

На правах рукописи



РЫЖЕВОЛ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСТАНОВОК
КОВШ-ПЕЧЬ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ
АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель:

Николаев Александр Аркадьевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Нехамин Сергей Маркович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий
Бикеев Роман Александрович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», доцент кафедры автоматизированных электротехнологических установок

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Защита состоится «19» декабря 2025 г. в 13 час 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.324.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте <http://magtu.ru/> ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.324.05
канд. техн. наук, доцент

Одинцов Константин Эдуардович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время черная металлургия является одной из ключевых отраслей российской экономики, существенно влияющая на формирование ВВП страны. Согласно последним данным, доля черной металлургии в ВВП страны составляет около 5%, в промышленном производстве 18% и формирует 14% экспортных поставок. В современной черной металлургии благодаря высокой производительности и экономической эффективности в сравнении с другими сталеплавильными агрегатами широкое распространение получило электросталеплавильное производство. Так, согласно последним данным на долю электросталеплавильного производства приходится 45-50% общего объема производства стали в стране. Крупнейшими производителями электростали в России являются: Магнитогорский металлургический комбинат, Череповецкий металлургический комбинат, Новолипецкий металлургический комбинат, Оскольский электрометаллургический комбинат, Уральская сталь, Выксунский металлургический завод, Ревдинский метизно-металлургический завод и др. Основой электрометаллургического производства являются электротехнические комплексы с дугowymi сталеплавильными печами (ДСП) и установками ковш-печь (УКП). Эксплуатация данных комплексов сопряжена со значительными затратами электроэнергии, которые вносят весомую часть в себестоимость конечной продукции.

В электрометаллургии ДСП используются как основной агрегат для расплавления твердой металлошхты и получения жидкого полупродукта, который затем доводят в УКП до требуемых температурных и химических параметров. Благодаря высокой производительности, гибкости производственного цикла и точности получаемого химического состава выпускаемой стали, УКП находит применение не только в электросталеплавильных цехах, но и в цехах с конвертерным производством стали, что позволяет существенно повысить эффективность конвертерного производства и качество получаемой стали, делая процесс более гибким и управляемым. Несмотря на преимущества внедрения УКП в металлургическое производство, энергопотребление агрегатов остаётся значительным и составляет весомую долю в себестоимости конечного продукта. При этом эффективность функционирования алгоритмов и систем автоматического управления электрическими режимами УКП существенно влияет на уровень энергопотребления. Достижение наилучших электрических режимов УКП, обеспечивающих минимальный удельный расход электроэнергии, возможно в случае применения алгоритмов и систем автоматического управления, обеспечивающих автоматическую адаптацию вторичного напряжения печного трансформатора и импеданса вторичного электрического контура УКП к изменяющимся условиям горения дуг, на которые влияют режим аргонной продувки, толщина и состояние шлака, а также расположение зеркал жидкого металла относительно электродов УКП.

Современные электротехнические комплексы на базе УКП в большинстве случаев оснащаются зарубежными системами управления электрическими режимами и перемещением электродов Melt Expert, ArCOS, Simelt, Q-REG, HI-REG, E.M.P.E.R.E. и A.R.C.E.L.E.C. 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, например, 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 напряжения трансформатора и рабочим кривым, которые сталеваз 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 аргонной продувки. Между тем именно 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 У КП, обеспечивающих динамическую адаптацию вторичного напряжения печного трансформатора и импедансов вторичного электрического контура к изменяющимся условиям горения дуг в У КП.

Степень разработанности. Исследования, направленные на снижение энергопотребления электротехнических комплексов с ДСП и У КП, описаны в научных трудах отечественных и зарубежных учёных. Среди зарубежных авторов следует выделить работы Krüger K, Bowman B. и Köhle S, а среди отечественных – работы Ю.М. Миронова, А.Н. Макарова, А.А. Николаева, Р.А. Бикеева, А.Н. Шпигановича, С.М. Нехамина, П.Г. Тулупова, В.А. Кудрина, В.П. Рубцова, В.А. Серикова, Л.А. Кучумова, Я.С. Паранчук и других. При этом фундаментальные основы данного направления исследований были заложены в работах А.Д. Свенчанского, М.Я. Смелянского, Ю.Н. Тулуевского, И.Ю. Зинурова, Р.В. Минеева и Ю.А. Гудима.

Значительное количество исследований проводится в области управления электрическими режимами ДСП с применением информации о гармоническом составе токов и напряжений дуг. Однако вопрос автоматического управления электрическими режимами У КП с возможностью автоматической адаптации к условиям аргонной продувки и шлаковому режиму в литературе подробно не рассматривался. В связи с этим, данный вопрос заслуживает рассмотрения в рамках отдельного исследования.

Объектом исследования являются установки ковш-печь, функционирующие в электросталеплавильных цехах отечественных металлургических предприятий черной металлургии ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь».

Предметом исследования является система автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов У КП.

Целью диссертационной работы является улучшение энергетических показателей У КП за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ состава электрооборудования, технологических режимов и существующих подходов к управлению электрическими режимами исследуемых установок ковш-печь.
2. Проведение экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг У КП в зависимости от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов.
3. Разработка математических моделей электротехнических комплексов «питающая сеть – электрический контур У КП» для исследования и сравнения электрических режимов У КП, а также для нахождения наилучших значений коэффициентов несимметрии длин дуг и уставок импедансов вторичного электрического контура, обеспечивающих снижение удельного расхода электроэнергии У КП.
4. Разработка 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.
5. Разработка усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с использованием информации о гармоническом составе токов дуг, выраженных через коэффициент шлака $K_{\text{шлак}}$, и обеспечивающих повышение КПД электрических дуг, повышение скорости нагрева металла, уменьшение времени работы под током, и, как следствие, снижение удельного расхода электроэнергии, за счет динамической

адаптации уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней Р ПН печного трансформатора к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам.

6. Разработка методики определения граничных значений коэффициента шлака $K_{\text{шлак}}$ для разработанного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП, позволяющей осуществлять своевременные изменения вторичного напряжения печного трансформатора и импеданса вторичного электрического контура.

7. Оценка эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией вторичного напряжения печного трансформатора и импедансов вторичного электрического контура, а также усовершенствованных электрических режимов У КП.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получены новые результаты экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг в У КП, показывающие взаимосвязь значения суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг и общего КПД дуг от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов. На основании этого доказана возможность улучшения энергетических показателей У КП за счет применения специальных электрических режимов с динамической коррекцией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней Р ПН печного трансформатора за счет анализа уровня высших 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 Р ПН печного трансформатора, что обеспечивает повышение КПД электрических дуг и снижение удельного расхода электроэнергии электротехнического комплекса «Питающая сеть – 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.

Практическая ценность и реализация работы заключается в ее универсальности и доказанной эффективности. Разработанные решения могут быть интегрированы как на уже эксплуатируемом оборудовании установок ковш-печь в существующие системы управления электрическими режимами, так и при конструировании новых агрегатов, а также при разработке новых систем управления электрическими режимами установок ковш-печь. Применение усовершенствованных алгоритмов автоматического управления обеспечивает доказанный технический эффект по снижению удельного расхода электроэнергии на 2–3 %, подтвержденный результатами промышленной эксплуатации на ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь». Достижение технического эффекта становится возможным благодаря динамической адаптации уставок импеданса вторичного электрического контура, определяющих длины электрических дуг, и ступеней Р ПН 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. Предложенные решения универсальны и могут быть эффективно интегрированы как в существующие, так и в новые системы управления электрическими режимами У КП.

Методика проведения исследований. Исследование базируется на фундаментальных принципах электротехники, теории автоматического управления и математической статистики. Практическая реализация математических моделей, описывающих электрические сети, контуры электросталеплавильных агрегатов и электрическую дугу, была выполнена в программной среде Simulink из состава математического пакета Matlab. Эмпирической базой для работы послужили производственные данные, полученные на металлургических комбинатах ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь». В ходе анализа использовался широкий спектр информации: осциллограммы токов и напряжений, записанные регистратором электрических событий РЭС-3, видеозаписи поведения поверхности расплава при аргонной продувке, характеристики гидроприводов электродов и параметры систем автоматического управления электрическими режимами У КП. Оценка итогового технического эффекта проводилась путем сравнения статистических данных по плавкам за периоды до и после внедрения разработанных решений.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований взаимосвязи суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг и общего КПД дуг от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов, доказывающие 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 в функции уровня высших гармоник токов дуг.

2. Методика задания оптимальных электрических режимов У КП, учитывающая расположение оборудования аргонной продувки и позволяющая 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. Усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора, обеспечивающие повышение КПД электрических дуг и снижение удельного расхода электроэнергии электротехнического комплекса «Питающая сеть – У КП».

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

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются как теоретической, так и практической базой. Теоретическая обоснованность подтверждается корректностью исходных предпосылок и методов моделирования, а также согласованностью результатов с работами других авторов. Практическая же ценность и 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 отечественных предприятий ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь».

Соответствие паспорту научной специальности. Проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 1, 3 паспорта научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (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 электромагнитные, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электрооборудования; п.3. Разработка, структурный и параметрический

синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления).

Апробация результатов диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 международных конференциях, в том числе: 2024 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2024); 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2023); 2022 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2022); 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (г. Магнитогорск, 2024); 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (г. Магнитогорск, 2022); 2022-2024 80-82 Международной научно-технической конференций «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2022-2024).

В 2023 – 2025 гг. исследования выполнялись в рамках государственного задания по теме «Разработка фундаментальных основ и научно обоснованных технических решений для повышения ресурсо- и энергоэффективности электротехнических и технологических систем предприятий горно-металлургического комплекса России» (научный проект №FZR-2023-0008).

В 2021-2023 гг. экспериментальные исследования, разработка и внедрение усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами однопозиционных У КП выполнялись в рамках НИОКР на предприятиях черной металлургии ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь».

Публикации. По содержанию диссертации опубликовано **13** научных трудов, в том числе **3** статьи в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, **6** статей в изданиях, индексируемых Scopus, получено **4** свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Структура диссертации включает в себя введение, пять глав, заключение и список литературы из **106** наименований. Работа изложена на **192** страницах основного текста, содержит **88** рисунков, **35** таблиц и приложения объемом **27** страниц.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Автором получены результаты экспериментальных исследований изменений гармонического состава токов дуг однопозиционных У КП, показывающие зависимость суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг и теплового КПД электрических дуг от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов. Была разработана методика задания оптимальных электрических режимов У КП, позволяющая находить наилучшие значения коэффициентов несимметрии длин дуг и уставок импедансов вторичного электрического контура для стабилизации дуг в фазах, расположенных в непосредственной близости к зеркалам жидкого металла на поверхности ванны в сталковом. Также были разработаны усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП, обеспечивающие динамическую адаптацию уставок импеданса вторичного электрического контура и вторичного напряжения печного трансформатора. Автором проведен анализ технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии от применения усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность решаемой проблемы и научная новизна работы, определяются цели и задачи, а также обосновывается теоретическая и практическая значимость выполненной работы.

щих алгоритмов управления электрическими режимами У КП. На действующем производстве управление электрическими режимами У КП осуществляется сталеварами вручную и зачастую с использованием ограниченного набора ступеней напряжения печного трансформатора $N_{тр}$ и рабочих кривых $N_{рк}$. Следовательно, в современных системах автоматического управления электрическими режимами У КП, несмотря на достаточную гибкость настроек и широкие функциональные возможности, отсутствует автоматическая адаптация электрических режимов к текущим условиям плавки (аргонной продувке и шлаковым режимам). В соответствии с этим, для повышения энергоэффективности У КП, необходимо использовать усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией вторичного напряжения печного трансформатора и импедансов вторичного электрического контура, задающих длины электрических дуг, используя суммарный коэффициент гармонических составляющих тока K_1 в качестве критерия для изменения электрического режима.

Вторая глава посвящена результатам экспериментальных исследований электрических режимов исследуемых У КП как объектов исследования в составе внутрицеховой системы электроснабжения (рис. 2, рис.3). Выполнен сбор данных об электрооборудовании, системах электроснабжения и управления. Выявлены особенности систем электроснабжения: наличие устройства компенсации реактивной мощности и параллельная работа с ДСП на ПАО «ММК», отсутствие устройств компенсации реактивной мощности и значительные колебания напряжения на ПАО «Северсталь». Выполнены серии опытов короткого замыкания на исследуемых У КП, позволившие с высокой точностью определить параметры вторичного электрического контура (активные, индуктивные, полные сопротивления фаз и взаимные индуктивности), учитывающие взаимное влияние фаз и смещение нейтрали. Экспериментально определены регулировочные характеристики гидроприводов перемещения электродов. Кроме вышеперечисленных исследований были построены и проанализированы экспериментальные зависимости $P_{1,сум} = f(I_{1,ср})$ и $Q_{1,сум} = f(I_{1,ср})$ для основных рабочих ступеней РПН печных трансформаторов и рабочих кривых (рис. 4). Также на основании данных зависимостей была проведена проверка адекватности разработанных математических моделей путем сравнения расчетных рабочих точек с экспериментальными данными (рис.6).

На основе полученных экспериментальных данных и известных методик, разработаны математические модели электротехнических комплексов «Питающая сеть – электрический контур У КП» для исследуемых установок (рис.5), включающие модели питающей сети, печного трансформатора, короткой сети, нелинейной электрической дуги (на основе уравнения Касси) и системы перемещения электродов. Статистический анализ подтвердил адекватность моделей: расчетные точки попадают в доверительные интервалы математических ожиданий экспериментальных массивов по токам и мощностям (рис.6). Разработанные математические модели исследуемых агрегатов имеют достаточную точность и позволяют провести детальный анализ имеющихся электрических режимов исследуемых агрегатов. Для заданных значений установок был проведен расчёт электрических характеристик ($P_1=f(I_d)$, $Q_1=f(I_d)$, $S_1=f(I_d)$, $P_d=f(I_d)$, $KI=f(I_d)$, $KIH=f(I_d)$) на математической модели с последующим нанесением рабочих точек (рис.7), что позволило оценить текущие электрические режимы. Проведенные экспериментальные исследования скорости нагрева жидкой стали в исследуемых У КП позволили установить среднюю скорость нагрева жидкой стали на производительной ступени напряжения ПТ: 1) для У КП№1 180т. ПАО «ММК» 4,5°С/мин; 2) для У КП№2 120т. ПАО «Северсталь» 4,6°С/мин.

Проанализированы средние временные и энергетические показатели работы исследуемых У КП на основе электронных паспортов плавок. Установлены базовые значения скорости нагрева жидкой стали, удельного расхода электроэнергии и других параметров, которые использованы в дальнейшем для сравнительного анализа эффективности усовершенствованных электрических режимов агрегатов. Также на основе данных электронных паспортов плавок были рассчитаны средние значения временных, энергетических и технологических показателей работы исследуемых У КП (таблица 1).

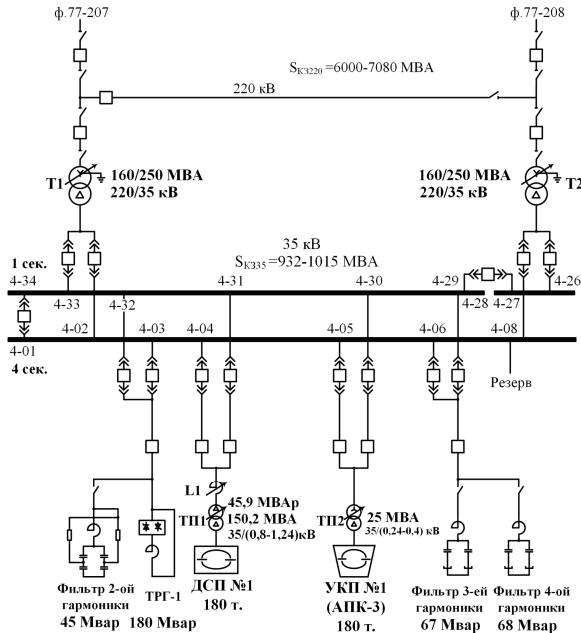


Рис. 2 – Упрощенная схема электроснабжения УКП №1 180 т. ПАО «ММК»

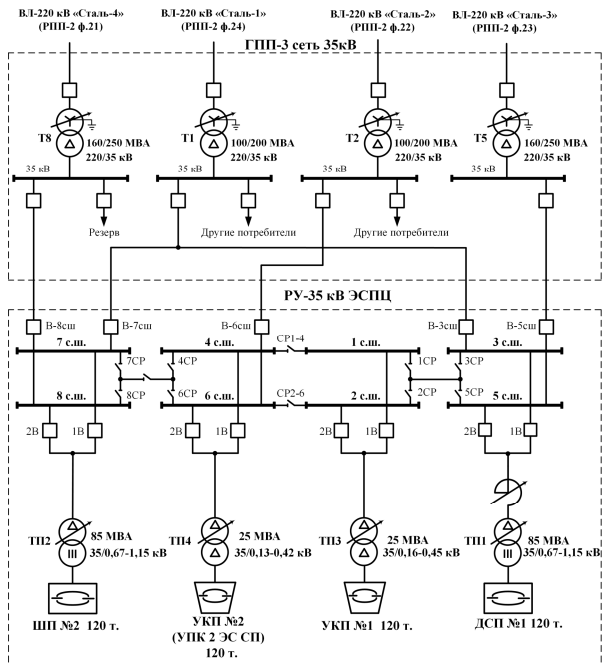


Рис. 3 – Упрощенная схема электроснабжения УКП №2 120 т. ПАО «Северсталь»

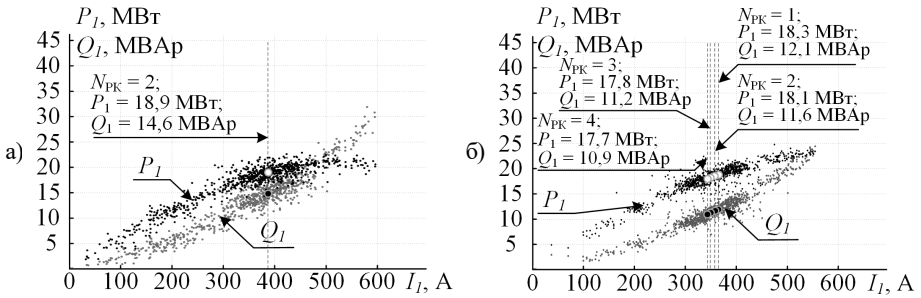


Рис. 4 - Экспериментальные зависимости $P_{1.сум} = f(I_{1.сум})$ и $Q_{1.сум} = f(I_{1.сум})$, полученные с использованием фактических областей рабочих точек для : а) УКП№1 180т. ПАО «ММК»; б) УКП№2 120т. ПАО «Северсталь»

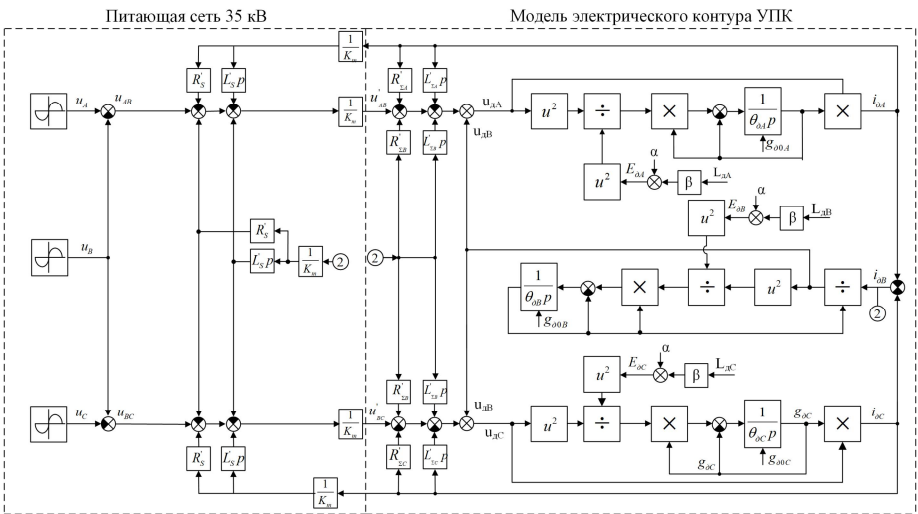


Рис. 5 - Структурная схема математической модели электрического контура УКП

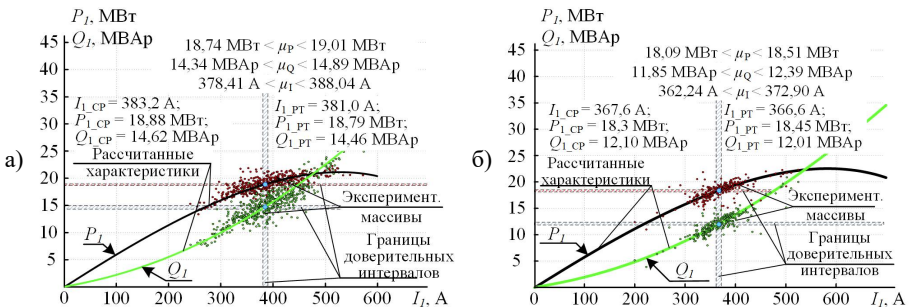


Рис. 6 - Характеристики $P_{1.сум} = f(I_{1.сум})$ и $Q_{1.сум} = f(I_{1.сум})$, полученные на математической модели, с нанесением фактической области распределения рабочих точек и доверительных интервалов для: а) УКП№1 180т. ПАО «ММК»; б) УКП№2 120т. ПАО «Северсталь»

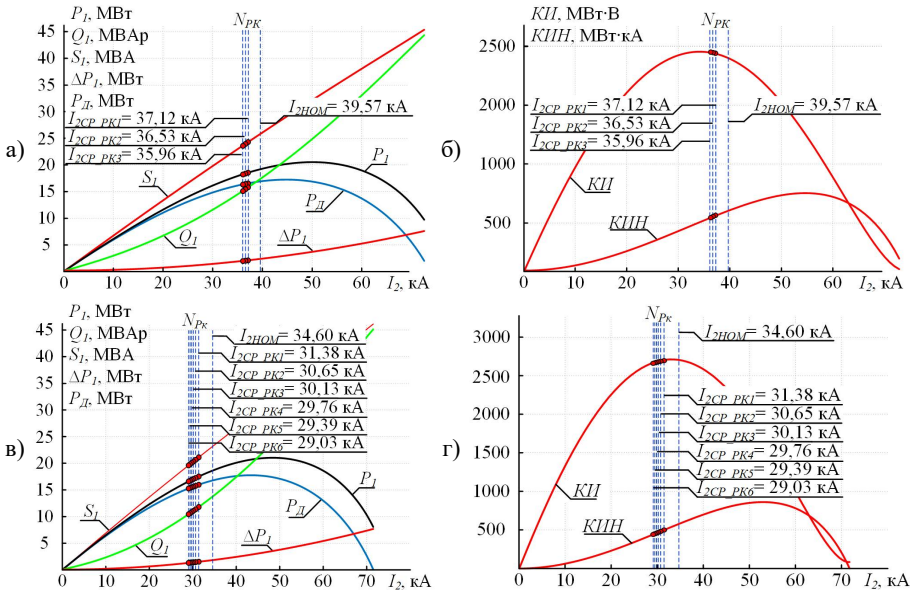


Рис. 7 – Основные электрические характеристики УКП№1 180 т. ПАО «ММК» (а и б) и УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь» (в и г) при исходных электрических режимах, полученные с использованием математических моделей

Таблица 1 – Средние значения временных, энергетических и технологических показателей исследуемых УКП

Наименование параметра	УКП№1 180т ПАО «ММК»	УКП№2 120т ПАО «Северсталь»
1.Среднее время обработки $t_{обр}$, мин	111,15	56,94
2.Среднее время работы под током $t_{рт}$, мин	29,2	27,03
4. Средний удел. расход ЭЭ на жидкую сталь $W_{уд}$, кВт·ч/т	69,13	47,46
5. Средний расход аргона $Q_{арг}$, м³	138,27	40,05
7.Средняя величина нагрева $\Delta T_{наг}$, °C	31,15	22,26

Таким образом, в данной главе был подготовлен необходимый объем экспериментальных данных для дальнейших теоретических исследований.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг УКП 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 $K_1 (THD_1)$. Показано, что экранирование дуг шлаком существенно повышает их стабильность горения и тепловой КПД, снижая коэффициент K_1 , напротив, работа с неэкранируемыми дугами приводит к значительным тепловым потерям и высокому K_1 (рис. 8, б). Установлено, 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_1 (рис.8, а). Показано влияние аргонной продувки на геометрию поверхности жидкого металла, детально рассмотрен процесс формирования зеркала жидкого металла (рис.9, а), которое приводит к оголению электрических дуг находящихся вблизи продувочных блоков, что негативно сказывается на их стабильности горения, тепловом КПД и приводит к росту K_1 (рис. 9, б). Эти экспериментальные данные доказывают обоснованность использования в качестве критерия для работы усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами УКП информации о гармоническом составе токов K_1 .

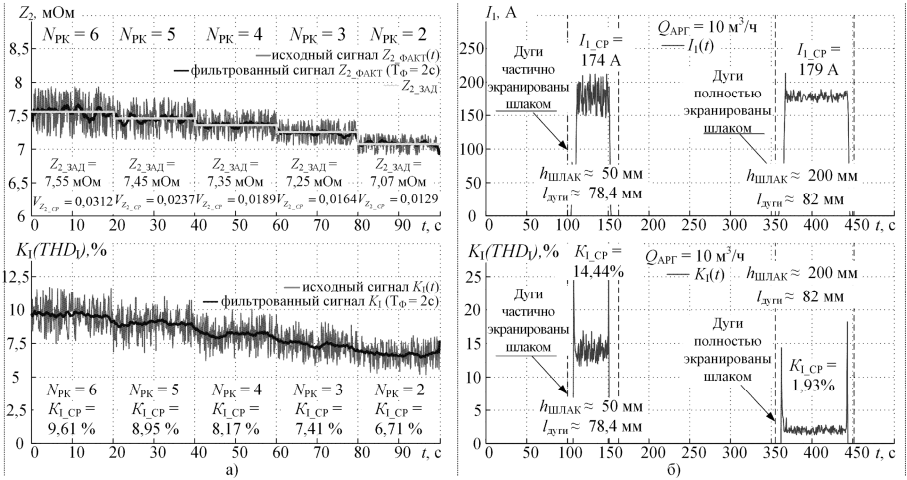


Рис. 8 – Экспериментальные исследования изменения гармонического состава токов электрических дуг УКП: а) качество регулирования импеданса при изменении длины электрической дуги, при интенсивной аргоновой продувке ($Q_{APG, \text{факт.}} = 1600 \text{ л/мин}$); б) влияние экранирования электрической дуги на коэффициент гармонических искажений тока

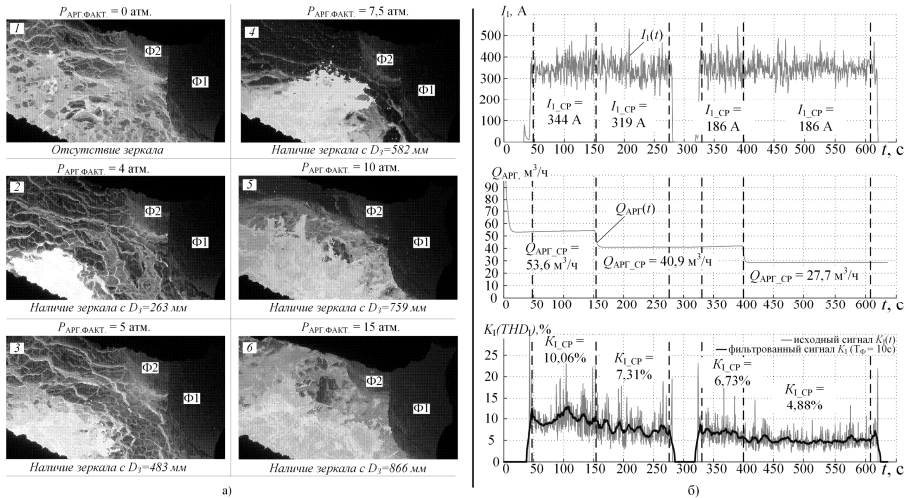


Рис. 9 – Экспериментальные исследования изменения гармонического состава токов электрических дуг УКП: а) исследование зеркала жидкого металла при различных режимах аргоновой продувки (съемка видеокамерой через рабочее окно); б) изменение суммарных коэффициентов гармонических искажений токов при изменении расхода аргона

Четвертая глава посвящена разработке методике задания оптимальных электрических режимов УКП с учетом расположения оборудования аргоновой продувки и усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура и вторичного напряжения печного трансформатора с использованием информации о гармоническом составе токов дуг.

На основании результатов исследования влияния режимов аргонной продувки и шлаковых режимов на K_1 был предложен подход к заданию несимметричных электрических режимов У КП, при которых длины дуг фаз находящихся в нестабильной зоне печи следует уменьшать, при сохранении среднего по фазам действующего значения тока для фиксированной средней уставки импеданса фаз. Разрабатываемая методика должна быть универсальной и применимой к У КП любых конфигураций, учитывая расположение продувочных пробок и аварийной фурмы. С учётом обозначенных требований, методика определения оптимальных значений уставок параметров регулирования (импедансов вторичного электрического контура У КП $Z_{2ф.А.3АД}$, $Z_{2ф.В.3АД}$, $Z_{2ф.С.3АД}$) имеет следующую последовательность действий:

1. Определение степени влияния зеркал жидкого металла на фазы в соответствии с конструкцией У КП.
2. Определение электрической принадлежности фаз и сопоставление их с обозначениями фаз в системе автоматического управления электрическими режимами У КП.
3. Расчет заданного значения коэффициента интенсивности нагрева $KИН_{3АД}$ на основе необходимой скорости нагрева жидкой стали согласно существующей технологии.
4. Определение требуемого количества рабочих кривых $N_{РК}$ и их соответствие длинам электрических дуг.
5. Расчет электрического режима У КП для коротких дуг. Для режима коротких дуг, в случае, когда зеркала жидкого металла оказывают влияние на одну дугу или одинаковое влияние на две дуги, используется максимальная несимметрия уставок импедансов $Z_{2ф.А.3АД}$, $Z_{2ф.В.3АД}$, $Z_{2ф.С.3АД}$, обеспечивающая минимальную длину дуг в фазах, расположенных вблизи зеркал жидкого металла в соответствии с системой критериев (1). В случае, когда зеркала металла оказывают неодинаковое влияние на две фазы, для фазы с наибольшим влиянием зеркала следует максимально укорачивать дугу, при этом для фазы, на которую зеркала металла оказывают меньшее воздействие, следует задавать дугу средней длины. Таким образом, две дуги укорачиваются в разной степени, а одна дуга удлиняется. В таком случае, актуальной системой критериев будет (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{2ф_КОР} > 1,3 \cdot Z_{2ф_КЗ} \\ I_{Д_КОР_МАКС} < \lambda \cdot I_{2НОМ} \\ I_{Д_СР} \leq I_{2НОМ} \\ KИ_{КОР} \rightarrow \min \\ I_{Д_ДЛ} \leq 1,2 \cdot h_{Ш} \\ I_{Д_ДЛ} \geq I_{Д_МИН} \\ KИН_{\Sigma} = KИН_{3АД} \end{array} \right. ; (1) \quad \left\{ \begin{array}{l} Z_{2ф_КОР} > 1,3 \cdot Z_{2ф_КЗ} \\ I_{Д_КОР_МАКС} < \lambda \cdot I_{2НОМ} \\ KИ_{КОР} \rightarrow \min \\ Z_{2ф_КОР} < Z_{2ф_СР_0} < Z_{2ф_ДЛ} \\ I_{Д_МИН} < I_{Д_СР_0} < \lambda \cdot I_{2НОМ} \\ KИ_{СР_0} \rightarrow \min \\ I_{Д_ДЛ} \geq I_{Д_МИН} \\ I_{Д_ДЛ} \leq 1,2 \cdot h_{Ш} \\ KИН_{\Sigma} = KИН_{3АД} \end{array} \right. ; (2) \quad \left\{ \begin{array}{l} Z_{2ф_А} = Z_{2ф_В} = Z_{2ф_С} \\ I_{Д_МИН} \leq I_{Д} < I_{2НОМ} \\ I_{Д} \leq 1,2 \cdot h_{Ш} \end{array} \right. , (3)$$

где $Z_{2ф_КОР}$ – значение уставки импеданса для укорачиваемой дуги; $Z_{2ф_КЗ}$ – значение импеданса фазы; $I_{Д_КОР_МАКС}$ – максимальное допустимое значение тока короткой дуги; λ – перегрузочная способность печного трансформатора; $I_{2НОМ}$ – значение номинального вторичного тока печного трансформатора; $KИ_{КОР}$ – коэффициент излучения укорачиваемой дуги; $I_{Д_ДЛ}$ – длина электрической дуги; $h_{Ш}$ – высота слоя шлака; $I_{Д_ДЛ}$ – значение тока удлиняемой дуги; $I_{Д_МИН}$ – минимальное допустимое значение тока дуги (при котором сохраняется стабильность горения); $KИН_{\Sigma}$ – суммарное расчетное значение коэффициента интенсивности нагрева; $KИН_{3АД}$ – расчётное заданное значение коэффициента интенсивности нагрева; $Z_{2ф_СР_0}$ – значение уставки импеданса для дуги средней длины; $Z_{2ф_А}$ – значение уставки импеданса для удлиняемой дуги; $I_{Д_СР_0}$ – значение тока дуги средней длины; $KИ_{СР_0}$ – коэффициент излучения дуги средней длины; $I_{Д_ДЛ}$ – длина электрической дуги; $Z_{2фА}$, $Z_{2фВ}$, $Z_{2фС}$ – значение уставки импеданса для дуг фаз 1-3; $I_{Д}$ – среднее значение тока дуг фаз 1-3.

6. Расчет электрического режима У КП для длинных дуг. Для режима работы с длинными дугами является целесообразным расширение диапазона регулирования тока дуги и симметричный режим работы дуг. Важным критерием при задании данного режима являются перекрытие электрический дуги слоем шлака не менее чем на 20%, так-

же ток дуг не должен быть ниже граничного значения, за которым теряется устойчивость горения. Системой критериев для задания длинных дуг является (3).

7. Расчет электрического режима У КП для несимметричных дуг средней длины. Для режима средних дуг разница между средним током по трем фазам для режима длинных дуг и средним током для режима коротких дуг делится на равные участки. Количество этих участков зависит от требуемого числа рабочих кривых с дугами средней длины. Для этого определяется величина шага приращения тока дуги (4), затем определяется среднее по трем фазам значение тока дуги на рабочей кривой (5):

$$I_{д_шаг} = \frac{I_{д_длин} - I_{д_кор}}{n + 1}; \quad (4) \quad I_{д_CP_n} = I_{д_кор} + n \cdot I_{д_шаг}, \quad (5)$$

где $I_{д_длин}$ – среднее по трем фазам значение тока дуги для режима горения длинных дуг; $I_{д_кор}$ – среднее по трем фазам значение тока дуги для режима горения коротких дуг; n – количество рабочих кривых для режимов горения дуг средней длины; $I_{д_шаг}$ – величина шага приращения тока дуги; $I_{д_кор}$ – среднее по трем фазам значение тока дуги для режима горения коротких дуг; n – порядковый номер рабочей кривой со средней длиной дуги.

Дуги средней длины должны быть несимметричными, но степень несимметрии меньше, чем для режима горения коротких дуг, т.е. разница между минимальным и максимальным значением балансовых коэффициентов должна быть меньше аналогичной разницы для режима коротких дуг, или средних дуг, но с большей степенью несимметрии. При этом, степень несимметрии также делится на равные участки между максимально несимметричным и симметричным режимом.

Значения балансовых коэффициентов найдутся следующим образом:

$$K_{b_кор} = \frac{Z_{2ф_кор}}{Z_{2ф_CP}}; \quad (6) \quad K_{b_CP_д} = \frac{Z_{2ф_CP_д}}{Z_{2ф_CP}}; \quad (7) \quad K_{b_длин} = \frac{Z_{2ф_длин}}{Z_{2ф_CP}}, \quad (8)$$

где $Z_{2ф_кор}$ – значение уставки импеданса для укорачиваемой дуги; $Z_{2ф_CP}$ – среднее значение уставки импеданса фаз 1-3; $Z_{2ф_CP_д}$ – значение уставки импеданса для дуги средней длины; $Z_{2ф_CP}$ – среднее значение уставки импеданса фаз 1-3; $Z_{2ф_длин}$ – значение уставки импеданса для удлиняемой дуги; $Z_{2ф_CP}$ – среднее значение уставки импеданса фаз 1-3.

8. Уточнение рассчитанных параметров в ходе проведения тестовых плавков на У КП. Поскольку расчет выполняется с использованием математической модели, то при практической реализации необходима проверка разработанных несимметричных режимов на действующем оборудовании и, при необходимости, коррекция параметров. Это обусловлено наличием множества факторов, влияющих на работу агрегата, которые невозможно полностью учесть при математическом моделировании.

Автоматическая адаптация электрических режимов У КП к текущим условиям плавки требует параметра, точно отражающего режимы горения электрических дуг. На основании доказанной взаимосвязи между шлаковыми режимами, параметрами аргонной продувки и гармоническим составом токов, в качестве критерия, на основании которого будет осуществляться работа алгоритма предложен коэффициент шлака $K_{шлак}$. При этом, коэффициент вспенивания шлака $K_{шп}$ может быть определен как обратная величина от K_1 с учетом масштабного коэффициента a (9), а коэффициент a может быть определен как произведение 100 на минимальное значение K_{limin} , зафиксированное за цикл плавки при существующей электрической дуге ($I_{д>0}$)(10):

$$K_{шлак} = \frac{a}{K_1}; \quad (9) \quad a = 100K_{limin}; \quad (10) \quad K_1 = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_0^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где I_{RMS} – среднеквадратичное значение сигнала тока; I_1 – среднеквадратичное значение сигнала тока 1-й гармоники; I_0 – постоянная составляющая сигнала тока.

Обобщённая блок-схема алгоритма автоматической адаптации электрического режима к текущим условиям плавки представлена на рис.10.

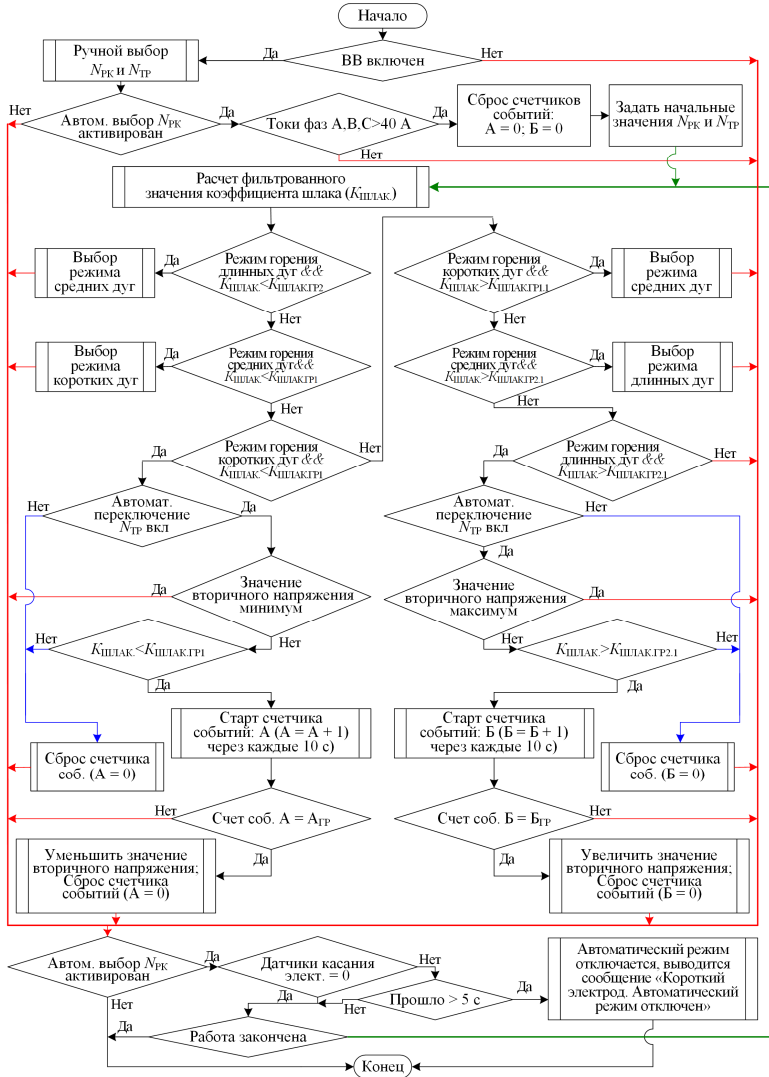


Рис. 10 – Блок-схема алгоритма автоматической адаптации электрических режимов к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам

Основным принципом управления, положенным в основу алгоритма автоматического управления электрическими режимами, является уменьшение заданных значений импедансов фаз вторичного электрического контура $Z_{2ф.А.ЗАД}$, $Z_{2ф.В.ЗАД}$, $Z_{2ф.С.ЗАД}$ и, как следствие, уменьшение длин дуг при снижении $K_{ШЛАК}$. В случае, если поддержание приемлемого $K_{ШЛАК}$ на самых коротких дугах не обеспечивается, тогда выполняется автоматическое понижение рабочей ступени печного трансформатора. Напротив, при большом значении $K_{ШЛАК}$ при работе на максимально длинных дугах формируется сигнал на увеличение ступени трансформатора с целью повышения мощностей дуг и коэффициента интенсивности нагрева $K_{ИН}$.

Разработанные электрические режимы и алгоритмы автоматического управления электрическими режимами УКП являются универсальными и подходят для печей различного класса и мощности. Их универсальность обусловлена тем, что в основе лежит фундаментальная физическая связь между процессом горения электрической дуги и ее гармоническим составом тока.

Пятая глава посвящена анализу достигнутого технического эффекта и результатам экспериментальных исследований заданных несимметричных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения N_{PK} и N_{TP} . Имеющиеся на исследуемых УКП системы управления электрическими режимами не имеют встроенной функции измерения гармонического состава токов дуг, поэтому на первичной стороне печного трансформатора были установлены анализаторы мощности с функцией измерения K_1 . Схемы подключения измерителей мощности показаны на рис. 11.

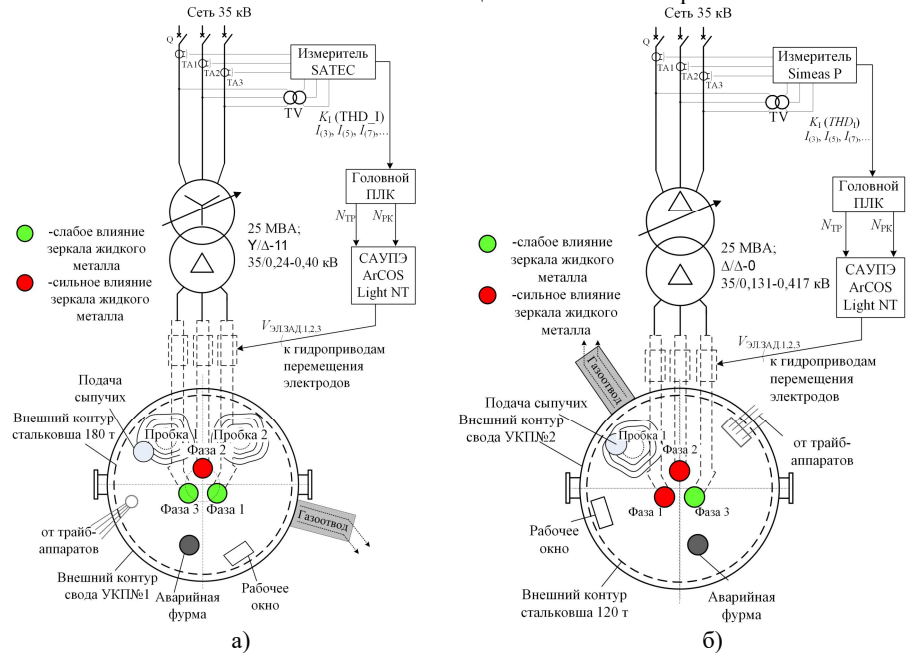


Рис. 11 – Схемы исследуемых УКП с расположением основного оборудования и установленными анализаторами мощности: а) УКП№1 180т. ПАО «ММК»; б) УКП№2 120т. ПАО «Северсталь»

Для наглядной демонстрации работы реализованных усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора с использованием информации о гармоническом составе токов дуг на рис. 12 представлены осциллограммы, полученные из архивных трендов IBA PDA с действующих агрегатов.

В результате промышленных испытаний на УКП ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь» было достигнуто снижение удельного расхода электроэнергии на 2,46% и 2,20% соответственно. Дополнительно было проведена оценка влияния алгоритма на ресурс переключающего устройства РПН. Результаты оценки показали, что за месяц работы без отключения алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП, было выполнено 4925 переключений ступеней напряжения, из которых 310 переключений было инициировано алгоритмом по счетчику событий А, 200 - по счетчику событий Б и 4415 переключений были выполнены сталеваром вручную, по технологической необходимости. Таким образом, на долю алгоритма автоматического управления электри-

ческими режимами У КП приходится 10,36% всех переключений устройства Р ПН печного трансформатора. Разработанные электрические режимы и алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура и вторичного напряжения печного трансформатора были успешно приняты в промышленную эксплуатацию, что свидетельствует о практической применимости и доказанной эффективности предложенных решений в реальных производственных условиях.

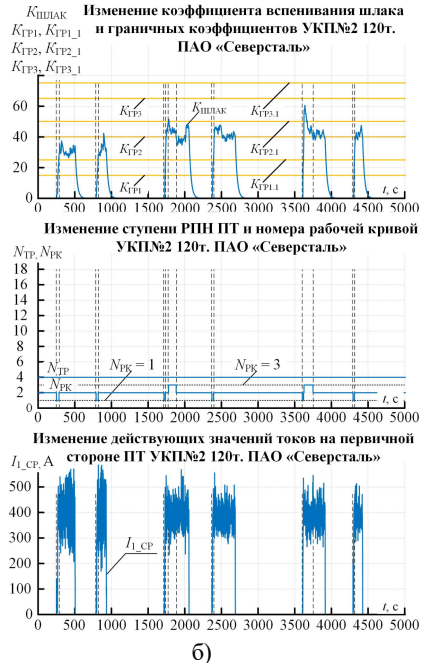
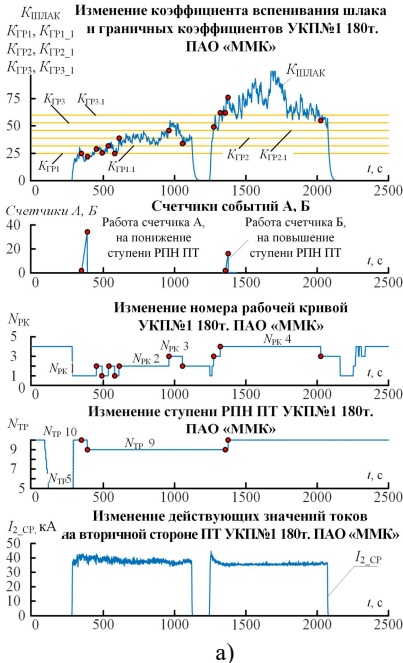


Рис. 12 – Осциллограммы работы алгоритма автоматического переключения рабочих кривых в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{шп.а.к.}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведены экспериментальные исследования электрических режимов У КП, функционирующих на отечественных предприятиях черной металлургии. Выполнен сбор данных об электрооборудовании, системах электроснабжения и управления, а также технологических режимах. Важной технологической особенностью У КП является необходимость перемешивания жидкой стали в сталковшах инертным газом. Работа продувочных блоков создает возмущения на поверхности жидкого металла, которые негативно сказываются на энергоэффективности работы агрегата.

2. Проанализированы существующие алгоритмы и параметры систем автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов У КП. Установлено, что управление электрическими режимами У КП осуществляется сталеварами вручную с использованием ограниченного набора ступеней Р ПН печного трансформатора $N_{ТР}$ и рабочих кривых $N_{РК}$, определяющих длины электрических дуг. Таким образом, отсутствует автоматическая адаптация к условиям плавки (аргонной продувке и шлаковым режимам). В соответствии с этим, для повышения энергоэффективности У КП, было предложено использовать усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП $Z_{2Ф.А.ЗД}$, $Z_{2Ф.В.ЗД}$, $Z_{2Ф.С.ЗД}$ и ступе-

ней РПН печного трансформатора $N_{тр}$, используя суммарный коэффициент гармонических составляющих тока K_1 в качестве критерия для изменения электрического режима.

3. Проведены экспериментальные исследования изменения гармонического состава токов электрических дуг K_1 в У КП в зависимости от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов, показывающие взаимосвязь значений суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг K_1 и теплового КПД дуг. На основании этого доказана возможность улучшения энергетических показателей У КП за счет применения специальных электрических режимов с динамической коррекцией уставок импедансов вторичного электрического контура, определяющих длины и несимметрию дуг, а также коррекцией уровня вторичного напряжения печного трансформатора.

4. Разработана методика задания оптимальных электрических режимов У КП с учетом расположения оборудования аргонной продувки, обеспечивающая нахождение наилучших значений уставок импедансов вторичного электрического контура, задающих наилучшую несимметрию длин дуг в фазах, расположенных в непосредственной близости к зеркалам жидкого металла на поверхности ванны в стальковше, обеспечивающую повышение КПД электрических дуг.

5. Разработаны усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора с использованием информации о гармоническом составе токов дуг, обеспечивающие достижение максимального КПД электрических дуг, повышение скорости нагрева металла, уменьшение времени работы под током, и, как следствие, снижение удельного расхода электроэнергии. Также даны правила определения граничных значений коэффициента шлака $K_{шлак}$ для разработанного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП, позволяющие алгоритму осуществлять своевременные изменения длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора при изменении условий аргонной продувки и шлакового режима.

6. Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора. Доказано наличие технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии на 2,46% для У КП№1 180т ПАО «ММК» и на 2,2% для У КП№2 120т ПАО «Северсталь». Разработанные 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 были успешно приняты в промышленную эксплуатацию, что свидетельствует о практической применимости и доказанной эффективности предложенных решений в реальных производственных условиях.

7. Разработанные 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 являются универсальными и могут применяться на У КП различного класса и мощности. При этом для каждого отдельно взятого агрегата необходимо производить параметризацию с учетом индивидуальных особенностей агрегата.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

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. Николаев, А.А. Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели / А.А.Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, **С.С. Рыжевол** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 72–84.

Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus

4. 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.

5. Nikolaev, A.A. Development and research of improved automatic control systems for electrotechnological modes of high-power ladle-furnace units / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, R.R. Dema, **S.S. Ryzhevol** // Chernye Metally, 2023. – Vol.No.12 p.32–39. DOI 10.17580/chm.2023.12.06. – EDN CLMUHU

6. 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

7. Nikolaev, A.A. Improving the energy performance of a ladle furnace using an improved control system for electrical modes and electrode movement / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, **S.S. Ryzhevol**, A.S. Denisevich, A.N. Emelyushin // Chernye Metally, 2024. – Vol. No. 12. P.89-95. – DOI 10.17580/chm.2024.12.12. – EDN RBNSHO.

8. Nikolaev, A.A. Development of an Improved System for Controlling Electrical Modes of Ladle-Furnace by using a Digital Twin / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, **S.S. Ryzhevol**, V.S. Ivekeev // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 1216-1220, doi: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553928.

9. Nikolaev, A.A. Analysis of Improved Ladle Furnace's Electrical Modes Automatic Control System in the Conditions of Real Production / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, **S.S. Ryzhevol**, P.I. Svyatkin // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2024, pp. 869-875, doi: 10.1109/UralCon62137.2024.10718972.

Программы для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669065. Программа для определения оптимальных несимметричных режимов горения дуг для однопозиционной установки ковш-печь / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, И. А. Гришин, Р.Р. Дема, **С.С. Рыжевол**; № 2022668511; заявл. 12.10.2022; опубли. 17.10.2022. 135 кб

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684442. Программа для энергоэффективного управления электрическими режимами установок ковш-печь высокой мощности / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, В. С. Ивекеев, Р.Р. Дема, **С.С. Рыжевол**; № 2023683052; заявл. 02.11.2023; опубли. 15.11.2023. 207 кб

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688107. Программа для исследования режимов работы усовершенствованной системы управления электрическими режимами установки ковш-печь с цифровым двойником / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, А. С. Денисевич, И.А. Ложкин, **С.С. Рыжевол**; № 2024686909; заявл. 11.11.2024; опубли. 25.11.2024. 139 кб

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684444. Программа для реализации цифрового двойника электрических режимов установки ковш-печь / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, И. А. Ложкин, П.И. Святкин, **С.С. Рыжевол**; № 2023683045; заявл. 02.11.2023; опубли. 15.11.2023. 2,17 мб