

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности 6D071800 – «Электроэнергетика»

Дружинин Валерий Михайлович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОСВЯЗАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Актуальность работы.

Современный стан горячей прокатки является сложной многосвязной многодвигательной электромеханической системой. Качество готовой продукции стана горячей прокатки определяется в основном точностью работы электроприводов чистой группы прокатного стана, содержащих упругие связи различного рода в механической части. Однако, в силу значительной установленной мощности оборудования, объективно существует электромагнитная взаимосвязь между электроприводами черновой и чистой группы через питающую сеть. Электромагнитное взаимодействие электроприводов черновой и чистой группы связано с использованием типовых проектных решений систем электроснабжения прокатных станов, предусматривающих работу электрооборудования от двух силовых трансформаторов. При такой схеме электроснабжения ударные нагрузки синхронных электроприводов черновой группы приводят к существенным различиям показателей качества электроэнергии источников питания отдельных элементов чистой группы прокатного стана.

Влияние электромагнитной взаимосвязи через питающую сеть электроприводов прокатного стана горячей прокатки, в отличие от влияния упругих связей в механической части прокатного стана, практически не учитывается при разработке систем управления электроприводов чистой группы, что также отрицательно влияет на качество готовой продукции прокатного стана.

Поэтому проблема количественной оценки параметров влияния питающей сети главных приводов клетей станов горячей прокатки на качество готовой продукции, качество электроэнергии в сети электроснабжения прокатного стана, разработка методов снижения такого влияния на характеристики взаимосвязанных электроприводов станов горячей прокатки является важной и актуальной задачей, решение которой окажет комплексное положительное влияние на различные аспекты функционирования электрооборудования стана горячей прокатки и качество выпускаемой продукции.

Целью диссертационной работы является разработка методов ограничения влияния сетей электроснабжения на характеристики взаимосвязанного электропривода станов горячей прокатки.

Объектом исследования в работе является сеть электроснабжения и взаимосвязанный электропривод непрерывного широкополосного стана горячей прокатки.

Идея исследования заключается в исследовании электромагнитно связанных посредством сети электроснабжения главных электроприводов прокатного стана, установлении характера и числовых характеристик влияния питающей сети на работу главных электроприводов станов горячей прокатки, разработке методов снижения влияния питающей сети электроснабжения на работу взаимосвязанных электроприводов станов горячей прокатки путем разработки методов и устройств управления форсировкой возбуждения главных электроприводов станов горячей прокатки.

Задачи работы, решаемые для достижения поставленной цели:

- провести анализ влияния сетей электроснабжения станов горячей прокатки на работу взаимосвязанных электроприводов стана горячей прокатки в условиях ударных нагрузок;

- выполнить экспериментальные исследования качества напряжения на шинах подстанции, питающей взаимосвязанные главные электроприводы стана горячей прокатки

- проанализировать влияние технологических параметров прокатки (марки стали, температуры заготовки) на характеристики ударных нагрузок электроприводов черновой группы;

- разработать математическую модель электромеханической системы главных электроприводов стана горячей прокатки с учетом влияния упругости полосы металла в межклетевом промежутке;

- выполнить экспериментальные исследования стана горячей прокатки на математической модели;

- разработать методы компенсации влияния синхронных электроприводов черновой группы на стабильность работы электропривода чистой группы;

- разработать структуру системы управления электроприводом чистой группы станов горячей прокатки, позволяющую минимизировать влияние провалов напряжения питающей сети электроснабжения.

Научная новизна:

- получила дальнейшее развитие теория взаимосвязанных электроприводов прокатного производства в части обоснования существенного влияния электромагнитной взаимосвязи между главными электроприводами станов горячей прокатки через питающую сеть электроснабжения;

- впервые установлено, что минимальное значение падения напряжения питающей сети и минимальное значение относительного удлинения металла в межклетевом промежутке при приложении ударной нагрузки достигается при точном совпадении моментов времени приложения ударной нагрузки и подачи форсировки возбуждения синхронного двигателя черновой группы прокатного стана, что позволяет обеспечить повышение качества готовой продукции;

- впервые установлено, что зависимость относительного удлинения металла в межклетевом промежутке от величины форсировки возбуждения синхронного двигателя черновой группы прокатного стана при приложении

ударной нагрузки носит экстремальный характер и имеет выраженный минимум, что позволяет определить оптимальные настройки системы управления форсировкой синхронного двигателя.

– предложена структура системы управления электроприводом чистовой клети станов горячей прокатки с учетом параметров питающей сети, позволяющей минимизировать провалы напряжения сети электроснабжения.

Основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

– математические и имитационные модели взаимосвязанных главных электроприводов стана горячей прокатки, учитывающие как электромагнитную связь групп электроприводов через сеть электроснабжения, так и упругость полосы металла в межклетевом промежутке;

– методы, позволяющие минимизировать влияние сетей электроснабжения на характеристики взаимосвязанного электропривода станов горячей прокатки в условиях ограниченной мощности;

– результаты регрессионного анализа экспериментальных исследований, позволяющие выполнить параметрирование системы управления форсировкой возбуждения синхронного электродвигателя черновой группы при приложении ударной нагрузки.

Методы исследования. Научные и практические результаты диссертационной работы получены на основе комплексных методов поиска и обработки информации, постановки и планирования эксперимента, статистической обработки данных, теории вероятностей и имитационного моделирования с использованием основных научных положений теории электрических цепей и электротехники, теории электропривода, теории автоматического управления широко применяемых при исследованиях сложных физических процессов в электроприводах прокатного производства.

Экспериментальные данные получены непосредственно на широкополосном стане горячей прокатки 1700 листопрокатного цеха №1 АО «АрселорМиттал Темиртау» (в настоящее время АО «Qarmet») с использованием сертифицированного на территории Республики Казахстан измерительного устройства показателей качества электрической энергии «Ресурс-UF2М».

Математическое моделирование выполнено в пакете прикладных программ Matlab/Simulink с использованием библиотеки SimPower Systems. Анализ и обработка экспериментальных данных осуществлялась в пакете прикладных программ Matlab Simulink и в программе Microsoft Excel. Регрессионный анализ результатов математического моделирования выполнен в программе STATGRAPHICS.

Практическая значимость полученных результатов:

– разработанная математическая модель системы электрически взаимосвязанных электроприводов черновой и чистовой группы прокатного стана позволила установить числовые характеристики влияния ударных нагрузок черновой группы на показатели качества напряжения питающей сети и стабильность угловой скорости электроприводов чистовой группы;

– предложенный метод компенсации влияния синхронных электроприводов черновой группы на стабильность работы электропривода чистовой группы позволил повысить стабильность работы электропривода чистовой группы и улучшить условия работы стана горячей прокатки в целом;

– получены регрессионные уравнения зависимостей падения напряжения питающей сети и стабильности угловой скорости от влияющих, посредством упругости полосы, факторов.

Результаты выполненных теоретико-экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс НАО «Карагандинский индустриальный университет» (г.Темиртау) на кафедре «Энергетика» факультета энергетики, транспорта и систем управления и используется при подготовке бакалавров обучающихся по образовательным программам: 6В07105 «Энергообеспечение промышленных объектов» и 6В07106 «Инженерия систем автоматизации»; магистров обучающихся по образовательным программам: 7М07112 «Электроэнергетика» (научно-педагогическое направление) и 7М07112 «Электроэнергетика» (профильное направление).

Результаты научных исследований и разработок будут использованы в системе автоматического управления электроприводами клеток черновой и чистовой групп стана горячей прокатки листопрокатного цеха №1 АО «АрселорМиттал Темиртау»; в технологическом комплексе «питающая сеть – электроприводы черновой и чистовой групп» стана горячей прокатки листопрокатного цеха №1 АО «АрселорМиттал Темиртау», что подтверждается протоколом производственного совещания от 13.09.2023г.

Обоснование и достоверность научных положений, результатов и выводов обусловлена применением апробированных методов и методик планирования эксперимента, теории электропривода, имитационного моделирования с использованием апробированных пакетов прикладных программ Matlab/Simulink и STATGRAPHICS.

Основные научные положения, результаты исследования и выводы нашли свое подтверждение на основании тщательного анализа собранных материалов аналитических исследований, результатов имитационного моделирования и промышленных экспериментов; опубликованы в научной литературе, входящей в базу Scopus и КОКСНВО, и согласуются с результатами других авторов, опубликованных ранее.

Все основные выводы, представленные в диссертации, обоснованы и основаны на признанных методологических подходах исследований, на анализе и оценке многочисленных научных источников литературы, что подтверждает научную надежность и достоверность исследования.

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на научно-техническом совете Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова;

– на научно-техническом совете кафедры «Автоматизация производственных процессов» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова;

Основные научные результаты диссертационной работы представлены в 20 публикациях, в том числе:

– в изданиях, входящих в информационную базу компаний Scopus – 2 статьи:

1) Druzhinin V.M., Kalinin A.A., Sivyakova G.A. Rolling stand electric drive model regarding influence of power supply network parameters. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2023, – Vol.29, №3. – pp. 1213–1223. ISSN: 2502-4752, DOI: 10.11591/ijeecs.v29.i3.pp. 1213-1223 (Процентиль – 46 Scopus)

2) V. Druzhinin, G. Sivyakova, A. Kalinin, V. Tytiuk, A. Nikolenko, V. Kuznetsov, M. Kuzmenko Preventing the development of emergency modes of interlocked electric drives of a rolling mill under the impact loads. Diagnostyka, 2023, – Vol. 24, №1:2023105 – pp. 1 – 13. e-ISSN 2449–5220 <https://doi.org/10.29354/diag/157089>. (Процентиль – 37 Scopus)

– в изданиях, рекомендованных КОКСОН МОН РК – 3 статьи «Труды университета» (Караганда);

– 12 статей в материалах международных научно-практических конференций «Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве» (КузГТУ, Экибастуз), «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения)», (КарТУ, Караганда) и 1 статья – 15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, которая входит в базу данных Scopus;

– 2 статьи в трудах Республиканского научного журнала «Вестник Карагандинского государственного индустриального университета» (КГИУ, Темиртау);

– получено 1 свидетельство о государственной регистрации прав на объекты авторского права «Имитационная модель электропривода чистовой клетки стана горячей прокатки (программа для ЭВМ)» Брейдо И.В., Дружинин В.М., Калинин А.А. ИС 4003 №2744 от 24.08.2018г.;

– получен 1 патент РК на полезную модель «Способ управления электроприводом чистовой группы клеток стана горячей прокатки» Дружинин В.М., Калинин А.А., Сивякова Г.А., Дружинин К.В. Патент РК на полезную модель №6957 от 18.03.2022г.

Личный вклад диссертанта заключается в решении задач исследования, разработке и обосновании положений, составляющих научную новизну и практическую значимость работы, проведении экспериментальных исследований качества напряжения на шинах питающей подстанции 10кВ; разработке модели электромеханической системы стана с учетом существующей системы электроснабжения, в обосновании возможности снижения влияния ударных нагрузок путем воздействия на обмотки возбуждения силовых электроприводов, в исследовании зависимости показателей работы стана от величины ударных нагрузок при управлении возбуждением СД и ДПТ НВ, в проведении анализа и обработки экспериментальных данных.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 95 наименований и 5 приложений. Общий объем работы составляет 115 страниц, включая 7 таблиц и 47 рисунков.

Содержание работы. Во введении дано описание состояния проблемы и обоснована актуальность работы. Сформулированы цель и задачи диссертации, определены научная новизна, научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту, практическая значимость результатов исследований.

Краткое содержание.

В первой главе изложено состояние вопроса и проведен обзор литературных источников. Проведенный обзор позволил установить особенности производства горячего проката на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки, а также основные технологические параметры, оказывающие существенное влияние на качество выпускаемой продукции.

Рассмотрены общие особенности конструкции непрерывных широкополосных станов горячей прокатки, особенности функционирования производственного оборудования и систем электроснабжения. Рассмотрено производство горячего проката на примере Акционерного общества «АрселорМиттал Темиртау», которое является крупнейшим предприятием горно-металлургического сектора Республики Казахстан и представляет собой интегрированный горно-металлургический комплекс.

На основании анализа научно-технической литературы установлены факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на качество готовой продукции широкополосных станов горячей прокатки, среди которых исследователи выделяют влияние сетей электроснабжения на характеристики взаимосвязанного электропривода станов горячей прокатки при ударных нагрузках, имеющих место в черновой группе прокатного стана.

Выполненный анализ показал, что на настоящий момент отсутствуют методы определения закономерностей и числовых характеристик влияния параметров и конфигурации сети электроснабжения на работу взаимосвязанных электроприводов стана горячей прокатки.

Таким образом, задача изучения закономерностей и числовых характеристик влияния сети электроснабжения на работу стана горячей прокатки, а также разработка методов ограничения влияния сети электроснабжения на работу взаимосвязанного электропривода станов горячей прокатки является актуальной задачей для обеспечения высокоэффективного функционирования прокатного производства.

Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены вопросы особенностей структуры системы электроснабжения и состава оборудования и параметров электромеханической системы широкополосного стана горячей прокатки. На основании проведенного анализа показана возможность влияния ударных нагрузок синхронных электроприводов черновой группы стана на условия функционирования электроприводов чистовой группы. Так как приводные двигатели последовательно расположенных прокатных клетей чистовой группы

подключены к различным силовым трансформаторам двухтрансформаторной подстанции, то была выдвинута гипотеза о том, что ударные нагрузки синхронного электропривода могут нарушать симметрию питающих напряжений в чистовой группе и оказывать негативное влияние на качество горячекатанного листа. Обоснована необходимость разработки математической модели прокатного стана, учитывающей влияние сети электроснабжения на взаимосвязанный электропривод станов горячей прокатки.

С целью подтверждения выдвинутых предположений были проведены экспериментальные исследования качества напряжения на шинах питающей подстанции и на электроприводах прокатных клетей НШПС 1700 горячей прокатки предприятия АО «АрселорМиттал Темиртау». По результатам экспериментального исследования установлено, что при существующей конфигурации сети электроснабжения ударные нагрузки синхронного электропривода клетки № 1 черновой группы прокатного стана имеют место значительные, до 10 - 12 % провалы напряжения на шинах питающего трансформатора с длительностью 2 - 2,5 с. На основании используемых методов наблюдения и измерения для системы электроснабжения НШПС 1700 горячей прокатки, получены выводы, подтверждающие существенное влияние главных электроприводов клетей станов горячей прокатки через питающую сеть электроснабжения на работу прокатного стана в целом.

Для установления абсолютной величины ударных нагрузок электропривода клетки № 1 черновой группы был выполнен анализ величины его нагрузок от таких режимных характеристик прокатки как марка прокатываемой стали и температура заготовки, которая изменялась на двух уровнях: первая величина 1250°C - максимально приближенная к максимальной температуре нагрева сляба 1270°C согласно технологической инструкции, и вторая величина 1150°C - принятая на основании сложившейся производственной практики. Установлено, что в текущих производственных условиях мощность прокатки изменяется в диапазоне от 2500 до 4200 кВт.

В третьей главе посвященной разработке математической модели электромеханической системы стана горячей прокатки, которая учитывает все указанные выше особенности работы, а именно: ударные нагрузки на валу синхронного электропривода черновой группы; существование упругой связи через полосу прокатываемого металла между электроприводами постоянного тока чистовой группы; существование связи и взаимного влияния взаимосвязанных электроприводов прокатного стана через систему электроснабжения прокатного стана были разработаны и апробированы математические модели отдельных элементов математической модели. Адекватность разработанных математических моделей отдельных электроприводов подтверждается соответствием результатов моделирования техническим характеристикам электродвигателей и соответствием полученных результатов моделирования общетеоретическим положениям.

Структура и параметры элементов математической модели системы электроснабжения в точности соответствуют существующей принципиальной схеме системы электроснабжения стана НШПС-1700.

С помощью разработанной математической модели стана горячей прокатки была получена регрессионная модель зависимости максимального падения напряжения на шинах трансформатора от мощности прокатки, что позволяет упростить оценку влияния режимных параметров прокатки на показатели качества напряжения.

Разработанная математическая модель может быть использована для исследования режимов работы и разработки способов управления синхронным электроприводом клеток черновой группы станов горячей прокатки с целью снижения негативного влияния параметров сети электроснабжения на работу электроприемников.

В четвертой главе проанализированы известные теоретические методы, направленные на снижение влияния ударных нагрузок синхронных электроприводов черновой группы на работу стана горячей прокатки.

Одним из лучших методов снижения влияния сетей электроснабжения на характеристики взаимосвязанного электропривода станов горячей прокатки, сочетающий простоту технической реализации и качество достигаемых результатов, является перевозбуждение синхронного электропривода черновой группы на период прокатывания заготовки. Перевозбуждение синхронного двигателя приводит к повышению напряжения в узле нагрузки и влияет непосредственно на основную причину падения угловой скорости электроприводов числовой группы, что снижает воздействие одновременно влияет на все электроприводы постоянного тока, подключенные к узлу нагрузки. Кроме того, это улучшает условия работы и других механизмов и процессов прокатного стана.

Для изучения влияния параметров возбуждения синхронного электропривода черновой группы на показатели работы взаимосвязанных электроприводов прокатного стана был разработан и реализован вычислительный двухфакторный эксперимент, использующий рототабельный центральный композиционный план. В качестве варьируемых факторов эксперимента были использованы: величина напряжения обмотки возбуждения синхронного двигателя на период прокатки заготовки U_f и длительность паузы между началом форсировки возбуждения и началом прокатки заготовки Δt

В результате экспериментов установлено, что зависимость относительного удлинения металла в межклетевом промежутке от величины форсировки возбуждения синхронного двигателя клетки черновой группы прокатного стана при приложении ударной нагрузки носит экстремальный характер и имеет выраженный минимум, что позволяет определить оптимальные настройки системы управления форсировкой синхронного двигателя. В соответствии с выбранным направлением исследований в качестве откликов эксперимента регистрировались следующие величины: максимальное значение относительного падения напряжения в узле электроснабжения ΔU ; максимальное и минимальное значение относительного удлинения полосы металла в межклетевом промежутке ϵ_{MAX} и ϵ_{MIN} .

Анализ полученных регрессионных моделей впервые позволил установить, что зависимость относительного удлинения металла в межклетевом

промежутке от величины форсировки возбуждения синхронного двигателя клетки черновой группы прокатного стана при приложении ударной нагрузки носит экстремальный характер и имеет выраженный минимум, что позволяет определить оптимальные настройки системы управления форсировкой синхронного двигателя.

Другим эффективным методом снижения влияния сетей электроснабжения на характеристики взаимосвязанного электропривода станов горячей прокатки является метод, при котором осуществляется форсировка напряжения цепи возбуждения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения, в момент входа полосы в валки, которая позволяет повысить быстродействие рассматриваемой системы управления электроприводом клетки чистовой группы прокатного стана горячей прокатки. На предложенное устройство получен патент РК на полезную модель «Способ управления электроприводом чистовой группы клеток стана горячей прокатки» Дружинин В.М., Калинин А.А., Сивякова Г.А., Дружинин К.В. Патент РК на полезную модель №6957 от 18.03.2022г.

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

- проведен анализ влияния сетей электроснабжения станов горячей прокатки на работу взаимосвязанных электроприводов стана горячей прокатки в условиях ударных нагрузок;
- выполнены экспериментальные исследования качества напряжения на шинах подстанции, питающей взаимосвязанные главные электроприводы стана горячей прокатки;
- проведен анализ влияния технологических параметров прокатки (марки стали, температуры заготовки и др.) на характеристики ударных нагрузок электроприводов черновой группы;
- разработана математическая модель электромеханической системы главных электроприводов стана горячей прокатки с учетом влияния упругости полосы металла в межклетевом промежутке;
- выполнены экспериментальные исследования стана горячей прокатки на математической модели;
- разработаны методы компенсации влияния синхронных электроприводов черновой группы на стабильность работы электропривода чистовой группы;
- разработана структура системы управления электроприводом чистовой клетки станов горячей прокатки, позволяющую минимизировать влияние провалов напряжения питающей сети электроснабжения.