

На правах рукописи



ТУЛУПОВ ПЛАТОН ГАРРИЕВИЧ

**УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ ЗА СЧЕТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С
АНАЛИЗОМ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЙ ДУГ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2021

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
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Ведущая организация:

Защита состоится «17» декабря 2021 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.111.04 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 « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.111.04
канд. техн. наук, доцент

Одинцов Константин Эдуардович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Металлургическая промышленность является одной из наиболее приоритетных отраслей современной экономики. По последним данным, доля металлургического производства в валовой добавленной стоимости (ВДС) Российской Федерации составила около 2,4%, в промышленном производстве порядка 17,8%, а в экспорте – 13,5%. При этом предприятия металлургии используют около 20% от общего объёма электроэнергии, производимой генерирующими компаниями с собственными электростанциями.

Одним из наиболее энергоёмких потребителей электрической энергии является дуговая сталеплавильная печь (ДСП). Современные ДСП характеризуются следующими основными технико-экономическими показателями: удельная мощность печного трансформатора в диапазоне 0,7 – 1 МВА/т, продолжительность плавки от выпуска до выпуска – около 40 минут, масса выплавляемой стали – от 100 до 250 т. За последние десятилетия при освоении новых производственных мощностей, а также реконструкции старых сталеплавильных цехов, наметилась устойчивая тенденция внедрения ДСП в производство. Это связано с высокими технико-экономическими, экологическими и эксплуатационными показателями работы данных агрегатов.

Несмотря на очевидные преимущества, показатели энергопотребления ДСП и установок ковш-печь (УКП) остаются значительными и составляют весомую долю в себестоимости конечного продукта. При этом существенное влияние на уровень энергопотребления оказывает эффективность функционирования системы управления электрическими режимами ДСП. Несмотря на расхождения в структуре и алгоритмах функционирования систем управления электрическим режимом различных фирм-производителей, таких как ARCOS, Simelt (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия), HI-REG, Q-REG (Danieli, Италия), E.M.P.E.R.E, A.R.C.E.L.E.C (Amec Spie, Франция), DECTEQ (Ferrottron, Германия) и DigitArc (AMI, Мексика), все они обладают схожей структурой профиля плавки, в основе которой лежит параметр удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$ [кВт·ч/т]. Соответственно, переключение между сочетаниями ступени печного трансформатора $N_{ТР}$, реактора N_P и номером рабочей кривой $N_{РК}$ производится при достижении показателя $W_{уд}$ предустановленных значений, определяемых усреднённо.

Основной недостаток данного способа обусловлен тем, что величина $W_{уд}$ не имеет прямой связи с технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи. Вследствие этого, при использовании $W_{уд}$ в основе профиля плавки переход между стадиями может производиться несвоевременно, что приводит к работе печи при электрическом режиме, не соответствующим текущей стадии плавления шихты. В связи с этим, особую актуальность приобретает разработка альтернативного подхода к решению задачи диагностики стадии плавления шихты, в основе которого лежит раздельный анализ чётных и нечётных гармоник сигнала напряжений электрической дуги.

Данный подход является более эффективным по сравнению с традиционным, поскольку гармонический состав напряжения электрической дуги имеет тесную связь с технологической стадией плавки, обусловленную физическими свойствами электрической дуги. Реализация и внедрение данного подхода позволит обеспечить достижение технического эффекта в виде снижения удельного расхода электроэнергии, что, в свою очередь, позволит снизить конечную себестоимость готовой продукции.

Степень разработанности.

Исследования в направлении снижения энергопотребления ДСП проводятся многими отечественными и зарубежными учёными. Среди зарубежных авторов следует выделить работы К. Крюгера, Б. Боумана и С. Кёле, а среди отечественных – работы Ю.М. Миронова, А.Н. Макарова, А.А. Николаева и Г.П. Корнилова, Р.А. Бикеева, А.Н. Шпигановича, С. М. Нехамина, И.А. Якимова, В.А. Кудрина, В.П. Рубцова, В.А. Серикова 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 Гудима Ю.А.

Значительное количество исследований проводится в области создания систем управления электрическим режимом ДСП с применением информации о гармоническом составе тока дуги. Несмотря на это, подход к построению системы управления электрическим режимом ДСП, в основе которого лежит раздельный анализ чётных и нечётных гармоник напряжения дуги, в отечественной и зарубежной литературе подробно не рассматривался. В связи с этим, данный вопрос заслуживает рассмотрения в рамках отдельного исследования.

Объектом исследования является дуговая сталеплавильная печь шахтного типа ШП-125 (ЧерМК, ПАО «Северсталь») с номинальной мощностью печного трансформатора 85 МВА. **Предметом исследования** является система управления электрическим режимом ШП-125.

Целью диссертационной работы является улучшение энергетических показателей ДСП за счёт разработки и применения системы управления электрическим режимом с автоматической адаптацией напряжения на вторичной стороне печного трансформатора и длин электрических дуг с использованием информации о гармоническом составе напряжения электрической дуги.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ существующих систем управления электрическим режимом и перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей, функционирующих на отечественных и зарубежных металлургических предприятиях.
2. Разработка математической модели электрического контура ДСП, обеспечивающей расчёт мгновенных значений и гармонического состава напряжений дуг на основе осциллограмм мгновенных значений токов дуг и фазных напряжений с учётом эффекта переноса мощности и взаимного влияния между фазами.
3. Теоретические и экспериментальные исследования гармонического состава напряжений электрической дуги на дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125
4. Разработка усовершенствованной системы управления электрическим режимом ШП-125 с использованием информации о гармоническом составе напряжений дуг.
5. Оценка эффективности усовершенствованных алгоритмов на действующем электросталеплавильном производстве.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель электрического контура ДСП, отличающаяся от известных возможностью расчёта мгновенных значений и гармонического состава напряжений дуг на основе осциллограмм мгновенных значений токов дуг и фазных напряжений с учетом эффекта переноса мощности и взаимного влияния между фазами.
2. Выполнено научное обоснование эффективности применения информации о гармоническом составе напряжений дуг для решения задач энергоэффективного управления ДСП в составе системы управления электрическим режимом. Результаты проведённого

обоснования отличаются от известных тем, что получены новые закономерности, отражающие изменения гармонического состава напряжения дуг в зависимости от стадии плавки.

3. Разработана система управления электрическим режимом ДСП, отличающаяся от известных тем, что в ней применяется новый алгоритм переключения N_{TR} и N_{PK} с использованием информации о гармоническом составе напряжения дуги.

4. Разработана новая методика определения граничных значений для алгоритма переключения N_{TR} и N_{PK} с использованием информации о гармоническом составе напряжения дуги, отличающаяся тем, что величины граничных значений определяются на основе анализа большого массива плавов в соответствии с критерием выхода сигнала тока электрической дуги на участки с различной амплитудой колебаний, обусловленной активным расплавлением твёрдой шихты на начальных стадиях и режимами продувки расплава на стадии доводки.

Практическая ценность и реализация работы заключается в том, что разработанная усовершенствованная система управления электрическим режимом с применением информации о гармоническом составе напряжений дуг может быть внедрена на действующем технологическом оборудовании ДСП с обеспечением технического эффекта в виде снижения удельного расхода электроэнергии на величину до 1,75%, что подтверждается результатами внедрения системы на базе ШП-125 (ЧерМК, ПАО «Северсталь»). Технический эффект достигается за счёт того, что новая система обеспечивает своевременный переход между сочетаниями N_{TR} и N_{PK} в соответствии с реальными технологическими процессами внутри ванны печи и позволяет увеличить тепловой КПД за счет более эффективного использования вводимой мощности на нагрев и расплавление шихты. Кроме того, результаты работы могут применяться при создании новых и модернизации существующих систем управления электрическим режимом ДСП.

Методика проведения исследований. В основу теоретических исследований легли базовые положения электротехники, теории автоматического управления и математической статистики. Для разработки математических моделей использовалась программная среда Simulink в составе пакета Matlab. При проведении теоретических исследований также использовались экспериментальные осциллограммы мгновенных значений токов дуг и фазных напряжений, полученные на ШП-125 с использованием регистратора электрических сигналов РЭС-3.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель электрического контура дуговой сталеплавильной печи, позволяющая восстанавливать сигнал мгновенного значения напряжения электрической дуги на основе экспериментальных осциллограмм фазного напряжения и тока дуги с последующим расчётом относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник напряжения дуги и учитывающая взаимное влияние между фазами и эффект переноса мощности.

2. Система управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи с алгоритмом переключения сочетаний N_{TR} и N_{PK} на основе анализа относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник напряжения электрической дуги.

3. Методика определения граничных значений для алгоритма переключения сочетаний N_{TR} и N_{PK} на основе анализа относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник напряжения электрической дуги.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтвердивших эффективность применения гармонического состава напряжения дуги для решения задач диагностики стадии плавки шихты и управления электрическим режимом путём перехода с одного сочетания N_{TR} и N_{PK} на другое.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается 1) правомерностью исходных положений и предпосылок; 2) корректным применением математических методов моделирования; 3) соответствием результатов исследования результатам, опубликованным в научной литературе по схожей тематике другими авторами; 4) результатами экспериментальных исследований разработанных алгоритмов управления в промышленных условиях на сверхмощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШПП-125 (ЧерМК, ПАО «Северсталь», г. Череповец) с номинальной мощностью печного трансформатора 85 МВА.

Соответствие паспорту научной специальности. Проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 1,3 паспорта научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение систем изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов энергоэффективного управления).

Апробация результатов диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 международных конференциях, в том числе: 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM) (г. Бохум, Германия, 2015 г.), 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Челябинск, 2016), 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Челябинск, 2017), 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) (г. Санкт-Петербург, 2018), 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Челябинск, 2018), 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, 2019), 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) (г. Санкт –Петербург, 2020), 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Челябинск, 2020), 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (г. Сочи, 2020), 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (г. Магнитогорск, 2020), 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г.Магнитогорск, 2020).

В 2020-2021 годах исследования выполнялись в рамках государственного задания (научный проект №FZRU-2020-0011) по теме «Разработка и исследование алгоритмов энергоэффективного управления электротехническими и технологическими комплексами горно-металлургической отрасли».

Публикации. По содержанию диссертации опубликовано **12** научных трудов, в том числе **7** статей в изданиях, индексируемых Scopus, и **5** статей в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ.

Кроме указанных трудов получено четыре свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Структура диссертации включает в себя введение, пять глав, заключение и список литературы из **80** наименований. Работа изложена на **118** страницах основного текста, содержит **38** рисунков, **14** таблиц и приложения объемом **3** страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено описанию актуальности решаемой проблемы, её научной новизне. Помимо этого, намечены цели и задачи, показана теоретическая и практическая значимость выполненной работы.

В первой главе исходя из анализа опыта эксплуатации ДСП и УКП на различных металлургических предприятиях, а также исходя из требований, предъявляемых к архитектуре энергоэффективной системы управления электрическим режимом, был сформирован перечень критериев, соответствие которым позволяет судить о преимуществах и недостатках той или иной системы. Кроме того, проведён подробный анализ систем управления электрическим режимом ДСП и УКП, представленных на рынке, таких как таких как ARCOS, Simelt (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия), HI-REG, Q-REG (Danieli, Италия), E.M.P.E.R.E, A.R.C.E.L.E.C (Amec Spie, Франция), DECTEQ (Ferrottron, Германия) и DigitArc (AMI, Мексика). Впоследствии для каждой из систем была проведена оценка на предмет соответствия сформированному перечню критериев. Результаты оценки показали, что все системы управления имеют свои сильные и слабые стороны, но при этом для всех обозначенных систем характерен общий недостаток, связанный с отсутствием возможности диагностики стадий плавки в ДСП с целью энергоэффективного управления электрическим режимом в соответствии с критерием, позволяющим судить о реальных технологических процессах, протекающих в ванне печи.

Наличие данного недостатка обусловлено структурой профиля плавки, используемой в современных системах управления электрическим режимом. Так, при использовании системы ARCOS в контроллер АСУ ТП ДСП вводится информация о составе шихты, количестве чугуна и количестве подвалок. На основании этой информации оператор выбирает один из наиболее подходящих существующих профилей плавки. Профиль плавки представляет собой набор таблиц уставок для выбора ступени трансформатора, ступени реактора и рабочей кривой регулятора в зависимости от стадии плавки. Каждой завалке и подвалке соответствует своя таблица. Стадия плавки определяется диапазоном израсходованной электроэнергии на текущую завалку, а таблица – текущей завалкой или подвалкой. Расход электроэнергии вычисляется регулятором ARCOS NT и передаётся в контроллер АСУ ТП ДСП. Таким образом, в системе существует только косвенная обратная связь по расходу электроэнергии. Структура профиля плавки в составе системы управления ARCOS представлена на рис. 1.

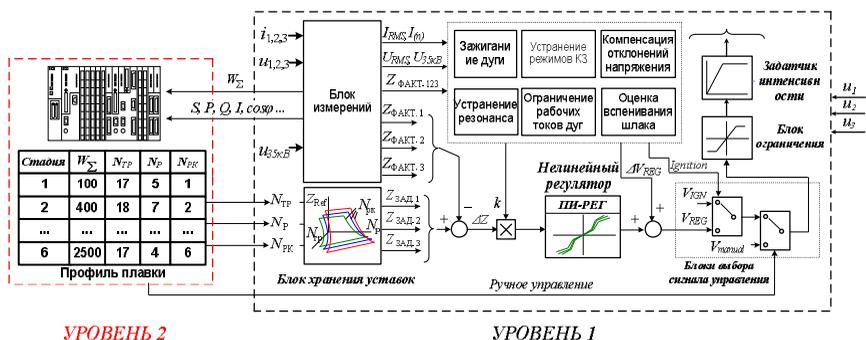


Рис.1. Функциональная схема системы автоматического управления электрическим режимом ДСП ARCOS

Основной недостаток профилей плавки, работающих на обратной связи по $W_{уд}$, заключается в том, что они основаны на количественной оценке завалок, а не на их ка-

чественной оценке. Увеличение количества профилей создаст трудности для оператора, так как будет сложно объективно оценить состав шихты. По многим причинам состав шихты меняется от завалки к завалке, вследствие чего достоверно оценить стадию плавки основываясь лишь на данных о количестве лома и введенной энергии достаточно сложно. Так, для одинакового количества лома по достижении одного и того же граничного значения $W_{уд}$ в случае для мелкого лома может идти стадия плавления, тогда как для крупного, содержащего большие куски либо пакеты – только стадия прожига коллоцев. Соответственно, как бы тщательно не был подобран профиль, есть вероятность задания неоптимальных электрических режимов, которые будут сопровождаться неэффективным использованием электроэнергии. В соответствии с этим актуальной задачей является разработка способов диагностики стадий плавки в ДСП как части энергоэффективной системы управления электрическим режимом, использующих альтернативные электрические и технологические параметры дуговой печи для распознавания условий горения дуг и состояния расплава. Эффективное решение, в основе которого лежит анализ гармонического состава токов дуг, подробно описано в работах Николаева А.А. Тем не менее, данный способ имеет ряд ограничений, связанных с сильной зависимостью гармонического состава тока дуги от колебаний длины дуги и несимметричных режимов. В результате, в качестве альтернативного варианта решения данной проблемы предложено использовать для диагностики стадии плавления шихты анализ гармонического состава напряжения электрической дуги, позволяющий нивелировать упомянутые ограничения.

Во второй главе рассмотрены основные конструктивные особенности дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 (ПАО «Северсталь», г. Череповец) как объекта исследования в составе внутрицеховой системы электроснабжения (рис. 2). Отмечено, что завалка (подвалка) шихты в печь осуществляется через шахту, в которой в качестве конструктивного элемента предусмотрены специальные удерживающие пальцы, что позволяет осуществлять предварительный нагрев лома отводимыми газами высокой температуры, активно образующихся в процессе расплавления основной массы металлошихты в дуговой печи с помощью электрических дуг, а также за счёт работы стеновых и комбинированных РСВ-горелок. При этом загрузка скрапа в печь через шахту производится порционно с помощью завалочной корзины. При этом общий вес шихты варьируется в диапазоне от 135 до 150 т. При шихтовке первой плавки (печь без «болота») масса шихтового материала лежит в диапазоне от 145 до 150 т.

На основе имеющихся исходных данных, была сформирована схема замещения электрического контура печи, состоящая из четырёх основных структурных компонентов: питающей сети, печного трансформатора, участка короткой сети и электрических дуг (рис. 3). По известным методикам был проведён поэтапный расчёт основных параметров схемы замещения. Результаты расчёта показаны в табл.1.

Таблица 1 - Основные параметры печного трансформатора и питающей сети ШП-125

N _{ТР}	Параметры печного трансформатора				Параметры питающей сети	
	R' _{ТР} , МОм	Z' _{ТР} , МОм	X' _{ТР} , МОм	L' _{ТР} , мГн	R' _С , МОм	L' _С , мГн
6	0,0594	1,4464	1,4451	4,600·10 ⁻³	0,0685	2,181·10 ⁻³
7	0,0591	1,4140	1,4128	4,383·10 ⁻³	0,0735	2,339·10 ⁻³
8	0,0582	1,3783	1,3770	4,412·10 ⁻³	0,0792	2,520·10 ⁻³
9	0,0612	1,3875	1,3862	4,423·10 ⁻³	0,0854	2,720·10 ⁻³
10	0,0640	1,3909	1,3894	4,209·10 ⁻³	0,0926	2,947·10 ⁻³

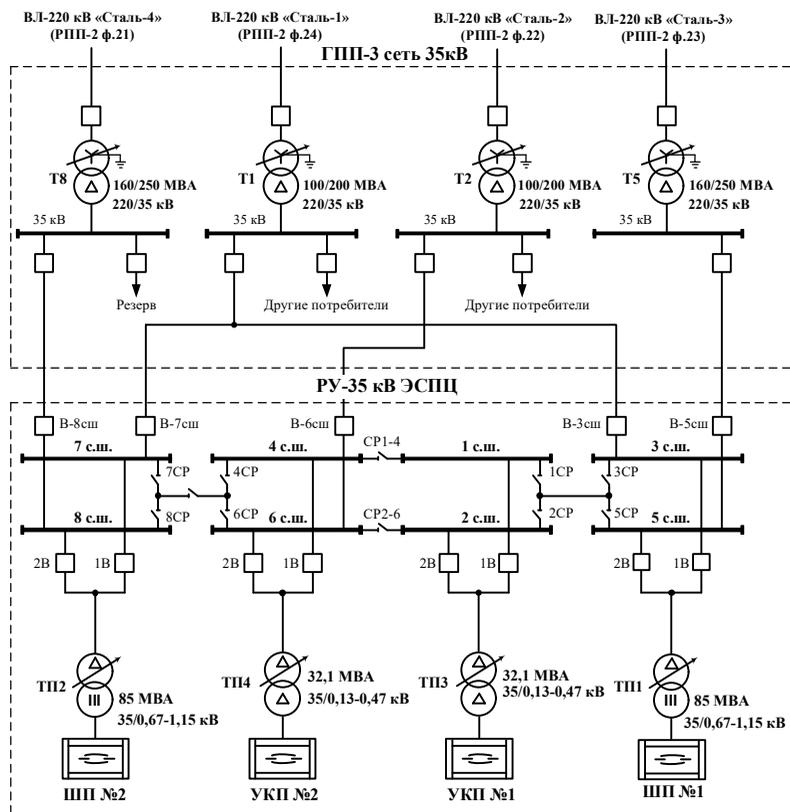


Рис.2. Упрощённая схема электроснабжения ШП-125

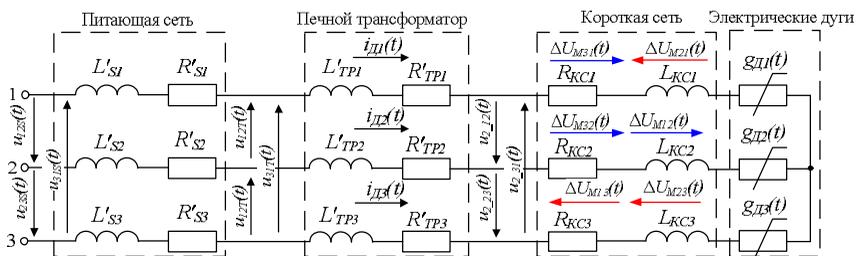


Рис.3. Схема замещения электрического контура ШП-125

Для определения активного и индуктивного сопротивления короткой сети, а также коэффициентов взаимной индуктивности применена методика расчёта, в основе которой лежат результаты экспериментов по двухфазным и трёхфазному короткому замыканию (КЗ), полученные с использованием регистратора электрических сигналов РЭС-3. В процессе измерений осуществлялся контроль взаимного расположения рукавов электродов для получения максимально достоверных результатов расчёта, исклю-

чающих влияние положения консолей в пространстве. Расчёт параметров по данной методике позволил определить активные и индуктивные сопротивления участка короткой сети, а также реактивные сопротивления взаимной индуктивности между фазами (табл.2).

Таблица 2 - Основные параметры участка короткой сети ШП-125

Активное сопротивление Участка короткой сети			Индуктивное сопротивление участка короткой сети			Реактивные сопротивления взаимной индуктивности		
R_{KC1} , МОм	R_{KC2} , МОм	R_{KC3} , МОм	X_{KC1} , МОм	X_{KC2} , МОм	X_{KC3} , МОм	X_{M12} , МОм	X_{M23} , МОм	X_{M13} , МОм
0,382	0,313	0,378	2,881	2,704	2,757	0,445	0,4275	0,0625

Анализ структуры схемы замещения электрического контура, а также результаты расчёта её основных параметров легли в основу разработанной математической модели электрического режима ШП-125. Отличительной особенностью данной математической модели является учёт эффекта переноса мощности и взаимной индуктивности между фазами. Адекватность разработанной модели подтверждается фактом соответствия результатов опытов двухфазных и трёхфазного КЗ, полученных экспериментально, результатам аналогичных опытов, выполненных на математической модели. Кроме того, проведена оценка адекватности с использованием статистических методов. Для $N_{TP}=9$ и $N_{PK}=5$ на начальной стадии плавки $N_{TP}=8$ и $N_{PK}=4$ на конечной стадии плавки с помощью математической модели электрического контура, а также упрощённой математической модели поддержания заданной уставки $Z_{2\phi}$ в соответствии с действующим профилем плавки ШП-125, были получены характеристики $P_{ДЭ}$ ($I_{ДСР}$) с нанесением моделируемых рабочих точек. Далее, на данные характеристики были нанесены массивы фактических рабочих точек, полученные экспериментально, с границами доверительных интервалов по математическому ожиданию для суммарной активной мощности дуг и средних значений токов дуг. Результаты оценки показали, что моделируемая рабочая точка в обоих случаях попадает в доверительный интервал статистической оценки математического ожидания для фактического массива рабочих точек, что наглядно продемонстрировано на рис. 4. Структурная схема непосредственно модели приведена на рис.5.

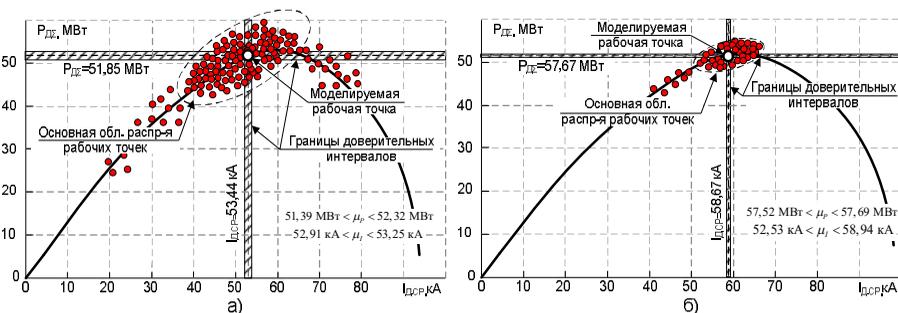


Рис. 4. Характеристика $P_{ДЭ}(I_{ДСР})$ с рабочей точкой, полученная на математической модели, с нанесением фактической области распределения рабочих точек и доверительных интервалов для: а) $N_{TP}=9$ и $N_{PK}=5$ на начальной стадии плавления шихты; б) $N_{TP}=8$ и $N_{PK}=4$ на конечной стадии плавления шихты

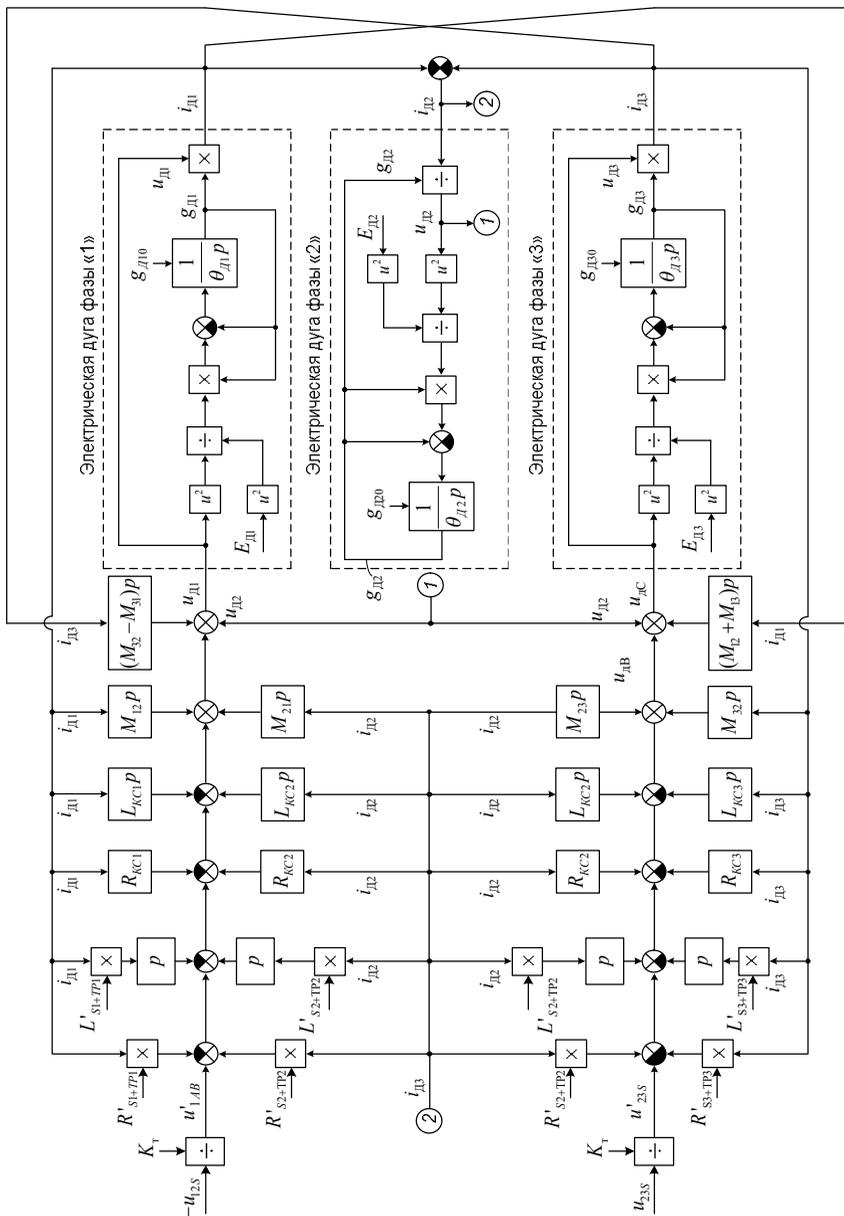


Рис.5. Структурная схема математической модели электрического контура ШП-125

В третьей главе приведено краткое описание способа диагностики стадии плавления шихты с использованием информации о чётных и нечётных гармониках токов дуг, подробно рассмотренного в научных работах Николаева А.А. Данный способ является эффективным и наиболее простым с точки зрения практической реализации, но имеет ряд ограничений в плане применения, связанных с сильной зависимостью гармонического состава тока дуги от колебаний длин дуг и несимметричных режимов. Отмечено, что при использовании анализа гармонического состава напряжений дуг обозначенный недостаток может быть компенсирован, поскольку гармонический состав напряжения дуги в меньшей мере подвержен влиянию колебаний длин дуг и несимметричных режимов по сравнению с гармоническим составом тока дуги. Данное утверждение обосновано как теоретически с применением математической модели, так и экспериментально с использованием реальных осциллограмм, полученных на производственной площадке.

В рамках теоретического обоснования, на математической модели были получены осциллограммы (рис.6-8), отражающие влияния ступенчатого изменения коэффициента вентильного эффекта $K_{ВЭ}$, ступенчатого изменения тепловой постоянной времени дуги $\theta_{Д}$, а также ступенчатого изменения длины дуги в фазе «3» $L_{Д3}$ на величины относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник токов ($I'_{ВГ.ЧЕТ}$ и $I'_{ВГ.НЕЧЕТ}$) и напряжений дуг ($U'_{ВГ.ЧЕТ}$ и $U'_{ВГ.НЕЧЕТ}$). Отметим, что параметры $I'_{ВГ.ЧЕТ}$, $I'_{ВГ.НЕЧЕТ}$, $U'_{ВГ.ЧЕТ}$ и $U'_{ВГ.НЕЧЕТ}$ были рассчитаны с использованием разработанной математической модели. Кроме того, для достижения условий протекания физических процессов, максимально приближенных к реальным, в процессе моделирования была использована вспомогательная модель, формирующая возмущающие воздействия по длине дуги с применением формирующих фильтров.

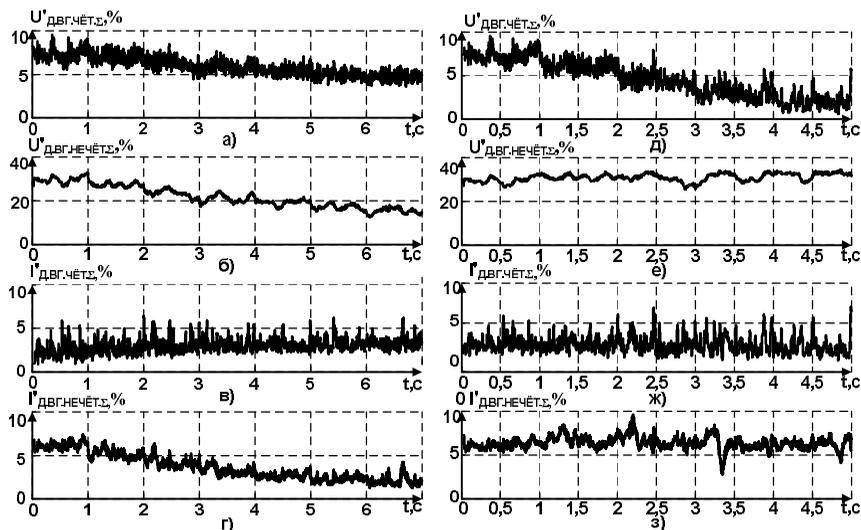


Рис. 6. Осциллограммы средних по 3 фазам относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник: а-г) напряжения дуги и тока дуги при ступенчатом изменении величины $\theta_{Д}$ от 500 мкс до 3500 мкс с приращением 500 мкс/с; д-к) напряжения и тока дуги при ступенчатом изменении величины $K_{ВЭ}$ от 1,2 до 1 с приращением -0,05/с.

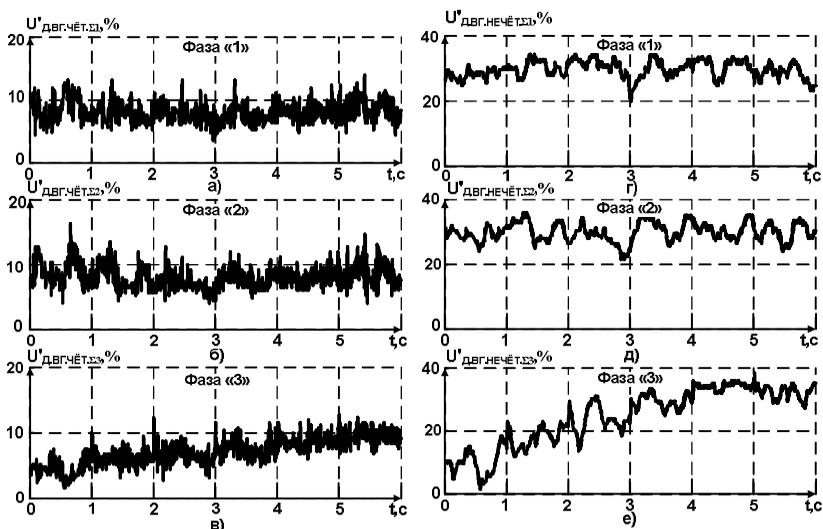


Рис. 7. Осциллограммы относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник напряжения дуги по каждой из 3 фаз для: а, б, в) чётных гармоник; г, д, е) нечётных гармоник при ступенчатом изменении величины длины электрической дуги в фазе «3» от 200 мм до 700 мм с приращением 100 мм/с

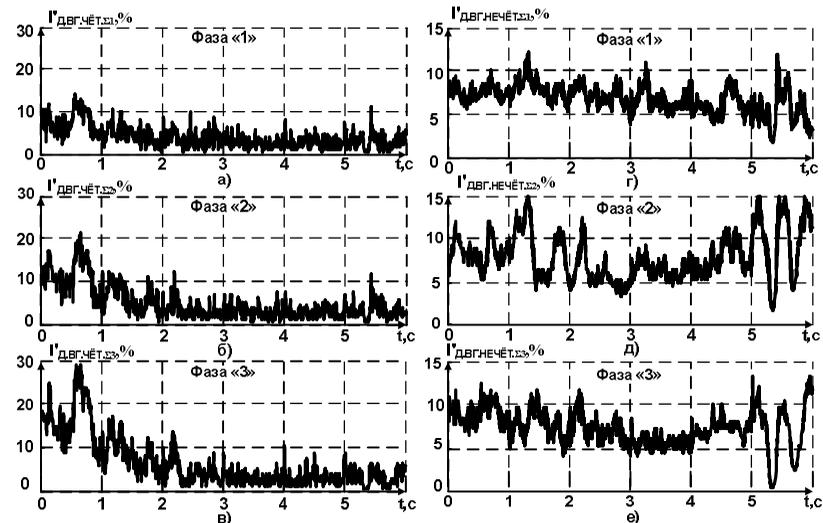


Рис. 8. Осциллограммы относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник напряжения дуги по каждой из 3 фаз для: а, б, в) чётных гармоник; г, д, е) нечётных гармоник при ступенчатом изменении величины длины электрической дуги в фазе «3» от 200 мм до 700 мм с приращением 100 мм/с

Анализ осциллограмм подтвердил, что выводы о тесной связи между уровнем нечётных гармоник тока дуги и тепловой постоянной времени, а также связи между уровнем чётных гармоник тока дуги и величиной коэффициента вентильного эффекта, сделанные в работах Николаева А.А., справедливы и для гармоник напряжения дуги. Ввиду того, что величина $K_{ВЭ}$ изменяется от максимального к минимальному значению по мере полного расплавления твёрдой шихты, а величина тепловой постоянной времени достигает максимальной величины при полном экранировании дуг вспененным шлаком на стадии доводки, для решения задачи диагностики стадии плавления шихты сделан вывод о целесообразности применения анализа чётных гармоник на начальных стадиях плавки, а нечётных гармоник – на поздних стадиях.

В рамках экспериментального обоснования с применением математической модели, позволяющей выполнять расчёт мгновенных значений напряжений дуг $u_{Д1}(t), u_{Д2}(t), u_{Д3}(t)$ на базе сигналов мгновенных значений фазных напряжений $u_{2Ф1}(t), u_{2Ф2}(t), u_{2Ф3}(t)$ и токов дуг $i_{Д1}(t), i_{Д2}(t), i_{Д3}(t)$, полученных с помощью регистратора электрических сигналов РЭС-3, были получены осциллограммы параметров $\Gamma'_{ВГ.ЧЕТ}, \Gamma'_{ВГ.НЕЧЕТ}, U'_{ВГ.ЧЕТ}$ и $U'_{ВГ.НЕЧЕТ}$ на протяжении первых 700 секунд плавки для каждой из трёх фаз. Характерный график для фазы «1» представлен на рис.9. Проведённый с использованием методов математической статистики анализ осциллограмм подтвердил вывод о том, что гармонический состав напряжения дуги в меньшей мере подвержен влиянию колебаний длин дуг и несимметричных режимов, что обуславливает преимущество его применения для диагностики стадии плавки.

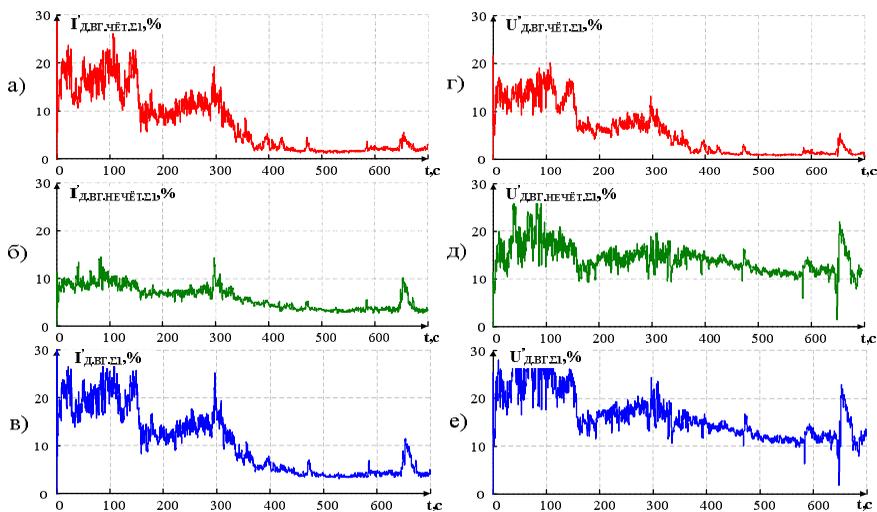


Рис.9. Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и высших гармоник (фильтр скользящей средней, $T_{Ф}=1c$)
 а, б, в – тока электрической дуги; г, д, е – напряжения электрической дуги в фазе «1»

В четвёртой главе разработана функциональная схема системы управления электрическим режимом шахтной печи с использованием информации о гармоническом составе напряжений электрических дуг. Данная схема включает в себя такие структурные компоненты как блок преобразования сигналов с датчиков тока электрической дуги, блок расчёта напряжения электрической дуги на основе мгновенных значений токов электрических дуг и

фазных напряжений. блок ПЛК, в который заложены граничные значения по чётным и нечётным гармоникам напряжения электрической дуги и алгоритм перехода с одного этапа профиля плавки на другой. Блок преобразования сигналов с датчика тока необходим для обеспечения возможности обработки сигналов при различных конфигурациях систем измерения токов дуг (рис.10). Блок расчёта напряжения электрической дуги на основе мгновенных значений токов электрических дуг и фазных напряжений используется в том же виде, что и при выполнении исследований в главе 2. В свою очередь, алгоритм переключения ступеней печного трансформатора и номера рабочей кривой работает на основе анализа чётных гармоник до момента закрытия пальцев, а впоследствии – на основе анализа нечётных гармоник.

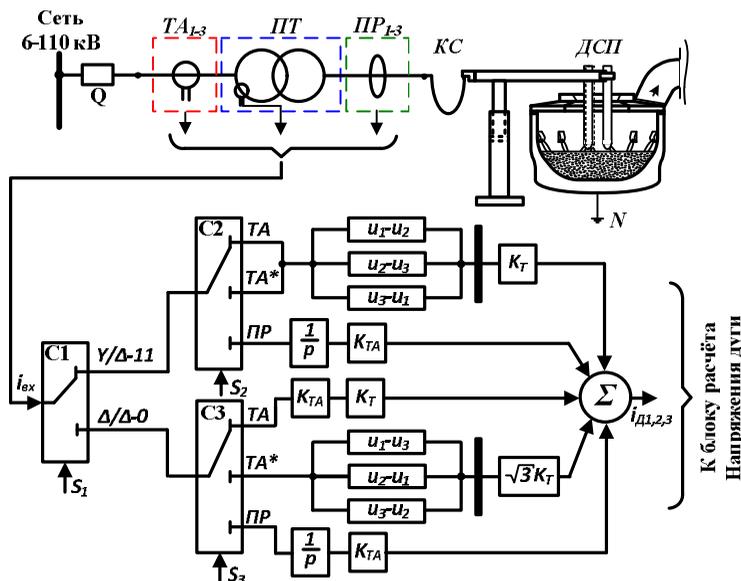


Рис.10. Функциональная схема блока обработки сигналов для различных способов измерения тока дуги

При обработке большой выборки плавков с помощью разработанной методики определены граничные значения в 7,5% и 1,5% для управления по чётным гармоникам напряжения электрической дуги на начальной стадии плавления шихты. Аналогичные значения в 10% и 7,5% определены для регулирования по нечётным гармоникам напряжений дуг на конечной стадии плавления. Основным критерием при определении граничных значений по чётным гармоникам стал выход сигнала тока электрической дуги на участок со средней амплитудой колебаний (для диагностики завершения промежуточной стадии активного проплавления шихты) и на участок с минимальной амплитудой колебаний (для диагностики момента полного перехода к жидкой фазе). Для нечётных гармоник граничные значения определялись в соответствии с режимами продувки кислородом (минимальный, средний и максимальный расход). Данный алгоритм позволяет осуществлять переключения сочетаний $N_{Тр}$ и $N_{Рк}$ в соответствии с реальными технологическими процессами, протекающими в ванне печи, тем самым предотвращая несвоевременные переключения. В рамках разработанного алгоритма предусмотрена дополнительная функция, направленная на предотвращение

несвоевременного перехода на повышенную ступень печного трансформатора на начальной стадии плавления шихты. Также реализован альтернативный способ управления электрическим режимом на поздней стадии плавления шихты, в основе которого лежит анализ текущего значения относительного действующего значения нечётных гармоник напряжений электрических дуг с переключением между режимами с короткими, средними и длинными дугами. Блок-схема нового алгоритма приведена на рис. 11, а функциональная схема новой системы управления – на рис. 12.

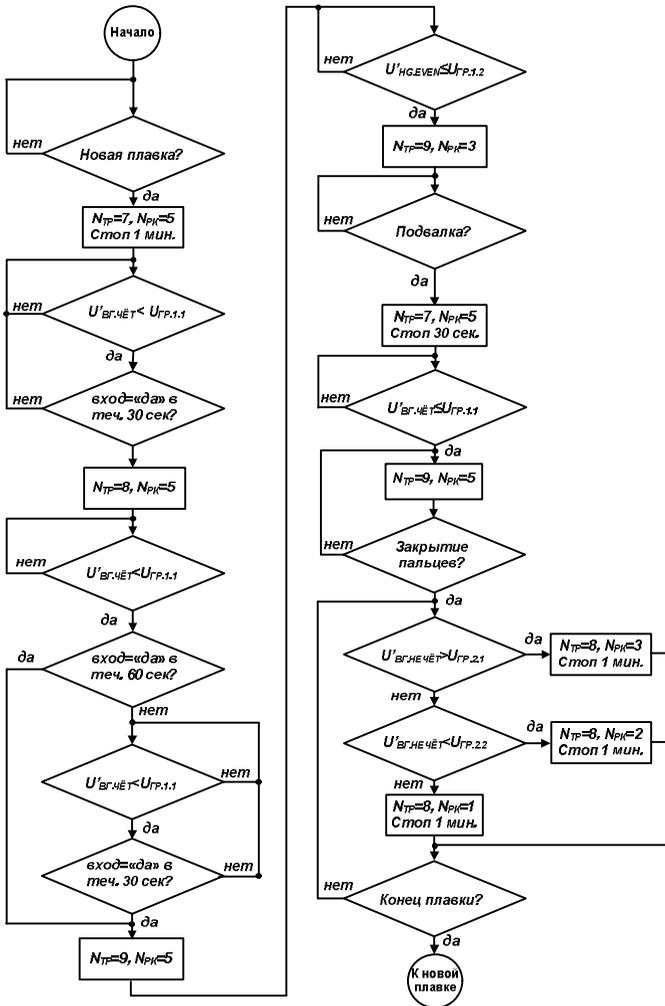


Рис. 11. Блок-схема алгоритма функционирования новой системы управления электрическим режимом ШП-125 с применением анализа гармонического состава напряжения дуги

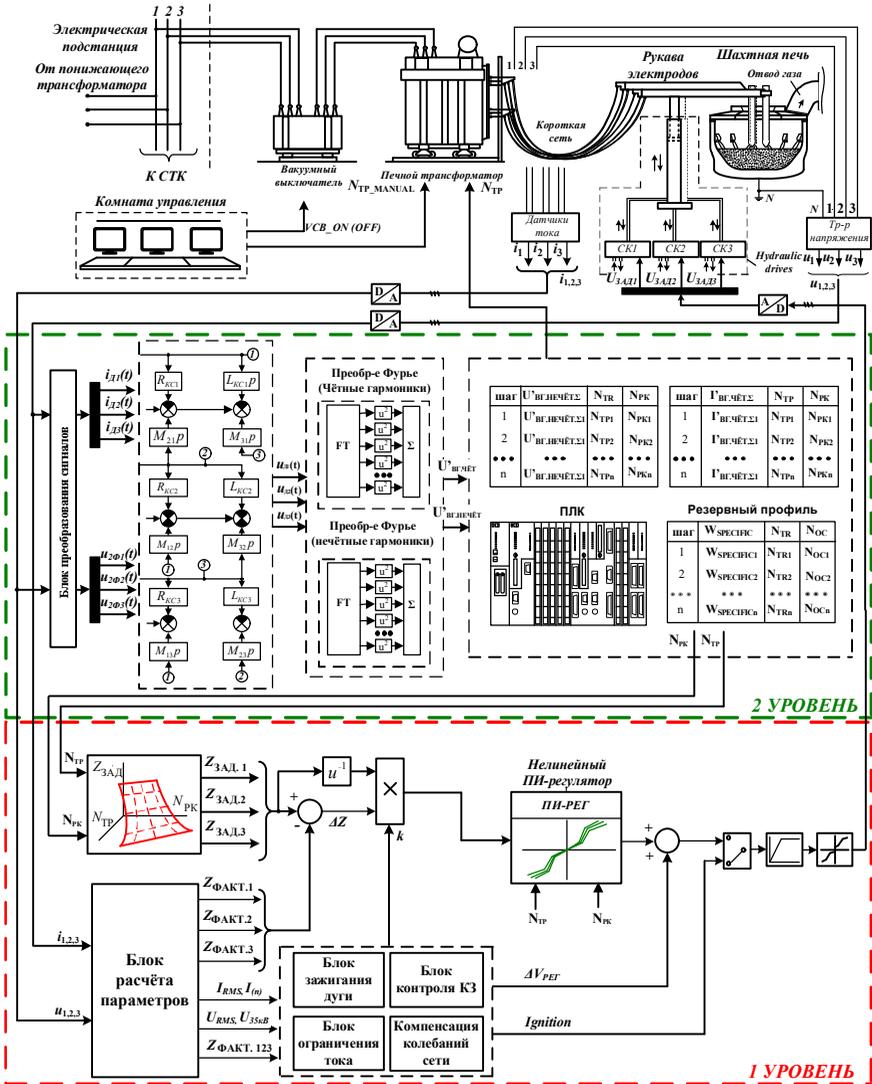


Рис.12. Функциональная схема системы управления электрическим режимом ШП-125 с использованием информации о гармоническом составе сигнала напряжения электрической дуги

В пятой главе приведены осциллограммы, полученные после внедрения новой системы управления на действующем оборудовании ШП-125, с нанесением точек переключения сочетаний $N_{ТР}$ и $N_{РК}$ при работе старого и нового алгоритмов (рис. 13). Также приведена оценка экономического эффекта от внедрения новой системы управления электрическим режимом с использованием анализа гармонического состава напряжения электрической дуги

ШП-125. Результаты оценки показали, что дополнительный экономический эффект от внедрённых мероприятий составит более 16 млн. руб. при подтверждённой величине технического эффекта в виде сокращения удельного расхода электроэнергии на 1,75%. Обоснована возможность применения разработанной системы на печах различной мощности и класса. Данная система является универсальной, поскольку взаимосвязь между стадией плавления шихты и гармоническим составом напряжения дуги обусловлена физическими свойствами дугового разряда в составе, процесс горения которого схож для всех печных агрегатов.

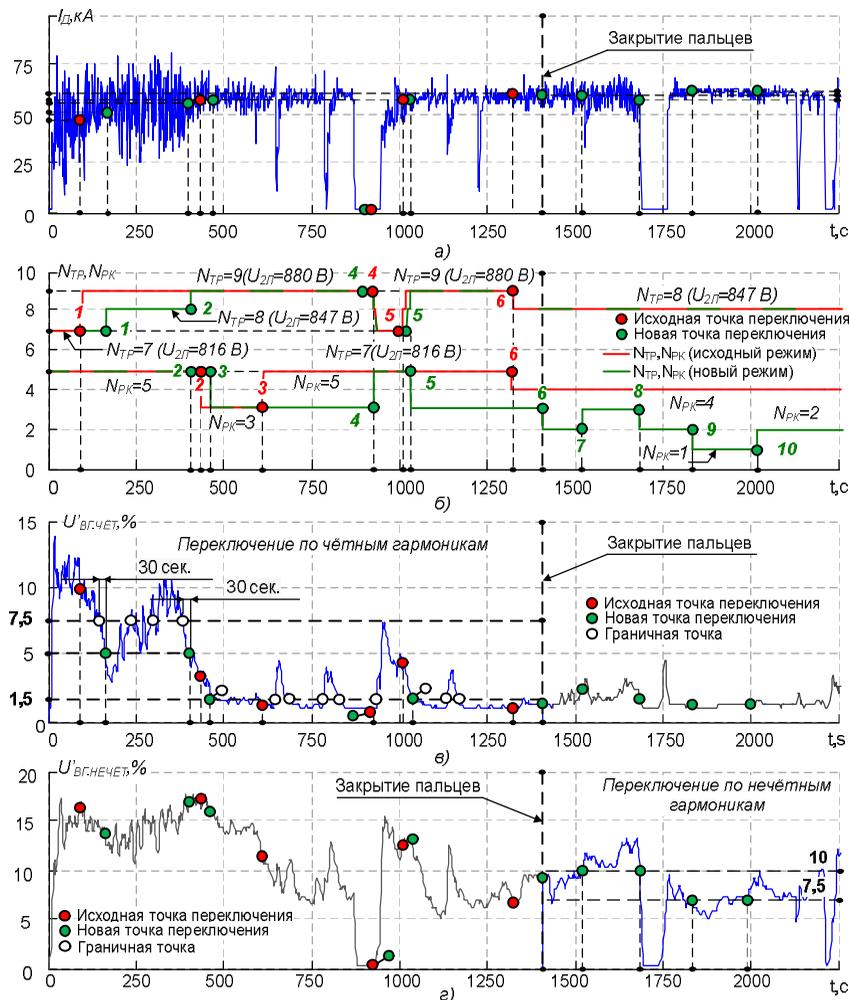


Рис.13. Осциллограммы сигналов: а) среднего значения сигнала тока электрической дуги I_d ; б) переключения ступени печного трансформатора N_{TP} и номера рабочей кривой N_{PK} для существующей и новой системы; в) относительного действующего значения чётных гармоник напряжения дуги $U'_{vg,chet}$, г) относительного действующего значения нечётных гармоник напряжения дуги $U'_{vg,nechet}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Выполнен анализ наиболее распространённых систем управления электрическим режимом ДСП и УКП. Установлено, что ни одна из рассмотренных систем не обеспечивает возможности управления процессом переключения ступени печного трансформатора N_{TP} , ступени реактора N_P и номера рабочей кривой N_{PK} в соответствии с параметром, позволяющим судить о реальных технологических процессах в рабочем объеме печи. Данный недостаток связан с тем, что во всех существующих системах переход с одного сочетания N_{TP} , N_P и N_{PK} на другое осуществляется по достижению определённых граничных значений удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$, который не является показательным. В связи с этим, предложено использовать новую систему диагностики стадии плавки с применением информации о гармоническом составе напряжения дуги.

2. С использованием разработанной математической модели электрического контура ШП-125, а также модели для расчёта относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник тока и напряжения дуги, было проведено теоретическое обоснование эффективности применения анализа уровня чётных и нечётных гармоник напряжения дуги для диагностики стадии плавки с целью энергоэффективного управления электрическим режимом. Доказано, что гармонический состав напряжения дуги более стабилен и в меньшей степени подвержен влиянию колебаний длин дуг и несимметричных режимов по сравнению с гармоническим составом тока дуги. Обоснована эффективность применения анализа чётных гармоник на начальных стадиях плавки, а нечётных - на конечных стадиях.

3. Эффективность применения анализа уровня чётных и нечётных гармоник напряжения дуги для диагностики стадии плавки с целью энергоэффективного управления электрическим режимом также доказана на базе экспериментальных данных с применением математической модели, позволяющей рассчитывать мгновенные значения напряжений дуг на основе экспериментальных сигналов мгновенных значений фазных напряжений и токов дуг. Также экспериментально подтверждены закономерности, обуславливающие эффективность применения анализа чётных гармоник на начальных стадиях плавки, а нечётных - на конечных стадиях.

4. Разработана и внедрена на базе ШП-125 система диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам напряжений дуг. В составе системы используется алгоритм, обеспечивающий переключение сочетаний N_{TP} , N_P и N_{PK} на основе анализа чётных гармоник до момента закрытия пальцев, а нечётных гармоник – после закрытия пальцев. Новый алгоритм является более эффективным по сравнению с действующим, поскольку его использование предотвращает несвоевременные переключения на начальных стадиях плавки, а также обеспечивает адаптацию электрического режима к интенсивности продувки расплава путём переключения между режимами с короткими, средними и длинными дугами на поздних стадиях. Внедрение новой системы в действующее производство обеспечило технический эффект в виде снижения удельного расхода электроэнергии на 1,75%, что подтверждается актом внедрения.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Николаев, А.А. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, В.С. Ивекеев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, №3. – С. 52-64.
2. Николаев, А.А. Усовершенствованный способ определения параметров электрического контура электродуговой сталеплавильной печи на основе экспериментальных данных / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18, №3. – С. 58-68.
3. Николаев, А.А. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа/ А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, Е.Я. Омельченко // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – №4 (41). – С. 63-72.

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

5. Николаев, А.А. Разработка универсальных алгоритмов обработки токовых сигналов для усовершенствованной системы управления электродуговой печи / А.А. Николаев, **П.Г. Тулунов**, В. С. Ивекеев // Вестник Магнитогорского государственного университета им. Г. И. Носова. – 2021. – Т. 19, № 2. – С. 112-121.

Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus

6. Nikolaev, A.A. Development and Research of Improved Control Algorithms for Electric Modes of a Shaft-type Electric Arc Furnace / A.A. Nikolaev, **P.G. Tulupov**, I.A. Lozhkin // Proceedings of the 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI 2020). – Magnitogorsk, Russia. – 25-26 Sep. 2020. – pp.1-6.

7. Nikolaev, A.A. Assessing the feasibility of electrical mode control of ultra-high power arc steel-making furnace based on data about harmonic composition of arc currents and voltages. / A.A. Nikolaev, **P.G. Tulupov**, A.V. Anufriev // Research and Education in Mechatronics (REM). 16th International Conference. – 2015. – pp. 301-308.

8. Nikolaev, A.A. Heating stage diagnostics of the electric arc furnace based on the data about harmonic composition of the arc voltage/ A.A. Nikolaev, **P.G. Tulupov**, L.I. Antropova // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElCon-Rus 2018. – 2018. – pp. 742-747.

9. Nikolaev, A.A. Analysis of the electric arc voltage harmonic composition with experimental data about mutual inductances of high-current system of arc furnace / A.A. Nikolaev, **P.G. Tulupov**, L.I. Antropova // Proceedings 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). – 2019. – pp. 24-29.

10. Nikolaev, A. A. Comparative Analysis of Modern Electric Control Systems of Electric Arc Furnaces / A. A. Nikolaev, **P. G. Tulupov**, V. S. Ivekeev // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2020. – pp. 464-468.

11. Nikolaev, A.A. Method of Switching Point Determination for Control System of Electric Arc Furnace Based on Data about Harmonics of Arc Currents and Voltages / A.A. Nikolaev, **P.G. Tulupov**, E.B. Agapitov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2020. – pp. 1-5

12. Nikolaev, A. A. Experimental Studies of Operating Modes of Electric Arc Furnaces of Various Capacity and Class at the Existing Metallurgical Plants / A.A. Nikolaev, **P.G. Tulupov** // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2020. – pp. 926-930.

Программы для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661460. Программа для определения параметров электрического контура электродуговой печи на основании экспериментальных осциллограмм напряжений и токов / А.А. Николаев, **П.Г. Тулунов**, А.С. Денисевич, В.С. Ивекеев, Р.Р. Дема, И.А. Гришин; №2020660637; заявл. 18.09.2020; опубл. 24.09.2020. Бюл.№10. – 1 с. (22000 кб).

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612008 Программа анализа гармонического состава напряжений и токов дуг электродуговой печи/ А.А. Николаев, П.Г. Тулунов, № 2019610868; опубл. 07.02.2019. 1113 Кб.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661816 Программа для исследования динамических режимов систем автоматического управления гидроприводами перемещения электродов электродуговых печей/ А.А. Николаев, **П.Г. Тулунов**, М.В. Буланов, И.А. Ложкин № 020660836; заявл. 24.09.2020; опубл. 01.10.2020. 66 Кб.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661845 Программа для анализа графиков электрических нагрузок электродуговых печей на основании экспериментальных данных. А.А. Николаев, **П.Г. Тулунов**, М.В. Буланов, К.А. Шахбиева № 2020660870; заявл. 23.09.2020; опубл. 01.10.2020. 48 Кб