

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновационной деятельности

ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет»


М.Г. Сульман
« 26 » 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

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 работы

В настоящее время в электросталеплавильных цехах крупных металлургических предприятий Российской Федерации и зарубежных стран функционируют мощные электротехнические комплексы на базе дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). В ДСП производят жидкий полупродукт с промежуточным химическим составом, который в дальнейшем обрабатывается на УКП, где жидкую сталь доводят до требуемых химических и температурных параметров. Особенностью данных агрегатов является высокое годовое электропотребление, обусловленное большой мощностью печных трансформаторов, составляющих 80 – 300 МВА для ДСП с весом выпуска жидкой стали 100-250 т и 20-56 МВА для УКП с аналогичным весом обрабатываемой стали в стальковшах. В зависимости от технологии обработки стали в УКП и производимого сортамента, удельный расход электроэнергии данных агрегатов находится в диапазоне $W_{уд} = 10 - 70$ кВт·ч/т на 1 тонну стали. При готовом производстве крупных электросталеплавильных или кислородно-конверторных цехов от 2 до 10 млн. тонн, электропотребление группы УКП большой мощности может находиться в диапазоне 0,1 – 0,5 ТВт·ч, что является значительной величиной, превышающей электропотребление всех других электроприемников металлургических цехов (электроприводов прокатных станов, электроприводов общепромышленных механизмов, индукционных печей), за исключением сверхмощных ДСП. Большая величина электропотребления УКП влияет на себестоимость готовой металлургической продукции электросталеплавильных цехов.

Электротехнические комплексы на базе УКП включают в себя: 1) питающую сеть среднего напряжения 6-35 кВ; 2) печной трансформатор УКП с устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) или без нагрузки (ПБВ); 3) вторичный электрический контур

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за №	_____
Дата регистрации	02.12.2025
Фамилия регистратора	_____

УКП с короткой сетью и электрическими дугами; 4) гидроприводы перемещения электродов; 5) систему автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов (САУЭР и ПЭ) УКП. Энергоэффективность комплексов с УКП зависит, как от технологических факторов, так и от качества настройки и используемых алгоритмов управления в САУЭР и ПЭ. Современные УКП оснащаются зарубежными системами управления электрическими режимами и перемещением электродов ведущих зарубежных компаний Primetals Technologies (ранее Siemens VAI и Vatron), Danieli, Amec Spie. Данные системы управления осуществляют поддержание заранее рассчитанных параметров вторичного электрического контура УКП (полное сопротивление фазы $Z_{2\phi}$, активное сопротивление дуг R_d или полные проводимости фаз $Y_{2\phi}$). Рассчитанные значения данных параметров привязаны к ступеням РПН (БПВ) печных трансформаторов и рабочим кривым, которые сталевар УКП выбирает вручную в зависимости от требуемой скорости нагрева жидкого металла, при этом при ручном управлении вторичным напряжением печного трансформатора и тока электрической дуги не учитывается изменение условий горения дуг в УКП в процессе обработки жидкой стали. Такой подход не позволяет автоматически адаптировать электрический режим УКП к динамически меняющимся условиям плавки, в первую очередь к состоянию шлака и интенсивности донной продувки аргоном. Однако эти факторы определяют степень экранирования электрических дуг и, как следствие, их тепловой КПД. В связи с этим актуальным является разработка усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами УКП, обеспечивающих динамическую адаптацию вторичного напряжения печного трансформатора и импедансов вторичного электрического контура к изменяющимся условиям горения дуг в УКП.

2. Объем, структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем диссертации: 192 страницы основного текста и 27 страниц приложений. Диссертация содержит 88 рисунков, 35 таблиц. Список литературы включает в себя 106 наименований.

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы и её научная новизна, сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования, показаны теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ состава электрооборудования и технологических режимов установок ковш-печь различного класса и мощности, проанализированы существующие алгоритмы и системы управления электрическими режимами УКП. Определены недостатки используемых алгоритмов и систем управления, которые негативным образом сказываются на энергетических показателях УКП. Обозначены пути решения проблемы энергоэффективности УКП за использования усовершенствованных алгоритмов управления вторичным напряжением печного трансформатора и уставкой задания полного сопротивления электрического контура УКП, учитывающих изменения условий горения дуг при разных шлаковых режимах и режимах аргоновой продувки.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований электрических и технологических режимов двух однопозиционных У КП, функционирующих в электроплавильных цехах российских металлургических предприятий. На основе полученных данных разработаны математические модели электротехнических комплексов «Питающая сеть - электрический контур У КП». Выполнена проверка адекватности моделей. Таким образом, в данной главе был подготовлен необходимый объем экспериментальных данных для дальнейших теоретических исследований по разработке технических решений, направленных на улучшение энергетических показателей У КП.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг У КП в зависимости от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов. Доказана взаимосвязь стабильности горения дуги и теплового КПД дуг со значением суммарного коэффициента искажения синусоидальности токов дуг K_I . Показано, что уменьшение длины электрической дуги в условиях интенсивной аргонной продувки способствует повышению стабильности горения дуг за счёт их погружения в мениск жидкого металла и частичного экранирования, что улучшает теплопередачу и снижает K_I . Также показано влияние аргонной продувки на геометрию поверхности жидкого металла, а именно: детально рассмотрен процесс формирования зеркала жидкого металла, которое приводит к оголению электрических дуг находящихся вблизи продувочных блоков, что негативно сказывается на их стабильности горения, тепловом КПД и приводит к росту K_I . Таким образом, доказана обоснованность использования в качестве критерия для работы усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП информации о гармоническом составе токов K_I .

В четвертой главе приведено описание разработанных усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней РПН печного трансформатора. Усовершенствованные алгоритмы за счёт анализа текущего значения коэффициента шлака $K_{\text{ШЛАК}}$, рассчитанного на основе текущего суммарного коэффициента искажения синусоидальности кривой тока дуг K_I , обеспечивают динамическую адаптацию вторичного напряжения печного трансформатора и полного сопротивления вторичного контура $Z_{2\phi}$, благодаря чему достигается наилучший тепловой КПД электрических дуг, снижаются тепловые потери и уменьшается электропотребление У КП. Также в данной главе разработана методика задания оптимальных несимметричных режимов горения дуг, учитывающая расположение возмущений на поверхности жидкого металла относительно трех электродов. Кроме того, разработана вторая методика для определения граничных значений $K_{\text{ШЛАК}}$ для алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП, обеспечивающая его эффективное функционирование.

В пятой главе приведена реализация и экспериментальные исследования эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами на двух исследуемых У КП, функционирующих на отечественных металлургических

предприятиях. На основании результатов экспериментальных исследований выполнена оценка технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии двух У КП.

В заключении приведены основные выводы по результатам, достигнутым в ходе выполнения диссертационной работы.

В приложениях содержатся результаты анализа исходных и усовершенствованных электрических режимов исследуемых У КП, а также акт внедрения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами У КП на действующем производстве.

3. Научная новизна и достоверность полученных результатов

1. Получены новые результаты экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг в У КП, показывающие взаимосвязь значения суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг K_I и КПД дуг от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов. 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 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 повышение КПД дуг в фазах, расположенных в непосредственной близости к зеркалам жидкого металла на поверхности ванны в сталковше.

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 У КП.

4. Получены результаты экспериментальных исследований эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП, доказывающие наличие технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии У КП.

Достоверность и обоснованность научных положений базируются на корректном применении основных законов электротехники, методов математического моделирования, использовании в качестве исходных данных реальных осциллограмм токов и напряжений, полученных на действующих электротехнических комплексах с У КП. Также достоверность доказана результатами промышленных испытаний разработанных алгоритмов управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура и вторичного напряжения печного трансформатора на агрегатах российских металлургических предприятий ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь».

4. Научная и практическая значимость результатов

Научная значимость результатов диссертации состоит:

1) в полученных результатах исследований, доказывающих возможность улучшения энергетических показателей У КП за счет применения специальных электрических режимов с динамической коррекцией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней Р П Н печного трансформатора за счет анализа уровня гармоник токов дуг;

2) в разработке усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней Р П Н печного трансформатора на основании коэффициента шлака, рассчитываемого с использованием информации о гармоническом составе токов дуг, что обеспечивает повышение КПД дуг и снижение удельного расхода электроэнергии У КП;

3) в разработке методики задания оптимальных электрических режимов У КП, учитывающей расположение оборудования аргонной продувки и позволяющей находить значения уставок импедансов вторичного электрического контура, обеспечивающих наилучшую несимметрию длин дуг, при которой достигается повышение КПД дуг в фазах, расположенных в непосредственной близости к зеркалам жидкого металла на поверхности ванны в стальковше.

Практическая значимость работы состоит в том, что применение разработанных усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП обеспечивает технический эффект по снижению удельного расхода электроэнергии на 2–3 % относительно исходных электрических режимов и алгоритмов управления, подтвержденный результатами экспериментальных исследований на металлургических предприятиях Российской Федерации (ПАО «ММК» и ЧерМК ПАО «Северсталь»). Достижение технического эффекта становится возможным благодаря динамической адаптации уставок импеданса вторичного электрического контура, определяющих длины электрических дуг, и ступеней Р П Н печного трансформатора, задающих уровень вторичного напряжения в зависимости от текущих условий аргонной продувки и шлакового режима, что повышает тепловой КПД дуг и увеличивает скорость нагрева металла без значительного увеличения затрат электроэнергии.

5. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Разработанные научно обоснованные технические решения являются универсальными и могут быть внедрены на других действующих металлургических предприятиях с электротехническими комплексами на базе мощных однопозиционных У КП. Также результаты диссертации могут использоваться при разработке новых и модернизации существующих систем автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов У КП.

6. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям

На основе проведенного анализа предоставленных материалов можно сделать вывод, что диссертационная работа Рыжевола С.С., полностью отвечает всем критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. В ней соблюдены следующие принципы соответствия:

1. Указанная соискателем цель работы «Улучшение энергетических показателей У КП за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами» реализована в рамках представленной диссертации.

2. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы, содержит информацию об основных положениях и выводах диссертационного исследования, позволяет сделать заключение о научном уровне работы, ее содержанию, а также отражает научные положения, результаты, основные выводы, научную новизну и практическую значимость диссертации.

3. Основные выводы и результаты диссертационной работы соответствуют поставленным задачам исследований и сформулированы соискателем структурно и содержательно.

4. Научные публикации соискателя с достаточной полнотой отражают сущность диссертационной работы, а также полученные результаты и выводы.

5. Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

- по формуле специальности и объекту исследования, связанными с закономерностями использования электрической энергии, принципами и средствами управления электротехнических комплексов, построенных на базе систем электроснабжения, силового электрооборудования и систем автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов У КП;

- по области исследований, в плане разработки алгоритмов эффективного управления электротехническими комплексами в различных режимах работы (энергоэффективное управление электрическими режимами установок ковш-печь за счёт использования усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами У КП, обеспечивающих снижение удельного расхода электроэнергии, за счет динамической адаптации полных сопротивлений вторичного электрического контура У КП и вторичного напряжения печного трансформатора к текущим технологическим режимам У КП), а также математического, имитационного и компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем (разработка математических моделей электротехнических комплексов «питающая сеть – электрический контур У КП»).

Диссертационная работа написана доступным языком, четко и логично структурирована. Материалы и результаты исследований изложены в полном объёме, достаточным для понимания, доступно и репрезентативно, что позволило автору раскрыть научно-техническую значимость диссертационной работы на необходимом квалификационном уровне.

7. Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В главе 1 на 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 искажения синусоидальности кривой тока K_I (THD_I). Можно

ли достичь необходимого технического эффекта по уменьшению расхода электроэнергии У КП 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 У КП. 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 У КП можно было применить упрощенную модель без реализации динамических режимов работы САУЭР и ПЭ.

3. При реализации математических моделей электрических контуров У КП использовалось уравнение Касси для мгновенной электрической проводимости дуги. Как определялись значения тепловой постоянной времени дуги θ_d для различных режимов аргоновой продувки и шлаковых режимов? Насколько изменяется θ_d при переходе от открытой электрической дуги к экранированной дуге, горящей 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 У КП 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 У КП 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 У КП. 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.

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

8. Заключение по диссертационной работе

Диссертация Рыжевола Сергея Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой. В диссертационной работе представлено решение актуальной задачи по повышению энергетических показателей установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами. Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г с изменениями и дополнениями), а ее автор, Рыжевол Сергей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Диссертация и автореферат заслушаны и обсуждены на заседании кафедры "Электро-снабжения и электротехники" ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (протокол заседания № 4 от "5" ноября 2025 г.).

Заведующий кафедрой «Элек-
троснабжения и электротехни-
ки» ФГБОУ ВО «Тверской го-
сударственный технический
университет»,
д.т.н., профессор

Макаров

Макаров Анатолий Николаевич
« 26 » 11 2025 г.

Докторская диссертация Макарова А.Н. защищена по специальности 05.09.10 – Электротех-
нология.

Подпись Макарова А.Н. заверяю:

Подпись *Макаров А.Н.*
ДОСТОВЕРЯЮ
Заведующий кафедрой
ФГБОУ ВО «Тверской го-
сударственный технический университет»
Макаров



Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образова-
ния «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)

Адрес: 170026, Россия, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д.22, Тел.: +7 (4822) 52-63-35,

Факс: +7 (4822) 52-62-92, E-mail: common@tstu.tver.ru, <http://www.tstu.tver.ru>