними узлами превосходят скорость вращения рабочих валков в отношении $D_k/D_{ш}$, необходимо выполнить приведение моментов инерции по известному соотношению $J_{np} = J \left(\frac{D_{ш}}{D_k} \right)^2$.

Соответственно жесткость промежуточного вала приводится аналогично

$$c_{np} = c_1 \left(\frac{D_{ш}}{D_k} \right)^2.$$

Система дифференциальных уравнений свободных колебаний системы имеет следующий вид [143]:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 + c_1(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 - c_1(\varphi_1 - \varphi_2) + c_2(\varphi_2 - \varphi_3) = 0 \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 - c_2(\varphi_2 - \varphi_3) + c_3(\varphi_3 - \varphi_4) = 0 \\ J_4 \ddot{\varphi}_4 - c_3(\varphi_3 - \varphi_4) = 0 \end{cases}$$

Достоверность данной модели можно легко проверить, сравнив расчетные значения угловых частот колебаний привода с частотами колебаний привода замеренными экспериментально, однако авторы в своей работе эти данные не приводят.

Следует отметить, что в расчете не учитывается влияние трения, которое может влиять на частотные характеристики, поэтому фактические измеренные частоты могут значительно отличаться от расчетных.

Модель определения критической скорости прокатки. По мнению авторов работы [144], резонансные колебания в рабочих клетях возникают при совпадении частоты, возбуждающей колебания, с одной из частот собственных колебаний системы.

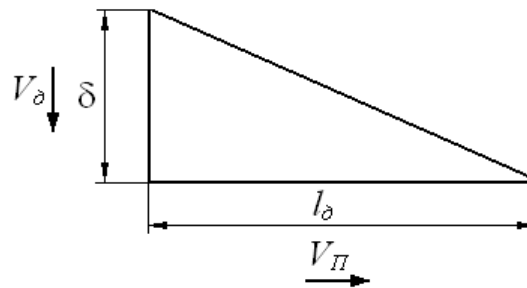
При движении полосы со скоростью V_{Π} возмущение перемещается вдоль горизонтальной проекции очага деформации за время $\frac{l_{\partial}}{V_{\Pi}}$, где l_{∂} – длина очага деформации, мм. Время, в течение которого подвижная масса перемещается из равновесного состояния в крайнее, составляет $\frac{\pi}{2\omega}$, где ω – частота вертикальных колебаний валковой системы в клети стана. Во избежание возникновения резонанса частот при подходе к зоне резонанса со стороны более низких частот необходимо, чтобы $\frac{l_{\partial}}{V_{\Pi}} > \frac{\pi}{2\omega}$.

Таким образом, условие отсутствия недопустимых колебаний при прокатке и обеспечения до резонансного режима запишется в виде $V_{\Pi} < \frac{2}{\pi} \omega l_{\partial}$, где ω – собственная частота колебаний валковой системы в клети стана.

Такое же выражение можно получить из условия, что возможные вертикальные скорости деформации в зоне очага деформации должны быть

меньше возможной средней скорости колебательного движения валковой системы.

Из соотношения между скоростью деформации и скоростью полосы (рис. 1.6) получается $V_{\delta} = -V_{\Pi} \frac{\delta}{l_{\delta}}$, где δ – величина обжатия на длине очага деформации, мм.



l_{δ} – длина очага деформации; δ – величина обжатия; V_{Π} – скорость прокатки;
 V_{δ} – скорость деформации

Рисунок 1.6 – Линеаризованная схема очага деформации

Скорость движения массы, амплитуда колебаний которой $y = \delta(\cos \omega t)$
 $V = -\delta \omega \cdot \sin \omega t$, где ω – угловая частота колебаний валковой системы.

За период $t = \frac{\pi}{2}$ средняя скорость

$$V_{cp} = \frac{-\delta \omega \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \omega t dt}{\pi/2}, \quad V_{cp} = \frac{-\delta \omega}{\pi/2}.$$

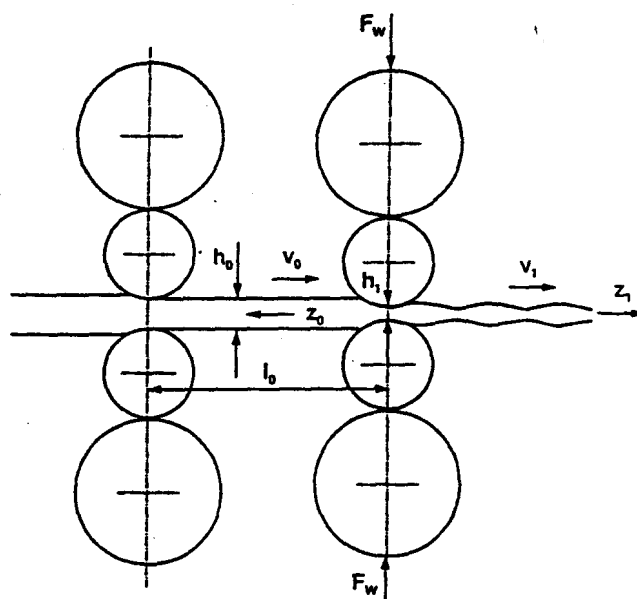
Чтобы не происходил «отрыв» инструмента от «возмущения», имеющегося на полосе, надо, чтобы $V_{cp} > V_{\delta}$.

Следовательно $V_{\Pi} \frac{\delta}{l_{\delta}} < \frac{\delta \omega}{\pi/2}$; $V_{\Pi} < \frac{2}{\pi} \omega l_{\delta}$, мм/с.

В данной работе при определении критической скорости прокатки, при которой возможно возникновение явления резонанса в рабочих клетях, не были учтены потери на трение, а также влияние переднего и заднего натяжений, что может влиять на достоверность математической модели.

Также предположение авторов о совпадении частоты резонанса клетки с одной из собственных частот колебательной системы нуждается в экспериментальной проверке.

Создание модели клетки как колебательной системы. В работе немецких специалистов [17], вибрации представлены как вертикальные колебания клетки, при которых верхний и нижний рабочие валки движутся в противофазе (рис. 1.7). Полоса, проходящая через межвалковый зазор, ведет себя как слабо демпфированная пружина. В результате изменений межвалкового зазора возникают растягивающие колебания входящей полосы, что в свою очередь вызывает колебания клетки. Возникающая на поверхности полосы ребристость ухудшает ее качество и часто приводит к неприемлемым дефектам толщины. Кроме того, при появлении вибраций приходится, как правило, снижать скорость прокатки, чтобы стабилизировать процесс. Производительность стана при этом ограничивается.



F_w – усилие прокатки; h_0, h_1 – толщина полосы на входе и выходе; V_0, V_1 – скорость полосы на входе и выходе; z_0, z_1 – натяжение полосы на входе и выходе; l_0 – расстояние между клетями

Рисунок 1.7 – Принципиальная схема вибрации в прокатной клетке с образованием ребристости на поверхности полосы

Для исследования поведения прокатного стана при появлении вибраций авторами предложена имитационная модель трехклетевого непрерывного стана вместе с разматывателем. Модель включает в себя не только клетки, но и главные приводы, поведение полосы и регулирование. Она позволяет изучить взаимодействие между клетями и воздействие на вибрацию отдельных факторов.

Для установления точной причины возникновения вибраций, исследования поведения клетки при различных рабочих состояниях и изучения стабильности ее работы достаточно иметь модель одной клетки.

Если наряду с массами валков учесть и массы верхних и нижних поперечных плоскостей станин, то получится колебательная система с шестью массами (рис. 1.8). При этом формируются пять значимых собственных (критических) частот и форм собственных колебаний клетки.

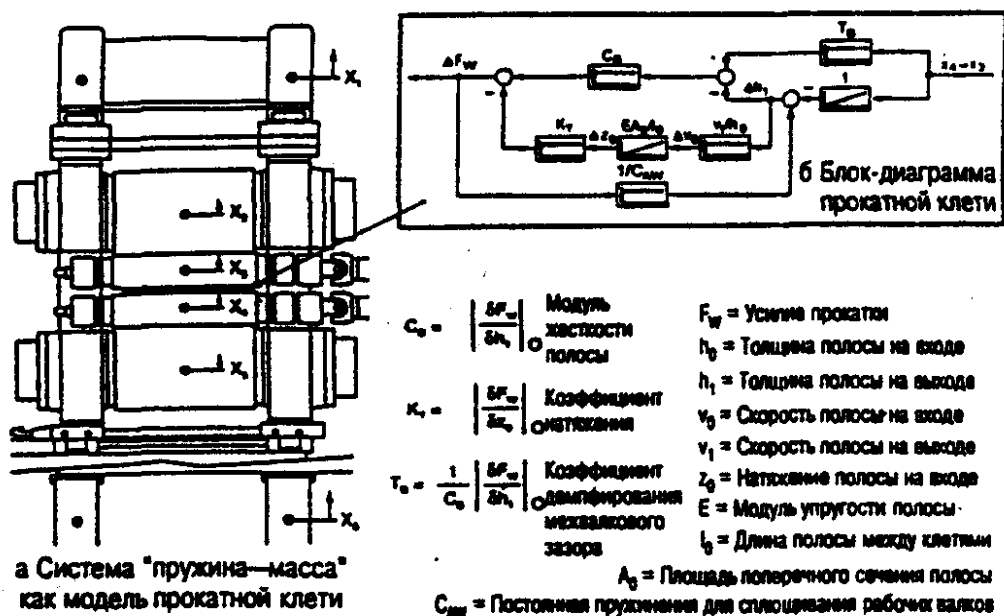


Рисунок 1.8 – Модель прокатной клетки

При этом представляют интерес только те формы колебаний, при которых рабочие валки движутся навстречу друг другу. В рассматриваемой установке это происходит при третьей критической частоте в 125 Гц, причем

колеблется преимущественно верхний комплект валков по отношению к нижнему. В клетях непрерывных станов такие колебания наблюдаются с частотами порядка 100–150 Гц.

Моделирование подтвердило тот факт, что при определенных рабочих параметрах, авторами не указано каких, система без какого-либо внешнего возбуждения из-за внутренней неустойчивости переходит в состояние вибраций.

Авторы указывают на успешный опыт устранения вибраций путем снижения скорости прокатки на 10 %, снижения заднего натяжения на 10 % и повышения коэффициента трения на 5 %.

Представленное объяснение проблемы вибраций может быть ее причиной не во всех ситуациях, наблюдаемых на практике. Опыт показал, что в большинстве случаев изложенный механизм хотя и действует, но условия удалены от границы неустойчивости. В таких случаях вибрация может быть вызвана также и внешним возбуждением (подшипниками качения, недостатками шлифования валков и т.д.). Поэтому в ряде случаев вибрации были успешно устранены мероприятиями, относящимися к подшипникам рабочих валков и к процессу их шлифования.

Данная модель позволяет установить причины возникновения вибраций и исследовать изменение технологических и конструктивных параметров прокатного стана в этой ситуации. Однако самими авторами отмечена невозможность разработки с помощью этой модели правила для расчета или выбора оптимальных для обеспечения устойчивости системы параметров эксплуатации.

Устранение вибраций происходит за счет снижения скорости прокатки, что неизбежно приводит к снижению производительности стана.

Как показал изложенный выше обзор, у специалистов, занимающихся поиском возможных причин зарождения и развития резонансных вибраций, отсутствует единый подход к решению данной проблемы.

При этом все модели описывают процесс вибраций, но не предлагают эффективных методов предотвращения.

Рассмотрение модели усилий, действующих на рабочие валки во время прокатки. Для определения режимов прокатки, исключая неустойчивое положение узла рабочих валков, необходимо проанализировать условия равновесия горизонтальных сил, действующих на рабочие валки и их опорные узлы. Расчетная схема силового взаимодействия полосы, рабочего и опорного валков в клети «кварто» представлена на рис. 1.9 [145–147].

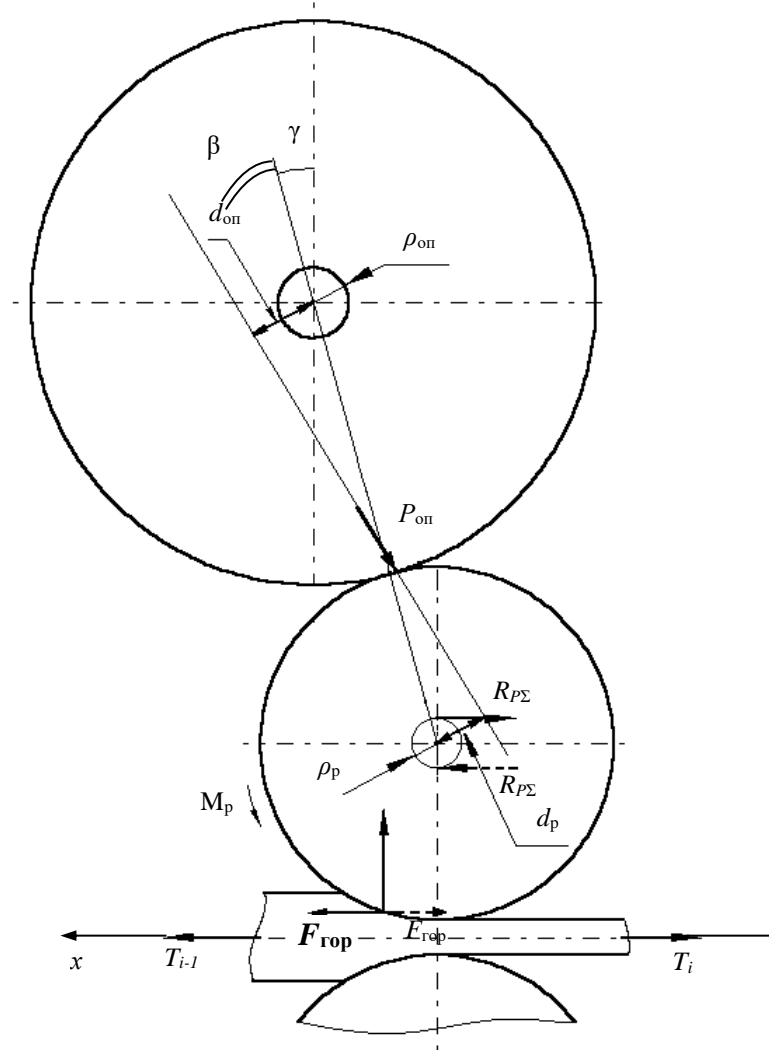
Согласно этой схеме, уравнение равновесия горизонтальных сил, действующих на рабочий валок в сборе с подушками, имеет вид (обозначения величин даны на рисунке) [148] $F_{ГОР} - P_{ОП} \cdot \sin(\beta + \gamma) + R_{Р\Sigma} = 0$, откуда сумма сил опорных реакций, действующих на подушки рабочего валка со стороны контактных плоскостей окна станины, $R_{Р\Sigma} = P_{ОП} \cdot \sin(\beta + \gamma) - F_{ГОР}$.

Согласно 3-му закону Ньютона, горизонтальная сила $F_{ГОР}$, действующая со стороны полосы на валок, равна по величине и противоположна по направлению горизонтальной силе $F_{ГОР.П}$, действующей со стороны валка на полосу, $F_{ГОР} = -F_{ГОР.П}$.

При стационарном процессе прокатки и отсутствии колебаний технологических параметров справедливо также уравнение равновесия горизонтальных сил, действующих на участок полосы, находящийся в валках

i -й рабочей клети, $\frac{\Delta T_i}{2} + F_{ГОР.П} = 0$, где $\Delta T_i = T_{i-1} - T_i$.

Как было сказано выше, реальный процесс прокатки в i -й рабочей клети непрерывного стана не является стационарным, так как происходят колебания натяжений полосы и частных обжатий, вызванные возмущающими воздействиями предыдущей $(i-1)$ -й клети, изменениями скорости прокатки при разгонах и торможениях, уменьшением шероховатости валков вследствие износа.



M_p – момент со стороны главного привода; $P_{оп}$ – межвалковая сила; $F_{гор}$ – горизонтальная сила в очаге деформации; $R_{p\Sigma}$ – сумма сил опорных реакций в подушках; P – вертикальная составляющая усилия прокатки; T_{i-1} , T_i – силы натяжения, действующие на полосу; d_{on} , d_p – плечи силы $P_{оп}$ относительно рабочего и опорного валков; ρ_{on} , ρ_p – радиусы кругов трения в подшипниках рабочего и опорного валков; γ – угол между вертикальной плоскостью и межосевой плоскостью валков; β – угол между направлением действия межвалкового усилия и плоскостью, проходящей через центры валков, при переменной скорости прокатки.

Рисунок 1.9 – Схема сил, действующих на приводной рабочий валок в i -й клетки «кварто» в общем случае при переменной скорости прокатки

Все эти факторы вызывают изменения коэффициента трения в очаге деформации, что, в свою очередь, приводит к колебаниям усилия прокатки и межвалковой силы, которая равна $P_{оп} = \frac{P}{\cos(\beta + \gamma)}$, а при стационарном процессе – $F_{гор} = \frac{\Delta T_i}{2}$.

Изменения коэффициента трения неизбежно сказываются на величинах горизонтальных сил в очаге деформации ($F_{гор.п}$, $F_{гор}$) и угла β между направлением действия силы $P_{оп}$ и плоскостью, проходящей через оси валков, (рис. 1.9). Этот угол равен $\beta = \arctg \left(\frac{\frac{M_{ин.оп}}{P} \cos \gamma + m + \rho_{оп}}{\frac{M_{ин.оп}}{P} \sin \gamma + R_{оп}} \right)$, где

$M_{ин.оп} = \frac{\pi L \gamma \cdot D_{оп}^4 \cdot \varepsilon_{оп}}{32}$ – момент инерции опорного валка, пропорциональный его угловому ускорению $\varepsilon_{оп}$, определяющему ускорение стана a_p ; m – плечо трения качения между рабочим и опорным валками; $D_{оп}$ – диаметр бочки опорного валка; L – длина бочки опорного валка (остальные величины объяснены на рис. 1.9).

Из выражений определения угла β и момента инерции опорного валка видно, что угол β изменяется не только из-за колебаний усилия прокатки, но и под воздействием углового ускорения $\varepsilon_{оп}$, пропорционального ускорению стана a_p .

Таким образом, все величины, определяющие суммарную силу опорных реакций на подушки рабочего валка $R_{p\Sigma}$, подвергаются колебаниям в процессе прокатки, вызывая колебания величины этой силы, являющиеся непосредственной причиной возникновения вибрационных процессов.

Для того чтобы валок сохранял устойчивое положение в горизонтальном направлении, необходимо, чтобы величина $R_{p\Sigma}$ сохраняла знак. Это означает, что подушки рабочего валка должны быть постоянно прижаты к передним или задним по ходу прокатки вертикальным плоскостям окна станины или подушек опорных валков. Выполнение этого условия зависит от

соотношения величин горизонтального усилия $F_{гор}$ и проекции межвалковой силы $P_{оп}$, являющихся функциями контактных напряжений в очаге деформации.

Таким образом, при формулировании условий, исключающих вибрации, должны быть рассмотрены варианты соотношений величин правой части выражения $R_{p\Sigma} = P_{оп} \cdot \sin(\beta + \gamma) - F_{гор}$.

Пример: $P_{оп} \cdot \sin(\beta + \gamma) > F_{гор}$.

Тогда, согласно выражению $R_{p\Sigma}$, условие исключения вибраций заключается в том, чтобы при всех возможных колебаниях технологических и энергосиловых параметров выполнялось неравенство $R_{p\Sigma} > 0$.

При выражении $P_{оп}$ через усилие прокатки, условие обеспечения устойчивого положения рабочих валков преобразуется к виду $R_{p\Sigma} = P \cdot \operatorname{tg}(\beta + \gamma) - F_{гор} > 0$.

Чтобы это условие выполнялось при всех возможных колебаниях параметров прокатки, необходимо, чтобы минимально возможная величина $P \cdot \operatorname{tg}(\beta + \gamma) = [P \cdot \operatorname{tg}(\beta + \gamma)]_{min}$ была больше максимально возможной величины $F_{гор} = F_{гор,max}$.

Для определения указанных величин введено понятие коэффициентов неустойчивости усилия прокатки k_P и межклетевых натяжений k_T , которые определяются следующим образом: $k_P = \frac{P_{max} - P}{P} = \frac{P - P_{min}}{P}$, где P_{max} и P_{min} –

максимальное и минимальное усилия прокатки (по данным реального технологического процесса), P – номинальное (расчетное) значение этого

усилия; $k_T = \frac{T_{i-1,max} - T_{i-1}}{T_{i-1}} = \frac{T_{i-1} - T_{i-1,min}}{T_{i-1}} = \frac{T_{i,max} - T_i}{T_i} = \frac{T_i - T_{i,min}}{T_i}$, где T_{i-1} , T_i –

номинальные значения сил заднего и переднего натяжений, заданные при настройке стана; $T_{i-1,max}$, $T_{i,max}$, $T_{i-1,min}$, $T_{i,min}$ – максимальные и минимальные

значения сил заднего и переднего натяжений, с учетом реальных колебаний натяжений, имеющих место на стане.

Значения фактических натяжений через номинальные натяжения и коэффициент нестабильности выражаются следующим образом:

$$T_{i-1max} = T_{i-1} \cdot (1 + k_T); T_{i-1min} = T_{i-1} \cdot (1 - k_T); T_{imax} = T_i \cdot (1 + k_T); T_{imin} = T_i \cdot (1 - k_T).$$

Откуда можно выразить минимально возможную разность натяжений полосы: $\Delta T_{imin} = T_{i-1min} - T_{imax} = T_{i-1}(1 - k_T) - T_i(1 + k_T)$, и максимально возможную разность натяжений: $\Delta T_{imax} = T_{i-1max} - T_{imin} = T_{i-1}(1 + k_T) - T_i(1 - k_T)$.

Для определения $[P \cdot tg(\beta + \gamma)]_{min}$ необходимо также учесть, что расчет усилия прокатки выполняют с погрешностью δ_P : $\delta_P = \left| \frac{P - P_{изм}}{P_{изм}} \right|$, где P и $P_{изм}$ – расчетное и измеренное значения усилия прокатки.

Тогда минимальное расчетное усилие прокатки, с учетом погрешности измерений, будет равно $P_{расч.min} = P(1 - \delta_P)$, а величина $[P \cdot tg(\beta + \gamma)]_{min}$, учитывающая нестабильность усилия прокатки будет равна $[P \cdot tg(\beta + \gamma)]_{min} = P(1 - \delta_P)(1 - k_P)tg(\beta + \gamma)$.

Максимально возможную величину горизонтальной силы $F_{гор.max}$, с учетом указанных выражений, можно представить в виде $F_{ГОР.max} = \frac{\Delta T_{imax}}{2} + \delta F_{ГОР}$, где ΔT_{imax} – максимальная разность натяжений, определяемая через номинальные значения натяжений, а $\delta F_{гор}$ – максимальное приращение горизонтальной силы, непосредственно не зависящее от колебания натяжений, происходящее из-за изменения контактных напряжений в очаге деформации $\delta F_{ГОР} = F_{ГОР.Ф} - F_{ГОР.Н}$, где $F_{гор.ф}$, $F_{гор.н}$ – величины горизонтальной силы при фактических (с учетом изменений) и номинальных параметрах (обжатии, скорости, натяжениях, шероховатости валков и т.д.).

В окончательном виде получено условие исключения вибраций в i -й рабочей клетки непрерывного стана [148]:

$$R_{p\Sigma min} = P \cdot (1 - \delta) \cdot (1 - k_p) \cdot tg(\beta_y + \gamma) - \frac{T_{i-1}(1 + k_T) - T_i(1 - k_T)}{2} - \delta F_{ГОР} > 0,$$

где $R_{p\Sigma min}$ – минимально возможная суммарная сила, действующая на подушки рабочего валка; $\delta F_{гор}$ – максимальное приращение горизонтальной силы $F_{гор}$.

Идентификация колебаний натяжений полосы в рабочих клетях непрерывных прокатных станов. Причины возникновения вибраций могут закладываться при проектировании прокатного оборудования и технологии, поскольку в процессе конструирования, разработки технологических процессов и алгоритмов работы систем АСУ ТП не предусматриваются вопросы проверки и оценки оборудования прокатных станов на виброустойчивость.

В работах [149, 150] выполнены исследования колебаний натяжения и параметров прокатки, при которых эти колебания возникают, с целью их правильного выявления – идентификации, то есть соотнесения колебаний натяжений с вибрационными процессами прокатного оборудования.

Исследования колебаний натяжений были продолжены на 5-клетевом стане 1700 холодной прокатки.

С помощью ЭВМ был обработан массив данных, содержащий колебания натяжения полосы и основные технологические параметры процесса прокатки. На рис. 1.10 показаны, в качестве примера, осциллограммы натяжения полосы между 3-й и 4-й клетями (рис. 1.10, а) и ее скоростей в 3-й и 4-й клетях (рис. 1.10, б).

Процесс колебаний натяжения полосы можно разделить на четыре стадии. Первая (стадия I) характеризуется зарождением колебаний и постоянством скорости прокатки. На второй (стадия II) продолжается нарастание амплитуды колебаний натяжения полосы, и на определенном уровне отклонения натяжения от заданного значения, система определения критических вибраций идентифицирует колебания натяжения полосы, на основании ее состояния скорость прокатки начинает понижаться. Снижение скорости клеток приводит к затуханию колебаний натяжения и на третьей (стадия III) колебания натяжения прекращаются. Однако скорость прокатки

по-прежнему снижается (это связано с особенностями алгоритма идентификации, поскольку он не определяет частотные свойства колебаний, а опирается лишь на относительные амплитуды бросков натяжения полосы во временной области). И на этапе четыре (стадия IV) скорость достигает нового установившегося значения, характеризующегося стабильностью натяжения.

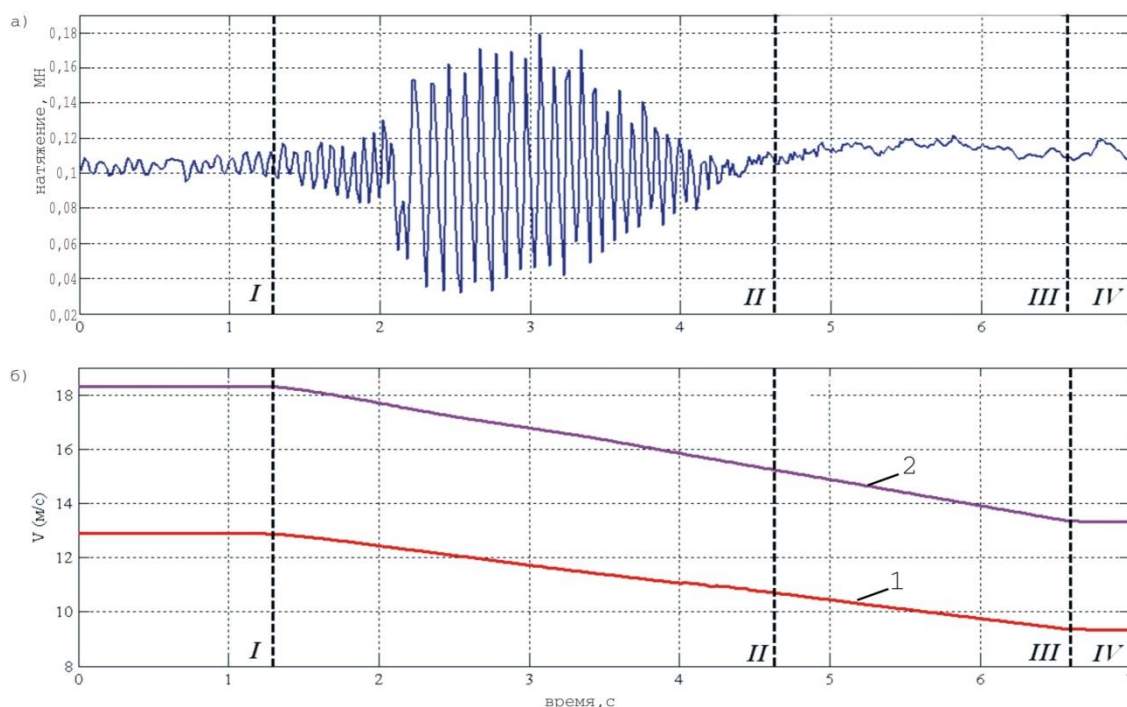


Рисунок 1.10 – Осциллограммы натяжения полосы между 3-й и 4-й клетями и ее скорости в 3-й (1) и 4-й (2) клетях в режиме колебаний

В процессе исследований анализировали следующие параметры прокатки: заданную толщину полосы во 2-м межклетевом промежутке – H_2 , мм; заданную толщину полосы в 3-м межклетевом промежутке – H_3 , мм; заданную толщину полосы в 4-м межклетевом промежутке – H_4 , мм; заданную линейную скорость 3-й клетки – V_3 , м/с; заданную линейную скорость 4-й клетки – V_4 , м/с; натяжение полосы в 3-м межклетевом промежутке – T_{34} , МН.

По результатам исследования получены гистограммы распределения задаваемых (рис. 1.11) и рабочих параметров прокатки.

Толщина прокатываемой полосы, при которой возникают колебания натяжений, находилась в следующих диапазонах:

$$H2=0,65 \pm 0,15\text{мм}; H3=0,48 \pm 0,07\text{мм}; H4=0,4 \pm 0,05\text{мм}.$$

Окружные скорости валков тех клеток, в межклетевых промежутках которых возникают колебания, распределились следующим образом:

$$V3=13 \pm 2 \text{ м/с}; V4=18,5 \pm 2 \text{ м/с}.$$

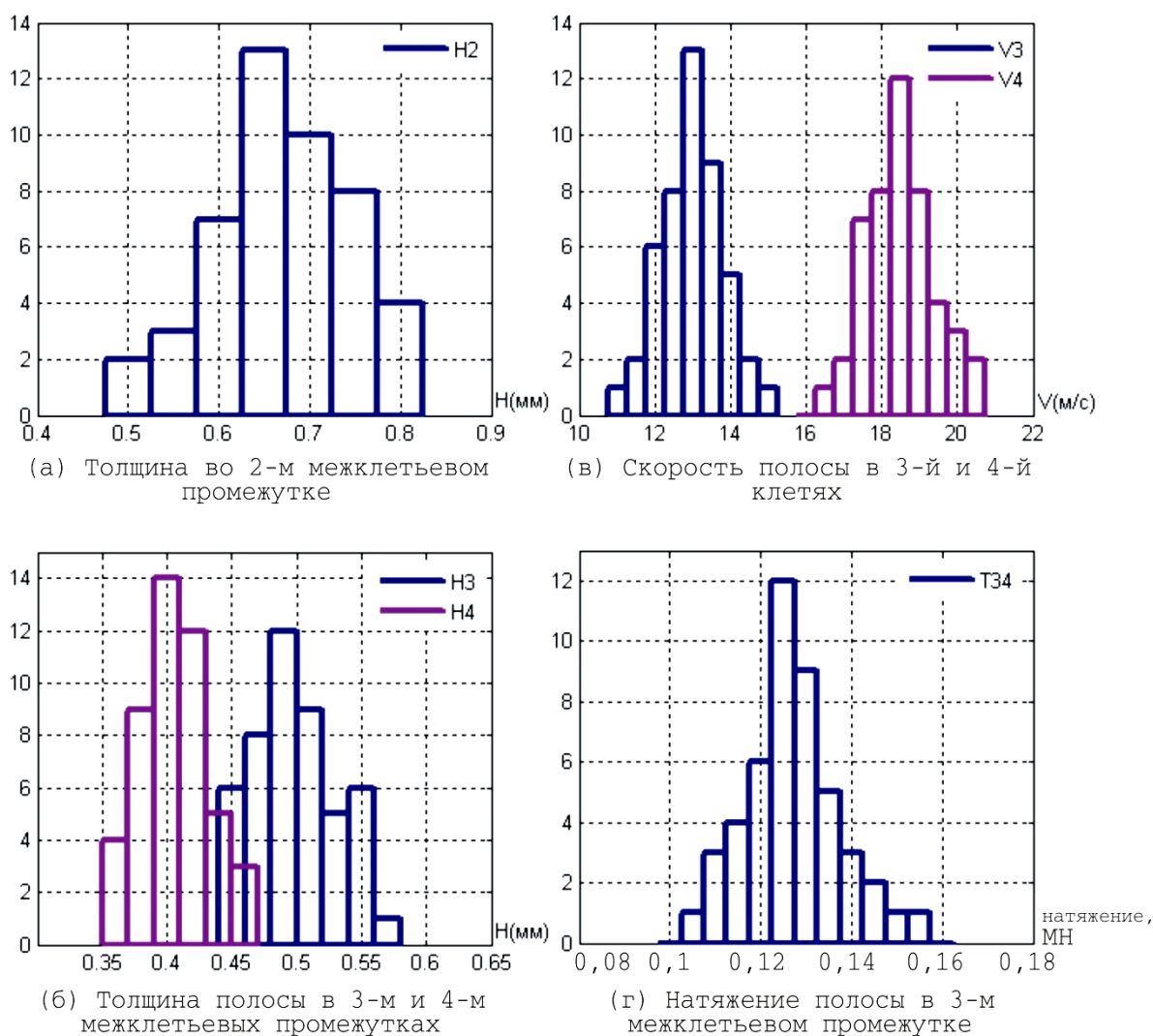


Рисунок 1.11 – Гистограммы заданных параметров прокатки, при которых возникают колебательные процессы

Заданное натяжение полосы в 3-м межклетевом промежутке, при возникновении колебательных процессов, равно: $T_{34}=0,125 \pm 0,03$ МН.

Анализируя положение гидронажимных устройств (ГНУ) и усилий прокатки в 3-й и 4-й клетях, установлено, что они распределены в широких диапазонах: для ГНУ 3-й и 4-й клетки 0,1–1,6 мм, для усилий 3-й клетки 5,5–8,5 МН, для усилий 4-й клетки 4,5–7,5 МН.

Исследовав колебания натяжения полосы, для осциллограммы, представленной на рис. 1.10, а, построили спектральную характеристику методом быстрого преобразования Фурье (рис. 1.12, а). На графике амплитудного спектра выделяется основная частота, характеризующая гармонику колебаний и составляющая $F_k=13,6$ Гц.

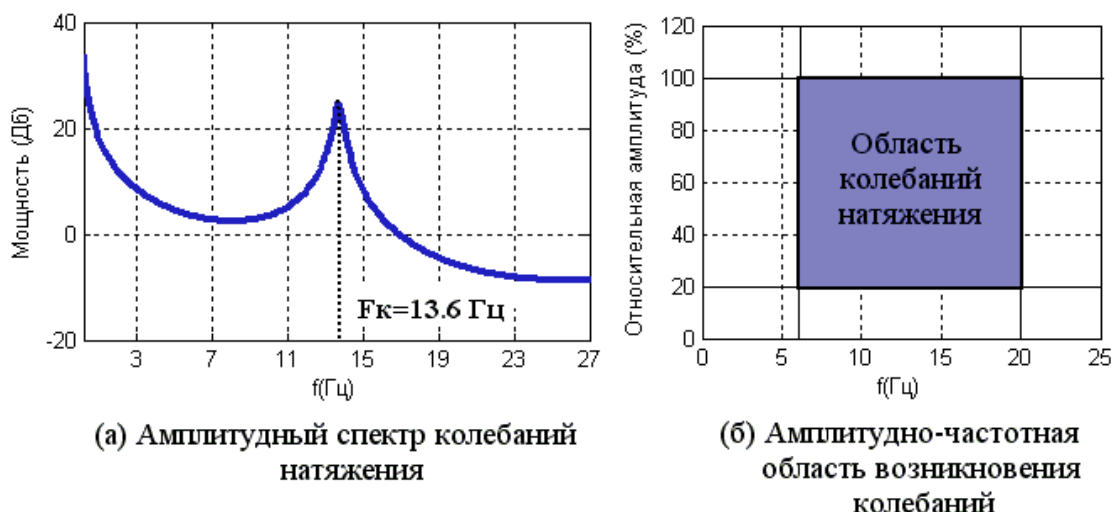


Рисунок 1.12 – Характеристики колебаний натяжения полосы

Анализ колебательных процессов по их амплитудно-частотным характеристикам, позволил выделить замкнутую область параметров колебаний натяжения (рис. 1.12, б), ограниченную полосой частот колебаний 6–20 Гц и относительной максимальной амплитудой бросков натяжения полосы 20–100 %.

В соответствии с полученными результатами, разработан алгоритм идентификации критических вибраций, дополняющий существующий алгоритм, который позволяет уменьшить время обнаружения вибрации, а

значит, и снизить длительность воздействия негативных эффектов вибрации на прокатываемую полосу.

Для повышения быстродействия системы идентификации критических вибраций необходимо, помимо анализа относительных амплитуд в смежных межклетевых промежутках, также анализировать частотные свойства показаний датчиков натяжения прокатываемой полосы, относительную амплитуду бросков натяжения полосы и заданные окружные скорости клеток рассматриваемого межклетевого промежутка.

Метод частотной идентификации основан на том факте, что в частотном спектре показаний натяжения полосы, при возникновении колебаний натяжения, преобладает одна основная гармоника (рис. 1.12, а), период которой равен периоду повторений максимумов (или минимумов) показаний натяжения полосы.

На рисунке 1.13 показаны максимумы и минимумы натяжения полосы, необходимые для идентификации вибраций по частотному признаку. Система определения критических вибраций должна выделить минимум показаний натяжения полосы, следующие за ним 3 максимума и минимум показаний, следующий за третьим максимумом (экстремумы фиксируются вместе с моментами времени).

Частота колебаний натяжения полосы определяется как средняя двум по

периодам $f_{вр.обл} = \frac{(t_{max3} - t_{max1})}{2 \cdot (t_{max2} - t_{max1}) \cdot (t_{max3} - t_{max2})}$, где $f_{вр.обл}$ – частота

колебаний натяжения полосы, определяемая по максимумам показаний натяжения полосы, Гц; t_{max1} – отсчет времени, соответствующий максимуму показаний натяжения полосы, следующим после зафиксированного минимума, сек; t_{max2} – отсчет времени, соответствующий максимуму показаний натяжения полосы, следующему после первого зафиксированного максимума, сек; t_{max3} – отсчет времени, соответствующий максимуму

показаний натяжения полосы, следующему после второго зафиксированного максимума, сек.

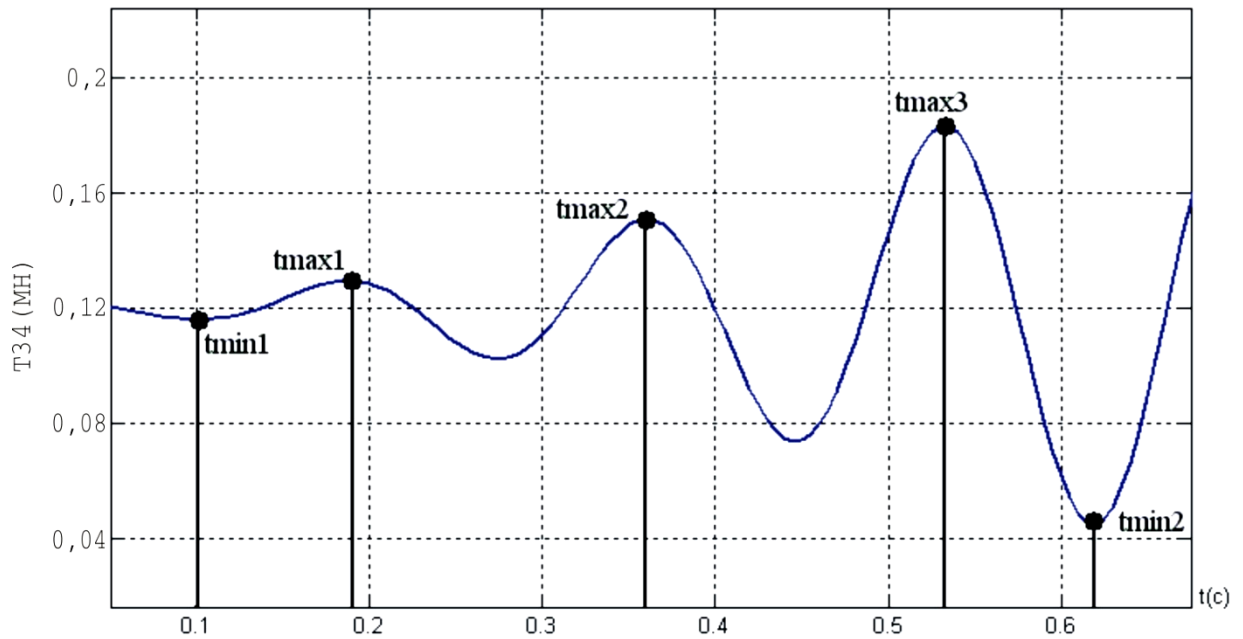


Рисунок 1.13 – Экстремумы колебаний натяжения полосы

Далее определяется частота колебаний натяжения по частотному спектру области, заключенной между зафиксированными минимумами,

$$f_{\text{част.обл}} = \frac{\max \left\{ \int_{t_{\min 1}}^{t_{\min 2}} T(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \right\}}{2\pi} \text{ при } \omega \in [12\pi; 40\pi], \text{ где } f_{\text{част.обл}} \text{ – частота}$$

колебаний натяжения полосы, определяемая по максимуму ее частотного спектра, Гц; $T(t)$ – натяжение прокатываемой полосы, МН; $t_{\min 1}$ – отсчет времени, соответствующий первому минимуму показаний натяжения полосы, сек; $t_{\min 2}$ – отсчет времени, соответствующий минимуму показаний натяжения полосы, следующему после третьего зафиксированного максимума, сек; ω – угловая скорость вращения рабочих валков клетки, рад/с.

При моделировании алгоритма было установлено, что для 3-го межклетьевого промежутка 5-клетьевого стана 1700 ПАО «Северсталь» система идентификации вибрации может давать команду на снижение скорости прокатки при соблюдении следующих условий

$$|f_{\text{част.обл}} - f_{\text{вр.обл}}| \leq 0.4 \text{ Гц}, \frac{\max\{|T(t)\} - T_{\text{зад.}}}{T_{\text{зад.}}} \geq 0.2 \text{ при } t \in [t_{\text{min1}}; t_{\text{min2}}],$$

$V_3 \in [11; 15]$ м/с, $V_4 \in [16.5; 20.5]$ м/с, где $T_{\text{зад.}}$ – заданное натяжение прокатываемой полосы, МН; V_3 – линейная скорость валков 3-й клетки, м/с; V_4 – линейная скорость валков 4-й клетки, м/с.

Скорость следует снижать до тех пор, пока выполняются вышеуказанные выражения.

Значения V_3 и V_4 вытекают из диапазона скоростей 3-й и 4-й клетки, при которых возникают вибрации.

Данное исследование проводилось специалистами ПАО «Северсталь» [151] для повышения эффективности алгоритмов АСУ ТП, решение проблемы возникновения резонансных вибраций заключалось в ограничении скорости прокатки в зависимости от уровня колебания натяжений.

Исследование разработанного алгоритма показало, что среднее время, которое требуется для обнаружения колебаний натяжения полосы, сократилось более, чем на 40 % с 0,55 сек. до 0,32 сек.

Анализ результатов исследования позволяет сделать следующие выводы:

- амплитудно-частотная область возникновения колебаний натяжения полосы в 3-м межклетьевом промежутке стана является замкнутой, что позволяет использовать частоту и относительную амплитуду колебаний при идентификации критических вибраций на стане;

- разработанный алгоритм идентификации колебаний, основанный на пороговом анализе частоты и относительной амплитуды колебаний натяжения полосы, позволяет выявить опасные вибрации и сократить время негативного воздействия вибраций на прокатываемую полосу в 3-м межклетьевом промежутке за счет увеличения быстродействия системы определения критических вибраций, в среднем с 0,55 сек. до 0,32 сек.

Анализ работ отечественных и зарубежных специалистов, занимающихся исследованиями автоколебаний и вибраций в рабочих клетях, их влиянием на качество проката, позволил сформулировать новые проблемные вопросы и задачи, решение которых будет способствовать развитию исследований в рассматриваемой области:

1. В существующих исследованиях процессы негативных автоколебаний не рассматривались с учетом нестационарности и динамики самого процесса прокатки. Для оценки влияния на явление резонанса технологических и конструктивных параметров в работах применялись аналитические модели, позволяющие определять точечные значения параметров.

2. В качестве причины или инструмента для решения проблем, связанных с нестационарностью процесса прокатки и возникновением вибрационных процессов, специалистами не рассматривались настройки и алгоритмы работы автоматизированных систем управления технологическим процессом, включая задание скоростных режимов с учетом опережения.

3. В качестве триггерного фактора, приводящего к резонансным вибрациям, во всех работах указывается скорость прокатки. Однако ни в одном исследовании не проводился анализ работы электромеханической системы прокатной клетки, как системы, обеспечивающей крутящий момент и скорость.

4. Необходимо выполнить исследования по оценке возможности снижения влияния вибрационных процессов, по повышению стабильности и эффективности процесса прокатки без конструктивных изменений существующего прокатного оборудования и систем управления.

1.3 Особенности задания скоростных режимов работы прокатного оборудования при непрерывной прокатке

Скорость выхода полосы из очага деформации превышает окружную скорость прокатных валков, это явление называется опережением. Вопросы

расчета и экспериментального определения величины опережения были неоднократно рассмотрены в литературе [10, 152, 153]. Если реализуется прокатка одновременно в нескольких клетях прокатного стана, то скорость выхода проката из некоторой клетки с номером « n » должна быть равной скорости входа в последующую клетку под номером ($n+1$). Если это условие нарушено, то либо происходит разрыв проката, либо его пробуксовка в одной из клеток, либо образование петли, все возрастающей по размерам. Возможна и перегрузка одной или нескольких клеток с разрушением деталей привода.

Если при прокатке металла в одной клетке вопрос: «С какой скоростью металл «выходит» из валков, например, со скоростью 2,0 м/с или 2,1 м/с?», не имеет большого значения, то при прокатке одновременно в нескольких клетках этот вопрос приобретает первостепенное значение. В реальных производственных условиях, зная заданную скорость прокатки, режимы обжатий в клетках и диаметры валков, требуется с учетом опережения определить скорости вращения рабочих валков 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 стохастические колебания основных энергосиловых и технологических параметров – скоростей, натяжений, моментов, токов двигателей). Указанные колебания не только влияют на качество проката и надежность оборудования, но и существенно (до 20–25%) увеличивают потери электрической энергии, снижая энергоэффективность процесса прокатки.

Следует отметить, что до настоящего времени в алгоритмах АСУ ТП прокатных станов для расчета опережения, а, следовательно, и настройки скоростного режима используются формулы, полученные в середине XX века на основе детерминистского подхода, не учитывающего

нестационарность и динамичность процесса обработки, стохастичность исходных параметров подката.

Для разработки практических инженерных методик важно не только знать величины опережения в каждой из прокатных клетей, но и диапазоны их возможных колебаний при неизбежных отклонениях всех параметров от номинальных величин из-за нестационарности нагружения. Необходимо выявлять и возможные причины возникновения этих колебаний с целью обеспечения стабильности процесса прокатки.

Развитие методов расчета опережения важно не только для развития теории прокатки, но и для развития теории управления, в том числе, и для повышения эффективности работы автоматизированных систем управления прокатными станами.

1.4 Перспективы повышения эффективности производства тонких широких полос

1.4.1 Развитие методов разработки режимов прокатки

В условиях постоянно изменяющихся внешних и внутренних факторов для обеспечения эффективной работы металлургических производств и качества выпускаемой продукции требуется оперативный инструментарий для автоматизации подготовки производства и разработки технологий получения новых видов продукции, а также совершенствования действующих производственных процессов. Такой инструментарий должен включать в себя различные стандарты, требования к качеству продукции, методы поиска комплексного решения с высокой достоверностью и программные средства, обеспечивающие выполнение процесса проектирования. В области холодной прокатки тонких стальных полос проблема выявления и внедрения методов оперативного проектирования технологий прокатки весьма актуальна, поскольку от ее решения зависит

ускорение выполнения и реализации разработок, позволяющих повысить эффективность существующих производств и конкурентоспособность выпускаемой продукции, а также освоить производство современных видов металлопроката.

В основе технологии холодной прокатки тонких стальных полос лежит технологический режим, результативность которого определяется, во-первых, настройкой стана на заданные параметры процесса, во-вторых, управлением процесса прокатки на стане. Настройка стана регламентируется технологическими инструкциями и операционными картами, разработанными подразделениями, службами, отвечающими за качество продукции. Управление режимами работы стана позволяет минимизировать отклонения фактических параметров технологического процесса от заданных при настройке и зависит от технического уровня средств и систем автоматизации, используемых на стане, от наличия достоверных и надежных средств измерения и контроля параметров технологического процесса, от качества и стойкости прокатных валков, оборудования для их смазки и охлаждения и от свойств смазочно-охлаждающей жидкости.

Проектирование технологического режима относится к этапу настройки стана и позволяет при наличии оперативного инструментария определить такие параметры настройки стана (уставки), которые с минимально возможными энергетическими затратами обеспечат выполнение требований к качеству готовой продукции, указанных в технических условиях на ее поставку.

Технический прогресс в оборудовании и технологии производства холоднокатаного листа, а так же в сфере информационных технологий привел к существенным изменениям в подходе выбора отдельных элементов технологических режимов, что нашло отражение в многочисленных работах. Так, в работе [154] показано влияние использования высококачественных эмульсолов на распределение обжатий по клетям непрерывных станов и уровень натяжений в межклетевых промежутках при прокатке

холоднокатаных полос автомобильного сортамента и конструкционных марок сталей за счет существенного снижения коэффициентов трения в очагах деформации рабочих клетей. В работе [155] при разработке режимов холодной прокатки выполнена оценка возможности захвата при первоначальном контакте и загрузки оборудования по энергосиловым параметрам, в работе [156] учтены ограничения по деформируемости металла, в [157] рассматривается отсутствие пробуксовки валков, в [158] – ограничение по разогреву металла в очаге деформации. Работа [159] посвящена разработке системы автоматизированного проектирования режимов холодной прокатки, но при этом лежащая в ее основе модель не учитывает динамической составляющей процесса холодной прокатки. Можно констатировать, что в большинстве работ, посвященных исследованию и проектированию технологических режимов холодной прокатки, выполняется точечная оценка параметров процесса и прокатываемого металла без учета стохастичности. В работе [23] предложена методика расчета величин нестабильности параметров процесса холодной прокатки с учетом воздействия случайных факторов по критерию равенства усилий по всем клетям стана, однако, как показывает практика, реализовать это крайне сложно.

Очевидные преимущества и достоинства моделирования процесса холодной прокатки с учетом нестационарности и стохастичности его параметров позволяют сделать вывод о целесообразности использования динамической модели процесса холодной прокатки при создании новых и совершенствовании действующих технологий производства тонких широких холоднокатаных полос. А полученные на основе этой модели углубленные знания о методах и способах исследования параметров процесса прокатки и полосы, в том числе в условиях их объективно существующей вариации, будут являться основой для разработки методологии проектирования технологических режимов холодной прокатки, определяющей инновационную деятельность научно-технических специалистов

металлургической промышленности, направленную на новый результат, связанный с выпуском листопрокатной продукции с высокими показателями конкурентоспособности и с развитием производства проката более высокой технической готовности. С этих позиций развитие методов для оперативной разработки режимов прокатки с решением задач ресурсо- и энергосбережения, улучшения качества продукции, расширения сортамента представляет большое научное и практическое значение для повышения эффективности технологий производства тонких стальных полос.

1.4.2 Вопросы прогнозирования затрат энергии при непрерывной прокатке

Оценка энергоэффективности процессов непрерывной прокатки широких стальных полос необходима для проектирования технологий обработки современных марок сталей и оптимизации существующих технологических решений. Динамику возникающих затрат энергии необходимо осуществлять с учетом влияния нестационарного характера динамических нагрузок на контактные напряжения и энергосиловые параметры в очаге деформации. Как показал обзор научно-технических публикаций по этой проблеме, затраты энергии при прокатке и разработанные методы ее снижения основаны на статичных моделях, также отсутствует оценка влияния одного из самых эффективных инструментов управления технологическими переменными – электромеханических систем, включающих электрические приводы, состоящие из силового преобразователя, электродвигателя, механической передачи и исполнительного органа.

В реальных условиях эксплуатации автоматизированных электроприводов листовых прокатных станов из-за нестационарности и нестабильности параметров технологического процесса возникают вынужденные колебания тока. На отклонение тока влияют различные

управляющие воздействия в сложных приводных системах, колебания многомассовых систем, выбор зазоров в механических передачах и т.д. Высокие броски тока якоря главных приводов негативно влияют на энергоэффективность технологии прокатки, создавая дополнительные потери электроэнергии, снижая надежность и К.П.Д. электротехнического оборудования, ухудшая качество и повышая себестоимость выпускаемой продукции.

На показатели колебаний тока электропривода оказывают существенное влияние вибрации клеток прокатного стана, для выхода из режима резонансных колебаний снижают скорость прокатки, что приводит к динамическим отклонениям (броскам) тока.

Как отмечается в работах [160, 161], одним из возможных путей устранения негативного влияния динамических бросков тока является повышение качественных показателей работы системы управления автоматизированными главными электроприводами рабочих клеток и оптимизацией настройки регуляторов приводов по критериям качества переходных процессов и энергосбережения в установившихся и переходных режимах.

Современная тенденция повышения качества управления непрерывным станом холодной прокатки требует применения управляющих устройств, сопоставимых по сложности с объектом управления. В этой связи, применение систем автоматизированного управления электромеханическими системами (САУ ЭМС) с типовыми законами регулирования в системах с нежесткой механикой, в высокодинамичных электроприводах при нестационарном нагружении является малоэффективным [162]. Например, при использовании типового ПИ-регулятора скорости в системе подчиненного регулирования для электропривода одного из валков широкополосного прокатного стана (ШПС) возникают быстропротекающие динамические отклонения тока якоря двигателя, достигающие 80–100% от среднего значения (рисунок 1.14). То есть, существующие САУ

электроприводов прокатных станов при использовании типового регулирования не в состоянии устранить подобные негативные явления.

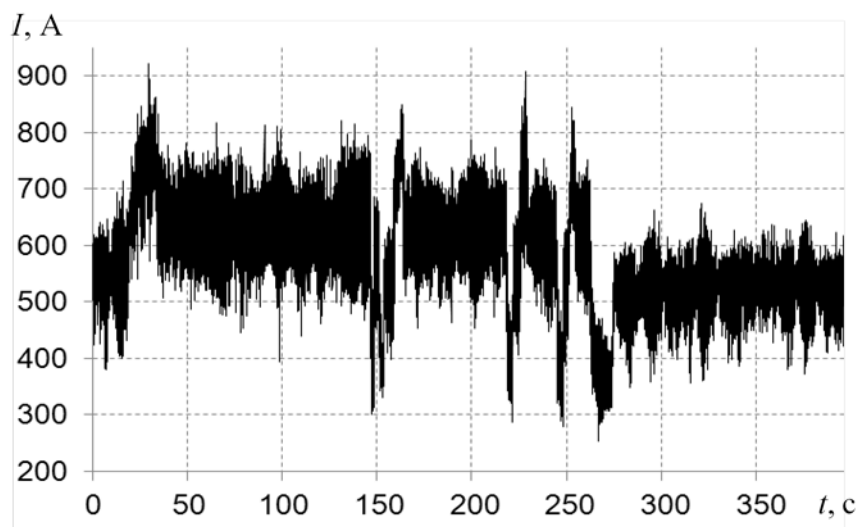


Рисунок 1.14 – График изменения тока якоря двигателя рабочего валка широкополосного стана

Повышение требований к качеству управления непрерывным прокатным станом в условиях его параметрической неустойчивости обуславливает необходимость учета более тонких эффектов функционирования стана, что, в свою очередь, приводит к проявлению дополнительных факторов сложности и требует применения управляющих устройств высокого порядка и более сложных процедур их синтеза. Для решения подобных задач хорошо зарекомендовали себя безынерционные и динамические регуляторы состояния, синтезируемые методом модального управления [163–169]. Однако изменение условий нестационарного динамического нагружения при прокатке может приводить к существенным отклонениям внутренних параметров ЭМС от их расчетных значений, принятых при синтезе регуляторов состояния, и к значительному снижению эффективности всей системы автоматизации технологических процессов. В этих условиях важное значение приобретает возможность оценки потерь энергии от колебательных процессов при пульсациях тока якоря, характеризующего рабочие режимные

характеристики электроприводов рабочих клетей. Такой подход ранее не применялся.

1.4.3 Вопросы повышения качества широких стальных полос

Современные направления повышения качества холоднокатаных полос включают не только повышение точности прокатываемых полос в части разнотолщинности и неплоскостности, но и обеспечение высоких показателей по качеству поверхности. Одним из таких показателей, определяющих более высокий уровень технологических и потребительских свойств, является чистота поверхности проката.

После холодной прокатки на поверхности полосы всегда остается некоторое количество частиц загрязнений от разложения технологических смазок (эмульсии, масла) и износа валков. В ряде работ [170–173] отмечается, что загрязненность поверхности проката зависит от качественных показателей прокатной эмульсии. В работе [174] повышение степени чистоты полосы связывается с использованием рабочих валков с хромовым покрытием. Авторами [175, 176] высказана гипотеза о зависимости чистоты поверхности от положения нейтральных сечений в очагах деформации рабочих клетей: увеличение зоны отставания в очаге деформации способствует очистке поверхности полосы от загрязнений, поскольку касательные напряжения, направленные в этой зоне по ходу прокатки, способствуют удалению загрязнений из очага. Несмотря на многочисленные исследования, посвященные вопросам обеспечения качества поверхности полос по чистоте, для многих непрерывных станов холодной прокатки остается актуальной проблема снижения уровня загрязненности проката. В связи с этим продолжение исследований в данном направлении имеет не только научное, но и практическое значение.

Одной из перспективных возможностей дальнейшего улучшения качества холоднокатаных полос является изучение закономерностей

распределения напряжений трения в очаге деформации, что позволит проектировать и оценивать результативность технологических режимов по всему комплексу характеристик процесса прокатки и качества полосы, включая обеспечение высокой чистоты ее поверхности.

Еще одним из существенных дефектов, возникающих на поверхности холоднокатаной полосы, является ребристость, проявляющаяся в виде поперечных зон с чередующимися темными и светлыми оттенками (рисунок 1.15).

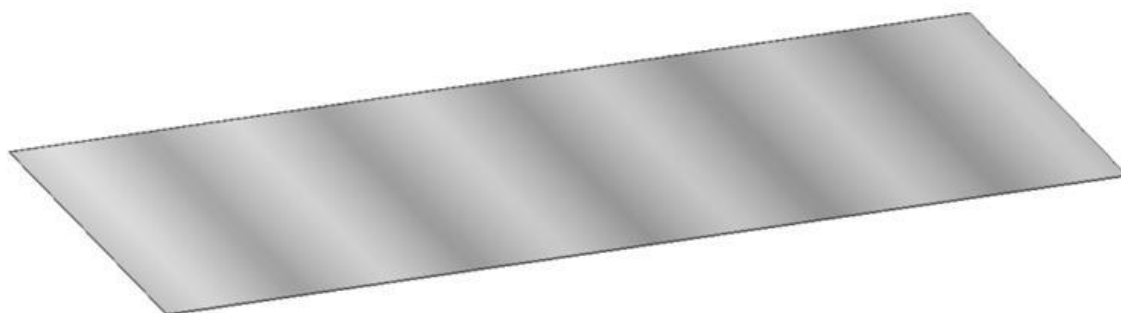


Рисунок 1.15 – Поверхностный дефект «ребристость полосы»

Основными причинами появления ребристости на полосе являются действующие в рабочей клетке вибрационные процессы, которые возникают вследствие самовозбуждения колебаний при прокатке [157, 177], динамические процессы в оборудовании главных линий рабочих клеток [38, 178], неустойчивое положение рабочих валков в клетке [179–181], а также качество обработки валков [182]. При этом очевидно, что, несмотря на различие перечисленных факторов, в конечном итоге ребристость возникает под действием колебательных процессов валкового узла.

Учитывая особенности процесса непрерывной холодной прокатки, затруднительно, а в большинстве случаев невозможно проводить экспериментальные исследования по выявлению влияния колебаний валковой системы на точность геометрических размеров полос и возникновению на них дефектов поверхности. В настоящее время все более эффективным инструментом является математическое моделирование

методом конечных элементов, поэтому изучение влияния колебательных процессов при холодной прокатке на показатели качества стальных полос с применением вычислительных сред конечно-элементного анализа весьма актуально. Таких исследований ранее не проводилось.

В современных условиях непрерывной прокатки широких тонких листов и полос с учетом нестационарности и стохастичности параметров технологического процесса, повышения производительности прокатных станов за счет увеличения скорости прокатки и динамических явлений актуальным становится вопрос перехода от аналитической теории и технологии прокатки к моделированию и исследованию технологического процесса прокатки в динамике. Особенно это важно в рамках оптимизации и корректировки технологий применительно к конкретным условиям, например освоения нового сортамента [183].

При этом важно знать не только изменение технологических и энергосиловых параметров процесса прокатки в каждую единицу времени, но и понимать, как изменятся параметры технологии с учетом потенциально возможных ситуаций, то есть прогнозировать параметры готовой продукции и работы стана.

Выводы по главе 1

В результате анализа установлены следующие проблемы, сдерживающие развитие современного листопрокатного производства:

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 усложняются процессы автоматического управления, регулирования и поддержания технологических параметров в допустимых пределах, обеспечивающих требуемые характеристики качества и свойства прокатной продукции.

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. Что в современных условиях приводит к существенным ошибкам при выполнении технологических и конструкторских расчетов непрерывных листопрокатных станов, и, как следствие, к неоправданным потерям энергии, повышенным эксплуатационным расходам, снижению качества проката.

3. При освоении проектных скоростей для повышения производительности, на многих отечественных и зарубежных непрерывных прокатных станах возникают негативные динамические вибрационные явления, которые вызывают появление дефектов на поверхности полос; 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 и не исследуются технологические причины возникновения вибрационных процессов, как основные.

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.

5. 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.

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.

Глава 2. Развитие теории процесса тонколистовой прокатки

2.1 Структура модели процесса упругопластического деформирования в условиях нестационарного динамического нагружения

Моделирование динамических процессов, возникающих при непрерывной холодной прокатке, является весьма сложной задачей, поэтому в технической литературе освещаются только ее отдельные аспекты.

Большинство известных математических моделей процесса холодной прокатки и методов расчета энергосиловых параметров являются детерминистскими [1–8], не учитывающими динамический характер его протекания в реальных производственных условиях.

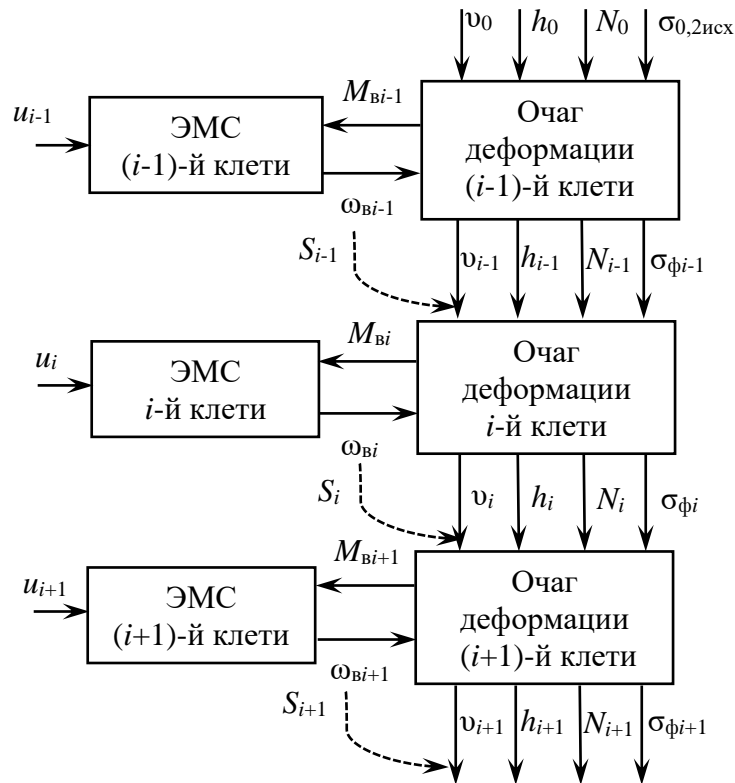
Динамические модели, описанные работах [184–186], являются моделями управления процессом, предназначенными для проектирования контроллеров, без прогнозирования напряжений, деформаций и нагрузок в прокатных клетях. В работе [187] затронут вопрос математического описания электромеханической системы клетки стана холодной прокатки для исследования динамических нагрузок электропривода клетки без учета влияния контактного взаимодействия между полосой и валками.

Вследствие многофакторности процесса, сложной взаимозависимости электромеханических систем клеток непрерывного стана холодной прокатки, дальнейшее комплексное развитие технологии тонколистовой прокатки невозможно без разработки модели процесса холодной прокатки, учитывающей его динамичность и нестационарность.

2.1.1 Структура физико-математической 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 (рисунок 2.1) [188–192].



$(i-1), i, (i+1)$ – номер рассматриваемой клетки; u_{i-1}, u_i, u_{i+1} – напряжение на якорной обмотке двигателя клетки; $\omega_{B(i-1)}, \omega_{Bi}, \omega_{B(i+1)}$ – угловая скорость вращения рабочего вала клетки; $M_{B(i-1)}, M_{Bi}, M_{B(i+1)}$ – момент, необходимый для обеспечения процесса прокатки в клетки; 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 клетки; S_{i-1}, S_i, S_{i+1} – опережение в клетях

Рисунок 2.1 – Структурная схема математической модели процесса холодной прокатки, учитывающая взаимосвязь электромеханических систем клеток, модель очага деформации

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 2.1 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.

2.2 Модель электромеханической системы прокатного стана

Главный привод непрерывного листового прокатного стана состоит из комбинированных редукторов, промежуточных соединений, муфты предельного момента и электродвигателей. Комбинированный редуктор состоит из сварной станины, крышки и двух пар шестеренных валков, установленных на подшипниках скольжения с баббитовой заливкой. Комбинированные редукторы всех клеток одинаковой конструкции и отличаются передаточным числом.

Соединение как правило шпиндельное состоит из двух шпинделей с зубчатыми муфтами на концах, устройства для подачи жидкой смазки в зубчатые зацепления и устройства для уравнивания шпинделей во время смены валков. Соединение вала со шпинделем обеспечивается с помощью

подвижных клиньев. Номинальный момент, передаваемый одним шпинделем, составляет 20 кН·м. Максимальный угол наклона шпинделя при работе – 30°.

На некоторых станах, например, на комбинированном полунепрерывном стане горячей прокатки 2800/1700 привод рабочих валков непрерывной группы 1700 осуществляется через шестеренную клеть.

На рисунке 2.2 показана схема главного привода клетки, где: 1 – двигатель; 2 – вал от двигателя к редуктору; 3 – редуктор; 4 – шпиндель; 5 – рабочий валок; 6 – опорный валок.

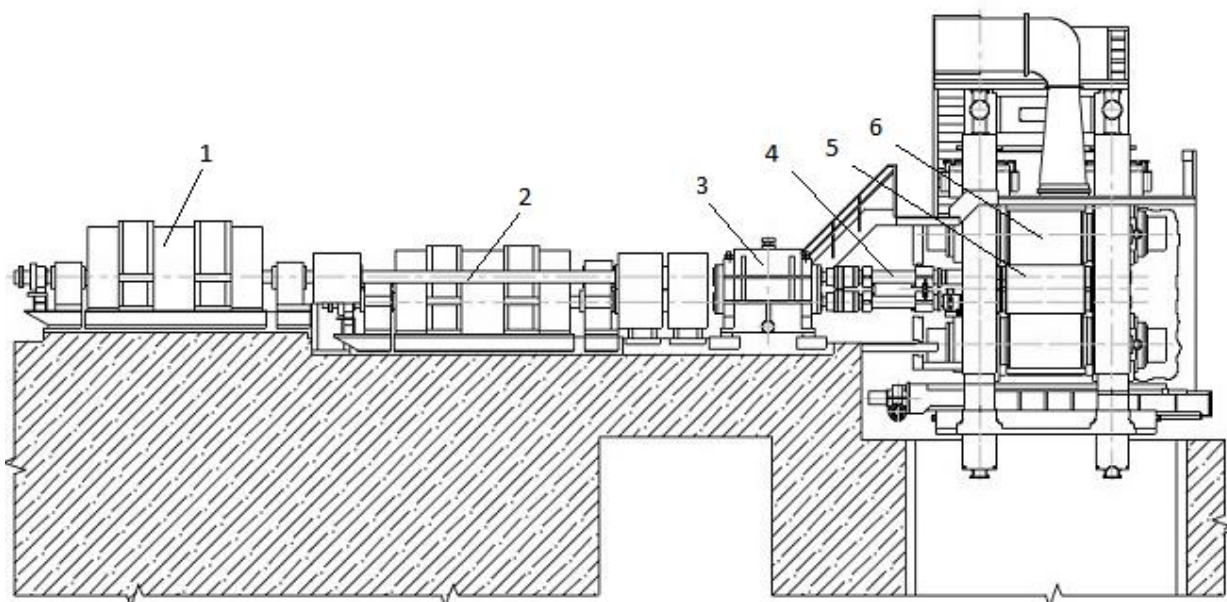
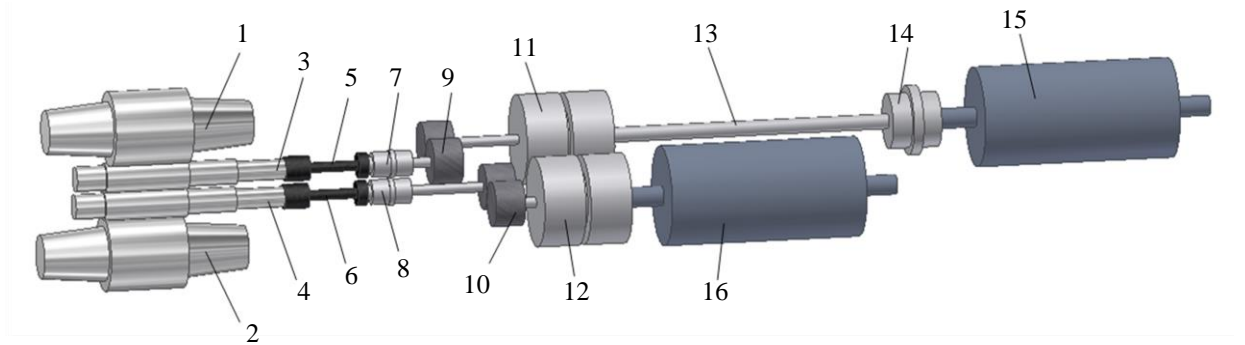


Рисунок 2.2 – Схема главного привода рабочей клетки

Привод рабочих валков клетей непрерывных станов холодной прокатки, как правило, является индивидуальным, для наглядности трехмерная схема оборудования привода стана представлена на рисунке 2.3.

Применяемые в главных приводах непрерывных листовых прокатных станов двигатели постоянного тока независимого возбуждения, описываются следующими дифференциальными и алгебраическими уравнениями в абсолютных единицах:



1 – верхний опорный валок; 2 – нижний опорный валок; 3 – верхний рабочий валок; 4 – нижний рабочий валок; 5, 6 – шпиндели; 7, 8 – муфты «редуктор-шпиндель»; 9, 10 – зубчатые зацепления комбинированного редуктора; 11, 12 – муфты предельного момента; 13 – промежуточное соединение; 14 – муфта зубчатая; 15, 16 – электродвигатели постоянного тока

Рисунок 2.3 – Трехмерная модель электромеханической системы непрерывного стана

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

$$M - M_C = J \cdot \frac{d\omega}{dt};$$

(2.1)

$$M = K_M \cdot \Phi \cdot i;$$

$$e = K_\omega \cdot \Phi \cdot \omega,$$

где u – напряжение на якорной обмотке двигателя; e – электродвижущая сила (ЭДС) якоря; i – ток якоря, Φ – поток, создаваемый обмоткой возбуждения; M – электромагнитный момент двигателя; M_C – момент сопротивления движению; ω – скорость вращения вала двигателя; R – активное сопротивление якорной цепи; L – индуктивность якорной цепи; J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки; C_ω – коэффициент связи между скоростью и ЭДС; C_M – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом.

По приведенным уравнениям составим модель двигателя постоянного тока независимого возбуждения в виде структурной схемы управления (рис. 2.4).

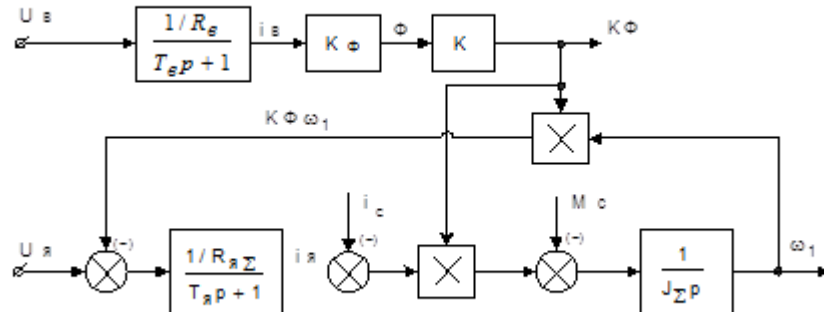


Рисунок 2.4 – Структурная классическая схема для математического моделирования двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Для учета упругих связей в структурную схему математической модели (рис. 2.4) необходимо добавить соответствующие элементы. Полученная схема изображена на рисунке 2.5.

С помощью данной схемы возможно смоделировать поведение двухмассовой упругой электромеханической системы с двигателем постоянного тока независимого возбуждения. На входы схемы M_{c1} и M_{c2} (M_{c1} – момент статического сопротивления двигателя; M_{c2} – момент статического сопротивления нагрузки) подаем значения $M_{c1}=M_{c2}=0$. Остальные параметры – номинальные. С выхода схемы снимаем переходную характеристику угловой скорости вращения рабочего органа и вала двигателя.

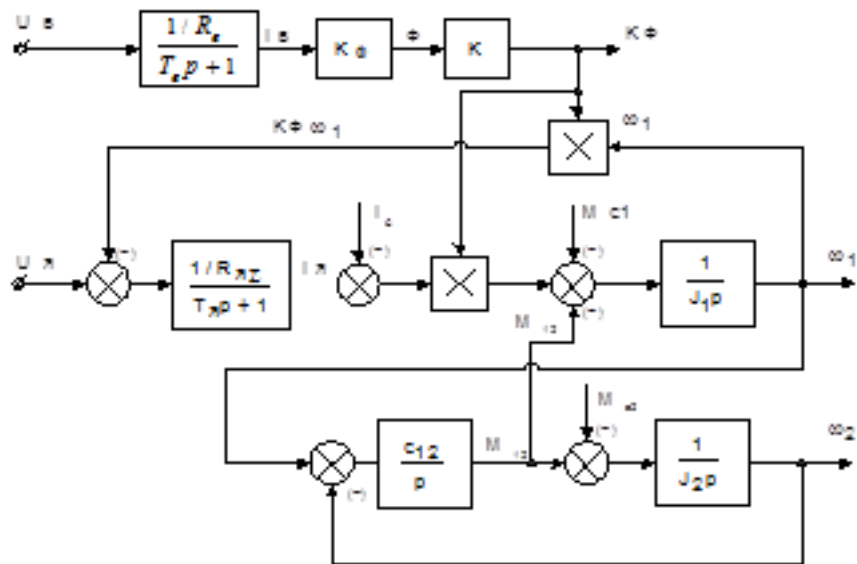


Рисунок 2.5 – Структурная схема для моделирования двухмассовой упругой системы с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

Учтем при моделировании электромеханической системы двухкорный тип электрической машины главного привода непрерывного листового прокатного стана, ее электрическая схема включения показана рисунке 2.6.

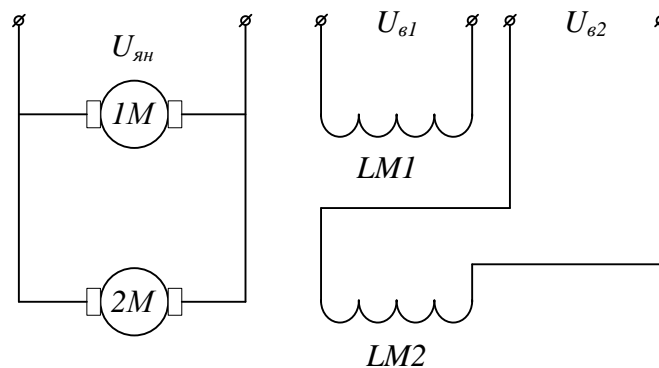


Рисунок 2.6 – Электрическая схема включения двухкорной машины постоянного тока с независимым возбуждением

Питание якорей $1M$ и $2M$ осуществляется от тиристорного преобразователя с напряжением U_n . Питание обмоток возбуждения $LM1$ и $LM2$ осуществляется от отдельных тиристорных возбудителей с напряжением $U_{в1}$, $U_{в2}$.

Математическое описание машины состоит из уравнений электрического равновесия цепи якоря, цепи обмотки возбуждения и уравнения механического равновесия относительно вала электродвигателя с учётом того, что электромагнитный момент двухякорной машины формируется исходя из уравнения $M = k\Phi_1 i_1 + k\Phi_2 i_2$ [193].

Система дифференциальных уравнений, описывающих поведение двухякорной машины в переходных режимах, при нулевых начальных условиях имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{di_{я1}}{dt} = \frac{1}{L_{я1}} (U_H - i_{я1} R_{я1} - k\Phi_1 \omega) \\ \frac{di_{я2}}{dt} = \frac{1}{L_{я2}} (U_H - i_{я2} R_{я2} - k\Phi_2 \omega) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c) \\ M = k\Phi_1 i_1 + k\Phi_2 i_2 \\ \frac{di_{\epsilon 1}}{dt} = \frac{1}{L_{\epsilon 1}} (U_{\epsilon 1} - i_{\epsilon 1} R_{\epsilon 1}) \\ \frac{di_{\epsilon 2}}{dt} = \frac{1}{L_{\epsilon 2}} (U_{\epsilon 1} - i_{\epsilon 2} R_{\epsilon 2}) \end{cases}$$

где Φ_1, Φ_2 – магнитные потоки, создаваемые обмотками возбуждения первого и второго якоря, Вб; M_c – момент статической нагрузки, приведённый к валу электродвигателя; L_1, L_2 – индуктивности якорей, Гн; $R_{я1}, R_{я2}$ – активные сопротивления якорей, Ом; $L_{в1}, L_{в2}$ – индуктивности обмоток возбуждения, Гн; $R_{в1}, R_{в2}$ – активные сопротивления обмоток возбуждения, Ом.

Изменение магнитного потока вносит нелинейность в математическое описание процессов преобразования энергии в электродвигателе. Поэтому, для исследования работы электродвигателя при двухзонном регулировании скорости, необходимо точное воспроизведение кривой намагничивания машины.

В литературе [193], рассматривается описание этой кривой апериодическим звеном первого порядка с передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{k_{\phi}}{1 + T_{\text{вт}} \cdot p},$$

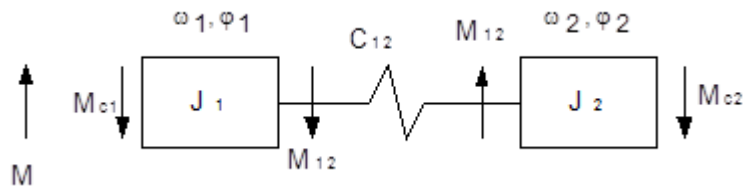
где k_{ϕ} – передаточный коэффициент; $T_{\text{вт}}$ – постоянная времени вихревых токов.

Если рассматривать электромеханическую систему в целом, т.е. электродвигатель совместно с механической частью, то для создания и исследования динамических процессов системы управления электроприводом листового прокатного стана необходимо создать точную математическую модель, максимально подробно описывающую свойства системы, но в тоже время удобную для пользователя. Критерием эффективности создания такой модели является совпадение результатов моделирования и теоретических аналитических расчетов с реальными производственными данными.

Существующие работы по теории электропривода, моделированию электромеханических систем и системам управления автоматизированными электроприводами, как правило, рассматривают упрощенные модели электромеханических систем с упругими связями в виде одно-, двух-, трех массовых систем с рядом допущений [194, 195]: по учету скручивания валов, сил внутреннего трения, отсутствие учета колебаний и деформаций механической части приводной системы. Зачастую электромеханические системы представлены линеаризованными, без учета нелинейностей и их влияния на качество динамических процессов [196–198].

Рассмотрим двухмассовую электромеханическую систему. В данной системе двигатель подключается к нагрузке через упругое звено. Схема такого включения изображена на рисунке 2.7.

Система дифференциальных уравнений, описывающая переходные процессы в двухмассовой электромеханической системе, представленной



M – электромагнитный момент двигателя; M_{c1} – момент статического сопротивления двигателя; M_{c2} – момент статического сопротивления нагрузки; M_{12} – момент сопротивления упругой связи; C_{12} – коэффициент жесткости упругой связи; ω_1 – скорость вращения вала двигателя; ω_2 – скорость вращения рабочего органа; J_1 – момент инерции двигателя; J_2 – момент инерции рабочего органа

Рисунок 2.7– Схема двухмассовой упругой электромеханической системы

рядной схемой¹, а структурная схема данной системы в относительных единицах, для общности исследования и абстрагирования от частных параметров, изображена на рисунке 2.8:

$$\begin{cases} M - M_{12} - M_{BT12} - M_{c1} = J_1(d\omega_1/dt) \\ M_{12} + M_{BT12} - M_{c2} = J_2(d\omega_2/dt) \end{cases}$$

где ω – скорость i -й массы; M_{12} , M_{BT12} – упругий момент и момент вязкого трения в механической передаче между 1-й и 2-й массами:

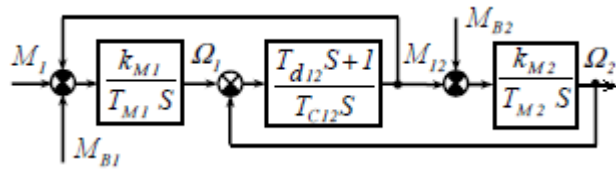
$$M_{12} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2); M_{BT12} = b_{12}(\omega_1 - \omega_2),$$

где b_{12} и c_{12} – приведенные коэффициенты демпфирования и эквивалентной жесткости передачи между 1-й и 2-й массами;

$$M_{ci} = M_{cni} + M_{cti} + M_{di},$$

где M_{cni} – момент, учитывающий влияние статической нагрузки; M_{cti} – момент трогания; M_{di} – момент внешнего вязкого трения.

¹ Под рядной схемой передачи крутящего момента привода понимается такая схема, в которой вся энергия от двигателя к исполнительному органу передается через элементы, расположенные последовательно в ряд. Характерным примером рядной схемы привода является главный привод листового прокатного стана.



T_{M1}, T_{M2} – механические постоянные времени масс J_1 и J_2 ; T_{C12} – постоянная времени эквивалентной жесткости передач между 1-й и 2-й массами; T_{d12} – постоянная времени сил, обусловленных вязким трением

Рисунок 2.8 – Структурная схема рядной двухмассовой системы

Наличие модели электрической и механической части двухмассовой системы электромеханической системы позволяет разработать структурную схему системы управления двухмассовой ЭМС двигателя постоянного тока, пример такой системы представлен на рисунке 2.9 [195].

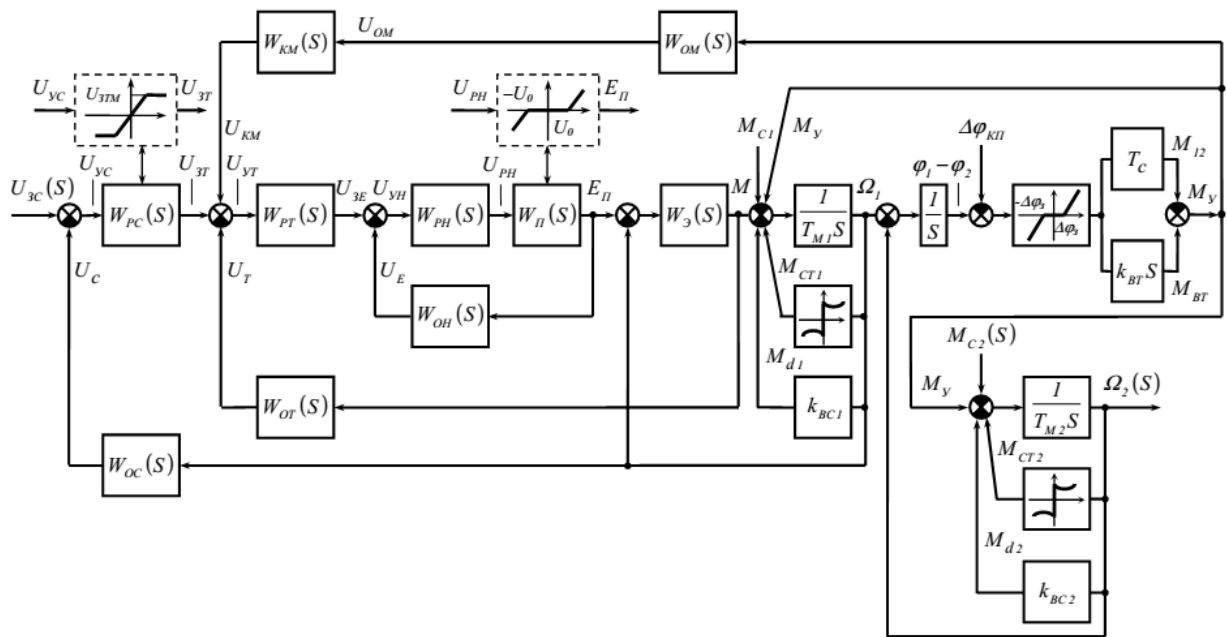


Рисунок 2.9 – Структурная схема системы управления двухмассовой ЭМС

Система управления реализует структуру подчиненного управления напряжением E_{II} , моментом (током) M и скоростью вращения ω_1 двигателя с помощью соответствующих датчиков, имеющих передаточные функции соответственно напряжения, тока и скорости $W_{OH}(S)$, $W_{OT}(S)$, $W_{OC}(S)$, и регуляторов – $W_{PH}(S)$, $W_{PT}(S)$, $W_{PC}(S)$. Свойства преобразователя учитываются

передаточной функцией $W_{\Pi}(S)$, а электромагнитные процессы в двигателе – $W_{\Sigma}(S)$. Канал управления моментом в упругих элементах механических передач показан в виде параллельной коррекции. Свойства датчика момента учитываются передаточной функцией $W_{OM}(S)$, а корректирующего устройства – $W_{KM}(S)$.

Механическая часть системы представляет собой объект управления с существенными нелинейностями, учитывающими зазоры $\Delta\varphi$ и моменты сухого трения M_{CT1} , M_{CT2} . Чаще всего при рассмотрении конкретных ЭМС с упругими связями не возникает необходимости в учете всех факторов и нелинейностей, так как обычно, в зависимости от цели и задач исследования, определяют наиболее существенные особенности ЭМС, представляющие наибольший интерес исследователям.

Представленное описание механической части привода эквивалентной двухмассовой упругой системой достаточно полно отражает особенности физических процессов реальных механизмов и в то же время является предельно упрощенной моделью ЭМС с упругими связями.

2.2.1 Математическое описание взаимосвязей электромеханических систем в процессе непрерывной прокатки

Для решения проблем исследования нестационарности и динамичности процессов непрерывной листовой прокатки и разработки мероприятий по повышению эффективности работы электромеханических приводных систем прокатных станов необходимо рассматривать не просто электромеханическую систему, а несколько таких систем в комплексе, с учетом взаимодействия скоростного режима клетей и прокатываемой стальной полосы.

В работе Башарина А.В., Новикова В.А. и Соколовского Г.Г. [199] рассмотрена разработка систем управления скоростью многодвигательных систем прокатного стана с учетом наличия полосы в межклетевом

промежутке, однако авторами при изучении данного вопроса в качестве допущений не учтены колебания толщины полосы во время прокатки (разнотолщинность), принято, что отсутствуют пробуксовки и проскальзывания полосы относительно валков, не учтено влияние опережения полосы на выходе их клетки относительно валков при здании скоростного режима, не учтены зазоры в линии механических передач.

Главная приводная линия непрерывного прокатного стана представляет электромеханическую систему, в которой динамические характеристики механической и электрической частей существенно влияют на характер движения, как трансмиссии, так и электродвигателя. В практике динамических расчетов автоматизированных электроприводов, как правило, характеристики механической части не учитывались. Расчётная механическая схема сводилась к жёсткому приведённому звену и описывалась уравнением движения [193].

$$M - |M_c| \text{sign} \omega = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}.$$

Когда параметры системы таковы, что влияние упругих связей и зазоров в передачах незначительно, или при решении задач, в которых с этим влиянием можно не считаться, механическая часть представляется простейшей расчетной схемой, не учитывающей влияния упругих связей, жестким приведенным звеном.

В этом случае многомассовая механическая часть заменяется эквивалентной массой с моментом инерции J_{Σ} , на которую воздействуют электромагнитный момент электродвигателя M и суммарный, приведённый к валу электродвигателя, момент нагрузки M_c , который включает в себя внешние силы, приложенные к механической системе.

В общем случае прокатный стан представляет крупный агрегат со сложным нагружением, где упругие свойства линий передачи в сочетании с большой кинетической энергией вращающихся масс могут приводить к возникновению недопустимо больших колебательных процессов. Известно,

что прочность и долговечность элементов приводов прокатных станов в значительной мере зависят от величин, действующих на них динамических нагрузок, поэтому проблемы, связанные с достоверной оценкой уровней динамических нагрузок и изысканием путей их снижения, весьма актуальны. Моменты упругих колебаний, возникающих в элементах механической части передаются электродвигателю, вызывая колебания его скорости и тока якоря. Значительные по величине колебания этих параметров неблагоприятно сказываются на работе систем автоматики, узлов выравнивания нагрузок и приводят к потерям электроэнергии в установившиеся и переходные режимы работы стана.

Исследования динамики приводов прокатных станов с целью получения информации о величинах динамического коэффициента в конкретных условиях работы, о зависимости изменения этого коэффициента от величины зазора или других параметров, а также использование этих данных при настройках систем автоматического регулирования, дают возможность определить наиболее благоприятные режимы работы или методы реконструкции оборудования, позволяющие увеличить надежность и производительность оборудования, улучшить качество продукции.

Таким образом, для оценки взаимного влияния динамических характеристик механической и электрической систем привода при непрерывной прокатке, установления их связи с режимами прокатки, при одновременном решении задач по повышению энергоэффективности и энергосбережения, необходима разработка математической модели прокатного стана.

Математическая модель прокатного стана дает возможность изучить влияние изменения внешних сил (например, момента прокатки, момента двигателя) и параметров исходной системы (распределение масс, жесткостей, зазоров, характеристик узлов регулирования и т.д.) на процессы, протекающие в элементах приводных линий, очаге деформации и системах регулирования, для выявления предельных и опасных режимов работы при

широком изменении всех параметров. При натурном эксперименте изучение ряда воздействий и явлений или вообще невозможно, или крайне трудно. При моделировании можно многократно воспроизвести пробуксовки рабочих валков в одних и тех же условиях, можно воспроизвести аварийные условия работы оборудования, выявить слабые звенья механизмов, найти предельные технологические, скоростные и нагрузочные режимы приводов и оборудования. Также просто могут быть изучены неравномерность распределения моментов между валками, влияние износа подвижных соединений (зазоры в шарнирах шпинделей), причины появления дефектов проката и многие другие вопросы, которые возникают при проектировании технологии и оборудования. Результаты подобных исследований также необходимы для сбора необходимой информации об объекте автоматизации при разработке алгоритмов управления.

При использовании математической модели можно решать ряд задач, прежде всего – это совершенствование технологического процесса. Обычно существующий процесс прокатки изучают для того, чтобы оценить возможности установленного технологического оборудования и обнаружить резервы повышения производительности. Математическое моделирование позволяет добиться взаимного соответствия параметров технологического процесса и характеристик механического и электрооборудования.

Экспериментальное решение всех этих задач практически нецелесообразно, так как оно требует, во-первых, больших затрат средств и времени и, во-вторых, исследования значительного количества равноценных вариантов. И в этом случае так же, как и при проектировании, математическая модель позволяет упростить проблему.

С информационной точки зрения непрерывный прокатный стан как объект автоматизации представляет собой многоконтурную нелинейную систему со многими элементами, тесно связанными друг с другом. Технологический процесс прокатки является сложной вероятностной системой с неполной информацией об объекте из-за наличия случайных

изменений параметров технологического режима и случайных помех и характеризуется большим количеством взаимосвязанных переменных параметров.

Математическое моделирование выполнено на примере 5-клетевого стана холодной прокатки 1700 ПАО «Северсталь», предназначенного для непрерывной прокатки горячекатаных травленных полос, смотанных в рулоны. Скорости прокатки составляют от 0,75 до 30 м/с. На всех станах холодной прокатки прокатка ведется с натяжением, т.е. полоса между клетями находится в упруго-напряженном состоянии. Натяжение полосы между клетями является функцией скоростей валков и обеспечивается двигателем последующей клетки. При потере натяжения полоса, как правило, теряет устойчивость, что приводит к аварии при высоких скоростях прокатки. Поэтому основным условием холодной прокатки является обеспечение натяжения между клетями стана во всех режимах его работы.

В практике исследования динамических нагрузок в машинах широко используется подход, основанный на переходе от реального объекта к эквивалентной расчетной схеме [200, 201].

На рисунке 2.10 приведена разработанная расчётная приведённая схема технологического участка между первой и второй клетями. Полоса перемещается по технологическому участку с заданными значениями скорости V и натяжения T . Рабочие валки приводятся в движение двухякорными двигателями постоянного тока, соединёнными с рабочими валками через редукторы. Двигатели всех 5-ти клеток одинаковые, на расчётной схеме представлены моментами инерции якорей верхнего ($J_{д.в.1}$, $J_{д.в.2}$) и нижнего валков ($J_{д.н.1}$, $J_{д.н.2}$), соответственно первой и второй клеток. Приведённые к валу электродвигателя моменты инерции верхних и нижних рабочих и опорных валков обозначены $J_{в.1}$, $J_{н.1}$, $J_{в.2}$, $J_{н.2}$ (соответственно). Главный привод состоит из комбинированных редукторов, промежуточных соединений, муфты предельного момента и электродвигателей. Наибольшие

зазоры в зацеплениях и промежуточных элементах механической части обозначены как $\Delta\varphi$.

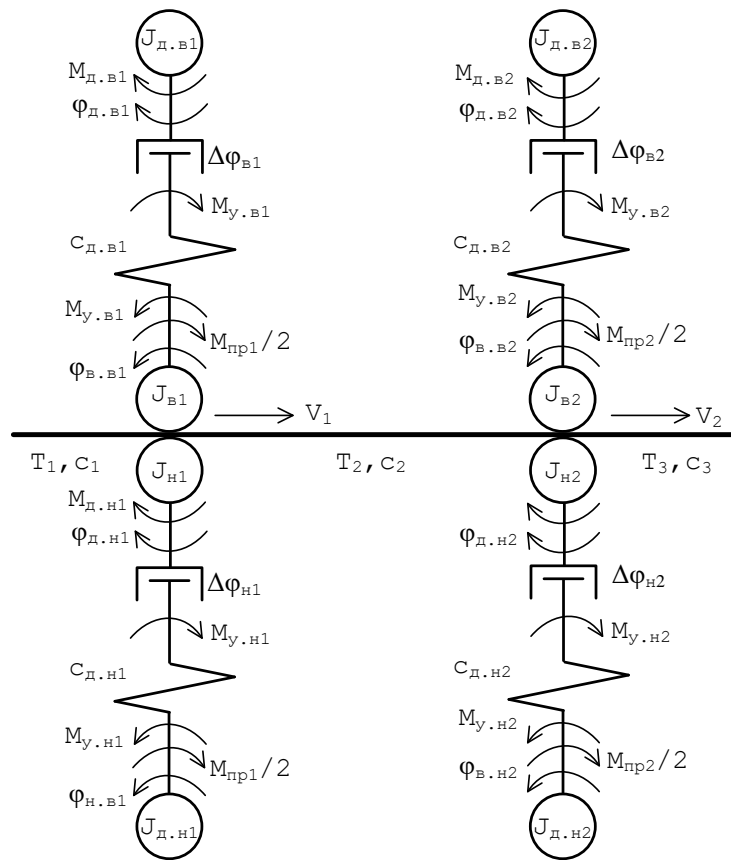


Рисунок 2.10 – Расчётная приведённая схема межклетевого промежутка

Схема представляет собой многомассовую механическую систему с зазорами и упругостями. Связь между верхним и нижним рабочими валками считаем абсолютно жесткой. Анализ динамических процессов в такой системе представляет определенные трудности и на практике он дополнительно осложняется отсутствием количественных характеристик всех элементов связи.

При построении расчетной схемы был сделан ряд общепринятых допущений, позволяющих упростить систему, без изменения характера протекающих в ней основных динамических процессов, определяемых элементами с наибольшими массами и наименьшими жесткостями [202, 203]:

– массивные и жесткие тела, считаются абсолютно жесткими, а вся их масса предполагается сосредоточенной в точках, совпадающих с центрами тяжести;

– силы и моменты, действующие в системе, приложены к сосредоточенным массам;

– упругие звенья, связывающие сосредоточенные массы, невесомы и характеризуются постоянством жесткости связи;

– деформация упругих звеньев линейна и подчиняется закону Гука;

– волновыми процессами, связанными с распределением деформации по длине, можно пренебречь.

Механизмы, которыми осуществляется транспортировка материалов, относятся к группе механизмов с модулем упругости второго рода. Отличительной чертой механических систем с модулем упругости второго рода от других механических систем является необходимость не только стабилизировать силы упругости, чтобы избежать разрушения оборудования, но и регулировать эти силы. Системы с упругостью не всегда могут быть представлены в виде двухмассовой модели. В нашем случае механическая схема электропривода представляет собой четыре локальные системы, содержащие упругие звенья первого рода, связанные между собой упругостью второго рода [202].

Связь соседних клеток непрерывного стана через межклетевой промежуток характеризуется тремя параметрами: толщиной H , скоростью V и натяжением полосы T и описывается дифференциальным уравнением [193]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{E \cdot B \cdot H}{L} (V_2 - V_1),$$

где E – модуль упругости полосы; B , H – средняя ширина и толщина металла в межклетевом промежутке, соответственно; L – длина межклетевого промежутка; V_2 , V_1 – скорости выхода полосы из клеток.

Выходная скорость полосы связана со скоростью валков через опережение S :

$$V_1 = (1 + S) \cdot V_{cp.в.1},$$

где $V_{cp.в.}$ – средняя окружная скорость валков первой клетки.

Движение системы в соответствии со схемой, изображённой на рис. 2.10 описывается системой дифференциальных уравнений, дополненных уравнением поведения полосы на участке длиной L . Например, для первой клетки, когда все параметры механической части приведены к валу электродвигателя, имеем [202]:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{д.в.1} - M_{y.в.1} + \frac{(T_2 - T_1)}{2} \cdot R_{в.1} = J_{д.в.1} \frac{d\omega_{д.в.1}}{dt} \\ M_{д.н.1} - M_{y.н.1} + \frac{(T_2 - T_1)}{2} \cdot R_{н.1} = J_{д.н.1} \frac{d\omega_{д.н.1}}{dt} \\ M_{y.в.1} - \frac{M_{np1}}{2} = J_{в.1} \frac{d\omega_{в.1}}{dt} \\ M_{y.в.1} = c_{д.в.1} \left(\varphi_{д.в.1} - \varphi_{в.1} - \frac{\Delta\varphi_{в.1}}{2} \right) \quad \text{при } |\varphi_{д.в.1} - \varphi_{в.1}| < \frac{\Delta\varphi_{в.1}}{2} \\ M_{y.в.1} = 0 \quad \text{при } |\varphi_{в.1} - \varphi_{д.в.1}| \geq \frac{\Delta\varphi_{в.1}}{2} \\ M_{y.н.1} - \frac{M_{np1}}{2} = J_{н.1} \frac{d\omega_{н.1}}{dt} \\ M_{y.н.1} = c_{д.н.1} \left(\varphi_{д.н.1} - \varphi_{н.1} - \frac{\Delta\varphi_{н.1}}{2} \right) \quad \text{при } |\varphi_{д.н.1} - \varphi_{н.1}| < \frac{\Delta\varphi_{н.1}}{2} \\ M_{y.н.1} = 0 \quad \text{при } |\varphi_{н.1} - \varphi_{д.н.1}| \geq \frac{\Delta\varphi_{н.1}}{2} \\ V_{в.1} = \omega_{в.1} \cdot R_{в.1}; V_{н.1} = \omega_{н.1} \cdot R_{н.1}; V_{cp.в.1} = \frac{V_{в.1} + V_{н.1}}{2} \\ V_1 = (1 + s) \cdot V_{cp.в.1} \end{array} \right. ,$$

где $M_{д.в.1}$, $M_{д.н.1}$ – электромагнитные моменты электродвигателей верхнего и нижнего валков; $M_{y.в.1}$, $M_{y.н.1}$ – моменты упругого взаимодействия в кинематических связях верхнего и нижнего валков; переднее и заднее натяжения T_1 и T_2 ; $M_{np.1}$ – момент прокатки первой клетки; $c_{д.в.1}$, $c_{д.н.1}$ – приведённые жёсткости между электродвигателем и соответственно верхним и нижним валком; $R_{в.1}$, $R_{н.1}$ – радиусы верхнего и нижнего рабочих валков; $V_{в.1}$, $V_{н.1}$ – окружные скорости верхнего и нижнего рабочих валков.

Аналогично записываются уравнения для второй клетки. Для получения имитационной модели клетки на основании вышеприведенной схемы уравнений используется метод «Переменных состояния» [204-206].

Данный метод позволяет уменьшить количество динамических звеньев при построении структурной модели исследуемого объекта.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{\partial.с.1} \\ \dot{\omega}_{\partial.н.1} \\ \dot{\omega}_{с.с.1} \\ \dot{\omega}_{н.с.1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{\partial.с.1} \\ \omega_{\partial.н.1} \\ \omega_{с.с.1} \\ \omega_{н.с.1} \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{J_{\partial.с.1}} & 0 & -\frac{1}{J_{\partial.с.1}} & 0 & -\frac{R_{с1}}{2J_{\partial.с.1}} & \frac{R_{с1}}{2J_{\partial.с.1}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_{\partial.н.1}} & 0 & -\frac{1}{J_{\partial.н.1}} & -\frac{R_{н1}}{2J_{\partial.н.1}} & \frac{R_{н1}}{2J_{\partial.н.1}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_{с.1}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2J_{с.1}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_{н.1}} & 0 & 0 & -\frac{1}{2J_{н.1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{\partial.с.1} \\ M_{\partial.н.1} \\ M_{у.с.1} \\ M_{у.н.1} \\ T_1 \\ T_2 \\ M_{нр1} \end{bmatrix}, \\
 \begin{bmatrix} \omega_{\partial.с.1} \\ \omega_{\partial.н.1} \\ \omega_{с.с.1} \\ \omega_{н.с.1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{\partial.с.1} \\ \omega_{\partial.н.1} \\ \omega_{с.с.1} \\ \omega_{н.с.1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{\partial.с.1} \\ M_{\partial.н.1} \\ M_{у.с.1} \\ M_{у.н.1} \\ T_1 \\ T_2 \\ M_{нр1} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Наличие зазоров в приводе прокатной клетки учитывается зависимостью момента в упругой передаче от разности углов поворотов инерционных масс $M_{y_i} = c_i(\varphi_i - \varphi_{i-1})$, с учётом этого динамическая модель механической части первой клетки прокатного стана, реализованная с помощью программной среды *MATLAB* (лицензия № 250111/6) с приложениями *Power System Blockset* и *Simulink* показана на рисунке 2.11.

В блоке «*State-Space*» записаны уравнения состояния механической части привода клетки. На вход блока заданы моменты электродвигателей

верхнего и нижнего валков $M_{д.н1}$ и $M_{д.в1}$, переднее и заднее натяжения T_1 и T_2 , а также момент прокатки в клетке $M_{пр.1}$.

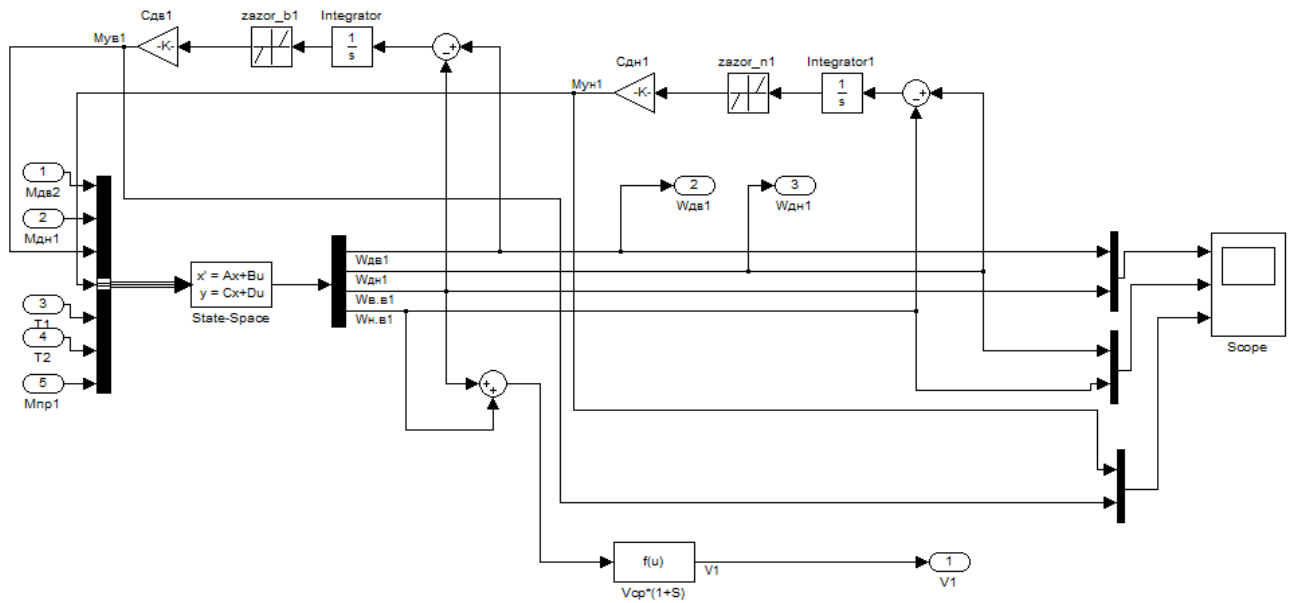


Рисунок 2.11 – Имитационная модель механической части клетки непрерывного стана холодной прокатки.

Динамическая модель двухякорной машины, записанной в виде «Переменных состояния» имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{я1} \\ \dot{i}_{я2} \\ \dot{i}_{\epsilon1} \\ \dot{i}_{\epsilon2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{я1}}{L_{я1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{я2}}{L_{я2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{\epsilon2}}{L_{\epsilon2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_{\epsilon1}}{L_{\epsilon1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{я1} \\ i_{я2} \\ i_{\epsilon1} \\ i_{\epsilon2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{я1}} & 0 & 0 & -\frac{k}{L_{я1}} & 0 \\ \frac{1}{L_{я2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{k}{L_{я1}2} \\ 0 & \frac{1}{L_{\epsilon1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_{\epsilon2}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{н} \\ U_{\epsilon1} \\ U_{\epsilon2} \\ \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{я1} \\ \dot{i}_{я2} \\ \dot{i}_{\epsilon1} \\ \dot{i}_{\epsilon2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{я1} \\ i_{я2} \\ i_{\epsilon1} \\ i_{\epsilon2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{н} \\ U_{\epsilon1} \\ U_{\epsilon2} \\ \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$

Структурная схема показана на рисунке 2.12.

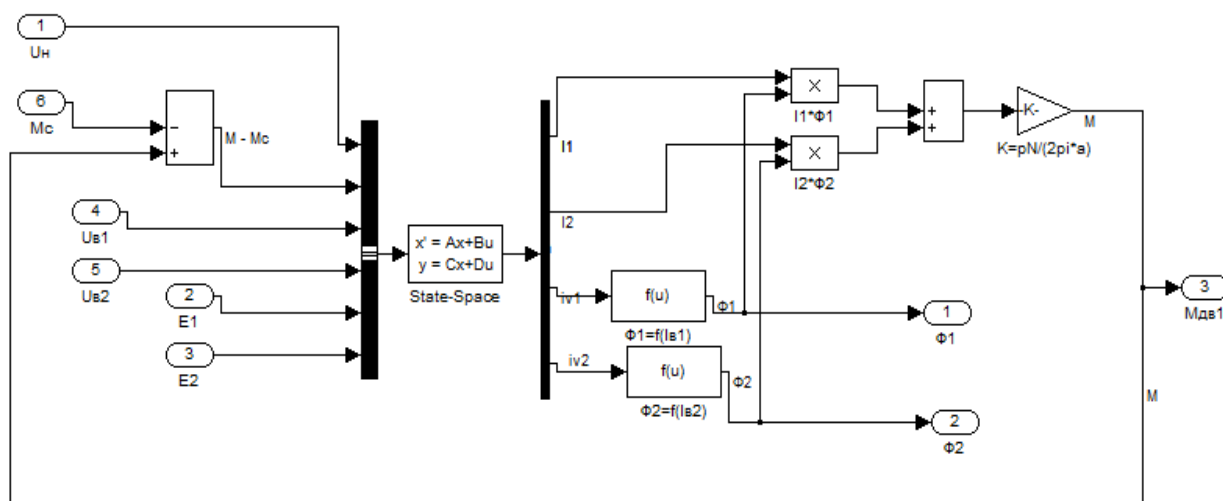


Рисунок 2.12 – Динамическая модель двухякорной машины

Изменение магнитного потока вносит нелинейность в математическое описание процессов преобразования энергии в электродвигателе, поэтому были дополнительно рассмотрены варианты описания обмотки возбуждения с помощью полиномов 2, 3, 5, и 6 порядков. С помощью программы «Advanced Grapher» построена кривая намагничивания по паспортным данным электродвигателя и методом регрессионного анализа найдено уравнение, учитывающее параметры цепи возбуждения при работе с номинальным ($\Phi_{\text{ном}}=0,259$ Вб) и минимальным ($\Phi_{\text{мин}}=0,1133$ Вб) потоком. В результате уравнение кривой намагничивания имеет вид [207]:

$$\Phi(i_g) = 2,695704 \cdot 10^{-11} \cdot i_g^6 - 4,7309075 \cdot 10^{-9} \cdot i_g^5 + 3,554073 \cdot 10^{-7} \cdot i_g^4 - 9,7034341 \cdot 10^{-6} \cdot i_g^3 - 8,756136 \cdot 10^{-5} \cdot i_g^2 + 0,0131278 \cdot i_g + 6,7868104 \cdot 10^{-5}$$

2.2.2 Комплексная модель электромеханической системы привода непрерывного прокатного стана

Входными воздействиями на комплексную модель электромеханической системы привода непрерывного прокатного стана, учитывающую электродвигатель, механическую часть привода, опорные и рабочие валки стана являются напряжения якоря u и момент сопротивления движению M_C ,

выходными переменными – электромагнитный момент двигателя M и скорость вращения вала двигателя ω , а переменными состояниями – переменные стоящие под знаком производной: ток якоря i и скорость вращения вала двигателя ω . Численные значения остальных параметров, входящих в состав уравнений (2.1), задаются при расчетах.

Так как рассматриваемый двигатель является двухякорным, то полученная модель характеризуется удвоением цепи якоря.

Математическая модель промежуточных валов, рабочих и опорных валков описывается следующим образом: модель отображает передачу вращающего момента через вал с учетом разности оборотов между его ведущей и нагруженной сторонами. Переданный вращающий момент T может быть выражен следующим уравнением:

$$T = K \int (\omega_m - \omega_l) dt + B(\omega_m - \omega_l),$$

где K – жесткость вала; B – внутреннее демпфирование; ω_m и ω_l – скорости ведущей и нагруженной стороны, соответственно.

Жесткость определяется следующими выражениями:

$$K = T/\theta,$$

где T – вращающий момент скручивания; θ – угловое отклонение.

$$K = GJ_n/l,$$

где G – модуль сдвига; J_n – полярный момент инерции; l – длина вала.

Полярный момент инерции J_n вала с круглым сечением диаметром D равен:

$$J_n = \pi D^4/32.$$

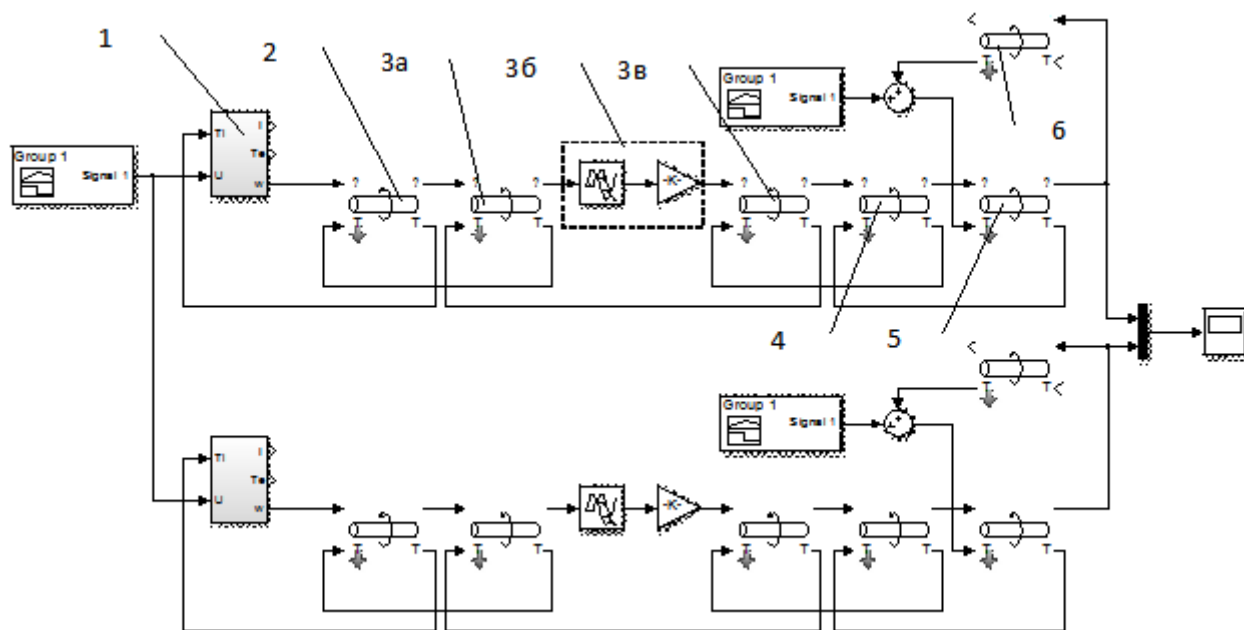
Фактор демпфирования B представляет собой внутреннее трение. Величина демпфирования увеличивается вместе с жесткостью вала. Так, фактор демпфирования B обычно численно меньше жесткости вала примерно в 30 раз. Внутреннее демпфирование должно быть высоким для того, чтобы избежать возникновения нежелательной переходной скорости и колебаний вращающего момента. Жесткость вала так же должна быть достаточно

высокой для того, чтобы избежать больших угловых отклонений, которые могут вызвать повреждения в подшипниках.

Для получения скорости вращения нагруженной стороны ω_l применяются уравнения (2.1), так же как и при создании модели двигателя.

Поскольку моменты инерции соединительных устройств (муфт) незначительны по сравнению с моментами инерции промежуточных валов, рабочих и опорных валков, то при математическом моделировании они были включены в общую характеристику промежуточных валов.

Модели двигателя, опорных валов и прокатных приводных рабочих валков объединены в электромеханическую модель привода клетки прокатного стана, реализованную в среде *MATLAB Simulink* и показанную на рисунке 2.13.



1 – электродвигатель; 2 – промежуточный вал (от двигателя к редуктору); 3а – входной вал редуктора; 3б – зубчатое соединение редуктора; 3в – выходной вал редуктора; 4 – шпиндель; 5 – рабочий валок; 6 – опорный валок

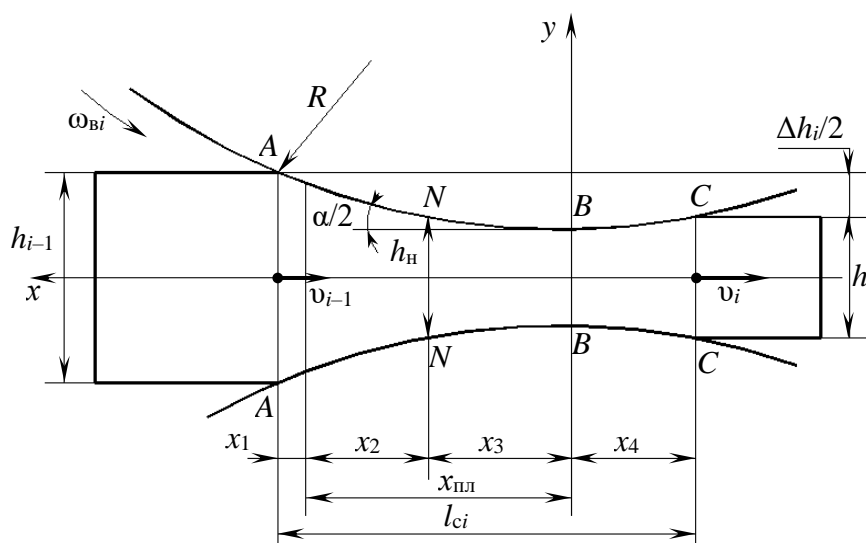
Рисунок 2.13 – *Simulink*-модель главного привода рабочей клетки:

2.3 Модель очага деформации и метод расчета его основных параметров

Математическое описание очага деформации i -й рабочей клетки основано на упругопластической схеме, в которой полоса рассмотрена как тонкое упругопластическое тело, а валки – как массивные упругие тела [208–211].

В соответствии с принятой схемой (рисунок 2.14) очаг деформации состоит из трех участков:

- 1) упругого сжатия полосы длиной x_1 ;
- 2) пластической деформации длиной $x_{пл}$, состоящий из двух зон: отставания длиной x_2 и опережения длиной x_3 ;
- 3) упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации длиной x_4 .



h_n – толщина полосы в нейтральном сечении; α – угол захвата; x_1, x_2, x_3, x_4 – конструктивные параметры очага деформации; h_i – толщина полосы на выходе из очага деформации; $x_{пл}$ – толщина полосы на участке пластической деформации; l_{ci} – длина очага деформации

Рисунок 2.14 – Схема упругопластической модели очага деформации:

2.3.1 Метод расчета параметров холодной прокатки

Изменения в сфере ИТ-технологий, произошедшие в последние десятилетия, позволяют отказаться от применения только аналитических моделей при проектировании технологий производства, при настройке и управлении оборудованием прокатных станов, при прогнозировании качества проката.

Одними из современных систем численно-математического моделирования, позволяющих строить динамические модели, являются системы *MATLAB/Simulink*, *VisSim*, *iWebSim*, *Dynamic Simulation Suite* и др. Для всестороннего исследования процесса холодной прокатки была программно реализована комплексная физико-математическая модель, позволяющая определять геометрию очага деформации, контактные напряжения, усилия, момент и мощность прокатки в функции времени с учетом колебаний технологических параметров, толщины и физико-механических характеристик прокатываемой полосы, крутильных колебаний в системе привода.

В качестве математической основы использованы положения и методы расчета геометрических и энергосиловых параметров очага деформации, изложенные в работах [208–211]. Основные математические выражения представлены ниже.

Длина очага деформации l_{ci} определяется по формуле:

$$l_{ci} = x_1 + x_{пл} + x_4.$$

Протяженность второго упругого участка определяется закономерностями упругого сплющивания полосы и рабочего валка, поэтому для ее вычисления используется классическая формула теории упругости – формула Герца:

$$x_4 = 8p_{срi}R \left(\frac{1 - \nu_B^2}{\pi E_B} + \frac{1 - \nu_{II}^2}{\pi E_{II}} \right),$$

где $p_{срi}$ – среднее значение нормальных контактных напряжений в очаге деформации; R – радиус бочки рабочих валков; ν_B, E_B – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала валков; $\nu_{П}, E_{П}$ – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала полосы.

Протяженность первого упругого участка и пластического определяется путем аппроксимации контактных поверхностей на соответствующих участках плоскостями и несложных геометрических вычислений:

$$x_1 + x_{Пл} = \sqrt{R\Delta h_i + x_4^2},$$

где Δh_i – абсолютное обжатие.

Для описания изменения сопротивления деформации полосы $\sigma_{\phi i}$ в зависимости от степени суммарного обжатия использована формула:

$$\sigma_{\phi i} = \sigma_{0,2исх} + \frac{A}{B+1} \cdot \frac{\varepsilon_{\Sigma i}^{B+1} - \varepsilon_{\Sigma i-1}^{B+1}}{\varepsilon_{\Sigma i} - \varepsilon_{\Sigma i-1}},$$

где $\sigma_{0,2исх}$ – предел текучести материала полосы в исходном, недеформированном состоянии; A, B – эмпирические величины, определяемые пластическими свойствами стали; $\varepsilon_{\Sigma i-1}, \varepsilon_{\Sigma i}$ – суммарные относительные обжатия в соответствующих клетях.

Выходной переменной модели очага деформации в линию электропривода (рисунок 2.1) является момент M_{Bi} , необходимый для обеспечения процесса прокатки в i -й клетке:

$$M_{Bi} = M_{при} + M_{тр.лi} + M_{опi} + M_{натi},$$

где $M_{при}$ – момент прокатки; $M_{тр.лi}$ – момент трения в подшипниках рабочих валков; $M_{опi}$ – момент, необходимый для вращения холостых опорных валков; $M_{натi}$ – момент, возникающий от разности сил заднего и переднего натяжений.

Расчет момента прокатки производится по формуле, в которой не применяются эмпирические коэффициенты плеча силы прокатки:

$$M_{при} = \frac{N_{при}}{\omega_{Bi}},$$

где $N_{при}$ – мощность прокатки, рассчитываемая с учетом работы прокатки на каждом упругом и пластическом участках очага деформации; ω_{vi} – окружная скорость рабочих валков, подаваемая на вход модели очага деформации от электродвигателя.

Момент трения в подшипниках рабочих валков определяется на основе составления и анализа схемы действия сил и моментов в клетке «кварто» с приводными рабочими валками:

$$M_{тр.пи} = R_{P\Sigma} \cdot \rho_p,$$

где $R_{P\Sigma}$ – сумма горизонтальных сил, действующих на шейки рабочего валка в качестве реакций, возникающих в подушках и подшипниковых опорах под влиянием натяжений полосы и других рабочих нагрузок; ρ_p – радиус круга трения в подшипниках рабочего валка.

Момент, необходимый для вращения холостых опорных валков:

$$M_{опi} = P_{опi} \cdot d_p,$$

где $P_{опi}$ – межвалковая сила, действующая от приводного рабочего валка на холостой опорный валок; d_p – расстояние от оси рабочего валка до линии действия силы $P_{опi}$.

Момент, возникающий от разности сил заднего и переднего натяжений:

$$M_{натi} = \frac{N_i - N_{i-1}}{2} R,$$

где N_{i-1} , N_i – силы заднего и переднего натяжений полосы.

Задание на скорость входа полосы в $(i+1)$ -ю клетку (v_i) может осуществляться через скоростные параметры предыдущей i -й клетки – угловую скорость вращения рабочих валков ω_{vi} и опережение S_i :

$$v_i = (1 + S_i) \cdot \omega_{vi} \cdot R.$$

2.4 Модель опережения при тонколистовой прокатке

Непрерывные станы получили широкое распространение ввиду следующих значительных преимуществ:

1. Возможность значительно повысить скорость прокатки и производительность стана.

2. Уменьшение охлаждения проката за время его прокатки, что в ряде случаев позволяет уменьшить температуру нагрева и потери энергии.

3. Возможность уменьшить производственные площади и массу оборудования станов.

Однако развитие непрерывной прокатки привело к необходимости точного регулирования скоростного режима валков прокатных клетей. Одновременная прокатка заготовки в нескольких клетях возможна только тогда, когда скорость «выхода» заготовки из данной клетки равна скорости ее «входа» в последующую (соседнюю) клеть. Нарушение этого условия приводит или к разрыву проката, или к быстрому возрастанию петли между клетями и аварии. Даже малые изменения скоростей валков в соседних клетях приводит к появлению межклетевых усилий – натяжений или «подпоров» (как правило, для заготовок больших сечений).

Развитие непрерывной прокатки потребовало более глубокого изучения скоростных режимов, но только в 1874 г. С. Финк четко показал, что при прокатке имеет место опережение и скорость выхода проката из валков больше, чем окружная скорость валков и поэтому

$$v_1 = v_g(1 + S)$$

где v_1 – скорость проката, v_g – окружная скорость валков, S – безразмерная величина, характеризующая опережение.

В дальнейшем опыты Б. Бласса в Германии и Р.Р. Тонкова в России (в Колпино, около 1901 г.) подтвердили наличие опережения и определили их величины). Библиографические ссылки приведены в работе [212].

Постановка задачи.

Предполагаем, как обычно, что в зоне деформации, см. рис. 2.15, имеется нейтральное сечение, определяемое углом γ . Касательные напряжения τ_n изменяют знак в нейтральном сечении. Усредняя нормальные

σ_n и касательные τ_n напряжения вдоль дуги захвата, можно записать уравнение равновесия

$$\sigma_1 h_1 - \sigma_0 h_0 - 2 \int_0^\alpha \sigma_n R \sin \varphi d\varphi + 2 \int_\gamma^\alpha \tau_n R \cos \varphi d\varphi - 2 \int_0^\gamma \tau_n R \cos \varphi d\varphi = 0$$

или

$$\sigma_1 h_1 - \sigma_0 h_0 - 2\sigma_n R(1 - \cos \alpha) + 2\tau_n R(\sin \alpha - \sin \gamma) - 2\tau_n R \sin \gamma = 0, \quad (2.2)$$

где σ_1 и σ_0 – напряжения переднего и заднего натяжений, α – угол захвата, R – радиус валков.

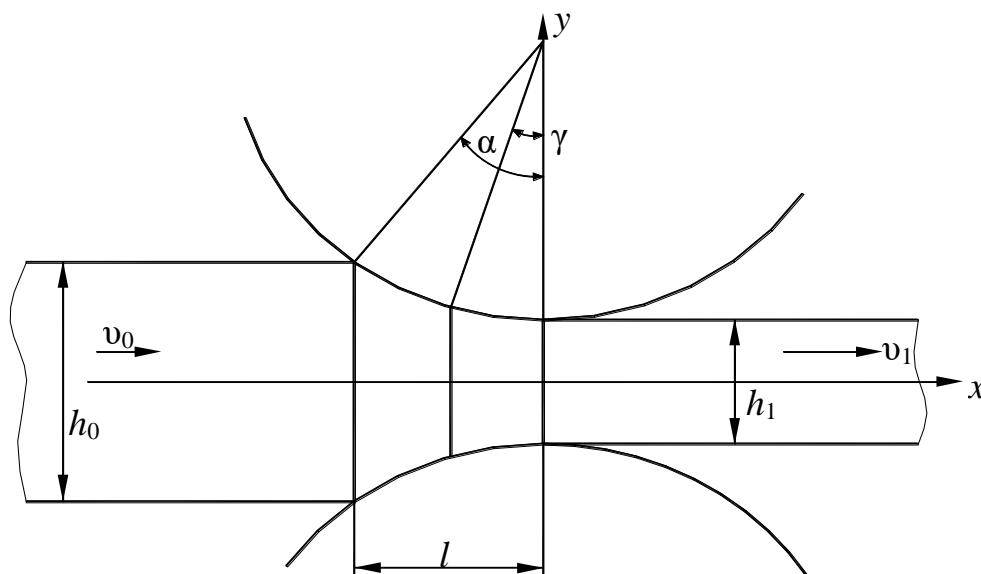


Рисунок 2.15 – Схема деформации при прокатке

Далее надо рассматривать отдельно случаи горячей прокатки и холодной прокатки, поскольку только при холодной прокатке можно использовать закон «сухого трения»:

$$\tau_n = \mu \sigma_n, \quad (2.3)$$

где μ – коэффициент трения.

При горячей прокатке этот закон, в виду больших величин коэффициента трения, приводит к величинам $\tau_n > k$, где k – предел текучести (сопротивление деформации) при сдвиге. Обычно $k = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}$, где σ_T – предел

текучности при одноосном растяжении-сжатии. Поэтому, при горячей прокатке обычно принимают

$$\tau_n = k, \quad (2.4)$$

(а иногда $\tau_n = \psi k$, где ψ – некоторая постоянная в диапазоне $0 < \psi \leq k$, определяющая трение в данных условиях), [38].

Рассмотрим сначала случай горячей прокатки, используя (2.4), и получим уравнение

$$\sigma_1 h_1 - \sigma_0 h_0 - 4\sigma_n R \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2kR \sin \alpha - 4kR \sin \gamma = 0.$$

Обозначив удельные натяжения $\varphi_1 = \frac{\sigma_1}{2k}$, $\varphi_0 = \frac{\sigma_0}{2k}$ и $\frac{\sigma_n}{2k} \approx n_\sigma$, где n_σ – коэффициент напряженного состояния, определяем

$$\sin \gamma = \frac{\varphi_1 h_1 - \varphi_0 h_0}{2R} + 0,5 \sin \alpha \left(1 - 2n_\sigma \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)$$

или

$$\sin \gamma = \frac{\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0}{2\varepsilon} \sin^2 \alpha + 0,5 \sin \alpha \left(1 - 2n_\sigma \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \quad (2.5)$$

Опережение S равно

$$S = \cos \gamma \frac{h_H}{h_1} - 1 = \frac{R}{h_1} \cos \gamma \sin^2 \gamma,$$

а если принять $\cos \gamma \approx 1,0$, что для малых углов γ допустимо, то получим известную формулу [28]

$$S = \frac{R}{h_1} \sin^2 \gamma, \quad (2.6)$$

которую удобно, учтя, что

$$\frac{R}{h_1} = \frac{l^2}{h_1 \Delta h} = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \frac{\Delta h}{h_1} = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon) \sin^2 \alpha},$$

преобразовать к виду

$$S = \frac{\varepsilon \sin^2 \gamma}{1 - \varepsilon \sin^2 \alpha} \quad (2.7)$$

Очевидно, что минимально допустимое значение $\gamma = 0$, при $S_{\min} = 0$, а максимальное при $\gamma = \alpha$

$$S_{\max} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}.$$

При $\gamma = 0$ имеет место пробуксовка – скольжение по всей дуге захвата (только одна зона отставания), а при $\gamma = \alpha$ реализуется режим волочения, когда (за счет переднего натяжения) полоса всюду движется быстрее, чем валки.

Определение опережения при горячей прокатке.

Использование для определения опережения уравнения равновесия в виде (2.2) и (2.4) часто используют см. [28, 29, 198], но применение только уравнение равновесия недостаточно. Уравнения равновесия могут зависеть от свойств тела, равновесие которого мы используем. Отметим принципиальную особенность рассмотрения равновесия в условиях пластической деформации, не учитываемую в работах по прокатке.

Обычно равновесие тела рассматривают в виде трех уравнений

$$\sum P_{ix} = 0, \quad \sum P_{iy} = 0, \quad \sum M_i = 0 \quad .$$

(в пространстве шесть аналогичных уравнений).

Суммы проекций всех сил на оси X, Y, P_{ix} и P_{iy} должны быть равны нулю, (также как и сумма моментов M_i относительно какой-либо оси). Это известные в механике условия равновесия жесткого тела, где все силы P_{ix} и P_{iy} независимы. Но очаг деформации не является жестким телом – это пластически деформируемое тело.

Рассмотрим, например, изгиб балки длиной l , нагруженной в центре, силой P_1 , см. рис. 2.16.

Если нам задано, что данное тело (балка) является жесткой, то величины усилий нам неизвестны. Из уравнений равновесия (и условий симметрии) мы можем только утверждать, что $P_2 = P_3 = 0,5P_1$, но величина P_1 не определена. Но известна информация о том, что «тело является жесткопластическим» и

реализуется пластическая деформация, то усилие P_1 может быть определено, например, в виде

$$P_1 = \sigma_T \frac{bh^2}{l},$$

(где известны размеры прямоугольного сечения балки, ее длина и предел текучести σ_T).

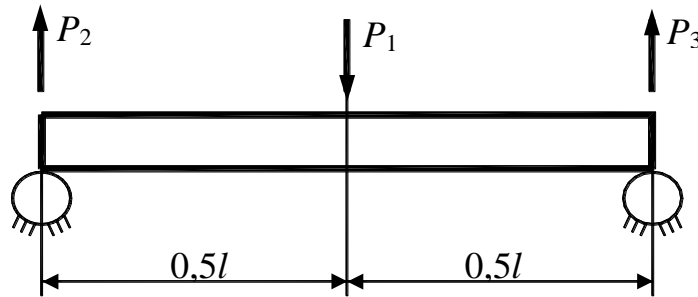


Рисунок 2.16 – Схема определения усилий, действующих на балку, при различных характеристиках ее деформации

Если мы примем, что материал балки находится в зоне упругих деформаций (и следует закону Гука), то сила будет определена, если известен максимальный прогиб f (в центре длины балки), то

$$P_1 = \frac{Pl^3}{4Ebh^3},$$

где E – модуль упругости, (если прогиб неизвестен, то неизвестна и сила P_1).

Для иных сред, например, упругопластических, пластических с упрочнением и т.д., информация о свойствах материала балки и ее деформации определит усилие. Сами «условия равновесия» зависят от материала тела и условий его деформации.

Какие выводы можно сделать из утверждения: *данное тело находится в равновесии*. Для ответа необходима информация о том «что это за тело», которое находится в равновесии? Если ответ: данное тело является жестким, (абсолютно жестким, как принимают в теоретической механике), то ответ таков: можно выразить силы P_2 и P_3 через P_1 , а сила P_1 остается неизвестной.

В случае прокатки, также следует учитывать то факт, что ввиду пластической деформации, горизонтальные силы (натяжения), могут оказывать влияние на уравнения равновесия, не только изменяя условие равенства нулю всех сил, действующих вдоль оси X , рис. 2.15, но также изменяя силы, действующие вдоль оси Y . Натяжения могут существенно изменить величины σ_n или n_σ , которые содержатся в формулах (2.2) и (2.5).

При определении угла γ и опережения реализуется двойное влияние натяжений. Следует учитывать и непосредственное изменение горизонтальных сил, характеризуемое выражением

$$\left[\frac{\varphi_1 h_1 - \varphi_0 h_0}{2R} \right], \text{ или } \left[\frac{\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0}{2\varepsilon} \right],$$

но и дополнительное их влияние.

Если учесть влияние натяжений на величину n_σ по известной формуле [199, 200]

$$n_\sigma = n_{\sigma_0} (1 - 0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1), \quad (2.8)$$

то формулу (2.3) можно привести к виду

$$\sin \gamma = 0,5 \sin \alpha \left[1 - 2n_{\sigma_0} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \frac{\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0}{\varepsilon} \sin \alpha + (\varphi_0 + \varphi_1)n_{\sigma_0} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right],$$

где n_{σ_0} – величина коэффициента напряженного состояния, определенная без учета влияния натяжений. Удобно записать формулу для опережения в виде (см. формулу (2.7))

$$S = \frac{0,25\varepsilon}{1-\varepsilon} (1 - A_1 + A_2)^2, \quad (2.9)$$

где безразмерные параметры

$$A_1 = 2n_{\sigma_0} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (2.10)$$

$$A_2 = \varphi_1 \left[\frac{(1-\varepsilon) \sin \alpha}{\varepsilon} + n_{\sigma_0} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right] - \varphi_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\varepsilon} - n_{\sigma_0} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right).$$

Первый из них A_1 характеризует условия прокатки без натяжений, а второй – влияние натяжений на опережение.

Если $A_2 = 0, A_1 = 0$, то $S = 0$ – это предельные условия, при которых начнется буксование, (конечно, прокатка и в этих условиях возможна за счет переднего натяжения, но равновесие невозможно обеспечить до поступления проката в последующую клетку или в моталку).

Удобно, что влияние натяжений сводится к одному безразмерному параметру, учитывающему их влияние в данных конкретных условиях.

Приведем пример для случая горячей прокатки, используя формулы, см. [214, 215],

$$n_{\sigma_0} = 0,5 \left(m + \frac{1}{m} \right)$$

при $0,5 \leq m \leq 2,0$.

$$n_{\sigma_0} = 0,75 + 0,25m \tag{2.11}$$

при $m > 2,0$.

$m = \frac{l}{h_c} = \frac{2l}{h_0 + h_1}$ – отношение длины зоны деформации к средней толщине проката.

Примем $h_0 = 4$ мм, $h_1 = 2$ мм, $\Delta h = 2$ мм, $\varepsilon = 0,5$; $R = 330$ мм, $l = 25,7$ мм, $\sin \alpha = 0,08$ ($\alpha = 4^{\circ}34'$), $m = 8,57$; согласно (2.11) $n_{\sigma_0} = 2,9$. Следуя (2.10), определим $A_1 = 2 \cdot 2,9 \cdot 0,04 = 0,232$ и в случае прокатки без натяжений

$$S = \frac{0,25 \cdot 0,5}{0,5} (1 - 0,232)^2 = 0,15$$

$$\sin \gamma = 0,031$$

Параметр A_2 равен

$$A_2 = \varphi_1(0,08 + 0,116) - \varphi_0(0,16 - 0,116) = 0,196\varphi_1 - 0,044\varphi_0$$

На рис. 2.17 приведены графики $S(\varphi_1)$ и $S(\varphi_0)$ – линии 1 и 2, характеризующие зависимости опережения от переднего натяжения (при $\varphi_0 = 0$) – линия 1 и заднего натяжения (при $\varphi_1 = 0$) – линия 2. В случае, когда $\varphi_0 = \varphi_1 = 0,5$ для данного примера $A_2 = 0,076$; $S = 0,18$.

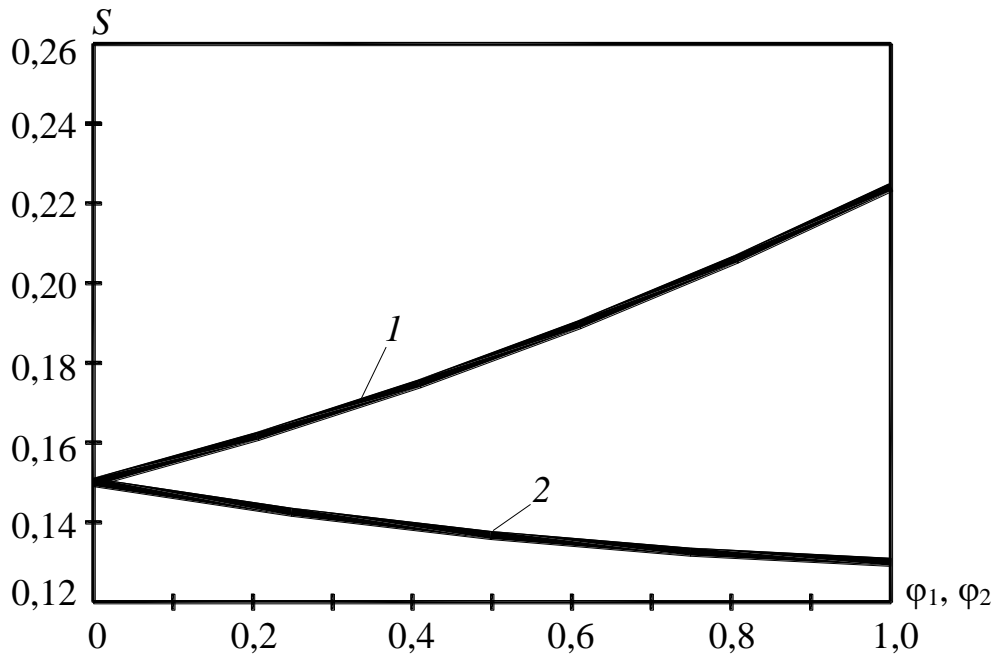


Рисунок 2.17 – Пример изменения опережения при горячей прокатке

Отметим важный факт: существует такой режим, при котором параметр $A_2 = 0$ и влияние натяжений на опережение отсутствует, (хотя натяжения не равны нулю и могут существенно уменьшить усилие прокатки). В данном примере $A_2 = 0$ при $\varphi_1 = 0,224\varphi_0$ и можно реализовать, например, натяжения $\varphi_0 = 0,2$; $\varphi_1 = 0,045$ при неизменном опережении.

В общем случае такой «нейтральный режим», когда натяжения не изменяют опережения, реализуется при
$$\frac{\varphi_1}{\varphi_0} = \frac{\sin \alpha - n_{\sigma_0} \varepsilon \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{(1 - \varepsilon) \sin \alpha + n_{\sigma_0} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

Опережение при холодной прокатке.

При холодной прокатке следует использовать формулу (2.3) и поэтому из равенства (2.2) получаем

$$\sin \gamma = 0,5 \sin \alpha \left[1 - \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\mu} + \frac{\varphi_1(1 - \varepsilon) - \varphi_0 \sin \alpha}{2\mu \varepsilon n_{\sigma}} \right].$$

Используя, как и ранее, формулу (2.8) для учета дополнительного влияния натяжений на удельное давление, получим и в этом случае возможность применения формулы (2.9) при

$$A_1 = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\mu} \quad (2.12)$$

$$A_2 = \frac{[\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0] \sin \alpha}{2\mu \varepsilon n_{\sigma_0} (1 - 0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1)}, \quad (2.13)$$

где n_{σ_0} – коэффициент напряженного состояния, определенный без учета влияния натяжений.

Однако при холодной прокатке следует учитывать упругую деформацию (сплющивание) валков, которая увеличивает длину дуги захвата и давление. Следуя работе [216], примем, что величина

$$n_{\sigma_0} = \frac{\exp(\mu t) - 1}{\mu t \sqrt[3]{1 - 1,4a \mu t n_{\sigma_1}}}$$

$n_{\sigma_1} = \frac{1}{\mu t} [\exp(\mu t) - 1]$ – величина коэффициента напряженного состояния, определенная без учета упругого сплющивания валков по формуле, аналогичной формуле Стоуна, (при номинальной величине « t » без учета сплющивания валков).

Параметр « a » характеризует упругую деформацию валков и его можно записать в виде [216]:

$$a = 1,15 \frac{c \sigma_T}{E \sin \alpha}, \quad (2.14)$$

c – постоянная, зависящая от распределения давления по дуге захвата и шероховатости поверхности валков, E – модуль упругости материала валков.

Если упрочнение при прокатке незначительно, то для шлифованных валков можно принять $c=4 \div 5$, а при поверхностной закалке валков с последующим шлифованием их поверхности $c=3,5$. использование валков с токарной обработкой поверхности приводит к увеличению постоянной « c » до $5,5 \div 5,8$.

С учетом изложенного, можно записать вместо (2.13)

$$A_2 = \frac{[\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0] m \sin \alpha \sqrt[3]{1-1,4a \mu m n_{\sigma_1}}}{2\varepsilon \cdot [\exp(\mu m) - 1] (1-0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1)},$$

а, учтя, что $m \sin \alpha = \frac{\varepsilon}{1-0,5\varepsilon}$, получим

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

Приведем пример холодной прокатки при $h_0 = 1,3$ мм, $h_1 = 0,85$ мм,

$$\Delta h = 0,45 \text{ мм}; R = 300 \text{ мм}, l = 11,6 \text{ мм}, m = \frac{11,6}{0,875} = 13,26; \sin \alpha = 0,039 (\alpha = 2^{\circ}33');$$

$$\varepsilon = \frac{0,45}{1,3} = 0,35; \mu = 0,03 \text{ и безразмерный параметр } A_1 \text{ согласно формуле (2.12)}$$

равен $A_1 = \frac{0,02}{0,03} = 0,67$, а опережение при отсутствии натяжений

$$S = \frac{0,25 \cdot 0,35}{1-0,35} (1-0,67)^2 = 0,015.$$

Приняв в формуле (2.14) $c = 4$, $\sigma_T = 4 \cdot 10^8$ Н/м², $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м², получим

$$a = \frac{1,15 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,039} = 0,24$$

а величина $\exp(\mu m) - 1 = \exp(0,4) - 1 = 0,492$.

Параметр A_2 , характеризующий влияние натяжений, равен

$$A_2 = \frac{(0,65\varphi_1 - \varphi_0) \sqrt[3]{1-1,4 \cdot 0,24 \cdot 0,492}}{2 \cdot 0,825 \cdot 0,492 \cdot (1-0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1)} = 0,675 \frac{(0,65\varphi_1 - \varphi_0)}{1-0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1}$$

и если $\varphi_0 = 0$; $\varphi_1 = 0,5$, то $A_2 = 0,29$

$$S = \frac{0,25 \cdot 0,35}{0,65} (1-0,67+0,29)^2 = 0,05$$

$$(\sin \gamma = 0,5 \cdot 0,039 (1-0,67+0,29) = 0,012).$$

Графики функций $S(\varphi_1)$ при $\varphi_0 = 0$ и $S(\varphi_0)$ при $\varphi_1 = 0$ приведены на рис. 2.18, (линии 1 – при $\varphi_0 = 0$ и 2 при $\varphi_1 = 0$). При увеличении переднего натяжения опережение быстро возрастает. Если же при $\varphi_1 = 0$ прокатку осуществляют с задним натяжением, то уже при $\varphi_0 = 0,38$ опережение равно

нулю и прокатка становится невозможной (происходит пробуксовка, а зона отставания имеет место по всей длине дуги захвата).

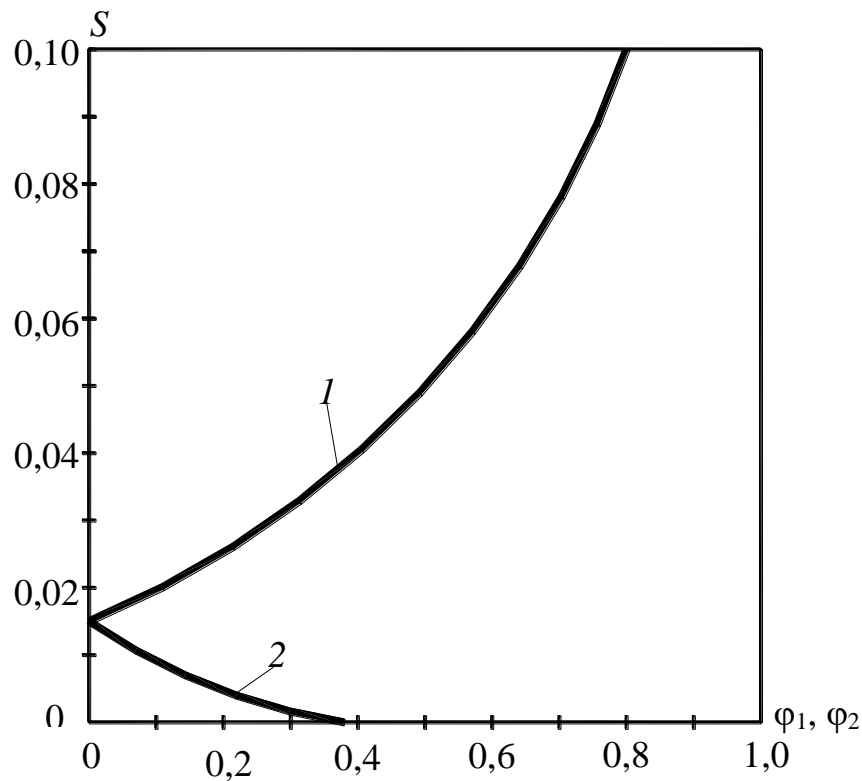


Рисунок 2.18 – Графики зависимости опережения от переднего и заднего натяжений при холодной прокатке

И при холодной прокатке возможен «нейтральный режим», когда параметр $A_2 = 0$ и натяжения не оказывают влияния на опережение, хотя они могут быть не равными нулю.

Это имеет место, если $\frac{\varphi_1}{\varphi_0} = \frac{1}{1-\varepsilon}$ или если использовать величину

$$\lambda = \frac{h_0}{h_1} = \frac{1}{1-\varepsilon}, \quad \frac{\varphi_1}{\varphi_0} = \lambda, \quad (2.15)$$

(для приведенного примера $\frac{\varphi_1}{\varphi_0} = 1,54$) (если можно пренебречь уширением, то λ – коэффициент вытяжки).

При непрерывной листовой прокатке $\frac{V_1}{V_0} = \lambda$. Видно, что при нейтральном режиме прокатки должно иметь место аналогичное

соотношение (2.15). Можно для каждой пары соседних клеток записать его в виде

$$\frac{\varphi_{11}}{\varphi_{01}} = \lambda_1; \quad \frac{\varphi_{12}}{\varphi_{02}} = \lambda_2; \quad \varphi_{11} = \varphi_{02}; \quad \frac{\varphi_{12}}{\varphi_{01}} = \lambda_1 \lambda_2.$$

Если осуществляют прокатку в непрерывной группе клеток с относительными деформациями $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, то возможна реализация такого режима, при котором с помощью моталки в первой клетке определяют заднее

натяжение φ_{01} , а переднее $\varphi_{11} = \frac{\varphi_{01}}{1 - \varepsilon_1} = \varphi_{11} \lambda_2$, т.е. $\varphi_{21} = \frac{\varphi_{01}}{(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} = \varphi_{01} \lambda_1 \lambda_2$.

Аналогично в третьей клетке

$$\varphi_{03} = \varphi_{21}, \quad \varphi_{13} = \frac{\varphi_{01}}{(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} = \varphi_{01} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3.$$

И далее следует выдерживать такие соотношения величин натяжений во всей непрерывной группе.

От безразмерных величин $\varphi_{01}, \varphi_{11}, \varphi_{02}, \varphi_{12}$ легко перейти к величинам усилий натяжений

$$T_{01} = 2k_1 b_0 h_0 \varphi_{01}, \quad T_{11} = 2k_1 b_1 h_1 \varphi_{11} = 2k_1 b_1 h_1 \lambda \varphi_{01} = 2k_1 b_0 h_0 \varphi_{01},$$

$$T_{02} = T_{11}, \quad 2k_1 b_0 h_0 \varphi_{01} = 2k_2 b_1 h_1 \varphi_{02}, \quad \varphi_{02} = \frac{k_1}{k_2} \lambda_1 \varphi_{01},$$

$$T_{12} = 2k_2 b_2 h_2 \varphi_{12} = 2k_2 b_2 h_2 \varphi_{02} \lambda_2 = 2k_2 b_1 h_1 \varphi_{02} = 2k_2 b_1 h_1 \frac{k_1}{k_2} \lambda_1 \varphi_{01}.$$

Следовательно, $T_{12} = 2k_1 b_0 h_0 \varphi_{01}$, т.е. величины $\varphi_{11}, \varphi_{12}$ и т.д. должны возрастать, а усилия натяжений быть постоянными. Здесь k_1, k_2, \dots величины пределов текучести при сдвиге в клетках непрерывного стана, $b_1, b_2, \dots, h_1, h_2, \dots$ – величины ширины и толщины проката (при $b = const, b_1 = b_2 = \dots$), T_{0i}, T_{1i} – переднее и заднее натяжения для клетки с номером i . В этих случаях нейтральный режим связан с постоянством усилий натяжений во всех клетках стана.

Такие режимы прокатки, которые можно назвать «нейтральными», обеспечивают величины опережений такие же, как при отсутствии натяжений, что повышает стабильность процессов прокатки. При этом коэффициенты φ_{11} , φ_{12} и т.д. следует увеличивать по ходу прокатки, если, например, $\varepsilon_1 = 0,2$; $\varepsilon_2 = 0,15$; $\varepsilon_3 = 0,15$ и принято заднее натяжение в первой клетки (обеспечиваемое моталкой) $\varphi_{01} = 0,2$; то $\varphi_{11} = \varphi_{02} = \frac{0,2}{1-0,2} = 0,25$ (при $k_1 = k_2 = k_3$), $\varphi_{12} = \varphi_{03} = \frac{0,25}{1-0,15} = 0,294$; $\varphi_{13} = \frac{0,294}{1-0,15} = 0,346$ (переднее натяжение в последней клетки непрерывной группы обеспечивается моталкой). Конечно, прокатка с натяжениями равными нулю тоже является «нейтральным режимом», но прокатка с натяжениями не равными нулю обеспечивает ряд серьезных преимуществ: повышает стабильность процесса деформации и устойчивость проката от боковых смещений; уменьшает давление на валки и усилия; способствует повышению устойчивости в отношении возникновения «коробоватости» или волнистости (у краев листа). Поэтому отказываться от прокатки с натяжениями нецелесообразно. Существуют и могут оказаться полезными такие режимы непрерывной прокатки, при которых натяжения могут быть использованы и даже быть значительными, но при этом их влияние на опережение равно нулю. При этом нет даже необходимости поддерживать их постоянными: их можно изменять, регулировать, однако соблюдая соотношения типа (2.15) между напряжениями в непрерывной группе прокатных клеток, т.е. равенство усилий $T_{0i} = T_{1i}$ во всех клетях [217].

2.4.1 Аналитическое моделирование колебания опережений при холодной листовой прокатке

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

В реальных производственных условиях, зная заданную скорость прокатки, режимы обжатий в клетях и диаметры валков, требуется с учетом опережения определить скорости вращения рабочих валков 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 стохастические колебания основных технологических параметров – скоростей, натяжений, моментов, токов двигателей). Указанные колебания не только влияют на качество проката и надежность оборудования, но и существенно (до 20–25%) увеличивают потери электрической энергии, снижая энергоэффективность процесса прокатки. Вопросы расчета опережения изложены в работах [213, 216].

Обычно опережение при стационарной прокатке полос в цилиндрических валках лежит в пределах 3–5% для черных металлов и 3–8% для цветных; при прокатке тонких листов оно достигает 10–15%.

Здесь можно привести аналогию с методами расчета усилий (моментов) прокатки, от их отклонений зависит точность прокатки (поскольку колебания величины усилия изменяют деформацию клетки, а, следовательно, толщину проката).

В 1966 г. М.Я. Бровманом была разработана методика расчета точности проката [27, 218]. При этом учтены возможные отклонения всех параметров прокатки от их номинальных величин.

Однако для величины опережения такой методики не разработано, что затрудняет выбор технологических режимов.

Для практических расчетов важно не только знать опережение S в каждой из прокатных клетей, 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.

Если расчетная величина опережения равна, например, $S = 0,10$, а реальный диапазон ее изменения $0,11 \div 0,13$, то такой режим прокатки существенно отличается от режима, при котором $S = 0,04 \div 0,16$. Во втором случае колебания опережения неизбежно приведут к значительным колебаниям натяжений в непрерывном стане, к значительной продольной разнотолщинности и к нестабильности процесса прокатки.

Если, например, величина радиуса валков изменится на величину ΔR , то, следуя формуле $S = \frac{R}{h_1} \sin^2 \gamma$, см. [213, 216], можно определить отклонение величины опережения ΔS :

$$\Delta S = \frac{\partial S}{\partial R} \Delta R = \frac{1}{h_1} \sin^2 \gamma \Delta R,$$

а относительное изменение опережения будет равным

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\sin^2 \gamma \Delta R h_1 \Delta R}{h_1 R \sin^2 \gamma} = \frac{\Delta R}{R}.$$

где $0 \leq \gamma \leq \alpha$ (γ – нейтральный угол, α – угол захвата), h_1 – толщина выходящей полосы.

Нейтральный угол может быть определен по формуле Экелунда:

$$\gamma = 0,5\alpha - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\alpha}{2} \right)^2.$$

Относительные отклонения у опережения и у номинальной величины радиуса (диаметра) валков будет одинаковы.

Отметим, что формулу для опережения удобно преобразовать от переменных R, h_1 к переменным α, ε , где α – угол захвата, $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$ – относительная деформация.

Поскольку $\frac{R}{h_1} = \frac{R \Delta h}{h_1 \Delta h} = \frac{l^2}{\Delta h^2}$, $\frac{\Delta h}{h_1} = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$, то опережение

$$S = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{\sin^2 \gamma}{\sin^2 \alpha}.$$

Отклонение величины нейтрального угла на величину $\Delta\gamma$ приведет к изменению S на величину

$$\Delta S = \frac{\partial S}{\partial \gamma} \Delta \gamma = \frac{2\varepsilon \sin \gamma \cos \gamma}{(1-\varepsilon) \sin^2 \alpha} = 2S \operatorname{ctg} \gamma \Delta \gamma,$$

или $\frac{\Delta S}{S} = 2 \operatorname{ctg} \gamma \Delta \gamma,$

или $\frac{\Delta S}{S} = 2\gamma \operatorname{ctg} \gamma \left(\frac{\Delta \gamma}{\gamma} \right).$

При малых углах захвата и малых величинах γ колебания положения нейтрального сечения могут быть очень большими, поскольку при $\gamma \rightarrow 0 \operatorname{ctg} \gamma \rightarrow \infty.$

Можно показать, что предел $\lim_{\gamma \rightarrow 0} (\gamma \operatorname{ctg} \gamma) = 1,$ (поскольку $\gamma \operatorname{ctg} \gamma = \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma},$ а

$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\gamma}{\sin \gamma} = 1).$ Поэтому колебания нейтрального угла $\Delta\gamma$ могут

создать изменение $\Delta S,$ определяемое при $\gamma \rightarrow 0$ величиной

$$\frac{\Delta S}{S} = \lim_{\gamma \rightarrow 0} (2\gamma \operatorname{ctg} \gamma) \frac{\Delta \gamma}{\gamma} = 2 \frac{\Delta \gamma}{\gamma}.$$

Конечно, на практике возможны изменения всех трех параметров: $R,$

h_1 и γ (или ε, α и γ) и в этом случае

$$\Delta S = \frac{\partial S}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial S}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial S}{\partial \gamma} \Delta \gamma,$$

или

$$\Delta S = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon + \frac{\partial S}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial S}{\partial \gamma} \Delta \gamma.$$

В наихудшем случае все колебания имеют один знак, и их следует сложить и если, например, колебания радиуса (за счет биений валков и погрешностей их обработки) и толщины достигают 1%, то это вызовет отклонение $\frac{\Delta S}{S} = 2\%.$

Но изменение нейтрального угла на $\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = 0,05$ приведет к изменению $\frac{\Delta S}{S}$

на 0,10.

Пусть, например, $\gamma = 5^\circ = 8,77 \cdot 10^{-2}$ рад. $ctg \gamma = 11,43$ и реализуются изменения (колебания) нейтрального угла на 1° . Это вызовет изменение величины опережения на $\frac{\Delta S}{S} = 2 \cdot \frac{1}{5} = 0,4$ – это значительная величина, которая может привести к появлению натяжений и нарушению стабильности процесса прокатки.

Следует указать, что поскольку диапазон колебаний нейтрального угла ограничен и всегда $0 \leq \gamma \leq \alpha$, то ограничено и опережение

$$0 \leq S \leq \frac{R}{h_1} \sin^2 \alpha \text{ или } 0 < S < \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}.$$

При $\gamma = 0$, когда на всей длине дуги захвата имеется отставание, начнется пробуксовка и прокатка становится невозможна. Если же $\gamma \geq \alpha$, то по всей дуге распространена зона опережения и реализуется режим волочения. Поэтому результаты при $\gamma < 0$ и $\gamma > \alpha$ являются недействительными.

При прокатке без натяжений обычно $\gamma < 0,5\alpha$ и $0 \leq S < \frac{0,25\varepsilon}{1 - \varepsilon}$.

Определим возможные колебания нейтрального угла, используя формулу Эжелунда:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \alpha} = 0,5 - \frac{\alpha}{\mu}, \quad \frac{\partial \gamma}{\partial \mu} = \frac{\alpha^2}{4 \cdot \mu^2},$$

где μ – коэффициент трения в очаге деформации.

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \frac{\left(0,5 - \frac{\alpha}{\mu}\right) \Delta \alpha}{0,5\alpha - \frac{\alpha^2}{4\mu^2}} + \frac{\alpha^2}{4\mu^2} \frac{\Delta \mu}{\left(0,5\alpha - \frac{\alpha^2}{4\mu^2}\right)},$$

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma} = 2\mu \frac{\mu - 2\alpha}{2\mu^2 - \alpha} \cdot \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\alpha \mu}{2\mu^2 - \alpha} \frac{\Delta \mu}{\mu}. \quad (2.16)$$

С учетом (2.16) можно записать:

$$\frac{\Delta S}{S} = C_1 \frac{\Delta R}{R} + C_2 \frac{\Delta h_1}{h_1} + \left(C_3 \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + C_4 \frac{\Delta \mu}{\mu} \right) \cdot 2\gamma \operatorname{ctg} \gamma \left(\frac{\Delta \gamma}{\gamma} \right);$$

здесь коэффициенты C_i ($i=1,2,3,4$) равны:

$$C_1 = 1, \quad C_2 = 1, \quad C_3 = \frac{2\mu(\mu - 2\alpha)}{2\mu^2 - \alpha}, \quad C_4 = \frac{\alpha\mu}{2\mu^2 - \alpha}, \quad (2.17)$$

где $i=1,2,\dots$ – коэффициенты, характеризующие зависимость относительной погрешности опережения от погрешности данного фактора. Из формулы (2.17) видно, что опасными являются режимы прокатки при $2\mu^2 - \alpha \rightarrow 0$, т.е. при $\alpha \rightarrow 2\mu^2$, когда и C_3 и C_4 стремятся к бесконечности.

При холодной прокатке обычно используют закон сухого трения [27, 216, 218, 219]. Если, например, $\mu = 0,10$, то при $\alpha = 0,02$ (угол $1,14 = 01^\circ 8,4'$) влияние погрешностей величин угла захвата и коэффициента трения может усилиться настолько, что это приведет к нарушению стабильности процесса прокатки и к усилению всех колебаний: натяжений, моментов и сил прокатки.

На некоторую аналогию с методиками расчета величин возможных колебаний энергосиловых параметров прокатки указано в работе [218].

Оценка неустойчивости опережения при горячей прокатке.

С использованием условий равновесия в зоны деформации при листовой прокатке методами работы [216] получаем уравнение для определения величины нейтрального угла γ

$$\sin \gamma = \frac{\varphi_1 h_1 - \varphi_0 h_0}{2R} + 0,5 \sin \alpha \left(1 - 2n_\sigma \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right), \quad (2.18)$$

где $\varphi_1 = \frac{\sigma_1}{2k}$, $\varphi_0 = \frac{\sigma_0}{2k}$, k – предел текучести при сдвиге, σ_0 и σ_1 – величина заднего и переднего натяжений, n_σ – коэффициент напряженного состояния

$n_\sigma = \frac{P_C}{2k}$, P_C – среднее удельное давление на валки.

Рассмотрим случай листовой прокатки при $m > 2$, где m – фактор формы очага деформации – отношение его длины к средней толщине полос l/h_c

Приняв, что при прокатке с натяжениями σ_0 и σ_1 (φ_0 и φ_1) коэффициент напряженного стояния приближенно равен

$$n_\sigma = (0,75 + 0,25m) \left(1 - \frac{\varphi_0 + \varphi_1}{2} \right),$$

и учтя, что

$$\frac{\varphi_1 h_0 - \varphi_0 h_0}{2R} = \frac{\varphi_1 h_1 - \varphi_0 h_0}{2\Delta h} \sin^2 \alpha = \frac{\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0}{2\varepsilon} \sin^2 \alpha,$$

получим формулу

$$\sin \gamma = 0,5 \sin \alpha \left\{ [\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0] \frac{\sin \alpha}{\varepsilon} + 1 - 2(0,75 + 0,25m) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + (0,75 + 0,25m) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} (\varphi_1 + \varphi_0) \right\}.$$

Используя эти данные, формулу для величины опережения можно записать в виде:

$$S = \frac{0,25\varepsilon}{1-\varepsilon} (1 - A_1 + A_2)^2. \quad (2.19)$$

Здесь кроме степени деформации включены два безразмерных параметра:

$A_1 = 2n_\sigma \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ – он характеризует условия прокатки без натяжений,

$$A_2 = \frac{\sin \alpha}{\varepsilon} [\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0] + n_\sigma \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} (\varphi_0 + \varphi_1), \quad (2.20)$$

отражающий влияние натяжений на опережение (при $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$; $A = 0$).

При $A_1 \geq 1$ прокатка без натяжений невозможна. Коэффициент A_2 , характеризующий влияние натяжений в данных конкретных условиях, может быть и положительным и отрицательным, а при $A_1 - A_2 = 1$ $S = 0$ и прокатка невозможна. Такое представление удобно, поскольку влияние натяжений характеризуется не двумя факторами σ_0 и σ_1 (φ_0 и φ_1), а одним параметром A_2 (при $A_2 = 0$ влияния натяжений нет, даже если $\varphi_0 \neq 0$, $\varphi_1 \neq 0$).

Условие возможности прокатки без натяжений $A_1 \leq 1$, а параметр

$$m = \frac{1}{\sin \alpha} \left(\frac{\varepsilon}{1 - 0,5\varepsilon} \right)$$

Если происходят колебания отклонения величин ε , A_1 и A на $\Delta\varepsilon$, ΔA_1 и ΔA_2 , то

$$\Delta S = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon + \frac{\partial S}{\partial A_1} \Delta A_1 + \frac{\partial S}{\partial A_2} \Delta A_2 = \frac{S}{1-\varepsilon} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} - \frac{2S}{1-A_1+A_2} \Delta A_1 + \frac{2S}{1-A_1+A_2} \Delta A_2. \quad (2.21)$$

Пусть, например, реализуется прокатка листов при 950–1000 °С при $h_0 = 4$ мм, $h_1 = 2$ мм, $\Delta h = 2$ мм, $R = 330$ мм, $l = 25,69$ мм, $m = 8,56$, $\varepsilon = 0,5$. При этом $n_\sigma = 2,89$; $\alpha = 4,46^\circ$; $\sin \alpha = 0,08$ и при прокатке без натяжений $A_1 = 2 \cdot 2,89 \cdot 0,04 = 0,23$, а для нейтрального угла, согласно (2.18)

$$\sin \gamma = 0,5 \sin \alpha (1 - A_1) = 0,5 \cdot 0,08 \cdot (1 - 0,23) = 0,031 \quad (\gamma = 1,77^\circ).$$

Тогда

$$S = \frac{0,25 \cdot 0,5}{0,5} (1 - 0,23)^2 = 0,15,$$

и возможные отклонения опережения, согласно (2.21)

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{1-\varepsilon} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} - \frac{2\Delta A_1}{1-A_1} = 2 \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right) - \frac{2A_1}{1-A_1} \left(\frac{\Delta A_1}{A_1} \right).$$

Относительные колебания ε и A_1 , равные $\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0,02$ и $\frac{\Delta A_1}{A_1} = 0,02$

приведут к изменению

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \cdot 0,02 - \frac{2 \cdot 0,23}{1 - 0,23} \cdot 0,02 = 0,04 - 0,012 = 0,028,$$

т.е. на 2,8 %. Но нужно учесть, что отклонения $\Delta \varepsilon$ и ΔA_1 в худшем случае могут иметь различные знаки и при $\Delta \varepsilon > 0$; $\Delta A_1 < 0$ максимальное отклонение опережения от номинальной величины может составить $\frac{\Delta S}{S} = 5,2 \cdot 10^{-2}$.

Теперь рассмотрим прокатку с передним натяжением $\varphi_1 = 0,5$ (при $\varphi_0 = 0$).

Здесь следует учесть параметр ΔA_2 , который при

$$\Delta A_2 = \left(\frac{0,08}{0,5} \cdot 0,5 + 2,89 \cdot 0,04 \right) \varphi_1 = 0,2\varphi_1 = 0,1 \text{ (в соответствии с (2.20)) будет}$$

$$\Delta A_2 = 0,2\Delta\varphi_1; \text{ приняв } \Delta\varphi_1 = 0,2, \text{ получим } \Delta A_2 = 0,04.$$

При этом опережение равно

$$S = \frac{0,25 \cdot 0,5}{0,5} (1 - 0,23 + 0,1)^2 = 0,19,$$

а его колебание, согласно (2.21)

$$\Delta S = \frac{2S}{1 - A_1 + A_2} \Delta A_2 = \frac{2 \cdot 0,19}{0,87} \cdot 0,04 = 0,0175.$$

Поэтому колебания натяжений может создать колебания опережения в пределах

$$S = 0,19 \pm 0,0175 = 0,1725 \div 0,2075,$$

так что следует считаться с возможностью изменения $\frac{\Delta S}{S_0}$ на $9,2 \cdot 10^{-2}$. В

наихудшем случае, когда колебания всех трех входящих в формулу (2.19) величин $-\varepsilon$, A_1 и A_2 совпадут по знаку, возможно отклонение опережения на

$$\frac{\Delta S}{S} = (5,2 + 9,2) \cdot 10^{-2} = 14,4 \cdot 10^{-2}.$$

Если величина 14,4 % нежелательна, то следует повысить точность контроля натяжения (и размеров проката). Если в данном примере увеличить переднее натяжение до максимально возможной величины $\varphi_1 = 1,0$ ($\varphi_0 = 0$), то получим $A_2 = 0,2$; $\Delta A_2 = 0,04$; $S = 0,24$ и по формуле (2.18):

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2 \cdot 0,04}{1 - 0,23 + 0,2} = 0,082; \Delta S = 0,02.$$

По сравнению с прокаткой при натяжении $\varphi_1 = 0,5$, когда $\frac{\Delta S}{S_0} = 0,092$,

видно, что изменения, создаваемые колебаниями натяжения, близки (9,2 % при $\varphi_1 = 0,5$ и 8,2 % при $\varphi_1 = 1,0$). Изменение опережения $S(\varphi_1)$ для этого

примера (при $\varphi_0 = 0$) приведено на рис. 2.19, где тонкими линиями показаны границы возможных колебаний при колебаниях натяжения на $\pm 0,2$.

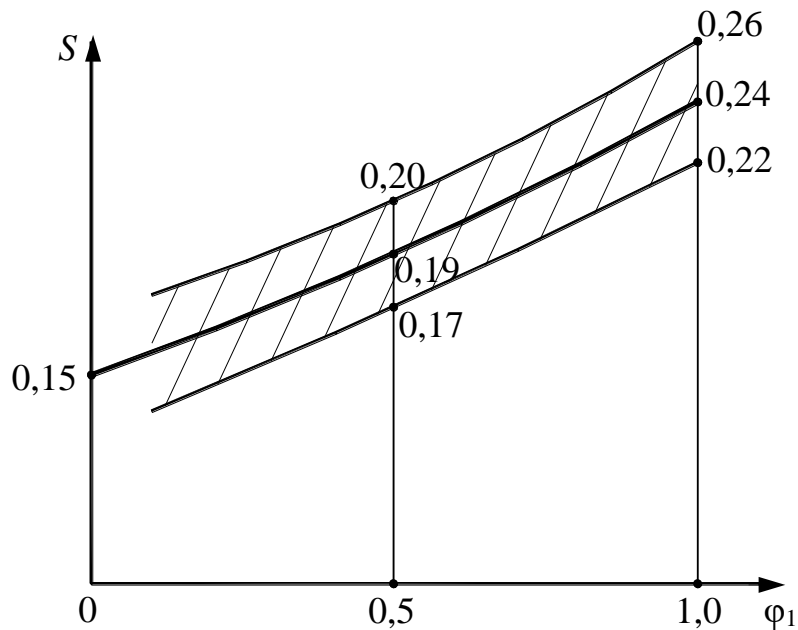


Рисунок 2.19 – Зависимость опережения от переднего натяжения при горячей прокатке

Оценка неустойчивости опережения при холодной прокатке.

Из условия равновесия с усреднением среднего давления p и касательных напряжений (μp) по дуге захвата получаем уравнение равновесия:

$$\sigma_1 h_1 - \sigma_0 h_0 - 4pR \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2\mu p R \sin \alpha - 4\mu p R \sin \gamma = 0.$$

Обозначив, как и ранее, $\frac{p}{2k} = n_\sigma$, $\frac{\sigma_1}{2k} = \varphi_1$, $\frac{\sigma_0}{2k} = \varphi_0$, и разделив все члены уравнения на $2k$, получим

$$4\mu n_\sigma R \sin \gamma = \varphi_1 h_1 - \varphi_0 h_0 - 4n_\sigma R \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2\mu n_\sigma R \sin \alpha,$$

откуда следует

$$\sin \gamma = 0,5 \sin \alpha \left[1 - \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\mu} + \frac{\varphi_1 (1 - \varepsilon) - \varphi_0 \frac{\sin \alpha}{\varepsilon}}{2\mu n_\sigma} \right]. \quad (2.22)$$

Видно, что и при холодной прокатке можно и удобно получить формулу (2.19), но только при несколько других величинах безразмерных параметров A_1 и A_2 . Поставив (2.22) в формулу (2.18), получим

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

$$\sin \gamma = 0,5 \sin \alpha (1-A_1+A_2),$$

где $A_1 = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\mu}$

$$A_2 = \frac{\sin \alpha}{\varepsilon} \frac{\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0}{2\mu n_\sigma}.$$

Коэффициент напряженного состояния при холодной прокатке следует определять с учетом упругой деформации (сплющивания) валков и можно приближенно определять n_σ по формуле (см. [220]):

$$n_\sigma = \frac{\exp(\mu t) - 1}{\mu t} \left(1 - \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\varphi_1}{2} \right),$$

– это формула Стоуна, которая при малых углах

захвата дает удовлетворительную точность.

Параметр A_2 равен

$$A_2 = \frac{m \sin \alpha [\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0]}{\varepsilon [\exp(\mu t) - 1] (1 - 0,5\varphi_1 - 0,5\varphi_0)} = \frac{\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0}{(1 - 0,5\varepsilon) [\exp(\mu t) - 1] (1 - 0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1)},$$

Используя данные [46], можно учесть упругое сплющивание валков и увеличение длины дуги захвата с применением формулы (см. [204], стр.139)

$$n_\sigma = \frac{n_{\sigma_0}}{\sqrt[3]{1 - 1,4a\mu t_0 n_{\sigma_0}}},$$

где t_0 и $n_{\sigma_0} = \frac{1}{\mu t_0} [\exp(\mu t_0) - 1]$ – номинальные величины, определенные без

учета упругого сплющивания валков, коэффициент

$$a = 1,15c \frac{\sigma_T l_0}{E \Delta h_0}. \quad (2.23)$$

Здесь E – модуль упругости материала валков, l_0 и Δh_0 – номинальные величины (без учета упругого сплющивания), см. [220]. Параметр c зависит

от распределения давления по дуге захвата и жесткости контактного слоя. При использовании шлифовальных станков для закаленной поверхности валков можно принимать $c = 3,5$ (для валков, подвергнутых только токарной обработке, c возрастает до $4 \div 5$).

С учетом изложенного можно принять

$$A_2 = \frac{[\varphi_1(1-\varepsilon) - \varphi_0] \sqrt[3]{1 - 1,4\mu m_0 n_{\sigma_0}}}{(1 - 0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1)[\exp(\mu m_0) - 1](1 - 0,5\varepsilon)} \quad (2.24)$$

Пусть, например, $h_0 = 1,3$ мм, $h_1 = 0,85$ мм, $\Delta h = 0,45$ мм, $R = 300$ мм,

$$l_0 = 11,6 \text{ мм}, h_c = 0,875, m_0 = \frac{l_0}{h_c} = \frac{11,6}{0,875} = 13,26; \quad \sin \alpha = \frac{0,45}{11,6} = 0,039 \quad (\alpha = 2,21^\circ);$$

$$\varepsilon = 0,35; \quad \mu = 0,03 \quad (\text{прокатка со смазкой}). \quad \text{Параметр } A_1 = \frac{0,02}{0,03} = 0,67 \quad \text{и}$$

опережение при прокатке без натяжений равно:

$$S = \frac{0,25 \cdot 0,35}{0,65} (1 - 0,67)^2 = 0,015,$$

$$\gamma \approx \sin \gamma = 0,5 \cdot 0,039 \cdot 0,33 = 0,0064 \quad (0,36^\circ 22').$$

Изменения величин α и μ на $\Delta\alpha$ и $\Delta\mu$ приведут к изменению параметра A_1 на величину

$$\Delta A_1 = \frac{\partial A_1}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial A_1}{\partial \mu} \Delta\mu = \frac{1}{2\mu \cos^2 \frac{\alpha}{2}} \Delta\alpha - \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\mu^2} \Delta\mu = A_1 \frac{\Delta\alpha}{\sin \alpha} - A_1 \frac{\Delta\mu}{\mu}. \quad (2.25)$$

Колебания натяжений на $\Delta\varphi_0$ и $\Delta\varphi_1$ приведут к изменению параметра A_2 на

$$\Delta A_2 = \frac{\partial A_2}{\partial \varphi_0} \Delta\varphi_0 + \frac{\partial A_2}{\partial \varphi_1} \Delta\varphi_1$$

$$\Delta A_2 = A_2 \left\{ \frac{1 - \varepsilon - \varphi_0(0,5 - \varepsilon)}{[\varphi_1(1 - \varepsilon) - \varphi_0][1 - 0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1]} \right\} \Delta\varphi_1 - A_2 \left\{ \frac{1 - \varphi_1(1 - 0,5\varepsilon)}{[\varphi_1(1 - \varepsilon) - \varphi_0][1 - 0,5\varphi_0 - 0,5\varphi_1]} \right\} \Delta\varphi_0. \quad (2.26)$$

Колебания опережения можно определить по формулам (2.22). В нашем примере при $\Delta\alpha = 0,01$ и $\Delta\mu = 0,01$ возможно изменение ΔA_1 согласно (2.25) на

$$\Delta A_1 = 0,67 \left(\frac{\Delta\alpha}{0,039} - \frac{\Delta\mu}{0,03} \right) = 17,18\Delta\alpha - 22,33\Delta\mu.$$

В худшем случае эти величины могут суммироваться и достигать величины $\Delta A_1 = 0,4$, поэтому и при прокатке без натяжений возможны изменения опережения на

$$\Delta S = \frac{2S}{1-A_1} \Delta A_1 = \frac{2 \cdot 0,015}{1-0,67} \cdot 0,4 = 0,0364.$$

Но величина опережения $S = 0,015$ и ее изменение в диапазоне $0,015 \pm 0,0364 = -0,0214 \div +0,0514$ невозможно. Достижение значения $S = 0$ означает, что в процессе прокатки возможны пробуксовки, и процесс прокатки будет нестабильным. Если повысить точность размеров валков и проката настолько, что $\Delta \alpha = 0$, то $\Delta A_1 = 0,2233$ $\Delta S = \frac{2 \cdot 0,015}{0,33} \cdot 0,2233 = 0,02$, т.е. и в этом случае возможно уменьшение опережения до нуля. Необходима стабилизация коэффициента трения за счет стабильности условий смазки. При этом необходимо уменьшить колебания параметра μ до $\Delta \mu = 0,005$ и менее, когда величина $22,33 \Delta \mu$ составит $0,11$ и $\Delta S = \frac{2 \cdot 0,015}{0,33} \cdot 0,11 = 0,01$; $S = 0,005 \div 0,025$ (колебания опережения будут значительными, но не будет происходить пробуксовка при $\gamma = 0$, $S = 0$).

Теперь рассмотрим случай прокатки с натяжением $\varphi_1 = 0,5$ (при $\varphi_0 = 0$). При этом примем $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м², $c = 3,5$, $\sigma_T = 3 \cdot 10^8$ Н/м². Согласно формуле

$$(2.23) \quad \text{параметр } a \quad \text{равен } a = \frac{1,15 \cdot 3,5 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 11,6}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,45} = 0,052, \quad \text{при } \mu t_0 = 0,4$$

$$n_{\sigma_0} = \frac{\exp(0,4) - 1}{0,4} = \frac{1,49 - 1}{0,4} = 1,23.$$

Согласно формуле (2.24) определим параметр A_2

$$A_2 = \frac{0,5 \cdot 0,65 \sqrt[3]{1 - 1,4 \cdot 0,052 \cdot 0,03 \cdot 13,26 \cdot 1,23}}{1 - 0,25} = 1,07$$

Здесь следует ожидать опережения

$$S = \frac{0,25 \cdot 0,35}{0,65} (1 - 0,67 + 1,07)^2 = 0,27 \quad (\text{опережение высокое}).$$

Согласно формуле (2.26) определим (при $\varphi_0 = \Delta\varphi_0 = 0$)

$$\Delta A_2 = 1,07 \left(\frac{1-0,35}{0,5 \cdot 0,65 \cdot 0,75} \right) \Delta\varphi_1 = 2,85\Delta\varphi_1,$$

и если $\Delta\varphi_1 = 0,1$ $\Delta A_2 = 0,285$, то согласно (2.21)

$$\Delta S = \frac{2 \cdot 0,27}{1-0,67+1,07} \cdot 0,225 = 0,089.$$

В этом случае можно ожидать колебания опережения в диапазоне $0,27 \pm 0,089 = 0,18 \div 0,36$ – практически в два раза.

В случае, если $\varphi_0 = 0$, $\varphi_1 = 1$, получим

$$A_2 = \frac{1 \cdot 0,65}{0,5} \frac{\sqrt[3]{1-0,036}}{0,49 \cdot 0,825} = 3,2,$$

$$S = \frac{0,25 \cdot 0,35}{0,65} (1-0,67+3,2)^2 = 1,68,$$

но это нарушает условие $S < \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} = 0,54$, поэтому приложение такого переднего натяжения невозможно, еще при меньшем переднем натяжении неизбежен переход к режиму волочения (когда $\gamma = \alpha$). Зависимость опережения от переднего натяжения для этого случая приведена на рис. 2.20 [221].

Из формулы (2.26) следует, 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.

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).

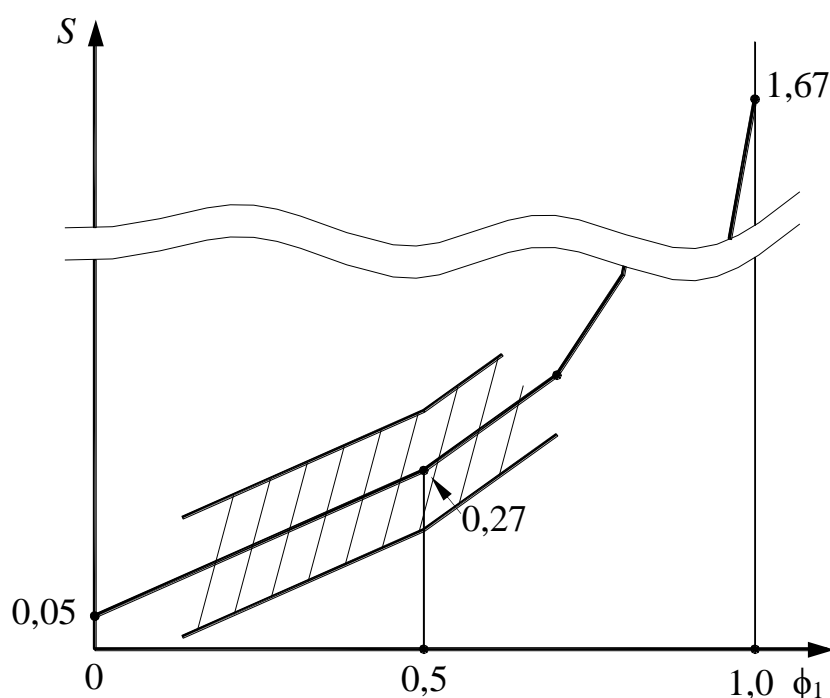


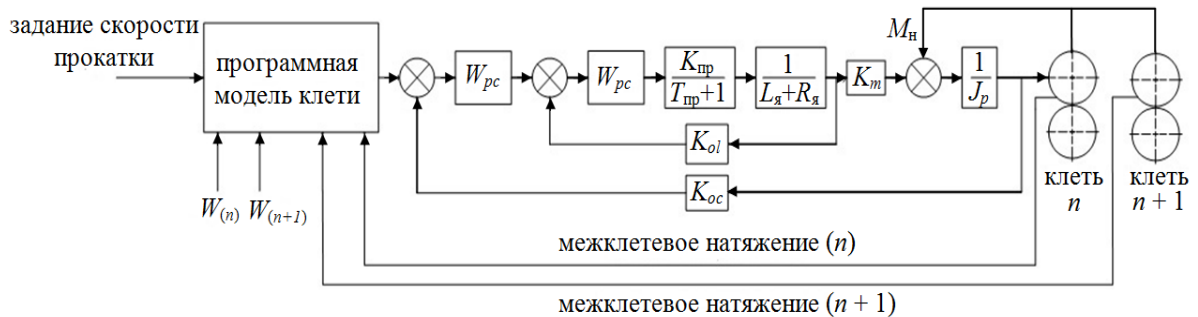
Рисунок 2.20 – Зависимость опережения от переднего натяжения при холодной прокатке

Структурная схема автоматизированной подсистемы корректировки опережения представлена на рис. 2.21, указанная подсистема может быть легко интегрирована в существующие АСУ ТП станов холодной прокатки [222].

Принцип действия системы заключается в непрерывной автоматической корректировке угловой скорости вращения рабочих валков в зависимости от изменения толщины полосы в процессе прокатки, межклетевых натяжений и расчетных параметров очага деформации.

Системы измерения и контроля технологических параметров стана посылают информацию в расчетный блок программной модели клетки, в которой происходит определение параметров очага деформации, включая опережение и скорость вращения валков. Скорректированный сигнал на задание скорости попадает в структурную модель управления электромеханической системой (приводом), обеспечивающую его выполнение. Контроль выполнения сформированного задания

осуществляется за счет обратных связей по скорости и току якоря в рамках реализации двухзонной системы регулирования.



$W_{(n)}$, $W_{(n+1)}$ – измеренные значения скорости вращения рабочих валков клеток n и $(n+1)$; W_{pc} – звено регулятора скорости; $K_{пр}$ – коэффициент пропорциональности ПИ-регулятора; $T_{пр}$ – постоянная времени регулятора; $K_{ол}$ – коэффициент регулирования обратной связи по току; $K_{ос}$ – коэффициент регулирования обратной связи по скорости; $L_{я}$ – индуктивность цепи якоря; $R_{я}$ – суммарное сопротивление обмоток якорной цепи; K_m – коэффициент учета тиристорного преобразователя; J_p – звено учета механической части (инерции системы); M_n – момент нагрузки

Рисунок 2.21 – Автоматизированная подсистема динамической корректировки опережения:

2.5 Промышленная апробация и оценка точности разработанных моделей и методов

2.5.1 Оценка точности и адекватности модели электродвигателя и электромеханической системы привода

Для оценки адекватности модели электродвигателя главного привода и модели электромеханической системы стана холодной прокатки на вход модели двигателя, описанной в параграфе 2.2.1, поданы следующие сигналы: $U_{н.я.}$, $U_{в.1}$, $U_{в.2}$, $M-M_c$. Регулируемыми (выходными) переменными являются: $I_{я.1}$, $I_{я.2}$, $I_{в.1}$, $I_{в.2}$, M , ω . Кривая намагничивания задана матричным уравнением

в блоке $f(u)$. Напряжения на обмотках возбуждения формируются блоками «Signal 2», где установлены задания на номинальный поток при напряжении $U_{в.1н.}=U_{в.2н.}= 220$ В и минимальный поток при напряжении $U_{в.1мин.}=U_{в.2мин.}= 47$ В. Блоком «Signal 1» подаётся напряжение на якорь. С помощью графопостроителя «XYGraph» выводится на экран кривая намагничивания.

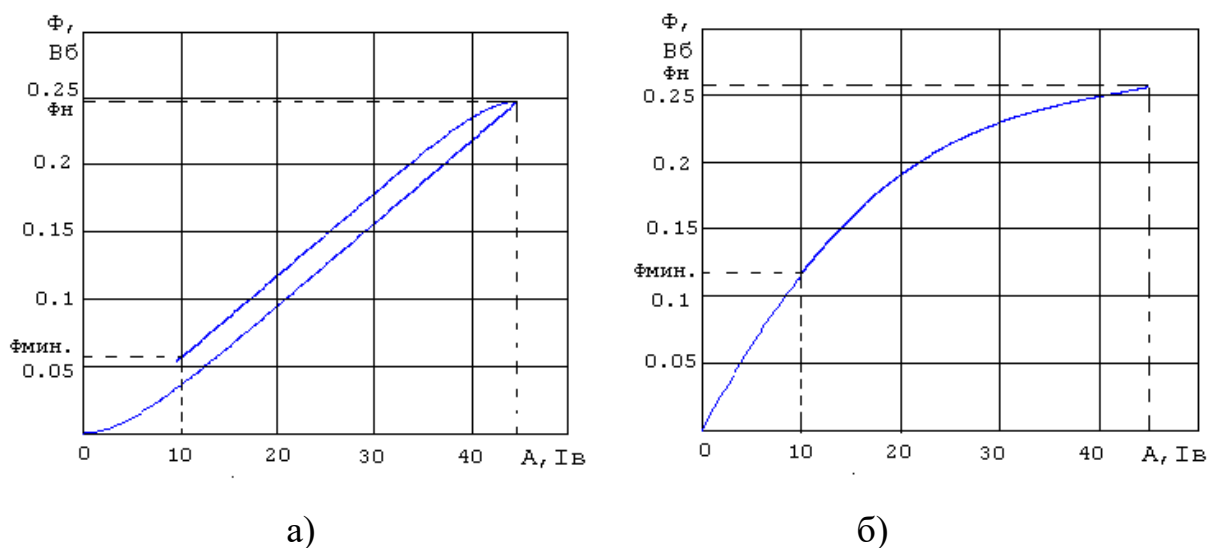
Данные обмоток электродвигателя серии 2П2-19/60-4УХЛ3 на один якорь: $R_{я1}=0,0191$ Ом; $L_{я1}=0,0011$ Гн; $R_{в1}=4,89$ Ом, $L_{в1}=12,37$ Гн; $J=2000$ кг·м².

Кривые намагничивания электродвигателя при описании цепей возбуждения с использованием передаточной функции [193, 199, 207]

$$W(p) = \frac{k_{\phi}}{1 + T_{в.т} \cdot p},$$

где k_{ϕ} – передаточный коэффициент; $T_{в.т}$ – постоянная

времени вихревых токов и уравнения кривой намагничивания показаны на рис. 2.22.



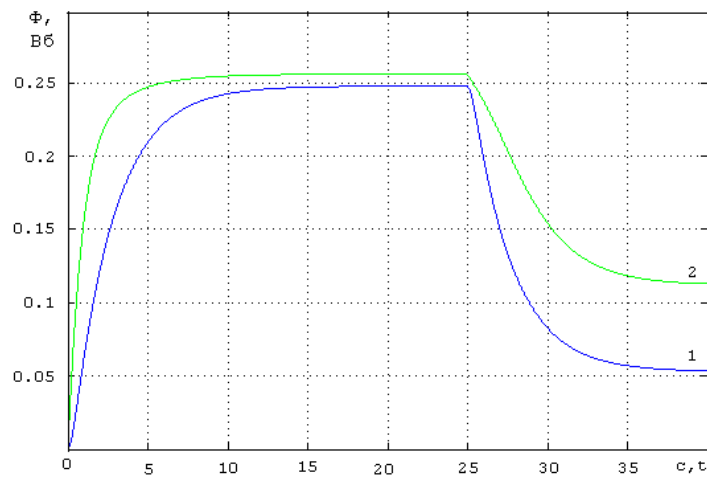
а) при описании апериодическим звеном первого порядка; б) при описании полиномом шестого порядка

Рисунок 2.22 – Кривые намагничивания двухякорного электродвигателя:

На основании полученных графиков можно сделать вывод, что при использовании апериодического звена первого порядка (рис. 2.21, а), и при работе электродвигателя с ослабленным полем ($I_{в}=10$ А, $\Phi=0,0536$ Вб), получаем относительную погрешность вычисления потока более 50 %, по

сравнению с паспортными данными электродвигателя. При работе с номинальным потоком ($I_B=47A$, $\Phi=0,247Bб$) эта погрешность составляет 5 %. Во второй модели (рис. 2.21, б), имеем расхождение с паспортными данными не более 0,3 % при минимальном потоке и 0,2 % при номинальном потоке ($I_B=47A$, $\Phi=0,258Bб$).

Переходные характеристики при различных имитационных моделях цепи возбуждения приведены на рисунке 2.23.



1 – характеристика при описании аперидическим звеном первого порядка,

2 – характеристика при описании полиномом шестого порядка

Рисунок 2.23 – Переходные характеристики цепи возбуждения электродвигателя при номинальном и минимальном магнитном потоке:

При сравнении переходных характеристик (рис.2.23) установлено, что быстродействие цепи возбуждения (характеристика – 2) увеличилось в два раза, по сравнению с использованием модели, построенной по выражению

$$W(p) = \frac{k_{\phi}}{1 + T_{\text{с.м.}} \cdot p} \text{ (характеристика – 1).}$$

На рисунке 2.24 показаны графики переходных процессов при пуске и работе электродвигателя на номинальной скорости.

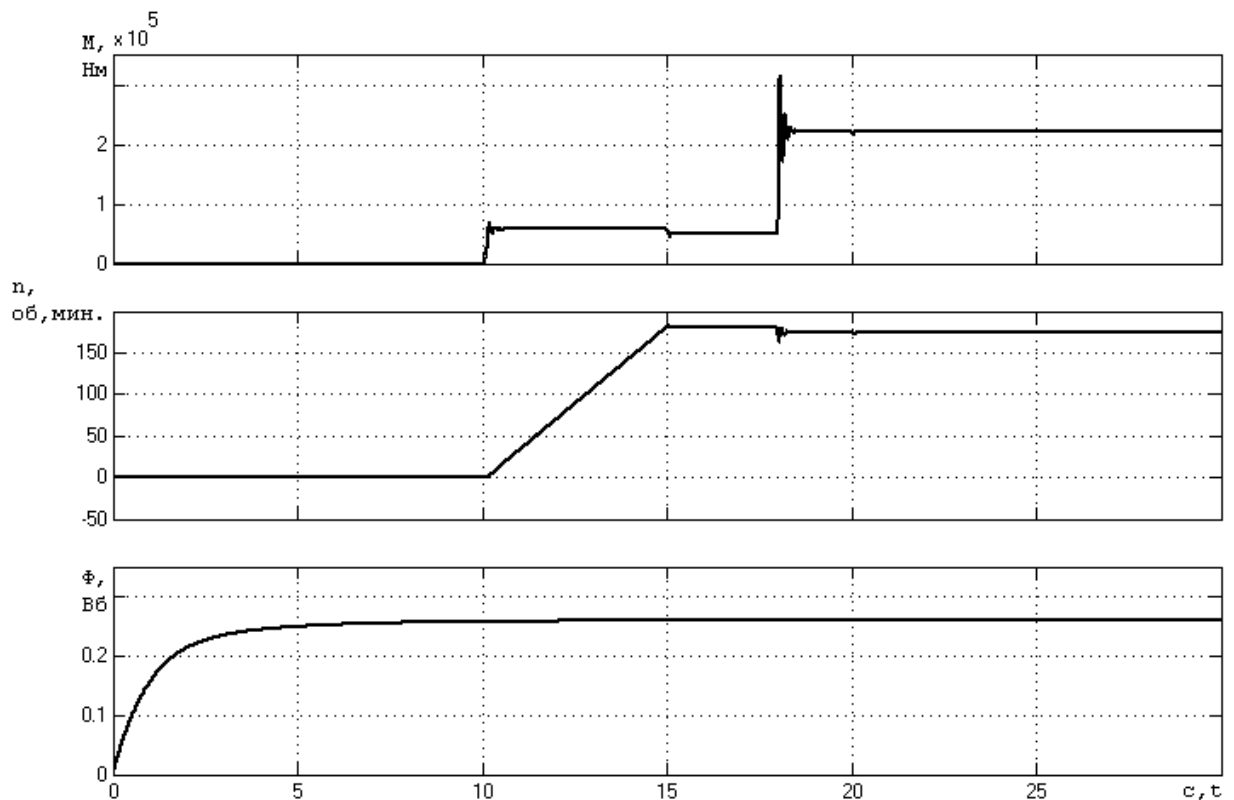


Рисунок 2.24 – Графики переходных режимов при пуске электродвигателя и работе с номинальной скоростью

Имитационная модель двух клетей непрерывного стана с индивидуальным электроприводом валков клетки, дополненная уравнением $\frac{dT}{dt} = \frac{E \cdot B \cdot H}{L} (V_2 - V_1)$, характеризующим поведение металла в межклетевом промежутке, а также моделью двухякорной машины с системой управления (2DC) представлена на рисунке 2.25.

Исходные данные для расчёта: приводной электродвигатель клетей 2П2-19/60-4УХЛЗ 2×2000 кВт, 2×2300 А, 930 В, 175/400 об/мин. Возбуждение независимое 220В, 2×47 А, $J_{д.в.1}=J_{д.н1}=J_{д.в2}= J_{дн2}=4000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_{в1}=1525 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_{н1}=1825 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_{в2}=2603 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_{дн2}=2353 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $c_{д.в.1}=12,2\cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $c_{д.н.1}=5,79\cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $c_{д.в.2}=20,05\cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $c_{д.н.2}=9,46\cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $R_{в}=0,3 \text{ м}$; $\Delta\varphi_{\text{max}}=1 \text{ рад}$; $T_1=200 \text{ кН}$; $T_3=150 \text{ кН}$; $M_{пр.1}=25 \text{ кН}\cdot\text{м}$; $M_{пр.2}=20 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Для расчета приведённых жесткостей между электродвигателем и верхним и нижним валком использованы результаты работы [202, 203].

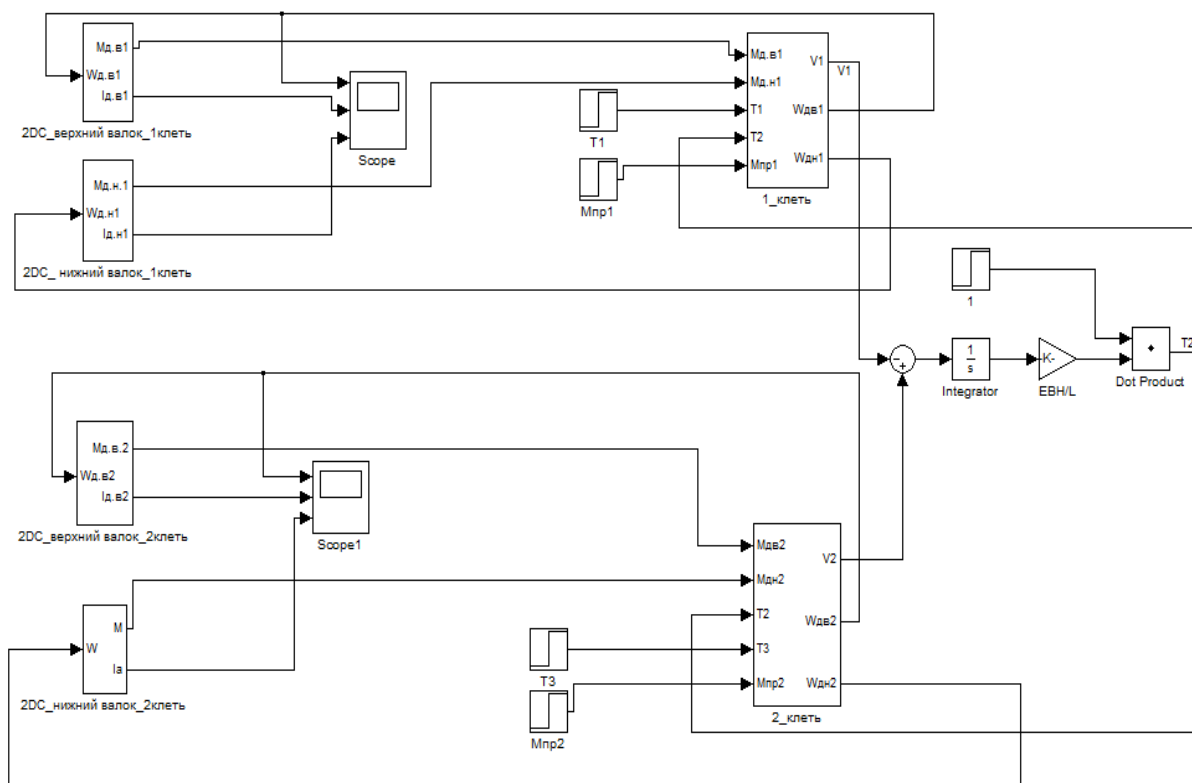


Рисунок 2.25 – Имитационная модель двух клеток стана холодной прокатки в среде *MATLAB*

На графиках (см. рис. 2.26) показаны токи двигателей верхнего ($I_{д.в.}$) и нижнего ($I_{д.н.}$) валков первой клетки ($I_{д.н.}$), момент в упругой механической передаче верхнего $M_{у.в}$ и нижнего вала $M_{у.н}$, скорость электродвигателя $W_{д.в.}$, приведённая скорость верхнего вала первой клетки $W_{в.в.}$. Как видно из приведённых на рисунке 2.26 графиков, полученных при моделировании, максимальные амплитуды моментов упругих колебаний превышают их средние значения, более чем в 2 раза.

Амплитуда упругих колебаний из-за разных жесткостей верхней и нижней упругих линий различны.

В верхней линии, обладающей большей жёсткостью, чем нижняя, моменты упругих колебаний приводят к значительным колебаниям тока якоря и скорости, величины которых соответственно равны 500 А и 0,15 рад/с. Амплитуды колебаний тех же параметров для нижней линии,

обладающей меньшей жёсткостью, меньше и равны соответственно 300 А и 0,08 рад/с.

Результаты моделирования совпадают с реальными производственными данными и характеристиками работы приводов станов холодной прокатки.

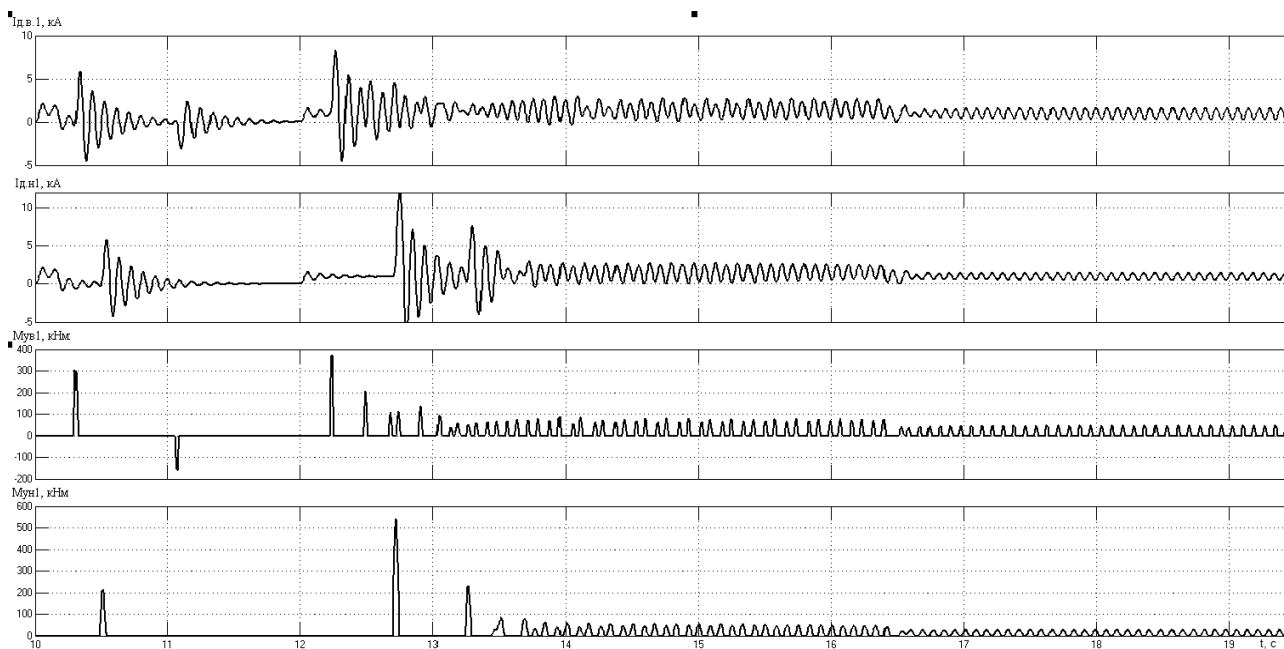


Рисунок 2.26 – Переходные режимы разгона главного привода клетки под нагрузкой

2.5.2 Оценка точности разработанной комплексной динамической модели взаимодействия электромеханической системы непрерывного стана холодной прокатки и очага деформации

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 ЧерМК ПАО «Северсталь» и статистического анализа погрешностей расчета – расхождений между рассчитанными и измеренными значениями.

Фактические параметры были получены из базы данных автоматизированной системы управления технологическим процессом стана.

Сводная информация об исследованных марочном и профильном сортаментах представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Марочный и профильный сортаменты

Марочный сортамент	Профильный сортамент		
	Ширина, мм	Толщина подката, мм	Толщина проката, мм
08, St14; 08ю, St13; 08пс, 1006, 1008, St12; 10пс; SAE 1015	900–1445	1,85–4,6	0,3–1,5

В общей сложности была сформирована база данных, содержащая информацию о 270-ти режимах прокатки различных марко- и профилеразмеров сортамента с контролем по усилию прокатки и угловой скорости вращения вала электродвигателя главной линии привода рабочей клетки.

Рассчитанные значения были сопоставлены с измеренными, в результате получены ряды погрешностей расчета параметров, необходимые для оценки точности разработанных моделей и методов.

В таблице 2.2 представлены технологические параметры режима холодной прокатки полосы толщиной 0,76 мм и шириной 1200 мм, на примере которого выполнена оценка точности модели по расчету усилия прокатки и угловой скорости вращения вала электродвигателя.

Угловая скорость вращения вала электродвигателя главной линии привода рабочей клетки рассчитана с учетом скорости прокатки в клетки v_i , опережение S_i и передаточного числа редуктора i :

$$\omega_{двi} = \frac{v_i}{(1 + S_i) \cdot R} \cdot i.$$

Таблица 2.2 – Технологические параметры режима холодной прокатки полосы толщиной 0,76 мм и шириной 1200 мм

Клеть №	v_i , м/с	h_{i-1} , мм	h_i , мм	ε_i , %	N_{i-1} , кН	N_i , кН
1	7,98	2,11	1,61	23,7	197	280
2	10,57	1,61	1,25	22,4	280	231
3	13,75	1,25	0,99	20,8	231	200
4	17,2	0,99	0,81	18,2	200	180
5	18,5	0,81	0,76	6,2	180	45

Примечание. ε_i – частное относительное обжатие полосы в i -й клетке.

На рисунке 2.27 представлены экспериментальные и расчетные кривые переходных процессов скоростей электропривода верхних валков клетки № 1 при прокатке по режиму таблицы 2.2.

После прокатки сварного шва происходит разгон валков до рабочей скорости, далее осуществляется прокатка на рабочей скорости, а затем скорость валков снижается перед прокаткой участка со швом. Расчетная кривая переходных процессов построена по результатам математического моделирования, а экспериментальная принята по осциллограмме, полученной непосредственно на стане. Результаты сравнения данных, представленных на рисунке 2.27, позволяют сделать вывод, что относительная погрешность не превышает 6,6 %.

На рисунке 2.28 приведены диаграммы изменения усилия по длине полосы при прокатке в клетке № 1 в условиях установившегося и переходного режимов работы электроприводов рабочих валков (рисунок 2.27).

Результаты статистического анализа выборок, характеризующих погрешности расчета силы прокатки и угловой скорости вращения вала электродвигателя привода рабочих валков, представлены в таблице 2.3.



Рисунок 2.27 – Графики изменения угловой скорости вращения вала электродвигателя

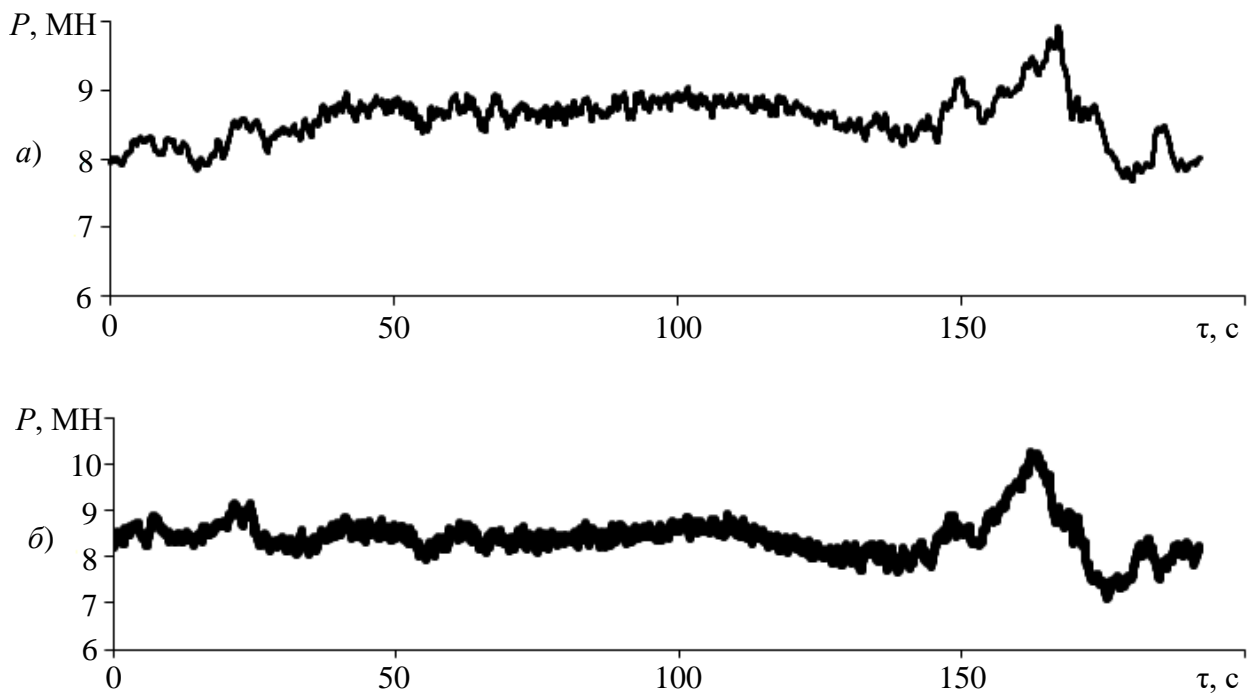


Рисунок 2.28 – Графики изменения силы прокатки: а – фактические значения; б – расчетные значения

Таблица 2.3 – Результаты статистического анализа погрешности расчета

Статистический параметр	Значение параметра для погрешности расчета	
	угловой скорости	усилия прокатки
Максимальное значение ΔP_{\max} , %	6,56	15,05
Минимальное значение ΔP_{\min} , %	0,016	0
Математическое ожидание $\Delta \bar{P}$, %	3,54	4,07
Дисперсия D_P	2,69	6,39
Среднеквадратическое отклонение S_P , %	1,64	2,53

Примечание. В таблице представлены статистические параметры выборок значений погрешностей без учета знака.

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

1. Максимальная погрешность расчета усилия прокатки не превысила 15,5 %. В 85,3 % случаев расхождения расчетных и измеренных значений силы прокатки 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.

2.6 Исследование геометрических, кинематических и энергосиловых параметров технологического процесса в условиях нестационарного динамического нагружения

Адекватность и высокая точность разработанной динамической модели процесса холодной прокатки позволяет использовать ее в целях исследования влияния технологических факторов и характеристик подката на геометрические, кинематические и энергосиловые параметры очага деформации в условиях их нестационарного и стохастического характера изменения [183, 223, 224].

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 с использованием динамической модели главного привода рабочей клетки позволили сделать следующие выводы [209]:

- 1) Частота крутильных колебаний линии привода при стабильном процессе прокатки, определяющая частоту колебаний окружной скорости валков, кратна 12,5 Гц (характерные гармоники на 25 и 50 Гц).

Из графика угловых скоростей (рисунок 2.29), полученного в результате моделирования, видно, 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 монографии [58].

На рисунке 2.30 приведен увеличенный фрагмент рисунка 2.29, который показывает вид автоколебаний верхнего и нижнего рабочих валков при установившемся режиме. Как видно из графика, автоколебания верхнего и нижнего валков различаются как по частоте, так и по амплитуде. Это

объясняется разницей в общей жесткости приводов (приводные валы верхнего и нижнего валков имеют разную длину).

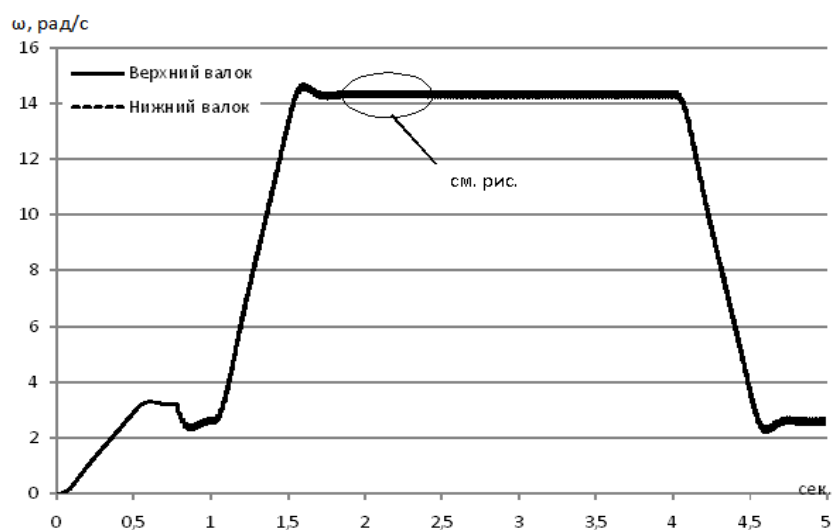


Рисунок 2.29 – Угловые скорости рабочих валков клетки

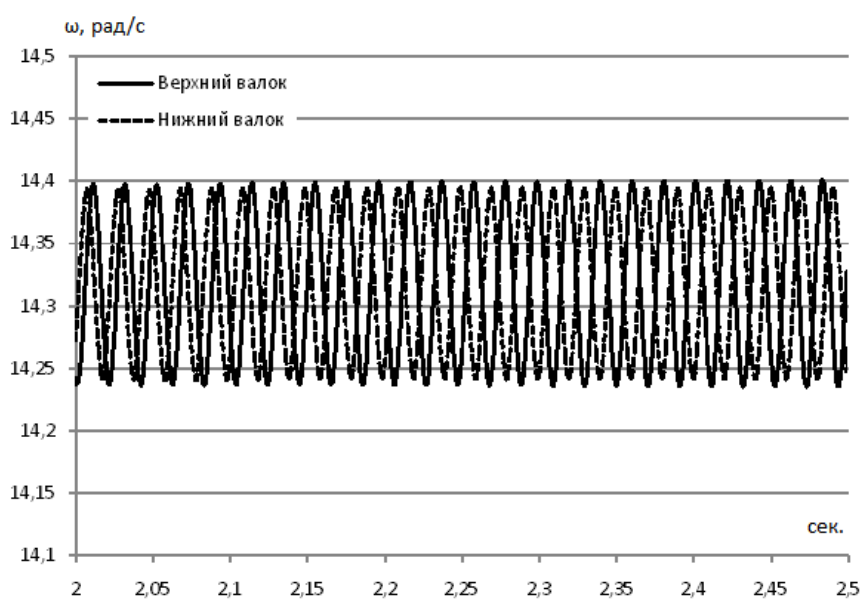


Рисунок 2.30 – Угловые скорости рабочих валков прокатной клетки при установившемся режиме

Согласно графику изменения скорости электропривода рабочих валков клетки № 1, представленному на рисунке 2.29, установившийся процесс прокатки наблюдается в период с 49 с по 115 с. Изменения толщины подката на этом временном участке носят случайный характер, подчиняющийся

нормальному или близким к нормальному закону распределения, с размахом достигающим 3,5 % (рисунок 2.31, а). Изменение натяжений является колебательным нестационарным процессом с частотой кратной 12,5 Гц и максимальным размахом 13,8 % (рисунок 2.31, б).

Поскольку геометрические и энергосиловые параметры очага деформации являются функцией характеристик подката (толщины, механических свойств) и параметров режима прокатки (скорости, натяжений), то их изменения носят нестационарный случайный характер.

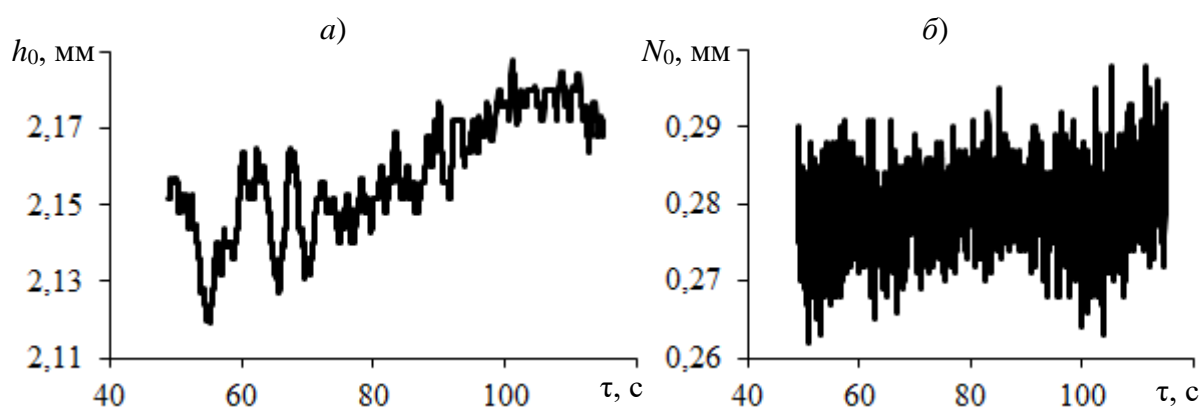


Рисунок 2.31 – Графики изменения толщины подката и переднего натяжения

Для определения частот автоколебаний валкового узла клетки от линии привода был выполнен спектральный анализ полученного сигнала на основании преобразования Фурье (рисунок 2.32). Незначительно отличающиеся спектры верхнего и нижнего валков (вследствие вышеуказанной конструктивной особенности линии привода, см. рисунок 2.32) также подтверждают адекватность математического моделирования.

Для сравнения полученных результатов с реальными характеристиками главного привода был выполнен спектральный анализ фактического графика изменения угловой скорости вращения нижнего рабочего валка клетки №2 непрерывного стана холодной прокатки 1700 при прокатке автолиста, результаты представлены на рисунке 2.33.

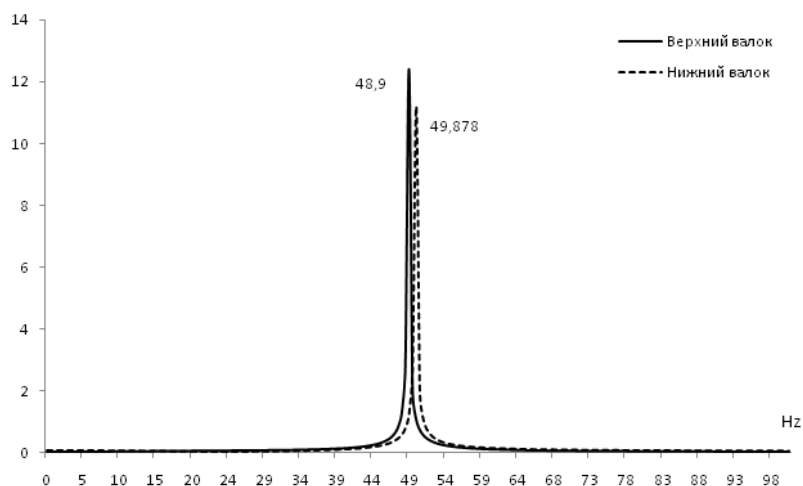


Рисунок 2.32 – Частота автоколебаний прокатных валков по данным моделирования

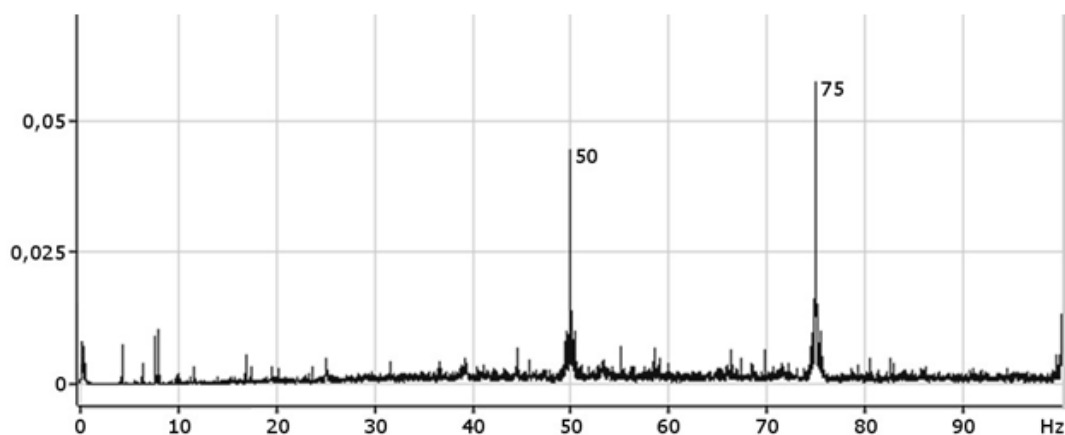


Рисунок 2.33 – Фактическая частота колебаний прокатных валков

Анализ фактических данных и результатов моделирования показал, что гармоники на частоте 50 Гц совпадают. Однако на графике (рисунок 2.33) присутствует дополнительная гармоника на частоте 75 Гц, возникающая вследствие воздействия динамических режимов работы прокатного оборудования (разгоны/торможения).

Колебания на частоте 50 Гц постоянно воздействуют на валковый узел при стационарной скорости прокатки, оказывая влияние на характер изменения нормальных и касательных напряжений в очаге деформации, геометрических параметров, что приводит к возникновению дефектов на поверхности проката.

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 (рисунок 2.34) [209].

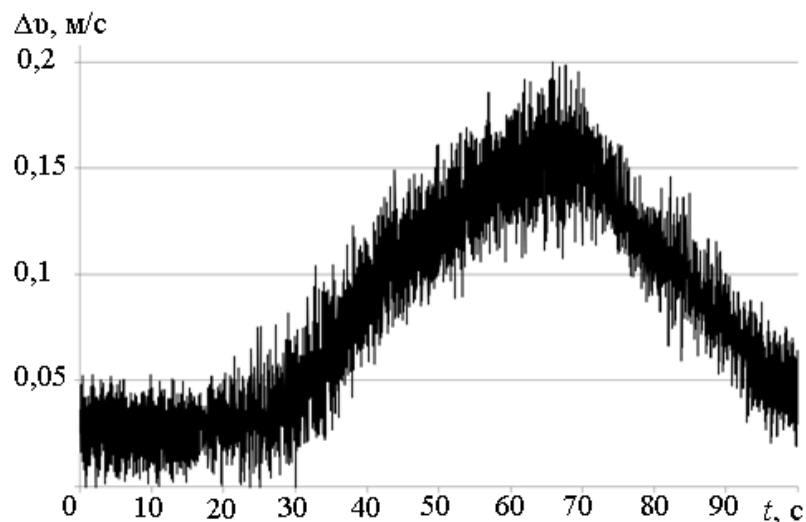


Рисунок 2.34 – Разность окружных скоростей верхнего и нижнего рабочих валков

Из-за разницы в крутильных колебаниях верхнего и нижнего рабочих валков была получена их средняя скорость вращения (рисунок 2.35) которая, в свою очередь, определяет скорость прокатки полосы. Как видно из рисунка 2.35 в клети возникают колебания скорости различной частоты, которые не могут не оказывать влияния на качество прокатываемого металла.

3) Рассинхронизация скоростей рабочих валков приводит к отклонению нейтрального сечения (линия N_1N_1 , рисунок 2.36) от вертикальной линии NN , характерной для стационарного процесса. Нарастание рассинхронизации скоростей 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) [225].

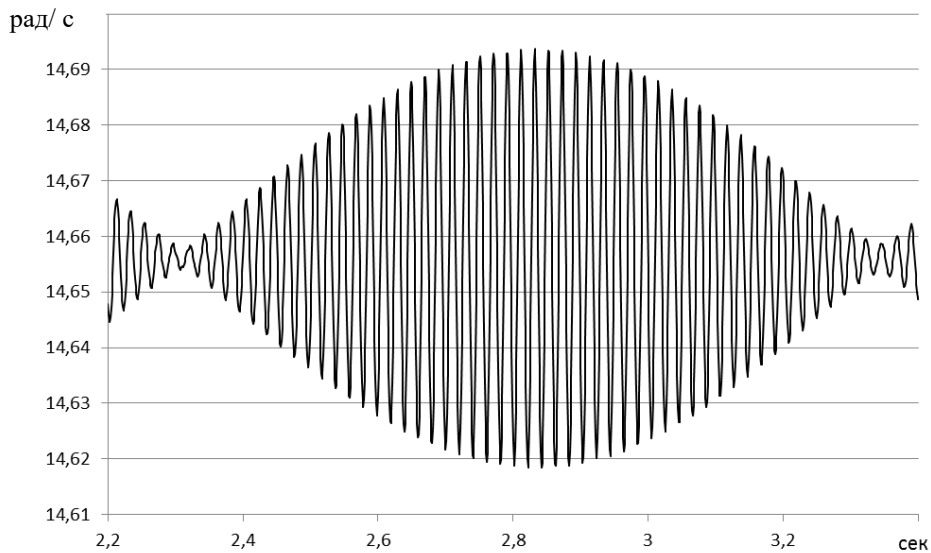
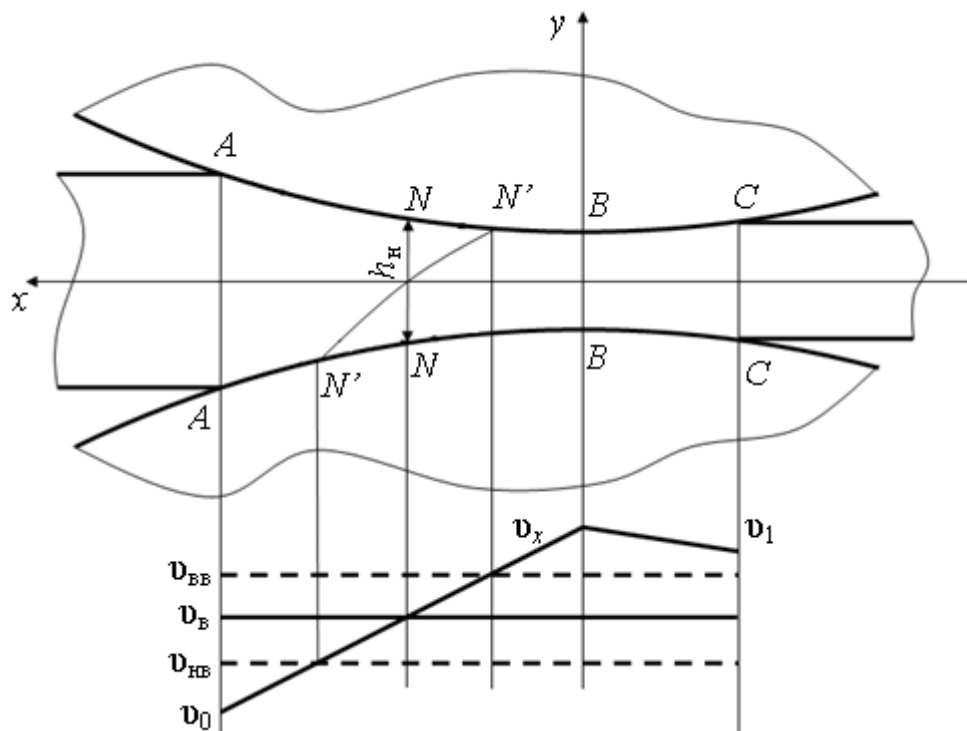


Рисунок 2.35 – Средняя скорость вращения рабочих валков.



v_{BB} , v_{HB} – фактические значения окружных скоростей верхнего и нижнего рабочих валков; v_B – номинальное значение скорости валков; v_x – скорость поверхностного слоя полосы; v_1 – скорость прокатки

Рисунок 2.36 – Положение нейтрального сечения в очаге деформации в случае разности скоростей верхнего и нижнего рабочих валков

4) Колебания коэффициента трения, скорости прокатки, положения нейтрального сечения в очаге деформации приводят к колебаниям

напряжений трения, на рисунке 2.37 представлен объемный график изменения касательных напряжений по длине очага деформации в диапазоне изменения скорости прокатки 5–10 м/с. На рисунке выделена зона, в которой касательные напряжения изменяют свое направление и величину с частотой 50 Гц.

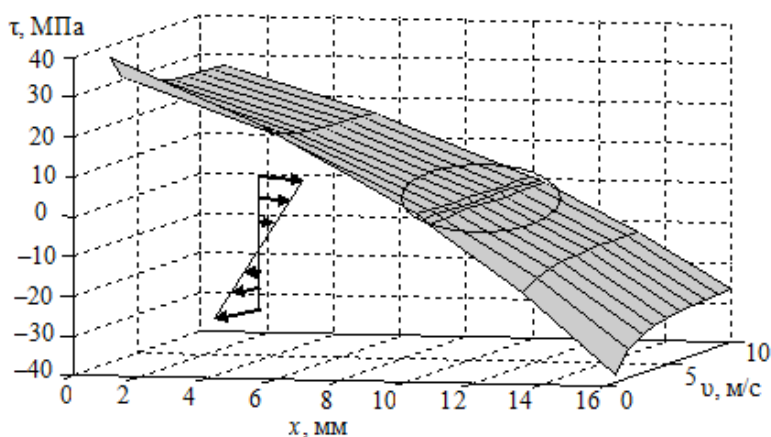
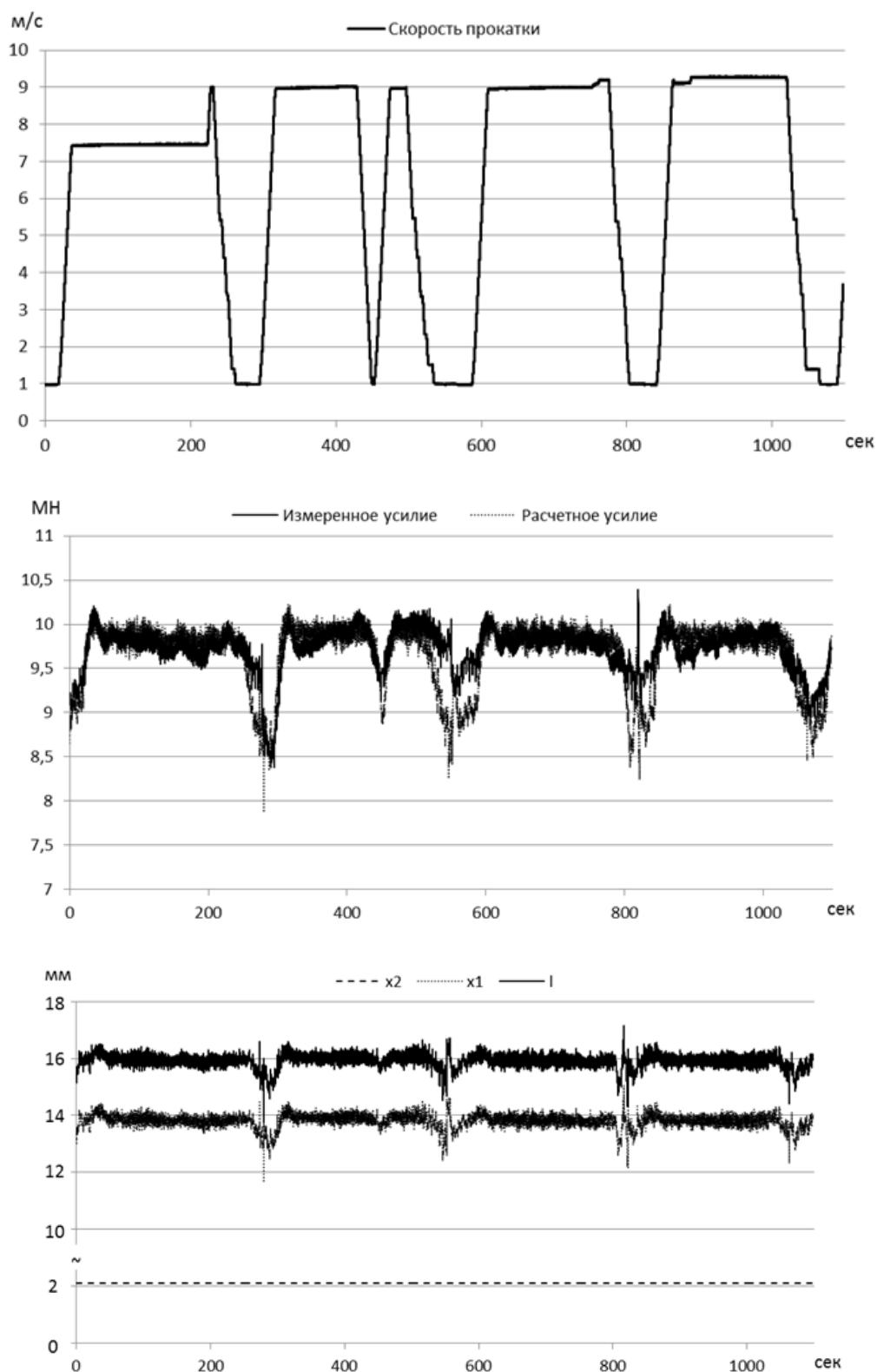


Рисунок 2.37 – Объемный график изменения касательных напряжений

Поскольку геометрические и энергосиловые параметры очага деформации являются функцией характеристик подката (толщины, механических свойств) и параметров режима прокатки (скорости, натяжений), то их изменения носят нестационарный случайный характер [225].

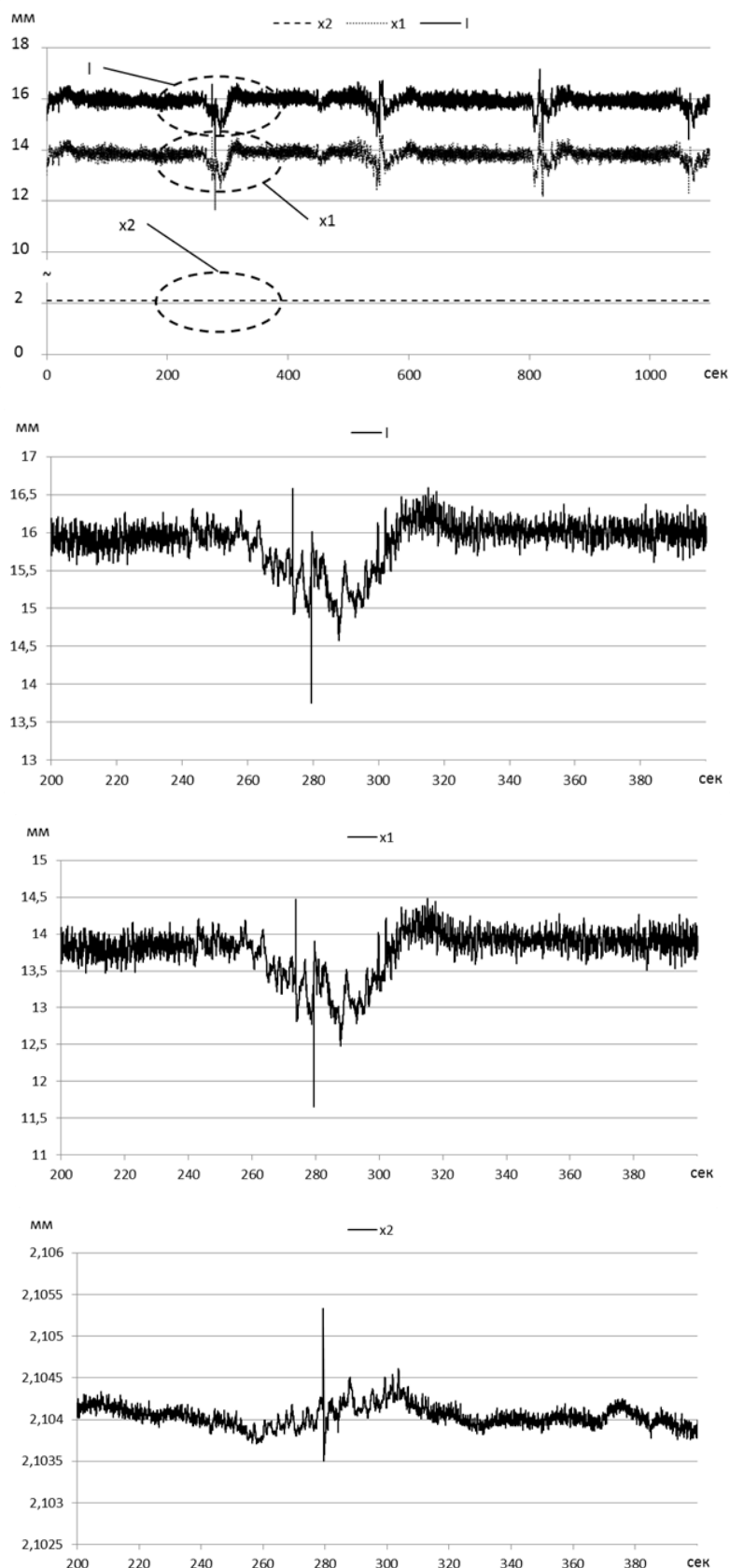
Результаты моделирования изменения геометрических параметров очага деформации при различных режимах работы стана представлены на рисунках 2.38–2.40.

Из графиков видно, что изменения длин участков носят колебательный нестационарный характер. Процессы, связанные с прокаткой сварных швов (периоды разгона и торможения), характеризуются наибольшим размахом значений геометрических параметров, достигающим 20–25 %, при установившемся процессе прокатки колебания составляют 5–10 %.



x_1 – длина участка упругого восстановления; x_2 – длина упругопластического участка; l – длина очага деформации

Рисунок 2.38 – Графики изменения скорости и усилия прокатки, геометрических параметров очага деформации по длине полосы в стационарных и динамических режимах работы стана



x_1 – длина участка упругого восстановления; x_2 – длина упругопластического участка; l – длина очага деформации

Рисунок 2.39 – Изменение геометрических параметров очага деформации в динамическом режиме работы стана

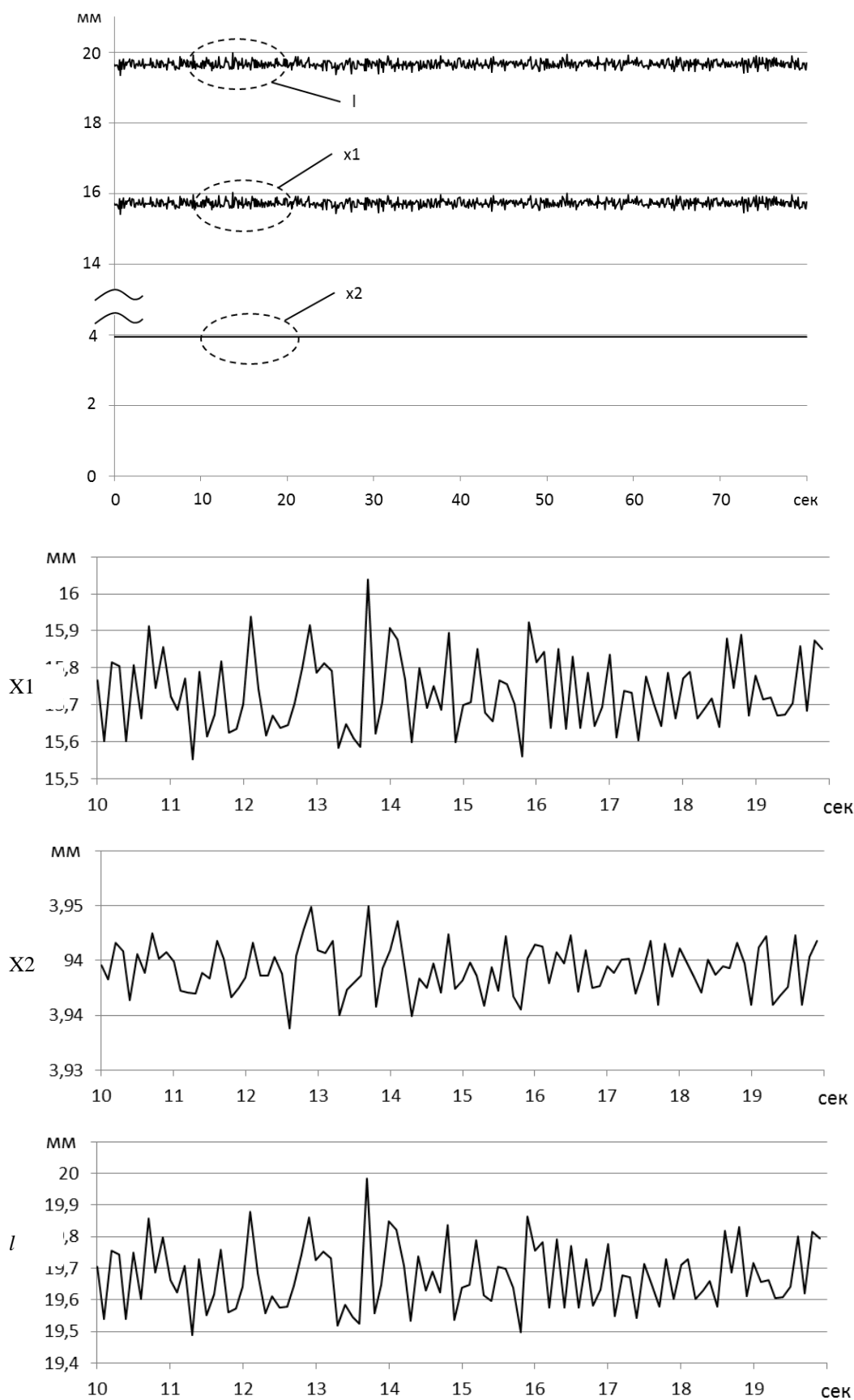


Рисунок 2.40 – Графики изменения геометрических параметров очага деформации при постоянной скорости прокатки и разнотолщинности

Анализ моделирования момента прокатки на участках разгона и выхода на номинальную скорость работы стана показал, что при установившемся процессе наибольшие пиковые значения момента соответствуют периодам прокатки полосы с выраженной разнотолщинностью, в этом случае размах колебаний может достигать 10–15 % (рисунок 2.41) [210].

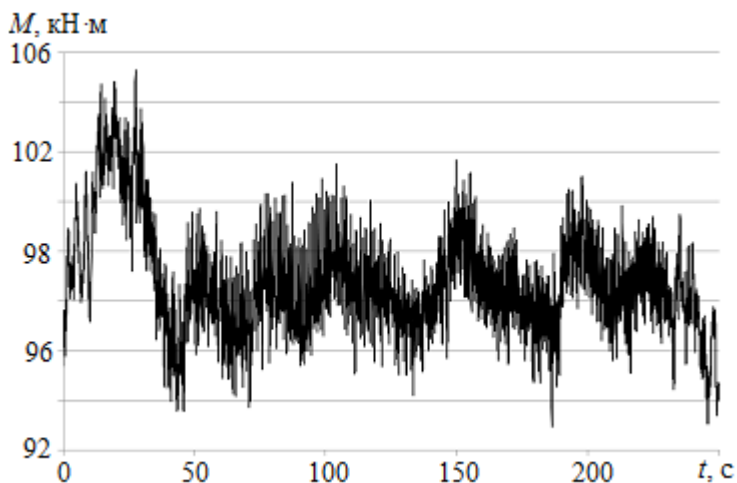


Рисунок 2.41 – График изменения момента прокатки по длине полосы

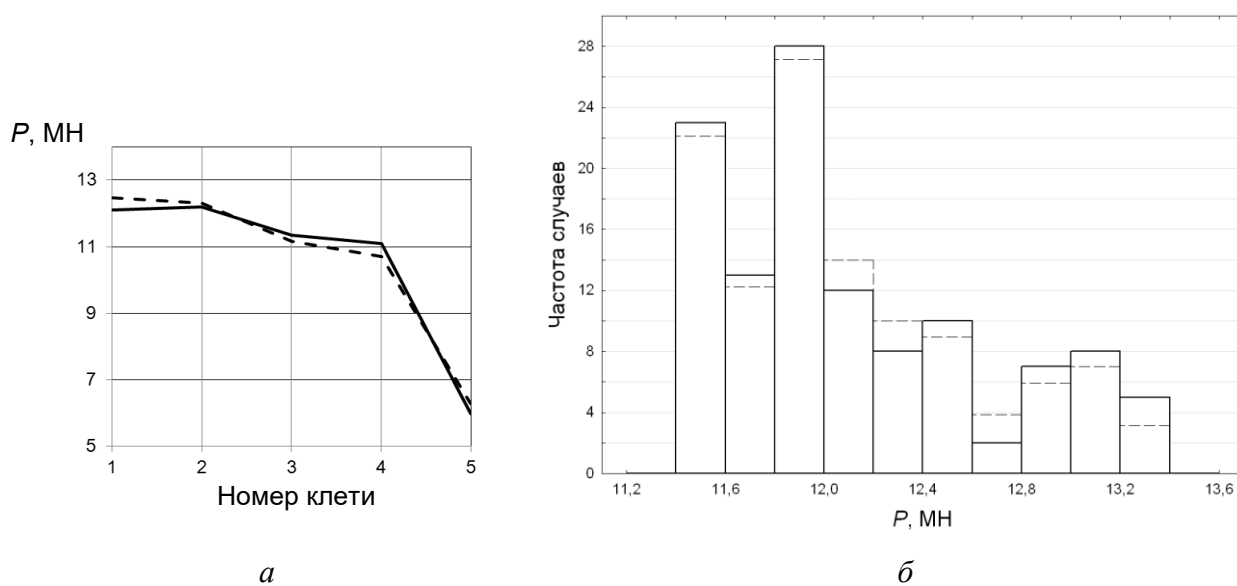
2.7 Статистический анализ параметров процесса холодной прокатки и механических характеристик полосы²

Для выявления взаимосвязи статистических характеристик действующих случайных факторов (исходный предел текучести, толщина подката) и выходных параметров (энергосиловых и механических характеристик) были исследованы полосы из малоуглеродистой стали марки SAE 1015 толщиной 0,6 мм, шириной 1200 мм с обжатием 70 %, прокатываемые в различные периоды эксплуатации 5-клетевого стана 1700. Доля стали марки SAE 1015 является наибольшей в объеме прокатанного металла для производителей промышленной упаковки.

² Кожевников А.В., Болобанова Н.Л., Селитриников И.В. Статистическая обработка информации при анализе процесса холодной прокатки с учетом его стохастичности // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – №3 (78). – С. 20–27.

Параметры процесса холодной прокатки рассчитывались с помощью математической модели, представленной в данной главе. Статистический анализ параметров процесса прокатки выполнен в системе STATISTICA.

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений усилий прокатки представлены на рис. 2.42. Ошибка в определении усилий прокатки находилась в пределах от 0,12 до 0,29 МН, что составляет 1–4,6%. Из распределения усилий на примере первой клетки (рис. 2.42, б) видно, что есть вероятность больших отклонений от наиболее часто встречающегося усилия прокатки, что необходимо учитывать при расчете деформационных режимов. Величины среднего квадратического отклонения расчетных значений от экспериментальных для усилий прокатки не превышают 0,03 МН. Таким образом, можно считать, что совпадение расчетных и экспериментальных данных – удовлетворительное.

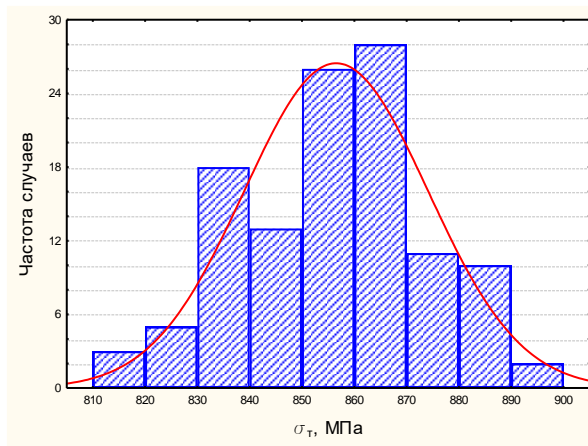


а – детерминированные величины; *б* – стохастические величины в первой клетке

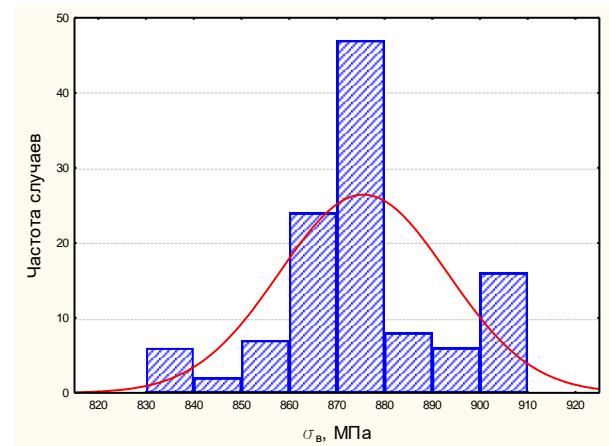
Рисунок 2.42 – Сравнение экспериментальных (сплошные линии) и расчетных (пунктирные линии) значений усилия прокатки

В условиях промышленных станов такие характеристики прокатываемого металла, как предел текучести, показатели упрочнения

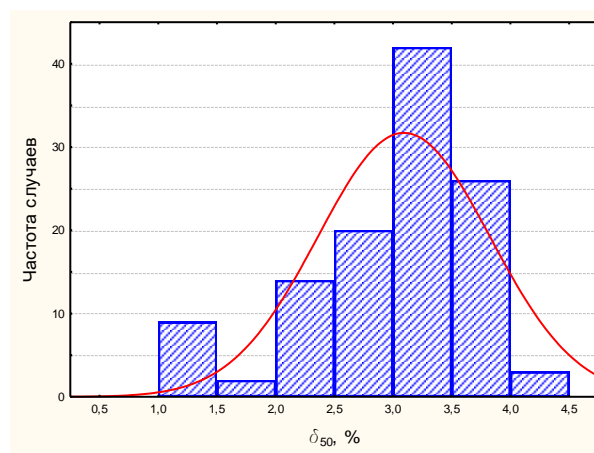
также представляют собой случайные величины, распределение которых определяется статистическими характеристиками (математическим ожиданием, средним квадратическим отклонением и др.). На рис. 2.43 показаны гистограммы распределения фактических пределов текучести σ_T (а) и прочности σ_B (б), относительного удлинения δ_{50} (в) упрочненной в процессе холодной прокатки полосы из стали марки SAE 1015 с обжатием $\varepsilon = 70\%$. Результаты статистического анализа предела текучести, предела прочности и относительного удлинения после прокатки полос приведены в табл. 2.4. Частотное распределение этих параметров близко к нормальному.



а



б



в

Рисунок 2.43 – Гистограммы распределения фактических пределов – текучести (а) и прочности (б) и относительного удлинения (в) холоднокатаной стали SAE 1015 после обжатий 70 %

Таблица 2.4 – Результаты статистического анализа механических характеристик полос из стали марки SAE 1015 после обжатий 70 % (объем выборки $n = 116$)

Параметры	\bar{X}	S	Асимметрия	Экссесс
$\sigma_{0,2}$, МПа	856,28	17,49	-0,017	-0,47
σ_B , МПа	875,24	17,51	-0,12	0,31
δ_{50} , %	3,07	0,73	-0,92	0,38

\bar{X} – математическое ожидание; S – среднее квадратическое отклонение

Выбор режимов обжатий и натяжений, энергосиловые и кинематические параметры процесса холодной прокатки полос в основном зависят от характера упрочнения деформируемой стали, поэтому важно получение гистограмм распределения предела текучести холоднокатаной стали в зависимости от степени суммарного обжатия, без проведения механических испытаний. В работе [209] для описания изменения предела текучести σ_T в зависимости от степени суммарного обжатия предложена формула:

$$\sigma_T = \sigma_{0,2\text{исх}} + \frac{A}{B+1} \cdot \frac{\varepsilon_{\Sigma_i}^{B+1} - \varepsilon_{\Sigma_{i-1}}^{B+1}}{\varepsilon_{\Sigma_i} - \varepsilon_{\Sigma_{i-1}}}, \quad (2.27)$$

где $\sigma_{0,2\text{исх}}$ – предел текучести материала полосы в исходном, недеформированном состоянии; A , B – эмпирические величины, определяемые пластическими свойствами стали; $\varepsilon_{\Sigma_{i-1}}$, ε_{Σ_i} – суммарное относительное обжатие за $i-1$ и i проходов.

Для расчета распределения предела текучести холоднокатаной стали был применен метод Монте-Карло с использованием уравнения (2.27). Гистограммы распределения предела текучести упрочненной в процессе холодной прокатки с обжатиями 60 и 70 % стали показаны на рис. 2.44.

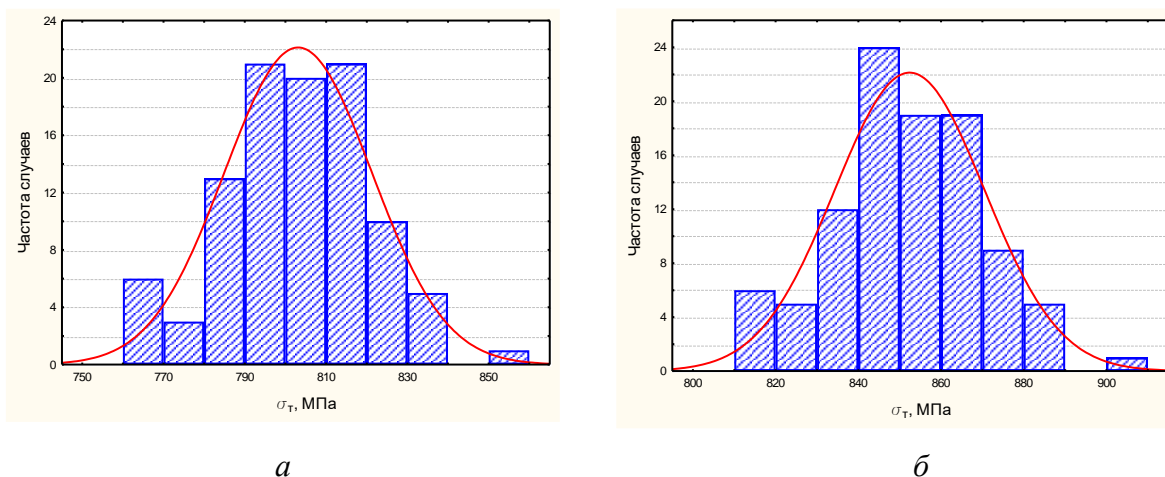


Рисунок 2.44 – Гистограммы распределения величины предела текучести $\sigma_T(\epsilon)$ холоднокатаной стали SAE 1015 после обжати: *a* – 60 %; *б* – 70%

После прокатки с обжатием 60 % среднее значение $\sigma_T(\epsilon)$ равно 802,8 МПа и среднее квадратическое отклонение $\sigma_T(\epsilon)$ равно 18,03 МПа. После суммарной деформации 70 % эти характеристики имели значения 852,1 и 18,18 МПа.

Сравнение полученного расчетным путем распределения $\sigma_{0,2}$ с экспериментальным (рис. 2.43, *a*) свидетельствует о полном учете в расчетах влияния случайного характера процесса.

Также было выполнено статистическое имитационное моделирование реального режима прокатки полосы на пятиклетевом стане 1700 из стали марки SAE 1015 толщиной 0,6 мм, шириной 1200 мм с обжатием 70 % (табл. 2.5) с учетом возмущения процесса прокатки.

Вначале для каждой точки полосы выполнена процедура имитации значения предела текучести и толщины полосы перед входом в первую клеть. Процесс имитации реализован с использованием процедуры генерации случайного числа по закону нормального распределения со стандартным отклонением 20 МПа для предела текучести и 0,035 мм для толщины подката, что соответствует попаданию в поле допуска ГОСТ 19904-90. Межклетевые натяжения, скорости и коэффициенты трения принимались

постоянными по клетям. Также сохранялось базовое соотношение обжатий по клетям.

Таблица 2.5 – Технологические параметры режима холодной прокатки полосы из стали марки SAE 1015 толщиной 0,6 мм и шириной 1200 мм на 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь»

Клеть №	v_i , м/с	h_{i-1} , мм	h_i , мм	ε_i , %	N_{i-1} , кН	N_i , кН
1	5,39	2,0	1,49	25,5	118	249
2	7,51	1,49	1,1	26,17	249	203
3	10,05	1,1	0,82	25,45	203	171
4	13,52	0,82	0,62	24,39	171	138
5	13,87	0,62	0,6	3,23	138	27

Для каждой точки полосы был выполнен расчет параметров процесса прокатки, в результате чего были сформированы соответствующие массивы значений, которые, в связи с имитацией возмущений, являлись случайными числами. Расчетные распределения энергосиловых параметров процесса прокатки полосы приведены в табл. 2.6.

Согласно полученным данным, усилие прокатки имеет наибольшее колебание в первой и последней клетях стана. Значительный диапазон колебаний усилий в последней клетке свидетельствует о том, что именно эту клетку в первую очередь необходимо оснащать средствами оперативного воздействия на плоскостность полосы. Нестабильность мощности и момента прокатки в первых клетях стана и усилия прокатки в первой клетке связана со значительными колебаниями исходного предела текучести и толщины подката. В связи с этим приводы первых клетей работают в нестабильном режиме. Поэтому при выборе деформационных режимов должны учитываться возможные значительные отклонения энергосиловых

параметров, приводящие к динамическим нагрузкам в приводных линиях и вибрациям клетей непрерывных станов холодной прокатки.

Таблица 2.6 – Энергосиловые параметры процесса прокатки полос из стали марки SAE 1015 толщиной 0,6 мм и шириной 1200 мм на 5-клетевом стане

Параметры	Клетки				
	1	2	3	4	5
\bar{P} , МН	12,37	12,05	11,25	10,74	6,29
S_P , МН	0,73	0,45	0,32	0,31	1,29
\bar{N} , кВт	1957	4316	3098	3261	3538
S_N , кВт	179	129	123	119	83
\bar{M} , кН·м	108,9	172,4	140,8	110,1	76,5
S_M , кН·м	9,94	5,14	3,68	2,65	1,29

\bar{P} , \bar{N} , \bar{M} – средние значения усилий, мощности и моментов прокатки; S_P , S_N , S_M – средние квадратические отклонения усилий, мощности и моментов прокатки

Выводы по главе 2

1. Разработана модель электромеханической системы непрерывного прокатного стана, включающая математическое описание двухкорного электродвигателя, механической части привода, опорных и рабочих валков стана.

2. 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.

3. 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.

4. Выполнена статистическая оценка точности разработанной комплексной динамической модели процесса холодной прокатки, в результате установлено следующее:

4.1 Максимальная погрешность расчета усилия прокатки не превысила 15,5 %, среднее значение погрешности составило 5,6 %.

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

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

5. С применением разработанной динамической модели процесса холодной прокатки выполнено исследование изменения геометрических, кинематических и энергосиловых параметров технологического процесса непрерывной прокатки в условиях нестационарного динамического нагружения. Получены следующие результаты:

5.1 В линии привода рабочей клетки прокатного стана постоянно действуют крутильные колебания с частотой кратной 12,5 Гц, оказывающие влияние на валковый узел и, соответственно, на характер контактных напряжений в очаге деформации.

5.2 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.

5.3 Рассинхронизация скоростей рабочих валков приводит к отклонению нейтрального сечения от вертикали, характерной для стационарного процесса. Ее нарастание способствует постепенному наклону нейтрального сечения в сторону выхода из очага деформации, возникновению отрицательного опережения и проскальзывания верхнего валка.

5.4 Изменение условий трения, колебания окружной скорости валков и положения нейтрального сечения в очаге деформации приводят к колебаниям геометрических и энергосиловых параметров очага деформации. Размах колебаний геометрических и силовых параметров составляет 5–15 %, размах колебаний энергетических характеристик процесса, определяющихся скоростными параметрами, достигает 20–40 %.

5.5 Распределения фактических значений исследуемых параметров подчиняются нормальному или близкому к нему закону.

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

3.1 Исследование вибрационных процессов, возникающих в рабочих клетях непрерывных широкополосных станов холодной прокатки

Проведены промышленные экспериментальные исследования повышенных вибрационных процессов, возникающих на 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь». Данные о метрологическом обеспечении промышленных экспериментов представлены в приложении 2.

На данном стане вибрации возникали при прокатке полос толщиной 0,3–0,5 мм после достижения определенной для каждой толщины скорости прокатки (см. табл. 3.1), сопровождаясь повышенными шумовыми характеристиками 4-й клетки и колебаниями полосы в предыдущем межклетевом промежутке.

Таблица 3.1 – Виброопасные диапазоны скоростей для полос с толщинами 0,3-0,5 мм

Толщина полосы, мм	Скорость прокатки, м/с
0,3	10-12 и более
0,4	14-15 и более
0,5	16 и более

Для предотвращения этого явления операторы вынуждены были уменьшать скорость прокатки, в среднем, с 15 м/с до 8–9 м/с, тем самым, снижая производительность стана.

Для исследования вибраций был использован стационарный вибродиагностический комплекс фирмы «ВАСТ» (г. Санкт-Петербург). Датчики, фиксирующие вибрацию, были установлены горизонтально вдоль

линии прокатки на станинах 4-й клетки со стороны привода и со стороны зоны обслуживания.

Измерения производились в диапазоне частот 0–800 Гц. Информация о режимах прокатки и вибрации фиксировалась персональными компьютерами круглосуточно в автоматическом режиме.

Анализ спектров вибрации показал, что уровень вибраций в клетке со стороны привода значительно превышает вибрацию со стороны обслуживания (см. рисунки 3.1 и 3.2).

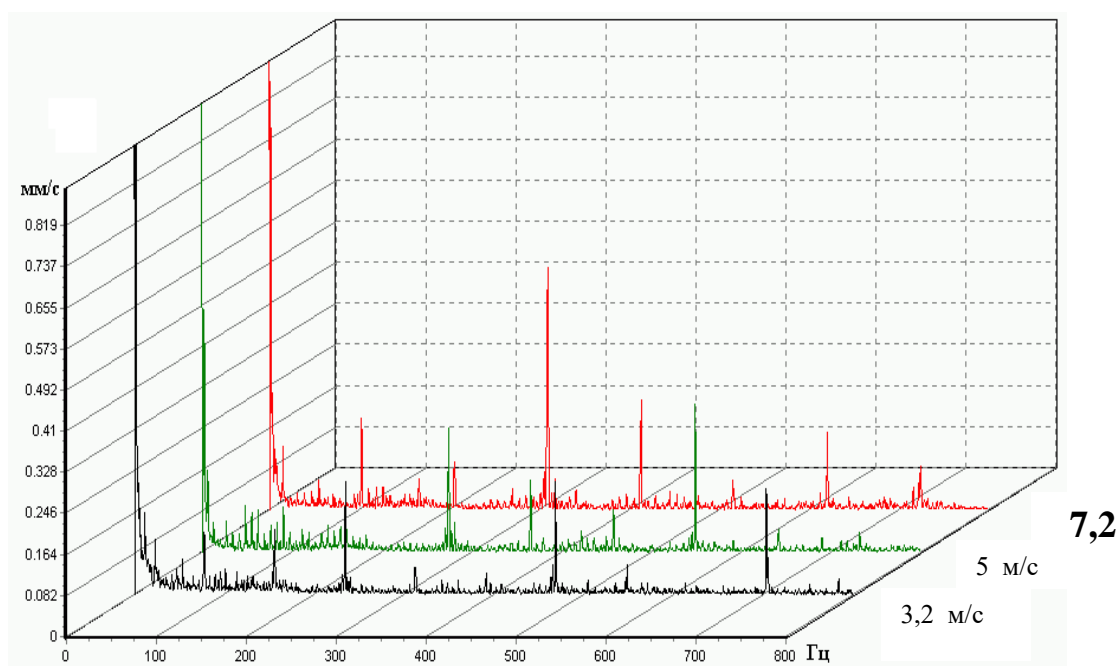


Рисунок 3.1 – Вибрация редуктора при различных скоростях прокатки

Чтобы уточнить причину возникновения резонансных колебаний клетки, подготовили и провели активный эксперимент – искусственный вывод клетки в режим резонанса [225, 226].

При прокатке полос толщиной 0,3–0,4 мм, шириной 995–1175 мм клетку выводили в режим «*chatter*» путем постепенного повышения скорости прокатки, а затем уменьшали скорость до безопасного уровня.

Измерения вибраций производили путем снятия временного сигнала – зависимости амплитуды виброускорения от времени – до резонанса, во время резонанса и после его прекращения (см. рис. 3.1, 3.2). При этом пользовались

переносным датчиком вибрации, который крепили с помощью магнита. Снятия временных сигналов основных узлов рабочей клетки (подушек рабочих и опорных валков, станин, ГНУ) осуществляли в двух направлениях: поперек и по направлению прокатки [132].

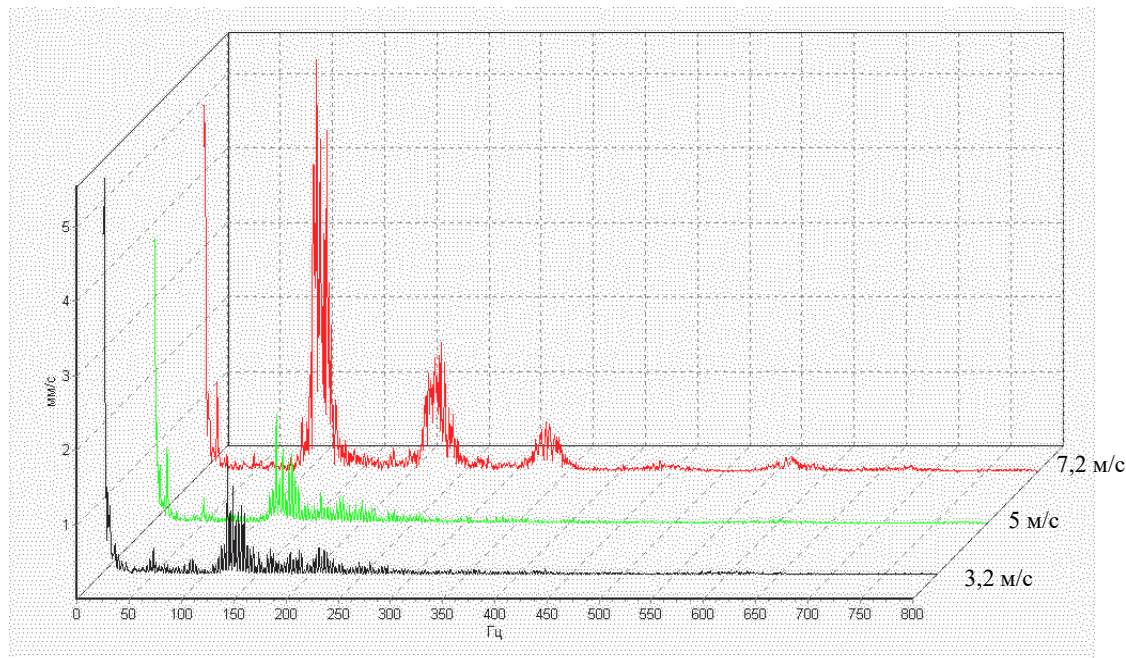


Рисунок 3.2 – Вибрация станины при различных скоростях прокатки

Одновременно с помощью АСУ ТП стана фиксировали все технологические и энергосиловые параметры режима прокатки, что позволило установить взаимосвязь этих параметров с характеристиками вибрационных процессов.

Далее с помощью аналогово-цифровых преобразователей (АЦП), входящих в состав вибродиагностического комплекса «*Portable*» преобразовали временные сигналы, снятые с основных узлов рабочей клетки во время активного эксперимента, в амплитудно-частотные спектры, используя преобразования Фурье (см. рис. 3.3) .

Основные результаты активного эксперимента следующие [132, 147]:

– с увеличением скорости прокатки происходит рост уровня вибраций в диапазоне частот 100-200 Гц;

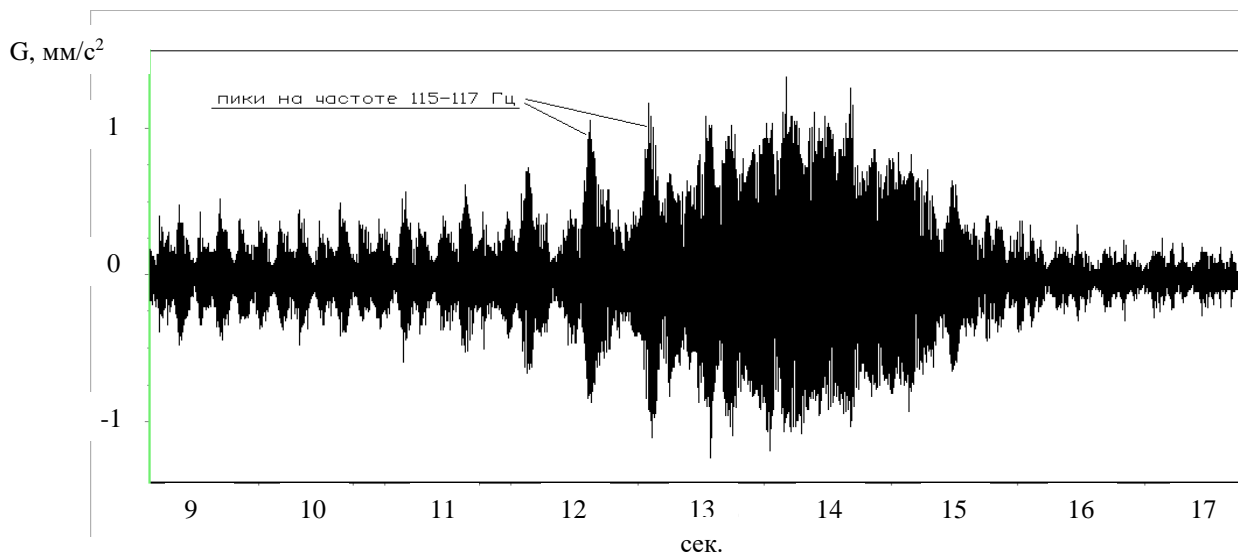


Рисунок 3.3 – Временной сигнал, характерный для момента вибраций на листовом прокатном стане в максимальной фазе

- в момент вибраций в максимальной резонансной фазе на всех узлах клетки происходит рост гармонического ряда на частоте 110–120 Гц, с максимальной амплитудой на первой гармонике от 130–155 Дб;

- максимальный уровень вибраций на частоте 110–120 Гц имеет место на узлах опорных валков со стороны обслуживания стана и достигает в момент их максимального уровня 155 Дб (см. рис. 3.4);

- усилие прокатки в 4-й клетки в момент начала резонанса изменялось с диапазоном $\pm 10\%$ (700–800 кН), при этом разность переднего и заднего натяжений полосы изменялась в диапазоне от 20 % до 50 % от величины, измеренной до режима резонанса.

Для определения характеристик вибраций исследуемой механической системы (клетки) без переменного внешнего воздействия, а также для выявления узлов рабочей клетки, ответственных за возникновение повышенного уровня колебаний, были проведены эксперименты по определению собственных частот станин, рабочих и опорных валков, их подушек, а также тензоролика и перегибного ролика.

Для определения собственных частот путем ударного воздействия возбуждали в выше перечисленных узлах рабочей клетки продольные и

поперечные свободные колебания, которые фиксировали при помощи вибродиагностического комплекса «*Portable*» и программного пакета измерения собственных частот *SHOCK 1.1*.

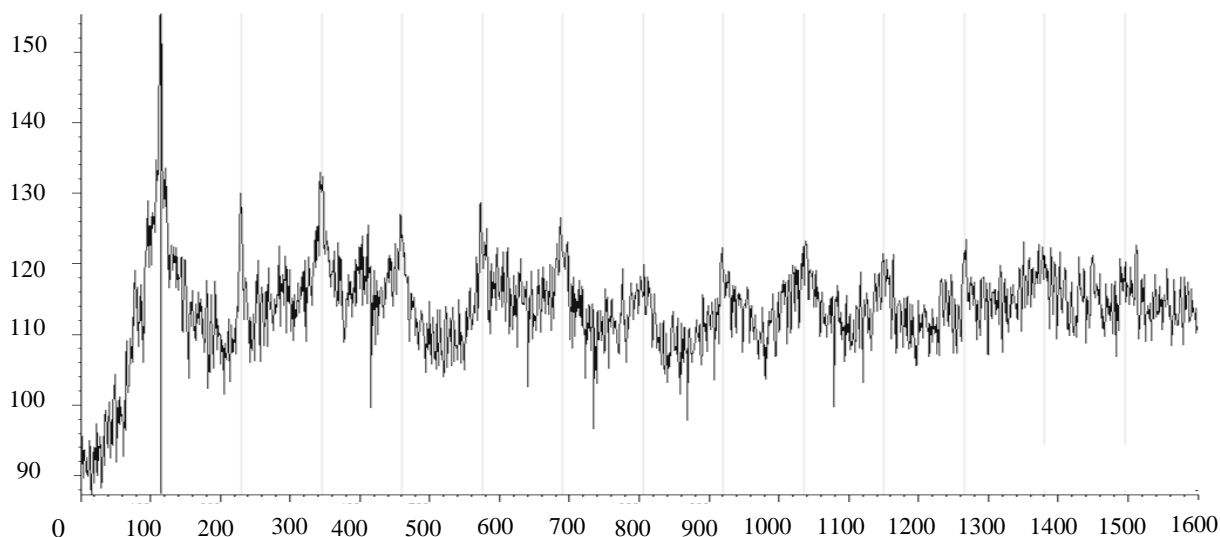


Рисунок 3.4 – Спектр вибрации, характерный для момента резонансных вибраций, полученный в результате измерений на подушке верхнего опорного вала со стороны обслуживания

В качестве ударного инструмента использовали: стальной молоток, стальную кувалду, деревянный брус. Спектры собственных частот не получили качественных различий в зависимости от материала ударного инструмента. Удар более жестким материалом (сталь) вызывал рост амплитуды пиков гармонического ряда частоты собственных колебаний в диапазоне (800–1600 Гц), в то время как удар деревом вызывал рост амплитуды гармоник того же ряда в диапазоне (100–400 Гц). Полученные таким образом величины собственных колебаний отдельных узлов клетки представлены в табл. 3.2.

Поскольку логарифмический декремент [227], характеризующий темп затухания колебаний, определяемый как натуральный логарифм отношения двух последовательных максимальных отклонений (амплитуд) разделенных интервалом времени: $\Lambda = \ln \frac{A_i}{A_{i-1}}$ (i – номер рассматриваемого отклонения), для

всех проведенных измерений составил значение менее 1, то частоты свободных колебаний узлов можно принять равными частотам их собственных колебаний.

Таблица 3.2 – Собственные частоты колебаний узлов рабочей клетки

Узел	Частоты, Гц
Рабочий валок	224
Рабочий валок в сборе	390
Опорный валок	264
Опорный валок в сборе	503
Подушка рабочего валка	670
Подушка рабочего валка в сборе	706
Подушка опорного валка	270
Подушка опорного валка в сборе	338
Станина	117
Тензоралик	566
Перегибной ролик	460

В ходе активного эксперимента было установлено, что в момент «*chatter*» происходит рост уровня вибрации на частоте 110–120 Гц. Согласно результатам, представленным в табл. 3.2, данному диапазону частот соответствует только собственная частота станины 117 Гц при возбуждении колебаний по направлению прокатки [132].

Примеры спектров собственных частот узлов станины представлены на рисунках 3.5–3.7.



Рисунок 3.5 – Спектр собственных частот станины

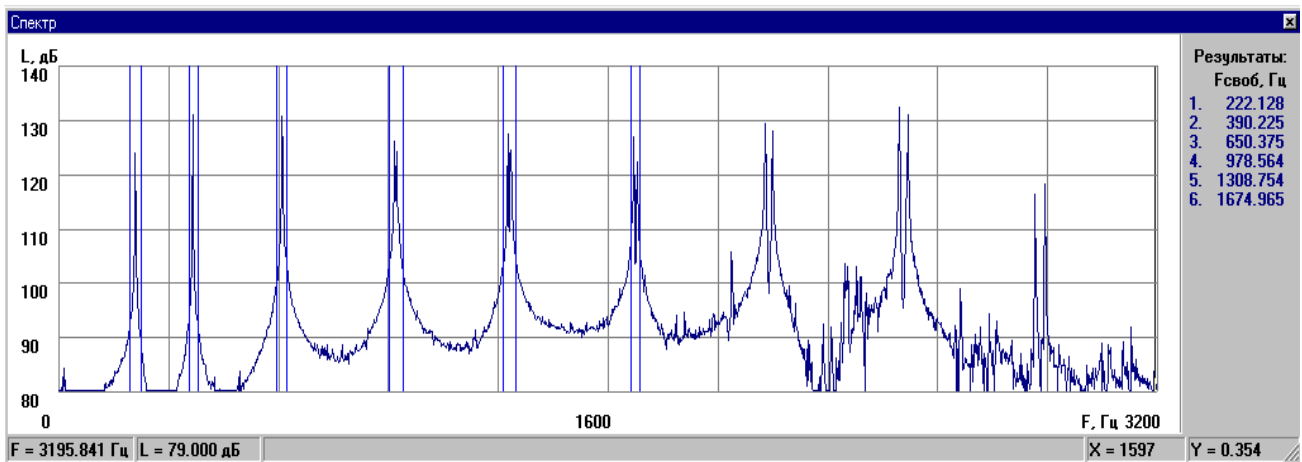


Рисунок 3.6 – Спектр собственных частот рабочего вала

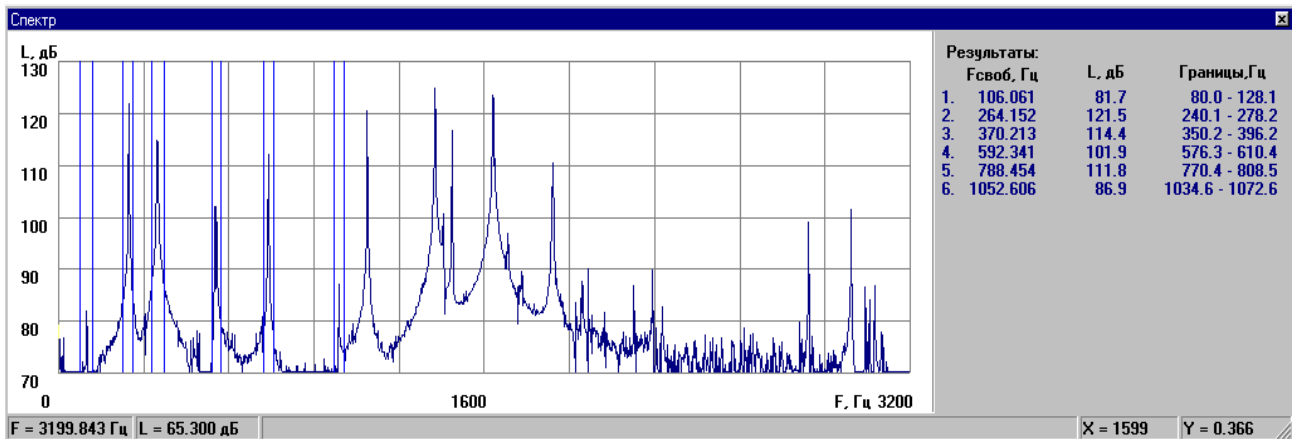


Рисунок 3.7 – Спектр собственных частот опорного вала

Анализ результатов проведенных вибродиагностических исследований выявил основной диапазон частот, при котором рабочая клеть и ее узлы входят в режим вибраций, равен 112–119 Гц, что совпадает только с

собственной частотой станин 117 Гц, все остальные узлы имеют собственные частоты в диапазоне 224–706 Гц.

Причина возникновения повышенного шума в клети прокатного стана – неблагоприятное наложение на собственную частоту определенного узла колебаний другого узла либо вибраций, возникающих под воздействием какого-либо источника возбуждения.

3.2 Исследование факторов и описание механизма возникновения резонансных вибраций

Вибрации при прокатке оказывают негативное влияние на тонкую стальную полосу и оборудование непрерывных прокатных станов. Они сопровождаются низким звуком – «гудением» (англ. «*chatter*») и наблюдаются на многих отечественных и зарубежных металлургических предприятиях. Из-за вибраций рабочих клетей не всегда достижимы высокие скорости прокатки, а значит и их высокая производительность.

В рамках исследования данной научно-технической проблемы проведен анализ более 1000 технологических режимов 5-клетевого стана холодной прокатки 1700 Череповецкого металлургического комбината 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.

Выявлены следующие факты:

1. Технологический процесс прокатки на 5-клетевом стане «1700» сопровождается колебаниями основных технологических и энергосиловых параметров, как при динамических режимах (разгон, торможение), так и при постоянной скорости прокатки холоднокатаных полос. Колебаниям подвергаются: межклетевые натяжения, усилия прокатки, токи якорей

двигателей, скорости верхнего и нижнего валков, разница скоростей верхнего и нижнего валков, положения гидронажимных устройств.

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

На рисунках 3.8, 3.9 показаны характерные колебания технологических параметров.

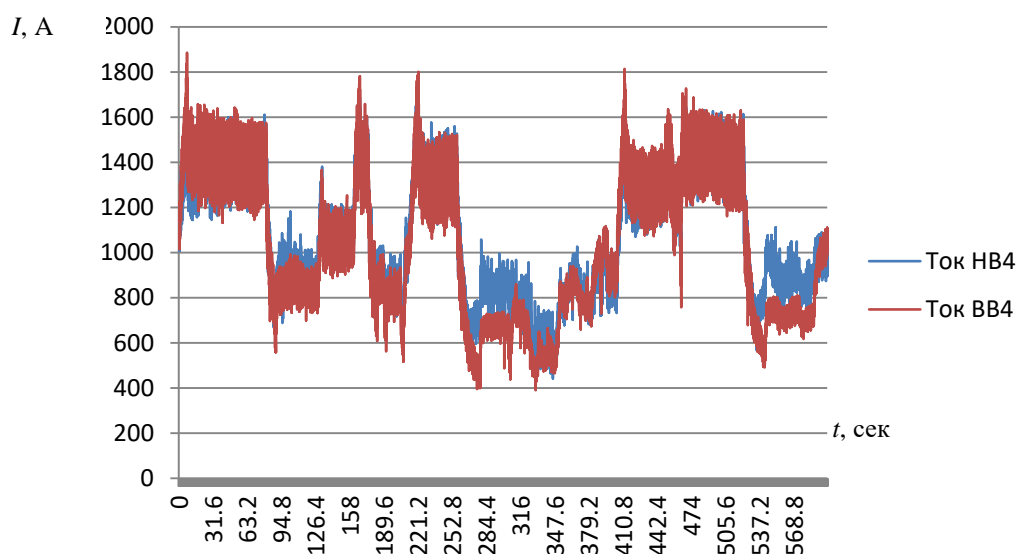


Рисунок 3.8 – График колебаний токов двигателей верхнего и нижнего валка клетки № 4

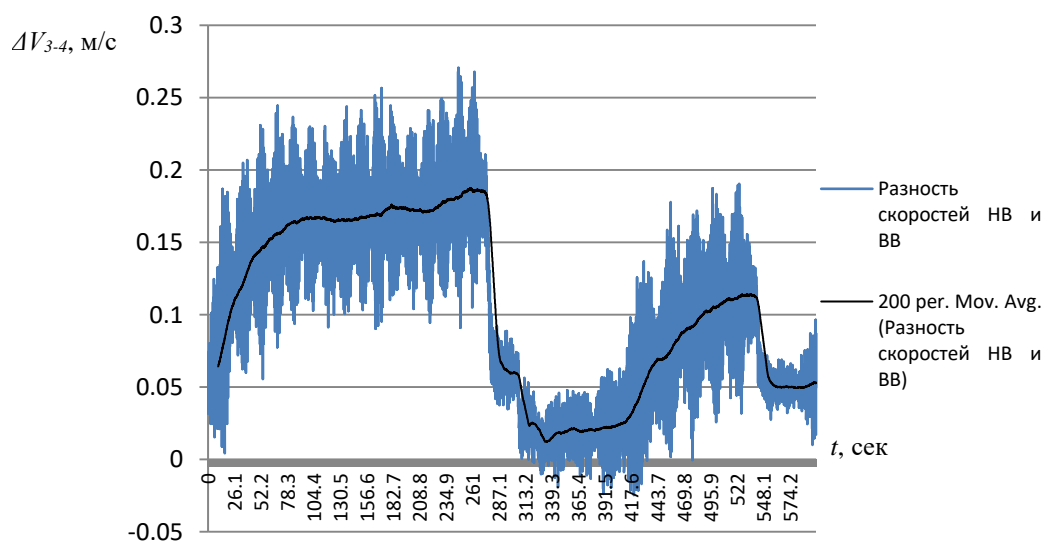


Рисунок 3.9 – График колебаний разницы скоростей верхнего и нижнего валка клетки № 4

Причин вышеуказанных колебаний технологических параметров несколько:

- колебания моментов в линии привода;
- процесс листовой прокатки с натяжением характеризуется непостоянством секундных объемов полосы в межклетевых промежутках, нестабильность или колебания указанных объемов могут вызывать нестабильность технологических параметров.

Был проведен более подробный анализ изменения секундных объемов в межклетевых промежутках при прокатке различного сортамента на 5-клетевом стане 1700. Секундные объемы в межклетевых промежутках вычислялись по непрерывно изменяющимся значениям скорости рабочих валков и толщины полосы в каждой клетке стана (параметры непрерывно фиксируются АСУ ТП), ширина полосы была принята постоянной. Диаграммы изменения разности секундных объемов металла в клетях № 3 и № 4 представлены на рисунках 3.10–3.14.

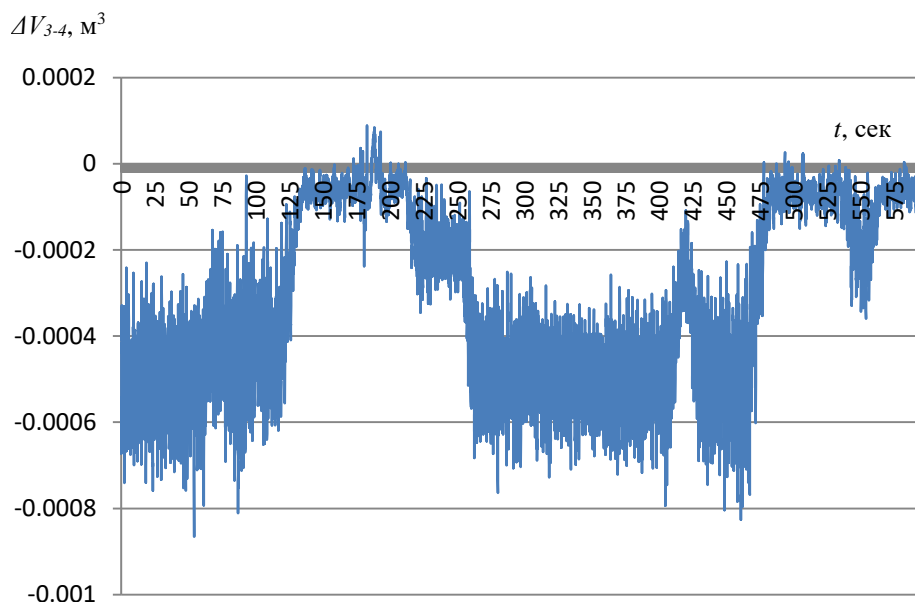


Рисунок 3.10 – Диаграмма, свидетельствующая о прокатке с натяжением (разность объемов меньше нуля, прокатка металла толщиной 0,45 мм)

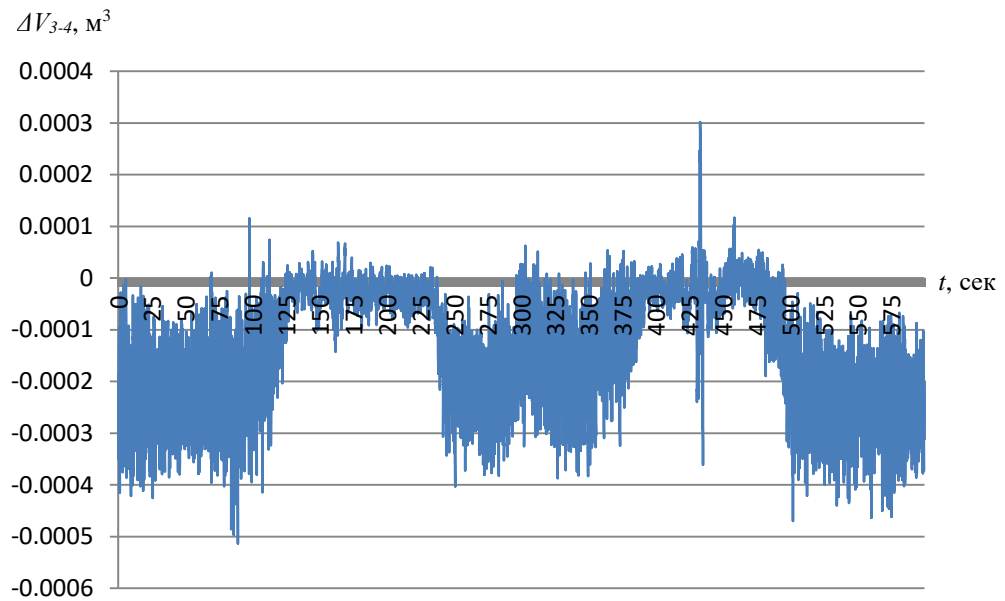


Рисунок 3.11 – Диаграмма, свидетельствующая о прокатке с натяжением (разность объемов меньше нуля, прокатка металла толщиной 0,6 мм)

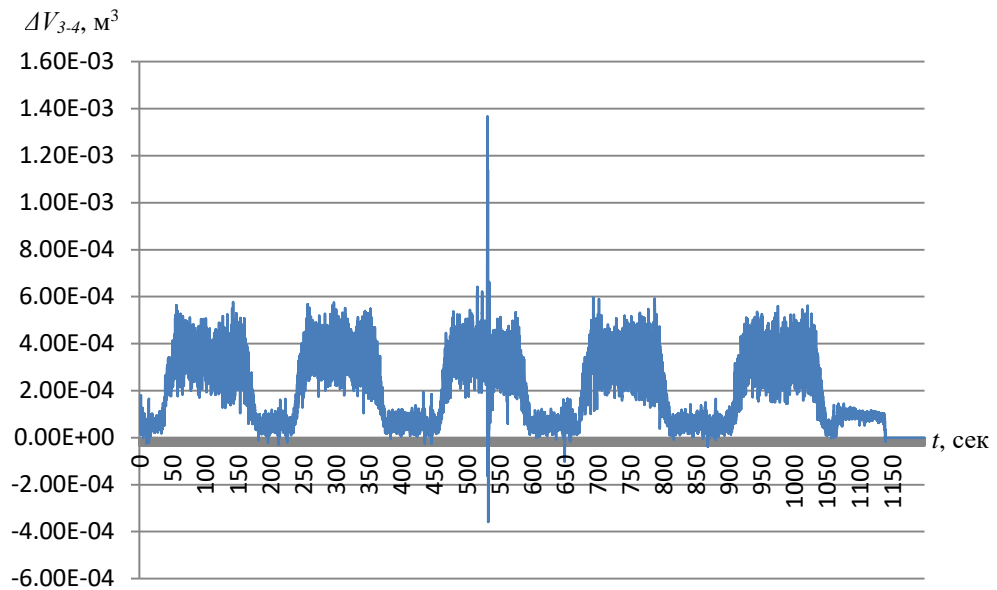


Рисунок 3.12 – Диаграмма, свидетельствующая о прокатке с подпором (разность объемов выше нуля, прокатка металла толщиной 0,45 мм)

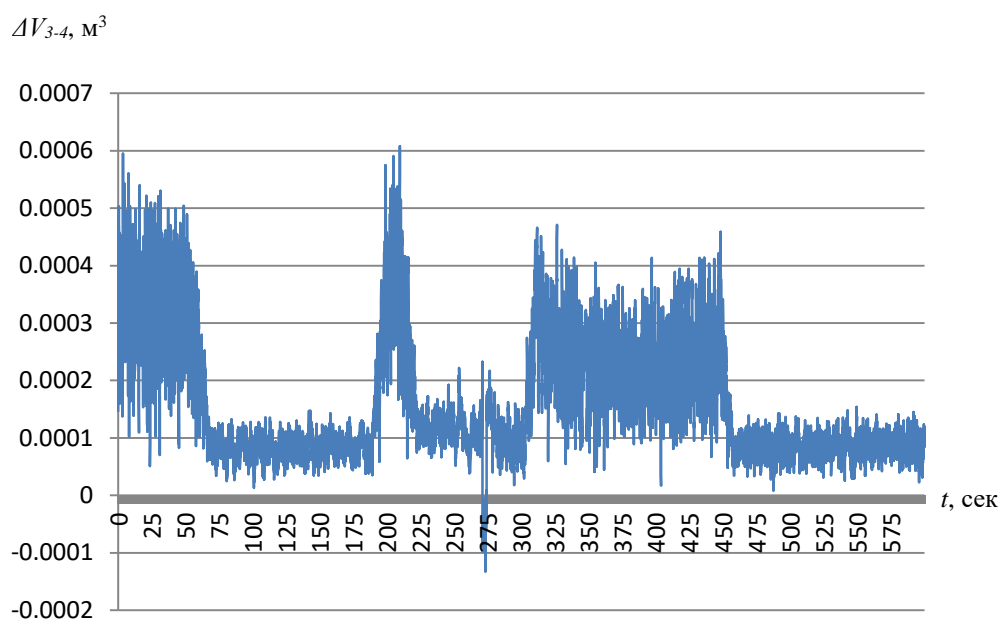


Рисунок 3.13 – Диаграмма, свидетельствующая о прокатке с подпором (разность объемов выше нуля, прокатка металла толщиной 0,75 мм)

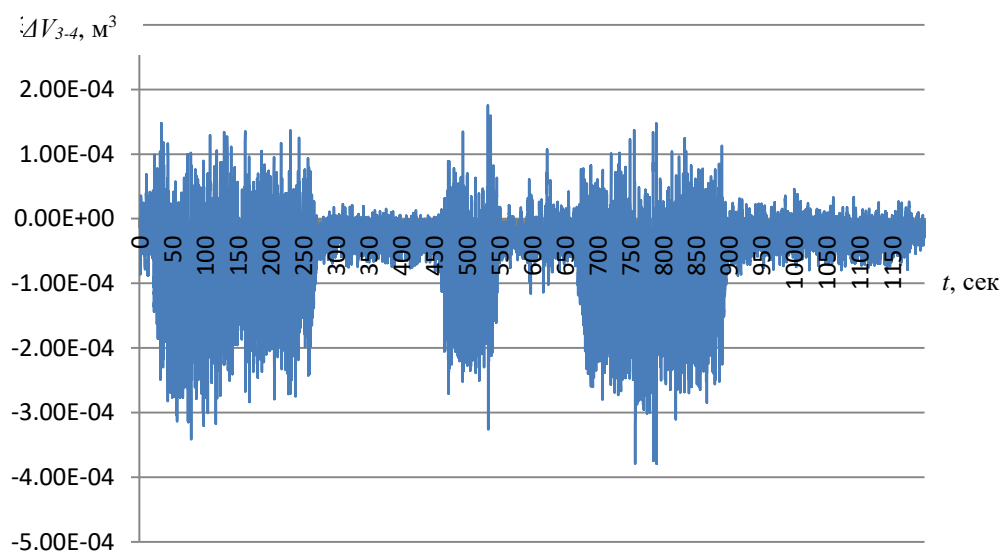


Рисунок 3.14 – Диаграмма, свидетельствующая о чередовании прокатки с натяжением и с подпором (разность объемов меняет знак в процессе прокатки, прокатка металла толщиной 0,45 мм)

Выявлено, что прокатка холоднокатаных полос на 5-клетевом стане 1700 осуществляется как с натяжением (отрицательная разность межклетевых секундных объемов полосы) [6], так и с подпором (разность межклетевых

секундных объемов больше нуля), также в ряде случаев может наблюдаться чередование натяжений и подпоров в межклетевых промежутках:

$$\Delta V_{i \cup i+1} = v_i h_i b - v_{i+1} h_{i+1} b < 0 \text{ – прокатка с натяжением;}$$

$$\Delta V_{i \cup i+1} = v_i h_i b - v_{i+1} h_{i+1} b > 0 \text{ – прокатка с подпором,}$$

где v_i, h_i, b – скорость, толщина и ширина полосы в i -м промежутке; $\Delta V_{i \cup i+1}$ – секундный объем металла в межклетевом промежутке ($i \dots i+1$).

Установлено, что в моменты колебаний разности межклетевых секундных объемов, при которых изменяется их знак, и возникают резонансные вибрационные процессы (см. рисунок 3.15) [228–230].

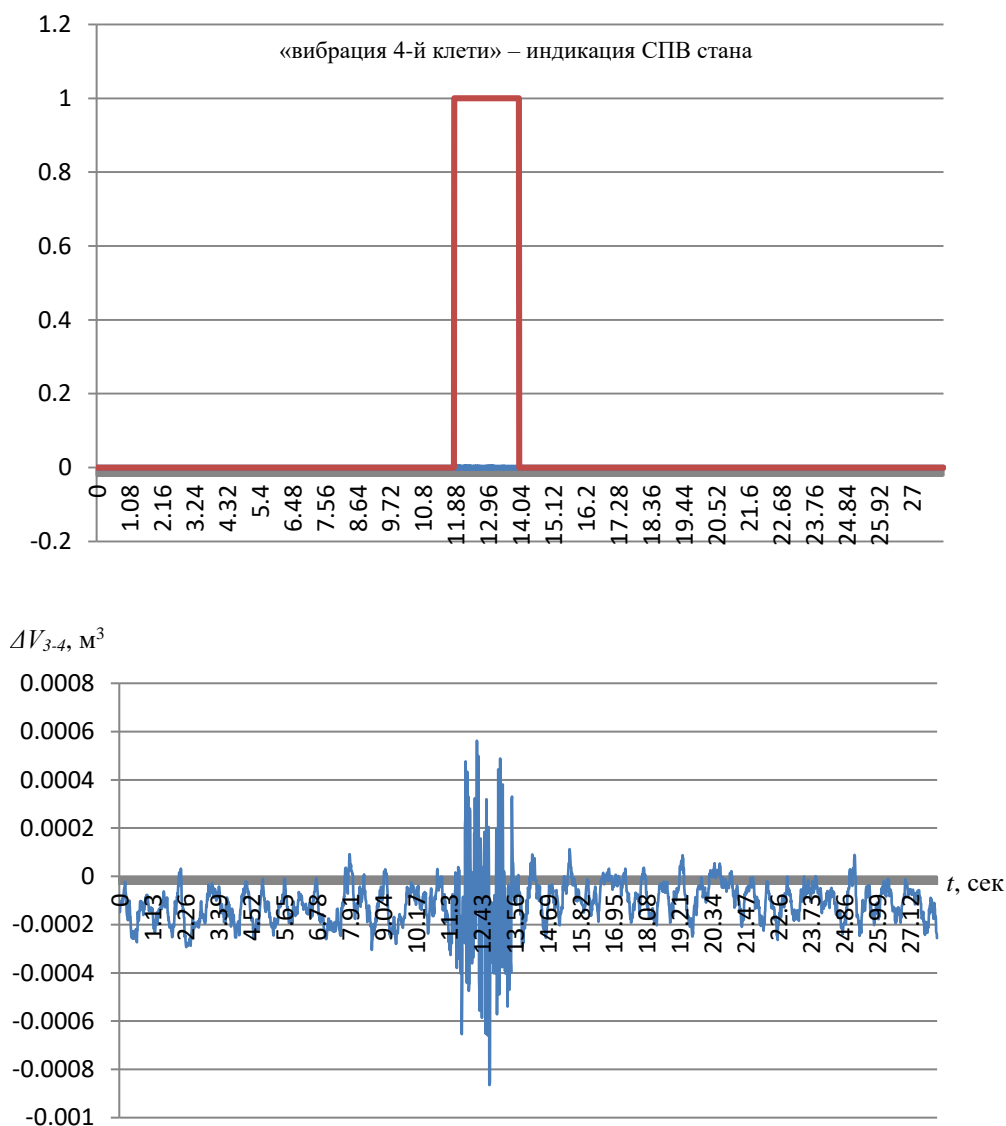


Рисунок 3.15 – Возникновение вибраций в рабочей клетке № 4 (индикация по изменению разности межклетевых секундных объемов)

Размах колебаний разности межклетевых секундных объемов во время негативных вибрационных процессов в рабочих клетях стана холодной прокатки может достигать 250–500 % от среднего значения.

Для исключения негативных вибраций необходимо, чтобы во всех режимах работы стана (установившиеся режимы, разгоны и торможения) разность межклетевых секундных объемов сохраняла знак, т.е. не происходило чередование условий прокатки полосы с натяжением с условиями прокатки с подпором.

Проведенный анализ позволил сформулировать понятия «устойчивый» и «неустойчивый режим прокатки».

Устойчивый режим прокатки – режим, при котором в процессе работы стана значение разности межклетевых секундных объемов не меняет знак.

Неустойчивый режим прокатки – режим, при котором значение разности межклетевых секундных объемов колеблется около нуля, изменение технологических параметров и параметров работы АСУ ТП стана может вызвать изменение знака межклетевых секундных объемов, обусловив тем самым возникновение вибраций. Примеры неустойчивого и устойчивого режимов прокатки показаны на рисунках 3.16, 3.17.

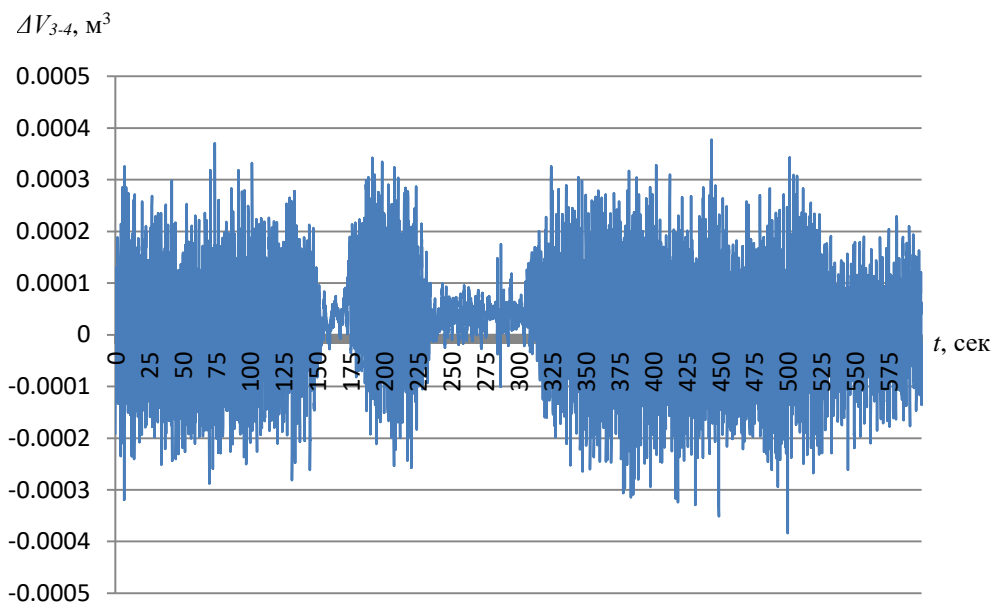
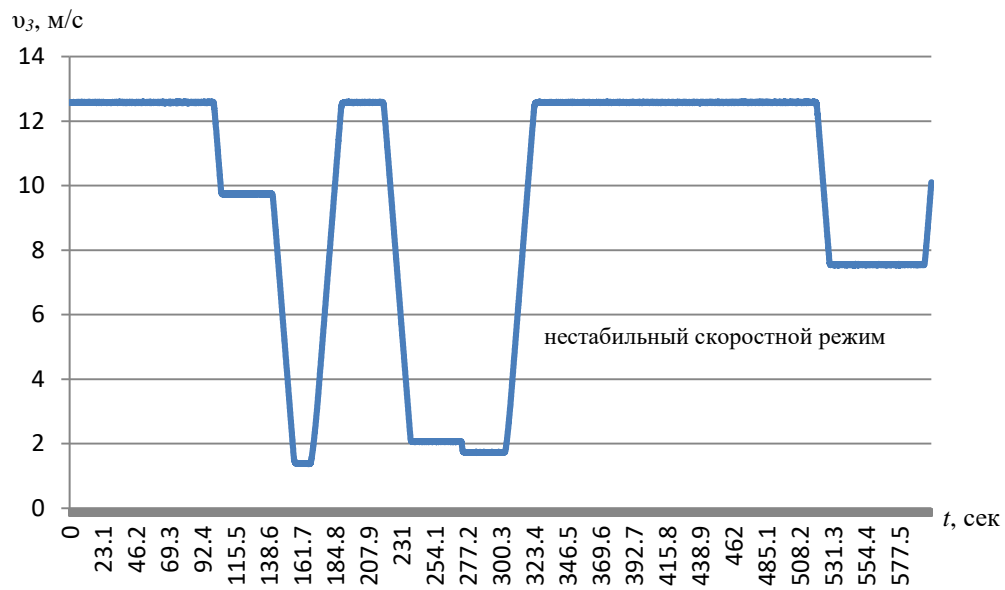


Рисунок 3.16 – Диаграммы работы стана в неустойчивом режиме прокатки

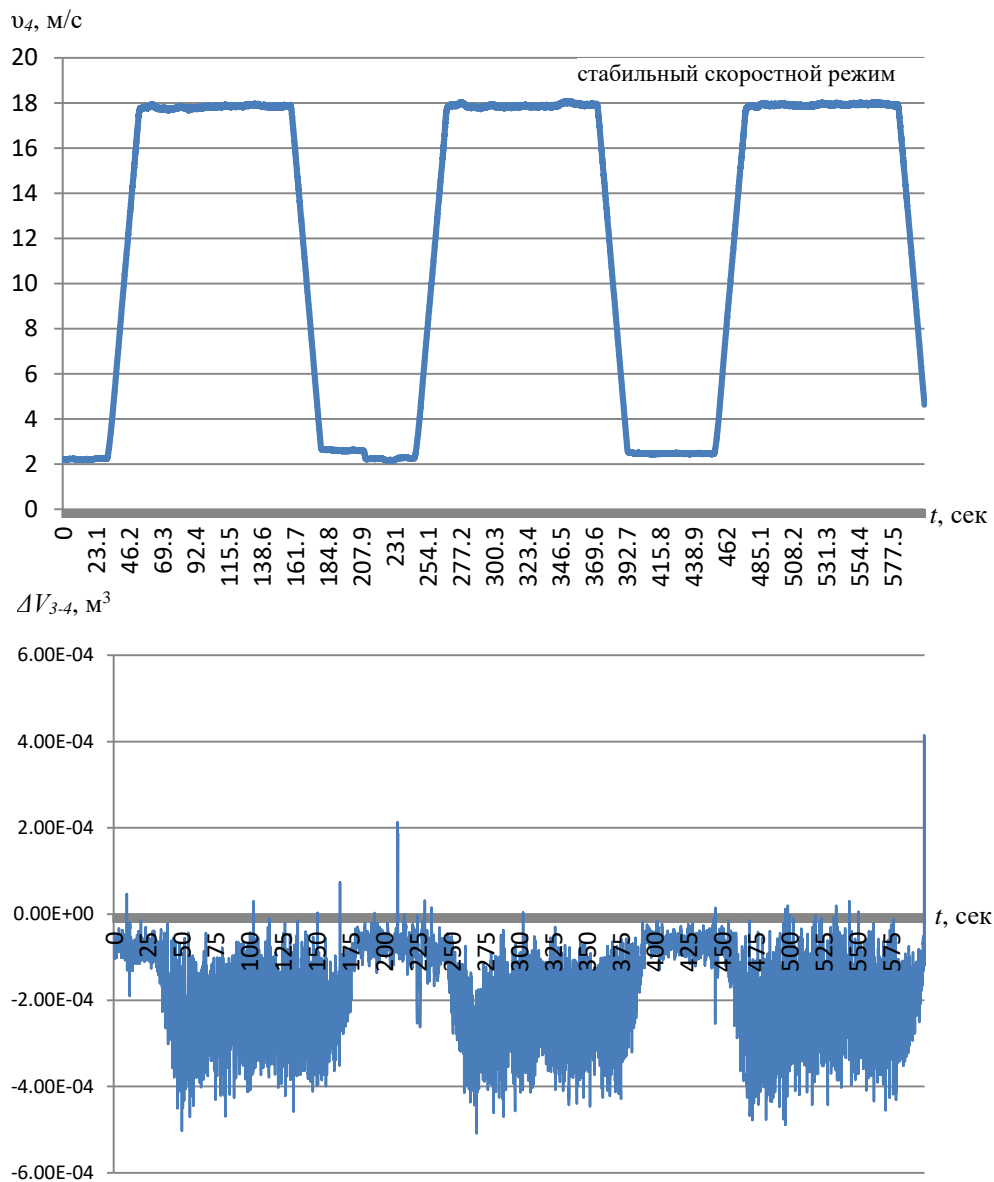


Рисунок 3.17 – Диаграмма устойчивого режима прокатки полосы

3.2.1 Исследование влияния характера режима натяжений полосы при непрерывной холодной прокатке на величину энергозатрат

Как было отмечено выше, в силу сложности регулирования процесса непрерывной прокатки, условия прокатки с натяжением могут чередоваться с прокаткой с подпором (рис. 3.14, 3.16), что оказывает влияние не только на качество проката, стабильность процесса (вероятность возникновения резонансных вибраций в рабочих клетях), но и на его энергоёмкость.

Для анализа энергетических затрат на процессы прокатки металла,

протекающие в условиях натяжения и подпора, были проанализированы параметры идентичных режимов деформации на 5-клетевом стане 1700 полос из углеродистой стали размерами 4,0/1,21–1220 мм.

Оценены токи якоря двигателя при прокатке с натяжением и подпором в клетях 3 и 4, относительные разности удельных затрат энергии (см. рис. 3.18–3.22). Для анализа взят период продолжительностью 600 секунд.

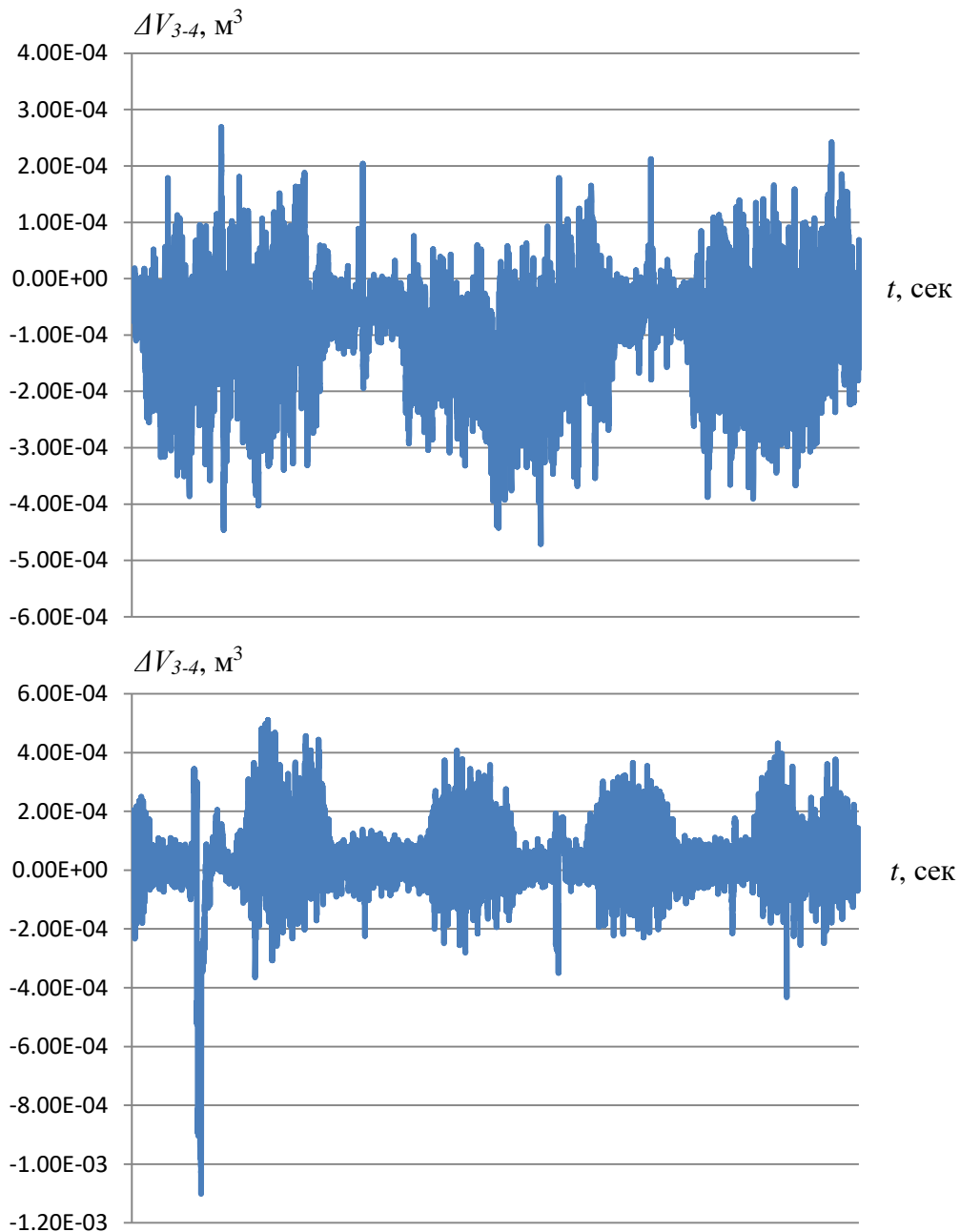


Рисунок 3.18 – Диаграммы разности секундного объема полосы в клетях №№ 3 и 4, прокатка режима с натяжением (верхняя диаграмма) и прокатка режима с подпором (нижняя диаграмма)

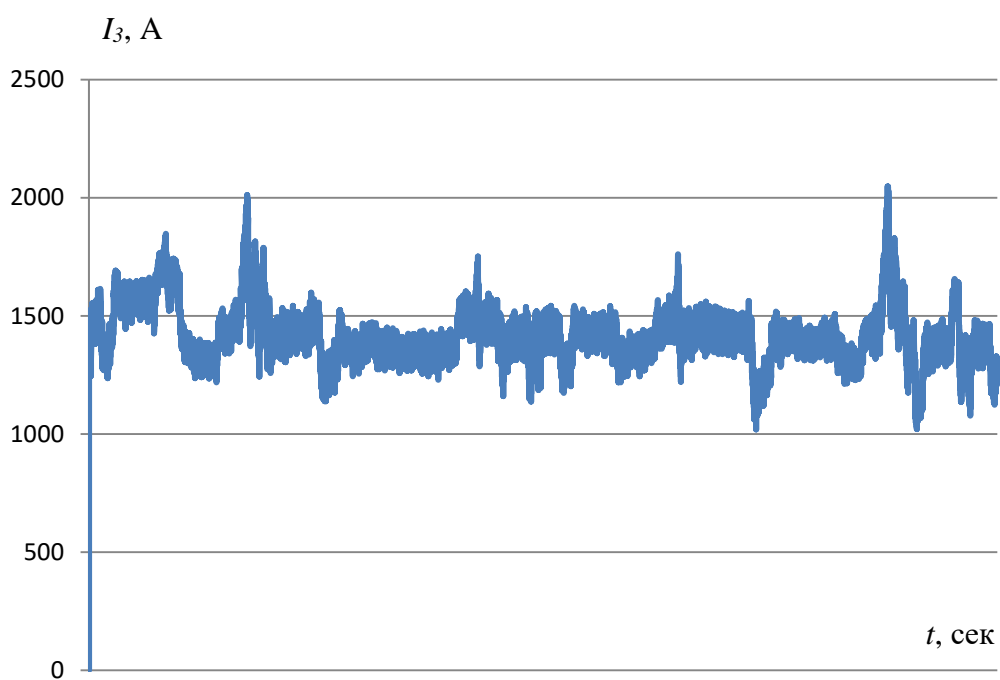
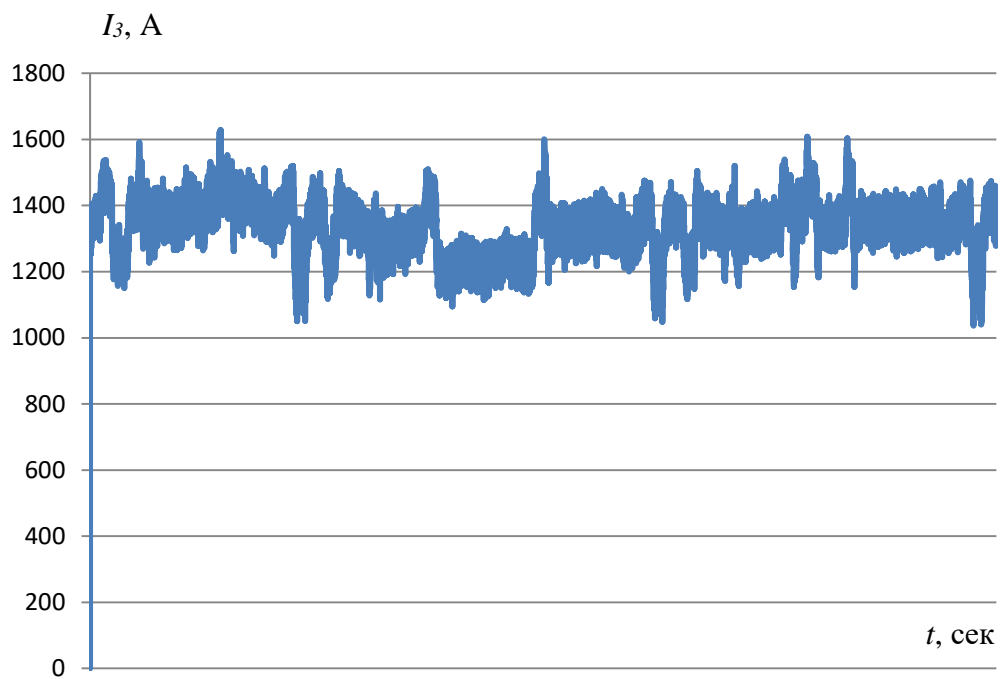


Рисунок 3.19 – Ток якоря двигателя клетки №3 при прокатке с натяжением (верхняя диаграмма) и подпором (нижняя диаграмма)

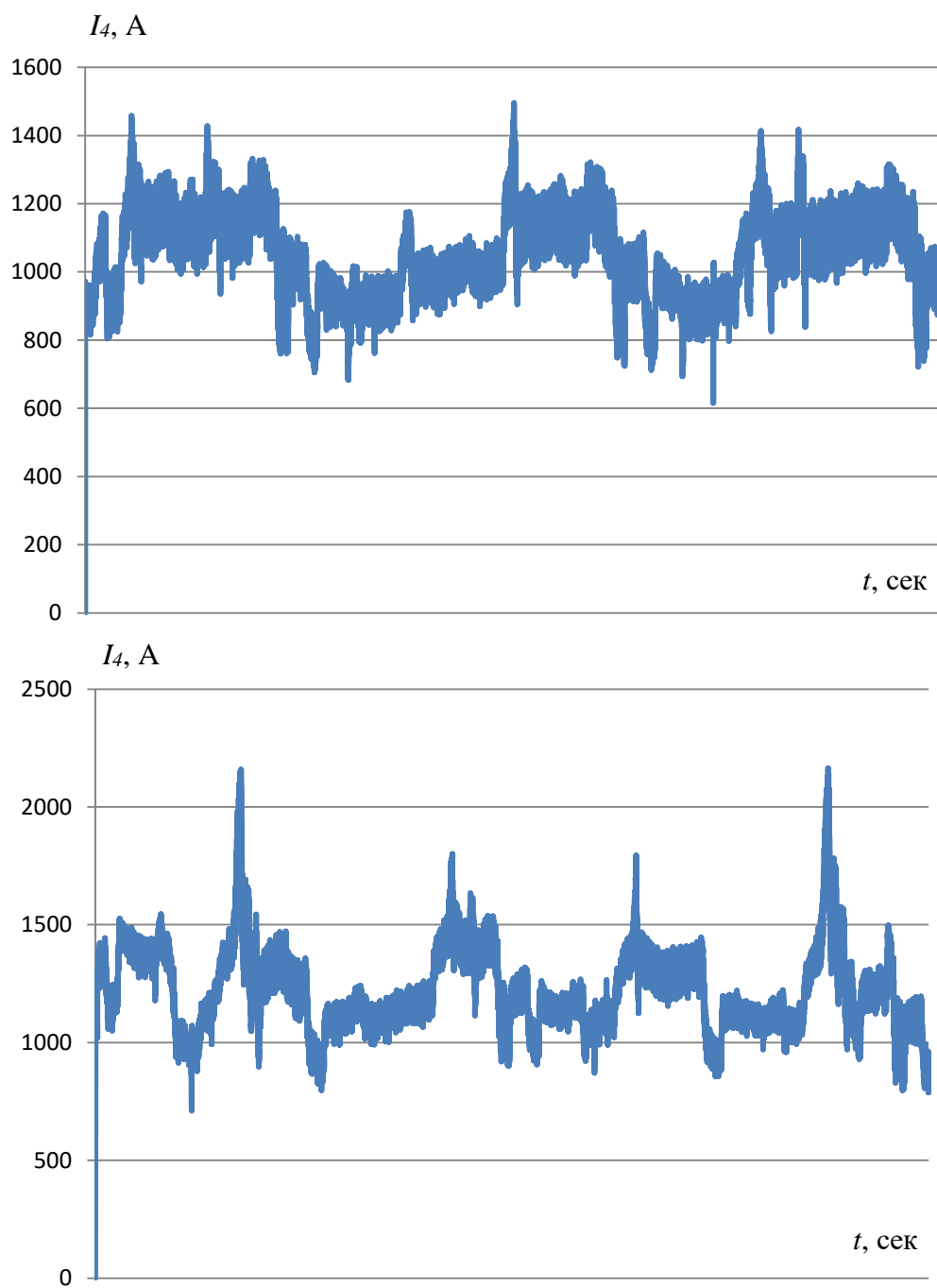


Рисунок 3.20 – Ток якоря двигателя клетки №4 при прокатке с натяжением (верхняя диаграмма) и подпором (нижняя диаграмма)

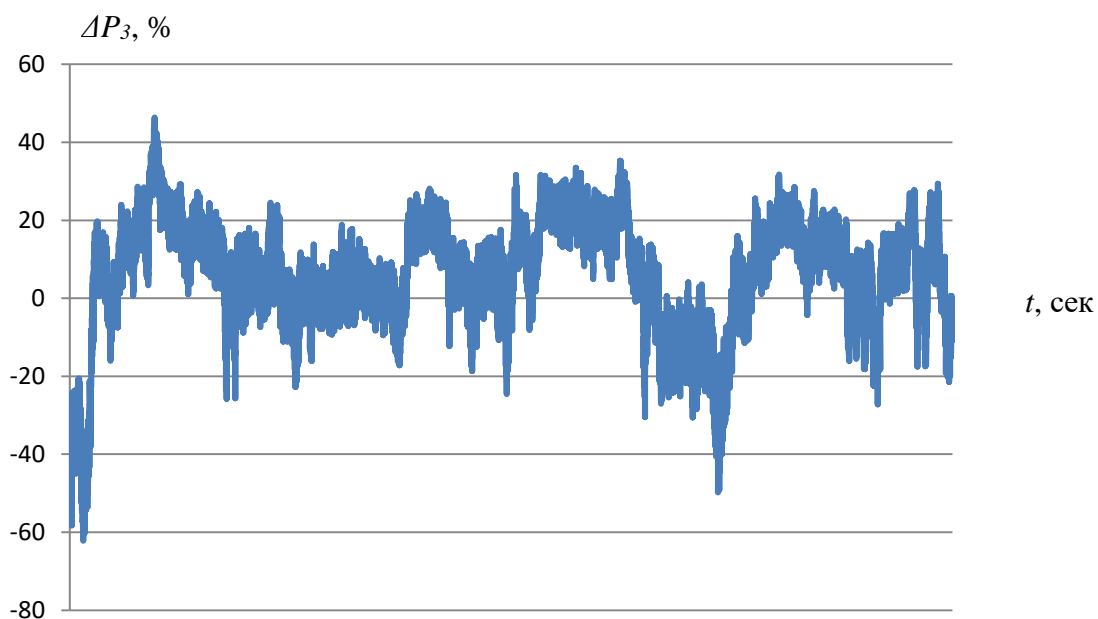


Рисунок 3.21 – Диаграмма относительной разности удельных мощностей, затрачиваемых в клетки № 3 на прокатку металла, в условиях подпора и натяжения

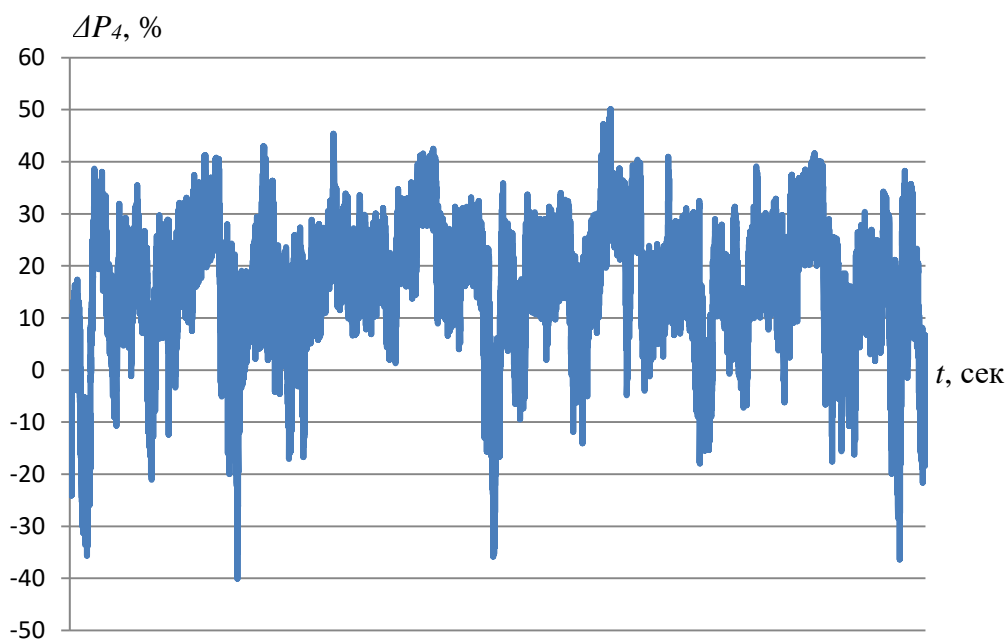


Рисунок 3.22 – Диаграмма относительной разности удельных мощностей, затрачиваемых в клетки № 4 на прокатку металла, в условиях подпора и натяжения

Из рисунков 3.11 и 3.12 видно, что ведение процесса непрерывной прокатки стальной полосы в условиях подпора приводит к увеличению токовых нагрузок в линии привода на 10–20 % и повышению его энергозатратности на 15–20 % по сравнению с прокаткой в условиях натяжения.

В результате проведенных исследований установлено, что ведение процесса непрерывной прокатки стальной полосы в условиях подпора приводит к увеличению токовых нагрузок в линии привода на 10–20 % (см. рис. 3.19 и 3.20) и повышению его энергозатратности на 15–20 % по сравнению с прокаткой в условиях натяжения (см. рис. 3.21, 3.22).

Таким образом, в ходе проведенных исследований была определена основная причина вибраций, заключающаяся в чередовании в процессе пластической деформации условий прокатки полосы с натяжением и подпором; выявлен резерв прокатного стана по экономии электроэнергии за счет минимизации или исключения режимов прокатки с подпором.

3.2.2 Исследование захвата полосы валками в условиях нестационарности технологического процесса

Возникновение вибраций связано не только с колебаниями разности межклетевых секундных объемов, в момент вибраций нарушается условие захвата полосы валками, точнее может чередоваться условие обеспечения захвата с условием невозможности его выполнения.

Условие обеспечения захвата полосы валками описывается выражением $tga < \mu$, из которого следует, что тангенс угла захвата α должен быть всегда меньше величины коэффициента трения μ . Угол захвата может быть определен исходя из выражения $\cos\alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D}$, где Δh – абсолютное обжатие в клети, мм; D – диаметр рабочего валка, мм.

Коэффициент трения определялся по модифицированной формуле А.П. Грудева [231], адаптированной к условиям холодной прокатки на 5-клетевом

стане 1700 ЧерМК ПАО «Северсталь». При прокатке конструкционных сталей:

$$\mu_i = \frac{1 + (0,4 + 0,01\varepsilon_i)R_a}{1 + 0,25\sqrt{v_{50}} - 0,005v_{50}} \left[0,091 - \frac{0,13v_i^2}{2(1 + v_i) + 3v_i^2} \right],$$

где R_a – среднеарифметическая высота микронеровностей; ε_i – относительное обжатие в i -й клетки; v_{50} – кинематическая вязкость смазки при 50 °С, мм²/с; v_i – скорость прокатки в i -й клетки.

В качестве подтверждения гипотезы о нарушении условий захвата полосы валками проведены исследования изменения тангенса угла захвата и коэффициента трения.

На рис. 3.23 представлены характеристики режима прокатки полосы размером 2,0→0,45×1254 мм со скоростью выше 17 м/с, не сопровождавшегося вибрациями.

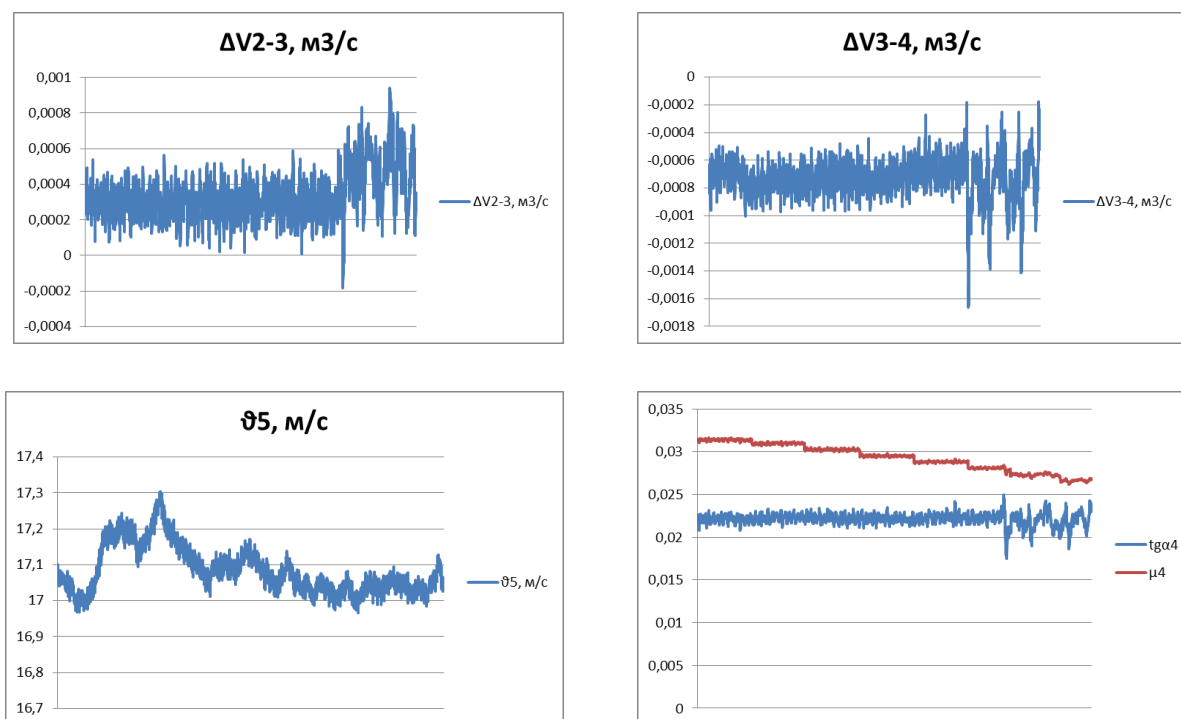


Рисунок 3.23 – Характеристики стабильного режима прокатки полосы размером 2,0→0,45×1254 мм

Из графиков разностей объемов ΔV_{2-3} и ΔV_{3-4} , представленных на рисунке 3.23, видно, что прокатка в клетки № 3 ведется с подпором, а в клетки

№ 4 строго с натяжением при этом условии захвата полосы валками строго соблюдается. В момент приближения значения тангенса угла захвата к значению коэффициента трения колебания разности межклетевых секундных объемов заметно увеличиваются.

На рисунках 3.24 и 3.25 представлены характеристики режимов прокатки двух рулонов полосы размером $2,0 \rightarrow 0,45 \times 970$ мм, сопровождавшихся вибрациями.

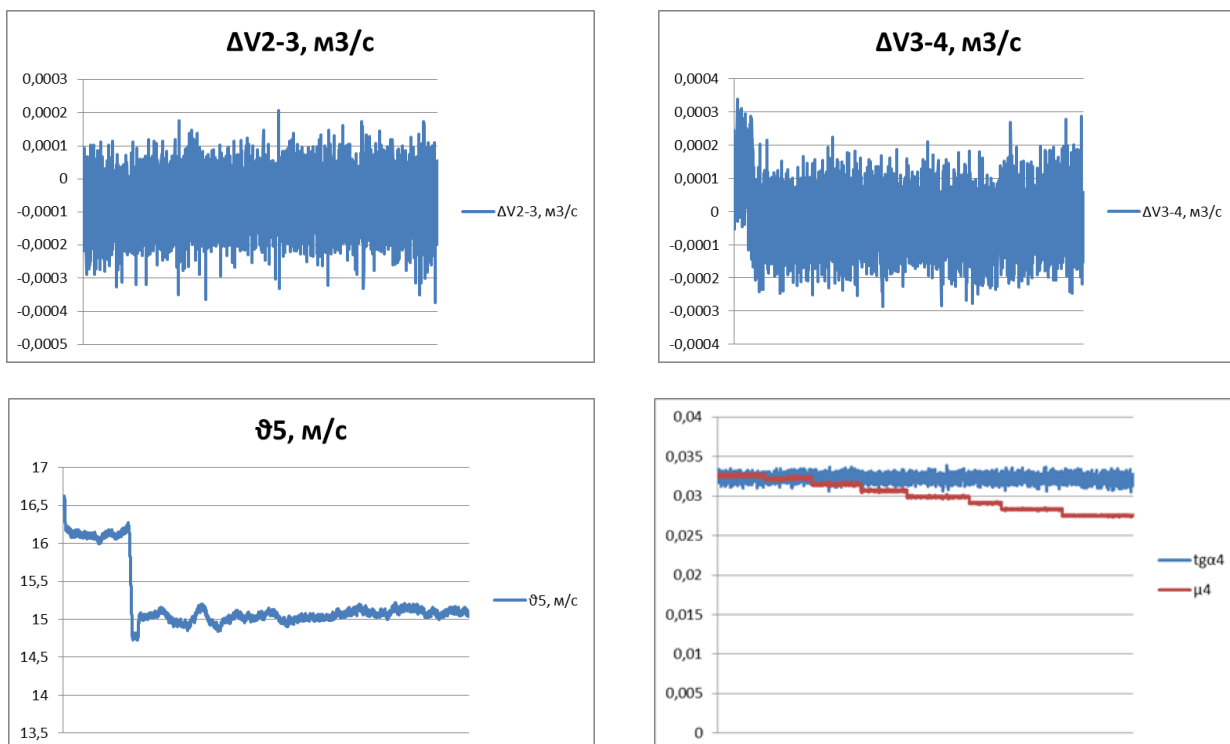


Рисунок 3.24 – Характеристики режима прокатки полосы размером $2,0 \rightarrow 0,45 \times 970$ мм, сопровождавшегося вибрациями

Из анализа диаграмм можно сделать заключение о нарушении условий захвата полосы в моменты колебаний разности межклетевых секундных объемов, при которых меняется их знак [232].

В результате исследований установлено, что нарушения условий захвата в моменты вибраций происходят в клетях №№ 3 и 4.

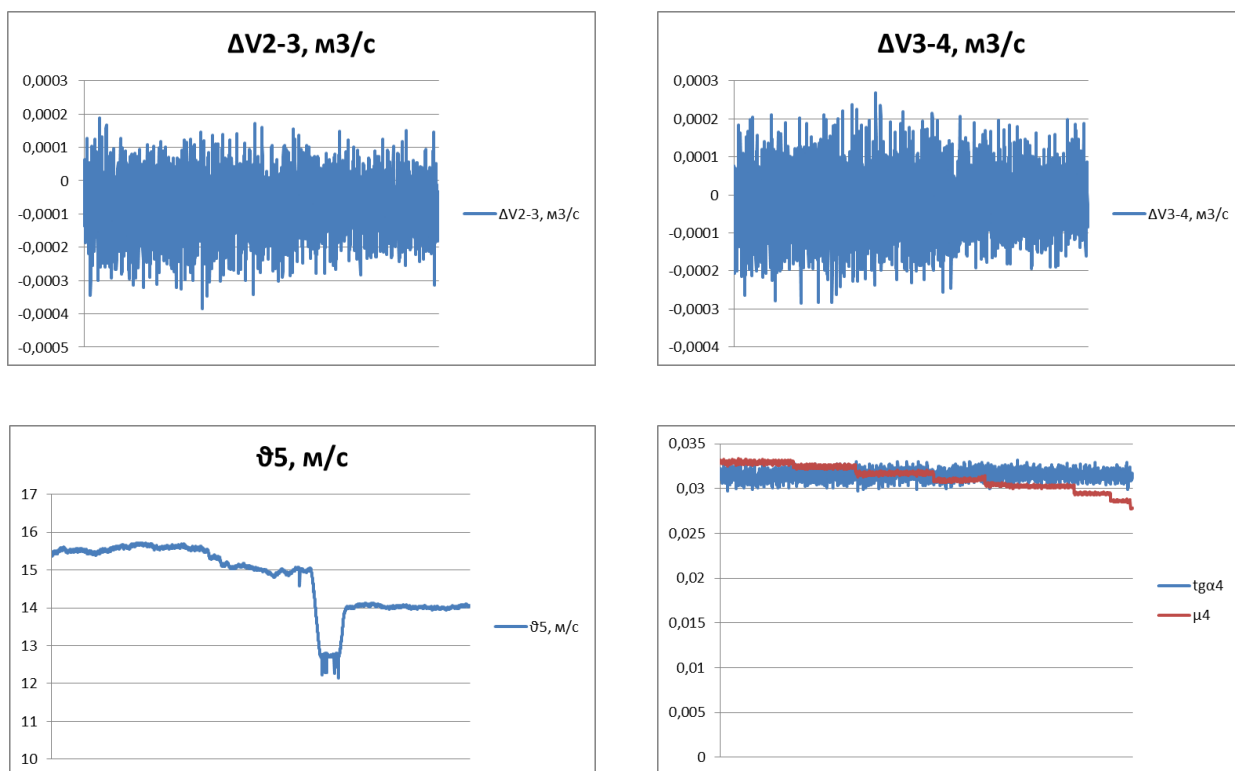


Рисунок 3.25 – Характеристики режима прокатки полосы размером 2,0→0,45×970 мм, сопровождавшегося вибрациями

3.2.3 Исследование колебаний прокатываемой полосы при непрерывной прокатке

Для исследования колебаний непосредственно самой прокатываемой полосы в межклетевом промежутке ее можно рассматривать, как стальную струну. Первые исследования колебаний стальных струн с учетом длины и натяжения датированы 1636 г., в работе *L'Harmonie universelle* французского ученого-аббата *Marin Mersenne*.

Частота колебания струны прямо пропорциональна квадратному корню от силы натяжения и обратно пропорциональна длине струны $f = k \frac{\sqrt{F}}{l}$, где F – сила натяжения струны, Н; f – частота колебаний струны, Гц; l – длина струны, м; k – коэффициент пропорциональности. Данный коэффициент зависит от плотности материала, из которого изготовлена струна (полоса), и

толщины данного материала $k = \frac{1}{d} \sqrt{\pi \rho}$, где d – толщина материала (диаметр струны); ρ – плотность материала.

Если преобразовать выражения, описывающие колебания струны, имеющей поперечное сечение – окружность, к стальной полосе, имеющей прямоугольное сечение, то в процессе прокатки полоса будет колебаться с частотой $f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho S}}$, где S – площадь поперечного сечения полосы.

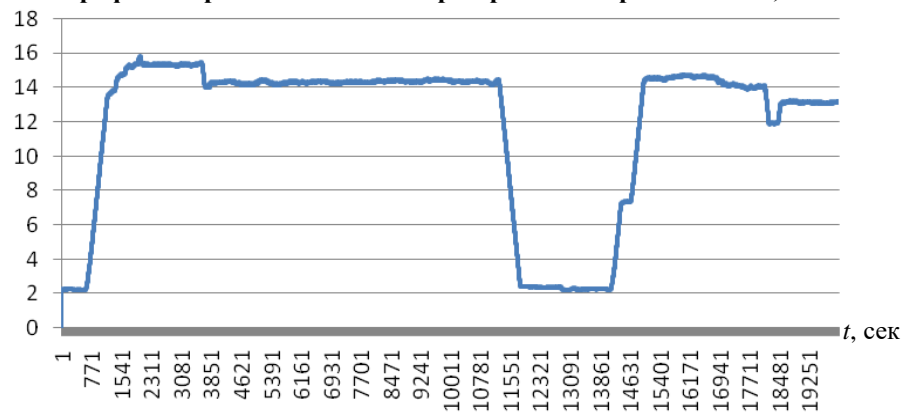
В результате исследований установлено, что в процессе прокатки в установившемся скоростном режиме стальная полоса колеблется в межклетевом промежутке с частотой 14–16 Гц независимо от ее толщины. В момент явления *chatter* (вибраций) размах частоты колебаний полосы в межклетевом промежутке может, как увеличиваться, так и не изменяться, что свидетельствует о слабой связи между возникновением вибраций и непосредственно колебаниями полосы во время прокатки. При прохождении сварных швов размах колебаний стальной полосы несколько увеличивается и достигает диапазона от 11 Гц до 19 Гц. Данный факт косвенно подтверждает «участие» стальной полосы в процессе возбуждения вибраций, но не на позиции межклетевого промежутка, а при ее нахождении в очаге деформации.

В качестве подтверждения вышеуказанных положений на рисунке 3.26 представлены графики колебаний полосы в процессе стационарной прокатки и в условиях возникновения вибраций.

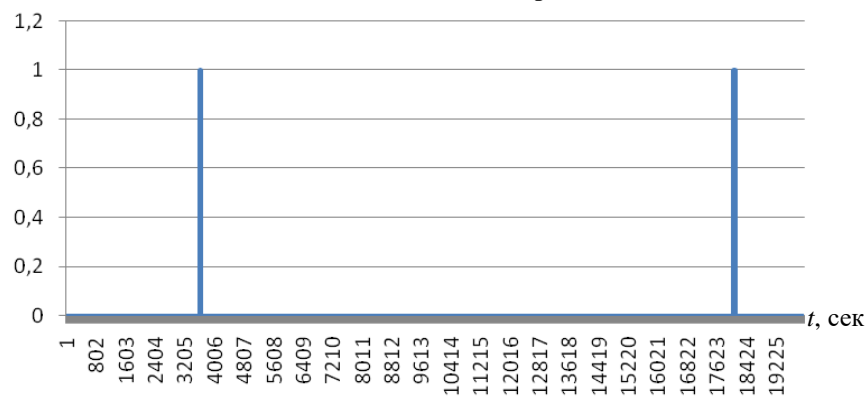
На рис. 3.27 показана диаграмма колебаний полосы толщиной 0,8 мм, т.е. рассмотрен более толстый сортамент.

Анализ колебаний полосы при прокатке профиля толщиной 0,8 мм шириной 920 мм показывает, что в промежутке 3–4 полоса «отреагировала» на возникновение явления «*chatter*» и снижение скорости, увеличением колебаний. Увеличение колебаний полосы на входе в клеть подтверждает гипотезу о неустойчивом захвате в очаге деформации [232].

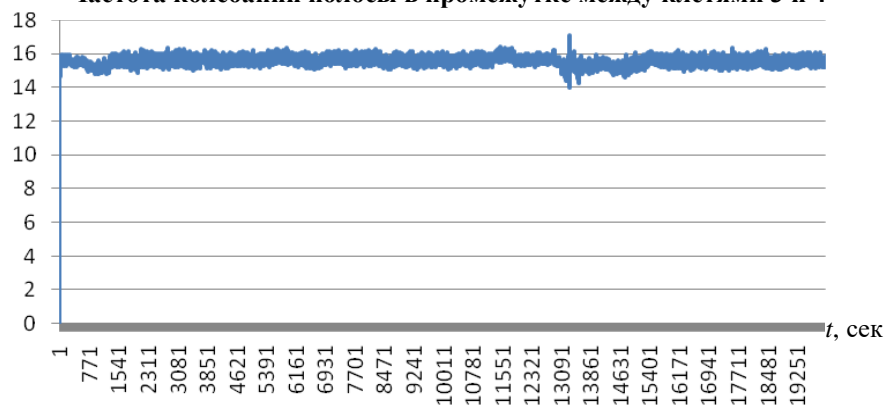
V_4 , м/с **График скорости в 4-й клетки при прокатке сортамента 2/0,45×970 мм**



Фиксация момента вибраций



f_{3-4} , Гц **Частота колебаний полосы в промежутке между клетями 3 и 4**



f_{4-5} , Гц **Частота колебаний полосы в промежутке между клетями 4 и 5**

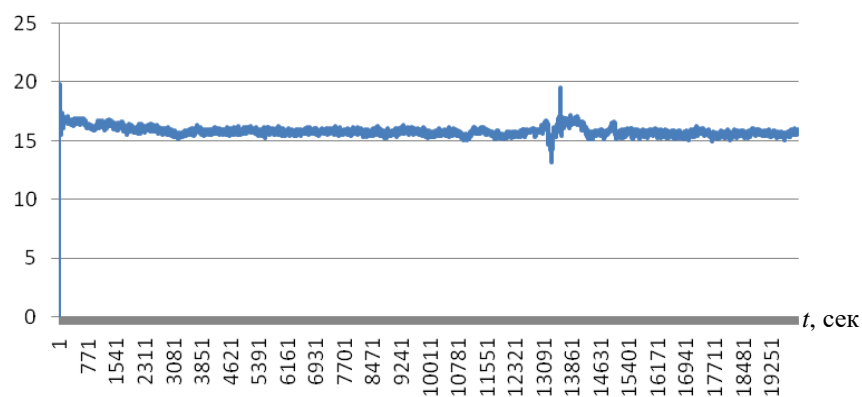


Рисунок 3.26 – Диаграммы колебаний стальной полосы в различных режимах работы стана



Рисунок 3.27 – Диаграммы колебаний стальной полосы в различных режимах работы стана при прокатке толстого сортамента

Частота собственных колебаний полосы во время прокатки может совпадать или быть по своей величине близкой к значению частот собственных колебаний электромеханической системы, равных 50 Гц, и пропорциональных ей частот (6,25; 12,5; 25; 50; 100 Гц) [61, 224]. Полоса может являться непосредственной причиной возникновения резонансных частот и акустического шума («гудения») совместно со звуковым эффектом от пробуксовки валков относительно полосы.

Полученные данные по анализу колебаний полосы опровергают теоретические исследования авторов публикации [136], где утверждается, что полоса при прокатке колеблется с частотой, равной 3000 Гц.

Таким образом, в результате исследований определена частота собственных колебаний полосы во время прокатки, установлено влияние этих колебаний на возникновение нестационарностей и негативных автоколебательных эффектов при эксплуатации прокатного стана.

3.2.4 Регулирование объемов металла за счет натяжений полосы

Для повышения эффективности работы автоматизированных систем управления непрерывными прокатными станами, с точки зрения контроля за стабильностью технологии и исключения вибраций, целесообразно связать объемы полосы и натяжения полосы во время прокатки. Это поможет технологам отслеживать процесс прокатки, а АСУ ТП автоматически поддерживать параметры на требуемом уровне без вибраций.

Используя основной закон динамики, учитывая действующие на участки полосы силы в межклевых промежутках, формула, выражающая связь скоростей движения полосы и натяжений выглядит следующим образом:

$$v_1 = \left(\sqrt{\frac{2(T_0 - T_1)}{h_1 b \rho}} + v_0 \right), \quad (3.1)$$

где v_0 и v_1 – это скорости движения полосы перед и за клетью; T_0 и T_1 – натяжений полосы перед и за клетью; h_1 и b – толщина и ширина полосы на выходе из клетки; ρ – плотность материала полосы.

Для формулировки конкретных рекомендаций по корректировке режима при возникновении вибраций умножим равенство (3.1) на величину h_1 и преобразуем полученное выражение:

$$h_1 v_1 = h_1 \sqrt{\frac{2(T_0 - T_1)}{h_1 b \rho}} + h_0 (1 - \varepsilon_1) v_0. \quad (3.2)$$

С учетом принятия того, что при холодной прокатке тонких широких полос ширина полосы неизменна, для обеспечения стабильного (без вибраций) процесса прокатки с натяжением необходимо выполнение условия $h_1 v_1 > h_0 v_0$ (соотношение объемов полосы). Как видно из равенства (3.2) в случае потери устойчивости валкового узла в клетке во время прокатки необходимо увеличивать обжатие в клетке ε_1 .

Преобразовав неравенство (3.2) и переходя от скоростей полосы к объемам получаем следующее выражение

$$\sqrt{\frac{2(T_0 - T_1)}{b \rho}} > \frac{V_0 h_1^2}{V_1},$$

преобразовываем

$$\frac{2(T_0 - T_1)}{b \rho} > \frac{V_0^2 h_1^2}{V_1^2},$$

в итоге получаем

$$\Delta T = (T_0 - T_1) > \frac{V_0^2 h_1^4 b \rho}{2V_1^2}, \quad (3.3)$$

где T_0 и T_1 – натяжения полосы перед и за клетью, соответственно; V_0 и V_1 – объемы полосы перед и за клетью, соответственно; h_1 и b – толщина и ширина полосы на выходе из клетки; ρ – плотность материала полосы.

Из выражения (3.3) следует, что для обеспечения технологии, исключаяющей вероятность возникновения вибраций необходимо, увеличивать натяжение за клетью T_1 (возможно уменьшая и натяжение перед

клетью T_0) и/или увеличивать величину объема полосы V_1 на выходе из клетки (корректируя скорости и обжатия) [233].

Пример анализа натяжений полосы на предмет склонности технологии к опасным вибрационным эффектам представлен на рис. 3.28, 3.29. На данных рисунках представлены диаграммы разности натяжений, определенной по формуле (3.3) при прокатке конструкционной стали размером $2/0,41 \times 1254$ мм.

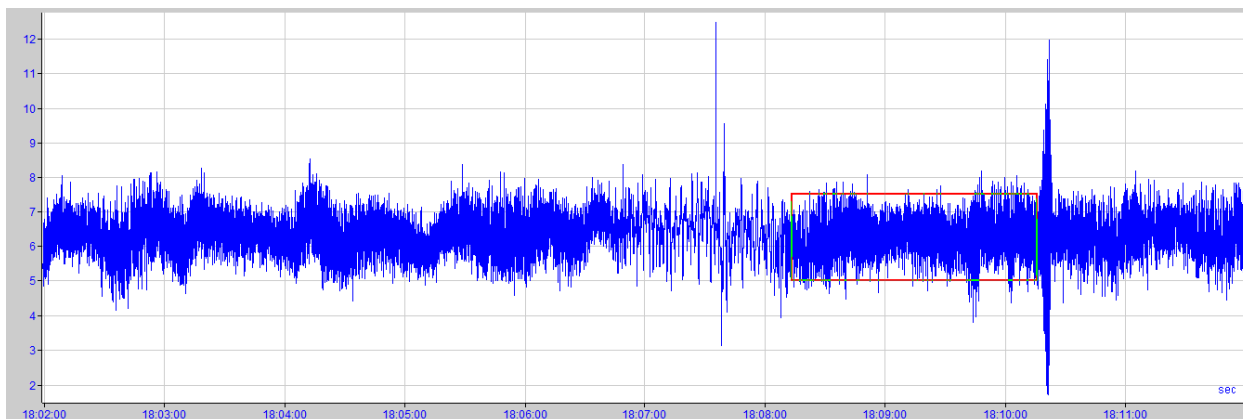


Рисунок 3.28 – Диаграмма колебаний разности натяжений между клетями №№ 3 и 4 5-клетевого стана 1700 при прокате сортамента $2/0,41 \times 1254$ мм (выделен участок колебаний натяжений при стабильном процессе прокатки и постоянной скорости стана)

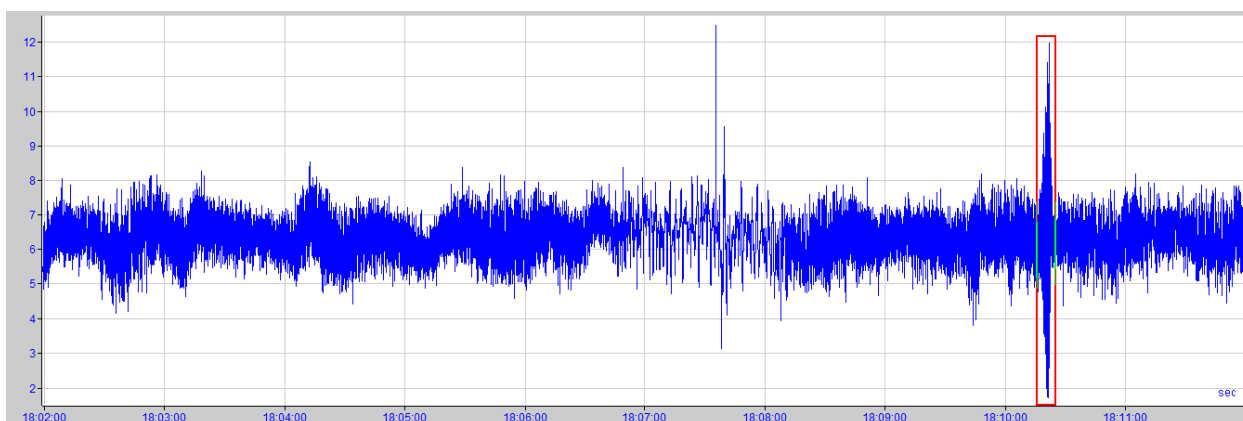


Рисунок 3.29 – Диаграмма колебаний разности натяжений между клетями №№ 3 и 4 5-клетевого стана 1700 при прокате сортамента $2/0,41 \times 1254$ мм (выделен участок колебаний натяжений при вибрациях)

При стабильном режиме прокатки уровень колебаний разности натяжений не превышает 25 % от среднего значения.

В момент вибрации видно, что явно увеличился разброс анализируемого параметра, от 2 до 12 тонн, что составляет от +90 % до –68 % от среднего значения.

Следовательно, высокий уровень колебаний натяжений, более 25 %, свидетельствует о нестабильности технологии, возможно некорректной настройке стана и склонности такого режима прокатки к возникновению негативных автоколебательных эффектов.

3.2.5 Причины возникновения негативных вибрационных эффектов, сопровождающихся повышенным акустическим шумом

На основании изложенных выше результатов прикладных исследований механизм возникновения вибраций представляется следующим образом:

1. Основным параметром, определяющим склонность технологического режима к вибрациям, является секундный объем полосы, величина которого непрерывно изменяется и зависит от скорости полосы, а также ее толщины.

Соотношение секундных объемов в соседних клетях определяет условия прокатки полосы с натяжением или с подпором [6]. Если разность объемов в рассматриваемой и последующей клетях отрицательна, то осуществляется процесс прокатки в условиях натяжения, в случае подпора указанная разность положительна.

Величина разности объемов между парами клеток №№ 2 и 3, №№ 3 и 4 нестационарна, как и технологический процесс прокатки в целом, и может колебаться около нуля, приводя режим в неустойчивое состояние.

В моменты, когда наблюдается рост колебаний разности межклетевых секундных объемов более, чем в два раза от среднего значения, переходя то в положительное, то в отрицательное значение через ноль (прокатка полосы с натяжением чередуется с прокаткой с подпором), и возникает явление

«*chatter*». Валки рабочей клетки начинают «дергать» полосу, то заталкивая (подпор), то вытягивая (натяжение) ее из рабочих валков последующей клетки.

Изменению колебаний объемов предшествует, как правило, повышение скоростей прокатки, которое и изменяет их соотношение в клетях.

2. Вторым основным фактором, оказывающим влияние на возбуждение резонансных вибраций в рабочих клетях при прокатке полос толщиной менее 0,5 мм, является величина угла захвата.

В моменты вибраций условие захвата полосы валками нарушается, т.е. величина тангенса угла захвата становится больше или равна значению коэффициента трения в очаге деформации, возникают пробуксовки валков относительно полосы. Связано это со следующими причинами:

а) Режимы прокатки полос толщиной менее 0,5 мм, по сравнению с прокаткой полос толщинами выше 0,8 мм, характеризуются большими на 25–30 % относительными обжатиями.

б) Скоростной режим при прокатке полос тонкого сортамента выше, чем при прокатке толстого практически в 2 раза. Это связано, во-первых, со стремлением повысить производительность стана, так как она априори ниже при прокатке тонких полос, во-вторых, скорость при прокатке более толстых полос ограничена допустимым значением мощности привода рабочих клетей.

в) Большие значения относительных обжатий, высокие скорости при прокатке полос толщиной менее 0,5 мм (п.п. а, б), приводят к снижению коэффициентов трения в очагах деформации рабочих клетей.

г) В процессе межперевалочной кампании шероховатость рабочих валков (следовательно, и коэффициент трения в очаге деформации) снижается по экспоненциальному закону. Так за плановый период, составляющий 6–8 часов, исходная шероховатость валков уменьшается за счет износа от 2 до 6 раз, например, в клетки № 4 5-клетевого стана 1700 за 8 часов показатель Ra у шлифованных валков снижается с 0,6 мкм до 0,1 мкм.

Что также способствует возникновению ситуаций, связанных с нестабильным захватом полосы рабочими валками.

д) Колебания толщины прокатываемой полосы и скорости приводят к колебаниям угла захвата и к повышению вероятности возникновения неустойчивых режимов, которые при прокатке тонких полос, из-за ее большей длины, действуют длительное время. В свою очередь, неустойчивые режимы прокатки на толстом металле, если и возникают, то действуют более короткое время. Что также объясняет высокую склонность процесса прокатки полос толщиной менее 0,5 мм к возникновению резонансных вибраций.

3. Еще одной из технологических причин возникновения негативных динамических эффектов являются принципы задания скоростного режима, в основе которых лежит расчет скорости прокатки через измеряемую скорость рабочих валков и величину опережения. Это связано с тем, что большинство прокатных станов во всем мире не оборудованы инструментальными системами измерения скорости полосы в межклетевых промежутках из-за отсутствия технической возможности самого измерения. При этом величина опережения является статичной, что является физически необоснованным, так как при холодной прокатке данный параметр может изменяться в 2 раза (см. п. 2.4) из-за колебаний толщины прокатываемой полосы и нестабильности трения в очаге деформации. Наиболее остро проблема корректного задания скоростного режима стоит при освоении нового профильного сортамента и при перенастройке стана.

3.3 Численное моделирование процесса холодной прокатки в условиях вибраций рабочих валков

Общая нестационарность технологии прокатки вызвана не только технологическим факторами, но и условиями работы прокатного оборудования, в частности валковых систем, которые из-за колебаний в

линии привода, связанных с зазорами в механических передачах, упругостью и жесткостью системы, а также конструктивными особенностями линии привода, вызывают колебания непосредственно рабочих валков, негативно влияющих на безотказность работы оборудования, энергосиловые параметры процесса и качество проката.

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) [234]. С целью применения сетки с минимальным размером конечного элемента 0,025 мм, была рассмотрена прокатка в трех последних клетях непрерывного стана и разработана модель процесса, включающая три верхних рабочих валка и стальную полосу с симметрией по толщине. Упругопластическая модель полосы длиной 500 мм была сформирована из 4-х узловых элементов, материал соответствовал свойству стали 08пс с изотропной моделью упрочнения. Рабочие валки с диаметром бочки 600 мм принимались как «жесткие поверхности» для сокращения вычислительных затрат и с учетом того, что жесткость валков намного больше жесткости полосы. Для описания контактов полосы с валком использовалась модель трения по Кулону. В начале процесса прокатки для осуществления захвата полосы валками на переднем конце полосы было задано граничное условие: узлы переднего торца перемещаются в направлении движения полосы в соответствии с заданной скоростью прокатки. Расстояние между осями клеток принято равным 200 мм. Настройка конечно-элементной модели прокатки в первой клетки показана на рисунке 3.30.

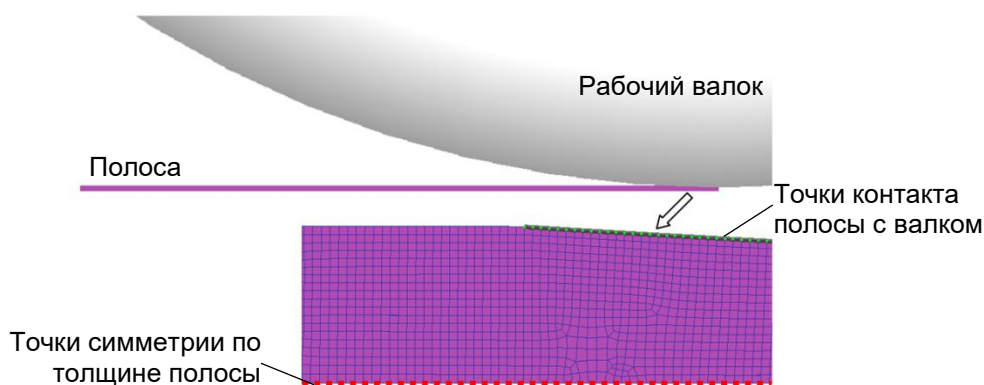


Рисунок 3.30 – Настройка модели

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

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

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.

Величины вертикальных перемещений рабочих валков и скоростей в момент вибраций определялись на основе результатов промышленных экспериментов на действующих станах холодной прокатки 2500 и 2030 [129, 130]. Максимальный размах виброперемещения рабочего валка принят равным 0,4 мм, частоты вибраций – 100 и 200 Гц. На рисунке 3.31, в качестве примера, приведен график виброскорости, заданный в системе DEFORM, при спектральной частоте 100 Гц.

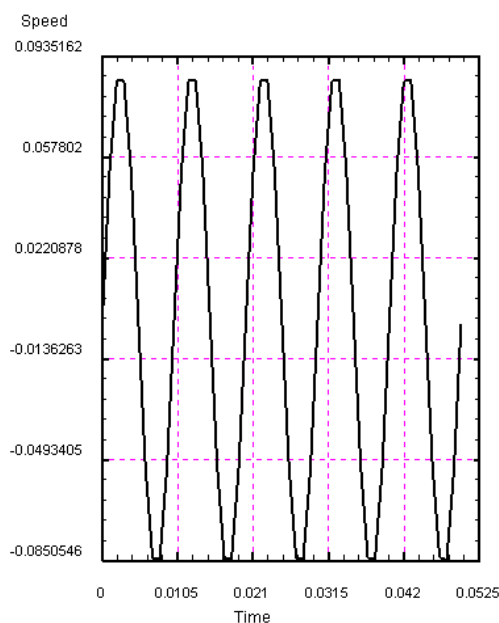


Рисунок 3.31 – График скорости перемещения рабочего вала по вертикали, заданный в системе DEFORM

Для моделирования выбран реальный режим прокатки полосы из стали марки 08пс толщиной 0,455 мм шириной 915 мм с суммарным обжатием 77 % и скоростью прокатки 15 м/с, при реализации которого на 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь» были зафиксированы вибрации. Из осциллограммы скорости прокатки в клети № 5 (рисунок 3.32) видно, что вибрации возникали трижды: на 145 с, на 216 с и на 242 с, соответственно. В это время скорость прокатки резко снижалась для предотвращения повреждения оборудования и полосы.

Исследование изменения продольных напряжений при вибрации рабочих валков.

Для исследования изменения продольных напряжений на поверхности полосы и в среднем по толщине сечении, перед началом прокатки были заданы соответствующие точки, и выполнено отслеживание значений напряжений в них в ходе всего процесса.

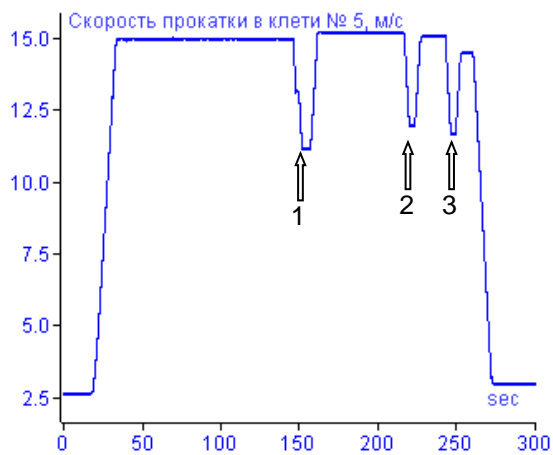
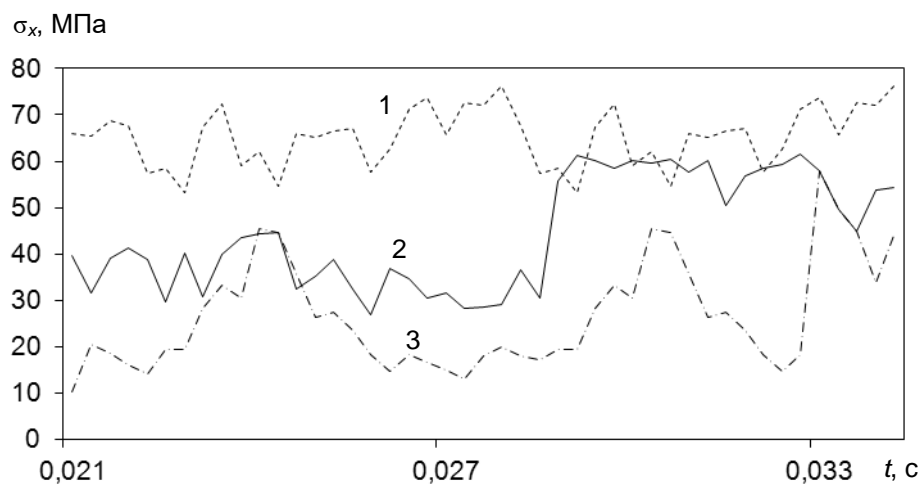


Рисунок 3.32 – Оциллограмма линейной скорости верхних рабочих валков клетки № 5

При моделировании были рассмотрены варианты с уменьшением скорости прокатки до 11 м/с при возникновении первой вибрации (рис. 3.32) и с увеличением скорости до 15 м/с. Результаты представлены на рис. 3.33 и в таблице 3.3.



1 – без вибраций; 2 – частота вибраций 100 Гц; 3 – частота вибраций 200 Гц

Рисунок 3.33 – Продольные напряжения в поверхностном слое металла между клетями №№ 4 и 5

Таблица 3.3 – Результаты расчета продольных напряжений σ_x в зависимости от скорости прокатки и частоты вибраций

№ варианта	σ_x на поверхности металла, МПа				σ_x в среднем по толщине сечения, МПа			
	Клетки № 3, 4		Клетки № 4, 5		Клетки № 3, 4		Клетки № 4, 5	
	\bar{x}	R	\bar{x}	R	\bar{x}	R	\bar{x}	R
$v_5 = 11$ м/с								
1	116,57	9,60	85,83	12,33	39,11	10,08	116,33	9,14
2	121,65	22,19	65,85	21,98	43,40	20,33	93,08	18,94
3	123,49	31,98	43,77	33,14	53,08	28,12	85,45	30,14
$v_5 = 15$ м/с								
1	125,65	19,27	65,31	22,99	37,42	18,13	124,17	19,76
2	130,27	35,79	44,38	34,66	40,86	29,28	108,18	33,24
3	133,53	43,08	26,65	47,72	44,64	39,87	89,61	42,32
$v_5 = 17$ м/с								
1	135,78	27,52	46,79	32,85	34,73	27,21	132,01	30,38
2	139,39	49,39	25,91	47,34	38,32	38,46	123,28	46,54
3	142,88	54,18	14,53	60,30	41,02	51,26	93,16	54,51

Примечание. 1 вариант – без вибраций; 2 вариант – частота вибраций 100 Гц; 3 вариант – частота вибраций 200 Гц; \bar{x} – среднее значение; R – размах.

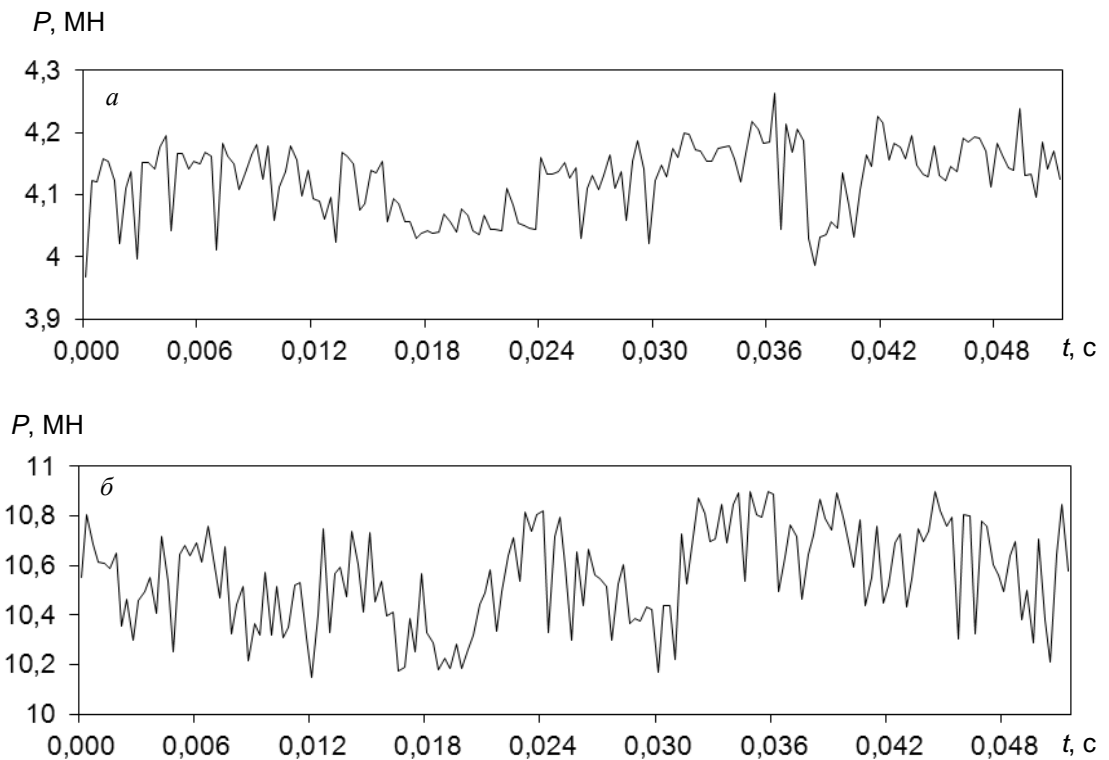
Из представленных данных видно, что при возрастании частоты вибраций рабочих валков и скорости прокатки колебания продольных напряжений увеличиваются. Так, увеличение скорости с 11 м/с до 17 м/с приводит к увеличению размаха колебаний напряжений в 1,7–1,8 раза. Наиболее чувствительны к частоте вибраций продольные напряжения в поверхностных слоях металла между клетями №№ 4 и 5. Например, колебания рабочих валков с частотой 100 Гц при скорости прокатки $v_5 = 15$ м/с приводят к уменьшению среднего значения продольных напряжений в 1,4 раза, а при $v_5 = 17$ м/с – в 1,8 раза.

Таким образом, в результате моделирования установлено, что негативные автоколебания рабочих валков оказывают влияние на уровень колебаний продольных напряжений в металле, увеличение их частоты совместно с ростом скорости прокатки приводит к существенному уменьшению переднего натяжения полосы.

Исследование изменения силы прокатки.

При моделировании процесса холодной прокатки в условиях вибраций рабочих валков с частотой 100 Гц среднее значение силы в клетях № 4 (рисунок 3.34, а) составило 4,12 МН при размахе колебаний 0,297 МН; в клетях № 5 (рисунок 3.34, б) – 10,56 МН при размахе 0,75 МН. Увеличение частоты вибраций до 200 Гц привело к снижению значения силы прокатки в среднем на 1,25 % и к существенному увеличению размаха на 0,125 МН (клеть № 4) и 0,442 МН (клеть № 5), т.е. в 1,5 раза. Увеличение скорости прокатки с 15 м/с до 17 м/с сопровождалось увеличением размаха колебаний исследуемого параметра в 1,25 раза. В работе [129] отмечено, что синхронные колебания сил прокатки в соседних клетях непрерывного стана с размахом выше 0,4 МН, неизбежно приводят к опасному предаварийному состоянию стана.

Моделирование силы прокатки в клетях №№ 3, 4 и 5 непрерывного широкополосного стана холодной прокатки 1700 ПАО «Северсталь» выполнено с погрешностью, не превышающей 2,5 %, что свидетельствует об адекватности разработанной 2D-модели процесса.



a – клеть № 4; b – клеть № 5

Рисунок 3.34 – Графики изменения силы прокатки для варианта с частотой вибраций 100 Гц и скоростью прокатки 15 м/с

3.4 Исследование влияния вибраций рабочих валков на возникновение дефектов поверхности полос с применением численных методов

Современные направления повышения качества холоднокатаных полос включают не только повышение точности прокатываемых полос в части разнотолщинности и неплоскостности, но и обеспечение высоких показателей по качеству поверхности. Одним из существенных дефектов, возникающих на поверхности холоднокатаной полосы, является ребристость, проявляющаяся в виде поперечных зон с чередующимися темными и светлыми оттенками (рисунок 3.35).

Основными причинами появления ребристости на полосе являются действующие в рабочей клетке вибрационные процессы, которые возникают

вследствие самовозбуждения колебаний при прокатке [136–141], динамические процессы в оборудовании главных линий рабочих клетей [60, 235], неустойчивое положение рабочих валков в клети [146, 236, 237, 238], а также качество обработки валков [239].

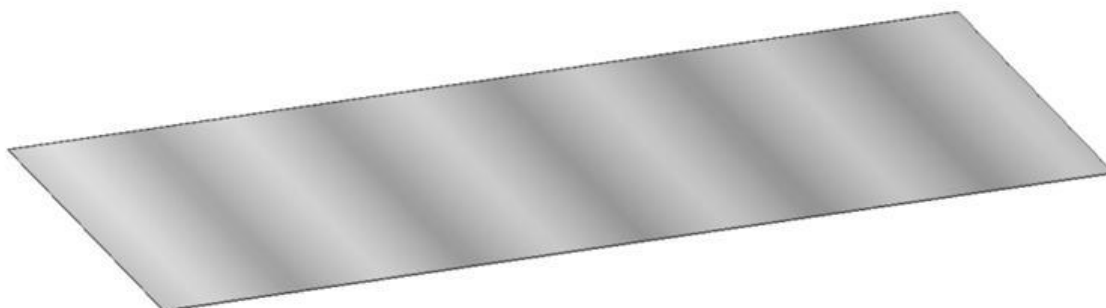


Рисунок 3.35 – Поверхностный дефект «ребристость полосы»

При этом очевидно, что, несмотря на различие перечисленных факторов, в конечном итоге ребристость возникает под действием колебательных процессов валкового узла.

Для раскрытия механизма появления на поверхности стальных холоднокатаных полос дефектов при вибрации рабочих валков использован метод конечных элементов, реализованный в программе DEFORM-2D [240].

В качестве объекта исследования была взята 4-я клеть 5-клетевого стана 1700 ПАО «Северсталь», поскольку системой сбора данных в ней было зафиксировано большее число случаев резонансных вибраций, приводящих к образованию ребристости на поверхности холоднокатаных полос.

Прокатываемая полоса рассматривалась как упругопластическая среда, обладающая степенным упрочнением. В качестве материала полосы принята сталь марки 08пс. Размеры полосы: длина 300 мм, толщина 0,7 мм. Модель полосы создана с симметрией по толщине. Рабочие валки с диаметром 600 мм принимались как «жесткие поверхности» для сокращения вычислительных затрат и с учетом того, что жесткость валков намного больше жесткости полосы. Характерный размер конечного элемента принят равным 0,025 мм. Для описания контактов полосы с валком использовалась

модель трения по Кулону. Рассматривались относительные обжатия в клети 26 % и 33 %, скорости прокатки 10 м/с, 15 м/с и 20 м/с. Кроме вращательного движения рабочих валков задавалась их вибрация по вертикали в виде графика колебаний по гармоническому закону $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$ аналогично исследованиям, представленным в параграфе 3.3. Максимальный размах виброперемещения рабочего валка принят равным 0,4 мм, частоты вибраций – 100 Гц, 200 Гц и 300 Гц. В начале процесса прокатки для осуществления захвата полосы валками на переднем конце полосы было задано граничное условие: узлы переднего торца перемещаются в направлении движения полосы в соответствии с заданной скоростью прокатки. На рисунке 3.36 представлена модель прокатки в исходном состоянии.

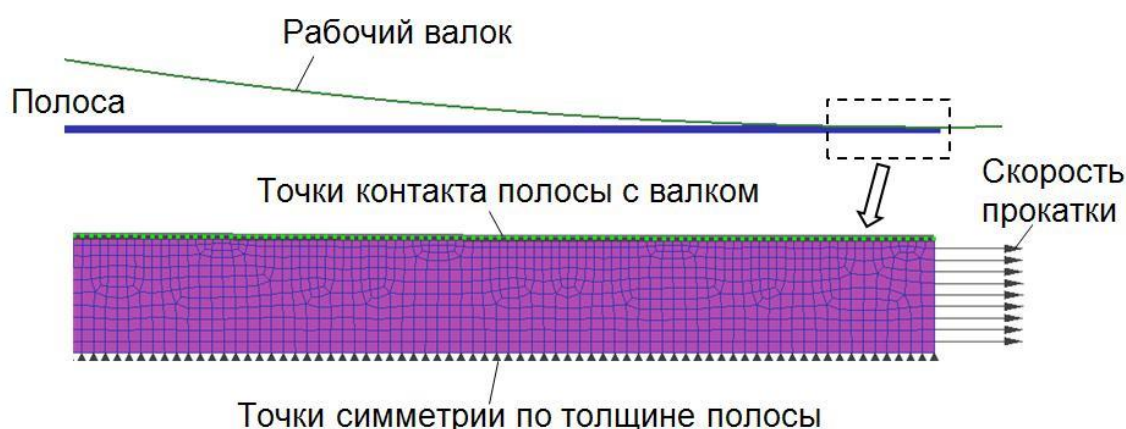


Рисунок 3.36 – Полоса и рабочий валок в исходном состоянии

На основе математической модели исследовано изменение профиля поверхности полосы в зависимости от частоты вибраций рабочего валка и скорости прокатки. На рисунках 3.37–3.39 показаны профили поверхности полосы, построенные на длине, равной 300 мм. При отсутствии вибраций (рисунок 3.37) поверхность полосы сглаженная. Отклонения, представленные на рисунках 3.38 и 3.39, можно рассматривать как дефект «ребристость» – чередующиеся светлые и темные полосы на поверхности металла. В отличие от значений колебаний рельефа поверхности, характер отклонений зависит от скорости прокатки и частоты вибраций. Возрастание скорости прокатки

приводит к увеличению ширины поперечных полос, а рост частоты вибраций – к уменьшению.

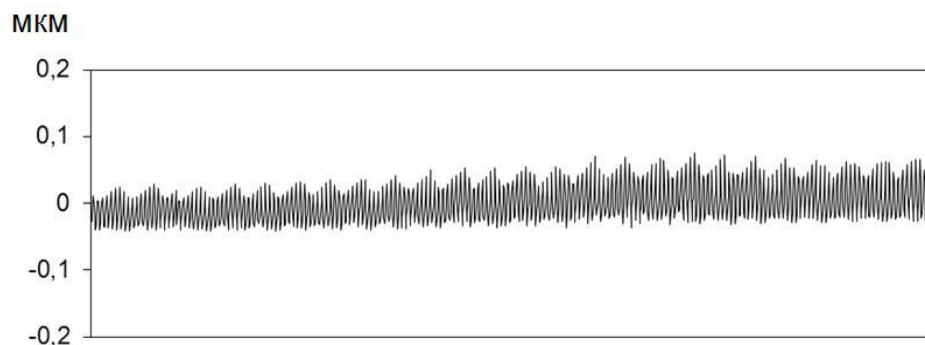
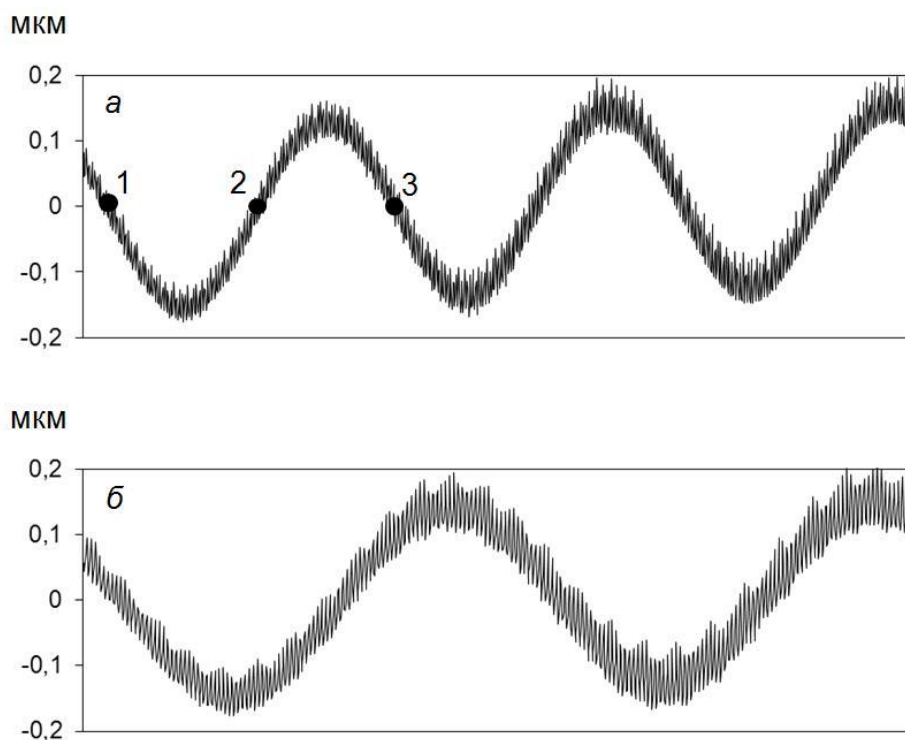


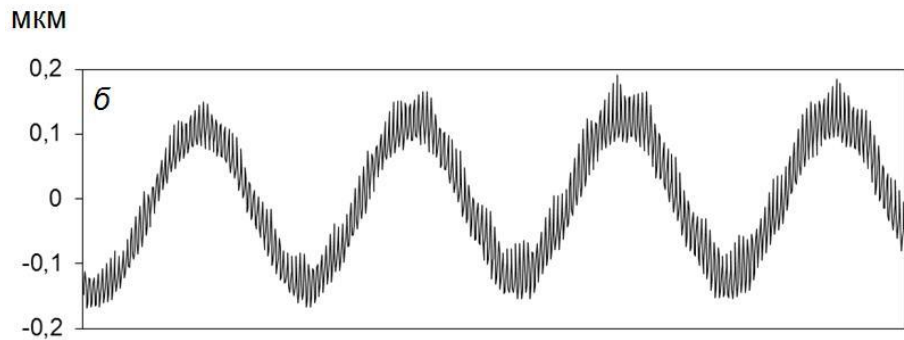
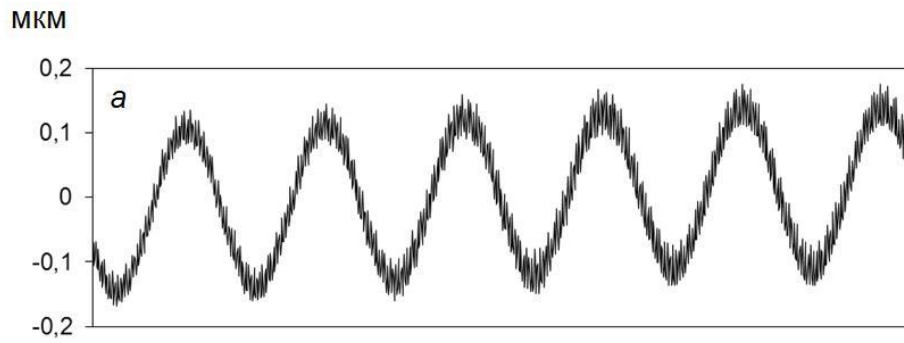
Рисунок 3.37 – Профиль поверхности полосы без вибраций

По результатам исследований построены графики зависимости размеров поперечных теневых полос от скорости прокатки и частоты вибраций рабочего валка (рисунок 3.40).



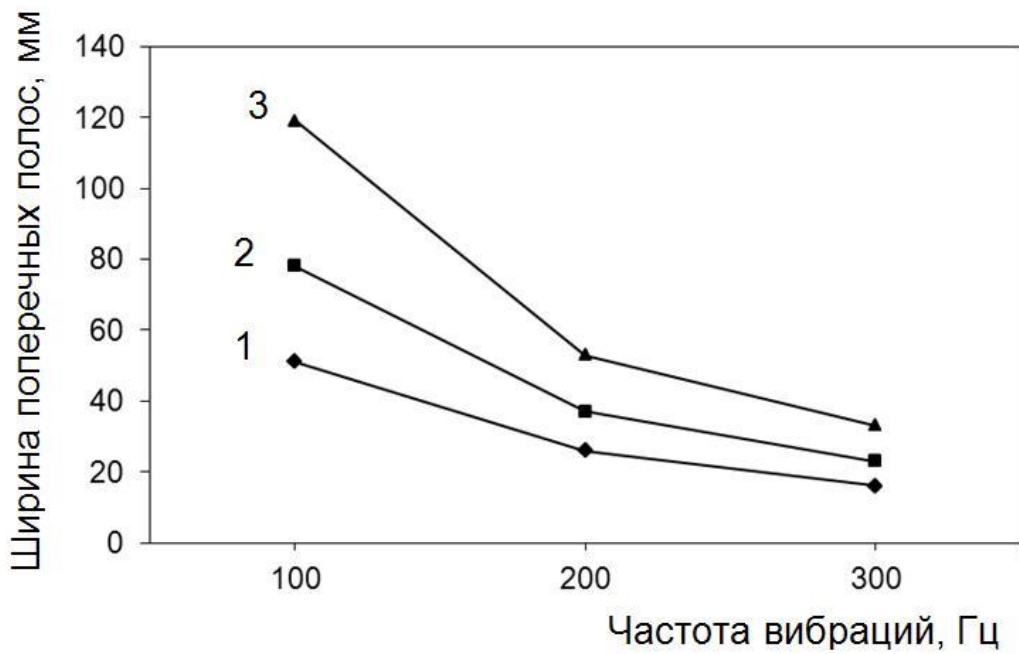
$a - v = 10 \text{ м/с}; \text{ б} - v = 15 \text{ м/с}$

Рисунок 3.38 – Профиль поверхности полосы при частоте вибраций рабочего валка 100 Гц



$a - v = 10 \text{ м/с}; b - v = 15 \text{ м/с}$

Рисунок 3.39 – Профиль поверхности полосы при частоте вибраций рабочего вала 200 Гц



$1 - 10 \text{ м/с}; 2 - 15 \text{ м/с}; 3 - 20 \text{ м/с}$

Рисунок 3.40 – Зависимость ширины поперечных полос от частоты вибраций и скорости прокатки

Холоднокатаная полоса из стали марки 08пс толщиной 0,46 мм шириной 915 мм, полученная по режиму прокатки с суммарным обжатием 77,5 % и фактической скоростью 15 м/с, реализованному в промышленном эксперименте на стане 1700 ПАО «Северсталь» с измерением частоты колебаний валкового узла 112–119 Гц [240], имела периодические дефекты на поверхности холоднокатаной полосы в виде темных полос шириной 70 мм. Расчеты с применением разработанной модели показали (кривая 2 рисунок 3.40), что ширина оттеночных чередующихся зон составила 68–70 мм, что свидетельствует об адекватности численной модели.

Если сравнить результаты полученных численных экспериментов с аналитическим описанием возможной ширины светлых и темных чередующихся полос при образовании дефекта ребристость, то можно воспользоваться следующими выражениями.

Период колебаний определяется как $T=1/f$, где f – частота колебаний, если взять экспериментально зафиксированную частоту резонансных вибраций порядка 100 Гц [148], то период колебаний будет равен $1/100=0,01$ сек. В этом случае ширина H чередующихся полос на прокате с учетом периода колебаний и скорости прокатки 10 м/сек будет равна $H = 0,01 \cdot 10 = 0,1$ м или 100 мм, что также косвенно подтверждает результаты исследований.

Моделирование показало, что увеличение частного относительного обжатия в клети с 26 % до 33 % приводит к увеличению ширины темных полосок на 8–10 %, а задание вибраций рабочих валков по горизонтали в виде графика колебаний по гармоническому закону не влияет на характер отклонений профиля поверхности полосы.

Исследованиями установлено, что сами по себе вибрации рабочих валков не оказывают существенного влияния на продольную разнотолщинность полосы. Независимо от частоты вибраций рабочих валков, среднее значение толщины полосы после прокатки с обжатием 26 % составило 0,52 мм, а после обжатия 33 % – 0,47 мм. Размах колебаний

толщины при вибрации рабочих валков и увеличении обжатия не превысил 1,5 мкм, что обеспечивает точность прокатываемых полос в части продольной разнотолщинности.

Результаты исследований позволили сделать оценку влияния вибраций рабочих валков на профиль поверхности полосы и могут быть использованы при разработке режимов прокатки, гарантирующих стабильную работу непрерывного стана без возникновения резонансных вибраций.

3.5 Идентификация вибраций на основе статистического анализа технологических параметров

Различные физические процессы, протекающие в прокатном стане, находят свое отражение в информации, фиксируемой контрольно-измерительными датчиками. Повсеместное внедрение цифровых технологий позволяет собирать информацию о параметрах процесса прокатки и состояния оборудования в цифровом виде, обеспечивать ее хранение в базах данных в течение продолжительного периода времени. Программные средства позволяют производить анализ полученной информации как постфактум, так и в *online*-режиме. Реализация различных алгоритмов, а также их коррекция и апробирование, возможны на основе моделей, построенных на наблюдениях сигналов за большой период времени при разных режимах и условиях работы стана. Все это делает перспективным применение статистических моделей для анализа тех или иных процессов, происходящих в работающем прокатном стане и его отдельных узлах.

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 [164, 241–245].

В качестве анализируемых данных в этом случае может быть 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. Однако напрямую использовать информацию с приборов, изначально предназначенных для другой цели, невозможно, так как их сигнал во временной области не дает возможности непосредственного анализа иных физических процессов, кроме тех, для которых они сконструированы. Но поскольку базы данных АСУ ТП станов содержат информацию с указанных выше датчиков за продолжительный промежуток времени, включая периоды и режимы работы оборудования, как стабильные, так и сопровождающиеся вибрациями, то получить данные о зарождении и развитии последних можно косвенным образом.

3.5.1 Метод идентификации автоколебаний в клетях прокатных станов на основе статистического анализа межклетевых натяжений

В результате многочисленных исследований было установлено, что значения технологических параметров процесса прокатки, включая натяжения полосы в межклетевых промежутках, распределяются по закону Гаусса [244]. В связи с этим в качестве гипотезы было выдвинуто предположение о том, что распределения выборок значений межклетевых натяжений отклоняются от нормального закона при возникновении негативных вибраций и автоколебаний в рабочих клетях, идентификация указанных негативных явлений может быть выполнена на основе анализа характера распределений в процессе прокатки.

В этом случае основным методом диагностики стабильности технологического процесса является статистический анализ экспериментальных данных, полученных при обработке осциллограмм технологических параметров.

В качестве примера на рисунке 3.41 представлен график изменения разности полных межклетевых натяжений при прокатке полосы толщиной 0,5 мм шириной 915 мм в клетки № 3 непрерывного 5-клетевого стана холодной прокатки 1700 ПАО «Северсталь», сопровождавшейся негативными автоколебательными процессами.

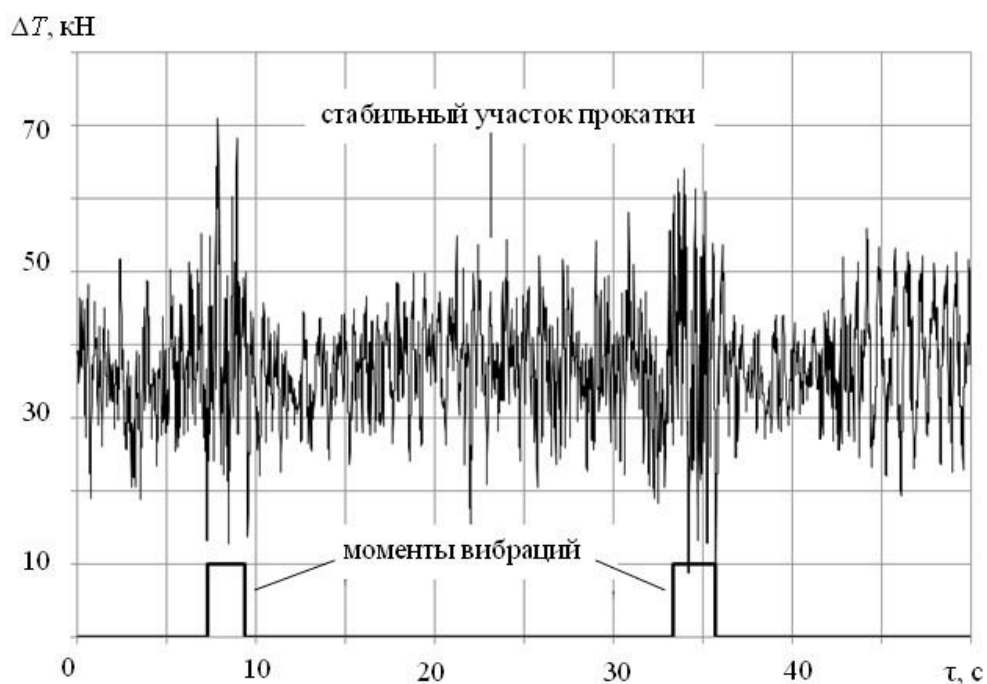
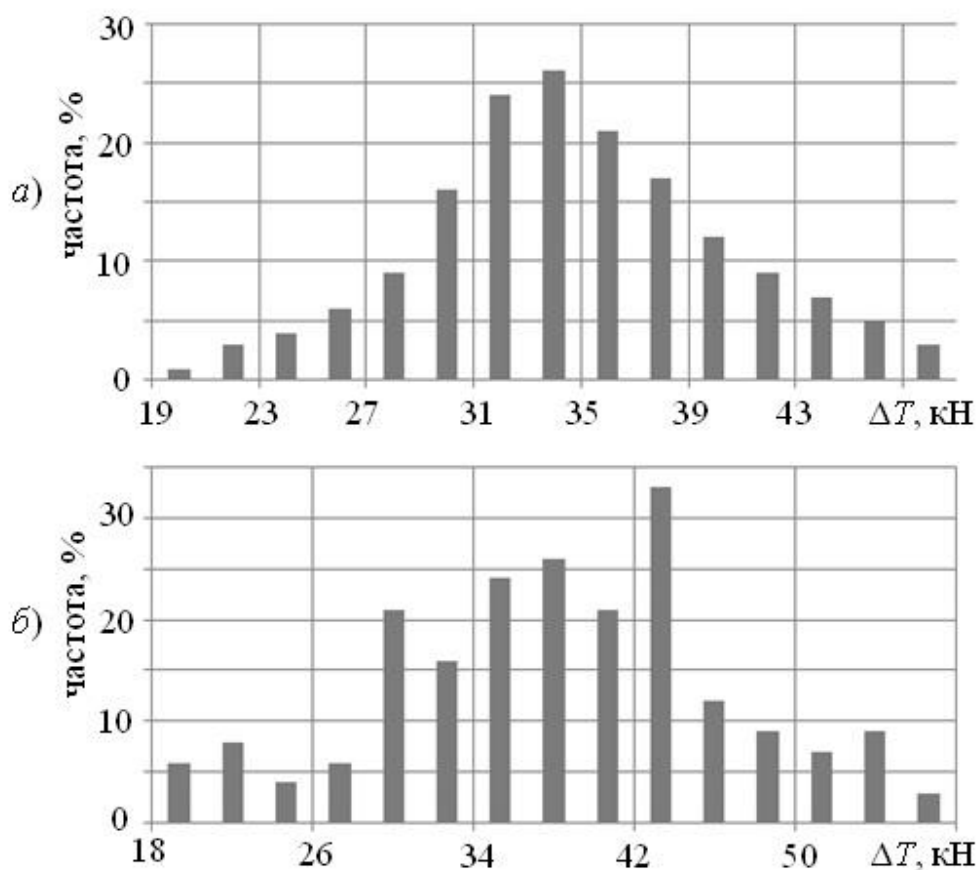


Рисунок 3.41 – График изменения разности заднего и переднего полных натяжений при прокатке полосы в клетки № 3

Из рисунка 3.41 видно, что моменты вибраций сопровождаются повышенным, по сравнению со стабильными участками, уровнем колебаний межклетевых натяжений.

На первом этапе статистического анализа фактических выборок значений разности натяжений были построены гистограммы распределений, из которых видно, что значения исследуемого технологического параметра при стабильном процессе прокатки подчиняются нормальному закону распределения (рисунок 3.42, а), который нарушается при возникновении негативных автоколебаний (рисунок 3.42, б).



a – стабильный участок прокатки; *б* – участок прокатки, сопровождавшейся вибрациями

Рисунок 3.42 – Гистограммы распределений исследуемых выборок разности натяжений

На втором этапе были выполнены расчеты основных статистических показателей, таких как математическое ожидание, стандартная ошибка, медиана, мода, среднеквадратическое отклонение, дисперсия выборки, эксцесс, асимметричность распределения, минимальное и максимальное значения, интервал, сумма элементов выборки. В результате установлено, что для решения задачи идентификации автоколебаний достаточно определить и проанализировать характер изменения двух показателей, характеризующих меру разброса и рассеивание значений выборки.

Графики изменения в процессе прокатки статистических идентификационных характеристик, выбранных для прогнозирования возникновения вибраций, представлены на рисунке 3.43.

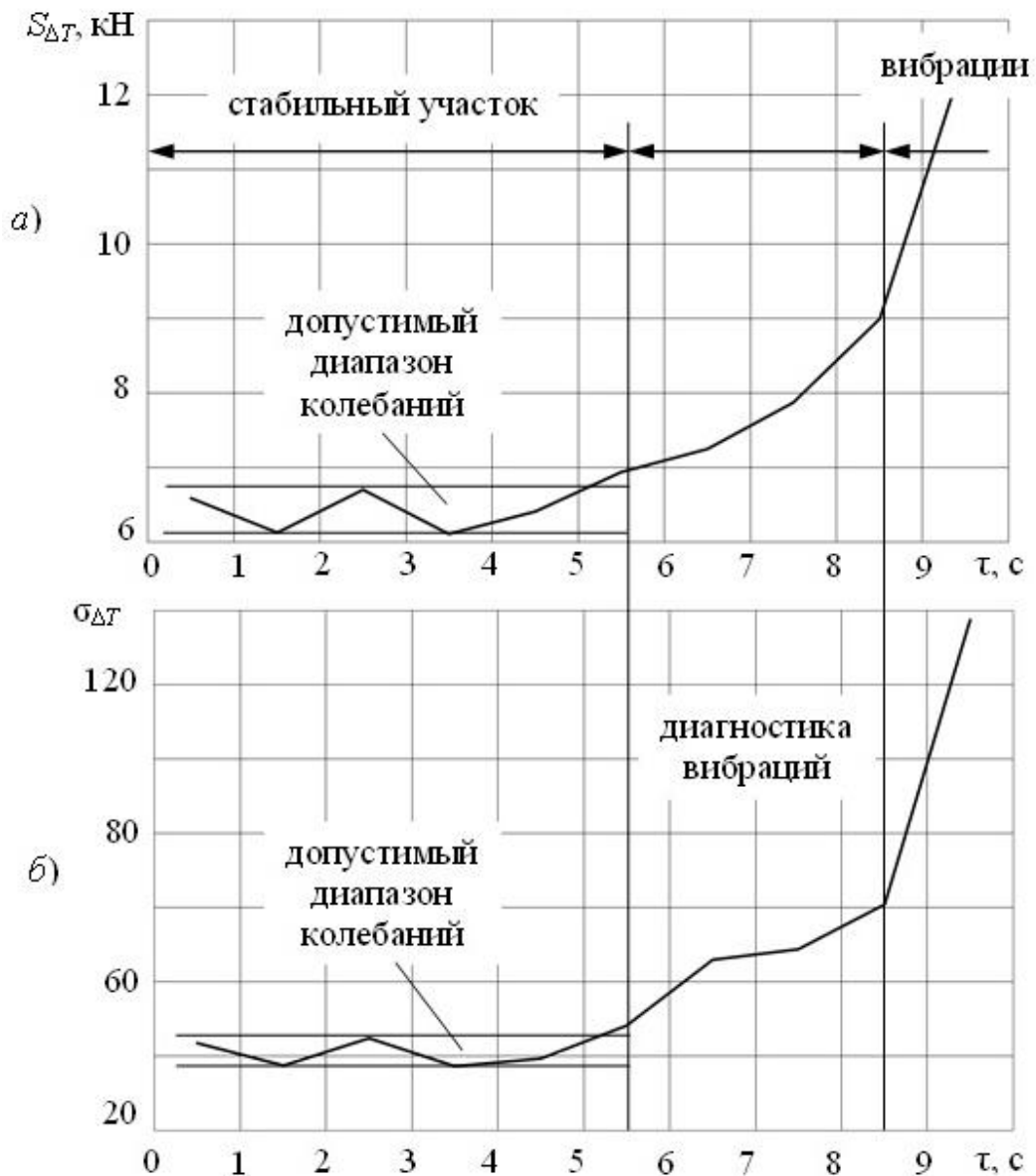


Рисунок 3.43 – Графики изменения среднеквадратического отклонения (а) и дисперсии (б) выборки значений разности межклетевых натяжений

Дисперсия $\sigma_{\Delta T}$ и среднеквадратическое отклонение $S_{\Delta T}$ разности межклетевых натяжений определялись не реже, чем через 1 секунду по зависимостям:

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

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

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 (рисунок 3.43) 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 2,5–3,5 сек, что достаточно для оперативного устранения условий возникновения аварийных ситуаций на станах холодной прокатки, изменения режима работы стана в системах автоматического управления.

Таким образом, диагностика разности межклетевых натяжений полосы при прокатке в реальном режиме времени путем определения среднеквадратического отклонения и дисперсии позволит идентифицировать вибрации в рабочих клетях и выработать предупреждающий или управляющий сигналы на изменение технологических параметров прокатки.

3.5.2 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.

При исследовании формировались и обрабатывались дискретные выборки токовых сигналов с действующего 5-клетевого прокатного стана 1700 ПАО «Северсталь», разбитые по степени стабильности процесса на три группы: 1 – стабильные участки прокатки; 2 – участки, предшествующие возникновению вибраций; 3 – участки прокатки с вибрацией рабочих клетей. Для каждого значения выборок токовых сигналов вычислялись величины производных, формирующие новые массивы данных, из которых извлекались статистические коэффициенты квантилей с целью их последующего анализа.

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

$$M_e = I_0 + h \frac{\frac{\sum f}{2} - f'_{Me-1}}{f_{Me}}$$

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.

То есть, ориентируясь на медианное значение распределения тока главного привода рабочей клетки прокатного стана, можно идентифицировать момент зарождения вибраций [245]:

- при стабильном режиме прокатки значение 0,5-квантиля (медиана) находится в нуле с отклонением, не превышающим для 5-клетевого стана $1 \cdot 10^{-5}$ (рисунок 3.44);

- на участках предшествующих вибрациям пропадает симметрия значений крайних квантилей, а отклонение значения медианы от нуля превышает $1 \cdot 10^{-5}$ и неуклонно возрастает (рисунок 3.45).

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, т.е. скорости изменения данного параметра.

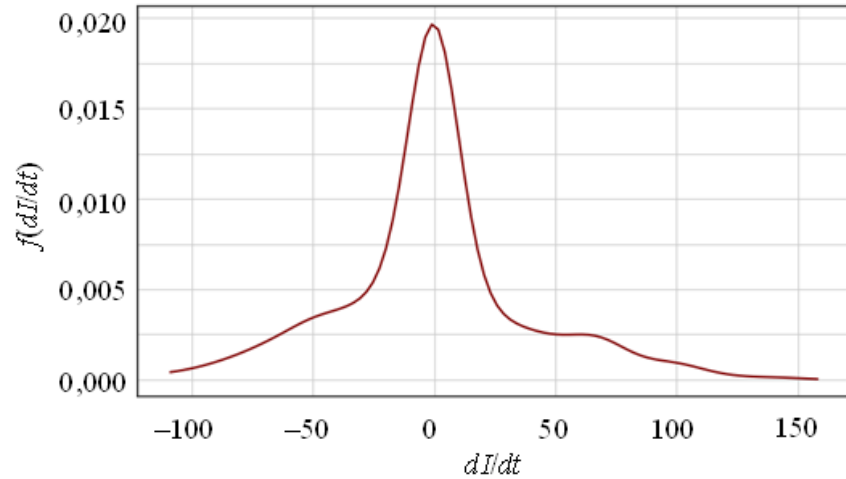


Рисунок 3.44 – Плотность распределения производных от токовых сигналов:
отсутствие вибрации

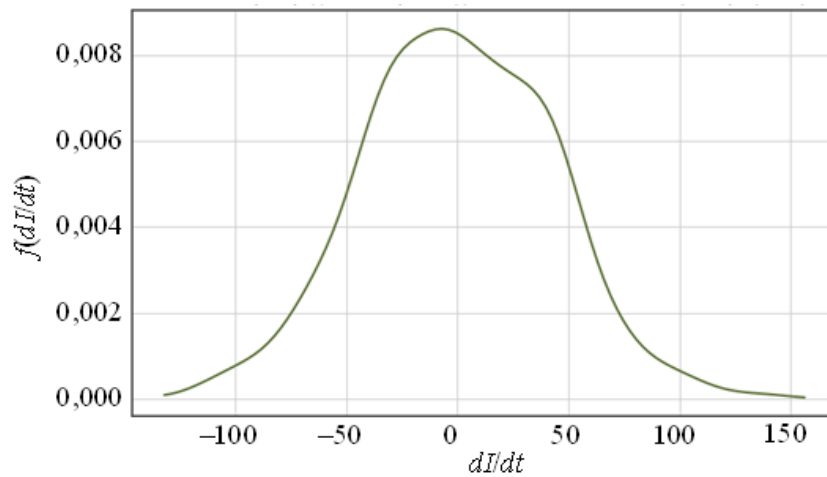


Рисунок 3.45 – Плотность распределения производных от токовых сигналов:
возникновение вибрации

Для более наглядного восприятия результатов исследования на рисунке 3.46 представлено наложение графиков, характеризующих плотность

распределения производных от токовых сигналов при стабильной работе прокатных клетей и в условиях вибраций.

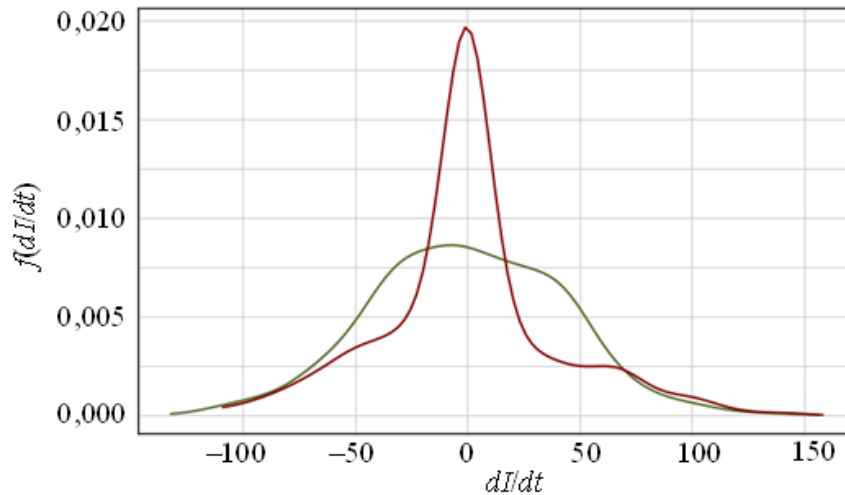


Рисунок 3.46 – Плотность распределения производных от токовых сигналов: сравнение режимов без вибрации и с вибрацией клетей

Реализацию данного метода на прокатных станах следует начинать с определения эталонного значения 0,5-квантиля и его допустимого отклонения от нуля. Калибровка параметра не требует вмешательства в работу стана, проведения специальных экспериментов с его запуском и остановом и может быть осуществлена на данных, хранящихся в базах АСУ ТП. Далее необходимо рассчитывать медианы для каждой дискретной выборки, сопоставляя их с эталонными значениями.

Для аппаратной реализации данного изобретения программно на ЭВМ непрерывно рассчитывается медианное значение (второй квантиль) для каждой выборки тока двигателя или его производной и сопоставляется с эталонным, получая при этом некоторую ошибку рассогласования

$$\varepsilon = I_{\text{факт}_{Me}} - I_{\text{эт}_{Me}}$$

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

При достижении критичного значения персоналу может быть подан предупреждающий сигнал, либо автоматически скорректированы технологические параметры процесса прокатки.

Для повышения надежности и точности прогнозирования вибраций необходимо с помощью численных методов дополнительно оценивать, вычисленное в реальном режиме времени значение интеграла площади от модуля разности распределения производной эталонной выборки и распределения рабочей выборки тока привода по формуле:

$$\sum_i^N \left| P(e) - P\left(\frac{dI}{dt}\right) \right| di$$

где $P(e)$ – плотность распределения от эталона; $P\left(\frac{dI}{dt}\right)$ – плотность распределения от производной тока привода клетки; N – количество точек в массиве распределений.

В рамках исследований были получены распределения от реальных токовых сигналов электроприводов рабочих клеток в режимах без вибрации, незадолго до вибрации и при фактически идентифицируемом режиме вибрации.

При этом в случае, когда рабочая выборка будет снята в режиме без вибраций, рассогласование будет иметь минимальное значение. Графически это можно увидеть на рисунке 3.47.

Площадь интеграла рассогласования имеет несущественное значение, так как нормализованные распределения производных тока практически совпадают.

В выборках, снятых непосредственно до возникновения вибраций и во время фактического наступления вибраций интеграл площади рассогласования существенно растет, так как само распределение сильно меняется даже при незначительном изменении поведения токового сигнала (его производной).

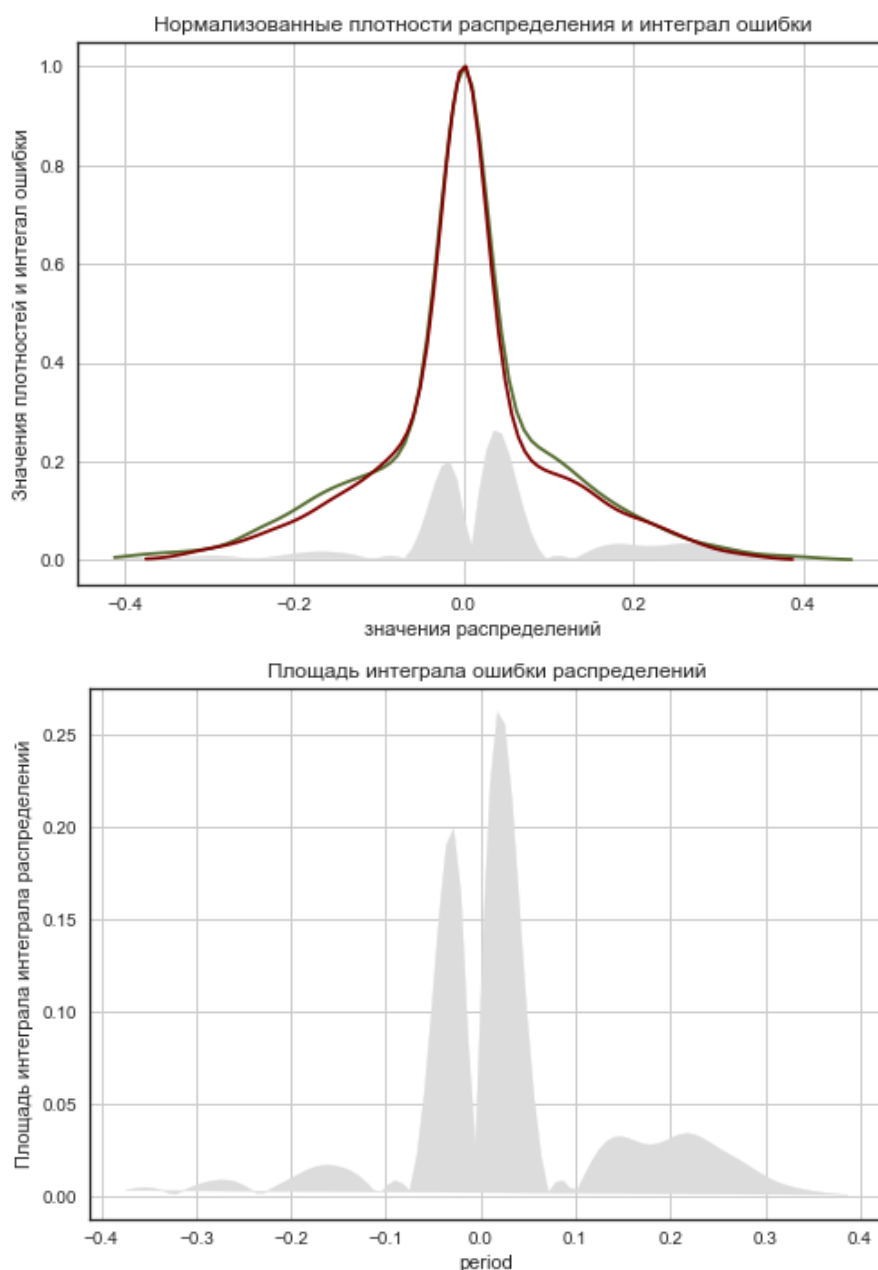


Рисунок 3.47 – Графическое отображение интеграла рассогласований эталонной и фактической выборки производной тока привода клетки стана при стабильном режиме работы стана (без вибраций)

На рисунке 3.48 представлено сопоставление нормализованных кривых распределения производных тока эталона и текущей выборки, а также закрашенная площадь интеграла рассогласования сигнала тока, полученного непосредственно за 15 секунд до возникновения вибраций. Величина интегральной суммы рассогласования в этом случае существенно увеличивается (показана на рисунке 3.48 отдельно).

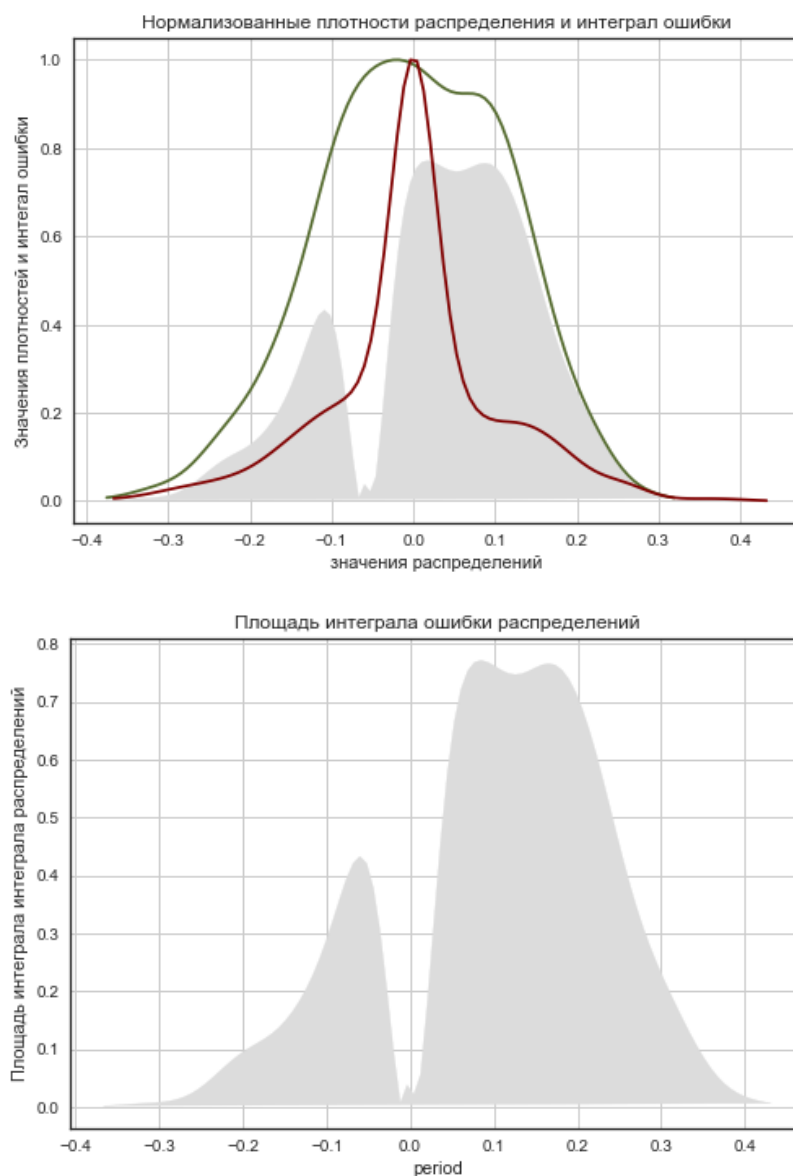


Рисунок 3.48 – Графическое отображение интеграла рассогласований эталонной и фактической выборки производной тока привода клетки стана непосредственно за 15 секунд до начала вибраций (интеграл ошибки возрастает)

Также меняются статистические параметры, такие как математическое ожидание, медиана и дисперсия в распределении производной тока выборки, полученной непосредственно перед возникновением вибраций.

Описанные выше технические решения необходимо алгоритмически и программно реализовать в автоматизированные системы управления станом, путем сопоставления приведенных выше статистических показателей и

интегральной суммы рассогласования от распределения тока или его производных из эталонной выборки и рабочей выборки и осуществления прогноза момента изменения технологического процесса и фактического возникновения вибраций. Таким образом, достигается технический результат прогнозирования вибрационных процессов.

На способ определения возникновения начальной стадии критической вибрации в рабочей клети прокатного стана получен патент Российской Федерации [246].

3.5.3 Выявление критических вибраций путем статистического анализа дисперсий сигналов нагружения системы

В работе [245] предлагается использовать для идентификации вибраций в рабочих клетях прокатных станов статистический анализ распределения токов главных приводов, при котором параметры кривой нормального распределения тока двигателя при фактических режимах работы сравниваются с некоей эталонной кривой. В итоге по изменению ошибки рассогласования и осуществляется идентификация возникновения вибраций.

Однако реализация данного подхода, с учетом используемых типов контроллеров в системах АСУ ТП, требует объемных быстрых вычислений и разложения токового сигнала в кривую нормального распределения в каждый момент времени, что влияет на возможное возникновение инерционности при прогнозе.

Анализ сигналов дисперсий нагружения рабочей клети стана способствует не только выявлению критических вибраций на стадии их зарождения, но и минимизирует возможные погрешности из-за инерционности измерительных и вычислительных систем при работе с большими данными.

Следует отметить, что при постоянной скорости прокатки момент нагрузки в клети равен крутящему моменту автоматизированного привода,

поэтому анализ параметров привода пропорционален нагрузочным процессам, происходящим в рабочей клетке и очаге деформации.

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

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

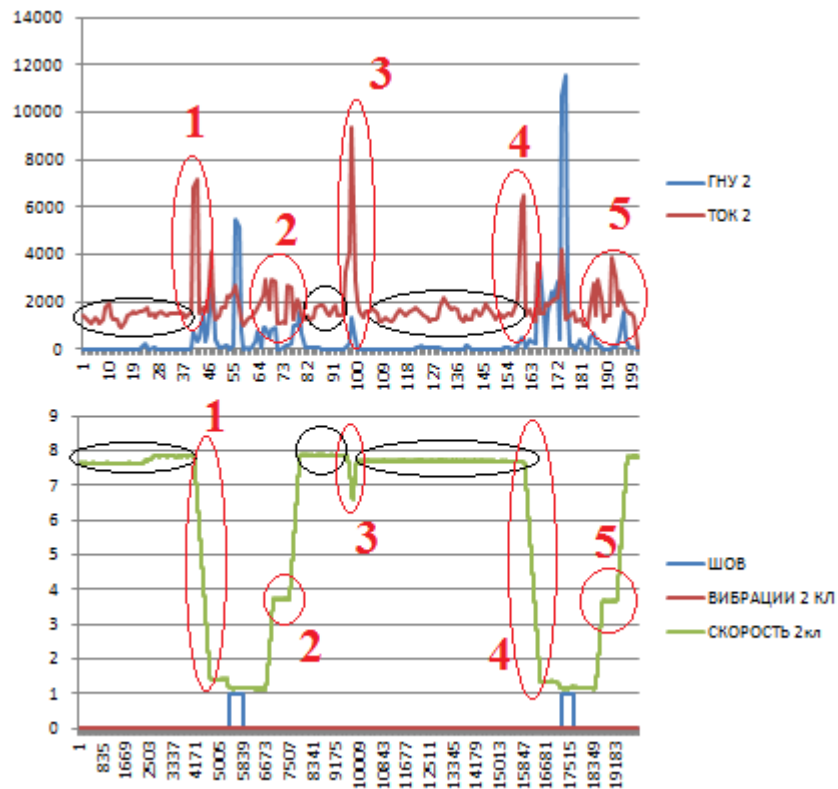
где I_i – измеренное значение тока двигателя в единицу времени; m_I – математическое ожидание выборки; N – объем выборки.

Далее происходит сравнение фактического значения дисперсии со значением дисперсии при постоянной скорости прокатки без вибраций путем расчета коэффициента пропорциональности k :

$$k = \frac{D_{\max}}{D_{Vconst}},$$

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

Ниже представлены результаты промышленных экспериментов. Для наглядности результатов на рисунках 3.46–3.48 представлен анализ сигналов дисперсий тока в рабочих клетках №№ 2–4 непрерывного 5-клетевого стана холодной прокатки 1700 и для сравнения показаны позиции гидронажимных устройств (ГНУ), пропорциональные величине межвалкового зазора, при прокатке сортамента 2,3→0,59×1255 мм



участки 1, 4 – динамический режим – торможение; участки 2, 5 – динамический переходный режим – разгон стана; участок 3 – момент вибраций на стане (также выделены участки с постоянной скоростью прокатки, на которых дисперсии тока и ГНУ имеют минимальную величину)

Рисунок 3.46 – Анализ сигналов дисперсий в клетѣ № 2

Из указанных диаграмм видно, что при вибрациях (участок 3) дисперсия тока имеет максимальный пик, увеличивающийся по своему значению от клетѣ № 2 к клетѣ № 4.

Можно сделать вывод об адекватности использования анализа дисперсии тока двигателя рабочих клетѣй прокатного стана при выявлении критических вибраций по сравнению с дисперсией позиции гидронажимных устройств.

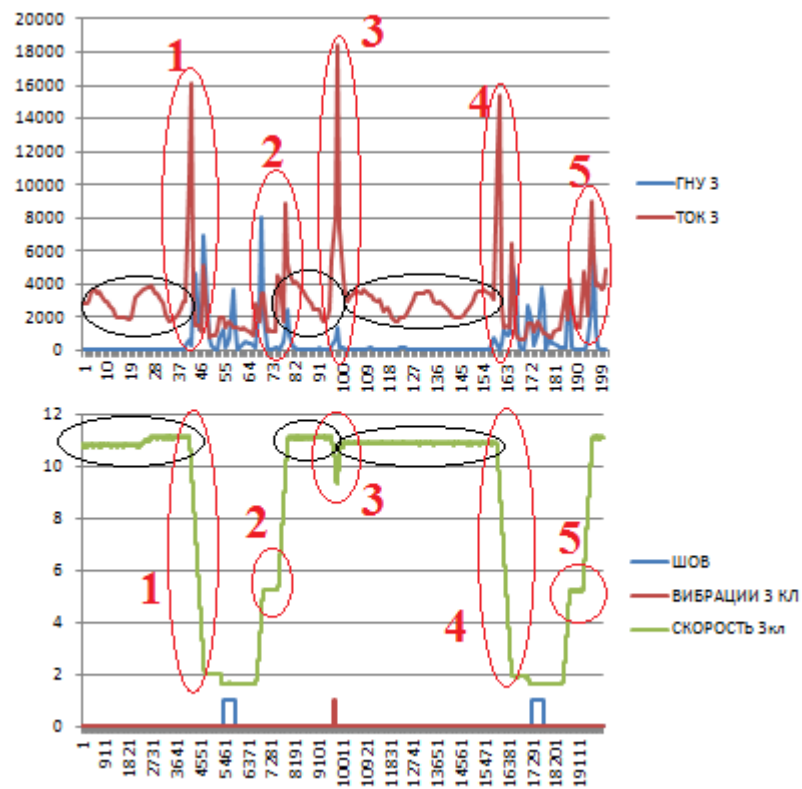


Рисунок 3.47 – Анализ сигналов дисперсий в клетки № 3

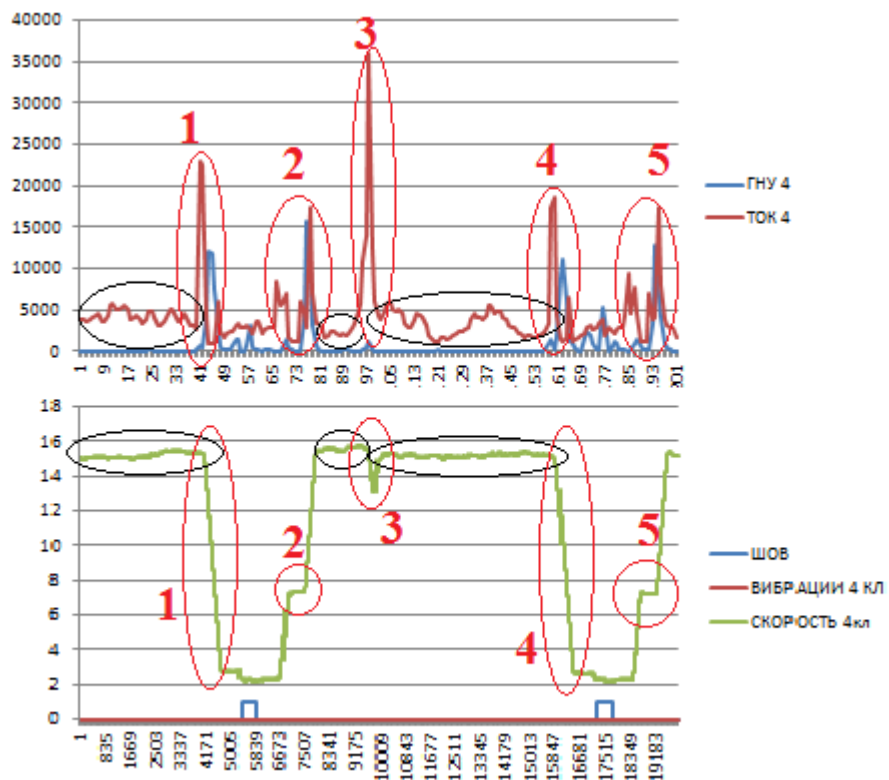


Рисунок 3.48 – Анализ сигналов дисперсий в клетки № 4

Результаты анализа диаграмм, представленных на рисунках 3.46–3.48, сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Данные коэффициента пропорциональности дисперсии тока двигателя по клетям при различных режимах работы стана

Режимы работы стана	Переходный режим – торможение	Переходный режим – разгон	Вибрации	Переходный режим – разгон	Переходный режим – торможение
Клеть №	1	2	3	4	5
2	4,83	2	6,33	4,33	2,66
3	5,3	3	6,1	5,1	3
4	7,6	5,83	12	6	5,83

В качестве обобщающих рекомендаций для промышленной реализации, после анализа более 1000 технологических режимов, в таблице 3.5 определены значения коэффициентов пропорциональности k по клетям №№ 2–4 при различных режимах работы стана.

Таблица 3.5 – Диапазоны дисперсии тока двигателя непрерывного стана холодной прокатки в различных режимах его работы

Клеть №	Диапазон значений коэффициента пропорциональности дисперсии тока привода клетки		
	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 выше

Соответственно, анализируя в реальном режиме времени изменение этого коэффициента можно без особого труда выявить критический уровень вибраций и экспертно определить «виброопасный» режим работы.

На способ выявления критических вибраций на станах холодной прокатки подготовлена заявка на патент Российской Федерации.

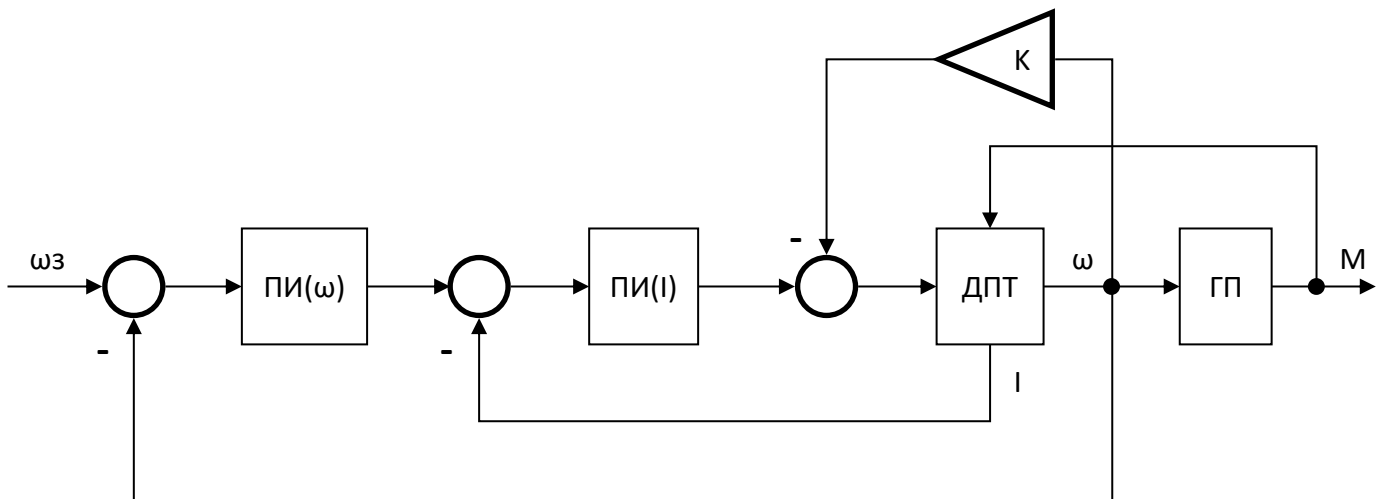
3.6 Демпфирование колебаний в главных приводах прокатных станов

Снизить уровень резонансных вибраций можно на основе классических подходов по демпфированию путем формирования в системах автоматизированного управления и регулирования скорости прокатки сигнала в противофазе существующему. Указанный способ относится к методам активного электромагнитного демпфирования, не требует капитальных затрат и может быть алгоритмически реализован в системах АСУ ТП прокатных станов [247, 248].

Аналогичным способом путем использования «антизвука» специалисты Саутгемптонского и Кембриджского университетов, а также Научно-технического колледжа г. Челси в 1977 году нейтрализовали негативные шумовые эффекты в салонах самолетов и вентиляционных установках [249, 250].

На рисунке 3.49 представлена схема управления демпфированием колебаний, основанная на принципе активного гашения посредством наложения одинаковых сигналов с противоположным знаком.

Поскольку различные колебания передаются через систему главного привода клетки на вал двигателя, то, снимая значение и характер его фактической скорости вращения, можно через повышающий коэффициент передать полученный сигнал в систему управления с противоположным знаком после стандартных регуляторов, непосредственно перед объектом управления.



$\omega_з$ – заданная угловая скорость вращения вала двигателя, $\text{ПИ}(\omega)$ – пропорционально-интегральный регулятор угловой скорости, $\text{ПИ}(I)$ – пропорционально-интегральный регулятор тока, ω – фактическая угловая скорость вращения вала двигателя, ДПТ – модель двигателя постоянного тока, ГП – линия лавного привода рабочего валка клетки (учет механической части), M – момент нагрузки необходимый для привода рабочего валка, K – коэффициент демпфирования

Рисунок 3.49– Схема управления демпфированием колебаний

Реализация подобной схемы и моделирование скорости прокатки в программном комплексе *MATLAB/Simulink* показали, что включение в цепь управления демпфирующего сигнала позволяет снизить амплитуду колебаний значений скорости приблизительно в 5 раз (рисунки 3.50 и 3.51).

При технической реализации проекта на базе существующих систем АСУ ТП станов холодной прокатки необходимо учитывать такой параметр, как «время отклика сигнала задания», то есть в данном случае это время от задания на скорость до управляющей команды на главный электрический привод. Указанный параметр является по сути «мертвой зоной», во время которой не происходит автоматического регулирования и подстройки параметров технологического процесса под требуемые заданные значения.

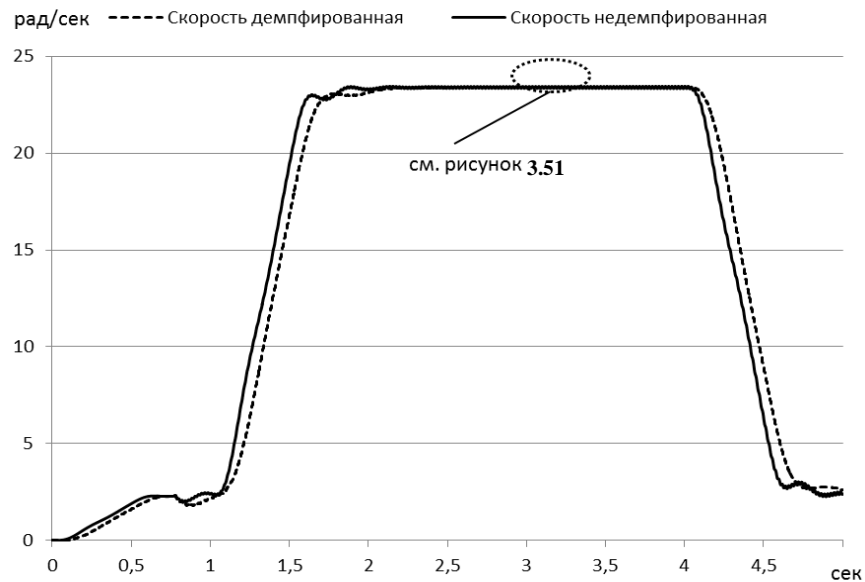


Рисунок 3.50 – Результаты моделирования окружной скорости рабочих валков

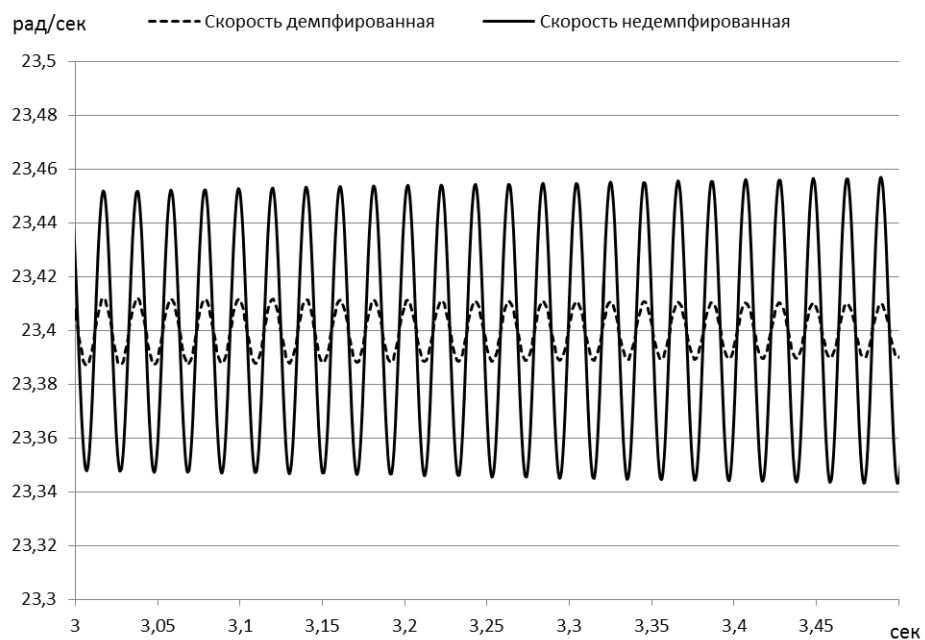


Рисунок 3.51 – Результаты демпфирования нагрузочных и крутильных колебаний в главном приводе рабочей клетки стана холодной прокатки

Значение времени отклика сигнала задания в современных АСУ ТП может варьироваться в достаточно широком диапазоне от 0,01 до 0,3 сек. В моделировании, описанном в данной работе, апробировалось время равное 0,01 сек.

Таким образом, в результате проведенных исследований создана динамическая модель, техническая реализация которой в системах АСУ ТП прокатных станов позволит без дополнительных капитальных затрат снизить негативный эффект от автоколебательных процессов скорости прокатки при обработке давлением тонких широких стальных листов.

Выводы по главе 3

1. Исследования вибрационных процессов, возникающих в рабочих клетях 5-клетевого стана 1700 ПАО «Северсталь», проводились с помощью стационарной системы диагностики, переносного вибродиагностического комплекса «Portable» с функцией цифрового магнитофона и программного обеспечения фирмы «ВАСТ». Для установления механизма перехода вибраций в резонансную фазу проведены активные эксперименты по «принудительному» выведению 4-й клетки стана, наиболее склонной к вибрациям, в состояние резонанса и фиксации с помощью вибродиагностического комплекса амплитудно-частотных характеристик основных узлов до начала резонанса, во время резонанса и после его прекращения, а также фиксации всех технологических и энергосиловых параметров режима прокатки. Были измерены собственные частоты рабочих и опорных валков, их подушек, станин, а также роликов измерителей натяжения. В результате установлено, что диапазону частот 110–120 Гц, при которых происходят резонансные колебания, соответствует только собственная частота узла станин 117 Гц.

2. 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.

2.1 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.

2.2 Установлено, что в процессе межперевалочной кампании шероховатость рабочих валков (следовательно, и коэффициент трения в очаге деформации) снижается по экспоненциальному закону от 2 до 6 раз. Это приводит к их пробуксовкам относительно полосы и повышению вероятности возникновения вибраций.

3. В результате аналитических исследований и моделирования технологических режимов установлено, что существует положительный технологический потенциал прокатного стана и техническая возможность управления секундными объемами полосы путем регулирования обжатий и скоростей рабочих валков для проектирования режимов, исключающих вероятность возникновения негативных вибрационных процессов.

4. Установлено, что ведение процесса непрерывной прокатки стальной полосы в условиях подпора приводит к увеличению токовых нагрузок в линии привода на 10–20 % и повышению его энергозатратности на 15–20 % по сравнению с прокаткой в условиях натяжения.

5. Разработана и реализована численная модель процесса холодной прокатки, сопровождающегося вибрациями рабочих валков, выполненная в программном комплексе DEFORM-2D, 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.

6. С помощью разработанной численной модели 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 оказывают существенного влияния на продольную разнотолщинность полосы, но приводят к появлению поверхностного дефекта «ребристость» с чередующимися светлыми и темными полосами.

7. Разработан метод идентификации опасной резонансной фазы вибрационных процессов в рабочих клетях станов холодной прокатки, 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. Применение метода 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. Разработан 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.

9. 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.

Глава 4. Разработка методологии проектирования технологических режимов процесса прокатки

4.1 Методология проектирования технологии холодной прокатки стальных полос

Общая тенденция улучшения качества производимой продукции затрагивает все отрасли промышленности и выражается в стремлении потребителей металлопроката получать стальной холоднокатаный лист с высокими технологическими и служебными свойствами. В свою очередь это требует от металлопроизводителей постоянного внедрения технологий, которые позволят повысить эффективность существующих производств и конкурентоспособность выпускаемого холоднокатаного проката. При этом возникает потребность в ускорении выполнения и реализации разработок, что обуславливает необходимость создания и совершенствования методов оперативного проектирования эффективных технологий прокатки с целью улучшения качества продукции, ресурсо- и энергосбережения.

Анализ современного состояния производства листового проката свидетельствует о том, что помимо энергосбережения, ключевой проблемой является обеспечение стабильности потребительских свойств листового проката, которое достигается только строгой регламентацией деформационных режимов прокатки и управлением технологическим процессом на стане в жестко заданных диапазонах изменения его параметров. Реализация перечисленного представляет определенные трудности из-за непостоянства и неоднородности химического состава и структуры стали, обуславливающие колебания величины исходного предела текучести, нестабильности толщины полосы на входе в стан и условий прокатки на непрерывном стане, когда при одновременном регулировании толщины и натяжения полосы непостоянны скорости, величины обжатий и, соответственно, энергосиловые параметры процесса прокатки, а также

показатели точности, плоскостности и механические свойства прокатываемых полос. Поэтому при проектировании технологического режима необходимо учитывать объективно существующие колебания технологических и энергосиловых параметров, что в итоге позволит разработать надежную энергоэффективную технологию прокатки, обеспечивающую получение продукции с заданным уровнем и стабильностью показателей её качества, с прогнозируемыми конечными свойствами.

В большинстве работ, посвященных исследованию и проектированию технологических режимов холодной прокатки, выполняется точечная оценка параметров процесса и прокатываемого металла без учета стохастичности [153, 154, 157, 158, 251]. В работе [252] предложена методика расчета величин нестабильности параметров процесса холодной прокатки с учетом воздействия случайных факторов по критерию равенства усилий по всем клетям стана, однако, как показывает практика, реализовать это крайне сложно. В работах [188–192], основные положения которых изложены в главе 2, показано применение и достоинства моделирования процесса холодной прокатки с учетом нестационарности и стохастичности его параметров, сделан вывод о целесообразности использования динамической модели процесса холодной прокатки при создании новых и совершенствовании действующих технологий производства тонких широких холоднокатаных полос. Проведенные исследования направлены на дальнейшее развитие методов моделирования энергоэффективных технологий прокатки с учетом стохастичности параметров.

При разработке методологии проектирования режимов холодной прокатки был применен модульный подход (рисунок 4.1). Каждым модулем реализуется определенная функция или несколько взаимосвязанных функций [253, 254].

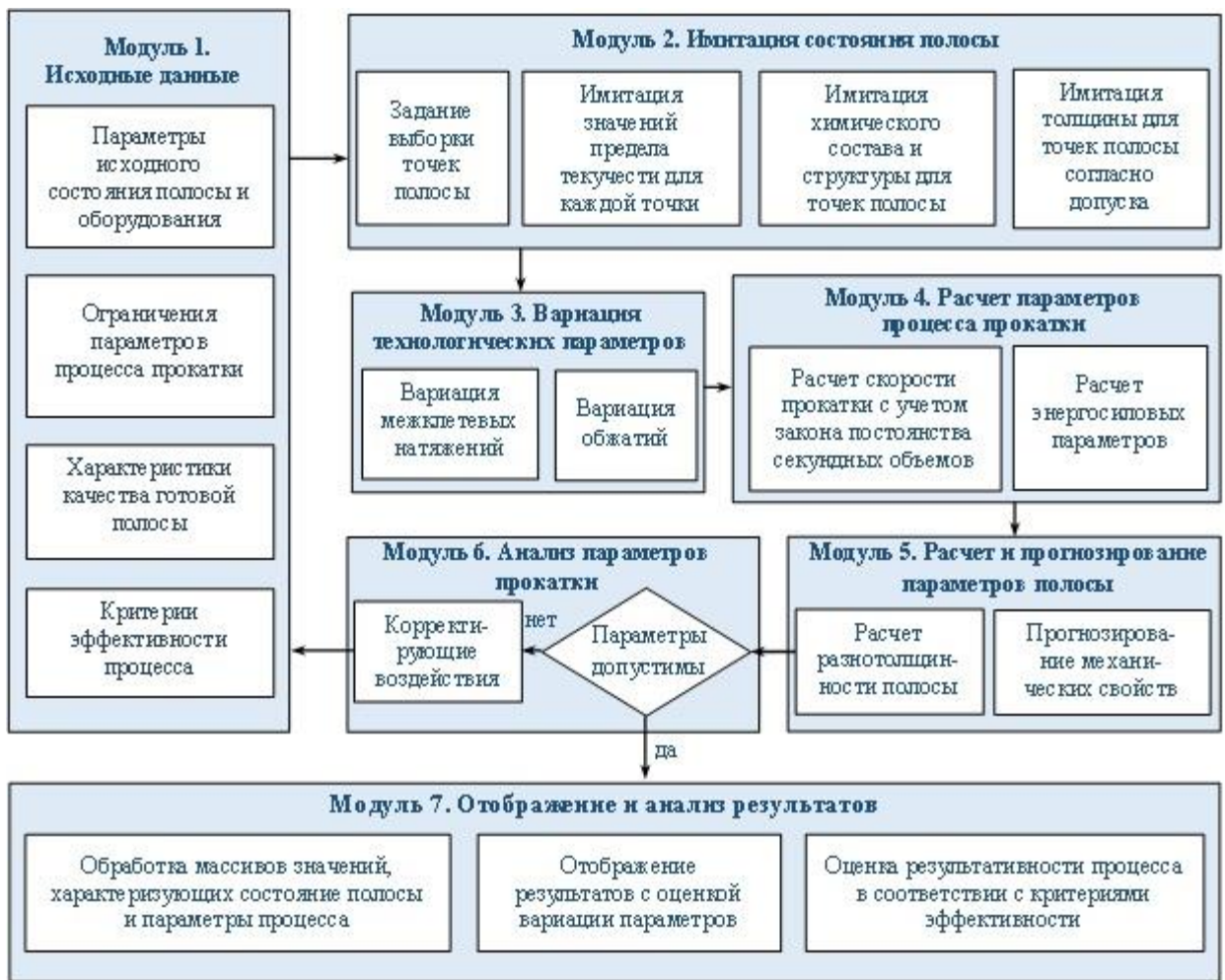


Рисунок 4.1 – Модули проектирования технологических режимов холодной прокатки с вариацией параметров процесса и полосы

Модуль 1 включает описание исходных данных для прокатываемой полосы и позволяет задавать характеристики и профилиразмеры 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.

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.

4.2 Алгоритмическое обеспечение методологии проектирования энергоэффективной технологии

Задача по проектированию технологии прокатки по критерию «минимум энергозатрат» была и остается задачей оптимизации. Термин «оптимизация» математический и означает у специалистов поиск экстремумов функции.

Вопросам оптимизации процессов и параметров прокатного производства стали уделять пристальное внимание в период развития систем и средств автоматизации и компьютерной техники примерно 30–40 лет назад

[255]. За это время проведено много исследований, направленных на оптимизацию различных параметров процесса прокатки: нагрева и охлаждения металла [256], механических свойств [257], энергосиловых параметров [258–261], профиля и толщины полосы [262]. Имеются современные исследования с применением современных интеллектуальных методов обработки информации для решения задач оптимизации энергосиловых параметров технологии прокатного производства с помощью нейронных сетей и генетических алгоритмов [263].

В современной мировой производственной и исследовательской практике в актуальных задачах сокращения издержек и снижения себестоимости продукции при выполнении достаточно жестких требований по обеспечению и повышению качества проката, задача оптимизации параметров остается на повестке. Однако осуществлять ее становится все сложнее и сложнее, при этом основным фактором, влияющим на себестоимость проката, являются затраты мощности на единицу продукции.

Для реализации этой задачи необходимы новые компетенции специалистов по работе с большими данными в области проектирования технологии листовой прокатки, а также оценки и прогнозирования энергозатрат.

Не менее актуальным остается задача выбора параметра, по которому нужно оптимизировать технологию, так как изменение одного из параметров прокатки может негативно отразиться на других.

Трендом в современных мировых исследованиях в области проектирования новых перспективных технологий прокатки и соответственно подготовки специалистов, помимо оптимизации технологических параметров, являются вопросы предиктивной (прогнозной) аналитики, позволяющие определять параметры и показатели процесса прокатки в будущем с учетом их стохастичности и нестационарности.

Ниже рассмотрены подходы, которые могут быть применены специалистами для решения задач проектирования технологии листовой

прокатки или оптимизации существующего процесса по критерию «минимум расхода энергии». В качестве объекта рассмотрен непрерывный 5-клетевой стан холодной прокатки 1700.

4.2.1 Интеллектуальный алгоритм работы с большими данными, основанный на методе эволюционного моделирования

Имеется набор данных, представляющий собой выборку допусков режима прокатки по отдельным параметрам $M[m * n]$. 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.

Поэтому 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, разработанная ранее [188, 190, 264], и статистические пакеты анализа данных из библиотек языка *Python*.

До начала оптимизации, попытаемся увидеть в каких пределах, приблизительно может варьировать мощность прокатки на данной выборке. Для этого на исходном множестве определенное количество раз получим случайную выборку нормально взятых параметров с последующим расчетом мощности прокатки. Это также позволит рассмотреть некоторые статистические характеристики распределения мощностей в зависимости от

сочетания параметров прокатки. В эксперименте была сделана выборка в 4000 комбинаций значений параметров из набора данных. На рисунке 4.2 показано распределение расчетных суммарных мощностей прокатных приводов. Из графика (рис. 4.2) видно, что при случайном выборе параметров распределение расчетных мощностей имеет вид нормального распределения с незначительными шумами.

В данном случае интересно не столько распределение, сколько среднее и минимальное значения. Так как по ним, в дальнейшем, будем ориентироваться для подбора оптимума по минимальной мощности. Находим, что среднее значение находится в пределах 12,77 МВт, минимальное значение в районе 8–9 МВт. На них далее необходимо ориентироваться при задании граничных условий оптимизации и коррекции, чтобы иметь представление о критериях останова алгоритма оптимизации и выбора количества циклов для ограничения итераций. На рисунке 4.2 приведена гистограмма мощностей, усредненных до 100 значений шкалы.

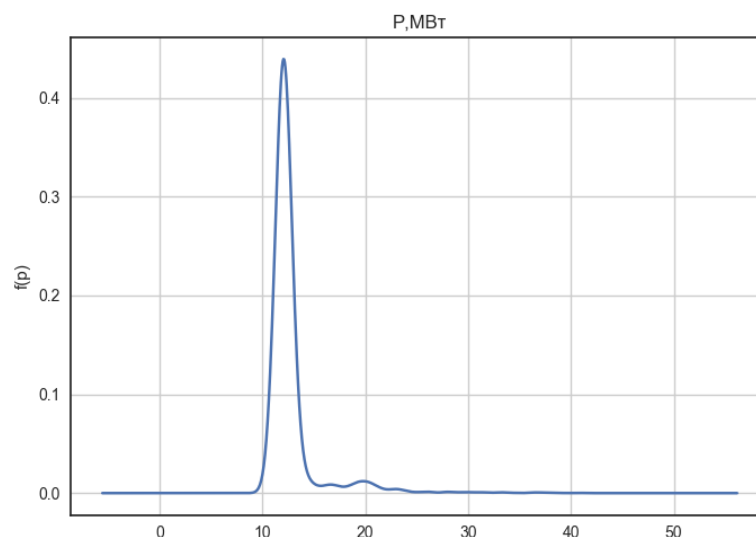


Рисунок 4.2 – График плотности распределения $f(P)$ расчетов мощностей P прокатных приводов на случайной выборке входных параметров из набора данных

Из гистограммы (рис. 4.3) видно, что при случайной выборке, малая вероятность получить наиболее оптимальные варианты по мощности. Лишь несколько единиц значений попадают в интервал ниже 9 МВт. Предполагается, что алгоритм оптимизации позволит снизить этот показатель, без необходимости перебора всех возможных комбинаций. Установим ограничение оптимизации на уровне $K_{min}=7,5$ МВт. Ниже приведена блок-схема алгоритма оптимизации (см. рис. 4.4) и описание работы данного алгоритма.

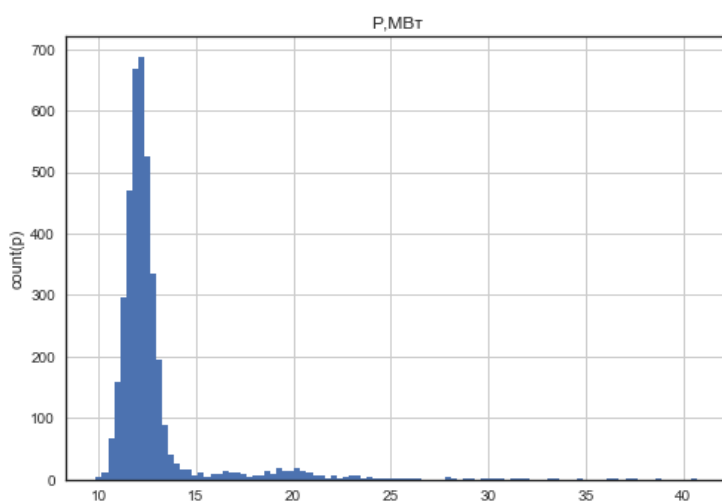


Рисунок 4.3 – Гистограмма распределения $count(P)$ мощностей прокатных приводов P на случайной выборке входных параметров из набора данных

В схеме алгоритма приняты следующие обозначения: P – потребляемая мощность прокатных электродвигателей, $M[m*n]$ – 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).

Работа алгоритма оптимизации начинается со случайного отбора параметров в стартовую выборку входного вектора $M[m * n] \rightarrow rand(A[m])$ для расчета мощности P . При стартовой инициализации значение расчетной

мощности может оказаться любым, в соответствии с вероятностью распределения $f(P)$, согласно ранее полученного графика (рис.4.2).

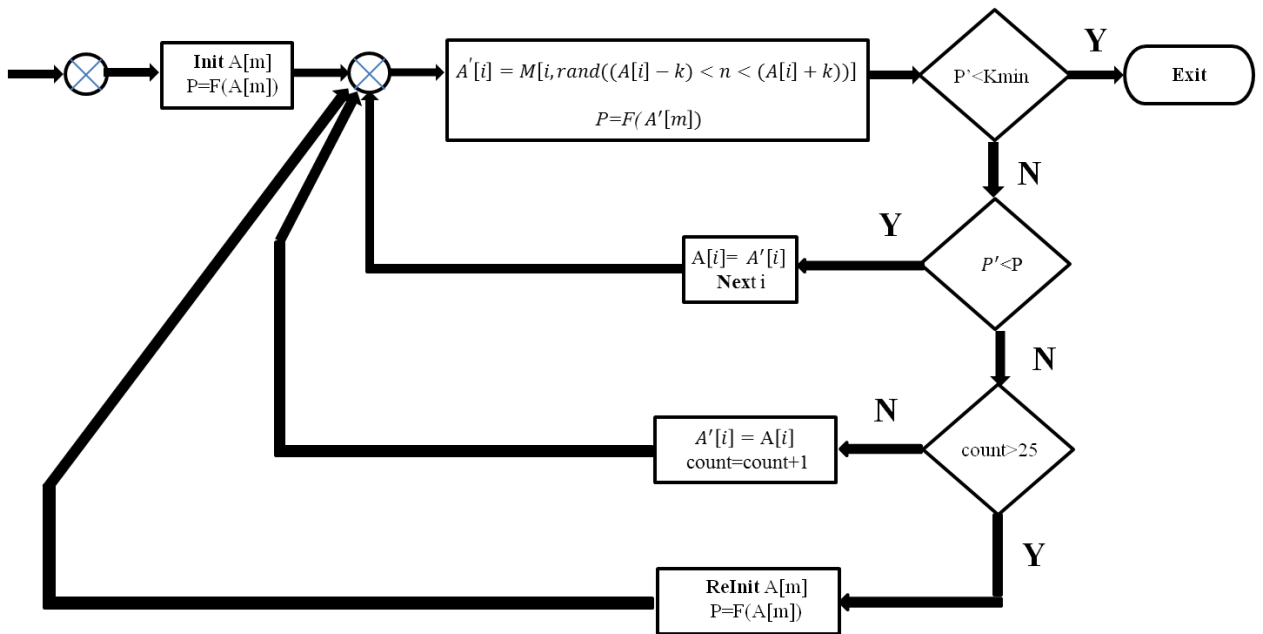


Рисунок 4.4 – Блок-схема алгоритма оптимизации мощности прокатки по критерию минимума

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 $M[m * n]$ 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 $M[m * n]$ на k значений. Метод подстановки приведен ниже:

$$A'[i] = M[i, rand((A[i] - k) < n < (A[i] + k))].$$

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 P [264, 265].

4.2.2 Алгоритм подбора технологических параметров, обеспечивающих минимальный уровень требуемой мощности

Проведенные ранее исследования, показали, что распределения обжатий и натяжений полосы в клетях прокатного стана могут существенно влиять на уровень потребляемой главными приводами рабочих клеток мощности, как при горячей, так и при холодной прокатке. Причем установлено, что изменение уровня межклетевых натяжений стальной полосы практически не влияет на уровень энергозатрат при непрерывной горячей прокатке [266].

Для поиска оптимальных значений факторов технологии с точки зрения энергоэффективности в работах применялись методы оптимизации, известные из теории планирования эксперимента, которые позволяют сократить количество расчетов при поиске «наилучшего» значения исследуемого параметра. Однако опыт их применения авторами работы [267] показал, что эффективность стандартных оптимизационных процедур не всегда будет достаточно высокой. В этих методах для скорейшего поиска оптимальной области диапазон варьирования независимых переменных должен быть относительно узким, а при расширении этого диапазона вероятность ошибки поиска оптимального значения для критического параметра увеличивается.

Кроме того, вследствие возможности автоматизации процесса поиска оптимальных значений параметров технологии, проблема большого количества промежуточных расчетов при поиске наилучших значений критического параметра теряет свою актуальность.

Очевидно, что для поиска оптимальных величин факторов технологии непрерывной прокатки наиболее рациональным подходом будет составление матрицы, содержащей сочетания всех возможных вариантов величин параметров технологии для конкретного стана – частных обжатий в клетях, удельных натяжений полосы в межклетевых промежутках и, соответствующих им, суммарных мощностей двигателей главных приводов, определенных с помощью достоверных методик. Из составленной матрицы производится выбор наиболее оптимального варианта по критерию «сумма энергозатрат на ведение процесса».

Такой подход может быть применен при проектировании технологии, если основным критерием эффективности будет являться какой-либо другой фактор, например, шероховатость поверхности готовой полосы, ее плоскостность или иной параметр при наличии соответствующей математической модели.

Результаты анализа расхода электроэнергии на прокатку стальных горячекатаных и холоднокатаных полос говорят о следующем. Затраты на горячую прокатку стальных полос на стане 2000 могут достигать величин 80–90 кВт·ч/т, а на холодную прокатку – 140–170 кВт·ч/т. Очевидно, что даже незначительное уменьшение количества потребляемой энергии обеспечит снижение себестоимости стальной продукции предприятий отрасли.

Актуальными являются вопросы исследования закономерностей распределения параметров технологии между прокатными клетями непрерывного стана, вопросы формирования рекомендаций по назначению параметров технологии в рамках освоения новых видов прокатной продукции по результатам автоматизированного проектирования. В том числе, интересна задача выявления возможных резервов экономии электроэнергии на действующих станах при внедрении технологических параметров, рассчитанных с помощью вновь предлагаемой методологии.

Целями данного исследования являлись разработка автоматизированной системы проектирования технологии холодной прокатки, обеспечивающей расчет наименее энергозатратных режимов прокатки полос, определение закономерностей изменения суммарной мощности приводов рабочих клетей непрерывных станов в зависимости от величин факторов – частных обжатий в рабочих клетях и натяжений в межклетевых промежутках стальной полосы, а также разработка общих рекомендаций по проектированию технологии производства стального проката.

Методика исследования.

Для проведения исследования использовали методологию разработки технологического режима, представленную в п. 4.1. Следуя этой методологии для действующего 5-клетевого стана 1700 ПАО «Северсталь», сначала определили механические характеристики материала полосы из справочных данных, для исследуемой стали марки 01ют – по результатам лабораторных испытаний образцов [268]. Марочный сортамент, использованный для исследования, характерный для большинства непрерывных станов – это стали марок 01ют, 08ю, 08пс. Установили профильный сортамент исследуемых полос – три условные группы толщин: тонкая полоса, толщиной не более 0,5 мм; полоса средней толщины – не более 0,8 мм; толстая полоса, толщиной больше 0,8 мм.

Далее составили матрицу технологических параметров для каждой марочной и профильной групп сортамента и конструктивного параметра – диаметра бочки вала. Матрица, включала в себя обжатия и удельные натяжения полосы, найденные путем перебора с заданным шагом всех возможных сочетаний этих параметров с учетом технологических ограничений клетей. Пример этой матрицы приведен в таблице 4.1.

Для всех созданных вариантов режимов были определены усилия прокатки и мощности двигателей главных приводов. Для расчета энергосиловых параметров применили методику, описанную в главе 2.

Таблица 4.1 – Матрица технологических параметров холодной прокатки на 5-клетевом стане полосы размерами 0,3×1020 мм из стали 08ю, диаметр бочки рабочего валка 600 мм

№	h ₀ , мм	h ₁ , мм	h ₂ , мм	h ₃ , мм	h ₄ , мм	h ₅ , мм	σ ₁ , МПа	σ ₂ , Мпа	σ ₃ , МПа	σ ₄ , МПа	N _{дв} , МВт
1	1,50	1,13	0,84	0,65	0,31	0,30	0,00	0,00	0,00	54,81	11,18
2	1,50	1,13	0,84	0,65	0,31	0,30	40,30	46,31	49,69	64,81	9,97
3	1,50	1,13	0,84	0,65	0,31	0,30	40,30	46,31	49,69	54,81	10,08
4	1,50	1,13	0,84	0,65	0,31	0,30	40,30	46,31	59,69	64,81	9,74
5	1,50	1,13	0,84	0,65	0,31	0,30	40,30	46,31	59,69	54,81	9,82
6	1,50	1,13	0,84	0,65	0,31	0,30	50,30	46,31	49,69	64,81	9,95
7	1,50	1,13	0,84	0,65	0,31	0,30	50,30	46,31	49,69	54,81	10,05
8	1,50	1,13	0,84	0,65	0,31	0,30	50,30	46,31	59,69	64,81	9,72
9	1,50	1,13	0,84	0,61	0,31	0,30	50,30	46,31	59,69	54,81	9,97
10	1,50	1,13	0,84	0,61	0,31	0,30	40,30	46,31	50,37	64,81	10,03
11	1,50	1,13	0,84	0,61	0,31	0,30	40,30	46,31	50,37	54,81	10,14
12	1,50	1,13	0,84	0,61	0,31	0,30	50,30	46,31	50,37	64,81	10,01
13	1,50	1,13	0,84	0,57	0,31	0,30	50,30	46,31	50,37	54,81	10,16
14	1,50	1,13	0,84	0,57	0,31	0,30	40,30	46,31	51,03	64,81	10,07
15	1,50	1,13	0,84	0,57	0,31	0,30	40,30	46,31	51,03	54,81	10,18
...
176	1,50	0,90	0,83	0,76	0,31	0,30	45,20	55,30	61,66	64,81	9,24
...
1962	1,50	0,82	0,76	0,69	0,31	0,30	46,60	57,20	61,17	0	10,02

Примечание: h₀ – толщина подката, h₁...h₅ – толщина полосы на выходе из клеток с 1 по 5 соответственно, σ₁ ... σ₄ – удельное натяжение на выходе из клеток с 1 по 4 соответственно

По результатам исследования параметров полученных режимов установили диапазон изменения требуемых мощностей двигателей главных приводов рабочих клеток для ведения процесса на прокатном стане конкретного типа. Для 5-клетевого стана 1700 при прокатке полосы из стали 08ю толщиной 0,3 мм и шириной 1020 мм из подката 1,5 мм этот диапазон составил от 9,24 МВт до 11,18 МВт при скорости прокатки 12 м/с, т.е. изменение оптимизируемого параметра составило 17,3 % от минимально

возможной требуемой мощности при изменении величин факторов технологии.

Из всех сочетаний параметров для каждой группы марочного и профильного сортамента выбрали то, которое обеспечивало минимальные затраты энергии на ведение процесса с учетом ограничений по допускаемым величинам усилий прокатки и мощности двигателей главных приводов. Такая оптимальная совокупность параметров представлена в таблице 4.1 в строке под номером 176. Общее количество обработанных данных для каждого марочного и профильного сортамента, подобранных для поиска оптимального, составило порядка 2000 единиц. По итогам произведенных расчетов установили закономерности влияния параметров технологии в рабочих клетях непрерывной группы на энергосиловые параметры процесса прокатки. Частный алгоритм, с помощью которого определяли наименее энергозатратный режим производства полос представлен на рис. 4.5 [268, 269].

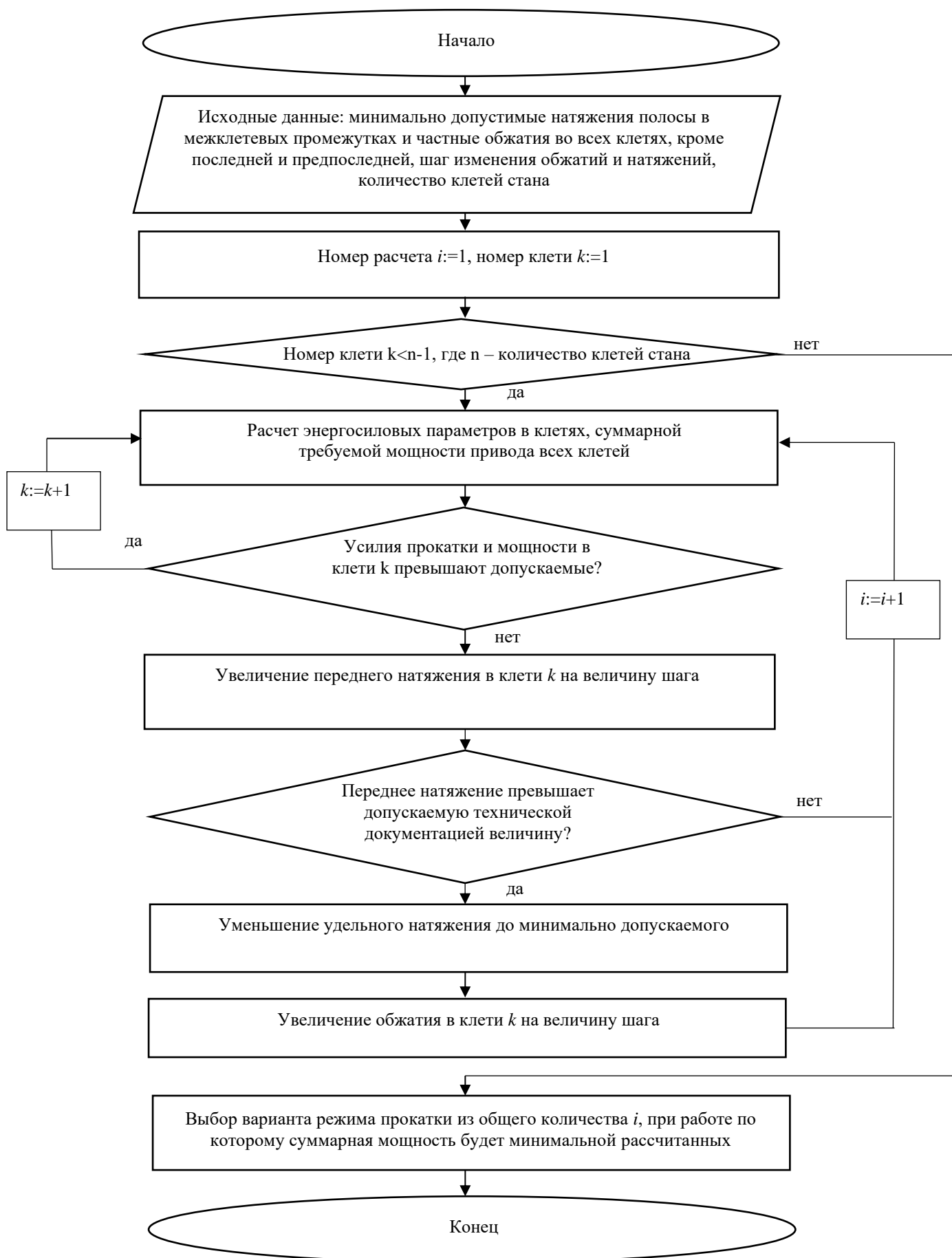


Рисунок 4.5 – Алгоритм поиска энергоэффективного режима

4.3 Апробация разработанного инструментария для проектирования энергоэффективной технологии

4.3.1 Практическое использование интеллектуального алгоритма оптимизации

На графике (рис. 4.6) показан процесс оптимизации, где удалось подобрать параметры мощности за небольшое количество итераций, когда выполнены условия и алгоритм остановил поиск.

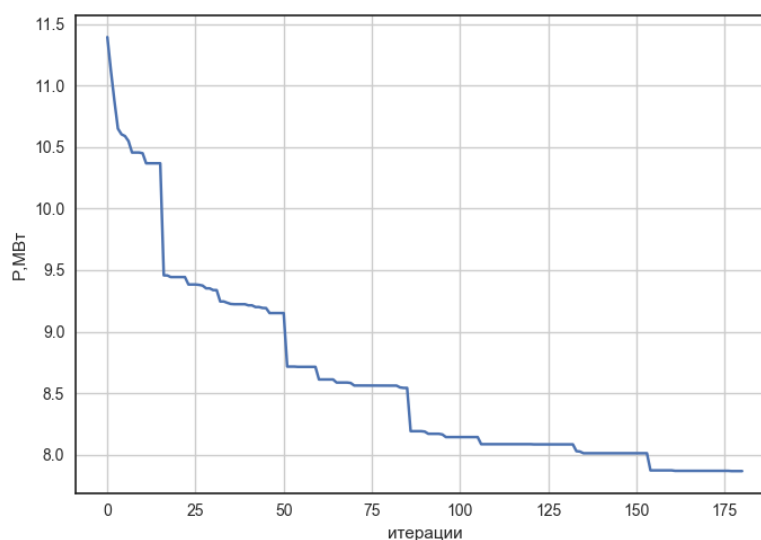


Рисунок 4.6 – Процесс минимизации потребляемой мощности P при подборе соотношения входных параметров алгоритмом оптимизации

Из (рис. 4.6) видно, что периодически процесс оптимизации замедляется, либо вообще останавливается на несколько итераций. Иногда оптимизация останавливается на определенной величине, так и не достигнув заданного критерия. Повторные эксперименты подтвердили, что оптимизация подобным методом подвержена попаданием в локальные минимумы, и это зависит от случайного стартового значения выборки $A[m]$. Чтобы избежать подобных ситуаций, в алгоритм было введено ограничение на количество итераций без изменения мощности, при условии отсутствия

достижения критерия останова. Эмпирически установлено, что оптимальное количество итераций без изменения колеблется в районе 15-25 циклов. Если процесс оптимизации не увеличивает минимизацию мощности за данное количество итераций, то процесс застрял в локальном минимуме.

Для исключения подобных сценариев, в алгоритм был введен процесс сброса текущего набора параметров в $A[m]$. Было опробовано два варианта: возвращать систему к исходному состоянию, либо возвращать к моменту до того как система попала в локальную ловушку. Второй вариант сложнее в вычислительном плане, так как требует хранить несколько предыдущих состояний системы. Кроме того, он не дал существенного преимущества в скорости подбора. В рабочей версии оставлен вариант, когда попав в локальный минимум, алгоритм полностью сбрасывает неудачную выборку и начинает весь цикл с начальной точки, заполняя выборку $A[m]$ новыми значениями из набора данных $M[m * n]$.

В результате многократных подборов удалось получить среднестатистические результаты минимизации мощности прокатки P на величине порядка 7,5–7,8 МВт, что меньше чем минимальные значения левой части кривой распределения (см. рис. 4.3) при случайных выборках. Таким образом, предложенный алгоритм оптимизации позволяет производить минимизацию по мощности из набора соотношений входных параметров за сравнительно небольшое количество итераций. При этом достигаются значения минимизации по мощности, которые затруднительно получить ручным или простым случайным перебором вариантов.

Получение образовательных компетенций в области освоения данного или аналогичных методов оптимизации специалистами в области прокатного производства будет способствовать развитию и внедрению цифровых и интеллектуальных технологий в процессы проектирования и производства листопрокатной продукции в будущем.

Таким образом, рассмотрена практическая задача минимизации потребляемой мощности при непрерывной холодной прокатке с

применением оптимизационного алгоритма в рамках проектирования эффективной технологии производства стального проката. Разработан универсальный алгоритм оптимизации технологии по критерию минимум энергозатрат, упрощающий и ускоряющий инженерные расчеты, которыми пользуются специалисты-эксперты по листопрокатному производству, на рассмотренном примере показавший свою эффективность [270–272].

4.3.2 Применение алгоритма подбора технологических параметров

Моделирование энергосиловых параметров для режимов работы 5-клетевого стана 1700 ПАО «Северсталь», рассчитанных с помощью алгоритма, приведенного на рис. 4.5, позволило определить величину затрат мощности на действующем стане и потенциал снижения энергозатрат при использовании предложенной в параграфе 4.1 методологии.

Результаты оценки энергозатрат на ведение процесса непрерывной прокатки на 5-клетевом стане 1700 представлены на рис. 4.7.

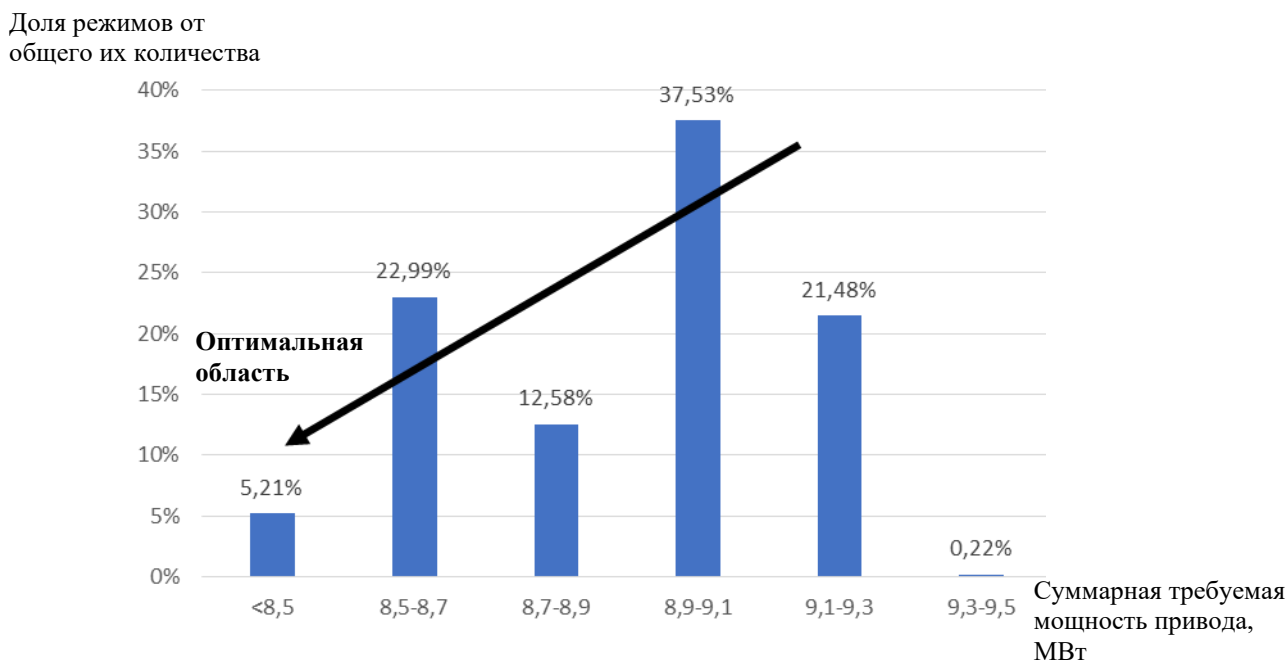


Рисунок 4.7 – Распределение суммарных энергозатрат при использовании всех возможных сочетаний параметров технологии при прокатке полосы толщиной 0,5 мм из стали марки 01ют при скорости 12 м/с

Данные диаграммы рис. 4.7 позволяют сделать заключение о достаточном потенциале уменьшения энергозатрат на ведение процесса. Наибольшее количество возможных технологических режимов – до 30 % от возможных – обеспечат величину энергозатрат в диапазоне 8,9–9,2 МВт при скорости прокатки 12 м/с. Из диаграммы видно, что существует возможность ведения процесса с суммарными затратами мощности менее 8,5 МВт при той же скорости прокатки. Причем таких режимов из общего количества возможных – менее 5 %. Целесообразно с целью уменьшения энергозатрат вести процесс прокатки в соответствии с технологией, обеспечивающей этот минимальный уровень энергозатрат.

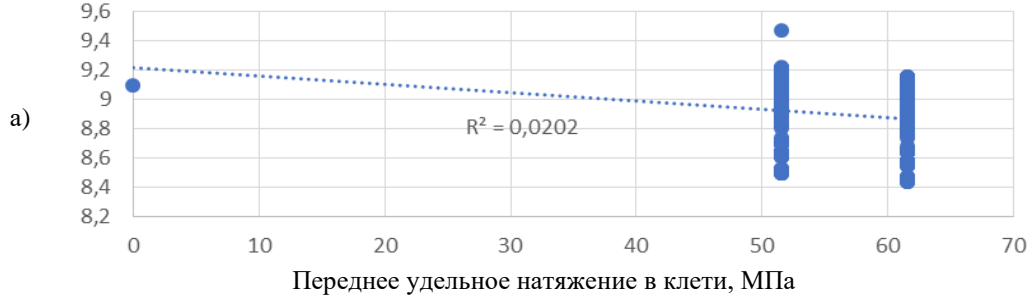
Результаты моделирования режимов прокатки позволили на значительном объеме данных установить влияние параметров технологии на уровень энергозатрат. Так изменение суммарной требуемой мощности для ведения процесса прокатки на 5-клетевом стане 1700 в зависимости от частных обжатий в клетях и удельных натяжений показано на рис. 4.8 [269].

Из зависимостей рис. 4.8 видно, что в наибольшей степени на изменение суммарной потребляемой мощности оказывают влияние величины частных обжатий в первых и предпоследней клетях, а также величины натяжений во всех межклетевых промежутках. Причем увеличение обжатия в первых и предпоследней клетях и всех удельных натяжений снижают уровень энергозатрат на ведение процесса стана 1700 ПАО «Северсталь».

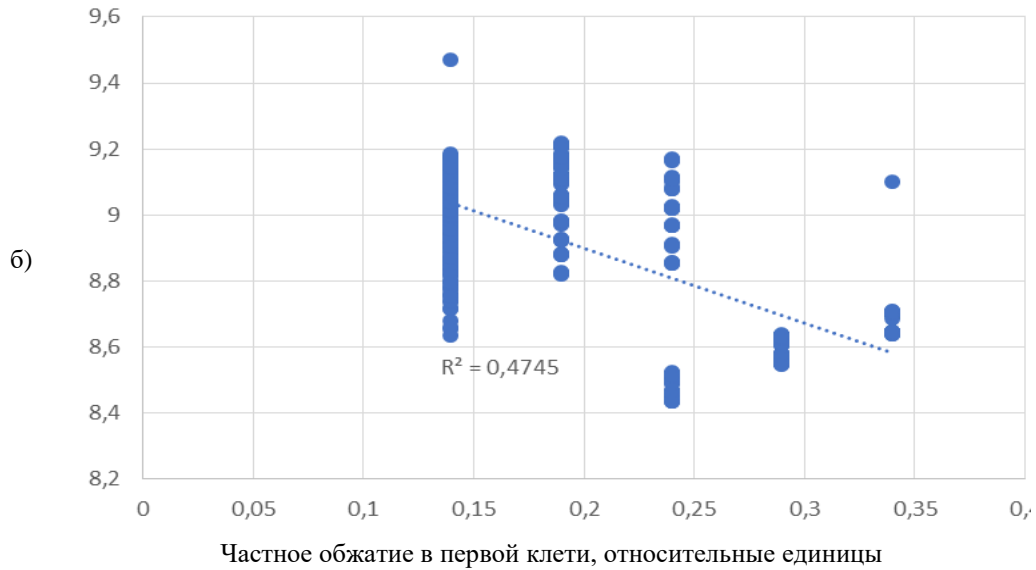
Данные исследования параметров технологии окончательно позволили установить характер их влияния на величину энергозатрат:

- снижение суммарной требуемой мощности на всем исследованном профильном сортаменте обеспечивается увеличением частного обжатия в первой клетке, причем наиболее существенное влияние эта величина оказывает при прокатке наиболее толстых полос;

Суммарная требуемая
мощность привода, МВт



Суммарная требуемая
мощность привода, МВт



Суммарная требуемая
мощность привода, МВт

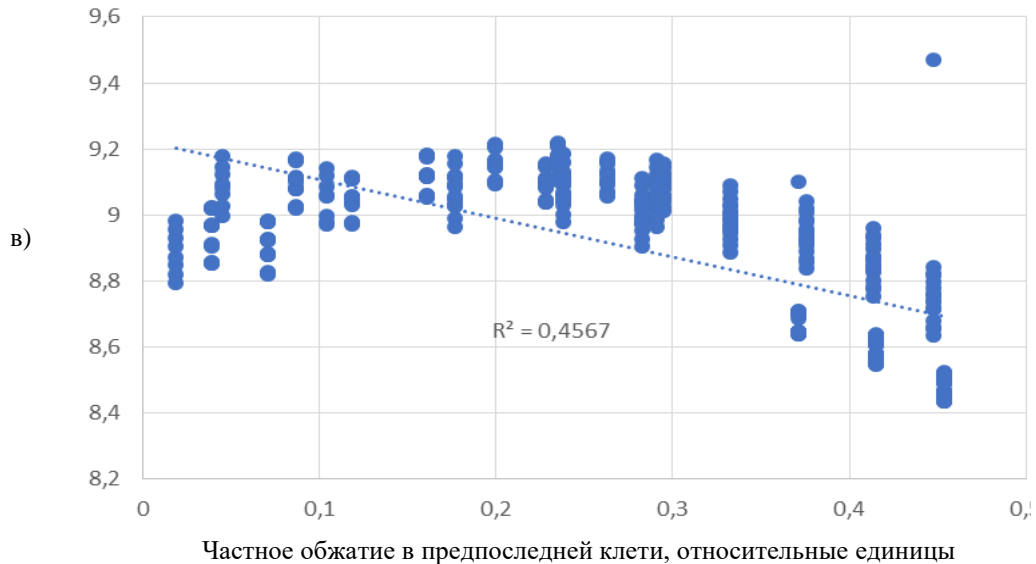


Рисунок 4.8 – Влияние на суммарную требуемую мощность двигателей удельного натяжения в последнем межклетевом промежутке (а); частных обжатий в первой (б) и предпоследней (в) клетях

– увеличение удельных натяжений во всех межклетевых промежутках окажет дополнительное воздействие на снижение требуемой мощности при производстве всего сортамента при любом диаметре бочек рабочих валков; уменьшение суммарного энергопотребления при повышении удельного натяжения в одном из межклетевых промежутков на 10 МПа может достигать величины 120 кВт при скорости прокатки до 12 м/с;

– разгрузка промежуточных клеток по величине частного обжатия с переносом оставшейся части обжатия на первую и предпоследнюю клетки обеспечивает снижение требуемой суммарной мощности привода рабочих клеток при производстве полос толщиной менее 0,5 мм;

– загрузка по обжатию предпоследней клетки стана увеличит расход энергии при выпуске проката толщиной более 0,5 мм, а при прокатке более тонких полос, наоборот – уменьшает расход энергии, при росте обжатия на 2 % изменение энергопотребления может достигать 150 кВт при скорости прокатки 12 м/с.

Наименее энергозатратные режимы прокатки были проанализированы по величинам технологических параметров, результаты этого анализа для 5-клетевого стана представлены на рис. 4.9 для готовых полос толщиной от 0,3 до 0,5 мм.

Установлено, что наиболее эффективными предложенные алгоритм и методология будут являться при проектировании режимов обработки наиболее тонких полос, что видно из диаграммы рис. 4.10.

По результатам исследования определено, что марка стали обрабатываемой полосы не окажет влияния на эффективность применения методологии.

В результате использования алгоритма установлено, что при изменении толщины полосы перед первой клетью на 5 % от номинального значения уровень колебаний мощности может составлять до 3–4% от его среднего значения при работе 5-клетевого стана 1700 ПАО «Северсталь» по существующей технологии.

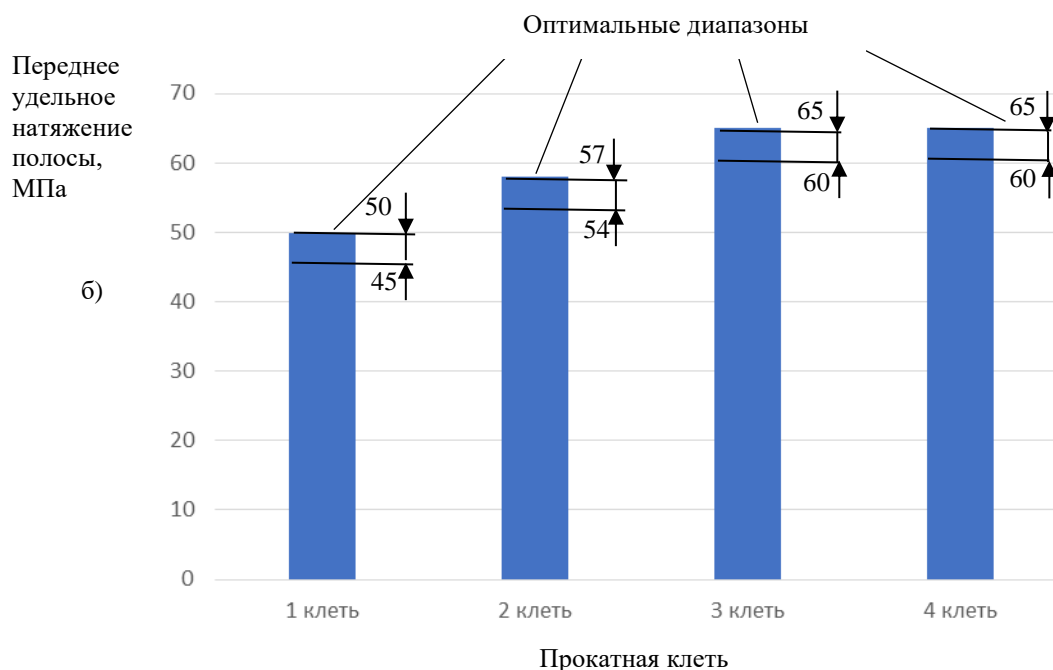
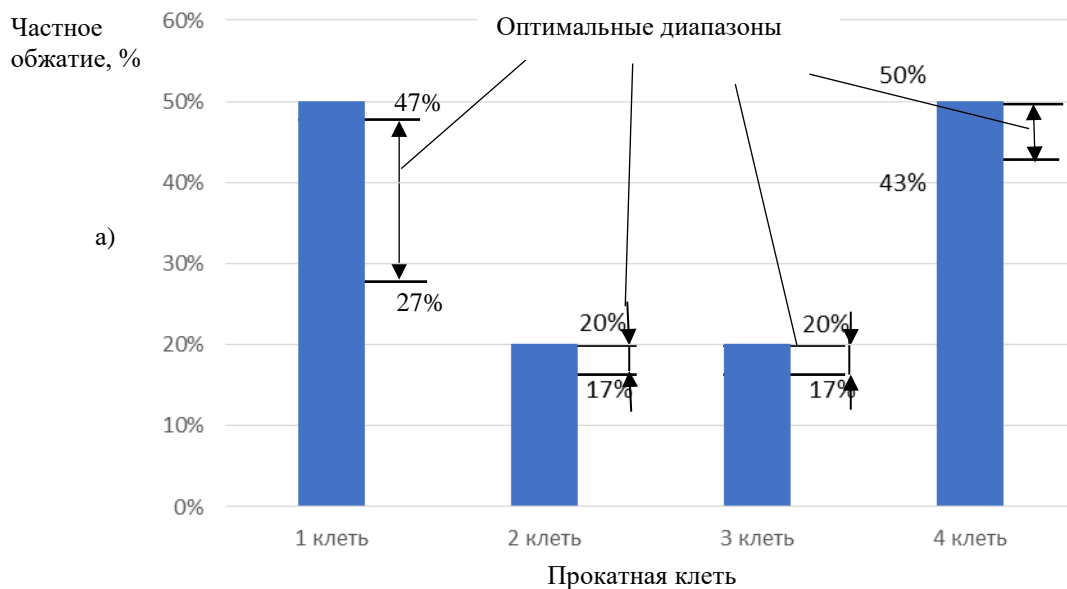


Рисунок 4.9 – Диапазоны частных обжатий (а) и удельных натяжений (б) в рабочих клетях 5-клетевого стана 1700, обеспечивающие наименьшее энергопотребление при прокатке

Необходимо отметить, что вследствие колебаний толщины по длине подката возникают также колебания требуемой мощности приводов в рабочих клетях.

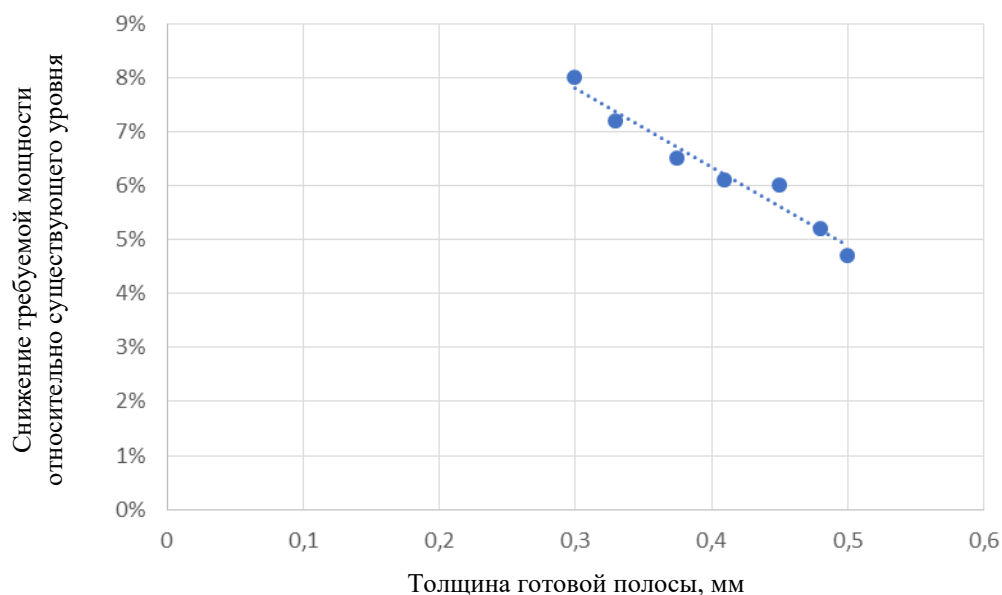


Рисунок 4.10 – Влияние толщины готовых полос на величину потенциального уменьшения энергозатрат при прокатке относительно существующего уровня на 5-клетевом стане 1700 при использовании автоматизированной методики проектирования энергоэффективной технологии

Опыт применения предложенного алгоритма показал, что энергоэффективные режимы обеспечивают снижение колебаний мощности на 1–2 %. Фрагмент диаграммы изменения мгновенной требуемой мощности с течением времени на ведение процесса прокатки представлен на рис. 4.11.

Уменьшение колебаний мощности при использовании энергоэффективных режимов, можно объяснить тем, что в каждый момент времени при изменении толщины подката технология прокатки будет наиболее оптимальной с точки зрения энергозатрат.

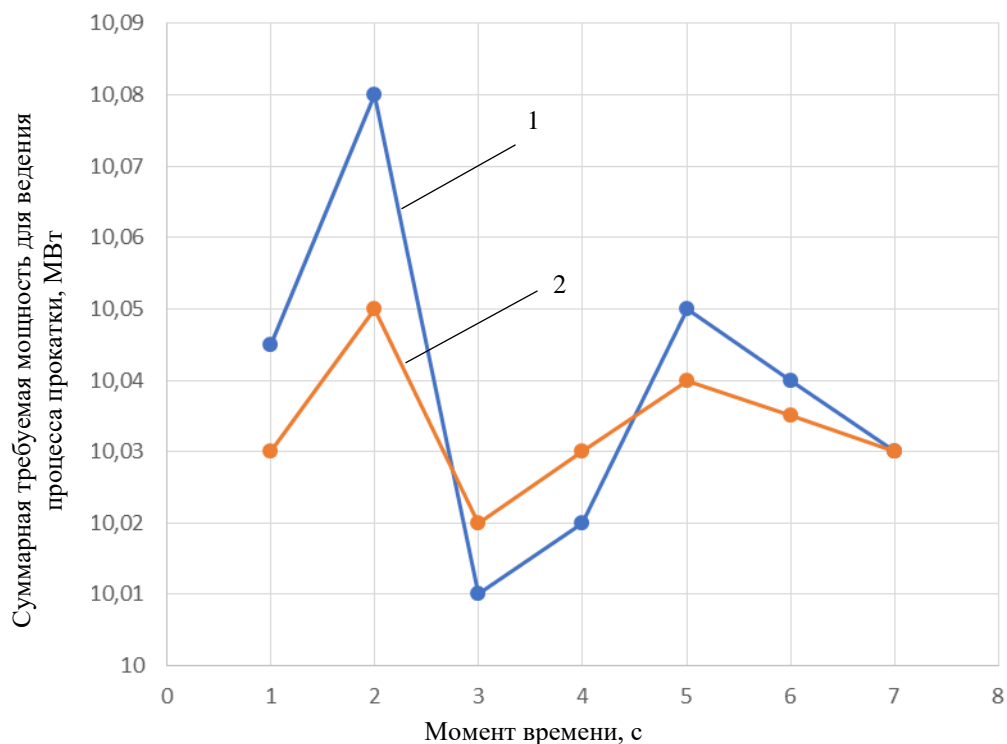


Рисунок 4.11 – Диаграмма изменения требуемой мощности двигателей с течением времени при прокатке полосы толщиной 0,5 мм из стали марки 01ют при работе 5-клетевого стана 1700 по существующей технологии (1) и разработанной с помощью автоматизированного алгоритма (2)

Результаты автоматизированного проектирования режимов для широкого диапазона сортамента позволили сформулировать общие рекомендации по выбору параметров технологии (см. таблицу 4.2). Стоит отметить, что при реализации этих рекомендаций необходимо учитывать ограничения рабочих клеток по усилиям и мощностям прокатки, а также условиям обеспечения стабильного процесса прокатки [273].

Таблица 4.2 – Рекомендации по выбору параметров обжатий и натяжений стальной полосы при непрерывной прокатке

Параметр	Значение
Удельное натяжение в межклетевом промежутке	Максимально возможное из регламентированных величин (22 % от величины предела текучести материала полосы).
Обжатие в первой клетки	Обжатие, обеспечивающее загрузку по усилию прокатки и/или мощности двигателей главного привода первой клетки на 65–75 % от максимально допустимых величин.
Обжатие в предпоследней клетки	Обжатие, обеспечивающее загрузку по усилию прокатки и/или мощности двигателей главного привода первой клетки на 65–75 % от максимально допустимых величин, при производстве полос толщиной менее 0,5 мм.
Обжатие в последней клетки	4–8 % при прокатке на 5-клетевом непрерывном стане, 8–12 % при прокатке на 4-клетевом стане
Обжатия в промежуточных клетях	Равномерное распределение оставшейся доли суммарного обжатия между промежуточными клетями, исходя из условия равномерного распределения усилия прокатки в этих клетях.

По результатам исследований на основе алгоритмов, описанных в п. 4.2, созданы и зарегистрированы программы для ЭВМ, позволяющие выполнять автоматизированное проектирование энергоэффективных режимов прокатки.

Выводы по главе 4

1. Разработана модульная 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 станов, на обеспечение устойчивости процесса при его минимальной удельной энергоемкости.

2. Разработан аналитический алгоритм проектирования технологических режимов прокатки, включающий 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 комплексного выполнения критериев эффективности процесса.

3. 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, 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.

4. Разработан алгоритм проектирования технологии холодной прокатки полос на непрерывном стане, основанный на автоматизированном подборе частных обжатий и удельных межклетевых натяжений, обеспечивающих минимальный уровень требуемой мощности главного привода.

При реализации алгоритма установлены следующие закономерности:

– увеличение частного обжатия в первой клетке, удельных межклетевых натяжений на всем профильном сортаменте, частного обжатия в предпоследней клетке при толщинах проката до 0,5 мм снижают суммарную мощность двигателей главных приводов;

– уменьшение частного обжатия в промежуточных клетках с равномерным распределением усилия прокатки между клетями способствует снижению уровня энергозатрат на ведение процесса.

5. Разработаны и зарегистрированы программы для ЭВМ, позволяющие проектировать оптимальные, с точки зрения удельной энергоемкости, параметры технологии производства холоднокатаных полос на непрерывном стане.

6. Практическая реализация разработанной методологии, алгоритмов и программного обеспечения позволила выполнить проектирование технологических режимов со сниженной на 5–8 % удельной энергоемкостью.

Глава 5. Разработка и внедрение решений для совершенствования технологий прокатного производства

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

5.1.1 Подходы к проектированию технологии, исключающей (минимизирующей) возникновение негативных вибрационных эффектов

Разработка технологических режимов выполнена на примере режима прокатки полосы толщиной 0,45 мм шириной 915 мм, при реализации которого на 5-клетевом стане 1700 наблюдались вибрации в клетях № 4.

На рис. 5.1 представлен фактический график колебания разности секундных объемов металла, прокатываемых в клетях № 3 и № 4.

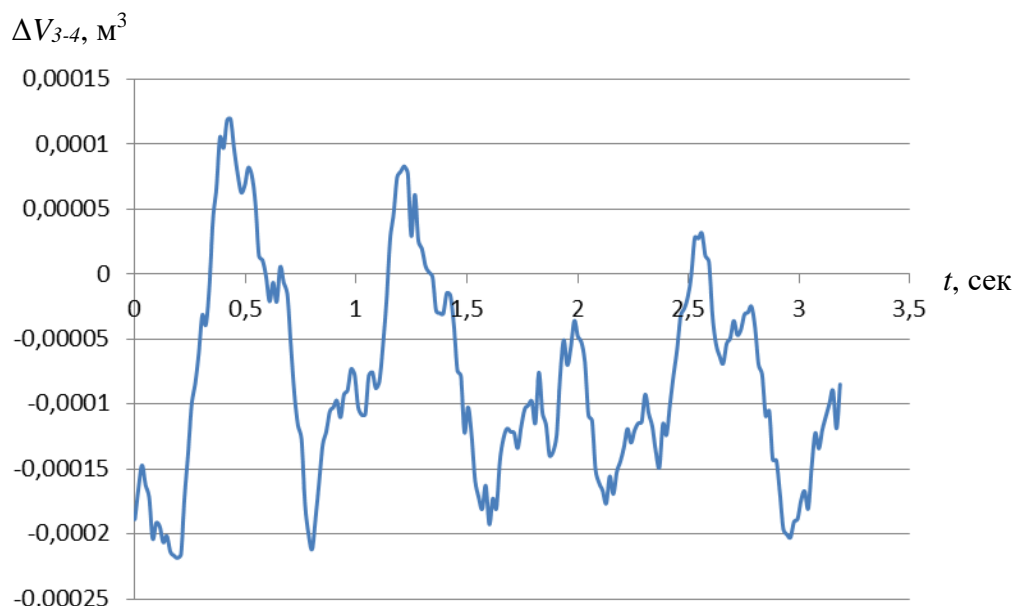


Рисунок 5.1 – График изменения разности секундных объемов металла, прокатываемых в клетях № 3 и № 4

Из рис. 5.1 видно, что процесс прокатки нестабилен – прокатка с натяжением (отрицательная область графика) чередуется с прокаткой с

подпором (положительная область графика), что и послужило причиной возбуждения в клети № 4 резонансных автоколебательных процессов.

Для выявления параметров режима прокатки, управляя которыми можно воздействовать на разность секундных объемов металла, был выполнен анализ соответствующих формул и варьирование относительного обжатия и скорости прокатки в клети № 4.

Формула для определения разности секундных объемов металла для третьего межклетевого промежутка имеет вид:

$$\Delta V = V_3 - V_4 = h_3 \cdot b \cdot v_3 - h_4 \cdot b \cdot v_4,$$

где V_3, V_4 – секундные объемы металла, прокатываемые в клетях №№ 3 и 4, соответственно; h_3, h_4 – толщины полосы на выходе из клеток №№ 3 и 4; b – ширина прокатываемой полосы; v_3, v_4 – скорости прокатки в клетях №№ 3 и 4.

Из формулы видно, что для обеспечения устойчивого процесса прокатки полосы с натяжением необходимо:

- уменьшать толщину на входе в клетку № 4 (h_3) и увеличивать толщину на выходе из клетки № 4 (h_4), т.е. снижать обжатие в клети № 4;
- увеличивать скорость прокатки в клети № 4 (v_4);
- уменьшать скорость прокатки в клети № 3 (v_3).

Варьирование относительного обжатия в клети № 4.

Поскольку увеличение толщины на выходе из клетки № 4 неизбежно приведет к увеличению обжатия в клети № 5, работающей в «проглаживающем» режиме, было принято снизить обжатие в клети № 4 за счет уменьшения толщины полосы после клетки № 3.

Принятые при моделировании и фактические параметры режима прокатки представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры режима прокатки

клеть №	$v_{i\phi}$, м/с	$h_{i\phi}$, мм	$\varepsilon_{i\phi}$, %	h_{iM} , мм	ε_{iM} , %
1	4,48	1,399	30,05	1,399	30,05
2	6,56	0,98	30	0,98	30
3	9,62	0,681	30,5	0,6639	32,22
4	14,15	0,47	30,96	0,478	28
5	14,65	0,455	3,2	0,455	5

Примечание. ϕ – фактические значения параметра; м – значения параметра, принятые при моделировании.

Из таблицы 5.1 видно, что обжатие в клетях № 4 снижено практически на 10 % (с 30,96 % до 28 %) за счет увеличения обжатия в клетях № 3 на 5,6 % и повышения обжатия в клетях № 5 до 5 %. При исследовании была выполнена имитация колебаний толщины полосы на выходе из клетей №№ 3 и 4 по нормальному закону распределений с отклонением от среднего ± 2 %. Результаты представлены на рис. 5.2.

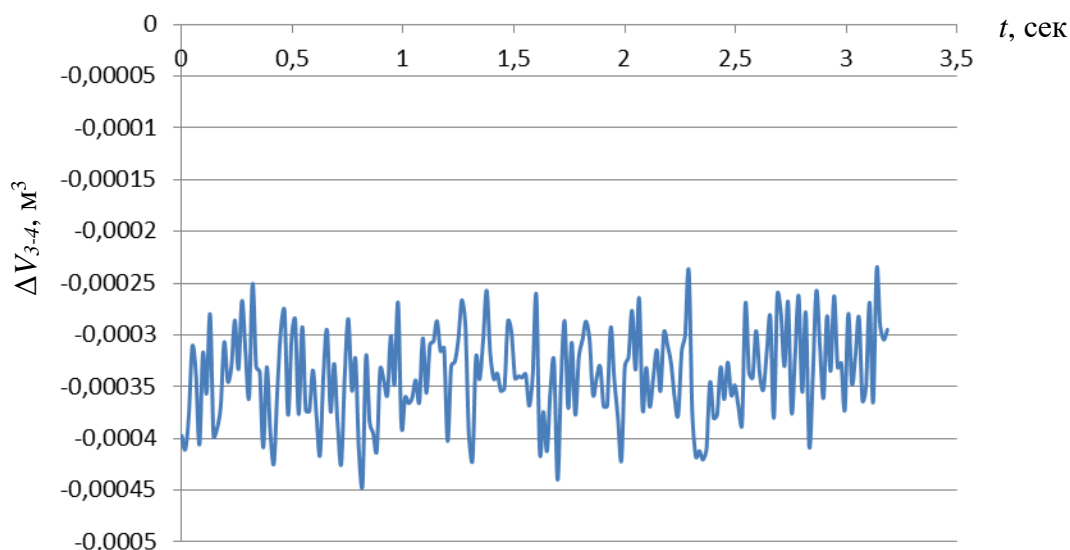


Рисунок 5.2 – График изменения разности секундных объемов металла, прокатываемых в клетях № 3 и № 4, при $\varepsilon_4 = 28$ %

Из рис. 5.2 видно, что обеспечена устойчивая прокатка полосы с натяжением.

Варьирование скорости прокатки в клетке № 4.

Анализ соотношений скоростей прокатки – $\frac{v_2}{v_1}$, $\frac{v_3}{v_2}$, $\frac{v_4}{v_3}$ – рассматриваемого режима, сопровождавшегося вибрациями, показал, что указанный параметр находится в диапазоне 1,465–1,47.

Было принято решение изменить значение соотношения $\frac{v_4}{v_3}$ в большую и меньшую сторону для исследования графика изменения ΔV .

На рис. 5.3 представлен график изменения ΔV при $\frac{v_4}{v_3} = 1,3$ ($v_3 = 9,624$ м/с – фактическое значение, $v_4 = 12,51$ м/с, выполнена имитация колебания v_4 по нормальному закону с отклонением $\pm 5\%$).

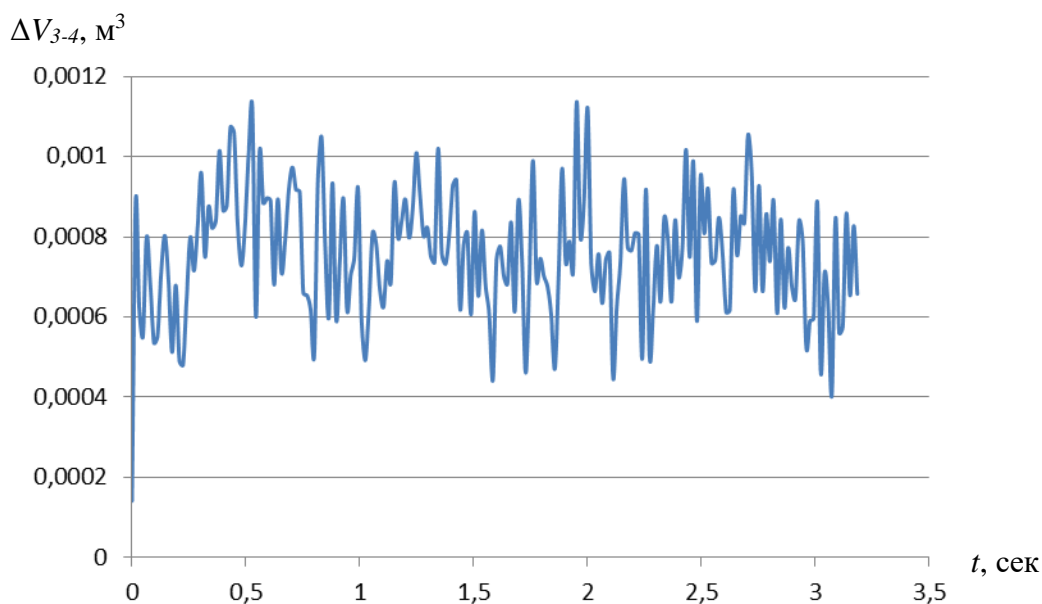


Рисунок 5.3 – График изменения разности секундных объемов металла,

прокатываемых в клетях № 3 и № 4, при $\frac{v_4}{v_3} = 1,3$

Из графика рис. 5.3 видно, что прокатка ведется строго в положительной области, т.е. с подпором.

На рис. 5.4 представлен график изменения ΔV при $\frac{v_4}{v_3} = 1,6$ ($v_3 = 9,624$ м/с – фактическое значение, $v_4 = 15,39$ м/с, выполнена имитация колебания v_4 по нормальному закону с отклонением $\pm 5\%$).

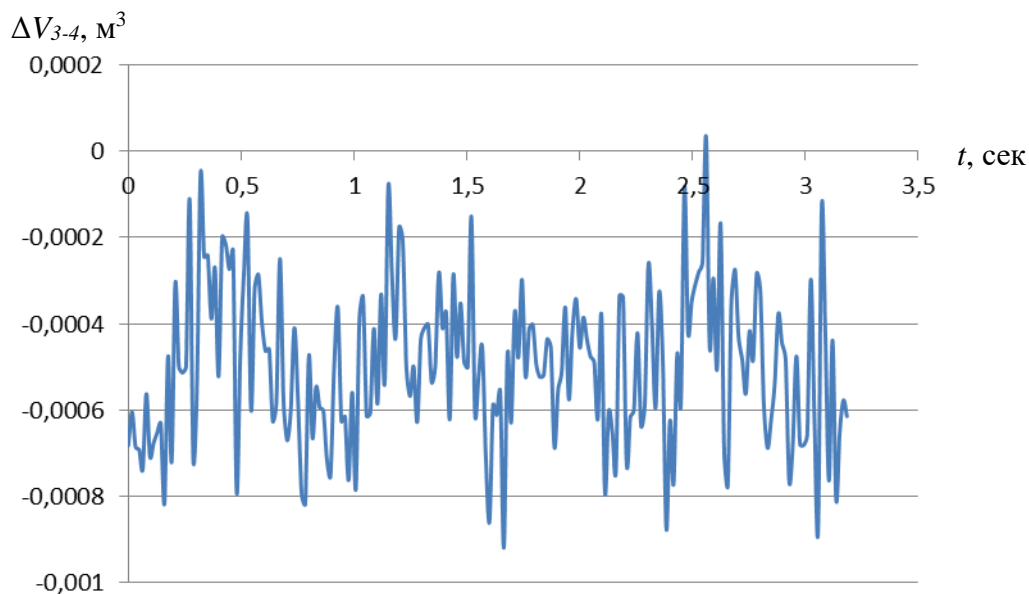


Рисунок 5.4 – График изменения разности секундных объемов металла, прокатываемых в клетях № 3 и № 4, при $\frac{v_4}{v_3} = 1,6$

Прокатка ведется в отрицательной области, но гарантировать устойчивость данной ситуации проблемно.

На рис. 5.5 представлен график изменения ΔV при $\frac{v_4}{v_3} = 1,8$ ($v_3 = 9,624$ м/с – фактическое значение, $v_4 = 17,32$ м/с, выполнена имитация колебания v_4 по нормальному закону с отклонением $\pm 5\%$).

Прокатка ведется строго в отрицательной области, однако реализация данного режима затруднительна ввиду высокой разности скоростей между клетями №№ 3 и 4.

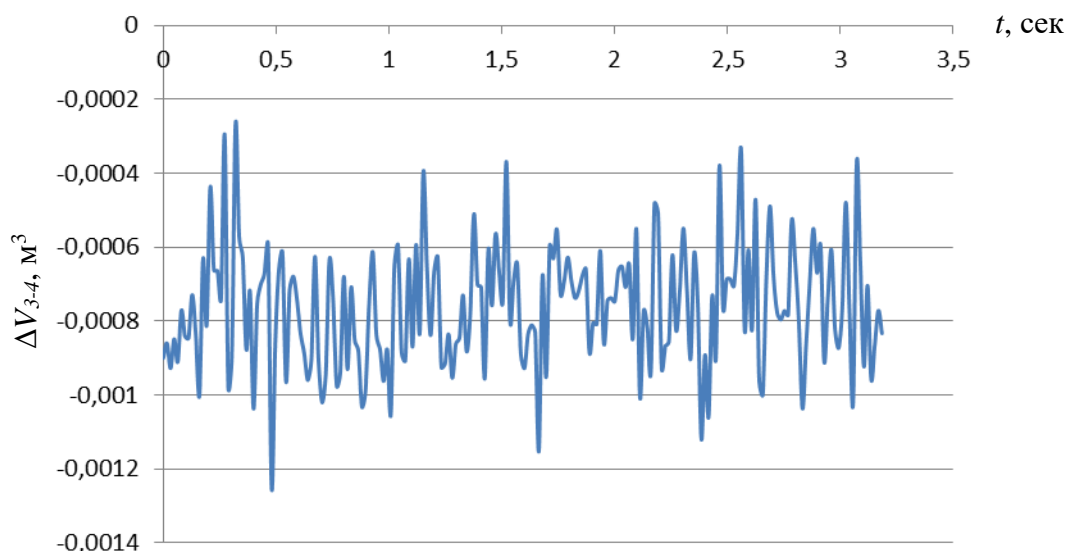


Рисунок 5.5 – График изменения разности секундных объемов металла,

прокатываемых в клетях № 3 и № 4, при $\frac{\vartheta_4}{\vartheta_3} = 1,8$

Проектирование режима прокатки.

Учитывая полученные результаты, была выполнена разработка (моделирование) режима прокатки, в котором относительное обжатие в клетях № 4 снижено до 28 %, скорость прокатки увеличена до 15,39 м/с (табл. 5.2), и, как следствие, увеличена скорость прокатки в клетях № 5.

Таблица 5.2 – Параметры режима прокатки

КЛЕТЬ №	$v_{i\phi}$, м/с	$h_{i\phi}$, мм	$\varepsilon_{i\phi}$, %	v_{im} , м/с	h_{im} , мм	ε_{im} , %
1	4,48	1,399	30,05	4,48	1,399	30,05
2	6,56	0,98	30	6,56	0,98	30
3	9,62	0,681	30,5	9,62	0,6639	32,22
4	14,15	0,47	30,96	15,39	0,478	28
5	14,65	0,455	3,2	16,18	0,455	5

Примечание. ϕ – фактические значения параметра; m – значения параметра, принятые при моделировании.

На рис. 5.6 представлен график изменения ΔV , из которого видно, что снижение относительного обжатия в клетях № 4 и увеличение скорости выше критического значения обеспечивают стабильный процесс прокатки с натяжением.

Примененный подход к проектированию технологии прокатки, обеспечивающий снижение и/или исключение негативных вибрационных процессов в рабочих клетях станов, обеспечил повышение средней скорости прокатки более, чем на 1 м/с, что эквивалентно получению экономического эффекта более 70 млн. руб. в год.

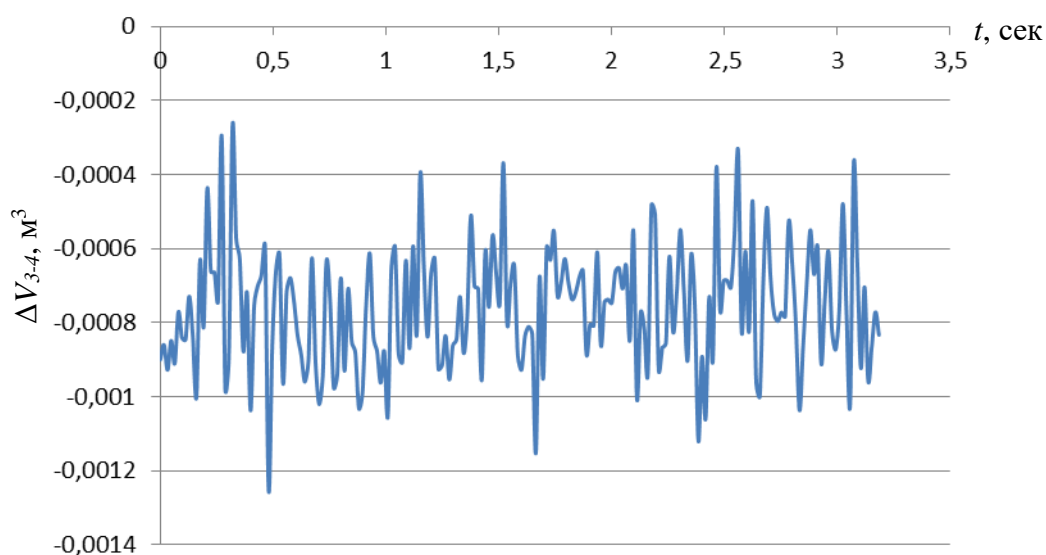


Рисунок 5.6 – График изменения разности секундных объемов металла, прокатываемых в клетях № 3 и № 4, при $\varepsilon_4 = 28 \%$, $v_4 = 15,39$ м/с

В рамках прикладных исследований была выполнена итерационная корректировка существующей технологии прокатки на 5-клетевом стане 1700 ЧерМК ПАО «Северсталь», заключающаяся в изменении технологических параметров работы стана для стабилизации секундных объемов полосы и обеспечения протекания всего процесса в условиях натяжения.

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

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

При исследовании влияния изменения коэффициента соотношения скоростей привода стана во втором и третьем межклетевых промежутках, определяемого как

$$k = \frac{v_i}{v_{i-1}},$$

где v_i – скорость прокатки в текущей клетки; v_{i-1} – скорость прокатки в предыдущей клетки,

определено, 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, связанного с этим, риска обрыва полосы.

Таким образом, при разработке технологии прокатки стальных полос, исключающей негативные вибрации на стане, а также обеспечивающей повышение средней скорости прокатки и снижающей обрывность полос, необходимо применять комбинированный подход, т.е. корректировать как межвалковый зазор, так и скоростной клин.

В таблицах 5.3 и 5.4 представлены результаты применения данного подхода при корректировке существующей технологии, промышленная апробация которой позволила обеспечить рост средней скорости прокатки на стане на 7–15 % [274–277].

Таблица 5.3 – Результаты комплексной корректировки технологии прокатки полосы из стали 08пс размером 2→0,48×915 мм

клеть №	фактические данные					результаты моделирования			
	$h_{i\phi}$, мм	$v_{i\phi}$, м/с	$\varepsilon_{i\phi}$, %	T_i , кН	k	h_{iM} , мм	v_{iM} , м/с	ε_{iM} , %	k
1	1,45	4,35	30	200	–	1,45	4,35	30	–
2	1,01	6,44	30,5	160	1,5	0,98	6,8	34	1,65
3	0,7	9,25	30	110	1,45	0,7	10,1	28	1,48
4	0,49	13,6	29	80	1,46	0,49	15,4	29	1,52
5	0,48	14,2	3,15	–	1,05	0,48	16,7	3,15	1,11

Таблица 5.4 – Результаты комплексной корректировки технологии прокатки полосы из стали 08ю размером 2,7→0,83×920 мм

клеть №	фактические данные					результаты моделирования			
	$h_{i\phi}$, мм	$v_{i\phi}$, м/с	$\varepsilon_{i\phi}$, %	T_i , кН	k	h_{iM} , мм	v_{iM} , м/с	ε_{iM} , %	k
1	2,09	6,8	26,5	270	–	2,09	6,8	26,5	–
2	1,58	9,5	25	230	1,41	1,52	9,7	27,2	1,43
3	1,17	12,6	25,4	190	1,33	1,15	13,23	24,5	1,37
4	0,85	17,4	27,3	140	1,37	0,85	18,8	27,3	1,41
5	0,83	18,3	2,1	–	1,053	0,83	20,1	2,1	1,075

5.1.2 Результаты промышленной апробации технологических режимов, обеспечивающих стабильное протекание процесса листовой прокатки без возникновения вибраций

Поскольку изменение и регулирование скорости, исходя из технических возможностей и характеристик систем стана, имеет инерционный характер, а регулирование разности объемов необходимо проводить в процессе прокатки оперативно, с достаточно большой скоростью, то основным параметром, которым возможно регулировать объемы полосы в процессе прокатки, является раствор валков.

Для определения диапазонов регулирования растворов валков в процессе прокатки был выполнен анализ разнотолщинности холоднокатаных

полос. В результате обработки 350 фактических режимов получена зависимость разнотолщинности от толщины готового проката (рис. 5.7).

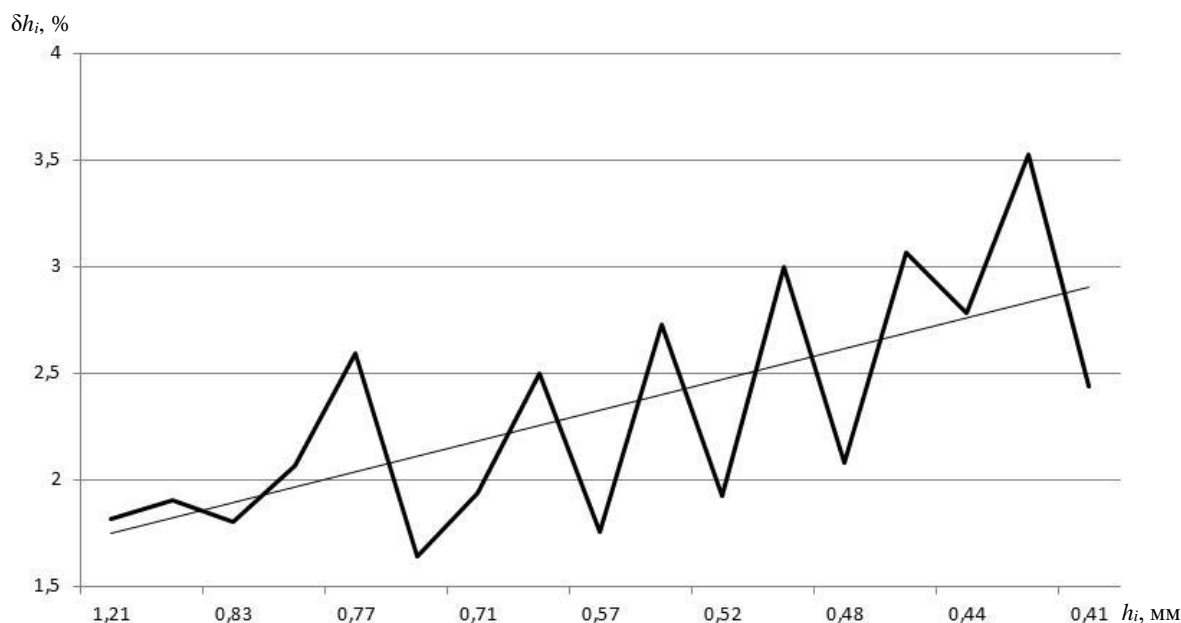


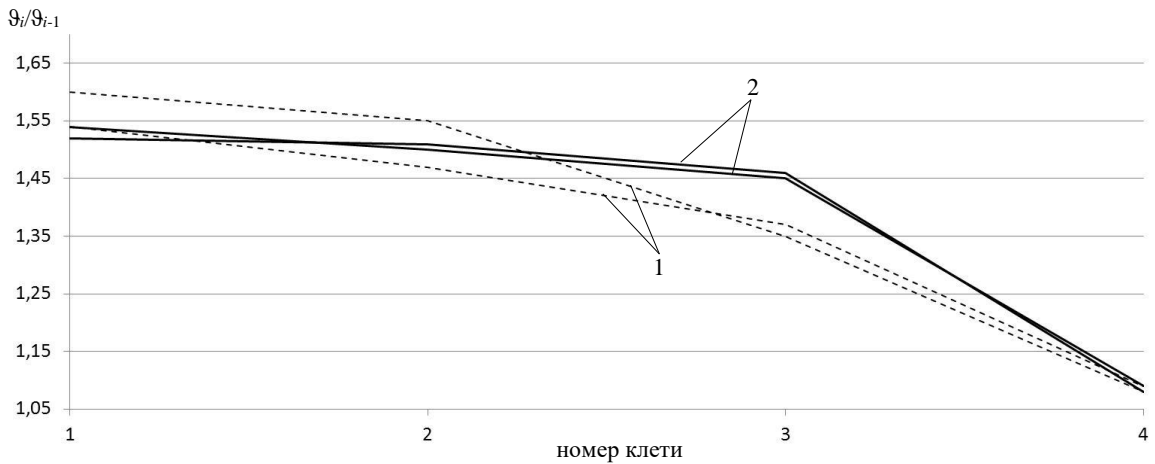
Рисунок 5.7 – Зависимость разнотолщинности от номинальной толщины проката

Из графика видно, что чем тоньше прокатываемая полоса, тем выше ее разнотолщинность, разброс параметра лежит в диапазоне от 1,5 % до 3,6 %, что говорит о необходимости регулирования раствора валков в процессе прокатки на указанные величины.

В течение января 2020 г. – 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. В ходе промышленных экспериментов прокатка осуществлялась по существующим базовым и скорректированным режимам. В общей сложности обработано более 4000 режимов.

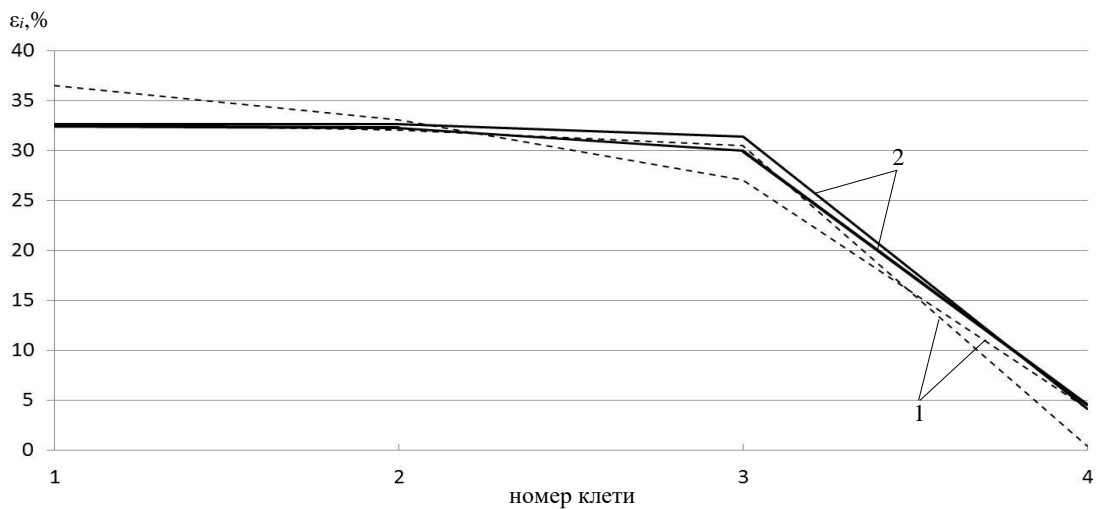
Были исследованы частные относительные обжатия в клетях №№ 1–4 и коэффициенты соотношения скоростей рабочих валков по клетям (рисунки 5.8 и 5.9). На рисунке 5.8 представлено распределение отношений скорости прокатки, сплошные линии 2 – настройки отношения скоростей, при которых удалось добиться стабильного удержания разности секундных объемов в отрицательной области при увеличении скорости прокатки. Пунктирные

линии 1 – это режимы, при которых разности объемов в некоторых промежутках не соответствовали условию исключения вибраций, изложенному в главе 3.



1 – нестабильные режимы; 2 – стабильные режимы

Рисунок 5.8 – Графики распределения отношений скоростей в смежных клетях при различных режимах прокатки



1 – нестабильные режимы; 2 – стабильные режимы

Рисунок 5.9 – Графики распределения относительных обжатий по клетям стана при различных режимах прокатки

На рисунке 5.9 представлено распределение относительных обжатий, сплошные линии 2 – настройки отношения обжатий, при которых удалось добиться стабильного удержания разности секундных объемов в

отрицательной области при увеличении скорости прокатки. Пунктирные линии I – это режимы, при которых разности объемов в некоторых промежутках были выше нуля.

Из представленных графиков видно, что распределение скоростного клина и обжатиий имеет достаточно узкую область регулирования, в которой возможно управление станом для поддержания разности секундных объемов в отрицательной области, соответствующей прокатке в условиях натяжения, а не подпора.

Для решения проблем настройки стана в условиях возможного возникновения вибраций приведены результаты опытной прокатки 2-х рулонов углеродистой стали размером $1,87 \rightarrow 0,41 \times 1254$ мм.

Для наглядности результатов промышленных экспериментов приведены графики режима прокатки со стандартными настройками, выполненными в базовом автоматическом режиме. При таком типе настройки стана, основным параметром является натяжение полосы, это связано с обеспечением исключения обрывов полосы, при этом определение отношения скоростей и распределение относительных обжатиий производится автоматически. Также приведены результаты опытной прокатки по режиму, обеспечивающему стабильный процесс прокатки за счет регулирования скоростного клина и обжатиий.

Проанализированы основные параметры экспериментальных режимов, оказывающие влияние на разность секундных объемов, а именно, отношение скоростей прокатки в смежных клетях, относительные обжатиия, значения разностей секундных объемов, распределение толщин полосы по всем клетям стана, графики скоростей рабочих валков всех пяти клетей и графики системы регистрации вибраций в трех клетях.

В качестве примера ниже представлены результаты сопоставительного анализа нескольких характерных режимов прокатки, исследованных в ходе промышленной апробации.

Опытный режим №1 (базовая технология).

На рис. 5.10 представлены графики распределения коэффициентов соотношения скоростей в смежных клетях и относительных обжатий при прокатке по базовой технологии.

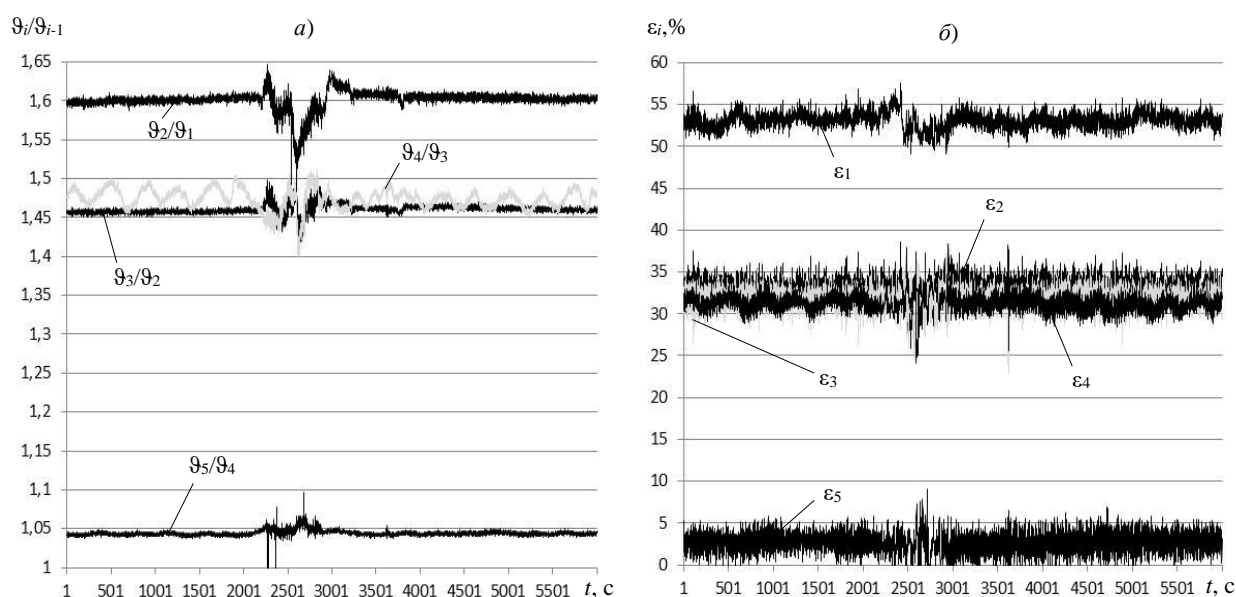


Рисунок 5.10 – Графики распределения коэффициентов соотношения скоростей в смежных клетях (а) и относительных обжатий (б) при прокатке по базовой технологии

Наблюдаемая нестационарность распределения коэффициента соотношения скоростей четвертой и третьей клеток обусловлена нестационарностью скорости прокатки в четвертой клетке. Нестационарность обжатий обусловлена разнотолщинностью подката.

Из графиков рис. 5.11 видно, что изначальная настройка стана по скорости прокатки была произведена на значение 16,7 м/с. После прохождения шва и в начале прокатки следующего рулона была выполнена перестройка стана на скорость 17,5 м/с, после чего произошла вибрация, и стан перестроился, снизив скорость до первоначального значения 16,7 м/с.

В таблице 5.5 приведены значения скорости прокатки, при которой началась вибрация стана, и значение, до которого она была после срабатывания системы, фиксирующей и предупреждающей вибрацию, для обеспечения стабильности работы стана.

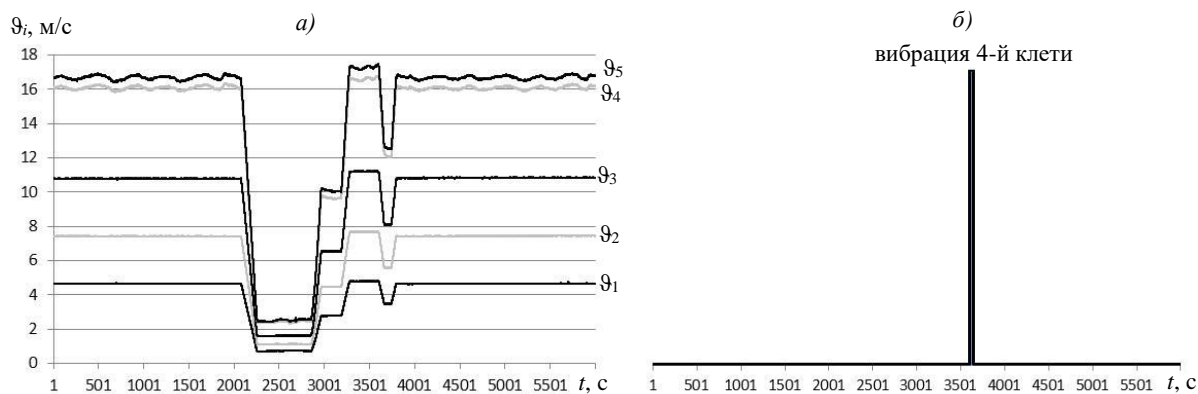


Рисунок 5.11 – Фактическая скорость рабочих валков при прокатке по базовой технологии (а) и момент вибраций, детектируемый системой предупреждения вибраций (б)

Таблица 5.5 – Скорости прокатки до срабатывания системы предупреждения вибраций и после

Скорость максимальная, м/с	Скорость рабочая, м/с	Снижение, %
17,5	16,7	4,5

Разности секундных объемов, параметра управление которым было основной задачей испытаний, распределены в обеих частях координатной плоскости относительно нулевого значения, что говорит о нестационарности опытного режима № 1, что и привело к вибрации в четвертой клетке стана и последующему снижению скорости прокатки (см. рис. 5.12).

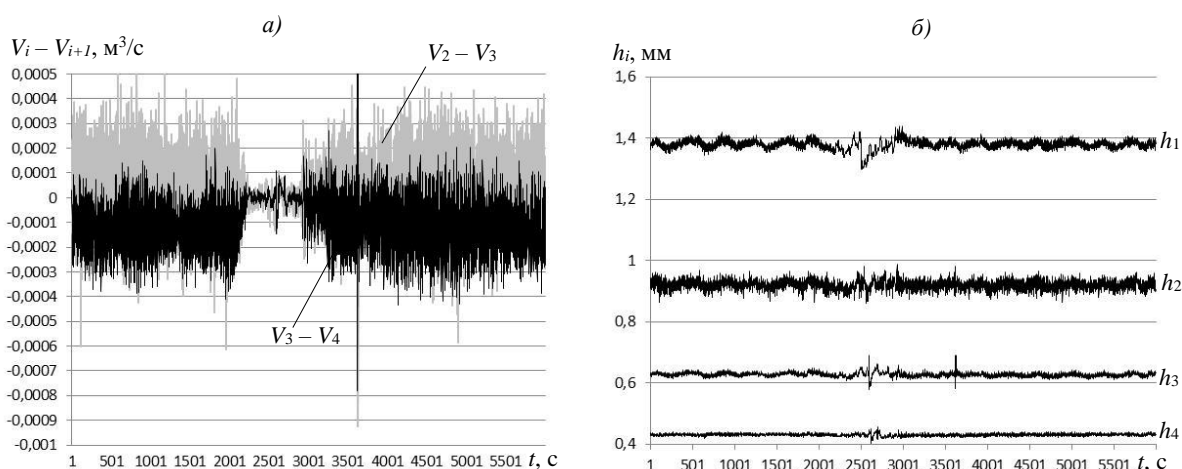


Рисунок 5.12 – Графики изменения разности секундных объемов (а) и фактической толщины полосы (б) при прокатке по опытному режиму № 1

Средние значения основных исследуемых параметров представлены табл. 5.6.

Таблица 5.6 – Технологические параметры прокатки по режиму № 1

Клеть №	Относительное обжатие $\varepsilon_{iM}, \%$	Клин скоростей
1	53	–
2	34	1,6
2	32	1,46
4	32	1,48
5	3	1,04

Из графиков на рис. 5.13 видно, что настройка стана, выполненная в автоматическом режиме, не соответствует требуемому уровню обеспечения стабильности протекания процесса.

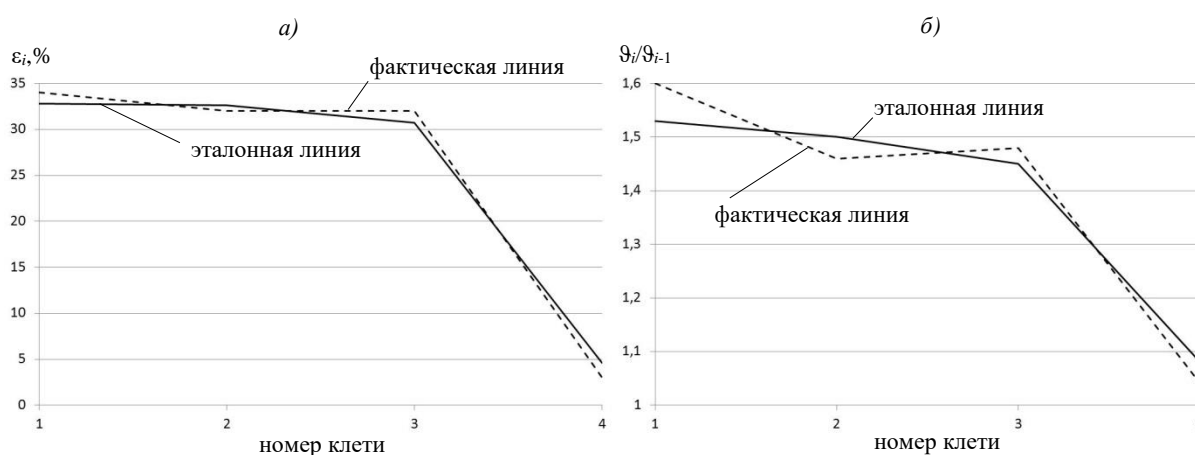


Рисунок 5.13 – Графики распределения относительных обжатий (а) и коэффициентов соотношения скоростей в смежных клетях (б) при прокатке по опытному режиму № 1

Опытный режим №2 (опытная настройка стана).

Наблюдаемая нестационарность распределений коэффициентов соотношения скоростей смежных клеток обусловлена частым изменением скорости вследствие изменения моментов нагрузки (рис. 5.14).

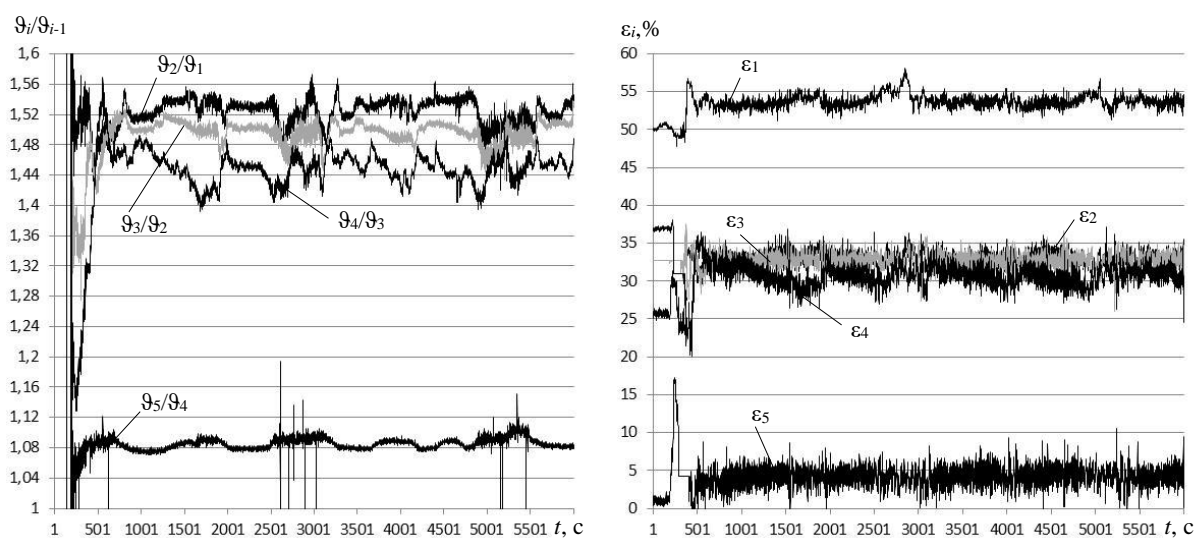


Рисунок 5.14 – Графики распределения коэффициентов соотношения скоростей в смежных клетях (а) и относительных обжатий (б) при прокатке по опытному режиму № 2

Из графиков рис. 5.15 видно, что изначальная настройка стана по скорости прокатки была произведена на значение 17,8 м/с. Далее скорость была увеличена до 18 м/с, после чего была снижена до 5 м/с, затем на том же рулоне была увеличена до 18,5 м/с без регистрации вибраций стана.

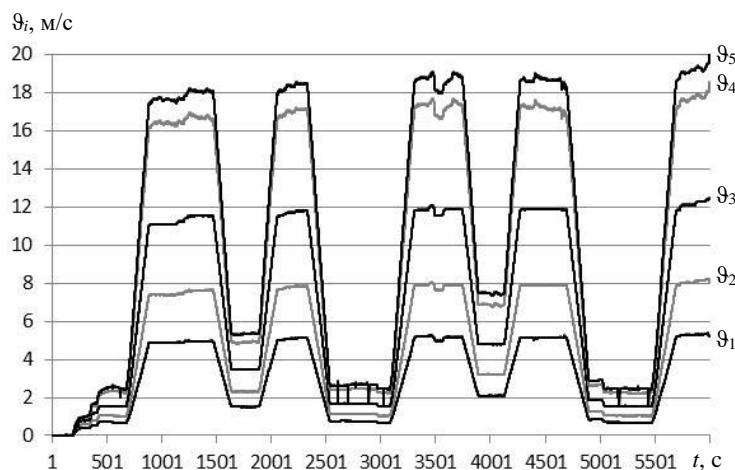


Рисунок 5.15 – Фактическая скорость рабочих валков при прокатке по опытному режиму № 2

При прокатке следующего рулона настройка стана была произведена на скорость 18,8 м/с, затем снижена до 18 м/с и до 7,5 м/с, и снова увеличена до 18,8 м/с без регистрации вибраций стана.

При увлечении скорости прокатки до 19 м/с (третий пик на рис. 5.15) есть кратковременный провал до 18 м/с, что говорит о некоторой нестационарности прокатки на скорости 19 м/с.

Из приведенных на рис. 5.16 графиков видно, что разности секундных объемов, распределены в отрицательной части координатной плоскости относительно нулевого значения, что говорит о работе стана в более стабильном режиме по сравнению с опытной прокаткой режима 1 (рис. 5.12).

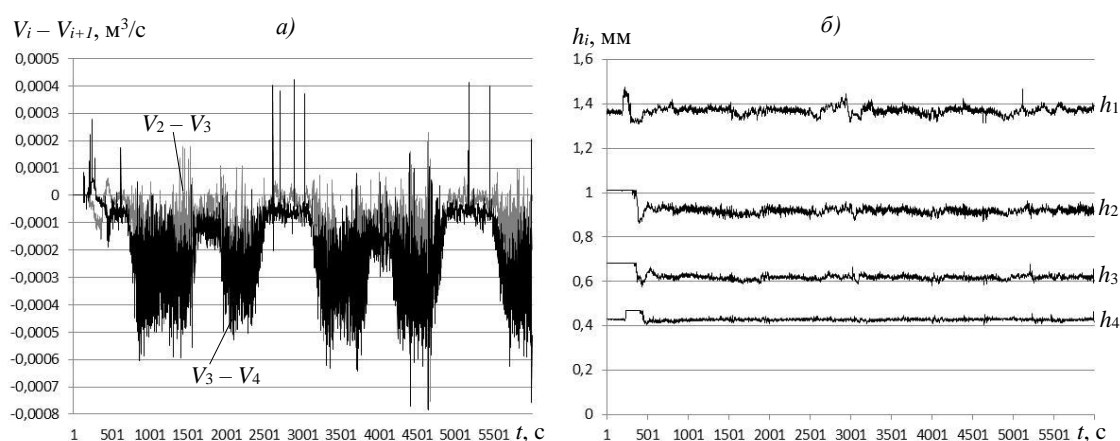


Рисунок 5.16 – Графики изменения разности секундных объемов (а) и фактической толщины полосы (б) при прокатке по опытному режиму № 2

Нестационарности графиков данных параметров объясняются колебаниями скорости прокатки вследствие нестационарности динамического нагружения.

Средние значения основных исследуемых параметров представлены в табл. 5.7.

На графиках рис. 5.17 представлены эталонные диаграммы изменения исследуемых параметров и диаграммы изменения их фактических значений при прокатке по режиму № 2.

Таблица 5.7 – Технологические параметры прокатки по режиму № 2

Клеть №	Относительное обжатие $\varepsilon_{im}, \%$	Клин скоростей
1	54	—
2	33	1,53
3	33	1,5
4	30	1,45
5	4	1,08

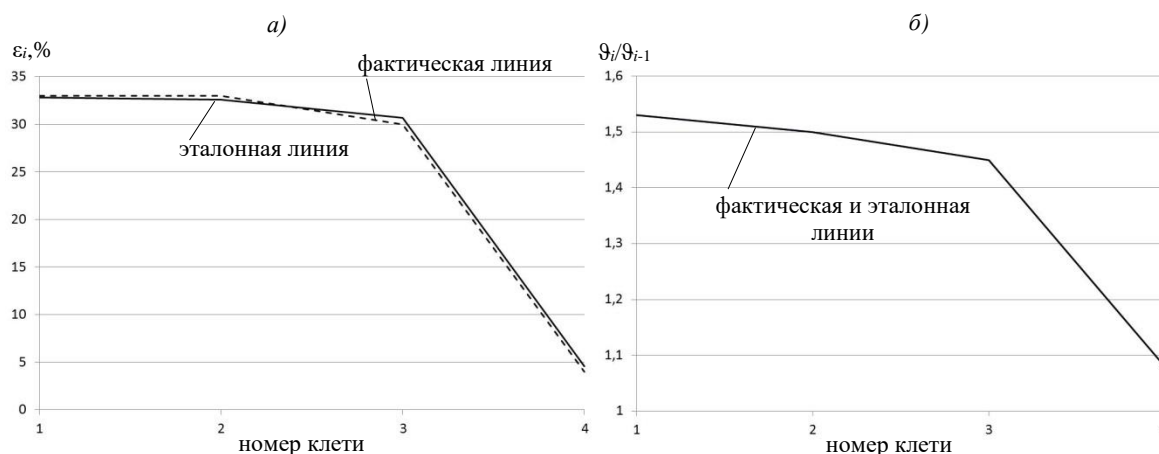


Рисунок 5.17 – Графики распределения относительных обжатий (а) и коэффициентов соотношения скоростей в смежных клетях (б) при прокатке по опытному режиму № 2

Из данных графиков видно, что настройка стана, выполненная в соответствии с теоретически рассчитанными параметрами, соответствует настройкам, позволяющим перевести разность секундных объемов в отрицательную область значений. Практически полное совпадение эталонных и реальных диаграмм свидетельствует о стабильном, по сравнению с базовым, режиме работы стана [278].

Таким образом, в результате промышленных экспериментов подтверждена гипотеза о возможности устранения вибраций путем регулирования секундных объемов растворами валков и скоростями прокатки. Скорость прокатки при реализации режимов с опытной настройкой

стана была увеличена более, чем на 10 % по сравнению с базовыми режимами.

5.2 Разработка и промышленная реализация энергоэффективных режимов работы широкополосных станов холодной прокатки

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

Исследование параметров технологии (обжатий, скоростей, натяжений) в условиях нестационарного процесса прокатки для снижения затрат энергии и одновременного обеспечения качественных показателей по продольной толщине и механическим свойствам выполнено на основе динамической модели (см. главу 2) и включало имитацию значений предела текучести и толщины для каждой точки подката из числа точек заданных пользователем [188, 189, 191]. Процесс имитации реализован с использованием процедуры генерации случайного числа по закону нормального распределения со стандартным отклонением 10 % для предела текучести, 2 % для толщины. Обжатия, межклетевые натяжения варьируются с учетом ограничений по энергосиловым и кинематическим параметрам, скорость прокатки пересчитывается, исходя из закона постоянства секундного объема. После расчета по модели формируются массивы значений, характеризующие состояние полосы и параметры процесса прокатки, которые оцениваются по выбранным показателям.

В качестве примера в таблицах 5.8 и 5.9 приведены значения обжатий и натяжений для двух вариантов технологических режимов прокатки полосы размерами 0,7×1250 мм из стали 08пс. В варианте № 1 фактические обжатия и натяжения получены путем промышленного эксперимента на стане 1700 ПАО «Северсталь»; в варианте № 2 технологические параметры определены путем имитационного моделирования результативного процесса прокатки. В

обоих случаях толщина подката составляла 2,1 мм, исходный предел текучести – 265 МПа, скорость прокатки – 18 м/с.

Таблица 5.8 – Режимы обжатий при прокатке полосы 0,7×1250 мм из стали 08пс

Номер варианта	Частные относительные обжатия (%) в клетях				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
1	24,29	25,16	24,37	21,11	2,82
2	23,33	24,85	23,14	22,58	3,06

Таблица 5.9 – Режимы удельных натяжений при прокатке полосы 0,7×1250 мм из стали 08пс

Номер варианта	Удельные натяжения, МПа					
	перед 1-й клетью	промежуток № 1	промежуток № 2	промежуток № 3	промежуток № 4	за 5-й клетью
1	75	136	149	174	181	40
2	75	136	156	161	197	40

Из таблиц 5.8 и 5.9 видно, что во втором варианте выполнено перераспределение обжатий между клетями (менее 1 % в каждой клетке по сравнению с фактическим) с одновременным увеличением удельных натяжений во 2-м и 4-м промежутках и уменьшением в 3-м промежутке. Сопоставление значений суммарной мощности двигателей (рис. 5.18) показало, что при прокатке по разработанному режиму уменьшение мощности составляет 1,21 МВт. Это обеспечивает около 8 % экономии электроэнергии при прокатке.

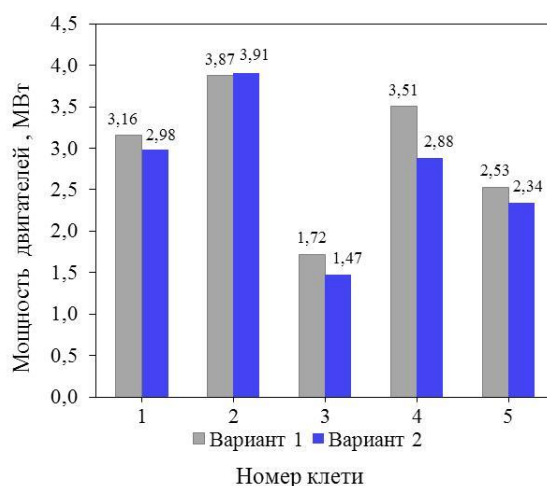


Рисунок 5.18 – Сопоставление суммарной мощности двигателей по клетям

Реализация изложенной в п. 4.1 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 5.10 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.

Таблица 5.10 – Режимы обжатий и удельных межклетевых натяжений при прокатке полос из стали CHES30 шириной 1250 мм на 5-клетевом стане

№ 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

Из таблицы 5.10 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 (см. рисунок 5.19) 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 [254]:

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

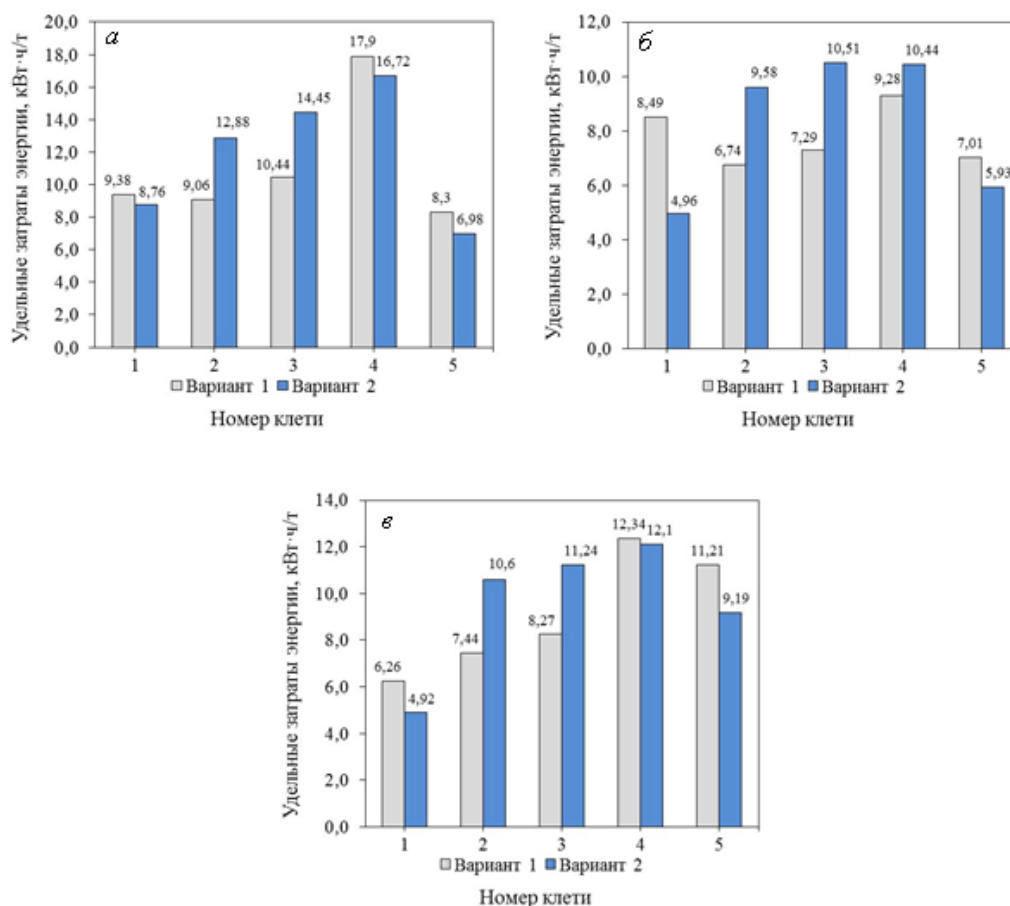


Рисунок 5.19 – Сопоставление удельных затрат энергии по клетям стана при прокатке полос толщиной: *а* – 0,5 мм; *б* – 0,7 мм; *в* – 1 мм

– 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, т.е. параметры готовых полос удовлетворяют требованиям, предъявляемым к прокату для холодной штамповки.

5.2.2 Стабилизация и повышение энергоэффективности процесса прокатки путем модернизации алгоритмов систем управления скоростными режимами работы станов

Проблемам оптимального управления посвящено много работ [279–281], однако выбор оптимальной модели обычно основан на компромиссе между

качеством регулирования и сложностью модели. Для нелинейных процессов и при повышенных требованиях к качеству регулирования разрабатывают модели с индивидуальной структурой, основываясь на физике процессов, протекающих в объекте управления.

Известен способ пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулирования с обратной связью [281], который доминирует в металлургической отрасли в сфере управления двигателями главных приводов прокатных станов, обеспечивающих скоростной режим, и описывается выражением:

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt},$$

где t – время; K , T_i , T_d – пропорциональные безразмерные коэффициенты; y – регулируемая; u – выходная величина регулятора.

Входом объекта управления является выход регулятора, т.е. величина u , которая имеет ту же размерность, что и рассогласование e , выходная величина y и управляющее воздействие r . Т.е., если объект управляется током или частотой вращения вала, во всех этих случаях управляющей величиной является u , а в модель объекта управления следует ввести преобразователь величины u в ток или в частоту вращения вала, соответственно. Таким воздействием во всех случаях должна быть величина u (выходная величина регулятора).

Прокатный стан включает в себя линию прокатных клетей, содержащих валковые системы и системы привода станов холодной прокатки, состоящие из редукторов, шпинделей, валов и муфт, что составляет сложную многомассовую систему, не поддающуюся полноценному математическому описанию, кроме того, существует взаимное влияние прокатных клетей друг на друга через прокатываемую полосу. Сама полоса имеет нестабильные параметры структуры и формы. Это приводит к стохастическим и неравномерным изменениям усилий прокатки, которые через систему привода передаются на вал двигателя. Несмотря на полученные результаты в

области создания современной теории оптимальных систем автоматического управления (САУ) практическое применение этой теории для синтеза реальных систем пока еще сравнительно ограничено. Это объясняется тем, что построение на основе указанной теории систем для сложных объектов, у которых система описывается дифференциальными уравнениями высокого порядка или имеет сложный характер ограничений, при нынешнем состоянии средств управляющей и вычислительной техники практически не реализуемо. Поэтому существующие САУ используют приближенные алгоритмы управления (квазиоптимальные), незначительно в смысле избранного функционала, отличающиеся от строго оптимальных, но зато просто реализуемые на практике. При этом получается некоторое отклонение процесса от строго оптимального, однако управляющее устройство системы существенно упрощается. Для определения оптимальных коэффициентов существуют известные аналитические методы, такие как, методы Зиглера-Никольса, *CHR* (*Chien, Hrones* и *Reswick*) метод. Расчет параметров по формулам не может дать оптимальной настройки регулятора, поскольку аналитически полученные результаты основываются на сильно упрощенных моделях объекта. В частности, в них не учитывается присутствующая нелинейность. Кроме того, модели используют параметры, идентифицированные с некоторой погрешностью. Поэтому после расчета параметров регулятора производят его подстройку. Подстройку выполняют на основе правил, полученных из опыта, теоретического анализа и численных экспериментов. Они сводятся к следующему:

- увеличение пропорционального коэффициента увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- с уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;

– увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

Несмотря на эффективность и широкую распространенность ПИД-регуляторы имеют ряд недостатков. Контуры ПИД-регулирования трудно настраивать, их поведение не всегда предсказуемо, не всегда удается достичь требуемого быстродействия, затруднен поиск неисправностей. Поскольку в формировании управляющего сигнала используется значение ошибки в цепи обратной связи, то форма управляющего сигнала не является идеальной, а «размывается» во времени (линии управляющего (2) и выходного (4) сигналов на рис. 5.20).

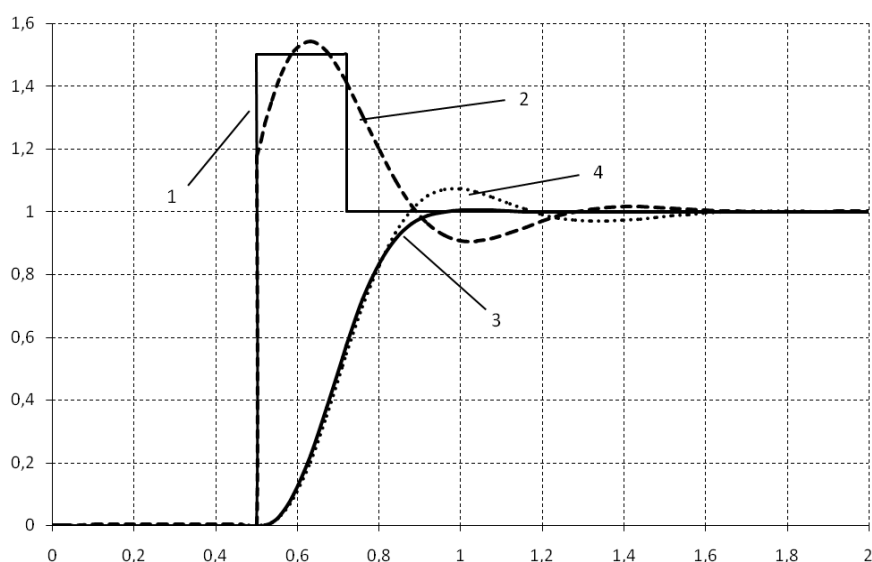


Рисунок 5.20 – Формы сигналов при регулировании

Задача оптимального управления двигателем прокатного стана – это обеспечение выхода на заданное значение скорости прокатки за минимальное время при минимальной диаграмме изменения тока якоря без перегрева двигателя. Максимально быстрое достижение выходным сигналом заданной величины возможно за счет формирования прямоугольного управляющего импульса в момент возникновения отклонения (при достижении заданного значения частоты вращения 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 (вход и выход заготовки из клетки, неравномерность прогрева заготовки по длине и т. д.).

Для определения оптимального управляющего воздействия строится математическая модель двигателя прокатного стана (см. главу 2). Условная схема модели двигателя представлена на рис. 5.21.

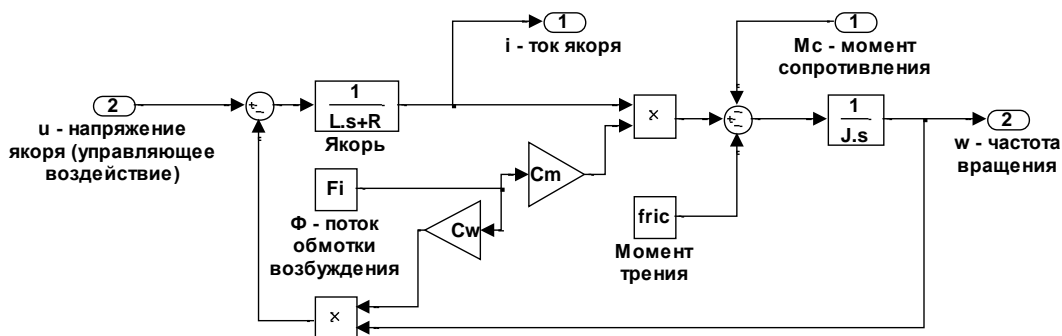


Рисунок 5.21 – Модель электродвигателя прокатного стана

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 [282–286].

Часть проблем возникает по причине сложности эксплуатации. Во многих ПИД-контроллерах дифференциальная компонента выключена только потому, что ее трудно правильно настроить. Поэтому основные усилия исследователей в настоящее время сосредоточены на поиске надежных методов автоматической настройки регуляторов, как встроенных в ПИД-контроллер, так и функционирующих на отдельном компьютере.

Для формирования оптимального управляющего воздействия составляется таблица зависимости значений выражения $\int_0^T |i(t)|dt + \int_0^T |\omega(t)|dt$ от величины и длительности импульса [287]. Таблица значений может составляться исходя из результатов испытаний или на базе математической

модели привода, при условии ее адекватности реальному приводу. Как известно, для получения оптимального по быстродействию переходного процесса необходимо поддерживать максимальный уровень управляющего воздействия. В данном случае необходимо с максимально допустимым ускорением разогнать систему, а по достижению заданной частоты вращения снизить управляющий сигнал (линии управляющего (1) и выходного (3) сигналов на рис. 5.20).

В идеальном случае при данном подходе можно достигнуть сколь угодно малого времени переходного процесса, однако реальный привод накладывает на способ формирования сигнала следующие ограничения:

- максимально допустимое напряжение, подаваемое на якорь двигателя;
- максимально допустимая перегрузка по току якоря двигателя;
- инерционность многомассовой системы, ограничивающей максимальное ускорение;
- время обработки сигналов существующими АСУ ТП.

Предлагаемый способ управления двигателем можно реализовать на существующих ПИД-контроллерах. Для этого полученное значение величины управляющего импульса вводится как коэффициент усиления пропорциональной составляющей, а по истечении необходимого времени регулирования данный коэффициент приравнивается к единице до возникновения следующего отклонения. Интегральная и дифференциальная составляющие равны нулю. На вход регулятора подается заданное значение частоты вращения, а значение отклонения используется для определения времени начала импульса.

Предлагаемый способ позволяет изменять параметры регулирования в широком диапазоне для достижения различных задач (учитывая указанные выше ограничения):

- максимально быстрый выход привода на заданную частоту вращения;
- минимизация токовых нагрузок;
- исключение колебательных процессов перерегулирования;

– повышение энергоэффективности (снижение потерь электроэнергии за счет снижения пульсаций тока) при работе двигателей главных приводов прокатных станов;

– оптимизация управления по совокупности времени достижения заданной частоты вращения при минимальном токе якоря.

На рисунках 5.22 и 5.23 представлены имитационные модели импульсного управления, выполненные в среде *MATLAB Simulink*.

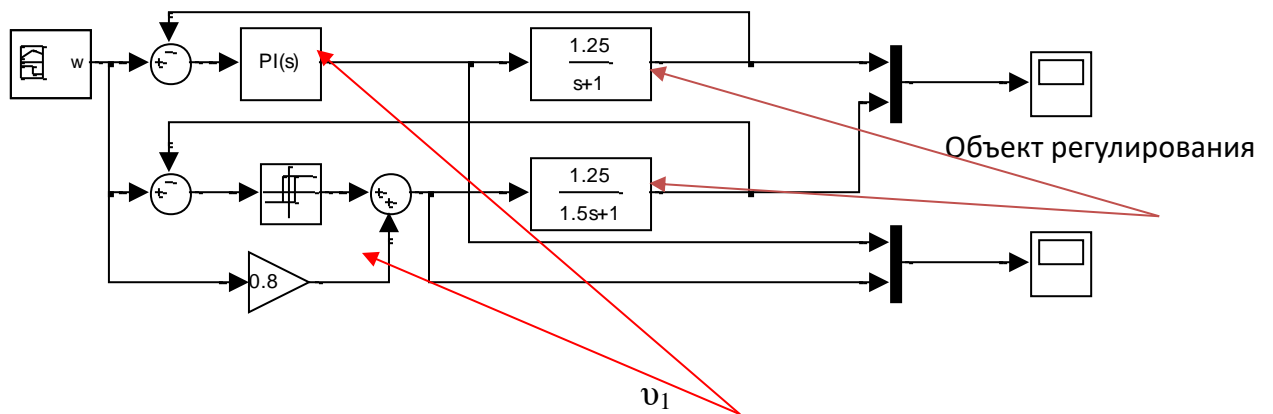


Рисунок 5.22 – Имитационная модель автоматизированного привода прокатного стана

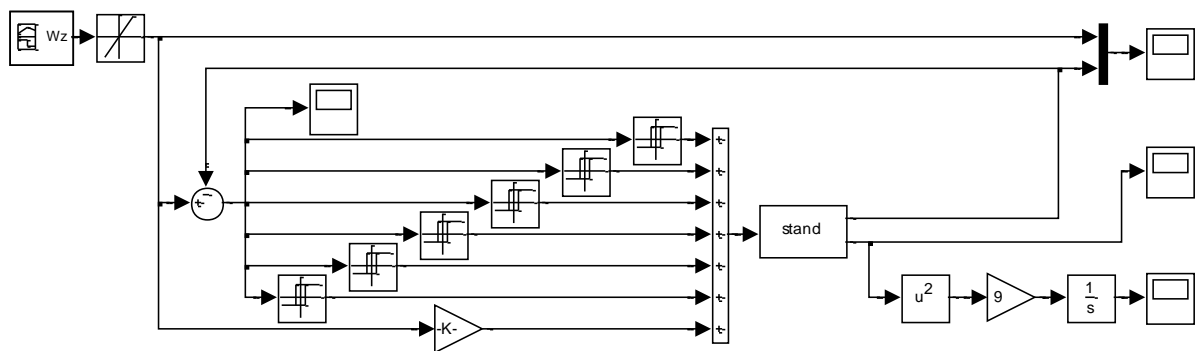


Рисунок 5.23 – Схема импульсного управления

Для проверки эффективности предложенного способа управления был создан и использован лабораторный стенд, предназначенный для исследования существующих и новых систем управления электроприводом за счет включения исследуемых реальных электроприводов в набор

виртуальных блоков в прикладных программных системах математического моделирования [288].

Стенд включает в себя последовательно соединенные входами и выходами цифровой преобразователь интерфейсов, микроконтроллер, преобразователь сигналов высокого напряжения, датчики углового перемещения, датчики тока, датчики напряжения, преобразователь внешнего напряжения, один двигатель постоянного тока с независимым возбуждением с возможностью измерения контролируемых параметров, один асинхронный двигатель переменного тока с возможностью измерения контролируемых параметров и двух двигателей постоянного тока без возможности измерения параметров, служащих для создания нагрузки на валах исследуемых двигателей. Стенд выполнен на одном микроконтроллере, имеющем восемь выходных каналов, восемь входных аналоговых каналов и четыре входных цифровых канала. Стенд соединен с компьютером через *USB*-интерфейс. Стенд включает в себя драйвер позволяющий передавать команды на микроконтроллер и получать данные от микроконтроллера в любой из программ компьютерного моделирования поддерживающих *COM* или *NET framework* технологию (например, *MATLAB/Simulink*). Питание микроконтроллера и датчиков стенда может осуществляться от компьютера через *USB*-интерфейс. Стенд выполнен в виде одной платы, размещенной в компактном корпусе. Двигатели для создания нагрузки имеют между валами ременную передачу [289].

На рисунках 5.24, 5.25 представлены результаты лабораторной реализации способа импульсного управления.

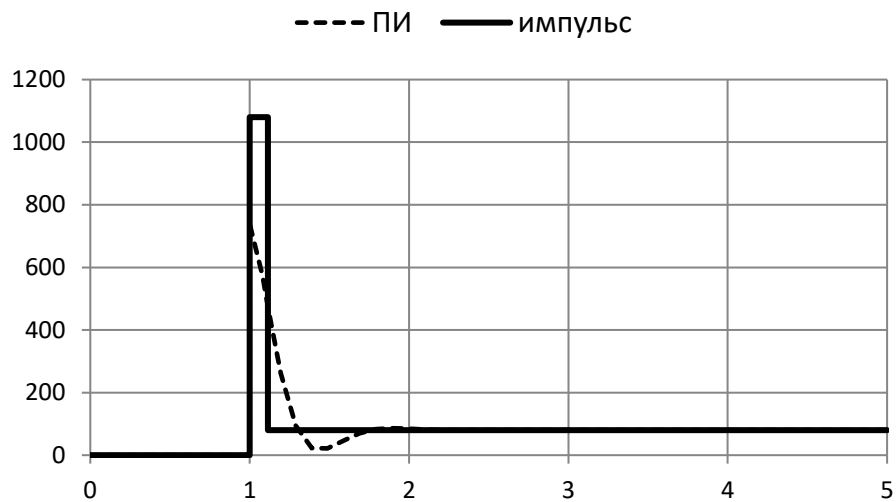


Рисунок 5.24 – Форма управляющего сигнала при ПИ- и импульсном регулировании

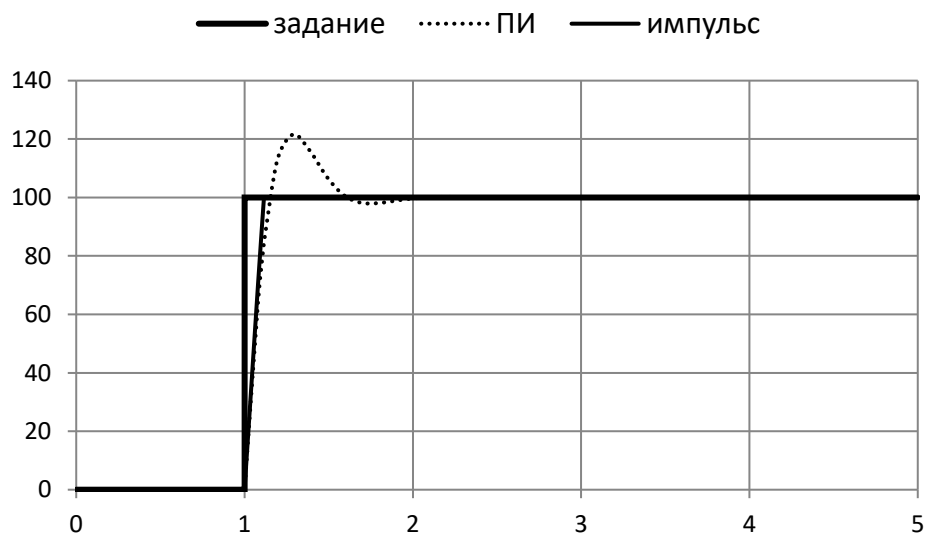


Рисунок 5.25 – Отклик объекта управления при ПИ- и импульсном регулировании

В натурном эксперименте производился разгон и торможение двигателя постоянного тока серии 2ПН90ЛУХЛ4 ($P_{НОМ}=0,55\text{кВт}$, $n_{НОМ}=1500\text{об/мин}$, $n_{МАКС}=4500\text{об/мин}$, $U_{ПИТ}=220\text{В}$). Равномерное вращение осуществлялось в течение 11 секунд. Во время эксперимента было произведено два последовательных запуска с ПИ- и импульсным управлением. В данном эксперименте при ПИ-управлении потреблено 5,45 Вт, а при импульсном управлении 4,8 Вт (рисунки 5.26 и 5.27), т.е. экономия составила 12 %.

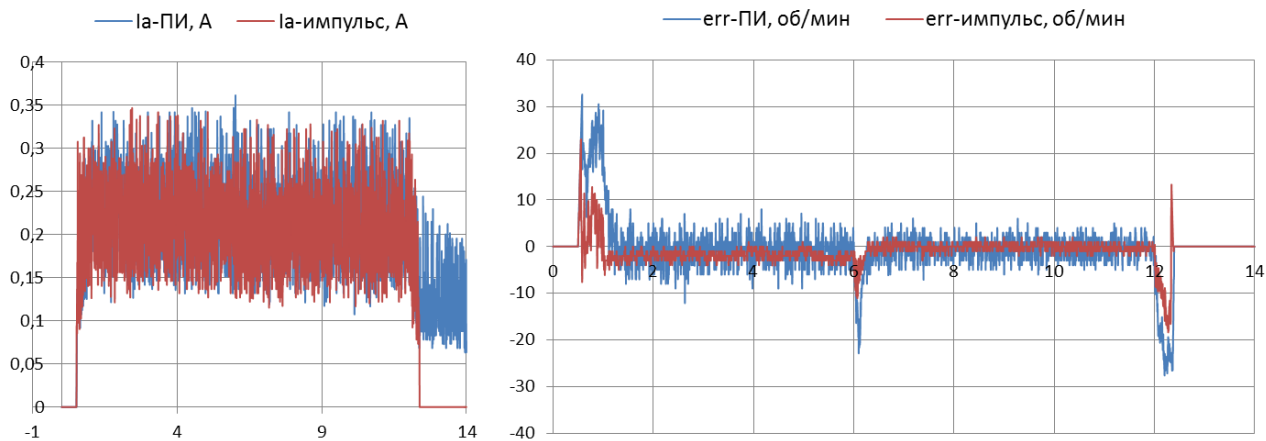


Рисунок 5.26 – Результаты лабораторных испытаний способа импульсного управления

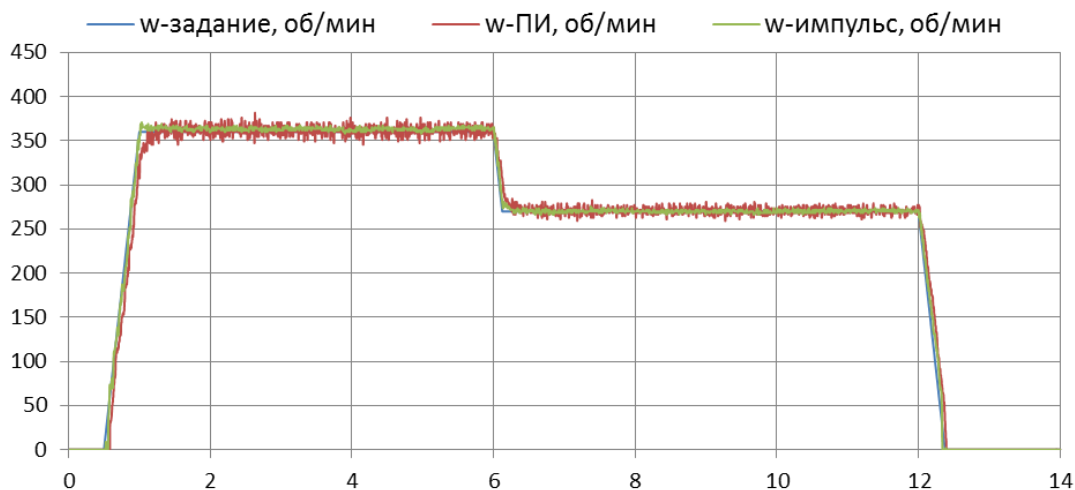


Рисунок 5.27 – Графики скоростей, полученные при натурном лабораторном эксперименте

Из приведенного на рис. 5.27 графика видно, что при импульсном управлении реальная скорость вращения якоря более точно соответствует заданию и имеет меньшие пульсации.

Таким образом, 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 %.

5.2.3 Применение интеллектуальных алгоритмов в системе управления скоростью прокатки для снижения энергозатрат

На схеме (см. рис. 5.28) представлены три различных подхода к объекту регулирования (рассмотрен идеализированный двигатель прокатного стана):

1. Пропорционально-интегральный *PI*.
2. Пропорционально-интегрально-дифференциальный *PID*.

3. Нечеткий *FUZZY* (данный вид регулирования в настоящее время не применяется в металлургии для построения автоматизированных систем управления главными приводами рабочих клетей прокатных станов, используется в основном за рубежом в робототехнической промышленности).

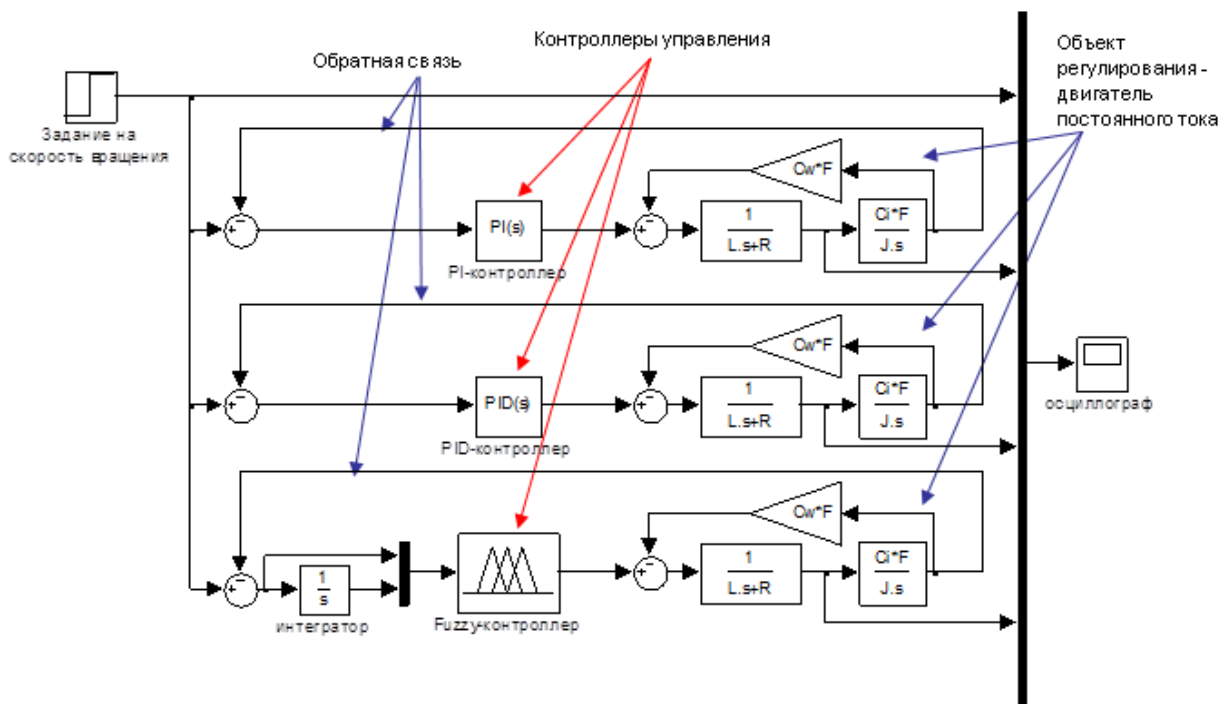


Рисунок 5.28 – Существующие подходы к регулированию объектов АСУ

При единичном задании с использованием различных подходов регулирования объект управления выходит на стационарный режим за различное время и с разной амплитудой колебаний, что в применении к электроприводам характеризует энергопотери. Например, использование

интеллектуальных регуляторов нечеткой логики (*FUZZY-регуляторов*), работающих на лингвистических переменных и правилах, приводит к снижению потерь электроэнергии от 13 до 28 раз (рис. 5.29).

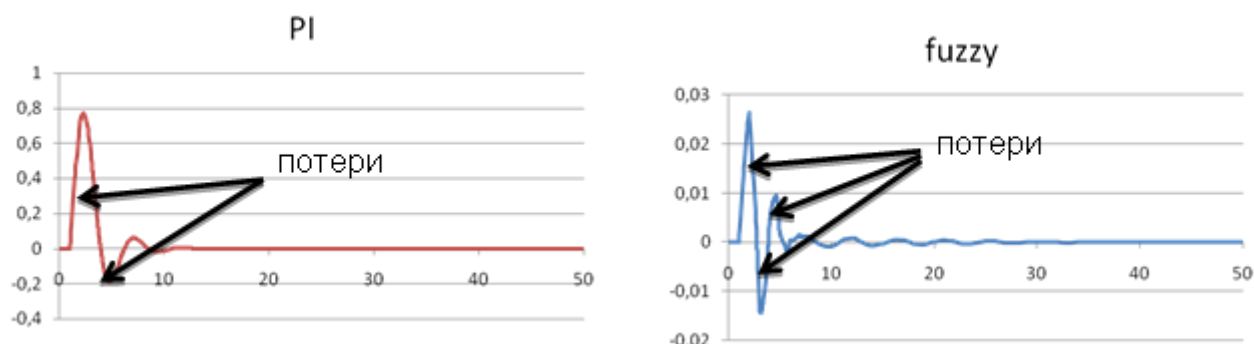


Рисунок 5.29 – Сравнение потерь электроэнергии при работе двигателя постоянного тока при *PI*- и *FUZZY*-регулировании

Реализуя модели электрической и механической части главных приводов постоянного тока 5-клетевого стана холодной прокатки 1700 ЧерМК ОАО «Северсталь» в среде *MATLAB Simulink*, были получены графики переходных процессов тока якоря двигателя верхнего валка рабочей клетки №1, представленные на рисунке 5.30 [276].

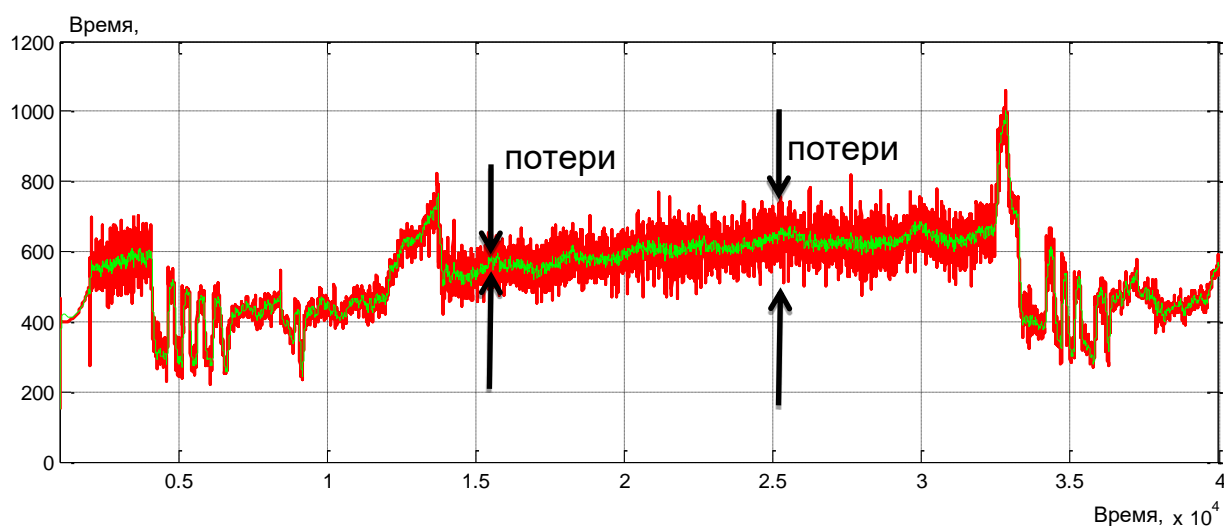


Рисунок 5.30 – Графики тока якоря двигателя и линейной скорости нижнего валка первой клетки стана, рассчитанные по модели на базе *PI*- и *FUZZY*-контроллера

Из графиков рис. 5.30 видно, что существенное снижение уровня нестационарностей процесса в виде колебаний токов якоря при использовании в системе управления автоматизированным электроприводом стана холодной прокатки регуляторов нечеткой логики.

Для проверки адекватности моделирования на лабораторном стенде [288] были проведены эксперименты по исследованию различных способов управления скоростью привода, вместо блока ПИ-регулятора был применен типовой блок нечеткой логики (*Fuzzy Logic*), на вход которого были поданы сигналы рассогласования и интегрального рассогласования по скорости вращения якоря двигателя. Для реализации блока нечеткой логики использовался программный пакет *Microsoft Visual Studio*, в котором было написано специализированное программное обеспечение позволяющее управлять электроприводом как в режиме ПИ-, так и в режиме *Fuzzy*-регулятора. Передаваемые пользователем и получаемые от стенда данные выводились в графическое окно в виде графиков и текстовых сообщений (рис. 5.31). Пользователь может контролировать параметры регуляторов и задание таких величин, как ток возбуждения и напряжение цепи якоря в реальном времени.

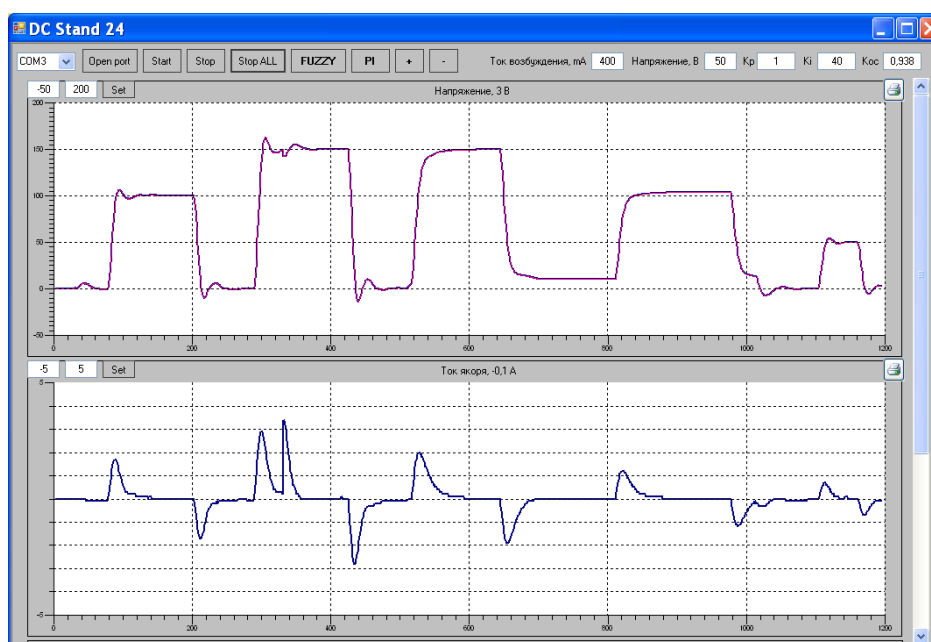


Рисунок 5.31 – Внешний вид программы для управления лабораторным стендом

На рисунке 5.32 показаны графики скоростей вращения якоря двигателя при различных способах управления и без управления, полученные при проведении лабораторных экспериментов на стенде.

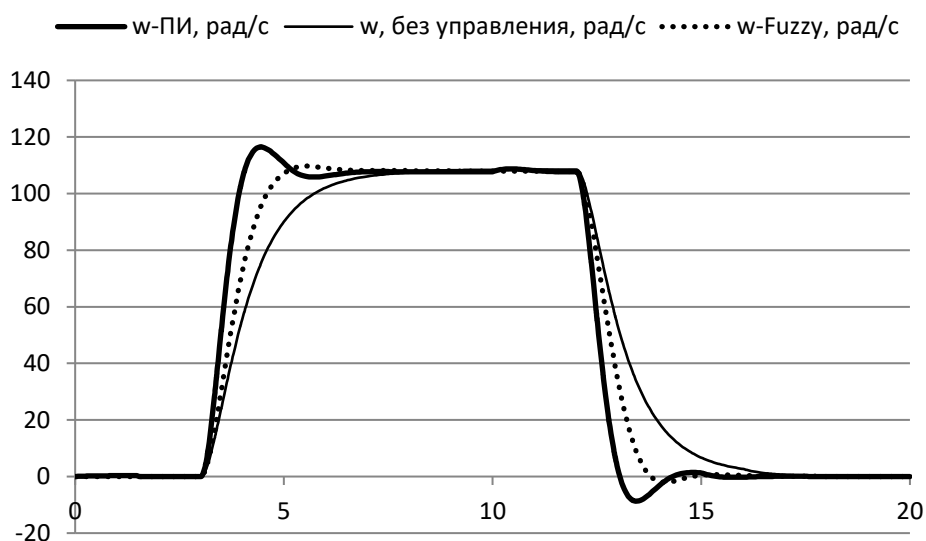


Рисунок 5.32 – Скорости вращения якоря при различных способах управления

Как видно из графиков, при одинаковых заданиях перерегулирование и время выхода на заданную скорость при *Fuzzy*-управлении значительно меньше по амплитуде, чем при ПИ-управлении.

Таким образом, эксплуатируя современные автоматизированные электрические приводы в условиях непрерывных и нестационарных технологических процессов, можно не только избежать проблем настройки и эффективности эксплуатации традиционно применяющихся регуляторов и способов управления, но и добиться существенных технических и экономических результатов.

В настоящее время активно ведутся исследования по внедрению и адаптации альтернативных способов настройки систем управления скоростными режимами прокатных станов на базе методов искусственного интеллекта. Наиболее популярные – нечеткая логика, искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы, а также комбинации их между собой и с классическими методами [290].

5.3 Разработка и промышленная реализация эффективных режимов работы широкополосных станов горячей прокатки

5.3.1 Разработка и внедрение способа управления электроприводами на основе компенсации момента инерции двигателя

Повышение технологической стабильности процесса производства листов и полос стало особенно актуально в задачах повышения энергоэффективности процесса прокатки. Колебания момента прокатки, высокий уровень динамических моментов приводят к возникновению существенных потерь электроэнергии и снижению полезной мощности двигателей главных приводов рабочих клетей [291].

В качестве примера на рис. 5.33 приведена диаграмма реальных колебаний скорости 6-й клетки чистовой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ЧерМК ПАО «Северсталь». На данном стане наблюдались значительные колебания и отклонения от заданной скорости, а также броски тока якоря двигателей главных приводов стана, обусловленные инерционностью многомассовой системы главных приводов, взаимодействием клетей между собой и работой петледержателей.

При рассмотрении изменений скорости валков в процессе прокатки в относительных единицах (рис. 5.33) видно, что в переходных динамических режимах они могут достигать 35–40 % и превышать заданное значение, при постоянной скорости прокатки скорость валков также может колебаться в пределах $\pm (10\text{--}15) \%$ от среднего значения.

Существующие отечественные и зарубежные исследования по моделированию и разработке технических решений для обеспечения стабильности технологического процесса листовой прокатки, снижения уровня негативных динамических эффектов, повышения энергоэффективности процесса не предлагают вариантов без конструктивных изменений существующего прокатного оборудования и систем управления.

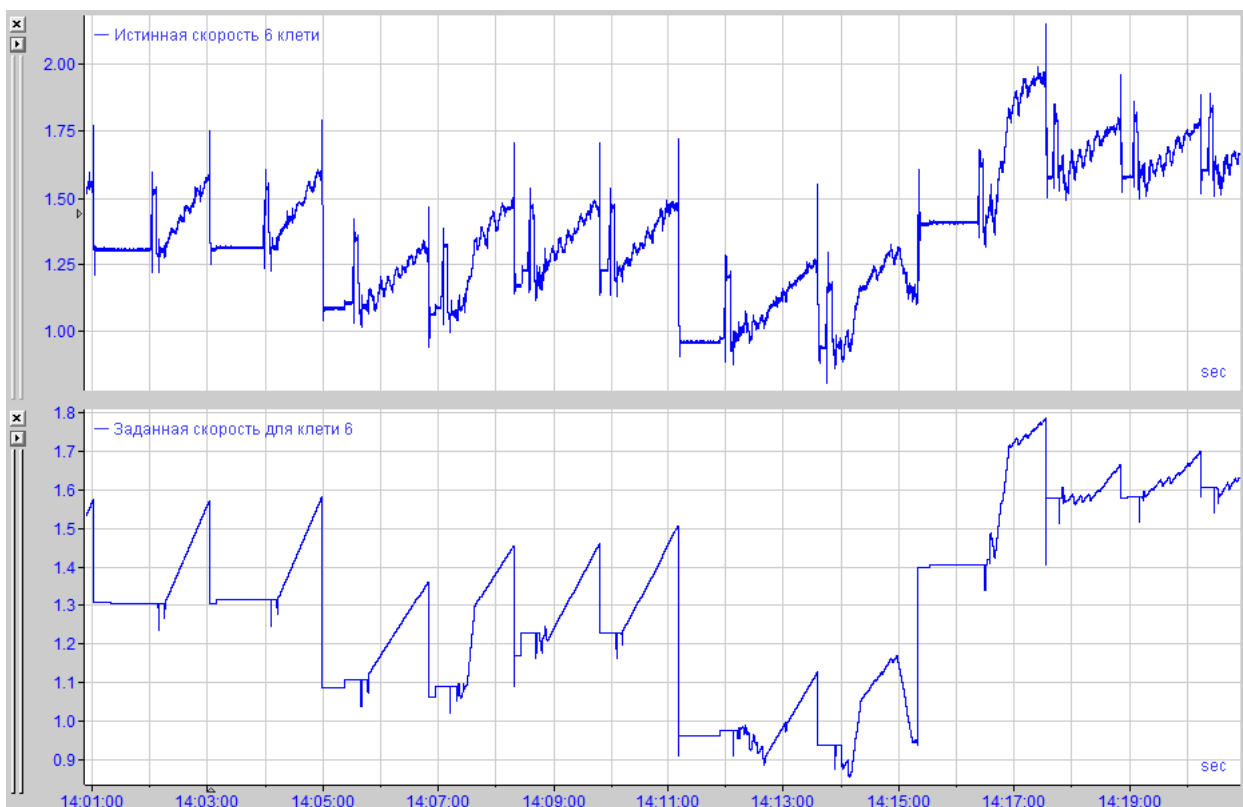


Рисунок 5.33 – Изменения скорости 6-й клетки чистовой группы стана 2000 ЧерМК ПАО «Северсталь» при постоянной скорости прокатки и в динамических режимах работы

Для развития исследований в данной области следует особое внимание уделить автоматизированным электроприводам рабочих клеток прокатных станов, а именно, применяющимся в настоящее время алгоритмам и способам управления двигателями главных приводов прокатных станов.

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

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

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 и заключается в снижении отклонения от заданной скорости вращения двигателя, что позволяет повысить точность управления техническими устройствами с электроприводом постоянного тока и уменьшить рассогласования между синхронно работающими приводами.

На станах, где в процессе прокатки меняется скорость и направление вращения вала двигателя, возникает динамический момент сил инерции, рассчитываемый по формуле [102]

$$M_k = \sum_k m_k \frac{1}{4} D_k^2 \frac{1}{i_k^2} \frac{d\omega}{dt}$$

где D_k – приведенный диаметр инерции k -ой вращающейся массы; $\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение двигателя; i_k – передаточное отношение k -ой вращающейся массы.

Для получения полного динамического момента клетки кварто чистой группы широкополосного стана необходимо учесть моменты инерции двенадцати тел (рис. 5.34). Обозначив сумму моментов инерции всех тел, входящих в привод, через J получаем:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}$$

Главный привод клетки стана горячей прокатки оборудован двигателем постоянного тока независимого возбуждения, математическое описание

которого представляет собой следующую систему дифференциальных и алгебраических уравнений в абсолютных единицах [292]:

$$\begin{cases} U = E + RI + L \frac{dI}{dt}, \\ M_{\text{ЭМ}} = C_M \Phi I, \\ E = C_{\omega} \Phi \omega, \\ M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{дин}} + M_C \end{cases}$$

где U – напряжение на якорной обмотке двигателя; E – электродвижущая сила (ЭДС) якоря; I – ток якоря; Φ – поток, создаваемый обмоткой возбуждения; $M_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитный момент двигателя; $M_{\text{дин}}$ – динамический момент; M_C – момент сопротивления движению; ω – скорость вращения вала двигателя; 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 (конструктивная постоянная).

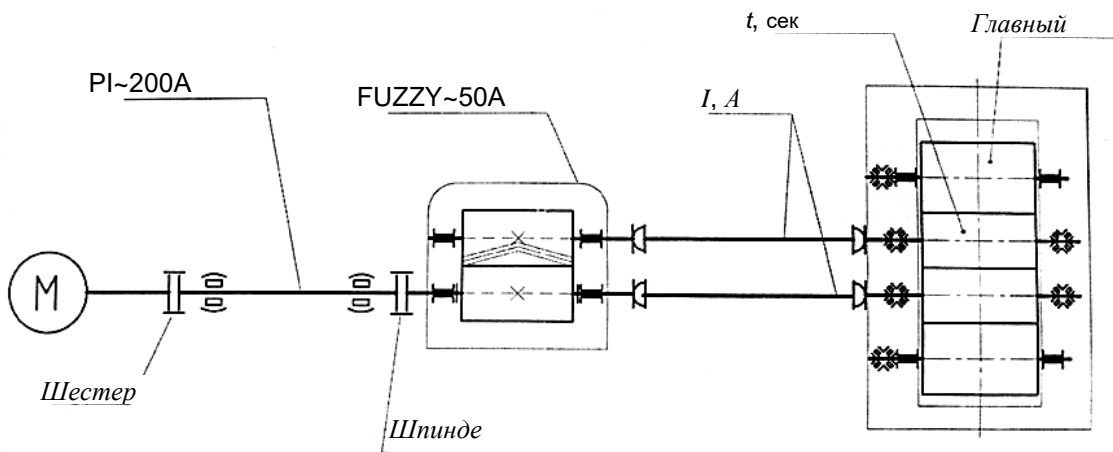


Рисунок 5.34 – Линия привода непрерывного широкополосного стана горячей прокатки

Преобразуя данную систему, получаем выражение для тока якоря:

$$I = \frac{M_{дин} + M_c}{C_M \Phi} = \frac{J}{C_M \Phi} \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_c}{C_M \Phi}$$

Рассмотрев полученную формулу, можно отметить, что все переменные входящие в состав первого слагаемого известны. Таким образом, можно использовать полученное выражение для точного задания тока якоря при ускоренном (замедленном) движении, необходимого для компенсации момента инерции, что позволяет устранить или существенно сократить переходные процессы, возникающие при обычном ПИД-регулировании.

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

Так как нет реальной возможности передачи значения тока компенсации момента инерции непосредственно в цепь якоря, то оно подается в виде добавки к заданию контура регулирования тока (рис. 5.35). Т.е. 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.

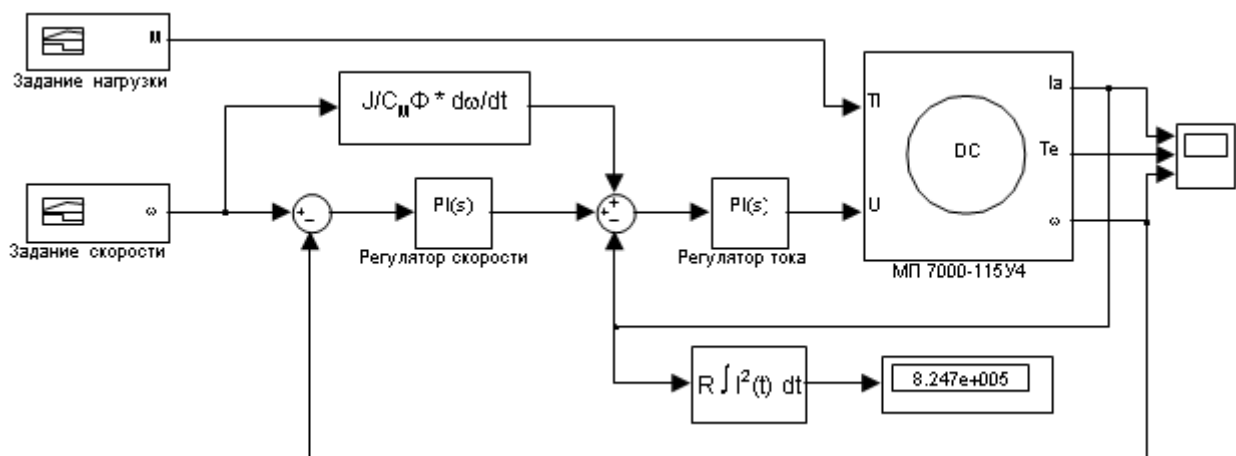


Рисунок 5.35 – Структурная схема системы управления двигателем прокатного стана в пакете *MATLAB*

Таким образом, выражение описывающее регулятор контура скорости принимает вид:

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

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

Специалистами кафедры Электроэнергетики и электротехники Череповецкого государственного университета разработан и программно реализован на приводах *Siemens* марки *Simoreg* и *Symatic* непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ЧерМК ПАО «Северсталь» способ компенсации момента инерции двигателя постоянного тока прокатного стана. Способ заключается в корректировке системы автоматизированного управления двигателем главного привода клетки таким образом, чтобы фактическое ускорение системы «двигатель–клеть» наиболее точно соответствовало заданному значению [293–295].

В систему управления приводом на лабораторном стенде [288] была введена добавка к заданию тока, что обеспечило дополнительное ускорение системе для компенсации ее инерционности (рис. 5.36) и позволило устранить негативные динамические эффекты (рывки и толчки валов) в моменты пуска, чреватые отклонением от заданной скорости в управляемой системе.

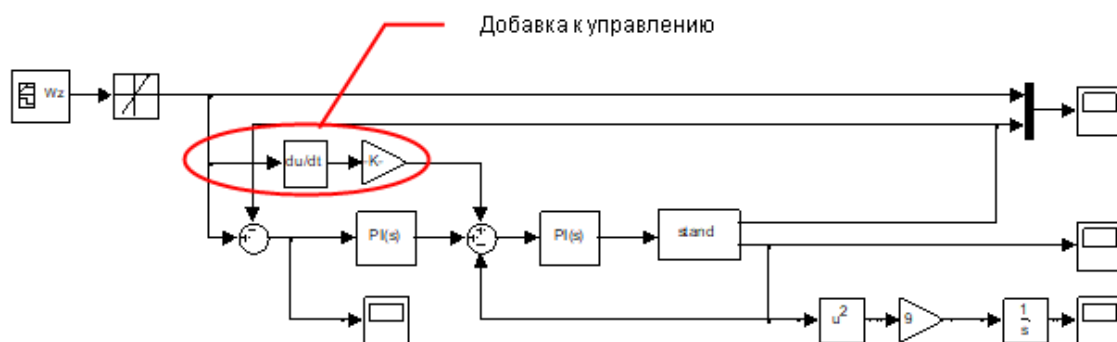


Рисунок 5.36 – Система управления, позволяющая снижать амплитуду переходных процессов при перерегулировании

Результаты лабораторных натурных экспериментов указанных систем представлены на рис. 5.37.

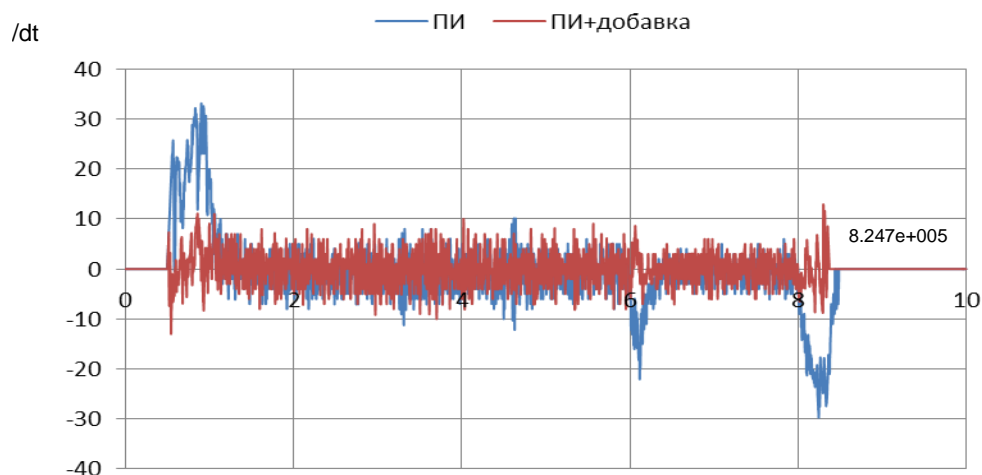


Рисунок 5.37 – Отклонение от заданной скорости (на графике в моменты изменения задания видны рывки)

Указанный метод был апробирован в реальных производственных условиях на клетях №№ 6 и 7 путем разгона двигателя до ползучей 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 [295, 296–298].

В ходе активных промышленных экспериментов были получены данные о заданной и фактической скорости и усилие прокатки, фактическом токе якоря двигателей главного привода, заданном и фактическом растворе валков, диаметре валков, толщине и ширине проката.

Результаты промышленных испытаний представлены на рис. 5.38. На графике 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). Также в результате промышленных испытаний выявлено улучшение соответствия заданной и истинной скорости клетки и

уменьшение величины и времени перерегулирования, что позволило снизить потери электроэнергии и уменьшить нестационарность процесса прокатки.

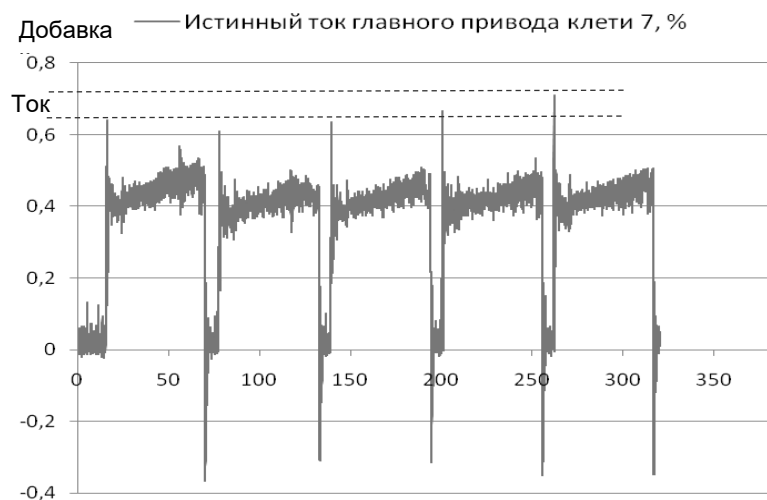


Рисунок 5.38 – Результаты промышленных испытаний энергоэффективных режимов работы автоматизированных приводов стана 2000 ЧерМК ПАО «Северсталь»

Для оценки экономической эффективности описанных выше положительных технических результатов промышленных испытаний необходимо разработать методику определения количества сэкономленной электроэнергии.

Так как компенсация момента инерции привода оказывает влияние на скоростные и энергетические параметры только в случае ускоренного движения, то необходимо получить количество электроэнергии затраченной на преодоление момента сопротивления, возникающем при ускоренном движении, без учета момента сопротивления вызванного усилием прокатки,

$$M_{\nu} = M_{O} - M_{\text{ПР}},$$

$$M_{O} = I_{\text{Я}} c \Phi,$$

$$M_{\text{ПР}} = Pl,$$

где M_{ν} – приведенный к валу двигателя момент, вызванный ускорением движения; M_{O} – общий момент на валу двигателя; $M_{\text{ПР}}$ – момент прокатки; $I_{\text{Я}}$

– ток якоря двигателя; c – конструктивная постоянная; Φ – магнитный поток; P – усилие прокатки; l – плечо (очаг деформации).

Для получения значения экономии электроэнергии, потраченной на преодоление момента, вызванного ускоренным движением, применяется следующий расчет

$$N = N_{БК} - N_K, N = I_{я}^2 R, I_{я} = \frac{M_{у}}{c\Phi},$$

где N – значение мгновенной мощности, потраченной на преодоление момента, вызванного ускоренным движением; $N_{БК}$ – мощность без компенсации; N_K – мощность с компенсацией момента инерции; R – сопротивление якорной цепи.

Для получения полной мощности произведено интегрирование мгновенной мощности по времени, а для получения сравнимых результатов полная мощность пересчитана в удельную и разделена на полную массу металла для каждого эксперимента. Результаты расчета энергоэффективности разработанных технических решений сведены в табл. 5.11. В данной таблице указан процент экономии в моменты переходных процессов (разгона двигателя до рабочей скорости).

В течение апреля–мая 2013 г. рекомендованные специалистами кафедры Электроэнергетики и электротехники Череповецкого государственного университета режимы настройки главных приводов внедрены на все клетки чистовой группы стана 2000 ЧерМК ПАО «Северсталь».

При годовой производительности стана в 6 млн тонн, удельном расходе электроэнергии – 46,6 кВт·час/т и стоимости электроэнергии – 2,5 руб./кВт·час, достигается экономический эффект в пересчете на 1 тонну проката более 7 млн руб. в год.

Таблица 5.11 – Результаты промышленных испытаний режимов настройки систем управления автоматизированными приводами чистой группы стана 2000 ЧерМК ПАО «Северсталь»

№	Клеть	Партия	Полная мощность, Вт	Масса металла, т	Удельная мощность, Вт	% экономии
1	6	554519	227737,2	34,992	6508,264	42,0
2			171484,5	34,816	4925,451	56,1
3			167571,4	35,036	4782,835	57,4
4			219942,4	34,766	6326,365	43,7
5	7	560366	185498,0	58,534	3169,064	16,4
6		560368	346583,9	25,881	13391,442	25,3
7			398191,1	25,750	15463,733	13,7
8			365133,4	25,988	14050,077	21,6

5.3.2 Повышение качества проката за счет снижения колебаний в системе петлерегулирования

В рамках решения задачи по повышению качества горячекатаного проката рассмотрена система регулирования натяжения полосы на непрерывной группе 1700 полунепрерывного комбинированного стана горячей прокатки 2800/1700 листопрокатного цеха № 1 ЧерМК ПАО «Северсталь». Данная система на указанном стане реализована с помощью электромеханических петледержателей.

При прокатке система петлерегулирования поддерживает заданный уровень петли металла в межклетевом промежутке и заданное постоянное натяжение полосы. Уровень натяжения и его колебания оказывают значительное влияние на продольную разнотолщинность и разноширинность полосы. При устойчивой прокатке колебания петледержателя невелики и

натяжение полосы поддерживается постоянным, что минимизирует колебания толщины и ширины полосы.

Ширина подката для непрерывной группы клеток 1700 формируется в вертикальной клетки и в черновой группе 2800. Подкат для группы 1700 имеет зауженные концы, величина сужения в основном определяется суммарным обжатием на вертикальной клетки, чем больше суммарное обжатие, тем больше заужены концы полосы.

Непрерывная группа клеток 1700 вносит изменения в профиль продольной разноширинности, основное воздействие на этот профиль оказывает создаваемое и поддерживаемое петледержателем натяжение полосы. Система петлерегулирования качественно отрабатывает в средней части и в конце полосы. Прокатка передней части полосы – это сложный для регулирования процесс, который определяется:

- формированием первоначальной петли;
- подъемом петледержателя до прижатия к полосе;
- выводом уровня петли от первоначального размера к заданному.

Размер первоначальной петли на передней части полосы определяется оператором при настройке скоростей и зазоров.

Существующая АСУ ТП непрерывной группы клеток 1700 настроена так, что в ряде случаев не выполняется правило постоянства секундных объемов. При захвате полосы образуется слишком большая или, наоборот, слишком маленькая петля. Далее с помощью системы петлерегулирования петля постепенно стабилизируется на заданную величину. Данная ситуация возникает чаще всего при перестройке на другой профиль. При захвате полосы происходит просадка ее скорости. Величина просадки и время возвращения клетки на заданную скорость определяют размер петли в предыдущем межклетевом промежутке.

Из данных системы диагностики прослеживается закономерность: чем ниже уровень первоначальной петли на передней части полосы, тем больше вероятность «утяжки» полосы по ширине.

Иногда операторы стана искусственно настраивают стан на прокатку с образованием большой петли на передней части полосы, так как хотят снизить «утяжку» по ширине.

При начале подъема петледержатель разгоняется, так как развиваемый им момент рассчитывается с учетом веса полосы и создания заданного натяжения, т.е. момент двигателя значительно больше момента сопротивления.

Общий момент на двигателе петледержателя включает в себя три составляющих и определяется по формуле (5.1):

$$M_G = M_E + M_B + M_Z, \quad (5.1)$$

где M_E – требуемый момент для покрытия собственного веса петледержателя; M_B – требуемый момент для покрытия веса полосы; M_Z – требуемый момент для покрытия необходимого натяжения полосы.

Выражение для момента, необходимого для покрытия натяжения полосы, получено из (5.1):

$$M_Z = M_G - M_E - M_B.$$

Общий момент может быть определен по формуле:

$$M_G = I_{дв} / k,$$

где $I_{дв}$ – ток двигателя петледержателя (значение фиксируется в базе данных АСУ ТП стана); k – коэффициент преобразования.

Момент, требуемый для покрытия собственного веса петледержателя, определяется по формуле:

$$M_E = G_E \cdot g \cdot P \cdot \cos(X),$$

где G_E – собственная масса петледержателя, $G_E = 1800$ кг; g – ускорение свободного падения; P – расстояние между точкой вращения и центром тяжести петлевого устройства (рис. 5.39), $P = 300$ мм; X – угол подъема петледержателя (значение фиксируется в базе данных АСУ ТП стана).

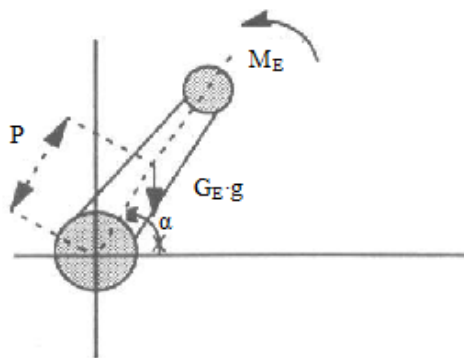


Рисунок 5.39 – Схема действия момента для покрытия собственного веса петледержателя

Момент, необходимый для покрытия веса полосы:

$$M_B = g_B \cdot g \cdot R_1 \cdot \cos(X),$$

где R_1 – длина плеча петлевого устройства; g_B – масса полосы, кг:

$$g_B = h \cdot b \cdot (L_1 + L_2) \cdot \rho,$$

где h – толщина полосы; b – ширина полосы; L_1, L_2 – расстояния от петледержателя до смежных клеток; ρ – плотность материала полосы.

Схема петледержателя с учетом действия всех моментов показана на рис. 5.40.

Петледержатель начинает тормозиться при соприкосновении с полосой, при этом происходит резкое увеличение натяжения полосы, которое и может вызвать ее вытяжку. При выводе уровня петли от первоначального к заданному происходит «качание» петледержателя. Это «качание» сопровождается колебаниями натяжения и, следовательно, незначительными колебаниями толщины полосы.

Для проведения исследования данной проблемы в программном комплексе *MATLAB/Simulink* была создана модель петледержателя с учетом ранее выполненных работ [293, 295, 299]. Графики угла подъема и момента, возникающего при моделировании работы петледержателя, приведены на рис. 5.41.

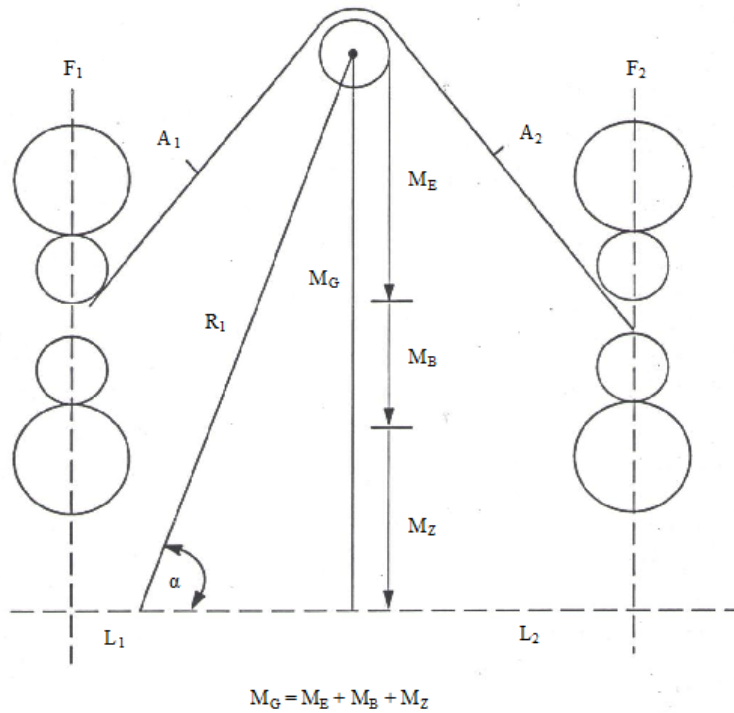


Рисунок 5.40 – Геометрия петледержателя с учетом действующих моментов

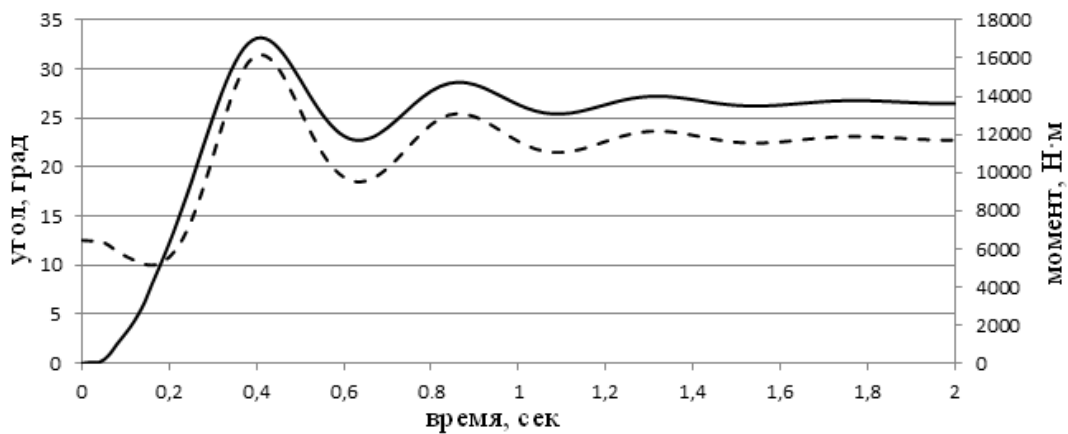


Рисунок 5.41 – Угол подъема (пунктирная линия) и момент петледержателя (сплошная линия)

Для устранения негативных факторов в программу петлерегулирования был внесен ряд изменений. Данные изменения действуют на участке прокатки передней части полосы (первые 5–6 сек. после начала подъема петледержателя) и направлены на

- увеличение уровня первоначальной петли;
- снижение натяжения полосы при столкновении с петледержателем;
- снижение «качаний» петледержателя после начала подъема.

Введена адаптивная коррекция скорости предыдущей клетки. Эта добавка в систему АСУ петледержателя является положительной, т.е. разгоняет предыдущую клетку. Добавка действует первые 0,8 сек. после включения петлерегулирования. Уровень добавки зависит от скорости подъема и высоты подъема петледержателя. При торможении петледержателя полосой добавка снижается и полностью снимается после остановки петледержателя в верхней точке. Дополнительная коррекция способствует более мягкой остановке петледержателя и увеличивает общий уровень первоначальной петли. Структурная схема адаптивной добавки показана на рис. 5.42.

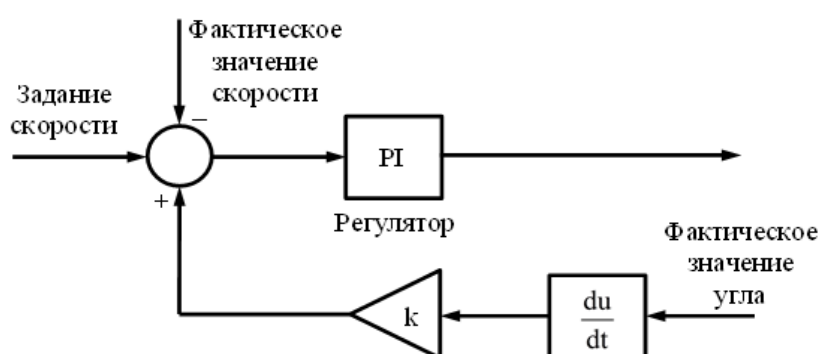


Рисунок 5.42 – Структурная схема адаптивной корректировки системы петлерегулирования

Реализован режим подъема петледержателя с пониженным заданием на натяжение. Заданное оператором натяжение делится на 2 части:

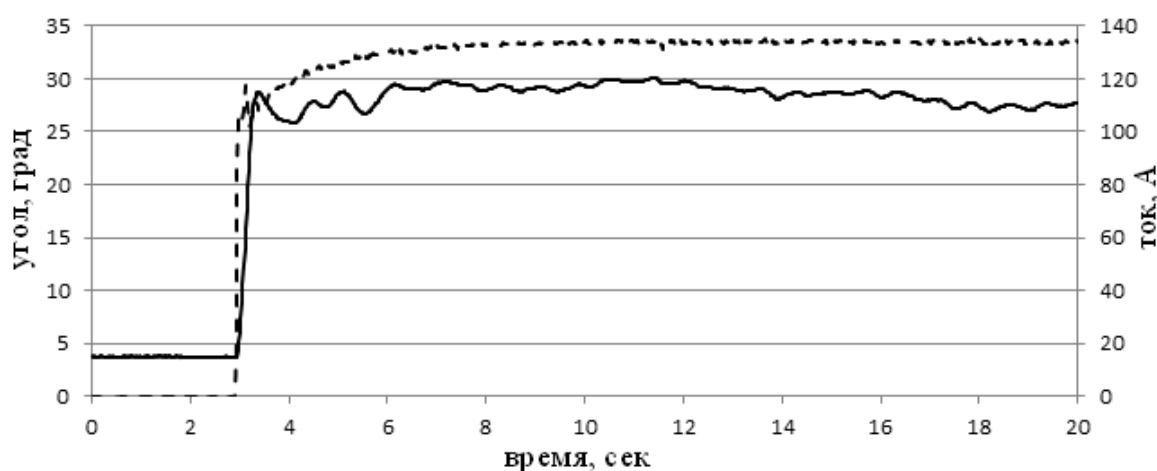
- минимальное натяжение применяется на всей полосе;
- разница между заданным оператором и минимальным натяжением не применяется при первом подъеме петледержателя.

После первого подъема петледержателя натяжение плавно в течение 2–3 сек. доводится до заданного значения. Величина минимального натяжения и время вывода натяжения до заданной величины подобраны эмпирически. При работе по данному режиму снижается скачок натяжения при ударе петледержателя о полосу. При опускании петледержателя с первой верхней точки начнет увеличиваться задание на натяжение, что противодействует

раскачиванию петледержателя. Передняя часть полосы будет прокатываться с пониженным натяжением, что приведет к снижению утяжки по ширине.

В тоже время прокатка с пониженным натяжением увеличивает колебания петледержателя при выводе петли от первоначального уровня к заданному. Поэтому на передней части полосы после первого подъема петледержателя реализован режим работы с повышенным коэффициентом стабилизации относительно рабочей точки. Для рабочей точки петледержателя производится расчет угла в зависимости от диаметра рабочих валков клетей.

Описанные изменения внедрены в программу контроллеров *SimadynD* АСУ ТП чистовой группы 1700. Результаты работы петледержателя показаны на рис. 5.43. Так как непосредственное измерение момента на стане не реализовано, то на графике показан уровень тока двигателя петледержателя.



ток петледержателя – пунктирная линия, угол поворота – сплошная линия

Рисунок 5.43 – Результаты внедрения адаптивной добавки петлерегулирования

На графике (рис. 5.43) видно, что усилие растет плавно в течение семи сек. без резких скачков угла поднятия петледержателя.

Разработанное техническое решение внедрено в производство горячекатаного проката на стане 2800/1700 ЧерМК ПАО «Северсталь» с

декабря 2014 г. В результате внедрения получен эффект по снижению расхода металла в среднем на 0,15 кг/т за счет уменьшения вытяжек от некорректной работы петледержателя на тонком металле, повышена энергоэффективность работы привода петледержателя за счет снижения токов нагрузки в момент подъема [300].

Выводы по главе 5

1. Разработан подход к проектированию режимов холодной прокатки, основанный на подборе таких значений растворов валков и их скоростей, которые обеспечивают ведение процесса прокатки строго в условиях натяжений за счет чего исключается вероятность возникновения резонансных вибраций. Промышленными экспериментами на действующем 5-клетевом прокатном стане подтверждена эффективность разработанных режимов, скорость прокатки при их реализации была увеличена более, чем на 10 % по сравнению с базовой технологией без риска возникновения вибраций.

2. С применением методологии проектирования энергоэффективной технологии разработаны и апробированы режимы холодной прокатки на непрерывном 5-клетевом стане 1700 ПАО «Северсталь», обеспечивающие фактическую экономию энергозатрат на процесс прокатки в диапазоне 5–8 %, при соответствии прочностных и пластических характеристик проката требованиям нормативно-технической документации.

3. Разработан способ оптимального управления скоростным режимом непрерывного прокатного стана, заключающийся в формировании прямоугольного управляющего импульса в момент возникновения отклонения частоты вращения вала двигателя от заданного значения. Способ направлен на максимально быстрое достижение выходным сигналом заданной величины скорости, позволяет снизить потери электрической энергии при работе прокатного оборудования до 15–20 % за счет снижения

уровня шумов, вызванных перерегулированием, а также достичь экономического эффекта за счет снижения потребления электроэнергии до 10–12 %. На способ получен патент Российской Федерации.

4. Создан лабораторный стенд, предназначенный для исследования существующих и новых систем управления электроприводом, в котором исследуемые реальные электроприводы включены в набор виртуальных блоков прикладных программных систем математического моделирования. При реализации способа импульсного управления на лабораторном стенде получена экономия мощности 12 % по сравнению с реализацией ПИ-управления. На лабораторный стенд получен патент Российской Федерации.

5. В результате косвенных экспериментов с применением разработанной математической модели электрической и механической частей главных приводов 5-клетевого стана 1700 и лабораторного стенда подтверждена техническая возможность и эффективность использования интеллектуальных регуляторов нечеткой логики при построении автоматизированных систем управления приводами. Установлено, что использование в системе управления автоматизированным электроприводом стана холодной прокатки регуляторов нечеткой логики позволяет снизить колебания токов якоря и связанные с этим потери мощности, по сравнению с ПИ-регулированием, в 13–28 раз.

6. Разработан и программно реализован на приводах непрерывного широкополосного стана 2000 и полунепрерывного комбинированного стана 2800/1700 ПАО «Северсталь» способ компенсации момента инерции двигателя постоянного тока, заключающийся в корректировке системы автоматизированного управления двигателем главного привода клетки таким образом, чтобы фактическое ускорение системы «двигатель–клеть» наиболее точно соответствовало заданному значению.

Реализация способа обеспечивает экономию электроэнергии, обеспечение надежности прокатного оборудования за счет снижения уровня бросков токов при разгоне стана, а также повышение стационарности

процесса прокатки за счет снижения уровня и продолжительности переходных режимов работы привода. Годовой экономический эффект от внедрения способа компенсации момента инерции в системах управления скоростными режимами непрерывных и полунепрерывных широкополосных станов составил более 10 млн руб. на 1 тонну проката. На способ получен патент Российской Федерации.

7. Предложено и внедрено в производство горячекатаного проката на стане 2800/1700 ПАО «Северсталь» решение по корректировке алгоритма работы автоматизированной системы управления петледержателем. Получен эффект по снижению расхода металла в среднем на 0,15 кг/т за счет уменьшения вытяжек передней части полосы от некорректной работы петледержателя, повышена энергоэффективность работы привода петледержателя за счет снижения токов нагрузки в момент подъема.

8. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 статичных 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, исключающая 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко С.П., Гудьер Д. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 575 с.
2. Чепуркин С.С. Закон Буссинеска и задача Герца при определении длины сплющенной дуги захвата // Изв. Вузов: Черная металлургия. – 1960. – № 7. – С. 89–98
3. Чепуркин С.С. Определение длины дуги захвата// Теория прокатки: Материалы конференции по теоретическим вопросам прокатки/ МЧМ СССР. – М.: Металлургиздат, 1962. – С. 322–329.
3. Динник А.А. Определение длины дуги контакта при прокатке листов и полос на гладких валках // Металлургия и коксохимия: Сб. науч. тр. ДМетИ. – Киев: Техника, 1970. – Вып. 23. – С. 56–59.
4. Определение сплющенной длины дуги захвата при листовой прокатке/ П.И. Полухин, В.А. Николаев, В.П. Полухин и др.// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1964. – № 7. – С. 125–131.
5. Николаев В.А. Модель расчета энергосиловых параметров при холодной прокатке полос // Металл и литье Украины. – 2006. – № 11, 12. – С.36–39.
6. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
7. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия. – 1995. – 368 с.
8. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справ. изд. Пер. с нем. – М.: Металлургия. – 1982. – 360 с.
9. Fleck N.A., Johncon K.L. Towards a new theory of cold rolling thin foil // International Journal of Mechanical Sciences. –1987. – No 29. – P. 507–524.

10. Lee W.H. Mathematical model for cold rolling and temper rolling process of thin steel strip // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2002. – No 16(10). – P.1296–1302.
11. Jortner D., Osterle J.F., Zorowski C.F. An analysis of cold strip rolling // International Journal of Mechanical Sciences. 1960. – No 2(3). – P.179–194.
12. Roberts W.L. Cold rolling of steel – New York: Marcell Dekker Inc. – 1978.
13. Liu Y., Lee W.H. Mathematical model for the thin strip cold rolling and temper rolling process with the influence function method // ISIJ International. – 2005. – No 45(8). – P. 1173–1178.
14. Freshwater I.J. Simplified theories of flatrolling – I. The calculation of roll pressure, rollforce and rolltorque // International Journal of Mechanical Sciences. – 1996. – No 38(6). – P. 633–648.
15. Аркулис Г.Э., Шварцман З.М., Файзуллин В.Х. и др. Автоколебания в стане холодной прокатки // Сталь. – 1972. – № 8. – С.727–728.
16. Пименов В.А. О причинах нарушения устойчивости холодной прокатки // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1990. – № 8. – С. 36–38.
17. Йепсен У.Н., Кнеппе Г.К., Роде В. Системное моделирование станов горячей и холодной прокатки на примере исследования вибраций в непрерывных станах холодной прокатки // Черные металлы. – 1996. – № 8. – С. 17–25.
18. Крот П.В. Исследование дефекта «ребристость» и высокочастотных колебаний станов холодной прокатки полос // Производство проката. – 2002. – № 3. – С. 21–23.
19. Рыбаков Ю.В., Субботин Г.Н. Определение источников вибрации, вызывающих явление резонанса на станах холодной прокатки // Производство проката. – 2002. – № 10. – С. 13–16.
20. Маркворт М. Поперечная волнистость холоднокатаной полосы // Черные металлы. – 1995. – № 4. – С. 50–59.

21. Гарбер Э.А., Наумченко В.П., Кожевников А.В. и др. Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов // Производство проката. – 2003. – № 1. – С. 10–12.
22. Alves P.G., Moreira L.P., deCastro J.A. Dynamic simulator for control of tandem cold metal rolling // ABCM Symposium Series in Mechatronics. – 2012. – No 5. – P. 39–48.
23. Lee W.H., Lee S.R. Computer simulation of dynamic characteristics of tandem cold rolling process // KSME International Journal. – 1999. – No 13(8). – P. 616–624.
24. Pittner J., Samaras N.S., Simaan M.A. A simple rolling mill model with linear quadratic optimal controller // 37th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – 2002. – No 1. – P. 142–149.
25. Синявский А.А. Совместная математическая модель электроприводов клетей непрерывного четырехклетевого прокатного стана и моталки // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – Випуск 4 (51). Частина 2. – С. 83–87.
26. Meshcheryakov V.N., Tolcheev V.M. Development of a method for reducing the dynamic loads of the electric drive of the roll stand of the cold rolling mill // Electrotechnical systems and complexes. – 2015. – No 28(3). – P. 14–19.
27. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке. / М.Я. Бровман. – М.: Metallurgiya, 1991. – 265 с.
28. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. / А.И. Целиков. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 494 с.
29. Павлов И.М. Уравнения характеристических углов α - β - γ , крутящего момента и работы прокатки при неравномерном распределении давления и сил трения // В сб. Процессы прокатки. Труды МИСИС. Сборник XL. – М.: Metallurgizdat, 1962. – С.15–24.
30. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. – М.: Metallurgiya, 1970. – 356 с.
31. Николаев В.А. Теория прокатки. – ЗГИА, 2007. – 228 с.

32. Смирнов В.С. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1967. – 460 с.
33. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства. – СПб.: Наука, 2005. – 540 с.
34. Кузнецов Л.А. Достижения теории и практики тонколистовой прокатки // Сталь. – 1988. – № 10. – С. 71–73.
35. Денисов П.И., Медведев Г.А., Шурыгин В.И., Медведев А.Г. Инженерный метод расчета параметров холодной прокатки стальных полос // Производство проката. – 2004. – № 9. – С. 19–27.
36. Астахов И.Г., Белосевич В.К., Ионов С.М. Расчет энергосиловых параметров и температур на непрерывном стане холодной прокатки // Пластическая деформация металлов и сплавов. Сб. тр. МИСиС № 150. – М.: Металлургия, 1983. – С. 31–36.
37. Бровман М.Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 256 с.
38. Гесслер Ю.В., Родинков С.В. Инженерная методика расчета усилия холодной прокатки тонких полос и лент // Производство проката. – 2004. – № 3. – С. 5–6.
39. Николаев В.А. Расчет усилий при холодной прокатке // Производство проката. – 2002. – № 6. – С. 5–8.
40. Железнов Ю.Д., Григорян Г.Г., Павлов И.М., Кузнецов Л.А. Алгоритм расчета параметров тонколистовой прокатки // Изв. Вузов: Черная металлургия. – 1973. – № 3. – С. 73–76.
41. Трайно А.И. Исследование и разработка ресурсосберегающих режимов производства листовой стали. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2009. – 40 с.
42. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). – Днепропетровск: РВА «Дніпро-VAL», 2010. – 500 с.

43. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. – М.: Metallurgia, 1972. – 512 с.

44 Коноводов Д.В. Развитие метода расчета контактных напряжений с учетом кинематики очага деформации для совершенствования режимов обжатий при холодной прокатке. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Днепропетровск, 2007. – 20 с.

45. Жуковский Н.Е. Кинематика, статика, динамика точки: унив. курс. – М.: УРСС, 2004. – 401 с.

46. Кожевников С.Н., Большаков В.И. Некоторые вопросы определения динамических нагрузок и выносливости главных линий прокатных станов // Модернизация и автоматизация оборудования прокатных станов. Тр. Днепропетр. ин-та черной металлургии. – М.: Metallurgia, 1967. – Т. 27. – С. 11–16.

47. Кожевников С.Н. Аппаратура и механизмы гидро-, пневмо- и электроавтоматики металлургических машин. – Киев: Машгиз, 1961. – 551 с.

48. Динамика машин: Сб. статей / Отв. ред. С.Н. Кожевников. – М.: Наука, 1974. – 215 с.

49. Кожевников С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах. – Киев: Наук. Думка, 1986. – 285 с.

50. Большаков В.И. Динамическое взаимодействие электропривода и механической системы с упругими связями // Модернизация и автоматизация оборудования прокатных станов. Тр. Днепропетр. ин-та черной металлургии. – М.: Metallurgia, 1967. – Т. 27. – С. 17–25.

51. Большаков В.И. Уравнения движения и электронное моделирование механических систем с зазорами и упругими связями. Модернизация и автоматизация оборудования прокатных станов. Тр. Днепропетр. ин-та черной металлургии. – М.: Metallurgia, 1967. – Т. 27. – С. 209–214.

52. Ленский А.К., Большаков В.И. Электронное моделирование соударений в механических системах // Известия вузов. Электромеханика. – № 2. – С. 213–214.

53. Кожевников С.Н., Скичко П.Я., Ленский А.Н., Большаков В.И., Лепа И.И. Опыт исследования динамики главных приводов прокатных станов с учётом упругих связей и зазоров // Динамика металлургических машин: Труды ИЧМ. – М.: Металлургия, 1967. – Т.31. – С.5–13.

54. Большаков В.И. О математическом описании и некоторых особенностях работы замкнутых механических систем // Модернизация и автоматизация оборудования прокатных станов. Тр. Днепропетр. ин-та черной металлургии. – М.: Металлургия, 1967. – Т. 31. – С. 13–17.

55. Большаков В.И. Технологические нагрузки листопркатных станов // Динамика металлургических машин: Труды ИЧМ. – М.: Металлургия, 1967. – Т. 31. – С. 64–67.

56. Крылов А.Н. О приближенном численном решении обыкновенных дифференциальных уравнений: [Доклад проф. А.Н. Крылова, почетн. чл. Союза, чит. 14 июня 1917 г.] / Проф. А.Н. Крылов. – Петроград: тип. Э.Ф. Мекса, 1917. – 43 с.

57. Введение в механику и динамика точки: Лекции орд. проф. Н.Е. Жуковского. – Москва: лит. О-ва распространения полез. кн., 1898/9. – 285 с.

58. В.В. Веренев, В.И. Большаков, А.Ю. Пунтоки, А.А. Коринь, С.В. Мацко. Диагностика и динамика прокатных станов. Монография. Днепропетровск: ИМА-пресс. – 2007. – 144 с.

59. Большаков В.И., Веренев В.В., Юнаков А.М. Развитие промышленных исследований динамических процессов в прокатных станах // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 4 (33). – С. 237–241.

60. В.В. Веренев Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах. Никополь: СПД Фельдман О.О., 2014. – 203 с.

61. В.В. Веренев Динамические процессы в полосовых станах холодной прокатки. Монография. – Д.: ЛИРА, 2015. – 112 с.

62. В.В. Смирнов, Р.А. Яковлев Механика приводов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1977. – 216 с.

63. Иванченко Ф.К., Полухин П.И., Тылкин М.А., Полухин В.П. Динамика и прочность прокатного оборудования. – М.: Металлургия, 1970. – 486 с.
64. Адамия Р.Ш. Оптимизация динамических нагрузок прокатных станков – Москва: Металлургия, 1978. – 232 с.
65. Адамия Р.Ш., Лобода В.М. Основы рационального проектирования металлургических машин (динамические расчеты и синтез структурных схем). – М.: Металлургия, 1984. – 128 с.
66. Коцарь С.Л., Третьяков В.А., Цупров А.Н., Поляков Б.А. Динамика процессов прокатки. – М.: Металлургия, 1997. – 255 с.
67. Кузнецов Б.И. Динамические характеристики главных электроприводов прокатных станков с синхронными двигателями с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл / Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Проблемы автоматизованого электроприводу. Теорія і практика. № 28 – Вестник НТУ "ХПИ", 2010. – С. 281–282.
68. Riccati J. F. Anim adversationes in aequationis differentialis secundi gradus. Acta Eruditorum Quae Lipsiae Publicantur, 1724. Supplementa 8.
69. Зеликин М.И. Однородные пространства и уравнение Риккати в вариационном исчислении. – М.: Факториал, 1998.
70. Анализ динамических нагрузок главного электропривода клетки стана горячей прокатки /Задорожний Н.А., Переходченко В.А., Задорожня И.Н., Литвинов О.А. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Проблемы автоматизованого электроприводу. Теорія і практика. № 28. – Вестник НТУ "ХПИ". С. 224–226.
71. Задорожний Н.А. Принцип электромеханической совместимости в приводах машин с упругими механическими связями // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ». – 1999. – Вип. 61. – С. 123–124.

72. Борисов А.А., Минтус А.Н. Автоматическое управление главным приводом первой клетки листопрокатного стана с регулированием мощности двигателя // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – № 10 (180). – 2011. – С.23–28.

73. Тимошенко Э.В., Самецкий А.А. Синтез систем управления параметрами полос при холодной прокатке. – К.: НВК «КІА», 1999. – 264 с.

74. Поваляев В.Д., Дмитриченко А.А. Оптимизация параметров главного привода прокатного стана с целью стабилизации скоростной асимметрии рабочих валков в нестационарном процессе прокатки // Машинознавство / Матеріали 11-ої регіональної науково-методичної конференції. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С. 55–57.

75. Большаков В.И., Поздняков В.П. Результаты и новые задачи исследований нагрузок приводов клеток тонколистового стана 1680 горячей прокатки // Защита металлургических машин от поломок. Межвуз. темат. сб. науч. тр. – Мариуполь, 2000. – Вып. 5. – С. 27–33.

76. Большаков В.И., Поздняков В.П. Пути уменьшения динамических нагрузок приводов клеток тонколистового стана горячей прокатки // Сталь. – 2003. – № 10. – С. 37–37.

77. Крот П.В. Система мониторинга механических нагрузок стана горячей прокатки 1680 по токовым нагрузкам электроприводов / Крот П.В., Соловьев К.В., Коренной В.В., и др. // Сб. научных трудов НГУ. – № 19, т.5. – Днепропетровск: Нац. горный университет, 2004. – С. 71–76.

78. Крот П.В. Система мониторинга динамических нагрузок в линиях привода станов горячей прокатки // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы механического привода. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2011. – № 29. – С. 68–81.

79. Тимошенко А.В. Исследование ресурса электромеханического оборудования на основе математического моделирования переходных процессов в электроприводах прокатных станов с однотономным регулированием скорости / А.В. Тимошенко, А.А. Пушкин // Захист

металургійних машин від поломок: зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2008. – Вип. 10. – С. 30–36.

80. Вышинский В.Т., Рахманов С.Р., Удовик П.В. Динамика нестационарных процессов холодной прокатки труб // Автоматизация виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. – Вип. 45. – С. 178–185.

81. Назарова Е.С. Оптимальное управление взаимосвязанными электроприводами стана холодной прокатки / Е.С. Назарова, В.И. Бондаренко, А.В. Пирожок // Электротехн. та комп'ют. системи. – 2011. – Вип. 3. – С. 216–217.

82. Назарова Е.С. Учет эффекта обрыва прокатываемой полосы при моделировании электроприводов двух смежных клеток стана холодной прокатки / Е. С. Назарова, А. В. Пирожок, А. С. Нечпай, П. А. Подпружников // Электротехніка та електроенергетика. – 2011. – № 2. – С. 37–41.

83. Назарова Е.С. К вопросу разработки систем диагностирования электромеханических систем станов холодной прокатки // Электротехніка та електроенергетика. – 2013. – № 1. – С. 36–41.

84. Швидченко Н.В., Лукьянов С.И. Система управления электроприводом отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 95–99.

85. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Математическая модель системы управления главным электроприводом прокатной клетки // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – Вып. 2. – С. 408–424.

86. Мещеряков В.Н., Мигунов Д.В. Математическое моделирование способа снижения динамических нагрузок электропривода черновой клетки прокатного стана // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – № 3. – С. 21–26.

87. Давильбеков Н.Х., Курапов Г.Г., Какимов У.К. Динамика прокатных станов // Труды 2-ой международной научно-практической конференции

«Горное дело и металлургия в Казахстане. Состояние и перспективы». – Алматы, 2006. – С. 351–354.

88. Давильбеков Н.Х., Курапов Г.Г., Какимов У.К. Исследование особенности динамики прокатных станов в лабораторных условиях // Вестник КазНТУ. – 2005. – № 5. – С. 28–33.

89. Давильбеков Н.Х., Курапов Г.Г., Какимов У.К. Снижение динамических нагрузок на реверсивных станах холодной прокатки // Научно-технический сборник «Новости науки Казахстана», Алматы. – 2006. № 5 – С. 45–49.

90. Давильбеков Н.Х., Курапов Г.Г., Какимов У.К., Бортебаев С.А. Снижение динамических нагрузок прокатных станов // Вестник КазНТУ. – 2006. – № 5. – С. 59–65.

91. Селиванов И.А. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 5–11.

92. Карандаев А.С. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 12–20

93. Храмшин В.Р. Система автоматической коррекции скоростей электроприводов клеток широкополосного стана горячей прокатки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». Вып. 18. Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУр-ГУ». – 2012. – № 37 (296). – С. 60–67.

94. Храмшин В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клеток широкополосного стана горячей прокатки // Электротехника. – 2013. – № 4 – С. 48–55.

95. Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Алгоритмы цифровой системы автоматического регулирования натяжения и петли широкополосного стана горячей прокатки // Электротехника. – 2013. – № 10 – С. 3–11.

96. Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, А.Н. Гостев // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 1. – С. 98–103.

97. Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Совершенствование электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров широкополосных станов горячей прокатки при расширении сортамента полос // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – № 1 (22). – С. 22–31.

98. Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. – 2014. – № 1. – С. 129–136.

99. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: Металлургия, 1967. – 259 с.

100. Челюсткин А.Б. Автоматизация процессов прокатного производства. – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.

101. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1977. – 392 с.

102. Афанасьев В.Д. Автоматизированный электропривод в прокатном производстве. – М.: Металлургия, 1977. – 279 с.

103. Синявский А.А. Совместная математическая модель электроприводов клетей непрерывного четырехклетевого прокатного стана и моталки // ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ І МОДЕЛЮВАННЯ. Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – Випуск 4 (51). Частина 2. – С. 83–87.

104. Пирожок А.В., Супрун А.А., Супрун Ю.А. Имитационные модели электромеханических процессов тонколистового стана холодной прокатки // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. – №2. – С. 34–42.

105. Мокрый Г.В., Борисов О.О. Моделирование динамики листопркатного стана і оптимізація управління процесом прокатки // Наукові праці ДонНТУ Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2006. – Вип. 74. – С. 14–18.
106. Жуков С.Ф., Шамрай А.А. Синтез динамической линейризованной модели клетки непрерывного стана холодного проката // Техн. електродинаміка. Тем. випуск: Електропривод. – 2006. – С. 48–53.
107. Назарова Е.С., Пирожок А.В., Супрун Ю.А. Имитационные модель механического движения металла для реверсивного одноклетьевого стана холодной прокатки // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 8–14.
108. Андронов А.А. Математические проблемы теории автоколебаний // Собр. трудов. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – С. 85–124.
109. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. Изд. 2-е, перераб. и дополн. Н.А.Железцовым. – М: Физматгиз, 1959.
110. Андронов А.А. Л.И. Мандельштам и теория нелинейных колебаний // Изв. АН СССР. Сер. физич. – 1945. – Т. IX, № 1–2. – С. 30–65.
111. Yarita I., Furukawa K., Seino Y. An analysis of chattering in cold rolling of ultrathin gauge steel strip. (1978) Transactions ISIJ 19 (1) 1-10.
112. Chefneux L., Fischbach J.-P., Gouzou J. Study and control of chatter in cold rolling. (1980) Iron and Steel Engineer 17–26.
113. Пименов В.А. О причинах нарушения устойчивости холодной прокатки// Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1990. – № 8. – С. 36–38.
114. Hu P.H., Ehmman K.F. Stability Analysis of Chatter on a Tandem Rolling Mill // International Journal of Manufacturing Processes. – 2000. – № 4. – P. 217–224.
115. Hardwick B.R. A technique from the detection and measurement of chatter marks on rolls surfaces // Steel Technology. – 2003. – No. 4. – P. 64–70.

116. Kimura Y., Sodani Y., Nishiura N., Ikeuchi N. and Mihara Y. Analysis of Chatter in Tandem Cold Rolling Mills, ISIJ International. – 2003. – Vol. 43, No. 1. – P. 77–84.

117. Pryhodko I.Y., Krot P.V. et al. Vibration monitoring system and the new methods of chatter early diagnostics for tandem mill control, Proc. of Int. Conf. “Vibration in rolling mills”, Inst. of Materials, Minerals and Mining, London, UK, 9th November, P. 87–106, 2006.

118. Valigi M. C., Papini S. Chatter in a S6-high rolling mill. XXI Congresso AIMETA, Torino, Italy, 17–20 September, 2013.

119. Keintzel G., Pröll C., Krimpelstätter K. Elimination of mill chatter vibration in cold rolling successful pilot installation. METEC&2ndESTAD 2015, Germany, Düsseldorf, 15–19 June, 2015.

120. Niroomand M.R., Forouzan M.R., Fasihfar M., Salimi M. Chattering Control Based Algorithm for Nonlinear Optimization of 5-Stands Cold Strip Rolling Process Parameters // Steel research int. 81. – 2010. – No. 9. – P. 162–165.

121. Niroomand M.R., Forouzan M.R., Salimi M. Prediction of Surface Quality due to Chatter Vibration in Rolling of Thin Steel Strip Using ALE Finite Element Method // Key Engineering Materials. – 2011. – Vol. 473. – P. 572–578.

122. Heidari A., Forouzan M.R., Niroomand M.R. Development and evaluation of friction models for chatter simulation in cold strip rolling // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. February, 2018 DOI: 10.1007/s00170-018-1658-x

123. Niroomand M.R., Forouzan M.R., Heidari A. Experimental analysis of vibration and sound in order to investigate chatter phenomenon in cold strip rolling // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. 100:673–682 <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2639-9>

124. Liu Xiaochan, Zang Yong, Gao Zhiying, Zeng Lingqiang Multidirectional regenerative chatter model of tandem rolling mills and its application // Journal of Central South University (Science and Technology). – 2017. – Vol. 48, №. 3. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.03.011

125. Xiaochan Liu, Yong Zang, Zhiying Gao, and Lingqiang Zeng Time Delay Effect on Regenerative Chatter in Tandem Rolling Mills // Shock and Vibration. Volume 2016, Article ID 4025650, 15 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4025650>

126. Xing Lu, Jie Sun, Guangtao Li, Zhenhua Wang, and Dianhua Zhang Stability Analysis of a Nonlinear Coupled Vibration Model in a Tandem Cold Rolling Mill // Shock and Vibration. Volume 2019, Article ID 4358631, 14 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/4358631>

127. Макаров Ю.Д., Белоглазов Е.Г., Недорезов И.В. и др. Исследование параметров процесса холодной прокатки перед началом вибраций на непрерывном стане // Сталь. – 2008. – № 12. – С. 92–95.

128. Аркулис Г.Э., Шварцман З.М., Файзуллин В.Х. и др. Автоколебания в стане холодной прокатки // Сталь. – 1972. – № 8. С. 727–728.

129. Федоров П.Ф., Носов В.Л., Уруймагов А.Д. и др. Определение технического состояния клеток стана 2500 ОАО ММК по результатам исследования добротности колебаний валковой системы // Производство проката. – 2002. – № 5. – С. 20–22.

130. Колпаков С.С., Пименов В.А., Цуканов Ю.А., Рубанов В.П. Исследование вибраций на пятиклетевом стане 2030 // Сталь. – 1993. – № 1. – С. 47–51.

131. Пименов В.А., Колпаков С.С., Рубанов В.П. и др. Система автоматического диагностирования вибраций и управления скоростным режимом на стане 2030 холодной прокатки // Производство проката. – 1998. – № 1. – С. 29–33.

132. Гарбер Э.А., Наумченко В.П., Кожевников А.В. и др. Исследование причин возникновения колебаний в клетях непрерывных прокатных станов // Производство проката. – 2003. – № 1. – С. 10–12.

133. Веренев В.В., Кукушкин О.Н., Зиновьев Е.Г. Влияние динамических процессов в оборудовании полосовых станов на качество

проката и выход годного: Обзор по системе Информсталь. – М.: Ин-т «Черметинформация», 1990. – Вып. 4 (361). – 33 с.

134. Ubici E., Borda M., Klemnow A., Piñeyro J. Identification and Countermeasures to Resolve Hot Strip Mill Chatter // AISE Steel Technology. – 2001. – P. 48–52.

135. Колбасников Н.Г., Демидов А.И. Кавитация и разрушение смазочно-охлаждающей жидкости – причина возникновения вибраций клетей станов холодной прокатки и появления дефекта «ребристость полосы» // Металлообработка. – 2004. – № 2. – С. 12–16.

136. Синицкий В.М., Рыбаков Ю.В. Стальная полоса в межвалковом пространстве стана холодной прокатки как колебательная структура // Производство проката. – 2002. – № 5. – С. 18–20.

137. Ананьевский М.Г., Беньковский М.А., Сергеев Е.П. и др. Ребристость на поверхности автомобильного листа // Сталь. – 1973. – № 9. – С. 820–824.

138. Лица И.И., Логинова К.С., Мазур В.Р. и др. Причины возникновения и пути устранения дефекта «ребристость» на поверхности холоднокатаных полос // Сталь. – 1978. – № 7. – С. 634–635.

139. Гарбер Э.А., Наумченко В.П., Абраменко В.И. и др. Влияние конструктивных параметров валковых узлов ШПС на вибрации рабочих клетей и ребристость холоднокатаных полос // Производство проката. – 2001. – № 4. – С. 20–25.

140. Гарбер Э.А., Павлов С.И., Тимофеева М.А., Кузнецов В.В., Кожевников А.В. Устранение дефектов поверхности холоднокатаных листов, вызванных вибрациями рабочих клетей / Труды второй международной научно-технической конференции, посвященная 110-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР Павлова Игоря Михайловича «Павловские чтения». – Москва, 2010 г., ИМЕТ РАН. – С. 184–196.

141. Крот П.В. Исследование дефекта «ребристость» и высокочастотных колебаний станов холодной прокатки полос // Производство проката. – 2002. – № 3. – С. 21–23.

142. Сеницкий В.М., Рыбаков Ю.В. Крутильные колебания шпинделей и вибрации клетей станов холодной прокатки с независимым приводом рабочих валков // Производство проката. – 2004. – № 10. – С.23–26.

143. Справочник машиностроителя. В 6-ти т. / Под редакцией академика АНУССР С.В. Серенсена. – М.: Машгиз, 1962. Т.3.

144. Сеницкий В.М., Рыбаков Ю.В. Резонансные колебания валковой системы в клетке стана и критическая скорость прокатки // Производство проката. – 2004. – № 8. – С.8–10.

145. Гарбер Э. А. Расчет энергосиловых параметров широкополосных станов холодной прокатки// Сталь. – 1998. – № 9. – С. 37–41.

146. Гарбер Э.А., Наумченко В.П., Кузнецов В.В. Анализ устойчивости рабочих валков непрерывного стана «кварто» // Производство проката. – 2000. – № 12. – С. 9–14.

147. 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. 79–82.

148. 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.

149. Харахнин К.А., Кожевников А.В., Маслов Е.А. Разработка алгоритма идентификации вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки // Сталь. – 2010. – № 10. – С. 38–40.

150. Маслов Е.А., Харахнин К.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. 36–39.

151. Голованов П.Н., Степаненко В.В., Верхорубов А.А., Павлов С.И. Способ определения вибраций на станах прокатки полосы. Патент РФ № 2239501, кл. В 21 В 37/00, 2004.
152. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке. – М.: Metallurgia, 1991. – 265 с.
153. Павлов И.М. Уравнения характеристических углов $\alpha-\beta-\gamma$, крутящего момента и работы прокатки при неравномерном распределении давления и сил трения // В сб. Процессы прокатки. Труды МИСИС. Сборник XL. – М.: Metallurgizdat, 1962. – С.15–24.
154. Garber E.A., Nikitin D.I., Shadrunkova I.A., Traino A.I. Calculation of the cold-rolling power with allowance for the variable work of friction along a deformation zone // Russian Metallurgy. – 2003. – No 4. – P. 340–346.
155. Химич Г.Л., Цалюк Б.М. Оптимизация режимов холодной прокатки на ЭЦВМ. – М.: Metallurgia, 1973. – 253 с.
156. Румянцев М.И. К вопросу учета ограничения по деформируемости металла при разработке режимов холодной прокатки // Калибровочное бюро. – 2014. – № 4. – С. 33–43.
157. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). – М.: ОАО «Черметинформация», 2004. – 416 с.
158. Румянцев М.И. Методика разработки режимов листопрокатки и ее применение // Вестник МГТУ. – 2003. – № 3. – С. 16–18.
159. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Митасов В.С., Горбунов А.В., Насонов В.В. Особенности реализации системы автоматизированного проектирования для разработки режимов холодной прокатки // Теория и технология металлургического производства. – 2011. – № 11. – С. 208–213.
160. 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.

161. 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.

162. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V. Analysis of parametric sensitivity and structural optimization of modal control systems with state controllers // Journal of Computer and System Sciences International. – 2011.– No 5. – P. 698–719.

163. Aschemann H., Minisini J., Rauh A. Interval arithmetic techniques for the design of controllers for nonlinear dynamical systems with applications in mechatronics // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2010. – Vol. 49, No. 5. – P. 683–695.

164. Apolonskii V.V., Tararykin S.V. Methods for the synthesis of reduced state controllers of linear dynamic systems // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – Vol. 53, No. 6. – P. 799–807.

165. Кочнева Т.Н., Кожевников А.В., Кочнев Н.В. Модальное управление электромеханическими системами в металлургии // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 1 (45). Т.1 – С. 14–19.

166. Кожевников А.В., Кочнева Т.Н., Кочнев Н.В. Модальное управление с автонастройкой регулятора в линеаризованных двухмассовых электромеханических системах // Проблемы управления. – 2015. – № 6. – С. 2–9.

167. Кожевников А.В. Оптимизация автонастройки модальных регуляторов электроприводов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 5 (66). – С. 17–20.

168. Кожевников А.В. Применение метода модального управления для повышения стабильности работы электромеханических систем прокатного производства // Производство проката. – 2013. – № 11. – С. 35–39.

169. Кочнева Т.Н., Кожевников А.В., Кочнев Н.В. Критериальная идентификация параметров переходных режимов электромеханических систем в прокатном производстве // Производство проката. – 2017. – № 5. – С. 31–38.

170. Пономарева А. Г., Гордеев Е. В., Евтушенко И. Ю. и др. Влияние параметров эмульсии на чистоту поверхности проката // Сталь. – 2013. – № 12. – С. 28–30.

171. Булыжев Е. М., Кокорин В. Н., Титов Ю. А. и др. Прокатка листового металла. Технологическое обеспечение процесса прокатки. Новое поколение высокоэффективных систем очистки больших объемов водных технологических жидкостей и стоков. Часть 1: Техника и технология холодной (горячей) прокатки листового металла. Концепция и методология расчета и проектирования ресурсосберегающих и экологизированных систем очистки: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 186 с.

172. Патент на изобретение RU 2465080 C1 МПК В 21 В 1/28. Способ производства холоднокатаных полос на четырехклетевом непрерывном стане 2500 / Кочнева Т.М., Малова Н.И., Крюков Д. М. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». – опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30.

173. Smeulders J.B.A.F., Zhu B., Song Z. et al. Friction and surface microstructure in steel cold rolling investigated in pilot mill trials // Iron and Steel Technology. – 2018. – Vol. 15. No 2. – P. 60–68.

174. Робертс В.Л. Холодная прокатка стали. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982. – 544 с.

175. Кожевникова И.А., Гарбер Э.А. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов: Монография. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2010. – 275 с.

176. Гарбер Э.А., Павлов С.И., Кожевникова И.А. и др. Повышение качества поверхности листовой стали на основе новых решений в теории

холодной прокатки // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2010. – № 2. – С. 116–126.

177. Крот П.В. Исследование дефекта «ребристость» и высокочастотных колебаний станов холодной прокатки полос // Производство проката. – 2002. – № 3. – С. 21–23.

178. Праздников А. В., Лица И. И., Логинова К. С., Качайлов А. П. Пути устранения ребристости на поверхности холоднокатаных листов // Metallurgical and Mining Industry. – 1976. – № 2. – С. 18–21.

179. Гарбер Э.А., Наумченко В.П., Кузнецов В.В. Анализ устойчивости рабочих валков в клетях кварто широкополосных станов // Производство проката. – 2000. – № 12. – С.9–13.

180. Кортс Й., Валь Курран Л. Высокостойкие прецизионные плоские направляющие для прокатных клетей // Черные металлы. – 2002. – № 8. – С. 27–31.

181. Петров В.Д., Голкин Ю.Е., Сабельников Ю.А., Захаров Л.А., Левыкин Г.В. Повышение устойчивости положения рабочих валков дрессировочных станов // Сталь. – 2001. – № 2. – С. 36–38.

182. Гризер Ф., Вебер Ф., Павельски О. Влияние микрогеометрии поверхности рабочих валков на качество холоднокатаной стальной полосы // Черные металлы. – 1984. – № 13. – С.11–19.

183. 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 [Текст] // Metallurgy: technologies, innovations, quality: proceedings of the XIX International scientific-practical conference: В 2 ч. Ч. 2 / Sib. gos. industr. un-t; под ред. Е.В. Протопопова. – Новокузнецк, Изд. центр СибГИУ. – 2015. – С. 140–143.

184. Alves P.G., Moreira L.P., de Castro J.A. Dynamic simulator for control of tandem cold metal rolling // ABCM Symposium Series in Mechatronics. – 2012. – No 5. – P. 39–48.

185. Lee W.H., Lee S.R. Computer simulation of dynamic characteristics of tandem cold rolling process // KSME International Journal. – 1999. – No 13 (8). – P. 616–624.

186. Pittner J., Samaras N.S., Simaan M.A. A simple rolling mill model with linear quadratic optimal controller // 37th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – 2002. – No 1. – P.142–149.

187. Meshcheryakov V.N., Tolcheev V.M. Development of a method for reducing the dynamic loads of the electric drive of the roll stand of the cold rolling mill // Electrotechnical systems and complexes. – 2015. – No 28 (3). – P. 14–19.

188. Kozhevnikov A., Kozhevnikova I., Bolobanova N. Dynamic model of cold strip rolling // METALURGIJA. – 2018. – Vol. 57. No. 1–2. – P. 99–102.

189. Kozhevnikov A. V., Kozhevnikova I. A., Bolobanova N. L. Simulation of cold-rolling process in dynamic conditions // Metallurgist. – 2017. – Vol. 61. No. 7–8. – P. 519–522.

190. Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л. Моделирование процесса холодной прокатки в динамических условиях // Metallurg. – 2017. – № 7. – С. 15–18.

191. 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.

192. Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л. Математическое моделирование процесса холодной прокатки в условиях нестационарности и стохастичности технологических параметров // Информатика и кибернетика. – 2017. – № 2 (8). – С. 58–64.

193. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. / Под общ. ред. М. Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.

194. Пятибратов Г.Я. Методология комплексного исследования и проектирования электромеханических систем управления усилиями в упругих передачах механизмов / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т.– Новочеркасск, 1999.– 154 с. – Деп. в ВИНТИ 29.06.99, № 2119–В99.
195. Пятибратов Г.Я., Барыльник Д.В, Моделирование электромеханических систем. Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т.– Новочеркасск: ЮРГПУ, 2013.– 103 с.
196. Чиликин М.Г., Ключев, В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
197. Степанов А.Г. Динамика машин. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 304 с.
198. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2005. – 300 с.
199. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. – 392 с.
200. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. – М.: Metallurgia, 1972. – 512 с.
201. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: Metallurgia, 1967. – 259 с.
202. Кожевников А.В., Белкова С.В. Имитационная модель механической части двух смежных клеток непрерывного стана холодной прокатки // Сталь. – 2012. – № 5. – С. 55–60.
203. Белкова С.В., Кожевников А.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.

204. Денисова А.В. Применение операторного метода и метода переменных состояния для расчета переходных процессов: Методические указания. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 105 с.
205. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 1; т. 2. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.; 416 с.
206. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1986. – 544 с.
207. Кожевников А.В., Белкова С.В. Имитационная модель двухякорного электродвигателя постоянного тока для главного привода непрерывного стана холодной прокатки // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 3 (32). Т.2 – С. 5–9.
208. Кожевникова И.А., Гарбер Э.А. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2010. – 275 с.
209. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Теория прокатки. – Череповец: ЧГУ; М.: Теплотехник, 2013. – 305 с.
210. Garber E.A., Shadrunkova I.A., Traino A.I., Yusupov V.S. Analysis of a deformation zone and the refined calculation of the forces for cold rolling of strips thinner than 0.5 mm in a continuous mill // Russian Metallurgy. – 2002. – No 4. – P. 300–315.
211. Garber E.A., Nikitin D.I., Shadrunkova I.A., Traino A.I. Calculation of the cold-rolling power with allowance for the variable work of friction along a deformation zone // Russian Metallurgy. – 2003. – No 4. – P. 340–346.
212. Зайков М.А., Полухин В.П., Зайков А.М., Смирнов Л.Н. Процесс прокатки. – М.: МИСИС, 2004. – 639 с.
213. Прокатное производство. Справочник под ред. Е.С. Рокотяна. Том 1. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 743 с.
214. Бровман М.Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки. – М.: Metallurgiya, 1995. – 256 с.

215. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). – Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2010. – 498 с.
216. Бровман М.Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки. – М.: Metallurgy, 1995. – 256 с.
217. Бровман М.Я., Полухин В.П., Кожевников А.В. Определение опережения при листовой прокатке // Сталь. – 2013. – № 7. – С. 37–42.
218. Бровман М.Я. Расчет точности прокатки. В сб. Metallurgical machine building. – 1966. – № 4. – С. 40–41.
219. Edwards V.J., Fuller N.A. Influence of strip velocity on tandem cold rolling mill performance // Automation of tandem mills. – 1973. – P.213–244.
220. Бровман М.Я. Влияние сплющивания валков на усилия при прокатке толстых листов./ Теория и практика производства толстолистовой стали. Тематический отраслевой сборник. М.: Metallurgy, 1982. – С. 10–14.
221. Кожевников А.В. Исследование возможных колебаний опережения при листовой прокатке // Производство проката – № 5. – 2013. – С. 2–8.
222. Кожевникова И.А., Кожевников А.В., Волков В.Н. Динамическая корректировка опережения при холодной прокатке полос // Производство проката. – 2017. – № 10. – С. 32–34.
223. Кожевникова И.А., Маркушевский Н.А., Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Моделирование и аналитическая диагностика вибраций в главных приводах станков холодной прокатки // Производство проката. – 2016. – № 7. – С. 19–23.
224. 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.
225. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. – СПб, 1997. – 250 с.

226. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

227. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1991. – 256 с.

228. 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.

229. 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.

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

231. Гарбер Э.А., Гончарский А.А., Петров С.В., Кузнецов В.В. Определение коэффициента трения при холодной прокатке с эмульсиями // *Производство проката.* – 2000. – № 12. – С. 2–3.

232. 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. doi: 10.32339/0135-5910-2020-1-54-58

233. Kozhevnikov A.V., Shalaevsky D.L., Smirnov A.S. 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.

234. Kozhevnikova I.A., Bolobanova N.L., Kozhevnikov A.V. Cold Rolling with Vibration of the Working Rollers // *Steel in Translation.* – 2017. – Vol. 47. No. 10. – P. 695–698.

235. Праздников А. В., Леепа И. И., Логинова К. С., Качайлов А. П. Пути устранения ребристости на поверхности холоднокатаных листов // *Металлургическая и горно-рудная промышленность.* – 1976. – № 2. – С. 18–21.

236. Кортс Й., Валь Курран Л. Высокостойкие прецизионные плоские направляющие для прокатных клетей // *Черные металлы.* – 2002. – № 8. – С. 27–31.

237. Петров В.Д., Голкин Ю.Е., Сабельников Ю.А., Захаров Л.А., Левыкин Г.В. Повышение устойчивости положения рабочих валков дрессировочных станов // *Сталь.* – 2001. – № 2. – С. 36–38.

238. Гарбер Э.А., Наумченко В.П., Абраменко В.И. и др. Исследование причин образования ребристости на поверхности холоднокатаных полос // *Бюллетень «Черная металлургия».* – 2001. – №1. – С. 16–19.

239. Гризер Ф., Вебер Ф., Павельски О. Влияние микрогеометрии поверхности рабочих валков на качество холоднокатаной стальной полосы // *Черные металлы.* – 1984. – № 13. – С. 11–19.

240. Кожевникова И.А., Болобанова Н.Л., Кожевников А.В. Исследование влияния вибраций рабочих валков на качество холоднокатаных полос на основе численного моделирования // *Производство проката.* – 2017. – № 12. – С. 19–21.

241. Моландер М., Столь Р., Рюбинг П. Способ и система для демпфирования вибраций и управления формой подвешенной металлической полосы, Патент РФ № 2493926, кл. В21С 47/34 (2006.01), В21В 37/00 (2006.01), В65Н 20/00, 27.09.2013, Бюл. №27.

242. Кайнтцель Г., Хоенбихлер Г. Способ и устройство для подавления вибраций в прокатном стане, Патент РФ № 2503512, кл. В21В37/00, 10.01.2014, Бюл. №1.

243. Кожевникова И.А., Кочнев Н.В., Кожевников А.В. Идентификация автоколебаний в клетях прокатных станов на основе статистического анализа

токовых нагрузок // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017/ – № 4 (79). – С. 21–26.

244. 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. 7–9.

245. Кожевникова И.А. Идентификация автоколебаний в клетях прокатных станов на основе статистического анализа технологических параметров // Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017: Материалы III Международной научной конференции. Череповец: Череповецкий государственный университет. – 2017. – С. 147–153.

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

247. 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.

248. Kozhevnikova I.A., Kozhevnikov A.V., Sorokin G.A. and Markushevskii N.A. Damping of vibrations in the primary drives of cold-rolling mills // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46. No. 10. – P. 739–741.

249. Вялышев А. Шум вокруг нас // Наука и жизнь. – 2006. – № 4. – С. 80–85.

250. Sound of silence is out of phase // New Scientist. – 1977. – Nov. 17.

251. Долматов А.П., Скороходов В.Н., Настич В.П., Чеглов А.Е. Автоматизированное проектирование и реализация технологии холодной прокатки электротехнической стали. – М.: Наука и технологии, 2000. – 448 с.

252. Румянцев М.И. К вопросу учета ограничения по деформируемости металла при разработке режимов холодной прокатки // Калибровочное бюро. – 2014. – № 4. – С. 33–43.

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

254. 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.7–11.

255. Скороходов А.Н. Оптимизация прокатного производства. – М.: *Металлургия*, 1983. – 432 с.

256. Генкин А.Л. Моделирование и оптимизация процесса горячей прокатки полос. – М.: *ЛЕНАНД*, 2012 – 170 с.

257. Zamani D., Golshan A., Dini G., Ismarrubie Z.N., Azmah Hanim M.A., Sajuri Z. Optimization of Cold Rolling and Subsequent Annealing Treatment on Mechanical Properties of TWIP Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2017. – Vol. 26, Issue 8. P. 3666–3675.

258. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Митрофанов А.В. Оптимизация технологического режима широкополосного стана горячей прокатки по критерию «минимум расхода электроэнергии» // *Механическое оборудование металлургических заводов*. – 2016. – №1 (6). – С. 3–9.

259. Garber E.A., Aleshin A.E., Degtev S.S., Traino A.I. Optimization of the technological and thermal conditions in a reversing cold rolling mill // *Russian metallurgy (Metally)*. – 2015. – Т. 2015. № 1. – P. 30–35.

260. Garber E.A., Nikitin D.I., Shadrunkova I.A., Traino A.I. Calculation of the cold-rolling power with allowance for the variable work of friction along a deformation zone // *Russian Metallurgy*. – 2003. – № 4. – P. 340–346.

261. Ćurčija D., Mamuzić I. Optimisation Process of Strip Cold Rolling // *Metalurgija*. – 2005. – Vol. 44. № 3. – P. 221–226.

262. Malik A. S. Rolling mill optimization using an accurate and rapid new model for mill deflection and strip thickness profile, Wright State University, Dayton, USA, 2007 (PhD thesis).

263. Mehdi Safari, Mohammad reza Moghoomi Optimization of Force and Power Imposed on Continuous Tandem Cold Rolling Rollers Using a Multiple-Function Genetic Algorithm // Open Access Library Journal. – 2015. – Vol. 02. No 4. – Article ID:68341, 13 pages.

264. A. Kozhevnikov, V. Volkov Determining the Energy Expenditures in Continuous Cold Rolling // Steel in Translation. – 2018. – Vol. 48. No. 4. – P. 252–255.

265. Кожевников А.В., Волков В.Н. Развитие математического аппарата для определения затрат энергии при непрерывной холодной прокатке // Сталь. – 2018. – № 7. – С.33 – 35.

266. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Митрофанов А.В., Мишнев П.А., Огольцов А.С. Разработка и промышленные исследования энергоэффективных режимов горячей прокатки широких стальных полос // Черная металлургия. – 2016,. – № 5. – С. 38–43.

267. Кузнецов В.В., Гарбер Э.А., Юсупов В.С., Шалаевский Д.Л., Технологические особенности производства холоднокатаного автомобильного листа из новой коррозионностойкой экономнолегированной стали с ВН-эффектом // Производство проката. – 2007. – № 11. – С. 9–12.

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

269. Shalaevsky D.L., Kozhevnikov A.V. Computer-Aided Design (CAD) of Energy-Efficient Cold Rolling Technology // Steel in Translation. – 2020. – Vol. 50. No. 1. – P. 36–41.

270. 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.

271. 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.

272. 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.

273. 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.

274. 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.

275. Kozhevnikov, A.V., Smirnov, A.S., Kozhevnikova, I.A. *et al.* Investigation of Self-Oscillations and the Development of a Procedure of Stabilization of the Process in a Continuous Mill for Strip Cold Rolling // *Metallurgist*. – 2020. – Vol. 64. No 7–8. – P. 770–779. (Russian Original No 7–8, July–August, 2020). DOI 10.1007/s11015-020-01053-1

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

277. Kozhevnikov A.V., Yusupov V.S. Methodology of Designing Cold Rolling Technology Preventing Vibrations on Rolling Mills // Steel in Translation. – 2021. – Vol. 51. No. 5. – P. 330–334. DOI: 10.3103/S0967091221050065

278. 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.

279. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 609 с.

280. Денисенко В.В. Непараметрическая модель объекта управления в ПИД регуляторах с автоматической настройкой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 6. – С. 9–13.

281. Ицкович Э.Л. Современные алгоритмы автоматического регулирования и их использование на предприятиях. // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 6. – С. 39–44.

282. Кожевников А.В. Совершенствование систем управления приводами прокатных станов для повышения энергоэффективности их работы // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2012. – № 4 (42). Т.1 – С. 11–16.

283. 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.

284. 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.

285. 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 // Черная металлургия. – 2015. – № 3 (1383). – С. 70–75.

286. Кожевников А.В., Сорокин Г.А., Белкова С.В. Новые решения в области управления автоматизированными приводами для повышения энергоэффективности листовой прокатки // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии: Материалы I Международной научно-технической конференции (2–4 октября 2013 г.) / Отв. ред. А. Л. Кузьминов. – Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2013. – С. 155–163.

287. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. 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), регистрационный № 2011154361.

288. Сорокин Г.А., Кожевников А.В. 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).

289. Сорокин Г.А., Кожевников А.В. Разработка и экспериментальные исследования эффективных способов управления электроприводами // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2014. – № 8 (61). – С. 19–22.

290. Кожевников А.В., Волков В.Н. Разработка функции самонастройки системы управления электроприводом на базе генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. – 2015. – № 2. – С. 41–45.

291. 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.

292. Черных И.В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

293. Сорокин Г.А., Кожевников А.В. Способ регулирования электроприводов постоянного тока Патент на изобретение № 2517324, Россия, МПК G05B 11/36 – 2012127659/08, Заявлено 02.07.2012 г., опубл. 27.05.2014. Бюл. №15. Приоритет 02.07.2012 (Россия), регистрационный № 2012127659.

294. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Опыт внедрения энергоэффективных режимов работы главных приводов широкополосных станов горячей прокатки // Металлург. – 2013. – № 12. – С. 61–65.

295. Kozhevnikov A.V., Sorokin G.A. Introduction of Energy-Efficient Operating Regimes for the Main Drives of Wide Strip Mills // Metallurgist. – 2014. – Vol. 57. Issue 11–12. – P. 1106–1111.

296. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Разработка и экспериментальные исследования энергоэффективных режимов работы автоматизированных приводов прокатных станов // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. труд. Часть II. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – С. 23–27.

297. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Устранение негативных динамических явлений путем корректировки систем управления главных приводов широкополосных станов горячей прокатки // Механическое оборудование металлургических заводов: Международный сб. науч. тр. / Под

ред. Корчунова А.Г. Выпуск 2. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – С. 109–114.

298. Кожевников А.В. Листовая прокатка в условиях нестационарного динамического нагружения. Эксплуатация и управление: монография – Череповец: ЧГУ, 2021. – 306 с.

299. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Математическое описание сил и моментов нагрузки петледержателя // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – № 4. – С. 18–23.

300. Кожевников А.В., Сорокин Г.А. Адаптивное управление петледержателем широкополосного стана горячей прокатки // Производство проката. – 2015. – № 4. – С. 39–43.

Справка об экономическом эффекте



29.05.2019 № Исх. / 704-00-19-366

На № _____ от _____

Справка об экономическом эффекте

Настоящая справка подтверждает экономический эффект от реализации научно-исследовательских работ, выполненных под руководством А.В. Кожевникова, а также при участии А.В. Кожевникова:

1. Корректировка систем управления приводов чистой непрерывной группы стана «2000» с целью повышения энергоэффективности процесса прокатки. Договор-подряда CP2402 от 01.11.2012 (спецификация №1/2012)
2. Корректировка настройки автоматизированной системы управления на непрерывной группе «1700» комбинированного стана горячей прокатки «2800/1700» на основании моделирования и исследования ее работы в целях повышения качества проката и увеличения производительности стана
3. Усовершенствование режимов эксплуатации 5-клетевого стана ППП с целью устранения вибраций в клетях при прокатке и повышения производительности №1049НП
4. Совершенствование технологии производства холодного проката на 4-клетевом стане 2100 ЦПиО ППП №1051НП
5. Разработка методики назначения слябов в заказы и на дальнейшую обработку с целью повышения эффективности назначения за счет использования статистических моделей влияния переходных режимов работы агрегатов КЦ на показатели качества металлопроката

После внедрения результатов указанных работ будет получен экономический эффект 205 204,8 тысяч рублей в год.

Директор по техническому развитию и
качеству дивизиона
Северсталь Российская Сталь

П.А. Мишнев



Филиал «Российская сталь»
в городе Череповце
АО «Северсталь Менеджмент»
ул. Мира, д. 30
г. Череповец
Вологодская область
Россия, 162608

Т: +7 (8202) 53-09-00
Ф: +7 (8202) 53-09-15
severstalm@severstal.com
www.severstal.com

Достичь большего вместе

Метрологическое обеспечение экспериментов в производстве плоского проката ЧерМК ПАО «Северсталь»

Наименование измеряемого параметра	Наименование и тип средств измерений (контроля)	Стандарт на изготовление	Метрологические характеристики		
			Диапазон измерения	Класс точности, погрешность	Цена деления
<i>5-клетевой стан</i>					
Толщина полосы	Радиоизотопный толщиномер типа FMM 24024	-	0-5,0 мм	± 0,5 %	0,001 мм
Ширина полосы	Рулетка типа РСО-5	ГОСТ 7502-89	0-2000 мм	± 1,0 %	1,0 мм
Усилие прокатки	Датчик давления Брандта	-	0-2200 тс	± 0,1 %	300 тс
Натяжение	Датчик ДСМ	ГОСТ 12.2.007.0-75	0-15 тс	± 0,1 %	1,5 тс
	Вольтметр М1730	ТУ 25-04-3230-77	0-10 тс	± 1,0 %	
Скорость прокатки	Таховольтметр ТП212-0,5-0,5	ТУ 16-515.279-82	0-30 м/с	± 0,5 %	1,0 м/с