

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу
Рыжевола Сергея Сергеевича «Улучшение энергетических показателей
установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных
алгоритмов управления электрическими режимами», представленную
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы**

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность избранной соискателем темы не вызывает сомнений. В настоящее время электрометаллургия является быстроразвивающейся отраслью. Значительная доля жидкой стали в черной металлургии производится в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) с последующей обработкой в установках ковш-печь (УКП). Характерными особенностями ДСП и УКП является высокое потребление электрической энергии. Установки УКП, несмотря на меньшую мощность печных трансформаторов по сравнению с ДСП, являются электроприемниками с высоким потреблением электроэнергии, которая для крупных металлургических предприятий может составлять десятки и сотни ГВт·ч в год. В этих условиях важной задачей является поиск резервов для повышения энергоэффективности работы данных агрегатов.

Современные электротехнические комплексы с УКП включают в себя систему электроснабжения электросталеплавильного агрегата, силовое оборудование в виде печного трансформатора с устройством регулирования вторичного напряжения под нагрузкой (РПН) или без нагрузки (ПБВ), вторичный электрический контур с короткой сетью и электрическими дугами, гидроприводы или электроприводы электродов, а также систему автоматического управления и перемещением электродов (САУЭР и ПЭ). Алгоритмы управления электрическими режимами, используемые в САУЭР и ПЭ, оказывают большое влияние на энергетические показатели УКП. В настоящее время основным недостатком существующих алгоритмов управления является отсутствие адаптации электрических режимов УКП к изменяющимся условиям плавки, а именно: 1) разной интенсивности аргонной продувки, выполняемой с помощью продувочных блоков в днище стальковша; 2) разных параметров шлака на поверхности жидкого металла. Изменение данных факторов в процессе обработки жидкой стали зависит от применяемой технологии получения отдельных марок стали. Необходимо отметить, что данные факторы оказывают значительное

влияние на условия горения электрических дуг в У КП. При интенсивных продувках и низком уровне шлака могут возникать ситуации, когда электрическая дуга является незкранированной, при этом нагрев жидкой ванны происходит с высокими тепловыми потерями, уменьшающими скорость нагрева металла и повышающими электропотребление. Отсутствие в существующих САУЭР и ПЭ алгоритмов динамической адаптации к изменению данных факторов приводит к ухудшению энергетических показателей У КП. По этой причине разработка усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами У КП, способных своевременно формировать управляющие сигналы на переключение ступени РПН печного трансформатора и изменять длины электрических дуг за счет коррекции уставок на полные сопротивления электрического контура при изменении условий горения дуг, является важной задачей.

2. Общая характеристика диссертации

Автор в своей диссертационной работе приводит научно обоснованные технические решения, направленные на повышение энергетических показателей У КП за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами с динамическим изменением ступени вторичного напряжения печного трансформатора и импедансов фаз вторичного электрического контура. В качестве основного критерия изменения электрического режима использован уровень коэффициента $K_{\text{ШЛАК}}$, рассчитываемый на основании высших гармоник токов дуг в фазах, расположенных рядом с возмущениями на поверхности жидкого металла, создаваемые при аргонной продувке. Для эффективной настройки алгоритма также использована новая методика определения оптимальных электрических режимов У КП, с помощью которой определяются наилучшие несимметричные режимы горения дуг с учетом расположения оборудования аргонной продувки.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Объем диссертации – 219 страниц. Содержание диссертации соответствует целям и задачам.

В первой главе выполнен анализ опыта эксплуатации электротехнических комплексов с У КП на различных металлургических предприятиях, а также проведен анализ наиболее распространенных систем управления электрическими режимами У КП. Выявлены недостатки данных систем. Основным недостатком является отсутствие динамической коррекции вторичного напряжения печного трансформатора, а также мощности, тока и длины электрической дуги при изменении степени

экранирования дуг из-за смены режима аргонной продувки и шлакового режима. Это является причиной ухудшения энергетических показателей У КП.

Во второй главе изучены режимы работы двух разных электротехнических комплексов с У КП, функционирующих на отечественных металлургических предприятиях – ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и Череповецкий металлургический комбинат ПАО «Северсталь». Анализируемые У КП имеют схожий состав электрооборудования и одинаковую структуру САУЭР и ПЭ, при этом конфигурация расположения продувочных блоков отличается, что дало возможность провести экспериментальные исследования режимов У КП при разных характерах формирования возмущающих воздействий для электрических дуг на поверхности жидкого металла. На основании полученных экспериментальных данных были разработаны математические модели исследуемых комплексов. Данные модели были использованы в дальнейшем для выполнения основных теоретических исследований по разработке решений, направленных на улучшение энергетических показателей У КП.

В третьей главе соискатель привел результаты экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг в У КП в зависимости от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов. Данные результаты исследований доказывают взаимосвязь значений суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг и общего КПД дуг от степени экранирования дуг, изменяющейся при разных режимах аргонной продувки и шлаковых режимах. Благодаря этому была доказана возможность улучшения энергетических показателей У КП за счет применения специальных электрических режимов с динамической коррекцией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней РПН печного трансформатора за счет анализа уровня высших гармоник токов дуг.

В четвертой главе соискатель привел описание разработанных усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней напряжения печного трансформатора. Для настройки этих алгоритмов была разработана методика определений граничных значений коэффициента $K_{\text{шлак}}$, который рассчитывается на основании информации о высших гармониках токов дуг, а также методика определения оптимальных несимметричных режимов горения дуг в У КП с учетом взаимного расположения зеркал жидкого металла и фаз с электродами.

В пятой главе соискатель привел результаты реализации и опытной эксплуатации усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами У КП, которые были внедрены на действующих электротехнических комплексах ПАО «ММК» и ЧерМК ПАО «Северсталь». Также приведен анализ технического эффекта по изменению удельного расхода электроэнергии на двух У КП. Внедрение усовершенствованных алгоритмов позволило достичь уменьшение удельного расхода электроэнергии на 2,5% относительно исходных режимов.

3. Достоверность, обоснованность и научная новизна основных результатов работы

Достоверность научных результатов подтверждается результатами компьютерного моделирования с применением современных программных средств, экспериментальных исследований и апробацией основных научных результатов на научно-технических конференциях и на действующем производстве. Результаты исследований не вызывают сомнений, поскольку основаны на общепринятых допущениях и методиках анализа, а также подтверждены экспериментально. Все теоретические положения и выводы в диссертации научно обоснованы.

По мнению официального оппонента, научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Получены результаты экспериментальных исследований, показывающие взаимосвязь значения суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг и общего КПД дуг от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов. Благодаря этому доказана возможность улучшения энергетических показателей У КП за счет применения специальных алгоритмов управления электрическими режимами с коррекцией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней РПН печного трансформатора за счет анализа уровня гармоник токов дуг.

2. Разработана методика задания оптимальных электрических режимов У КП, отличающаяся от известных тем, что учитывает расположение оборудования аргонной продувки и позволяет находить значения уставок импедансов вторичного электрического контура, задающих наилучшую несимметрию длин дуг, которая обеспечивает увеличение КПД дуг в фазах, расположенных в непосредственной близости к зеркалам жидкого металла на поверхности ванны в стальковше.

3. Разработаны усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП, отличающиеся от известных тем, что имеют динамическую адаптацию уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора, что обеспечивает повышение

КПД электрических дуг и снижение удельного расхода электроэнергии электро-технического комплекса «Питающая сеть – У КП».

4. Практическая значимость и ценность работы

Практическая значимость реализации результатов диссертационной работы заключается в улучшении энергетических показателей У КП, а именно: в снижении удельного расхода электроэнергии до 2,5% за счет повышения КПД электрических дуг благодаря динамической адаптации электрических режимов У КП при изменении аргонной продувки и шлаковых режимов. Технический эффект в снижении удельного расхода электроэнергии на указанную величину обуславливает значительный годовой экономический эффект, который может превышать 5 млн. руб. для одного У КП 120 т (25 МВА) с годовой обработкой жидкой стали в 1 млн. тонн. Результаты диссертации могут быть применены на действующих электро-технических комплексах с У КП, имеющих одну рабочую позицию с фиксированным расположением продувочных блоков в днище стальной ванны. Также результаты могут быть полезны специалистам и предприятиям, занимающимся разработкой и производством САУЭР и ПЭ для У КП.

Значимость результатов диссертации для науки заключается в том, что теоретические выводы соискателя развивают общую теорию электротехники электродуговых печей и позволяют практически реализовать создание промышленных электротехнических комплексов с У КП с улучшенной энергоэффективностью.

5. Подтверждение достаточной полноты публикаций основных положений результатов, выводов и заключения. Соответствие автореферата содержанию диссертации.

Основное содержание диссертации раскрыто в 13 печатных работах, из них: 3 научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 научных публикаций в изданиях, входящих в Scopus, получено 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. В представленных публикациях достаточно полно отражены все основные результаты диссертации. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

6. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует пунктам 1, 3 паспорта научной специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы, а именно: 1) п.1 Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и

связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; 2) п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления).

7. Вопросы и замечания

1. Общеизвестно, что в дуговых сталеплавильных электропечах, из-за несимметрии вторичного токоподвода, может развиваться негативное явление – возникновение «дикой» фазы (наибольшая мощность дугового разряда) и «мертвой» фазы (наименьшая мощность дугового разряда), что отрицательно сказывается на производительности печи, поскольку, хотя и суммарная мощность разрядов остается неизменной, увеличение производительности «дикой» фазы не полностью компенсирует снижение производительности «мертвой» фазы, так как существенно ухудшается равномерность выделения тепла по объему печи. Автор предлагает вводить преднамеренную несимметричность дуговых разрядов. Как, по его мнению, это отразится на производительности УПК?

2. В таблице 2.12 представлены расчетные значения взаимоиндуктивных сопротивлений фаз вторичных токоподводов исследуемых УКП, однако, не совсем понятно, каким образом они были получены?

3. Для оценки адекватности разработанных математических моделей электротехнических комплексов «Питающая сеть – электрический контур УКП» было использовано наложение экспериментально полученного массива токов и напряжений на соответствующие численные реализации этих моделей. Почему, в таком случае, рассчитанные характеристики, приведенные на рисунках 2.22-2.25, имеют не случайный характер, а представляют собой непрерывные гладкие кривые? Какие значения для тепловой постоянной времени дуги и градиента напряжения дугового столба применялись в численной реализации математических моделей при проведении этой процедуры?

4. Каким образом осуществлялось измерение толщины шлака, в рассматриваемых УКП, в процессе экспериментальных исследований скоростей нагрева жидкой стали?

5. При анализе результатов экспериментальных исследований влияния режимов аргонной продувки на гармонический состав токов электрических дуг, авто-

ром обнаружен факт существенного возрастания коэффициента гармонических искажений токов электрических дуг при значительном увеличении интенсивности аргонной продувки, приводящей к образованию волн и брызг жидкого металла и вызывающих закорачивание дуговых разрядов. В это же время, в разделе 3.4 диссертации, устанавливается факт снижения дисперсии тока дуги и величины коэффициента гармонических искажений при интенсивной аргонной продувке и уменьшенной длиной электрической дуги. Однако, можно предположить, что волны и брызги металла, вызванные интенсивной продувкой, могут закорачивать короткий дуговой разряд с большей вероятностью и, как следствие, должны увеличивать дисперсию тока. Каково мнение автора по данному предположению?

6. При использовании упрощенной формулы расчета коэффициента гармонического искажения тока – (5.1), в работе рекомендуется уменьшение коэффициента приведения a , используемого для вычисления коэффициента шлака КШЛАК., что должно привести к приемлемому значению этого коэффициента. Что автор подразумевает под приемлемым значением коэффициента шлака и на сколько следует уменьшить коэффициент приведения a ?

Необходимо отметить, что указанные замечания не являются принципиальными и не снижают ценность результатов диссертационной работы.

8. Заключение

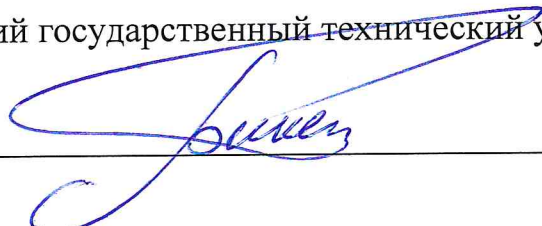
Диссертационная работа Рыжевола Сергея Сергеевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной научно-технической задачи по улучшению энергетических показателей улучшению энергетических показателей электротехнических комплексов с установками ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами с динамической адаптацией ступени вторичного напряжения печного трансформатора и импедансов фаз вторичного электрического контура УКП за счет анализа гармонического состава токов дуг. Все задачи, определенные целью исследования, объединены общей идеей создания энергоэффективных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами УКП. Последовательность изложения результатов исследований логически обоснована, взаимосвязана и направлена на решение поставленной прикладной научной проблемы, которая является актуальной.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в согласно пунктам 9-14 «Положения о присуждении

ученых степеней» (постановление Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г. с изменениями и дополнениями), а её автор, Рыжевол Сергей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент

Кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизированных
электротехнологических установок
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

 / Бикеев Роман Александрович /

«28» ноября 2025 г.

Подпись Бикеева Романа Александровича заверяю



Кандидатская диссертация Бикеева Р.А. защищена по специальности 05.09.10 – Электротехнология.

Сведения об организации:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Тел./факс: +7 (383) 346-08-43, +7(383) 346-02-09

E-mail: rector@nstu.ru, bikeevra@ya.ru

Сайт: www.nstu.ru