

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.05,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»,  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 19.12.2025 № 15

О присуждении Рыжеволу Сергею Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Улучшение энергетических показателей установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами» по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы принята к защите 09 октября 2025 г. (протокол №12) диссертационным советом 24.2.324.05, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 508/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Рыжевол Сергей Сергеевич, 13 сентября 1991 года рождения. В 2021 году соискатель окончил обучение в магистратуре ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника». В 2025 году соискатель окончил обучение в аспирантуре ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника.

Работает в должности инженера-электроника в Обществе с Ограниченной Ответственностью «Объединенная сервисная компания».

Диссертация «Улучшение энергетических показателей установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами» выполнена на кафедре автоматизированного электропривода и мехатроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования РФ.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Николаев Александр Аркадьевич, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

1. Нехамин Сергей Маркович – доктор технических наук, проф. ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г Москва), кафедра электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий, профессор.

2. Бикеев Роман Александрович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Автоматизированные электротехнологические установки», доцент.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», в своем положительном отзыве, подписанным Макаровым Анатолием Николаевичем, доктором технических наук, заведующим кафедрой «Электроснабжения и электротехники», указала, что диссертация Рыжевола Сергея Сергеевича «Улучшение энергетических показателей установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами» соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п.п. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, представляет собой решение актуальной задачи по улучшению энергетических показателей установок ковш-печь, а её автор, Рыжевол Сергей Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата техни-

ческих наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Соискатель имеет 29 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 13 работ, из них: 3 в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК, 6 публикаций, входящих в систему цитирования Scopus, по теме диссертации получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Авторский вклад соискателя заключается в: 1) получении результатов экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг в У КП, показывающих взаимосвязь значения суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг и общего КПД дуг от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов; на основании чего 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 на основании анализа уровня высших гармоник токов дуг; 2) в разработке методики задания оптимальных электрических режимов У КП, учитывающей расположение оборудования аргонной продувки и позволяющей 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 сталковше; 3) в разработке усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП, обеспечивающих 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 электротехнического комплекса «Питающая сеть - У КП»; 4) доказательстве эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП и наличии технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Николаев, А.А. Разработка усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами установок ковш-печь с анализом гармонического состава токов дуг / А. А. Николаев, В. С. Ивекеев, П. Г. Тулупов, **С. С. Рыжевол** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 62-75. – DOI 10.14529/power220307. – EDN XDXLQZ.

2. Николаев, А.А. Разработка усовершенствованного алгоритма оптимального управления электрическими режимами установки ковш-печь с применением цифрового двойника / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, **С.С. Рыжевол**, М. В. Буланов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2024. – Т. 24, № 3. – С. 33-43. – DOI 10.14529/power240304. – EDN MHRUAF.

3. Nikolaev, A.A. Development of a Methodology for Selecting Optimum Asymmetric Arc Combustion Modes in Ladle-Furnace Installations under Different Argon Purging Regimes / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, **S.S. Ryzhevol**, I.A. Lozhkin // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 353-358, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906772.

4. Nikolaev, A.A. Analysing of the Efficiency for Ladle Furnace Improved Electric Modes Control Algorithms at PJSC "MMK" / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, **S.S. Ryzhevol**, V.S. Ivekeev // 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, pp. 90-95, doi: 10.1109/PEAMI58441.2023.10299919

На диссертацию и автореферат поступило 12 отзывов, все положительные:

**1. Отзыв ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» г. Санкт-Петербург** (д.т.н., доцент Ю. А. Сычев): 1) При каких отклонениях параметров системы электроснабжения требуется перенастройка электрических режимов У КП и алгоритма автоматического изменения ступени напряжения печного трансформатора и рабочей кривой, определяющей уставку импеданса вторичного электрического контура У КП? Например, на рис.3 автореферата приведена схема электроснабжения исследуемой У КП №2, в соот-

ветствии с которой питание агрегата может осуществляться как от сетевого трансформатора 220/35 кВ МВА, так и от трансформатора большей мощности — 160 МВА. Необходимо ли адаптировать разработанный алгоритм автоматического управления электрическими режимами данного У КП при смене режима электроснабжения? 2) Изменяются ли условия выбора оптимальных несимметричных режимов горения дуг в У КП, представленные выражениями (1) - (8), если выполнить изменения чередования фаз на вторичной стороне печного трансформатора? 3) Существуют ли другие конфигурации расположения продувочных блоков в У КП, отличные от приведенных двух вариантов на рис. 11. Если да, то потребуются ли коррекция разработанных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП?

**2. Отзыв ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара** (д.т.н., доцент Ю.В. Зубков): 1) Стр.9 «проведена проверка адекватности разработанных математических моделей..., ... модели имеют достаточную точность». Не увидел моделей, результатов оценки их адекватности. Не ясен термин «достаточная точность». 2) На рис.10 приведена блок-схема алгоритма автоматической адаптации режимов к текущим условиям. Автоматическая адаптация предполагает применение системы автоматического управления. В автореферате ничего об этом не сказано.

**3. Отзыв ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г.Казань** (к.т.н. доцент В.М. Бутаков): 1) Из материала автореферата не ясно, требуется ли адаптация предложенного алгоритма управления электрическими режимами У КП при изменении параметров питающей сети.

**4. Отзыв ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург** (к.т.н., доцент А.В. Костылев): 1) В автореферате на стр. 15 приведена формула (11) для расчета суммарного коэффициента искажения синусоидальности кривой тока  $K_I$ . Данная формула является модифицированной и отличается от известной. где действующее значение тока высших гармоник рассчитывается как квадратный корень суммы квадратов значений отдельных гармоник  $I_{(n)}$  с номерами  $n = 2, 3, 4 \dots 40$  (50). Чем обусловлена необходимость применения модифицированной формулы расче-

та  $K_I$ , в которой действующее значение высших гармоник тока определено через квадратный корень разности квадратов действующего значения тока дуги  $I_{RMS}$ , тока первой гармоники  $I_{(1)}$  и постоянной составляющей  $I_{(0)}$ . 2) Как осуществлялся поиск оптимальных уставок импеданса для реализации необходимой несимметрии длинных, средних и коротких дуг на математической модели электрического контура УКП с системой автоматического управления электрическими режимами согласно условиям, представленными выражениями (1) - (8) на стр. 14 и 15?

**5. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа** (д.т.н., доцент Р.Р. Саттаров): 1) В автореферате на рис. 8 не указаны численные значения КПД электрических дуг для случаев частичного и полного их экранирования. Показаны только действующие значения токов дуг. 2) В автореферате не указаны значения КПД дуг при использовании режимов коротких, средних и длинных дуг, задаваемых уставками импеданса вторичного электрического контура, рассчитанными по разработанной методике. 3) В автореферате в блок-схеме алгоритма отсутствует функция адаптации электрических режимов УКП к изменению напряжения питающей сети 35 кВ. Присутствует ли данная функция в алгоритмах, реализованных на действующем производстве?

**6. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа** (д.т.н., профессор Ф.Р. Исмагилов): 1) Из автореферата не ясно как определялись граничные значения коэффициентов  $K_{ШЛАК,ГР}$ , для разработанного алгоритма автоматического переключения ступени РПН печного трансформатора и импедансов фаз вторичного электрического контура УКП, блок-схема которого представлена на рис.10. 2) Почему в блок-схеме алгоритма на рис.10 введено условие по минимальному току электрической дуги «Токи фаз А, В, С > 40 А»? Как определялось значение минимального тока? 3) Как функционирует разработанный алгоритм автоматического переключения ступени РПН печного трансформатора и импедансов фаз вторичного электрического контура УКП при отсутствии донной продувки и использовании аварийной фурмы?

**7. Отзыв ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре** (д.т.н., доцент С.П. Черный): 1) Какое

влияние оказывает разработанный алгоритм автоматического управления электрическими режимами У КП на ресурс работы Р ПН печного трансформатора? 2) Каким образом определяются граничные значения счетчиков событий А и Б в разработанных усовершенствованных алгоритмах автоматического управления электрическими режимами У КП, представленных на рис. 5.11 и рис. 5.12. 3) Как определяется заданное значение коэффициента интенсивности нагрева  $K_{ИНЗ_{АД}}$ , используемое в выражениях (1.1) – (1.3). Также не сказано, почему в условиях (1.1) – (1.3) для длины дуги принято перекрытие шлаком на 20%.

**8. Отзыв АО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ», г. Магнитогорск** (к.т.н. А.В. Иванов): 1) На рис. 1 автореферата перед нелинейным регулятором импеданса отсутствует сигнал обратной связи. Каким образом рассчитывается фактическое значение импеданса фазы вторичного электрического контура? 2) Какое влияние оказывает уровень напряжения питающей сети 35 кВ на электрические характеристики У КП. Требуется ли учитывать данный уровень напряжения в алгоритме автоматического управления электрическими режимами? 3) На каком уровне АСУ ТП реализованы усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами исследуемых У КП. На уровне головных ПЛК агрегатов или в существующих регуляторах перемещения электродов?

**9. Отзыв АО «МЗ Балаково», с. Быков Отрог** (Е.Г. Пупышев): 1) Каковы диапазоны автоматического регулирования вторичного напряжения печных трансформаторов двух исследуемых У КП при использовании усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами. 2) Применяется ли фильтрация мгновенных значений суммарного коэффициента искажения синусоидальности токов дуг  $K_1$  перед расчетом коэффициента шлака  $K_{ШЛАК}$ , используемого в алгоритме автоматического управления электрическими режимами У КП?

**10. Отзыв ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» г. Нижний Новгород** (д.т.н., доцент А.Б. Дарьенков, к.т.н. доцент А.В. Серебряков): 1) Применимы ли предложенные алгоритмы при изменении параметров питающей сети. 2) Вызывают вопросы термины

«достаточная гибкость», «достаточная точность», применяемые автором. На наш взгляд, следовало бы привести количественную оценку данных параметров.

**11. Отзыв ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре** (д.т.н., профессор А.В. Сериков, к.т.н. доцент Р.В. Кузьмин):

1) На структурной схеме (рис. 5) не указаны блоки, описывающие конкретные элементы системы, такие как: печной трансформатор, короткая сеть, нелинейная электрическая дуга и перемещение электродов, что затрудняет анализ системы и взаимосвязь ее элементов между собой. 2) В тексте автореферата не раскрыты коэффициенты  $k_{\text{и}}$  (коэффициент излучения) и  $K_{\text{ИН}}$  (коэффициент интенсивности нагрева), представленные на рис.7, из-за этого не ясен выбор их размерных величин, а также общее влияние на последующие расчеты и исследования.

**12. Отзыв ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург** (д.т.н., в.н.с. А.В. Сивцов):

1) В автореферате не приведена схема отбора исходных электрических сигналов регулятора, не указаны способы и средства их отбора, измерения и регистрации. Поэтому невозможно даже угадать причины появления постоянных составляющих в сигналах тока. В реферате объяснений этому явлению нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью их научных достижений в области повышения эффективности электротехнических комплексов на базе электросталеплавильных установок. Профессор, д-р техн. наук С.М. Нехамин является признанным специалистом в области повышения энергоэффективности электротехнических комплексов с дугowymi сталеплавильными печами и установками ковш-печь. Доцент, канд. техн. наук Р.А. Бикеев - признанный специалист в области оптимизации энергопотребления электротехнических комплексов с электросталеплавильными агрегатами. В ведущей организации – ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» действует научный коллектив под руководством д-ра техн. наук, профессора Макарова А.Н., включающий в себя известных ученых в области разработки технологий и алгоритмов энергоэффективного управления электродуговыми печами различного класса и мощности.



**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработаны:**

1) усовершенствованная методика задания электрических режимов У КП, учитывающая расположение оборудования аргонной продувки и позволяющая находить значения уставок импедансов вторичного электрического контура, задающих несимметрию длин дуг, которая обеспечивает увеличение КПД дуг в фазах, расположенных в непосредственной близости к зеркалам жидкого металла;

2) усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора, что обеспечивает повышение КПД электрических дуг и снижение удельного расхода электроэнергии У КП;

**предложены** оригинальные научно обоснованные технические решения по улучшению энергетических показателей установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора, позволяющие снизить удельный расход электроэнергии У КП;

**доказана** эффективность усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП, заключающаяся в наличии технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии;

**введены** в работу на действующих электротехнических комплексах с У КП, функционирующих на металлургических предприятиях ПАО «ММК» (г. Магнитогорск) и ЧерМК ПАО «Северсталь» (г. Череповец) усовершенствованные электрические режимы и алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** взаимосвязь значений суммарного коэффициента гармонических

искажений токов дуг  $K_1$  ( $THD_1$ ) и КПД дуг; на основании этого **доказана** возможность улучшения энергетических показателей У КП за счет применения специальных электрических режимов с динамической коррекцией длины и несимметрии дуг, а также уровня вторичного напряжения печного трансформатора;

**применительно к проблематике диссертации эффективно использованы** методы математического моделирования и экспериментальных исследований, выполненных в условиях действующих производств на металлургических предприятиях ПАО «ММК» и ЧерМК ПАО «Северсталь»;

**изложена** идея улучшения энергетических показателей У КП за счет применения усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора, функционирующего на основании анализа гармонического состава токов дуг;

**раскрыта** взаимосвязь значения суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг и общего КПД дуг при различных технологических режимах У КП;

**изучено** влияние режимов аргонной продувки, шлаковых режимов и общего КПД электрических дуг на значения суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены:** усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора, обеспечивающие технический эффект по снижению удельного расхода электроэнергии;

**определена** эффективность применения усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора. На примере металлургических предприятий ПАО «ММК» и ЧерМК ПАО «Северсталь» доказано снижение удельного расхода элек-

троэнергии на 2–3%, что подтверждено результатами промышленной эксплуатации;

**получены** результаты экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг в УКП, доказывающие возможность улучшения энергетических показателей УКП за счет применения специальных электрических режимов с динамической коррекцией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней РПН печного трансформатора на основании анализа уровня высших гармоник токов дуг;

**представлена** методика задания оптимальных электрических режимов УКП, учитывающая расположение оборудования аргонной продувки и позволяющая находить значения уставок импедансов вторичного электрического контура, задающих наилучшую несимметрию длин дуг, при которой достигается улучшение энергетических показателей в виде повышения общего КПД дуг и снижения удельного расхода электроэнергии.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

корректность применения математического аппарата; использование в качестве исходных данных реальных осциллограмм токов и напряжений, полученных на действующих электротехнических комплексах с УКП; теоретические исследования выполнены с использованием реальных технических характеристик электротехнических комплексов «Питающая сеть–УКП»; эффективность подтверждается результатами промышленной эксплуатации усовершенствованных алгоритмов автоматического управления УКП на ПАО «ММК» и ЧерМК ПАО «Северсталь»;

**теория** базируется на известных положениях теории автоматического управления, методах теории электрических цепей, а также методах математического моделирования;

**идея** базируется на взаимосвязи значений суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг  $K_I$  ( $THD_I$ ) и теплового КПД дуг при различных технологических режимах УКП;

**выполнено** сравнение результатов исследований, полученных автором, с результатами, представленными в патентных и литературных источниках, посвя-

щенных вопросам улучшения энергетических показателей электротехнических комплексов с У КП;

**установлено** уменьшение удельного расхода электроэнергии при использовании разработанных алгоритмов управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней Р П Н печного трансформатора в промышленных условиях на агрегатах отечественных предприятий ПАО «ММК» и ЧерМК ПАО «Северсталь»;

**использованы** современные методы математического моделирования с применением математического пакета Matlab с приложением Simulink.

Личный вклад соискателя состоит в: 1) постановке целей и задач исследования; 2) обработке результатов экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг в У КП, показывающих взаимосвязь значения суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг и общего КПД дуг от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов; 3) в разработке методики задания оптимальных электрических режимов У КП, учитывающей расположение оборудования аргонной продувки и позволяющей находить значения уставок импедансов вторичного электрического контура, задающих наилучшую несимметрию длин дуг; 4) в разработке усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней Р П Н печного трансформатора; 5) доказательстве эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП и наличии технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

**В отзыве ведущей организации:**

1. В главе 1 в п.1.3 приведен анализ структуры и алгоритмов управления, используемых в действующих системах управления электрическими режимами ДСП и У КП. Отмечено, что в системах управления ArCOS и Melt Expert присутствует блок адаптации уставок полных сопротивлений (импедансов) вторичного электрического контура электродуговой печи в функции коэффициента искаже-

ния синусоидальности кривой тока  $K_I$  ( $THD_I$ ). Можно ли достичь необходимого технического эффекта по уменьшению расхода электроэнергии УКП используя существующие функции адаптации электрического режима, заложенные в эти системы, без применения дополнительных алгоритмов анализа гармонического состава токов дуг с последующим формированием заданий на ступень РПН печного трансформатора и номер рабочей кривой?

2. Во 2 главе диссертации приведены результаты исследования регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов. Полученные характеристики использованы в математической модели гидроприводов перемещения электродов двух исследуемых УКП. Насколько обоснована подробная реализация модели гидроприводов и нелинейных регуляторов импеданса в системе управления, если в диссертационной работе модель электрического контура применяется только для расчета электрических, рабочих и технологических характеристик агрегатов, а также определения положения рабочих точек на этих характеристиках? Для выполнения теоретических исследований по разработке усовершенствованных электрических режимов УКП можно было применить упрощенную модель без реализации динамических режимов работы САУЭР и ПЭ.

3. При реализации математических моделей электрических контуров УКП использовалось уравнение Касси для мгновенной электрической проводимости дуги. Как определялись значения тепловой постоянной времени дуги  $\theta_d$  для различных режимов аргонной продувки и шлаковых режимов? Насколько изменяется  $\theta_d$  при переходе от открытой электрической дуги к экранированной дуге, горячей под слоем шлака?

4. В главе 3 диссертации не указано какие дополнительные факторы влияют на значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока дуги  $K_I$ , кроме теплового КПД электрической дуги. Как эти дополнительные факторы могут повлиять на точность автоматического управления электрическими режимами УКП с применением коэффициента шлака  $K_{\text{ШЛАК}}$ , который рассчитывается на основе коэффициента  $K_I$ ?

5. В главе 4 приведена методика выбора оптимальных несимметричных режимов горения дуг с учетом расположения продувочных блоков в днище сталковша. Как осуществлялся поиск оптимальных уставок полных сопротивлений (импедансов) на математической модели электрического контура УКП для дальнейшей реализации режимов длинных, средних и коротких дуг?

6. В главе 5 в табл. 5.6 приведен анализ количества переключений ступеней РПН печного трансформатора за 1 месяц работы усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП. Показано, что применение алгоритма увеличивает общее число переключений на 10% относительно исходных алгоритмов. Насколько возможно превысить данную величину без возникновения значимого негативного эффекта на работу РПН печного трансформатора с позиции уменьшения ресурса его работы.

**В отзыве официального оппонента Нехамина С.М.:**

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 УКП: 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 УКП управление осуществляется в ручном режиме. В результате выполненной автором работы канал управления переключением ступеней напряжения переведен в автоматиче-

ский 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  $K_{ШЛАКА}$ , определяющий функционирование алгоритма адаптации режима, не обеспечивает однозначной связи с режимом УКП. Следует ли из этого вывод, что полученный в работе положительный эффект является результатом 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 смысл 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  $k$ . 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  $I_U$  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.

#### **В отзыве официального оппонента Бикеева Р.А.:**

1. Общеизвестно, что в дуговых сталеплавильных электропечах, из-за несимметрии вторичного токоподвода, может развиваться негативное явление – возникновение «дикий» 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 «дикий» фазы не полностью компенсирует снижение производительности «мертвой» фазы, так как существен-



но 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, автором 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, а используемого для вычисления коэффициента шлака  $K_{\text{ШЛАК}}$ , что должно привести к приемлемому значению этого коэффициента. Что автор подразумевает под приемлемым значением коэффициента шлака и на сколько следует уменьшить коэффициент приведения  $a$ ?

**В ходе заседания диссертационного совета:**

1. Какие дополнительные факторы влияют на значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока дуги  $K_L$ , кроме теплового КПД электрической дуги.

2. За счет изменения каких параметров осуществляется регулирование импеданса в системе управления электрическими режимами и перемещением электродов УКП?

3. Какую функцию имеет нелинейный регулятор импеданса?

4. Какая часть разработки математических моделей исследуемых УКП выполнялась непосредственно вами?

5. Какие значения может принимать длина электрической дуги в исследуемых УКП и как она измеряется?

6. В чем заключается полученный технический эффект и какова его величина?

7. Приведите приблизительную оценку полученного экономического эффекта?

8. Как изменится вид электрических характеристик УКП при использовании алгоритма автоматического управления электрическими режимами?

9. Как оценивалась величина влияния шлаковых режимов и режимов аргонной продувки на гармонический состав токов дуг?

10. Коэффициент шлака — это общий коэффициент или индивидуальный для каждого электрода? Как определяется?

11. Какие энергетические показатели оценивались при выполнении работы?

Соискатель Рыжевол С.С. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привёл собственную аргументацию:

1. В результате проведенных экспериментальных исследований влияния шлаковых режимов и режимов аргонной продувки на гармонический состав токов дуг УКП было установлено, что основными факторами, влияющими на суммарный коэффициент искажения синусоидальности кривой тока ( $K_I$ ) в УКП, являются условия ее горения и степень экранирования, которые определяют градиент напряжения дугового столба. Дополнительными факторами, влияющими на суммарный коэффициент искажения синусоидальности кривой тока ( $K_I$ ) являются: 1) длина электрической дуги; 2) ток электрической дуги; 3) суммарное индуктивное сопротивление электрического контура; 4) значение вторичного напряжения. Однако влияние дополнительных факторов составляет порядка 10–15%, а остальные 85–90% весовой доли обусловлены именно условиями горения дуги и степенью её экранирования.

2. На втором уровне системы управления электрическими режимами УКП сталевар задает требуемую ступень РПН силового трансформатора и номер рабочей кривой. Затем на первом уровне, в соответствии с матрицей уставок, то есть с такой таблицей, где каждому сочетанию ступени напряжения и номеру рабочей кривой соответствует заданная уставка импеданса. То есть, таким образом, номер рабочей кривой на данной ступени трансформатора однозначно определяет величину заданного значения импеданса вторичного электрического контура. А непосредственно регулирование осуществляется самой системой управления за счёт нелинейного регулятора импеданса, за счёт изменения длины электрических дуг.

3. Нелинейный регулятор импеданса является пропорционально-интегральным звеном, но у него есть определенные особенности. Уставки пропорционального и интегрального коэффициентов в системе управления первого уровня задаются независимо для каждого номера рабочей кривой.

4. Математические модели исследуемых агрегатов разрабатывались лично мной, но на основании разработанных ранее методик и формул. Данные методики и формулы представлены в работах Николаева, Тулупова.

5. Для исследуемых УКП диапазон изменения длины электрических дуг составляет от 70 до 160 мм. При этом величина 70 мм — это для ступеней РПН печ-

ного трансформатора с пониженным напряжением. Длина дуги рассчитывается математически на основании информации о градиенте напряжения дугового столба.

6. В рамках оценки эффективности разработанных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами УТП я оцениваю снижение удельного расхода электроэнергии. Относительное изменение выражено в процентах относительно исходных электрических режимов и составляет -2,46% для УТП№1 ПАО «ММК» и -2,2% для УТП№2 ПАО «Северсталь».

7. Для электросталеплавильного цеха с объёмом производства 2 млн т в год и средней стоимости одного кВт\*ч 4 рубля, величина экономического эффекта за год может составлять составляет порядка 9 млн руб.

8. Вид графиков зависимости активной, реактивной и полной мощностей от величины тока зависит от параметров вторичного электрического контура, от активного и индуктивного сопротивлений короткой сети и печного трансформатора, от уровня вторичного напряжения. А рабочие кривые и, соответственно, уставка импеданса определяет положение точки на этих графиках. Соответственно, изменяя рабочую кривую, мы на этом графике смещаемся влево, либо вправо.

9. Были проведены экспериментальные исследования, при которых происходили измерения коэффициента гармонических искажений тока дуг при различных степенях экранирования электрической дуги, при различных электрических режимах, при различных уровнях аргоновой продувки. При экспериментах варьировалась степень погружения электрической дуги в шлак, интенсивность аргоновой продувки и при этом наблюдались значительные изменения коэффициента гармонических искажений синусоидальности.

10. Коэффициент шлака для представленных алгоритмов следует рассчитывать для фаз, находящихся вблизи продувочных блоков, то есть по наихудшему составу гармонических составляющих токов. Но на основании полученного коэффициента шлака осуществляется изменение электрического режима для всех трех фаз.

11. В работе оценивались следующие энергетические показатели: расход электрической энергии; потери мощности; коэффициент мощности; коэффициент

гармонических искажений токов дуг. Поскольку в основу алгоритма положено поддержание максимальной длины электрической дуги при условии её полного экранирования, в таком случае потери мощности в короткой сети уменьшаются. Но если дуга экранирована плохо, то мы уменьшаем длину тем самым экранируя её. В таком случае потери во вторичном электрическом контуре возрастают, поскольку возрастает вторичный ток. Но это компенсируется за счёт увеличения КПД электрической дуги и минимизации тепловых потерь из-за этого.

Диссертационный совет установил, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую критериям «Положения о присуждении ученых степеней» №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 19 декабря 2025 г. диссертационный совет принял решение за разработку научно обоснованных технических решений, направленных улучшение энергетических показателей установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура УКП и ступеней РПН печного трансформатора, присудить Рыжеволу Сергею Сергеевичу учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 10 человек, из них – 9 докторов наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 10, против присуждения ученой степени – нет, не проголосовали – нет.

Председатель

диссертационного совета

Ученый секретарь

диссертационного совета



Корнилов Геннадий Петрович

Одинцов Константин Эдуардович

19 декабря 2025 г.