

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора
Нехамина Сергея Марковича 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 научной специальности

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Актуальность темы диссертационной работы

Современные предприятия черной металлургии включают в себя мощные электротехнические комплексы с электродуговыми печами различного класса. Основными электросталеплавильными агрегатами являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП) и установки ковш-печь (УКП) переменного тока. Доля производства жидкой стали в ДСП и УКП на компактных металлургических заводах может составлять 100%, а для крупных предприятий с полным циклом производства, включая доменные и кислородно-конверторные цеха, доходит до 50%. Необходимо отметить, что УКП – это один из наиболее мощных электроприемников в металлургической промышленности. По этой причине энергоэффективное управление режимами работы электротехнических комплексов с УКП является важной задачей.

В настоящее время большинство УКП оснащаются системами автоматического управления электрическими режимами зарубежного производства. Ведущими компаниями-производителями регуляторов являются: Primetals Technologies (система Melt Expert, в прошлом системы ArCOS и Simelt от Siemens Automation, Vatron), Danieli (системы Hi-REG и Q-REG), Amec Spie (E.M.P.E.R.E и A.R.C.E.L.E.C.) и др. В отличие от ДСП, где помимо регулятора электрического режима, функционирует система задания профиля (программы) плавки, задающая на разных стадиях расплавления металлошихты электрический режим и выполняющее автоматического управление режимами работы газокислородного оборудования, в случае с УКП управление электрическим режимом осуществляется полуавтоматическим образом. Сталевар, в зависимости от требуемой скорости нагрева жидкой стали, выбирает подходящую ступень напряжения печного трансформатора N_{Tr} и

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА	
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за №	
Дата регистрации	01.12.2025
Фамилия регистратора	

номер рабочей кривой N_{PK} для задания длины дуги. Сочетания N_{TP} и N_{PK} передаются в систему автоматического управления электрическими режимами, осуществляющую поддержание заранее рассчитанного значения параметра вторичного электрического контура У КП, например, импедансов фаз $Z_{2\phi}$. При таком подходе к управлению электрическими режимами У КП не учитывается изменение условий горения дуг при изменении режимов аргонной продувки и шлаковых режимов, что часто приводит к работе У КП с неэкранированными дугами, что снижает энергоэффективность и производительность процесса доводки стали. По этой причине актуальной задачей является разработка усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с функцией динамической адаптации вторичного напряжения печного трансформатора и импедансов фаз вторичного электрического контура к изменяющимся технологическим условиям.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений, изложена на 219 листах. Содержание работы соответствует поставленной цели и задачам.

Во введении приведена информация об актуальности темы, описаны цели и задачи исследований, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

В первой главе на основе выполненного анализа существующих алгоритмов и систем управления электрическими режимами У КП определены цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований электрических режимов различных промышленных У КП. Дано описание разработанной математической модели электротехнического комплекса «Питающая сеть – электрический контур У КП», являющейся инструментом проведения теоретических исследований по разработке новых решений с целью улучшения энергетических показателей У КП.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг в У КП в зависимости от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов. На основании полученных экспериментальных результатов автором определены подходы к решению по-

ставленных задач по совершенствованию алгоритмов управления электрическим режимом, основанные на использовании данных о гармоническом составе тока дуг в У КП.

В четвертой главе разработаны усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней Р П Н печного трансформатора.

В пятой главе приведена информация о реализации и экспериментальных исследований технико-экономической эффективности разработанных технических решений по улучшению энергетических показателей двух У КП, функционирующих на действующих металлургических предприятиях.

В заключении приведены общие выводы по диссертационной работе.

Достоверность и новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность результатов обеспечена результатами имитационного моделирования и экспериментальных исследований с использованием общепризнанных методов, с применением высокоточного измерительного оборудования на действующих электротехнических комплексах с У КП металлургических предприятий, а также критическим сопоставлением полученных в диссертации результатов с данными, опубликованными в технической литературе, посвящённой повышению энергоэффективности функционирования систем автоматического управления электрическими режимами электродуговых печей. Основные научные результаты прошли апробацию на научно-технических конференциях, публикацией статей в научных реферируемых журналах, в том числе международных. Все теоретические положения и выводы в диссертации научно обоснованы.

К наиболее существенным научным результатам, определяющим новизну работы, относятся:

1. Новые результаты экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг в У КП, показывающие взаимосвязь значения суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг и интенсивности аргонной продувки, а также степени заглужения дуг в шлак. На основании этого доказана возможность улучшения энергетических показателей У КП за

счет применения использования сигнала обратной связи по коэффициенту искажения тока дуги для динамической коррекцией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней РПН печного.

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

3. Усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП, отличающиеся от известных тем, что обеспечивают адаптацию уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора, что повышает усвоение металлом теплового излучения электрических дуг и способствует снижению удельного расхода электроэнергии электротехническим комплексом «Питающая сеть – У КП».

Значимость результатов диссертации для науки и практики

Результаты диссертации являются значимыми для науки и практики.

Научная значимость заключается в следующем:

1) получены результаты экспериментальных исследований, показывающие взаимосвязь высших гармоник тока электрических дуг и степени усвоения металлом теплового излучения дуг, а также доказывающих возможность улучшения энергетических показателей У КП за счет применения специального алгоритма автоматического управления электрическими режимами с использованием информации о высших гармониках токов дуг;

2) разработана усовершенствованная методика задания оптимальных электрических режимов У КП, учитывающая расположение оборудования аргонной продувки и позволяющая находить значения уставок импедансов вторичного электрического контура, задающих несимметрию дуг. Предложенная методика позволяет повысить усвоение металлом теплового излучения электрических дуг в

фазах, расположенных рядом с зеркалом жидкого металла на поверхности ванны в стальковше;

3) разработаны усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней Р П Н печного трансформатора, обеспечивающие уменьшение теплового излучения дуг на футеровку и свод, снижение удельного расхода электроэнергии;

4) получены результаты экспериментальных исследований усовершенствованных алгоритмов и методик задания оптимальных электрических режимов на однопозиционных У КП, доказывающие наличие технического эффекта в снижении удельного расхода электроэнергии.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в том, что применение усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией ступени Р П Н печного трансформатора и сигналов задания на импедансы фаз электрического контура к изменяющимся условиям аргонной продувки и толщине шлака позволяет снизить потребление электроэнергии однопозиционных У КП на 2-3% относительно исходных режимов и алгоритмов управления. Данный технический эффект является значительным из-за большого электропотребления У КП. Большое практическое значение имеют обширные экспериментальные данные, полученные автором в результате исследований действующих промышленных электротехнических комплексы с однопозиционными У КП на ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь».

Результаты диссертации являются могут быть использованы на других предприятиях черной металлургии, где функционируют однопозиционные У КП. Также результаты исследований могут быть использованы при модернизации существующих и разработке новых систем автоматического управления электрическими режимами У КП.

Степень завершенности диссертации и качество ее оформления

Диссертация Рыжевола С.С. содержит теоретические и практические результаты, сформулированные выводы, которые позволяют квалифицировать ее как

законченную научную работу. Диссертация написана грамотным техническим языком, хорошо оформлена, положения четко аргументированы.

Полнота опубликования основных результатов диссертации

Основные положения диссертации в достаточном объеме изложены в 13 печатных работах, из них: 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В представленных публикациях достаточно отражены все основные положения и выводы диссертационной работы.

Соответствие содержания автореферата основным идеям и выводам диссертации

Автореферат в полной мере отражает основные положения, идеи и выводы диссертации. Материалы автореферата дают полное представление о научных результатах работы.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В диссертации многократно повторяется словосочетание «тепловой КПД электрических дуг», но не дается его определение. Из контекста использования указанного словосочетания, например на стр. 6, 23, 99, 114 диссертации, можно сделать вывод, что имеется ввиду усвоение теплового излучения дуги. тепловое излучение дуги – не единственный механизм теплообмена дуги с окружающим пространством. Автор не приводит данных о соотношении составляющих тепловых потоков дуги в У КП: излучения, конвекции и теплопроводности. Следует учесть также, что тепловое действие дуги приводит к таким явлениям как испарение металла и шлака, эрозия электродов, которые не следует квалифицировать как полезные. Корректность использования термина «КПД» в данном случае вызывает сомнение также в связи с указанием на стр. 97-98 о возможности достижения этим параметром значения 100%.

2. На стр. 28 (рис.1.6) приведена функциональная схема системы управления электрическим режимом и перемещением электродов установок ковш-печь, а на стр. 68 и в заключении на стр. 175 сказано, что с исследуемых У КП управление осуществляется в ручном режиме. В результате выполненной автором работы канал управления переключением ступеней напряжения переведен в ав-

томатический режим. Автоматическое регулирование перемещения электродов обеспечивалось и ранее двухуровневой системой управления. Автор ее дополнил адаптивными алгоритмами автоматического определения уставок существующему регулятору.

3. Требуется ли выполнять изменение коэффициентов пропорциональной и интегральной частей нелинейного регулятора импеданса в составе существующих системы автоматического управления электрическим режимом и перемещением электродов УКП при переключении между режимами коротких, средних и длинных дуг, используемых в разработанном алгоритме управления? Как это учитывается в предложенных алгоритмах управления?

4. Использование формулы Фрелиха (2.45), по которой на стр. 73 диссертации автор предлагает определять противо-ЭДС дуги в модели Касси, не позволяет учесть зависимость от тока и температуры процесса, характерную для мощных промышленных дуг переменного тока.

5. На стр.126 указано требование обеспечения минимальной длины дуг в фазах, расположенных вблизи зеркал жидкого металла. Указан также критерий режима работы с короткими дугами, при котором коэффициент $KИ = P_d U_d \rightarrow \min$. Задача поиска минимума указанных параметров в диссертации не раскрыта. Не очевидно, что минимум существует, поскольку наименьшим значением указанных параметров является их нулевое значение, т.е. замыкание электрода на ванну металла. Очевидно, что это не может служить критерием выбора режима. Следовало бы определить не минимальное, а оптимальное значение упомянутых параметров.

6. На стр. 154 для оперативной настройки разработанных алгоритмов управления вводятся «весовые коэффициенты», учитывающие влияние изменения вторичного напряжения печного трансформатора на уровни высших гармоник. На стр. 157 указано, что коэффициент $K_{\text{шлака}}$, определяющий функционирование алгоритма адаптации режима, не обеспечивает однозначной связи с режимом УКП. Следует ли из этого вывод, что полученный в работе положительный эффект является результат удачного подбора поправочных коэффициентов?

7. При исходных алгоритмах управления электрическими режимами УКП операторы установок вручную выбирают нужную ступень напряжения трансформатора в зависимости от требуемой скорости нагрева жидкой стали, руководствуясь технологическими инструкциями, в которых определен примерный диапазон

скоростей нагрева для каждой ступени трансформатора. С использованием этой информации оператор У КП рассчитывает необходимое время нагрева жидкой стали, чтобы получить заданную температуру. Имеется ли автоматизировать выбор профиля плавки по задаваемому оператором времени нагрева и, если да, то как это сделать?

8. В диссертационной работе в главе 3 не рассмотрен альтернативный вариант использования коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения дуги K_U для определения степени экранирования дуг в У КП и оценки их КПД, в дополнении к коэффициенту гармонических искажений тока K_I . В диссертационной работе Тулупова П.Г. «Улучшение энергических показателей электродуговой печи за счет системы управления с анализом гармоник напряжений дуг» доказывалось, что для дуговых сталеплавильных печей (ДСП) коэффициент K_U является наиболее предпочтительным, т.к. имеет лучшую корреляцию с условиями горения дуг.

9. Приведенная на стр. 82 диссертации формула (2.66) для определения полной мощности не учитывает мощность несимметрии. Предлагаемый автором подход по введению дополнительной несимметрии по фазам электрического режима связан со снижением коэффициента мощности и потребует уменьшения активной мощности У КП. В диссертации не указано в какой степени такое снижение активной мощности будет скомпенсировано снижением тепловых потерь в зоне фаз, расположенных вблизи зеркала открытого металла в стальковше.

Необходимо отметить, что указанные замечания не снижают научную и практическую новизну и ценность результатов, полученных автором в диссертационной работе.

Заключение

Диссертационная работа Рыжевола Сергея Сергеевича «Улучшение энергических показателей установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новое решение актуальной научно-технической задачи по снижению расхода электроэнергии мощных однопозиционных У КП в составе электротехнических комплексов, функционирующих на предприятиях черной металлургии. Диссертационная работа Рыжевола С.С. соответствует пунктам 1, 3 паспорта научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (п.1. Развитие общей теории электротехни-

ческих 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; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления).

Представленная 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:

Профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий, д.т.н.

Сергей Маркович Нехамин

(докторская диссертация Нехамина С.М. защищена по научной специальности 05.09.10 – Электротехнология)

Подпись Нехамина С.М. заверяю:



ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ ПО РАБОТЕ С ПЕРЕКВАЛОМ
Л.И. ПОЛЕВАЯ

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово, ул.

Красноказарменная, д. 14, стр. 1. Тел./факс: +7 495 362-70-01

E-mail: universe@mpei.ac.ru Сайт: <https://mpei.ru>