

- 1 -

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук,
профессора ОСИПОВА О.И. на диссертацию

ГАСИЯРОВА ВАДИМА РАШИТОВИЧА

**"СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
РЕВЕРСИВНОЙ КЛЕТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТНОГО
СТАНА"**

на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Представленная на отзыв диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 330 наименований, имеет 331 страницу основного текста, содержит 119 рисунков, 44 таблицы и четыре приложения объемом 28 страниц.

1. Актуальность темы.

Производство проката из труднодеформируемых марок сталей на толстолистовых и широкополосных станах связано со значительными проблемами управления их технологическими режимами и обеспечением качества регулирования параметров прокатки. Недостаточно эффективная работа систем автоматического регулирования электромеханических систем подобных станов может приводить к снижению качества проката, значительным потерям металла с боковой и концевой обрезью, а при аварийных отключениях - к потере производительности станов. К тому же это сопровождается увеличением нагрузок приводов валков прокатных клетей в установившихся и динамических режимах их работы, которые негативно влияют на эксплуатационные характеристики электрического и механического оборудования..

В научных трудах отечественных и зарубежных ученых решению проблем управления технологическими режимами и обеспечением качества регулирования параметров прокатки посвящено немало исследований и

ОБЩЕРОССИЙСКИЙ ЦЕНТР ДЕЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

за № _____
Дата регистрации <u>25.02.2021</u>
Фамилия регистратора _____

практических работ. Однако большинство из них связано с отдельной оценкой какого-либо одного конкретного фактора влияния на показатели регулирования параметров прокатки. При этом комплексный подход, сочетающий развитие современной технологии проката, совершенствование автоматизированных электроприводов и систем управления, учитывающий совокупность и комбинацию ряда известных методов ограничения динамических нагрузок совместно с учетом влияния упругости механических связей электропривода валков, динамических показателей его систем регулирования по каналам управления и возмущения, согласованием скоростей электроприводов горизонтальной и вертикальной клетей при их совместной прокатке практически отсутствует и требует более глубокого исследования, возможной коррекции основных положений теории взаимосвязанных систем автоматического регулирования и на их основе разработки научно обоснованных технических решений по обеспечению работоспособности подобных приводов.

Необходимость учета взаимосвязей и согласованной работы электромеханических и гидравлических приводов при повышении требований к точности регулирования параметров прокатки предопределили актуальность комплексных исследований и совершенствования приводов толстолистовых прокатных станов.,

Все предлагаемые автором работы научные исследования и решения практически апробированы на примере электромеханической и гидравлической систем приводов станов горячей прокатки 5000 и 2000 ПАО "Магнитогорский металлургический комбинат" (ПАО "ММК"), заметно подтверждая и усиливая основные положения диссертации.

2. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Диссертация посвящена теории и практике совершенствования автоматизированных электромеханических систем толстолистого

прокатного стана, обеспечивающих расширение сортамента, снижение материалоемкости, улучшения качества и производительности проката.

В первой главе дана характеристика технологии проката на современных толстолистовых станах и их оборудования. Представлены силовые схемы электроприводов горизонтальных валков, рассмотрены функции и структуры систем автоматизации реверсивной прокатной клетки. Рассмотрены схемы профилированной прокатки по технологии ASC. Определены особенности функционирования систем регулирования толщины и управления положением гидравлических нажимных устройств НУ. Анализом опыта эксплуатации толстолистовых прокатных станов доказана актуальность разработки систем управления по устранению неравенства секундных объемов металла в очаге деформации и межклетевом промежутке за счет коррекции скорости вертикальных валков при перемещении НУ. Экспериментально подтверждены недопустимые динамические нагрузки электродвигателей и механических передач привода валков, неравномерность распределения их нагрузок для двигателей верхнего и нижнего валков при существующих алгоритмах управления их приводами, обоснованы направления их ограничения. Доказана необходимость разработки способов и алгоритмов управления, компенсирующих поперечную асимметрию зазора валков. Дан анализ причин ухудшения «геометрии» раската металла, возникновения дефекта типа «серповидность» и обоснована актуальность разработок, направленных на их устранение.

Вторая глава связана с разработкой математических моделей электромеханических систем горизонтальной и вертикальной клеток, взаимосвязанных при прокатке через металл, а также с учетом опережения металла в зоне его деформации. Модель обеспечивает возможность исследования проектных и разрабатываемых алгоритмов управления электромеханической системы реверсивной клетки толстолистового стана. В основу модели положен электропривод валков клеток по системе преобразователь частоты - синхронный двигатель ПЧ-СД с векторным

управлением его координатами, подобный электроприводу стана 5000 горячего проката ПАО "ММК". В технологической части модели учтены режимы деформации металла при прокате, упругие связи и зазоры в механических соединениях привода валков, а также взаимосвязь электроприводов последовательно расположенных клеток через металл. Моделирование режимов работы приводов валков позволило выявить возникновение подпора (отрицательного натяжения) при рассогласовании скоростей верхнего и нижнего валков с колебательным характером подпора с двойной его амплитудой. Обоснован, предложен и разработан способ регулирования и согласования скоростей электроприводов горизонтальных и вертикальных валков по принципу «постоянства массы». Предложена структура системы автоматического регулирования толщины САРТ стана 5000 горячего проката ПАО "ММК", обеспечивающая коррекцию скорости валков при перемещении НУ. Дан анализ переходных процессов координат электропривода, подтверждающих компенсацию силовых взаимодействий прокатных клеток в квазиустановившемся режиме прокатки металла.

Третья глава посвящена разработке методики анализа и прогнозирования нагрузок электроприводов горизонтальной клетки на основе уточненного расчета энергосиловых параметров прокатки и измерения моментов (токов) двигателей в on-line режимах. Необходимость разработки связана с заметной ошибкой использования ранее известных методик расчета нагрузочных режимов электроприводов прокатных станов без учета высоких очагов деформации, свойственных толстолистовой прокатке. Получены новые аналитические зависимости для расчета усилий и моментов прокатки металла с учетом влияния высоты очага его деформации на величину угла захвата и коэффициента трения. На основании этих зависимостей разработаны алгоритмы и программы расчета энергосиловых параметров прокатки толстых заготовок с учетом их ускорения при выходе из валков в режимах реверсивной прокатки. Эффективность методики подтверждена серией экспериментальных исследований и проверкой двигателей на нагрев

для стадий черновой и чистовой прокаток. Методика позволяет в автоматизированном режиме определять ограничения на формирование программ прокатки со стороны электропривода валков.

Четвертая глава связана с решением проблем формирования «лыжни» и выравнивания нагрузок электродвигателей валков за счет совершенствования их алгоритмов управления. На основе экспериментальных осциллограмм скоростей и моментов для действующей на стане 5000 горячего проката ПАО "ММК" системы лыжеобразования и регулятора деления нагрузок РДН отмечена неэффективность их настройки. Предложен нелинейный РДН с переключающейся структурой управления электроприводом, способствующий увеличению быстродействия при компенсации рассогласования скоростей приводов валков. В режиме лыжеобразования предложено регулирующий сигнал управления приводом формировать пропорционально линейной скорости прокатки, величине раствора валков перед захватом и обратно пропорционально радиусу изгиба прокатываемой полосы. Представлена структура системы управления приводами валков и алгоритм задания их скоростей. Результаты моделирования процессов регулирования при проектном и разработанном алгоритмах лыжеобразования подтвердили сокращение времени согласования нагрузок более чем в два раза.

Пятая глава связана с совершенствованием систем автоматического регулирования и устранения перекоса зазора валков, и тем самым дефекта «серповидность» прокатываемой полосы. На основе анализа механизма возникновения изгиба в плоскости прокатки обоснован принцип регулирования асимметрии поперечного профиля путем перераспределения регулирующих воздействий на гидравлические НУ со стороны расположения электропривода и стороны обслуживания. Предложены способы устранения «наследственной» клиновидности заготовки и текущего перекоса зазора из-за разницы усилий по различным сторонам проката. Математическое моделирование и экспериментальное исследование на примере привода клетки

стана горячего проката 5000 ПАО "ММК" подтвердили эффективность предлагаемых решений по заметному (в $2 \div 2,5$ раза) уменьшению клиновидности раската.

Шестая глава связана с обоснованием и разработкой способов ограничения динамических нагрузок на привод валков в режимах захвата ими металла. Предложен способ ограничения динамических моментов двигателей и упругих моментов шпинделей за счет формирования оптимальных тахограмм работы привода валков. Способ подтвержден и теоретически и экспериментально. Разработан наблюдатель упругого момента валков, обеспечивающий восстановление переходных процессов по непрерывно измеряемым параметрам электропривода. На его основе предложена четырехконтурная система регулирования скорости валков средствами электропривода, где внутренним контуром является контур регулирования момента двигателя, содержащий многомерный регулятор тока электродвигателя. Подобное решение позволяет ограничивать не только задание на контур момента двигателя, но и на контур регулирования упругого момента. Математическим моделированием подтверждена эффективность предложенного решения. .

Седьмая глава отражает результаты экспериментальных исследований и внедрений разработанных алгоритмов и систем управления на действующих прокатных станах горячего проката 5000 и 2000 ПАО "ММК", а также результаты оценки технико-экономической эффективности внедрений. На примере стана 5000 показана эффективность способа ограничения динамического момента за счет предразгона и компенсации ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки. Для стана 2000 показаны результаты внедрения алгоритмов регулирования межклетевых натяжений в непрерывной подгруппе черновых клетей и согласование скоростей электроприводов вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки. Представлена программа расчета энергосиловых параметров прокатки при разработке программ прокатки

трубного сортамента. Сопоставлением результатов проката в существующих электромеханических системах прокатных станов и усовершенствующих доказаны технические преимущества последних. Оценка технико-экономической эффективности внедрения разработок подтвердила снижение разнотолщинности и отклонений ширины проката, статических и динамических нагрузок электроприводов, сокращение числа аварий и затрат на их устранения и восстановление оборудования. Актами внедрения подтвержден суммарный экономический эффект до 12,7 млн.руб./год.

3. Основные научные результаты и их новизна.

1. Впервые разработана математическая модель электромеханической системы реверсивной клетки толстолистового прокатного стана, учитывающая при прокатке взаимосвязь гидравлических приводов нажимных устройств, горизонтальной и вертикальной клетей стана через металл с учетом его опережения в зоне деформации, а также наличия упругих связей и зазоров в механических узлах системы. Модель создает возможность исследования проектных и разрабатываемых алгоритмов управления электромеханической системы реверсивной клетки толстолистового стана.

2. Впервые представлена математическая модель очага деформации металла при толстолистовой прокатке, учитывающая мощности, обусловленные передним и задним натяжениям, мощности потерь, связанные с разнонаправленными продольными силами трения, мощности, затрачиваемые на формоизменение металла и мощности потерь на трение скольжения. Их учет позволил получить более точную модель для исследования процессов деформации металла в клетях станов горячей прокатки.

3. Впервые определены аналитические соотношения расчета усилий прокатки металла при высоких очагах его деформации с учетом влияния толщины металла на вертикальное напряжение и инерции металла при

ускорении, обеспечивающие точность определения энергосиловых параметров прокатки толстых листов.

4. Впервые предложен алгоритм расчета нагрузочных режимов электроприводов клеток на основе вычисления энергосиловых параметров в on-line режиме с учетом ограничений, накладываемых электроприводом на технологический процесс.

5. Впервые разработан способ управления электроприводами прокатных валков горизонтальной и вертикальной клеток толстолиствого прокатного стана в режимах перемещения гидравлических НУ при формировании формы раската на основе принципа «постоянства массы» металла в межклетевом промежутке.

6. Обоснованы способы автоматического управления скоростными режимами электроприводов валков прокатного стана, обеспечивающие согласование режимов формирования «лыжи» полосы независимо от толщины раската и способы автоматического выравнивания нагрузок приводов в квазиустановившемся режиме прокатки.

7. Обоснован способ и предложен алгоритм ограничения динамических нагрузок электроприводов прокатной клетки за счет индивидуальной компенсации динамических моментов, обусловленных замыканием углового зазора и упругими свойствами кинематических узлов главной линии клетки.

8. Разработан способ ограничения дефекта «серповидность» прокатываемой полосы путем предиктивного регулирования наследственного перекоса зазора валков и быстродействующей компенсации текущей асимметрии профиля раската.

9. В развитии теории двухмассовых электромеханических систем разработана система компенсации упругого момента в кинематических узлах привода клеток в режимах ударного приложения нагрузки на основе предложенного автором работы цифрового наблюдателя упругого момента,

обеспечивающего управление динамическими режимами механизмов валков по непрерывно измеряемым параметрам электропривода.

4. Основные практические результаты работы

1. На основе научных положений диссертации усовершенствованы и технически реализованы на толстолистовом прокатном стане горячего проката 5000 ПАО "ММК" электротехнические системы, обеспечивающие:

- согласование режимов работы регуляторов деления нагрузок электроприводов валков и системы лыжеобразования полосы;

- компенсацию асимметрии зазора валков непосредственно в процессе прокатки за счет автоматического регулирования положения нажимных винтов, расположенных на приводной и неприводной сторонах клетки;

- ограничение динамических нагрузок в режимах захвата металла

2. В АСУ ТП непрерывной подгруппы стана 2000 ПАО "ММК" внедрены алгоритмы регулирования межклетевых натяжений и согласования нагрузок электроприводов в квазиустановившихся режимах прокатки.

3. Методика и программы расчета усилий при высоких очагах деформации металла и нагрузочных режимах работы электроприводов валков переданы в калибровочное бюро ПАО "ММК", где их используют при освоении новых профилей листового проката на стане горячего проката 5000 и полос трубного сортамента на стане 2000.

Внедрение разработанных систем и алгоритмов управления электроприводами привода прокатных клеток обеспечило улучшение качества проката за счет повышения его размерной точности, устойчивость прокатки листов расширенного сортамента, снижение брака и потерь с обрезью, а также снижение аварийности электрического и механического оборудования.

Разработанные технические решения справедливы для применения на толстолистовых и широкополосных станах горячего проката независимо от рода тока и типа электроприводов. Их преимуществом является

универсальность и высокая эффективность при минимальных затратах на внедрение.

Результаты внедрения подтверждены высокими технико-экономическими показателями: экономия металла достигла в объеме 4,7 тыс.т/год, срок эксплуатации оборудования главной линии клетки увеличился от 3 до 8 лет, затраты на замену шпинделей снизились на 5,76 млн.руб/год. Результаты внедрения подкреплены актами и опытно-промышленными испытаниями. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения результатов работы на станах горячей прокатки 5000 и 2000 ПАО "ММК" достиг 12,7 млн.руб/год ,

5. Замечания по диссертационной работе

1. Представленная на рис. 2.5 весьма сложная структурная схема электропривода по системе ПЧ-СД с векторным управлением достаточно полно отражает все взаимосвязи между переменными системы управления и непосредственно СД. Однако при отсутствии численных значений параметров СД и регуляторов (в работе представлены лишь общие аналитические соотношения по определению параметров регуляторов) трудно определить, насколько адекватен переход к дальнейшему более упрощенному представлению структур систем управления приводом.

2. На стр. 87 диссертации отмечается, что *« система управления осуществляет двухзонное регулирование скорости синхронного двигателя, что обеспечивает прокатку на скоростях выше номинальной»*. Тогда при проверке синхронного двигателя на нагрев методом эквивалентного момента (а не эквивалентного тока) необходимо было сделать оговорку и обосновать подобное допущение.

3. На стр. 224 диссертации отмечается, что *«при настройке системы регулирования скорости привода на симметричный оптимум перерегулирование момента электродвигателя при ударном приложении нагрузки достигает 43%, что приводит к аналогичным динамическим*

увеличениям упругого момента шпинделя. И в связи с этим ставится задача снижения составляющей динамического момента, связанного с настройкой САР скорости электропривода». Но это факт хорошо известен и известен автору диссертации по ссылке на [16]! Поэтому надо было бы по возможности сначала перенастроить САР скорости электропривода на требуемые по технологии показатели перерегулирования и лишь затем оценивать результаты новых предлагаемых решений или хотя бы их сравнить именно с «нормальной» настройкой.

4. Согласно способу выравнивания нагрузок электроприводов в квазиустановившемся режиме (стр.180 диссертации) предлагается форсированное согласование скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков за счет исключения интегральной части РДН и увеличения коэффициента усиления пропорциональной части с последующим возвратом по окончании режима в исходное состояние регуляторов. Учитывая, что увеличение коэффициента пропорциональной части П-регулятора может привести к ухудшению устойчивости контура регулирования и дополнительному перерегулированию (см. рис. 4.12,а и 4.12,б), было бы полезно оценить степень возможного увеличения этого коэффициента.

5. Нет ясности, насколько отличаются параметры регуляторов скорости и моментов, используемые при математическом моделировании системы управления электроприводами валков прокатной клетки, от реальных их параметров в действующей системе управления, учитывая весьма сложный характер векторной системы частотного управления синхронных двигателей привода клетки стана 5000 ПАО "ММК".

6. По тексту диссертации неудачно использовано обозначение ψ – то это потокосцепление в математической модели синхронного двигателя (стр. 82 диссертации), то это коэффициент положения равнодействующей давления на валки (стр. 140).

6. Общее заключение по работе

Диссертация Гасиярова В.Р. является законченной научно-квалификационной работой в направлении развития теоретических положений и разработок комплекса обоснованных технических решений по совершенствованию автоматизированных электротехнических систем толстолистовых прокатных станов.

Теоретические положения диссертации, связанные с разработкой математических моделей электромеханической системы реверсивной клетки толстолиствого прокатного стана, создают возможность исследования проектных и разрабатываемых алгоритмов управления подобными станами. Предлагаемые и реализованные автором способы, алгоритмы и системы управления электроприводами валков толстолиствого прокатного стана отличаются новизной и являются существенным шагом в направлении совершенствования систем управления электроприводами прокатных станов. Их внедрение способствует расширению сортамента и улучшению качества проката, снижению брака выпускаемой продукции стана и аварийности его механического оборудования, затрат на их устранение и, в итоге, повышения производительности стана. Итоги работы подтверждены актами внедрения.

Диссертация представлена логичным, аргументированным, грамотным и ясным языком, хорошо оформлена. Достоинство диссертации в большом числе экспериментальных исследований режимов работы электромеханических систем прокатных станов горячей прокатки 5000 и 2000 ПАО "ММК", подтверждающих достоверность научных и технических положений диссертации.

Основные материалы и результаты диссертации опубликованы в монографии, в 26 рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в 12 статьях в журналах в наукометрических базах Scopus и WoS и в 17 научных работах в трудах конференций, цитируемых в базах Scopus и WoS. Они подкреплены патентом на изобретение РФ и двумя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, широко апробированы на

международных научно-технических конференциях, и полностью отвечают требованиям ВАК к докторским диссертациям.

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Научный и технический уровень, высокое качество и единство теоретических и практических результатов работы, их новизна, достоверность и технико-экономическая целесообразность полностью соответствуют требованиям ВАК к докторским диссертациям, а ее автор Гасияров Вадим Рашитович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 - "Электротехнические комплексы и системы".

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

доктор технических наук,

профессор кафедры автоматизированного электропривода,

Осипов Олег Иванович



/ О.И. Осипов /

111250, г. Москва, Красноказарменная, 14

Тел. 8 (495) 362-76-25, e-mail: osipovoi2015@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет

«Московский энергетический институт»

Подпись профессора кафедры АЭП МЭИ

Осипова Олега Ивановича

Удостоверяю:

